

**УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ  
ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКИ ФАКУЛТЕТ**

Богдан Р. Марковић

**Нов алгоритам за обраду и естимацију  
позиције рефлексије ласерске линије код  
профилних скенера на наменској  
платформи**

Докторска дисертација

Београд, 2023.

**UNIVERSITY OF BELGRADE  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING**

Bogdan R. Marković

**A new algorithm for processing and  
estimation of the laser reflection position on  
profile scanners by using embedded platform**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2023.

## **Комисија за преглед и оцену дисертације**

### **Ментори:**

Проф. др Јелена Ђертић

Универзитет у Београду, Електротехнички факултет

### **Чланови комисије:**

Проф. др Зоран Чича

Универзитет у Београду, Електротехнички факултет

Проф. др Ненад Јовичић

Универзитет у Београду, Електротехнички факултет

Проф. др Дејан Ђирић

Универзитет у Нишу, Електронски факултет

Доцент др Милош Бјелић

Универзитет у Београду, Електротехнички факултет

Доцент др Ана Гавровска

Универзитет у Београду, Електротехнички факултет

Датум одбране: \_\_\_\_\_

## **Захвалница**

Захвалио бих се менторки, проф. др Јелени Ћертић, на сјајној сарадњи током докторских студија и без које ова теза не би угледала светлост дана. Захвалио бих се и свим колегама са којима сам радио и који су током година несебично делили знање и сјајне инжењерске идеје.

Захвалио бих се породици на бескрајној подршци и разумевању.



Подаци о докторској дисертацији

**Наслов дисертације:**

Нов алгоритам за обраду и естимацију позиције рефлексије ласерске линије код профилних скенера на наменској платформи

**Резиме:**

Модерни профилни ласерски скенери засновани на принципу триангулације раде брзу обраду сигнала са дигиталне индустријске камере у реалном времену и на тај начин добијају информацију о удаљености до мерног објекта. Циљ дигиталне обраде сигнала је естимација позиције центра рефлектоване ласерске линије чији профил интензитета прати Гаусову расподелу криве. Главне компоненте система су ласер, као предајник информације, скенирани објекат са својим рефлексивним карактеристикама и брза индустријска камера која представља пријемник информације о удаљености мерног објекта. Карактеристике ове три компоненте утичу на квалитет реконструкције. Поред осталих делова система, од пресудног значаја за квалитетно скенирање објекта је алгоритам за детекцију центра ласерске рефлексије са резолуцијом испод величине пиксела камере.

Традиционални алгоритми дају лоше резултате када је SNR (*Signal to Noise Ratio*) однос мали или када су пиксели који одговарају рефлексији засићени. У том случају информација о врху рефлексије је изгубљена и квалитет реконструкције опада. Претпроцесирање података има кључну улогу у смањењу ефеката шума, али и других нежељених ефеката индустријског окружења у којем скенери раде. Због велике количине података које долазе са индустријске камере, алгоритми за претпроцесирање морају бити брзи и са друге стране једноставни за имплементацију на наменским платформама за обраду сигнала. У овом раду дат је алгоритам који побољшава тачност естимације позиције ласерске рефлексије користећи аутоконволуцију сигнала линије слике. Предложени алгоритам је имплементиран на наменској FPGA (*Field Programmable Gate Array*) платформи и експериментално потврђен у реалним условима рада. Резултати тестирања показују да се употребом аутоконволуције као алгоритма за претпроцесирање линије слике у комбинацији са алгоритмом центра масе, смањује грешка естимације за више од величине пиксела камере, када је ласерска линија сатурисана.

**Кључне речи:** естимација позиције ласерске рефлексије, профилни скенер, имплементација на наменском систему, обрада сигнала у реалном времену, обрада слике, аутоконволуција, центар масе, 2D/3D скенирање

**Научна област:** Електротехника и рачунарство

**Ужа научна област:** Телекомуникације

**УДК:** 621.3

## Information about doctoral dissertation

### **Dissertation Title:**

A new algorithm for processing and estimation of the laser reflection position on profile scanners by using embedded platform

### **Abstract:**

Modern profile laser scanners based on the principle of triangulation perform fast signal processing from a digital industrial camera in real-time and thus obtain information about the distance to the measuring object. The goal of digital signal processing is to estimate the position of the center of the reflected laser line whose intensity profile follows the Gaussian distribution curve. The main components of the system are the laser, as an information transmitter, the scanned object with its reflective characteristics, and a fast industrial camera that represents the receiver of information about the distance of the measuring object. The characteristics of these three components affect the quality of the reconstruction. In addition to other parts of the system, the algorithm for detecting the center of the laser reflection with a resolution below the size of the camera pixel is crucial for quality scanning of the object.

Traditional algorithms give poor results when the SNR (*Signal to Noise Ratio*) ratio is low or when pixels that correspond to reflection are saturated. In this case, information about the peak of reflection is lost and the quality of reconstruction decreases. Data preprocessing plays a crucial role in reducing noise effects, as well as other unwanted effects of the industrial environment in which scanners operate. Due to the large amount of data coming from the industrial camera, preprocessing algorithms must be fast and, on the other hand, simple to implement on dedicated signal processing platforms. This paper presents an algorithm that improves the accuracy of the estimation of the position of the laser reflection by using autocorrelation of the signal of the image line. The proposed algorithm is implemented on a dedicated FPGA (*Field Programmable Gate Array*) platform and experimentally confirmed in real operating conditions. The results of the algorithm testing show that the use of autocorrelation as an image line preprocessing algorithm in combination with the center of mass algorithm reduces the estimation error by more than the size of one pixel when the laser line is saturated.

**Keywords:** estimation of the laser stripe reflection, profile scanners, embedded systems, real time signal processing, image processing, autoconvolution, center of gravity algorithm, 2D/3D scanning.

**Scientific field:** Electrical Engineering

**Specific scientific field:** Telecommunications

**UDC:** 621.3

## Садржај

1. Увод.....	1
1.1. Преглед дисертације .....	7
2. Профилни ласерски скенери базирани на принципу триангулације .....	8
2.1. Ласерски модул и профил ласерске светлости.....	8
2.2. Карактеристике површине која се скенира и рефлексција ласерске линије .....	12
2.3. Оптички систем и дигитални сензор камере код профилних скенера.....	16
2.3.1. Оптички систем.....	16
2.3.2. Дигитални сензор камере .....	17
2.3.3. Калибрација камере, екстринзични и интринзични параметри система.....	19
2.4. Извори и типови шума који се јављају у систему профилног ласерског скенера .....	23
2.5. Триангулација.....	29
3. Наменски системи за обраду сигнала у реалном времену .....	37
4. Преглед постојећих алгоритама за естимацију ласерске рефлексције .....	42
4.1. Једнодимензионални алгоритми за детекцију центра ласерске рефлексције.....	42
4.1.1. Гаусова апроксимација.....	44
4.1.2. Центар масе .....	47
4.1.3. Линеарна интерполација .....	49
4.1.4. Естиматор параболе .....	50
4.1.5. <i>Blais</i> и <i>Rioux</i> (БР) полином .....	52
4.2. Анализа максималне грешке једнодимензионалних алгоритама и њихова имплементација .....	53
4.3. FIR филтар .....	57
4.4. Повећање резолуције слике (интерполација слике).....	58
4.5. Дводимензионални алгоритми за естимацију центра рефлексције ласерске линије.....	59
4.5.1. <i>Hough</i> трансформација у примени естимације ласерске позиције.....	60
4.5.2. Дводимензионални алгоритам центра масе .....	62
4.5.3. <i>Steger</i> алгоритам.....	65
4.6. Детекција ласерске линије употребом континуалне таласне трансформације .....	69

4.7. Момент функције .....	71
4.8. Комбинација више алгорита за детекцију ласерске рефлексije .....	72
4.9. Примена машинског учења у детекцији центра рефлексije ласерске линије .....	74
4.10. Изводљивост имплементације идеја за обраду сигнала на профилним скенерима.....	77
5. Примена аутоконволуције у естимацији позиције рефлексije ласерске линије .....	78
6. Симулације .....	82
6.1. Симулација ласерске рефлексije и естимације њене позиције .....	84
6.2. Естимација грешке рачунања аутоконволуције услед квантизације вредности пиксела .....	91
7. Имплементација алгорита аутоконволуције на наменском систему.....	96
7.1. Преглед обраде сигнала у наменском систему профилног скенера.....	96
7.2. Имплементација аутоконволуције.....	102
7.3. Пут процесирања сигнала.....	104
8. Тестирање алгорита у реалним условима рада.....	108
9. Закључак .....	116
Литература.....	119
Прилог А.....	131

## Листа слика које се налазе у раду

Слика 1. Преглед метода за скенирање профила, растојања и 2D или 3D реконструкцију [6]	2
Слика 2. (a) Leica Scan Station P40 / P30 (б) Wenglor MEL MLWL221 2D/3D Profile Sensor (ц) Wenglor ShapeDrive MLBS103 3D Sensor (д) Creaform HandySCAN 300.....	3
Слика 3. Примери употребе профилних скенера .....	5
Слика 4. Поједностављен принцип рада ласерске диоде .....	9
Слика 5. Различити профили ласерске линије, за различите врсте сочива. (a) Пример када је велика густина снаге на месту фокуса, али се ширина ласерске линије нагло повећава. (б) мања густина снаге и ширира линија, али са проширеном дубином фокуса. [17] .....	10
Слика 6. Илустрација основних радиометријских параметара.....	13
Слика 7. Различити типови рефлексивних површина. (a) Идеална рефлексивна површина (б) Ламбертиан (ц) Транспарентна површина.....	14
Слика 8. Проблеми који настају са ивицама скенираних објеката у системима са профилним сензорима. (a) проблем "сенке" (б) додатне рефлексивне (ц) мртва зона скенирања (означена на слици црном бојом) .....	15
Слика 9. (a) CMOS AMS CMV4000 сензор; (б) индустријска камера Flir Blackfly S у коју је уграђен Sony IMX 287 CMOS сензор.....	18
Слика 10. Pinhole модел камере са параметрима калибрације.....	20
Слика 11. Врсте радијалних геометријских аберација. (a) негативна радијална аберација (б) слика без геометријске аберације (ц) позитивна радијална аберација.....	22
Слика 12. Илустрација узрока тангенцијалних дисторзија.....	22
Слика 13. Шум ласерске мрље на слици са камере профилног ласерског скенера. ....	24
Слика 14. FPN шум CMOS камере. На слици се јасно могу уочити вертикалне линије које представљају FPN шум. ....	25
Слика 15. (a) Пример слике у пуној резолуцији на којима се види изражен проблем лажне рефлексивне, сатурирана рефлексивна и шум ласерске мрље. (б) једна линија слике на којој је приказана ласерска рефлексивна (ц) једна линија слике, околина детектоване рефлексивне. ....	26

Слика 16. Тродимензионални приказ претходне слике на којој се види проблем лажне рефлексије. ....	27
Слика 17. Пример слике у пуној резолуцији на којој се види мали интензитет ласерске рефлексије услед недовољне снаге ласера или времена експозиције (SNR однос) (а) слика са профилног скенера, (б) једна линија слике означена црвеном линијом на слици (а). (ц) врх ласерске рефлексије. ....	27
Слика 18. Тродимензионални приказ ласерске рефлексије када интензитет пиксела није довољан .....	28
Слика 19. Пример слике на којој се види ласерска рефлексија са сачуваним Гаусовим профилном. ....	28
Слика 20. Тродимензионални приказ детектоване ласерске линије када она има Гаусов профил .....	29
Слика 21. Процес триангулације за непознату тачку у 3D простору. [49] .....	30
Слика 22. Илустрација грешке триангулације услед несавршености ласерске линије .....	33
Слика 23. Минимално и максимално радно растојање профилног скенера .....	33
Слика 24. Одабирање у просторном и фреквенцијском домену: (а) Профил интензитета $f(s)$ , (б) Фуријеова трансформација $F(s)$ профила интензитета. (ц) Функција одабирања $s(s)$ . (д) Фуријеова трансформација $S(s)$ функције одабирања. (е) Дискретне вредности профила $g(s)$ . (ф) Фуријеова трансформација $g(s)$ , $G(s)=F(s)\otimes S(s)$ . ....	36
Слика 25. Функција вредности информације за различите типове система који раде у реалном времену .....	37
Слика 26. Блок дијаграм типичног индустријског система који користи ласерске скенере. 41	
Слика 27. Правац претраге ласерске линије за једнодимензионалне алгоритме. (а) пример слике са профилног скенера. (б) Профил ласерске рефлексије (ц) пример слике (д) изглед профила ласерске рефлексије. ....	43
Слика 28. Пример естимације позиције ласерске рефлексије применом Гаусове апроксимације. ....	45
Слика 29. Пример естимације позиције ласерске рефлексије применом алгоритма центра масе. ....	48
Слика 30. Пример естимације позиције ласерске рефлексије применом линеарне интерполације .....	50
Слика 31. Пример естимације позиције ласерске рефлексије применом параболичне интерполације .....	51
Слика 32. Пример естимације позиције ласерске рефлексије применом БР4 детектора линеарне интерполације .....	53
Слика 33. Грешка естимације позиције за различите алгоритме естимације позиције рефлексије (ЦМ 3, ЦМ 5, ЦМ 7, параболични и линеарни естиматор, Blais и Rioux естиматор 4, Blais и Rioux естиматор 8 и Гаусова апроксимација) .....	54
Слика 34. RMS вредност грешке естимације за $= 50\text{dB}$ (ЦМ 3, ЦМ 5, ЦМ 7, параболични и линеарни естиматор, Blais и Rioux естиматор 4, Blais и Rioux естиматор 8 и Гаусова апроксимација) .....	55
Слика 35. RMS вредност грешке естимације за $\text{SNR} = 30\text{ dB}$ (ЦМ 3, ЦМ 5, ЦМ 7, параболични и линеарни естиматор, БР 4, БР 8 и Гаусова апроксимација) .....	55

Слика 36. Разлике у естимираним позицијама врха ласерске рефлексije за различите алгоритме. ....	56
Слика 37. (а) Оригинална слика са камере ласерског скенера. (б) Сапу филтер оригиналне слике (ц) Hough трансформација слике. (д) Резултат детекције линија оригиналне слике... 62	62
Слика 38. Параметри имплементације дводимензионалног алгоритма центра масе примењеног за детекцију центра ласерске линије. Прилагођено из рада [98] .....	63
Слика 39. Пример примене таласне трансформације у детекцији ласерске линије. (а) пример линије слике са ласерском рефлексijом са камере профилног скенера. (б) таласни облик Ricker таласне функције (ц) пример континуалне таласне трансформације за различите вредности с параметра (1:64). ....	70
Слика 40. Профил ласерске рефлексije када се користи момент функције за естимацију позиције. ....	72
Слика 41. Блок дијаграм конволуционе неуралне мреже са више конволуционих слојева ....	75
Слика 42. (а) Нефилтрирана слика са камере заједно са детектованим центром ласерске рефлексije означеним црвеном бојом; (б) линија слике са означеним тачкама које су коришћене за алгоритам центра масе (ц) иста слика филтрирана са аутоконволуционим филтром дужине $N = 11$ ; (д) линија филтриране слике, са означеним тачкама које су коришћене за алгоритам центра масе .....	81
Слика 43. Дијаграм тока развоја алгоритма, његове имплементације и тестирања у реалним условима рада .....	83
Слика 44. (а) Слика моделована са линијама дефинисаним правоугаоном функцијом, (б) Слика моделована линијама дефинисаним параболничном функцијом, (ц) Слика моделована линијама дефинисаним Гаусовом функцијом. У сва три случаја коришћена је иста ширина линије $w$ . ....	85
Слика 45. (а) Пример слике добијене симулацијом, при чему је црвеном бојом означена једна линија слике дата на слици поред; (б) приказ једне линије слике добијене симулацијом упоредо са линијом слике добијене са камере профилног скенера. ....	86
Слика 46. Импулсни одзив Гаусовог прилагођеног филтра дужине $N=11$ одбирака .....	87
Слика 47. Стандардна девијација грешке естимације позиције ласерске рефлексije за различите алгоритме филтрирања у комбинацији са алгоритмом центра масе, када је ширина аутоконволуционог филтра 9, а $SNR = 9 \text{ dB}$ .....	89
Слика 48. Стандардна девијација грешке естимације позиције ласерске рефлексije за различите ширине прозора аутоконволуције, када је $SNR = 9 \text{ dB}$ .....	90
Слика 49. Стандардна дев. грешке естимације позиције за различит број бита квантизације рачунања аутоконволуције у зависности од ширине рефлексije за $SNR = 9 \text{ dB}$ и ширину прозора аутоконволуције $N=9$ . ....	90
Слика 50. Средња вредност грешке рачунања аутоконволуције за различите дужине квантизације пиксела у зависности од ширине ласерске рефлексije, када се користи квантизација бита одсецањем .....	92
Слика 51. Стандардна девијација грешке рачунања аутоконволуције за различите дужине квантизације пиксела у зависности од ширине ласерске рефлексije, када се користи квантизација бита одсецањем .....	93

Слика 52. Средња вредност грешке рачунања аутоконволуције за различите дужине квантизације пиксела у зависности од ширине ласерске рефлексије, када се користи квантизација бита заокруживањем.....	93
Слика 53. Стандардна девијација грешке рачунања аутоконволуције за различите дужине квантизације пиксела у зависности од ширине ласерске рефлексије, када се користи квантизација бита заокруживањем.....	94
Слика 54. Стандардна девијација грешке естимације позиције ласерске рефлексије за различите ширине рефлексије, изражене у величини пиксела, када је SNR однос 15 dB, ширина аутоконволуције 5 и дужином од 3 бита по пикселу.....	94
Слика 55. Стандардна девијација грешке естимације позиције ласерске рефлексије за различите ширине рефлексије, изражене у величини пиксела, када је SNR однос 15 dB, ширина аутоконволуције 5 и дужином од 2 бита по пикселу.....	95
Слика 56. Преглед главних блокова који се налазе унутар Xilinx Zynq UltraScale+ SoC.....	99
Слика 57. Блок дијаграм главних модула који врше обраду података и синхронизацију рада периферија.....	101
Слика 58. Имплементација једног аутоконволуционог блока на наменској FPGA платформи.....	103
Слика 59. Пут процесирања података од пријема слике са камере па до слања података у DDR меморију.....	105
Слика 60. Тест окружење на којем су приказани (1) тест објекат, (2) ласерска линија, (3) индустријска камера која се налази унутар профилног скенера, (4) покретна платформа, (5) и (6) каблови за напајање, комуникацију и синхронизацију.....	109
Слика 61. Тест објекат за мерење.....	109
Слика 62. Тест објекат за мерење.....	110
Слика 63. (а) облик рефлектоване ласерске линије у зависности од времена експозиције, (б) ширина ласерске рефлексије дата у броју пиксела у односу на време експозиције.....	110
Слика 64. Ширина детектоване ласерске линије у зависности од промене времена експозиције камере.....	111
Слика 65. Варијанса естимиране позиције ласерске линије у зависности од промене времена експозиције камере.....	112
Слика 66. Сирови подаци са скенера, пре калибрације података.....	113
Слика 67. Реконструисан 3D облак тачака тест објекта, поглед 1, након калибрације података.....	113
Слика 68. Реконструисан 3D облак тачака тест објекта, поглед 2, након калибрације података.....	114
Слика 69. Реконструисан 3D облак тачака тест објекта, поглед 3, након калибрације података.....	114
Слика 70. Реконструисан 3D облак тачака тест објекта, поглед 4, након калибрације података.....	115
Слика 71. Стандардна дев. грешке естимације позиције за различите вредности дужине аутоконволуционог филтра $N=3,5,7,9$ и $11$ за SNR однос 3dB у зависности од ширине рефлексије.....	131



Слика 72. Стандардна дев. грешке естимације позиције за различите вредности дужине аутоконволуционог филтра $N=3,5,7,9$ и $11$ за $SNR$ однос $6\text{ dB}$ у зависности од ширине рефлексије .....	132
Слика 73. Стандардна дев. грешке естимације позиције за различите вредности дужине аутоконволуционог филтра $N=3,5,7,9$ и $11$ за $SNR$ однос $9\text{ dB}$ у зависности од ширине рефлексије .....	132
Слика 74. Стандардна дев. грешке естимације позиције за различите вредности дужине аутоконволуционог филтра $N=3,5,7,9$ и $11$ за $SNR$ однос $12\text{ dB}$ у зависности од ширине рефлексије .....	133
Слика 75. Стандардна дев. грешке естимације позиције за различите вредности дужине аутоконволуционог филтра $N=3,5,7,9$ и $11$ за $SNR$ однос $15\text{ dB}$ у зависности од ширине рефлексије .....	133
Слика 76. Стандардна дев. грешке естимације позиције за различите вредности дужине аутоконволуционог филтра $N=3,5,7,9$ и $11$ за $SNR$ однос $18\text{ dB}$ у зависности од ширине рефлексије .....	134
Слика 77. Стандардна дев. грешке естимације позиције за различите вредности дужине аутоконволуционог филтра $N=3,5,7,9$ и $11$ за $SNR$ однос $21\text{ dB}$ у зависности од ширине рефлексије .....	134
Слика 78. Стандардна дев. грешке естимације позиције за различите алгоритме филтрирања (аутоконволуција, аутоконволуција са квантизацијом, прилагођени Гаус, без филтрирања) у зависности од ширине рефлексије за $SNR = 3\text{ dB}$ .....	135
Слика 79. Стандардна дев. грешке естимације позиције за различите алгоритме филтрирања (аутоконволуција, аутоконволуција са квантизацијом, прилагођени Гаус, без филтрирања) у зависности од ширине рефлексије за $SNR = 6\text{ dB}$ .....	135
Слика 80. Стандардна дев. грешке естимације позиције за различите алгоритме филтрирања (аутоконволуција, аутоконволуција са квантизацијом, прилагођени Гаус, без филтрирања) у зависности од ширине рефлексије за $SNR = 9\text{ dB}$ .....	136
Слика 81. Стандардна дев. грешке естимације позиције за различите алгоритме филтрирања (аутоконволуција, аутоконволуција са квантизацијом, прилагођени Гаус, без филтрирања) у зависности од ширине рефлексије за $SNR = 12\text{ dB}$ .....	136
Слика 82. Стандардна дев. грешке естимације позиције за различите алгоритме филтрирања (аутоконволуција, аутоконволуција са квантизацијом, прилагођени Гаус, без филтрирања) у зависности од ширине рефлексије за $SNR = 15\text{ dB}$ .....	137
Слика 83. Стандардна дев. грешке естимације позиције за различите алгоритме филтрирања (аутоконволуција, аутоконволуција са квантизацијом, прилагођени Гаус, без филтрирања) у зависности од ширине рефлексије за $SNR = 18\text{ dB}$ .....	137
Слика 84. Стандардна дев. грешке естимације позиције за различите алгоритме филтрирања (аутоконволуција, аутоконволуција са квантизацијом, прилагођени Гаус, без филтрирања) у зависности од ширине рефлексије за $SNR = 21\text{ dB}$ .....	138
Слика 85. Симулирана слика (лево) за $SNR = 3\text{ dB}$ . Пример линије слике, на слици лево означена црвеном бојом (средина). Увеличан врх рефлексије за различите алгоритме филтрирања (десно) .....	138
Слика 86. Симулирана слика (лево) за $SNR = 6\text{ dB}$ . Пример линије слике, на слици лево означена црвеном бојом (средина). Увеличан врх рефлексије за различите алгоритме филтрирања (десно) .....	139

Слика 87. Симулирана слика (лево) за $SNR = 9 \text{ dB}$ . Пример линије слике, на слици лево означена црвеном бојом (средина). Увеличан врх рефлексије за различите алгоритме филтрирања (десно) .....	139
Слика 88. Симулирана слика (лево) за $SNR = 12 \text{ dB}$ . Пример линије слике, на слици лево означена црвеном бојом (средина). Увеличан врх рефлексије за различите алгоритме филтрирања (десно) .....	140
Слика 89. Симулирана слика (лево) за $SNR = 15 \text{ dB}$ . Пример линије слике, на слици лево означена црвеном бојом (средина). Увеличан врх рефлексије за различите алгоритме филтрирања (десно) .....	140
Слика 90. Симулирана слика (лево) за $SNR = 18 \text{ dB}$ . Пример линије слике, на слици лево означена црвеном бојом (средина). Увеличан врх рефлексије за различите алгоритме филтрирања (десно) .....	141
Слика 91. Симулирана слика (лево) за $SNR = 21 \text{ dB}$ . Пример линије слике, на слици лево означена црвеном бојом (средина). Увеличан врх рефлексије за различите алгоритме филтрирања (десно) .....	141

## Листа табела

Табела 1. <i>Поређење две CMOS камере на основу EMVA</i> .....	18
Табела 2. <i>Однос флексибилности, трајања развоја, потрошње, перформанси као и цене развоја и продукције различитих опција за DSP хардверске платформе</i> .....	38
Табела 3. <i>Тип наменског система и минимални захтеви за Embedded Linux и RTOS оперативне системе [62]</i> .....	40
Табела 4. <i>Преглед алгоритама и класа операција неопходних за њихову имплементацију, као и комплексност алгорита базирана на броју потребних пиксела за естимацију позиције</i> .57	
Табела 5. <i>Упоредни приказ времена извршавања Steger, центар масе и алгорита побољшаног центра масе за слику резолуције 500 × 250 пиксела, са различитим облицима ласерске линије</i> .....	64
Табела 6. <i>Искоришћеност FPGA ресурса и време извршавања за различите алгоритме детекције линије</i> .....	68
Табела 7. <i>Време обраде слике Steger методом за различите резолуције на FPGA платформи Xilinx Virtex 5 LX330</i> .....	68
Табела 8. <i>Параметри симулације</i> .....	88
Табела 9. <i>Преглед логичких ресурса за AMD ZynqUltraScale+ (ZU4CG) чип</i> .....	98
Табела 10. <i>Искоришћеност главних блокова AMD UltraScale+ ZU4CG уређаја за имплементацију аутоконволуционог филтра дужине <math>N = 11</math></i> .....	106
Табела 11. <i>Време процесирања слика на различитим платформама (са * је означено време процесирања предложеног алгорита у овом раду)</i> .....	107

## **Акроними**

AI - Artificial Intelligence  
ASIC - Application-Specific Integrated Circuit  
AWGN - Additive Gaussian White Noise  
CCD - Charged Coupled Device  
CFAR - Constant False Alarm Rate  
CMM - Coordinate Measuring Machine  
CMOS - Complementary Metal Oxide Semiconductor  
CPU - Central Processing Unit  
FIR - Finite Impulse Response  
FPGA - Field Programmable Gate Array  
FPN - Fixed Pattern Noise  
GPU - Graphical Processing Unit  
HDR - High Dynamic Range  
HLS - High Level Synthesis  
LUT - Look Up Table  
MEMS - Micro Electro-Mechanical System  
ML - Machine Learning  
ROI - Region of Interest  
RTL - Register Transfer Level  
RTU - Real Time Unit  
SNR - Signal to Noise Ratio  
SoC - System on Chip

Мојој ћерки Хелени

## 1. Увод

Још од времена првих цивилизација, препозната је потреба за мерењем и јединицама мере. Поред тежине, једна од основних јединица мере била је дужина. Људи су мерили удаљеност, површину и запремину, а за то им је било неопходно да мере растојање између две тачке. У почетку се дужина дефинисала и мерила примитивно, па су тако на пример стари Египћани користили кубит за јединицу дужине, који је представљао растојање између лакта и врха средњег прста руке фараона. У гробницама виђенијих људи који су вероватно били први грађевински инжењери, геометри или просто високи чиновници тог времена, пронађени су еталони мере које су они користили [1]. Од тада, па све до данас, непрекидно се ради на унапређењу дефиниције мера и мерних алата које користимо за мерење дужине.

Прва индустријска револуција донела је масовну производњу и човек је по први пут у историји био способан да направи велике количине реплика које су верне оригиналу. Са развојем математике, механике и практичног знања мењали су се и алати које је човек користио. Заједничко им је било контактано мерење, и то у почетку једноставно и грубо, користећи лењир, траку или канап, а касније је то било кљунасто мерило и микрометарски завртањ. Почетком XVII века конструисан је први пантограф који је представљао својеврсну револуцију и може се сматрати претечом модерних скенера [2]. Такав уређај је могао прецизно да репродукује покрете врха сонде која је била са једне стране у додиру са мерном површином, а са друге стране преко механичке везе паралелограма везана са оловком која је остављала траг на папиру. На тај начин било је могуће репродуковати комплексне облике на брз и релативно једноставан начин. Доста касније, са развојем електронике и рачунарске технике у XX веку долази и до развоја потпуно нових метода и алата за мерење.

Последња индустријска револуција, познатија као индустрија 4.0 донела је аутоматизацију индустријских процеса производње кроз праћење, контролу и оптимизацију свих ресурса у производном ланцу. Индустрија 4.0 довела је до развоја и примене широке лепезе уређаја за мерење растојања али и профилних скенера који дају 2D реконструкцију сцене, као и 3D скенера који дају потпуну тродимензионалну реконструкцију посматраног објекта. Процес мерења се назива скенирање, а резултат скенирања је облак тачака које представљају 2D или 3D реконструкцију површине скенираног објекта. Потпуна дигитализација индустријског система постиже се фузијом паметних сензора и то из потпуно различитих области сензорике – од једноставних температурних сензора па све до врло комплексних као што су MEMS (*Micro Electro-Mechanical System*), сензори камере и други. Такви умрежени сензори у индустрији се називају ПоТ (*Industrial Internet of Things*) уређајима.

Методе скенирања објекта (генерално растојања или 3D простора) се могу поделити на контактне и бесконтактне. Преглед метода скенирања дат је на слици 1. Контактне методе скенирања подразумевају директан контакт између мерног уређаја и објекта чија се површина реконструише. Модеран контактни мерни уређај (*Coordinate Measuring Machine - CMM*) се најчешће састоји од калибрисане фиксне платформе и механичке руке са сондом на њеном крају. Кретање механичке руке и врха сонде преко мерне површине може бити контролисано мануелно или роботски. Са сваким контактом врха сонде са мерном површином, скенер памти тродимензионалне ( $X, Y, Z$ ) координате врха сонде, односно ради транслацију позиције врха сонде у облак 3D тачака које ће формирати облик површине скенираног објекта. Свака тачка из 3D облака тачака се касније користи да би се израчунала мрежа тачака, односно добила реконструкција облика површине објекта. Модерни контактни координатно мерни уређаји, иако ефективни и прецизни, захтевају велико време скенирања објекта, јер за сваку тачку у 3D простору неопходан је контакт сонде са површином, затим њено померање на следећу позицију и понављање процеса док се не прођу све контролне тачке [3]. Још један од проблема са којим се овакав тип скенера суочава су објекти од врло танких или меканих материјала где се у контакту са чврстим врхом мерне сонде њихова површина мења или у најгорем случају може доћи до њеног оштећења (на пример у случају уметничких дела) [4]. Овакви уређаји се обично користе у раним фазама продукције у машинској индустрији и то сложених механичких целина, како би се што раније утврдила евентуална одступања од задатих спецификација [5]. Са развојем CCD (*Charge-Coupled Device*) камера почетком '80-их година прошлог века, овакве скенере постепено почињу да потискују профилни ласерски скенери базирани на принципу триангулације.



Слика 1. Преглед метода за скенирање профила, растојања и 2D или 3D реконструкцију [6]

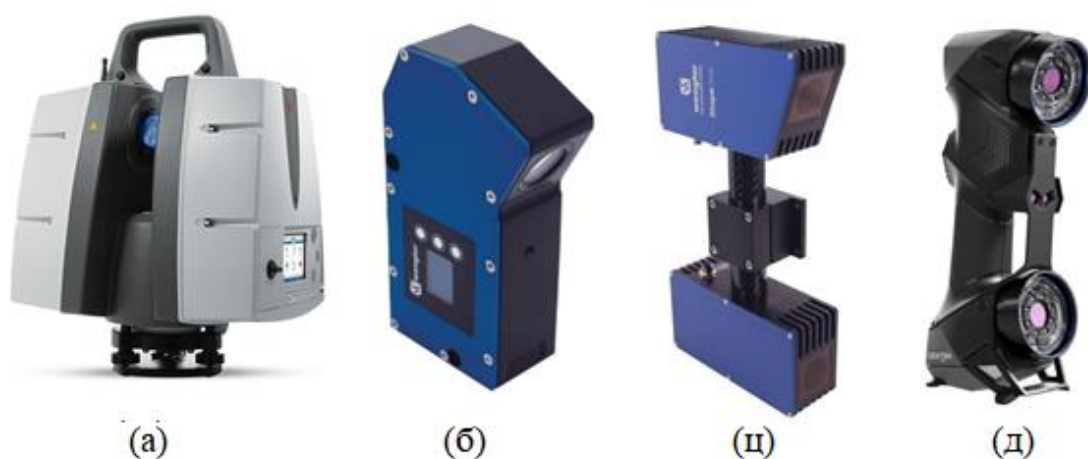
Бесконтактне технике 3D реконструкције подразумевају мерење без директног контакта мерног инструмента и мерног објекта и могу се поделити на радиолошке, акустичне и оптичке методе. У радиолошке методе спадају компјутеризована томографија базирана на X зрацима (СТ скенери) и компјутеризована магнетна томографија (МРИ) базирана на магнетној резонанци. Акустичне методе подразумевају употребу ултразвука за одређивање растојања између пријемника и тачке рефлексије. Класичан пример акустичне методе је сонар који се користи за мерење растојања у води.

Оптичке методе се могу поделити на пасивне и активне. Пасивне технике нису базиране на додатним изворима светлости већ у зависности од осветљења сцене, односно амбијенталног светла уз контролу времена експозиције камере, врше 3D реконструкцију посматраног објекта. Најраспрострањенији пример пасивне методе у природи је чуло вида, где се са два ока на основу рефлектоване светлости формира слика, а у мозгу добија информација о 3D простору. Широко распрострањена пасивна метода у машинској визији је стерео визија, где се са две камере добија реконструкција посматране сцене, односно одговарајућа дубина сцене и на тај начин формира облак тачака скенираног објекта.

У општем случају активне технике користе неки додатни извор електромагнетног зрачења (као што је ласер или пројектор) и детектор рефлексије, како би утврдили растојање до мерног објекта. Активне методе се даље могу поделити на интерферометрију, *time of flight* и триангулацију.

Интерферометрија користи интерференцу таласа, у овом конкретном случају ласерске светлости, како би се израчунало тачно растојање између две тачке. Ова особина ласерске светлости је искоришћена за пројекат LIGO (*Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory*) који је имао за циљ детекцију космичких гравитационих таласа. У две географски удаљене опсерваторије у Сједињеним Америчким Државама 2015. године је по први пут у историји детектован гравитациони талас који је прошао кроз нашу планету користећи ову методу мерења [7].

*Time of Flight* (ToF) скенери раде на принципу мерења времена које је потребно ласерској светлости да пређе двоструко растојање између извора и места рефлексије (*round trip*). Тачност оваквих скенера зависи од способности да се ово време измери што прецизније. Предност оваквих скенера је њихова могућност да врло прецизно мере растојање до веома удаљених објеката (врло често и до неколико километара). Због те особине ови скенери су врло корисни за мерења у грађевини, за прецизну 3D реконструкцију зграда или за израду врло прецизних топографских карти. Њихова мана је условно мала прецизност, која се најчешће мери у милиметрима, због велике брзине светлости ( $c$ ). На слици 2а. дат је пример *Leica Scan Station 3D* ласерског скенера са тачкастим извором ласерске светлости и ротирајућим огледалима, који ради на принципу *time of flight*. За сваку позицију брзо ротирајућег огледала памти се удаљеност ласерског зрака од површине посматраног објекта. Ове скенере одликује дуго време скенирања, јер очигледно за сваку тачку у простору неопходно је поставити огледало, сачекати рефлексију и обрадити повратну информацију о удаљености објекта.



Слика 2. (а) *Leica Scan Station P40 / P30* (б) *Wenglor MEL MLWL221 2D/3D Profile Sensor* (ц) *Wenglor ShapeDrive MLBS103 3D Sensor* (д) *Creaform HandySCAN 300*



Последњу групу оптичких активних скенера представљају уређаји базирани на принципу триангулације. Дигитална камера, извор светлости и посматрани објекат чине теме на троугла чије је параметре потребно израчунати како би се одредила удаљеност објекта до камере скенера. Прве идеје о ласерским скенерима су настале у *National Research Council* у Канади још давне 1978. године, где је и направљен први прототип скенера базиран на принципу триангулације.

Скенири чији је рад базиран на триангулацији се могу поделити на скенере са структурираним светлом и профилне ласерске скенере. Скенер базиран на структурираном светлу користи дигитални пројектор и LED диоду као активни извор светлости. Најчешће се врши пројектовање бинарних слика или слика кодованих Грејевим кодом и то у комбинацији са сликама на којима се интензитет мења синусном функцијом и који су међусобно фазно померени, како би се побољшала резолуција реконструкције и смањио утицај шума. Камера и пројектор су синхрони, а број слика које је неопходно направити како би се добила добра 3D реконструкција, варира у зависности од потреба и услова рада скенера. Мана ових уређаја је релативно велико време аквизиције слика, при чему скенирани објекат мора остати стационаран док се аквизиција слика не заврши. На слици 2ц. је дат пример *Wenglor MLBS 103* 3D скенера са структурираним светлом.

Профилни скенери су 2D скенери и састоје се од дигиталне камере и ласерског извора светлости упареног са оптичком призмом која тачкасти извор светлости претвара у ласерску линију. Сваки пиксел дигиталне камере једнозначно одговара некој тачки у посматраном простору, односно растојању до посматраног објекта. Али, пре свега потребно је детектовати ласерску рефлексију и одредити њену тачну позицију на слици. Затим, узимајући у обзир калибрационе параметре система, (који укључују између осталог дисторзије које уносе сочива камере, параметре камере и разне изворе шума), кроз процес линеаризације резултата детекције, одређује се тачна удаљеност од камере до посматраног објекта. На слици 2б. дат је пример профилног 2D/3D ласерског скенера *Wenglor MLWL221* базираног на принципу триангулације. Овакве технике скенирања се најчешће користе у комбинацији са покретним производним тракама или ротирајућим платформама на којима су инсталирани енкодери који прате промену позиције, те се на тај начин добија трећа димензија реконструкције облака тачака.

Ручни ласерски скенери инкорпорирају додатне алгоритме (поред триангулације), како би се одредила позиција скенера у интерном координатном систему приликом његовог померања. Ова позиција се може одредити користећи предефинисане референтне тачке на објекту, али постоје истраживања у којима се на основу самог окружења скенираног објекта прати референтна позиција скенера. Такође, референтну позицију скенера је могуће одредити коришћењем инфрацрвених диода које су упарене са камерама. Врло често су на камерама инсталирани специјални филтри који пропуштају само инфрацрвену светлост са диода, како би посао процесорима за обраду слике (и позиције) био олакшан. На слици 2д. је дат ручни 3D ласерски скенер *Creaform HandySCAN 300*.

Профилни ласерски скенери, као и 3D скенери се најчешће користе за инспекцију квалитета, посебно када се ради о позицијама комплексног облика (као на пример турбине за дизел моторе или приликом инспекције квалитета металних варова на спојевима). Домен примене 2D-3D скенирања поред индустријске производње обухвата и друге врло различите области, па тако на пример, осим провере квалитета могуће их је користити како би се поједини недостаци производа отклонили (на пример одливке од метала је могуће дорадити) па се на тај начин смањује и количина отпада у производњи. Профилни скенери се користе и за навођење електрода робота вариоца и то скенирањем површине која се вари, али исто тако могу се користити за контролу квалитета варова [8]. Једна од врло занимљивих примена профилних скенера је инспекција квалитета железничких шина [9]. У зависности од

географске позиције и климатских услова, могуће је да метал трпи напор због великих температурних промена. Услед пренапрегнутости материјала може доћи до пуцања шина и испадања воза из колосека. Међутим употребом профилних скенера, површинске пукотине је могуће детектовати и на време поправити оштећене делове пруге. Технике 3D скенирања врло често се користе када не постоје одговарајући 3D модели, односно у ситуацијама када се ради тзв „reverse engineering“. То је врло чест случај у аутомобилској индустрији када је потребно направити део мотора који се више не производи. Није необично да се финална верзија производа разликује од пројектоване, те је потребно ажурирати одговарајући 3D модел. Профилни 2D или 3D скенери користе и у разним другим областима, као на пример приликом академских испитивања, архитектуре и грађевинарства, археологије, медицине, стоматологије, индустрије видео игара и филма, као и многих других [10] [11] [12]. Гране примене 2D и 3D скенера су приказане на слици 3 [13].



Слика 3. Примери употребе профилних скенера

Ласерски скенери су такође чувари нашег културног и уметничког наслеђа. Велики пожар који се десио априла 2019. године у Паризу, скоро да је уништио Нотр Дам, једну од најпознатијих катедрала на свету. Међутим, катедрала је документована како споља, тако и изнутра, милиметарском прецизношћу са ласерским скенерима. Историчар архитектуре Andrew Tallon, скенирао је 2010. године са преко 50 различитих позиција катедралу користећи *Leica ScanStation C10* ласерски скенер. Његов циљ је био истраживање архитектонских структура, прорачуна грађевинских инжењера као и проучавање метода које су неимари користили приликом градње катедрале. У периоду од 5 дана скенирања сакупљено је довољно 3D тачака и фотографија за комплетну реконструкцију унутрашњости и спољашњости. Дрвени сводови од којих је био направљен кров катедрале су скенирани са посебном пажњом. За неке делове постоје подаци од неколико тачака по квадратном сантиметру [14]. Управо тај део зграде је у потпуности уништен и нестао у пожару. Сигурно је да ће сачувани подаци помоћи

да се катедра обнови и врати у првобитно стање. На тај начин ће огроман рад и труд вештих мајстора бити сачуван.

Активне технике реконструкције су чешће коришћене јер пружају боље резултате у индустријским условима рада, али такође као и пасивне, имају своја ограничења по питању тачности и робусности мерења. Обе методе имају проблем лажних рефлексија, сенки и мртвих углова, који се најчешће решавају употребом више синхронизованих скенера. Врло често један од скенера има улогу главног (мастер) скенера и задужен је за дистрибуцију синхронизационих сигнала осталим скенерима у систему. Још један од недостатака ласерских скенера базираних на триангулацији су потешкоће које имају са транспарентним или изразито рефлективним површинама, јер у тим случајевима лако може доћи до сатурације пиксела на слици услед превеликог времена експозиције или неодговарајуће снаге ласера. Тада се информација о тачној позицији врха ласерске рефлексије губи, а резултат мерења је погрешан. Карактеристике ласера, камере, сочива и површине која се скенира су главни фактори који одређују квалитет реконструкције.

Када су у питању профилни скенери, информација о удаљености између камере и скениране површине објекта је сачувана у делу светлости која је рефлектована назад ка камери. Профил снаге светлости ласера прати Гаусову криву, за коју се сматра да ће остати непромењена приликом пропагације кроз простор, процеса рефлексије и проласка кроз оптичке компоненте система. Без обзира на конфигурацију профилног скенера и извора ласерске светлости, неопходно је одредити тачну позицију рефлектоване ласерске светлости. То подразумева дигиталну обраду слике на разним врстама наменског хардвера. Међутим, свака линија слике се може посматрати као једнодимензионални сигнал чији профил интензитета прати Гаусову криву, која услед различитих извора шума на пријему (дигиталној камери) трпи мање или веће дисторзије. Због различитих параметара система, као што су време експозиције камере, снага ласера, или различитих рефлексионих карактеристика скенираних површина, може доћи до сатурације пиксела камере, те се информација о тачној позицији ласерске рефлексије не може једнозначно одредити. У таквим ситуацијама квалитет реконструкције опада, што за неке више слојеве апликације може довести до погрешних одлука да ли посматрани објекат испуњава тражене спецификације.

Посебан акценат истраживања у овом раду је стављен на обраду сигнала у случајевима када је рефлексија ласерске линије сатурисана. Очекивана рефлексија има симетричан облик сигнала у простору, па се идеја о коришћењу аутоконволуције као технике претпроцесирања чинила као добар кандидат за истраживање. Након имплементације симулационих модела у MATLAB-у, аутоконволуциони филтар је имплементиран на наменској FPGA (*Field Programmable Gate Array*) платформи. Реализовани филтар има једноставну структуру, те је искоришћеност ресурса мала, што га чини идеалним за интеграцију са комплексним системима. Такође, филтар подржава обраду сигнала у реалном времену, па је као такав идеалан за употребу у индустријским апликацијама. Кроз тестирање у реалним условима је показано да аутоконволуциони филтар у комбинацији са алгоритмом центра масе даје боље резултате у односу на неке друге, постојеће методе.

## 1.1. Преглед дисертације

У наставку дисертације приказан је основни принцип рада профилних скенера базираних на триангулацији, при чему је на почетку посебан фокус стављен на његове главне компоненте:

- Ласер са оптиком која тачкасти извор светлости претвара у ласерску линију.
- Индустијска камера са оптиком која формира слику рефлектоване ласерске линије.
- Рефлексионе карактеристике објекта (површине) који се скенира.

Кроз основне геометријске појмове који објашњавају принцип триангулације показано је због чега је важна детекција ласерске линије са резолуцијом испод физичке величине пиксела камере.

Такође, у раду су наведени извори и типови шума који утичу на тачност реконструкције, као и неке од основних метода за филтрирање и побољшање очекиваног SNR (*Signal Noise Ratio*) односа, а све у циљу како би се јасно приказали параметри система на које треба обратити пажњу приликом симулације.

Као везивни елемент свих набројаних компоненти ласерског скенера издваја се наменски систем на којем се ради обрада сигнала са камере, контрола рада ласерског модула, синхронизација са осталим деловима система и другим скенерима, прослеђивање обрађених података ка централној контролној јединици, као и контрола других периферних сензора. Када су у питању индустријски наменски системи који раде у улози ласерских профилних скенера углавном се говори о системима за обраду слике или сигнала у реалном времену, јер време одзива целокупног система на побуду мора да буде предвидиво.

Обрада сигнала ласерске рефлексије је један од главних задатака наменског система. У раду је дат преглед постојећих алгоритама који имају за циљ естимацију позиције ласерске рефлексије на слици скенера. Неки од алгоритама су крајње једноставни и захтевају мали број рачунских операција, док опет на другој страни постоје алгоритми који покушавају да елиминишу разне изворе шума или ефекте који настају услед природе ласерске светлости, комплексним математичким операцијама и комбинацијом више алгоритама, што за последицу има компликовану имплементацију или практично немогућу, када су у питању системи у реалном времену. Кроз преглед алгоритама направљен је одабир оних који су погодни за имплементацију на FPGA платформама у комбинацији са аутоконволуцијом, као одабраном техником претпроцесирања сигнала ласерске рефлексије.

У наставку рада су дате особине аутоконволуције, али исто тако кроз симулацију су приказани основни параметри система на које треба обратити пажњу приликом имплементације аутоконволуционог филтра, као што је на пример дужина аутоконволуције. Основна полазна тачка у развоју новог система је симулација. Она би требало да на веран начин представи и опише улазне параметре система, односно побуду, како би се на правилан начин могла одрадiti карактеризација предложених алгоритама. Такође, кроз симулацију је могуће пронаћи оптимално решење за имплементацију - формат и број бита који се користе или разне апроксимације или квантизације у самом алгоритму.

На крају рада дат је преглед већ постојећег наменског система са главним компонентама, предлог имплементације новог оригиналног предложеног алгоритма, као и резултати тестирања у реалним условима рада. Кроз тестирање је показано да предложени алгоритам филтрирања сигнала рачунарски ефикасан, а да, истовремено, даје добре резултате естимације позиције ласерске рефлексије.

## 2. Профилни ласерски скенери базирани на принципу триангулације

Профилни ласерски скенер је комплексан уређај који се састоји од ласерског модула, који је извор ласерске светлости, камере заједно са одговарајућом оптиком и оптичким филтрима, као и електронике која је задужена за дигиталну обраду сигнала, комуникацију и синхронизацију са остатком система, као и мноштва сензора који мере параметре рада целог скенера. У наставку је дат преглед основних карактеристика сваке од наведених компоненти система.

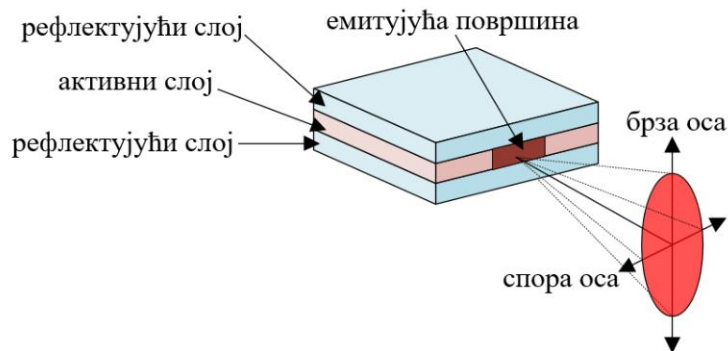
### 2.1. Ласерски модул и профил ласерске светлости

Ласерски извор даје високо кохерентан, усмерен сноп монохроматске светлости. Основна структура сваког ласерског склопа је базирана на активном медијуму (који може бити гас или полупроводник) садржаном између рефлектора. Ласерска светлост настаје приликом проласка кроз медијум и њене рефлексије од рефлектора кроз процес који се назива стимулисана емисија. Светлост практично осцилује између рефлектора и приликом проласка кроз медијум акумулира енергију. Ласерско зрачење напушта медијум кроз парцијално рефлективно огледало (емитујући слој) које се налази унутар ласерског склопа. На слици 4. је дат приказ упрошћеног принципа рада извора ласерске светлости.

Ширина ласерског снопа је битан параметар који карактерише сваки ласер и може се дефинисати на неколико начина, али је за Гаусовске ласерске снопове типично изражена преко  $1/e^2$ , односно то је растојање између две тачке на кривој дистрибуције чији су интензитети  $1/e^2$  (0,135) вредности максималног интензитета [15].

Параметри пројектоване ласерске линије су кључни за реконструкцију али и калибрацију профилног ласерског скенера. Извори ласерске светлости нису идеално прави или хомогени, при чему се ове особине мењају у зависности од удаљености ласера до мерног објекта. Један од кључних параметара ласерског извора је униформност његове снаге, односно флукуације које настају услед малих варијација у процесу производње, али које су и даље у границама толеранције. Ове флукуације се најчешће манифестују као варијације у

интензитету, посебно изражено на ивицама снопа, неравном профилу интензитета и расипању светлости. Већина произвођача ласерских линијских профила наводи униформност линије као варијацију интензитета профила од средње вредности у датом региону. Међутим, управо изван дефинисаног региона се јављају проблеми са униформношћу снаге. Такође, апсолутне варијације снаге и даље могу да буду присутне, али се оне усредњавају преко целе дужине ласерске линије и могу значајно утицати на квалитет реконструкције.



Слика 4. Поједностављен принцип рада ласерске диоде

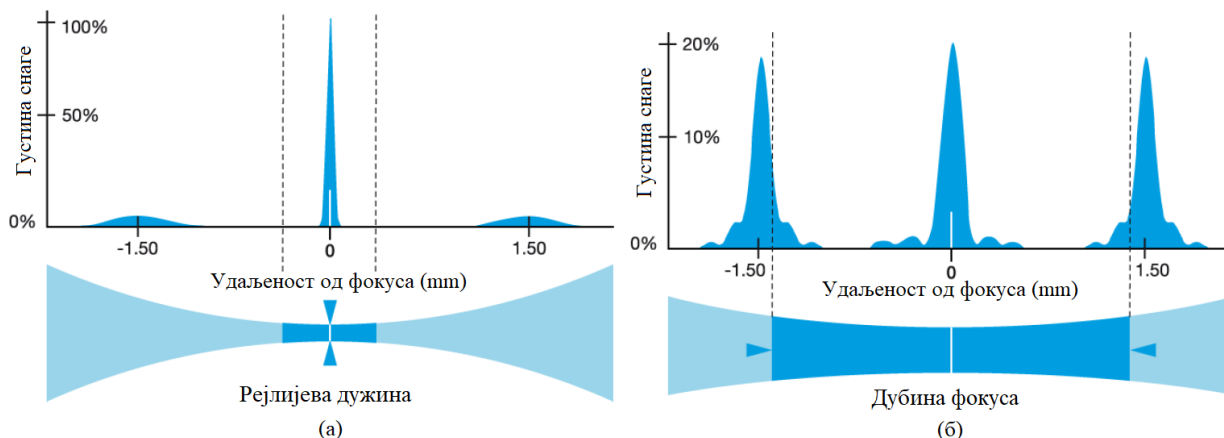
Због фокусирања ласерске линије долази до варијација у њеној ширини у односу на њену дужину, али исто тако и до промене долази за различите удаљености мерног објекта у односу на извор ласерске светлости. Квалитет оптичких сочива која дају ласерску линију има велики утицај на перформансе система. У данашње време већина линијских пројектора је базирана на EEL (*Edge Emitting Laser*) или FP (*Fabry-Perot*) диодним ласерима. Сама конструкција диодног ласера је таква да извор ласерске светлости нема кружан облик, него је он елипсаст због чињенице да је њихова емитујућа страна много већа у једној оси у односу на другу (приказано на слици 4.). Последица таквог дизајна је да ће диода имати у једном правцу већу величину извора и мању дивергенцију фокуса (која се по номенклатури назива спора оса) него у вертикалном смеру (брза оса) [16].

Оптичко сочиво које се користи за фокусирање ласерске светлости може бити конфигурисано тако да ради транслацију или споре или брзе осе. Ефекти дифракције настали избором осе утичу на понашање ласерске линије на три начина:

- Мања ширина ласерске линије на месту фокуса може се постићи тако што се оријентацијом ласера бржа оса поставља за ужу димензију снопа, док спорија оса постаје њена дужина. Ово је врло важно јер ужа линија даје већу резолуцију и ужу расподелу густине снаге ласерске светлости, што на пример значи могућност да се раздвајају мање варијације у висини мерног објекта.
- Дифракција чини да се фокусиране уске ласерске линије брже шире изван фокуса у односу на шире линије. То заправо значи да са већом резолуцијом долази до смањења видног поља скенера, односно смањења растојања на којој ширина ласерске линије постаје неприхватљива.
- У случају да се мери равна површина која је нормална на правац ширења ласерске линије, тада ивице ласерске линије морају путовати незнатно веће растојање у односу на централни зрак који иде директно на површину. Ако се узме у обзир да са повећањем растојања долази до ширења ласерске линије, то значи да ће крајеви имати мало већу ширину ласерске линије него централна рефлексија. Овакав ефекат се назива ефекат кравате.

Профил пројектоване ласерске линије у многоставно зависи од типа изабраног сочива које врши трансформацију снопа Гаусовог профила у ласерску линију. На слици 5а. је дат пример

профилне линије која има малу ширину и велику густину енергије око централне тачке профила (у односу на центар фокуса), међутим врло брзо њена ширина почиње да расте, а енергија линије опада. На другој страни имамо сочива која дају ширу ласерску линију али са већом униформношћу у односу на центар профила (дато на слици 5б.). У зависности од конкретног случаја и мерења, профилни скенери ће користити ласере са различитим типовима фокусирајућих сочива.



Слика 5. Различити профили ласерске линије, за различите врсте сочива. (а) Пример када је велика густина снаге на месту фокуса, али се ширина ласерске линије нагло повећава. (б) мања густина снаге и шира линија, али са проширеном дужином фокуса. [17]

Свака ласерска линија је фокусирана на неку предефинисану даљину од извора светлости. Преко те удаљености ласерска линија почиње да буде шира и густина њене снаге почиње да опада. За ласерску линију са ширином  $B$  важи следећа једначина:

$$B = \frac{4\lambda A}{\phi_s \pi} \quad (2.1)$$

где је  $\lambda$  означена таласна дужина ласера који се користи, са  $A$  је дато радно растојање, док је са  $\phi_s$  означен пречник долазног ласерског снопа [18]. Из једначине је лако закључити да је ширина ласерске линије обрнуто пропорционална пречнику долазног ласерског снопа, те за уску ласерску линију долазни снопа мора бити што је могуће шири.

Правилност ласерске линије је такође битан фактор у одређивању перформанси профилног скенера. Идеално праве ласерске линије у пракси не постоје, већ су оне обично благо закривљене а у ретким случајевима имају облик благо закривљеног латиничног слова S. Блага закривљеност настаје када ласерски снопа улази у призму под углом који није идеално прав у односу на осу призме. Због чињенице да праволинијске особине ласерске линије зависе од оптичког поравнања, ова особина може да варира од уређаја до уређаја али и да се за исти уређај мења у току времена због утицаја фактора средине [19]. Због тога је неопходно одрадити калибрацију сваког профилног скенера и узети у обзир карактеристике ласерске линије у дати систем.

Извори ласерске светлости који се користе дужи временски период губе уједначену расподелу снаге преко целе слике, па ће тако поједини делови имати већу осветљеност од осталих, док се у екстремним случајевима може десити да поједини делови уопште немају ласерско светло. Таква флукуација расподеле снаге извора ласерске светлости, отежава правилно подешавање параметара система.

Електронске компоненте ослобађају значајну количину топлоте приликом рада, те због компактности кућишта профилног скенера није неуобичајено да је ласерска диода изложена

високим температурама. Наравно, и сама диода део електричне енергије претвара у топлотну енергију која доприноси скраћењу њеног животног века. Због тога су модерни профилни скенери опремљени са температурним сензорима, који непрестано прате температуру диоде, као и *Пелтиер* елементом који је задужен за одвођење топлоте из система. Занимљиво је поменути да се у оптичким системима ретко користе активна хлађења електронских компоненти, јер захтевају циркулацију ваздуха кроз систем. Са друге стране циркулација ваздуха неминовно уноси честице прашине у систем које би временом прекриле ласерски извор, камеру и оптичке филтре [20]. У том случају параметри система под којим је урађена калибрација би били промењени. Осим што је могуће пратити температуру којом је диода била изложена, врло често се у систему прати и потрошња струје диоде али и број радних сати који могу дати додатне информације о животном веку диоде. Тако је могуће предвидети очекивано време отказа диоде и на време одрадити сервисирање (*predictive maintenance*), како би се предупредили изненадни откази у системима производње.

Боја и храпавост (текстура) скениране површине су важни фактори и утичу на квалитет реконструкције преко количине рефлектоване светлости, па већина профилних сензора подржава опцију контроле интензитета (снаге) ласерске светлости. На тај начин се постиже побољшање оштрине и интензитета ласерског снопа који је пројектован на скенирану површину [21]. Многи профилни скенери осим једноставне PWM (*Pulse Width Modulation*) контроле рада ласерске диоде користе разне алгоритме за контролу снаге, али и времена колико је ласерски извор укључен током времена експозиције камере. Уколико је снага извора ласерске светлости неодговарајућа за скенирану површину, квалитет реконструкције ће бити значајно смањен, а у неким ситуацијама могу се добити потпуно погрешна мерења или их уопште није могуће направити. Уколико је снага ласера превелика, лако долази до засићења пиксела. Са друге стране, уколико је снага ласера недовољна, квалитет слике (SNR однос) и детектоване ласерске рефлексије је мали, те ће и квалитет реконструкције бити доведен у питање.

Ласерски извори базирани на ласерским диодама су доступни у таласним дужинама од 375 nm (UV блиском делу спектра) па све до 2300 nm, што одговара инфрацрвеном делу спектра. Међутим, за већину система базираним на триангулацији, спектар таласних дужина је лимитиран на област сензитивности спектра камере и креће се у области од 400 до 700 nm укључујући мањи део блиско инфрацрвеног дела спектра до 1000 nm. На тржишту се могу наћи љубичасте (375 - 410 nm), плаве (415 - 488 nm), зелене (505 - 520 nm), црвене (633 - 690 nm) и инфрацрвене (705 - 1550 nm) ласерске диоде [22].

У пракси се најчешће срећу ласерски извори светлости чија таласна дужина одговара црвеној боји. У последње време се доста користе и извори светлости са плавом бојом који имају боље перформансе када је у питању скенирање објеката као што су на пример одливци од усијаног метала, али исто тако и органски материјали. Љубичасте или плаве диоде се користе у ситуацијама када је потребна изразито уска линија (односно резолуција скенирања) и када дубина фокуса није битна.

Треба напоменути да ласерска светлост може бити врло опасна уколико се не поштују безбедносне процедуре. Ласерски извори светлости се могу класификовати на основу таласне дужине и снаге. Када је у питању сигурност, ласери се могу поделити на 4 категорије и неколико поткатегорија, при чему класа I није опасна за човека и средину, док класа IV има довољно енергије да чак и рефлексијом од површине нанесе повреду у виду опекотина или трајног оштећења вида. Модерни скенери имају уграђене хардверске и софтверске заштите како би случајно укључење или погрешно подешени параметри система онемогућили неконтролисан рад ласерског извора. Врло често се користе алгоритми којима се проверава да ли је објекат за мерење присутан унутар радног простора скенера и једино у случају да је тај услов испуњен долази до активирања ласера и рада скенера.



У многим научим радовима, али и у практичним апликацијама могу се пронаћи примене различитих облика пројектоване ласерске светлости. Наравно, поред класичног тачкастог извора, могу се користити разне врсте оптичких сочива које модификују тачкасти извор у линију, паралелне линије, пресек линија или мрежу тачака. Како би се побољшала брзина скенирања и смањено број слика неопходних за 3D скенирање могу се користити MEMS (*Micro-Electro Mechanical Systems*) огледала како би се истовремено пројектовало више ласерских линија. У том случају уколико је број пројектованих линија  $N$ , тада је број потребних слика смањен са фактором  $1/N$ . На исти начин и време потребно за скенирање је смањено са фактором  $1/N$ , када се пореди са системом у којем се налази само једна ласерска линија [23]. За пројектовање таквог уређаја могу се користити Texas Instruments DLPC 350 (који је контролер) упарен са Texas Instruments DLP4500 MEMS огледалима.

Један од најчешћих проблема са којима се профилни скенери суочавају је сатурација пиксела којима је представљена рефлексија ласерске линије. Тада се губи информација о врху Гаусовог импулса, а самим тим и тачна позиција ласерске рефлексије.

Материјали као што су глатке металне површине, рефлектују светлост са спекулар ефектом. Лажне спекуларне компоненте, које не припадају објекту, већ долазе из вишеструке рефлексије у том случају доминирају и могу бити тумачене погрешно као главне рефлексије. Додатни проблем представља и чињеница да у зависности од упадног угла светлости зависи интензитет детектоване ласерске рефлексије на слици (упадни угао представља угао између ласерске светлости и нормале на мерну површину). Па се тако може десити да неки делови сцене са великим упадним углом имају мањи интензитет пиксела у односу на остатак слике, па се мора водити рачуна о времену експозиције камере. Са друге стране, велико време експозиције и мали упадни углови лако доводе до ефекта засићења, што смањује тачност пре свега детекције, а онда и естимације тачне позиције ласерске рефлексије [24].

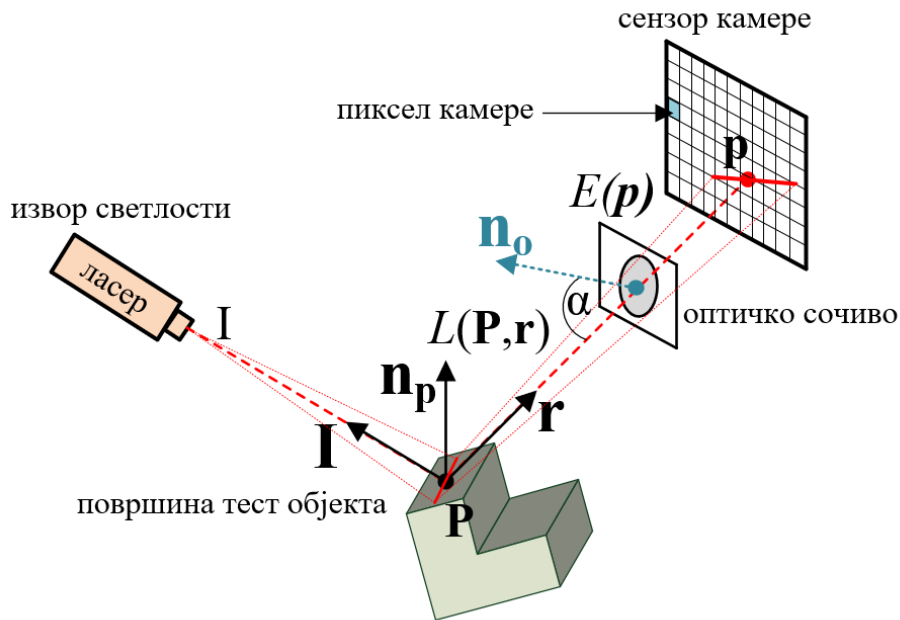
Приликом симулације и анализе целог система сматраће се да ласерска светлост не губи Гаусовски профил снаге приликом пропагације кроз ваздух, рефлексије и проласка кроз оптички систем камере профилног скенера. Међутим, ефекат ласерске мрље се не може занемарити и њега је потребно моделовати у симулацији на прави начин преко додатних рефлексија различите ширине, амплитуде и позиције.

Након што ласерска светлост напусти профилни скенер, долази до површине скенираног објекта и рефлектована се враћа назад ка камери. Информација о удаљености између посматраног објекта и камере се налази у делу рефлектоване ласерске светлости и као таква за систем представља битнију информацију. Пре свега, неколико речи о томе шта се дешава када ласерска светлост дође до површине скенираног објекта.

## **2.2. Карактеристике површине која се скенира и рефлексија ласерске линије**

Радиометрија је наука која се бави изучавањем израчене енергије електромагнетног зрачења било које таласне дужине. Са друге стране фотометрија изучава исти проблем, само у видљивом делу спектра. Основна јединица мере у радиометрији је ват ( $W$ ), док је основна јединица мере у фотометрији лумен ( $lm$ ) и представља снагу израчене светлости. Радиометрија има важну улогу у системима активног скенирања јер учествује у проучавању формирања слике кроз посматрање односа енергије светлости које се емитује из извора, рефлектоване о површину и оног дела светлости који је детектован од стране камере.

Могу се дефинисати и два основна појма који представљају осветљеност слике, односно снагу светлости по јединици површине у свакој тачки  $\mathbf{p}$  у равни сензора камере. Такође, могуће је дефинисати зрачење сцене по јединици површине која је идеално емитована из тачке  $\mathbf{P}$  неке површине у датом правцу  $\mathbf{r}$ . На слици 6. дата је илустрација основних радиометријских параметара – извор ласерске светлости интензитета  $I$  који се рефлектује о површину тест објекта у тачки  $\mathbf{P}$  и кроз бленду камере пролази кроз оптичко сочиво и бива детектовано сензором камере.



Слика 6. Илустрација основних радиометријских параметара

Фундаментална једначина формирања слике за активне технике скенирања дата је следећом једначином:

$$E(\mathbf{p}) = L(\mathbf{P}, \mathbf{r}) \frac{\pi}{4} \left(\frac{d}{f}\right)^2 \cos^4(\alpha) \quad (2.2)$$

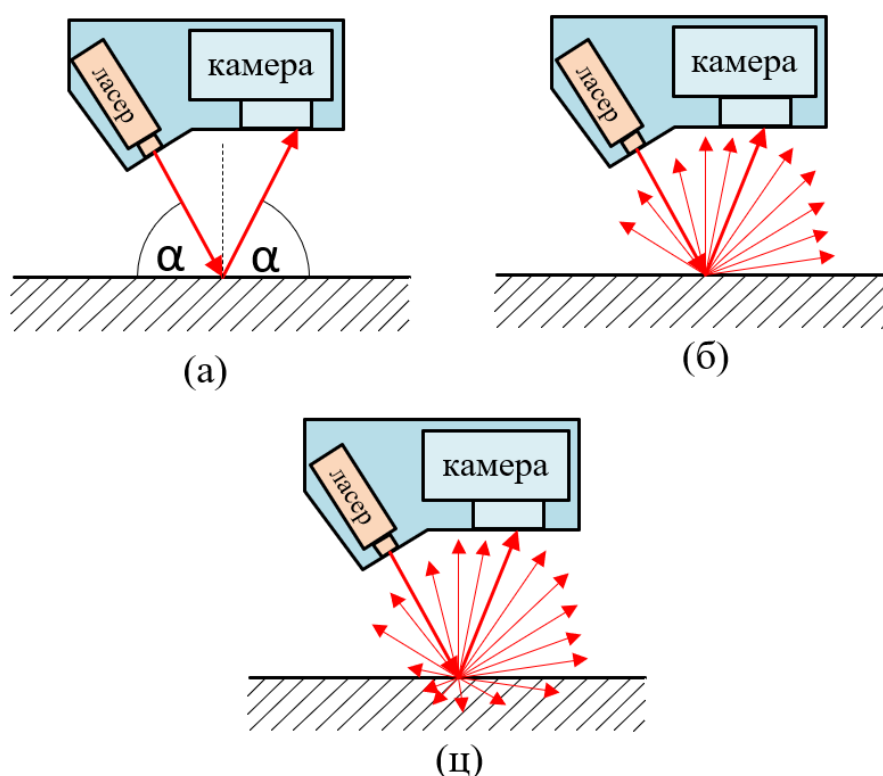
где је са  $E$  дата илуминација у тачки  $\mathbf{p}$  сензора камере, са  $L$  је означена радијанса идеалне Ламбертиан површине у тачки  $\mathbf{P}$  која се налази на површини тест објекта,  $d$  је пречник оптичког сочива,  $f$  је жижна даљина сочива, док је са  $\alpha$  дат угао између долазног зрака и оптичке осе  $n_o$  [25].

Једначина говори да илуминација слике у тачки  $\mathbf{P}$ , опада са четвртим степеном косинуса угла формираног између главног зрака и оптичке осе система. У случају малог отвора бленде камере, овај фактор је занемарљив те због тога осветљење слике се може посматрати униформно пропорционално зрачењу сцене преко целе равни сензора. Фундаментална једначина формирања слике такође укључује параметар  $\frac{d}{f}$  који се назива  $F$  број и говори колико светлости је сакупљено у камери. Уколико је број  $F$  мањи, већи део светлости долази до сензора.

Укупна енергија долазног снопа ласерске светлости, после контакта са скенираном површином се може поделити на три главне компоненте: апсорпцију, рефлексију и трансмисију. Када су у питању објекти тамне боје тада је рефлектована светлост практично једнака нули, па су такве површине тешке за скенирање. У зависности од типа скениране

површине, пре свега од материјала и боје, на ове три компоненте опадају различити проценти у односу на укупну долазну снагу светлости [26].

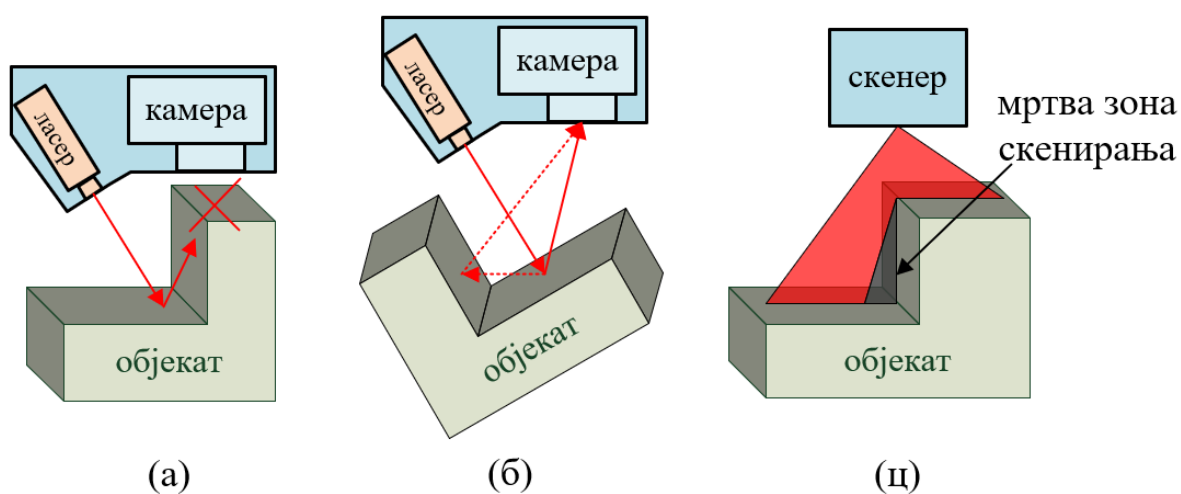
Познавање рефлективне карактеристике површине објекта који се мери је неопходно за квалитетну реконструкцију. Ако површина објекта има особине огледала, ласерска рефлексија неће доћи до камере и није могуће направити реконструкцију објекта, те је због тога неопходно да површина има делом дифузиону рефлексију. Већина површина показује комбиноване особине огледала и дифузионе рефлексије, што олакшава проблем скенирања. Осим карактеристика површине, квалитет реконструкције могу одређивати и угао под којим се камера и ласер налазе у профилном скенеру, али и таласна дужина ласерског извора светлости. Аутори [27] су се бавили испитивањем квалитета реконструкције профилног скенера са извором црвене ласерске светлости за различите боје скениране површине, угла под којим камера види рефлектовану светлост, као и за различите удаљености скенера од посматраног објекта. Најбоље резултате су постигли за мала растојања између скенера и посматраног објекта и за углове између камере и ласера мање од 55 степени.



Слика 7. Различити типови рефлексионих површина. (а) Идеална рефлексиона површина (б) Ламбертиан (ц) Транспарентна површина

На слици 7(а). је приказано како се светлост понаша у односу на идеалну рефлексиону површину. Закон рефлексије каже да је упадни угао једнак углу под којим се талас рефлектује. Када скенирана површина није глатка, односно њене неравнине по величини су упоредиве према таласној дужини ласерске светлости, настаје дифузна рефлексија и тада се таласи рефлектирају у свим правцима. Оптималан тип површине за скенирање је Ламбертиан површина са виским индексом рефлексије. На слици 7(б). је дата илустрација како се светлост понаша у контакту са Ламбертиан површинама. Такве површине имају карактеристику да без обзира на угао посматрања, рефлексија долази са истим интензитетом и у свим правцима до ока посматрача. Пример таквих површина су папир или равно дрво. На пример, материјал под називом Спектралон, који је врста пластике беле боје има највећу познату рефлектансу од било ког материјала или фарбе и представља најбољи пример Ламбертиан површине. Рефлектанса

овог материјала је преко 99% у распону таласних дужина од 400 до 1500 nm и 95% између 250 и 2500 nm [28]. Врло често се приликом тестирања алгоритама или основних функционалности профилних скенера користе равне плоче од оваквих материјала, како би се поједноставило тест окружење. На слици 7(ц) је приказано како се зрак светлости понаша када се рефлектује о транспарентну површину. Када је у питању транспарентна површина, светлост се рефлектује делом као да је у питању Ламбертиан површина, али такође улази у унутрашњост материјала до одређене дубине и онда се одатле поново рефлектује. Транспарентне површине су често срећу у нашем свакодневном окружењу - одређене врсте пластике, ткива, разне врсте силикона, одређени типови минерала или камења итд. [29]. Што је јача снага ласера, то је пенетрација светлости кроз такву средину већа. Оно што представља додатан проблем за ласерски скенер су нежељене рефлексије које настају на оваквим површинама јер их камера види као рефлексије настале у околини главног снопа. Уколико се на транспарентним површинама смањи ниво снаге којом се емитује ласерска светлост, остали извори шума постају значајни, па то одмах утиче на квалитет реконструкције објекта који се скенира.



Слика 8. Проблеми који настају са ивицама скенираних објеката у системима са профилним сензорима. (а) проблем "сенке" (б) додатне рефлексије (ц) мртва зона скенирања (означена на слици црном бојом)

Осим типа површине која се скенира, врло често проблем приликом скенирања прави и сам облик скенираног објекта. На слици 8. су дати неки од класичних проблема који се јављају у системима са профилним ласерским скенерима, а последица су природе рефлексије ласерске светлости или облика скенираног објекта. Ефекат сенке настаје када рефлексија нема директну видљивост са камером сензора (блокирана је ивицом скенираног објекта или неком другом препреком), те је није могуће детектовати и илустрована је на слици 8а. У случају када се скенирају изразито рефлективне површине може доћи до интерференце у виду додатних нежељених рефлексија које су детектоване камером, а самим тим касније и процесиране као стандардне рефлексије. Филтрирање оваквих лажних рефлексија може представљати велики изазов јер их је тешко разликовати од правих. Пример додатне рефлексије дат је на слици 8б. Проблем мртве зоне скенирања настаје када ласерска линија не може да допре до скениране површине услед препрека у виду ивица или неких других објеката. Мртва зона скенирања дата је на слици 8ц., и означена је транспарентном црном бојом [30]. Проблем мртве зоне се у пракси решава употребом више синхроних скенера који појединачно генерисани облак тачака софтверски спајају у један.

Поједини делови слике са пикселима у засићењу могу лако настати у процесима контроле квалитета РСВ плоча (*Printed Circuit Board*) приликом рефлексије ласерске светлости о површине склоне креирању ефекта ласерске мрље, као што су на пример ножице или пинови електронских компоненти (металне површине високог сјаја) [31]. Како би се побољшала тачност 3D реконструкције у таквим случајевима, може се користити HDR (*High Dynamic Range*) слика. Код HDR слика добија се значајно бољи опсег интензитета, али и детаља слике у односу на традиционалну дигиталну слику. Како би се добила HDR слика, често се користе методе комбиновања више слика са различитим временима експозиције камере. Такав приступ захтева да су сцена и камера фиксирани и то због преклапања слика у процесу креирања нове HDR слике. Због тога аутори [32] предлажу јако занимљив приступ коришћења микро дисплеја, односно LCOS (*Liquid Cristal On Silicon*) како би се смањио интензитет долазног зрака светлости и модификовао у очекивани динамички опсег камере. Практично, у таквом систему ласерска светлост долази до камере преко LCOS уређаја, који може на нивоу пиксела да динамички подешава количину светлости која стиже до камере. Коришћењем одговарајућих алгоритама могуће је направити систем који се динамички подешава на услове средине.

Приликом симулације система, без губитка општости може се претпоставити да се користи идеална Ламбертиан површина високог степена рефлексије, а да су ефекти апсорпције и трансмисије ласерске светлости занемарљиви.

Од описаних феномена који утичу на ласерску рефлексију сигурно се као главни фактори издвајају време експозиције и снага извора ласерске светлости у односу на скенирану површину. Такође као један од битних фактора издваја се ефекат ласерске мрље о којем ће бити више речи у наставку рада. Нов алгоритам који је описан у овом раду кроз симулацију моделује поменуте ефекте и даје добре резултате за случај када је ласерска рефлексија сатурисана, те на тај начин доприноси бољим резултатима скенирања.

Након рефлексије светлости од површине скенираног објекта ласерски светлосни зрак долази назад ка профилном скенеру. Осим његове рефлексије ка профилном скенеру долазе и амбијентално светло али и додатне рефлексије који заједно утичу на квалитет реконструкције. Пре него што светлост допре до камере, мора да прође кроз оптички филтар и оптику камере.

## **2.3. Оптички систем и дигитални сензор камере код профилних скенера**

### **2.3.1. Оптички систем**

Након рефлексије од мерног објекта, рефлектована ласерска светлост у систем долази преко оптичких филтара и оптичких сочива до камере. Оптички филтри заправо пропуштају светлост одређене таласне дужине и тако смањују ниво шума у систему. Постоје разне врсте оптичких филтара, па тако на пример монохроматски филтри пропуштају само узак опсег таласних дужина. Дихроични филтери омогућавају пропуштање само одређене таласне дужине док је остатак светлости рефлектован назад.

Класичан пример примене оптичких филтара код профилних скенера је у апликацијама роботизованог варења. Тада амбијентално светло има изразито јак интензитет, а осим светлости, услед високе температуре јављају се разне врсте испарења и честица које напуштају површину метала. Такође, не треба заборавити да честице прашине или дима које настају

приликом процеса заваривања метала имају већи пречник од таласне дужине видљиве светлости. На основу особина дифракције таласа, светлост таласне дужине која одговара црвеној боји лако продира кроз дим. Због тога профилни скенери који имају примену у системима заваривања користе црвени ласер таласне дужине 660 nm. Тада се користи оптички филтар пропусник опсега на улазу у систем, те се потискују таласне дужине које одговарају амбијенталном светлу, које се може сматрати извором шума. Ефективна таласна дужина филтара је између 200 и 1200 nm, при чему је трансмитанса у опсегу од 650 до 670 nm обично већа од 85 %, док је у опсегу који се блокира мања од 0.01 % [33].

Оптика камере је елемент који фокусира долазећу рефлектовану ласерску светлост на сензор камере. Модеран дизајн сочива врло често комбинује више од једног сочива у оптици камере.

Заједно, сочива и филтери у систему обликују и мењају светлост која долази до сензора камере.

Амбијентално светло може се филтрирати оптичким филтром пропусника опсега, те се неће рачунати као додатни извор шума у анализи детекције рефлексије ласерске линије.

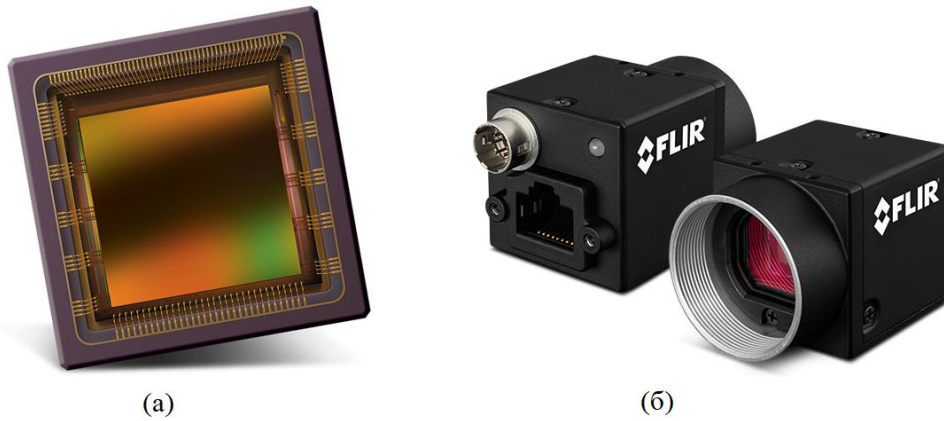
Након проласка светлости кроз оптички филтар и оптику камере, рефлектована ласерска светлост долази до сензора камере где се врши конверзија фотона у електроне а онда са аналогно дигиталним конверторима (ADC) претвара у дигитални сигнал, односно пикселе и на крају у слику коју видимо.

### 2.3.2. Дигитални сензор камере

Како би сачували и обрадили информацију рефлектоване светлости од мерног објекта, она мора бити примљена неком врстом фотодетектора. Већина модерних ласерских профилних скенера користи CCD (*Charge Coupled Device*) или CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*) сензоре. Након представљања, CCD сензори су доживели огромну експанзију, а развој дигиталне фотографије дефинитивно достиже свој максимум са развојем CMOS технологије. CCD сензори имају већу осетљивост и боље формирање слике у условима када је интензитет светлости мали, док су CMOS сензори значајно јефтинији.

У апликацијама профилних ласерских сензора користе се брзе индустријске камере са глобалним шатером (*global shutter*), односно чување свих вредности пиксела се врши у истом временском тренутку. Када су у питању профилни скенери, мерни објекат најчешће није стационаран, већ се креће на покретној индустријској траци. Некада се дешава да је сама платформа на коју је инсталиран профилни скенер покретна те се тако скенира мерни објекат, а неретко и мерни објекат и платформа на којој се налази скенер се могу кретати у истом тренутку. Управо је то разлог због којег се уместо покретног (*rolling shutter*) користи глобални шатер, како би се избегао добро познати ефекат *rolling shutter*-а на сликама.

На слици 9. је дат пример CMOS сензора AMS CMV 4000 заједно са Flir *Blackfly S* индустријском камером у коју је уграђен Sony IMX 287 сензор.



Слика 9. (а) CMOS AMS CMV4000 сензор; (б) индустријска камера Flir Blackfly S у коју је уграђен Sony IMX 287 CMOS сензор

EMVA (*European Machine Vision Association*) је покренула иницијативу како би се усагласио метод како се мере, рачунају и презентују параметри камера који се користе у апликацијама машинске визије [34]. Одабир одговарајуће камере за конкретну апликацију може представљати велики изазов, посебно када се узме у обзир да многи произвођачи дају карактеристике које се не могу поредити директно са другим произвођачима. Један од главних циљева EMVA је да поједностави одабир камере и смањи трошкове, јер се избегава скуп процес мерења и поређења резултата између различитих произвођача. Стандардни параметри камере су обавезни да се наведу као податак дат од стране произвођача. То су на пример осетљивост, временски променљив шум, линеарност одзива, број дефектних пиксела, цурење тамне струје камере и други. Могуће је пронаћи поређење две камере различитих произвођача на основу EMVA стандарда:

Табела 1. Поређење две CMOS камере на основу EMVA

	Sony IMX273	CMOSiS CMV4000
Тип сензора	CMOS	CMOS
Тип шатера	Global	Global
Резолуција	1440 × 1080	2048 × 2048
Величина пиксела [ $\mu\text{m}$ ]	3.45	5.50
Величина сензора ["]	1/2.9	1
Quantum Efficiency [%]	63	62
Dark Noise [ $e^-$ ]	7	14
Капацитет сатурације [Ke $^-$ ]	10.5	12.4
Динамички опсег [dB]	71	59
Максималан SNR [dB]	40	41

Величина пиксела има директан утицај на алгоритам квантизације те на тај начин утиче на тачност 3D реконструкције. Величина пиксела има одређена ограничења, па тако када пиксел има мању величину, тачност реконструкције се повећава, али се са друге стране смањује квалитет слике са камере због мањег SNR односа [35]. Резолуција је такође један од битних фактора приликом избора сензора камере, јер утиче на видно поље профилног скенера. Физичка величина сензора ће пре свега зависити од величине пиксела и резолуције камере и има значајну улогу приликом конструкције механичко-оптичког дела система.

Квантна ефикасност сензора камере представља однос између броја примљених фотона и дела фотона конвертованих у електроне и заправо представља сензитивност камере. Квантна ефикасност од 63 % из табеле 1, за Sony IMX273 сензор заправо говори да од 100 фотона који дођу на површину пиксела произведе 63 електрона које касније пиксел претвара у напон.

Шум тамне струје (*Dark Noise*) је врста шума који настаје због температуре и физичких карактеристика електрона који се спонтано ослобађају и крећу у виду струје, чак и када нема долазних фотона на површини пиксела. О овом шуму ће бити више речи у наставку рада.

Капацитет сатурације представља количину наелектрисања коју пиксел камере може да прими пре сатурације. Зависи од величине пиксела, као и радних напона камере. Наравно, боље камере имају већи капацитет сатурације.

Максимални SNR камере је уско повезан са капацитетом сатурације. Произвођачи камера га најчешће дају у dB, израженог преко квадратног корена капацитета сатурације.

Динамички опсег слике ( $D_R$ ) се односи на однос између највеће вредности интензитета пиксела и најмање вредности пиксела. Обично се изражава у dB и представља однос максималног ( $I_{max}$ ) и минималног ( $I_{min}$ ) интензитета на слици. Динамички опсег слике дат је следећом једначином:

$$D_R = 20 \log \left( \frac{I_{max}}{I_{min}} \right) \quad (2.3)$$

Наравно, у табели 1. дати су само неки од основних параметара камере.

У начелу 3D скенери имају доста сличности са камерама које прикупљају информацију о боји окружења у којем се налазе, док скенери прикупљају информацију о даљини објеката. Као и већина камера, профилни скенери имају ограничено видно поље и могу прикупити информације само о објектима који имају директну линију видљивости са оптичким сензором. Занимљиво је да се већ сада могу пронаћи први прототипови камера које имају интегрисане функционалности лидара, тј. осим интензитета сцене могу за сваки од пиксела дати и дубину, односно удаљеност пиксела од места рефлексије [36].

Како би се на прави начин одредила дубина посматране сцене, неопходно је компензовати све дисторзије које у систем уноси оптички део система. Овај процес се назива калибрација камере (скенера) јер се оптички део система врло често сматра саставним делом камере.

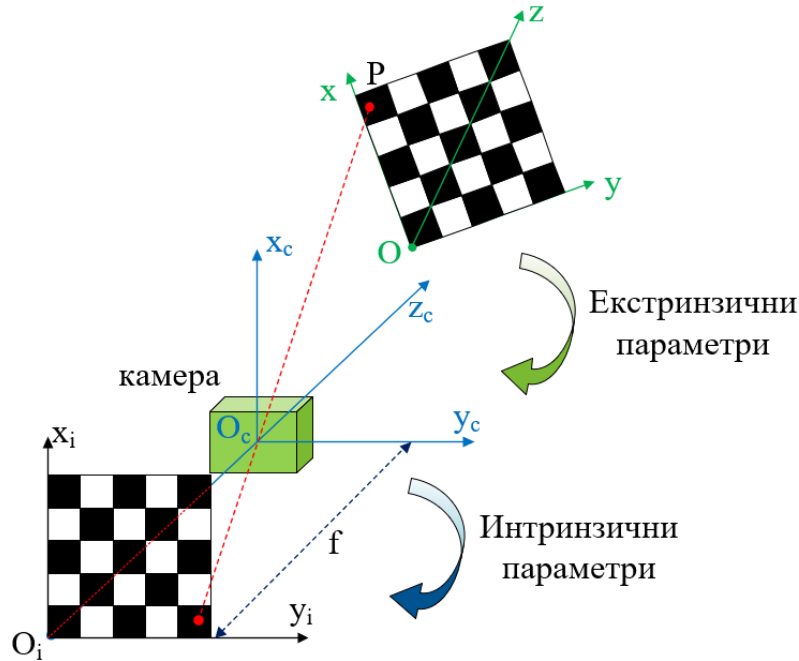
### 2.3.3. Калибрација камере, екстринзични и интринзични параметри система

Приликом калибрације камере најчешће се полази од једноставног модела идеалне камере (*pinhole* модел камере) која нема сочиво и не разматра проблем дисторзије које сочиво уноси у систем. Пре калибрације изобличења самог сочива камере неопходно је наћи одговарајуће релације које пресликавају простор камере у простор слике.

Излаз алгоритма калибрације камере су матрице трансформације које врше транслацију, ротацију и корекцију једног координатног система у други. Конкретно у случају ласерских профилних скенера врши се транслација координата мерног простора у координатни систем равни слике како би се одредило тачно растојање камере од мерног



објекта. Алгоритам калибрације модела идеалне камере даје екстринзичне и интринзичне параметре система. Екстринзични параметри система подразумевају трансформацију 3D координатног система мерног простора у 3D координатни систем камере, док интринзични параметри система подразумевају трансформацију 3D координатног система камере у 2D систем равни слике (пиксела). На слици 10. дат је упрошћен приказ калибрације модела идеалне камере.



Слика 10. *Pinhole* модел камере са параметрима калибрације

Нека су са  $(x, y, z)$  означене координате било које тачке  $P$  координатног система мерног простора, која је видљива камери из фиксног референтног система (на слици 8. означене црвеном тачком) и нека су са  $(x_c, y_c, z_c)$  означене координате исте тачке у координатном систему камере. Као што је приказано на слици 10. почетак координатног система камере је коинцидентан са оптичким центром камере и  $z_c$  оса је коинцидентна са оптичким осама. Раван слике се подразумева да је паралелна са осама камере и налази се на растојању  $f$  од координатног почетка, где је са  $f$  дата жижна даљина сочива. Релација између координата мерног простора и координатног система где се центар камере налази у координатном почетку, дата је следећом једначином:

$$\begin{pmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{pmatrix} = \mathbf{R} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} + \mathbf{T} \quad (2.4)$$

где је са  $\mathbf{R}=(r_{i,j})$  означена матрица димензије  $3 \times 3$  и представља матрицу ротације (оријентације камере) док је са  $\mathbf{T} = (t_1, t_2, t_3)$  представљен вектор транслације који дефинише позицију камере. Ова два параметра се једним именом називају екстринзични параметри камере.

Координатни систем равни слике је дат са  $O_i$  док су са  $x_i, y_i$  означене осе одабране тако да буду паралелне са осама камере  $x_c$  и  $y_c$ . Тада су координате тачке  $P$  у равни слике дефинисане са:

$$x_i = \frac{f x_c}{z_c}; \quad y_i = \frac{f y_c}{z_c} \quad (2.5)$$

Уколико се претходне једначине искомбујују, добија се однос позиције пиксела, координата сцене и параметара калибрације које треба одредити:

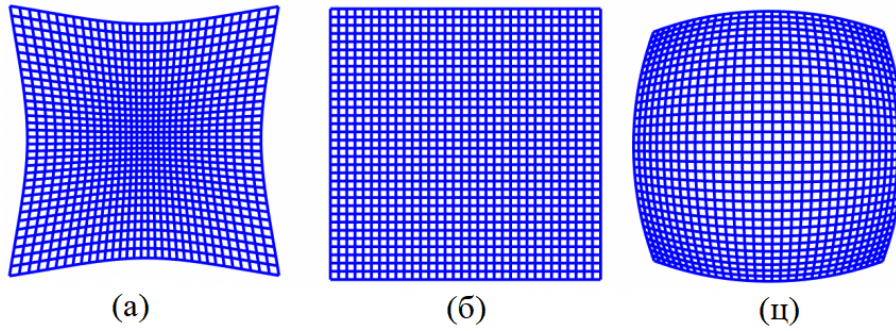
$$\begin{aligned}\frac{x_i}{f} &= \frac{r_{1,1}x + r_{1,2}y + r_{1,3}z + t_1}{r_{3,1}x + r_{3,2}y + r_{3,3}z + t_3} = x_n \\ \frac{y_i}{f} &= \frac{r_{2,1}x + r_{2,2}y + r_{2,3}z + t_2}{r_{3,1}x + r_{3,2}y + r_{3,3}z + t_3} = y_n\end{aligned}\tag{2.6}$$

где су са  $x_n$  и  $y_n$  дефинисане координате у нормализованој равни слике која се налази на  $z = 1$  и  $f_u = s_u f$  и  $f_v = s_v f$  које се називају жижна даљина колоне и жижна даљина врсте слике.

На основу довољног броја координата мерног простора  $(x_k, y_k, z_k)$  чија се тачна позиција зна са великом прецизношћу, при чему је  $k = 1..N$  ( $N$  је број калибрационих слика), могуће је естимирати екстринзичне и интринзичне параметре система [37].

Како би се добила реална калибрација камере у обзир је неопходно узети и разне врсте дисторзија које у систем уносе оптичка сочива. За ту потребу су развијени разни модели који описују утицај дисторзије сочива, а најпознатији је *Fisheye* модел камере за широкоугаона сочива.

Сочива која се користе у оптичким системима нису идеална и уносе дисторзију у светлосне зраке који путују од посматраног објекта. Неке од ефеката који се на слици могу видети су замућење, промене боје или разне геометријске дисторзије и једним именом се називају оптичке аберације. Замућење слике се може моделовати са одсецањем високо фреквентних компоненти из Фуријеовог спектра слике, које може бити апроксимирано филтром пропусником високих учестаности. Абериације се могу поделити на сферне, кома, астигматизам, хроматске и геометријске дисторзије [38]. Сферне абериације настају због облика сочива, односно због чињенице да зрак који пролази кроз сочиво ближе центру се фокусира даље у односу на зрак који пролази кроз обод сочива. Кома абериације настају када објекат не лежи на оптичкој оси, па се приликом проласка кроз различите делове сочива светлост прелама различито. То доводи до ефекта издуживања слике које подсећа на реп комете (због тога ова абериација и носи име кома). Астигматизам настаје када оптички систем има различит фокус за зраке који се простиру у две нормалне равни у односу на сочиво (ако се такав систем користи како би се формирала слика крста, вертикална и хоризонтална линија ће имати две различите тачке фокуса). Хроматске абериације настају када сочиво не може да фокусира све боје светлости у једну тачку. Због чињенице да је индекс рефракције мањи како се крећемо према црвеном делу спектра, жижна даљина сочива у ваздуху ће бити већа за црвену него за плаву светлост. У апликацијама профилних ласерских скенера, се најчешће користе монохроматске камере тако да се хроматске абериације могу занемарити. Такође, сферне, абериације астигматизма и кома ефекта се могу предупредити у процесу дизајнирања сочива, тако да се и оне могу искључити из даљег посматрања. За системе машинске визије базиране на дигиталним камерама, велики утицај на мерење имају геометријске абериације [39]. Оне настају приликом промене упадног угла снопа светлости, па се због промене тачке жижне даљине, ивице објекта могу видети под већим или мањим увећањем у односу на слику објекта која је формирана централним делом сочива (тада се добија параболоидна површина која се назива *Petzval* површина). Геометријске абериације се могу поделити на радијане и тангенцијалне. Радијална геометријска абериација може бити позитивна и негативна. У случају када је позитивна онда се линије слике шире од центра и долази до увећања слике, док када је негативна онда се линије слике скупљају ка центру и слика се смањује. Оба примера радијалне абериације дати су на слици 11.



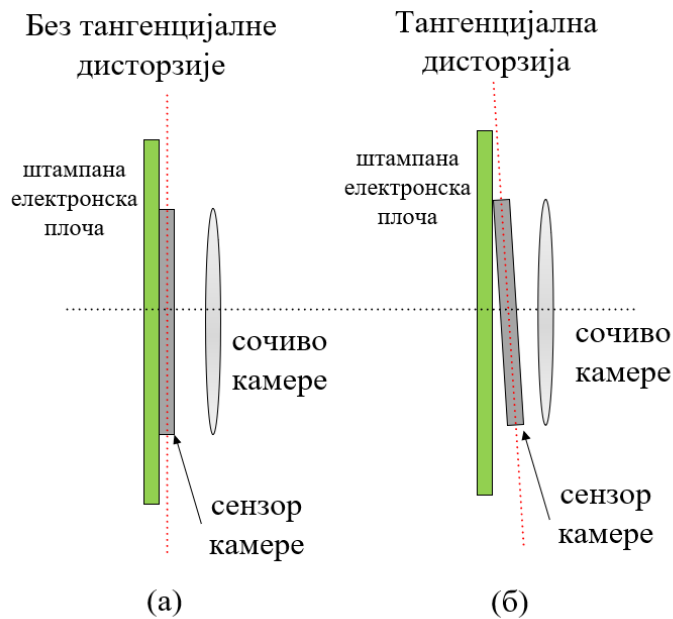
Слика 11. *Врсте радијалних геометријских аберација. (а) негативна радијална аберација (б) слика без геометријске аберације (ц) позитивна радијална аберација*

Једначине које описују радијалну дисторзију су дате следећим изразима:

$$\begin{aligned} x_d &= x(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \\ y_d &= y(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \end{aligned} \quad (2.7)$$

где су са  $x, y$  означене недисторзоване локације пиксела и имају вредности у нормализованој равни слике.  $k_1, k_2$  и  $k_3$  су коефицијенти радијалне дисторзије сочива, док је вредност  $r$  дата са  $r^2 = x^2 + y^2$ . За калибрацију камере су најчешће довољна само два коефицијента  $k_1, k_2$ , док у посебним случајевима (као што су широкоугаона сочива) укључују и коефицијенте вишег реда.

Тангенцијална дисторзија настаје када раван слике и раван сочива нису паралелне. Илустрација тангенцијалне дисторзије дата је на слици 12:



Слика 12. *Илустрација узрока тангенцијалних дисторзија*

Тангенцијални коефицијенти који су изражени следећим једначинама компензују овај вид дисторзије.

$$\begin{aligned} x_t &= x + [2p_1 xy + p_2(r^2 + 2x^2)] \\ y_t &= y + [p_1(r^2 + 2y^2)xy + 2p_2 xy] \end{aligned} \quad (2.8)$$

где су са  $x, y$  означене недисторзоване локације пиксела, као у случају радијалне дисторзије. Са  $p_1$  и  $p_2$  дати су коефицијенти тангенцијалне дисторзије сочива, а  $r$  је дефинисано на исти начин као и за радијалну дисторзију [40, 41, 42].

Тачност 3D реконструкције зависи од многих фактора, не само од екстракције центра ласерске рефлексије. Калибрација камере се издваја као најважнији фактор, али и величина сензора, резолуција камере, ширина отвора бленде, као и њено видно поље утичу на процену тачности скенера. За калибрацију (али и процену тачности алгоритама који врше обраду слике и сигнала на скенеру), врло често се користе мерни објекти (слике) са калибрисаним димензијама велике тачности које су врло често за ред величине веће него што је крајња очекивана тачност система.

Приликом калибрације скенера, као тест објекат врло често се користе керамичке сфере, са врло прецизно измереним пречницима и познатим одступањима [43]. Керамичке сфере се користе за проверу тачности реконструкције скенера, јер током времена њихова површина не кородира и нема потребе да се третира заштитним средствима која се врло тешко наносе на површину са тачном дебљином слоја. Наравно, за скенере различитих радних растојања користе се керамичке сфере различитих пречника.

Крајњи резултат калибрације камере и оптике су калибрационе матрице које елиминишу нелинеарна изобличења и одређују коефицијенте пресликавања 3D у 2D простор. Процес калибрације камере и оптичких сочива је добро познат и није од посебног интереса за даље истраживање у раду, међутим треба имати у виду да процес калибрације података са скенера може представљати рачунски захтевне операције које могу заузимати значајну количину ресурса на наменској платформи. Улазни подаци за калибрацију су координате естимиране позиције ласерске рефлексије. Због динамичког опсега коефицијената калибрације, мора се користити аритметика са покретном тачком. Уколико се користе FPGA уређаји за обраду сигнала са сензора камере, оваква аритметика захтева значајно већу количину ресурса него у случају када се користи аритметика са фиксном тачком.

#### **2.4. Извори и типови шума који се јављају у систему профилног ласерског скенера**

Видљивост рефлексије ласерске светлости од површине (уколико се посматра људским оком или неким другим детектором) зависи од односа сигнал шум (SNR), који представља однос снаге ласера и снаге амбијенталног светла. Наравно, већи SNR однос значи да је лакше детектовати ласерску светлост. У апликацијама визуелне инспекције, што је таласна дужина светлости ближа 550 nm, то је њена рефлексија сјајнија.

Временски зависан шум (*temporal noise*) обједињује све изворе шума који имају утицај на тренутну вредност пиксела (разликује се од слике до слике). Временски променљив шум се састоји од шума фотона, шума тамне струје, шума читавања вредности пиксела и шума квантизације. Временски променљив шум је доминантан шум који се јавља код камера.

Шум фотона настаје услед саме природе светлости и настаје услед чињенице да флуks фотона који погоди пиксел нема униформну расподелу. Још се назива и шумом сачме. Овај шум одређује и максималан однос сигнал шум који камера може да постигне и случајне је природе а посебно је приметан у условима када је сигнал рефлексије слаб.

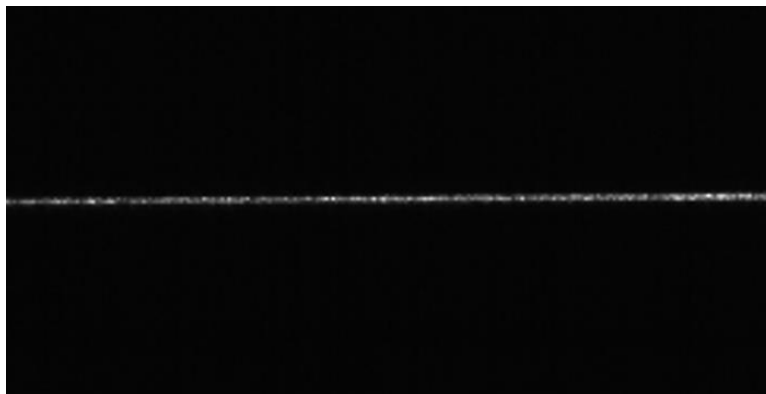
Шум тамне струје стварају електрони који се појављују кроз термичке процесе у пикселу камере. Број електрона се повећава са повећањем времена излагања и температуре. Такође се повећава са мањом брзином читања. Линеарно расте са температуром. Овај шум је независан од нивоа детектованог сигнала.

Шум читања се јавља када се наелектрисање (електрони) претвара у напон (за CCD сензоре такође када се наелектрисање преноси кроз регистре померања или пикселе). Обично због чвршће повезане путање пиксела и AD конвертора у CMOS сензорима, овај извор шума је знатно нижи у CMOS камерама у поређењу са CCD.

Шум квантизације је последица несавршености AD конвертора. Из овог разлога имамо и скупе и јефтине камере које користе исти сензор.

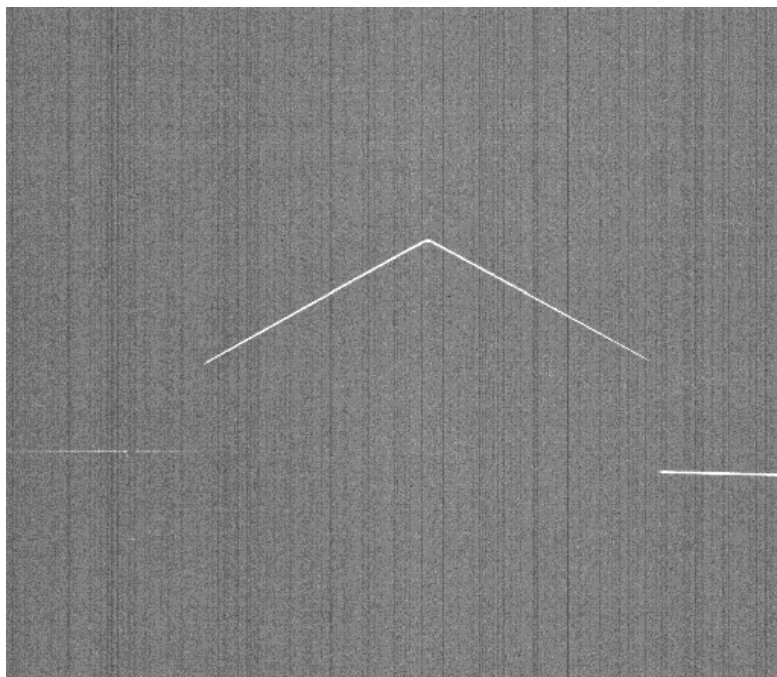
Амбијентално светло или амбијентални шум такође значајно утиче на квалитет детекције ласерске рефлексије на слици, а самим тим, касније и на 3D реконструкцију. Постоје два приступа у сузбијању амбијенталног шума – филтрирање на основу таласне дужине и синхронизација извора ласерске светлости са глобалним отвором камере (временско филтрирање). Када се користи филтрирање амбијенталног светла довољно је да се користи 20nm филтар пропусник опсега, чија централна фреквенција зависи од таласне дужине употребљеног ласера, како би се смањио флукс долазног светла [44].

У стандардним камерама најугицајнији шум има Гаусову дистрибуцију, која је последица *point spread function* (PSF). PSF описује одзив камере на тачкасти извор светлости, услед несавршености сочива и дигитализације сигнала. Три извора шума утичу на квалитет 3D реконструкције: електрични шум, шум квантизације, као и шум ласерске мрље (*speckle noise*). Последњи извор шума је директно повезан са природом ласерске светлости, док су остала два повезана са камером. Електрични и квантизациони шум су врло значајни када је SNR однос низак, односно када је снага ласерске линије мала. Шум ласерске мрље настаје као последица феномена интерференције таласа. Светлосни таласи излазе из ласера кохерентно, међутим, када ласерска светлост удари у грубу површину, одлазни таласи постану растурени, а фазе ових растурених таласа могу бити поравнате или не. На местима где се фазе подударују, таласи се додају или интерферирају конструктивно, стварајући светла места. На другим местима, светлосни таласи могу бити уништени или интерферирати деструктивно, стварајући тамна места. Ова светла и тамна места заједно се називају ласерском мрљом. Шум ласерске мрље настаје због упоредиве таласне дужине светлости у поређењу са неравнинама на посматраној површини од које се светлост рефлектује. Већина површина, синтетичких или природних, је изузетно груба на скали таласне дужине. Електрични шум, шум квантизације, као и шум ласерске мрље, се заједно комбинују и чине да посматрач види конструктивне и деструктивне интерференције унутар ласерске линије [45, 46]. Пример слике са ласерског профилног скенера на којем се јасно може видети ефекат шума ласерске мрље дат је на слици 13.



Слика 13. Шум ласерске мрље на слици са камере профилног ласерског скенера.

Хомогеност ласерске линије која је усмерена на дифузиону рефлективну површину објекта је поремећена због ефекта шума ласерске мрље, који је заправо ефекат вишеструке интерференције на храпавим површинама. Интензитет који би требало да одговара центру ласерске линије је латерално размештен у односу на осе снопа на стохастички начин и тако утиче на тачност мерења. Ефекат ласерске мрље се може избећи коришћењем извора светлости мале кохеренције, као што је на пример супер-луминесцентна диода.

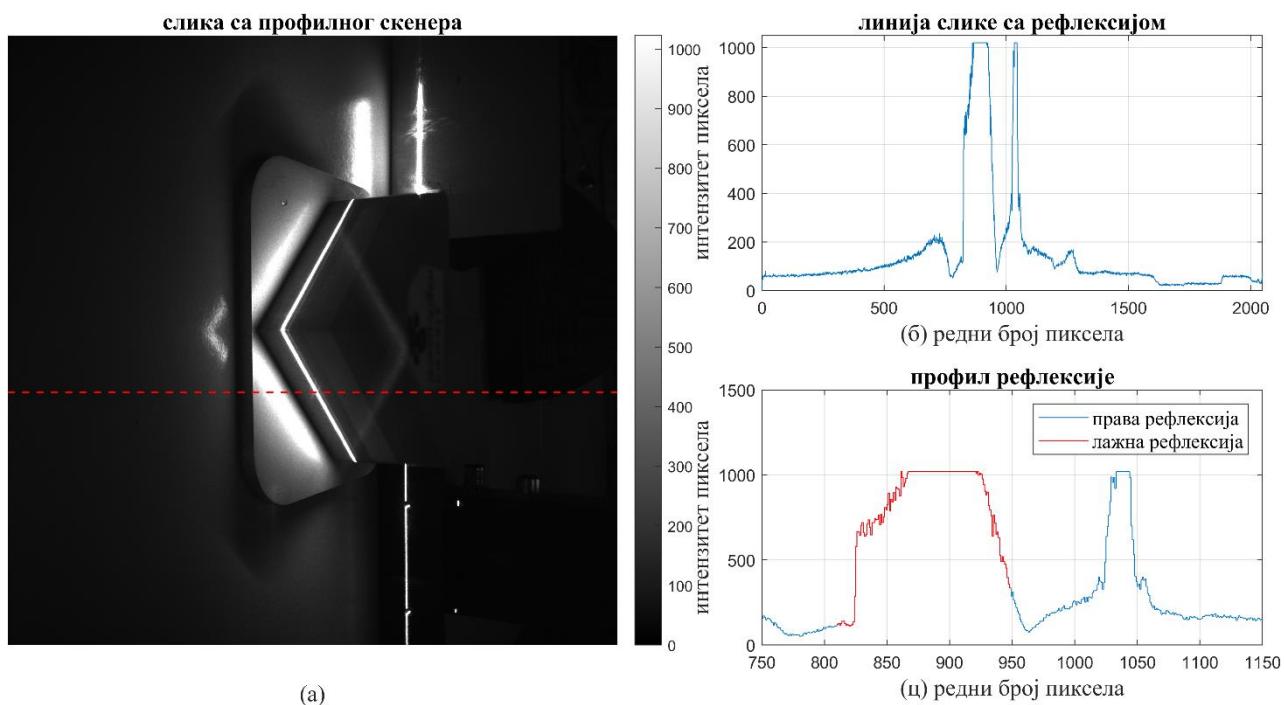


Слика 14. FPN шум CMOS камере. На слици се јасно могу уочити вертикалне линије које представљају FPN шум.

Извори просторног шума (*Spatial noise*), или чешће фиксног шума FPN (*Fixed Pattern Noise*) се могу објаснити кроз постојање структуралних неуниформности пиксела, односно могућности пиксела да акумулирају различите вредности интензитета сигнала. Такве варијације имају фиксно понашање, али су насумично дистрибуиране између пиксела. У зависности од архитектуре чипа дигиталне камере, пиксели се читавају или по врстама или по колонама (односно или хоризонтално или вертикално), тако да се овај шум јавља или као шум врсте или шум колоне и то као мала промена у интензитету слике. Модрне CMOS камере се обично састоје од мноштва ADC који побољшавају време читавања слике, те свака разлика у појачању и биас-у коришћених ADC оставља траг у виду FPN-а на примљеним сликама. FPN шум се може поделити на два дела. Први је FPN шум пиксела, а други се назива FPN шум колоне који има далеко већи утицај него случајни шум. На слици 14. дат је пример слике добијене са профилног скенера на којој се јасно може уочити FPN шум. У овом случају ради се о FPN шуму колоне слике, при чему се лако могу приметити вертикалне тамне линије. Како би се јасно видели ефекти FPN шума, слика је додатно обрађена у MATLAB-у где је хистограм слике промењен.

Количина FPN шума који настаје на камери може се успешно смањити побољшањем хардверског дизајна камере, међутим таква решења су пре свега тешка за имплементацију а самим тим и врло скупа, посебно када се ради о брзим индустријским камерама. Алтернативно, FPN шум се може успешно филтрирати у дигиталном домену након аквизиције слике. Иако се сматра да је FPN шум фиксан, он је јединствен за сваку камеру и мења се током времена услед експлоатације и хабања сензора. Коришћењем одговарајућих алгорита могуће је смањити ефекте FPN шума који се развијају током времена [47].

Генерално постоје три типа дигиталних метода за филтрирање и смањење утицаја FPN шума и то су методе базиране на калибрацији, статистици и оне које узимају у обзир сцену околине. Од набројаних метода, најчешће се користи метода калибрације камере, због своје једноставности, али и високе тачности отклањања шума и једноставне имплементације [48]. Метода калибрације подразумева да се на камери направи потпуно тамна слика, са минималним временом експозиције камере, са истим појачањем и температуром сензора на којој ће уређај бити коришћен. Касније у току рада неопходно је ову слику одузети од слике која долази са сензора камера. Најважнији моменат у току калибрације на FPN шум је да слика камере буде у потпуности тамна, односно да до сензора камере не долази амбијентална светлост.

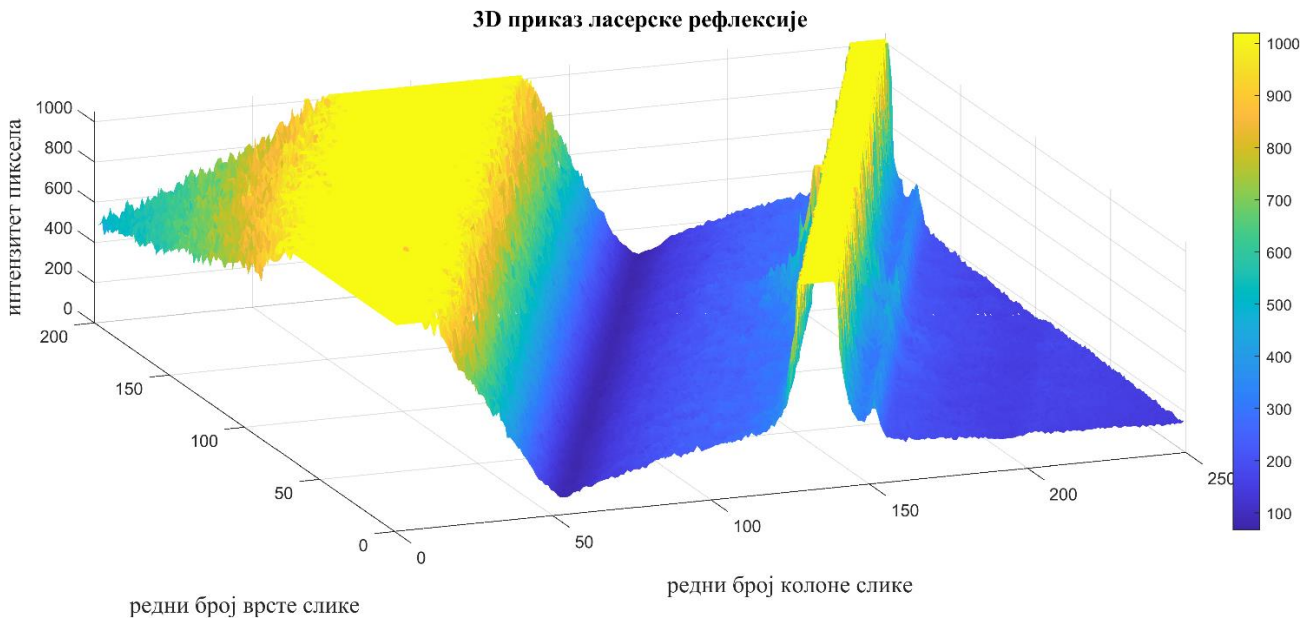


Слика 15. (а) Пример слике у пуној резолуцији на којима се види изражен проблем лажне рефлексије, сатурирана рефлексија и шум ласерске мрље. (б) једна линија слике на којој је приказана ласерска рефлексија (ц) једна линија слике, околина детектоване рефлексије.

Лажне рефлексије су још један велики проблем у 3D реконструкцији и најчешће се јављају у скенирању сјајних металних површина. Рефлектована светлост од циљаног дела може осветлити неке друге делове површине. Ове нежељене рефлексије могу заварати алгоритам за рачунање даљине, те се у том случају добијају погрешне вредности. На слици 15а. дат је пример слике добијене са ласерског профилног скенера на којој се јасно могу уочити вишеструки проблеми са којима се алгоритми за обраду слике и естимацију позиције сусрећу. У горњем делу слике, јасно се може уочити шум ласерске мрље. Практично целом дужином ласерске линије постоји проблем додатне лажне рефлексије, као и сатурације ласерске рефлексије. Црвена испрекидана линија означава једну линију слике која је приказана као једнодимензионални сигнал приказан на сликама 15б. и 15ц. На слици 15ц. је дат профил ласерске рефлексије заједно са лажном рефлексијом која је означена црвеном бојом.

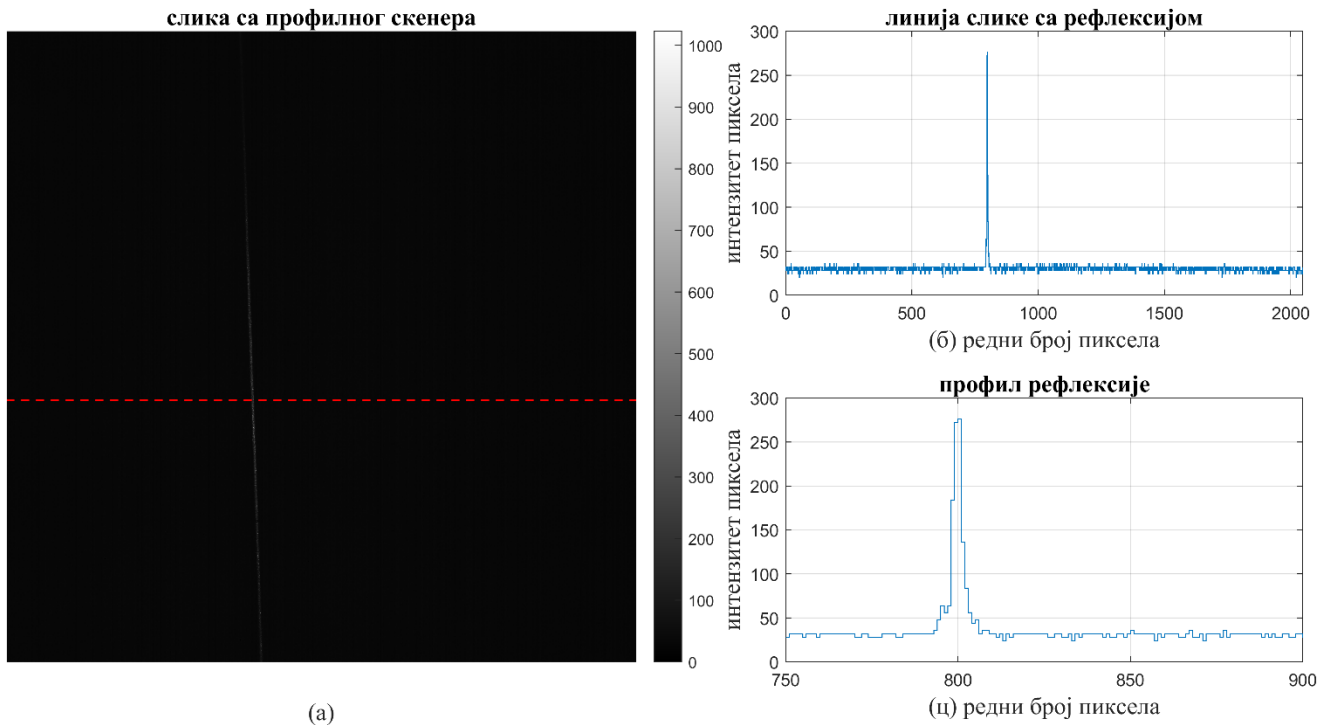
На слици 16. дат је тродимензионални приказ слике где је трећа димензија слике заправо интензитет пиксела. Лако је уочљиво да је лажна рефлексија заправо доминантна и да маскира детекцију праве ласерске рефлексије.





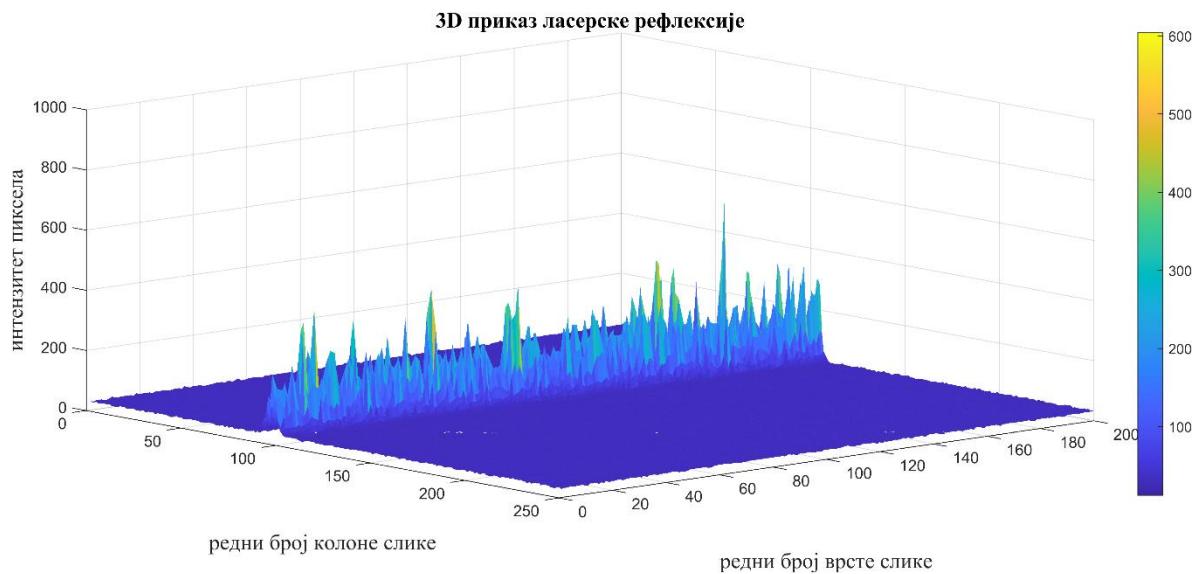
Слика 16. Тродимензионални приказ претходне слике на којој се види проблем лажне рефлексије.

На сликама 17. и 18. дати су примери ласерских рефлексија код којих је SNR однос мали, па се може уочити да ласерска рефлексија има интензитет упоредив са интензитетом амбијенталног светла, као и осталих нежељених извора шума у систему. Посебно је изражено да максимум интензитета ласерске рефлексије има велику флукуацију, што ће сигурно довести до веће грешке у естимацији позиције.



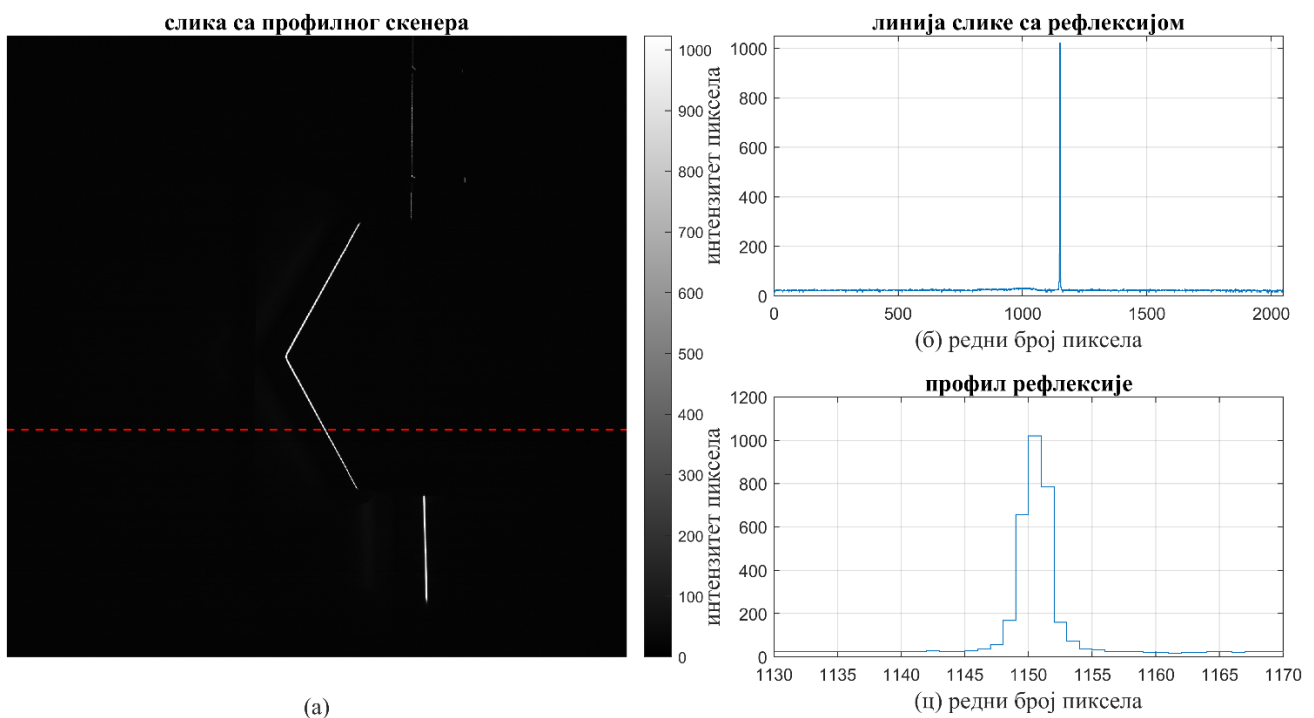
Слика 17. Пример слике у пуној резолуцији на којој се види мали интензитет ласерске рефлексије услед недовољне снаге ласера или времена експозиције (SNR однос) (а) слика са профилног скенера, (б) једна линија слике означена црвеном линијом на слици (а). (ц) врх ласерске рефлексије.



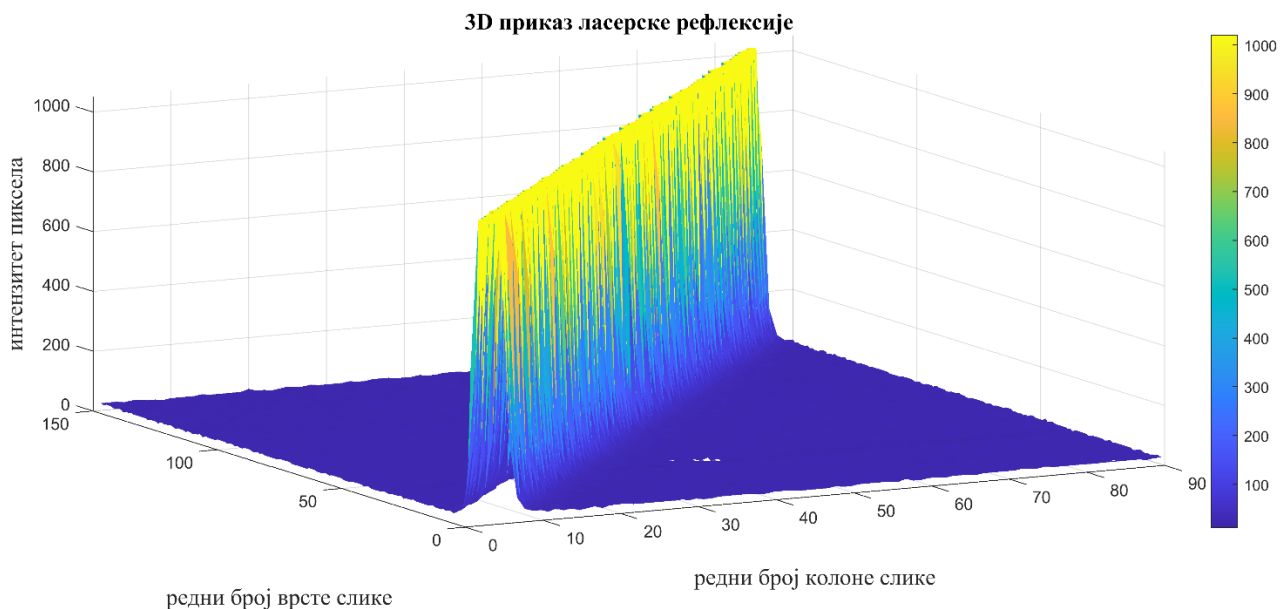


Слика 18. Тродимензионални приказ ласерске рефлексије када интензитет пиксела није довољан

На сликама 19. и 20. дат је пример ласерске рефлексије од Ламбертиан површине, која је скоро идеална и на којој се јасно уочава Гаусов профил интензитета ласерске светлости. Јасно је уочљиво да је интензитет ласерске рефлексије далеко већи од интензитета свих осталих извора шума и њен облик подсећа на Диракову делта функцију.



Слика 19. Пример слике на којој се види ласерска рефлексија са сачуваним Гаусовим профилном.

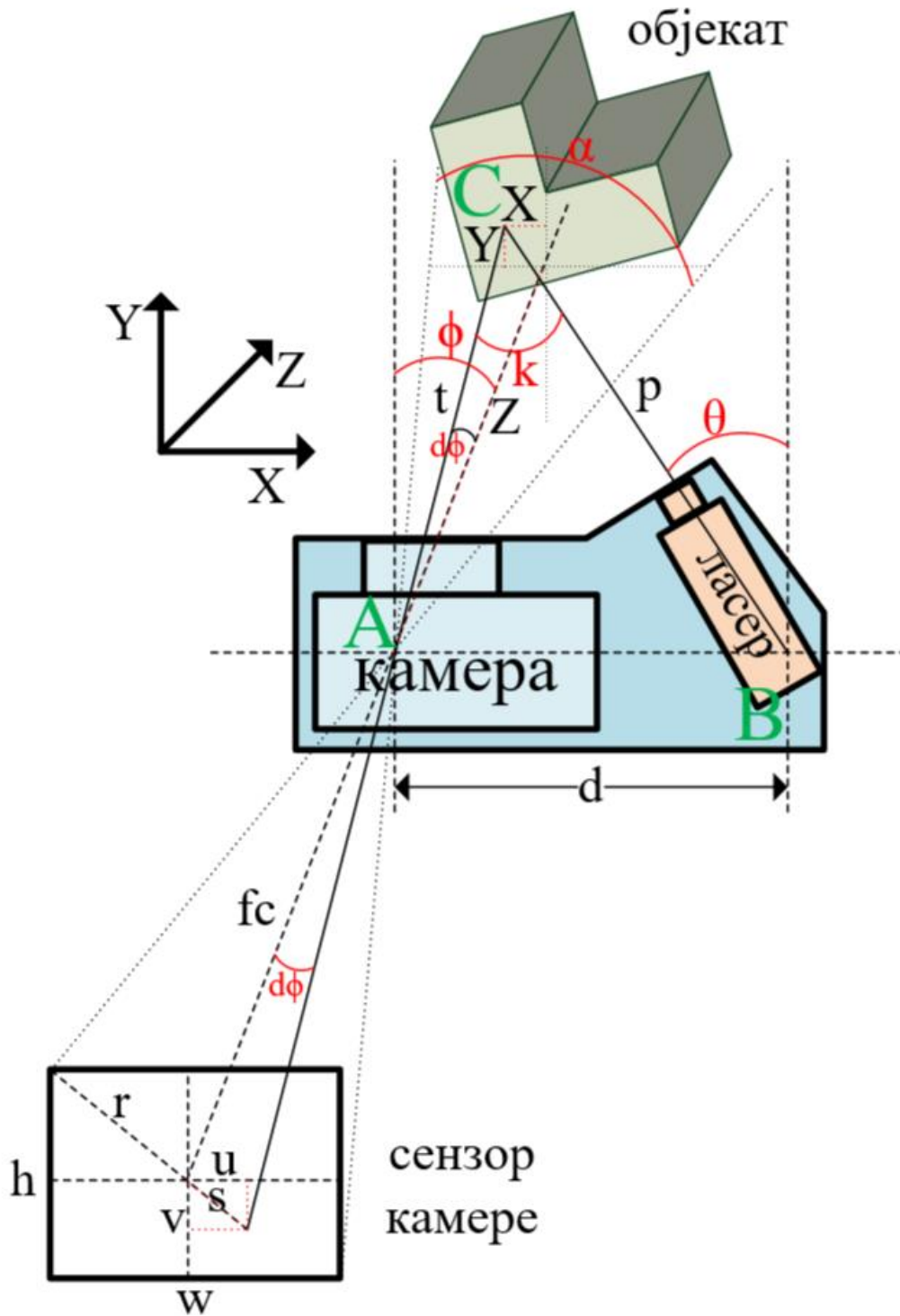


Слика 20. Тродимензионални приказ детектоване ласерске линије када она има Гаусов профил

Са слика је интуитивно јасно да када су параметри система правилно подешени детекција ласерске рефлексије и естимација њене позиције не представљају велики проблем, јер Гаусов профил је очуван па се чак и са базичним алгоритмима могу лако добити тражене информације. Наравно, у пракси то није случај, већ се врло често дешава да на истој слици постоје региони од оних са недовољним интензитетом, па све до сатурисаних рефлексија. Рефлексије које имају мали SNR такође представљају проблем за себе када је у питању естимација позиције. У овом раду акценат истраживања је стављен на другу страну, односно на рефлексије код којих је врх одсечен и где је услед велике ширине тешко дати естимацију њене позиције. Предложени алгоритам у овом раду треба да на једноставан начин додатним филтрирањем сигнала помогне у естимацији позиције таквих рефлексија.

## 2.5. Триангулација

Три основна елемента сваког система у којима се користи ласерски скенер су камера, извор ласерске светлости и објекат над којим се врши мерење. Управо те три компоненте формирају темења троугла где су два темења позната (камера и ласер), док је треће теме троугла непознато и представља удаљеност објекта од скенера, односно камере. Користећи синусни закон о троуглу, као и основне тригонометријске законе, могуће је израчунати непознату удаљеност објекта од камере. На слици 21. је представљен процес триангулације непознате тачке у 3D простору.



Слика 21. Процес триангулације за непознату тачку у 3D простору. [49]

Темена троугла су означена са  $A$ ,  $B$  и  $C$ , при чему  $A$  одговара камери,  $B$  одговара ласерском модулу, док је са  $C$  означена непозната тачка у 3D простору чије је растојање до камере неопходно израчунати. Одговарајуће стране троугла су означене са  $d$  ( $AB$ ) и представља растојање камере и ласерског модула,  $t$  ( $AC$ ) растојање од камере до скенираног објекта и са  $p$  ( $BC$ ) растојање од ласерског модула до скенираног објекта. Црвеном бојом су означени одговарајући углови:  $\alpha$  означава видно поље камере (*Field of View* - FOV),  $\theta$  је угао

између снопа ласерске линије и вертикале у односу на раван камера – ласер. Са  $\phi$  је означен угао између рефлектованог снопа који улази у камеру и вертикале у односу на раван камера-ласер. Са  $\kappa$  је означен угао између долазног и одлазног снопа (рефлектованог) ласерске линије. У овом случају се ласерски снап посматра као тачкасти извор, бесконачно уске ширине ласерског снопа. Са  $d\phi$  је означен угао детекције. Од осталих битних параметара за триангулацију ту се налазе  $f_c$  који представља жижну даљину сочива које се користи у систему. Са  $h$  и  $w$  су означени ширина и дужина сензора камере. Ова два параметра заправо представљају резолуцију камере. Са  $2r$  је означена дијагонала сензора камере, док је са  $s$  означено растојање рефлектованог ласерског снопа од центра сензора. Познати параметри система су угао гледања камере ( $\alpha$ ), резолуција камере ( $x$  и  $w$ ), као и угао под којима се налази камера и ласерски модул ( $\phi$  и  $\theta$ ), као и њихово међусобно растојање ( $d$ ) [50]. Тада се за жижну даљину камере могу извести следеће једначине:

$$\begin{aligned}\tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) &= \frac{r}{f_c} \\ (2r)^2 &= w^2 + h^2\end{aligned}\tag{2.9}$$

Одакле следи да је:

$$f_c = \frac{\sqrt{w^2 + h^2}}{2 \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)}\tag{2.10}$$

Триангулација је заснована на синусној теореми троугла, која каже да за сваки троугао са страницама  $a$ ,  $b$ ,  $c$  и угловима  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$  који се налазе насупрам тих страница, важи следећа једнакост:

$$\frac{a}{\sin(\alpha)} = \frac{b}{\sin(\beta)} = \frac{c}{\sin(\gamma)} = 2R\tag{2.11}$$

где је  $R$  полупречник описаног круга око датог троугла. Када у једначину 2.11 убацимо параметре посматраног система, она постаје:

$$\begin{aligned}\frac{d}{\sin(k)} &= \frac{p}{\sin\left(\frac{\pi}{2} - \phi + d\phi\right)} = \frac{t}{\sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right)} = 2R \\ k &= \pi - \left(\frac{\pi}{2} - \phi + d\phi\right) - \left(\frac{\pi}{2} - \theta\right) = \phi + \theta - d\phi\end{aligned}\tag{2.12}$$

Одакле се може закључити да је непознато растојање објекта од камере дато са:

$$t = d \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right)}{\sin(\phi + \theta - d\phi)}\tag{2.13}$$

У овој једначини једина променљива која је непозната је угао  $d\phi$  који се може израчунати на следећи начин:

$$\tan(d\phi) = \frac{s}{f_c}; \quad d\phi = \arctan\left(\frac{s}{f_c}\right)\tag{2.14}$$

Односно:

$$d\phi = \arctan\left(\frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{f_c}\right) = \arctan\left(2\frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{\sqrt{w^2 + h^2}}\tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)\right) \quad (2.15)$$

Уколико  $d\phi$  представимо са два угла  $d\phi_x$  и  $d\phi_y$  (односно уколико посматрамо исте углове са стране камере,  $d\phi_u$  и  $d\phi_v$ ), тада је:

$$\begin{aligned} d\phi_u &= \arctan\left(\frac{u}{r}\tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)\right) \\ d\phi_v &= \arctan\left(\frac{v}{r}\tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)\right) \end{aligned} \quad (2.16)$$

Односно заменом одговарајућег израза за  $f_c$  добијамо да је

$$\begin{aligned} d\phi_u &= \arctan\left(\frac{u}{f_c}\right) \\ d\phi_v &= \arctan\left(\frac{v}{f_c}\right) \end{aligned} \quad (2.17)$$

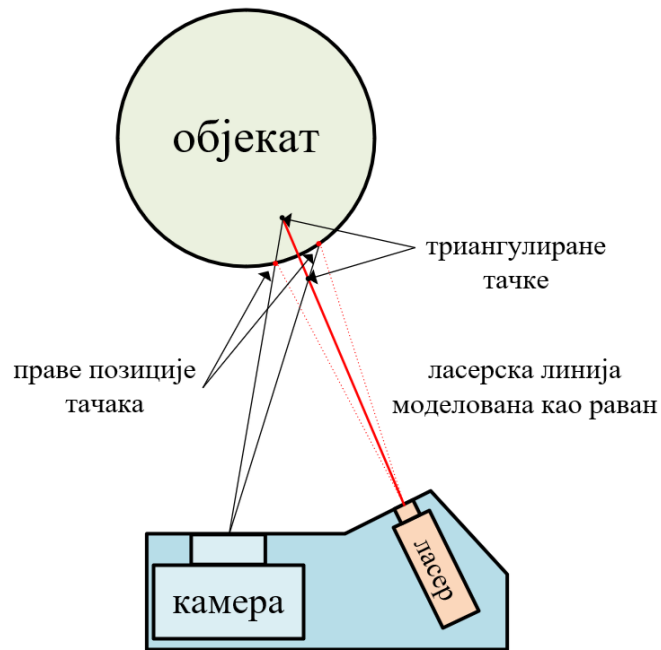
На основу симетрије углова имамо:

$$\begin{aligned} d\phi_x = d\phi_u &= \arctan\left(\frac{X}{Z}\right) = \arctan\left(\frac{u}{f_c}\right) \Rightarrow X = Z\frac{u}{f_c} \\ d\phi_y = d\phi_v &= \arctan\left(\frac{Y}{Z}\right) = \arctan\left(\frac{v}{f_c}\right) \Rightarrow Y = Z\frac{v}{f_c} \end{aligned} \quad (2.18)$$

На крају имамо да је:

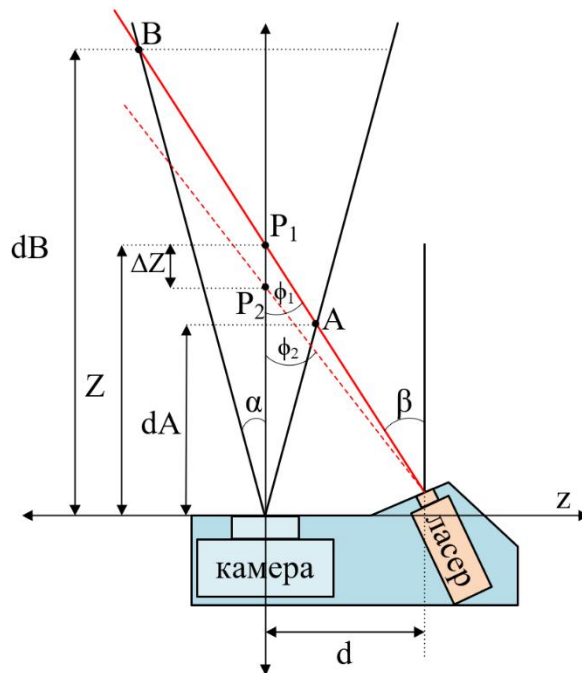
$$Z = t \cos(d\phi) = d \frac{\cos(d\phi) \sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right)}{\sin(\phi + \theta - d\phi)} \Rightarrow Z = d \frac{\cos(d\phi) \cos(\theta)}{\sin(\phi + \theta - d\phi)} \quad (2.19)$$

На основу претходне једначине могуће је израчунати вредност удаљености камере од објекта, односно  $Z$  координату [49]. На основу једначина могуће је израчунати и остале две осе ( $X$  и  $Y$ ). Из једначине је лако закључити да је тачност мерења  $Z$  координате директно везана за тачност одређивања долазног угла ласерске рефлексије, односно  $u$  и  $v$  координата у равни камере. Ако се узме у обзир да је сензор камере сачињен од матрице пиксела који имају одређену величину и растојање између њих, лако се може доћи до закључка да просто узимање једног пиксела као централне позиције ласерске рефлексије није довољно и да је потребно естимирати центар ласерске рефлексије у бољој резолуцији, односно у резолуцији која је мања од величине пиксела (*sub-pixel resolution*).



Слика 22. Илустрација грешке триангулације услед несавршености лазерске линије

На слици 22. је приказана традиционална формулација триангулације код профилних скенера, где је пројектована лазерска линија моделована као раван, а сваки осветљени пиксел на којем се налази лазерска рефлексија дефинисан као зрак, односно права. У пресеку праве и равни налази се посматрана тачка у 3D простору. Међутим услед несавршености ласера, али и у зависности од скениране површине, не може се једнозначно утврдити која тачка из 3D простора одговара детектованој рефлексији, јер ширина и интензитет профила варирају од линије до линије. Ово је посебно уочљиво у ситуацијама када је врх лазерске рефлексије zasiћен, па уместо очекиване Гаусове криве, имамо раван врх рефлексије [51].



Слика 23. Минимално и максимално радно растојање профилног скенера

Један од битних параметара сваког профилног скенера је опсег његове радне даљине. На слици 23. дата је илустрација минималног и максималног радног растојања профилног ласерског скенера, где се са  $dA$  може дефинисати минимално растојање од објекта до камере које може бити детектовано и дато је са следећом једначином:

$$dA = \frac{d}{\tan(\alpha) + \tan(\beta)} \quad (2.20)$$

Са друге стране, постоји максимално растојање између објекта и камере -  $dB$  које може да буде детектовано и рачуна се на следећи начин [52]:

$$dB = \frac{d}{\tan(\beta) - \tan(\alpha)} \quad (2.21)$$

За инкременталну промену мерног растојања  $\Delta Z$ , постоји инкрементално мала промена угла  $\Delta\phi$ . Оно што је занимљиво је да се профилни скенери могу заправо посматрати као скенери угла, јер свака промена скениране тачке доводи до промене угла под којим ласерски рефлектовани зрак долази до камере, односно  $\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2$ . Из практичних разлога, грешка естимације долази из грешке естимације позиција  $P_1$  и  $P_2$  преко  $\sigma_p$ . Грешка естимације  $Z$  координате дата је следећом једначином:

$$\sigma_z \approx \frac{Z^2}{fd} \sigma_p \quad (2.22)$$

где је са  $f$  дата ефективна позиција сензора камере,  $d$  је растојање између камере и извора ласерске светлости,  $\sigma_p$  је грешка естимације позиције ласерске рефлексије док је са  $Z$  дато растојање до мерног објекта.

Из претходне једначине може се доћи до закључка да је грешка мерења растојања инверзно пропорционална растојању између камере и ласера, као и ефективној позицији  $f$ , али исто тако директно пропорционална квадрату мерног растојања. Параметри профилног скенера  $f$  и  $d$  су углавном лимитирани механиком система. Са већим растојањем  $d$ , стабилност целог система опада, а такође проблем сенки почиње више да буде изражен. Многи произвођачи профилних скенера имају различите типове скенера у понуди, где се у зависности од радног растојања мења њихов механички дизајн. Унутар скенера врло често се налазе идентичне компоненте, док се само разликује механички дизајн скенера.

Параметар  $\sigma_p$  зависи од изабраног типа ласера, алгоритма за обраду сигнала рефлектоване ласерске рефлексије, као и постигнутог SNR односа. Ефекат шума ласерске мрље на грешку естимације позиције ласерске рефлексије је апроксимативно дат следећом једначином:

$$\sigma_p \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \lambda f_n \quad (2.23)$$

где је са  $f_n$  дат  $f$  број коришћене оптике скенера, а са  $\lambda$  таласна дужина ласера. Количина прикупљеног светла у пикселу опада са квадратом растојања и доприноси да максимална радна удаљеност до мерног објекта не прелази више од 10m, чак и када раздаљина између камере и ласера износи 1m [53].

На основу Никвистове теореме о одабирању сигнала, добро је познато да фреквенција одабирања мора бити најмање двоструко већа од највеће фреквенције у спектру сигнала, како

би се сачувала инфомрацију коју он носи у себи. Уколико се та теорема примени на линију слике, долази се до закључка да период одабирања не може бити већи од једне половине физике величине најмањег објекта на слици. Дигиталне камере најчешће имају организоване пикселе, као фотосензитивне ћелије, у облику квадрата са растојањем  $d_p$  између њих. Без губитка општости може се претпоставити да је растојање између пиксела у свим правцима исто и једнако  $d_p$ . Тада је највећа просторна фреквенција у систему  $f_c$  дата са:

$$f_c = \frac{1}{2d_p} \quad (2.24)$$

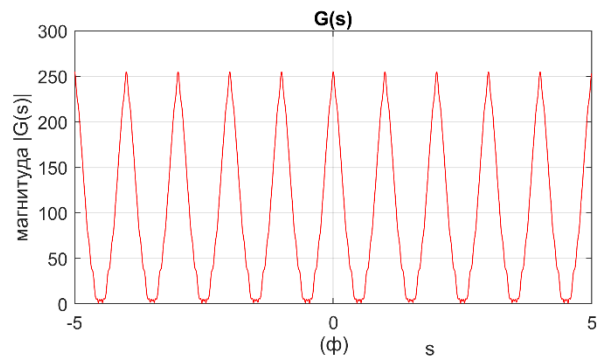
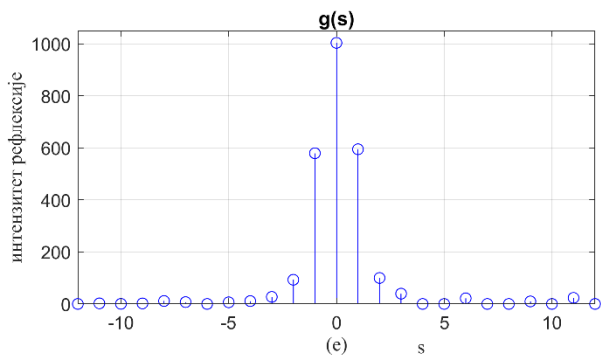
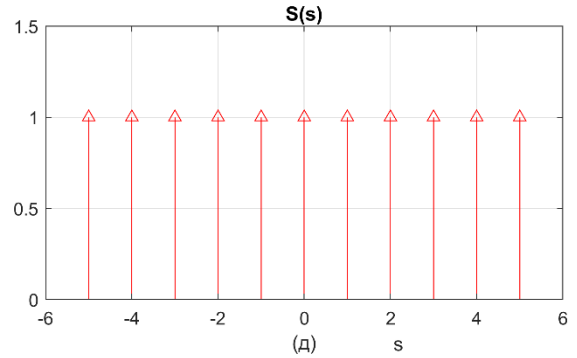
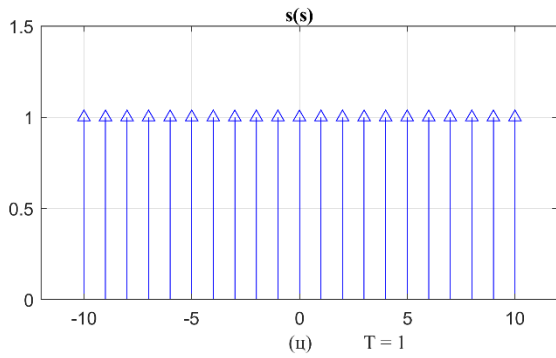
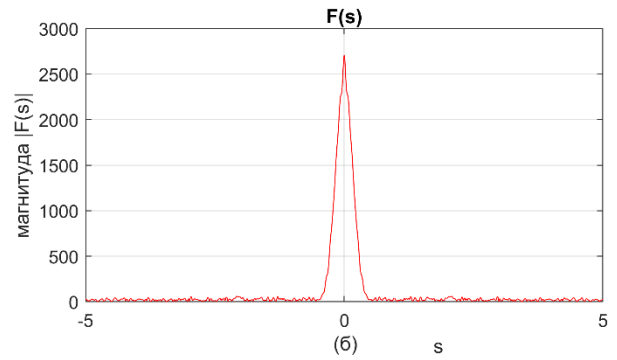
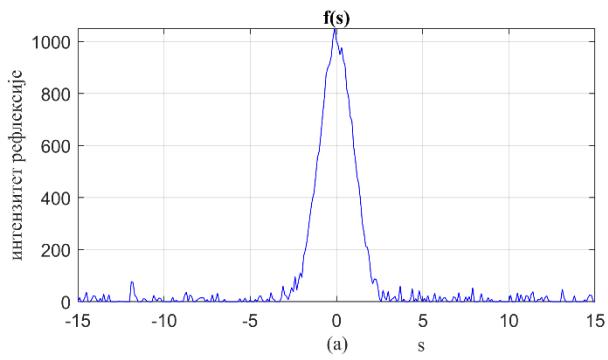
Растојање  $d_p$  различито је за различите врсте камера и дато је у спецификацијама камере од стране произвођача. На основу теорије дифракције, процес настанка слике се може изразити преко филтра пропусника ниских просторних учестаности, визуелног сигнала. У конкретном случају, ако је са  $a$  дата величина отвора бленде оптике камере, тада просторне фреквенције веће од  $f_c'$  дате са следећом једначином 2.25 неће учествовати у просторној фреквенцији слике. Један од главних разлога зашто је просторни *aliasing* занемарен је чињеница да је амплитуда високо фреквентних компоненти на стандардним сликама веома мала [54]

$$f_c' = \frac{a}{\lambda f} \quad (2.25)$$

На слици 24а. дат је профил ласерске рефлексије заједно са шумом који долази до сензора камере. Наравно, претпоставка је да је у питању континуалан сигнал са главном компонентом у виду Гаусове рефлексије. На слици 24б. дат је одговарајући спектар просторног сигнала рефлексије (FFT) који такође има облик Гаусове криве (Фуријеова трансформација Гаусове функције је такође Гаусова функција). Слика 24ц, представља поворку просторних Диракових функција (односно пиксела) којима се аналогни сигнал претвара у дигитални. Слично као и код Гаусове функције, Фуријеова трансформација поворке Диракових делта функција је такође поворка Диракових делта функција и дата је на слици 24д. На слици 24е, дат је квантизован сигнал ласерске рефлексије са слике 24а, као производ  $f(s)s(s)$ . На слици 24ф. дат је спектар дискретног сигнала са слике 24е. који се може добити конволуцијом спектра улазног сигнала и Фуријеове трансформације поворке Диракових делта функција  $G(s) = F(s) \otimes S(s)$ .

На основу слике 24ф. очигледно је да ће  $F(0) = G(0)$  бити задовољено уколико се реплике  $f(s)$  не преклапају у спектру. То ће бити задовољено уколико је фреквенција одсецања  $f_c$  мања од  $\frac{1}{T}$ , односно фреквенције одабирања. Треба обратити пажњу да уколико функције које описују континуални и одабирани профил рефлектоване ласерске светлости треба да буду једнаке, фреквенција одсецања  $F(s)$  је једнака фреквенцији одабирања, како би било могуће реконструисати  $f(s)$  из вредности одбирака [55].

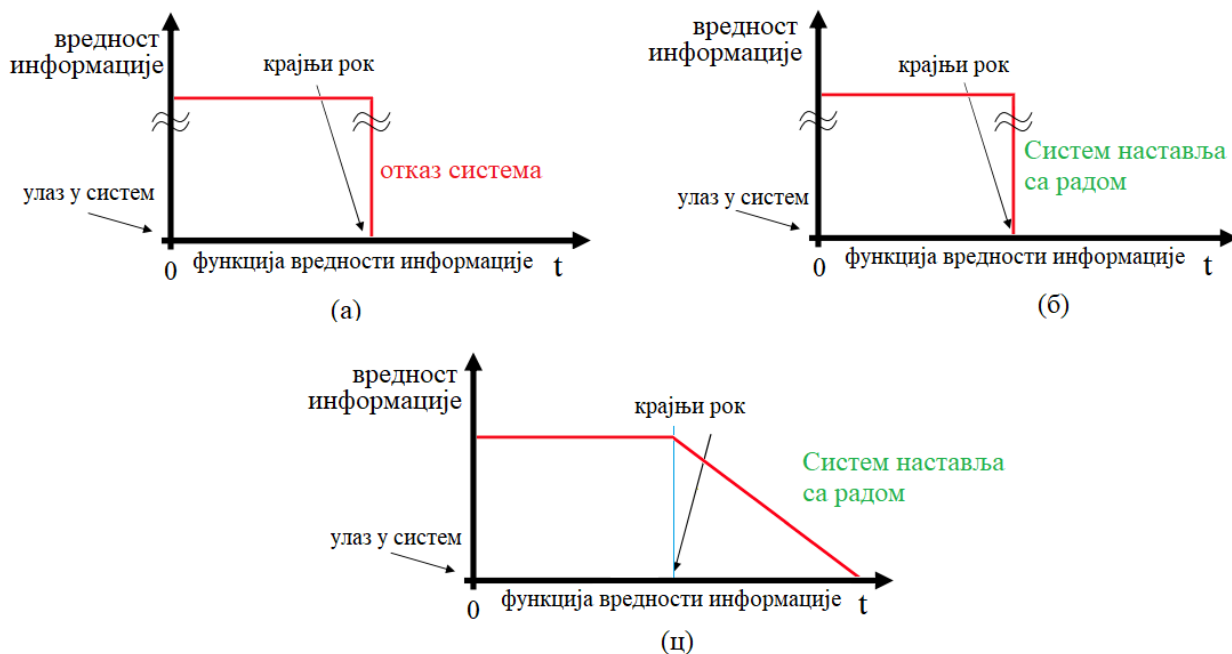




Слика 24. Одабирање у просторном и фреквенцијском домену: (а) Профил интензитета  $f(s)$ , (б) Фуријеова трансформација  $F(s)$  профила интензитета. (ц) Функција одабирања  $s(s)$ . (д) Фуријеова трансформација  $S(s)$  функције одабирања. (е) Дискретне вредност профила  $g(s)$ . (ф) Фуријеова трансформација  $g(s)$ ,  $G(s)=F(s)\otimes S(s)$ .

### 3. Наменски системи за обраду сигнала у реалном времену

Обрада сигнала и слике у реалном времену је захтеван хардверски и софтверски задатак. Са огромном количином података, посебно у случају када је у питању обрада слике, перформансе пројектованог система долазе до пуног изражаја. Генерално, да би се рекло да систем ради у реалном времену неопходно је да тачност операције не зависи само од њене логичке исправности, него и од времена за које је информација добијена као излаз система. Такође, немогућност система да одговори у задатом времену се сматра подједнако лошим као и лош резултат (тачност) обраде сигнала [56].



Слика 25. Функција вредности информације за различите типове система који раде у реалном времену

Системи који раде у реалном времену – RTOS (*Real Time Operating System*) могу се поделити на основу апликације где се користе и последица уколико систем није одреаговао на

време. Тако се под стварним системом који ради у реалном времену са фиксним (тешким) крајњим роком (*hard RTOS*) сматра да пропуштање крајњег рока за обраду сигнала представља комплетан отказ система. У другу категорију система спадају строги системи у реалном времену са чврстим (*firm RTOS*) задацима, где је након пропуштеног рока за обраду информације, њена вредност опала, али то не представља отказ система, који може наставити нормалан рад услед мањег број оваквих случајева. На крају постоје меки (*soft RTOS*) системи у реалном времену који након пропуштеног рока за обраду настављају са нормалним радом, а вредност обрађене информације опада са протеклим временом, односно долази до деградације квалитета сервиса (*Quality of Service – QoS*). На слици 25. дата је илустрација различитих типова наменских система који раде у реалном времену кроз различите типове вредности информације у односу на време обраде сигнала (реакције система).

Као пример стварних система који раде у реалном времену често се наводи пример нишанског радарског система који мора да одреагује у датом тренутку на задате параметре система. Свако непредвиђено кашњење реакције система може довести до катастрофалних последица, те се приликом пројектовања таквих система посебна пажња посвећује избегавању таквих ситуација. Као пример строгих система у реалном времену се наводи пример конференцијског позива где пропуштени пакети слике могу довести до деградације квалитета, али не и потпуног отказа система. Изгубљени пакети након пропуштеног времена немају вредност, јер су стигли након нових и могу бити занемарени. Пример меког система у реалном времену представља видео игра, па тако на пример команде које корисник шаље стижу са неким кашњењем које зависи од других операција које систем у том тренутку обавља.

У системима за обраду сигнала су најзаступљеније аритметичке операције множења и сабирања (одузимања). Ове инструкције могу бити једноставно имплементирани на микропроцесорима, микроконтролерима, DSP (*Digital Signal Processing*) процесорима, FPGA или ASIC (*Application-Specific Integrated Circuit*) платформама. Одабир одређеног хардвера зависи од апликације, али и буџета, а најчешће је у питању комбинација оба параметра. У наредној табели дат је преглед односа флексибилности развоја, дужине трајања развоја, потрошње, перформанси, цене развоја, као и цене производње система у којима се користе неке од DSP опција [57].

Табела 2. Однос флексибилности, трајања развоја, потрошње, перформанси као и цене развоја и продукције различитих опција за DSP хардверске платформе

	ASIC	FPGA	Микроконтролер, Микропроцесор	DSP процесор
Флексибилност	Не постоји	Ограничена	Велика	Велика
Трајање развоја	Дуго	Средње	Кратко	Кратко
Потрошња	Мала	Мала ка средњој	Средња ка великој	Мала ка средњој
Перформансе	Високе	Високе	Мале ка средњим	Средње ка великим
Цена развоја	Високе	Средње	Мала	Мала
Цена продукције	Мала	Мала ка великој	Средња ка великој	Мала ка средњој

ASIC чипови су обично дизајнирани за специфичне намене и то обично за апликације које захтевају јако велики број рачунских операција. У питању су добро познати алгоритми чији је развој завршен а истовремено препозната комерцијална исплативост да се такви уређаји производе у великим (милионским) серијама. Са друге стране, када је брзина извршавања

операција најбитнији фактор, као што је на пример рударење крипто валута, без обзира на цену развоја ASIC чипова, они се користе због перформанси које пружају. Њихову намену није могуће мењати или радити надоградњу постојећих алгоритама. Одликују се високим перформансама и малом потрошњом јер су оптимални за дату апликацију, јефтине у производњи, међутим време и цена развоја су велики.

FPGA уређаји су због својих добрих перформанси, флексибилности, мале потрошње и доста краћег времена развоја у односу на ASIC постали веома занимљив избор за широк спектар DSP апликација. Одликују се изразито великим степеном паралелизма у архитектури DSP алгоритама. У апликацијама дигиталне обраде сигнала њихова примена је практично неограничена. Па тако на пример могуће их је користити за промену учестаности одабирања сигнала када однос улазне и излазне фреквенције одабирања представља однос два велика цела броја (на пример 160/147, односно 44.1 на 48 KHz). За овакве потребе могу се користити полиномске кубне *Farrow* структуре, које су нашле примену у QAM, DVB-T, али исто тако и у потискивању ехо ефекта у дигиталним модемима, еквилајзерима за WiMAX и GSM комуникационе системе [58, 59]. Такође, FPGA архитектура је оптимална за имплементацију FIR и IIR (*Infinite Impulse Response*) филтара за најразличитије потребе филтрирања сигнала, као што је на пример структура FIR филтара за вишестепену децимацију сигнала [60].

Са друге стране, део логике може бити искоришћен за имплементацију посебних врста интерфејса између чипова или различитих периферних уређаја, те се врло често користе као „*glue logic*” решења. Један од класичних примера такве примене је употреба FPGA логике како би се примила слика са брзе индустријске камере.

Да FPGA архитектуре имају светлу будућност говори и чињеница да су два највећа произвођача процесорских чипова на свету, Intel и AMD недавно купили већинске акције фирми Xilinx и Altera које су били два водећа произвођача FPGA чипова. Посебно популарне серије су SoC (*System on Chip*), и то Zynq серија код AMD Xilinx и Intel Aria, које интегришу хардверски имплементиран процесор и FPGA логику у један чип. Осим поједностављене архитектуре у наменским системима, услед остварене интеграције два различита типа система, идеја о реконфигурабилном хардверу је одувек привлачила инжењере. Употребом хардвера који лако мења своју намену, могуће је добити максималне перформансе и минимално кашњење обраде података, те су FPGA чипови виђени као акцелератори процесора. Осим за класичне операције обраде сигнала декодовања података или једноставно акцелерације операција, FPGA налазе велику примену у AI (*Artificial Intelligence*) апликацијама.

Наравно, за обраду сигнала не треба заборавити све моћније DSP чипове као што су микроконтролери (DSC – *Digital Signal Controller*) и микропроцесори [61].

Одабир одговарајућег хардвера који покреће наменски систем је врло битан, међутим никако се не сме заборавити софтверски део система који се извршава на датом хардверу. Па је тако уобичајено да се на микроконтролерима покрећу такозване „*bare metal*” апликације без оперативних система, које се компајлерима одмах преводе у асемблерски (машински) језик. На тај начин се апликација оптимизује како би се извукао максимум из доступних рачунарских операција хардвера на којој је она покренута. Са друге стране, у наменским системима који користе микропроцесоре или једноставно процесоре, обично се користе RTOS или *Embedded Linux* оперативни системи. Овакви системи захтевају већу количину ресурса, али са друге стране добром архитектуром система у многоставној поједностављују развој наменског система. Због своје популарности и софтвера отвореног кода (*Open Source Software*), који се може бесплатно користити, овакви системи се могу пронаћи у готово сваком наменском уређају.

Табела 3. Тип наменског система и минимални захтеви за *Embedded Linux* и *RTOS* оперативне системе [62]

Оперативни систем	Тип наменског система	Минимални ROM	Минимални RAM	Дужина процесорске речи	Драјвери
RTOS	<i>Hard</i>	< 10 Кб	1 Кб	8 bit	Не
Embedded Linux	<i>Soft</i>	> 2 МВ	> 4 МВ	32 bit	Да

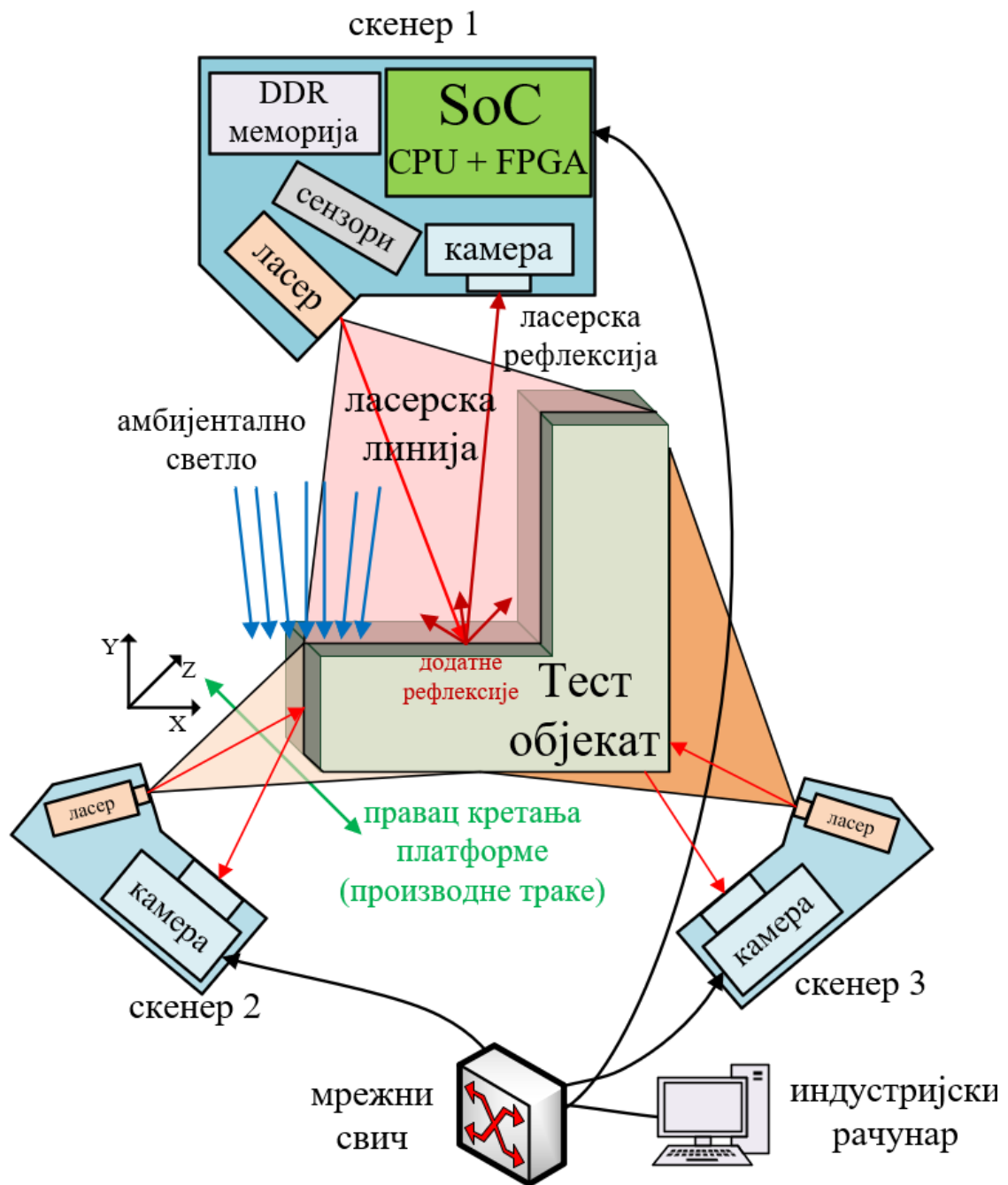
Разлика између *RTOS* и *Embedded Linux* оперативних система је пре свега у типу наменског система, где *RTOS* системи спадају у категорију система са фиксним крајњим роком, док *Embedded Linux* припадају групи меких система. Осим по типу, ова два оперативна система се разликују и по минималној количини неопходних ресурса који су потребни да би се успешно покренули на наменској платформи и дати су у табели 3. Оно што је такође битно истаћи је да *Embedded Linux* као оперативни систем има далеко већи број корисника, али и инжењера који активно раде на подршци, одржавању и развоју за нове чипове који непрестано стижу на тржиште. Архитектура оваквих система је врло комплексна и представља засебну област. У зависности од апликације и примене наменског система зависи и који се тип оперативног система користи.

Нове генерације профилних скенера које користе SoC решења могу истовремено комбиновати на једном чипу *RTOS* и *Embedded Linux* оперативне системе, односно могу бити асиметрични мулти-процесорски AMP (*Asymmetric Multi-Processing*) системи. Овакви системи у потпуности користе ресурсе хетерогених архитектура, односно паралелизам мулти-процесорских система. На тај начин се унутар једног наменског система процеси могу поделити на процесе са фиксним крајњим роком и остатак система на којем се налази класичан оперативни систем. Употреба *OpenAMP framework-a* (*Open Asymmetric Multi-Processing*) пружа могућност развоја софтверских апликација које користе предности AMP система.

На слици 26. дата је илустрација система ласерских профилних скенера заједно са свим главним компонентама.

Са становишта хардверске имплементације профилног скенера, главне компоненте система су камера, SoC, који иде заједно са DDR меморијом, додатни периферални сензори и наравно извор ласерске светлости.

Не треба заборавити да су профилни скенери заправо 2D скенери и да се приликом примена у којима се захтева 3D реконструкција објекта, мора користити неколико скенера који раде синхронно у комбинацији са покретном траком опремљеном са енкодером, како би се добила информација о померају скенираног објекта.



Слика 26. Блок дијаграм типичног индустријског система који користи ласерске скенере

## 4. Преглед постојећих алгоритама за естимацију ласерске рефлексije

Алгоритми за детекцију центра ласерске рефлексije се могу поделити на једнодимензионалне, односно оне који се баве једном линијом слике и информацију о центру рефлексije добијају независно од осталих линија слике и дводимензионалне где се за одређивање тачне позиције ласерске линије у обзир узимају и суседне линије слике у односну на посматрану. Сваки од приступа има своје предности и мане о којима ће бити више речи у наставку.

### 4.1. Једнодимензионални алгоритми за детекцију центра ласерске рефлексije

Свака од линија слике може се посматрати и процесирати као једнодимензионални сигнал ограниченог кратког трајања, са вредностима одбирака једнаких вредностима пиксела. Главни циљ једнодимензионалних алгоритама за естимацију центра ласерске линије је да на основу пиксела посматране линије слике дају што тачнију естимацију позиције рефлексije ласерске линије. Историјски гледано ови алгоритми су први развијени, јер нису претерано захтевни по питању количине рачунских операција и комплексности. Многи од њих се и данас користе, јер дају добре резултате у пракси. Врло често се комбинују са разним методама филтрирања, како би се смањили ефекти шума или алгоритмима интерполације.

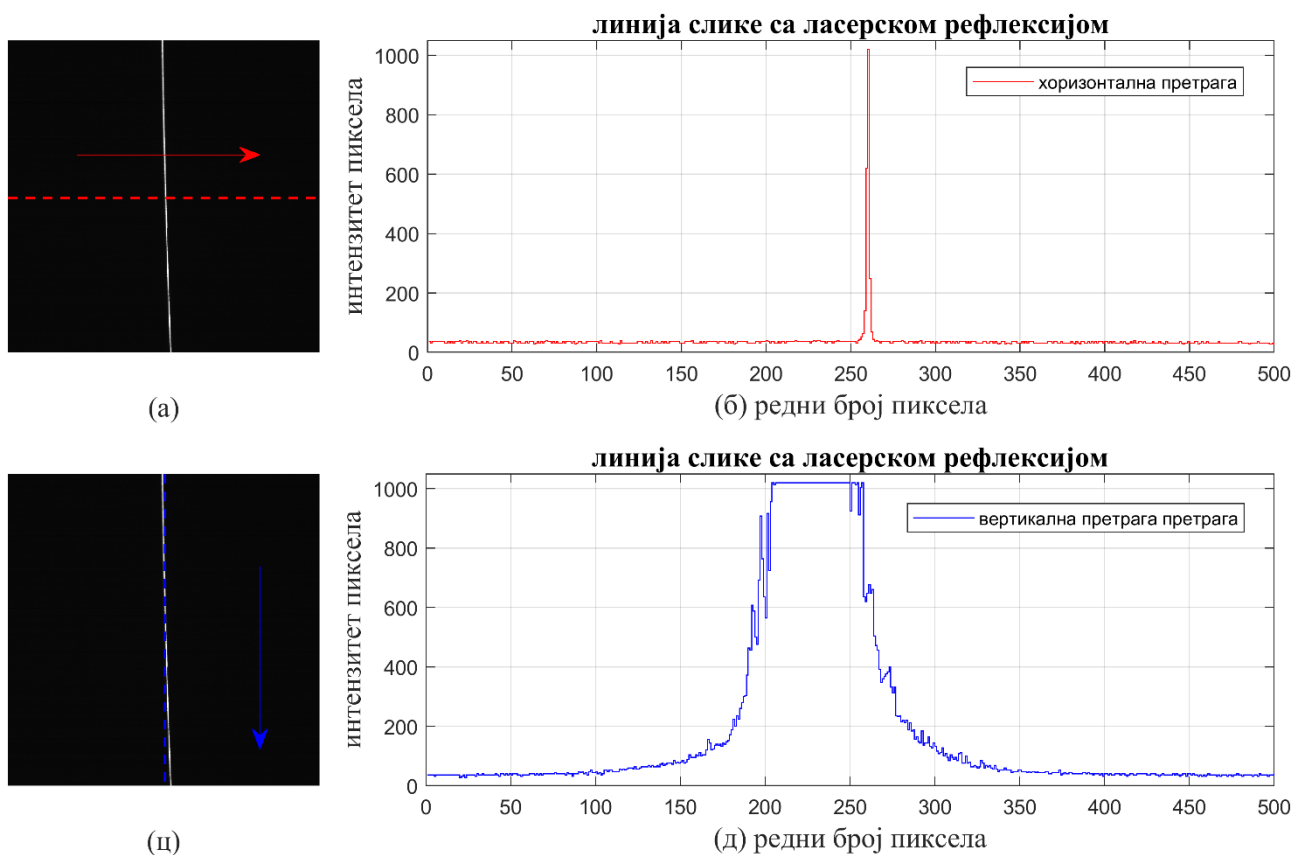
Једнодимензионални алгоритми за естимацију центра ласерске рефлексije угрубо се могу поделити на оне који то одређују на нивоу пиксела и оне који иду испод величине пиксела, односно *sub-pixel* алгоритме. Најједноставнији алгоритам за естимацију центра ласерске линије на нивоу пиксела је одређивање максималне вредности пиксела у зони

рефлексије ласерске линије. Наравно, овакав алгоритам је екстремно подложен утицајима шума и не даје довољну прецизност а и његова практична употреба је врло лимитирана и у највећем броју случајева ради се о уређајима мале прецизности.

Због чињенице да је потребно одредити позицију између вредности два пиксела сви алгоритми се заснивају на методама интерполације сигнала, при чему се настоји одредити естимација позиције врха очекиваног профила ласерске рефлексије.

Осим чињенице да алгоритми за естимацију позиције полазе од претпоставке да профил ласерске рефлексије прати Гаусову криву, подразумевају да је правац претраге нормалан у односу на правац простирања ласерске рефлексије. На слици 27а. и 27б. дат је пример слике са профилног скенера на којој се налази вертикална ласерска линија и приказан је њен профил на којем се јасно уочава импулс у интензитету пиксела, када је правац претраге хоризонталан. Међутим, уколико ортогоналност правца претраге и правца ласерске рефлексије није испуњен, као што је приказано на слици 27ц. и 27д., долази до потпуно погрешног тумачења података са профилног скенера. У том случају, грешка естимације се повећава, јер профил рефлексије губи очекивани Гаусов профил.

Једна од најпознатијих метода естимације позиције је Гаусова метода интерполације због очекиваног профила рефлексије. У зависности од области примене профилног скенера могу се користити и линеарна и параболна естимација. Метода која је показала највећу примену у пракси је алгоритам центра масе због добрих резултата и једноставности примене. Ту се налазе и *Blais* и *Rioux* (БР) естиматор, FIR филтар или неке од бољих метода интерполације пиксела (повећања резолуције слике). У наставку је дат преглед наведених метода, као и њихово поређење на основу примера ласерске линије добијене са камере профилног скенера.



Слика 27. Правац претраге ласерске линије за једнодимензионалне алгоритме. (а) пример слике са профилног скенера. (б) Профил ласерске рефлексије (ц) пример слике (д) изглед профила ласерске рефлексије



#### 4.1.1. Гаусова апроксимација

Добро позната Гаусова функција је дата следећом једначином:

$$f(x) = Ae^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (4.1)$$

где је са  $A$  дата максимална вредност амплитуде коју  $f(x)$  може имати,  $\mu$  је позиција максимума Гаусове криве, док је са  $\sigma$  означена стандардна девијација која заправо контролише ширину криве на  $x$  оси. Када се параметри Гаусове функције пренесу на проблем ласерске рефлексије, јасно је да амплитуда Гаусове функције одговара максималном интензитету рефлексије (пиксела),  $\mu$  је естимиран центар рефлексије, док је са  $\sigma$  означена ширина ласерске рефлексије. На основу пиксела који описују ласерску рефлексију могуће је одредити естимирану позицију центра, а за то је неопходно интерполирати криву Гаусове функције кроз дати сет тачака. Постоје разни алгоритми за естимацију Гаусове криве, али један од најједноставнијих је Каруана алгоритам који користи чињеницу да је тражена функција описана као експоненцијална квадратна једначина и коју је могуће претворити у линеарну једначину користећи природан логаритам [63, 64]. Тада, користећи алгоритам најмањих квадрата (*least square method*), могуће је одредити параметре криве. Уколико се на обе стране једначине примени логаритам, једначина постаје:

$$\ln(f) = \ln(A) - \frac{\mu^2}{2\sigma^2} + \frac{2\mu x}{2\sigma^2} - \frac{x^2}{2\sigma^2} = a + bx + cx^2 \quad (4.2)$$

при чему је:

$$a = \ln(A) - \frac{\mu^2}{2\sigma^2}; b = \frac{\mu}{\sigma^2}; c = -\frac{1}{2\sigma^2} \quad (4.3)$$

Уколико са  $\hat{f}$  означимо естимирану Гаусову криву, тада је грешка естимације  $\varepsilon$ , дата следећом једначином:

$$\varepsilon = \ln(\hat{f}) - \ln(f) = \ln(\hat{f}) - (a + bx + cx^2) \quad (4.4)$$

На основу методе минималних квадрата, првим изводом квадратне грешке по  $a$ ,  $b$  и  $c$ , као и постављањем резултата извода на нулу добија се следећи систем линеарних једначина:

$$\begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n d_i & \sum_{i=1}^n d_i^2 \\ \sum_{i=1}^n d_i & \sum_{i=1}^n d_i^2 & \sum_{i=1}^n d_i^3 \\ \sum_{i=1}^n d_i^2 & \sum_{i=1}^n d_i^3 & \sum_{i=1}^n d_i^4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n \ln(\hat{f}_i) \\ \sum_{i=1}^n d_i \ln(\hat{f}_i) \\ \sum_{i=1}^n d_i^2 \ln(\hat{f}_i) \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

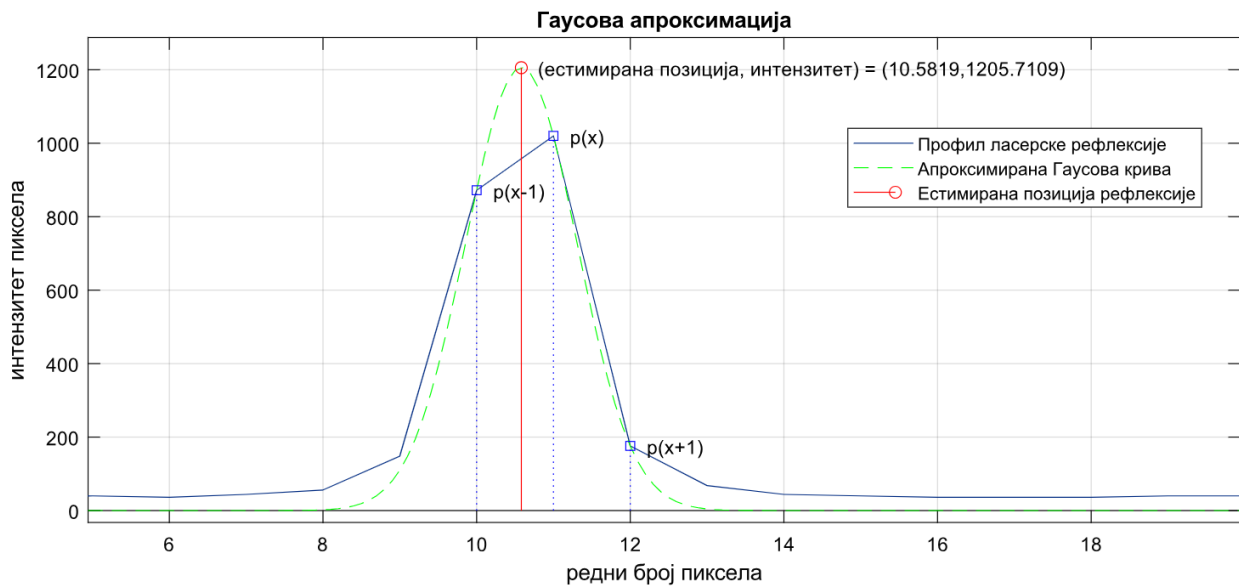
На основу дате једначине могуће је одредити непознате  $a$ ,  $b$  и  $c$ , а одатле параметре Гаусове функције ( $A, \mu, \sigma$ ).

Алгоритам за естимацију позиције ласерске рефлексије претпоставља да пиксел највећег интензитета одговара околина максимума Гаусове функције. Уколико се као пример алгоритма узме најједноставнији случај са само три суседна пиксела највећа по интензитету (један са леве и један са десне стране пиксела максималне вредности) могуће је решити систем једначина дат са 4.5. Треба имати на уму да сваки од пиксела камере има своје видно поље, као и одређени простор између суседних пиксела, што ће утицати на то да стварни профил рефлексије није у потпуности Гаусов, међутим сви ти ефекти се могу моделирати Гаусовом расподелом и за даље разматрање неће бити узети у обзир.

Уколико са  $f(x+1)$ ,  $f(x)$  и  $f(x-1)$  означимо интензитет пиксела на највећим вредностима, тада се естимирана ( $\hat{\delta}$ ) локација рефлектованог центра на слици може израчунати са следећом једначином:

$$\hat{\delta} = \frac{1}{2} \frac{\ln(f(x-1)) - \ln(f(x+1))}{\ln(f(x-1)) - 2\ln(f(x)) + \ln(f(x+1))} \quad (4.6)$$

где је са  $x$  означен редни број пиксела унутар линије  $l$  слике са интензитетом  $f(x)$ .



Слика 28. Пример естимације позиције ласерске рефлексије применом Гаусове апроксимације

На слици 28. дат је пример ласерске рефлексије са профилног скенера за неку линију слике (на слици је ласерска рефлексија означена са плавом бојом). Зеленом испрекиданом линијом дата је апроксимирана Гаусова функција на основу три тачке највећег интензитета (такође означене на слици), док је са црвеном линијом означена естимирана позиција центра ласерске рефлексије.

Велики број научних радова из области естимације позиције ласерске рефлексије се фокусира на чињеницу да је очекивани профил рефлексије на пријему крива која прати Гаусову функцију. У покушају да се добије што тачнија естимација, бројни аутори [65] [66] узимају различите параметре система или карактеристике ласерске рефлексије.

Ако се пође од претпоставке да се рефлексија састоји од једне главне рефлексије на коју су суперпониране многобројне рефлексије од секундарног значаја а настале услед разних физичких ефеката, тада се за Гаусов сигнал може дефинисати степен скалабилности који је дат са  $z = 2\sigma^2$  као и центар енергије сигнала који је дат са  $u_i = u_0 + s_i$ , где је са  $u_0$  дата иницијална вредност центра, док  $s_i$  представља померај. Тада је могуће дефинисати сигнал  $g_f(x)$  који представља суперпозицију  $m$  Гаусових сигнала са различитим степенима скалабилности и центрима енергије. Додатно са  $\varphi_i$  дефинисан тежински фактор за сваки од сигнала:

$$g_f(x) = \sum_{i=1}^m \varphi_i \frac{1}{\sqrt{\pi z}} e^{-\frac{(x-u_i)^2}{z}} \quad (4.7)$$

На основу максималне вредности кроскорелације једне линије слике, на којој се налази ласерска рефлексија, са различитим  $g_f(x)$  може се поуздано одредити позиција центра рефлексије. Пре свега потребно је одредити иницијалне вредности центра енергије  $u_0$  и степена скалабилности  $z_1$ . За те потребе могуће је користити једноставан праг детекције, јер је очекивана рефлексија значајно већег интензитета него интензитет позадине слике. Када су одређене иницијалне вредности центра енергије и степена скалабилности дефинише се секвенца Гаусових сигнала на следећи начин:

$$\text{гаус секвенца сигнала} \begin{cases} g_{z_1, u_0}(t), g_{z_2, u_2}(t), g_{z_3, u_3}(t), \dots, g_{z_m, u_m}(t) \\ z_{i+1} = \frac{1}{2} z_i, (i \in [1, m]) \\ u_i = u_0 + s_i, (i \in [2, m]) \end{cases} \quad (4.8)$$

Сличности између сваког Гаусовог сигнала и добијене рефлексије могу се означити са  $r_{z1}, r_{z2}, \dots, r_{zm}$  и дефинисане су са:

$$r_{zi}(\tau) = \text{cov}(m_N(t), g_{zi, ui}(t)) = \sum_1^{Y_{max}} m_N(\tau) g_{zi, ui}(t + \tau) \quad (4.9)$$

На основу израчунате корелације, могуће је одрадити померај  $s_i$  тако да је степен корелације између вештачки генерисаног сигнала рефлексије и детектоване рефлексије максималан.

Један од занимљивих приступа је употреба Гаусовог интерполатора у случају када је врх ласерске рефлексије сатурисан. Тада се на основу једначине (4.6) прво даје естимација интензитета врха Гаусове криве на основу чињенице да је естимирана позиција дата са следећом једначином:

$$\widehat{\delta}_k = \left( \frac{N_{max} + 1}{2} + k \right) \frac{1}{2} \frac{\ln(I_k) - \ln(I_{-k})}{\ln(I_k) - 2 \ln(I) + \ln(I_{-k})} \quad (4.10)$$

где је са  $I_k = f(x - k - 1)$  дата вредност интензитета пиксела који се налази  $k$  пиксела удаљен од сатурисаних пиксела, а са  $N_{max}$  означен број узастопних сатурисаних пиксела, док је са  $k$  означен редни број суседних пиксела у односу на оне који су сатурисани. Због чињенице да је естимирана позиција једнака за било који пар пиксела  $(j, k)$  у односу на сатурисане пикселе, односно да важи  $\widehat{\delta}_k = \widehat{\delta}_j = \widehat{\delta}$ . Уколико са  $a_k$  и  $a_j$  означимо растојања центра Гаусове криве у односу на пикселе  $k$  и  $j$ :

$$a_k = \frac{N_{max} + 1}{2} + k; \quad a_j = \frac{N_{max} + 1}{2} + j \quad (4.11)$$

Тада је естимирана позиција врха ласерске рефлексије дата са следећом једначином:

$$\widehat{\delta} = \frac{1}{2} \frac{a_k (\ln(I_k) - \ln(I_{-k})) - a_j (\ln(I_j) - \ln(I_{-j}))}{\ln(I_k) + \ln(I_{-k}) - \ln(I_j) - \ln(I_{-j})} \quad (4.12)$$

#### 4.1.2. Центар масе

Алгоритам центра масе (ЦМ) такође претпоставља да расподела интензитета примљене рефлексије задовољава Гаусову дистрибуцију. Локација центра рефлексије може бити одређена на основу једноставног, добро познатог алгоритма где се интензитети пиксела користе као тежински коефицијенти (фактори) заједно са њиховим позицијама (редним бројевима). Уколико су интензитет и редни бројеви пиксела означени на исти начин као у претходном примеру, тада је естимирана позиција ласерске рефлексије дата са следећом једначином:

$$\widehat{\delta} = \frac{f(x + 1) - f(x - 1)}{f(x - 1) + f(x) + f(x + 1)} \quad (4.13)$$

Пример је дат само за три пиксела, али се наравно може проширити на већи број пиксела из исте линије, док напреднији алгоритми врло често користе и пикселе из суседних линија слике. У претходном примеру централни пиксел за вредност редног броја има 0, те пиксели лево и десно од њега имају негативне и позитивне целобројне вредности. Једначина 4.14 описује случај када се користи већи број пиксела за одређивање центра рефлексије и дата је са:

$$\widehat{\delta} = \frac{\sum_{i=-M}^M i f(x + i)}{\sum_{i=-M}^M f(x + i)} \quad (4.14)$$

где је са  $M$  означен број пиксела који улазе у алгоритам.

Због чињенице да је интензитет пиксела који одговарају рефлексији ласерске линије има већи интензитет од остатка линије слике, аутори [67] [68] предлажу да се уместо класичног

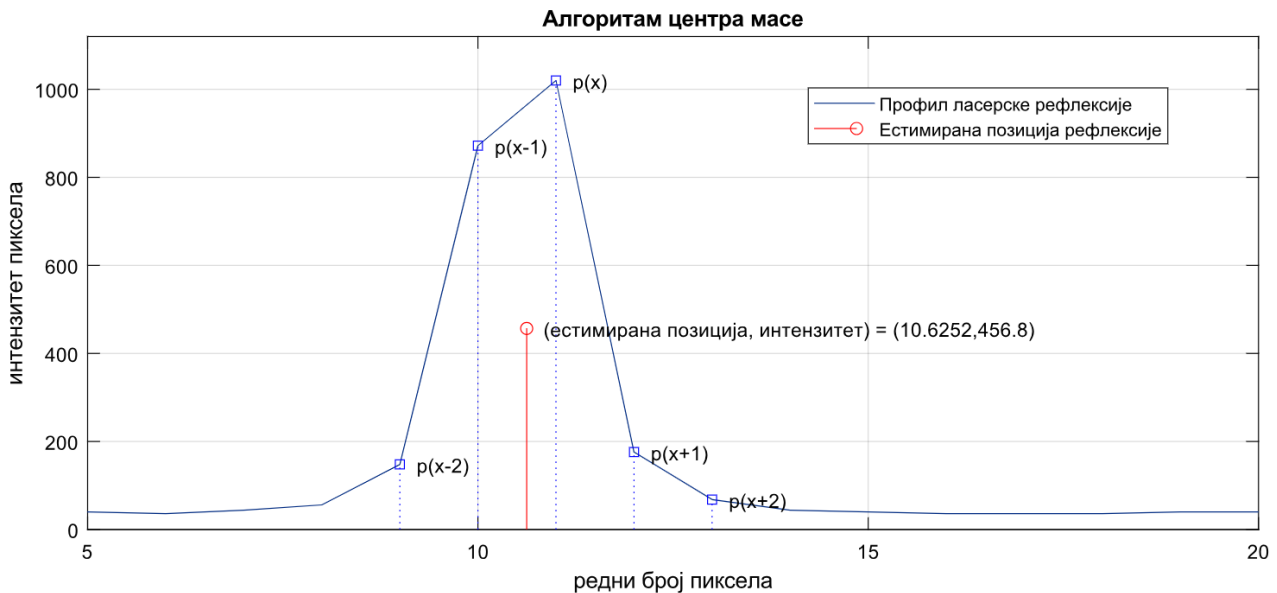
алгоритма центра масе, користе квадриране вредности интензитета приликом прорачуна тачне позиције ласерске рефлексије, па тако једначина 4.14 постаје:

$$\hat{\delta} = \frac{\sum_{i=-M}^M i (f(x+i))^2}{\sum_{i=-M}^M (f(x+i))^2} \quad (4.15)$$

Са друге стране аутори [69] предлажу употребу алгоритма центра масе са тежинским коефицијентима који одговарају Гаусовој криви на основу следеће једначине:

$$\hat{\delta} = \frac{\sum_{i=-M}^M i f(x+i) e^{-\frac{(f(x_c-i))^2}{\sigma^2}}}{\sum_{i=-M}^M f(x+i) e^{-\frac{(f(x_c-i))^2}{\sigma^2}}} \quad (4.16)$$

где је са  $x_c$  означен редни број пиксела највеће вредности, који потенцијално одговара позицији максимума ласерске рефлексије. На овај начин се смањује комплексност рачунања апроксимације Гаусове криве.



Слика 29. Пример естимације позиције ласерске рефлексије применом алгоритма центра масе

На слици 29. дат је пример алгоритма центра масе заједно са естимираном позицијом ласерске рефлексије, као и тачкама које су коришћене као улаз алгоритма. У датом примеру коришћено је 5 тачака за естимацију позиције. За вредност амплитуде која одговара центру рефлексије узета је средња вредност интензитета свих пиксела који су узети у обзир приликом рачунања алгоритма центра масе и на слици 29. дата је црвеном бојом.

Алгоритам центра масе се врло често користи у комбинацији са неким од алгоритма за одређивање прага на основу којег пиксели улазе у прорачун алгоритма [70]. Због саме природе рефлектоване ласерске светлости, константан праг који се емпиријски одређује може дати добре резултате у великом броју случајева. Међутим, када је SNR однос у систему мали, многе рефлексије ће бити одбачене, те се због тога користе неки од алгоритма који постављају тај праг динамички (адаптивно) у зависности од параметара окружења. На основу карактеристика Гаусове функције, 68.27% енергије сигнала је концентрисано у распону од  $[\mu - \sigma, \mu + \sigma]$ , 95.45% енергије сигнала се налази у распону  $[\mu - 2\sigma, \mu + 2\sigma]$ , док у распону од  $[\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma]$  је концентрисано 99.74% енергије, односно скоро целокупна енергија у

случају профилних скенера је концентрисана у том делу Гаусове криве. На основу ових података може се одрадити колико је пиксела неопходно за рачунање центра масе [71]. Са друге стране, горња и доња граница за одређивање који пиксели улазе у алгоритам центра масе може се одредити коришћењем добро познатог *Sobel* филтра који се користи за детекцију ивица на сликама [72]. *Sobel* филтар је заправо дводимензионални дискретни диференцијатор, те ће због јасног контраста (наравно у случајевима када је SNR однос довољан) лако дати ивице ласерске рефлексије на слици.

Алгоритам центра масе се често помиње као добар компромис између времена процесирања, потребних ресурса за имплементацију, комплексности имплементације и прецизности са друге стране [73]. Центар масе се показао као врло робустан алгоритам за естимацију позиције ласерске линије. Пре свега треба напоменути његову малу комплексност имплементације, која захтева мали број релативно једноставних рачунских операција (множење и сабирање) са једном операцијом дељења на крају. Због тога се врло често може срести у јефтним хардверски платформама [74] [75].

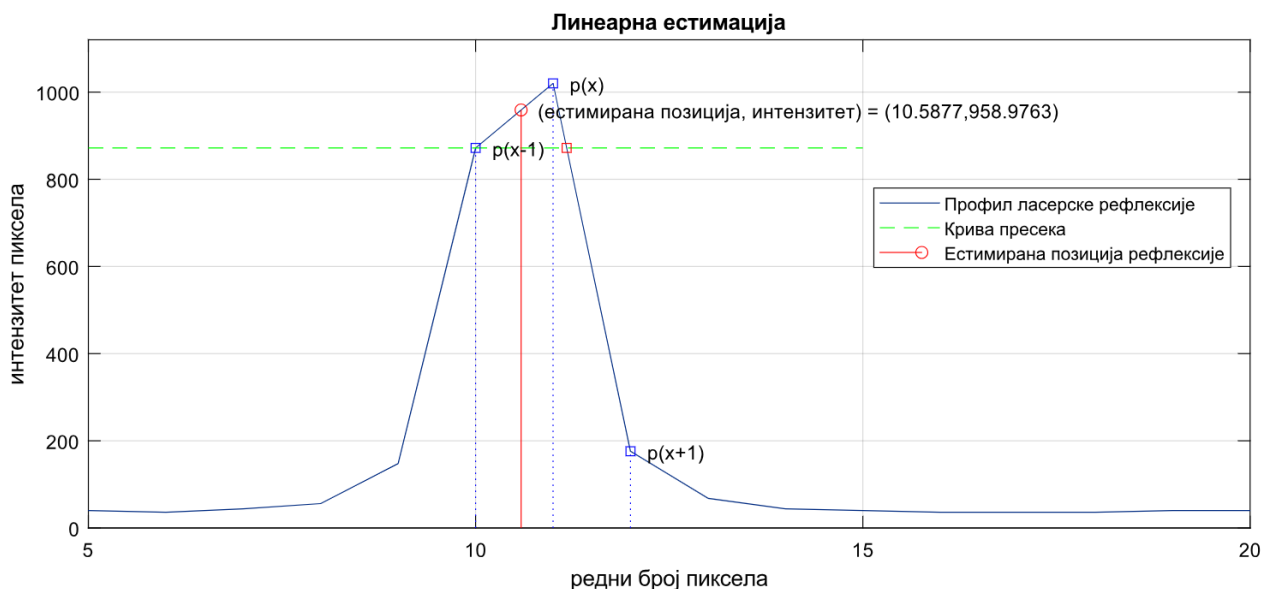
### 4.1.3. Линеарна интерполација

Овај алгоритам претпоставља једноставну, линеарну релацију између суседних пиксела рефлексије ласерске линије. Принцип рада алгоритма дат је на слици 30. Као улазни параметри алгоритма узимају се три пиксела (леви и десни пиксел у односу на пиксел највећег интензитета укључујући и њега). У случају да је  $f(x-1) > f(x+1)$ , односно да је леви пиксел већи по интензитету, тада се естимирана позиција ласерске рефлексије одређује као половина дужи дефинисане са тачком левог пиксела и тачке пресека праве дефинисане тачкама пиксела највећег интензитета и његовог суседног пиксела са десне стране и хоризонталне праве дефинисане левим пикселем (на слици је дата зеленом испрекиданом линијом).

$$\hat{\delta} = \frac{1}{2} \frac{f(x+1) - f(x-1)}{f(x) - f(x-1)} \quad (4.17)$$

У случају да је пиксел са десне стране пиксела највећег интензитета већи него пиксел са леве стране, естимација позиције је дата следећом једначином:

$$\hat{\delta} = \frac{1}{2} \frac{f(x+1) - f(x-1)}{f(x) - f(x+1)} \quad (4.18)$$



Слика 30. Пример естимације позиције ласерске рефлексије применом линеарне интерполације

Имплементација линеарне интерполације је једноставан алгоритам за реализацију и није рачунски захтевана. Вредности пиксела су целобројни бројеви са ограниченим опсегом и у зависности од типа индустријске камере која се користи у профилном скенеру најчешће се користи између 8 и 12 бита. Због те чињенице је могуће избећи рачунски захтевну операцију дељена два броја и уместо ње користити LUT у коју су смештене реципрочне двоструке вредности свих могућих разлика пиксела (вредности које одговарају делиоцима из једначина 4.17 и 4.18).

И поред једноставне имплементације линеарна интерполација као алгоритам даје неодређен резултат када је су два суседна пиксела једнака, јер је у том случају делилац једнак нули. То чини овај алгоритам инфериорним у односу на неке друге, добро познате алгоритме, који дају естимацију у том случају.

#### 4.1.4. Естиматор параболе

Уколико бисмо представили интензитет рефлексије ласерске линије преко Тејлорове серије, претпостављајући да је она континуална функција, тада би центар рефлексије на месту  $f(x + \delta)$  био представљен са следећом једначином:

$$f'(x + \delta) = 0 = f'(x) + \delta f''(x) + O(\delta^2) \quad (4.19)$$

Уколико занемаримо чиниоце вишег реда у Тејлоровом развоју, тада се  $\delta$  може израчунати на следећи начин:

$$\delta = \frac{f'(x)}{f''(x)} \quad (4.20)$$

Уколико се користи дискретна верзија, тада једначина (4.20) постаје:

$$\delta = \frac{1}{2} \frac{f(x-1) - f(x+1)}{(f(x+1) - 2f(x) + f(x-1)))} \quad (4.21)$$

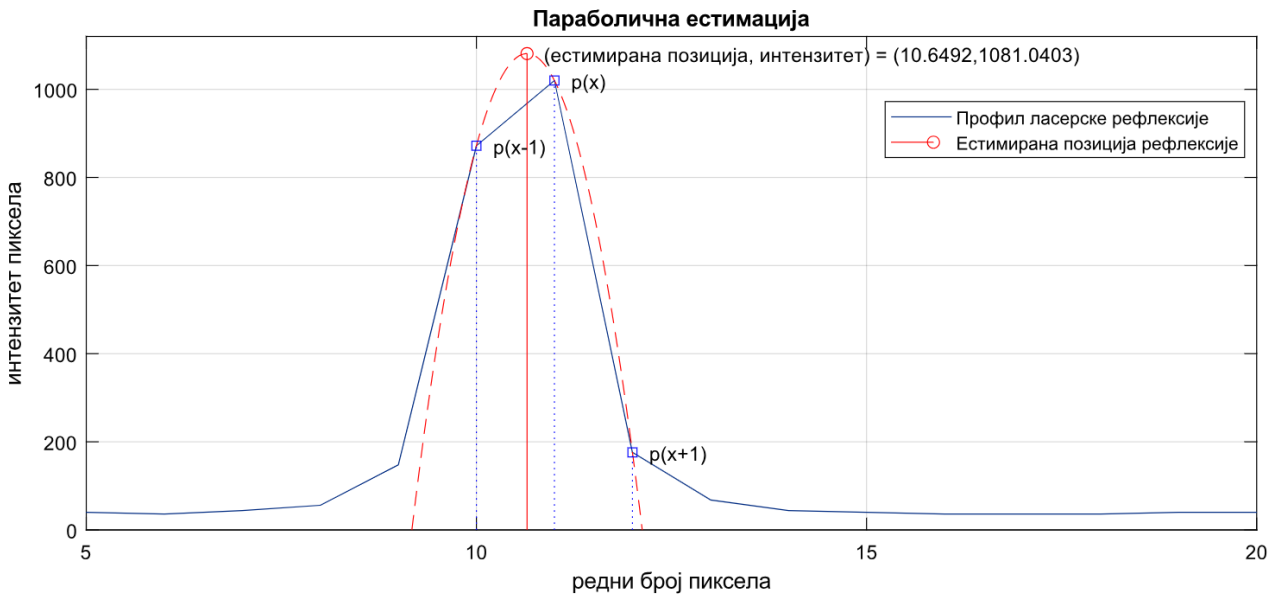
Другачији приступ овом алгоритму је естимација параболое на основу три суседна пиксела са позицијама  $f(x-1)$ ,  $f(x)$  и  $f(x+1)$ .

Такође, могуће је користити више тачака како би естимација параболое била што приближнија. Како би се избегао проблем засићених пиксела, уместо централних тачака рефлексије, могуће је користити пикселе који се налазе са леве и десне стране рефлексије за естимацију параболое. У том случају естимација параболое се ради методом најмањих квадрата. Уколико се за прорачун параболое узима  $n$  тачака  $(x_i, y_i)$ , при чему је  $n \geq 3$ , тада су параметри параболое  $y = a + bx + cx^2$  дати са следећим системом једначина [76]:

$$\begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i^3 \\ \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i^3 & \sum_{i=1}^n x_i^4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i^2 y_i \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

Решавањем датог система једначина, естимирана позиција ласерске рефлексије дата је као:

$$x_{est} = -\frac{b}{2c} \quad (4.23)$$



Слика 31. Пример естимације позиције ласерске рефлексије применом параболичне интерполације

На слици 31. дат је приказ алгоритма који за естимацију позиције ласерске рефлексије користи параболични интерполатор. Парабола се методом најмањих квадрата интерполира кроз три тачке и дата је на слици црвеном испрекиданом линијом. Естимирана позиција ласерске рефлексије дата је са пуном линијом црвене боје. Из практичног искуства, када се



ради инспекција железничких шина, алгоритам естимације позиције ласерске рефлексије заснован на интерполатору параболе је дао добре резултате. Због природе ласерске светлости, као и скениране металне површине врх ласерске рефлексије је често или сатурисан или због додатних рефлексија значајно измењен, па се уместо пиксела који припадају врху рефлексије узимају пиксели са леве и десне стране криве. У супротном овај алгоритам има проблем дељења са нулом, јер изостаје очекивани профил параболе (врх рефлексије је равна линија).

#### 4.1.5. Blais и Rioux (БР) полином

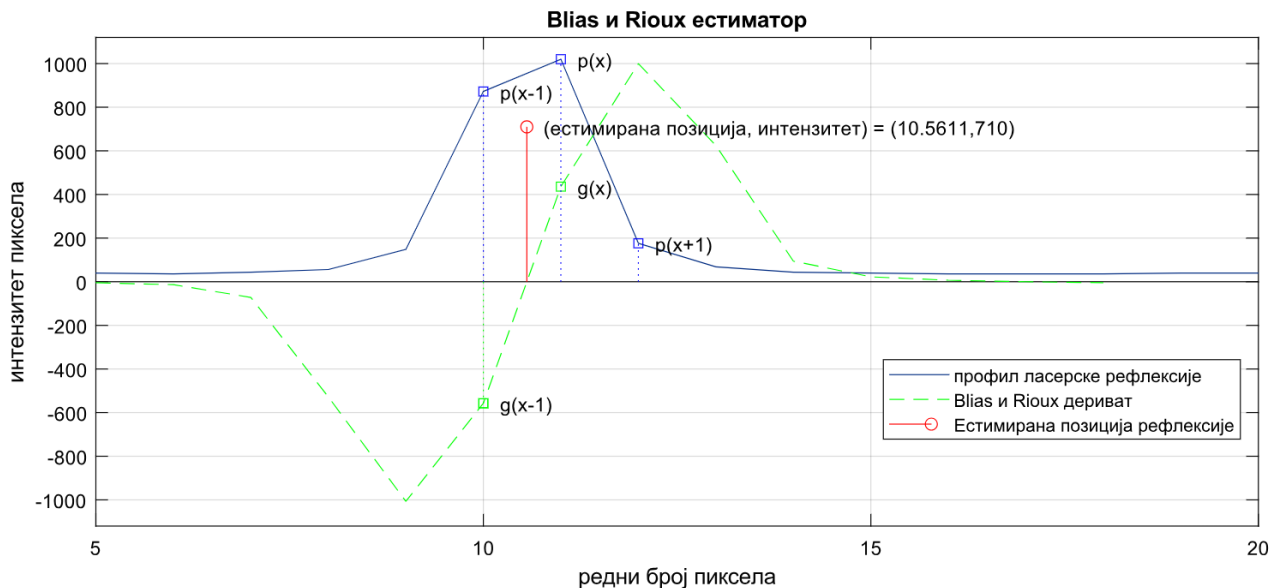
Алгоритам је базиран на диференцијацији сигнала и елиминацији његових високо фреквентних компоненти (шума пре свега) употребом једноставних филтарских структура. Полиноми *Blais* и *Rioux* (БР) другог (БР2), четвртог (БР4) и осмог реда (БР8) дати су са следећим једначинама:

$$\begin{aligned} g_2(x) &= f(x-1) - f(x+1) \\ g_4(x) &= f(x-2) + f(x-1) - f(x+1) - f(x+2) \\ g_8(x) &= f(x-4) + f(x-3) + f(x-2) + f(x-1) - f(x+1) - f(x+2) \\ &\quad - f(x+3) - f(x+4) \end{aligned} \tag{4.24}$$

Овакви филтри се понашају као нумерички диференцијатори [77]. Тачка промене знака криве израчунате на основу неког од БР полинома даје естимирану позицију центра рефлексије. Коначна једначина за естимацију рефлексије ласерске линије позиције користећи БР полином дата је следећом једначином:

$$\delta = \begin{cases} \frac{g(x)}{g(x) - g(x+1)}, & f(x+1) > f(x-1) \\ \frac{g(x)}{g(x-1) - g(x)}, & f(x+1) < f(x-1) \end{cases} \tag{4.25}$$

У радовима је показано да филтар четвртог реда има боље перформансе од филтра осмог реда [78].



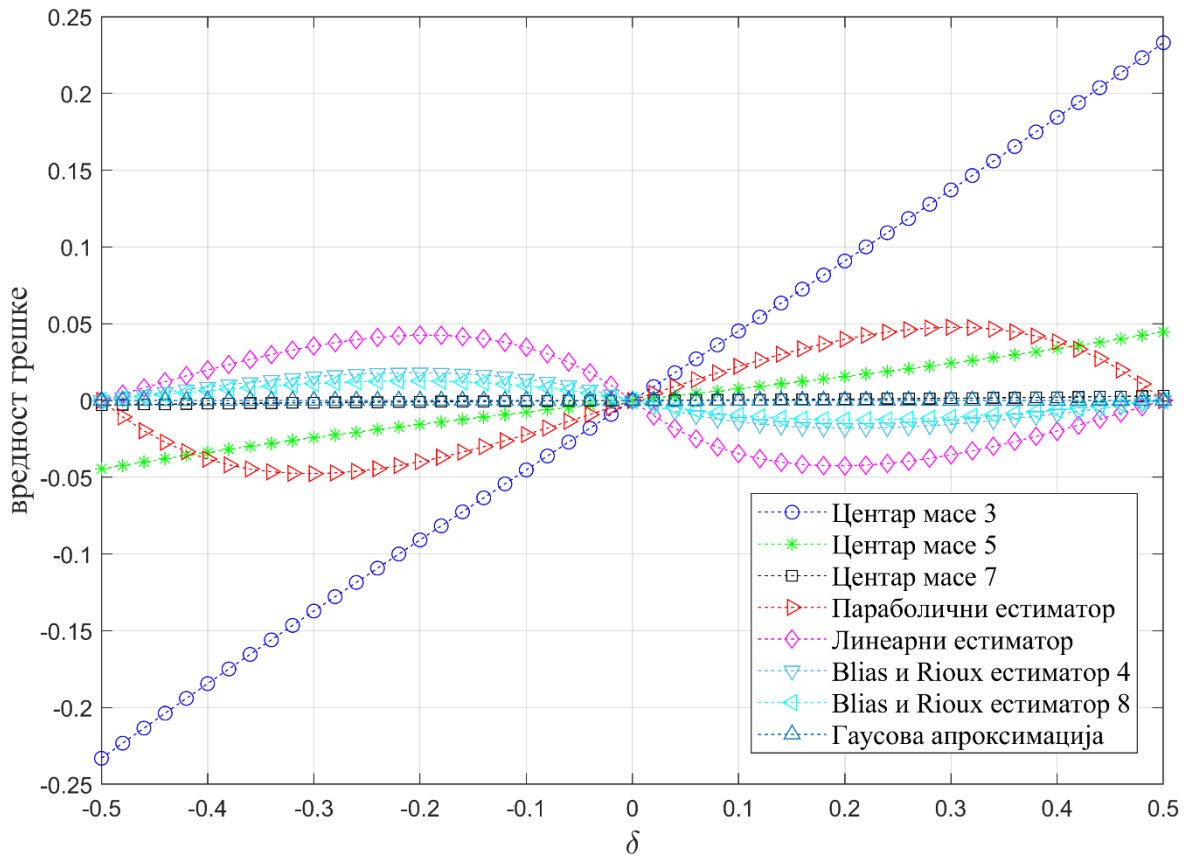
Слика 32. Пример естимације позиције ласерске рефлексије применом БР4 детектора линеарне интерполације

На слици 32. дат је приказ алгоритма у којем се користе БР4 ( $g_4(x)$ ) полиноми за естимацију позиције ласерске рефлексије. Прво се израчуна вредност полинома  $g_4(x)$ . Тачка промене знака криве  $g(x)$  се узима као естимирана вредност ласерске позиције. На слици је са зеленом испрекиданом линијом дата вредност  $g(x)$ , док је са црвеном бојом дата естимирана позиција ласерске рефлексије. За вредност амплитуде естимиране позиције узета је средња вредност интензитета 3 пиксела који се налазе у околини тачке промене знака функције  $g(x)$ .

#### 4.2. Анализа максималне грешке једнодимензионалних алгоритама и њихова имплементација

Уколико се претпостави да је рефлексија ласерске линије идеална континуална функција Гаусовог профила и да је тачна позиција рефлексије близу посматраног централног пиксела, могуће је утврдити везу између естимиране позиције и тачне позиције рефлексије. Ако је рефлексија описана једначином (4.1), тада је  $\delta$  права позиција рефлексије и налази се у интервалу  $-\frac{1}{2} \leq \delta \leq \frac{1}{2}$ , док је  $f$  одабирана вредност у  $x = \dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots$  и заправо представља вредност интензитета пиксела. На овај начин се централном пикселу највећег интензитета додељује редни број 0, односно он постаје централни пиксел. Многи алгоритми узимају овакав приступ, јер врло често се на тај начин смањује број неопходних операција (множење и сабирање).

На слици 33. дата је вредност грешке естимације центра ласерске рефлексије за алгоритме центра масе (3, 5 и 7 пиксела узетих за алгоритам), параболичног и линеарног естиматора, као и БР 4 и 8 диференцијатора. У прорачунима грешке естимације параметар ширине ласерске рефлексије  $\delta$  је једнак 1. У разматрање није узет Гаусов естиматор (његова грешка естимације износи 0), јер је рефлексија моделована са идеалном Гаусовом кривом [79, 80]. Са слике 33. лако се може закључити да са повећањем броја тачака које су узете за естимацију, грешка опада, те тако алгоритам центра масе са 7 тачака има најмању вредност грешке. Наравно, на тај начин се повећава комплексност алгоритма.



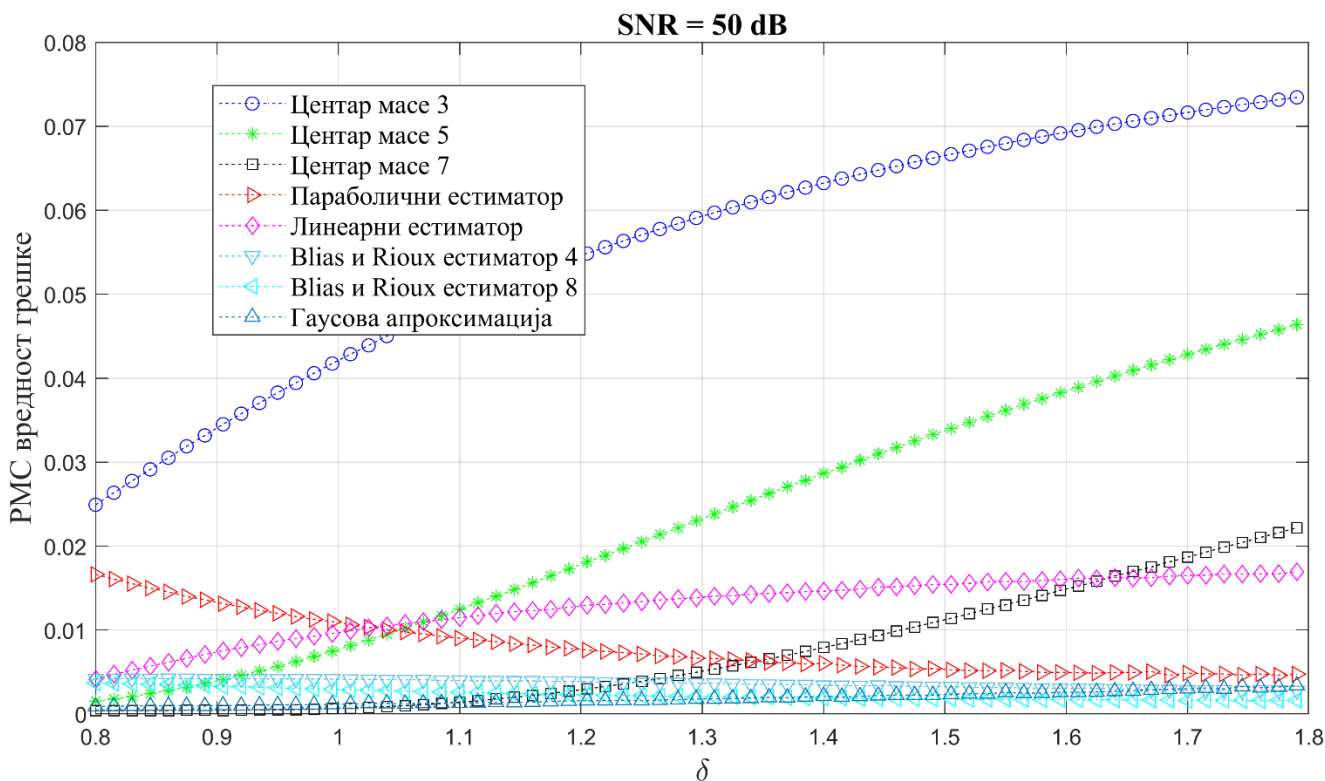
Слика 33. Грешка естимације позиције за различите алгоритме естимације позиције рефлексије (ЦМ 3, ЦМ 5, ЦМ 7, параболични и линеарни естиматор, Blais и Rioux естиматор 4, Blais и Rioux естиматор 8 и Гаусова апроксимација)

Претходна анализа није узимала у обзир шум, који значајно утиче на грешку естимације рефлексије ласерске линије. Утицај шума се може симулирати као случајна вредност у интервалу од 0 до 1, са униформном расподелом која је додата на Гаусов профил симулиране ласерске рефлексије. Тада једначина постаје:

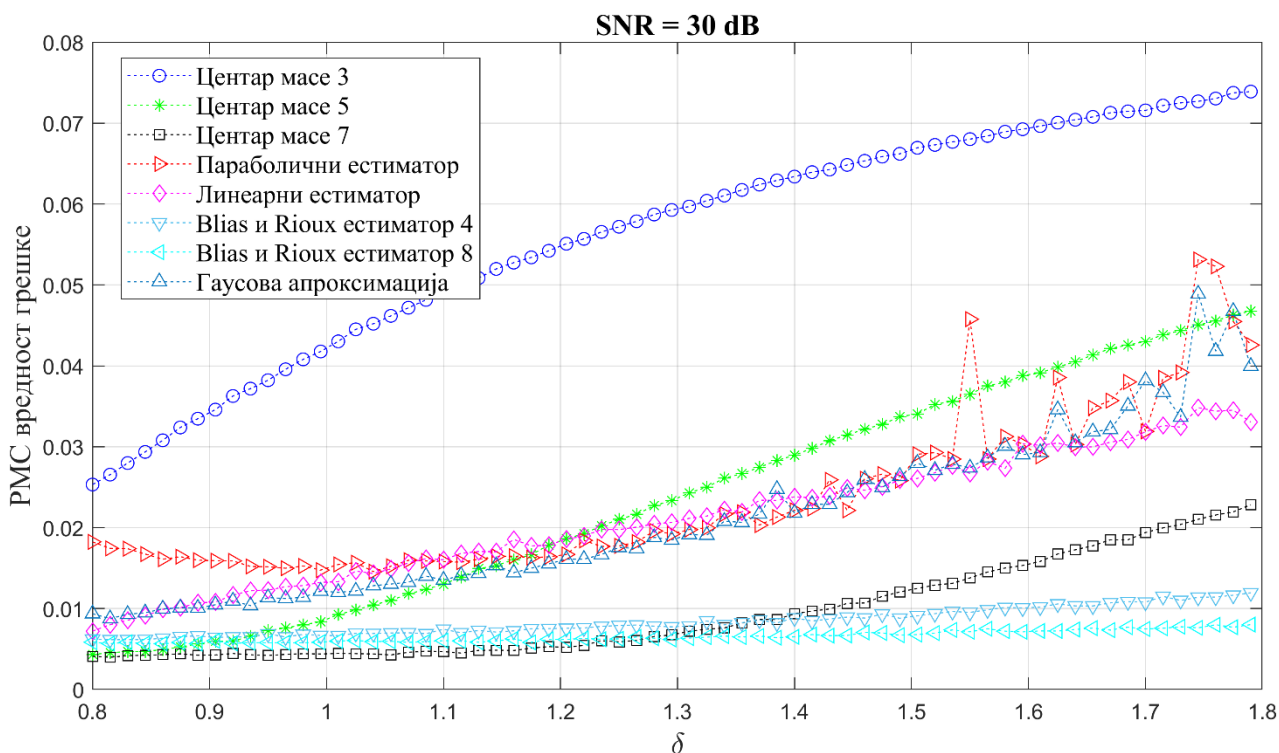
$$f(x, \delta, \sigma, \beta) = e^{-\frac{(x-\delta)^2}{2\sigma^2}} + n(x) \quad (4.26)$$

где је са  $\delta$  означена позиција ласерске рефлексије и има вредности у интервалу  $-\frac{1}{2} \leq \delta \leq \frac{1}{2}$ ,  $x$  су позиције (редни бројеви) пиксела,  $n(x)$  је AWGN (*Additive White Gaussian Noise*) шум, док је са  $\sigma$  означен параметар ширине ласерске рефлексије. Уколико узмемо да је ширина ласерске рефлексије  $\sigma$  у интервалу  $0.8 \leq \delta \leq 1.8$ , онда је RMS (*Root Mean Square*) грешка дата са:

$\sqrt{\frac{1}{N} \sum (\delta_i - \hat{\delta}_i)^2}$  и за наведене алгоритме приказана је на сликама 34. и 35. за различите вредности SNR (50dB и 30dB).



Слика 34. *RMS вредност грешке естимације за  $\text{SNR} = 50\text{dB}$  (ЦМ 3, ЦМ 5, ЦМ 7, параболични и линеарни естиматор, Bias и Rioux естиматор 4, Bias и Rioux естиматор 8 и Гаусова апроксимација)*



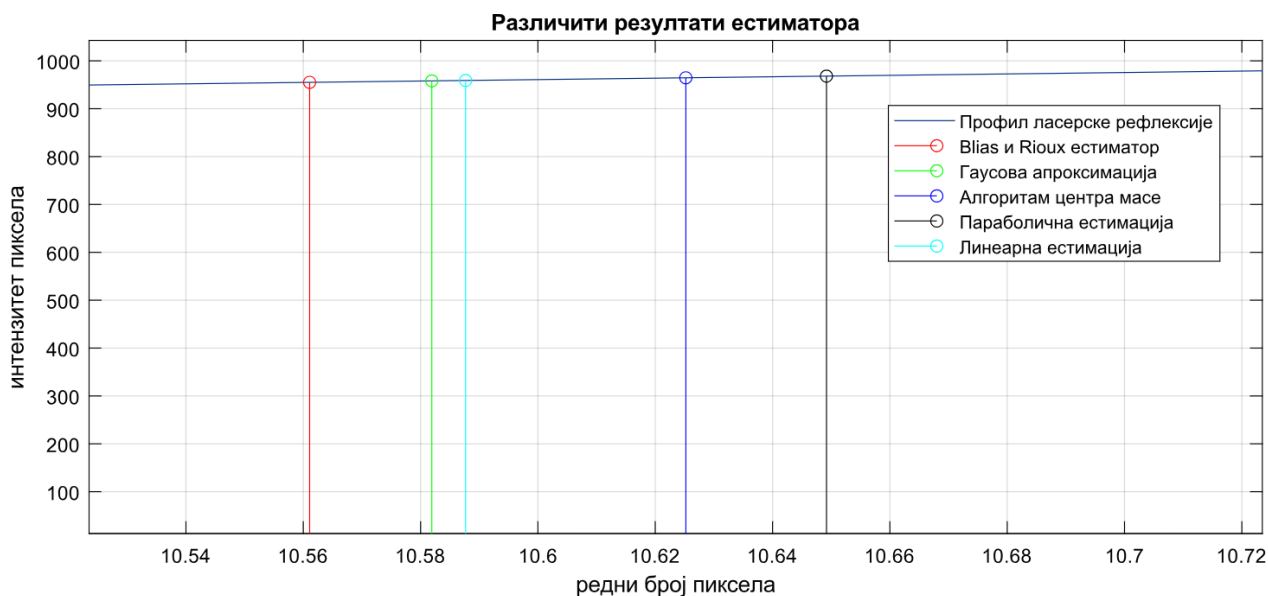
Слика 35. *RMS вредност грешке естимације за  $\text{SNR} = 30\text{dB}$  (ЦМ 3, ЦМ 5, ЦМ 7, параболични и линеарни естиматор, БР 4, БР 8 и Гаусова апроксимација)*

У оба случаја ЦМ3 алгоритам показује лоше перформансе. Уколико се посматра параболични естиматор у случају када је вредност шума мала, он има најбоље перформансе, међутим када ниво шума почиње да расте, долази до значајне дисторзије параболое а самим тим

и ефикасности алгоритма да на правилан начин естимира центар рефлексије. Са повећањем нивоа шума алгоритми који узимају већи број пиксела у разматрање дају значајно боље резултате. Па тако ЦМ7 и БР4 дају најмању RMS грешку за веће вредности нивоа шума, при чему је ЦМ7 алгоритам који показује најбоље перформансе. Узимајући у обзир све посматране случајеве, може се закључити да алгоритам центра масе у односу на остале алгоритме даје најбоље резултате [81] [82].

Посебно је занимљиво посматрати шта се дешава са наведеним алгоритмима у случају када дође до засићења пиксела који описују ласерску рефлексију. Уколико површина показује транспарентне особине, односно има висок индекс рефлексије, или ако је снага ласера превелика и упарена заједно са неодговарајућим временом експозиције камере, врло лако може доћи до засићења пиксела. Тада је врх ласерске рефлексије сатурисан, односно одсечен и информација о центру је неповратно изгубљена. У тим случајевима, Гаусов, Линеарни, Параболични и БР естиматор имају проблем дељења са нулом, што значи да је резултат алгоритма недефинисан. Алгоритам центра масе практично постаје филтар за усредњавање, јер су сви пиксели исте вредности и у једначини се потиру, док је резолуција естимиране позиције ласерске линије не већа од половине величине пиксела.

Слика 36. даје занимљив упоредни приказ различитих алгоритма за естимацију ласерске рефлексије за исте улазне податке у сваки од алгоритма (у алгоритмима је коришћена иста ласерска линија као у претходним примерима). Очекивано, алгоритми дају различите резултате.



Слика 36. Разлике у естимираним позицијама врха ласерске рефлексије за различите алгоритме.

Проучавање комплексности алгоритма омогућава да се донесе одлука који тип платформе је одговарајући за имплементацију. Па тако на пример апликација која захтева велики број једноставних операција може се имплементирати на платформама са паралелним архитектурама као што су FPGA или GPU (*Graphical Processing Unit*). Са друге стране, алгоритми и апликације које захтевају мањи број комплексних операција је боље имплементирати на CPU (*Central Processing Unit*). У данашње време најчешће се користе процесори, заједно са акцелераторима у виду FPGA или GPU, док ће нове генерације алгоритма врло вероватно захтевати и чипове посебне намене за вештачку интелигенцију. Комплексност алгоритма може се проучавати кроз број операција, њихов тип и естимирану количину потребне меморије за имплементацију.

У имплементацијама наменских система операције рачунања се могу класификовати на три класе. Прва класа садржи основне операције као сабирање, одузимање, множење и поређење. Друга класа операција садржи операторе који се могу добити једноставним алгоритмима, као што је дељење и квадратни корен. Последња, трећа класа операција, садржи операторе који су имплементирани сложеним алгоритмима, као што је на пример логаритам, експонент и тригонометријске функције. Алгоритми који су наведени, могу се поделити и на основу ових група оператора. Па тако алгоритам у којем се једноставно претражује максимална вредност (МАХ), захтева операторе прве групе. Алгоритми као што су линеарни естиматор (ЛН), параболични естиматор (ПФ), центар масе и БР(4 или 8) захтевају операторе из друге групе, док Гаусова апроксимација (ГА) захтева операторе из све три групе [83]. У табели су дати алгоритми, као и групе оператора који су потребни за имплементацију алгоритама.

Табела 4. Преглед алгоритама и класа операција неопходних за њихову имплементацију, као и комплексност алгоритма базирана на броју потребних пиксела за естимацију позиције.

Алгоритам	МАХ	ЛН	ПФ	ЦМ	БР	ГА
Класа операције	1	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2,3
Комплексност	Линеарна $N$	Линеарна $N, L$	Линеарна $N, L$	Линеарна $N, L$	$N \times L$	$N \times L$

Број операција за сваки алгоритам се такође може естимирати, те се на основу те информације може говорити о комплексности алгоритма. Уколико се са  $N$  означи број линија на слици, а са  $L$  број пиксела који се користе за естимацију позиције, тада је комплексност алгоритма на основу тих параметара дата такође у табели 4. За алгоритме у којима се трага за максимумом, линеарном или параболичном естимацијом и на крају центром масе комплексност је линеарна са  $N$  и  $L$ . У случају када се говори о БР и ГА комплексност није линеарна већ расте са производом  $N \times L$ .

### 4.3. FIR филтар

Из угла гледања обраде сигнала, свака линија слике се може посматрати као једнодимензионални сигнал који прати Гаусов профил и на који су суперпониране додатне рефлексије као и остали извори шума. Линију слике је могуће филтрирати филтром пропусника ниских фреквенција са одговарајућом фреквенцијом одсецања, слабљењем и транзиционим опсегом. Параметри филтра се могу одредити на разне начине, али свакако да ће одабир алгоритма за рачунање коефицијената зависити од одабране платформе за обраду сигнала и расположивих ресурса који се за имплементацију могу користити. У литератури се могу пронаћи добро познати алгоритми за пројектовање FIR (*Finite Impulse Response*) филтара, као и познате архитектуре за оптималну имплементацију [84] [85].

Као што је добро познато, FIR филтрирање се састоји од конволуције сигнала  $x(n)$  и коефицијената филтра  $h(n)$ , [86] и дато је једначином 4.27. Први извод конволуције сигнала  $x(n)$  и  $h(n)$  је једнак конволуцији  $x(n)$  и првог извода  $h(n)$ , дато једначином 4.28. Након што је израчуната конволуција сигнала  $x(n)$  и првог извода  $h(n)$ , на месту промене знака, узимају се прва тачка филтрираног сигнала изнад  $x$  осе већа од нуле ( $x_1$ ) и прва  $x$  тачка мања од нуле ( $x_2$ )

и кроз њих се конструише права [87]. Пресек  $x$  осе и праве дефинисане тачкама  $x_1$  и  $x_2$  представља центар детектоване рефлексије.

$$y(n) = \sum_{k=0}^M x(k) \cdot h(n-k) \triangleq x(n) * h(n) \quad (4.27)$$

За естимацију центра ласерске рефлексије се користи први извод интензитета пиксела у посматраној линији слике и то на месту промене знака извода. Први извод филтриране линије слике  $dy/dn$  може се израчунати на основу следеће једначине (на основу особине конволуције):

$$\begin{aligned} \frac{dy(n)}{dn} &= \frac{d[x(n) * h(n)]}{dn} = \frac{d \sum_{k=0}^M x(k) \cdot h(n-k)}{dn} \\ &= \sum_{k=0}^M \frac{d[x(k) \cdot h(n-k)]}{dn} \\ &= \sum_{k=0}^M \frac{dx(k)}{dn} \cdot h(n-k) \\ &+ \sum_{k=0}^M x(k) \cdot \frac{dh(n-k)}{dn} = \sum_{k=0}^M x(k) \frac{dh(n-k)}{dn} = x(n) * \frac{dh(n-k)}{dn} \end{aligned} \quad (4.28)$$

Односно естимирана позиција ласерске рефлексије са суб-пиксел резолуцијом дата је са:

$$\hat{X} = x_0 - \frac{y_0 \cdot (x_1 - x_0)}{y_1 - y_0} \quad (4.29)$$

Претходна једначина представља естимирану позицију ласерске линије када се користи FIR филтар пропусник ниских фреквенција [88]. Занимљиво је напоменути да неки аутори користе FIR филтар пропусник ниских фреквенција у ситуацијама када је ласерска рефлексија сатурисана [89].

Филтрирање 2D Гаусовим филтрима је широко распрострањена метода у обради слике. Генерално, такође се ради о филтру пропуснику ниских фреквенција. Осим Гаусовог филтра, врло често се користи и филтрирање са његовим дериватима првог и другог реда [90]. Па се тако могу комбиновати Гаусови деривати првог реда, на нелинеаран начин са остатком система, како би се одрадила позиција ласерске рефлексије на слици [91].

Филтрирање FIR филтром даје добре резултате, посебно у ситуацијама када је SNR однос веома мали, међутим, биас завистан од интензитета светлости у процени позиције рефлексије појављује се ако се скенирају провидне (транспарентне) површине [92].

#### 4.4. Повећање резолуције слике (интерполација слике)

У раду [93] аутори дају занимљиву идеју да се тачност детекције ласерске линије побољша користећи неку од метода повећања резолуције пиксела слике. Након што је

резулација слике повећана, позиција ласерске линије се може одредити са резолуцијом већом од величине пиксела. Постоје разни алгоритми за повећање резолуције слике, а неки од њих су: *Nearest Neighbor*, билинеарна, бикубна *Spline* интерполација, генерализована бикубна интерполација и друге. Такође, неки од добро познатих алата као што је *OpenCV* овакве функције имају већ имплементирани, те је њихова употреба релативно једноставна [94].

Међутим, на овај начин се повећава резолуција слике, а самим тим и број података које треба обрадити. На пример, једноставним повећањем резолуције од 2 пута, количина података се повећа четири пута, док је резолуција скенера повећана за половину пиксела. Као што и сами аутори напомињу, овакав метод није практичан за примену уколико се прво не користи неки од метода за одређивање зоне интереса слике или ROI (*Region of Interest*) који заправо даје грубу естимацију где се налази рефлексија, па тек онда користити неку од метода интерполације или филтрирања слике. Овакви алгоритми су брзи, јер је неопходно што пре пронаћи оквирно где се налази ласерска рефлексија, како би остатак процесирања могао почети. Неки од једноставних алгоритама за одређивање ROI су претрага за ласерском линијом, алгоритам акумулирања интензитета и алгоритам предикције и естимације.

Алгоритам претраге ласерске линије прво одређује интензитет позадине слике тако што се израчуна средња вредност пиксела по свим линијама слике. Интензитет рефлектоване светлости која одговара рефлексији је већа од интензитета позадине, па се једноставном употребом прага може одредити позиција ROI. Сви пиксели који имају интензитет већи од прага се означе и као границе ROI се узимају минимална и максимална вредност координате у оба правца ( $x$  и  $y$ ). Додатно, како би се убрзао процес претраге могуће је одређени број пиксела прескочити приликом претраге у хоризонталном и у вертикалном правцу.

#### 4.5. Дводимензионални алгоритми за естимацију центра рефлексије ласерске линије

Како би се унапредили алгоритми детекције центра ласерске рефлексије у разматрање се врло често узима и окружење посматране ласерске рефлексије на слици. На тај начин се повећава количина информација о рефлектованој ласерској линији, а самим тим и тачност одређивања њене централне позиције. Тако на пример, једнодимензионални алгоритми не узимају у разматрање нагиб ласерске линије у односу на правац претраге алгоритма, већ претпостављају да је он увек нормалан. Наравно, у пракси су врло чести примери када то није случај, те због тога дводимензионални алгоритми који то узимају у обзир имају предност у односу на бројане једнодимензионалне алгоритме. Међутим, са друге стране, имплементација таквих алгоритама је далеко комплекснија и захтева много више рачунарских ресурса.

У наставку је дат преглед неких од најчешће коришћених дводимензионалних алгоритама за детекцију центра рефлексије ласерске линије код профилних скенера који се могу пронаћи у литератури. Једна од често коришћених трансформација када је у питању детекција линија на слици је класична *Hough* трансформација. Такође, у наставку ће бити више речи о побољшаном алгоритму центра масе, који заправо у обзир узима оријентацију ласерске рефлексије на слици како би побољшао естимацију центра. Један од често коришћених алгоритама када је у питању естимација позиције ласерске линије је *Steger* алгоритам. На крају дат је пример употребе таласних трансформација (*wavelet*) у обради слике са профилних



скенера. Таласне трансформације дају занимљив научни приступ решавању проблема детекције, али, барем за сада, њихова комплексност далеко превазилази практичну примену. Развој све бржих и моћнијих платформи за обраду сигнала прати и развој сензора камере, који имају све већу резолуцију али и број слика у секунди, што на неки начин опет фаворизује употребу једноставних алгоритама како би се добио што је могуће већи број тачака по једном пролазу скенера. Наравно у зависности од примене, са савременим платформама могуће је имплементирати заиста комплексне алгоритме на уштрб резолуције или броја тачака профилног скенера по секунди.

#### 4.5.1. Hough трансформација у примени естимације ласерске позиције

За разлику од метода које су базирани на процесирању пиксела у околини детектоване рефлексије, постоје алгоритми који узимају у обзир и све релације између детектованих ивица скенираног објекта. Неке од ових метода имају *a priori* информације о очекиваном облику рефлексије, јер је врло често облик скенираног објекта унапред познат, посебно када се говори о примени профилних скенера у инспекцији индустријске производње или контроле квалитета варова. Међу таквим методама једна од најпознатијих је *Hough* трансформација, која се обично користи како би се детектовале праве линије на слици, али исто тако уз додатне модификације може бити коришћена како би се детектовали одређени предефинисани облици [95]. У наставку је дат кратак опис алгоритма који детектује праве линије слике на основу *Hough* алгоритма.

Алгоритам полази од чињенице да се кроз сваки пиксел на слици може повући бесконачно много правих линија. Свака од тих линија може бити тачно описана једначином праве датом са:

$$Y = mX + b \quad (4.30)$$

где су са  $X$  и  $Y$  означене координате посматраног пиксела, док је са  $m$  означен нагиб праве, а тачка пресека  $Y$  осе и праве дата је са вредношћу  $b$ . Уколико ову једначину посматрамо другачије, односно уколико су  $X$  и  $Y$  константе а  $m$  и  $b$  координате новог простора, тада се једначина 4.30 може реорганизовати на следећи начин:

$$b = -mX + Y \quad (4.31)$$

На основу једначине 4.31 свака тачка (пиксел) у дводимензионалном простору слике  $(X, Y)$  може се једнозначно представити фамилијом правих у  $(m, b)$  простору, који представља *Hough* простор. Тачке у *Hough* простору које се секу, одговарају колинеарним тачкама у простору слике  $(X, Y)$ . Ово важи за било које две тачке (јер је сваки пар тачака колинеаран), међутим све линије које се секу у истој тачки  $(m, b)$  простора ће одговарати колинеарним тачкама у  $(X, Y)$  простору. Другим речима, ако се  $N$  правих у *Hough* простору, које одговарају  $N$  тачака у простору слике, сече у једној тачки, онда тих  $N$  тачака лежи на истој правој у простору слике. Параметри те линије одговарају  $(m, b)$  координатама тачке пресека, што заправо чини дефиницију *Hough* трансформације.

Може се рећи да је овај алгоритам сличан хистограму слике, уз разлику да се овде ради о хистограму тачака пресека, уместо интензитета пиксела. Потребно је одрадити степен квантизације  $(m, b)$  координата пре него што се почне са прорачуном алгоритма. За сваки

пиксел у оригиналној слици рачунају се параметри праве у *Hough* простору и увећава се вредност бројача тачака пресека које припадају тој линији. Након што је за сваки од пиксела израчуната линија за *Hough* простор, тачке са највећим вредностима одговарају пикселима који се налазе на истој линији на оригиналној слици. Због чињенице да једначина 4.31. не може да представи вертикалну линију, уводи се једначина као побољшање алгоритма:

$$r = x\cos(\omega) + y\sin(\omega) \quad (4.32)$$

где је са  $r$  означено растојање од координатног центра до линије, а са  $\omega$  угао између криве која пролази кроз координатни почетак и нормална је на посматрану криву и  $x$  осе [96].

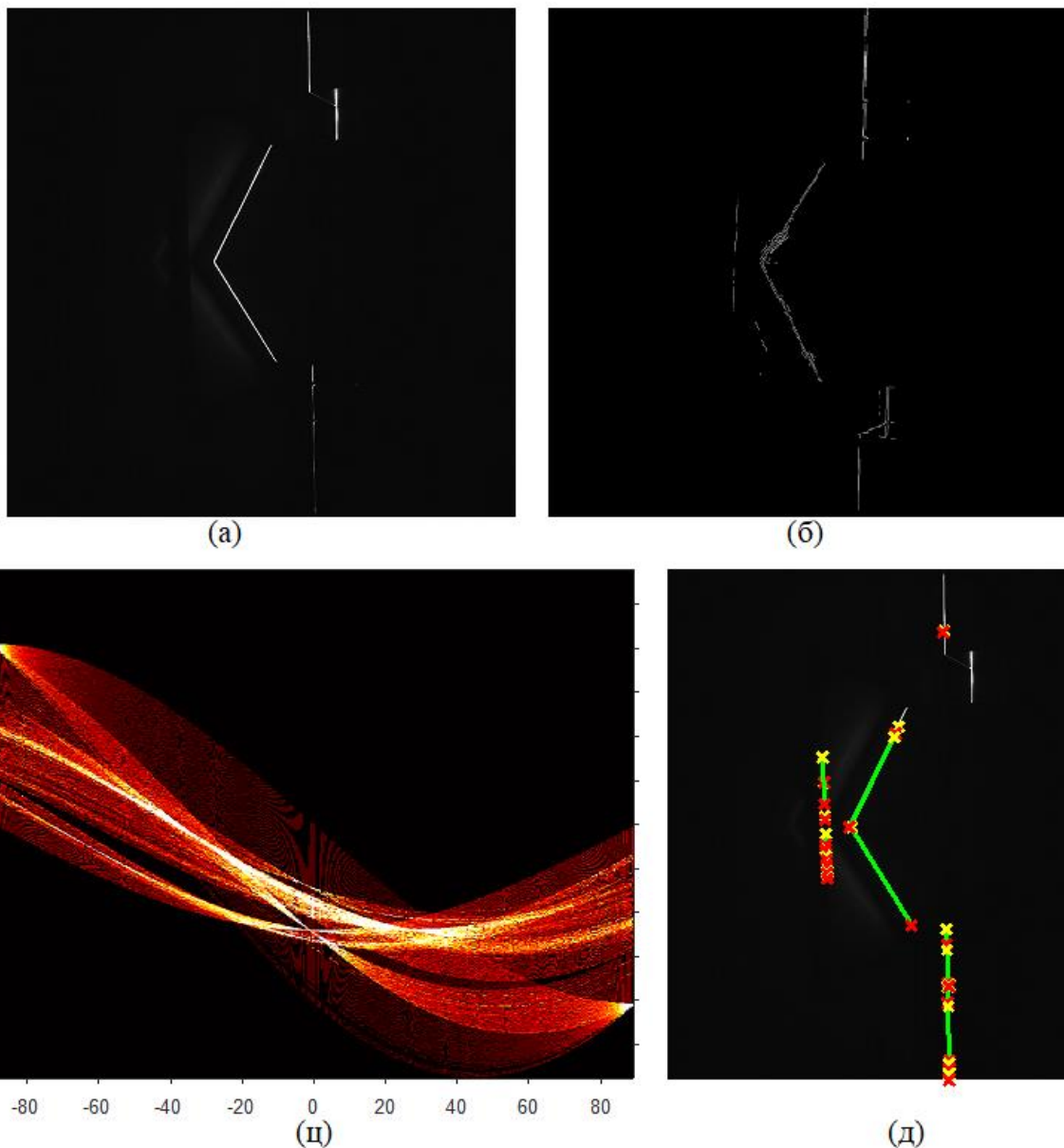
*Hough* алгоритам је такође описан следећим корацима:

- Све тачке *Hough* простора на почетку алгоритма се поставе на вредност 0.
- За сваку од тачака у простору слике  $(i, j)$  увећа се свака тачка *Hough* простора која одговара свим могућим правима које пролазе кроз њу, а дефинисана је са једначином 4.32. У конкретном случају, вредности  $i$  и  $j$  су познате, што значи да је потребно израчунати вредности  $r$ , за сваку могућу вредност  $\omega$ .
- На крају је неопходно претражити *Hough* простор и идентификовати све тачке  $(r, \omega)$  које су веће од суседних ћелија и прелазе унапред задати праг који одређује да те тачке припадају истој линији.

*Hough* трансформација се најчешће користи када је унапред познато да ће рефлексија имати облик праве линије, као у случајевима када се ради о праћењу ласерске рефлексије код скенера за испитивање квалитета варења.

У пракси се најчешће овај алгоритам користи у комбинацији са неким од добро познатих алгоритама за детекцију ивица слике. На слици 37а. дат је приказ оригиналне слике ухваћене камером ласерског скенера. На слици 37б. дат је резултат *Canny* филтра за детекцију ивица оригиналне слике, док је на слици 37ц. дат приказ *Hough* алгоритма за исту слику имплементиран у MATLAB-у. Крајњи резултат алгоритма је приказан на слици 37д, где су са жутим знаком  $x$  означени детектовани почеци линије, са зеленом бојом је дата детектована линија на слици док су са црвеним знаком  $x$  означени крајеви детектованих линија.

Проблем имплементације оваквог алгоритма је велики број рачунских операција, као и чињеница да га је тешко имплементирати као процесирање сигнала у реалном времену. Сигурно је да би у пракси било неопходно користити неки од филтара за усредњавање шума поред неких од стандардних филтара за детекцију ивичних пиксела. Финални резултат детекције је могуће рачунати тек када су сви пиксели слике или ROI израчунати, што имплицира да би међу-резултати прорачуна морали бити смештени у меморију (највероватније DDR меморију) те би врло вероватно њена брзина била уско грло система. Са друге стране свака потреба да се подаци снимају у меморију како би се донела коначна одлука о позицији рефлексије доводе до кашњења података. Идеалан приступ обраде ласерске рефлексије подразумева да одмах након пријема дела слике на којој се рефлексија налази може се донети одлука о позицији.



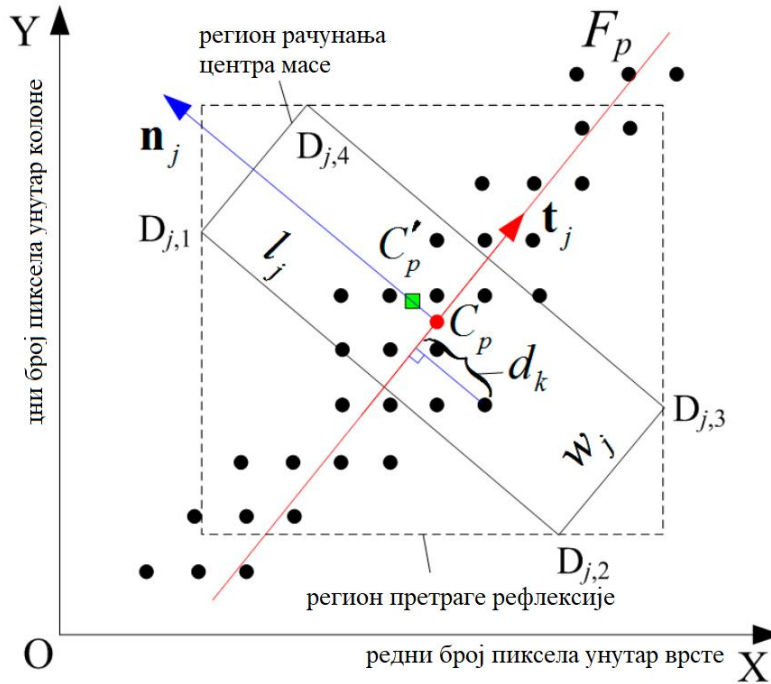
Слика 37. (а) Оригинална слика са камере ласерског скенера. (б) Сапу филтер оригиналне слике (у) *Hough* трансформација слике. (д) Резултат детекције линија оригиналне слике.

У литератури се може пронаћи да *Hough* трансформација није довољна за детекцију ивице у пракси. Овај метод може дати много лажних линија када се детектује само једна ивица на слици [97].

#### 4.5.2. Дводимензионални алгоритам центра масе

У случајевима када рефлексија ласерске линије није нормална на правац претраге или када скенирани објекат има оштре ивице извесно је да ће доћи до грешке у естимацији позиције, јер изостаје очекивани Гаусов профил рефлексије. Занимљиво је посматрати како се понаша алгоритам центра масе када се у обзир узимају не само пиксели из једне линије слике, већ када се посматрају и околни пиксели заједно са естимираним нормалним и тангенцијалним

векторима сваког пиксела у односу на правац рефлексије. Концепт дводимензионалног алгоритма центра масе је приказан на слици 38.



Слика 38. Параметри имплементације дводимензионалног алгоритма центра масе примењеног за детекцију центра ласерске линије. Прилагођено из рада [98]

На слици су приказани тачкама пиксели који су већи од предефинисаног прага  $T_0$ .  $C_p$  је централна координата колоне  $j$  слике.  $n_j$  и  $t_j$  су нормални и тангенцијални вектори тачке  $C_p$  у односу на праву  $F_p$  која пролази кроз  $C_p$  (дата на слици 38. црвеном бојом) и која је коинцидентна са вектором  $t_j$  и дата је са  $ax + by + c = 0$ . Нове координате  $C_p$ , означене са  $C'_p$  су израчунате на основу вредности пиксела који се налазе унутар правоугаоника дужине странице  $w_j$  и  $l_j$  чија су темена  $D_{j,1}$ ,  $D_{j,2}$ ,  $D_{j,3}$  и  $D_{j,4}$ . Аутори предлажу да се слика издели на секције у којима се на основу алгоритма покретног прозора минималног квадратног растојања одреди вредност нормалног и тангенцијалног вектора, односно  $a$ ,  $b$  и  $c$  коефицијенти који дефинишу  $F_p$  и да се за све тачке које се налазе унутар правоугаоника одреди растојање  $d_k$ , дато следећим изразом:

$$d_k = (\text{sign}) \cdot \frac{|a \cdot j + b \cdot i + c|}{\sqrt{a^2 + b^2}} \quad (4.33)$$

Ако је пиксел изнад  $F_p$  праве, онда је знак позитиван у једначини, у супротном знак је негативан. Једначина којом се може изразити нова модификована удаљеност у нормалном смеру ( $d_p$ ) је дата са:

$$d_p = \frac{\sum_{k=1}^K d_k \cdot I_n(i, j)}{\sum_{k=1}^K I_n(i, j)} \quad (4.34)$$

где је са  $I_n$  означен интензитет пиксела, а  $K$  је број пиксела који се налазе у посматраном правоугаоном прозору пиксела.

Нова вредност центра рефлексије  $C'_p$  (на слици 38, дата је зеленом бојом) може се израчунати на следећи начин:

$$C'_p(x'_p, y'_p) = \begin{cases} x'_p = x_p - d_p \cdot \sin\theta \\ y'_p = y_p + d_p \cdot \cos\theta \end{cases} \quad (4.35)$$

где је са  $\theta$  означен угао између  $t_j$  ( $F_p$  праве) и  $X$  осе, а  $x'_p$  и  $y'_p$  су нове координате тачке  $C_p$ .

Предложени алгоритам аутори су покренули на РС рачунару на којем се налази Intel i5-3470 процесор брзине 3.2GHz, упарен са 4GB RAM меморије. Алат који су аутори користили за обраду слике је MATLAB R2012b. Резолуција посматране тест слике је  $500 \times 250$  пиксела. За сваку слику, програм за естимирање позиције центра рефлексије је покренут 10 пута и средње време за различите методе је приказано у табели 5. [98]:

Табела 5. Упоредни приказ времена извршавања Steger, центар масе и алгоритма побољшаног центра масе за слику резолуције  $500 \times 250$  пиксела, са различитим облицима ласерске линије

Тест слика	Време извршења алгоритма [ms]		
	Steger	Центар масе	Унапређени центар масе
Слика 1	2806	6	91
Слика 2	2811	6	89
Слика 3	2802	5	95
Слика 4	2819	6	96

Из табеле 5. могуће је закључити да се алгоритам центра масе најбрже извршава, док са друге стране Steger алгоритам због комплексности треба највише времена за естимацију центра ласерске линије.

Када је у питању одређивање предефинисаног прага  $T_0$  на основу којег је рађена детекција ласерске линије у односу на позадину слике, коришћен је Отсу алгоритам. Ова метода се доста користи у машинској визији за сегментирања слике. Алгоритам одређује праг који минимизује унутар класну варијансу  $\delta_\omega^2$ , дефинисану као суму варијанси две класе (у конкретном случају се ради о пикселима који припадају окружењу сцене и ласерској рефлексији):

$$\delta_\omega^2(t) = \omega_0(t)\delta_0^2(t) + \omega_1(t)\delta_1^2(t) \quad (4.36)$$

где су са  $\omega_0$  и  $\omega_1$  дате вероватноће две класе раздвојене са прагом  $t$ . Са  $\delta_0^2$  и  $\delta_1^2$  су дате варијансе ове две класе. На тај начин се добија вредност прага  $T_0$  и слика дели на пикселе који припадају ласерској линији и пискеле позадине. У програмском језику MATLAB, функција *graythresh(n)* је имплементирана на основу Отсу алгоритма и врло често се користи у комбинацији са функцијама које раде бинаризацију слике [99]. Осим одређивања прага једноставне бинаризације слике, овај алгоритам се може проширити на  $n$ -димензионалну сегментацију, односно слика се може поделити на већи број сегмената употребом више израчунатих прагова поделе.

Аутори [100] користе додатно филтрирање слике дводимензионалним филтром пропусника ниских фреквенција величине  $3 \times 3$ , како би смањили ефекте шума. Филтар је описан следећом једначином:

$$I(i, j) = k_0 \times f(i, j) + k_1 \times [f(i, j - 1) + f(i, j + 1)] + k_2 \times [f(i, j - 2) + f(i, j + 2)]; j = C_i - k, \dots, C_i + k \quad (4.37)$$

Употреба Отсу алгоритма има широку примену у обради слике, али за његово рачунање је потребно користити велики број пиксела (потребно је одредити хистограм слике), што у неким од апликација које раде у реалном времену може представљати проблем.

Дводимензионални алгоритам центра масе може бити занимљив за практичну имплементацију уколико се поједностави алгоритам за детекцију пиксела који припадају ласерској линији, односно ако се избаци детекција употребом Отсу алгоритма. Да би се одредио праг на основу којег се одређује који пиксели припадају рефлексiji, а који су само позадински шум неопходно је да се одради анализа целе слике, израчунају одговарајући параметри, а онда на крају поново прочитају вредности пиксела из меморије и израчунају естимације позиција. Међутим, и поред тога, у једначинама које описују алгоритам се користе операције дељења, кореновања, као и тригонометријске функције те би имплементација оваквог алгоритма сигурно била рачунски захтевна. Такође, пошто се ради о дводимензионалном алгоритму, неки вид имплементације са померачким прозорима је неопходан, што опет значи већу количину неопходне меморије.

### 4.5.3. *Steger* алгоритам

Дводимензионални алгоритам за естимацију позиције ласерске рефлексije који заслужује посебну пажњу је сигурно *Steger* алгоритам. Алгоритам је оригинално развијен за анализу медицинских и аеро снимака, али је исто тако један од врло често коришћених метода који се користи за анализу ласерске линије, пре свега захваљујући својој робусности и тачности [101] [102] [103] [104] [105] [106] [107]. Идеја овог алгоритма је била да се на медицинским сликама детектују крвни судови. Такође, исти алгоритам је коришћен за детекцију путева на аеро (или сателитским) снимцима.

Када се ради о профилним ласерским скенерима, алгоритам полази од чињенице да свака линија која се налази на слици има карактеристичан профил, тако да *Steger* метод полази од дефиниције Гаусовог облика линије као једнодимензионалног сигнала. Како би се детектовале линије на слици, у случају када на слици нема шума, довољно је одредити први извод и место где је први извод једнак нули. Алгоритам уводи појам главних линија на слици, које се могу додатно разликовати од оних које су детектоване првим изводом, тако што се додатно посматра други извод и његова вредност у истој тачки. Светле линије на слици које се налазе на тамној позадини ће имати други извод значајно мањи од нуле, док ће тамне линије на светлој позадини имати вредност другог извода много већу од нуле.

Слике добијене са индустријске камере ће садржати и значајну количину шума, те предложени метод сигурно није довољан па је слику потребно филтрирати конволуцијом извода Гаусовог филтра ( $g_\sigma(x)$ ). Током екстракције центра ласерске линије, сви пиксели слике се конволуирају са Гаусовим дводимензионалним филтрима који рачунају први и други извод слике у хоризонталном и вертикалном правцу. Први извод Гаусовог филтра, у односу на  $x$ ,  $G_x(x, y)$  и други извод у односу на  $y$ ,  $G_y(x, y)$  су дати следећим једначинама [108]:

$$G_x(x, y) = \left( \frac{-1}{2\pi\sigma^4} \right) x e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (4.38)$$

$$G_y(x, y) = \left( \frac{-1}{2\pi\sigma^4} \right) y e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (4.39)$$

Када се ради анализа линија на сликама користећи *Steger* метод, правац детектоване линије за сваки пиксел слике може се локално израчунати користећи *Hessian* матрицу, која је дефинисана следећом једначином:

$$H(x, y) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 g(x, y)}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 g(x, y)}{\partial x \partial y} \\ \frac{\partial^2 g(x, y)}{\partial y \partial x} & \frac{\partial^2 g(x, y)}{\partial y^2} \end{bmatrix} \otimes f(x, y) = \begin{bmatrix} r_{xx} & r_{xy} \\ r_{xy} & r_{yy} \end{bmatrix} \quad (4.40)$$

где је са  $\otimes$  означена дводимензионална конволуција. Из једначине 4.40 се може закључити да је *Hessian* матрица заправо правоугаона матрица другог извода скаларних функција са више променљивих и дефинише локалне минимуме и максимуме дате функције.

Уколико је резолуција слике дата са  $M \times N$  и са  $\omega(x, y)$  филтар димензија  $m \times n$ , тада је конволуција слике  $f(x, y)$  и филтра  $\omega(x, y)$  дата следећом једначином:

$$r = f(x, y) = \sum_{s=-a}^a \sum_{t=-b}^b f(x+s, y+t) \omega(-s, -t) \quad (4.41)$$

где је  $a = \frac{(m-1)}{2}$ ,  $b = \frac{(n-1)}{2}$ . Са  $\omega(x, y)$  је заправо означен неки од дводимензионалних Гаусових филтара првог или другог извода ( $G_x, G_y, G_{xx}, G_{yy}, G_{xy}$ ).

*Hessian* матрица се рачуна конволуцијом пиксела слике са дводимензионалним Гаусовим парцијалним изводима који су дефинисани следећим једначинама [109]:

$$G_{xx}(x, y) = \frac{\partial^2 g(x, y)}{\partial x^2} = \left( \frac{-1}{2\pi\sigma^4} \right) \left( 1 - \frac{x^2}{\sigma^2} \right) e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (4.42)$$

$$G_{yy}(x, y) = \frac{\partial^2 g(x, y)}{\partial y^2} = \left( \frac{-1}{2\pi\sigma^4} \right) \left( 1 - \frac{y^2}{\sigma^2} \right) e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (4.43)$$

$$G_{xy}(x, y) = \frac{\partial^2 g(x, y)}{\partial x \partial y} = \left( -\frac{xy}{2\pi\sigma^6} \right) e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (4.44)$$

У претходним једначинама са  $\sigma$  је дата стандардна девијација Гаусове функције. Нормалан правац сваког пиксела, означен са  $(n_x, n_y)$  одређује се на основу сопствених вредности и сопствених вектора *Hessian* матрице. Сопствене вредности *Hessian* матрице су дате са следећим једначинама:

$$\lambda_1 = \frac{r_{xx} + r_{yy}}{2} + \frac{\sqrt{(r_{xx} - r_{yy})^2 + 4r_{xy}^2}}{2} \quad (4.45)$$

$$\lambda_2 = \frac{r_{xx} + r_{yy}}{2} - \frac{\sqrt{(r_{xx} - r_{yy})^2 + 4r_{xy}^2}}{2}$$

$$\lambda = \max(|\lambda_1|, |\lambda_2|)$$

Сопствени вектори *Hessian* матрице су дати са следећим једначинама:

$$n_x = \frac{r_{xy}}{\sqrt{r_{xy}^2 + (r_{xx} - \lambda)^2}}$$

$$n_y = \frac{\lambda - r_{xx}}{\sqrt{r_{xy}^2 + (r_{xx} - \lambda)^2}}$$
(4.46)

У наставку алгоритма се рачуна Тејлоров развој другог реда у правцу  $(n_x, n_y)$ , па је коначна естимација позиције ласерске линије дата са координатама  $(p_x, p_y)$  следећим једнакостима:

$$(p_x, p_y) = (tn_x + x, tn_y + y)$$
(4.47)

Ако са  $f(tn_x + x, tn_y + y)$  означимо интерполирану вредност слике којој одговара врх рефлексије:

$$f(tn_x + x, tn_y + y) = f(x, y) + (tn_x, tn_y) \begin{bmatrix} r_x \\ r_y \end{bmatrix} + \frac{1}{2} (tn_x, tn_y) \begin{bmatrix} r_{xx} & r_{xy} \\ r_{xy} & r_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} tn_x \\ tn_y \end{bmatrix}$$
(4.48)

и уколико пустимо да први извод дате функције буде једнак нули по  $t$ :

$$\frac{\partial f(tn_x + x, tn_y + y)}{\partial t} = 0$$
(4.49)

Добијамо да је вредност естимиране позиције врха ласерске рефлексије користећи *Steger* алгоритам дата следећом једначином:

$$t = - \frac{n_x r_x + n_y r_y}{n_x^2 r_{xx} + 2n_x n_y r_{xy} + n_y^2 r_{yy}}$$
(4.50)

При чему мора бити испуњен следећи услов:

$$(tn_x, tn_y) \in \left[-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right] \times \left[-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right]$$
(4.51)

Како би се добила вредност естимиране позиције, слика са профилног скенера се мора филтрирати са 5 различитих филтара  $(r_x, r_y, r_{xx}, r_{yy}, r_{xy})$ , а треба узети у обзир и да је за финални резултат рачунања потребна операција дељења. Ово наравно захтева велику количину рачунарских операција, као и велико време обраде слике.

Занимљиво је посматрати искоришћеност FPGA логичких ресурса за различите алгоритме који се баве детекцијом ивица на слици. У табели 6. је дат преглед коришћених ресурса за *Sobel*, *Canny*, оригиналан *Steger* и оптимални *Steger* за FPGA имплементацију. Комплексност *Steger* алгоритма је далеко већа од *Sobel* и *Canny* алгоритма, те је због тога потребно више ресурса за његову имплементацију. Време обраде слике, са различитим



резолюцијама, на FPGA платформи је дато у табели 7. Резултати из табела 6 и 7 су преузети из [110]. Такође, аутори истог истраживања дали су и поређење времена извршавања *Steger* алгоритма на PC рачунару и FPGA платформи (Virtex 5 LX330) за слику резолуције  $512 \times 512$  пиксела. На PC рачунару са Intel Pentium Dual-core E5400 процесору, који ради на 2.7 GHz, било је потребно 609.1 ms за обраду слике. Исти алгоритам на наменској FPGA платформи, са радним тактом од 100MHz, извршавао се за 2.62 ms, што је побољшање од 232 пута. Треба напоменути да се у овим истраживањима није одређивала позиција ласерске рефлексије, већ само ивице које одређују почетак и крај ласерске рефлексије на слици.

Табела 6. Искоришћеност FPGA ресурса и време извршавања за различите алгоритме детекције линије

FPGA ресурси	<i>Sobel</i>	<i>Canny</i>	Оригинални <i>Steger</i>	Оптимални <i>Steger</i>
Slice registers	339	40640	14996	12276
Slice LUTs	1927	82496	13684	12964
DSP48Es	0	224	114	73
Меморија (kb)	1303	16184	180	180

Табела 7. Време обраде слике *Steger* методом за различите резолуције на FPGA платформи Xilinx Virtex 5 LX330

Резолуција	Време обраде слике [us]			
	Ширина = 128	512	1024	2048
Висина = 128	164	655	1320	2620
512	655	2620	5240	10490
1024	1310	5240	10490	20970
2048	2620	10490	20970	41940

Како би постигли обраду у реалном времену, неки аутори предлажу да се *Steger* метод користи тако што се прво пронађе прва тачка ласерске рефлексије, а онда се остатак тачака анализира посматрајући локалне оријентације ласерске линије [111]. Осим тога, GPU или FPGA платформе такође могу бити коришћене у циљу смањења оптерећења процесора, као и времена извршавања алгоритма, јер су погодне за имплементацију дводимензионалних конволуција. На основу описа *Steger* алгоритма, лако се може закључити да је процес којим се добијају позиције рефлектоване ласерске линије, рачунарски захтеван, а самим тим и време обраде података није мало. У *Steger* алгоритму, неопходно је пет пута одрадiti 2D конволуције са различитим кернелима. Овај алгоритам у односу на остале има велику прецизност и солидну робусност, међутим велики недостатак алгоритма је комплексност и упитно је да ли без додатних модификација или оптимизација овакав алгоритам може да се имплементира да ради у реалном времену [112] [113].

На основу *Steger* прорачуна, релација између ширине ласерске линије  $\omega$  и оптималног  $\sigma$  параметра Гаусовог профила је дата са следећом једначином [114]:

$$\sigma \geq \frac{\omega}{\sqrt{3}} \quad (4.52)$$

У *Steger* методи  $\sigma$  је анализирано кроз једнодимензионалне линије на којима се налазе рефлексије. Други извод не узима своју максималну негативну вредност за мале вредности  $\sigma$  и веома је близу нули за  $\sigma \leq 0.2\omega$  и постоје два различита минимума у интервалу  $[-\omega, \omega]$ . Тако да услов 4.52 треба да осигура да други извод добије своју максималну негативну вредност. Линије које имају правоугаони профил могу се детектовати са одабиром одговарајуће вредности  $\sigma$  уз ограничење  $\sigma \geq \frac{\omega}{\sqrt{3}}$ . Међутим, ово ограничење отежава избор када су питању комплексни профили ласерских линија који имају променљиву ширину и таласни облик. Резултат тога је да други извод не узима своју максималну негативну вредност за све центре ласерске рефлексије. Фиксан праг детекције другог извода ће довести до губитка детекције и естимације централних тачака рефлексије. Због тога се може десити да неке методе које су базиране на *Steger* алгоритму неће дати добре резултате за различите ширине примљене рефлексије [115].

*Hessian* матрица даје добар и тачан резултат када су у питању одређивање дирекције, али са друге стране има јако малу ефикасност имплементације и није једноставна за апликације у реалном времену. Неки од аутора предлажу да се користи *Hessian* матрица у комбинацији са алгоритмом центра масе [116].

#### 4.6. Детекција ласерске линије употребом континуалне таласне трансформације

Таласни облик функције (*wavelet*) је дефинисан као функција  $\psi(t)$  у  $L^2(R)$ , тако да  $\psi(t)$  задовољава следећу једнакост:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (4.53)$$

Континуална таласна трансформација за функцију  $f(t)$ , дефинисана у тачки  $(t_0, s)$ , дата је следећом једначином:

$$W[f, \psi](t_0, s) = \langle f, \psi_{t_0, s} \rangle = \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-t_0}{s}\right) dt \quad (4.54)$$

где је са  $\psi_{t_0, s}(t)$  дата  $\psi(t)$  функција која је померена за  $t_0$  и скалирана са  $s$ :

$$\psi_{t_0, s}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi\left(\frac{t-t_0}{s}\right) \quad (4.55)$$

Резултати континуалне таласне трансформације дају шаблон дистрибуције ласерских рефлексија на основу којих је могуће одредити њихову локацију и снагу. Ово је могуће на основу сличности сегмената улазног сигнала (линије слике) у којима се налази рефлексија и скалираног облика таласне функције. Променом параметра  $s$  у  $\psi_{t_0, s}$  таласне функције са различитим ширинама се могу користити за анализу примљеног сигнала са камере скенера. Очигледно да ће одговарајућа вредност параметра  $s$  зависити од облика рефлексије ласерске

линије. Због очекиваног таласног облика рефлектоване ласерске линије у виду Гаусове криве, *Ricker* таласна функција се намеће као логичан избор за таласну трансформацију. *Ricker* таласна функција је заправо негативан нормализован други извод Гаусове функције и дата је следећом једначином:

$$\psi(t) = \frac{2}{\sqrt{3\sigma\pi^4}} \left( 1 - \left( \frac{t}{\sigma} \right)^2 \right) e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}} \quad (4.56)$$

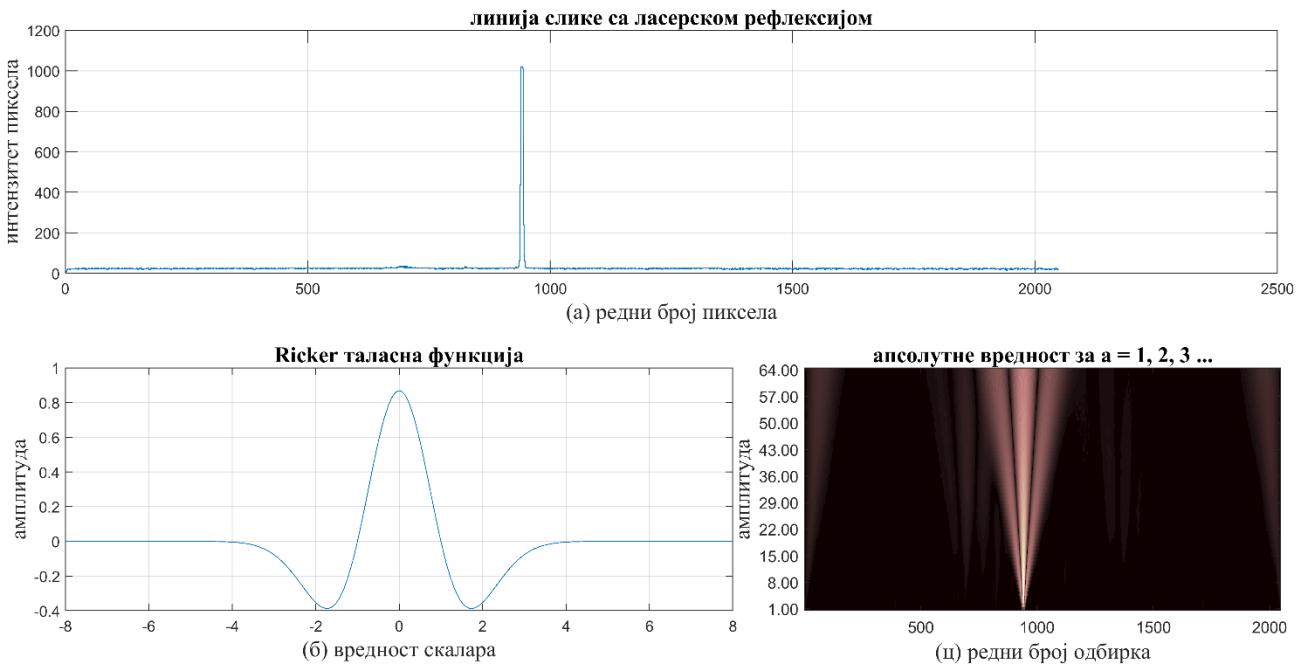
где је са  $\sigma$  дата стандардна девијација Гаусове функције.

Један од најзначајнијих фактора код таласне трансформације је правилно одређивање распона за вредност  $s$  параметра. У случају када се ради анализа линије слике, доминантан параметар ће бити ширина ласерске рефлексије. Као што је познато од раније, сваки профилни скенер има унапред познато радно растојање, које је дефинисано као минимално и максимално могуће растојање камере и посматраног мерног објекта ( $r_{min}, r_{max}$ ). Уколико са  $\alpha$  означимо угао између камере и равни ласера, жижну даљину сочива са  $f_x$  у  $x$  правцу референтних система и са  $d$  ширину ласерске линије тада се параметри  $s$  таласних функција могу изразити преко следећих једнакости [117]:

$$s_{min} = \frac{f_x}{r_{max}} d \sin(\alpha)$$

$$s_{max} = \frac{f_x}{r_{min}} d \sin(\alpha) \quad (4.57)$$

На слици 39а. дат је пример једне линије слике профилног скенера са рефлектованом ласерском линијом, заједно са *Ricker* таласним обликом у временском домену, која је дата на слици 39б. На слици 39ц. дат је приказ континуалне таласне трансформације сигнала линије слике за 64 различите вредности скала фактора. За ову слику коришћена је MATLAB функција  $cwt(n)$  из *wavelet transform toolbox*-а [118].



Слика 39. Пример примене таласне трансформације у детекцији ласерске линије. (а) пример линије слике са ласерском рефлексијом са камере профилног скенера. (б) таласни облик

*Ricker таласне функције (ц) пример континуалне таласне трансформације за различите вредности с параметра (1:64).*

Као природна надоградња алгоритма у којем се користи једнодимензионална *Ricker* таласна функција и одговарајућа таласна трансформација, дводимензионална представа исте таласне функције и дводимензионална таласна трансформација се могу користити за детекцију ласерске линије и естимацију позиције. Овакав приступ посебно је погодан за анализу ласерске рефлексије која настаје употребом биконвексних сочива за формирање ласерске линије [119].

Дводимензионална *Ricker* функција, такође позната и као *Marr* таласна функција или једноставно мексички шешир због свог таласног облика дата је следећом једначином:

$$\psi(x, y) = \frac{1}{\pi\sigma^4} \left( 1 - \frac{1}{2} \left( \frac{x^2 + y^2}{\sigma^2} \right)^2 \right) e^{-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}} \quad (4.58)$$

*Ricker* таласна функција и њена дводимензионална верзија су нашле примену у декомпозицији и препознавању сигнала, као и компресији слике, међутим њена примена у области обраде сигнала са слике профилног скенера је врло вероватно искључиво теоријске природе због своје комплексности.

#### 4.7. Момент функције

Моменат функције у математици дефинише одређене квантитативне мере у зависности од облика графика функције. У случају да функција представља расподелу енергије, тада је нулти моменат функције укупна енергија, нормализован први моменат (са нултим моментом) представља центар масе, итд.

Моменат континуалне функције  $f(x)$ , реда  $p$  је дат следећом једначином:

$$M_p = \int_{-1}^1 x^p f(x) dx, p = 0, 1, 2, 3 \dots \quad (4.59)$$

Употребом момента функције се може одредити естимација позиције ласерске рефлексије. Довољно је користити прва четири момента функције како би се добила естимација позиције [120].

Лежандров моменат се користи у многим апликацијама обраде слике, пре свега у препознавању облика, препознавању лица, али и за естимацију позиције ласерске линије. Такође добро је познато да због велике комплексности рачунања, посебно када се користе моменти вишег реда, употреба Лежандровог момента је лимитирана у практичним апликацијама [121].

Лежандров моменат  $n$ -тог реда, континуалне функције  $f(x)$ , дат је следећим изразом:

$$L_n = \frac{(2n + 1)}{2} \int_{-1}^1 P_n(x) f(x) dx \quad (4.60)$$

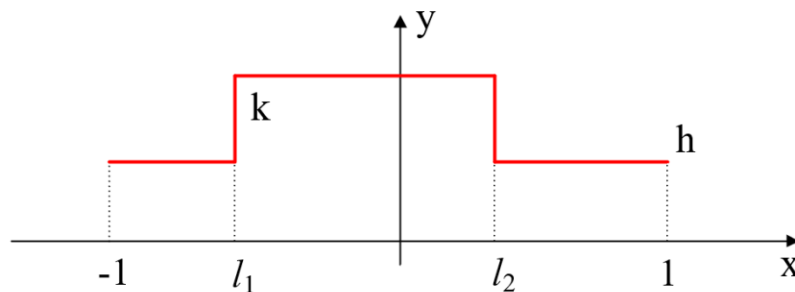
где је са  $P_n(x)$  дат Лежандров полином  $n$ -тог реда и дефинисан је следећом једначином:

$$P_n(x) = \frac{1}{2^n n!} \frac{d^n}{dx^n} [(x^2 - 1)^n], \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (4.61)$$

Са порастом степена Лежандровог полинома, расте и комплексност рачунања, те се врло често за рачунање наведеног полинома користи његова рекурзивна формула дата са:

$$P_{n+1}(x) = \frac{2n+1}{n+1} x P_n(x) - \frac{n}{n+1} P_{n-1}(x) \quad (4.62)$$

Уколико се уместо очекиваног Гаусовог профила за ласерску рефлексију узме да је она униформне расподеле снаге, може се користити *boxcar* функција за моделовање детектоване рефлексије. Пример ове функције дат је на слици 40. Како би се одредила естимирана позиција рефлексије, довољно је користи прва три Лежандрова момента [122].



Слика 40. Профил ласерске рефлексије када се користи момент функције за естимацију позиције.

Рачунање Лежандрових полинома је рачунарски захтевна операција и врло вероватно да нема практичну примену у профилним скенерима који своју обраду сигнала и слике базирају на алгоритмима у реалном времену.

#### 4.8. Комбинација више алгорита за детекцију ласерске рефлексије

У литератури се може пронаћи да многи од аутора предлажу употребу и комбинацију више алгорита за детекцију центра рефлексије [123]. Комбинација више алгорита неминовно повећава комплексност имплементације и количину неопходних рачунских операција за њихово извршавање. Врло често се користе једноставни алгоритми који прво раде претпроцесирање слике, како би се смањило утицај шума, а затим, врло често се ради одређивање оног дела слике где се налази ласерска линија – ROI, док се на крају користе неки од напредних алгорита који дају коначну естимацију позиције.

Приликом детекције екстерних извора светлости, врло често се користе технике које узимају у обзир интензитет амбијенталног осветљења као извор додатог шума. На тај начин је у одређеној мери могуће елиминисати шум на слици који настаје услед амбијенталног светла и побољшати детекцију ласерске линије на слици. Начин на који ће светлост бити

рефлектована од посматраног објекта се не може предвидети, јер зависи од његовог облика, материјала и позиције, али и угла под којим светлосни зрак на њега пада. Међутим, могуће је изабрати тип позадине која ће дати оптималну рефлексију, што ће детекцију ласерске линије учинити једноставнијом. Такође, позиција ласерске линије на позадини је стационарна (како просторно, тако и временски), те се ове особине могу искористити за унапређење детекције оног дела ласерске светлости који се налази на посматраном објекту. Један од једноставнијих алгорита за претпроцесирање слике који се користи је метод разлике сенке (*Shadow Difference Method*) где се слика на којој постоји ласерска линија одузима од слике где она није присутна [124] [125]. Тако је постигнуто да је разлика интензитета слике проузрокована једино рефлектованом ласерском светлошћу (заједно са рефлексијама које настају услед шума ласерске мрље) и не зависи од амбијенталног светла мерне сцене. Касније се могу користити алгоритми на основу којих се одређују ROI слике на којој се налази рефлексија, а затим се на пример, алгоритмом центра масе одређује позиција ласерске рефлексије.

Како би се побољшала видљивост ласерске линије може се прво одрадити њена карактеризација у односу на позадину, али без мерног објекта [95]. Свака линија слике се посматра као независан једнодимензионални сигнал, где се за све пикселе веће од нивоа шума (који зависи од осветљености слике) рачуна центар масе и тако добија сет тачака који представљају центар ласерске рефлексије за сваку линију. На крају овог дела алгоритма, ради се интерполација криве методом најмањег квадратног растојања. Тип криве или полинома који се користи зависи од облика позадине, али се најчешће може користити парабола  $y(x) = Ax^2 + Bx + C$ . Коефицијенти  $A$ ,  $B$  и  $C$  описују где се ласерска линија налази на слици позадине. Алгоритам онда покушава да одреди где се налази граница рефлексије која припада позадини или посматраном објекту. На тај начин се дефинише ROI слике и смањује број неопходних операција за рачунање. Са проблемом шума или сатурације пиксела, аутори се боре тако што те рефлексије одбацују и попуњавају интерполираним вредностима. Користе линеарну, квадратну и *Akima Spline* интерполацију (даје добре резултате интерполације када се други извод криве брзо мења) у комбинацији са “*Split and Merge*” алгоритмом. Уколико се користи линеарна интерполација, тада се користе само прва и последња тачка из сегмента (крајње тачке). За параболичну интерполацију користе се крајње тачке и тачка између њих, док се за *Akima Spline* интерполацију користи 5 тачака- 2 крајње и 3 тачке са еквиливантним растојањима у односу на њих.

$$f(x) = a_3(x - x_i)^3 + a_2(x - x_i)^2 + a_1(x - x_i) + a_0, x_i \leq x \leq x_i + 1 \quad (4.63)$$

Уколико је грешка естимације већа од унапред задате вредности, тај део криве се на том делу дели у два нова сегмента и интерполација понавља. Алгоритам је имплементиран користећи C++.

Процес одлучивања о ширини ласерске линије је врло битан и има велики утицај на алгоритам центра гравитације. Ласерска линија најчешће има од само неколико пиксела па све до неколико десетина пиксела.

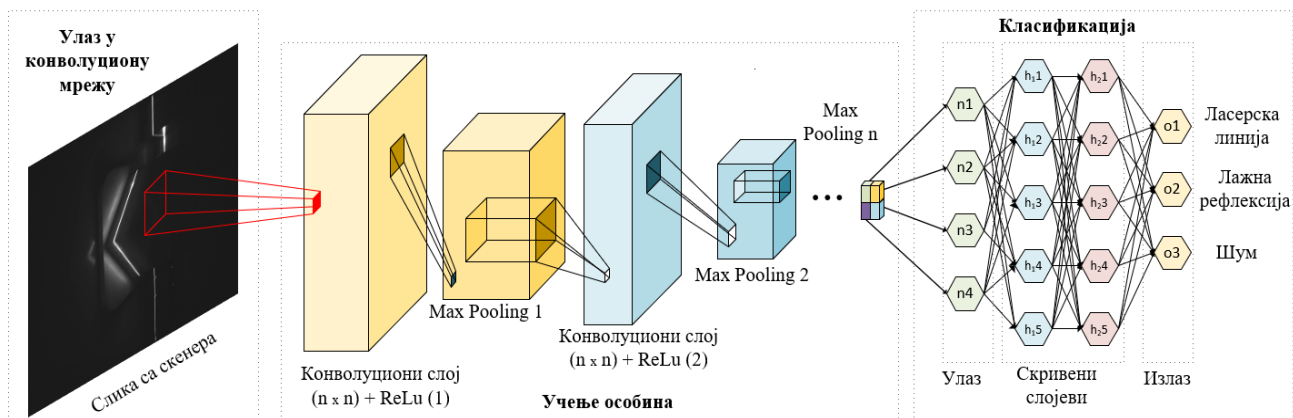
Због чињенице да су једнодимензионални алгоритми подложни утицајима шума, аутори [126] предлажу употребу самоподешавајуће дводимензионалне конволуције у комбинацији са центром масе (*Self-Adaptive Convolution-Mass - SACM*). Предложени алгоритам користи геометријске особине и корелацију ласерске рефлексије како би дао тачну естимацију њене позиције. SACM алгоритам је комплексан алгоритам који се базира на самоподесивој конволуцији, одређивању прага сегментирања слике и на крају рачунања центра масе тачака на основу пиксела који су претходни алгоритми прогласили ласерском рефлексијом. Параметри самоподешавајуће конволуције (њена величина, као и коефицијенти)

се одређују на основу геометрије детектоване рефлексије. Такође како би се смањио утицај шума, предлаже се употреба медијанског филтра као метода претпроцесирања слике.

#### 4.9. Примена машинског учења у детекцији центра рефлексије ласерске линије

Идеја машинског учења је одавно присутна и добро позната научној заједници, међутим тек са развојем веома моћних GPU у неколико претходних година, које је корисник могао да програмира, долази до праве експанзије алгорита из области неуралних мрежа које су заправо само једна од области машинског учења. Основну градивну јединицу неуралне мреже представљају чворови (неурони или *nodes*) који се организују у слојеве. Свака мрежа се састоји од једног улазног чвора, једног или неколико скривених слојева и излазног слоја. Сваки чвор мреже је повезан са осталим чворовима мреже и додељен му је тежински фактор и праг активације. Уколико је излаз било ког појединачног чвора мреже изнад дефинисаног прага, тај чвор је активиран и прослеђује информацију даље ка осталим чворовима у следећим слојевима.

Најчешћи пример неуралних мрежа које се користе у обради слике су конволуционе неуралне мреже или скраћено CNN (*Convolutional Neural Network*). Класичан пример CNN мреже дат је на слици 41. и састоји се од конволуционог слоја који прати *pooling* слој, при чему дубина мреже зависи од броја слојева који се користе, док се на излазу мреже налази мрежа за класификацију (*Fully connected* – FC). Ове мреже се најчешће користе за анализу дводимензионалних података (као што су слике), али исто тако могу се користити и за једнодимензионалне као и тродимензионалне податке. Главни део конволуционих неуралних мрежа је конволуциони слој, по којем су ове мреже и добиле име, и као што само име каже обавља операцију “конволуције” [127]. Овде се под конволуцијом сматра линеарна операција множења сета тежинских параметара са улазним подацима. Тај сет дводимензионалних параметара се назива филтер или кернел. Овде је занимљиво приметити да се у обради сигнала када се врши филтрирање ради претходно обртање коефицијената филтра како би се одрадила конволуција, што овде није случај. Из угла обраде сигнала, операција конволуције у области неуралних мрежа заправо одговара кроскорелацији сигнала из теорије обраде сигнала. Резултат операције конволуције улазног сигнала и матрице димензије  $N \times N$  је један број, те се ова операција често назива и скаларни производ. С обзиром на то да су улазни подаци дводимензионални, финални резултат операције једног конволуционог слоја је дводимензионална матрица која се назива „*Feature map*“. Резултат рада једног конволуционог слоја неуралне мреже се најчешће додатно филтрира са ReLU (*Rectified Linear Unit*), која представља линеарну активациону функцију и која ће директно дати улаз ако је њен аргумент позитиван, док у супротном случају даје нулу као резултат.



Слика 41. Блок дијаграм конволуционе неуралне мреже са више конволуционих слојева

Развој дигиталних сензора који су у стању да мере параметре средине у којој се налазе и хардвера који може те податке да обради у реалном времену, довели су до експанзије аутономних возила, дронова и робота. Један од кључних сензора у апликацијама управљања аутономних возила је дигитална камера. Због лоше видљивости или слабог осветљења окружења у којем се возило налази, врло често се користи фузија сензора где предњачи употреба LiDAR система. Међутим, такви системи су скупи, па се за оријентацију у простору могу користити и профилни или скенери са структурираним светлом, као јефтинија решења [128] [129].

У реалним условима рада профилног скенера који се користи за навигацију аутономног возила није познато од каквих површина ће се рефлектовати ласерска светлост. На пример, уколико је подлога по којој се возило креће направљена од углачаног мермера, стакла или у генералном случају неке врсте подлоге са високим степеном рефлексије, камера профилног скенера ће ухватити велики број додатних рефлексија насталих услед ефекта огледала, које су по својим карактеристикама врло сличне главној рефлексији. Као такве, представљају лажне рефлексије које дају погрешну информацију о удаљености скенираног објекта [130]. Употребом конволуционих неуралних мрежа могу се класификовати пиксели на слици у одређене категорије. У зависности од очекиване апликације, може се направити више категорија пиксела. На пример, може се направити класификација пиксела који припадају ласерској линији, пиксели који припадају позадини слике, пиксели који припадају лажним рефлексијама и друге. За тренирање конволуционих мрежа могу се користити слике на којима су означени пиксели који припадају ласерској линији, додатним рефлексијама, позадини, амбијенталном светлу или замућеном делу слике. Излаз конволуционе мреже је RGB слика где су препознати објекти означени различитим бојама. У суштини оваква примена конволуционих мреже може се сматрати алгоритмом за одређивање ROI слике на којој се налази рефлексија, док се касније употребом неке од класичних метода рачуна коначна позиција.

Неки од класичних примера мрежа које се могу користити за класификацију слике су AlexNet, VGGNet и ResNet. На пример, употреба Sketch-a-Net типа мреже може бити занимљива за детекцију ласерске линије на слици, јер се користи за детекцију линија рукописа или симбола. Главни разлог за тако нешто је чињеница да су данашње мреже углавном дизајниране за природне слике са високим степеном детаља, док су рукописи једноставни и поприлично апстрактни, без много визуелних детаља и врло често сачињени само од црно белих линија. На сличан начин се може посматрати и ласерска линија – бела танка линија на црној позадини, апстрактних линија и без превише детаља [131].



Након што су пиксели слике класификовани у различите категорије, може се користити неки од добро познатих алгоритама, као на пример *Steger* алгоритам [132] у комбинацији са алгоритмом центра масе, како би се добила информација о естимацији центра рефлексије ласерске линије. Аутори предлажу да се пиксели који припадају ласерској линији даље додатно процесирају, како би се направила разлика између праве ласерске линије и различитих облика шума и позадинског осветљења, те на тај начин додатно издвојили пиксели од интереса. Када су одговарајући пиксели слике препознати и означени да припадају ласерској рефлексији, довољно је употребом једнотавних конвенционалних метода, као што је центар масе, да се естимира позиција ласерске линије [133] [134].

Неки од CNN алгоритама користе резултате детекције профила скенираног објекта, како би направили предикцију квалитета и карактеристика металних варова (мада ово не мора бити ограничено на металне варове) [135]. Осим за контролу квалитета варова, CNN се могу користити и у апликацијама за навођење робота вариоца. Такође, у доступној литератури се може пронаћи да се резултати скенирања са профилних скенера користе у комбинацији са неуралним мрежама за рано откривање проблема у железничкој инфраструктури (пре свега на квалитет спојева железничких шина) [136].

Приликом давања естимације позиције увек је добро знати са коликом грешком је она естимирана. Неуралне мреже се могу истренирати да за различите алгоритме, на основу улазне вредности пиксела који припадају рефлексији, дају естимацију грешке позиције [137].

Неуралне мреже се могу користити за адаптивно подешавање времена експозиције камере како би се контролисала ширина детектоване рефлексије. Уколико би се користио неки од класичних метода за естимацију ширине ласерске рефлексије, као на пример Гаусов метод интерполације, време естимације би било велико и неподобно за употребу у апликацијама које се извршавају у реалном времену. Са друге стране *Back Propagation Neural Network* (BPNN) могу значајно смањити време рачунања оптималне експозиције и могу се користити у системима са обрадом сигнала у реалном времену [138]. Вероватно је могуће сличну мрежу користити за аутоматску контролу снаге ласера на профилним скенерима.

На основу доступне литературе јасно се издвајају два приступа у коришћењу CNN. Први је употреба конволуционих мрежа како би се одрадила класификација пиксела који припадају ласерској линији, и на тај начин смањено број података који ће неки комплекснији алгоритам за одређивање позиције ласерске рефлексије користити. Међутим, такав приступ има за последицу да се комплексан и рачунарски захтеван алгоритам користи као пред алгоритам за такође комплексан алгоритам, како би се само одредила позиција рефлексије. Далеко већи број радова, који припадају другом приступу коришћења CNN, се може наћи на тему употребе резултата профилног скенера као улазних података за алгоритме машинског учења. Углавном се ту ради о контроли квалитета варова или навођењу робота за машинско варење.

Треба напоменути и да је већина предложених алгоритама у којима се користе неки од метода машинског учења имплементирано на GPU платформама, које нису погодне за интеграцију унутар профилних скенера. Због архитектуре на којој су базирани GPU платформе су далеко атрактивније у односу на FPGA чипове који се могу најчешће наћи унутар профилних скенера. Не треба заборавити да су све популарније *TinyML* (*Tiny Machine Learning*) неуралне мреже које не захтевају моћне платформе и које могу радити на микропроцесорима или чак микроконтролерима [139].

Употреба машинског учења за класификацију пиксела врло вероватно да нема велику практичну примену. Алгоритми за детекцију ласерске линије на слици су једноставни, углавном и због саме природе формирања слике на профилном скенеру – мало време

експозиције са ласерском линијом високог интензитета, што је чини једноставном за препознавање.

Међутим, са друге стране, комплексни алгоритми за препознавање разних врста недостатака у индустријској производњи или навођења робота, базирани на резултатима рада профилног скенера, врло вероватно имају огроман потенцијал у комбинацији са CNN.

#### **4.10. Изводљивост имплементације идеја за обраду сигнала на профилним скенерима**

У претходним поглављима дат је детаљан преглед доступних научних радова у којима се дискутује о проблему естимације позиције детектоване ласерске рефлексије. Неки од њих баве се теоријским приступом решавања проблема где је пре свега постављено мерно окружење и сачувани резултати мерења. На тај начин је могуће пробати широк спектар алгоритама из различитих области обраде сигнала и теорије интерполације кривих. Овакав приступ има ограничену практичну примену јер су ретке ситуације у којима се ради накнадна обрада резултата мерења. Такође, неретко у таквим алгоритмима се користе врло сложене математичке конструкције, као и велика количина меморије у коју се смештају међурезултати алгоритма (предфилтрирање слике, филтрирање Гаусовима дериватима, одређивање прага детекције и слично).

Са друге стране практична примена алгоритама и њихова имплементација за рад у реалном времену захтевају пажљиво планирање и компромис између доступних ресурса за обраду слике, односно комплексности алгоритма и цене хардвера. Када су у питању подаци са брзе индустријске камере, употреба скупих и моћних FPGA или DSP процесора за њихову обраду врло вероватно није опција јер то значајно подиже цену готовог уређаја. Приметно је да у радовима у којима се описује нека врста имплементације углавном користе условно речено једноставни алгоритми као што је естиматор параболе или алгоритам центар масе где се малим побољшањем у самом алгоритму покушава извући максимум информације. То је наравно и логично јер алгоритми који се извршавају на наменским системима профилних скенера раде у реалном времену са минималним временом процесирања података.

Добар алгоритам који ради обраду сигнала са камере профилног скенера даје добре резултате у различитим условима рада, односно са релативно малим подешавањима могуће је исти профилни скенер користити у веома различитим апликацијама. На пример, могуће је исти скенер користити када се врши контрола квалитета варења металних делова или у индустрији меса за контролу рада машине за сечење.

Употреба алгоритма центра масе се чини као веома добар кандидат пре свега због компромиса између тачности естимације, комплексности алгоритма и његове имплементације. Може се рећи да алгоритам центра масе представља језгро или централни део обраде рефлектоване ласерске линије. Главна мотивација овог истраживања је побољшање естимације позиције код сатурисаних рефлексија што значи да би фокус истраживања била нова метода за филтрирање сигнала која са малом количином ресурса на неки начин побољшава рад алгоритма центра масе, односно даје боље резултате естимације позиције.

## 5. Примена аутокорелације у естимацији позиције рефлексије ласерске линије

Профилни скенер добија информацију о свом окружењу на основу примљене ласерске светлости, слично радарском систему који такође ради по принципу активног електромагнетног зрачења и пријема рефлексије послатог сигнала од посматраног објекта. У радарској техници се врло често на улазу детектора примљеног сигнала налазе прилагођени филтри, јер је унапред познато који таласни облик сигнала је послат и чија се рефлексија очекује. Као што је показано у претходним поглављима многе идеје за обраду ласерске рефлексије се управо заснивају на идеји употребе Гаусове криве као неке врсте прилагођеног филтра (једнодимензионалног или дводимензионалног филтра) који подиже вредност SNR-а на уласку у систем.

Очекивано, услед разних ефеката који се јављају приликом рефлексије светлости о мерну површину, разних извора шума, амбијенталног светла или просто неприлагођене снаге ласера и времена експозиције камере, рефлексија мења очекивани облик и то пре свега ширину и врх који постаје раван. Када су пиксели слике који одговарају рефлексији сатурисани, информација о облику рефлексије је неповратно изгубљена, па је реконструкција криве која одговара рефлексији једино могућа преко пиксела који припадају левој и десној страни рефлексије (сатурисани пиксели се врло често игноришу). У том случају се проблем одређивања центра рефлексије посматра из перспективе интерполације криве. Међутим, тада се за естимацију позиције узимају пиксели који не носе главни део информације о енергији рефлексије, јер је она концентрисана у сатурисаним пикселима.

Добро је познато да аутокорелација може користити за анализу особина сигнала, пре свега за проналажење понављајућих патерна, али и за рачунање снаге сигнала преко Винер-Хинчинове теореме. Аутокорелација даје расподелу снаге унутар сигнала. Ова особина је чини добром полазном техником за обраду сатурисаних ласерских рефлексија, јер би управо одређивање симетрије у расподели енергије рефлексије дало естимацију позиције врха.

За детерминистички и стохастички сигнал ограничене снаге  $x(t)$ , аутокорелација показује степен поклапања сигнала са самим собом и дефинише се следећом једначином:

$$R_{xx}(\tau) = \int_{t_1}^{t_2} x(t)x(\tau + t)dt \quad (5.1)$$

при чему сигнал  $x(t)$  једино постоји у дефинисаном интервалу од  $t_1$  до  $t_2$ . Аутокорелација  $R_{xx}(\tau)$  је увек реална парна функција са максимумом на  $\tau = 0$ . За дискретан сигнал  $x[n]$  једначина (5.1) постаје:

$$r_{xx}[k] = \frac{1}{N} \sum_{n=k}^{N-1} x[n]x[k+n] \quad (5.2)$$

где је са  $r_{xx}[k]$  дата вредност дискретне аутокорељације сигнала  $x[n]$ , при чему је  $N$  укупан број одбирака сигнала, а  $k$  узима вредности од  $-\infty < k < \infty$ .

Уколико анализирамо реални, једнодимензионални сигнал ограничене снаге  $x[n]$ , на основу парно-непарне декомпозиције сигнала,  $x[n]$  се може представити као сума парне секвенце  $x_p[n]$  такве да је  $x_p[n] = x_p[-n]$  и непарне секвенце  $x_n[n]$  такве да је  $x_n[n] = -x_n[-n]$  на следећи начин:

$$x_p[n] = \frac{x[n]+x[-n]}{2}; x_n[n] = \frac{x[n]-x[-n]}{2} \quad (5.3)$$

при чему је  $x[n] = x_p[n] + x_n[n]$ . Очигледно је да су парна и непарна секвенца ортогоналне у смислу да је њихов скаларни производ дефинисан са  $\langle x_p[n], x_n[n] \rangle = \sum_n x_p[n] x_n^*[n]$  једнак 0. То такође значи да је сума енергија  $x_p[n]$  и  $x_n[n]$ , означених са  $E_p$  и  $E_n$  једнака енергији  $E$  сигнала  $x[n]$ . На врло једноставан начин се може одредити колико је симетрије или анти симетрије око тачке  $n = 0$ . Након декомпозиције сигнала на паран и непаран део, уколико је сигнал претежно паран (исто важи уколико је сигнал претежно непаран), тада ће енергија парног сигнала бити већа од половине укупне енергије сигнала, тако да је поређење енергија ових низова довољно како би се утврдила симетрија сигнала  $x[n]$  у тачки 0. Могуће је генерализовати једначину 5.2 на такав начин да се обухвате и симетрије чији центар није у тачки 0. Како бисмо то одрадили, потребно је обрнути низ око тачке  $n = m$  те једначина 5.3 постаје:

$$x_p[n; m] = \frac{x[n]+x[2m-n]}{2}; x_n[n; m] = \frac{x[n]-x[2m-n]}{2} \quad (5.4)$$

где је са  $x[n] = x_p[n; m] + x_n[n; m]$ . Сада је потребно проценити тренутак у коме је секвенца максимална или парна или непарна. Узевши у обзир да Гаусов профил ласерске рефлексије има облик симетричне парне функције, у проучавање ће бити узета енергија парне секвенце као функција симетрије око центра  $m$ . Тада се енергија парне секвенце може написати на следећи начин:

$$\begin{aligned} E_p[m] &= \sum_n |x_e[n; m]|^2 = \sum_n \left| \frac{x[n] + x[2m-n]}{2} \right|^2 \\ &= \frac{1}{4} \sum_n |x[n]|^2 + |x[2m-n]|^2 + 2x[n]x[2m-n] \\ &= \frac{1}{2} E + \frac{1}{2} \sum_n x[n]x[2m-n] = \frac{1}{2} E + (x * x)[2m] \end{aligned} \quad (5.5)$$

где је са  $(x * x)$  означена конволуција дискретне секвенце  $x[n]$  саме са собом, односно аутоконволуција сигнала. Тада је оптимална тачка парне симетрије дата са:

$$2n_0 = \arg_m \max(x * x)[m] \quad (5.6)$$

Односно тачка симетрије је одређена на основу максималне вредности аутоконволуције сигнала  $x[n]$ .

Проналажење  $n_0$  у једначини даје оптимално место симетрије у односу на енергију сигнала, међутим то не гарантује да сигнал  $x[n]$  испољава било какве карактеристике симетрије сигнала око неке тачке [140, 141].

У општем случају аутоконволуција сигнала је дата следећом једначином:

$$A_{xx}(t) = \int_{t_1}^{t_2} x(t)x(\tau - t)dt \quad (5.7)$$

Свака од линија слике се може посматрати као независан једнодимензионални сигнал  $x[n]$ ,  $n = 1, 2, \dots, L$ , где је вредност  $x[n]$  заправо интензитет пиксела. Аутоконволуција лимитирана на прозор дужине  $N = 2M + 1$  пиксела је дата следећим изразом:

$$A[i] = \sum_{n=-M}^M x[i - n]x[i + n], M \leq i \leq L - M \quad (5.8)$$

где је са  $M$  означена дужина аутоконволуције,  $i$  је редни број пиксела док је  $L$  дужина линије слике.

Након што је филтрирање аутоконволуцијом готово за линију слике, без обзира на изабрани алгоритам за естимацију позиције неопходно је одредити који пиксели (односно вредности њихове аутоконволуције) улазе у алгоритам. Због природе ласерске светлости могуће је користити једноставан праг фиксне вредности који је одређен емпиријски на основу експеримента. Могуће је користити неки од алгоритама за адаптивно подешавање прага за пикселе који ће ући у даљи прорачун за естимацију ласерске линије. Вредност прага је рачуната као максимална вредност  $A[i]$  из претходне једначине, скалирана са вредношћу из интервала  $[0.7, 0.8]$ . Број пиксела коришћених у прорачуну је обрнуто пропорционалан вредности скала фактора. Такође, могуће је користити неки од добро познатих адаптивних алгоритама за детекцију импулса (рефлексије) као што је CFAR (*Constant False Alarm Rate*) који континуално прати ниво шума у односу на посматрани прозор сигнала са његове леве и десне стране. Осим једнодимензионалног CFAR алгоритма, могуће је користити његову дводимензионалну варијанту која се врло често користи у обради слике.

Због добрих перформанси и једноставне имплементације изабран је алгоритам центра масе у комбинацији са аутоконволуцијом. Естимирана позиција ласерске линије  $l$ , означена са  $CG(l)$ , је израчуната следећом једначином:

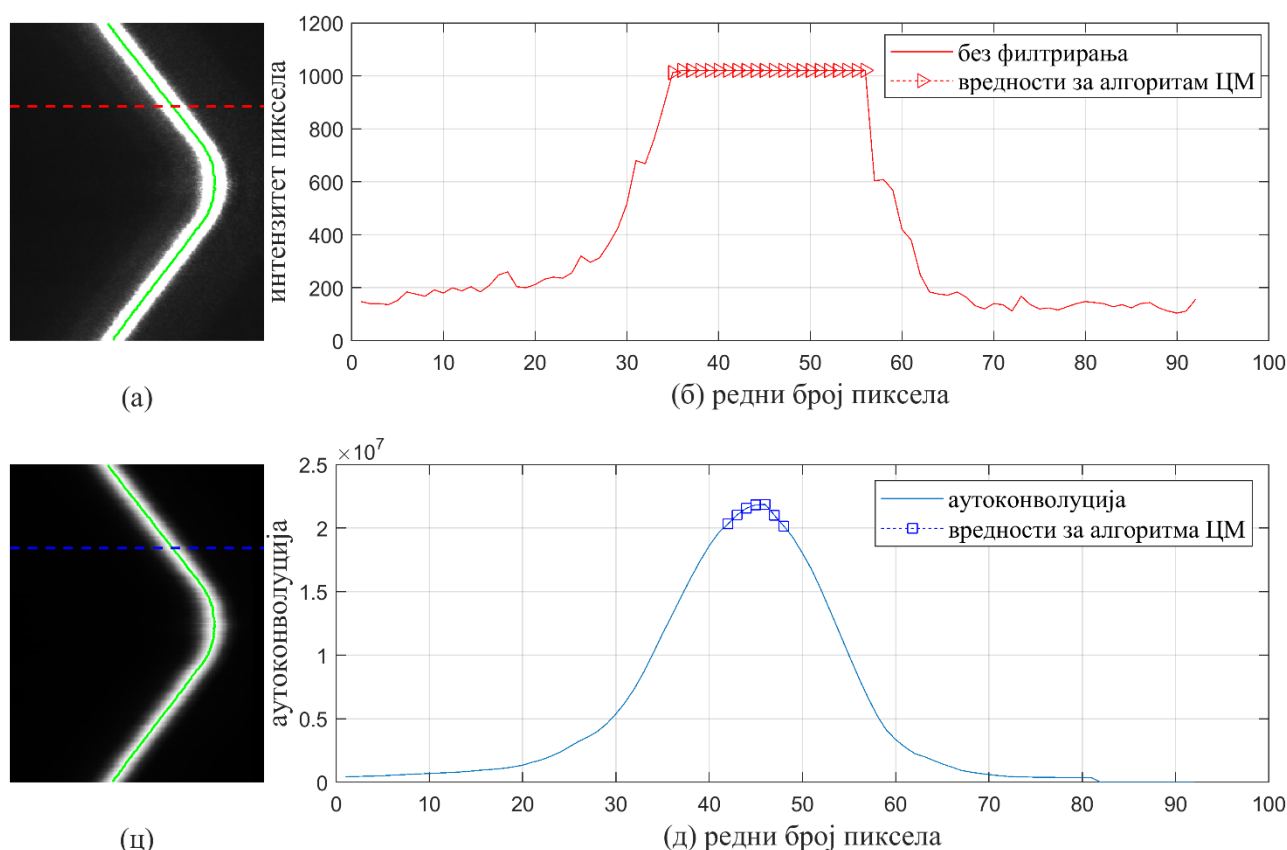
$$CG[l] = \frac{\sum_{k \in W} k A[k]}{\sum_{k \in W} A[k]} \quad (5.9)$$

где је са  $A[k]$  означена израчуната вредност аутоконволуције за линију  $l$ ,  $k$  је редни број пиксела филтриране линије аутоконволуцијом са вредношћу већом од израчунатог прага, док је са  $W$  дат скуп свих редних бројева пиксела који задовољавају услов да су већи од прага детекције [142].

На слици 42а. дат је пример дела слике профилног скенера са ласерском рефлексијом, на којом је црвеном бојом означен израчунати центар рефлексије употребом једнодимензионалног алгоритма центра масе. Због неодговарајућег времена експозиције камере, интензитет пиксела који представљају врх ласерске рефлексије је засићен. На слици 42б. је приказана вредност интензитета пиксела једне линије слике, односно профил

рефлектоване ласерске линије, заједно са означеним пикселима који су коришћени за рачунање алгоритма центра масе. Лако је приметити да су за прорачун узети само засићени пиксели слике. Због тога је максимална резолуција естимације позиције ласерске рефлексије не већа од половине физичке величине пиксела.

Са друге стране, на слици 42ц. дат је пример исте слике која је филтрирана аутоконволуцијом док је на слици 42д. дата иста линија слике, само филтрирана аутоконволуцијом. Разлику у профилу ласерске рефлексије је лако приметити. Профил поново има облик који одговара Гаусовом профилу, а оно што је најбитније, вредности више немају сатурисане вредности, па и излаз алгоритма центра масе више нема резолуцију од половине пиксела. На слици су означене плавим квадратима вредности израчунате аутоконволуције пиксела који се узимају као улаз за алгоритам центра масе.



Слика 42. (а) Нефилтрирана слика са камере заједно са детектованим центром ласерске рефлексије означеним црвеном бојом; (б) линија слике са означеним тачкама које су коришћене за алгоритам центра масе (ц) иста слика филтрирана са аутоконволуционим филтром дужине  $N = 11$ ; (д) линија филтриране слике, са означеним тачкама које су коришћене за алгоритам центра масе

У зависности од изабране ширине прозора за рачунање аутоконволуције могу се очекивати различите перформансе система. Такође, различите ширине аутоконволуције имаће значајан утицај на комплексност имплементације, кроз неопходан број рачунских операција за њено рачунање, као и број бита по одбирку сигнала, односно пиксела. У наставку ће бити посвећена пажња симулацији система са аутоконволуцијом као алгоритмом за претпроцесирање пиксела приликом детекције позиције ласерске линије на слици. Симулација би требало да одговори на питање колика је оптимална ширина прозора аутоконволуције, али исто тако и колика је оптимална дужина речи за обраду сигнала.

## 6. Симулације

*Папир и MATLAB трпе све – је била једна од шала које ми је менторка упутила када смо почињали да радимо на истраживању како да унапредимо детекцију ласерске рефлексије и којом методом да проблем “нападнемо”.*

Сигурно је да ћу кроз каријеру много пута ову реченицу поновити, јер без одговарајуће симулације и потврде алгоритма у неком симулатору не можемо говорити о озбиљном развоју алгоритама за обраду сигнала. Добра симулација не значи само потврду да нека идеја ради и да се са њом може ићи даље у имплементацију, већ представља и референтни модел на који истраживач или инжењер може увек да се врати и да провери резултат који је добио. Ово је посебно важно када се ради на развоју дигиталног дизајна на наменском систему као што је FPGA, јер је резултате имплементације неопходно проверити на одговарајући начин, и то на неколико различитих нивоа. Пре свега на функционалном нивоу, који се назива синтеза FPGA дизајна, где се проверава да ли написани код ради и задовољава све очекиване функционалности. Након тога могуће је радити симулацију имплементационог кода где се у обзир узимају различити параметри система, као што су радна фреквенција система, физичка позиција елемената чипа, њихово бројно стање и многи други. Тек када све симулације потврде функционалност имплементационог алгоритма, могуће је почети рад на тестирању система у реалним условима рада.

Без обзира који алат се користи за симулацију дигиталног дизајна, и на ком нивоу (да ли је то после синтезе или после имплементације) неопходно је резултат симулације упоредити са референтним вредностима за задати улаз. Када се ради са великом количином података (као што је то случај са обрадом слике), неопходно је податке брзо и једноставно обрадити и врло често приказати упоредно резултате симулације и имплементације, како би се на једноставан начин откриле евентуалне разлике које указују на проблем у дизајну.

Систем у развоју је подложен честим променама. Само неки од примера су имплементације нових алгоритама, делова алгоритма или једноставна побољшања већ постојећих решења. У бројним ситуацијама кроз симулацију се разматра имплементација алгоритама где се у обзир узима број рачунских операција, брзина извршавања алгоритма,

прелазак са једног на други тип података (*double precision float point* конверзија у *single precision float point*) или прелазак са аритметике са покретном тачком на аритметику са фиксном тачком (*fixed point*).

Када говоримо о развоју алгоритама за дигиталну обраду сигнала, приликом симулације система треба водити рачуна о архитектури наменске платформе због једноставније имплементације алгорита. Симулацију је потребно организовати у логичке целине које ће касније бити имплементирани као појединачни модули или засебне целине система. Лоше организована симулација врло вероватно за последицу има и лошу имплементацију.

Дијаграм тока развоја новог алгорита за обраду сигнала је дат на слици 43. Свака симулација почиње са припремом добрих улазних података (параметара) система. На тај начин се покушава симулирати рад система у реалним условима. Приликом симулације улазних параметара, потребно је узети главне параметре система који имају највећи утицај на његов рад, док се мање битни параметри могу касније узети у обзир или једноставно занемарити, уколико нису од пресудног значаја за рад система у целисти. За симулацију алгорита аутоконволуције, као дела процесирања сигнала са профилног скенера, најбитнији улазни параметар је ласерска рефлексија, као и проблем који ће његова примена решити. Конкретно у овом случају ради се о рефлексијама чији је врх одсечен услед сатурације пиксела. Део који одговара развоју новог алгорита у дијаграму тока развоја је уско повезан са симулацијом. У њему се пробају различити приступи и врши се анализа добијених података. Уколико резултати нису задовољавајући, неопходно је вратити се у симулацију како би се открили узроци због којих предложени алгорита не даје добре резултате. Са друге стране, уколико алгорита показује добре резултате, прелази се у фазу имплементације алгорита, у којој се ради одабир платформе и алата за његову имплементацију. У овој фази се раде додатне симулације система које потврђују да имплементирани алгорита има исте перформансе као и онај из симулације. Уколико је алгорита захтеван за имплементацију раде се оптимизације система у којима се неки делови алгорита могу имплементирати кроз апроксимације.



Слика 43. Дијаграм тока развоја алгорита, његове имплементације и тестирања у реалним условима рада

Посебна пажња приликом симулације се мора обратити на тип података са којима се ради. MATLAB подразумевани тип података је представа бројева са покретном тачком двоструке прецизности дужине 64 бита по податку.



## 6.1. Симулација ласерске рефлексије и естимације њене позиције

Тест поставка користи оптички модул са цилиндричним сочивима како би трансформисали ласерски зрак у ласерску линију. Оригиналан ласерски зрак има Гаусов профил интензитета и кроз симулацију ће се сматрати да он остаје непромењен приликом проласка кроз оптичко сочиво. Када је ласерска линија пројектована на површину, на главну рефлексију се суперпонира амбијентално светло, као и додатне рефлексије ласерске светлости од посматране површине. Пиксели камере прикупљају суму свих светлосних зрака које сочиво камере прима. Амбијентално светло се може једноставно са слике елиминисати одузимањем слике без присуства ласерске линије од слике на којој се линија налази, те његов утицај неће бити анализиран у симулацији. Због неравнина, хрпавости и транспарентности површине која се мери, извесно је да ће на главну рефлексију бити суперпониране додатне нежељене рефлексије које се могу моделовати као Гаусови профили различитих амплитуда, ширина и позиција у односу на главну рефлексију.

Главни параметри симулације се могу представити као извор ласерске светлости, односно ласерски модул унутар скенера, објекат над којим се врше мерења заједно са рефлексионим особинама површине и сензор камере упарен са оптиком и оптичким филтерима.

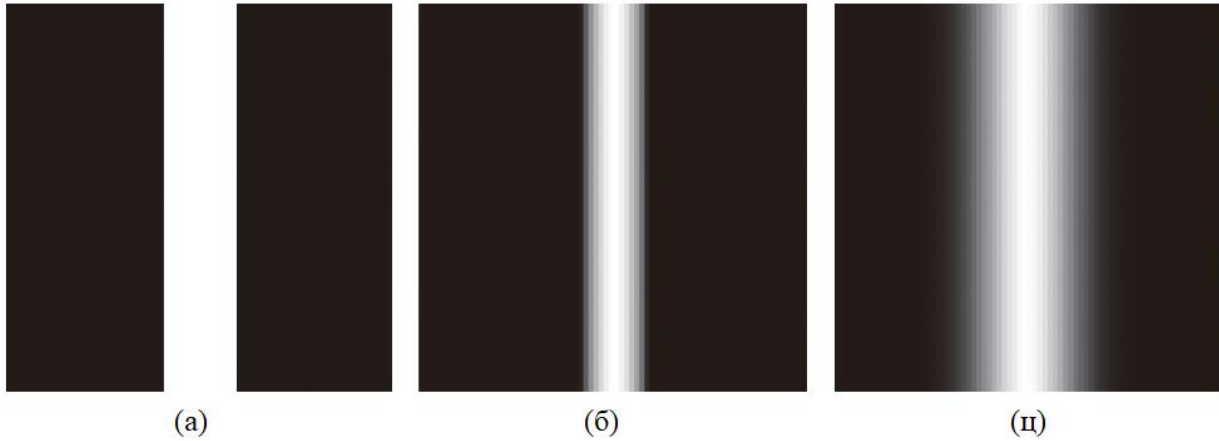
Идеалан облик поједностављене ласерске линије се може дефинисати као симетрична правоугаона функција ширине  $2w$  и максималне вредности  $x$  (дата са 6.1). Наравно у пракси овакав идеалан случај није могућ, тако да се полази од дефиниције несиметричне правоугаоне функције ширине  $2w$  (дата са 6.2), да би се анализа касније проширила на несиметричну параболичну и несиметричну Гаусову функцију дефинисану са 6.3:

$$f_b(x) = \begin{cases} 0, & (-\infty, -w) \\ 1, & [-w, +w] \\ a, & (+w, +\infty) \end{cases} \quad (6.1)$$

$$f_p(x) = \begin{cases} 0, & (-\infty, -w) \\ 1 - \left(\frac{x}{w}\right)^2, & [-w, 0] \\ 1 - (1 - f_{sym})\left(\frac{x}{w}\right)^2, & [0, +w] \\ f_{sym}, & (+w, +\infty) \end{cases} \quad (6.2)$$

$$f_g(x) = \begin{cases} e^{-\frac{x^2}{2w^2}}, & (-\infty, 0] \\ f_{sym} + (1 - f_{sym})e^{-\frac{x^2}{2w^2}}, & (0, +\infty) \end{cases} \quad (6.3)$$

где је са  $w$  означена ширина линије, односно профила, а  $0 \leq f_{sym} < 1$  одређује асиметрију профила.  $f_b$  представља линију моделовану са правоугаоном функцијом,  $f_p$  представља линију моделовану са параболом, док је са  $f_g$  дата линија моделована са Гаусовом кривом. На слици 44. дата је представа генерисаних слика како би се јасно уочила разлика између ова три случаја. За све три слике је коришћена иста ширина рефлексије ласерске линије  $w$ .



Слика 44. (а) Слика моделована са линијама дефинисаним правоугаоном функцијом, (б) Слика моделована линијама дефинисаним параболичном функцијом, (ц) Слика моделована линијама дефинисаним Гаусовом функцијом. У сва три случаја коришћена је иста ширина линије  $w$ .

Због неједнаке дистрибуције илуминације у практичним условима рада, Гаусова крива може имати асиметричну расподелу [143]. Када ласерска линија није пројектована вертикално на посматрани објекат, а правац посматрања камере је нормалан на површину осветљену ласером, рефлектовани профил ће имати асиметричну Гаусову расподелу [144]. Осим асиметрије профил рефлектоване ласерске линије може имати и сатурисани Гаусов профил, који се може моделовати са следећом једначином:

$$f(x) = \begin{cases} e^{-\frac{x^2}{2w^2}}, & (x \leq -x_b) \\ T, & (-x_b > x > x_b) \\ f_{sym} + (1 - f_{sym})e^{-\frac{x^2}{2w^2}}, & (x \geq x_b) \end{cases} \quad (6.4)$$

где су  $f_{sym}$  и  $w$  дефинисани на исти начин као у претходним једначинама, док параметар  $T$  представља тренутак засићења дефинисан је са:

$$1 > T > f_{sym} > 0 \quad (6.5)$$

Рефлексиона површина са својим карактеристикама утиче на облик профила који детектује сензор камере. Сензор камере има своје карактеристике шума који се генерално може поделити на случајан шум и FPN шум. Постоје два типа случајног шума, где први обухвата случајан шум као што је електрични шум или шум квантизације, док је други извор случајног шума сам извор ласерске светлости, односно шум ласерске мрље. Случајни шум може се описати као једнодимензионални стохастички процес у мулти-димензионалном пољу и најчешће се третира као Гаусов бели шум са средњом вредношћу 0. Такође, сви додатни извори шума могу се моделовати као адитивни бели Гаусов шум (AWGN). Ефекти FPN шума могу се једноставно елиминисати користећи FPN филтре имплементиране преко LUT(Look Up Table) табеле, јер је тај шум константне вредности за сваку линију слике, те се његова вредност лако може одузети од одговарајуће вредности пиксела из одговарајуће линије.

Рефлектована ласерска линија се може моделовати као Гаусов профил где је стандардна девијација параметар који описује ширину ласерске рефлексије на самој слици. Поред главне рефлексије постоје и додатне рефлексије које се такође могу моделовати преко Гаусових

профила, различитих ширина, односно стандардних девијација, амплитуда и позиција. Симулирана рефлексија једне линије слике је дата са следећом једначином:

$$R[i] = a_m e^{-\left(\frac{i-c_m}{\sigma_m}\right)^2} + \sum_{k=1}^K a_k e^{-\left(\frac{i-c_k}{\sigma_k}\right)^2} + n[i] \quad (6.6)$$

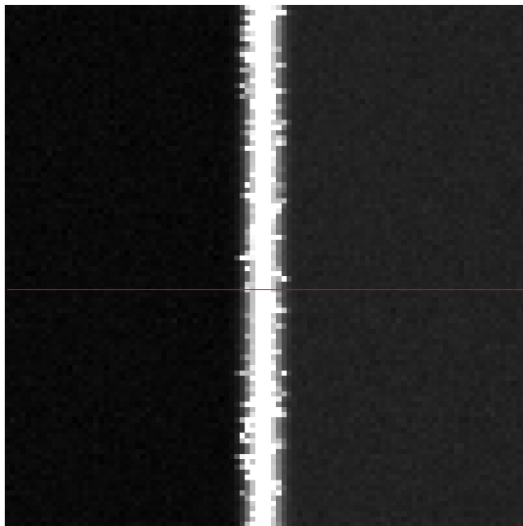
где је са  $R[i]$  дата вредност симулиране рефлектоване ласерске линије,  $a_m$  је амплитуда,  $\sigma_m$  је ширина рефлексије,  $c_m$  је централна позиција главне рефлексије, док су са  $a_k$ ,  $\sigma_k$  и  $c_k$  дати исти параметри само дефинисани за додатне рефлексије које се могу сматрати шумом.  $K$  је укупан број симулираних додатних рефлексија, док је са  $i$  означен редни број пиксела унутар линије слике, а  $n[i]$  је AWGN.

Интензитет ласерске светлости има веома узак дијаграм расподеле снаге, односно снага је фокусирана на малу површину са великим интензитетом што у комбинацији са различитим карактеристикама рефлексионе површине и неодговарајућим временом експозиције камере сигурно доводе до слика на којима је врх Гаусовог профила у потпуности сатурисан.

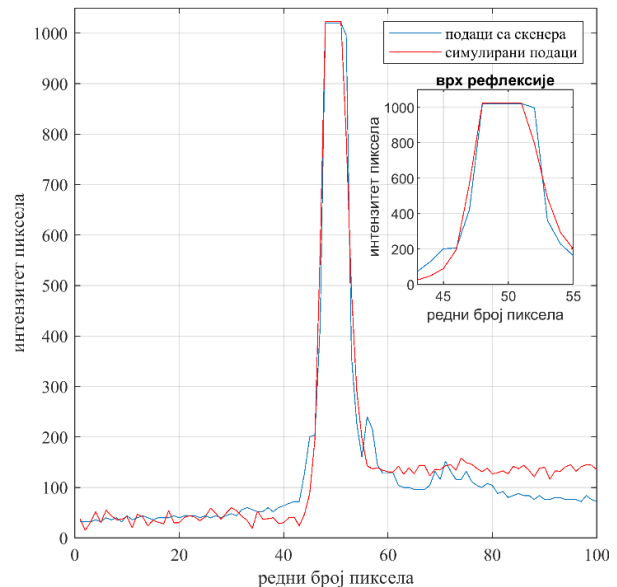
Уколико се приликом симулације система узму у обзир и ефекти сатурације и асиметрије ласерске рефлексије, тада је једначина која је описује дата са:

$$R_f[i] = \begin{cases} R[i], & i \in (0, s_1); \\ S, & i \in [s_1, s_2]; \\ f_{sym} + (1 - f_{sym})R[i], & i \in (s_2, I); \end{cases} \quad (6.7)$$

где је са  $S$  дата вредност сатурације (која је дефинисана динамичким опсегом камере), док су са  $s_1$  и  $s_2$  дати редни бројеви пиксела који означавају почетак и крај сатурације ласерске рефлексије, а са  $f_{sym}$  фактор асиметрије. Са  $R_f[i]$  дата је коначна вредност симулиране рефлексије ласерске линије.



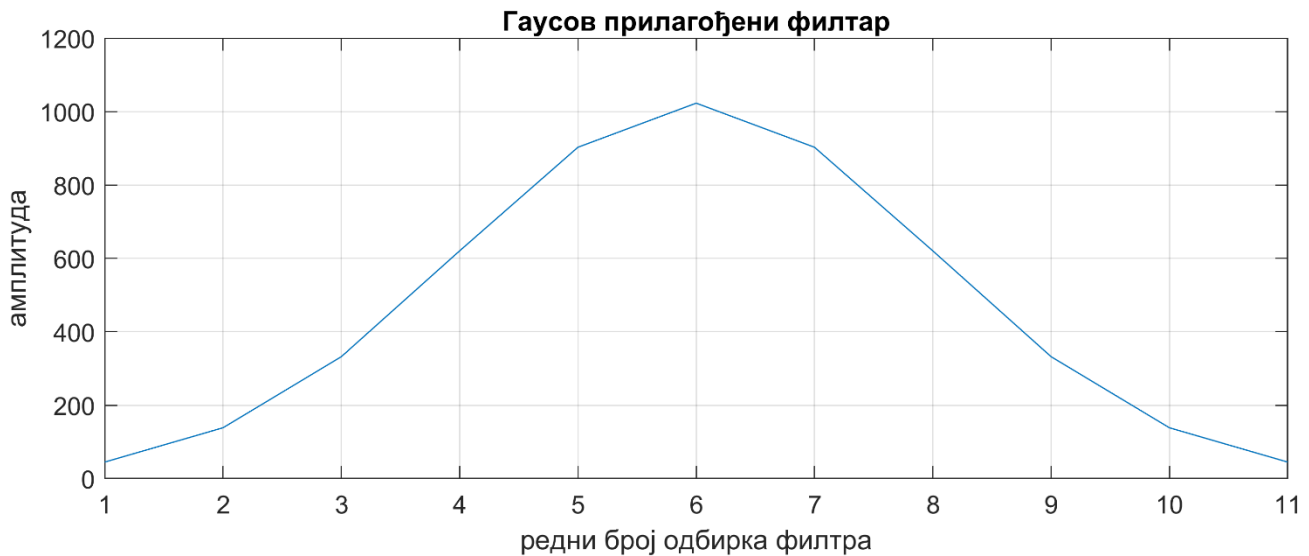
(а)



(б)

Слика 45. (а) Пример слике добијене симулацијом, при чему је црвеном бојом означена једна линија слике дата на слици поред; (б) приказ једне линије слике добијене симулацијом упоредо са линијом слике добијене са камере профилног скенера.

На слици 45. дат је пример симулиране ласерске рефлексије упоредо са једном линијом слике са профилног скенера. На слици 45б. је дат увећан приказ врха ласерске рефлексије за оба случаја на којима се види сатурисан врх. Такође, на десној страни рефлексије може се јасно видети утицај фактора асиметрије на очекивани Гаусов профил.



Слика 46. Импулсни одзив Гаусовог прилагођеног филтра дужине  $N=11$  одбирка

Примена аутоконволуције у детекцији центра рефлексије ласерске линије тестирана је коришћењем *Monte Carlo* симулације. Симулација је рађена у MATLAB програмском језику. Први корак је генерисање симулиране слике ласерске рефлексије на основу једначине 6.7 на основу задатог сета параметара. Сваки сет слика се састоји од 10.000 слика са случајно генерисаним линијама, где су параметри рефлексије – ширина, амплитуда и позиција фиксни за задати сет. За дужину ласерске линије узето је да је једнака 100 пиксела, како би се смањио број података и значајно уштедело време потребно за симулацију. Свака линија слике је процесорирана као независан једнодимензионални сигнал. У симулацији за сваку слику је додата иста снага AWGN шума користећи MATLAB функцију AWGN. Ова MATLAB функција прво израчуна снагу улазног сигнала, па на основу прорачуна додаје захтевану снагу AWGN на сигнал изражен у dBW. Кроз симулацију ширина рефлексије је мењана од минималне до максималне вредности (дате у табели 8.), уз претпоставку да је снага извора ласерске светлости константа, као и да је време за које је ласер укључен једнако времену експозиције камере. На тај начин је симулирано засићење пиксела услед превеликог времена експозиције камере. Центар рефлексије је кроз симулацију постављен на случајно изабрану вредност у околини средине симулиране линије и дат је у табели 8. Максималан број додатних рефлексија које се налазе у околини главне рефлексије је 4. При чему је максимална амплитуда постављена да буде на половини динамичког опсега камере. Док је позиција нежењене рефлексије постављена да буде у околини 4 пиксела са леве или 4 пиксела са десне стране главне рефлексије. Како би се одабрала оптимална дужина речи за имплементацију аутоконволуционог филтра, број бита квантизације је мењан у распону од 6 до максимално 9 одсечених бита од укупно 10 бита (са колико је и представљена вредност пиксела камере). Ширина аутоконволуционог филтра је такође мењана кроз симулацију како би се одабрала оптимална дужина прозора за филтрирање. Дужина Гаусовог прилагођеног филтра је одабрана да одговара половини симулираног опсега ширине ласерске рефлексије. Импулсни одзив Гаусовог прилагођеног филтра дат је на слици 46.

Параметри симулације који су узети у обзир и распон у којем су они мењани, дати су у табели 8.

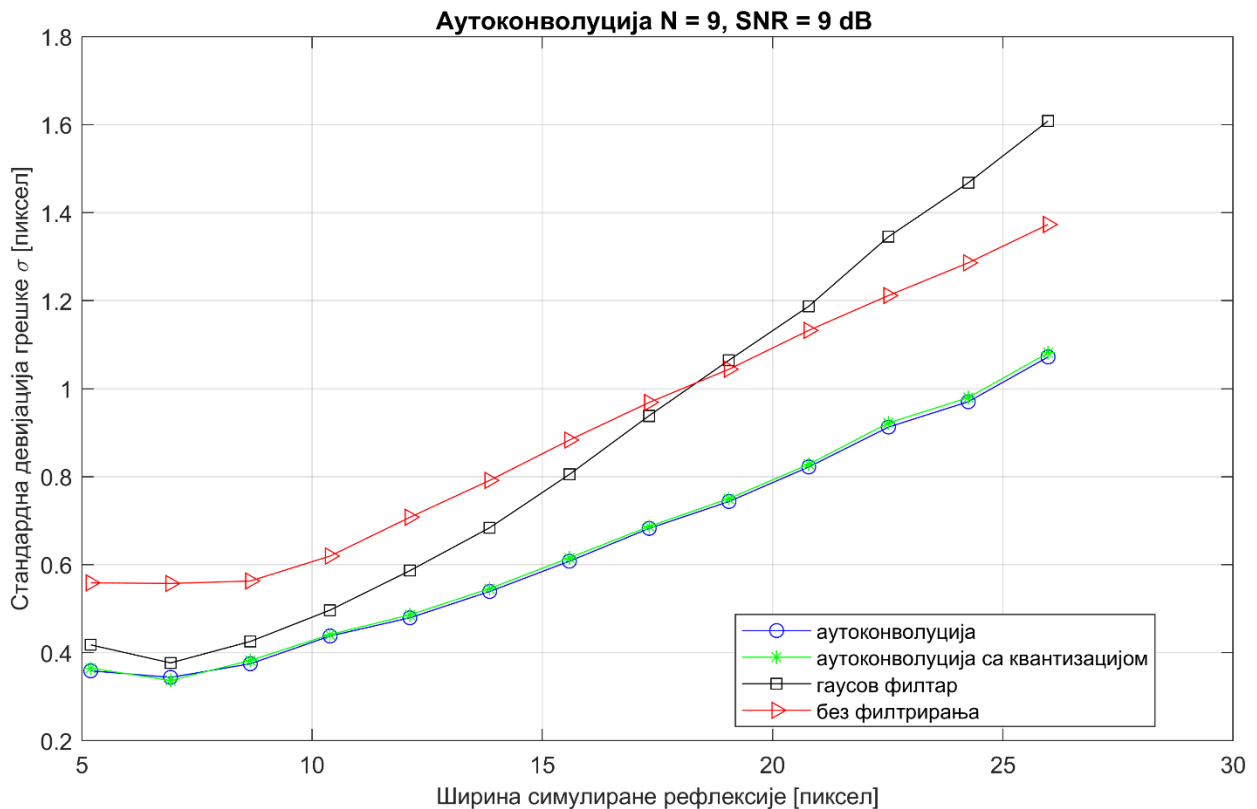
Табела 8. Параметри симулације

Параметар симулације	Min	Корак	Max	Јединица
Главна рефлексija				
Ширина рефлексije ( $\sigma_m$ )	3	1	20	Пиксел
Амплитуда рефлексije ( $a_m$ )	1023			Интензитет пиксела
Позиција центра главне рефлексije ( $c_m$ )	49.123			Редни број пиксела
Додатне рефлексije				
Број додатних рефлексija	0	1	4	
Ширина додатне рефлексije ( $\sigma_k$ )	1	1	3	Пиксел
Амплитуда додатне рефлексije ( $a_k$ )	50	1	500	Интензитет пиксела
Померај додатне рефлексije у односу на главну рефлексiju ( $c_k$ )	-4	1	4	Пиксел
Остали параметри симулације				
Број квантизованих (одсечених) бита	6	1	9	бит
Вредност прага за детекцију ласерске рефлексije ( $th$ )	0.7		0.9	% максималне вредности интензитета пиксела
SNR ( $n[i]$ )	3	3	20	dBW
Ширина прозора аутоконволуције ( $N$ )	3	1	11	Пиксел
Фактор асиметрије ( $f_{sym}$ )	0.1			%

Главни излаз симулације представља естимирана позиција ласерске рефлексije израчуната користећи алгоритам центра масе за случај када се користи аутоконволуција као метода предфилтрирања, Гаусов прилагођени филтар и када није коришћено филтрирање пиксела.

Прецизност алгоритма се обично процењује на основу стандардне девијације грешке или варијансе грешке алгоритма и у нашем случају ова вредност ће се мењати у зависности од времена експозиције камере, односно ширине рефлексije.

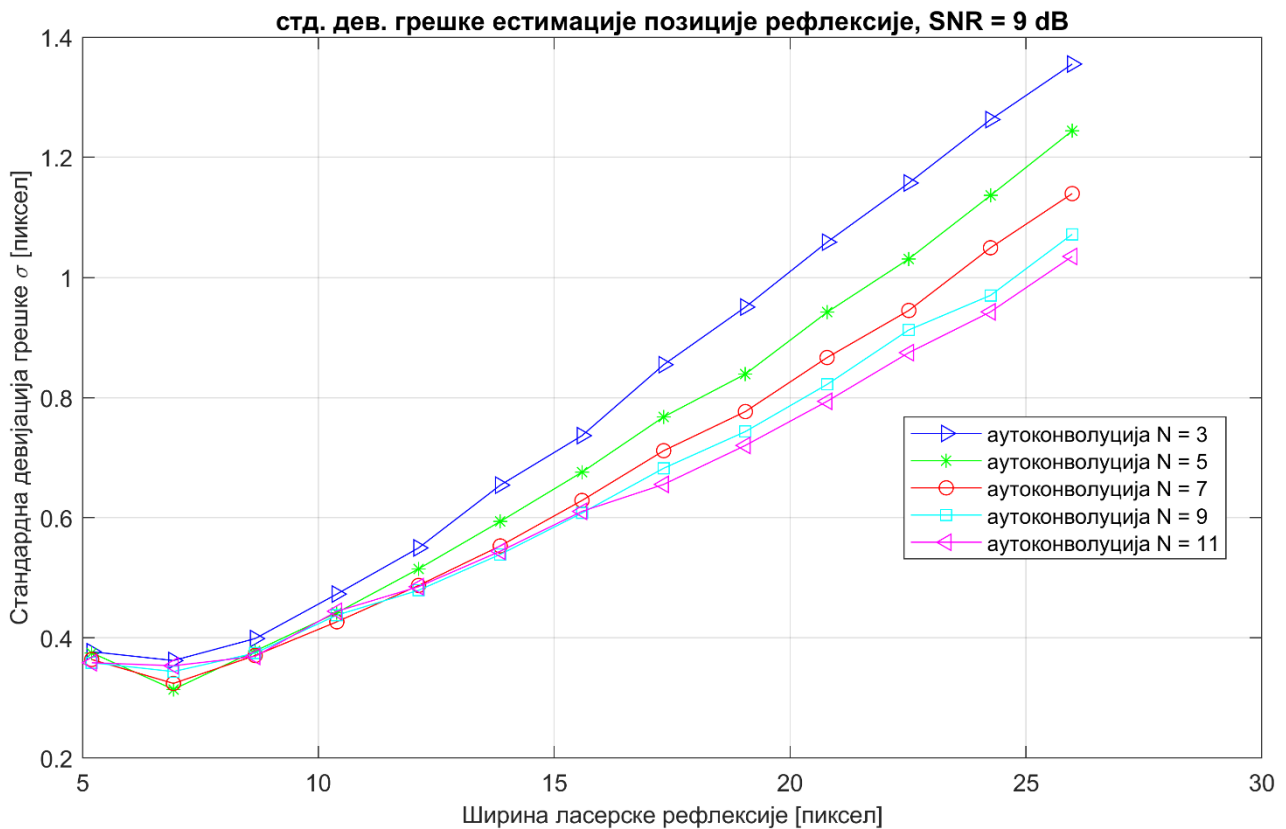
На слици 47. дата је стандардна девијација грешке естимације позиције ласерске рефлексije за различите алгоритме предфилтрирања сигнала у комбинацији са алгоритмом центра масе. Посматрани су случајеви када нема филтрирања и очекивано у овом случају грешка естимације је највећа. Затим, посматрани су случајеви када се користи Гаусов прилагођени филтар и аутоконволуција са пуном дужином речи, као и аутоконволуција са квантизацијом вредности пиксела. Ширина прозора аутоконволуције је изабрана да буде 11 пиксела. Када је ширина рефлексije мала, свега неколико пиксела, Гаусов филтар показује нешто боље резултате у односу на аутоконволуцију. Међутим, како ширина рефлексije почиње да расте, тако његове перформансе опадају, док грешка естимације када се користи аутоконволуција почиње да опада. Кроз симулацију је показано да је разлика у варијанси грешке естимације мала када се користе аутоконволуција са и без квантизације приликом њеног рачунања.



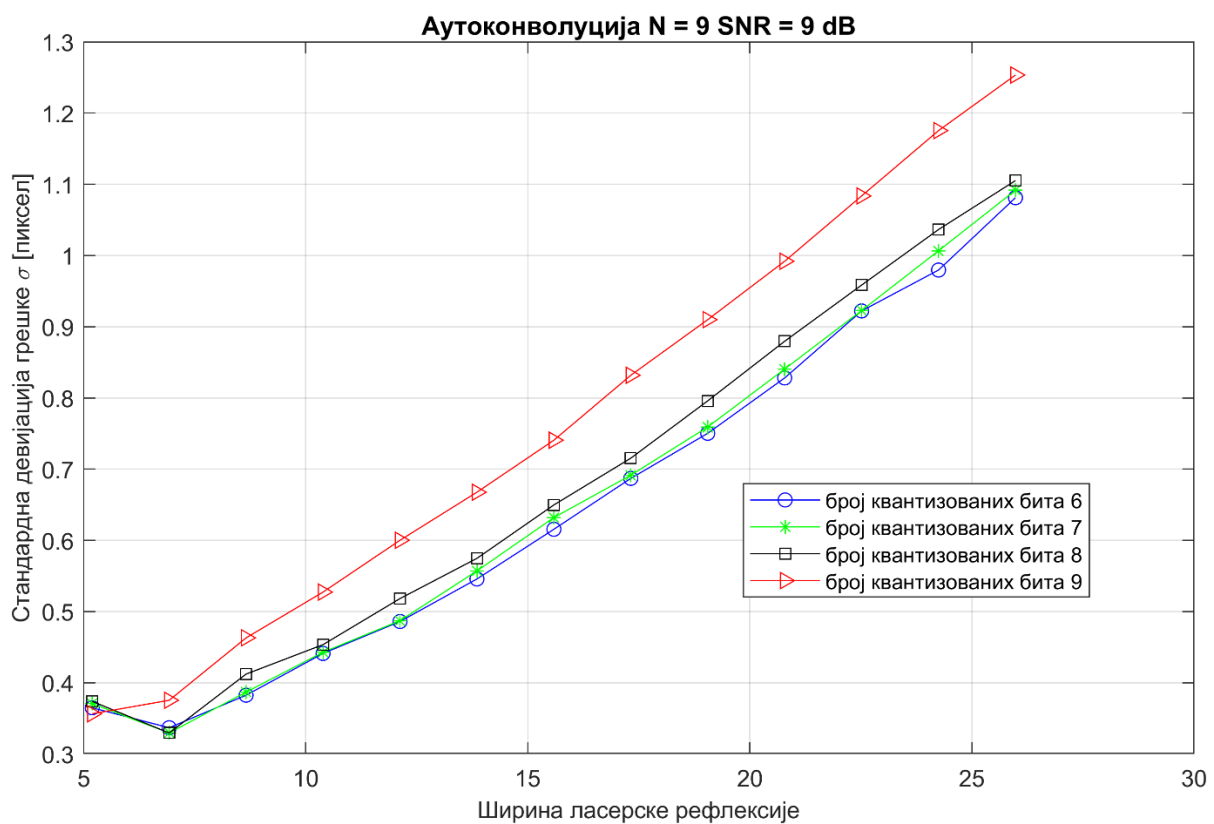
Слика 47. Стандардна девијација грешке естимације позиције ласерске рефлексије за различите алгоритме филтрирања у комбинацији са алгоритмом центра масе, када је ширина аутоконволуционог филтра 9, а SNR = 9 dB

Један од најбитнијих параметара симулације је ширина прозора аутоконволуције. На слици 48. дата је варијанса грешке естимације позиције ласерске рефлексије у зависности од ширине рефлексије за различите величине прозора. Интуитивно је јасно да се бољи резултати очекују када ширина посматраног прозора расте, јер је већи број пиксела захваћен филтрирањем. Тако је разлика у варијанси грешке естимације практично једнака за све ширине аутоконволуције када рефлексија има малу ширину. Међутим, како ширина рефлексије расте, тако се врло лако уочава да за веће ширине прозора аутоконволуције даје боље резултате.

На слици 49. дата је стандардна девијација грешке естимације позиције ласерске рефлексије за алгоритам центра масе у комбинацији са аутоковолуцијом као предфилтром за податке са камере. Очекивано како расте број одсечених бита тако опадају перформансе система, па се тако лако могу уочити разлике када се користи 4 највиша бита у односу на случај када се користи само највиши бит.



Слика 48. Стандардна девијација грешке естимације позиције ласерске рефлексије за различите ширине прозора аутоконволуције, када је SNR = 9 dB



Слика 49. Стандардна дев. грешке естимације позиције за различит број бита квантизације рачунања аутоконволуције у зависности од ширине рефлексије за SNR = 9 dB и ширину прозора аутоконволуције N=9.

На претходним сликама дати су графици који потврђују да идеја аутоконволуције као технике претпроцесирања сигнала са камере профилног скенера даје добре резултате. У прилогу А налазе се додатне слике у којима су дати примери како се посматрани алгоритам понаша за различиту снагу шума, ширину прозора аутоконволуције и различите алгоритме претпроцесирања. Такође, дати су примери како се врх ласерске рефлексије мења у зависности од његове ширине, снаге шума, али исто тако и како аутоконволуција утиче на профил рефлексију у тим случајевима.

Због природе алгоритма аутоконволуције где се сигнал филтрира са филтром непознатих коефицијената (зависе од улазног сигнала), од великог је значаја добра анализа грешке квантизације када се користи приступ са квантизацијом бита, како би се операције множења имплементирале преко LUT табела или преко операција померања, сабирања и одузимања бита. У наставку је дата естимација грешке рачунања аутоконволуције услед квантизације вредности пиксела.

## 6.2. Естимација грешке рачунања аутоконволуције услед квантизације вредности пиксела

Треба обратити пажњу да је имплементација аутоконволуције на наменској платформи практично немогућа због динамичког опсега камере без употребе *multiplierless* архитектуре филтра. Таква архитектура филтра подразумева да су операције множења имплементиране кроз операције померања, сабирања и одузимања бита. Овакви приступи се врло често користе на наменским платформама, јер то су брзе и рачунски јефтине операције. Међутим, за имплементацију оваквог филтра неопходно је познавати коефицијенте филтра унапред. Из једначине која описује аутоконволуцију јасно је да коефицијенти филтра нису унапред познати и да зависе од улазног сигнала. Због тога је потребно искористити неку од DSP метода, где се тачност операције плански жртвује због брзине или комплексности и броја рачунских операција.

Потребан ниво квантизације пиксела ради имплементације аутоконволуције се може анализирати на основу броја преосталих бита  $N_b$  после операција одсецања или заокруживања. Грешка квантизације је дата следећом једначином:

$$e_x[i] = x_q[i] - x[i] \quad (6.8)$$

где је са  $x_q[i]$  дата квантизована вредност пиксела,  $x[i]$  представља почетну вредност пиксела, а са  $e_x[i]$  је дата вредност грешке квантизације.

Свако филтрирање сигнала мења облик функције густине вероватноће грешке. Додатно, филтрирање сигнала уноси нове компоненте грешке квантизације због ефекта заокруживања бита. Анализа ефекта заокруживања бита у линеарним временски инваријантним системима је добро позната. Међутим, чак иако посматрамо аутоконволуцију као једноставан FIR филтар, овакви модели нису применљиви због чињенице да коефицијенти филтра нису унапред познати, већ зависе од самог улазног сигнала.

У анализи квантизације развијена је једноставна *Monte Carlo* симулација како би се добила естимација дистрибуције грешке резултата рачунања аутоконволуције базиране на квантизованим вредностима. Грешка рачунања аутоконволуције у том случају је дата са:



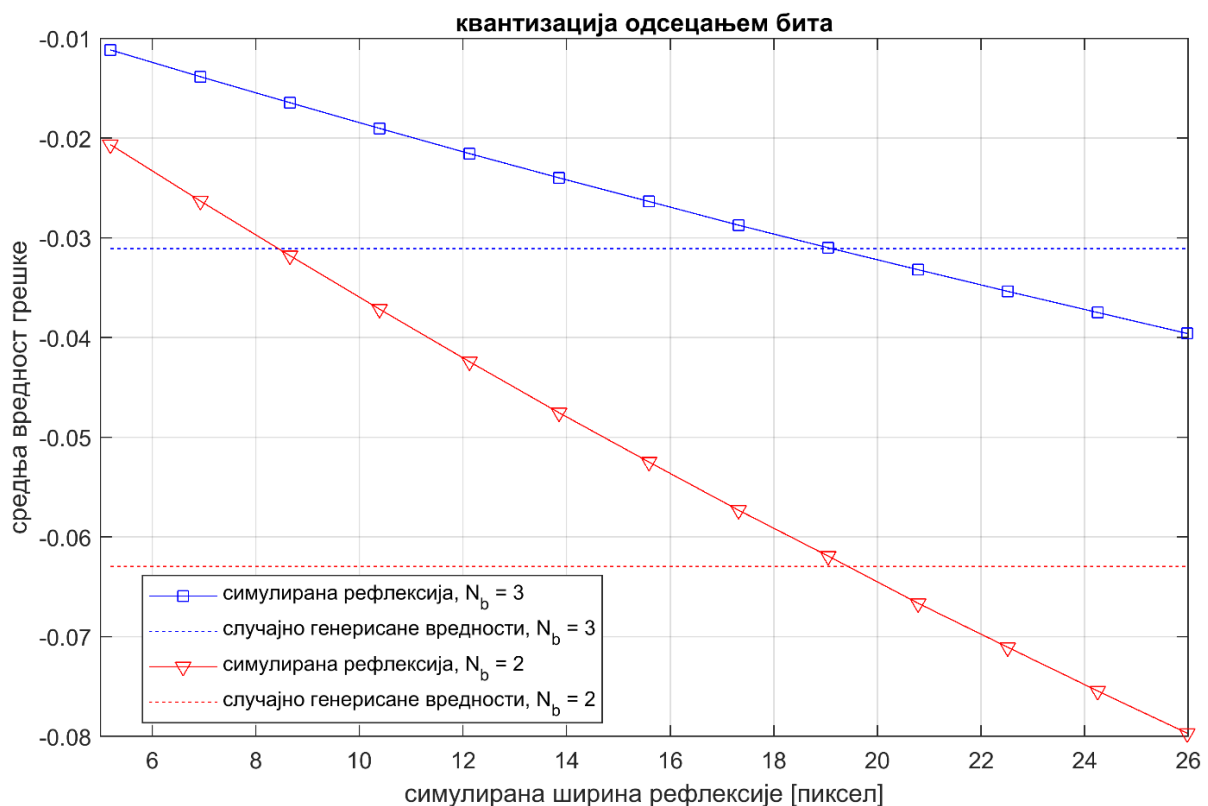
$$e_A[i] = A_q[i] - A[i] \quad (6.9)$$

где је са  $A_q[i]$  дата аутоконволуција добијена квантизованим вредностима пиксела  $x_q[i]$ .

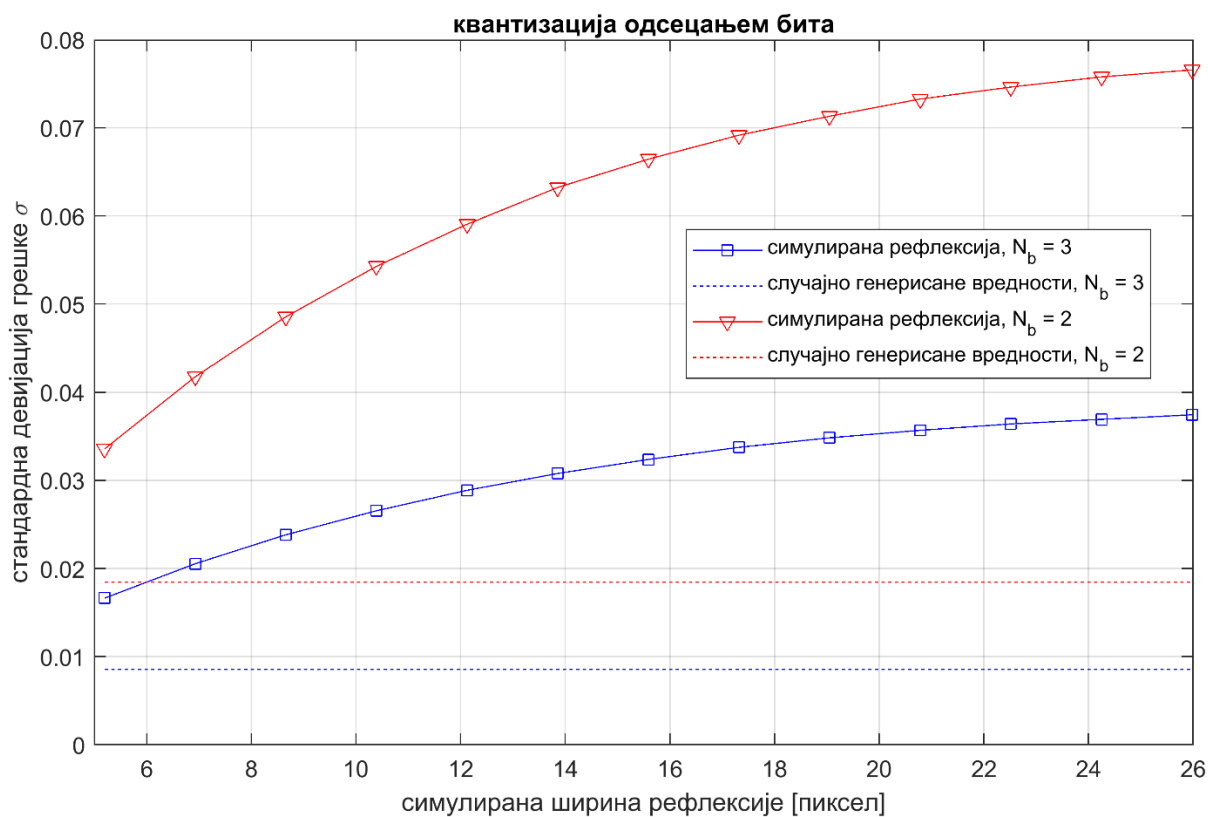
Кроз симулацију су коришћена два приступа како би се утврдили ефекти квантизације на резултат рачунања аутоконволуције. У првом случају генерисан је низ случајних бројева у распону  $[0, 1023]$ , који одговара динамичком опсегу камере од 10 бита. У другом случају генерисана је једна линија слике на основу једначине 9.2. У оба случаја је коришћена једначина за рачунање вредности аутоконволуције дата са 6.7. Симулација је поновљена 10.000 пута за различите улазне низове података и резултат симулације је дат преко средње грешке и стандардне девијације грешке рачунања аутоконволуције.

Резултати за  $N_b = 2$  и  $N_b = 3$  за низ података  $x$ , где је коришћена операција одсецања бита дата је на сликама 50. и 51. На сликама су приказани резултати оба приступа тестирања ефеката квантизације (случајан низ улазних података дат је испрекиданом линијом, док су резултати са симулираном линијом слике са ласерском рефлексијом дати пуном линијом). Наравно, у другом приступу је могуће симулирати различите ширине ласерске рефлексије. У обзир треба узети да између суседних одбирака улазног сигнала у том случају постоји корелација. Узимајући у обзир све речено, резултати добијени другим приступом се могу сматрати поузданијим. Очекивано, у случају када се користи више бита за рачунање аутоконволуције, грешка рачунања је мања.

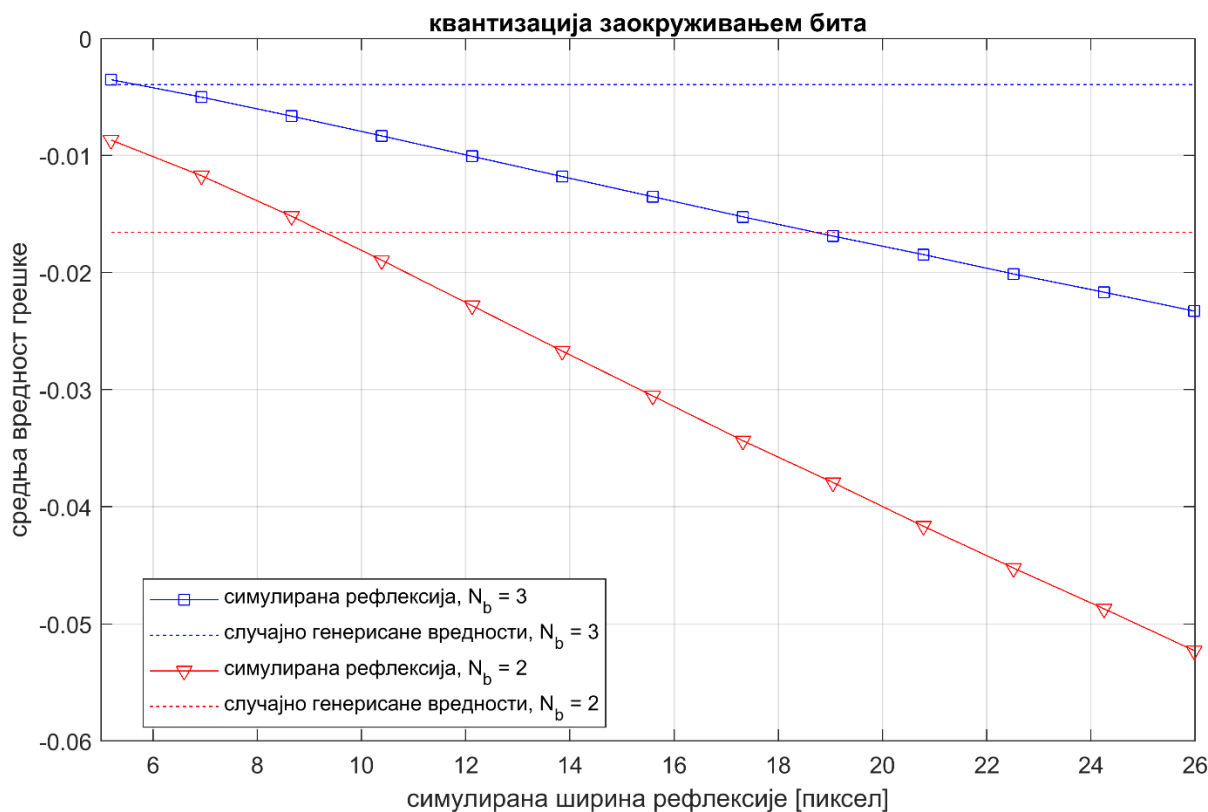
Међутим, чак и у случају када се користи други приступ анализе грешке, резултати нису у потпуности применљиви на анализу резултата комплетне симулације естимације ласерске рефлексије, јер се резултат рачунања аутоконволуције користи као улаз у алгоритам центра масе за финално рачунање естимације позиције њене позиције [145].



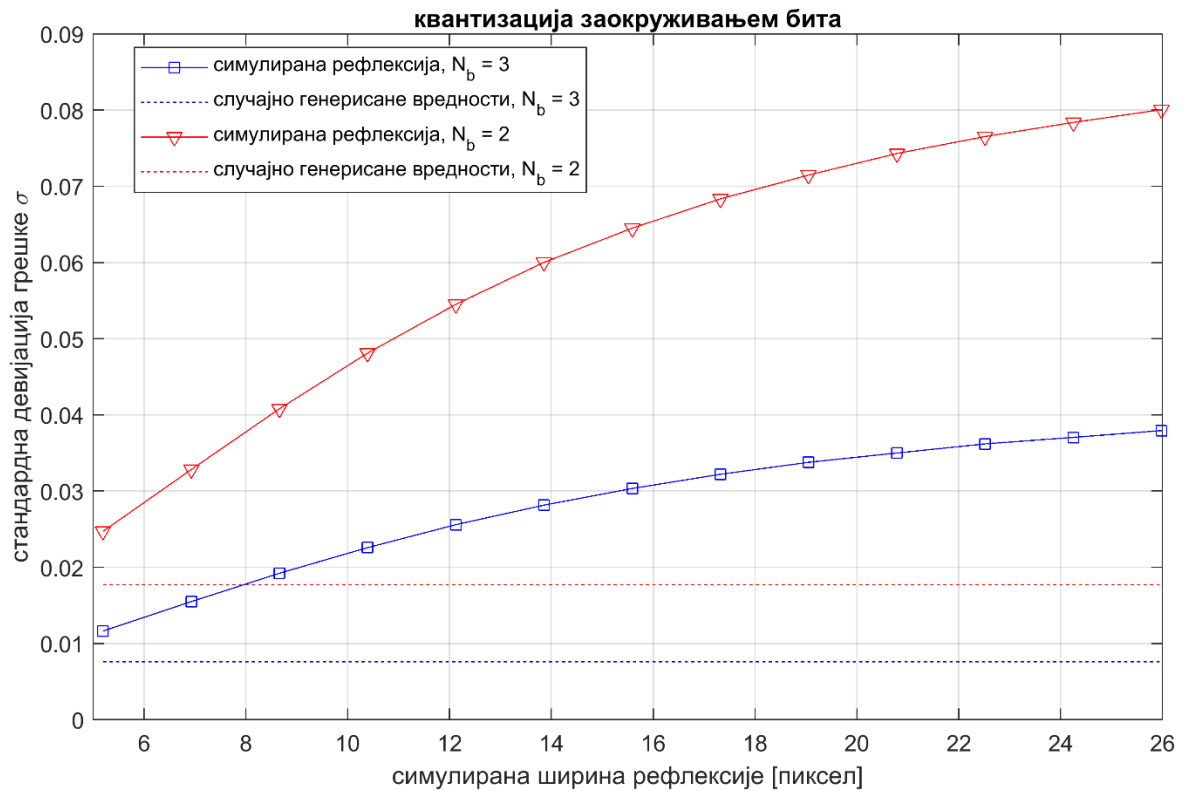
Слика 50. Средња вредност грешке рачунања аутоконволуције за различите дужине квантизације пиксела у зависности од ширине ласерске рефлексије, када се користи квантизација бита одсецањем



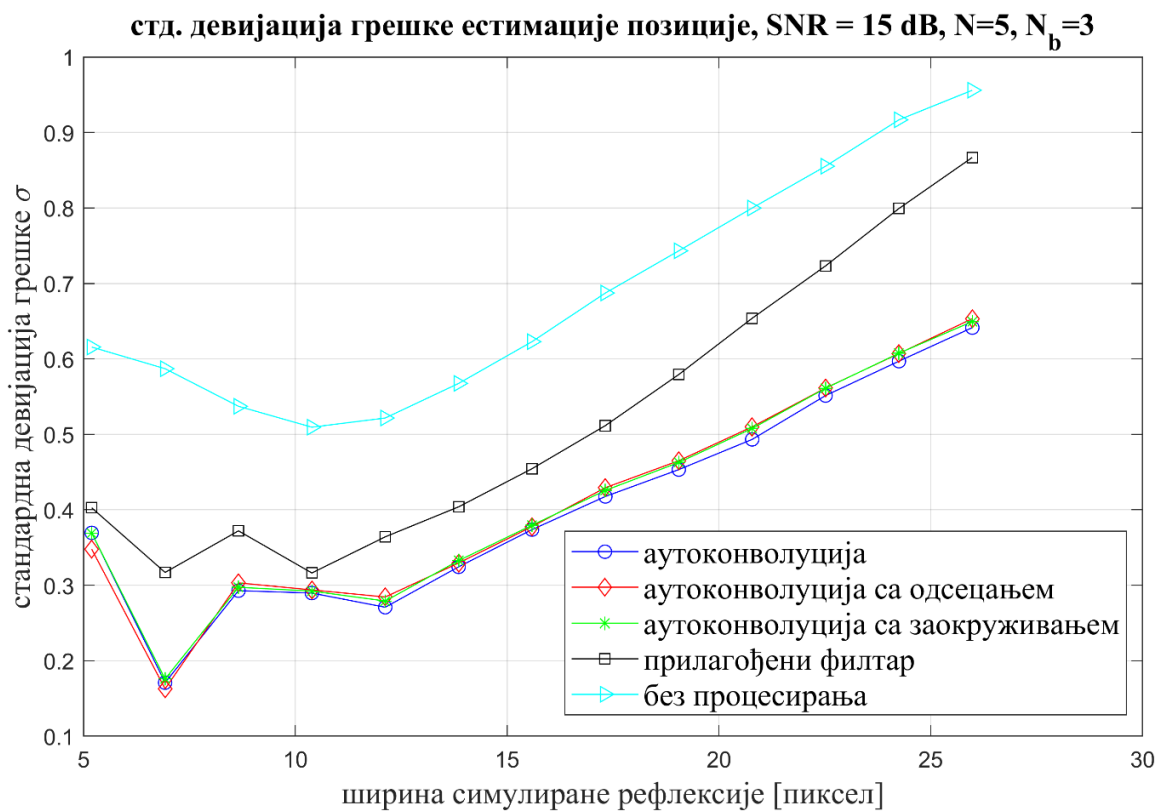
Слика 51. Стандардна девијација грешке рачунања аутоконволуције за различите дужине квантизације пиксела у зависности од ширине ласерске рефлексије, када се користи квантизација бита одсецањем



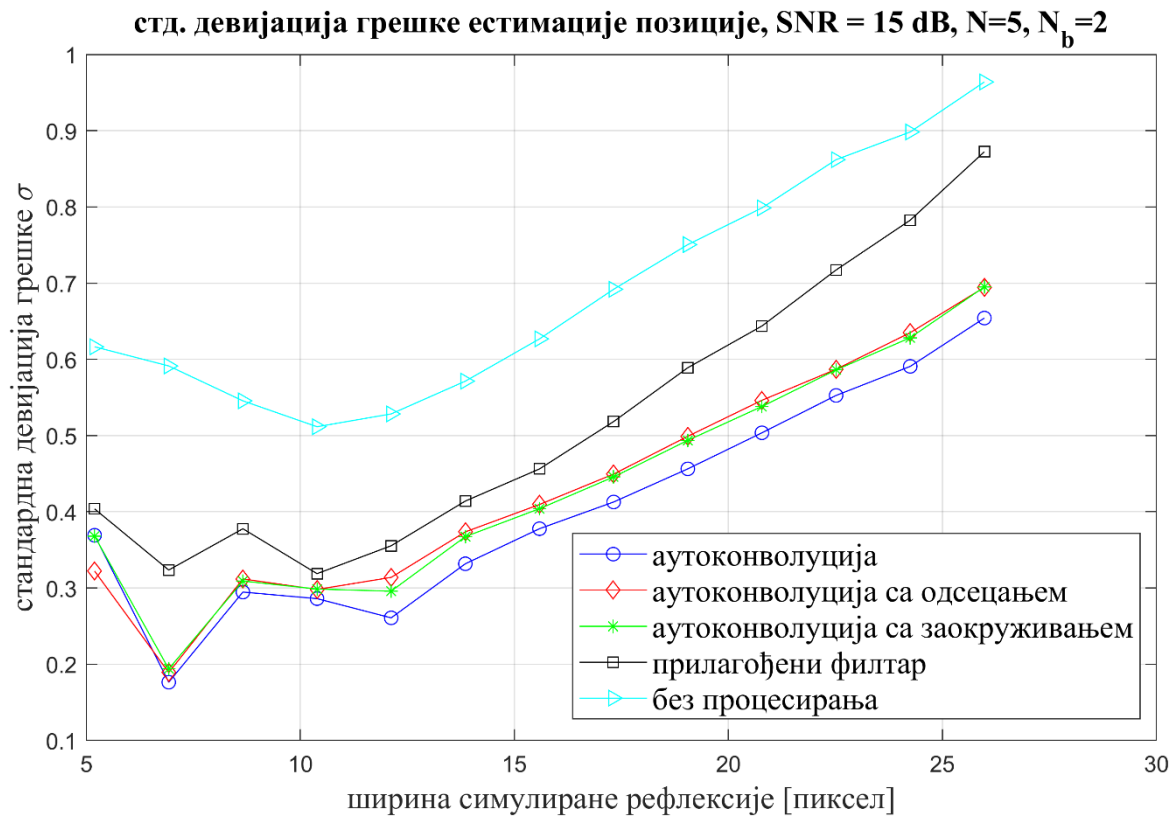
Слика 52. Средња вредност грешке рачунања аутоконволуције за различите дужине квантизације пиксела у зависности од ширине ласерске рефлексије, када се користи квантизација бита заокруживањем



Слика 53. Стандардна девијација грешке рачунања аутоконволуције за различите дужине квантизације пиксела у зависности од ширине ласерске рефлексије, када се користи квантизација бита заокруживањем



Слика 54. Стандардна девијација грешке естимације позиције ласерске рефлексије за различите ширине рефлексије, изражене у величини пиксела, када је SNR однос 15 dB, ширина аутоконволуције 5 и дужином од 3 бита по пикселу



Слика 55. Стандардна девијација грешке естимације позиције ласерске рефлексије за различите ширине рефлексије, изражене у величини пиксела, када је SNR однос 15 dB, ширина аутоконволуције 5 и дужином од 2 бита по пикселу

На сликама 52. и 53. дата је стандардна девијација грешке естимације позиције за различите ширине ласерске рефлексије и дужине квантизације (3 и 2). У симулацији је коришћен аутоконволуциони филтар ширине 11 пиксела са SNR = 11 dB. Кроз симулацију су посматрани различити алгоритми за претпроцесирање сигнала. Очекивано, без употребе неке од техника претпроцесирања сигнала, стандардна девијација грешке ће имати највећу вредност изражену преко величине пиксела. Прилагођени Гаусов филтар има добре перформансе када је његова ширина упоредива са рефлектованом линијом. Након тога почиње да губи перформансе, а за изразито велике ширине почиње да има вредности грешке веће него када се не користи претпроцесирање.

Од највећег интереса су случајеви када се користи аутоконволуција без квантизације и она показује најмање вредности грешке кроз цео опсег симулиране ширине рефлексије. Када је у питању квантизација вредности пиксела, симулирана су два случаја, када се користи операција заокруживања и једноставног одсецања бита. Рачунски захтевнија операција заокруживања бита показује нешто боље резултате у односу на једноставно одсецање бита.

Анализа чији су резултати дати на графицима приказаним на сликама 54. и 55. верификује могућност имплементације предложеног новог алгоритма заснованог на аутоконволуцији и алгоритму центра масе коришћењем мале дужине кодне речи, односно на начин погодан за рад у реалном времену на FPGA платформи.

## 7. Имплементација алгоритма аутоконволуције на наменском систему

### 7.1. Преглед обраде сигнала у наменском систему профилног скенера

Модерни индустријски скенери представљају комплексне наменске системе иза којих се налазе године инжењерског развоја из најразличитијих области, почевши од електронике и дигиталне обраде сигнала и слике, програмирања, машинства и оптике, па све до њихове производње и продаје. Ласерски скенер мора бити прецизан, поуздан у свим условима рада, а опет једноставан за коришћење и за инсталацију. Такође, цена развоја али и самог уређаја мора бити пажљиво буџетирана. Све то утиче на одабир компоненти и начин на који се оне користе у систему. Пре свега је од пресудног значаја одабрати главне компоненте система, како би њихова искоришћеност била потпуна, а цена комплетног уређаја оптимална.

Један од најтежих задатака је процена потребних ресурса за имплементацију одређених функционалности система. Такође, потребно је направити добар баланс између онога што систем треба да ради у датом тренутку, као и функционалности које ће тек касније доћи на ред за имплементацију у виду нових могућности скенера. Уколико је одмах након прве верзије дизајна, искоришћеност ресурса система велика, врло је вероватно да ће у том случају морати да се ради ревизија хардвера, односно мењају главне компоненте система а самим тим могуће и првобитни дизајн. То наравно захтева додатно време и новац, а то значи и заостајање за конкуренцијом. Због тога је неопходно дати добру естимацију неопходних ресурса за имплементацију потребних алгоритама, те на основу ње направити процену о главним компонентама система. Ово је посебно важно када се узме у обзир FPGA део система, јер за његов развој важи да је спор. Такође, у случајевима када се искоришћеност ресурса које се налазе унутар чипа приближава максималној, алгоритми развојних алата за рутирање интерне FPGA логике имају све тежи задатак да логичке елементе чипа повежу на прави начин, за задате параметре система, по питању брзине (фреквенције).

Идеја обраде сигнала на самом делу где се прикупљају подаци је добро позната, јер се на тај начин смањује количина информације коју треба пренети ка остатку система и главној процесорској јединици, а уједно и поједностављује коришћење сензора у комплексним индустријским системима. Конкретно на примеру профилног ласерског скенера, количина података која долази са камере је огромна и мери се у GB/s. Тако на пример, један од модела Gigapixel камере, резолуције 10MP, са 12 бита по пикселу, је у стању да произведе 500 слика у секунди, што даје невероватних 60Gb/s. Одмах је јасно да толика количина података не може бити обрађена на РС рачунару у реалном времену, без употребе додатног хардвера (разних аквизиционих картица, процесорских акцелератора или GPU картица) за обраду података. Због тога обрада слике, односно сигнала, са сензора мора бити што ближе извору података и то реалном времену, а опет у стању да подржи максималан проток података који долази са сензора. Брз проток података са таквих сензора захтева имплементацију одговарајућих

алгоритама који са малом количином доступне логике (рачунарских ресурса) дају довољну количину података коју прослеђују ка остатку система.

На излазу скенера корисник добија низ података који представљају информацију о позицији рефлексије и њеним карактеристикама као што су на пример ширина или максималан интензитет. Најчешће се може изабрати структура података која се шаље ка централном рачунару. Структура се обично састоји од минимално десетак бајтова по детектованој рефлексији. Тако на пример, уколико је линија слике дужине 4608 пиксела, где је сваки пиксел дужине 12 бита, при чему из практичног искуства, није потребно слати више од 4 детектоване рефлексије (од којих свака има 10 бајтова информације) по једној линији, уштеда у количини података које остатку система треба проследити је 175 пута. Наравно, уколико корисник одабере опцију да преноси само основне информације о позицији рефлексије, уштеда у количини података је значајно већа. Такође, треба напоменути да нове верзије скенера имају додатне ресурсе за обраду података, па је тако могуће направити „паметне“ верзије скенера где се на пример могу задати предефинисане толеранције очекиваног профила. Тако се практично целокупна обрада сигнала и слике ради унутар скенера, а остатак система добија минималну количину података у виду сигнала да ли је производ на покретној траци прошао инспекцију или не. Треба обратити пажњу да у одређеним ситуацијама није довољно користити један профилни скенер, већ је за то неопходно синхронизовати већи број скенера. У таквим ситуацијама је неопходно радити софтверску реконструкцију сцене, при чему се количина података у систему линеарно повећава са бројем употребљених скенера.

Сензори брзих индустријских камера најчешће користе велики број диференцијалних линија за повезивање на физичком слоју. Најчешће је то LVDS (*Low Voltage Differential Signaling*) стандард, али са развојем решења смањене потрошње, све више се користе стандарди типа Sub-LVDS који користе нижи напонски ниво за комуникацију између камере и чипа за процесирање података. У највећем броју случајева не постоје готова решења за директну комуникацију између процесора и чипа камере, па је неопходна употреба или чипа преводиоца (који ће примити LVDS сигнал и конвертовати га у неки од стандардних интерфејса које процесор може да прими) или FPGA где се ради посебна имплементација интерфејса камере или користе нека од готових решења која се могу прилагодити конкретном случају.

Предност FPGA у односу на друга решења је добар однос перформанси, времена развоја система, као и цене. Употребом FPGA процесирање података се у потпуности пребацује на „edge“ система, практично на сам интерфејс камере. Након што су подаци примљени и то најчешће преко већег броја паралелних канала, главни део процесирања података могуће је одрадити управо на уласку у систем.

Није необично да различити произвођачи камера имају различите интерфејсе према остатку система, те је врло често неопходно писање одговарајућих FPGA модула који ће радити пријем података са камере и из њих добијати сигнал такта, као и саме пикселе слике, заједно са пратећим контролним сигнаlima, који дају основне информације о почетку и крају линије слике или почетку и крају целе слике. Начин на који подаци стижу у FPGA део система у многоме одређује облик имплементације алгорита за обраду података. Тако на пример, интерфејс са 16 паралелних канала преко којих стижу подаци са камере, говори да ће и обрада података бити у паралели и да се исти алгоритам мора покренути у исто толико паралелних процеса. Наравно, делом је могуће радити временско дељење ресурса или TDM (*Time Division multiplex*) где се за два, три или више канала користи физички иста интерна логика која ради на два, три или више пута већем такту него сигнал који у њу улази. У великом броју случајева због високе фреквенције којом подаци стижу у систем, није реално очекивати да се може радити TDM већи од 2, 3 или 4 (у најбољем случају). Осим што се разликује број физичких канала преко којих се преноси информација о пикселима, различити произвођачи камера имају

потпуно различите начине (или стандарде) по којима се врши паковање пиксела. Тако на пример Sony IMX серија камера прима пикселе из једне линије по 16 узастопних пиксела, док са друге стране AMS CMOSIS CMV 4000 камера такође прима пикселе из једне линије слике али са кораком од 128 пиксела, те се у једном такту добијају редом пиксели са редним бројевима 1, 129, 257... Осим што је могуће да се распоред пиксела унутар линије разликује, камере које имају велики број LVDS канала врло често мењају и начин како се шаљу линије слике. Па тако на пример могуће је слати истовремено прву и последњу линију, односно читање се врши истовремено од почетка и краја ка оптичком центру сензора, што наравно значајно компликује имплементацију алгоритама у реалном времену. Обично су неопходне неке од техника преклапања процесирања, па се тако на пример за CMV камеру ради обрада сваког канала посебно, а онда врши преклапање добијених резултата, како би се добила континуална обрада сигнала.

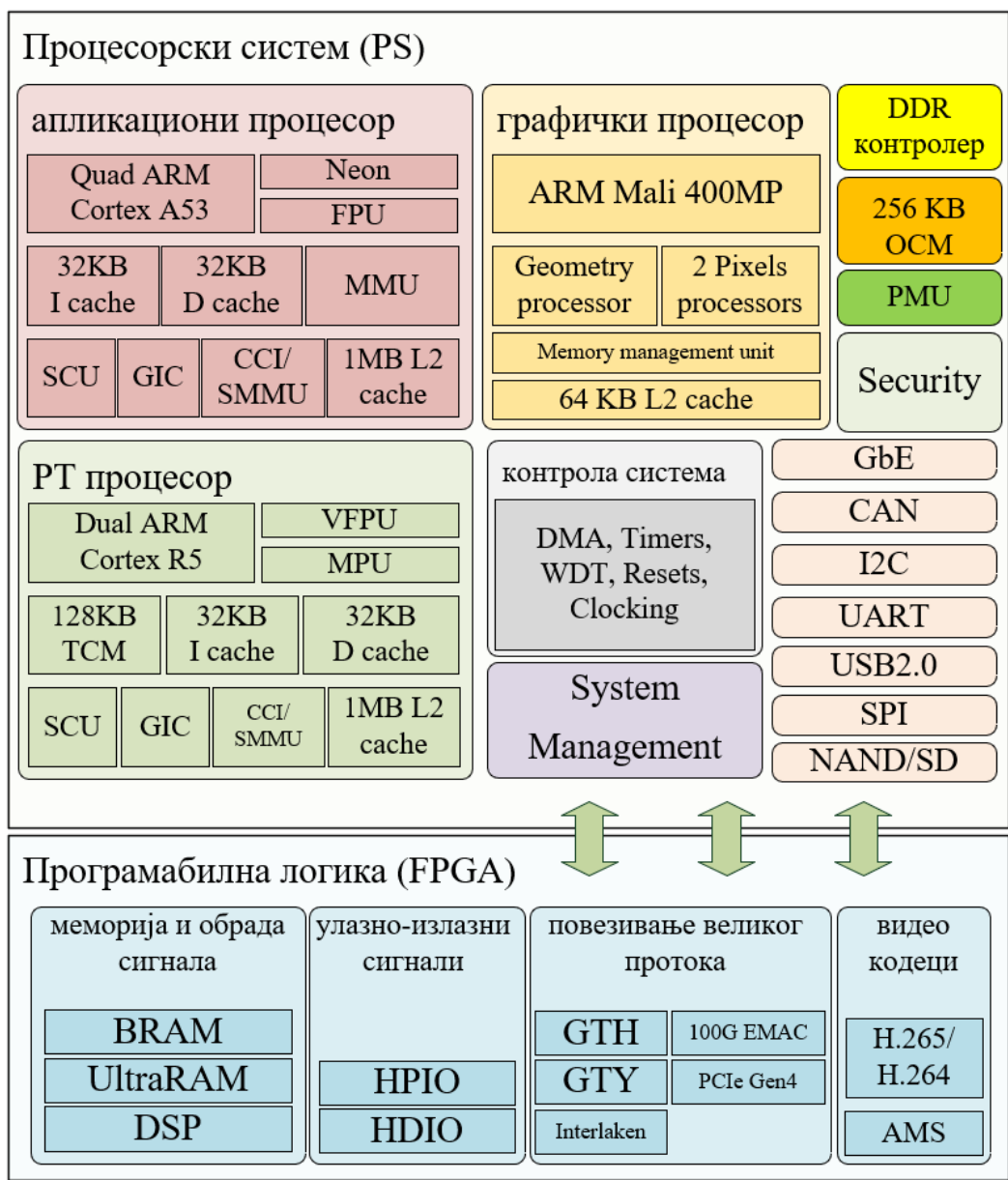
У зависности од изабраног приступа за обраду слике, али и саме архитектуре система, неки од алгоритама ће захтевати употребу DDR меморије. У том случају посебна пажња мора бити посвећена начину како се подаци уписују и читају из меморије [146] како би се добиле максималне перформансе. Операције уписа су мање временски захтевне него операције читања, посебно уколико је потребно читати малу количину података са различитих меморијских локација. Обично се алгоритми имплементирају на начин да се приликом уписа води рачуна о редоследу читања података, како би се са једним приступом меморији прочитало што је могуће више података. Међутим употребом DDR меморије у ланац процесирања сигнала уноси се додатно кашњење у систем, које је врло често непожељно и треба га избегавати.

Већ поменути Gigapixel камера користи 144 паралелна Sub-LVDS канала. Имплементација сложених алгоритама за детекцију позиције ласерске рефлексије који раде обраду слике у реалном времену је практично немогућа из више разлога. Пре свега због количине доступних логичких ресурса. У табели 9. је дат приказ логичких ресурса који се налазе унутар PL дела AMD Zynq UltraScale+ (ZU4CG) чипа:

Табела 9. Преглед логичких ресурса за AMD ZynqUltraScale+ (ZU4CG) чип

Логички градивни елемент FPGA (ZU4CG)	Количина или број елемената
System Logic Cell	192
CLB Flip-Flops (K)	176
CLB LUTs (K)	88
Maximum Distributed RAM (Mb)	2.6
Block RAMs (Mb)	4.5
Ultra RAMs (Mb)	13.5
Clock Management Tiles (CMTs)	4
DSP Slices	728
PCI Express Gen3 x16	2
AMC – System monitor	1
GTH 16.3 Gb/s Transceivers	16

Из приложене табеле одмах је јасно да употреба само једног хардверског множача (DSP Slice) за обраду сигнала унутар једног канала за пријем слике значи искоришћеност ресурса од скоро 20%. Сваки Block RAM (BRAM) се може конфигурисати као 36 Kbit меморија са двоструким портom за читање и упис података као и двоструком адресном линијом или 2 независне меморије са по једним портom за читање и упис података и једном адресном линијом величине 18 Kbit. На основу табеле 8. доступно је укупно 256 меморија са једном линијом за податке и једном линијом за адресе. Уколико се за сваки канал користи само једна таква меморија искоришћеност ресурса је 56%, што је више од половине укупних ресурса. Јасно је да алгоритам за обраду података мора бити минималног потписа што се тиче искоришћености ресурса, а опет са друге стране довољно добар како би корисна информација била извучена из великог број пиксела слике.



Слика 56. Преглед главних блокова који се налазе унутар Xilinx Zynq UltraScale+ SoC



Модерна SoC архитектура система, представља добро познату технологију програмабилних интегрисаних кола са краја XX века. На слици 56. дат је преглед главних модула AMD Zynq UltraScale+ (*System on Chip - SoC*) фамилије чипова. За разлику од првих FPGA чипова који су били сачињени од искључиво логичких програмабилних интегрисаних кола, нове генерације су представници правих SoC уређаја на којима осим програмабилне логике, постоји и мноштво других система заједно са одговарајућим периферијама. Тако, AMD Zynq UltraScale+ чип се може поделити на PS (*Processor Subsystem*) део у којем је смештен процесор заједно са његовим периферијама и PL (*Programmable Logic*) део у којем је смештена FPGA програмабилна логика. Унутар PL дела су смештена интегрисана логичка кола заједно са хардверски имплементираним модулима као што су BRAM, UltraRAM, DSP, GTN или GTY трансивери (у зависности од одабране платформе), интерфејси према DDR меморијама итд. Унутар PS дела се налази APU (*Application Processing Unit*) са Quad ARM Cortex A53, RTU (*Real-Time Processing Unit*) у којем је смештен Dual Arm Cortex R5, GPU, DDR меморијски контролер, периферије према различитим интерфејсима као што су Display Port (DP), USB3.0, SATA3.0, PCIe GEN2, као и неке од добро познатих комуникационих протокола, као што су CAN, I2C, SPI, UART, SD/eMMC, QUAD SPI и друге.

Веза између PS и PL делова чипа је остварена преко AXI (*Advanced eXtensible Interface*) протокола дефинисаног од стране ARM-а као AMBA (*Advanced Microcontroller Bus Architecture*) стандарда. Постоје 3 врсте AXI интерфејса:

- AXI4 је магистрала високих перформанси, меморијски мапирана
- AXI Lite је такође меморијски мапирана, али поједностављена верзија са малим протоком, предвиђена углавном за регистарску комуникацију
- AXI4-Stream која се користи у апликацијама са великим протоком стримованих података и није меморијски мапирана.

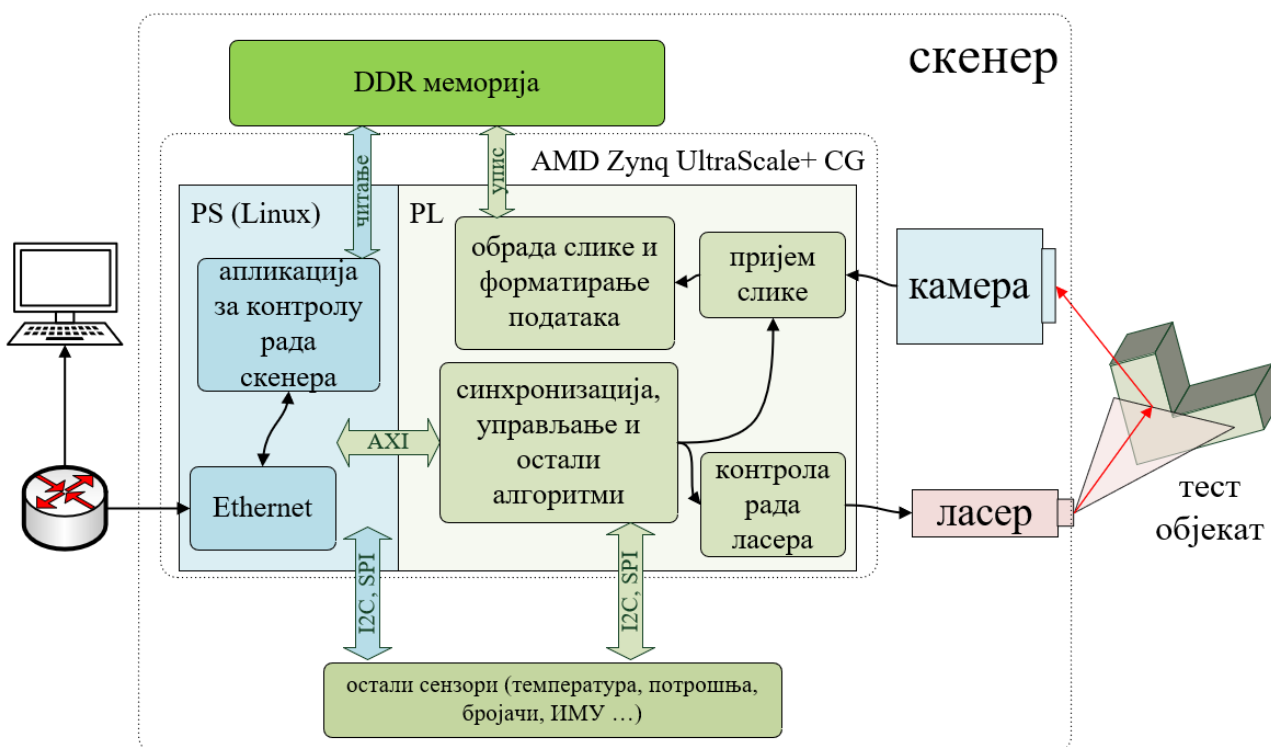
Већина IP модула (*Intellectual Property - IP*) који се користе су писани по AXI стандарду. На тај начин се постиже додатни ниво могућности за поновну употребу већ написаних комплексних делова FPGA дизајна, јер су интерфејси које IP модул користи постали стандардизовани. Тако је развој нових апликација на FPGA платформама значајно убрзан, јер већ тестиране, и у раду потврђене IP модуле, је могуће једноставним повезивањем преко стандардизоване магистрале додати у остатак дизајна.

Са представљањем Vivado алата, Xilinx, а касније AMD, је представио и нови концепт за развој FPGA дизајна. Акцент је стављен на “блок дизајн“, где се периферије преко AXI магистрале, односно AXI свичева, повезују на главни део чипа који је у овом случају ARM A53 процесор [147]. До појаве SoC решења, велики проблем је представљала конекција FPGA чипова са остатком система. Примљене и обрађене податке било је неопходно негде послати или сачувати, а то је изискивало употребу стандардних интерфејса према осталим деловима система или екстерне меморије. За мање фирме је то могао представљати велики проблем, јер цена развоја таквих интерфејса је велика, а IP модули који су то подржавали су веома скупи, при чему врло често крајњи корисник није имао могућност прилагођења таквих делова дизајна сопственим потребама. Врло често се користила опција екстерног процесора који је повезан преко неке од стандардних меморијско-мапираних магистрала на FPGA, како би се обезбедио пренос података.

Наравно, са интеграцијом правих процесора у FPGA чипове, ниво апстракције је подигнут на највиши ниво, те је тако могуће покренути Linux оперативни систем на процесорима, RTOS систем на RTU а то све заједно повезати према FPGA делу чипа преко AXI магистрале. На тај начин је обезбеђена једноставна размена података између различитих апликационих слојева једног врло комплексног система.

На слици 57. дат је блок дијаграм комплетног система профилног ласерског скенера уколико је централна компонента за обраду сигнала изабран AMD Zynq UltraScale+ чип. Остале архитектуре са другачијим FPGA уређајима или оне које се састоје од комбинације FPGA уређаја и одвојеног (издвојеног) процесора би у начелу имале исте или сличне блокове за процесирање података, те се ово може узети као општи пример блок шеме профилног скенера. Унутар PL дела се налази интерфејс према камери који је задужен да прими слику и пратеће контролне сигнале. Врло често се интерфејс (стандардно I2C или SPI магистрале) за контролу рада сензора камере налази унутар самог PL дела, како би се обезбедило мењање параметара камере у реалном времену. Излаз блока за пријем података је повезан на део система који ради обраду слике и форматирање крајњих података који се смештају у DDR меморију. Употреба DDR меморије је неопходна како би се премостила разлика између обраде сигнала у реалном времену и оперативног система који се налази на самом скенеру или централном РС рачунару који ради додатну обраду података. По својој намени ова меморија се може назвати FIFO (*First In First Out*) меморијом у коју се смештају резултати алгоритма, односно обраде сигнала.

Врло битан блок профилног скенера који је на слици 57. назван „синхронизација и остали алгоритми“ представља фузију више мањих блокова који су неопходни за нормално функционисање уређаја. Пре свега ту је део задужен за синхронизацију камере и ласерске диоде, синхронизацију између скенера или синхронизацију скенера са осталим индустријским уређајима и сензорима. На пример, ту се налазе неки од софистицираних блокова, као што су блок за аутоматску контролу експозиције камере, модули за комуникацију са периферним сензорима, енкодери или блок за дистрибуцију података (најчешће блок за дистрибуцију подешавања и вредности параметара алгоритама који долазе од крајње корисничке апликације)



Слика 57. Блок дијаграм главних модула који врше обраду података и синхронизацију рада периферија.

## 7.2. Имплементација аутоконволуције

Архитектура, имплементација и верификација алгоритама на наменским FPGA платформама је изазован задатак. У почетној фази развоја ради се на архитектури система. Истражује се који алгоритми могу да помогну у решавању проблема, какве су перформансе и колико су комплексни за имплементацију. Обично се раде симулације у неким од добро познатих програмских језика који се користе у области обраде сигнала и слике, као што су MATLAB или Python. Када су резултати симулације задовољавајући, прелази се на фазу имплементације алгоритама на изабраној хардверској платформи. Први корак је оптимизација одабраних алгоритама, као и операција које се у алгоритмима користе. Пре свега ту је проблем преласка са аритметике покретне тачке која се обично користи у првим фазама симулације, на аритметику фиксне тачке која ће врло вероватно бити коришћена у имплементацији. Такође, посебна пажња се мора обратити на специфичне операције које су захтевне за имплементацију на FPGA наменским платформама, као што су операција дељења, квадратног корена, природног логаритма, тригонометријских функција итд... Тако на пример, операција дељења два броја се често апроксимира Тејлоровим развојем функције  $1/x$ , где се онда уместо операције дељења користи једноставнија операција множења два броја. У случају да је опсег вредности улазног сигнала ограниченог типа, са коначним бројем вредности (као што је интензитет пиксела), тада се делилац може апроксимирати са LUT и операција поново свести на множење два броја. Операције кореновања, логаритма и тригонометријске функције се могу ефикасно имплементирати на FPGA наменским платформама употребом CORDIC (*Coordinate Rotation Digital Computer*), алгоритма.

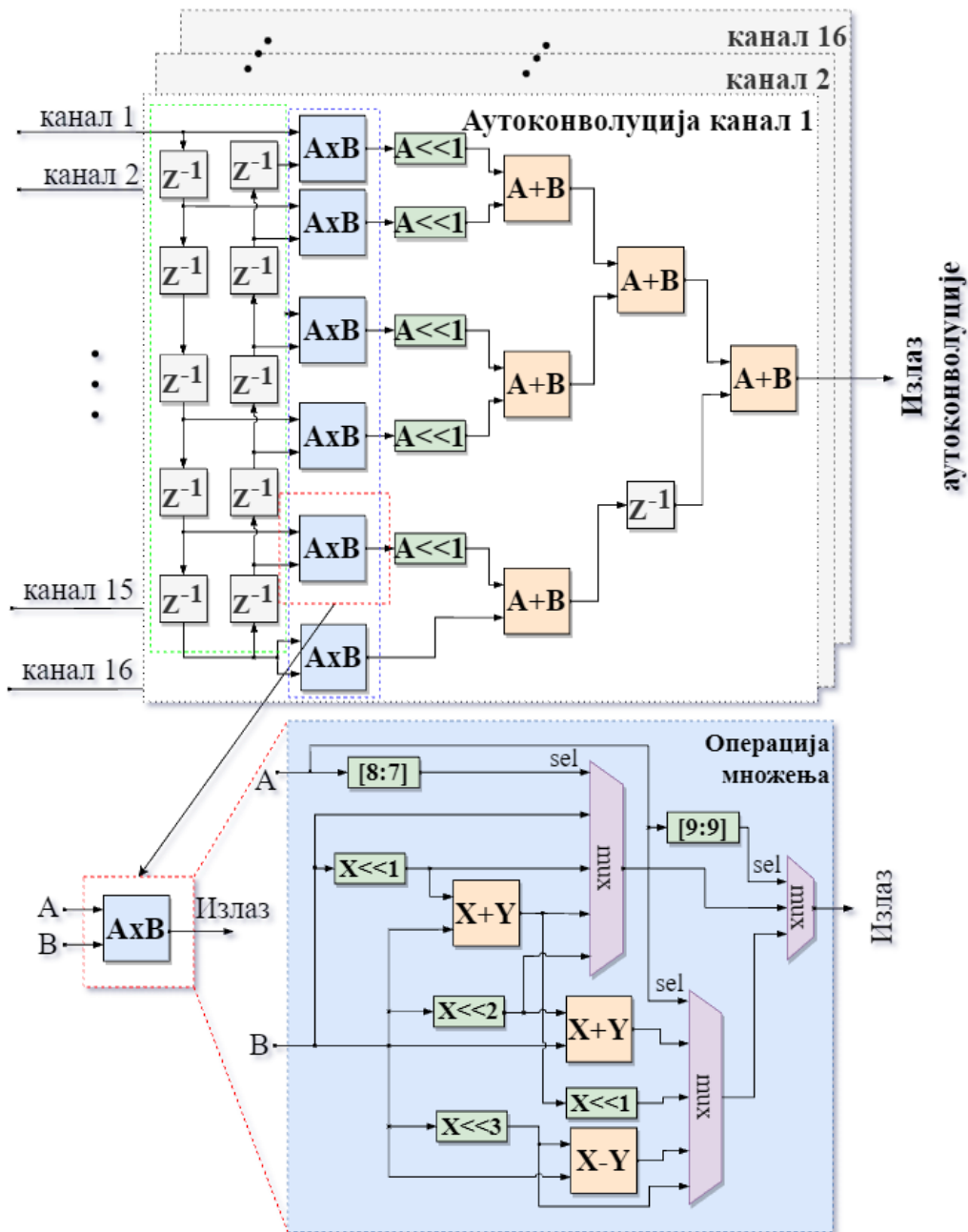
За имплементацију филтра аутоконволуције дужине  $N$ , где је  $N$  непаран број, потребно је  $(N-1)/2+1$  операција множења. Структура имплементације филтра за аутоконволуцију са дужином  $N = 11$  дата је на слици 58. Сивом бојом су означени регистри за кашњење сигнала. У општем случају за имплементацију филтра је потребно  $N-1$  регистара за кашњење. Плавом бојом су означени блокови у којима се ради множење вредности интензитета долазних пиксела. Када се узме у обзир да је број множача на FPGA врло лимитиран ресурс, операцију множења је могуће оптимизовати тако што се један од чиниоца квантизује на мањи број бита, при чему се узимају само виши бити одбирка – MSB (*Most Significant Bit*). Тако на пример, уколико се узимају три MSB бита једног од чиниоца, операција множења се може имплементирати са операцијама сабирања и померања бита у лево (што је еквивалентно множењу броја са степеном двојке). Наравно на тај начин се врши оптимизација броја употребљених множача на уштрб броја логичких елемената чипа (којих је далеко више доступно). На слици 58. плави блок са називом  $A \times B$  представља имплементацију операције множења када се користе 3 MSB бита. Додатно, како би се смањио број операција неопходних за имплементацију филтра аутоконволуције, због очекиване симетрије ласерске рефлексије, може се сматрати да је:

$$x[i] \cdot [x[i + n]]_{quant} \approx [x[i - n]]_{quant} \cdot x[i] \quad (7.1)$$

На основу претходне једначине (7.1), финални израз за рачунање аутоконволуције постаје:

$$A[i] = x[i][x[i]]_{quant} + 2 \sum_{n=1}^M x[i-n][x[i+n]]_{quant} \quad (7.2)$$

Изабрани аутоконволуциони филтар је имплементиран као независан модул у односу на остатак система, са јасно дефинисаним улазним и излазним параметрима (портовима) блока. То га чини једноставним за употребу у већ постојећим системима који раде обраду рефлектоване ласерске линије. Осим што је независан, његова функционалност се може по потреби укључити или искључити, што у многосте олакшава његово тестирање. На тај начин могуће је поредити резултате система када је овај модул укључен и када се ради обрада ласерске рефлексије без њега, што ће и бити приказано у наредном поглављу које се бави тестирањем имплементираниог филтра у реалним условима рада.



Слика 58. Имплементација једног аутоконволуционог блока на наменској FPGA платформи.

Аутоконволуциони филтар (као и остали блокови у FPGA задужени за обраду сигнала) је имплементиран користећи System Generator (*SysGen*) алат који долази заједно са осталим алатима из AMD (Xilinx) пакета. Овај алат се интегрише као додатни toolbox за Simulink у оквиру MATLAB-а. *SysGen* се показао као одличан алат за имплементацију DSP алгоритама на FPGA наменским платформама пре свега због једноставног повезивања симулације написане у MATLAB-у и модела који ће касније бити аутоматски преведен у модул који се може једноставно користити у остатку пројекта. Време симулације дизајна је значајно краће него када се користе неки од стандардних алата за симулацију FPGA дизајна. Такође, могуће је на врло једноставан начин припремити улазне сигнале користећи MATLAB и директно их користити у симулацији. Са друге стране резултате симулације је могуће одмах користити у оквиру MATLAB-а, јер се резултати смештају у његов радни простор (*workspace*). На тај начин се елиминише потреба да се улазни параметри симулације генеришу у једном програму, симулација ради у другом, а онда резултати симулације проверавају поново у MATLAB-у или неком трећем програму. *SysGen* је алат који користи графички начин програмирања FPGA дизајна. Унутар toolbox-а у оквиру Simulink-а, налазе се сви основни градивни елементи FPGA чипа, као и неке од основних DSP функција (као на пример FIR филтер, FIFO, Cordic и други алгоритми) које се могу једноставном конфигурацијом одмах користити. Нова верзија овог алата названа је *ModelComposer* и са собом је донела новине у виду готових модула за машинско учење, а при томе задржала у потпуности функционалности из претходних верзија System Generator алата.

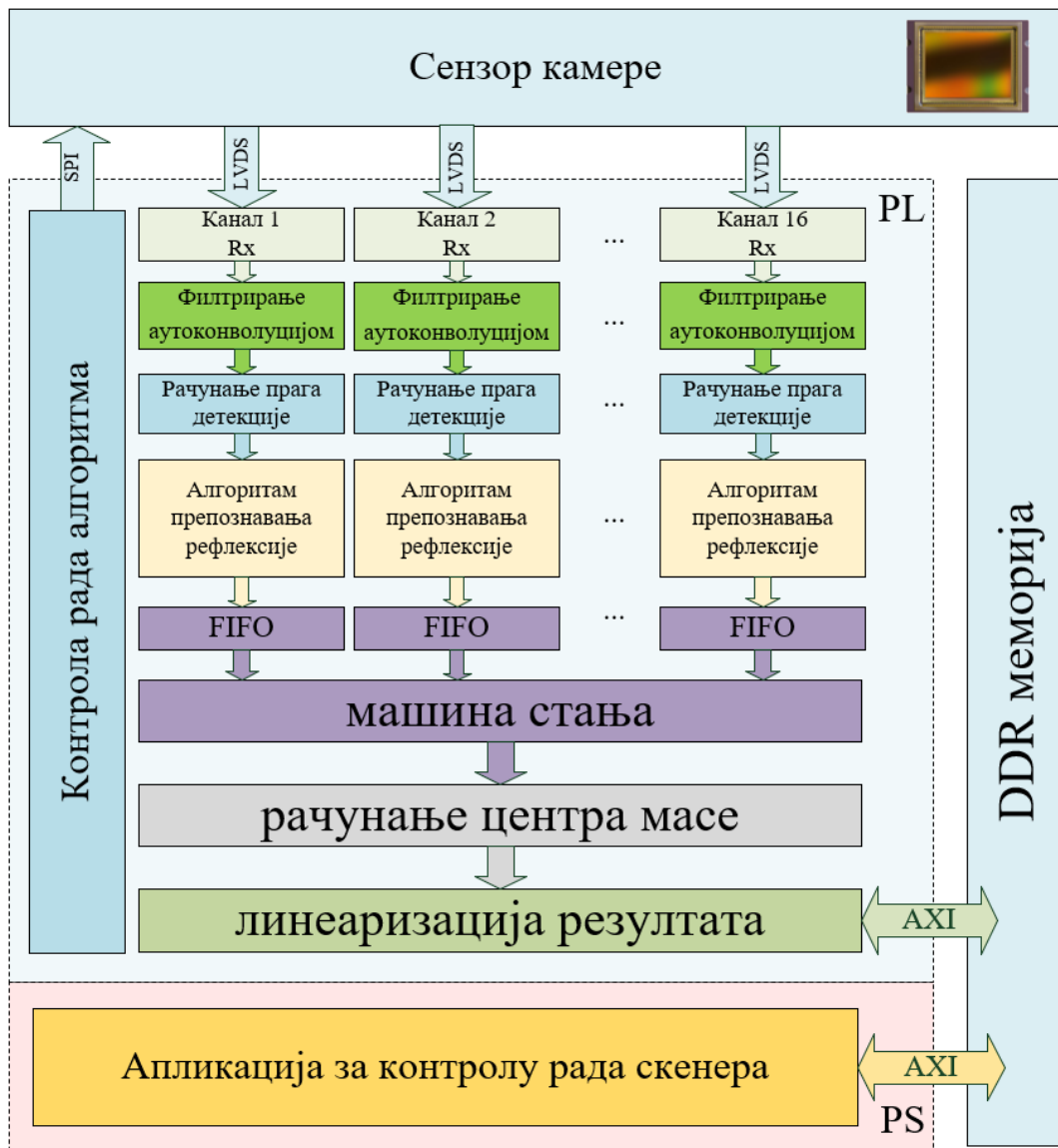
Наравно, брз развој не долази без одређених недостатака које инжењер мора да плати. Пре свега како би се овај алат користио тимски, неопходно је да систем буде изузетно добро испланиран и издељен на мање целине јер није могуће да се истовремено ради унутар једног модула. Као један од великих недостатака је верзионирање пројекта (употребом git-а или SVN-а), које је врло тешко јер је у питању графичко програмирање FPGA (практично говорећи, црта се логичка шема градивних елемената чипа). Због тога је тешко пратити историју пројекта, као и измене које су одрађене. И на крају, инжењер нема контролу над генерисаним кодом, јер је цео процес аутоматски одрађен. Сигурно је да ће транслација пројектованог модула из Simulink-а имати додатну логику, која можда није потребна уколико би се исти модул писао директно у VHDL или Verilog језику, тако да се употреба логичких ресурса повећава.

И поред свих набројаних недостатака, овај алат, пре свега због брзине развоја и одличне повезаности са MATLAB-ом, али и брзине симулације, представља добар избор.

### 7.3. Пут процесирања сигнала

Комплетан пут процесирања пиксела који долазе са камере је дат на слици 59. Преко 16 паралелних канала индустријска камера шаље податке о пикселима, као и контролне сигнале који дају информације о томе који су валидни пиксели, почетку и крају линије, почетку и крају слике, као и мноштво других статусних информација са камере (врло често на основу информација са контролних канала је могуће закључити када је могуће комуницирати са камером или када се може вршити промена времена експозиције камере). Након уласка електричног сигнала у FPGA чип, сваки од канала прима податке и врши базично процесирање добијених бита. Главни задатак блокова означених са “Канал 1..16 Rx” на слици 59. је транслација бита из серије у паралелу, односно ови блокови раде синхронизацију на нивоу речи (пиксела). Како је тренутак почетка рада, како камере, тако и периферија FPGA непознат, тренутак одабирања физички може бити у било ком делу примљене речи. Задатак ових блокова

је да утврде где је почетак речи (на основу предефинисаних синхронизационих речи које камера може да шаље), али и да постигну синхронизацију између канала.



Слика 59. Пут процесирања података од пријема слике са камере па до слања података у DDR меморију

Након успешног пријема пиксела са камере, први блок у ланцу процесирања је аутоконволуциони филтар који је описан у претходним поглављима а блок шема имплементације дата на слици 58. Након филтрирања сигнала, потребно је одредити који пиксели припадају ласерској линији, а који позадини. Како би се то одредило, користи се једноставан алгоритам где се посматра максимална вредност филтрираног сигнала за једну линију у комбинацији са фиксним прагом детекције. Наиме, пиксели који ће касније бити коришћени за даље прорачуне морају имати минималну вредност интензитета. За тестирање алгоритма овакав приступ је сасвим довољан, међутим за комплексно индустријско окружење у којем ће овај скенер радити, потребно је имплементирати неки од бољих добро познатих адаптивних метода одређивања прага детекције.

У следећим блоковима за процесирање ласерске рефлексије врши се обрада свих пиксела чија је вредност аутоконволуције већа од траженог прага. Блок под називом

“Алгоритам препознавања рефлексије” је неопходан како би се одредио почетак и крај сваке детектоване рефлексије, јер у зависности од облика посматраног објекта може се десити да у једној линији слике постоји више од једне рефлексије. Рефлексије се раздвајају једноставним посматрањем редних бројева (односно позиције) пиксела. Уколико је разлика између два редна броја пиксела већа од неког унапред, емпиријски одређеног прага, може се сматрати да је настала нова рефлексија, односно може се прогласити крај тренутне.

Након што је одређен почетак и крај рефлексије могуће је израчунати естимирану позицију користећи алгоритам центра масе. Како би се добио финални резултат детекције неопходно је да се одради калибрација података на основу калибрационих матрица скенера. Наравно ове матрице су одређене на основу процеса калибрације и у суштини овај процес представља рачунање полинома чији су коефицијенти унапред познати.

Сви резултати обраде слике са профилног скенера се смештају у DDR меморију одакле процесор може да им приступи и на основу њих преузме одговарајуће операције.

Оно што је занимљиво посматрати приликом сваке имплементације на FPGA наменској платформи је количина искоришћених ресурса и време извршавања алгоритма. У табели 10. дата је искоришћеност главних градивних блокова FPGA чипа за имплементацију аутоконволуционог филтра. Као што се може видети за његову имплементацију су коришћени искључиво логички елементи и регистри. То оставља довољно ресурса за неке комплексне операције или неке од функција акцелерације процесора за више апликационе слојеве којима је то потребно.

Табела 10. Искоришћеност главних блокова AMD UltraScale+ ZU4CG уређаја за имплементацију аутоконволуционог филтра дужине  $N = 11$

FPGA елемент	Доступно	Искоришћено	Искоришћеност [%]
LUT	87840	415	< 1
Registers	175680	1377	< 1
BRAM blocks	128	0	0
URAM blocks	48	0	0
DSP blocks	728	0	0

Други битан параметар је време извршавања алгоритма на наменској платформи. У табели 11. дато је време извршавања предложеног алгоритма. Осим предложеног алгоритма дато је време извршавања и других алгоритма на другим платформама како би се направило компаративно поређење колико је то могуће. Оно што је битно напоменути је да је предложени алгоритам предфилтрирања аутоконволуцијом имплементиран као *pipeline*, тако да приказано време у табели представља заправо време кашњења кроз систем.

На основу резултата из табеле може се закључити да је време обраде слике највеће на платформама које користе процесоре опште намене, као и да је број обрађених пиксела за то време далеко мањи него када се користе неке наменске платформе које су специјализоване за дигиталну обраду сигнала. SACM алгоритам који је описан у претходним поглављима је комплексан за имплементацију на наменским платформама па је одабир процесора опште намене добар избор. Алгоритам у којем се користе CNN за детекцију ласерске линије заједно са алгоритмом центра масе за њену естимацију захтева велико време извршавања, због великог броја операција. Алгоритам је имплементиран на GPU, користећи CUDA (*Compute Unified Device Architecture*) језгра на Nvidia GTX 2080Ti графичкој картици. Чак и са тако моћним хардвером време извршавања је 82 ms, односно нешто мало више од 12 слика по секунди.

Имплементација алгоритма центра масе на наменској платформи без додатног претпроцесирања узима 0.4 ms. Наравно треба узети у обзир да у раду није наведено колика је радна фреквенција дела FPGA чипа који се бави обрадом сигнала. Предложени алгоритам у овом раду узима 0.344 ms и у табели 11 означен је са (\*).

Табела 11. *Време процесирања слика на различитим платформама (са \* је означено време процесирања предложеног алгоритма у овом раду)*

Хардверска конфигурација	Резолуција слике	Алгоритам	Време процесирања [ms]	Платформа
Intel i5-4590 CPU [126]	180 × 400	SACM	1.540	Linux (Qt 5)
AMD (Xilinx) Spartan 6, Virtex6, Virtex7 [73]	128 × 2048	Центар масе	0.400	FPGA (VHDL)
Nvidia GTX 2080Ti [130]	1920 × 1080	МЛ + центар масе	82	Nvidia CUDA (C++)
AMD Zynq UltraScale+ (ZU4CG) *	2048 × 2048	Аутоконволуција + центар масе	0.344	FPGA (VHDL)



## 8. Тестирање алгоритма у реалним условима рада

Интензитет и ширина детектоване ласерске линије су кључни фактори за одређивање њене тачне позиције на слици. Ови параметри су контролисани временом експозиције камере, снагом изречене ласерске светлости, али зависе и од рефлексивних карактеристика површине која се скенира. Из практичног искуства, за најбоље резултате мерења интензитет рефлексивности би требало да се налази негде на половини динамичког опсега са минималном ширином рефлексивности, јер на тај начин се избегава засићење, а енергија ласера је распоређена на свега неколико кључних пиксела слике. Наравно, у пракси овакви услови врло често не важе и тешко их је постићи, па је у зависности од позиције објекта и његових карактеристика, тешко подесити време експозиције камере, јер за један део слике оно може бити премало, док је за други део слике доводи до засићења. Уколико мерно окружење то дозвољава, могуће је користити HDR функционалности камере или наизменичном променом великог и малог времена експозиције надокнадити недостатке једне слике.

У овом раду је посебна пажња посвећена рефлексивности чији су врхови у засићењу, па је као тест објекат коришћен алуминијумски профил високог степена рефлексивности. Мерно тест окружење коришћено за потврду алгоритма је приказано на слици 60. и састоји се од:

(1) тест објекта чија се површина скенира, (изглед посматраног мерног објекта дат је на сликама 61. и 62)

(2) ласерског извора, односно ласерске линије

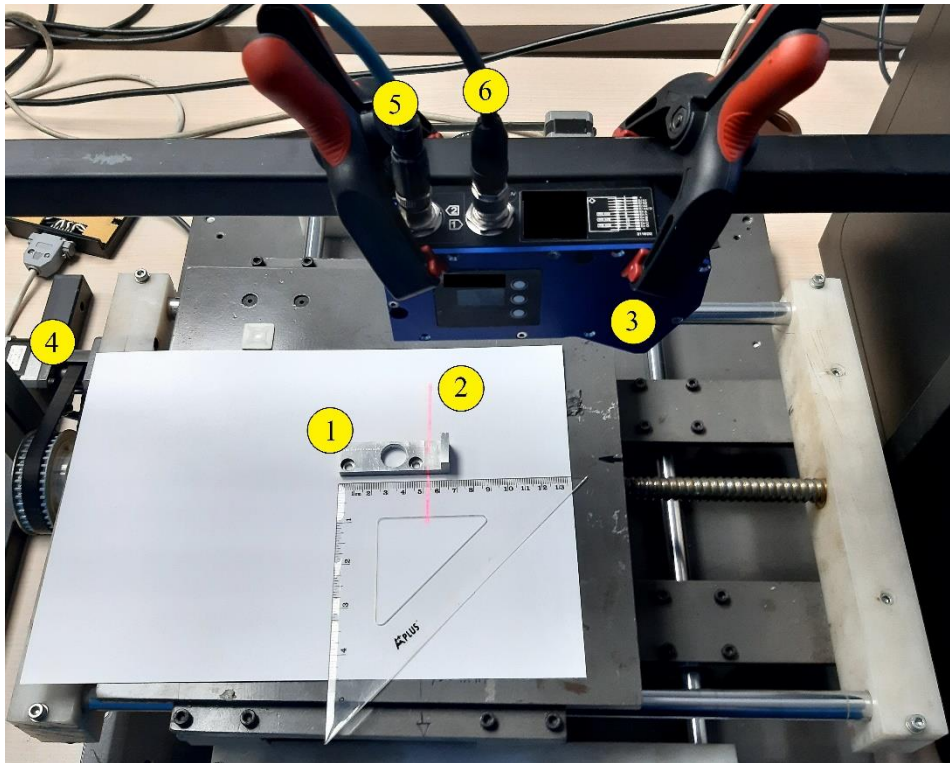
(3) индустријске камере

(4) платформе на којој се налази мерни објекат и чију је позицију могуће фино подешавати

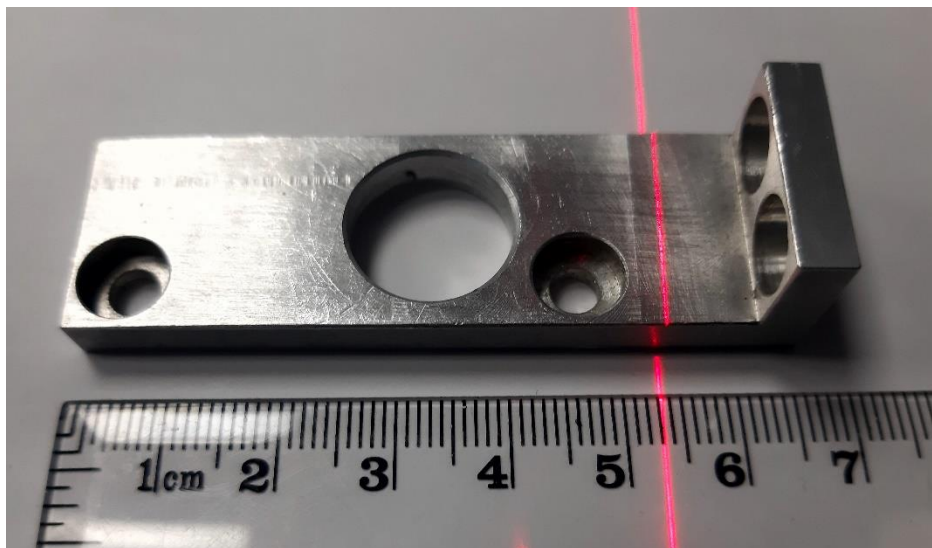
(5) конектор преко којег је скенер повезан на извор напајања, али и преко којег му стижу контролни сигнали, као што су окидач за синхронизацију окидања камере и моменат укључења ласера. Такође, преко истог конектора са покретне платформе стижу подаци о њеној тачној позицији која се прати преко енкодера.

(6) Gigabit Ethernet линк, као директна конекција између РС рачунара и профилног скенера.

Покретна платформа са слике 60. се састоји од два корачна (степер) мотора чији је рад контролисан преко РС рачунара и могуће је фино контролисати хоризонтални померај у две осе. Ласер профилног скенера је постављен нормално у односу на смер кретања платформе.



Слика 60. Тест окружење на којем су приказани (1) тест објекат, (2) ласерска линија, (3) индустријска камера која се налази унутар профилног скенера, (4) покретна платформа, (5) и (6) каблови за напајање, комуникацију и синхронизацију



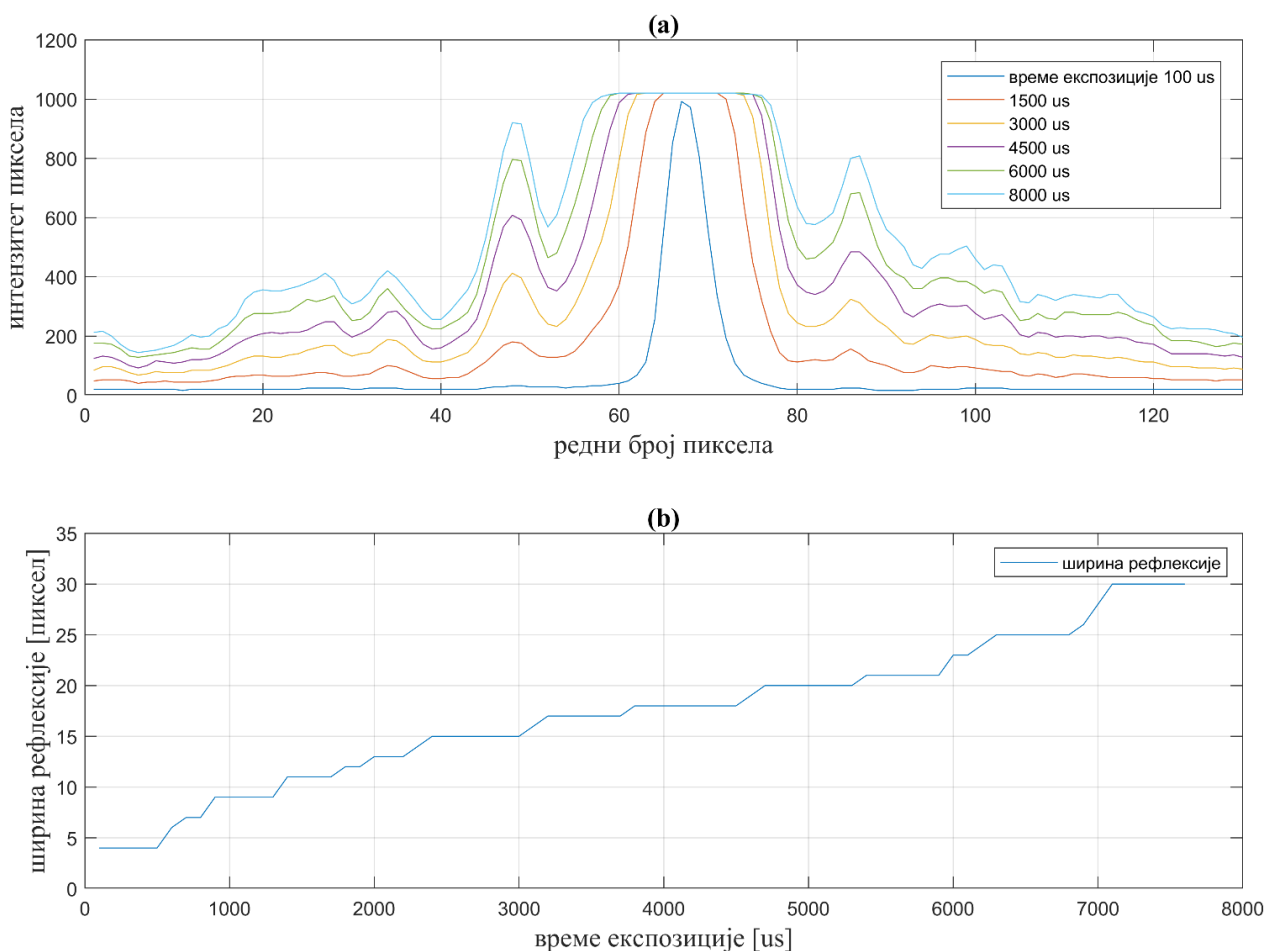
Слика 61. Тест објекат за мерење

Имплементирани аутоковолуциони филтар је додат на већ постојећи систем у којем се ради обрада података са камере употребом алгоритма центра масе. Као што је у претходном поглављу речено филтар се по потреби може укључити или искључити како би се упоредили резултати естимације у оба случаја. Идеја тестирања алгоритма је била да се прво прикупе подаци за случај када је филтар искључен и да се види како се понашају ласерска рефлексија и њена ширина када расте време експозиције камере. Битно напоменути је да је за време тестирања алгоритма снага извора ласерске светлости константа и да је једино контролисано време за које је ласер укључен. Ово време је синхроно са временом експозиције камере и има

једнако трајање, јер свака друга вредност нема претераног смисла – ако је време експозиције дуге тада се допушта већој количини амбијенталног светла да допре до пиксела камере, а када је време за које је ласер укључен веће онда се непотребно троши снага ласера.



Слика 62. Тест објекат за мерење

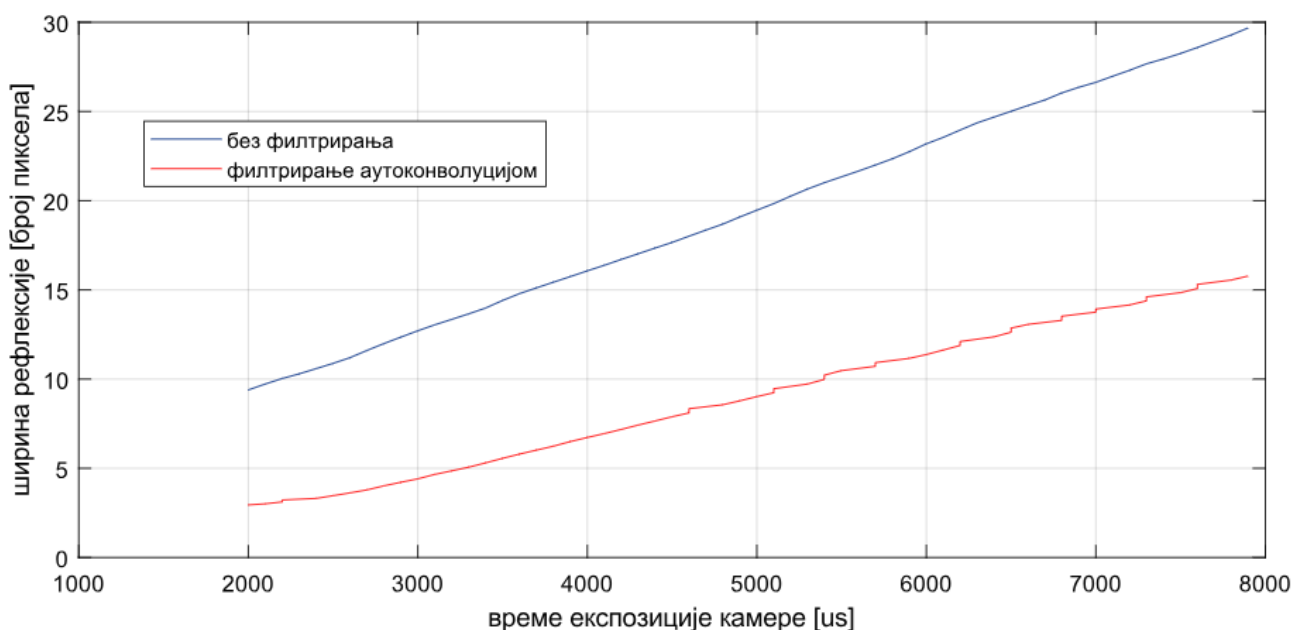


Слика 63. (а) облик рефлектоване ласерске линије у зависности од времена експозиције, (б) ширина ласерске рефлексије дата у броју пиксела у односу на време експозиције

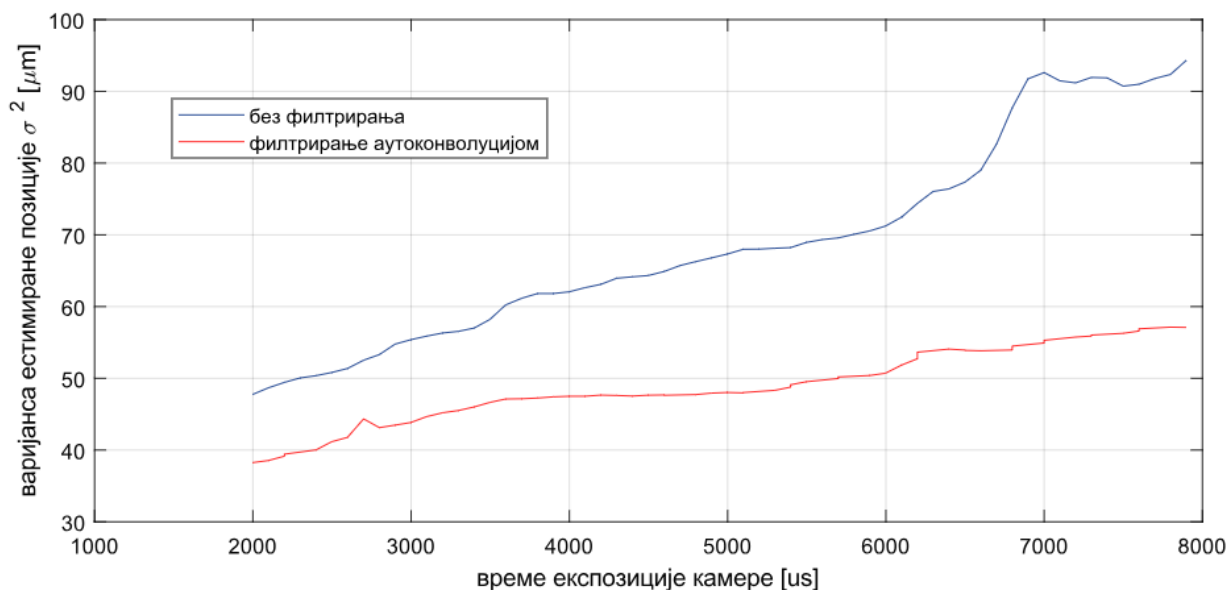
На слици 63а. (слика горе) дат је приказ промене облика исте линије слике за различито време експозиције камере. За свако време експозиције камере направљено је 1000 профила, а резултати су усредњени, како би се елиминисао случајни шум. За мало време експозиције од 100 $\mu$ s, профил ласерске линије задржава приближни Гаусов профил, са јасно дефинисаним

врхом рефлексије од свега неколико пиксела. Са повећањем времена експозиције долази до нагле деградације облика рефлексије, губитка Гаусовог профила и њеног наглог ширења и сатурације пиксела. Са великим временом експозиције камере, долази до потпуног губитка облика, ширине и појаве нових нежељених пикова рефлексије у околини главне рефлексије, које настају као последица дифракције ласерске светлости. На слици 63б. (слика доле) дата је промена ширине детектоване рефлексије у зависности од промене времена експозиције камере. Очекивано, за мало време експозиције, ширина детектоване рефлексије је свега неколико пиксела (испод 5), док је за велико време експозиције, информација о рефлектованој ласерској линији расута на преко 25 пиксела.

Након што су утврђени параметри ласерске линије када је филтрирање аутоконволуционим филтром искључено, може се започети главна фаза тестирања предфилтрирања сигнала ласерске рефлексије. На слици 64. дато је поређење ширина детектованих ласерских рефлексија за ова два посматрана случаја. Као и у претходном случају за свако време експозиције камере сачувано је 1000 профила и резултати детекције су усредњени. Са графика се лако може утврдити да је детектована ширина ласерске рефлексије приближно дупло мања када се користи аутоконволуциони филтар. На слици 65. дата је варијанса естимације позиције ласерске рефлексије у зависности од времена експозиције камере за ова два посматрана случаја. Одмах је јасно да је варијанса детектоване позиције ласерске рефлексије са више од величине пиксела мања када се користи аутоконволуциони филтар за мало време експозиције. Како време експозиције расте, тако расте и разлика у варијанси када се користи филтрирање у односу на случај када је филтар искључен.



Слика 64. *Ширина детектоване ласерске линије у зависности од промене времена експозиције камере.*

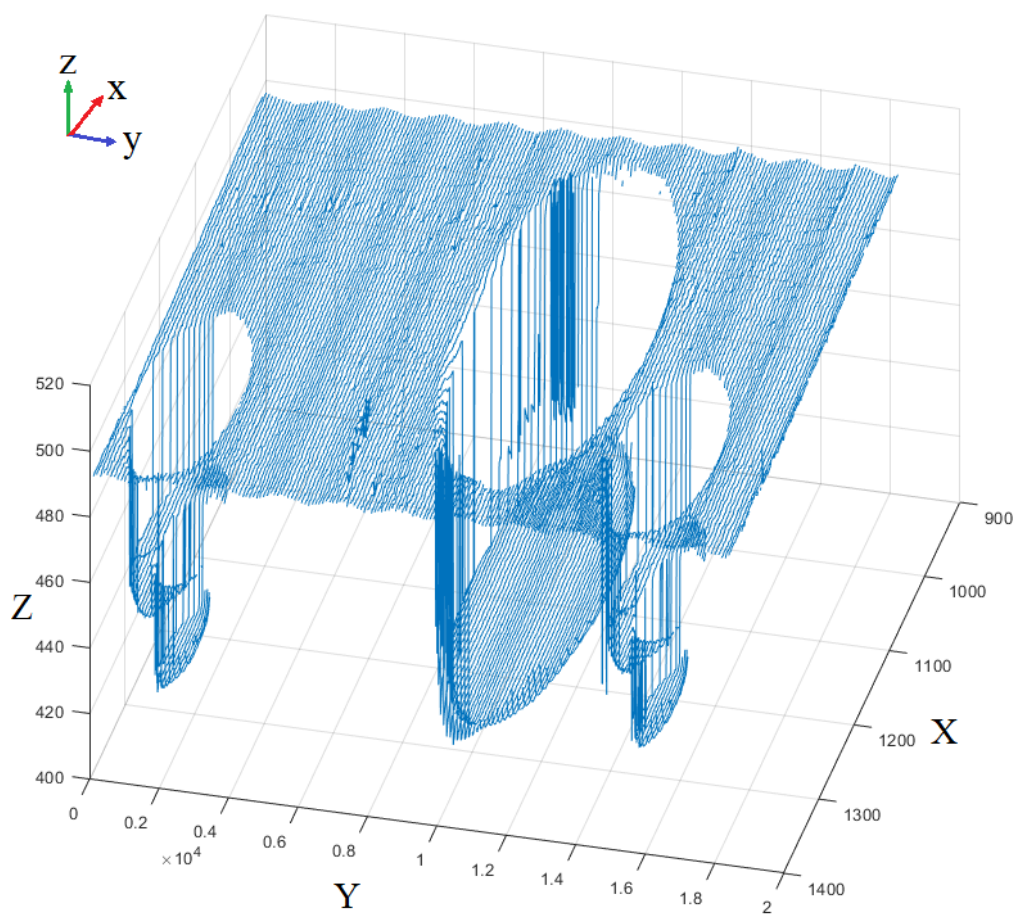


Слика 65. Варијанса естимиране позиције ласерске линије у зависности од промене времена експозиције камере.

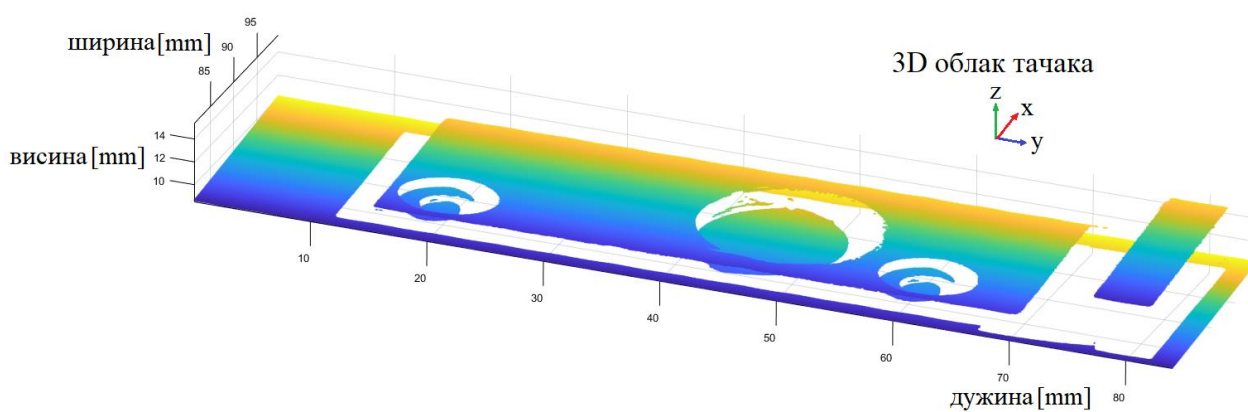
На сликама 66, као и 67., 68., 69. и 70. дат је 3D приказ реконструисаног облака тачака посматраног мерног објекта када се користи аутоконволуциони филтар. Међутим за компаративну анализу података неопходно је унапред знати тачне димензије мерног објекта, односно потребно је да он буде калибрисан, што свакако у овом случају није задовољено. Такође битно је напоменути да за коришћени скенер нису коришћене одговарајуће калибрационе матрице, већ неког другог скенера које су у том тренутку биле доступне. Међутим то никако не утиче на резултат мерења и тестирања алгоритма, јер су у оба случаја коришћени исти подаци. Као што се са слике 60. може видети, профилни скенер је причвршћен чврстом везом за рам покретног стола, тако да је његова позиција фиксна у односу на покретну платформу. Након подешавања параметра покретног стола, започиње се мерење профила скенираног објекта. На сваку промену вредности енкодера који се налази на покретној платформи и прати померај њених оса, врши се окидање снимања профила. На тај начин добија се трећа димензија реконструкције. На слици 66. дати су необрађени подаци приказани у MATLAB-у. Занимљиво је уочити да је могуће детектовати неисправност једног од механичких делова покретног стола услед дугог времена експлоатације у виду таласне промене  $z$  осе.

Филтрирање и смањење фреквенције одабирања података је честа појава када се ради реконструкција 3D облака тачака. Увек постоје тачке са високим степеном шума у реконструкцији површине објекта, а које настају услед разних спољашњих фактора, као што су амбијентално осветљење, разне врсте механичких осцилација или једноставно погрешне калкулације линеаризације услед испадања појединих тачака изван зоне калибрације скенера. Такве тачке је неопходно отклонити једноставним филтерима ограничења вредности. Уколико је позиција тачке изван задатих вредности, једноставно ће бити избачена из облака тачака. У неким случајевима могуће је користити разне врсте интерполационих филтара који мењају израчунату вредност тачке са интерполираном. [148]. За приказ слика 67., 68., 69. и 70. коришћен је MATLAB објекат `pointCloud` над којим се могу користити функције `pcdenoise()` и `pcshow()` којима се елиминише шум 3D тачака и исцртава филтрирани облак тачака.

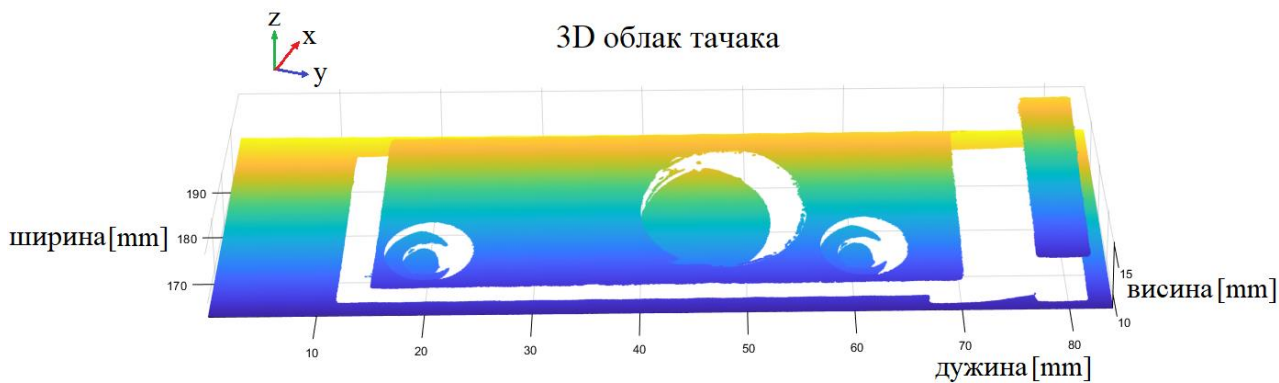




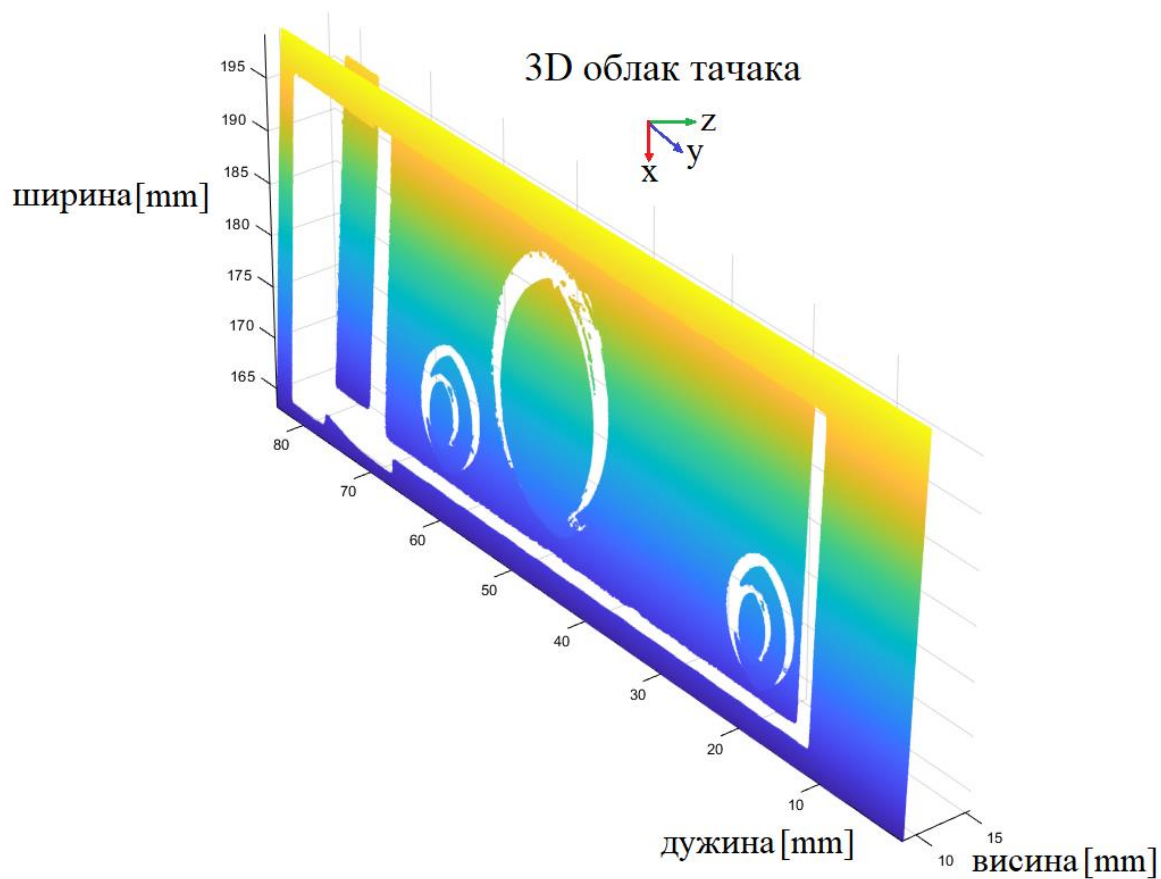
Слика бб. Сирови подаци са скенера, пре калибрације података



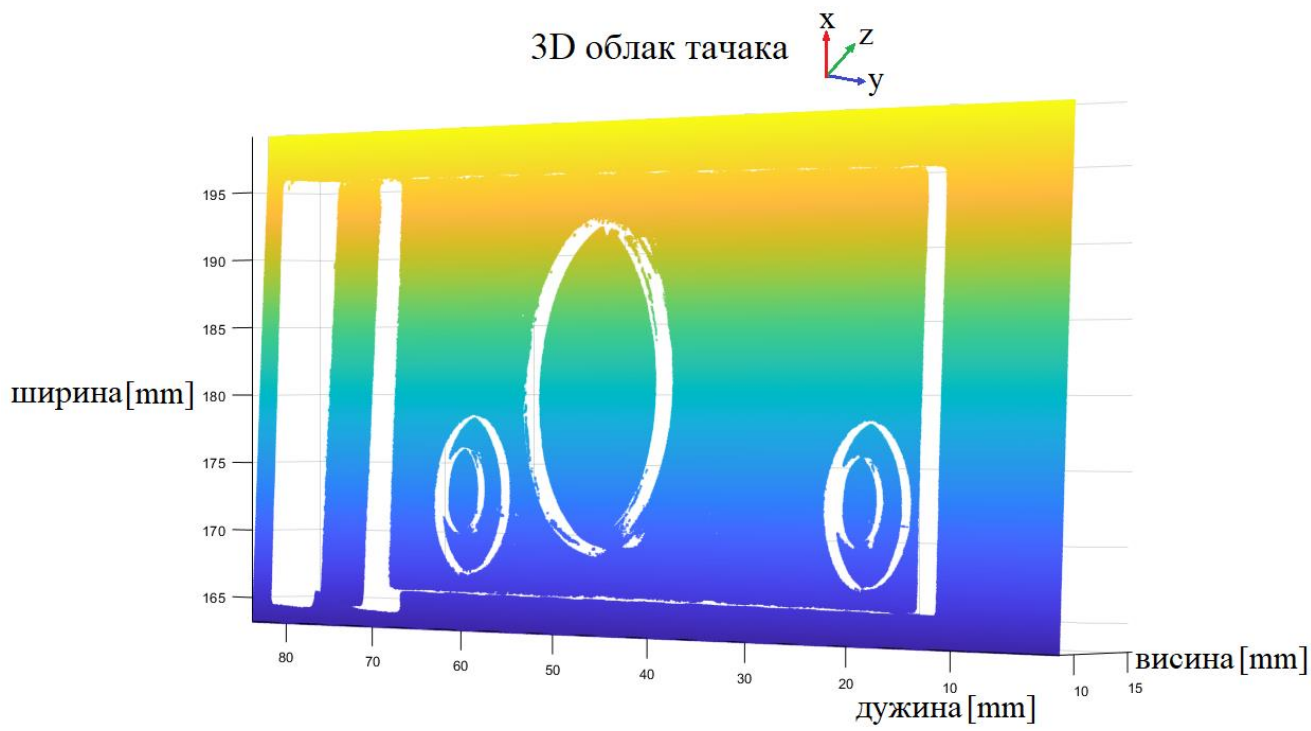
Слика 67. Реконструисан 3D облак тачака тест објекта, поглед 1, након калибрације података



Слика 68. Реконструисан 3D облак тачака тест објекта, поглед 2, након калибрације података



Слика 69. Реконструисан 3D облак тачака тест објекта, поглед 3, након калибрације података



Слика 70. Реконструисан 3D облак тачака тест објекта, поглед 4, након калибрације података



## 9. Закључак

Ласерски профилни скенери су постали нераздвојни део индустрије 4.0 и извесно је да ће њихова употреба само расти, а област њихове примене бити све већа. На једном од састанака колега ми је рекао: *“Не би веровао где су све колеге из продаје виделе прилику за интеграцију наших сензора”*. Мислим да ова реченица довољно говори колика је прилика за примену профилних скенера. Наравно, свака од нових апликација вероватно ће захтевати неку од модификација постојећег софтвера, имплементацију неког новог филтра или алгоритма за обраду сигнала, нова подешавања за камеру или једноставно неки нови алгоритам који ће побољшати детекцију ласерске рефлексије у неким специфичним условима рада.

Занимљиво је истаћи да је животни век наменског софтвера у индустрији веома дугачак, јер линије кода које сам написао као тек свршен инжењер, још увек негде детектују одступања аутомобилских делова на покретној траци, проверавају квалитет варова или раде навигацију роботске руке, и врло је извесно да ће то радити још дуги низ година. У међувремену у позадини се ради на развоју нових профилних скенера са новим камерама запањујућих брзина и резолуција, новим ласерима који су далеко стабилнији током времена експлоатације, као и новим наменским платформама на којима осим FPGA и CPU почиње да се појављује нов чип – AI акцелератор. Са њим долази и нова генерација уређаја – паметни профилни скенери.

Са огромном количином података које савремене камере производе и потребом да све то буде обрађено у реалном времену, комплексни алгоритми једноставно немају места. Због тога је неопходно радити на развоју једноставних, а опет довољно моћних алгоритама за обраду сигнала. Кроз рад је дат преглед свих доступних идеја за обраду ласерске рефлексије на профилним скенерима - од једнодимензионалних алгоритама, дводимензионалних, њихове комбинације, па све до употребе машинског учења у решавању проблема естимације позиције ласерске рефлексије. Кроз све њих се провлачи заједничка идеја да је употреба алгоритма центра масе још увек најбоља за естимацију позиције са резолуцијом бољом од величине пиксела камере. Применом алгоритма центра масе, могуће је избећи интерполацију сигнала што је алтернатива у ситуацији када се жели постићи резолуција боља од величине пиксела. Сама интерполација, међутим, захтева додатне рачунске операције и додатне ресурсе за чување података, па самим тим представља неповољније решење када се ради о алгоритму који треба да ради у реалном времену. Међутим, са сатурацијом пиксела, која настаје услед мноштва разлога, перформансе алгоритма центра масе драстично опадају и резолуција пада. Кроз истраживање је анализирано да ли је употребом неке од метода предфилтрирања сигнала

могуће овај проблем решити или барем смањити његов утицај на општи рад профилног скенера.

Употреба аутоконволуције као самоподешавајућег филтра у комбинацији са алгоритмом центра масе показала се као добар кандидат за решавање проблема када су пиксели ласерске рефлексије засићени. Идеја за њену употребу дошла је након читања научног рада у којем су аутори користили ову методу за детекцију количине симетрије на некој слици. Очекивани профил ласерске рефлексије би требао да буде симетричан, па је паралела некако била очигледна. Резултати симулације показали су да употреба аутоконволуције може смањити грешку естимације и до величине неколико пиксела када је врх Гаусове криве сатурисан у поређењу са случајем када се користи прилагођени Гаусов филтар или када нема предфилтрирања сигнала. За поређење је изабран Гаусов филтар јер из приказане анализе сигнала следи да је Гаусов филтар, филтар прилагођен сигналу. Како се у ситуацијама различитих нивоа засићења ласерске рефлексије, заправо мења ширина профила линије, јасно је да непроменљив Гаусов филтар више није прилагођен сигналу, док аутоконволуција прати промену.

За поуздане резултате симулације било је неопходно детаљно познавање свих делова система – од извора ласерске светлости, особина површина које се скенирају и процеса формирања слике. На основу тих сазнања могуће је генерисати одговарајуће реалне улазне податке, који укључују одступања од идеално очекиваног Гаусовог профила рефлексије, сатурацију, асиметрију, шум и додатне рефлексије. То је била основа за развој новог алгоритма који ће унапредити естимацију ласерске рефлексије у важном практичном случају када су пиксели слике сатурисани. Кроз симулацију су посматрани различити параметри алгоритма и пронађено је оптимално решење за његову имплементацију на наменским платформама.

У коначној реализацији, део прорачуна имплементиран је у аритметици фиксне тачке, са редукованим бројем бита. На тај начин, постигла се изузетна ефикасност у погледу брзине и употребе ресурса система. Понашање предложеног решења у условима рада са редукованим бројем бита верификовано је *Monte Carlo* симулацијом, кроз посебно развијен симулациони блок инкорпориран у целокупну симулацију.

Остварени научни доприноси у оквиру ове докторске дисертације су:

- Нов алгоритам за обраду и естимацију позиције ласерске рефлексије на профилним скенерима у условима засићења, односно проширење граница где други алгоритми дају лоше резултате или престају са радом у потпуности,
- Примена аутоконволуције као предфилтра, што резултује смањеном грешком естимације у поређењу с другим решењима,
- Детаљан симулациони модел који обухвата велики број реалних случајева и даје основу за развој нових алгоритама или поређење перформанси постојећих и будућих алгоритама,
- Мултидисциплинарни приступ, односно могућност да се резултати тезе искористе и у другим сличним применама, као што је и идеја да се у овој тези искористи аутоконволуција преузета из друге, донекле различите, области.

Предложена комбинација алгоритама је једноставна и погодна за имплементацију на наменским FPGA платформама на којима већ постоји имплементирано процесирање позиције рефлексије јер се алгоритам претпроцесирања може додати на остатак система као независан модул са јасно дефинисаним улазним и излазним параметрима (портовима). То је допринело и једноставнијем тестирању алгоритма јер се његова функција може по потреби укључити или

искључити, односно упоредити понашање система у оба случаја. Резултати су потврђени кроз тестирање алгоритма у реалним условима рада када је мерни објекат са високим степеном коефицијента рефлексије. Иако је верификација алгоритма извршена на једној конкретnoj платформи, коришћени принципи при развоју алгоритма су опште применљиви, што је приказано и кроз симулацију, која се не ослања ни на једну конкретну платформу, али укључује ефекте прорачуна са коначном дужином кодне речи типичне за имплементације у реалном времену независно од конкретно изабране платформе.

На крају рада дате су 3D реконструкције тест објекта урађене у MATLAB-у, како би се и визуелно потврдило да алгоритам даје резултате и у случају када је рефлексија сатурисана.

Као што је већ истакнуто, и јасно из прегледа литературе датог у тези, профилни скенери и одговарајући алгоритми за естимацију позиције рефлексије ласерске линије су тема од интереса како у научним истраживањима, тако и у практичним, инжењерским решењима. Резултати добијени у оквиру ове тезе, указују на то да је могуће комбиновати различите алгоритме, чиме се може добити боља реконструкција профила скенираног објекта. Може се рећи да је комбинација различитих алгоритама, уз модуларну структуру комплетног решења, добар правац за даља истраживања. У овој тези, слика добијена са индустријске камере се посматрала искључиво као једнодимензиони сигнал, па би први следећи корак могао бити употреба неког од алгоритама који у обзир узимају и суседне линије слике. Сигурно је да у том случају комплексност имплементације расте, као и количина неопходних ресурса, али свакако се на тај начин адресирају неки од класичних проблема профилних скенера, као што су оријентација (нагиб) ласерске линије, шум ласерске мрље или сатурација. Вероватно је да би због добрих перформанси показаних у једнодимензионалној имплементацији, алгоритам центра масе био и први кандидат за дводимензионалну имплементацију у комбинацији са другим алгоритмима за претпроцесирање сигнала.

Осим нових начина за обраду сигнала слике са сензора профилних скенера, већ сада могуће је пронаћи нове алате и приступе за њихову симулацију и имплементацију на FPGA наменским платформама. Па тако, када је у питању AMD Xilinx, очигледна је жеља да се овакви наменски системи приближе инжењерима којима FPGA дизајн није примарна област рада. Са представљањем Vivado HLS (*High Level Synthesis*) идеја је да се употребом C/C++ кода поједностави и убрза процес дизајнирања нових решења. Међутим остаје широко отворено питање ефикасности оваквих алата да на оптималан начин преведу више програмске језике на RTL (*Register-Transfer Level*) ниво.

## Литература

- [1] A. Waziry, "Different and Dissonant Values in Measuring Dimensions in Ancient Egypt "A Comparative Study with Contemporary Measurements", " *Annals of Archaeology*, vol. 3, no. 1, pp. 12-29, 2020.
- [2] G. Taubin, D. Moreno and D. Lanman, *3D Scanning for Personal 3D Printing: Build Your Own Desktop 3D Scanner*, Siggraph, 2014.
- [3] S. Martínez, E. Cuesta, J. Barreiro and B. Álvarez, "Analysis of laser scanning and strategies for dimensional and geometrical control," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 46, p. 621–629, 2010.
- [4] E. Mostafa Abdel-Bary, "3D Laser Scanners: History, Applications and Future," Civil Engineering Department Faculty of Engineering Assiut University, October 2011.
- [5] E. Mostafa Abdel-Bary, "3D Laser Scanners' Techniques Overview," *International Journal of Science and Research (IJSR)*, vol. 4, no. 10, pp. 323-331, October 2015.
- [6] W. Strothmann, *Multi-wavelength laser line profile sensing for agricultural applications*, Institute for Computer Science Knowledge-Based Systems, 2016.
- [7] "LIGO Caltech," LIGO Caltech, [Online]. Available: <https://www.ligo.caltech.edu/page/facts>. [Accessed 24 12 2020].
- [8] X. Lü, D. Gu, Y. Wang, Y. Qu, C. Qin and F. Huang, "Feature Extraction of Welding Seam Image Based on Laser Vision," *IEEE Sensors Journal*, vol. 18, no. 11, pp. 4715 - 4724, 2018.
- [9] C. Alippi, E. Casagrande, F. Scotti and V. Piuri, "Composite real-time image processing for railways track profile measurement," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 49, no. 3, pp. 559 - 564, 2000.
- [10] M. Edl, M. Mizerák and J. Trojan, "3D Laser scanners: History and applications," *Acta Simulatio - International Scientific Journal about Simulation*, vol. 4, no. 4, pp. 1-5, 2018.

- [11] T. Lerch, M. Mac Gillivray and T. Domina, "3D Laser Scanning: A Model of Multidisciplinary Research," *Journal of Textile and Apparel, Technology and Management*, vol. 5, no. 3, 2007.
- [12] F. Blais and J. Beraldin, "Recent developments in 3D multi-modal laser imaging applied to cultural heritage," *Machine Vision and Applications*, vol. 17, p. 395–409, 2006.
- [13] J. Mohd, H. Abid, P. S. Ravi and S. Rajiv, "Industrial perspectives of 3D scanning: Features, roles and it's analytical applications," *Sensors International*, vol. 2, no. ISSN 2666-3511,, 2021.
- [14] "Laser scans for the reconstruction of Notre Dame," [Online]. Available: <https://world-of-photonics.com/en/newsroom/photonics-industry-portal/technologies/reconstruction-of-notre-dame/>.
- [15] A. Javier, "Laser and Gaussian Beam Propagation and Transformation," *Encyclopedia of Optical Engineering*, pp. 999-1023, 2003.
- [16] J. Suganda, M. Guoguang, Z. Hongchen and S. Feijun, "Application of laser diode to optical signal processing," in *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2005.
- [17] O. Ulrich, K. Christian, R. Mats and S. Michael, "Laser Sources for Metrology and Machine Vision: Laser diode based laser sources for high precision measurement and inspection Systems," Schäfter+Kirchhoff GmbH, 22525 Hamburg, Germany, 2021.
- [18] A. Krischke, P. Gips, C. Knothe and U. Oechsner, "Laser Line Generators for Light-sectioning in Rail Inspection, 3D-Measurement and process control for research and industrial environments," *Physic Journal*, no. 1, pp. 41-44, 2013.
- [19] W. Latimer, "Vision Systems Design," Coherent, 5 June 2015. [Online]. Available: <https://www.vision-systems.com/cameras-accessories/article/16738248/understanding-laserbased-3d-triangulation-methods>. [Accessed 25 Decembar 2021].
- [20] Z. Yuanyuan, Z. Mingyang, Z. Lei and J. Chunying, "Development of Laser Stripe Sensor for Automatic Seam Tracking in Robotic Tailored Blank Welding," in *7th World Congress on Intelligent Control and Automation*, Chongqing, China, 2008.
- [21] D. Blanco, P. Fernández, E. Cuesta and C. M. Suárez, "Influence of Ambient Light on the Quality of Laser Digitized Surfaces," in *World Congress on Engineering*, London, U.K., 2008.
- [22] "Wavelengths Of Diode Based Lasers," Schäfter + Kirchhoff, [Online]. Available: [https://www.sukhamburg.com/support/technotes/laserm\\_modules/linebasics/wavelength.html](https://www.sukhamburg.com/support/technotes/laserm_modules/linebasics/wavelength.html). [Accessed 28 12 2021].
- [23] H. Gailing, Z. Xiang, Z. Guanliang, Z. Chunwei, L. Dong and W. Gangfeng, "Multiple Laser Stripe Scanning Profilometry Based on Microelectromechanical Systems Scanning Mirror Projection," *Micromachines*, vol. 10, no. 1, p. 57, 2019.

- [24] J. Du, W. Xiong, W. Chen, J. Cheng, Y. Wang, Y. Gu and S. Ching Chia, "Robust laser stripe extraction using ridge segmentation and region ranking for 3D reconstruction of reflective and uneven surface," in *IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, Quebec City, QC, Canada, 2015.
- [25] S. Richard, *Computer Vision: Algorithms and Applications*, 2nd Edition, Springer, 2022.
- [26] S. Xiaoquan, S. Yazhou, L. Haitao, B. Linqi and L. Chonghao, "Research on laser stripe characteristics and center extraction algorithm for desktop laser scanner," *SN Applied Sciences*, vol. 3, no. 3, 2021.
- [27] N. Vukašinović, M. Korošec and J. Duhovnik, "The Influence of Surface Topology on the Accuracy of Laser Triangulation Scanning Results," *Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering*, vol. 56, no. 1, pp. 23-30, 2010.
- [28] G. G. Butler and J. James, "Long-term calibration monitoring of Spectralon diffusers BRDF in the air-ultraviolet," *Applied Optics*, vol. 46, no. 32, pp. 7892-7899, 2007.
- [29] J. Molleda, R. Usamentiaga, D. F. Garcia, F. G. Bulnes, A. Espina, B. Dieye and L. N. Smith, "An improved 3D imaging system for dimensional quality inspection of rolled products in the metal industry," *Computers in Industry*, vol. 64, no. 9, pp. 1186-1200, 2013.
- [30] C. Piotr and M. Wojciech, "Application Of A Laser 2D Triangulation Method For Reconstruction Of Surface Geometry," Institute for Sustainable Technologies – National Research Institute, Radom, 2013.
- [31] M. Breier, P. Breier, L. Wei, B. Marcel, A. Richard, T. Pretz and D. Merhof, "Accurate laser triangulation using a perpendicular camera setup to assess the height profile of PCBs," in *IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT 2015)*, Seville, Spain, 2015.
- [32] Z. Yang, P. Wang, X. Li and C. Sun, "3D laser scanner system using high dynamic range imaging," *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 54, pp. 31-41, 2014.
- [33] Z. Yanbiao, Y. Wang, Z. Weilin and C. Xiangzhi, "Real-time seam tracking control system based on line laser visions," *Optics and Laser Technology*, vol. 103, pp. 182-192, 2018.
- [34] E. S. 1288, *Standard for Characterization of Image Sensors and Cameras*, European Machine Vision Association, November 29, 2010.
- [35] S. Emam, S. Khatibi and K. Khalili, "Improving the accuracy of laser scanning for 3D model reconstruction using dithering technique," in *The 7th International Conference Interdisciplinary in Engineering (INTER/ENG 2013)*, 2014.
- [36] A. Firooz, A. Behrooz, R. Angad and H. Ali, "Nanophotonic coherent imager," *Optics Express*, vol. 23, no. 4, pp. 5117-5125, 2015.
- [37] J. Weng, P. Cohen and M. Herniou, "Camera Calibration with Distortion Models and Accuracy Evaluation," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 14, no. 10, pp. 965 - 980, 1992.

- [38] F. M. Gerald and E. S. Glenn, *Handbook of Optical and Laser Scanning*, Boca Raton: CRC Press, 2012.
- [39] M. Sonka, V. Hlavac and R. Boyle, *Image Processing, Analysis, and Machine Vision*, Stamford: Cengage Learning, 2013.
- [40] "What Is Camera Calibration?," MathWorks, [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/help/vision/ug/camera-calibration.html>. [Accessed 10 Januar 2022].
- [41] Z. Zhang, "A Flexible New Technique for Camera Calibration," Microsoft Research, Microsoft Corporation, One Microsoft Way, Redmond, WA 98052, 1998.
- [42] H. Janne and S. Olli, "A Four-step Camera Calibration Procedure with Implicit Image Correction," Infotech Oulu and Department of Electrical Engineering, University of Oulu, Oulu, Finland, FIN-90570.
- [43] R. Marani, G. Roselli, M. Nitti, G. Cicirelli, T. D'Orazio and E. Stella, "A 3D vision system for high resolution surface reconstruction," in *Seventh International Conference on Sensing Technology (ICST)*, Wellington, New Zealand, 2013.
- [44] K. Konolige, J. Augenbraun, N. Donaldson, C. Fiebig and P. Shah, "A Low-Cost Laser Distance Sensor," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Pasadena, CA, USA, 2008.
- [45] M. A. Yousaf and T. Benny, "High Precision Laser Scanning of Metallic Surfaces," *International Journal of Optics*, vol. 2017, 2017.
- [46] I. Besic and Z. Avdagic, "Laser stripe model for sub-pixel peak detection in real-time 3D scanning," in *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, Budapest, Hungary, 2017.
- [47] M. Georgiev, R. Bregović and A. Gotchev, "Fixed-Pattern Noise Modeling and Removal in Time-of-Flight Sensing," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 65, no. 4, pp. 808 - 820, 2015.
- [48] Z. Tao, L. Xinyang, L. Jianfeng and X. Zhi, "CMOS Fixed Pattern Noise Elimination Based on Sparse Unidirectional Hybrid Total Variation," *Sensors*, vol. 20, no. 19, p. 5567, 2020.
- [49] P. George, "Laser scanning using a laser pointing device and a camera," 2006. [Online]. Available: <http://georgepavlides.info/research/LaserScanningAndTriangulation.php>. [Accessed 24 Decembar 2021].
- [50] L. Yonghuai, N. Pears, P. Rosin and P. Huber, *3D Imaging, Analysis and Applications*, Springer Cham, 2020.
- [51] P. Walecki and G. Taubin, "Super-Resolution 3-D Laser Scanning Based on Interval Arithmetic," *IEEE Transaction On Instrumentation And Measurement*, vol. 69, no. 10, pp. 8383-8392, 2020.

- [52] S. V. F. Barreto, R. E. Sant'Anna and M. A. F. Feitosa, "A method for image processing and distance measuring based on laser distance triangulation," in *20th International Conference on Electronics, Circuits, and Systems (ICECS)*, Abu Dhabi, United Arab Emirates, 2013.
- [53] J. Beraldin, "Integration of Laser Scanning and Close-Range Photogrammetry - The Last Decade and Beyond," in *XXth ISPRS Congress*, Istanbul, January 2004.
- [54] T. Emanuele and V. Alessandro, *Introductory Techniques for 3-D Computer Vision*, New Jersey: Prentice Hall, 1998.
- [55] F. A. Brian and C. N. Kim, "Elimination of systematic error in subpixel accuracy centroid estimation," *Optical Engineering*, vol. 30, no. 9, pp. 1320 - 1331, September 1991.
- [56] K. Shin and P. Ramanathan, "Real-time computing: a new discipline of computer science and engineering," *Proceedings of the IEEE*, vol. 82, no. 1, pp. 6 - 24, 1994.
- [57] M. K. Sen, H. L. Bob and T. Wenshun, *Real-Time Digital Signal Processing Implementations and Applications*, West Sussex PO19 8SQ, England: John Wiley & Sons Ltd, 2006.
- [58] B. Marković and J. Čertić, "FPGA Realization of Farrow Structure for Sampling Rate Change," *Serbian Journal Of Electrical Engineering*, vol. 13, no. 1, pp. 83-93, 2013.
- [59] B. Marković and J. Čertić, "Efficient Realization Of Farrow Structure For Sampling Rate Change On FPGA Platform," in *2th International Conference on Electrical, Electronics and Computing Engineering, IcETRAN*, Srebrno Jezero, 2015.
- [60] B. Marković, M. Bjelić, M. Stanojević and J. Čertić, "Efficient Implementation of the Half-band FIR based Multistage Decimator," in *4th International Conference on Electrical, Electronics and Computing Engineering, IcEtran*, Kladovo, 2017.
- [61] D. S. Zivkovic, B. R. Markovic, D. Rakic and S. Tadic, "Design considerations and performance of low-cost ultrasonic ranging system," in *Positioning Navigation and Communication (WPNC)*, Dresden, Germany, 2013.
- [62] B. Edoardo, "What is embedded Linux? Part I," 2021. 11. 2023.. [Online]. Available: <https://ubuntu.com/blog/what-is-embedded-linux>. [Accessed 22. 10. 2023.].
- [63] A.-N. Ibrahim, A. D. Octavia, B. Ertugrul, M. Cecilia and I. Salama, "A Fast, Accurate, and Separable Method for Fitting a Gaussian Function," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 36, no. 6, pp. 157-163, 2019.
- [64] S. Liming, W. Wenfu, G. Junrong and L. Xiuhua, "Research on sub-pixel location of the laser spot center," in *Fifth International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics*, Hangzhou, China, 2013.
- [65] C. Li, X. Ye, Y. Gong and W. Tian, "A Center-line Extraction Algorithm of Laser Stripes Based on Multi-Gaussian Signals Fitting," in *International Conference on Information and Automation*, Ningbo, China, 2016.



- [66] I. Besic and Z. Avdagic, "Laser Stripe Sub-Pixel Peak Detection in Real-Time 3D Scanning Using Power Modulation," in *42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Florence, Italy, 2016.
- [67] Z. Qingchun, L. Qipei, Z. Peihao, M. Wenpeng, L. Jingna and L. Xiaoyang, "Study On The Centerline Extraction Method Of Weld Image Line Structured Light Stripe," *UPB Scientific Bulletin, Series C: Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 84, no. 1, pp. 21-32, 2022.
- [68] N. Zhuojiang, T. Wei, Z. Hui and L. Na, "A Fast Laser Adjustment-Based Laser Triangulation Displacement Sensor for Dynamic Measurement of a Dispensing Robot," *Applied Sciences*, vol. 10, no. 21, p. 7412, 2020.
- [69] H. Gan, C. Zhang, L. Li and W. Luo, "Sub-pixel extraction of laser stripe in complex background," *Opto-Electronic Engineering*, vol. 46, no. 2, p. 180457, 2019.
- [70] P. Shuo and S. Xinjie, "An Optimal Method for Extracting the Center of Light Stripes," in *International Conference on Computer Technology*, Tianjin, China, 2021.
- [71] W. Zhuo-Ren, L. Lei-Jie, M. Jian and Z. Li-Min, "Extraction and segmentation method of laser stripe in linear structured light scanner," *Optical Engineering*, vol. 60, no. 4, p. 046104, April 2021.
- [72] Z. Zhiyi and Y. Lin, "Building a 3D scanner system based on monocular vision," *Applied Optics*, vol. 51, no. 11, pp. 1638-1644, 2012.
- [73] C. Seher, D. Emmanuel, F. Virginie and O. Alatay, "Proposition and evaluation of a real-time generic architecture for a laser stripe detection system on FPGA," in *Conference on Design and Architectures for Signal and Image Processing (DASIP)*, Dresden, Germany, 2017.
- [74] S. Winkelbach, S. Molkenstruck and F. M. Wahl, "Low-Cost Laser Range Scanner and Fast Surface Registration Approach," in *28th DAGM-Symposium*, Berlin, Germany, 2006.
- [75] A. R. Abdul Rais, A. R. Mohd Adli, R. Muhammad Azizi and S. Azilah, "Development of Low Cost 3D Scanner (LC3S) Using Matlab and FPGA," *International Journal Of Electrical And Electronic Systems Research*, vol. 13, December 2018.
- [76] P. Mallick, C. Nayak and T. B. Behera, "Least Square based Parabolic Regression to determine Calibration Constant in Measurement," in *International Conference on Industrial and Information Systems, ICIIS 2010*, India, 2010.
- [77] F. Blais and M. Rioux, "Real-time numerical peak detector," *Signal Processing*, vol. 11, no. 2, pp. 145-155, 1986.
- [78] J. Forest, J. Teixidor, J. Salvi and E. Cabruja, "A Proposal For Laser Scanners Sub-Pixel Accuracy Peak Detector," 2003.

- [79] D. Naidu and R. Fisher, "A Comparative Analysis of Algorithms for Determining the Peak Position of a Stripe to Sub-pixel Accuracy," in *British Machine Vision Conference*, 1991.
- [80] R. B. Fisher, "A Comparison of Algorithms for Subpixel Peak Detection," *Image Technology, Advances in Image Processing, Multimedia and Machine Vision*, pp. 385-404, 2001.
- [81] S. Qiucheng, C. Jian and L. Chunjing, "A robust method to extract a laser stripe centre based on grey level moment," *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 67, pp. 122-127, 2014.
- [82] H. Karsten and P. Gunter, "Robust laser-stripe sensor for automated weld-seam-tracking in the shipbuilding industry," in *IECON '98. Proceedings of the 24th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Aachen, Germany, 1998.
- [83] S. Colak, V. Fresse, O. Alata, T. Gautrais and E. Dumas, "Comparative study of laser stripe detection algorithms for embedded real-time suitability in an industrial quality control context," in *The International Conference on Mechanical, Electric and Industrial Engineering (MEIE2018)*, Hangzhou, China, 2018.
- [84] A. Oppenheim and R. W. Schaffer, *Discrete-time signal processing*, Upper Saddle River: Prentice Hall, 1999.
- [85] G. P. John and G. M. Dimitris, *Digital Signal Processing: Principles, Algorithms and Applications*, 5th edition, Pearson, 2021.
- [86] L. Milić, Z. Dobrosavljević and J. Čertić, *Uvod u digitalnu obradu signala*, Beograd: Akademska misao, 2015.
- [87] J. F. Collado, *New Methods for Triangulation-based Shape Acquisition using Laser Scanners*, Girona: Universitat de Girona. Departament d'Electrònica, Informàtica i Automàtica, 2004.
- [88] J. Forest, J. Salvi, E. Cabruja and C. Pous, "Laser stripe peak detector for 3D scanners. A FIR filter approach," in *17th International Conference on Pattern Recognition*, Cambridge, 2004.
- [89] L. Jun Jie, *3D Laser Scanner Development and Analysis (PhD Thesis)*, Department of Computer Science Aberystwyth University, Ceredigion SY23 3DB, UK, October 2013.
- [90] F. Huijie, Z. Lipo, H. Siyuan and T. Yandong, "A New Open Curve Detection Algorithm for Extracting the Laser Lines on the Road," *Advanced Engineering Forum*, vol. 2, no. 3, pp. 205-210, December 2011.
- [91] V. Matiukas and D. Miniotas, "Detection of Laser Beam's Center-line in 2D Images," *Elektronika Ir Elektrotechnika*, vol. 95, no. 7, pp. 67-70, 2009.
- [92] I. Besic and Z. Avdagic, "Automated Test Environment for Image Processing in Laser Triangulation 3D Scanning," in *58th International Symposium ELMAR*, Zadar, Croatia, 2016.

- [93] A. Molder, O. Martens, T. Saar and R. Land, "Laser Line Detection with Sub-Pixel Accuracy," *Elektronika ir Elektrotechnika*, vol. 20, no. 5, pp. 132-135, 2014.
- [94] K. Dawson-Howe, *A Practical Introduction to Computer Vision with OpenCV*, John Wiley & Sons Ltd, 2014.
- [95] R. Usamentiaga, J. Molleda and D. F. García, "Fast and robust laser stripe extraction for 3D reconstruction in industrial environments," *Machine Vision and Applications*, vol. 23, p. 179–196, 2012.
- [96] J. R. Parker, *Algorithms for Image Processing and Computer Vision*, Indianapolis: Wiley Publishing, 2010.
- [97] A. Georgina Flesia, G. Ames, G. Bergues, L. Canali and S. Clemar, "Sub-pixel straight lines detection for measuring through machine vision," in *IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference*, Montevideo, Uruguay, 2014.
- [98] L. Yuehua, Z. Jingbo, H. Fengshan and L. Lijian, "Sub-Pixel Extraction of Laser Stripe Center Using an Improved Gray-Gravity Method," *Sensors*, vol. 17, no. 4, 2017.
- [99] A. A.-T. Ali and A. A.-S. Shahad, "Laser-based structured light technique for 3D reconstruction using Extreme Laser stripes extraction method with global information extraction," *Optics & Laser Technology*, vol. 138, p. 106897, 2021.
- [100] D. Song, K. D. Yue and Z. Li, "A High Efficiency Algorithm of Light Stripe Center Extraction in 3D Scanning System," in *3rd International Conference on Computer Science and Network Technology*, Dalian, China, 2013.
- [101] H. Zhixin, Z. Hongtao, H. Ming and M. Yong, "Adaptive centre extraction method for structured light stripes," *Ukrainian Journal of Physical Optics*, vol. 18, no. 1, pp. 9-19, 2017.
- [102] C. Steger, "Unbiased extraction of lines with parabolic and Gaussian profiles," *Computer Vision and Image Understanding*, vol. 117, no. 2, p. 97–112, 2013.
- [103] C. Steger, "Subpixel-precise extraction of lines and edges," *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 13, pp. 141-156, 2000.
- [104] C. Steger, "Evaluation Of Subpixel Line And Edge Detection Precision And Accuracy," *Informatik*, 2000.
- [105] Q. Li, Z. Yixin, Z. Xuping, W. Shun and X. Fei, "Statistical behavior analysis and precision optimization for the laser stripe center detector based on Steger's algorithm," *Optics Express*, vol. 21, no. 11, pp. 13442-13449, 2013.
- [106] C. Steger, "An unbiased detector of curvilinear structures," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 20, no. 2, pp. 113 - 125, 1998.
- [107] M. Shao, Z. Wei, M. Hu and G. Zhang, "Correction Method for Line Extraction in Vision Measurement," *PLoS ONE*, 2015.

- [108] Z. Li, L. Ma, X. Long, Y. Chen, H. Deng, F. Yan and G. Qingyi, "Hardware-Oriented Algorithm for High-Speed Laser Centerline Extraction Based on Hessian Matrix," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 70, pp. 1-14, 2021.
- [109] Y. Haotian, P. Chongchong, Z. Zhuang and Z. Yi, "Laser stripe extraction in additive manufacturing based on spatiotemporal noise regularization," *Optical Review*, vol. 27, p. 521–529, 2020.
- [110] J. Jiang, C. Liu and S. Ling, "An FPGA implementation for real-time edge detection," *Journal of Real-Time Image Processing*, no. 15, p. 787–797, 2018.
- [111] L. Xingjian, Z. Hengshuang, Z. Guomin, Z. Kai, L. Zhongwei, C. Yuhjin and S. Yusheng, "Rapid and automatic 3D body measurement system based on a GPU–Steger line detector," *Applied Optics*, vol. 55, no. 21, pp. 5539-47, 2016.
- [112] C. Xu, Z. Guangjun and S. Junhua, "An Efficient and Accurate Method for Real-Time Processing of Light Stripe Images," *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 5, no. 2013, p. Article ID 456927, 2013.
- [113] D. Zhixu, S. Xingwei, L. Weijun and Y. Heran, "Measurement of Free-Form Curved Surfaces Using Laser Triangulation," *Sensors*, vol. 18, no. 10, p. 3527, 2018.
- [114] P. Fasogbon, L. Duvieubourg and L. Macaire, "Fast laser stripe extraction for 3D metallic object measurement," in *IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Florence, Italy, 2016.
- [115] L. Yue, X. Guo and J. Yu, "An Improved Method of Contour Extraction of Complex Stripe in 3D Laser Scanning," in *2nd International Conference on Mechanical, Electronic and Information Technology Engineering (ICMITE 2016)*, Chongqing China, 2016.
- [116] H. Leiyang, W. Shanshan and W. Chuanyu, "Robust laser stripe extraction for three-dimensional reconstruction based on a cross-structured light sensor," *Applied Optics*, vol. 56, no. 4, pp. 823-832, 2017.
- [117] T. Mehran, M. Mohammad and Y. Davood, "A Novel Method for Laser Peak Detection with Subpixel Accuracy for the Rail Corrugation Measurement," *Hindawi Journal of Sensors*, vol. 2021, pp. Article ID 6695674, 16 pages, 01 Oct 2021.
- [118] M. Michel, M. Yves, O. Georges and P. Jean-Michel, *Wavelet Toolbox for use with Matlab (User's Guide version 3)*, Natick: The MathWorks, Inc., 2004.
- [119] B. Hagen, K. Markus and R. Eduard, "Robust and sub-pixel accurate wavelet-based segmentation of laser lines formed by lenticular lenses," in *SPIE Optical Metrology (Proceedings Volume 11782, Optical Measurement Systems for Industrial Inspection XII)*, Online Only, 2021.
- [120] Q. Sun, Y. Hou, Q. Tan and Z. Xu, "A Fast and Robust Detection Algorithm for Extraction of the Centre of a Structured Light Stripe," *Lasers in Engineering*, vol. 31, no. 1, pp. 41-51, 2015.

- [121] K. M. Hosny, "Exact Legendre moment computation for gray level images," *Pattern Recognition*, vol. 40, no. 12, pp. 3597-3605, 2007.
- [122] S. Qiucheng, L. Renyun and Y. Fanhua, "An extraction method of laser stripe centre based on Legendre moment," *Optik*, vol. 127, no. 2, pp. 912-915, 2016.
- [123] A. I. Mohammed and L. Ismail, "Design and analysis of a 3D laser scanner," *Measurement*, vol. 111, pp. 122-133, December 2017.
- [124] H.-F. Wang, Y.-F. Wang, J.-J. Zhang and J. Cao, "Laser Stripe Center Detection Under the Condition of Uneven Scattering Metal Surface for Geometric Measurement," *IEEE Transactions On Instrumentation And Measurement*, vol. 69, no. 5, pp. 2182-2192, 2020.
- [125] U. Martínez, B. Valera, J. Sánchez and V. García, "Vision System for Subpixel Laser Stripe Profile Extraction with Real Time Operation," in *8th Iberoamerican Congress on Pattern Recognition*, Havana, Cuba, 2003.
- [126] Y. Xiao-Qia, T. Wei, F. Yi-Yang, G. Qiang, H. Qiao-Zhi and Z. Hui, "Laser stripe extraction method in industrial environments utilizing self-adaptive convolution technique," *Applied Optics*, vol. 56, no. 10, pp. 2653-2660, 2017.
- [127] L. Yann, B. Yoshua and H. Geoffrey, "Deep learning," *Nature*, vol. 521, p. 436-444, 2015.
- [128] G. Fu, P. Corradi, A. Menciassi and P. Dario, "An Integrated Triangulation Laser Scanner for Obstacle Detection of Miniature Mobile Robots in Indoor Environment," *IEEE/ASME Transactions On Mechatronics*, vol. 16, no. 4, pp. 778-783, 2011.
- [129] P. Chmelar and M. Dobrovolny, "The Laser Line Detection for Autonomous Mapping Based On Color Segmentation," *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, vol. 7, no. 12, pp. 1654-1658, 2013.
- [130] Z. Congyang, Y. Jianing, Z. Fuqiang, S. Junhua, L. Xiaosong and X. Wentao, "A Robust Laser Stripe Extraction Method for Structured-Light Vision Sensing," *Sensors*, vol. 20, no. 16, p. 4544, 2020.
- [131] W. Shengchun, W. Hao, Z. Yunlai, L. Junbo, D. Peng, D. Xinyu and A. W. Magd, "Automatic laser profile recognition and fast tracking for structured light measurement using deep learning and template matching," *Measurement*, vol. 169, p. 108362, 2021.
- [132] W. Yu, Y. Li, H. Yang and B. Qian, "The Centerline Extraction Algorithm of Weld Line Structured Light Stripe Based on Pyramid Scene Parsing Network," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 105144-105152, 2021.
- [133] W. Liu, H. Di, Y. Zhang, Y. Lu, X. Cheng, J. Cui and Z. Jia, "Automatic Detection and Segmentation of Laser Stripes for Industrial Measurement," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 69, no. 7, pp. 4507 - 4515, 2020.
- [134] W. Kaixuan, W. Tianqi, H. Junjie, L. Yang and J. Zhenwei, "Autonomous seam recognition and feature extraction for multi-pass welding based on laser stripe edge guidance network,"

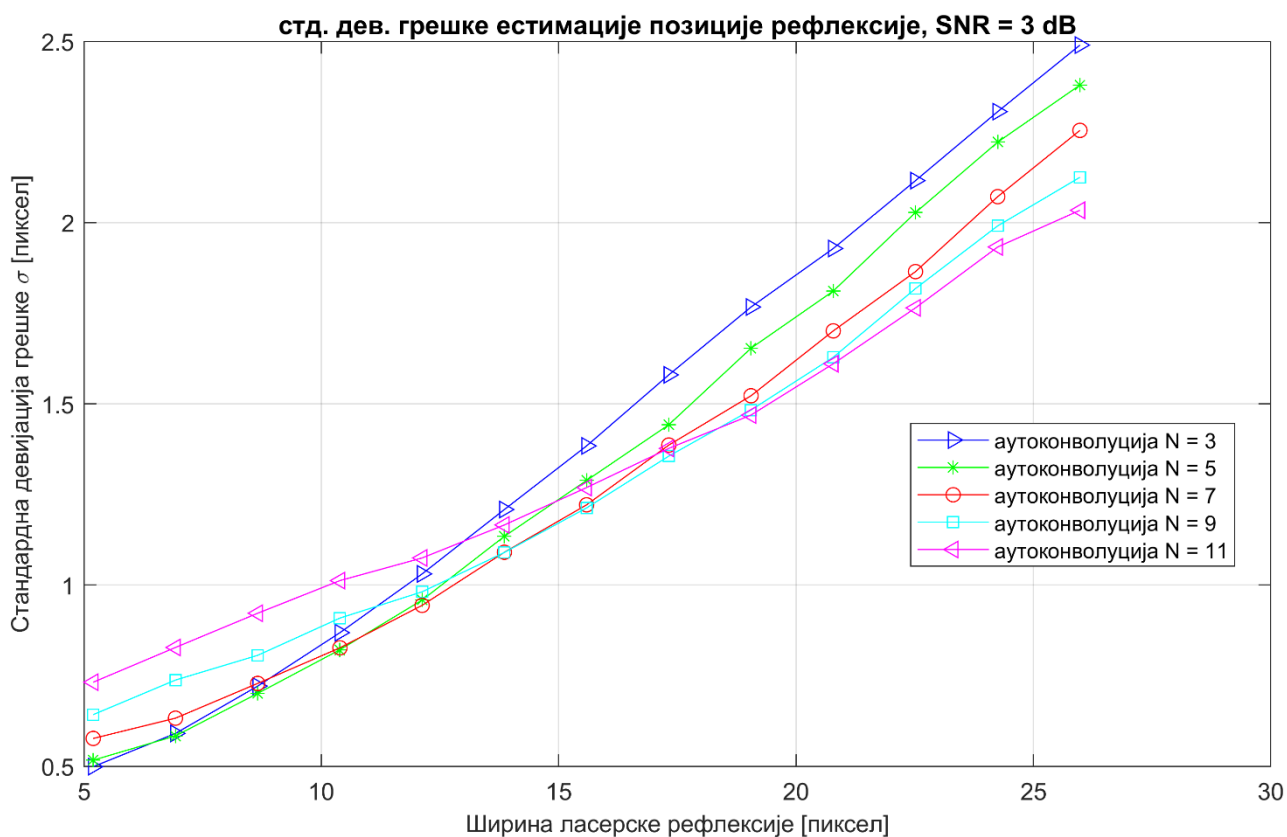
*The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 111, p. 2719–2731, 2020.

- [135] K. Lee, I. Hwang, Y.-M. Kim, H. Lee, M. Kang and J. Yu, "Real-Time Weld Quality Prediction Using a Laser Vision Sensor in a Lap Fillet Joint during Gas Metal Arc Welding," *Sensors*, vol. 20, no. 6, p. 1625, 2020.
- [136] Z. You, D. Xianxing, Y. Enhui and C. W. Kelvin, "Convolutional neural network for detecting railway fastener defects using a developed 3D laser system," *International Journal of Rail Transportation*, vol. 9, no. 21, pp. 424-444, 2020.
- [137] Z. Jingbo, W. Kai, Y. Guang, L. Xiaohong, D. Renjie and L. Yuehua, "Real-time uncertainty estimation of stripe center extraction results using adaptive BP neural network," *Measurement*, vol. 194, p. 111022, 2022.
- [138] Z. Jingbo, P. Laisheng, L. Yuehua, L. Peng and L. Lijian, "Real-Time Stripe Width Computation Using Back Propagation Neural Network for Adaptive Control of Line Structured Light Sensors," *Sensors*, vol. 20, no. 9, p. 2618, 2020.
- [139] Y. Abadade, A. Temouden, H. Bamoumen, N. Benamar, Y. Chtouki and A. Senhaji Hafid, "A Comprehensive Survey on TinyML," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 96892-96922, 2023.
- [140] A. Gnutti, F. Guerrini and R. Leonardi, "A normalized mirrored correlation measure for data symmetry detection," in *25th European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*, Kos, Greece, 2017.
- [141] S. Douglas and D. Mandic, "Autoconvolution and panorama: Augmenting second-order signal analysis," in *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, Florence, Italy, 2014.
- [142] B. R. Marković and J. Čertić, "Improving Sub-pixel Estimation of Laser Stripe Reflection Center by Autoconvolution on FPGA," *Journal of Circuits, Systems and Computers*, vol. 31, no. 4, 2021.
- [143] J. Cheng, L. Wen-long, W. An and Y. Wen-Yong, "A novel centerline extraction algorithm for a laser stripe applied for turbine blade inspection," *Measurement Science and Technology*, vol. 31, no. 9, 2020.
- [144] Z. Yang, L. Wei, L. Xiaodong, Y. Fan, G. Peng and J. Zhenyuan, "Accuracy improvement in laser stripe extraction for large-scale triangulation scanning measurement system," *Optical Engineering*, vol. 54, no. 10, p. 105108, 2015.
- [145] B. Marković and J. Čertić, "Simulation of the Laser Stripe Reflection in Sub-Pixel Estimation with Autoconvolution Algorithm," in *30th Telecommunications forum TELFOR*, Belgrade, 2022.
- [146] T.-H. César and A.-E. Miguel, "Real-time image processing with a compact FPGA-based systolic architecture," *Real-Time Imaging*, vol. 10, no. 3, p. 177–187, 2004.

- [147] C. Louise, N. David, R. Craig, D. R. Fraser and W. S. Robert, Exploring Zynq® MPSoC With PYNQ and Machine Learning Applications, Glasgow, Scotland, UK.: Strathclyde Academic Media, 2019.
- [148] Y. Jiaqi, S. Edward and R. Clive, "Use of a 3D model to improve the performance of laser-based railway track inspection," *Journal of Rail and Rapid Transit*, vol. 233, no. 3, pp. 337-355, 2019.

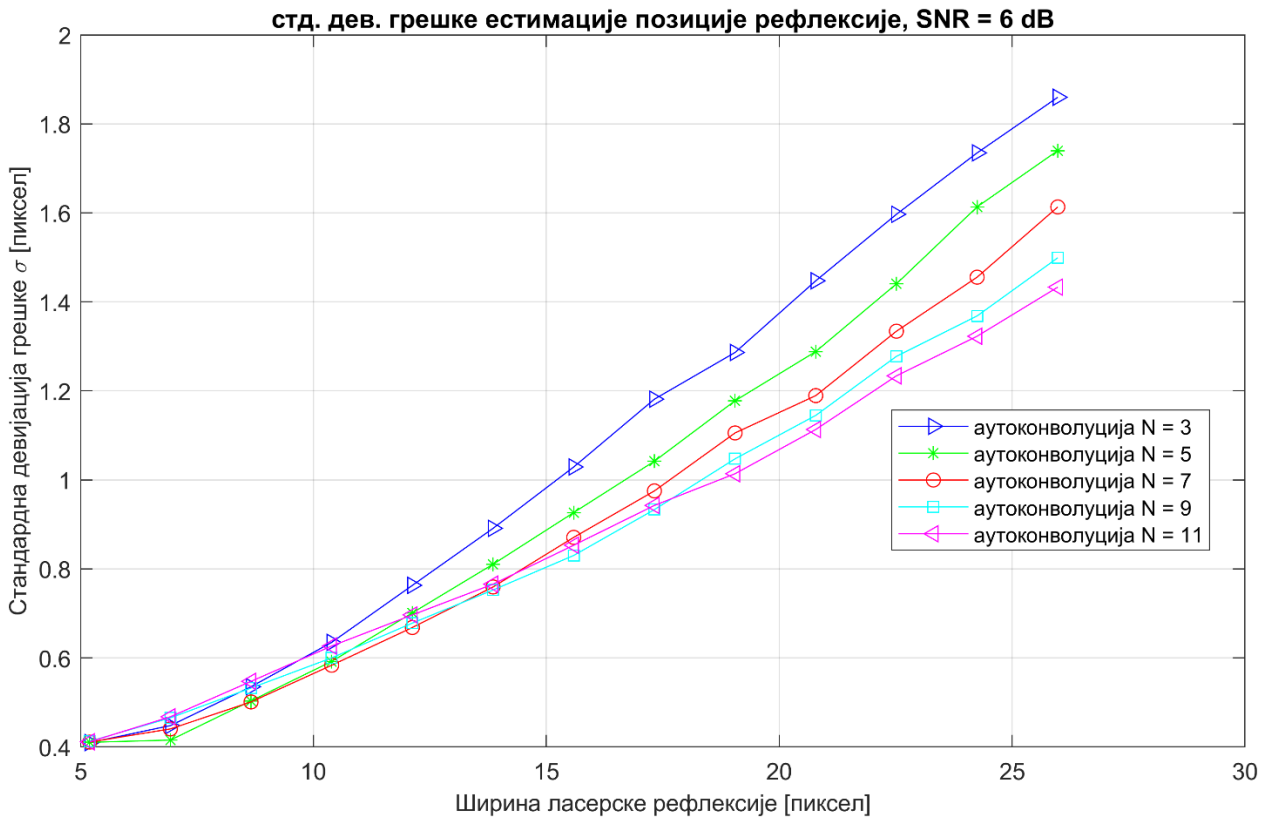
## Прилог А

У прилогу се налазе графици као резултати симулације естимације позиције ласерске рефлексије у комбинацији алгоритма центра масе и аутоконволуцијом као техником предфилтрирања линије слике као једнодимензионалног сигнала. За различите вредности SNR-а, ширине прозора аутоконволуције, као и различитих алгоритама за претпроцесирање сигнала дата је стандардна девијација грешке естимације.

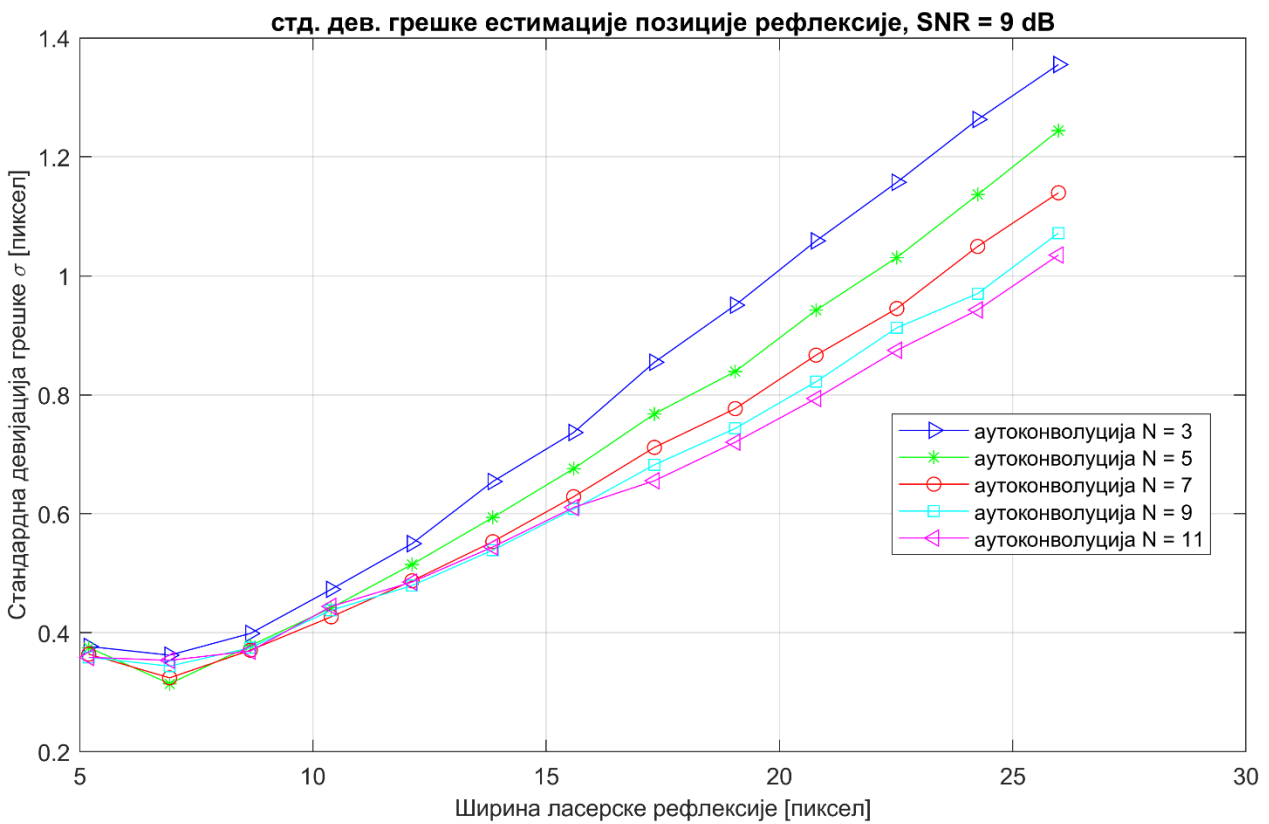


Слика 71. Стандардна дев. грешке естимације позиције за различите вредности дужине аутоконволуционог филтра  $N=3,5,7,9$  и  $11$  за SNR однос  $3\text{dB}$  у зависности од ширине рефлексије

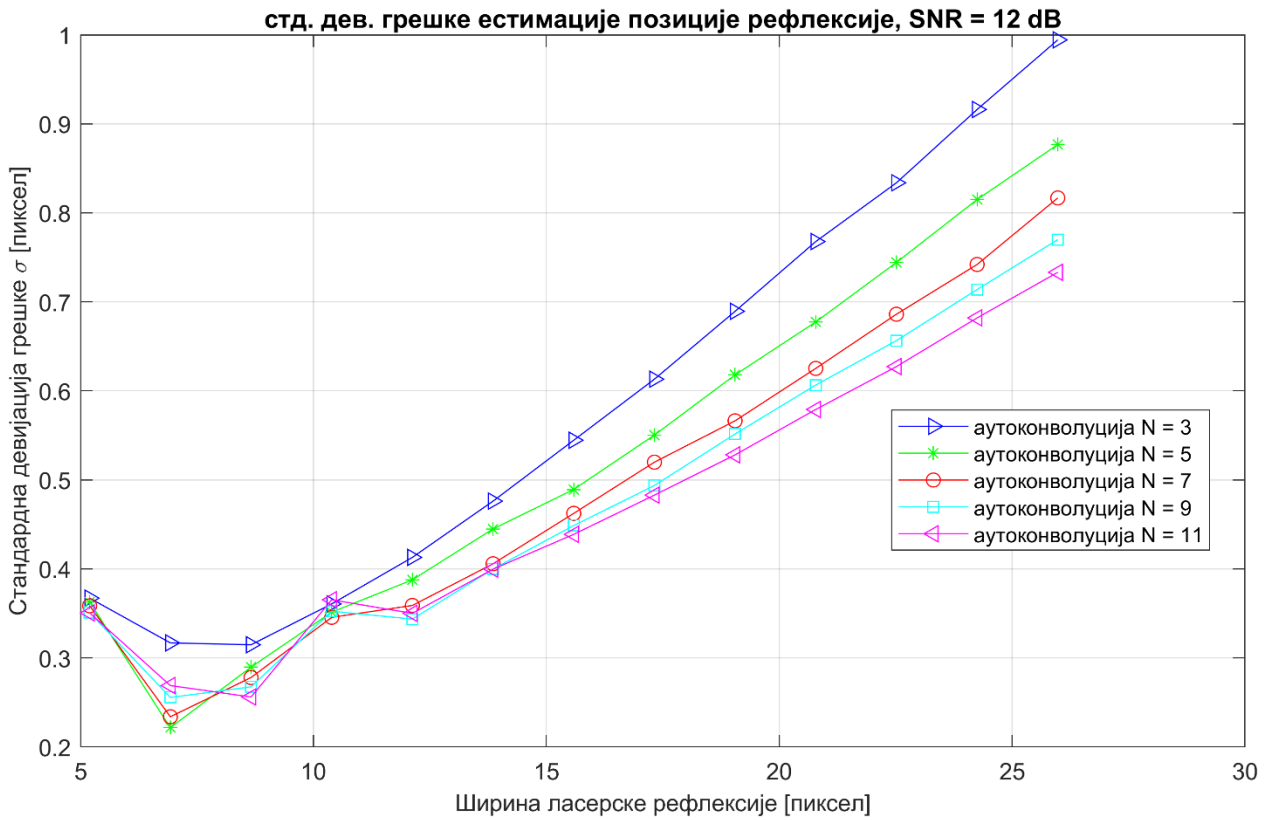




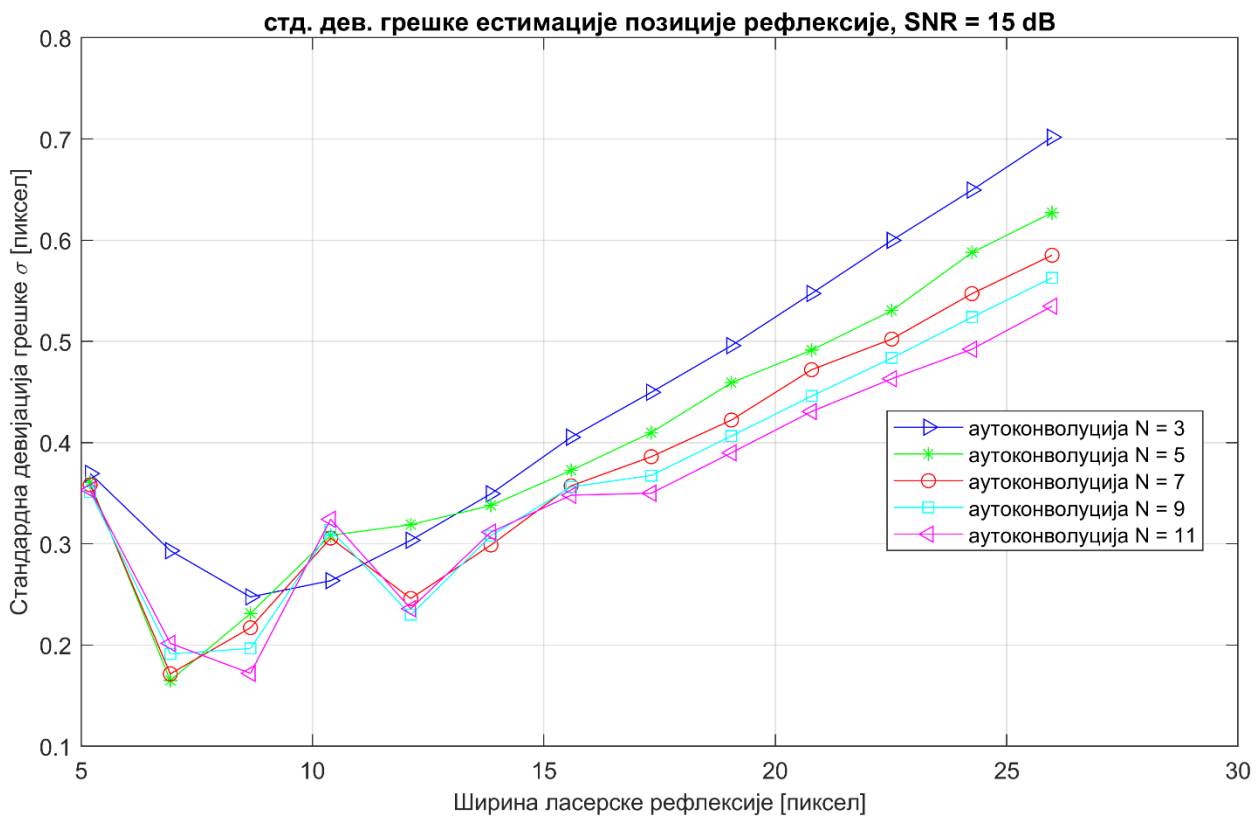
Слика 72. Стандардна дев. грешке естимације позиције за различите вредности дужине аутоконволуционог филтра  $N=3,5,7,9$  и  $11$  за SNR однос  $6$  dB у зависности од ширине рефлексије



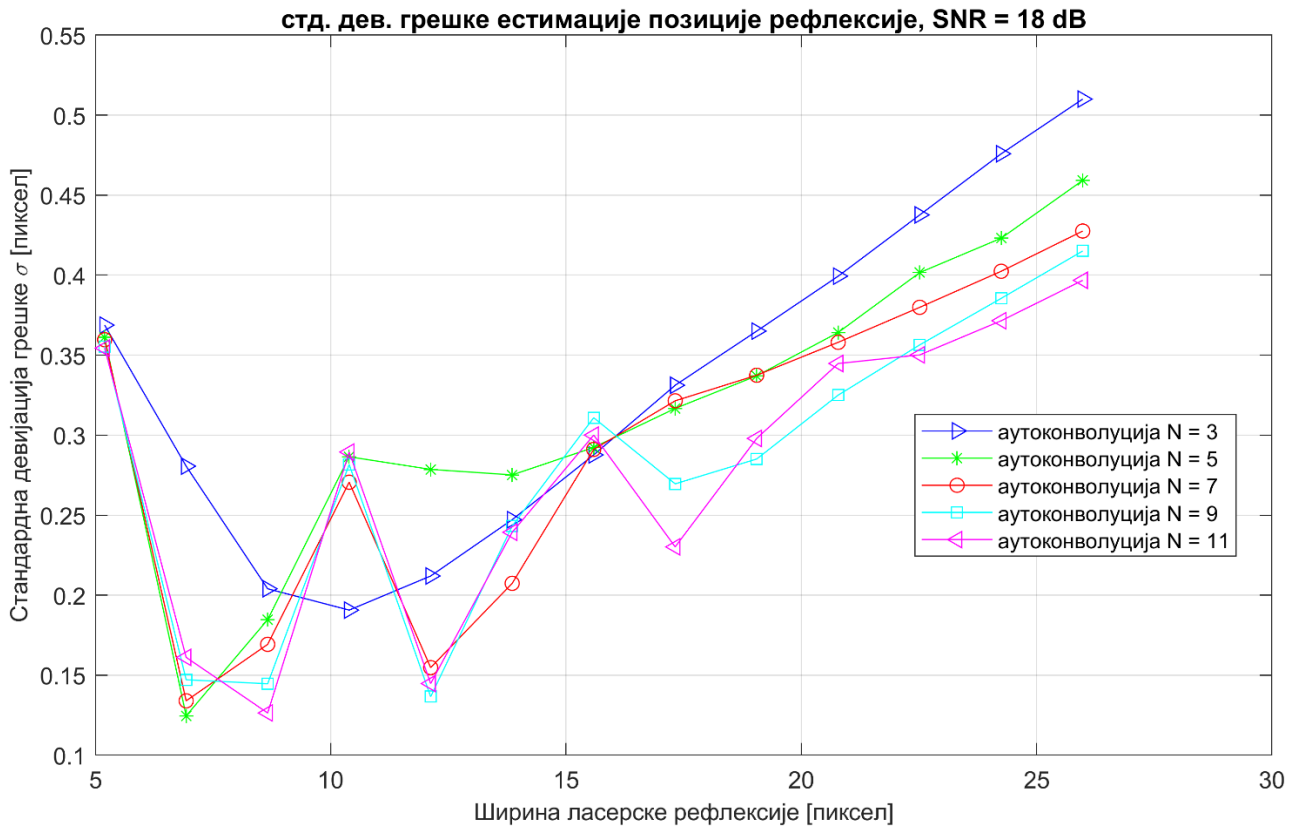
Слика 73. Стандардна дев. грешке естимације позиције за различите вредности дужине аутоконволуционог филтра  $N=3,5,7,9$  и  $11$  за SNR однос  $9$  dB у зависности од ширине рефлексије



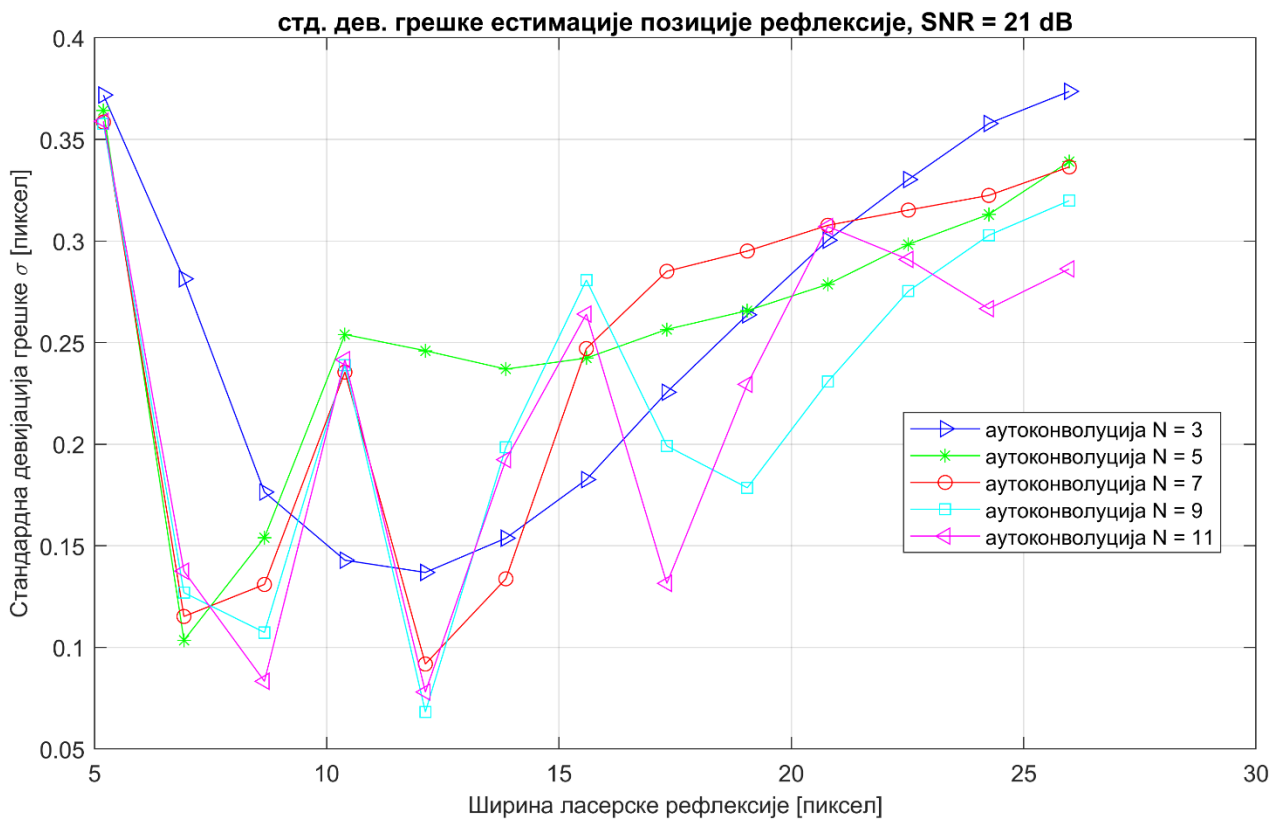
Слика 74. Стандардна дев. грешке естимације позиције за различите вредности дужине аутоконволуционог филтра  $N=3,5,7,9$  и  $11$  за SNR однос  $12$  dB у зависности од ширине рефлексије



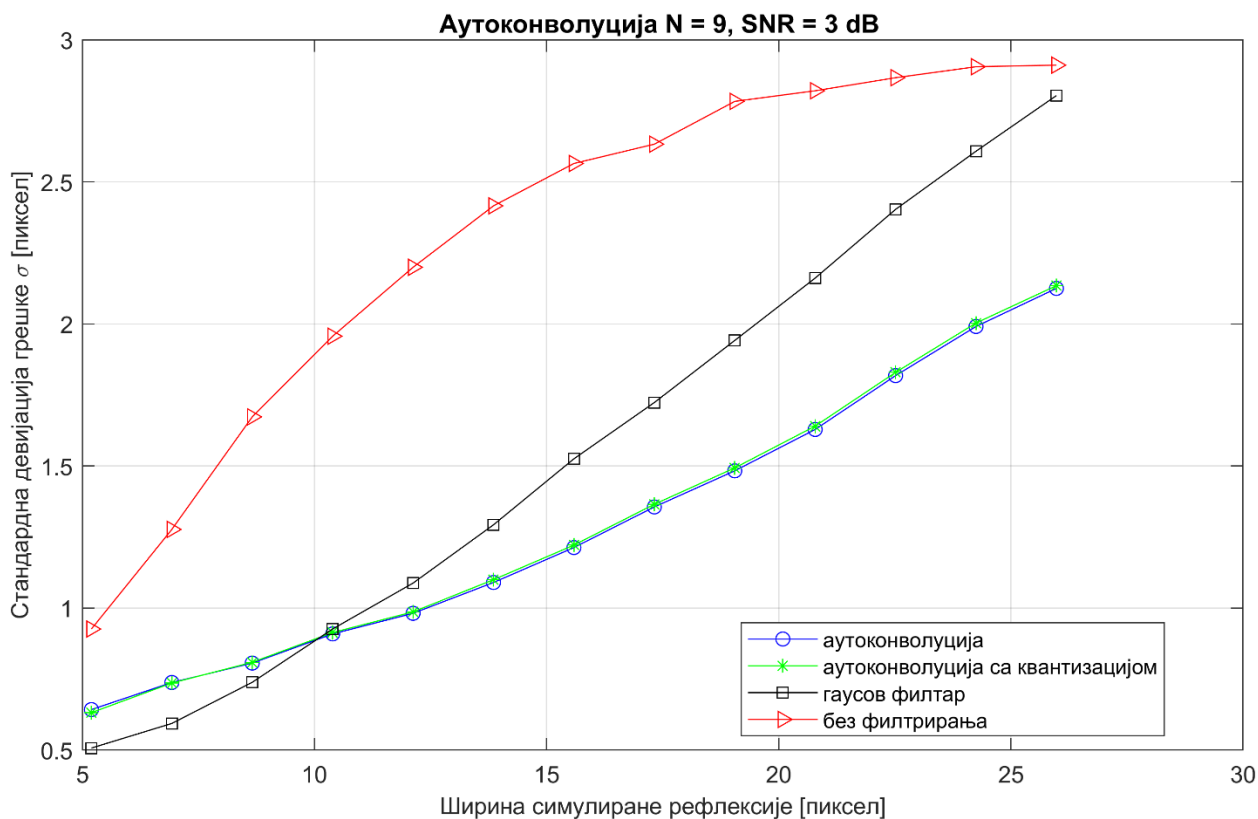
Слика 75. Стандардна дев. грешке естимације позиције за различите вредности дужине аутоконволуционог филтра  $N=3,5,7,9$  и  $11$  за SNR однос  $15$  dB у зависности од ширине рефлексије



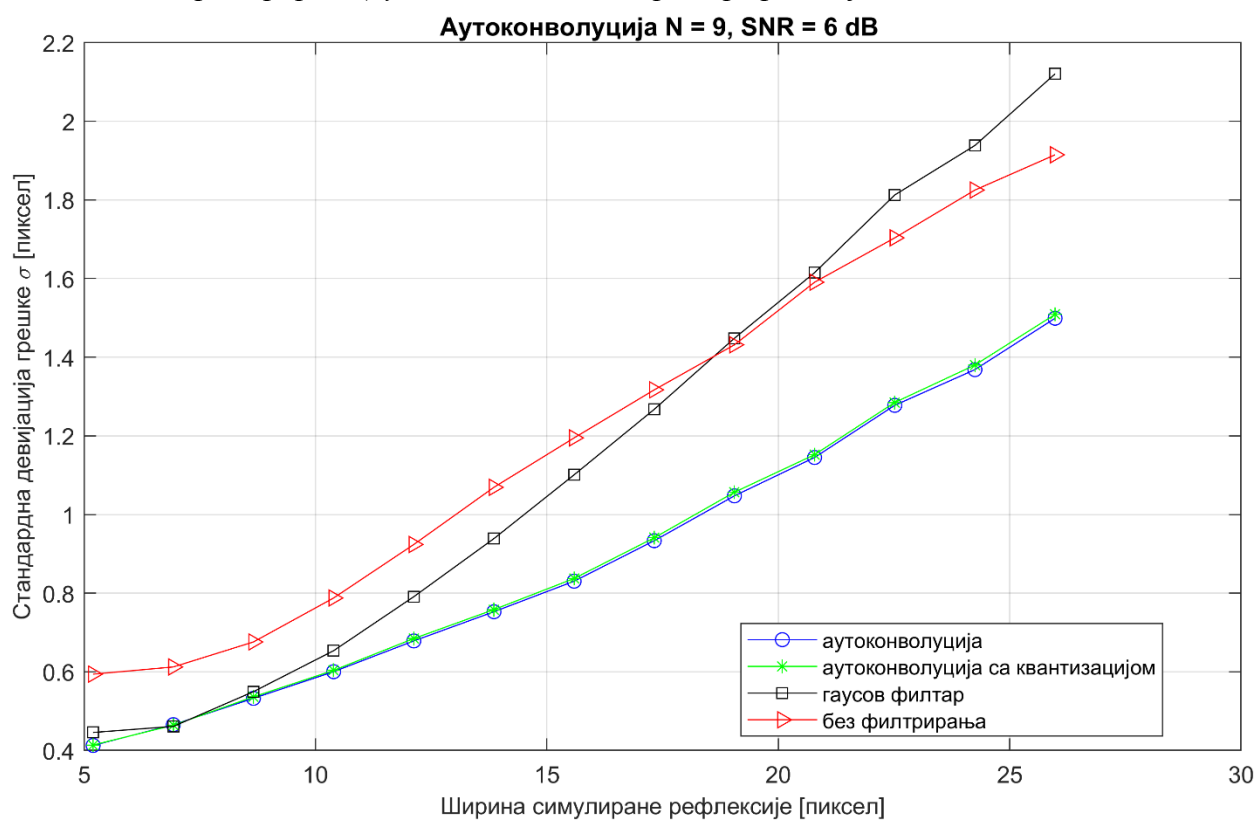
Слика 76. Стандардна дев. грешке естимације позиције за различите вредности дужине аутоконволуционог филтра  $N=3,5,7,9$  и  $11$  за SNR однос  $18$  dB у зависности од ширине рефлексије



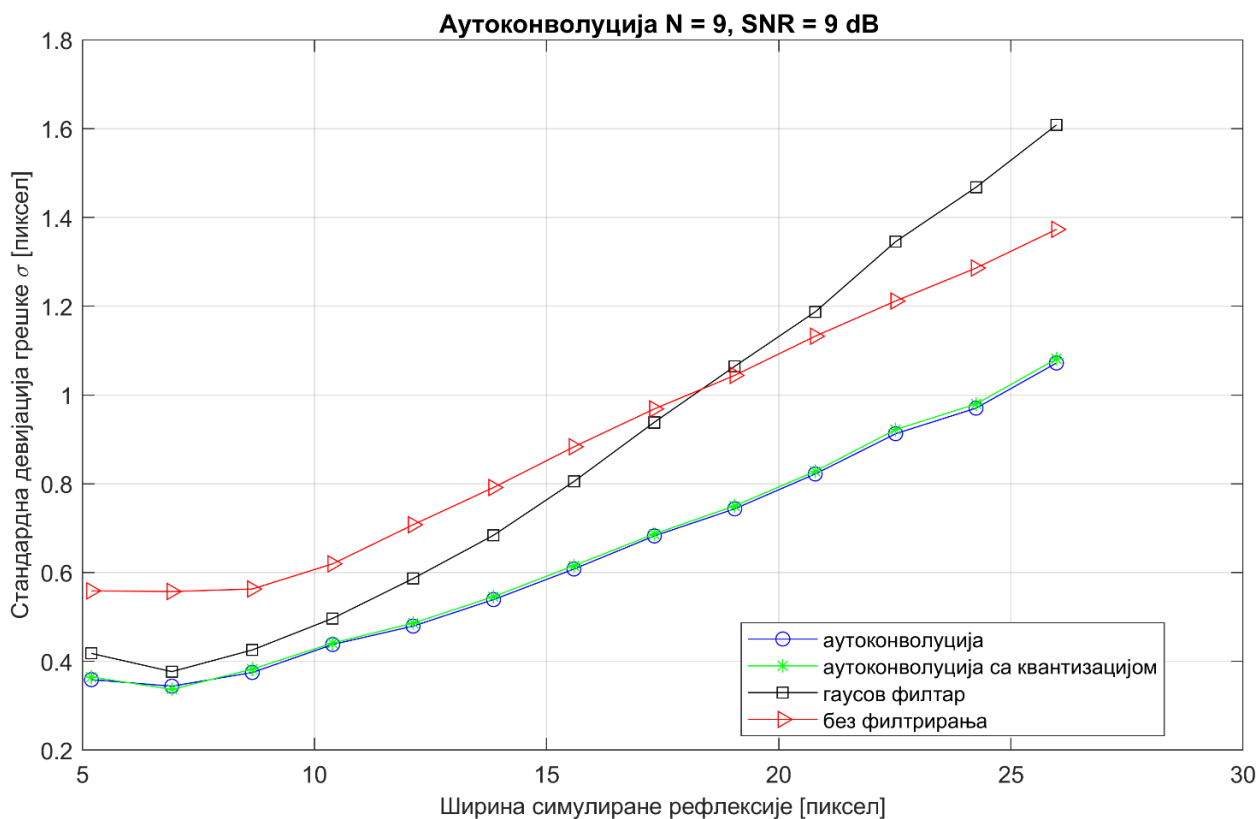
Слика 77. Стандардна дев. грешке естимације позиције за различите вредности дужине аутоконволуционог филтра  $N=3,5,7,9$  и  $11$  за SNR однос  $21$  dB у зависности од ширине рефлексије



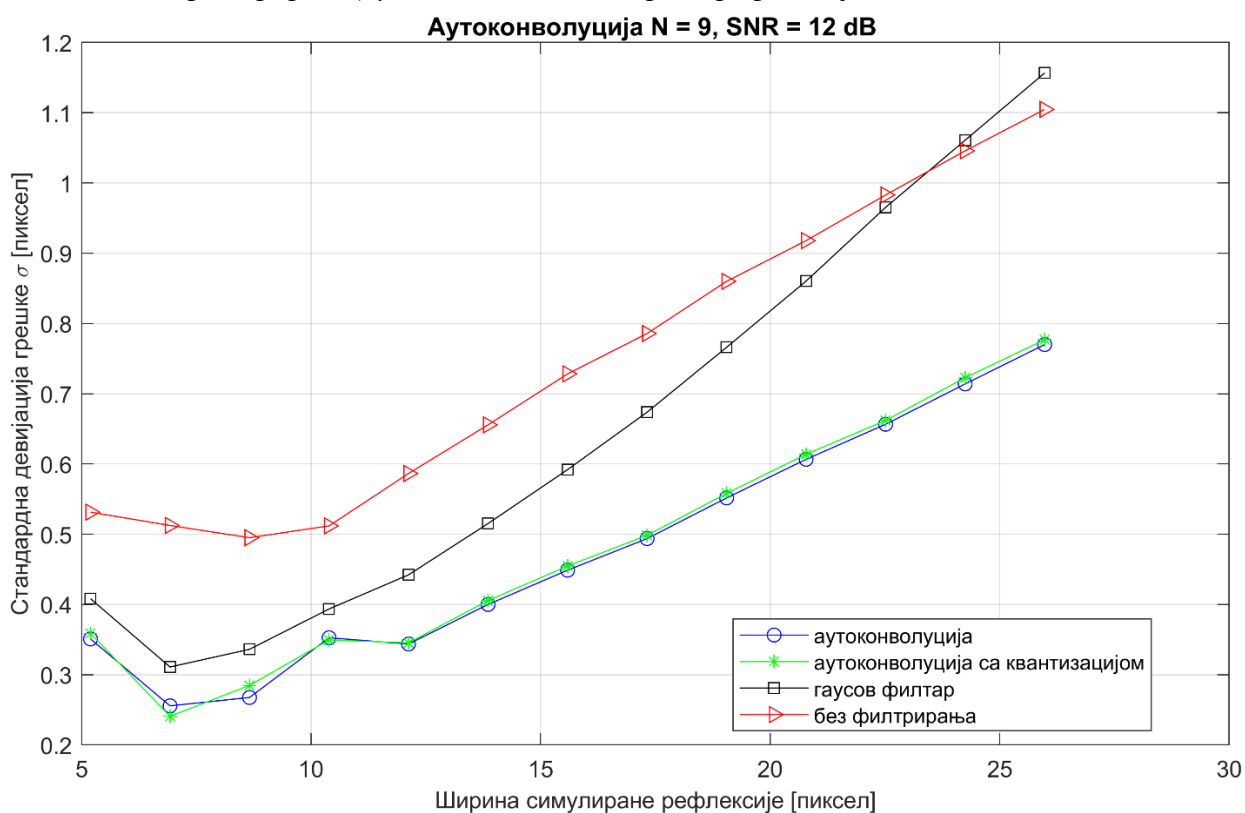
Слика 78. Стандардна дев. грешке естимације позиције за различите алгоритме филтрирања (аутоконволуција, аутоконволуција са квантизацијом, прилагођени Гаус, без филтрирања) у зависности од ширине рефлексије за SNR = 3 dB



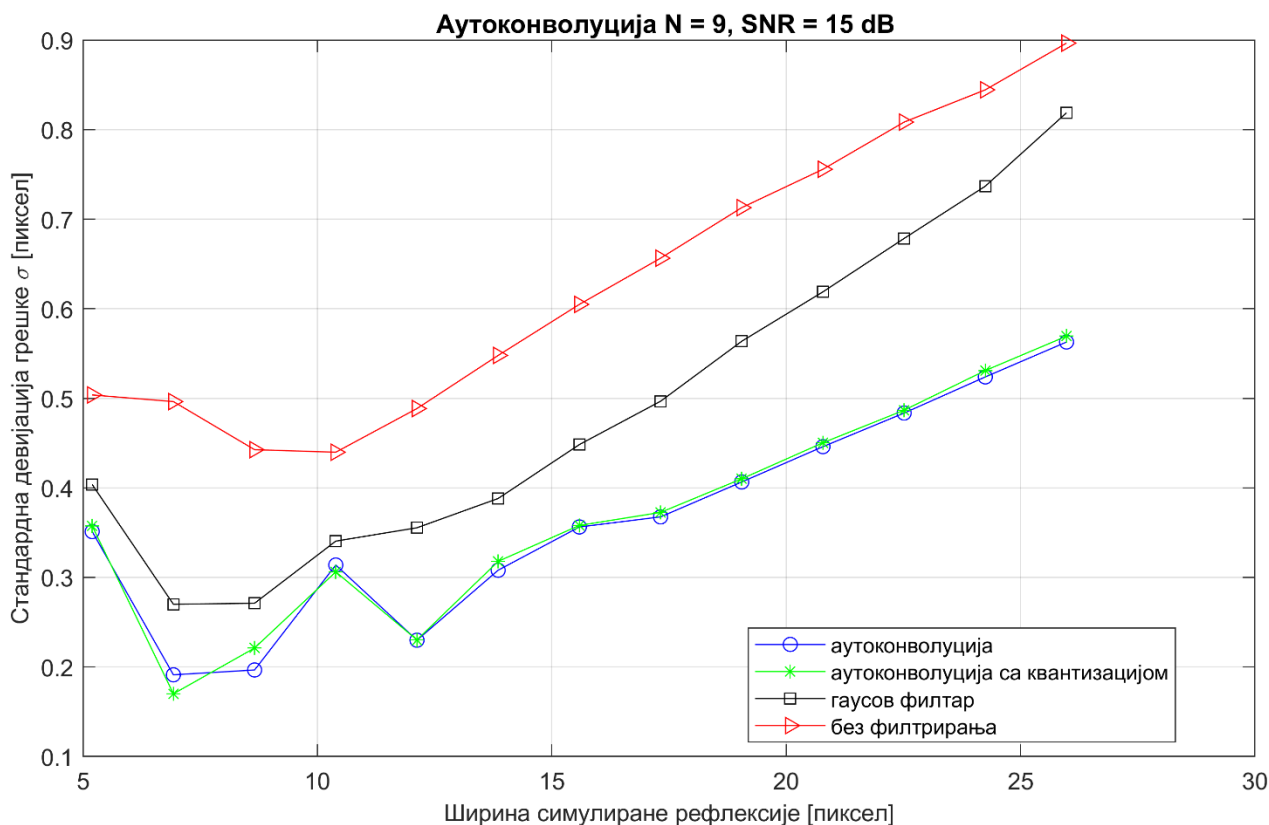
Слика 79. Стандардна дев. грешке естимације позиције за различите алгоритме филтрирања (аутоконволуција, аутоконволуција са квантизацијом, прилагођени Гаус, без филтрирања) у зависности од ширине рефлексије за SNR = 6 dB



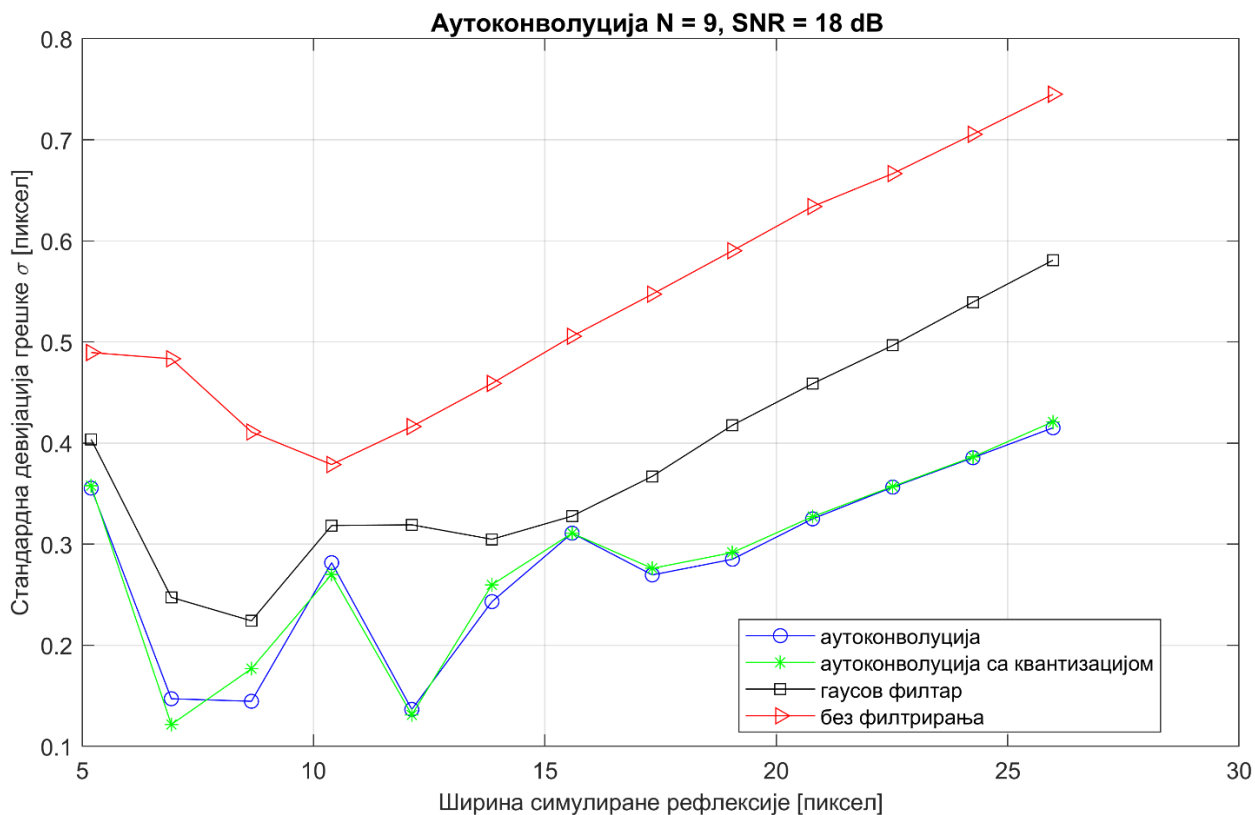
Слика 80. Стандардна дев. грешке естимације позиције за различите алгоритме филтрирања (аутоконволуција, аутоконволуција са квантизацијом, прилагођени Гаус, без филтрирања) у зависности од ширине рефлексије за SNR = 9 dB



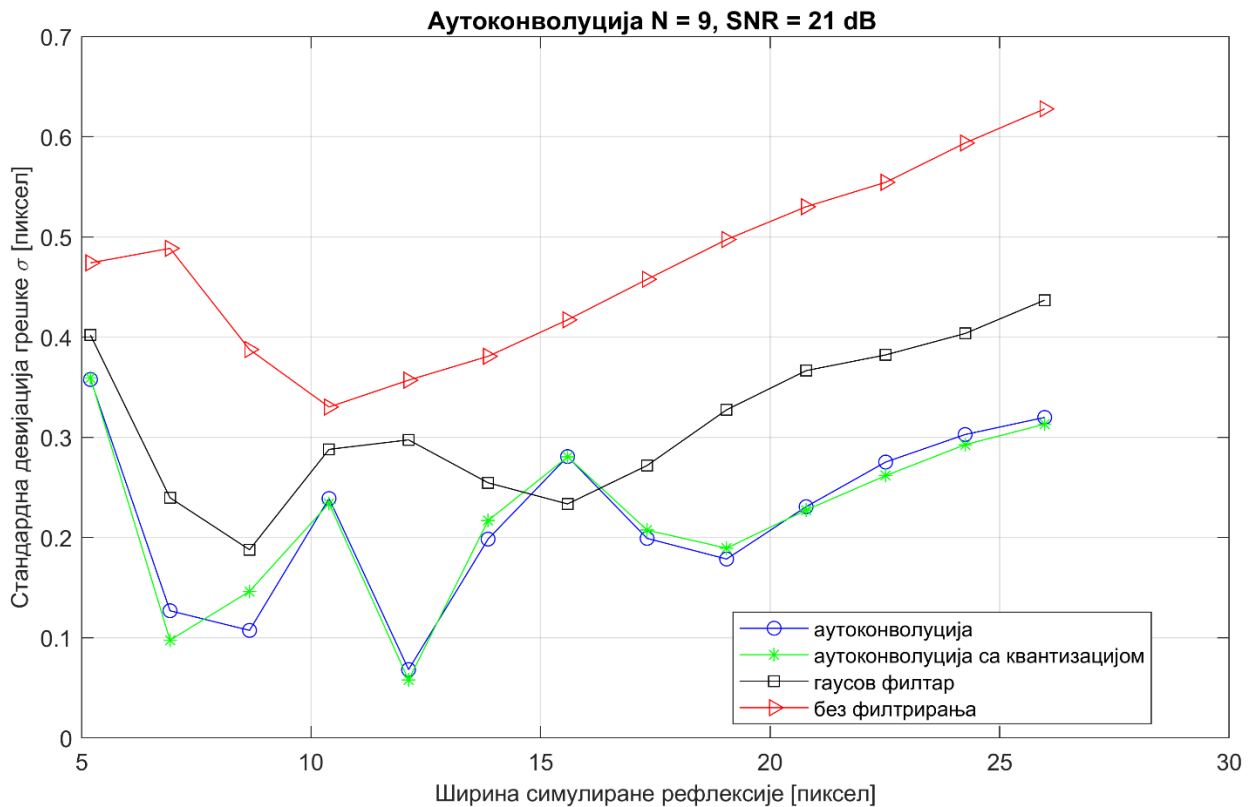
Слика 81. Стандардна дев. грешке естимације позиције за различите алгоритме филтрирања (аутоконволуција, аутоконволуција са квантизацијом, прилагођени Гаус, без филтрирања) у зависности од ширине рефлексије за SNR = 12 dB



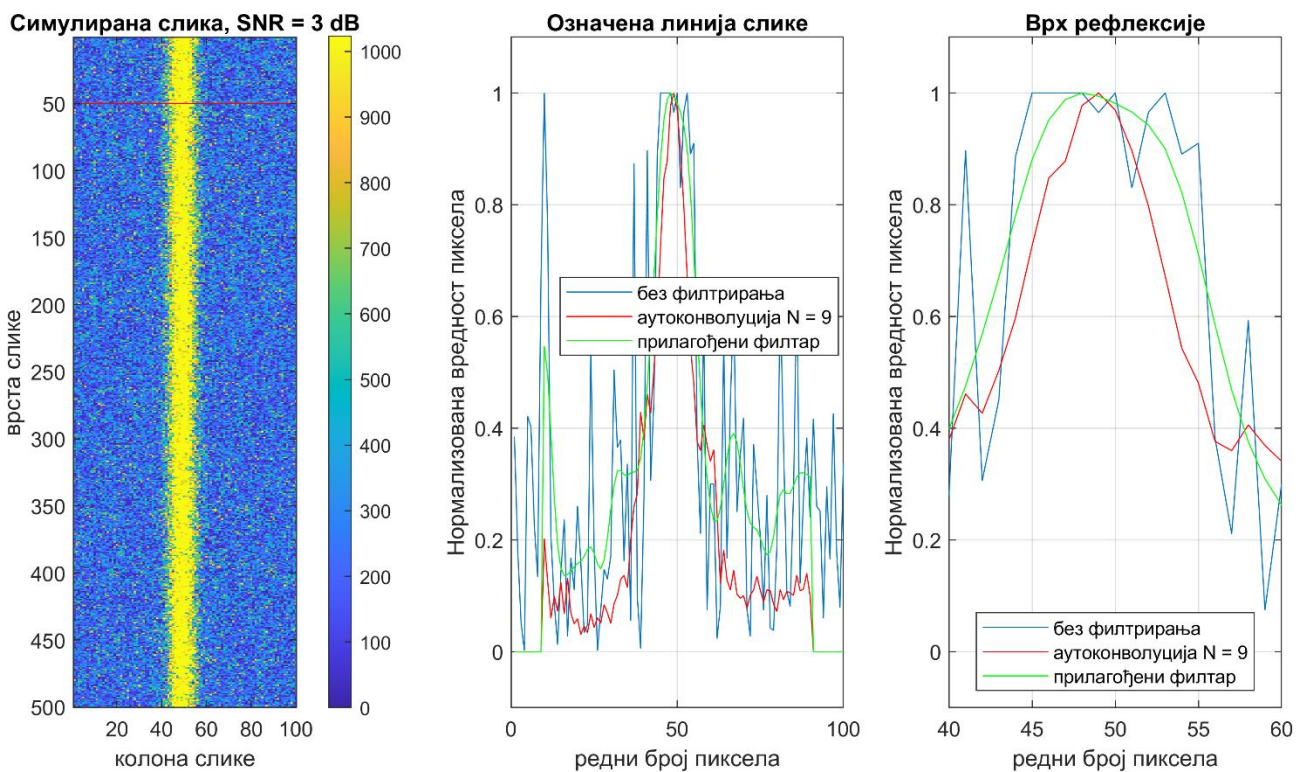
Слика 82. Стандардна дев. грешке естимације позиције за различите алгоритме филтрирања (аутоконволуција, аутоконволуција са квантизацијом, прилагођени Гаус, без филтрирања) у зависности од ширине рефлексије за SNR = 15 dB



Слика 83. Стандардна дев. грешке естимације позиције за различите алгоритме филтрирања (аутоконволуција, аутоконволуција са квантизацијом, прилагођени Гаус, без филтрирања) у зависности од ширине рефлексије за SNR = 18 dB



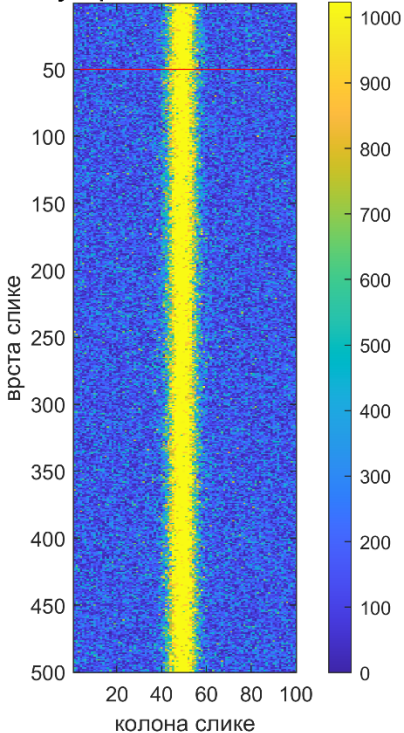
Слика 84. Стандардна дев. грешке естимације позиције за различите алгоритме филтрирања (аутоконволуција, аутоконволуција са квантизацијом, прилагођени Гаус, без филтрирања) у зависности од ширине рефлексије за SNR = 21 dB



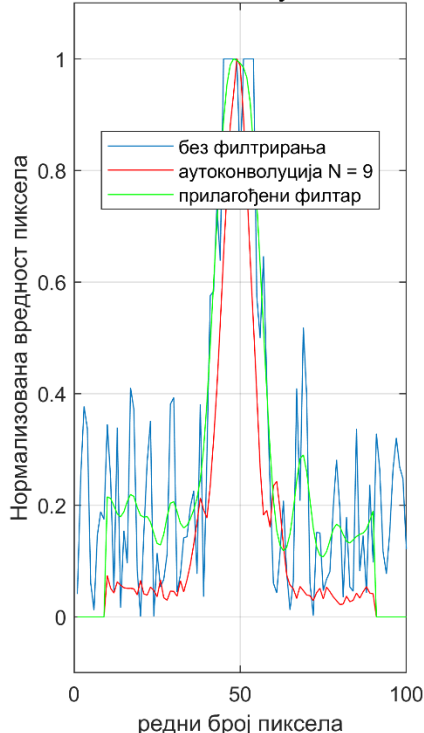
Слика 85. Симулирана слика (лево) за SNR = 3 dB. Пример линије слике, на слици лево означена црвеном бојом (средина). Увеличан врх рефлексије за различите алгоритме филтрирања (десно)



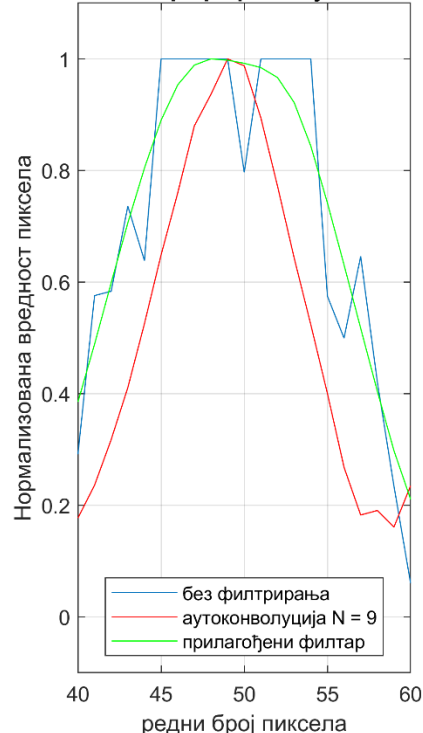
Симулирана слика, SNR = 6 dB



Означена линија слике

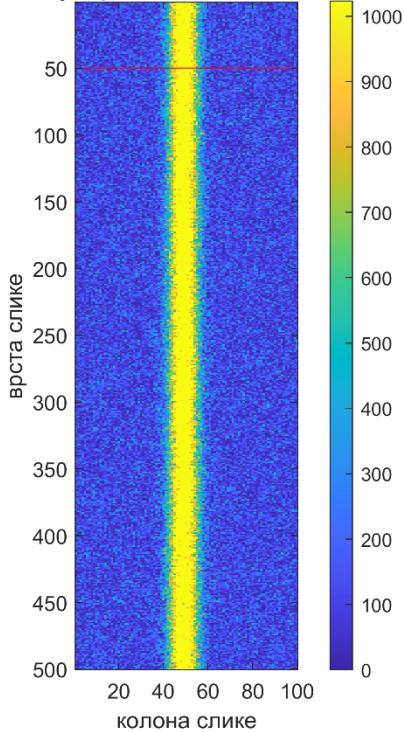


Врх рефлексије

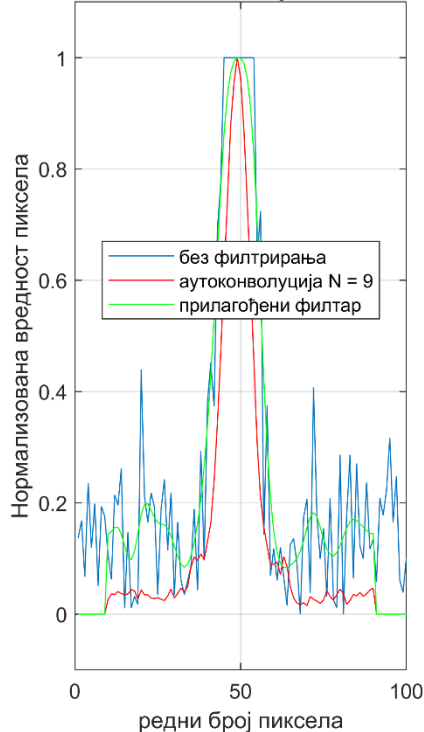


Слика 86. Симулирана слика (лево) за SNR = 6 dB. Пример линије слике, на слици лево означена црвеном бојом (средина). Увеличан врх рефлексије за различите алгоритме филтрирања (десно)

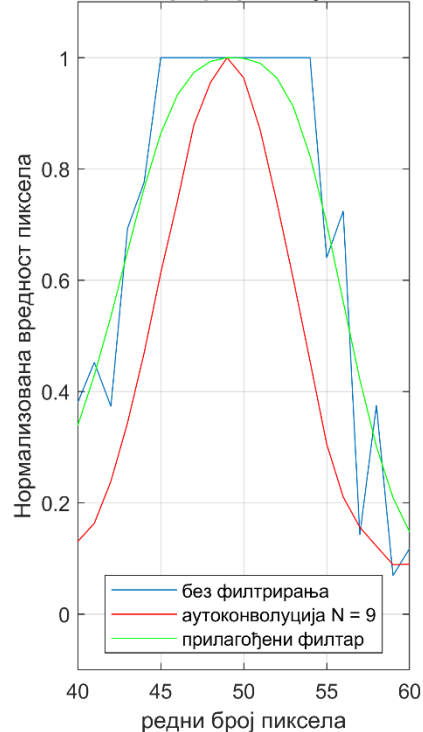
Симулирана слика, SNR = 9 dB



Означена линија слике



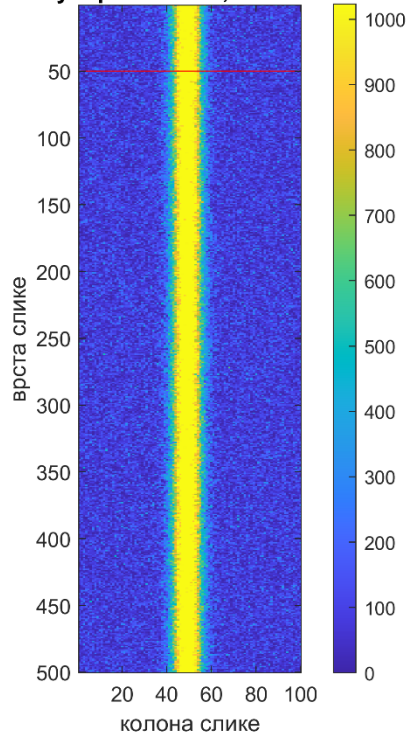
Врх рефлексије



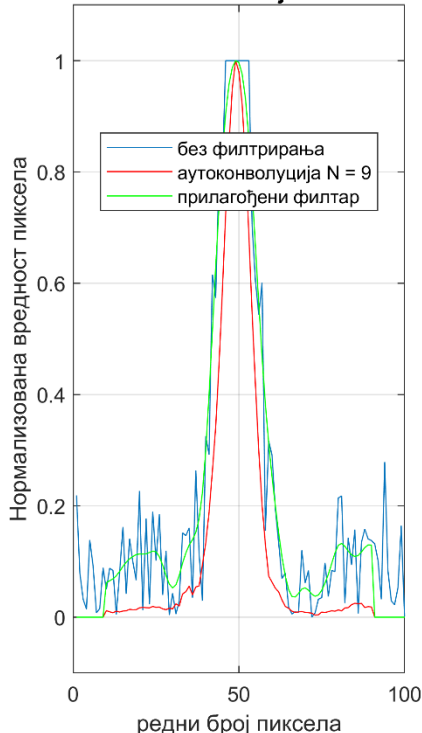
Слика 87. Симулирана слика (лево) за SNR = 9 dB. Пример линије слике, на слици лево означена црвеном бојом (средина). Увеличан врх рефлексије за различите алгоритме филтрирања (десно)



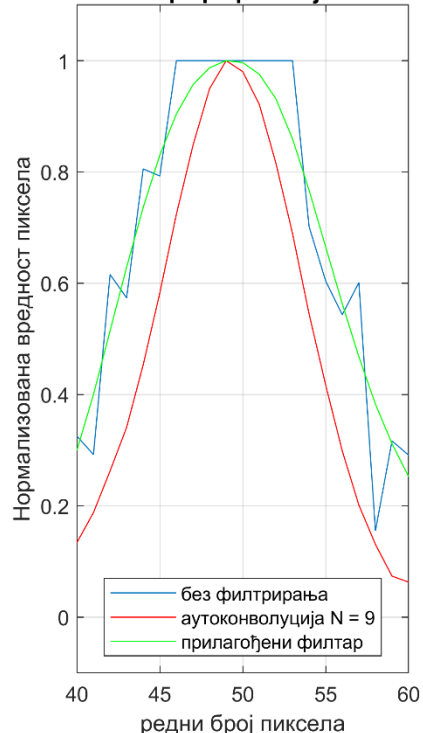
Симулирана слика, SNR = 12 dB



Означена линија слике

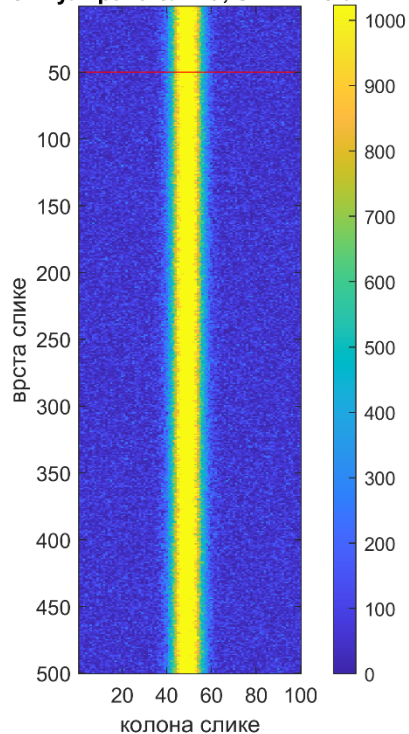


Врх рефлексије

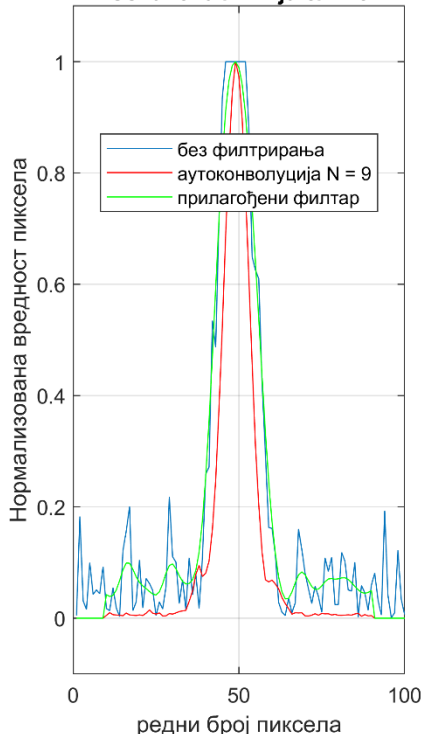


Слика 88. Симулирана слика (лево) за SNR = 12 dB. Пример линије слике, на слици лево означена црвеном бојом (средина). Увећан врх рефлексије за различите алгоритме филтрирања (десно)

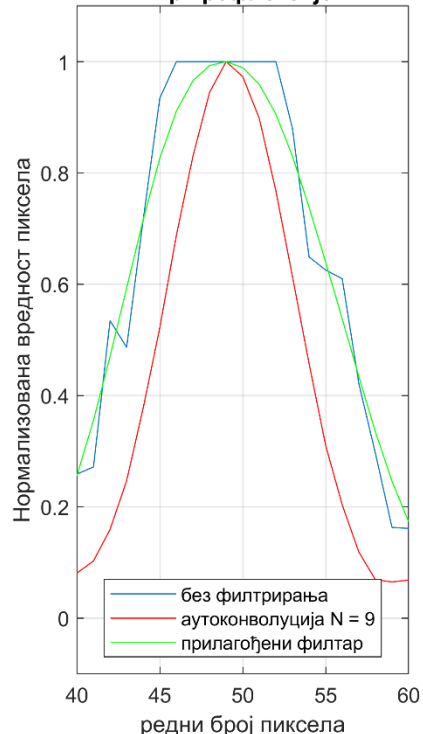
Симулирана слика, SNR = 15 dB



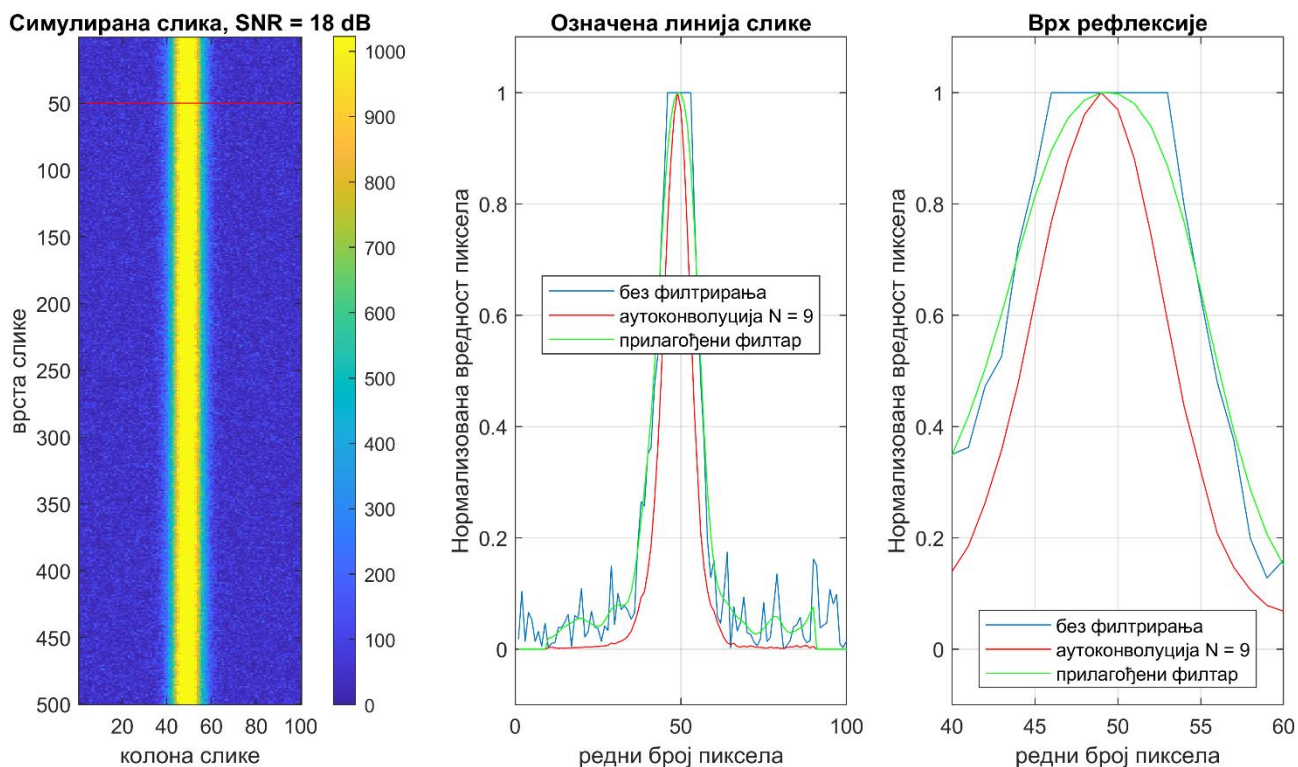
Означена линија слике



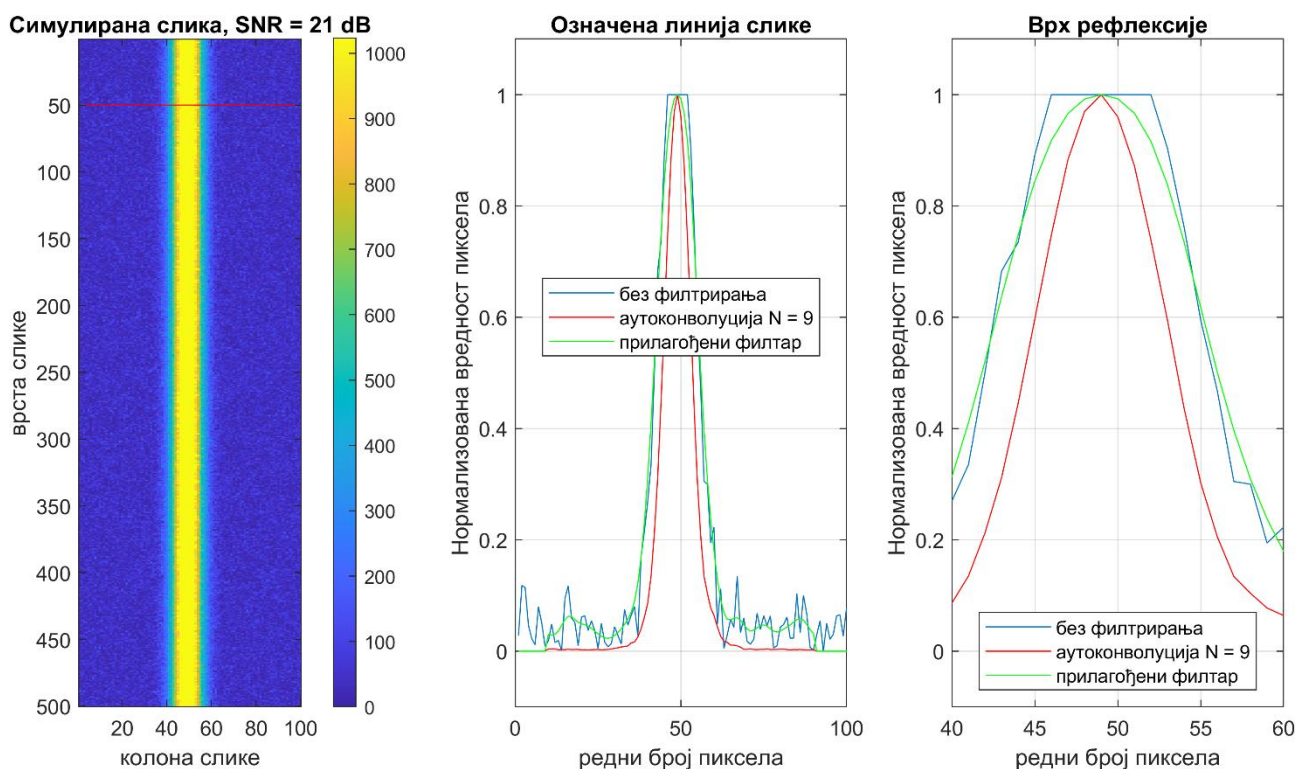
Врх рефлексије



Слика 89. Симулирана слика (лево) за SNR = 15 dB. Пример линије слике, на слици лево означена црвеном бојом (средина). Увећан врх рефлексије за различите алгоритме филтрирања (десно)



Слика 90. Симулирана слика (лево) за SNR = 18 dB. Пример линије слике, на слици лево означена црвеном бојом (средина). Увеличан врх рефлексије за различите алгоритме филтрирања (десно)



Слика 91. Симулирана слика (лево) за SNR = 21 dB. Пример линије слике, на слици лево означена црвеном бојом (средина). Увеличан врх рефлексије за различите алгоритме филтрирања (десно)

## БИОГРАФИЈА

Богдан Р. Марковић рођен је 06.11.1987. године у Ваљеву, Република Србија. Основну школу „Браћа Недић“ у Осечини је завршио 2002. године као носилац Вукове дипломе, где је освајао бројне награде на општинским и градским такмичењима из математике и физике. Ваљевску гимназију је завршио 2006. као носилац Вукове дипломе и ђак природно-математичког смера. Учествовао је на бројним градским и републичким такмичењима из математике и физике.

Електротехнички факултет Универзитета у Београду, одсек за телекомуникације и информационе технологије, смер системско инжењерство, завршио је у јуну 2010. године са просечном оценом 8.82. Дипломски рад под називом „Формирање RINEX датотеке помоћу GPS-а AC12“ одбранио је са оценом 10, чиме је стекао академско звање Дипломирани инжењер електротехнике.

На дипломске академске-мастер студије, смер системско инжењерство и радио комуникације уписао се у октобру 2010. године на Електротехничком факултету Универзитета у Београду. Положио је све предмете предвиђене планом и програмом са просечном оценом 9. Мастер рад под називом „Симулација и анализа LPI радарских система Wigner-Ville методом“, одбранио је са оценом 10, чиме је стекао академско звање мастер.

На докторским академским студијама на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, смер телекомуникације, положио је све предмете предвиђене наставним планом са просечном оценом 10. Аутор је више научних и стручних радова од којих је један објављен на СЦИ листи.

Од септембра 2010. године био је запослен у домаћој фирми Bitgear Wireless Design Services д.о.о. где је радио на многобројним пројектима:

- Био је део тима који је радио на *Horizon 2020* пројекту „*Ultrawide band indoor positioning system*“ и био задужен за развоје новог алгоритма за „*indoor*“ позиционирање који је био базиран на технологијама широкопојасног спектра.
- Радио је на развоју новог уређаја за „*indoor*“ позиционирање базираног на технологији ултразвука у комбинацији са инерцијалним сензорима где је радио на развоју нових алгоритама и обради сигнала.
- Био је део тима који је радио развој ултра-осетљивог *AM, FM, SSB* и *CW SDR (Software Defined Radio)* радио уређаја у сарадњи са домаћом фирмом Ирител из Београда.
- Велики део своје каријере посветио је развоју индустријских профилних скенера где је радио на развоју и имплементацији нових алгоритама за брзу обраду сигнала са индустријских камера на *FPGA* платформама.

- Радио је на пројекту развоја новог 3D скенера базираног на принципу структуралног светла, при чему је главни задатак био имплементација брзих алгоритама за процесирање 3D облака тачака.
- Развоју новог медицинског уређаја за лечење малигнух тумора, базираног на ултразвучним сондама где се бавио њиховом синхронизацијом и оптимизацијом таласних облика.
- Радио је на развоју прототипа „*VR headset*“ уређаја последње генерације високе резолуције са екстремно малим временом освежавања слике.

Од маја 2022. године је био запослен као сениор инжењер у фирми Tannera technologies d.o.o. где је радио на развоју нових алгоритама за обраду сигнала из области DRM30 стандарда базираног на OFDM технологији.

Од јануара 2023. године је директор фирме wenglor sensoric d.o.o са седиштем у Београду, где је наставио свој рад на истраживању нових алгоритама за обраду сигнала у области рефлексије ласерске линије код профилних скенера.

## Изјава о ауторству

Име и презиме аутора: Богдан Марковић

Број индекса: 21/5009

### Изјављујем

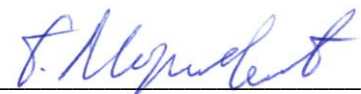
да је докторска дисертација под насловом:

#### **Нов алгоритам за обраду и естимацију позиције рефлексije ласерске линије код профилних скенера на наменској платформи**

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да дисертација у целини ни у деловима није била предложена за стицање друге дипломе према студијским програмима других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио/ла интелектуалну својину других лица.

Потпис аутора

У Београду, \_\_\_\_\_ 23.10.2023. \_\_\_\_\_



## **Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада**

Име и презиме аутора: Богдан Марковић

Број индекса: 21/5009

Студијски програм: Телекомуникације

Наслов рада:

### **Нов алгоритам за обраду и естимацију позиције рефлексije ласерске линије код профилних скенера на наменској платформи**

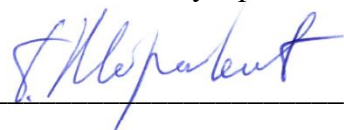
Ментор: Проф. др Јелена Ђертић

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла ради похрањивања у **Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског назива доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис аутора



У Београду, \_\_\_\_\_ 23.10.2023. \_\_\_\_\_

## Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:  
Нов алгоритам за обраду и естимацију позиције рефлексије ласерске линије код профилних скенера на наменској платформи  
која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

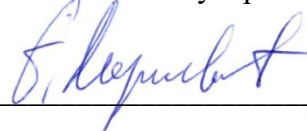
Моју докторску дисертацију похрањену у Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду и доступну у отвореном приступу могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство (CC BY)
2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)
- ③ Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)
5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)
6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци. Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве).

У Београду, \_\_\_\_\_ 23.10.2023. \_\_\_\_\_

Потпис аутора



1. **Ауторство.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.
2. **Ауторство – некомерцијално.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.
3. **Ауторство – некомерцијално – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.
4. **Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.
5. **Ауторство – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.
6. **Ауторство – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода