

Darbības programma: “Uzņēmējdarbība un inovācijas”  
Prioritātes numurs un nosaukums: 2.1. “Zinātne un inovācijas”  
Pasākuma numurs un nosaukums: 2.1.1. “Zinātne, pētniecība un attīstība”  
Aktivitātes numurs un nosaukums: 2.1.1.1. aktivitāte "Atbalsts zinātnei un pētniecībai"

**PROJEKTS Nr.2014/0052/2DP/2.1.1.1.0/14/APIA/VIAA/031**

**Projekta nosaukums: ”Tehnoloģija nanoimpulsu kiberfizikālas sistēmas izveidei zemes virsējo slāņu neinvazīvai apsekošanai” (NanoKS)**

Līguma noslēgšanas datums: 26.09.2014.g.

Projekta sākuma datums: 26.09.2014.g.

Projekta beigu datums: 31.08.2015.g.

Eiropas Reģionālās attīstības fonda finansējuma saņēmējs:  
Elektronikas un datorzinātņu institūts (EDI)

**ZINĀTNISKĀ PĒTĪJUMA PROGRESU APLIECINOŠA DOKUMENTĀCIJA**

*Pārskata numurs Nr.4. par periodu no 01.06.2015.g līdz 31.08.2015.g.*

*Projekta zinātniskais vadītājs:* Rolands Šāvelis, Dr.sc.ing., pētnieks.

*Projekta izpildītāju saraksts:* Vad.pētn. Dr.sc.comp. Kārlis Krūmiņš  
Pētn. Dr.sc.ing. Vladimirs Aristovs  
Pētn. Dr.phys. Ivars Driķis  
Pētn. Dr.sc.ing. Oļegs Ņikišins  
Pētn. Dr.sc.comp. Andrejs Skaģeris  
Pētn. Gatis Šūpols  
Zin.asist. Rūdolfs Cīrulis  
Zin.asist. Mārtiņš Liepiņš  
Zin.asist. Aivars Ševerdaks  
Prog.inž. Ģirts Pētersons  
Prog.inž. Normunds Šilinskis

## **Anotācija**

NanoKS ir Eiropas Reģionālās attīstības fonda līdzfinansēts projekts zinātnei un pētniecībai. Projekta vispārīgais mērķis ir sekmēt zinātnes un ražošanas integrāciju un pētniecības rezultātu komercializāciju atbilstoši valstī noteiktajām prioritārajām tautsaimniecības nozarēm un prioritārajiem zinātnes virzieniem. Projekta ietvaros plānots izstrādāt jaunu inovatīvu tehnoloģiju, kas padarītu zemes virsējo slāņu radiozondēšanas metodi (tehnoloģiju) plašāk pieejamu un pielietojamu, pateicoties kombinētai vairāku devēju datu ieguvei, izmantojot komparatora tipa pārveidotāju, un iegūto rezultātu uzlabotai vizualizācijai un interpretācijai.

Projekts ietver sekojošas aktivitātes: 1) rūpnieciskais pētījums; 2) rūpnieciskā pētījuma tiesību nostiprināšana; 3) projekta vadība un publicitāte.

Projekts tiek īstenots sadarbībā starp Elektronikas un datorzinātņu institūtu un SIA „Infoserv-Rīga”.

Īstenošanas ilgums – 12 mēneši.

Šajā dokumentā dots pārskats par projekta ceturtajā periodā (01.06.2015.-31.08.2015.) veiktajiem pētniecības darbiem un sasniegtajiem rezultātiem.

## **Ievads**

Zemes virsējo slāņu (līdz 10 m) un apakšzemes objektu neinvazīvai apsekošanai izmanto radiolokācijas metodes, kurai pamatā ir impulsveida elektromagnētiskā viļņa izstarošana zemē un zemes radītā atstarojuma uztveršana un pētīšana. Iekārtas, ar kurām veic šos mērījumus, sauc par zemes zondēšanas radariem jeb GPR (no angļu valodas – Ground Penetrating Radar). Šo radiolokācijas metodes var izmantot zemē esošo resursu apzināšanai (piemēram, kūdras, kaļķakmens un grants atradņu lokācijai un daudzuma analīzei), kā arī būvniecībā būvkonstrukciju un ceļu stāvokļa apsekošanai, apakšzemes energotīklu (gāzes, ūdens vadu) un komunikāciju tīklu precīzai kartēšanai un stāvokļa apsekošanai u.c.

Problēma, kas līdz šim ir kavējusi tehnoloģijas plašu izmantošanu ir tehnoloģijas sarežģītība, kas liedz nespeciālistam saprotamā veidā veikt kvalitatīvus mērījumus un mērījumu rezultātā iegūto datu apstrādi un interpretāciju. Problēmas risināšanai projekta ietvaros plānots izstrādāt jaunu tehnoloģiju zemes virsējo slāņu neinvazīvai apsekošanai, kas izmantos nanosekunžu un subnanosekunžu impulsu raidītājus objektu izšķirtspējai līdz 10 cm. Lai nodrošinātu apsekošanas dziļumu līdz 2 m, tiks kombinētas antenas ar šauru virziendarbību un platu virziendarbību, kā arī tiks veikta gan kontakta (piemērota dziļāku objektu apsekošanai), gan bezkontakta mērīšana un izstrādāta metodika optimālā risinājuma iegūšanai. Lai mērījumos iegūtos datus padarītu vieglāk interpretējamus, tiks izstrādāti atbilstošie signālapstrādes algoritmi un izmantots kiberfizikālās sistēmas modelis no fizikālās pasaules iegūtās informācijas sasaistei ar datorsimulāciju rezultātā iegūtajiem vides modeļiem.

Šajā projekta pārskata posmā ir veikti darbi un sasniegti rezultāti aktivitātes „Rūpnieciskie pētījumi” sekojošos pētījumos:

- datu apstrāde, GUI izveide (pētījumi Nr.1);
- vides kiberfizikālās sistēmas modeļa izveide (pētījumi Nr.2);
- raiduztvērēju moduļu izveide (pētījumi Nr.3);
- datu pārraides arhitektūras un datu glabāšana (pētījumi Nr.4).

## Rezultātu kopsavilkums

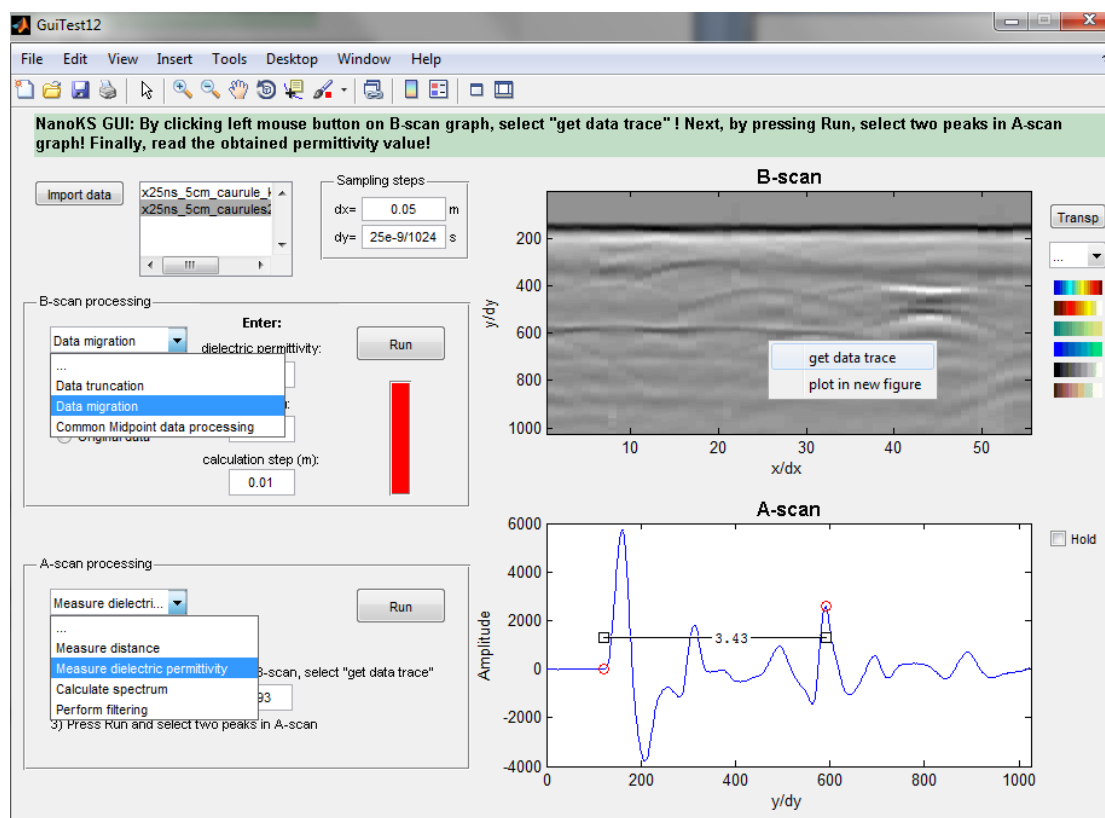
**Pētījumi Nr.1.** Ar radiolokācijas metodi iegūto zemes virsējo slāņu zondēšanas datu apstrādes algoritmu izpēte, lai apstrādātu dažādos reālos apstākļos iegūtus zemes virsējo slāņu lokācijas datus (attēlus).

Pārskata periodā veikti sekojoši darbi saistībā ar ģeolokācijas radaru (GPR) signālu apstrādi:

- turpināta algoritmu un pabeigta grafiskā lietotāja interfeisa (GUI) izstrāde Matlab vidē GPR mērījumos iegūto datu pēcapstrādei;
- veikti eksperimentālie mērījumi un iegūto datu apstrāde.

### Grafiskais lietotāja interfeiss.

Grafiskais lietotāja interfeiss (1.1. attēls) ļauj lietotājam ērtā veidā ielasīt GPR mērījumos iegūtos datus un veikt to apstrādi ar interfeisā iestrādātajām signālapstrādes metodēm, kā arī veikt šo datu dažādu vizualizāciju.



1.1. att. Grafiskais lietotāja interfeiss GPR datu ielasīšanai un apstrādei

Izmantojot GUI, ar *B-scan processing* paneli ir iespējams veikt:

- 1) radarogrammas (B-scan) izmēru samazināšanu;
- 2) radarogrammas transformāciju no koordināta-laiks uz koordināta-dziļums plakni ar difrakciju-summēšanas un Kirhofa migrācijas metodēm;
- 3) kopējā viduspunkta (CM) mērījumos iegūtās radarogrammas raksturīgo parabolu izdalīšanu un slāņa biezuma un dielektriskās caurlaidības noteikšanu;

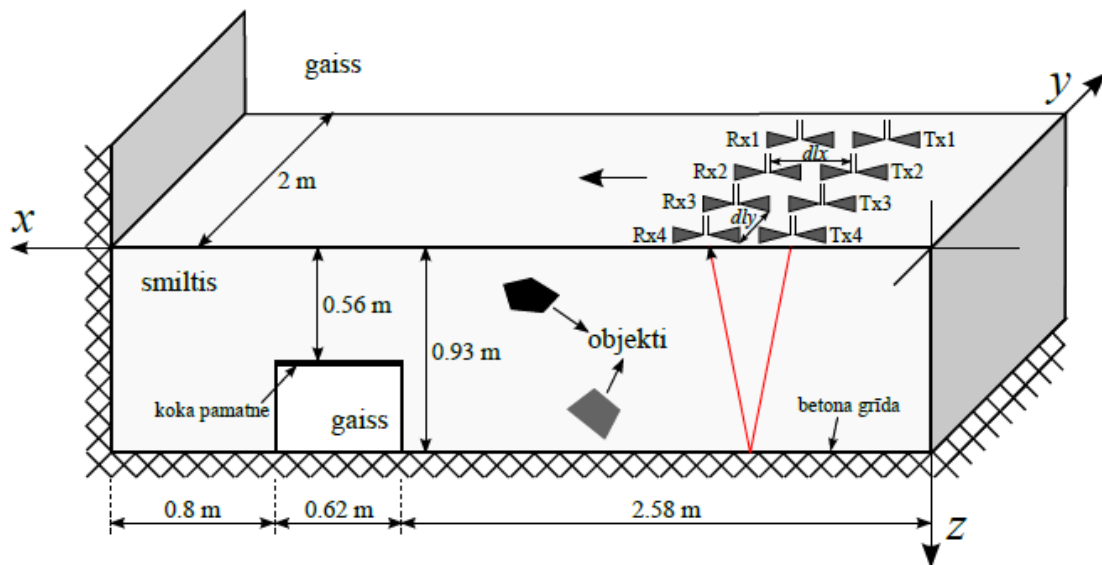
- 4) radarogrammas atsevišķu signālu izdalīšanu un attēlošanu apakšējā grafikā (A-scan).

Ar *A-scan processing* paneli ir iespējams veikt:

- 1) laika intervālu mērīšanu starp signāla tiešo un atstarotajiem impulsiem, lai, zinot vides dielektrisko caurlaidību, aprēķinātu attālumus starp vidē esošajiem objektiem, vai pretēji, zinot attālumus starp objektiem, aprēķinātu vides dielektrisko caurlaidību;
- 2) signāla spektra attēlošanu;
- 3) signāla filtrēšanu.

### Eksperimentālie mērījumi.

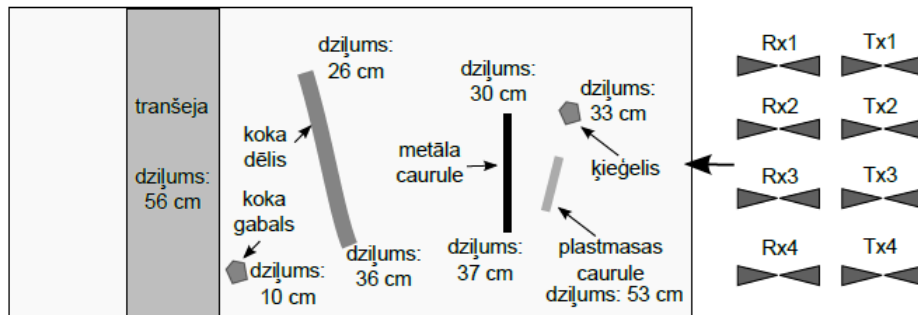
Mērījumi tika veikti 1.2. attēlā parādītajā testa vidē ar daudzantenu sistēmu, kas sastāvēja no četrus raidošo un uztverošo antenu pāriem.



1.2. att. Objektu meklēšana smilšu slānī, antenu masīvu virzot no labās puses uz kreiso

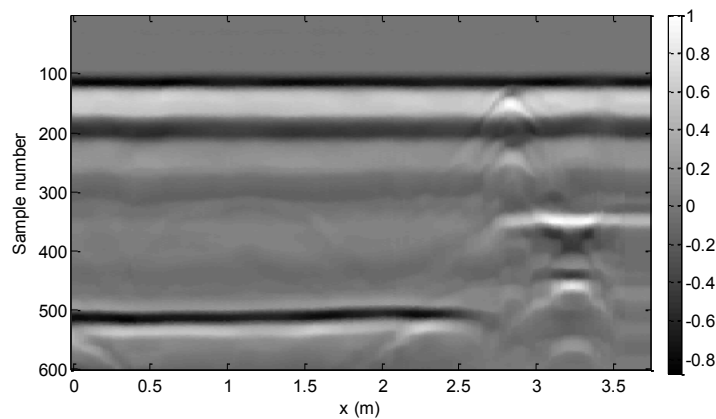
Antenu masīvu virzot uz priekšu, pie vienas un tās pašas koordinātas  $x$  katra raidošā antena secīgi viena pēc otras (nepārklājoties laikā) izstaroja elektromagnētiskos impulsus, kuri tika uztverti ar visām uztverošajām antenām. Rezultātā tika iegūtas 16 radarogrammas  $s_{nm}(x, t)$ , kuru indeksi  $n$  un  $m$  norāda, kura raidošā antena (indekss  $n$ ) un kura uztverošā antena (indekss  $m$ ) darbojās pie šo radarogrammu uzņemšanas.

Veicot eksperimentālos mērījumus, smilšu slānī tika aprakti vairāki objekti, kuru izvietojums skatpunktā no augšas ir parādīts 1.3. attēlā. Garie objekti (metāla caurule un koka dēlis) slānī ir ievietoti slīpi attiecībā pret horizontālo plakni, tāpēc 1.3. attēlā ir uzdoti to galapunktu dziļumi.

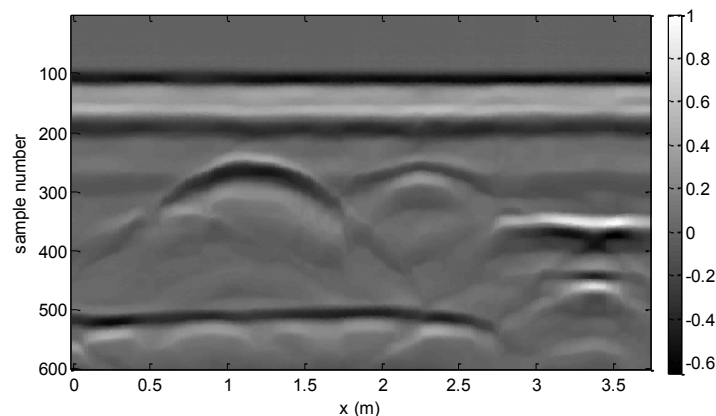


1.3. att. Meklējamo objektu izvietojums smilšu slānī (skats no augšas) un antenu masīva novietojums uz smilšu slāņa, to pārvietojot no labās puses uz kreiso

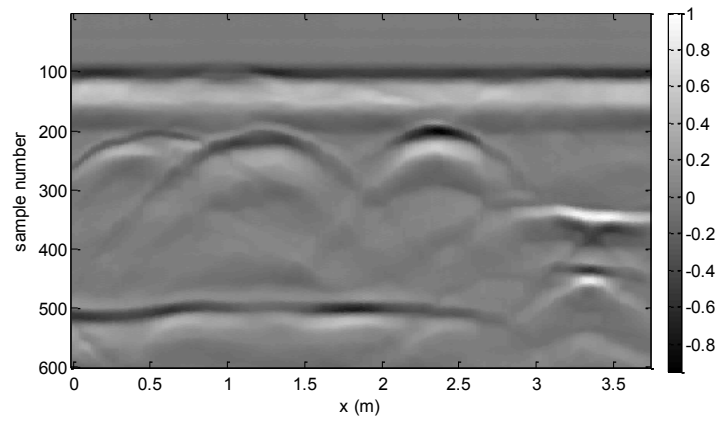
Ņemot vērā, ka antenas praktiski nestaro šķērsvirzienā, tad no 1.3. attēla var secināt, ka radarogramma  $s_{44}(x, t)$ , kas atbilst 4. raidošajai un 4. uztverošajai antenām, uzrādīs koka gabalu un tranšeju (1.4. attēls), radarogramma  $s_{33}(x, t)$  – plastmasas un metāla caurules, koka dēli un tranšeju (1.5. attēls),  $s_{33}(x, t)$  – ķieģeli, metāla cauruli, koka dēli un tranšeju (1.6. attēls), bet  $s_{44}(x, t)$  – tikai koka dēli un tranšeju (1.7. attēls). Visas šīs radarogrammas var parādīt arī vienā 1.8. attēlā.



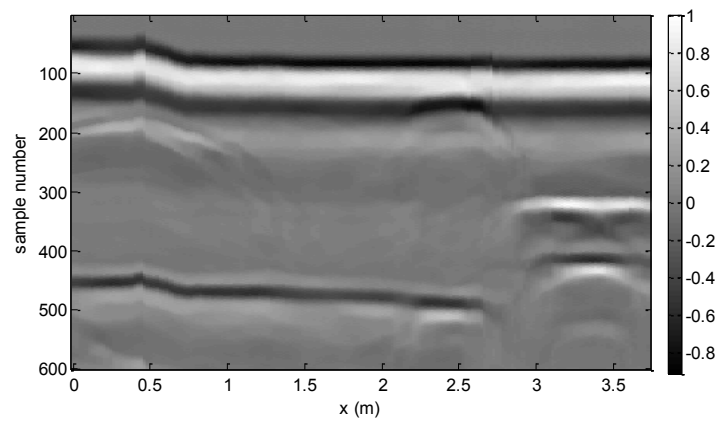
1.4. att. Radarogramma  $s_{44}(x, t)$



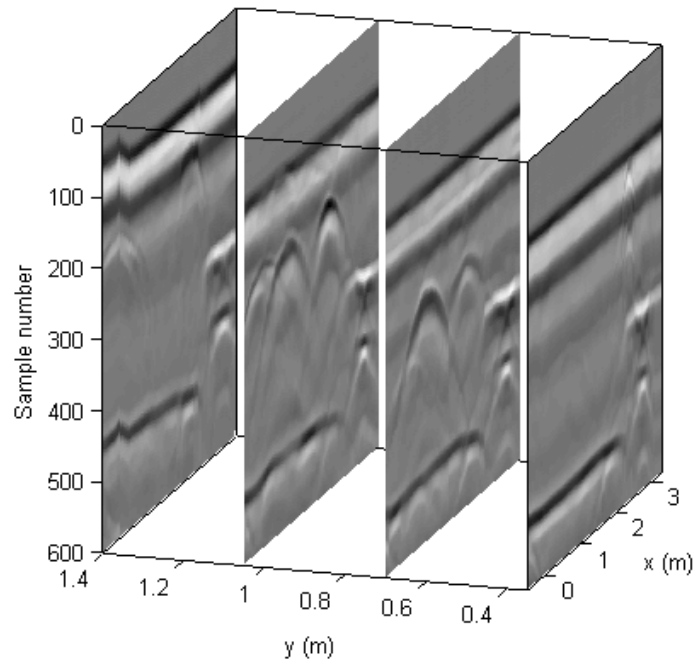
1.5. att. Radarogramma  $s_{33}(x, t)$



1.6. att. Radarogramma  $s_{22}(x, t)$



1.7. att. Radarogramma  $s_{11}(x, t)$



1.8. att. Četru radarogrammu vizualizācija vienā 3D attēlā

Kā var secināt no iegūtajiem rezultātiem, tad ar antenu masīvu var ātri noteikt objektu atrašanās vietu pētāmajā slānī, nosakot parabolu virsotņu koordinātas uzņemtajās radarogrammās. Zinot slāņa dielektrisko caurlaidību, var atrast šo objektu dziļumu, kā arī, veicot radarogrammu transformāciju no koordināta-laiks uz koordināta-dziļums asīm ar datu migrācijas metodēm, parabolu līknes var aizstāt ar punktiem līkņu virsotnēs, kas tālāk ļauj noteikt apslēpto objektu 3D formas.

## **Pētījumi Nr.2.** Vides kiberfizikālās sistēmas modeļa izveide.

Vides kiberfizikālās sistēmas modeļus zemes virsslāņu radiolokācijas problēmai parasti veido, izmantojot Finite-difference time-domain (FDTD) programmatūru, kas aprēķina elektromagnētisko viļņu izplatīšanos nehomogēnā vidē. Ir ļoti plaša komerciālās un nekomerciālās programmatūras izvēle, kas risina šādas problēmas. Taču zemes virsslāņu radiolokācijas problēma no elektromagnētisko viļņu izplatīšanās fizikas viedokļa ir nedaudz specifiska, jo vides materiāli ir stipri elektrovadoši, kā arī to izvietojums un elektromagnētisko viļņu avoti ir specifiski. Tāpēc tieši radiolokācijas problēmai parasti lieto speciāli radītu programmatūru, vispopulārākā no tām ir brīvi pieejamā gprMax. Tāpēc vides kiberfizikālās sistēmas modeļa izstrāde tika sākta, izmantojot šo programmatūru.

Projektam uzsākoties, gprMax programmas aprēķinu rezultātu pēcapstrāde bija smagnēja, Matlab sistēmā realizēta. Tāpēc projekta ietvaros vispirms tika izveidota gprMax programmas aprēķinu rezultātu pēcapstrāde, izmantojot python programmatūras līdzekļus numpy, scipy un matplotlib. Pirmo testu rezultāti bija pārsteidzoši – aprēķinātajos uztvērēja signālos bija ļoti liels skaitlisko trokšņu līmenis. Piemēram, ja zemes virskārtu veido vairāki dažādu materiālu slāņi (dažāda mitruma smiltis, betons utt.), un raidītājs atrodas gaisā virs zemes, tad jau no otrās iekšējās slāņu robežvirsmas atstarotais signāls praktiski pazūd skaitliskajos trokšņos. Tas bija dīvaini, bet vismaz izskaidroja to, kāpēc gprMax standartpiemēros raidītāja antenas atrodas apraktas zem smiltīm. Tāpēc tika nolemts vides kiberfizikālās sistēmas modeļa izveidei izmantot citu programmatūru. Skaitlisko trokšņu avotu noskaidrot neizdevās, jo šīs programmas pirmkods nav publiski pieejams. Bet netiešas norādes binārajās rezultātu failos liecina, ka, iespējams, publiski pieejamajās gprMax distribūcijas kompilētas, izmantojot float nevis double tipa peldoša komata skaitļus.

Nākošā populārāka FDTD programmatūra, kuru lieto zemes virsslāņu radiolokācijas problēmu pētnieki, ir meep. Tā ir daļa no Masačūsetsas Tehnoloģiskajā Institutā radītā programmatūras kompleksa, kas paredzēts nanofotonikas problēmu risināšanai. Projekta darbiniekiem bija iepriekšēja pieredze darbā ar citu šīs programmatūras kompleksa daļu mpb, tāpēc jau iepriekš bija zināms, ka šī programmatūra ir izstrādāta ļoti augstā tehnoloģiskā līmenī, pat saņēmusi balvas, ļoti ērta pētniecībā – iespējams veidot samērā sarežģītus aprēķinu scenārijus, pie kam, nepieciešamos parametrus mainīt iespējams ne tikai aprēķinu scenāriju skriptā, bet arī komandlīnijā. Bez tam, aprēķinu rezultāti tiek noglabāti HDF5 tipa failos, kuros dati tiek saglabāti, izmantojot hierarhisku iekšējo organizāciju, aparātiski neatkarīgi bināri un darbam ar šiem failiem ir pieejams plašs programmatūras klāsts. Tālāk jāsaprot, ka diemžēl meep programmatūra nav orientēta uz inženieri kā gala lietotāju. Vispirms jau aprēķinu scenārijus var izveidot tikai un vienīgi programmēšanas valodā Scheme, kuru Latvijā

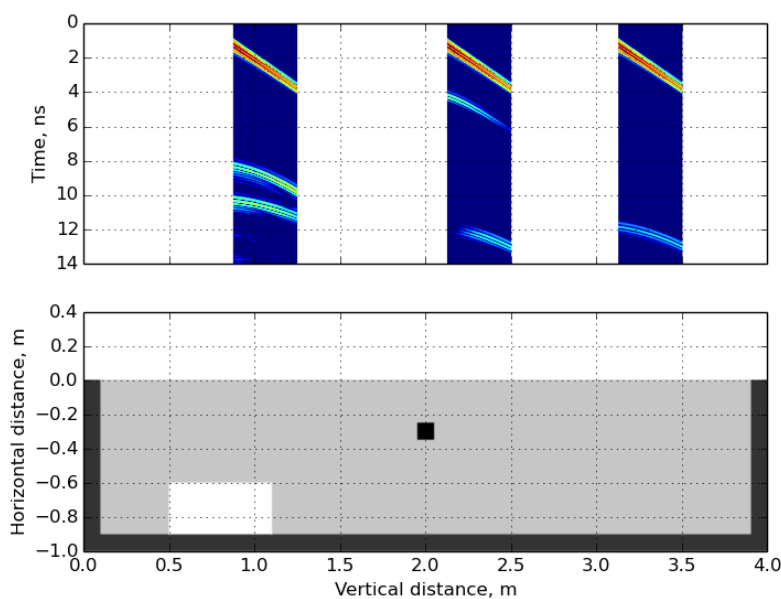


parasti pārzina tikai datorspeciālisti ar ļoti labu klasisko izglītību, vai arī ļoti specifiskos uzdevumos specializējušies Autocad lietotāji. Tālāk, lai maksimāli izmantotu skaitlisko aprēķinu precizitāti, programma lieto nevis standarta SI mērvienību sistēmu, bet gan bezdimensionālās vienības. Tas viss rada nopietnas neērtības inženieriem. Tāpēc, lai lietotu šo programmu zemes virsslāņu radiolokācijas problēmu risināšanai, samērā liels darbs jāiegulda aprēķinu scenāriju sagatavošanā.

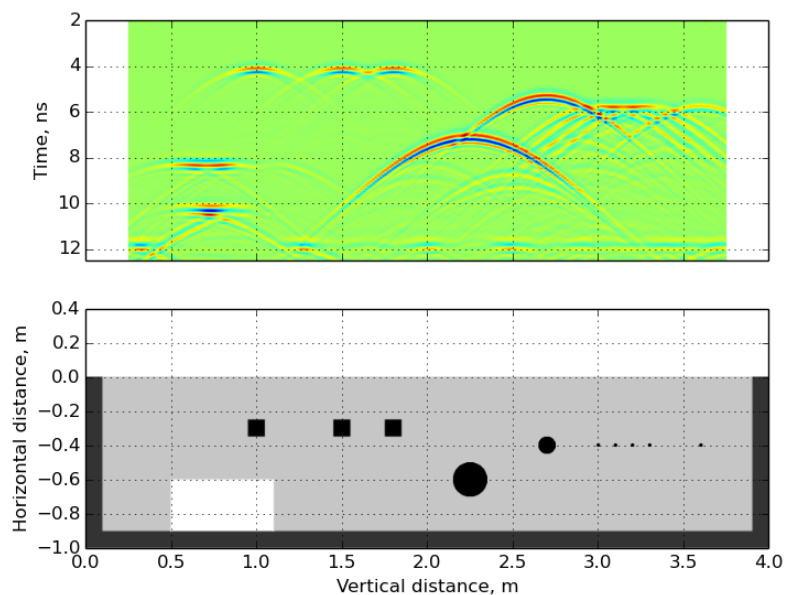
Ņemot vērā visu iepriekš teikto, vides kiberfizikālās sistēmas modeļa izveides ietvaros tika veikti sekojoši darbi:

- izstrādāta programmatūra meep programmas aprēķinu scenāriju sagatavošanai atbilstoši CommonMidpoint un CommonDifference mērījumu procedūrām;
- izstrādāta programmatūra gprMax programmas aprēķinu rezultātu tādai pēcapstrādei, kuras rezultātā iegūstam HDF5 tipa failus ar tādu saturu, it kā tos veidotu meep programma, ka ļauj unificēt rezultātu tālāku apstrādi;
- izstrādāta programmatūra meep programmas aprēķinu rezultātu pēcapstrādei gan CommonMidpoint gan arī CommonDifference mērījumu procedūrām.

Tālāk sekojošos zīmējumos doti aprēķinu rezultāti pēc apstrādes gan CommonMidpoint gan arī CommonDifference mērījumu procedūrām.



2.1. att. Aprēķinu rezultāti CM mērījumu procedūrā



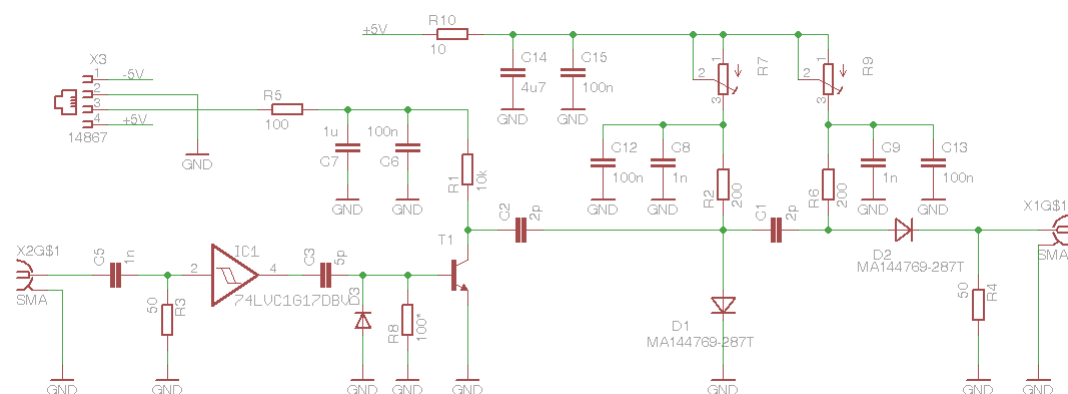
2.2. att. Aprēķinu rezultāts CD mērījumu procedūrā

### Pētījumi Nr.3. Raidzuvērēju moduļu izveide un uzlabošana.

Pārskata periodā veikti sekojoši darbi raidzuvērēju moduļu izveidē un pilnveidošanā kontakta un bez kontakta veida zondēšanai:

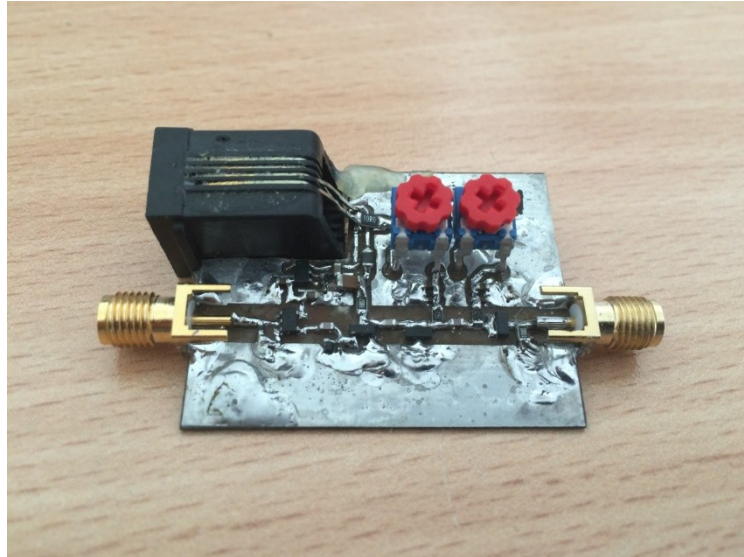
- Izveidoti universāli, maināma impulsa platuma antenu ierosmes impulsu ģeneratoru moduļi;
- Izveidoti universāli impulsu radaru signālu uztvērēju moduļi;
- Veikti raidzuvērēju moduļos izmantoto antenu virziena darbības mērījumi;
- Izveidota modulāra, no vairākiem raidzuvērēju moduļiem sastāvoša, daudzantenu sistēma.

### Universāla ierosmes ģeneratora izveide.



3.1. att. Universāla, maināma impulsa platuma antenas ierosmes impulsu ģeneratora principiālā shēma

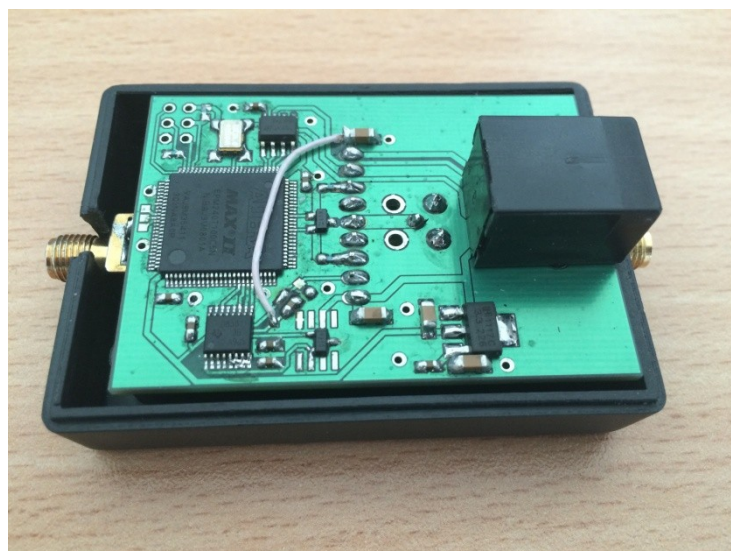
Impulsa formētāja moduļi dod iespēju mainīt impulsa platumu. Tas nepieciešams, lai varētu izmantot vienu universālu impulsa formētāja moduli dažādām antenām. Optimāla impulsa izstarošanai nepieciešams noskaņot ierosmes impulsu ar raidīšo antenu. Raidītāja modulis sastāv no lavīntranzistora un SRD diodes, kas formē augsta sprieguma (60V) impulsu. Impulsa otru daļu dzēš otra SRD diode, kuras tiešās strāvas regulēšana sniedz iespēju mainīt impulsa platumu.



3.2. att. Antenu ierosmes impulsu ģenerators modulis

### **Universāla uztvērēja moduļa izveide.**

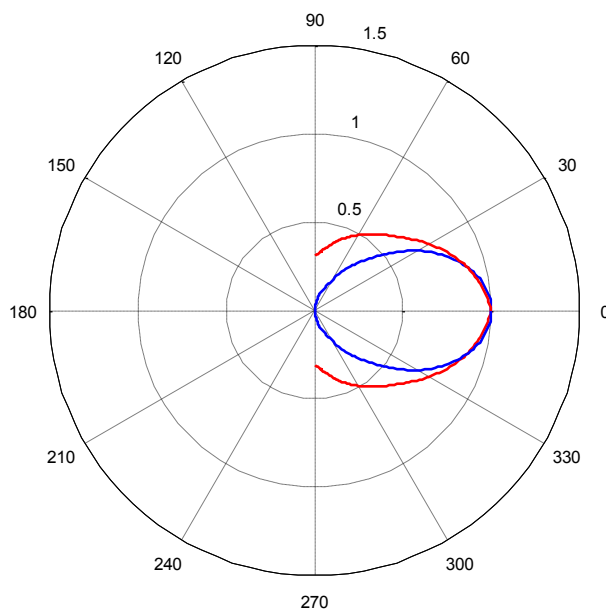
Izveidots universāls uztvērēja modulis, kura signāla ieeja salāgota ar 50  $\Omega$  pretestību. Signālu uztvērēja ieejā var pievadīt ar koaksiālo kabeli, tādā veidā uztvērēja modulim var pievienot dažāda veida antenas, nemainot moduļa konstrukciju.



3.3. att. Universāls impulsa radaru signālu uztvērējmodulis

### Antenu virziena diagrammu mērījumi.

Bezkontakta mērījumiem nepieciešams izgatavot antenas ar šauru virziena diagrammu, lai izstarotā signāla enerģija tiktu ievadītā zemē, nevis izstarota apkārtējā telpā. Lai apstiprinātu virziena diagrammu, tika veikti mērījumi un salīdzināti ar kontakta antenu virzienu diagrammu.

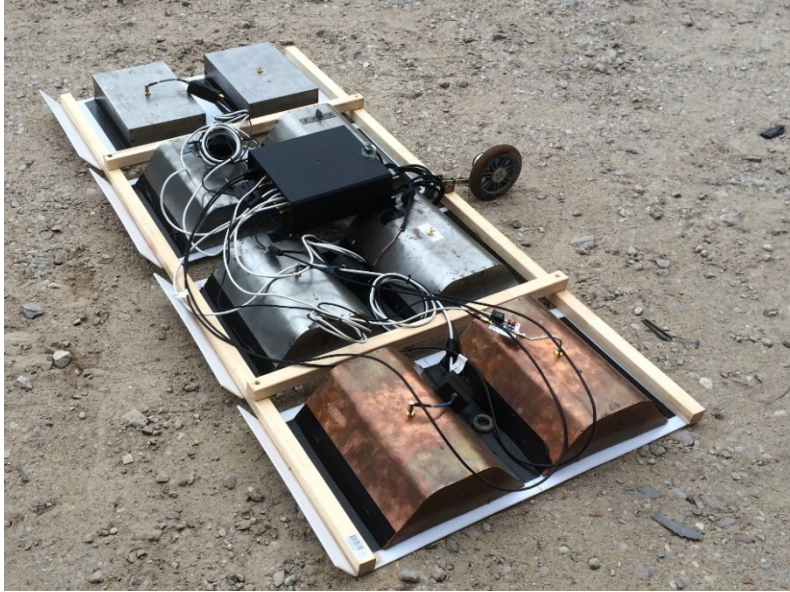


3.4. att. Antenu virziendiagrammas

Attēlā 3.4. redzams platas virziena diagrammas (sarkanā līnija) salīdzinājums ar šauras virziena diagrammas antenu (zilā līnija). Redzams, ka platas virziena diagrammas antenām enerģija tiek izstarota arī 90 grādu leņķi no antenas centra. Šādas antenas bezkontakta mērījumiem nav iespējams izmantot.

### Daudzantenu sistēma.

Projekta gala rezultātā izveidota radara sistēmas tehnoloģija ar četriem antenu pāriem, kas sniedz iespēju vienlaicīgi noklāt lielāku zondēšanas laukumu. Tehnoloģijā izmantotie zemes virskārtas apsekošanas paņēmieni ir videi neinvazīvi. Precīzai attāluma noteikšanai starp mērījumu punktiem, izmantos soļa devējs.



3.5. att. Daudzantenu sistēma

**Pētījumi Nr.4.** Datu pārraides arhitektūras (topoloģijas, protokoli) un datu glabāšanas (datu bāzes), attālinātas vadības risinājumu izveide.

Pārskata periodā veikti sekojoši darbi:

- NI Labview attālinātas piekļuves paneļa piemērošana vairāku antenu sistēmas vadīšanai.
- NI Labview vadības paneļa pilnveidošana: Iekārtas maināmo parametru iestatīšanas realizācija.
- Automatizētas mērījumu veikšanas realizācijas, izmantojot pašgājēj kāpurķēžu platformu Dr Robot Jaguar V4 izpēte.
- Pašgājēja platformas un radara mēriekārtas vienotas attālinātas vadības iespēju izpēte.
- Mērījumu maršrutu plānošanas iespēju izpēte.  
GPR papildus koordinātu datu glabāšanas realizācija HDF5 failu formāta ietvaros.
- GPR mērījumu vides parametru datu glabāšanas realizācija HDF5 failu formāta ietvaros.
- GPR mērījumu datu ekstrakcijas no HDF5 failu formāta un konvertācijas uz SegY realizācija.
- GPR mērījumu datu ekstrakcijas no HDF5 failu formāta un konvertācijas uz SU formātu realizācija.