

Stikusjá

Sævar Þór Jónasson
saevar@inertia.is
Mars 2026

Útdráttur

Í þessu verkefni rannsökum við ratsjá fyrir vegstíkur sem er sérstaklega hönnuð til að aðstoða ökumenn að aka í erfiðum aðstæðum vegna snjóbyls, rigninga, þoku eða gosösku. Til að uppfylla þetta markmið er lögð fram hönnun á samræmandi 10.5 GHz FMCW ratsjá. Á Íslandi eru um 350.000 vegstíkur um allt land og með því að bæta sérhönnuðu endurskini á þær eykst endurspeglunarstyrkurinn sem getur hjálpað við að ákvarða staðsetningu þeirra, og þar af leiðandi, vegsins. Valdir eru íhlutir sem notaðir verða til að búa til frumgerð á seinni stígunum.

Þetta er einungis áfangaskýrsla og mun taka breytingum í lokaskýrslu. Höfundar skýrslunnar bera ábyrgð á innihaldi hennar. Niðurstöður hennar ber ekki að túlka sem yfirlýsta stefnu Vegagerðarinnar eða álit þeirra stofnana eða fyrirtækja sem höfundar starfa hjá.

Kafli 1

Inngangur

Á hverjum vetri á Íslandi eru vegir lokaðir vegna snjóbylja, snjókomu eða þoku sem veldur vondu skyggni eins og sýnt er á Mynd 1.1. Öskufall frá eldgosum hafa einnig valdið erfiðleikum við akstur í nokkur skipti síðustu ár, sýnt á Mynd 1.2. Sandstormar, reykur frá bruna, ísboka og úrhellisrigning eru einnig eitthvað sem fólk upplifir erlendis og getur valdið slæmu skyggni.



Mynd 1.1: Mjög slæmt skyggni í snjóbyl [1].

Venjulegt fólk, oft með börn í bílnum, festast uppá heiðum eða fjallvegum þar sem skyggni er lítið sem ekkert, fennt hefur yfir dekkjaför fyrra bíla sem gerir það oft ómögulegt að fylgja veginum. Heil bæjarfélög og nauðsynlegar þjónustur geta lokast af, oft á versta mögulega tíma. Forgangsbílar eins og sjúkrabílar og slökkvilið geta átt í erfiðleikum með að komast sinna leiða, og vistir komast ekki á áfangastað þegar þörfin er sem mest. Flutningur af blóðprufum eða öðrum lífsýnum úr veikum einstaklingur eru oft seinkaður vegna þess að þau ná ekki á áfangastað eins og gerðist þegar COVID-19 gekk yfir heimsbyggðina.

Akstur bifreiða í slæmum veðurskilyrðum eins og mikilli snjókomu, þoku eða úrhellisrigningu getur verið krefjandi sökum lélegs skyggnis. Sýnilegt ljós endurkastast eða gleypist í þessum veðurskilyrðum vegna víxlverkunar þess við agnir í loftinu (eins og vatnsdropa, snjókorn, ísskristallar, ösku, ryki eða mengun). Sýnilegt ljós hefur bylgjulengd á milli 400 nm (fjólublátt) og 700 nm (rautt), sem er sambærilegt að stærð eða aðeins minna en agnirnar sem valda Mie- og rúmfræðlegri dreifingu. Í þessum veðurskilyrðum falla milljónir agna eða eru svifandi í loftinu sem veldur dreifðu jöfnu endurkastandi á öllum litum næstum jafn



Mynd 1.2: Björgunarsveitir að störfum í öskufalli [2].

mikið, sem leiðir til hvíts eða gráleitt útlits.

Fyrir utan þess að hafa slæmt skyggni þegar ekið er á veturna vegna snjóbylja, eru vegstíkur oft þaktar snjó eða drullu, sem gerir þær oft nær ósýnilegar þegar ekið er um veginna.

Tækni sem virkar við eða nálægt sýnilegu ljósi, eins og myndavélar og laser, er takmörkuð af sömu lögmálum eðlisfræðinnar, eins og áður hefur verið lýst, og þegar við notum augun okkar til að horfa fram á veginn á meðan við ökum. Sýnilegt ljós er aðeins rafsegulsvið með ákveðinni bylgjulengd, líkt og útvarpsbylgjur, röntgengeislun og örbylgjur.

Rafsegulbylgjur með bylgjulengdina 3-300 mm (1 GHz - 100 GHz) verða ekki eins mikið fyrir áhrifum þessara litlu agna (þoka, snjór, ís) og sýnilegt ljós og gætu því verið notaðar til að "sjá" gegnum þessi veðurskilyrði. Ratsjár er þróuð og sönnuð tækni sem er venjulega notuð til að mæla fjarlægð, hraða og staðsetningu flugvéla, skipa, eldflauga og bíla, til að nefna nokkur dæmi

Hugmyndin sem lögð er fram hér skoðar hvernig ratsjá getur verið notuð til að greina plast vegstíkur við vegkantinn til að aðstoða við akstur í óhagstæðum veðurskilyrðum. Ratsjá sendir rafsegulbylgjur sem endurkastast af umhverfi sínu, og hluti af sendri bylgjunni endurkastast aftur til ratsjárinnar þar sem hægt er að reikna fjarlægð og hlutfallslegan hraða.

Hugmyndin er að þróa og hanna svokallaða Vegvísunar Ratsjá eða Stikusjá sem getur skannað veginn fyrir framan og greint vegstíkur við vegkantinn í öllum veðurskilyrðum, og sýnt staðsetningu þeirra á skjá miðað við staðsetningu ökutækisins. Slíkt kerfi gæti leyft ökutækjum — sérstaklega neyðarökutækjum — að keyra í blindum aðstæðum. Í stærri framtíðarsýn fyrir verkefnið gæti þróun og framleiðsla slíkrar stikusjár bætt gervigreindar sjálfkeyrandi ökutæki, sem eru núna fyrst og fremst þjálfuð í betri veðurskilyrðum. Þessi viðbót myndi gera sjálfkeyrandi ökutækjum einnig færa um að starfa í erfiðum veðurskilyrðum.

Stikusjá er byggð á því að senda rafsegulbylgjur á örbylgjurófi eftir vegnum fyrir framan til að greina veg- og snjóstíkur sem eru til staðar við vegkanta víða um lönd. Á meðan á rannsókn á fyrri vinnu fyrir þetta verkefni stóð, var ratsjá til að greina vegmerkjar lögð fram í [3]. Að bestu vitund höfundar hefur ratsjá aldrei verið þróuð sérstaklega til að greina vegstíkur. Slík ratsjá þarf að vera sérstaklega hönnuð til að greina veg- og snjóstíkur á eins nákvæman hátt og mögulegt er.

Verkefnið miðar að því að setja saman ratsjá úr þeim íhlutum sem henta best og prófa hana á nálægum og fjarlægum vegstikum í bæði góðu og slæmu veðri. Viðamikil merkjavinnsla verður nauðsynleg til að aðgreina merkin frá umhverfinu, hvort sem það eru önnur ökutæki, steinar eða tré. Einnig þarf að þróa hugbúnað til að sýna niðurstöðurnar skýrt á skjá.

Í þessu fasa verkefnisins, styrkt af Vegagerðinni, er markmiðið að greina verkfræðilega þætti og hönnun til að skilgreina tæknilegar kröfur og hönnunar ákvarðanir.

Þessi skýrsla er á íslensku og mörg orðanna hafa verið þýdd úr ensku yfir á íslensku af höfundi þar sem íslensku orðin eru ekki til og höfundur er vanari að nota ensku orðin og hugtökin.

Höfundar skýrslunnar bera ábyrgð á innihaldi hennar. Niðurstöður hennar ber ekki að túlka sem yfirlýsta stefnu Vegagerðarinnar eða álit þeirra stofnana eða fyrirtækja sem höfundar starfa hjá.

Kafli 2

Ratsjá sem Akstursaðstoð

2.1 Inngangur

Að stjórná ökutækjum í slæmum veðurskilyrðum eins og mikilli rigningu, þoku eða snjó getur verið krefjandi vegna minna skyggis. Ratsjártækni býður upp á áreiðanlega lausn með því að greina hluti sem erfitt er að sjá með berum augum eða optískum skynjurum. Þessi kafli skoðar hvernig ratsjá getur verið notuð til að greina plast vegstikur við vegkanta til að aðstoða við akstur í óhagstæðum veðurskilyrðum.

2.2 Ratsjár Bergmál

Ratsjá sendir rafsegulbylgju sem getur hæft mark (t.d. vegstika), og lítill hluti bylgjunnar fer aftur til ratsjárinnar til að verða sömpluð.

Óhjákvæmilega mun rafsegulbylgjan einnig lenda á hlutum sem ekki á að scanna og endurkastast aftur til ratsjárinnar. Mörkin munu oft vera skyggð af þessum óvelkomnu hlutum ef endurkastamerkið frá hlutnum er sterkara en endurkastamerkið frá markinu og þarf að reyna að fjarlægja með síun. Þegar verið er að senda frá ökutæki í átt að veginum framundan, mun rafsegulbylgjan endurkastast af veginum, bílum, trjám, vegstikum, steinum og hverju sem kann að vera á eða í nálægð við veginn. Effektívasta leiðin til að komast að því hvar vegurinn liggur, með ratsjá, er að kortleggja merkin við vegkantinn eins og vegstikur.

2.3 Greining Vegstika með Ratsjá

Vegstikur eru algengar við vegkantinn til að sýna jaðar vegarins, sérstaklega í dreifbýli landsins. Að greina þessar vegstikur með ratsjá getur aðstoðað við að halda sér inná akgrein og fylgja vegnum.

2.3.1 Erfiðleikar í Greiningu á Plast Vegstikum

Vegstikur á Íslandi eru gerðar úr polypropylene (PP) plasti [4]. PP hefur hlutfallslegt permittivitet, $\epsilon = 2.2$, og eiginlega leiðni, $\sigma_e = 0.00025 S/m$, sem þýðir að það er vel einangrandi efni og frekar gegnsætt fyrir rafsegulbylgjur. Það myndi því vera krefjandi að greina endurkastmerki frá plast vegstikum án einhverra breytinga. Það eru til aðferðir til að auka sýnileika plast vegstika fyrir ratsjár. Samkvæmt fyrri framleiðanda plastsins, SET, telja þeir að nýju vegstikur sem nú eru framleiddar í Kína séu gerðar úr polyethylene (PE). [5].

2.3.2 Bæting á Endurkasti Plasts

Það er til fjöldi aðferða til að bæta endurkastsmöguleika rafsegulbylgja eins og að:

- **Málmhúðun:** Þunnu lagi af málmhúðun sem er bætt á plast vegstikur getur snarlega aukið endurkast frá ratsjá.

- **Ratsjár Endurskin:** Festa lítið ratsjár endurskin, eins og passíve málm ferninga.
- **Sérhönnuð Form:** Hönnun endurskins með form sem bæta endurkast ratsjár eins og t.d. Van Atta retro-reflector.

Aðrar aðferðir við að auka endurkast ratsjár og aðstoða við geiningu á vegstikum í samanburði við aðra óvelkomna hluti verður rætt frekar í Kafli 3

2.4 Yfirlit yfir Ratsjárkerfi

Til að greina plast vegstikur skilmerkilega, verður ratsjárkerfi að vera almennilega hannað og stillt. Mikilvægustu þættir sem þarf að skilgreina eru:

- **Frequency:** Val á hentugustu tíðninni ákvarðar stærð loftnetanna og íhlutanna sem eru til á markaði.
- **CW vs Pulsed:** Tvær helstu tækninar í ratsjárheiminum eru CW og pulsed.

2.5 Tíðnival

Tíðnin (eða bylgjulengdin) sem valin er fyrir ratsjá eru meðal mikilvægustu ákvarðana við hönnunina þar sem hún ákvarðar marga eiginleika sem eru afleiðingar ákvörðuninnar eins og stærð loftneta, fánleiki íhluta, leiðartap, rúmfræðileg upplausn, flækjustig framleiðslu, kostnaður, dempun í lofti og meira. Venjulega verður að gera einhvers konar málamiðlanir þar sem engin ein bylgjulengd er ætíð best fyrir radara í þessu tilgangi.

Fyrir þessa ratsjá er 10.5 GHz talið hentugast en sú tíðni veitir góða upplausn og gott veðurgegnsæi. Tæknin er nokkuð þroskuð, loftnetin eru tiltölulega lítil og aðgreining marka frá öðrum hlutum með FMCW. Dempunin er takmörkuð og ýmsar reglugerðir eru til.

Tíðnin á milli 10.5 og 10.6 GHz er sérstaklega tekin frá fyrir tæki sem senda skammt sín á milli eins og tekið er fram í [6] og leyfir tækjum að senda á sérstaks leyfis með að hámarki 500mW E.I.R.P.

2.6 FWCW vs Púlsuð Ratsjá

Aðal munurinn og samsvaranir á milli tíðnimótandi stanslausri-bylgju (FMCW) ratsjá og púlsaðri ratsjá er lýst í þessum undirkafli.

2.6.1 Reginmunur

- **Púlsað:** Sendir háafis púlsa með stuttum millibilum, mælandi flugtíma til að ákvarða fjarlægð.
- **FMCW:** Stöðug sending merkis; FMCW leggur ramp á burðarbylgjuna, reiknar út fjarlægð út frá takttíðninni á milli sent og móttækið merkis.

2.6.2 Flækjustik og Kostnaður Vélbúnaðar

- **Púlsað:** Krefst háspennu púls móturum, hraðri senda/móttöku (T/R) rofa, og háafis magnara, aukin stærð, þyngd og kostnaður.
- **FMCW:** Notar lágaf, stöðuga senda og blandara án T/R rofa, endar í einfaldari, léttari og ódýrari vélbúnaði.

2.6.3 Fjarlægð og Upplausn

- **Fjarlægðar Upplausn:** Fyrir bandbreidd B , er upplausnin $\Delta R \approx c/(2B)$. FMCW kerfi geta náð ΔR í 10–20 cm með 1–1.5 GHz skannaðiri bandbreidd, til samanburðar við púlsaða ratsjá án þess að hafa þörf á mjög háu affi.
- **Hámarks Fjarlægð:** CW hannanir nýta sér lengri samstæða heildunartíma frekar en hámarks afl, samsvarandi næmni púlsaðra ratsjárna til að greina vegstikur á fjarlægðum uppundir 200m.

2.6.4 Afl og Hitastjórnun

- **Púlsað:** Hátt hámarksafl leiðir til hitasveifla og eykur stress á íhluti, sem gerir það nauðsynlegt að veita öfluga kællilausn.
- **FWCW:** Stöðugt lágafsvirkni dregur úr hita toppum og þar með eykum áreiðanleika.

2.6.5 Samantekt

- Svipuð fjarlægðar upplausn.
- Meiri einfaldleiki, kostnaður og minni stærð í FMCW ratsjám.
- Aukinn hitastöðugleiki og áreiðanleiki á FMCW ratsjám.

FMCW topólógi er valin fyrir þetta verkefni þar sem það er talið henta mun betur aðstæðum.

2.7 Niðurlag

Ratsjártækni býður hugsanlega uppá trausta og áreiðanlega lausn til að nema plast vegstikur og aðstoðar ökumenn í að stýra ökutækjum sínum í krefjandi veðurskilyrðum. Með að auka endurkast ratsjáar á vegstikum og með að nota þróuð ratsjárkerfi, get bifreiðar keyrt um á öruggari og skilvirkari hátt í erfiðum aðstæðum. Framtíðarþróun í ratsjártækni og efnum ýtir enn meira undir betra næmi og greiningu á hlutum á vegbrúnum.

Kafla 3

Endurkast Ratsjár frá Sérstöku Endurskini

3.1 Inngangur

Að greina sérstakar ratsjárendurkast frá vegstikum á meðal óæskilegra hluta er mjög mikilvægt fyrir vegstiku ratsjá. Það var staðfest í fyrri kafla að plast vegstikur endurkasta rafsegulbylgjum ekkertsérstaklega vel einar og sér. Þessi kafla skoðar ýmsar þróaðar aðferðir til að gera ratsjár endurkast greinilegri.

Kostnaður hefur einnig áhrif á að ákveða þá aðferð sem er hentugust, þar sem það eru 350.000 vegstikur á Íslandi og á hverju ári eru framleiddar 30.000 vegstikur sem notaðar eru til að skipta um brotnar vegstikur og bæta við á ný svæði [7]. Íslenski plastframleiðandinn SET var helsti framleiðandinn fyrir Vegagerðina í langan tíma þar til nýlega. Verð á hverri vegstiku var [5]:

- Vegstika 0.9m, án endurskins (250 stk eða 500 stk á euro-pallettu): 640ISK
- Vegstika 0.9m, álímd (250 stk eða 500 stk á euro-pallettu): 1527ISK
- Vegstika 0.9m, með endurskini á framanverðu ásett: 1175ISK

Til að festa plast vegstiku í jörðina, þarf fyrst að keyra málm fót í jörðina. Málm fóturinn kostar 400ISK [7].

3.2 Aðferðir til Auðkenningar á Afturkasti

Afturkast er þegar rafsegulbylgjur endurkastast að uppruna sendandans. Aðferðir sem mögulegt er að nota til auðkenningar á afturkasti eru:

- Pólunartækni
- Hámarka afturkastafi
- Passíft afturkastsmótun
- Tíðnidreifing
- Tíma-svæðis tækni
- Doppler-hliðrun
- Ratsjár vitar

Aðeins verður fjallað um pólunartækni og hámarkun afturkastafis þar sem þau eru talin líklegust til að veita passífa lausn sem hægt er að framleiða sem límniðar til að festa á plast vegstikur á raunhæfu verði.

3.3 Krosspólun með Flötu Endurskini

Krosspólun felur í sér notkun pólaðar rafsegulbylgja og nýtingu krosspólunar endurskini. Þessar lausnir geta breytt pólun innsendra bylgja, sem gerir endurkast merkis greinilegt frá óæskilegum hlutum.

Fjöldmörg flöt form geta umpólað. Þessi form fela í sér L-formaðar plötur, kross-dípólar, Jerúsalemskross, víramyndundar línur, ferkantaðar lykkjur, brothrings resonator, slaufu loftnet og hringlaga/eggformaðar plötur.

3.3.1 L-Formaðar Plötur

L-formaðar plötur eru einföld en effektív hönnun fyrir krosspólun. Þær samanstanda af tveimur hornréttum örmum sem sveifla með hornréttu rafsviði, sem hliðra fasa og breyta pólun endurkastsins. Djúp greining á L-formuðu plötunni fer fram í næsta kafla.

3.3.2 Kross-Dípóla Raðir

Kross-dípóla raðir eru gerður úr tveimur dipólum raðað í krossmynstri. Hver dípóll hefur áhrif á einn arm rafsviðs, sem hliðra fasanum sem leiðir til umpólunar. Þessar loftneta raðir eru oft notaðar í ratsjár- og samskiptakerfum til að ná tvípólun eða hringpólun.

3.3.3 Jerúsalemskross

Jerúsalemskrossinn er krossformaður með auka efni í endum hvers arms. Þessi flókna uppbygging víxlverk- ar við margar víddir af rafsviðinu, sem orsakar stýrðri fasahliðrun. Hann er oft notaður í tíðniskilyrtum yfirborðum (FSS) til að ná bandhleypi eða bandstopp eiginleikum með pólunarnæmri hegðun.

3.3.4 Víramyndunar Línur

Víramyndunar línur hafa ormlaga eða zigzag mynstur sem skapar seinkunaráhrif, sem hliðra fasanum til sem getur umpólað. Þessi strúktúr er gjarnan notaður í loftnet og metaefnum til að ná fram snúning pólunar og minnkun flatamáls.

3.3.5 Ferkantaðar Lykkjur

Ferkantaðar lykkjur úr leiðandi efni geta víxlverka við rafsviðið, sem hliðra fasanum vegna útlits þeirra. Þessar lykkjur eru notaðar í FSS til að skapa bandhleypi síu og pólunarnæmu yfirborði.

3.3.6 Brothrings Resonator

Brothrings resonator (SRR) eru hringir með glufum sem skapa resonant strúktúra. Þeir geta skap segulsvið og rafsvið eiginleika, sem leiðir til hliðrun pólunar. SRR eru algengir í metaefnum og metayfirborðum til að ná neikvæðum brotinnvísnum og pólunarstýringu.

3.3.7 Slaufu Loftnet

Slaufu loftnet samanstanda af þríhyrndum formum raðað í slaufuformi. Breið bandbreidd þeirra getur víxlverkað við ýmsar pólunir, sem hliðra fasanum. Slaufu loftnet eru notuð í ofurvíðum (UWB) tækjum og pólunar fjölbreyttum loftnetum.

3.3.8 Hring- og Eggformaðar Plötur

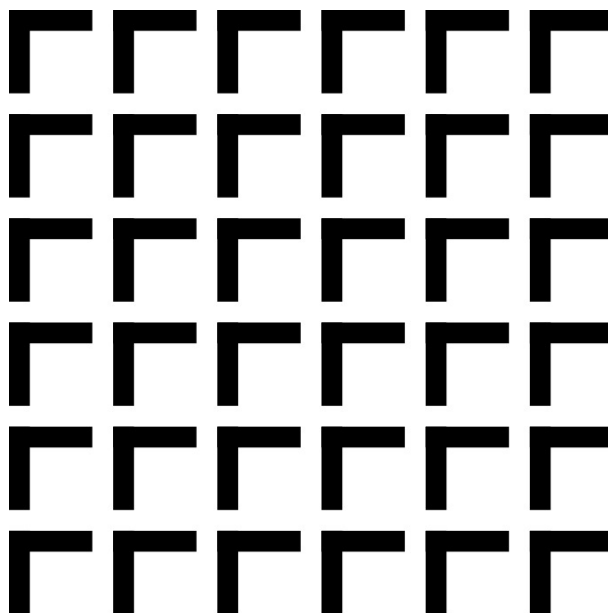
Hring- og eggformaðar leiðandi plötur geta stutt marga mismunandi resonansa, sem valda umpólunum. Þessi form eru víða notuð í microstrip plötu loftnetum til að ná hringpólun.

3.3.9 Samantekt

Flatir endurkastarar sem nota L-formaðar plötur og önnur form veita áhrifaríkar krosspólunarlausnir. Með því að hanna og hámarka þessa strúktúra vandlega má ná fram æskilegum pólunaráhrifum, sem eykur greiningu og árangur ratsjármerkja.

3.4 Krosspólun með L-Formuðum Plötum

L-formaðar plötur eru einföld en áhrifarík hönnun til að ná krosspólun í ratsjám- og samskiptakerfum (Mynd 3.1). Þessar plötur samanstanda af tveimur hornréttum örmum sem sveiflast með hornréttum þáttum rafsviðsins, sem hliðra fasanum og breyta pólun endurkastans. Þessi undirkafla skoðar hönnun, virkni og notkun L-forma plötur. Dæmi um slíkt form má finna í [8].



Mynd 3.1: L-formaðar plötu raðir.

3.4.1 Hönnun af L-Formuðum Plötum

Hönnun af L-formuðum plötum er ákvarðað af bylgjulengdinni af innkomandi rafsegulbylgju. Fyrir tíðni í kringum 10 GHz, er bylgjulengdin (λ) 30 mm.

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{10 \times 10^9 \text{ Hz}} = 0.03 \text{ meters} = 30 \text{ mm}$$

Hver armur L-formuðu plötunnar ætti að vera um það bil $\lambda/4$, eða 7.5 mm, til að sveifla áhrifaríkar við 10 GHz.

$$\lambda/4 = \frac{30 \text{ mm}}{4} = 7.5 \text{ mm}$$

3.4.2 Virkni Umpólunar

L-formaða platan hliðrar fasanum á milli hornréttra þátta rafsviðsins (E_x og E_y). Svo virkar þetta:

3.4.3 Víxlverkun við Rafsviðið

- **Láréttur Armur:** Sveiflast með láréttum þætti (Ex) rafsviðsins.
- **Lóðréttur Armur:** Sveiflast með lóðréttum þætti (Ey) rafsviðsins.

3.4.4 Fasahliðrun

L-formaða platan hliðrar fasa mun á milli tveggja þátta vegna mismunandi lengda og sveifuskilyrða fyrir lárétta og lóðrétta arma.

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x$$

Þar sem:

- $\Delta\phi$ er fasahliðrun.
- ϕ_y er fasi lóðrétta þáttsins.
- ϕ_x er fasi lárétta þáttsins.

3.4.5 Niðurstöður Pólunar

Samsetning fasahliðrandi þátta (Ex og Ey) leiðir til nýs pólunarástands. Til dæmis:

- Ef innkomandi bylgjan er lárétt póluð og L-formaða platan skapar 90 gráðu fasa hliðrun, getur endurkast bylgjan orðið með lóðréttri pólun.
- Nákvæm pólun endurkast bylgjunnar fer eftir hönnunarparametrum L-forma plötunnar, þar á meðal lengd arma, horninu á milli þeirra og tíðni innkomandi bylgjunnar.

3.4.6 L-Formuð Plata fyrir Krosspólun við 10 GHz

Ef við íhugum dæmi um hönnun fyrir L-formaða plötu sem breytir láréttri pólun rafsegulbylgja í lóðrétta pólun við 10 GHz.

Hönnunarparametrar

- **Tíðni:** 10 GHz
- **Bylgjulengd (λ):** 30 mm
- **Lengd Arms:** 7.5 mm (um það bil $\lambda/4$)
- **Breidd Arms:** 1.5 mm (cirka $\lambda/20$)

Hermun og Bestun

Með notkun rafsegul hermunar hugbúnaðar (t.d. CST Microwave Studio, HFSS, OpenEMS) er hægt að móta og besta hönnun L-formaða plötunnar. Breytingar á viddum og bilum plötunnar má gera til að besta skilvirkni krosspólunar og styrk endurkast við 10 GHz.

3.5 Hámörkun Afturkastafis

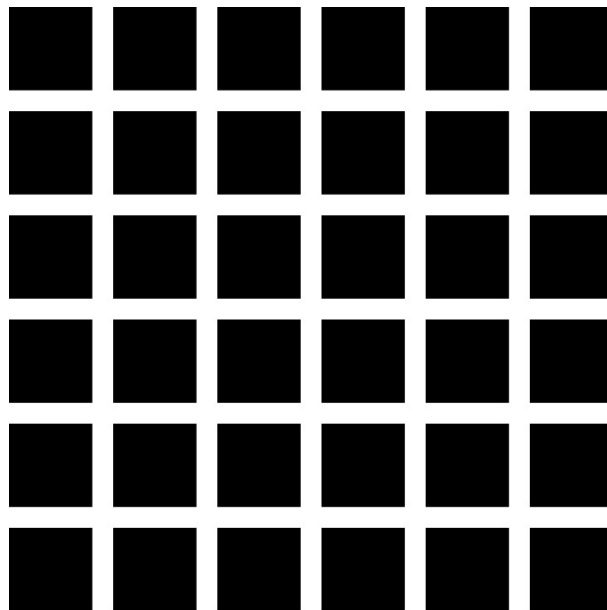
Þegar rafsegulbylgja með einhverju afli er send frá ratsjá, er minna afl sem endurkastast af markinu og til baka. Með því að hámarka afl sem kemur til baka er hægt að aðgreina markið frá óæskilegum hlutum betur.

3.5.1 Aðferðir til að Hámarka Afturkast

Besta aðferðin til að hámarka afturkast frá ratsjá væri að hafa málmhorns endurkastara af óendanlegri stærð. Horn endurkastari er þrívíður strúktúr sem er gerður úr þremur hornréttum málm yfirborðum sem endurkastar í raun allri innkomandi orku aftur til upprunans. Því væri það í princippinu best að setja hundruð þúsunda slíkra strúktúra í kringum Ísland sem vegstikur fyrir ratsjá. Raunveruleikinn er hins vegar sá að það væri ópraktískt vegna kostnaðar og stærðar þeirra við vegkantinn. Einfaldari lausn væri að nýta plast vegstikur sem þegar eru til staðar og eru settir upp á hverju ári.

Það var stuttlega rætt í Kafa 2.3.2 að með því að, til dæmis, setja þunnt málmag á plast vegstikur gæti það aukið endurkast vegstika.

Annar valkostur væri að festa lítil ratsjár endurskinsmerki sem límmiða með einföldum strúktúr eins og ferhyrndum (Mynd 3.2), kúlum o.s.frv., eða sérhönnuðum strúktúr. Hefðbundin endurskinsmerki sem endurkasta sýnilegu ljósi eru þegar festir á vegstikur sem límmiðar og endurkasta ljósi frá ökutækjum. Að bæta við öðrum límmiða, mögulega undir hefðbundna endurskinsmerkinu (til að breyta ekki útliti vegstikunar of mikið), gæti verið besta lausnin.



Mynd 3.2: Ferhyrnd Plötu Röð.

Fjöldi af strúktúrum hafa verið nefndar í vísindagreinum eins og [8–25] sem gefur ágætan upphafspunkt fyrir þetta verkefni.

3.6 Samantekt

Með því að nýta aðferð við afturkasts mótun, pólunartækni og hámarka endurkastað afls geta ratsjárkerfi betur greint ákveðin endurkastsmerki frá sértæku endurskinni. Þessar aðferðir auka getu til að fylgjast með og aðgreina hluti í óhagstæðum veðurskilyrðum.

Kafla 4

Hönnun Ratsjár

Að nota ratsjá ásamt endurskini til að aðstoða við akstur er ekki nýtt [3, 26, 27]. Í þessum kafla verða helstu parametrar ratsjárkerfisins ræddir og metnir byggt á fyrri vinnu, persónulegri þekkingu og reynslu. Íhlutir verða valdir fyrir helstu RF íhlutina sem nauðsynlegir eru fyrir hátíðnihluta ratsjárinnar og er ein veigamesta vinnan í þessu verkefni.

4.1 Ratsjár vegalengda jafnan

Ratsjár vegalengda jafnan (e. radar range equation) skapar grunnlinuna fyrir hvernig á að hanna ratsjá. Ratsjár vegalengda jafnan er notuð til að reikna sambandið milli parametra loftnetsins, sendiafls, kerfistap, fjarlægð, bylgjulengdar og ratsjárþverskurður. Þetta er grundvallarjafna fyrir öll ratsjár kerfi og er mikilvæg til að ákvarða einn parametra þegar þú festir alla aðra. Jafnan 4.1 er notuð til að reikna út lágmarks móttöku næmni miðað við ákveðna parametra.

$$P_{r,\min} = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 L R_{\max}^4} \quad (4.1)$$

Valdir parametrar fyrir þessa útreikninga byggja á reynslu höfundarins um hvað telst skynsamlegt með hliðsjón af nútíma tækni, tíðninni sem valin var í fyrri köflum og kröfum sem ríkisstjórnin hefur sett fram í gegnum tíðina. Parametrarnir eru taldir upp í Töflu 4.1 og verða síðan teknir fyrir einn af öðrum.

Tafla 4.1: Ratsjár Vegalengda Jöfnu Parametrar (Línulegt and dB)

Parameter	Gildi (Línulegt)	Gildi (dB)
Sendiafl P_t	2.51 mW	4 dBm
Sendiloftnets mögnun G_t	199.5	23 dBi
Móttökuloftnets mögnun G_r	199.5	23 dBi
Bylgjulengd λ	0.028 55 m	-30.89 dB
Ratsjár þverskurður σ	0.5 m ²	-3.01 dBsm
Kerfis tap L	2.51	4 dB
Vegalengd R_{\max}^4	200 ⁴ m ⁴	92.04 dB
Fasti $(4\pi)^3$	1984	32.97 dB

Sendingafl og Loftnetsmögnun

Sendingafl og loftnetsmögnun fyrir sendirinn er tekin saman þar sem þessir eiginleikar eru mjög samtengdir. Íslensk yfirvöld takmarka skammsenda samskipti á tíðnisviðinu 10.5 GHz – 10.6 GHz í 500 mW E.I.R.P [6].

Það þýðir að margföldun P_t og G_t á ekki að vera meira en 500 mW, $P_t \cdot G_t = 0.5$ W (27 dBm).

Ef loftnetsmögnum fyrir sendiloftnetið er til dæmis valið að vera 23 dBi, þá þýðir það að sendingafl þyrfti að vera 4 dBm til að hámarka heildar E.I.R.P í 27 dBm.

Móttöku Loftnetsmögnum

Kerfis parametrar eru mjög háðir loftnetsmögnumuninni eins og móttökunæmninni. Því lægri sem loftnetsmögnumunin er, þeim mun næmari þarf móttakarinn að vera. Þetta er því málamiðlun. Mögnum móttöku loftnetsins er mjög háð stærð. Fyrir dæmigert 8x8 patch loftnesröð er mögnumunin 20-24 dBi. Fyrir þetta verkefni er búist við að móttöku loftnetsmögnumunin verði 23 dBi. Fyrir minni loftnetsraðir eins og 4x4, er mögnumun uppá 15-18 dBi víða fundnar í fræðunum og í vísindagreinum.

Bylgjulengd

Bylgjulengdin er einfaldlega gefin sem $\lambda = \frac{c}{f} = 28.4$ cm, þar sem c er hraði ljóssins í tómarúmi og f er tíðnin 10.55 GHz.

Ratsjár Þverskurður

Ratsjár þverskurður plast vegstikanna þarf að auka með því að bæta við einhvers konar endurvarpandi hlut á plast vegstikurnar. RCS (ratsjár þverskurður) er settur í 0.5 m² og samsvarar $7 \cdot 7$ cm koparplötu á sem er hornrétt á sendirinn. Þetta telst raunhæft sem upphafsgildi.

Kerfistap

Kerfistap inniheldur ohmískt loftnetstap, ósamræmistap, tap vegna sía og tap í tengjum í framenda ratsjárinnar. Auk þess verður tap í andrúmsloftinu einnig og er innifalið í 4 dB heildartapi kerfisins. Tap fyrir hvern af þessum þáttum eru um það bil 0.1 – 1 dB og telst raunhæft að leggja þau saman upp í um 4 dB.

Vegalengd

Vegstikur eru almennt settar upp á 50 m millibili beggja vegna vegarins, á móti hvor annarri, á stofvegum og tengivegum þar sem ársdagsumferð er jöfn eða meiri en 100 bílar [28]. Með því að greina vegstikur í allt að 200m fjarlægð ættu fjórar vegstikur (á hvorri hlið) að vera sýnilegar alla jafna og veita upplýsingar um hvernig vegurinn liggur framundan.

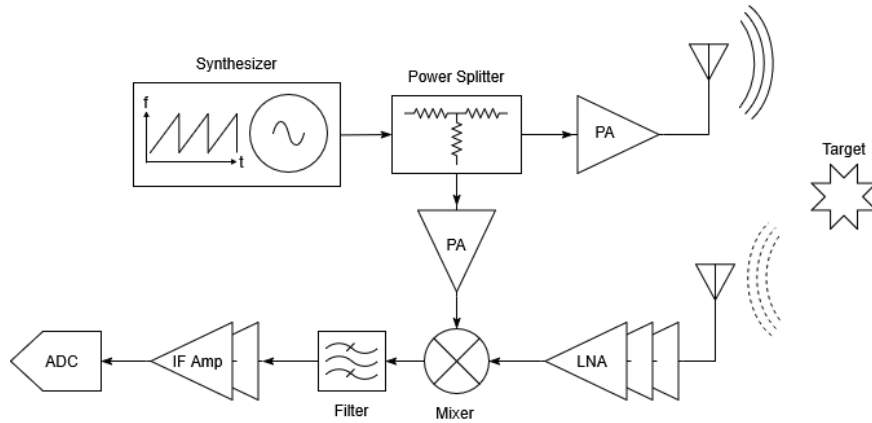
Næmni Móttakara

Með að setja parametrana úr Töflu 4.1 í Jöfnu 4.1 fáum við

$$\begin{aligned} P_{r,\min} &= \frac{(2.51 \times 10^{-3}) \cdot 199.5 \cdot 199.5 \cdot (0.02855)^2 \cdot 0.5}{1984 \cdot 2.51 \cdot (200)^4} \\ &= \frac{0.04072}{7.969 \times 10^{12}} \approx 5.11 \times 10^{-15} \text{ W} \end{aligned}$$

$$P_{r,\min} \approx 5.11 \times 10^{-15} \text{ W} (\approx -113 \text{ dBm})$$

Lágmarks mótttekið afl sem við ættum að geta greint er -113 dBm. Fyrir merkja-suð hlutfall (SNR) sem er 10 dB, sem er dæmigert gildi, ætti næmni móttakarans að vera að minnsta kosti -123 dBm.



Mynd 4.1: Einfölduð blokkmynd af einsleitri ratsjá.

4.2 Einsleitur FMCW Arkitektúr

Almennt er einsleitur arkitektúr sá sem er algengastur fyrir FMCW ratsjá (Mynd 4.1). Einsleitur (e. homodyne) þýðir að merkið sem er skapað og sent gegnum sendiloftnetið er notað óbreytt til að blanda saman við móttækna endurvarpaða merkið, nálægt DC eða í DC.

Almenn virkni ratsjárinnar má útlista á eftirfarandi hátt:

- FMCW merkjagjafi býr til rísandi merki
- Rísandi merkið er magnað upp af afl magnara
- Magnaða rísandi merkið er sent með sendiloftnetinu
- Rafsegulbylgjan er endurköstuð af markinu og óæskilegum hlutum til jafns
- Merkið er móttækið af móttökunarloftnetinu
- Móttækna merkið er magnað af lág-suðsmagnara
- Blandari blandar sendimerkinu með móttökumerkinu, hliðrað í tíma og býr til millitíðni (IF) sem er mismunurinn á milli þessa tveggja merkja
- IF merkið er síað til að draga úr og fjarlægja óæskileg merki
- Síaða IF merkið er safnað í gegnum analog í digital breytu (ADC)

4.3 Íhlutir í Ratsjá

Þegar rafmagns íhlutir eru valdir í ratsjánnu þá er mikill kostur að einfalt sé að kaupa þá og að þeir séu á lager á helstu sölusíðum á netinu eins og Digi-Key og Mouser sem dæmi.

4.3.1 Tíðnigjafi

Nokkrir möguleikar í arkitektúr eru til staðar þegar valið snýst um tíðnigjafa. Algengast er að velja annaðhvort svokallaðann DDS eða eða PLL. PLL sem stendur fyrir fasalæstri lykkju er fyrir valinu í þessu verkefni. PLL er yfirleitt notað með svokölluðum VCO eða spennustýrðum sveifflugjafi. Útgangstíðnin á VCO er deilt í tvennt, annar hlutinn fer í átt að aflmagnara og hinn hlutinn er fer í PLL sem að ber útgangstíðnina saman við stöðugann tíðnigjafa sem gjarnan er stöðill krystall. Í töfluninni að neðan eru listaðir upp helstu mögulegu VCO. Báðir VCO keyra á 5V sem er kostur þar sem mögulegt er að keyra sem flest á sem fæstum spennum. Báðir skila RF/2 frá sér á sér porti og því væri hægt að nota það til að keyra PLLinn beint.

HMC530LP5E gefur frá sér 10 dBm afl og það er 3 dB hærra en hinn og það veitir meiri svigrúm til taps og því er hann fyrir valinu.

Tafla 4.2: Val á VCO

Partnúmer	Tíðnisvið (GHz)	Afl (dBm)	Verð (Evrur)
HMC530LP5E	9.5 – 10.8	10	43.6
MAOC-009265-TR0500	9.4 – 10.8	7	29.5

4.3.2 Afmagnari

Kröfur um afl frá afmagnara voru skoðuð fyrr í þessum kafla þar sem E.I.R.P má að hámarki vera 500 mW eða 27 dBm. Með loftnetsmögnun uppá 23 dBi má sendiaflið vera 4 dBm. Ef afmagnarinn getur skilað hærra afli er hægt að slaka á kröfum á loftnetinu. Helstu afmagnarar eru listaðir upp hér að neðan. Mikilvægt er að hann hafi nógu hátt Pout1dB til að verða ekki mettaður þegar hann keyrir blandarann. Blandarinn þarf um 10 dBm inná LO portið. Afmagnarinn sem er valinn hér er GRF2710, hann er með mögnun uppá ca 13 dB og Pout1dB uppá 12.8 dBm. Hann er með suðfaktor uppá 1.9 dB sem þýðir að hægt er að nota hann í seinni stigum á lágsuðsmagnara keðjunni án þessa að bæta miklu suði við. Þar að auki er hægt að keyra hann á 5V.

Tafla 4.3: Val á afmagnara

Partnúmer	Tíðnisvið (GHz)	Mögnun (dB)	Pout1dB (dBm)	Verð (Evrur)
GRF2710	8 – 12.7	13.2	12.8	5.8
CMX90G701QF-R705	6 – 18	10.5	10	7.7
MAAM-011101-TR1000	4 – 20	17	18	9.8
EHA-163L+	0 – 16	13.5	3.9	16.6
HMC3656	7 – 15	15	15	35.4

4.3.3 Blandari

Þegar blandari er valinn eru nokkrir hlutir sem ber að hafa í huga. Aðalatriðið er að tíðnisviðið sem um ræðir er dekkjað af blandaranum. Eins ber að taka breytimögnun til greina í heildar útreikningum ratsjárinnar. Hugsa þarf úti hversu mikið afl þarf til að drífa blandarann eins og hann var hannaður til en týpísk gildi eru frá 7 dBm til 15 dBm. Mikilvægt er að velja afmagnara og blandara saman þar sem mögnunin í afmagnaranum og afdeilingin frá tíðnigjafanum segir til um hversu mikið afl er eftir til að drífa blandarann. Blandarar geta verið aktívir eða passívir. Aktívir blandarar eru yfirleitt með magnara inní rásinni og eru með jákvæða breytimögnun en þeir passívu eru með neikvæða breytimögnun eða í raun breytitap. Samanburður á helstu blöndurum á tíðninni í kringum 10.5 GHz er sýndur í töflunni hér að neðan. HMC1056LP4BE er talinn vera hentugasta valið fyrir þetta verkefni.

4.3.4 Lágsuðsmagnari

Val á lágsuðsmagnara hefur mikið að segja um hvers konar næmni móttakarinn hefur. Lágsuðsmagnari er yfirleitt teiknaður sem stakur magnari í blokkmyndinni en í raun getur hann samanstaðið af keðju af mögnurum. Fyrsti lágsuðsmagnarinn upp við móttökuloftnetið er sá mikilvægasti. Allt sem er í móttöku keðjunni hefur áhrif á og bætir við suði sem maður vill halda í lágmarki. Nauðsynlegt er að fyrsti lágsuðsmagnarinn hafi lágan suðfaktor og háa mögnum á sama tíma. Magnið af suði sem kemur frá öðrum íhlutum en fyrsta lágsuðsmagnaranum er minnkað sem nemur mögnun fyrsta lágsuðsmagnarans. Há mögnun gerir það að verkum að seinni stig íhluta, magnarar, síur og blandari hafa minni áhrif á samanlagða næmni móttarakans.

Tafla 4.4: Val á blandara

Partnúmer	Tíðnisvið (GHz)	Breytimögnun (dB)	Eiginleiki	Verð (Evrur)
CMD183C4	7.5 – 13	-5.5	I/Q	70.6
HMC220B	5 – 12	-9	Fundamental	14.3
HMC521ALC4	8.5 – 13.5	-9	I/Q	41.0
HMC1056LP4BE	8 – 12	-8	I/Q	39.9

Suðfaktor fyrir fyrsta lágsuðsmagnarann er bætt við suðið sem kemur inn í loftnetið og því er mikilvægt að halda þeim suðfaktor sem minnstum. Við val á lágsuðsmagnara er algengt að velja magnarablokk sem er rás með inngangs og útgangs tilpössun innifalda. Slíka magnara er einfalt að bæta við keðjuna þar sem nú þegar er búið að tilpassa impedansinn í 50 Ohm eða þar um bil. Annar og mun ódýrari möguleiki er að nota stakann transistor og sjá sjálfur um að reikna, herma og smíða tilpössunarnetið á inngangi og útgangi til að lágmarka suðfaktorinn og hámarka mögnunina. Hlestu möguleikar eru útlistaðir í töflunni að neðan. Sem fyrsta skref er PMA3-5123+ valinn þar sem einfalt er að bæta honum við. Einn af ókostunum við hann er að hann þarf 4V en ekki 5V eins og er notað víða. Seinna meir er mögulegt að reyna að ná lægri suðfaktor með að búa til sína eigin magnarablokk úr transistor.

Tafla 4.5: Val á lágsuðsmagnara

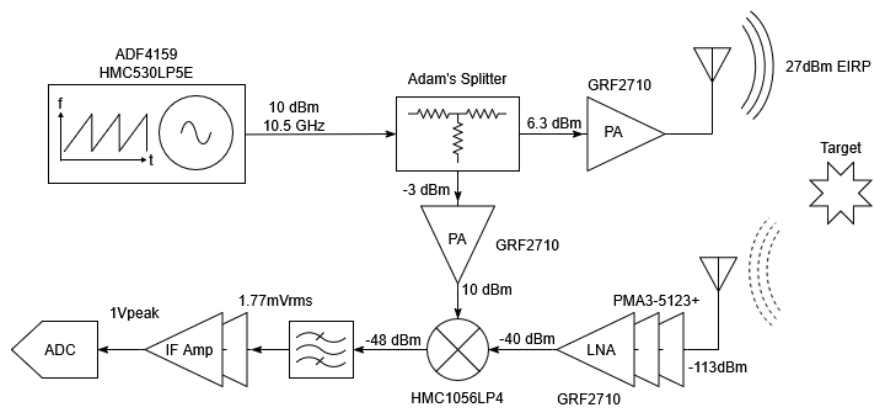
Partnúmer	Tíðnisvið (GHz)	Mögnun (dB)	Suðfaktor (dB)	Verð (Evrur)
GRF2101	4 – 10	18	0.9	2.8
ADL8143ACPZN	8 – 14	28.5	1.0	62.3
ADL8107ACPZN	6 – 18	24	1.3	96.5
BFR840L3RHESD	0.5 – 12	16	0.9	0.7
BFP840FESD	0.5 – 12	16	1.1	0.5
PMA3-5123+	5.5 – 12.5	21	1.0	29.3
CMD319C3	8 – 12	21	1.0	80.3

4.3.5 Loftnet

Loftnet sem passa fyrir þetta verkefni eru ekki seld í neinum búðum. Það eina sem hægt er að gera að búa til eigið loftnet sem uppfyllir kröfur eins og mögnun. Líklegasta loftnetið til að nota í þessari ratsjá verður að teljast vera svokallað microstrip patch antenna array og notast við 8x8 loftnet fyrir bæði sendarann og móttakarann. Miðað við að tYPísk patch loftnet hafa 6-8 dBi mögnun þá mundi heildar loftnetsmögnun á þannig röð vera í kringum 20-24 dBi með tapi. Til að ná 27 dBm E.I.R.P með 23 dBi loftneti, þá þarf aflíð sem fer inní loftnetið að vera 4 dBm eða minna.

4.3.6 Samantekt

Helstu atriði hönnunar á einfaldri ratsjá voru skoðuð í þessum kafla. Þegar búið er að velja tegundina af ratsjá þá er mikilvægast að velja íhlutina vel. Þegar íhlutir eru valdir þá þarf að huga að nokkrum þáttum svo sem tíðnibil, inngangsafli og útgangsafli. Allt þarf að spila saman svo hægt sé að raða íhlutum frá ólíkum framleiðendum í eina heild og fá virkandi kerfi. Aðalatriðið í þessum kafla var að hanna, á blokkleveli, RF hlutann af ratsjanni. Honum til viðbótar er mikilvægt að skoða lágtíðnihlutann ásamt merkjavinnslunni. Á Mynd 4.2 sést blokkmynd af ratsjanni með völdum íhlutum, afli og tíðni.



Mynd 4.2: Blokkmynd með völdum íhlutum.

Heimildaskrá

- [1] Mbl.is. *Vegir víða lokaðir*. Ágú. 2025. URL: https://www.mbl.is/frettir/innlent/2024/04/06/vegir_vida_lokadir/.
- [2] Víkurfréttir. *Þurftu að ganga á undan bílnum*. Ágú. 2025. URL: <https://www.vf.is/frettir/thurftu-ad-ganga-a-undan-bilnum>.
- [3] Keyvan Hashtrudi-Zaad Dean Sacoransky Joshua A. Marshall. “Towards Unsupervised Filtering of Millimeter-Wave Radar Returns for Autonomous Vehicle Road Following”. Í: *2023 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2023.
- [4] E. F. L. A. Verkfræðistofa. *Vistferilsgreining fyrir veg*. Tæknileg skýrsla. EFLA, 2013.
- [5] SET plastic. *Email communication with SET*.
- [6] Fjarskiptastofa. *Tíðnimál*. Ágú. 2025. URL: <https://www.fjarskiptastofa.is/fjarskiptastofa/fjarskiptainnvidir/tidnimal/>.
- [7] Ásbjörn Ólafsson Sævar Þór Jónasson. *Discussion with Vegagerðin*. Meeting with Ásbjörn Ólafsson at Vegagerðin. Mar. 2025.
- [8] Jun Ding o.fl. “Efficient multiband and broadband cross polarization converters based on slotted L-shaped nanoantennas”. Í: *Optical Society of America* (2014).
- [9] Paris Ang og George V. Eleftheriades. “A Passive Re-Directing Van Atta Type Reflector”. Í: *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* 17.4 (apr. 2018).
- [10] Wen-Jen Tsen, Shyh-Jong Chung og Kai Chang. “A Planar Van Atta Array Reflector with Retrodirectivity in Both E-Plane and H-Plane”. Í: *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 48.2 (feb. 2000).
- [11] Shyh-Jong Chung og Kai Chang. “A Retrodirective Microstrip Antenna Array”. Í: *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 46.12 (des. 1998).
- [12] Chenyang Mao o.fl. “Broadband reflective multi-polarization converter based on single-layer double-L-shaped metasurface”. Í: *Applied Physics A* (2017).
- [13] G. Goussetis E. Doumanis, V. Fusco G.Papageorgiou og D. Linton R.Cahill. “Design of Engineered Reflectors for Radar Cross Section Modification”. Í: *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 61.1 (jan. 2013).
- [14] Kin Shing Bobby Yau. “Development of a Passive Retrodirective Van Atta Array Reflector at X-band”. Í: *2013 International Conference on Radar*. 2013.
- [15] S. N. Tevetkova D. H. Kwon A. Elsakka M. Albooyeh S. A. Tretyakov V.S.Asadchy A.Díaz-Rubio. “Flat Engineered Multichannel Reflectors”. Í: *Physical Review X* (2017).
- [16] Viktor S. Asadchy Ana Díaz-Rubio og Sergei A. Tretyakov Amr.Elsakka. “From the generalized reflection law to the realization of perfect anamalous reflectors”. Í: *Applied Physics* (2017).
- [17] Haochen Wang Baihong Chi o.fl. “Full-Polarized RCS Enhancement Planar Reflector Utilizing A 4x4 Retrodirective Array”. Í: *2023 IEEE 11th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation*. 2023.
- [18] Babar Kamal o.fl. “High efficiency and ultra-wideband polarization converter based on an L-shaped metasurface”. Í: *Optical Materials Express* (2021).

- [19] Majid Karimipour og Iman Aryaninan. “High-efficiency dual-polarized broadband reflecting meta-surface using continuous polarization conversion technique and element with multi degree of freedom”. Í: *Nature:Scientific reports* (2022).
- [20] Yanbin Chen o.fl. “Orientation Controllable RCS Enhancement Electromagnetic Surface to Improve the Road Barriers Detectability for Autonomous Driving Radar”. Í: *Sensors* (2025).
- [21] Mohammed Kalaagi og Divitha Seetharamdoo. “Radar Cross Section Enhancement using Metasurfaces for Road Safety Applications”. Í: *2022 16th European Conference on Antennas and Propagation*. 2022.
- [22] J.Thornton og D.J.Edwards. “Range Measurement Using Modulated Retro-Reflectors in FM Radar System”. Í: *IEEE Microwave and Guided Wave Lettters* 10.9 (sep. 2000).
- [23] Yuxiang Jia o.fl. “Retro-reflective metasurfaces for backscattering enhancement under oblique incidence”. Í: *AIP Advances* 7 (2017).
- [24] Li Li o.fl. “The Study on a New Type of Low-profile and Passive Radar Retro-reflector”. Í: *2014 3rd Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation*. 2014.
- [25] Maochang Feng o.fl. “Wide-angle flat metasurface corner reflector”. Í: *Applied Physics Letters* (2018).
- [26] Richard A. Bishel. “Radar-based vehicle guidance using radar reflectors embedded in pavement markers on a driving surface”. English. EP4565746A1. 2025.
- [27] Alexey Voronov o.fl. “Radar reflecting pavement markers for vehicle automation”. Í: *Trafikverkets forskningsportföljer*. 2016.
- [28] Vegagerðin. *2.1 Stikur*. Vegagerðin. Ágú. 2025. URL: <https://www.vegagerdin.is/vegagerdin/gagnasafn/leidbeiningar-og-reglur/gaedahandbok/12194-2/2-1-stikur>.