

Važnost lidar sustava u unapređenju autonomnih vozila

Tomljanović, Roko

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies, Rijeka / Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:187:799706>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-20**



Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet
University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies

Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies - FMSRI Repository](#)



**SVEUČILIŠTE U RIJECI
POMORSKI FAKULTET U RIJECI**

ROKO TOMLJANOVIĆ

**VAŽNOST LIDAR SUSTAVA U UNAPRJEĐENJU
AUTONOMNIH VOZILA**

ZAVRŠNI RAD

Rijeka, 2021.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
POMORSKI FAKULTET U RIJECI**

**VAŽNOST LIDAR SUSTAVA U UNAPRJEĐENJU
AUTONOMNIH VOZILA
THE IMPORTANCE OF THE LIDAR SYSTEM IN THE
IMPROVEMENT OF AUTONOMOUS VEHICLES
ZAVRŠNI RAD**

Kolegij: Inteligentni transportni sustavi

Mentor: doc. dr. sc. Jasmin Čelić

Student/studentica: Roko Tomljanović

Studijski smjer: Elektroničke i informatičke tehnologije u pomorstvu

JMBAG: 0112073511

Rijeka, kolovoz 2021.

Student: Roko Tomljanović

Studijski program: Elektroničke i informatičke tehnologije u pomorstvu

JMBAG: 0112073511

IZJAVA O SAMOSTALNOJ IZRADI ZAVRŠNOG RADA

Kojom izjavljujem da sam završni rad s naslovom “Važnost lider sustava u unaprjeđenju autonomnih vozila ” izradio/la samostalno pod mentorstvom doc. dr. sc. Jasmin Čelić

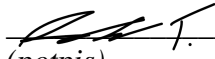
U radu sam primijenio/la metodologiju izrade stručnog/znanstvenog rada i koristio/la literaturu koja je navedena na kraju završnog rada. Tuđe spoznaje, stavove, zaključke, teorije i zakonitosti koje sam izravno ili parafrazirajući naveo/la u završnom radu na uobičajen, standardan način citirao/la sam i povezo/la s fusnotama i korištenim bibliografskim jedinicama, te nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Rad je pisan u duhu hrvatskoga jezika.

Suglasan/na sam s trajnom pohranom završnog rada u cjelovitom tekstu u mrežnom digitalnom repozitoriju Pomorskog fakulteta Sveučilišta u Rijeci te Nacionalnom repozitoriju Nacionalne i sveučilišne knjižnice.

Za navedeni rad dozvoljavam sljedeće pravo i razinu pristupa mrežnog objavljivanja:

- a) rad u otvorenom pristupu
- b) pristup svim korisnicima sustava znanosti i visokog obrazovanja RH
- c) pristup korisnicima matične ustanove
- d) rad nije dostupan

Student/studentica



(potpis)

Roko Tomljanović

SAŽETAK

Autonomna vozila (AV) su sva vozila koja imaju mogućnost sigurno se kretati prometnicama i interpretirati prometne uređaje bez aktivnog sudjelovanja vozača. Ova novija vrsta tehnologije razvijena je s ciljem smanjenja broja prometnih nesreća kao i broja smrtnih slučajeva koji su uzrokovani pogreškom korisnika odnosno operatera. Postoje ukupno šest razina autonomije, a za postizanje autonomnosti vozila potrebna je umjetna inteligencija za procesuiranje i integraciju podataka iz mnoštva senzora kao što su kamere, mikrovalni radar, ultrazvučni senzor te laserski radar također poznat kao lidar koji je ujedno i najčešće korišten te se smatra najvažnijim dijelom autonomnih vozila. Lidar čini skraćenicu engleskog naziva "light detection and ranging" te označava senzor metodu koja uočava objekte te mapira njihove udaljenosti. Podjela lidar-a vrlo je složena, a različite vrste imaju različite principe rada. Kako bi shvatili važnost lidar sustava kod autonomnih vozila potrebno je razumjeti kako on radi.

Ključne riječi: autonomna vozila, lidar, laser

SUMMARY

Autonomous vehicles (AV) are all vehicles that have the ability to navigate roads and interpret traffic devices without the active participation of driver. This newer type of technology has been developed with the aim of reducing the number of traffic accidents as well as the number of deaths caused by user or operator error. There are a total of six different levels of autonomy, and to achieve vehicle autonomy it requires artificial intelligence to process and integrate data from a multitude of sensors such as cameras, microwave radar, ultrasonic sensor and laser radar which is also commonly known as lidar and often considered as the most important part of autonomous vehicles. Lidar is abbreviated of "light detection and ranging" which means a sensor method that detects objects and maps their distances. Classification of lidar is very complex, and different types have different working principles. In order to understand the importance of the lidar system in autonomous vehicles it is necessary to understand how it works.

Key words: autonomous vehicles, lidar, laser

SADRŽAJ

| | |
|--|-----------|
| SAŽETAK | I |
| SADRŽAJ | II |
| 1. UVOD | 1 |
| 2. AUTONOMNA VOZILA | 3 |
| 2.1. ŠTO SU AUTONOMNA VOZILA | 3 |
| 2.1.1. Povijest autonomnih vozila | 4 |
| 2.2. RAZINE AUTONOMNE VOŽNJE/AUTONOMNIJE | 5 |
| 2.3. SENZORI AUTONOMNIH VOZILA | 9 |
| 2.4. PREDNOSTI I NEDOSTACI AUTONOMNIH VOZILA..... | 11 |
| 3. LIDAR KOD AUTONOMNIH VOZILA | 13 |
| 3.1. USPOREDBA LIDAR, SONAR I RADAR SUSTAVA | 13 |
| 3.2. KLASIFIKACIJA LIDAR-A | 14 |
| 3.2.1. TOF lidar | 15 |
| 3.2.1.1. Skenirajući lidar..... | 15 |
| 3.2.1.2. Flash lidar | 20 |
| 3.2.2. Koherentni lidar..... | 22 |
| 4. PRINCIP RADA LIDAR-a | 24 |
| 4.1. STVARANJE MAPE VISOKE RAZLUČIVOSTI | 26 |
| 4.1.1. Stvaranje jednog kadra mape | 27 |
| 4.1.2. Stvaranje više kadrova mape | 29 |
| 5. VALNE DULJINE, LASERI I DETEKTORI ZA LIDAR | 32 |
| 5.1. VALNE DULJINE | 32 |
| 5.2. LASERI | 33 |
| 5.2.1. Vlasknasti laser | 33 |
| 5.2.2. Mikročip laser..... | 34 |
| 5.2.3. Diodni laser | 34 |
| 5.3. FOTODETEKTORI | 35 |
| 5.3.1. PIN fotodioda..... | 36 |
| 5.3.2. Lavinska fotodioda..... | 36 |

| | |
|---|-----------|
| 5.3.3. Jednofotonska lavinska fotodioda..... | 36 |
| 5.3.4. Si fotomultiplikator | 36 |
| 6. TROŠKOVI I BUDUĆNOST LIDAR SUSTAVA..... | 38 |
| 6.1. TROŠKOVI LIDAR SUSTAVA | 38 |
| 6.2. BUDUĆNOST LIDAR SUSTAVA | 38 |
| 7. ZAKLJUČAK..... | 39 |
| LITERATURA | 40 |
| KAZALO KRATICA..... | 43 |
| POPIS GRAFIKONA | 44 |
| POPIS PRIKAZA..... | 44 |
| POPIS SHEMA..... | 44 |

1. UVOD

Većina ljudi danas posjeduje vozačku dozvolu te iako to označava pozitivan razvoj, potrebno je osvrnuti se i na sigurnost zbog toga što, iako su položili vozačke ispite, nisu svi ljudi dobri vozači. Nesigurnost na cestama očituje se u broju prometnih nesreća koji je u stalnom porastu. Govoreći o prometnim nesrećama, samo u Sjedinjenim Američkim Država godišnje pogine preko 35 000 ljudi, dok neki autori navode i 37 000 ljudi. Osim gubitka velikog broja ljudskih života, posljedice automobilskih nesreća uočljive su u društvenom i ekonomskom području [1, 2]. Nadalje, više od 90% nesreća smatra se da je uzrokovano ljudskim pogreškama - prebrza vožnja, umor, vožnja u pijanom stanju, ometana vožnja itd. Autonomna vozila mogu smanjiti prometne nesreće za 90% te na taj način spasiti više od 30 000 ljudskih života samo u Sjedinjenim Državama [1]. Današnji proizvođači automobilske industrije opremaju automobile sve naprednijom tehnologijom upravo s ciljem smanjivanja broja prometnih nesreća. Pritom koriste širok raspon tehnologija kao što su sustavi upozorenja i izbjegavanja sudara, sustavi upozorenja za mrtvi kut, tempomat, pomoć pri održavanju prometne trake, upozorenja o napuštanju prometne trake itd. Navedene tehnologije karakteriziraju značajke koje pomažu vozačima tijekom njihove vožnje te automatiziraju određene zadatke tijekom vožnje. Osnovna svrha tehnologija koje su ugrađene u modernije automobile je sigurnija vožnja te sprječavanje prometnih nesreća odnosno smanjivanje njihova broja [3]. Nadalje, mobilnost onih koji ne mogu voziti biti će značajno povećana, bilo da se radi o onima koji zbog svoje starosti odnosno mladosti ne mogu voziti, bilo da zbog zdravstvenih razloga ili smanjenog samopouzdanja ne mogu upravljati automobilom [2]. Istraživači diljem svijeta tvrde da će do 2025 godine biti barem 8 milijuna autonomnih ili poluautonomnih vozila [4].

Prije nego što se autonomna vozila mogu preoblikovati za promet, istraživači moraju potvrditi sigurnost i pouzdanost ovih vozila. Potpuno autonomni automobili moraju planirati najbolji put do odredišta, osigurati sigurnu vožnju kao i učinkovitu potrošnju energije. Proizvođači za navedeno koriste kamere, ultrazvučne senzore, radare te, kao središte senzornih sustava autonomnih vozila, koriste lidar sustav. Lidar kod autonomnih vozila omogućuje uočavanje manjih objekata što je jedna od ključnih komponenti za gradsku vožnju uz pješake i bicikliste [2].

Ovaj rad će se sastojati od dva ključna dijela. U prvom dijelu pobliže će se objasniti termin autonomnih vozila, njihove prednosti i nedostaci, ali i razine autonomije. Drugi dio rada prikazati će složeni senzorski sustav koji se smatra temeljem autonomnih vozila - lidar. Nastojat će se pobliže objasniti što je lidar sustav te kako glasi njegova podjela. U radu će također biti objašnjen princip rada lidar-a te će na kraju biti riječ o troškovima i budućnosti ovog senzorskog sustava.

2. AUTONOMNA VOZILA

Govoreći o lidar -u kod autonomnih vozila, potrebno je razumjeti termin autonomna vozila - što su oni te kako glasi njihova povijest. U nastavku teksta slijedi opis istoga uz prikaz razina autonomije te prikaz prednosti i nedostataka autonomnih vozila.

2.1. ŠTO SU AUTONOMNA VOZILA

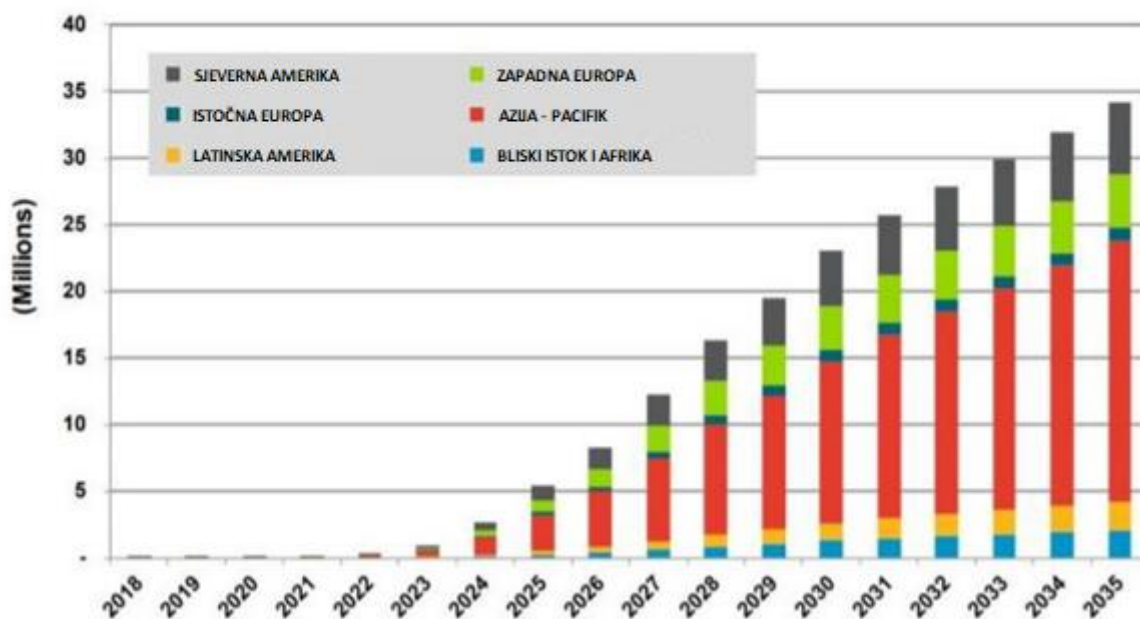
Autonomna vozila (AV) su sva vozila koja imaju mogućnost navigirati prometnicama i interpretirati prometne uređaje bez aktivnog sudjelovanja vozača. Iako ova definicija isključuje vozila s djelomičnom automatizacijom (objašnjeno u nastavku), drugi autori smatraju da i oni pripadaju u skupinu autonomnih vozila [1]. Autonomna vozila pripadaju u noviju vrstu tehnologija koja je razvijena s ciljem štednje energije te smanjenja broja smrtnih slučajeva koji su uzrokovani pogreškom korisnika odnosno operatera [5]. Više od 35000 smrtnih slučajeva i 2.4 milijuna slučajeva ozljeda nastalih posljedicom automobilskih nesreća u Sjedinjenim Američkim Državama, od kojih se čak 94% pripisuje isključivo ljudskoj pogrešci. Nadalje, broj smrtnih slučajeva u automobilu porastao je u razdoblju od 2014. do 2016. godine za 14% u SAD-u, a kao razlog navodi se upotreba mobilnih uređaja i ometana vožnja. Eliminacijom čovjeka kao operatera vozilom smanjuje se mogućnost nastajanja nesreća čime se dokazuje da su autonomna vozila uistinu revolucionarni napredak u tehnologiji [2, 5]. Tehnologija koju koriste autonomna vozila na različite načine mjere i tumače okolinu oko samih vozila [5]. Za postizanje autonomnosti vozila potrebna je umjetna inteligencija za procesuiranje i integraciju podataka iz mnoštva senzora kao što su kamere, mikrovalni radar, ultrazvučni senzor te laserski radar također poznat kao lidar koji je ujedno i najčešće korišten. Svaki od navedenih senzora ima pozitivne i negativne strane. Ultrazvučni senzori su korisni za prepoznavanje prepreka prilikom parkiranja vozila no nemaju domet za korištenje prilikom vožnje zbog toga što oni slabe nakon nekoliko metara, koriste se prvenstveno za otkrivanje objekata kratkog dometa [3]. Kamere vrlo dobro prikazuju okolinu u kojoj se vozilo nalazi no ne mogu mjeriti daljinu i brzinu. Mikrovalni radar ima mogućnost mjerenja daljine i brzine, no ima vrlo ograničenu rezoluciju. Lidar određuje udaljenost te stvara oblak točaka lokalnog okoliša s glavnim nedostatkom njegove visoke cijene [5, 6].

2.1.1. Povijest autonomnih vozila

Neki autori smatraju da je povijest autonomnih vozila započela je 1977. godine u Japanu, no pioniri ove tehnologije smatraju njemačkog profesora aeronautike Ernstom Dickmannsom koji je sa svojim timom početkom 1980-tih preuredio Mercedesov kombi dodajući mu kamere i ostale senzore kako bi omogućili upravljanje upravljača, mjenjača i kočnica korištenjem kompjuterskih naredbi [7].

Međutim, prema Andersonu i Rang Corporation, povijest autonomnih vozila dijeli se na tri osnovne, ali vrlo različite faze te je prva faza autonomnih vozila trajala od 1980. do 2003. godine. Tih godina sveučilišni istraživački centri su u suradnji s automobilskim i prijevoznim tvrtkama i agencijama pokrenula istraživanja o autonomnim vozilima i autonomnom prijevozu općenito. Istraživanja su dovela do dvije vrlo važne spoznaje. Prva je da autonomna vozila ovise o automatiziranim sustavima autocesta kao i infrastrukturi autocesta, dok je druga spoznaja bila razvoj poluautonomnih i potpuno autonomnih vozila koja će vrlo malo ovisiti o infrastrukturi autocesta ili neće ovisiti uopće [1]. Druga faza razvoja autonomnih vozila trajala je od 2003. do 2007. godine te je ona obilježena velikim izazovom pod nazivom DARPA izazov (engl. DARPA challenges). Agencija Sjedinjenih američkih država za zaštitu naprednih istraživačkih projekata (DARPA, the United States Defence Advanced Research Projects Agency) organizirala je tri velika izazova (engl. Grand Challenges) s ciljem razvoja tehnologija autonomnih vozila. Organizirajući ove izazove, DARPA je ubrzala napredak u razvoju novih tehnologija te motivirala proizvođače i istraživače, ali i potakla znatiželju javnosti. Izazovi su se organizirali na način da je svaki tim zasebno trebao razviti potpuno autonomno vozilo, a zatim prijeći utrku udaljenosti od 150 milja. Prvu utrku 2004. godine nije uspjelo proći niti jedno autonomno vozilo te je najbolji istraživački tim dosegao 8 milja. Veliki napredak je bio 2007. godine kada je na tzv. Urban Challenge šest istraživačkih timova uspjelo prijeći ukupnu stazu od 60 milja. U toj utrci osim samog prelaska udaljenosti, timovi su morali voziti zajedno, jedni uz druge, poštujući prometna i sigurnosna pravila i znakove. DARPA izazovi pokazali su se krucijalnim u napretku senzorskih sustava, algoritama te općenito za razvoj autonomnih vozila. Treća faza razvoja autonomnih vozila označava komercijalni razvoj. Naime, nakon što su DARPA izazovi učvrstili budućnost autonomnih vozila, logičan slijed bio je partnerstvo s proizvođačima automobila te obrazovnih sektora, primjerice partnerstvo Volkswagena i Sveučilišta Stanford. Google je također doprinio napretku autonomnih vozila na način da su potakli inicijativu komercijalnih istraživanja te su pokrenuli kampanje za

demonstraciju primjene ove tehnologije [1]. Istraživači diljem svijeta tvrde da će do 2025. godine biti barem 8 milijuna autonomnih ili poluautonomnih vozila [4], dok prema istraživanju iz 2019. godine (NHTSA prema Navigant) razvoj autonomnih vozila označava ekspanzivan porast te potpuno autonomna vozila su budućnost, a na grafikonu 1 možemo vidjeti i procjene razvoja autonomnih vozila po područjima svijeta.



Grafikon 1. Procijenjeni razvoj autonomnih vozila (AV) po različitim područjima

Izvor: *Highly Automated or “Self-Driving” Vehicles*, U.S. Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration, https://www.nhtsa.gov/sites/nhtsa.gov/files/documents/14269-overview_of_automated_vehicle_technology_042319_v1b.pdf (06.07.2021.)

2.2. RAZINE AUTONOMNE VOŽNJE/AUTONOMNIJE

Termin “autonomno vozilo” (AV) vrlo je širok pojam te upravo zbog širine značenja, tvrtke automobilske industrije koriste se stupnjevima ili razinama autonomije koje su jasno vrlo jasno definirane [8]. Postoje je šest stupnjeva autonomije koje je definiralo Društvo automobilskih inženjera (engl. SAE, Society of Automotive Engineers) prema kojima proizvođači vozila određuju u koju kategoriju pripadaju. Prvi (nulti) stupanj (engl. Level 0) označava potpuno manualna vozila dok posljednji (peti) stupanj označava potpuno autonomna vozila [4]. Ovi stupnjevi opisuju funkcije koje autonomni sustav mora preuzeti

od vozača, ali ne opisuju kako se ti stupnjevi odnosno funkcije moraju ostvariti. Različiti načini prepoznavanja okoline i objekata ostaju proizvođaču na izbor. Neki proizvođači će za prepoznavanje pješaka i ostalih prepreka u okolini primjenom video kamera dok će drugi primjerice koristiti lidar, neku drugu vrstu senzora poput radara ili kombinaciju više njih [8, 9].

Razine autonomije odnosno šest razina (ili stupnjeva) autonomije opisuju se na razinama od 0 do 5. Razina 0 (engl. Level 0) naziva se i neautonomna razina upravo zbog izostanka automatizacije u vožnji. Drugim riječima, vozač je jedini koji upravlja vozilom odnosno vozač upravlja potpuno i samostalno, ručno upravljajući i kontrolirajući vožnju. Vozila s razinom 0 mogu imati tehnologije poput ABS-a, sustav za pomoć pri kretanju na uzbrdici i slične koje mogu pomoći vozaču da vožnja bude sigurnija, ali i ugodnija. Ove tehnologije nisu svjesne svoje okoline već reagiraju na jednostavne ulaze (inpute) automobilskih senzora. Također, kočenje u slučaju nužde aktivira se binarno te, s obzirom da ne upravlja automobilom aktivno, pripada u razinu 0. Trenutno, većina populacije koristi automobile s upravo ovom razinom čime je ona najčešće korištena u svijetu [8, 9, 10].

Sljedeća razina je razina 1 (engl. Level 1). Autonomija ove razine uključuje automatizaciju pojedinih parametara same vožnje, primjerice automatizacija elektronskih pomoćnih sustava kočenja ili elektronske kontrole stabilnosti, koji u pojedinim situacijama mogu preuzeti ili oduzeti upravljanje automobilom [9]. Ovu razinu autonomije ima većina modernih automobila, no ona se smatra najnižom razinom automatizacije upravljanjem vozilom zbog toga što vozilo samo pomaže vozaču prilikom upravljanja njegovim vozilom ili pri usporavanju odnosno ubrzanju [4, 10]. Vozila koja imaju ovu razinu autonomije mogu primjerice imati adaptivnu kontrolu brzine kojom vozilo održava sigurni razmak u odnosu na vozilo ispred sebe dok vozač i dalje upravlja vozilom te nadgleda okolinu [8, 9].

Razina 2 (engl. Level 2) označava djelomičnu automatizaciju u kojem sustav istovremeno upravlja vozilom (održava vozilo u prometnoj traci) te usporava ili ubrzava kada je to potrebno kako bi zadržao sigurni razmak od vozila ispred sebe [8, 9]. Ova razina podrazumijeva da najmanje dva elementa moraju biti automatizirana te da oni moraju raditi kooperativno. Na taj način, vozač se oslobađa od upravljanja tim funkcijama, iako vozač u svakom trenutku može preuzeti kontrolu nad upravljanjem vozilom te nadići sam sustav odnosno automatizaciju [8, 9 10]. Kao primjer djelomične automatizacije upravljanja

vozilom odnosno razine 2, navodi se Teslin Autopilot - General Motorsov Super Cruise [4, 8, 10].

Sljedeći stupanj autonomije je razina 3 (engl. Level 3) koja se naziva i uvjetnom automatizacijom. Vozilo ove razine svjesno je okoline odnosno prometnice, drugih vozila na prometnicama te objektima u neposrednoj blizini, te preuzima svu kontrolu od vozača, dok se od vozača traži da povremeno djeluje u kritičnim, zahtjevnim situacijama. Vozilo uvjetne automatizacije može samostalno preteći i zaobići vozilo koje se kreće sporije od njega. Važno je napomenuti da vozač u svakom trenutku može preuzeti kontrolu nad upravljanjem te na taj način zaustaviti radnje vozila. Prvi (komercijalno) dostupni automobil s uvjetnom automatizacijom je Audi A8L, a njegov sustav naziva se Traffic Jam Pilot. Iako europsko tržište ima omogućenu razinu 3 autonomije ovoga automobila, na američkom tržištu ona je smanjena na razinu 2 zbog zakonodavnih razloga [8, 9].

Sljedeći stupanj autonomije je razina 4 (engl. Level 4) te se vozilo s razinom autonomije 4 naziva vozilom visoke razine autonomije odnosno automatiziranosti. Ova razina označava početak prave autonomije vozila u kojoj vozač nije potreban kroz cijelu vožnju već on samo intervenira po potrebi [10]. Vozilo visoke razine autonomije samostalno izvršava zadatke s tri stajališta: operacijskog aspekta koji uključuje ubrzavanje, kočenje, upravljanje itd., taktičkog aspekta koji uključuje davanje signala, promjena cestovne trake itd. te reakcija na opasnost. Sustavi su na taj način u mogućnosti samostalno voziti, prepoznati stanje u okolini, intervenirati u iznenadnim situacijama (primjerice iznenadni prelazak pješaka preko prometne trake). Međutim, vozilo ima ugrađen i sustav za ručno upravljanje te ukoliko je situacija kompleksna, vozilo može zatražiti interakciju upravitelja odnosno vozača te vozač može preuzeti kontrolu u svakom trenutku vožnje [8, 9]. Trenutno se vozila visoke razine autonomije koriste za kratke relacije za usluge komercijalnog prijevoza, primjerice na relaciji od aerodroma do hotela. Autonomija koja je geografski ograničena na manji prostor naziva "geofencing". Tvrtnke koje trenutno imaju dostupna vozila s ovom razinom autonomije su primjerice NAVYA (francuska tvrtka) koja koristi električne taksije u SAD-u, Alphabetov Waymo koji koristi taksije u Arizoni.

Posljednji stupanj autonomije je razina 5 (engl. Level 5) koji označava potpuno autonomno vozilo. Vozač tada samo unosi željeno odredište te put ka njemu, dok sve ostale funkcije vozilo obavlja samostalno s maksimalnom razinom pouzdanosti neovisno o vremenskim uvjetima ili stanju prometa [9]. Drugim riječima, vozilo s potpunom automatizacijom

samostalno obavlja sve funkcije bez sudjelovanja vozača, a ljudi u njemu su isključivo samo putnici. Također, potpuno autonomno vozilo (ili vozilo s razinom autonomije 5) može prometovati i bez prisutnosti vozača te niti nema sustav za ručnu kontrolu [10]. Vozila ove razine autonomije nije moguće kupiti te ne postoji u serijskoj kao ni u maloserijskoj proizvodnji [8].

Trenutna vozila koja koriste autonomnu vožnju pripadaju razinama autonomije 2 ili 3, dok ostale razina ostaju nerazvijene te su upravo te razine cilj koji se želi postići u automobilskoj industriji [8, 6]. Visoko i potpuno autonomna vozila (vozila razine 4 i 5) koriste više senzorskih tehnologija kako bi stvorili kratku i dugu mapu (engl. long i short range map) okruženja vozila pod nizom različitih vremenskih uvjeta kao i različitih uvjeta osvjetljenja. Tehnologije se ne trebaju samo nadopunjavati već se, fuzijom senzora, one trebaju i preklapati kako bi se poboljšala sigurnost u dobivene podatke odnosno kako bi se stvorila točna i pouzdana karta okruženja vozila [3].

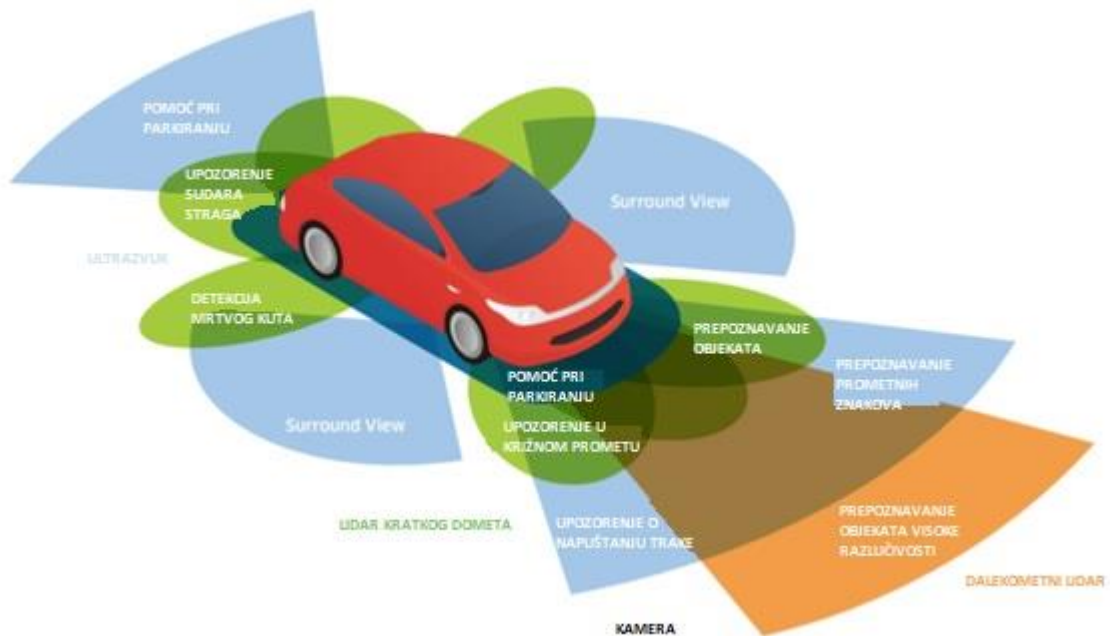
| | | LJUDSKI VOZAČ | | AUTOMATIZIRANI SUSTAV | |
|-------------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|---|-------------------------------------|
| | | upravljanje i ubravanje/ usporavanje | nadzor okoline u kojoj se vozi | rezervna radnja kada automatika prestane raditi | automatizirani sustav je u kontroli |
| vozač nadzire cestu | 0 NEMA AUTOMATIZACIJE | | | | nedostupno |
| | 1 POMOĆ VOZAČU | | | | NEKI NAČINI VOŽNJE |
| | 2 DJELOMIČNA AUTOMATIZACIJA | | | | NEKI NAČINI VOŽNJE |
| automatizirani sustav nadzire cestu | 3 UVJETNA AUTOMATIZACIJA | | | | NEKI NAČINI VOŽNJE |
| | 4 VISOKA AUTOMATIZACIJA | | | | NEKI NAČINI VOŽNJE |
| | 5 POTPUNA AUTOMATIZACIJA | | | | |

Prikaz 1. Prikaz razina autonomije

Izvor: Study: The rise of autonomous vehicles, 2021, online: <https://www.steinlaw.com/resources/studies/the-rise-of-autonomous-vehicles/> (06.07.2021.)

2.3. SENZORI AUTONOMNIH VOZILA

Senzori automobila su sustavi koji unose velik broj informacija u integrirane platforme koje su kontrolirane od strane umjetne inteligencije (AI). Informacije dobivene sensorima omogućavaju pregled 3D karte okoline vozila te klasifikaciju objekata oko samog vozila. Umjetna inteligencija tada naposljetku kontrolira neke ili sve radnje autonomnih vozila, ovisno o tome koju razinu autonomije automobil ima. Senzori koji su uključeni u stvaranje 3D karte dijele se na: kamere, radar, ultrazvučne senzore te lidar. Kamere, bile one crno-bijele ili u boji, koriste se za pasivno vizualno opažanje. Algoritmi za otkrivanje objekata, omogućavaju im percipiranje svih objekata 360° oko automobila, ali i promjena u okolini automobila kao što su prometni signali te promjene važne za upozorenje o napuštanju prometne trake. Sljedeći senzor autonomnih vozila je radar. Radarski sustavi koriste za otkrivanje objekata te njihovu lokalizaciju i praćenje. Drugim riječima, radar nam omogućuje obavijesti o objektima oko vozila te prate kretanje objekata odnosno njihov domet i brzinu. Radarski sustav pritom koristi milimetarske radio valove na 24, 77 ili 79 GHz. Velika prednost radara je njihova pristupačna cijena te mogućnost otkrivanja objekata na velikim udaljenostima preko 200 metara te u ekstremnim vremenskim uvjetima, međutim ne nudi kutnu i linearnu razlučivost kao lidar. Radar dugog dometa (engl. long-range radar, LRR) ima, od svih senzora autonomnih vozila, najduži raspon skeniranja te omogućuje uočavanje objekata i opasnosti prilikom brzih vožnji te velikim udaljenostima. Upravo zbog navedene karakteristike, radar dugog dometa (LRR) koristi prilagodljivi ili adaptivni tempomat (engl. adaptive cruise control) ili automatsku kontrolu udaljenosti kao i za hitno kočenje, dok se radar kratkog dometa (engl. short-range radar, SRR) koristi za pomoć pri promjeni prometne trake, nadzor mrtvog kuta, pomoć pri parkiranju te upozorenja za sudar. Ultrazvučni senzor ima jednaku namjeru kao i radar kratkog dometa te možemo reći da je on njegova zamjena [11]. Nadalje, posljednji senzor autonomnih vozila je lidar koji će biti opisan u daljnjem tekstu. Prikazi 2 i 3 prikazuju dva različita primjera senzorskih sustava autonomnih vozila.

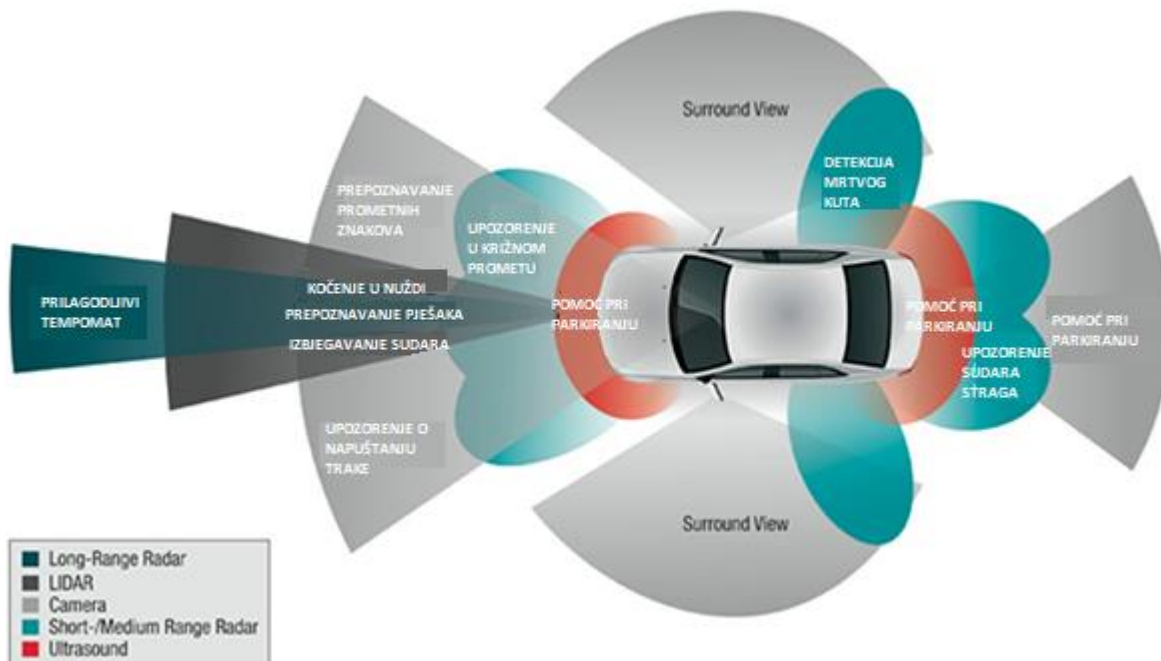


Prikaz 2. Prvi primjer senzorskih sustava autonomnih vozila

Izvor: Making Vehicles Smarter and Safer with Diode Laser-Based 3D Sensing. online:

<https://resource.lumentum.com/s3fs-public/technical-library-items/diodelaservehicle-wp-cl-ae.pdf>

(06.07.2021.)



Prikaz 3. Drugi primjer senzorskih sustava autonomnih vozila

Izvor: Benchmarking Sensors for Vehicle Computer Vision Systems. online:

<https://mtri.org/automotivebenchmark.html> (06.07.2021.)

2.4. PREDNOSTI I NEDOSTACI AUTONOMNIH VOZILA

Kao što je spomenuto ranije u radu, velik broj prometnih nesreća (više od 90%) uzrokovano je ljudskim pogreškama, bilo umorom, prebrzom vožnjom ili slično. Glavna prednost i odlika autonomnih vozila je mogućnost smanjivanja prometnih nesreća za čak 90%. Istraživanjem Sveučilišta u Michiganu na institutu za istraživanje prijevoza, potvrdila se teza da su autonomna vozila sigurnija od tradicionalnih, konvencionalnih vozila odnosno automobila bez ugrađenih dodatnih tehnologija. Potvrđeno je također da ukupna težina ozljeda dobivene tijekom prometnih nesreća su bile znatno manje kada su u sudaru sudjelovala autonomna vozila od onih u kojima su sudjelovala konvencionalna, dok su same nesreće u 100% slučajeva uzrokovala konvencionalna vozila [1].

Nadalje, valja naglasiti da nisu svi ljudi u mogućnosti voziti automobile, primjerice osobe oštećena vida, osobe s motoričkim teškoćama ili intelektualnim teškoćama. Nadogradnje automobila, koje omogućuju osobama s invaliditetom vožnju, financijski su nedostupne većini populacije. Također, javni prijevoz najčešće nije u potpunosti prilagođen osobama s invaliditetom te je tada vrlo jasan razlog zbog čega se oko 4,3 milijuna osoba s invaliditetom suočava s raznim preprekama tijekom putovanja, bilo onih dužih, ali i kraćih relacija kao što je primjerice odlazak liječniku. Implementacija autonomnih vozila ključna je za olakšavanje kretanja i putovanja osoba s invaliditetom. Na taj način smanjilo bi se opterećenje njihovim vozačima (najčešće članovima obitelji i prijateljima) te bi imali bolji pristup i mogućnosti obrazovanja, zapošljavanja te općenito veću kvalitetu života [1].

Dodatna prednost autonomnih vozila je mogućnost povezivanja više potpuno autonomnih vozila (CAV, Connected Autonomous Vehicle). CAV poboljšava sigurnost putem aktivnih visokofrekventnih prijenosa položaja vozila, njegove brzine, smjera i ubrzanja. Vozači nakon što sami odaberu put kojim žele ići, dok će im CAV pomoći pri odabiru najkraćeg puta poznavajući prometne uvjete putem komunikacije s drugim autonomnim vozilima. Drugim riječima, CAV će pronaći optimalan put kojim će najbrže stići do ciljanog odredišta. CAV će također smanjiti prometne gužve te dopustiti putnike da se usredotoče na druge zadatke [1].

Međutim, autonomna vozila unatoč svim navedenim prednostima, imaju i nedostatke. Iako bi autonomna vozila dovela do veće pristupačnosti, posljedično bi se povećao broj putovanja, a zajedno s time bi se povećala i potrošnja energije. Potrošnja energije mogla bi se povećati za 10 do 14% te bi kilometri prijeđeni autonomnim vozila mogla prijeći

kilometre prijeđene konvencionalnim vozilima. Kao sljedeća posljedica implementacije autonomnih vozila, smanjio bi se i broj korištenja zrakoplovnih prijevoznika za čak 53% [1]. Nadalje, potrebno je dodatno naglasiti da autonomna vozila imaju smanjenu učinkovitost u lošim vremenskim uvjetima poput kiše, magle, snijega ili vjetra [12]. Ovakvi vremenski uvjeti djeluju ograničavajuće na funkcionalnost kamera i senzora te može doći do neispravnog očitavanja ili lažnih očitavanja što posljedično može dovesti do prometnih nesreća. Također, nova prijetnja pouzdanosti autonomnih vozila te njihovoj sigurnosti je sklonost i mogućnost hakiranja. Naime, kao i sve tehnologije, prijetnja za hakiranjem raste i u ovom području te one mogu doći kroz sve sustave koji su povezani sa sensorima vozila, aplikacijama za komunikaciju, procesorima, sustavima za upravljanje kao i kroz vanjske unose poput drugih vozila, GPS-a itd. Hakeri na taj način mogu preuzeti kontrolu nad vozilom te dovesti putnike u opasnost [1].

3. LIDAR KOD AUTONOMNIH VOZILA

Lidar čini skraćenicu engleskog naziva “light detection and ranging” te označava senzor metodu koja uočava objekte te mapira njihove udaljenosti. Lidar se naziva još i laserski skeneri, laserski radar ili 3D skener [3]. Glavna odlika ovog sustava je da koristi laser kako bi stvorio 3D prikaz okruženja vozila [13].

Standardni lidar senzor emitira pulsirajuće svjetlosne valove u okolinu vozila, zatim uz pomoć vremena koje je potrebno za putovanje do objekta te natrag do senzora izračunava udaljenost objekta od vozila. Ovaj postupak ponavlja se milijun puta u sekundi te na taj način stvara preciznu, realnu 3D kartu okruženja vozila [13].

Razlikujemo lidar velikog i kratkog dometa. Lidar velikog dometa (engl. long-range lidar, LRR) vrsta je lidar-a koji se koristi za uočavanje, lokaliziranje i identificiranje objekata na većim udaljenostima do 200 metara, primjerice za izbjegavanje sudara, hitno kočenje ili identifikaciju pješaka. Veliki nedostatak ove vrste lidar -a je njegova slabija učinkovitost u lošijim vremenskim uvjetima. S druge strane, njegova prednost smatra se da je visoka kutna i linearna razlučivost [11]. Osim lidar -a velikog domena, postoji i lidar kratkog dometa (engl. short-range lidar, SRR) koji se za razliku od lidara velikog dometa, koristi za nadziranje neposrednog, najbližeg okruženja vozila. Prednost ove vrste lidar-a je što uz uočavanje predmeta, ima mogućnost identificirati objekte, primjerice razlikovati će dijete na trotoaru od hidranta [11].

3.1. USPOREDBA LIDAR, SONAR I RADAR SUSTAVA

Prema nekim autorima, rad lidar-a možemo usporediti s prethodnim radarskim i sonarnim implementacijama pomoću lasera. Razlika između lidara i navedenih implementacija je u visokofrekventnim impulsima svjetlosti koje lidar šalje na valnim duljinama od 830nm do 1550 nm te u korištenju zrcala za skeniranje lasera dok navedene implementacije koriste antene i radio valove (radar) i zvučne valove (sonar) [5]. S druge strane, lidar i radar dijele širok raspon zajedničkih značajki kojima mapiraju okolinu te mjere brzinu objekta u okolini dok sonar nema tu mogućnost [3].

Prva njihova zajednička komponenta je domet. Lidar kao i radarski sustavi mogu detektirati objekte na udaljenosti od nekoliko metara do više od 200 metara. Dok lidar ima poteškoća s otkrivanjem objekata na manjim udaljenostima, radar i sonar mogu uočiti objekte na udaljenosti manjoj od jednog metra no njihovi rasponi ovise o vrsti sustava - radi se o radaru kratkog, srednjeg ili velikog dometa kod radara te o aktivnom i pasivnom sonaru. Lidar međutim, zbog sposobnosti kolimacije, ima mogućnost visoke prostorne razlučivosti (3D karakterizacije) objekta bez značajne pozadinske obrade, što radarski sustavi ne nude [3].

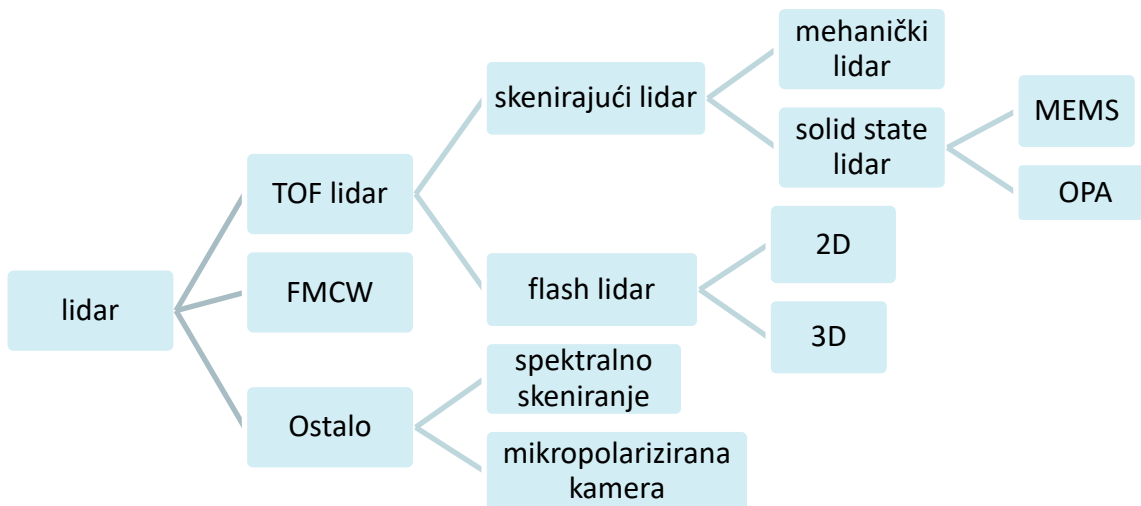
Iduća zajednička značajka je vidno polje (engl. field of view, FOV) koje se sastoji od horizontalnog i vertikalnog vidnog polja. Solid-state lidar, radar i sonar imaju izvrsna horizontalna vidna polja, dok mehanički lidar sustavi imaju najširi FOV od svih naprednih driver assistance systems (ADAS), s rotacijom od čak 360 stupnjeva. Za razliku od horizontalnog polja vidljivosti, vertikalno vidno polje puno je bolje razvijeno u Lidar sustavima nego u radarskim sustavima. Također, Lidar sustavi pokazali su veliku prednost nad radarom u kutnoj razlučivosti koja se smatra jednom od ključnih značajki za bolju klasifikaciju objekata [3].

Uzimajući u obzir vremenske uvjete, radarski i sonar sustavi pokazali su se boljim od Lidar-a - oba sustava otporniji su na uvjetima kiše, magle i snijega [11]. Noću, Lidar sustavi imaju mogućnost vrlo visokih izvedbi i učinaka (very high performance) iako su oboje (i radarski i Lidar sustavi) osjetljivi na ambijentalno osvjetljenje, a sonar sustavi su ograničeni brzinom zvuka i ponekad mogu detektirati objekt koji zapravo nije tamo [3, 14].

3.2. KLASIFIKACIJA LIDAR-A

Postoji nekoliko podjela lidara odnosno lidarskog sustava no u daljnjem tekstu detaljnije će biti opisana klasifikacija prema Rablau [11]. Lidar se prema navedenom autoru dijeli po principima rada na vrijeme leta (engl. time of flight, TOF), koherentni frekvencijski modulirani kontinuirani val (engl. coherent frequency modulated continuous wave, FMCW) te ostali lidarski sustavi kojima pripadaju spektralno skeniranje te mikropolarizatorska kamera. TOF lidar nadalje se dijeli na dvije vrste LIDAR-a: skenirajući lidar te flash LIDAR. Skenirajući lidar dijeli se na mechanical scanning lidar te na solid state scanning lidar, koji se nadalje dijeli na mikro elektromehanički sustav (engl. microelectromechanical, MEMS) mirror lidar te na lidar optičkog faznog niza (engl. optical phase arrays, OPA) lidar. Flash

lidar se dijeli na 2D linijski flash lidar te na 3D flash lidar koji obuhvaća cijelu okolinu [11]. Ova podjela je jednostavnije prikazana na Shemi 1.



Shema 1. Podjela lidar sustava

Izvor: izradio student

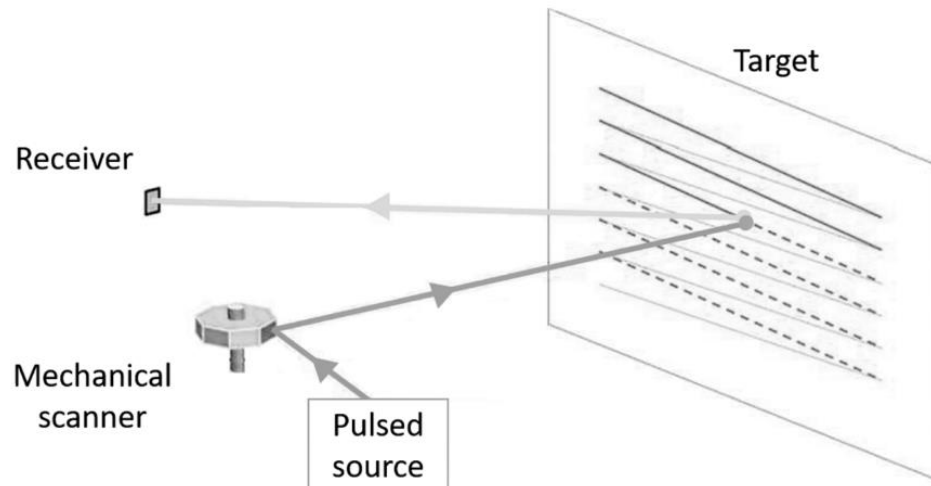
3.2.1. TOF lidar

Kao što je već navedeno, Lidar koji radi na principu vremena leta (TOF) dijeli se na skenirajući lidar i flash lidar.

3.2.1.1. Skenirajući lidar

Lidar koji radi na principu TOF-a, skenirajući (engl. scanning) lidar mjeri vrijeme koje je potrebno fotonima da putuju od lasera do cilja te natrag. Izmjereno vrijeme potom pretvara u udaljenost, a zatim konstruira 3D mapu objekta na koje su zrake naišle, jednu po jednu točku (kod lidar-a s jednim laserom) ili cijeli red točaka odjednom (lidar s više lasera). Sustav koji koristi mehaničko skeniranje sastoji se od visokokvalitetne optike i neke vrste rotacijskog sklopa sa zrcalima ili prizmom. U tom slučaju cijela jedinica zajedno sa izvorima i detektorima se rotira oko osi [3, 15]. Na prikazu 4 prikazan je shematski prikaz rada lidar-

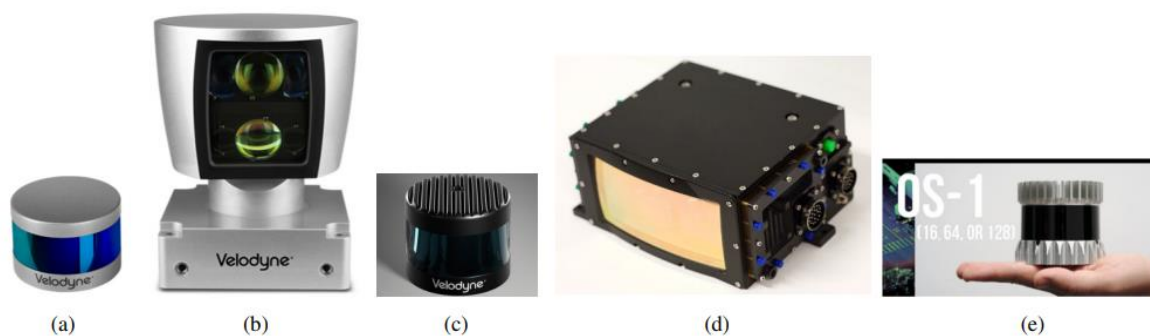
a baziran na mehaničkom skeniranju. Na prikazu naziv „pulsed source“ označava pulsirajući izvor, „mechanical scanner“ označava mehanički skener, „target“ označava metu, dok „receiver“ označava prijemnik. Lidari s takvim sustavom su znatno veći te koriste znatno više energije no velika prednost im je domet od kojih neki mogu postići domet koji seže preko jednog kilometra [15].



Prikaz 4. Rad lidar-a baziran na mehaničkom skeniranju

Izvor: Royo, S., Ballesta-Garcia, M. (2019). 'An Overview of Lidar Imaging Systems for Autonomous Vehicles', *Applied Sciences*, vol. 9(19), 409, online: <https://www.mdpi.com/2076-3417/9/19/4093#cite>

Na Prikazu 5 prikazani su različiti Velodyne spinning lidar modeli koji imaju najdužu povijest i najkorišteniji su raznim testovima autonomne vožnje, i dostupni su u 16, 64 i 128 kanala.



Prikaz 5. Različiti Velodyne spinning lidar modeli

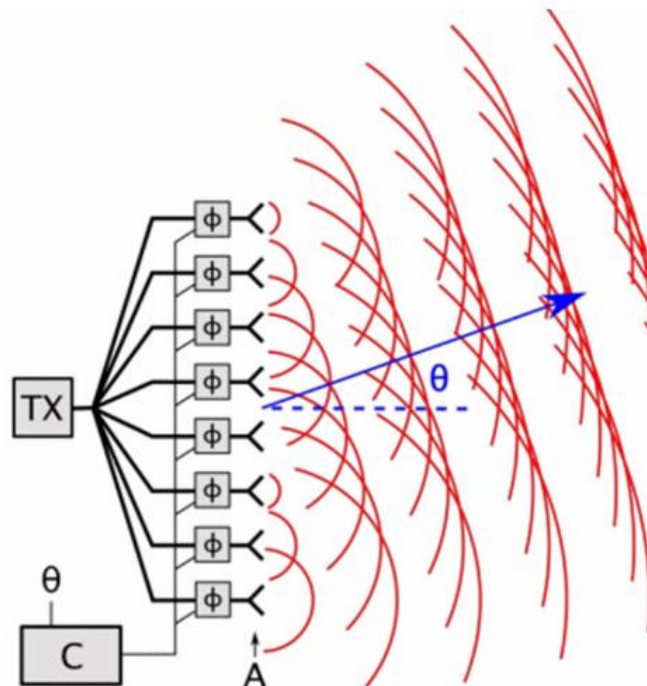
Izvor: Rablau, C. (2019). 'Lidar: a new self-driving vehicle for introducing optics to broader engineering and non-engineering audiences', Fifteenth Conference on Education and Training in Optics and Photonics: ETOP 2019, online: https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?uri=ETOP-2019-11143_138

Najpoznatiji, najstariji te najčešće korišteni skenirajući lidar naziva se Velodyne rotacijski skener HDL-64E te je on korišten od strane različitih marki i modela automobila. Ova vrsta lidar-a koristi set od 64 naslagana para laserskih detektora koji istovremeno skeniraju horizontalne linije čime pokrivaju okomiti kut od $26,9^\circ$. Svakom laseru je posvećen detektor lavinske fotodiode (engl. avalanche photodiode detector, APD). Laseri se okreću punih 360 pri frekvenciji od 10 do 30 Hz. Svih 64 lasera su 905 nm laseri diodnog tipa koji emitiraju 5 ns 60 W impulse sa maksimalnim dometom od 120 m [11].

Mehanički skenirajući lidar sastoji se od pokretnih dijelova te predstavlja složeniji lidar što rezultira visokim troškovima te visokim rizikom kvara u mehaničkim, ali i okolinskim teškim uvjetima vožnje [11]. Upravo zbog ovih nedostataka, proizvođači nastoje prijeći na solid state lidar koji nema pokretne dijelove [3]. Ova vrsta lidar-a učinit će ga pristupačnijim za autonomna vozila, no ono zahtjeva drugačiju tehnologiju u kojoj neće biti potrebno mehaničko pomicanje lasera kao ni pomicanje makroskopskih ogledala. Ova vrsta lidara je ekonomičnija te koristi više kanala s prednje, bočne i stražnje strane. Spajajući informacije dobivene iz svih kanala, stvara se vidno polje koje može parirati mehaničkom scanning lidar. Dva najčešća sustava solid state scanning lidara nazivaju se mikroelektromehanički sustavi (engl. microelectromechanical systems, MEMS) i optički fazni niz (engl. optical phased array, OPA) [11]. Iako je mikroelektromehanički sustav korištenjem skenirajućeg

zrcala tehnički i dalje mehanički sustav, mala veličina tih zrcala, mala inercija i visoka rezonantna frekvencija čine ga otpornijim na grube mehaničke i temperaturne uvjete no i dalje je osjetljiv na udarce i vibracije koje nastaju prilikom uobičajene vožnje automobila, također je pogodan za znatno smanjivanje cijene pri masovnoj proizvodnji [3, 11]. Proizvodnja zrcala za taj sustav je od prije poznata zbog njegove korisnosti i u drugim područjima kao što su sklopke za komunikacije optičkim vlaknama. Zrcala mogu biti promjera od nekoliko milimetara do devet milimetara napravljenih od silikona i obloženih slojem aluminijske ili zlatne folije što im omogućuje rukovanje većinom laserskih valnih duljina korištenih kod gotovo svih lidar sustava. Zrcala mogu biti rezonantna i nerezonantna od kojih nerezonantna pružaju veću slobodu u dizajniranju putanje, ali zahtijevaju kompleksni upravljač skenerom kako bi se održala kvaliteta i zahtijevane putanje s konstantnom brzinom. Rezonantna zrcala pružaju veći kut skeniranja pri većoj frekvenciji i relativno jednostavan dizajn kontrolera no putanja skena je sinusoidalna odnosno brzina nije ujednačena. Niski moment inercije dopušta zrcalu da izvede dvodimenzionalni sken preko cijelog vidnog polja u djeliću sekunde te ima mogućnost prilagodbe uzorka skena promjenom kuta nagiba što mu omogućuje da točnije skenira specifični objekt [15]. Za razliku od lidara koji se vrti MEMS zrcalni lidar ima ograničeno polje vidljivosti te za postizanje potpune slike od 360° potrebno je više kanala i spajanjem. Također, zbog malih dimenzija zrcala stvara se veći ogib što dovodi do divergencije projiciranog snopa zraka i time smanjuje njegov maksimalni domet [11].

Treći tip lidara koji koristi sustav skeniranja sa dizajnom sustava koji nema pomičnih dijelova je lidar optičkog faznog niza (optical phased array, OPA) koji je vrlo privlačan zbog svoje poželjnosti. Ova vrsta tehnologije je međutim, najmanje razvijena bez značajnih testova autonomne vožnje, no ima obećavajuću budućnost. Iako je dvodimenzionalno upravljanje moguće većina trenutnih OPA-a će omogućiti upravljanje laserskom zrakom u samo jednoj dimenziji [11]. Jednodimenzionalna OPA-a sastoji se od većeg broja optičkih elemenata (antena) poslaganih u jednodimenzionalni niz kao što je vidljivo na prikazu 6.



Prikaz 6. Jednodimenzionalni niz optičkih elemenata OPA-e

Izvor: Rablau, C. (2019). 'Lidar: a new self-driving vehicle for introducing optics to broader engineering and non-engineering audiences', Fifteenth Conference on Education and Training in Optics and Photonics: ETOP 2019, online: https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?uri=ETOP-2019-11143_138

Kada se osvijetle s koherentnim svjetlom iz lasera, elementi u nizu djeluju kao optičke antene koje ponovno emitiraju upadno svjetlo. Kontrolirajući fazu i amplitudu svakog ponovno emitiranog svjetla, kontrolira se smjer maksimuma udaljenog polja smetnji i tako može usmjeriti snop u bilo koji određeni smjer u jednoj ravnini. Promjenom vrijednosti faznog pomaka mijenja smjer [11].

Kako bi se upravljalo zrakom u drugoj dimenziji OPA sustav skeniranja koristi rešetku ili prizmu mijenjajući smjer svjetlosti bazirano na njegovoj valnoj duljini, za što se moraju koristiti laseri sa mogućnošću podešavanja [11].

U OPA uređajima optički fazni modulator kontrolira brzinu svjetlosti koja prolazi kroz uređaj što mu omogućuje da upravlja oblikom i orijentaciji valne fronte. Na primjer, gornja zraka ne kasni, dok srednja i donja kasne sa rastućim iznosima, te na taj način omogućava otklon snopa svjetlosti (usmjerava ga u različitim smjerovima). Ti uređaju su vrlo stabilni,

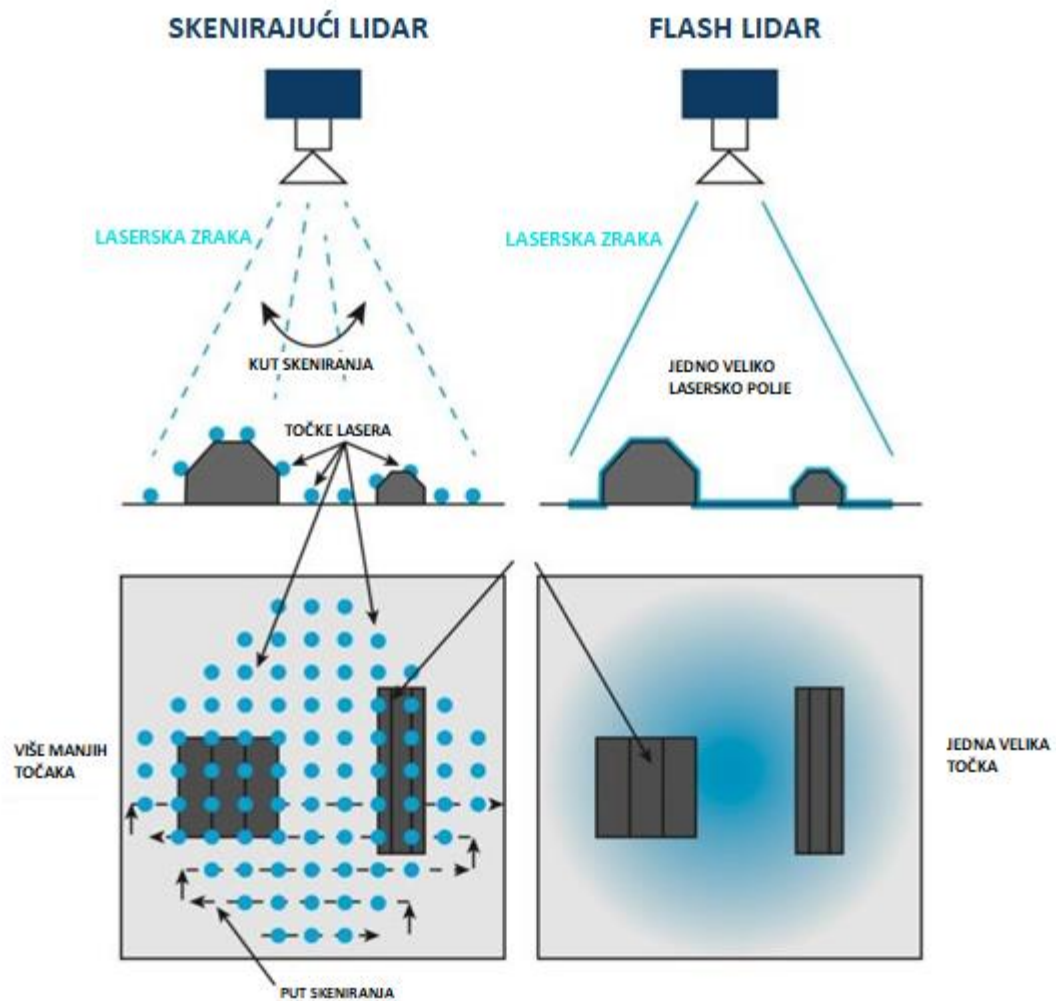
brzi, precizno usmjeravaju svjetlosni snop, robusni (nemaju pokretnih dijelova), nisu osjetljivi na vanjske utjecaje i vrlo su kompaktni tako da mogu biti pohranjeni u jednom čipu. Unatoč svim prednostima nisu u mogućnosti podnijeti velike snage potrebne za dalekometno snimanje, te navedena tehnologija zahtijeva daljnje razvijanje [3, 15].

3.2.1.2. Flash lidar

Flash lidar nema pokretnih dijelova, solid state lidar čije je djelovanje slično flash kameri ili standardnoj digitalnoj kameri te se time rad lidara želi maknuti od procesa skeniranja [11]. Ova vrsta lidar-a koristi seriju laserskih impulsa velike površine u seriji 2D i 3D bljesaka kako bi osvijetlio okruženje ispred vozila. Na taj način uz laserski impuls, koristi niz žarišnih ravnina fotodetektora koji su postavljeni u neposrednoj blizini lasera koji zahvaća svjetlo raspršeno unatrag, prijemnik potom hvata svjetlost koja je raspršena nazad i dijeli se na više detektora [3, 11, 15]. Svaki detektor koristeći princip time of flight ili skraćeno TOF (vrijeme leta) dobiva informaciju o udaljenosti i ponekad intenzitet refleksije. Kod flash lidar sustava vidno polje niza detektora mora biti isto kao osvijetljeno područje dijela okoline koji se snima, a to se dobiva korištenjem pripadajućega divergentnog optičkog sustava koji proširuje laserski snop zraka kako bi osvijetlio cijelo vidno polje. Svaki detektor u nizu se aktivira kada se odbijeni impuls vrati i mjeri intenzitet i udaljenost, iz toga se vidi da prostorna rezolucija uvelike ovisi o tome koliko gusto su detektori raspoređeni. Limitirani cijenom i veličinom detektora i niza žarišnih ravnina, prostorna rezolucija često nije jako velika sa vrijednostima od oko desetak kilopiksela [15, 16]. Zbog ograničene snage lasera i potrebe za širenjem laserskog snopa zraka kako bi se obuhvatio cijeli prizor efektivni domet flash lidara je vrlo često ograničen na udaljenosti od desetak metara do u nekim slučajevima u rasponu od 20 m do 150 m. Jedni od načina povećanja dometa je povećanje broja lasera korištenih prilikom jednog bljeska (engl. flash-a), kao i poboljšanje granica detekcije osjetilnih elemenata [11, 15].

U stvarnom svijetu postojanje predmeta koji su reflektivni (kao što su tablice automobila i prometni znakovi) naglašavaju glavni nedostatak ovog sustava zbog kojih dolazi do zasićenja detektora fotonima, zasljepljujući ga i čineći ga beskorisnim u ponekim kadrovima. Sa druge strane, flash lidar ima veliku brzinu snimanja podataka, vrlo je otporan na vibracije i u jednoj slici snimi široko vidno polje, dokazao se kao vrlo koristan kako u vojne svrhe tako i kod običnih vozila u scenarijima kada su uređaj i objekt koji se snima u pokretu. Ostale prednosti su nedostatak pokretnih dijelova i potencijal za stvaranje minijaturnih sustava što

je uvelike pomoglo da se flash lidar sustav komercijalizira [15, 17, 18]. Prikaz 7 prikazuje usporedbu između načina snimanja objekata gdje skenirajući (engl. scanning) lidar snima mnoštvo točaka svojim laserima, dok flash lidar snimi cijelo područje u kojem se zadani objekti nalaze odjednom.

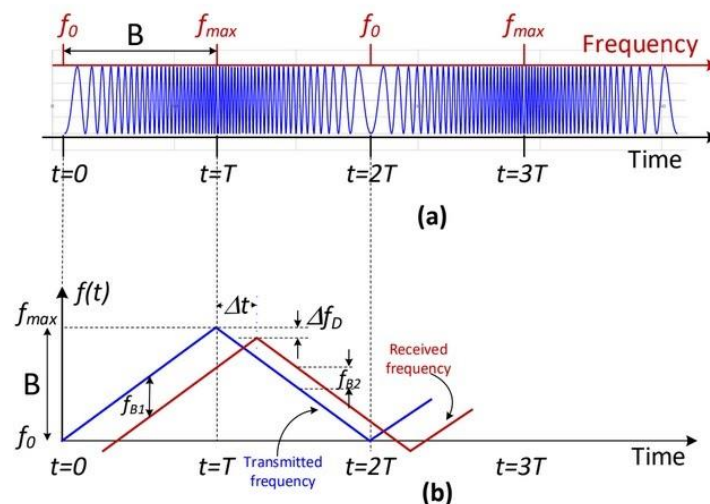


Prikaz 7. Usporedba između načina snimanja objekata scanning i flash lidar-a

Izvor: Global Shutter Flash LIDAR Advantages, online: <https://asc3d.com/our-technology/> (06.07.2021.)

3.2.2. Koherentni lidar

Koherentni frekvencijski modulirani kontinuirani val (engl. frequency modulated continuous wave, FMCW) je složenija vrsta lidar-a koja ima sposobnost istodobne detekcije udaljenost od snimanog objekta i njegove brzine. Način rada FMCW lidar-a vrlo je sličan načinu rada FMCW radara kod kojeg antena neprekidno emitira radio valove čija frekvencija linearno raste od bazne frekvencije f_0 do maksimalne frekvencije f_{max} tijekom perioda T , popraćeno sa smanjenjem frekvencije s f_{max} nazad do f_0 tijekom istog perioda T . Ako se pretpostavi da val koji je emitiran u trenutku $t=0$ dođe do objekta na nekoj udaljenosti R koji se kreće radijalnom brzinom v_r . Nakon vremena $t=2R/c$ odbijeni val dođe do odašiljača-prijemnika gdje ometa valove koji su poslani u tom trenutku. Primljeni val će imati drugačiju frekvenciju od poslanog vala zbog dva faktora: vremena puta t koji je određen udaljenošću R od objekta i Dopplerovog pomaka F_d zbog odbijanja valova od objekta koji se kreće relativnom brzinom v . Međusobno ometanje dvaju valova proizvede beat (izbojnu) frekvenciju f_{B1} (na strani gdje frekvencija raste od bazne frekvencije f_0 do maksimalne frekvencije f_{max}) i f_{B2} (na strani gdje dolazi do smanjenja frekvencije s f_{max} nazad do f_0) kao što je vidljivo na Prikazu 8 koji prikazuje linearnu FMCW modulaciju signala pod a) i beat frekvencije koje proizvede ometanjem između poslanog i odbijenog signala pod b).



Prikaz 8. Linearna FMCW modulacija signala i beat frekvencije koje proizvede ometanjem između poslanog i odbijenog signala

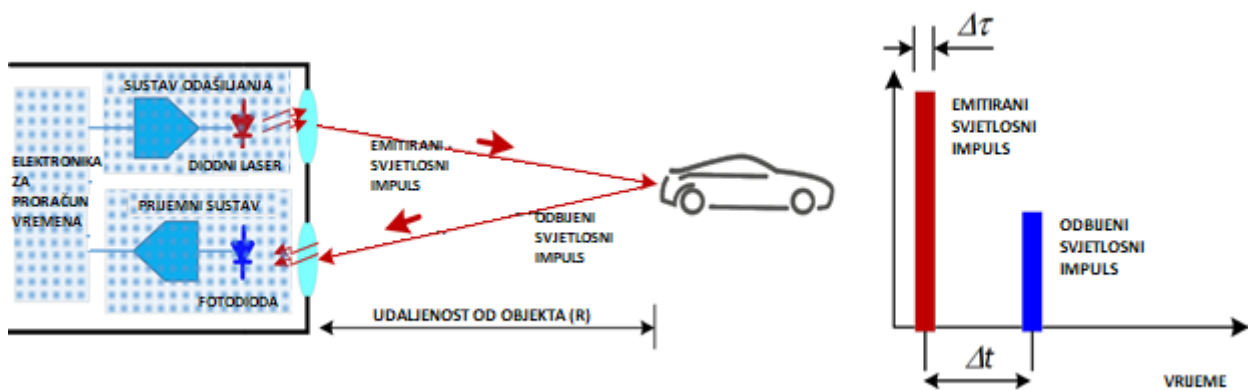
Izvor: Rablau, C. (2019). 'Lidar: a new self-driving vehicle for introducing optics to broader engineering and non-engineering audiences', Fifteenth Conference on Education and Training in Optics and Photonics: ETOP 2019, online: https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?uri=ETOP-2019-11143_138

Princip rada FMCW lidar-a je gotovo isti koji to postiže koristeći podesivi laser kako bi se modulirala frekvencija lasera ili korištenjem lasera sa stalnom valnom duljinom kojemu se podešava intenzitet. Miješanjem signala nosioca sa primljenim (odbijenim) signalom koji se potom demodulira i time se dobiju fazni i frekvencijski pomak laserskog signala koji služe za izračunavanje udaljenosti i brzine snimanog objekta [19].

FMCW lidar se pokazao izrazito korisnim u vanjskim okruženjima koji osim mogućnosti detekcije udaljenosti i brzine objekta također ima prednost smanjene osjetljivosti na ambijentalno svjetlo poput sunčevog svjetla ili laserskih zraka drugih lidar jedinica. Kao i svi dosad opisani lidar sustavi tako i ovaj ima svoje negativne strane, zbog svoje kompleksnije izvedbe nailazi na probleme poput: manje dostupnosti izdržljivih podesivih lasera sa dobrom temperaturnom stabilnošću, osjetljivost na vanjske uvjete, preciznost modulacijske elektronike i zahtijevanje više računalne snage za stvaranje 3D oblaka točaka. Iako trenutno nije glavni pristup u sustavima lidar-a kod autonomnih vozila, neki timovi (kompanije) trenutno implementiraju FMCW lidar u komercijalnu upotrebu zbog svoj raznih prednosti [11, 15].

4. PRINCIP RADA LIDAR-a

Osnove rada lidar-a prikazane su na Prikazu 9. Radi na principu vremena leta (time of flight, TOF) na način da šalje impulsni svjetlosni laser i mjeri vrijeme potrebno impulsu da se odbije od objekta i vrati nazad nakon čega računa udaljenost od objekta od kojeg se pojedina zraka odbila [20]. Širina samog optičkog impulsa može se kretati od nekoliko nanosekundi do nekoliko mikrosekundi [3]. Ta mjerenja se mogu koristiti za stvaranje 3D prikaza okoline. Današnji lidar senzori su sposobni mjeriti udaljenosti brzinama većim od 150 kiloherca (150000 pulsa u sekundi) sa dometom preko 250 metara [20].



Prikaz 9. Osnovni princip rada lidar-a i vremenski dijagram impulsa

Izvor: Rablau, C. (2019). 'Lidar: a new self-driving vehicle for introducing optics to broader engineering and non-engineering audiences', Fifteenth Conference on Education and Training in Optics and Photonics: ETOP 2019, online: https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?uri=ETOP-2019-11143_138

Udaljenost od objekta se računa kao

$$R = \frac{v \cdot \Delta t}{2}$$

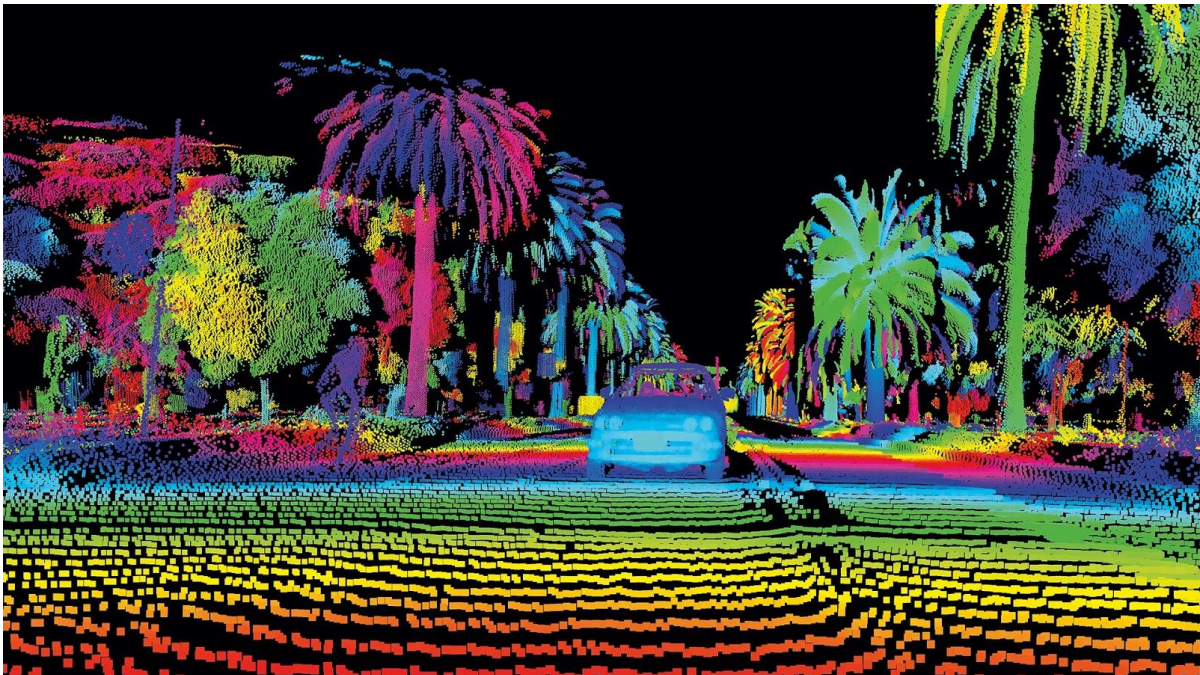
gdje je

R = udaljenost od objekta

V = brzina poslanog impulsa

T = vrijeme od trenutka slanja impulsa do primitka istog

U slučaju lidar-a to je vrlo kratak laserski impuls s obzirom na vrlo veliku brzinu svjetlosti (koja je približno $3 \cdot 10^8$ m/s kroz zrak i pretpostavljajući da je indeks loma jednak jedan), meta udaljena 150 metara rezultira vremenom putovanja impulsa $\Delta t = 1\mu s$. Ovo jako kratko vrijeme leta omogućuje stvaranje 3D oblaka točaka u obliku slike okoline skeniranjem laserskim zrakama preko objekata mjerenjem individualnih vremena leta (puta) svakog horizontalnog i elevacijskog kuta laserskih zraka te izračunavanjem odgovarajućih udaljenosti. Prikazi 10 i 11 prikazuju fotografije oblaka točaka nastalih skeniranjem lidar-a proizvedenog od strane Luminara (tvrtka sa sjedištem u SAD-u, California) [11]. Gustoća točaka u oblaku točaka a samim time i rezolucije slike koju uređaj proizvede ovisi udaljenosti objekta te horizontalnim i vertikalnim kutnim vidnim poljima [21].



Prikaz 10. Fotografija oblaka točaka nastalih skeniranjem lidar-a

Izvor: Chen, Y. (2018). 'Lidar Startups Update: Luminar Hires Ex-Uber Executive and Aeva Introduces 4D LiDAR Technology', online:

https://www.ledinside.com/news/2018/11/lidar_startups_update_luminar_hires_ex_uber_executive_and_aeva_introduces_4d_lidar_technology (06.07.2021.)



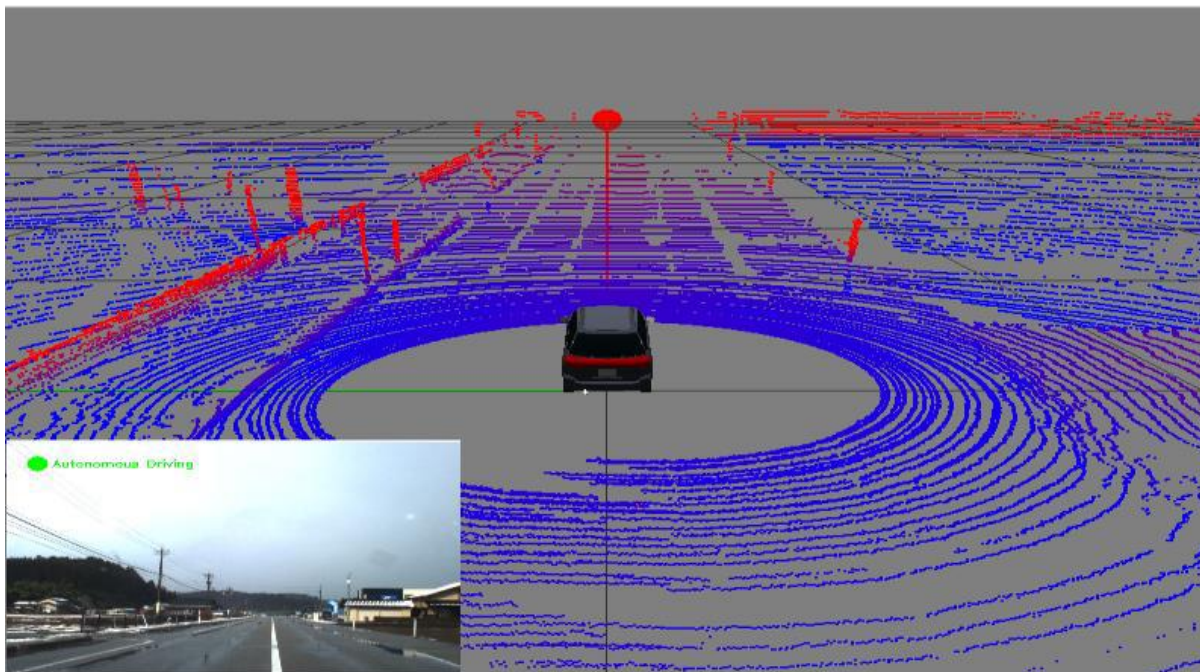
Prikaz 11. Fotografija oblaka točaka nastalih skeniranjem lidar-a

Izvor: Glassdoor, Luminar Office Photos, online: <https://www.glassdoor.co.in/Photos/Luminar-Office-Photos-IMG8116007.htm> (07.07.2021.)

4.1. STVARANJE MAPE VISOKE RAZLUČIVOSTI

Mape visokih razlučivosti potrebne su za autonomnu vožnju kako bi se vozilo moglo kontrolirati u stvarnom svijetu. Mapiranje se može podijeliti na dva tipa ovisno o vrsti senzora: baziran na kameri i baziran na lidar-u.

Kamere su vrlo isplative te lako dostupne, međutim one zahtijevaju obradu za izvlačenje korisnih informacija te ovise o uvjetima ambijentalnog osvjetljenja. Ono što čini kamere jedinstvenima je njihova mogućnost viđenja boja [3]. Mape temeljene na kameri pružaju mnoštvo informacija o okruženju uključujući izgled i teksture. S druge strane, mape temeljene na lidar-u su tradicionalne, tehnički se jednostavnije prikupljaju i pouzdanije zbog mogućnosti stvaranja potpune mape zadane okoline u jednoj vožnji, bez potrebe za ponavljanjem vožnje po istoj ruti. Prikupljeni podaci lidar-a obično se sastoje od 3D oblaka točaka kao što je vidljivo na prikazu 12.



Prikaz 12. 3D oblak točaka lidar-a

Izvor: Aldibaja, M., Suganuma, N., Yoneda, K. (2017). 'LIDAR-data accumulation strategy to generate high definition maps for autonomous vehicles', *IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI)*, pp. 422-428, online:

<https://www.semanticscholar.org/paper/LIDAR-data-accumulation-strategy-to-generate-high-Aldibaja-Suganuma/ff44e4ab293838bfd6aaca4f90bde18a3a05dcd7>

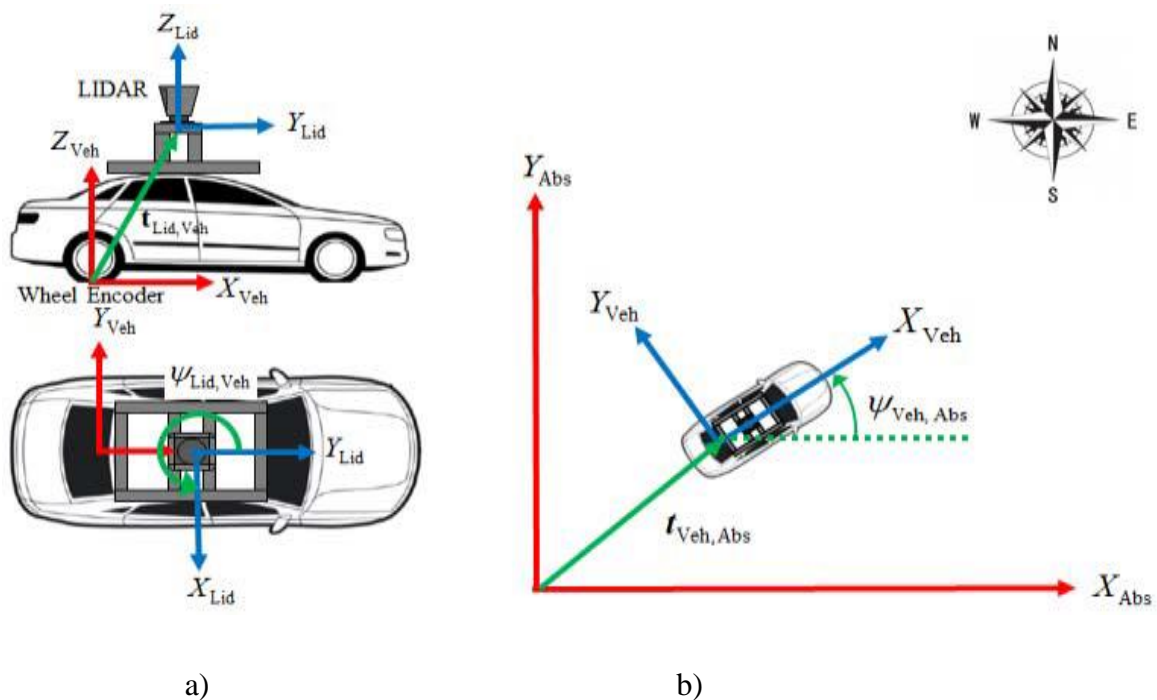
Mnoge strategije mapiranja predložene su za uporabu lidar podataka na temelju intenziteta ili izdvajanja značajki [22, 23]. Tehnika mapiranja značajki nastoji interpretirati okoliš koristeći elemente kao što su rubnici, uglovi, reflektori i drugo. Ova metoda nije u potpunosti pouzdana zbog nemogućnosti dobivanja stabilnih informacija dok mapiranje intenzitetom je pouzdanija metoda na koju promjene u okolini nemaju veliki utjecaj [21].

4.1.1. Stvaranje jednog kadra mape

Prilikom biranja načina prikupljanja podataka, na početku se odabire hoće li se mapiranje vršiti u 3D ili 2D domeni. 3D mape pružaju detaljnije informacije o površini cesta i struktura koje okružuju vozilo kao što su zgrade, stupova, dinamički objekti poput pješaka,

drugih vozila, biciklista i mnoštvo drugih. Takva vrsta informacije koristi vozilu prilikom procjenjivanja pozicije vozila u urbanom okruženju, no korištenje 3D mapiranja je gotovo beskorisno na otvorenim cestama i autoputevima i njegovi podaci su znatno veće veličine. U skladu s tim 2D stvaranje mapa se odabire za kodiranje površine ceste i okolne površine do maksimalne visine od 30 cm [21].

Geometrijski, svaka točka u oblaku može biti predstavljena vektorom $X_{lid} = [X_{lid}, Y_{lid}, Z_{lid}]$ u lidar koordinatnom sustavu. Te točke se mogu projicirati u koordinatni sustav vozila (X_{veh}) korištenjem Eulerove matrice rotacije i translacijskog vektora. Odnos između koordinatnih sustava lidar-a i vozila vidljiv je na Prikazu 13 (a). Nadalje, koordinate točaka iz koordinatnog sustava vozila se moraju projicirati u globalni koordinatni sustav te pretvoriti koordinate točke X_{veh} u apsolutni koordinatni sustav X_{abs} , vidljivo u Prikazu 13. (b).



Prikaz 13. Lidar koordinatni sustav vozila (a) te apsolutni koordinatni sustav

Izvor: Aldibaja, M., Suganuma, N., Yoneda, K. (2017). 'LIDAR-data accumulation strategy to generate high definition maps for autonomous vehicles', *IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI)*, pp. 422-428, online:

<https://www.semanticscholar.org/paper/LIDAR-data-accumulation-strategy-to-generate-high-Aldibaja-Suganuma/ff44e4ab293838bfd6aaca4f90bde18a3a05dcd7>

Svaka točka ima vrijednost refleksije koja predstavlja objekt kojeg pogađa i vrijednost te refleksije se dobiva primjenom kalibracijskog procesa na lidar zrakama [16]. Točka X_{Abs} se može izraziti kao piksel $I(u,v)$ koristeći formulu (2):

$$I \begin{bmatrix} U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{round} \left(\frac{(X_{Abs} - x_{(Est,Nrt),Abs})}{Res} \right) \\ \text{round} \left(\frac{(Y_{Abs} - y_{(Est,Nrt),Abs})}{Res} \right) \end{bmatrix}$$

Gdje je:

$I[u,v]$ = pikseli u domeni slike

round= zaokružena vrijednost

X_{Abs} = x koordinata točke u apsolutnom koordinatnom sustava

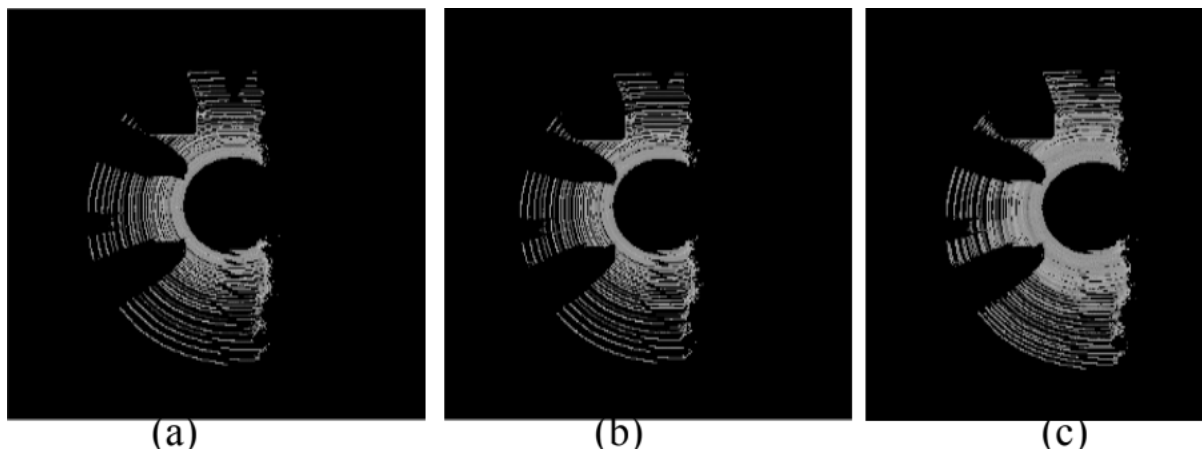
Y_{Abs} = y koordinata točke u apsolutnom koordinatnom sustava

$x_{(Est,Nrt),Abs}$ i $y_{(Est,Nrt),Abs}$ = koordinate gornjeg lijevog ugla slike u apsolutnom koordinatnom sustavu

Res= rezolucija piksela

4.1.2. Stvaranje više kadrova mape

Uzimajući u obzir brzinu vozila i njegovu orijentaciju, novi lidar kadar se dobiva kao što se može vidjeti na prikazu 13. Novi kadar (Prikaz 14 (b)) dijeli neke iste piksele s prijašnjim Prikaz 14 (a) te se spajanjem ta dva kadra dobiva slika mape s novom veličinom kao što je prikazano na Prikazu 14 (c). Novonastala slika mape je povećana za četiri piksela u visini i dva piksela u širini u odnosu na veličine dva prijašnja kadra.

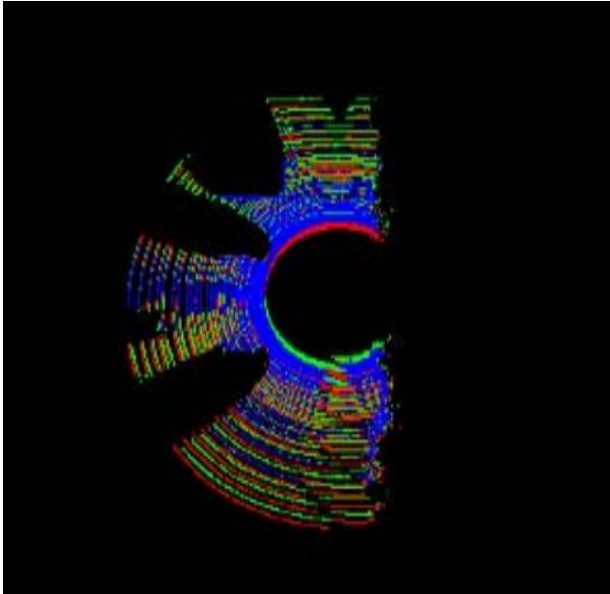


Prikaz 14. Stvaranje više kadrova mape

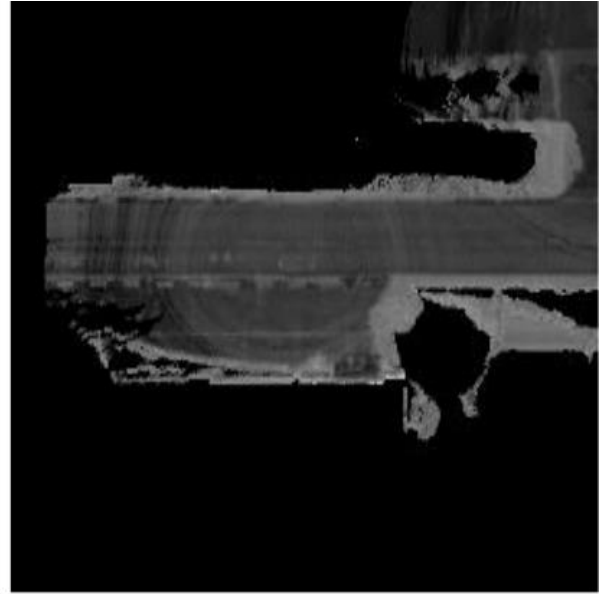
Izvor: Aldibaja, M., Suganuma, N., Yoneda, K. (2017). 'LIDAR-data accumulation strategy to generate high definition maps for autonomous vehicles', *IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI)*, pp. 422-428, online:

<https://www.semanticscholar.org/paper/LIDAR-data-accumulation-strategy-to-generate-high-Aldibaja-Suganuma/ff44e4ab293838bfd6aaca4f90bde18a3a05dcd7>

Prikaz 15 (d) prikazuje distribuciju piksela prvoga kadra (označeno crvenom bojom), piksela drugoga kadra (zelenom bojom) i modificiranih odnosno zajedničkih piksela (plavom bojom), dok Prikaz 15 (e) prikazuje fotografiju mape nastalu spajanjem 560 različitih kadrova.



(d)



(e)

**Prikaz 15. Distribucija piksela kadrova i fotografija mape nastale spajanjem
560 kadrova**

Izvor: Aldibaja, M., Sukanuma, N., Yoneda, K. (2017). 'LiDAR-data accumulation strategy to generate high definition maps for autonomous vehicles', *IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI)*, pp. 422-428, online:

<https://www.semanticscholar.org/paper/LIDAR-data-accumulation-strategy-to-generate-high-Aldibaja-Sukanuma/ff44e4ab293838bfd6aaca4f90bde18a3a05dcd7>

5. VALNE DULJINE, LASERI I DETEKTORI ZA LIDAR

5.1. VALNE DULJINE

Prilikom stvaranja svake lidar jedinice mora se uzeti u obzir da je takvoj jedinici potreban laser koji posjeduje mogućnost odašiljanja impulsa u trajanju od nanosekundi i velikim brojem ponavljanja. Valna duljina, snaga, duljina pulsacije, stopa ponavljanja i divergencija zraka su ključni parametri koji direktno utječu na konstrukciju i performanse lidar jedinice, također prilikom dizajniranja jedinice potrebno je uzeti u obzir ambijentalno svjetlo koje može ometati njegov rad. Takva jedna jedinica se mora sastojati od izvora (odašiljač, laser), fotodetektora (prijemnik), elektronike koja obrađuje primljene podatke i strategije za prikupljanje informacija. O odabiru lasera ovisi o samoj namjeni, performansama, pristupačnosti i cijeni ne samo lasera već i fotodetektora. Kod primjene lidar tehnologija u automobilske industriji najčešće se koriste valne duljine 905 nm, 940 nm i 1550 nm, od kojih svaka navedena valna duljina ima svojih prednosti ali i mana [15].

Valna duljina 905 nm je postala standard na tržištu za range-finding lidar-e zbog svoje niske cijene i visoke izlazne snage koristeći impulsni laser što vidimo na primjeru kao što je Velodyne360rotirajući lidar. Mana 905 nm valne duljine je da ukoliko se dođe unutar dometa može oštetiti ljudsko oko, stoga sigurnosna pravila su postavljena za ograničavanje takvog lidar-a [15].

Valna duljina 1550 nm sa sigurnosne pruža veliku prednost zato što je iznad granice opasnosti koja je 1400 nm, sve valne duljine iznad te granice se upijaju prednjem sloju oka izbjegavajući mogućnost oštećivanja. Razine snaga su do 10 puta veće (ali mogu biti i do 40 puta) u odnosu na 905 nm, te zbog manjeg ometanja sunčevih zraka postiže puno veći maksimalni domet što vidimo na primjeru Luminar kompanije koja je u suradnji sa Volvom uspjela postići domet od preko 200 metara. Mana prilikom korištenja ove valne duljine je povećana cijena detektora koji se rade od teže dostupnih materijala poput germanija i inidij galij arsenida za razliku od silikonskih lavinskih fotodioda korištenih kod 905 nm [15].

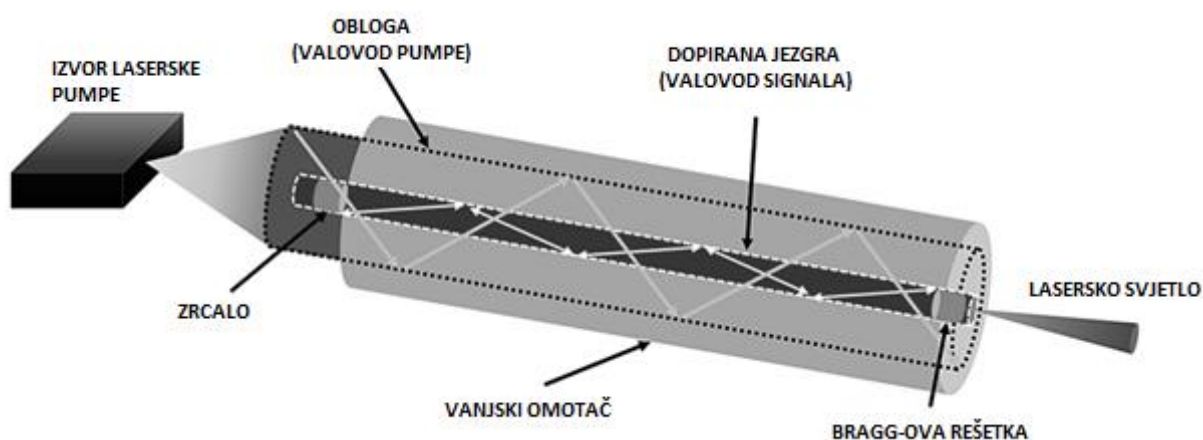
Osim prijašnje navedenih valnih duljina jedna kompanija bazirana u San Franciscu koristi valnu duljinu 850 nm u kombinaciji sa patentiranim pristupom odbijanja ambijentalnog svjetla postiže bolje performanse u vrlo vlažnim uvjetima kao i poboljšanu osjetljivost CMOS detektora [15].

5.2. LASERI

Lidar sustavi najčešće koriste lasere sa valnim duljinama u području infracrvenog zračenja između 0.80m i 1.55m. Prilikom biranja lasera poneke značajke se moraju uzeti u obzir poput vršne snage, brzine ponavljanja impulsa, širine impulsa, valne duljine, vrste emisije, veličine, težine, potrošnje energije i radne temperature [15].

5.2.1. Vlaknasti laser

Fiber laseri koriste optička vlakna kao aktivni medij, oni mogu imati vrlo dugo aktivno područje i time pružiti vrlo velik optički dobitak. Trenutno postoje vlaknasti laseri sa izlaznim snagama od nekoliko stotina vata (W), a ponekad i nekoliko kilovata (kW) iz samo jednog vlakna. Imaju vrlo veliku stabilnost, nemaju problem pri visokim temperaturama (iako njihova konfiguracija omogućuje dobro hlađenje zbog niskog i raspršenog zagrijavanja) i na izlazu daju kvalitetnu zraku sa malom divergencijom. Njegove glavne mane su visoka cijena i veća veličina u odnosu na ostale [15].

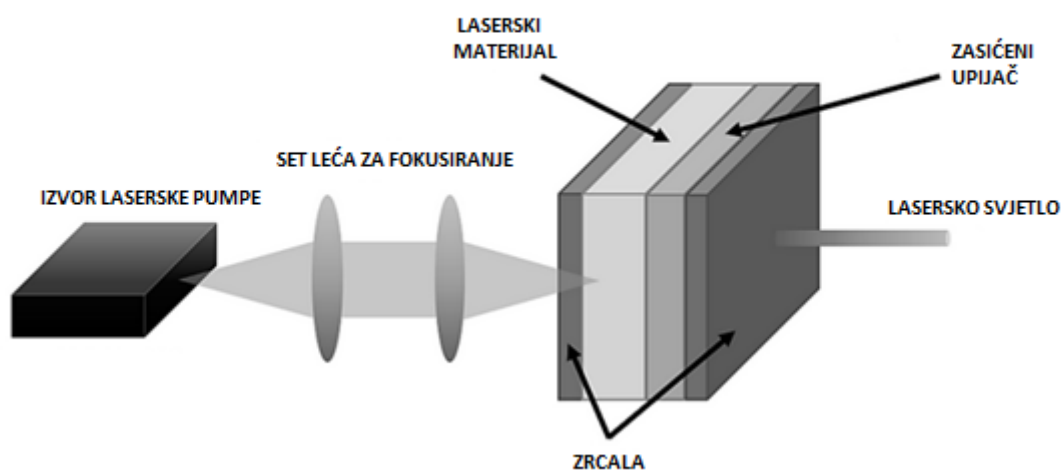


Prikaz 16. Shematski prikaz dijelova vlaknastog lasera

Izvor: Royo, S., Ballesta-Garcia, M. (2019). 'An Overview of Lidar Imaging Systems for Autonomous Vehicles', *Applied Sciences*, vol. 9(19), 409, online: <https://www.mdpi.com/2076-3417/9/19/4093#cite>

5.2.2. Mikročip laser

Mikročip laseri su solid-state laseri sa komadom dopiranog stakla ili kristala debljine nekoliko milimetara koji imaju funkciju medija. Njegov dizajn omogućuje velike količine energije u mediju lasera te pružaju prihvatljivi balans između maksimalne snage i trajanja impulsa sa niskom cijenom u masivnoj proizvodnji, također kompaktne i robustne su konstrukcije te imaju nisku potrošnju električne energije. Na slici je prikazan shematski dijagram mikročip lasera [15].

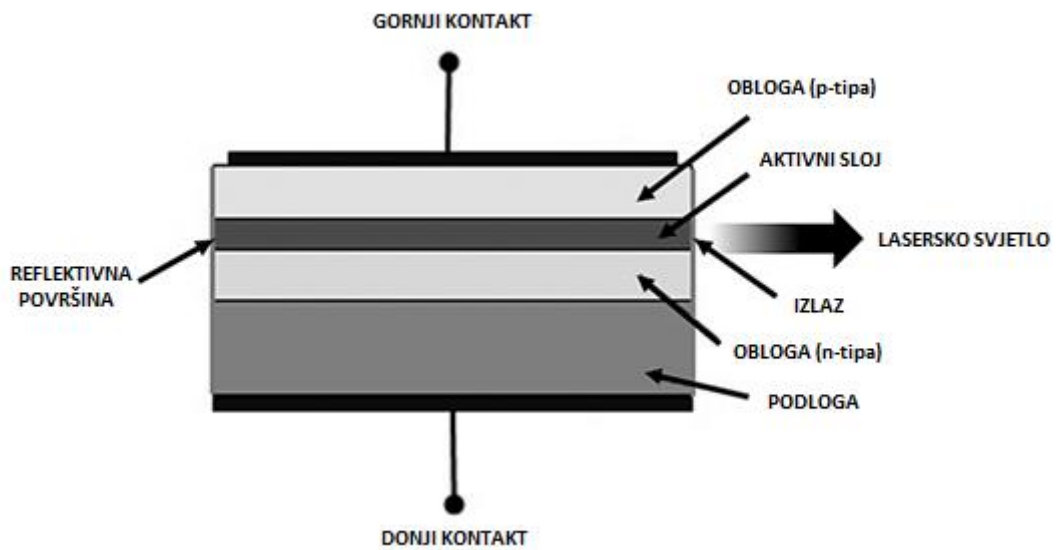


Prikaz 17. Shematski prikaz mikročip lasera

Izvor: Royo, S., Ballesta-Garcia, M. (2019). 'An Overview of Lidar Imaging Systems for Autonomous Vehicles', *Applied Sciences*, vol. 9(19), 409, online: <https://www.mdpi.com/2076-3417/9/19/4093#cite>

5.2.3. Diodni laser

Diodni laseri su najraširenija vrsta koja se koristi u gotovo svakom lidar-u, postoje dvije glavne vrste diodnih lasera : interband laser, koji koristi tranziciju sa jednog elektroničkog pojasa na drugi i quantum cascade laser (QCL) koji djeluje na unutar pojase transzicije. Diodni laseri su vrlo kompaktni i jeftini, ali postaju limitirani u upotrebi zbog smanjene stope ponavljanja (repetition rate) i povećane širine impulsa. Nadalje, laseri visokih snaga su najčešće u EEL (edge emitting laser) konfiguraciji što dovodi do smanjenja kvalitete snopa zraka. Na slici() je prikazan shematski dijagram EEL diodnog lasera [15].



Prikaz 18. Shematski prikaz diodnog lasera u EEL izvedbi

Izvor: Royo, S., Ballesta-Garcia, M. (2019). 'An Overview of Lidar Imaging Systems for Autonomous Vehicles', *Applied Sciences*, vol. 9(19), 409, online: <https://www.mdpi.com/2076-3417/9/19/4093#cite>

5.3. FOTODETEKTORI

Fotodetektori su fotoelektrični elementi u kojem svjetlost direktno uzrokuje promjenu nekih električnih svojstava poput vodljivosti koristeći fotoelektrični efekt. Najvažnija karakteristika fotodetektora je osjetljivost koja se odnosi na njegov odaziv prilikom primanja fotona i ona ovisi valnoj duljini korištenog lasera. Najkorišteniji detektori su PIN fotodioda, lavinska fotodioda (avalanche photodiode, APD), lavinska fotodioda koja može detektirati pojedine fotone (single photon avalanche photodiode, SPAD) i Si photomultipliers (SiPM) fotodetektor [19,25].

5.3.1. PIN fotodioda

Ovaj tip fotodiode se sastoji od p-dopiranog i n-dopiranog poluvodičkog materijala te intrinzičnog područja koji se nalazi između njih. Kada je korištena kao fotodetektor je reverzno polarizirana i u tom slučaju dioda ne vodi do trenutka kada na nju dođe foton sa dovoljno energije da dioda provede. PIN fotodiode su malih dimenzija, jeftine, mogu biti izrađene od raznih materijala i imaju veliki omjer pretvorbe fotona u elektrone; no njihova osjetljivost nije dovoljna za primjene u okolini sa niskom razinom osvjetljenja [15, 19, 25].

5.3.2. Lavinska fotodioda

Lavinska fotodioda (APD) istog je sastava kao i PIN fotodioda no lavinska ima i p+područje u kojem elektroni i šupljine (već nastali nosioci) stvaraju nove parove koji su sastavljeni od elektrona i šupljina čime povećavaju fotostruju. Navedeni proces se naziva lavinski proces. APD fotodiode su danas vrlo čest izbor u lidar sustavima zbog svojstva dodatnog unutarnjeg pojačanja koji im omogućuju detekciju slabijih signala. Ova vrsta fotodiode malih je dimenzija, male snage i velike pouzdanosti, dok su joj mane manje pojačanje u odnosu na fotomultiplikator i šum [19, 25].

5.3.3. Jednofotonska lavinska fotodioda

Jednofotonska lavinska fotodioda (engl. Single photon avalanche photodiode, SPAD) dizajnirana isto kao iznad navedena APD da radi u Geigerovom režimu i mogu imati ulogu brojača fotona [26]. SPAD može ostvariti pojačanje od 10⁶ što je znatno više od APD. Ova vrsta fotodiode je vrlo efikasna u područjima sa slabim osvjetljenjem i može se koristiti kada je potrebna visoka osjetljivost na razini detekcije jednog fotona. SPAD se koristi u mnoštvu lidar sustava, no glavni nedostatak im je osjetljivost na reflektirajuće objekte (tablice vozila, prometni znakovi) zbog kojih dolazi do zasićenja detektora ostavljajući ga beskorisnim u nekim trenucima [15, 19].

5.3.4. Si fotomultiplikator

SPAD su vrlo efektivni u detekciji jednog fotona i daju digitalni izlaz u prisutnosti jednog ili više fotona. Signal dobiven detekcijom jednog ili više fotona biti će jednak što je nedostatak u pojedinim vrstama primjena. Kako bi se to izbjeglo, SiPM (Si photomultiplier) integrira gusti niz mikroćelija koje rekombiniraju izlazni signal svake zasebne mikroćelije i

spaja ih u zajednički analogni izlaz. Tipični SiPM ima gustoću mikroćelija između 100 i nekoliko 1000 po mm^2 ovisno o veličini jedinice. Njegove karakteristike uvelike ovise o naponu koji se koristi i temperaturi okoline. Povećanjem reverznog napona povećava se električno polje unutar uređaja što poboljša učinkovitost detekcije fotona, poboljša pojačanje i vremensku rezoluciju; no povećava mogućnost lažnog okidanja do termalnog šuma i smanjuje omjer signala i šuma. Zbog svojih karakteristika vrlo je koristan uređaj za primjenu u slučajevima niske razine osvjetljenja [19].

6. TROŠKOVI I BUDUĆNOST LIDAR SUSTAVA

6.1. TROŠKOVI LIDAR SUSTAVA

Iako je radarski sustav postao standardan posljednjih godina što ga je posljedično učinilo i vrlo ekonomično pristupačnim, lidar je s vremenom postao sve poznatiji u automobilskoj industriji. S porastom popularnosti, cijena je naglo padala. Jedan od prvih lidar sustava koji je korišten za mnoga autonomna vozila imao je težinu od trinaest kilograma i cijenu od 80000 USD. Procjenjuje se da je vrijednost lidar-a pala s 50 000 USD na svega ispod 10 000 USD, dok se procjenjuje da će do 2022 pasti ispod 200 USD [3].

Očekivano je da će lidar tehnologija napredovati vrlo brzo u narednim godinama. Prema Yole Developpementu u 2017. godini vrijednost tržišta automobilskih lidar sustava bila je 726 milijuna dolara, a isti predviđaju porast od 5 milijardi dolara do 2023. godine. Ovakav napredak u industriji potaknule su mnoge tvrtke poput Mitsubishi, Nissan, Toyota i Denso [5].

6.2. BUDUĆNOST LIDAR SUSTAVA

Glavni cilj za budućnost je u potpunosti zamijeniti lidar sustave sa pokretnim djelovima te smanjiti njihovu cijenu na manje od 100 dolara [6]. Novija istraživanja i razvoj tehnologija dovode i to razvoja samog lidar sustava kojima je cilj povećati i poboljšati isti. Neke od tehnologija koje se razvijaju su flash lidar te MEMS skeneri. Flash lidar je unaprijeđeni lidar u kojem cijelo područje nije skenirano već osvijetljeno u jednoj vremenskoj točki čime se smanjuju pokretni dijelovi i smanjuju troškovi proizvodnje. Nadalje, tvrtke nastoje unaprijediti lidar povećanjem snage lasera za čak 720 nm (od 830 nm do 1550 nm). Time bi lidar bio otporniji na prašinu te bi imao preciznija detektiranja u uvjetima poput kiše. Nadalje, kao jedna od tehnologija u razvoju kojima se nastoji unaprijediti lidar naziva se mikroelektromehanički sustav skeneri ili MEMS skeneri koji se temelje na prethodnim lidar skenerima. Prednosti MEMS skenera su u njegovoj veličini (manji je od prethodnog lidar-a), ekonomičnosti, većoj preciznosti i točnosti. Nadalje, MEMS skeneri, koriste samo dio energije, pomoću dva lasera skeniraju (na zasebnim osi) te ne koriste jedan široki laser već se odražavaju na zrcalo. Upravo zbog dvije osi koje koristi, MEMS skeneri mogu uočiti sitnije kretnje u kraćem vremenskom intervalu od lidar-a čime daju autonomnim vozilima kraće odnosno brže vrijeme reakcije [5].

7. ZAKLJUČAK

Autonomna vozila, odnosno sva vozila koja imaju mogućnost manevrirati prometnicama i interpretirati prometne uređaje bez aktivnog sudjelovanja vozača, su budućnost svijeta. Osnovni cilj razvoja autonomnih vozila je smanjenje broja nesreća uzrokovanih ljudskom pogreškom te time i smanjenje broja stradalih osoba u prometu odnosno broja smrtnih slučajeva koji su uzrokovani pogreškom korisnika odnosno operatera. Kao još jedna prednost autonomnih vozila, smatra se olakšano kretanje ljudi, posebno starijih osoba, osoba koje još nemaju vozačku dozvolu te osoba koje ne mogu upravljati vozilom zbog svojeg invaliditeta. Uz prednosti, potrebno je naglasiti nedostatke ili negativne učinke koje za sobom nosi kao što je povećanje potrošnje energije te smanjenje korištenja zrakoplovnih prijevoznika. Cilj svakog proizvođača automobila je postići što veću razinu autonomije (od mogućih šest), a kako bi to postigli potrebno je razviti senzorske sustave te naprednu tehnologiju za procesuiranje dobivenih podataka. Najvažniji sustav za autonomna vozila, uz kamere, radar i ultrazvučne senzore, je lidar. Razvoj i napredak tehnologije lidar sustava, postepeno smanjuje njegovu tržišnu cijenu te time doprinosi razvoju autonomnih vozila te povećanju pristupačnosti široj javnosti.

U bliskoj budućnosti možemo očekivati sve više autonomnih vozila te razvoj lidar sustava, ali i ostalih vrsta senzora koji će omogućiti potpunu autonomnost vozilima i pristupačnost "običnom čovjeku". Tijekom istraživanja materijala za ovaj završni rad stekao sam mnoštvo novih saznanja i uvida o svijetu industrije autonomnih vozila, ali i svijetu tehnologije senzora, ponajviše dakako lidar sustava čiji daljnji nastavak razvijanja neće doprinijeti samo automobilskoj industriji već i u agrikulturi, mjerenju onečišćenja zraka, arheologiji i graditeljstvu.

LITERATURA

- [1] Study: The rise of autonomous vehicles, 2021, online:
<https://www.steinlaw.com/resources/studies/the-rise-of-autonomous-vehicles/>
(06.07.2021.)
- [2] Rapp, J. et al. 2020. 'Advances in Single-Photon Lidar for Autonomous Vehicles: Working Principles, Challenges, and Recent Advances', *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 37, no. 4, p. 62-71, online:
https://pure.hw.ac.uk/ws/portalfiles/portal/41662542/SPM_AV_1.pdf
- [3] Khader, M., Cherian, S. (2020). 'An Introduction to Automotive LIDAR', *Texas Instruments Incorporated*, online: <https://www.scribd.com/document/481425544/An-Introduction-to-Automotive-LIDAR-Rev-A>
- [4] The 6 Levels of Vehicle Autonomy Explained, 2021, online:
<https://www.synopsys.com/automotive/autonomous-driving-levels.html> (05.07.2021.)
- [5] Shaukat, A. (2021). *Što je Lidar?*, Električar u kući i na radnom mjestu, online:
<https://hr.answersexpress.com/what-is-lidar-46559>
- [6] Hecht, J. (2018). Lidar for Self-Driving Cars, siječanj, The Optical Society, online:
https://www.osapublishing.org/DirectPDFAccess/FAAD49F5-60F8-45CC-A7F59C080CF47249_380434/opn-29-1-26.pdf?da=1&id=380434&seq=0&mobile=no
- [7] Opačić, A. (2007). 'Autonomna vozila - automobili budućnosti', *Ekscentar*, Vol 10, p. 114-115, online: <https://hrcak.srce.hr/20691>
- [8] Galić, D. (2019). *Autonomna vozila – hoćemo li ikada sjediti u automobilima bez volana?*, 17. kolovoza, Autonet, online:
<https://www.autonet.hr teme/predstavljamo/autonomna-vozila-hocemo-li-ikada-sjediti-u-automobilima-bez-volana/> (05.07.2021.)
- [9] Fossen T., Pettersen K. Y., Nijmeijer H. (2017). *Sensing and Control for Autonomous Vehicles*, Springer International Publishing AG.
- [10] Scott Brown, D. (2019). *Driverless Cars: Levels of Autonomy*, 22. kolovoz, Technopedia, online: <https://www.techopedia.com/driverless-cars-levels-of-autonomy/2/33449> (06.07.2021)
- [11] Rablau, C. (2019). 'Lidar: a new self-driving vehicle for introducing optics to broader engineering and non-engineering audiences', Fifteenth Conference on Education and

Training in Optics and Photonics: ETOP 2019, online: https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?uri=ETOP-2019-11143_138

[12] Rasshofer, R.H., Spies, M., Spies, H. (2011). 'Influences of weather phenomena on automotive laser radar systems', *Adv. Radio Sci*, vol. 9, p. 49–60., online: https://www.researchgate.net/publication/307751693_Influences_of_weather_phenomena_on_automotive_laser_radar_systems

[13] *What is Lidar?*, 2020, online: <https://velodynelidar.com/what-is-lidar/> (05.07.2021.)

[14] How Self-driving Cars Work: Sensor Systems, 2021, online: <https://www.udacity.com/blog/2021/03/how-self-driving-cars-work-sensor-systems.html> (06.07.2021)

[15] Royo, S., Ballesta-Garcia, M. (2019). 'An Overview of Lidar Imaging Systems for Autonomous Vehicles', *Applied Sciences*, vol. 9(19), 409, online: <https://www.mdpi.com/2076-3417/9/19/4093#cite>

[16] Williams, G.M. (2017). 'Optimization of eyesafe avalanche photodiode lidar for automobile safety and autonomous navigation systems', *Opt. Eng.*, vol. 56, p. 031224, online: <https://www.spiedigitallibrary.org/journals/Optimization-of-eyesafe-avalanche-photodiode-lidar-for-automobile-safety-and/volume-56/issue-03/031224/Optimization-of-eyesafe-avalanche-photodiode-lidar-for-automobile-safety-and/10.1117/1.OE.56.3.031224.full>

[17] Gelbart, A., Redman, B.C., Light, R.S., Schwartzlow, C.A., Griffis, A.J. (2002). 'Flash lidar based on multiple-slit streak tube imaging lidar', *Proceedings of the Laser Radar Technology and Applications VII, Bellingham, WA, USA*, vol. 4723, p. 9–19, online: https://www.researchgate.net/publication/241589350_Flash_lidar_based_on_multiple-slit_streak_tube_imaging_lidar

[18] McManamon, P.F., Banks, P., Beck, J., Huntington, A.S., Watson, E.A. (2016). 'A comparison flash lidar detector options', *Laser Radar Technology and Applications XXI; SPIE: Bellingham, WA, USA*, vol. 9832, p. 983202, online: https://www.researchgate.net/publication/314300443_Comparison_of_flash_lidar_detector_options

- [19] Li, Y., Ibanez-Guzman, J. (2020). 'Lidar for Autonomous Driving: The principles, challenges, and trends for automotive lidar and perception systems', *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 37, p. 50-61, online: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9127855>
- [20] Campbell, S. *et al.* (2018). 'Sensor Technology in Autonomous Vehicles: A review', *Irish Signals and Systems Conference (ISSC)*, p. 1-4, online: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8585340>
- [21] Aldibaja, M., Suganuma, N., Yoneda, K. (2017). 'LIDAR-data accumulation strategy to generate high definition maps for autonomous vehicles', *IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI)*, pp. 422-428, online: <https://www.semanticscholar.org/paper/LIDAR-data-accumulation-strategy-to-generate-high-Aldibaja-Suganuma/ff44e4ab293838bfd6aaca4f90bde18a3a05dcd7>
- [22] Levinson, J., Montemerlo, M., Thrun, S. (2007). 'Map-Based Precision Vehicle Localization in Urban Environments', *Robotics Science and Systems*, online: https://www.researchgate.net/publication/221344565_Map-Based_Precision_Vehicle_Localization_in_Urban_Environments
- [23] Sivaraman, S., Trivedi, M. (2013). 'Looking at vehicles on the road: A survey of vision-based vehicle detection, tracking, and behavior analysis', *Intelligent Transportation Systems, IEEE Trans*, vol. 14, p. 1773-1795, online: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6563169>
- [24] Levinson, J., Thrun, S. (2010). 'Unsupervised Calibration for Multi-beam Lasers', *International Symposium on Experimental Robotics*, online: <http://driving.stanford.edu/papers/ISER2010.pdf>
- [25] *Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje* (2021). Leksikografski zavod Miroslav Krleža, online: <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=20238> (06.07.2021.)
- [26] Milevoj, D. (2019). 'Utjecaj gama zračenja na silicijsku lavinsku fotodiodu kao brojač fotona u Geigerovom režimu rada', Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet, online: <https://zir.nsk.hr/islandora/object/pmf%3A7659> (06.07.2021.)

KAZALO KRATICA

| Kratika | Puni naziv na stranom jeziku | Tumačenje na hrvatskom jeziku |
|---------|--|--|
| ABS | njem. Antiblockiersystem | Sustav protiv blokiranja kotača automobila |
| AI | engl. artificial intelligence | Umjetna inteligencija |
| APD | avalanche photodiode detector, APD | Detektora lavinska fotodioda |
| AV | engl. autonomous vehicles | autonomna vozila |
| CAV | engl. Connected Autonomous Vehicle | Povezana autonomna vozila |
| DARPA | engl. Defence Advanced Research Projects Agency | Agencija za obranu naprednih istraživačkih projekata |
| EEL | engl. edge emitting laser | Rubno emitirajući laser |
| FMCW | engl. coherent frequency modulated continuous wave | Koherentni frekvencijski modulirani kontinuirani val |
| FOV | engl. field of view | Vidno polje |
| LIDAR | engl. light detection and ranging | svjetlosno zamjećivanje i klasifikacija |
| LRR | engl. long-range radar | Radar dugog dometa |
| MEMS | engl. microelectromechanical system | Mikroelektromehanički sustav |
| OPA | engl. optical phase arrays | Optički fazni niz |
| SAE | engl. Society of Automotive Engineers | Društvo automobilskih inženjera |
| SRR | engl. Short-range radar | Radar kratkog dometa |
| TOF | engl. time of flight | Koji radi na principu vremena leta |

POPIS GRAFIKONA

| | |
|--|---|
| Grafikon 1. Procijenjeni razvoj autonomnih vozila (AV) po različitim područjima..... | 5 |
|--|---|

POPIS PRIKAZA

| | |
|--|----|
| Prikaz 1. Prikaz razina autonomnije | 8 |
| Prikaz 2. Prvi primjer senzorskih sustava autonomnih vozila..... | 10 |
| Prikaz 3. Drugi primjer senzorskih sustava autonomnih vozila | 10 |
| Prikaz 4. Rad lidar-a baziran na mehaničkom skeniranju | 16 |
| Prikaz 5. Različiti Velodyne spinning lidar modeli..... | 17 |
| Prikaz 6. Jednodimenzionalni niz optičkih elemenata OPA-e | 19 |
| Prikaz 7. Usporedba između načina snimanja objekata scanning i flash lidar-a..... | 21 |
| Prikaz 8. Linearna FMCW modulacija signala i beat frekvencije koje proizvede ometanjem između poslanog i odbijenog signala | 22 |
| Prikaz 9. Osnovni princip rada lidar-a i vremenski dijagram impulsa | 24 |
| Prikaz 10. Fotografija oblaka točaka nastalih skeniranjem lidar-a..... | 25 |
| Prikaz 11. Fotografija oblaka točaka nastalih skeniranjem lidar-a..... | 26 |
| Prikaz 12. 3D oblak točaka lidar-a | 27 |
| Prikaz 13. Lidar koordinatni sustav vozila (a) te apsolutni koordinatni sustav..... | 28 |
| Prikaz 14. Stvaranje više kadrova mape | 30 |
| Prikaz 15. Distribucija piksela kadrova i fotografija mape nastale spajanjem 560 kadrova | 31 |
| Prikaz 16. Shematski prikaz dijelova vlaknastog lasera..... | 33 |
| Prikaz 17. Shematski prikaz mikročip lasera..... | 34 |
| Prikaz 18. Shematski prikaz diodnog lasera u EEL izvedbi..... | 35 |

POPIS SHEMA

| | |
|---------------------------------------|----|
| Schema 1. Podjela lidar sustava | 15 |
|---------------------------------------|----|