

Environmental engineering Aplinkos inžinerija

PASAULINĖS NAVIGACIJOS PALYDOVŲ SISTEMŲ IR SINTETINĖS APERTŪROS RADARŲ TECHNOLOGIJOS PRITAIKYMAS APLINKOS IR ŽEMĖS PAVIRŠIAUS STABILUMO TYRIMUOSE: APŽVALGA

Rokas BRAŽIŪNAS, Jūratė SUŽIEDELYTĖ VISOCKIENĖ  

Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Vilnius, Lietuva

- gauta 2025 m. gegužės 15 d.
- priimta 2025 m. gegužės 30 d.

Santrauka. Aplinkos stebėjimo technologijos pažengė į priekį, siūlydamos patikimus duomenis planetos klimato ir ekosistemų pokyčiams vertinti ir pasekmėms mažinti. Pasaulinės navigacijos palydovų sistemos (GNSS) ir sintetinės apertūros radarų (SAR) technologija prisidėjo prie šio progreso. GNSS ir SAR papildomas naudojimas leidžia praturtinti aplinkos vertinimus, palaikant programas klimatui stebėti, vandens ciklui analizuoti ir augalijos žemėlapiams sudaryti. Ši integracija taip pat yra labai svarbi sekant Žemės tektoninių plokščių judėjimą ir stebint jos stabilumą, kai GNSS matuoja tikslus paviršiaus poslinkius, o SAR teikia išsamius žemės deformacijos vaizdus. Sukurtas ne vienas modelis ir sistema globaliems didelio masto teritorijų stebėjimams, kur GNSS ir SAR duomenys suteikia tikslus matavimus, kurie naudojami įvertinti įvairiems parametrams, tokiems kaip dirvožemio drėgmė, augalijos danga, ledynų tirpimas ir kt. GNSS ir SAR plačiai naudojami atliekant tektoninių plokščių poslinkių ir žemės stabilumo stebėjimus. Europos žemės judesius stebinčios tarnybos sukurta sistema atliktas tyrimas Kirkilų ežero smegduobių teritorijoje, kurios plotas 5,9 ha. Nustatyta, kad sistema tokioje plote naudoja tik keturis matuojamus taškus, tai išsamiai neapibūdina visos vietovės aukščių pokyčių situacijos laike, todėl būtų naudinga kurti vietinį modelį arba sistemą Lietuvos teritorijai stebėti pasitelkiant tas pačias GNSS ir SAR technologijas.

Reikšminiai žodžiai: GNSS, SAR, InSAR, aplinkos tyrimai, klimato kaita, žemės stabilumo tyrimai.

 Autorius susirašinėti. El. paštas juratesuziedelyte-visockiene@vilniustech.lt

1. Įvadas

GNSS teikia tikslus objektų padėties nustatymo duomenis, fiksuodamas subtilius aukščių ir atmosferos pokyčius, o SAR teikia aukštos raiškos, visų oro sąlygų vaizdus, atskleidžiančius paviršiaus struktūras ir kai kurias augalijos charakteristikas (Richards, 2009). GNSS ir SAR papildomas naudojimas aplinkos tyrimuose leidžia papildyti aplinkos vertinimus, palaikant programas klimatui stebėti, vandens ciklui analizuoti ir augalijos žemėlapiams sudaryti. Ši integracija yra labai svarbi sekant Žemės tektoninių plokščių vertikalius judesius ir stebint jų stabilumą, kai GNSS matuoja tikslus paviršiaus poslinkius, o SAR teikia išsamius žemės deformacijos vaizdus. Puikus pavyzdys yra Europos žemės judesius stebinti tarnyba (angl. *European Ground Motion Service* (EGMS), kuri naudoja GNSS ir SAR duomenis, kad teiktų žemės judėjimo matavimus visoje Europoje, planuojant miesto plėtrą, infrastruktūros stabilumą ir pasirengimą nelaimėms (Detektia, 2024). GNSS ir SAR duomenų rinkimas, analizė naudojama nuotolinio stebėjimo (angl. *Remote Sensing* (RS) programose, skirtose Žemės

sistemos komponentų parametrams vertinti, kurie reikalingi aplinkai stebėti. Informacija naudojama veiksmingam aplinkos iššūkių politikos formavimui, valdymui ir būsimoms strategijoms spręsti (Rajabbi, 2024).

Straipsnyje, pasitelkiant literatūros šaltinius, nagrinėjamas GNSS ir SAR duomenų naudojimas aplinkos programose, pabrėžiant jų papildomumą ir naudą ekologijai ir klimato tyrimams. Pateiktas Žemės vertikalio judesio tyrimų praktinis pritaikymas.

2. Pasaulinės navigacijos palydovų sistemų ir sintetinės apertūros radarų technologijos taikymas aplinkos tyrimuose

GNSS ir SAR duomenys yra neįkainojami įrankiai, padedantys spręsti įvairius aplinkos iššūkius. Štai keletas aspektų:

- Didelio masto globalūs stebėjimai: šie duomenys leidžia stebėti didelius geografinius plotus ir identifikuoti ilgalaikius bei trumpalaikius aplinkos pokyčius.

- Tikslūs matavimai: GNSS ir SAR duomenys suteikia tikslus matavimus, kurie gali būti naudojami siekiant įvertinti įvairius parametrus, tokius kaip dirvožemio drėgmė, augalijos danga, ledynų tirpimas ir kt.

- Realiojo laiko stebėjimai: dėl palydovų, teikiančių šiuos duomenis, galima stebėti situaciją realiuoju laiku ir greitai reaguoti į besikeičiančias sąlygas.

GNSS ir SAR duomenys naudojami formuojant aplinkos politiką:

- Vertinant riziką: padeda įvertinti natūralių katastrofų, tokių kaip potvyniai, sausros ir žemės drebėjimai, riziką.
- Aplinkos monitoringe: padeda stebėti oro kokybę, vandens taršą, miškų kirtimą ir kitus aplinkos rodiklius.
- Klimato kaitos tyrimuose: GNSS ir SAR duomenys yra svarbūs tiriant klimato kaitos poveikį aplinkai ir visuomenei.
- Priimant tvirus sprendimus: padeda priimti pagrįstus sprendimus, susijusius su žemės ūkiu, miškininkyste, vandens išteklių valdymu ir kitomis sritimis.

Kompleksiniu požiūriu aplinkos būklės vaizdai GNSS ir SAR duomenys gali būti integruoti su kitais duomenų šaltiniais. GNSS ir SAR integracija įgijo svarbą aplinkos tyrimuose dėl jų papildomų galimybių: GNSS suteikia tikslus geodezinius duomenis apie paviršiaus padėtį, o SAR leidžia „matyti“ informaciją pro debesis, tamsoje ir netgi pro medžių lapiją, suteikdamas informacijos apie Žemės paviršiaus struktūrą, drėgmę ir judėjimą. Vyksta sinergija, kai integruojant šiuos duomenis galima gauti detalesnę informaciją apie įvairius reiškinius, tokius kaip žemės drebėjimai, vulkaninė veikla, ledynų tirpimas, miškų kirtimas, dirvožemio drėgmė ir kt. Ši integracija atveria duris naujoms taikymo sritims, pvz., tiksliai žemės ūkiui, urbanistikos tyrimams, katastrofų valdymui ir klimato kaitos tyrimams (Elliott, 2020).

GNSS apima kelias regionines palydovų sistemas, pvz., GPS (angl. *Global Positioning System*), Galileo (angl. *European Global Navigation Satellite System*) ir GLONASS

(angl. *Russian Global Navigation Satellite System*). Lietuva savo GNSS poreikiams naudoja Lietuvos padėties nustatymo sistemą (*LitPOS*). *LitPOS* GNSS turi 34 georeferencines stotis, kurios nuosekliai išdėstytos visoje Lietuvos teritorijoje, taškų koordinatės yra žinomos. GNSS naudotojų taškų padėtys nustatomos tiksliai, priimant jau apdorotus ir modeliuotus signalus iš referencinių stočių *LitPOS*. Regioninis GNSS stočių valdymo centras yra ant Vilniaus Gedimino technikos universiteto stogo (Parseliunas et al., 2008; Lietuvos erdvinės informacijos portalas, 2025). Dėl EUPOS (angl. *European Position Determination System*) projekto Lietuvos vartotojai turi prieigą prie 6 Latvijos stočių (LATPOS) ir 3 Lenkijos stočių (ASG-EUPOS) (1 pav.).

Tyrėjai turi prieigą prie erdvinio atvirų duomenų specialiaame Lietuvos atvirų duomenų portale (2025). Dalis duomenų yra prieinama registruotiems vartotojams. 2022 m. *LitPOS* tinklas buvo išplėstas įtraukiant papildomus palydovų duomenis iš keturių navigacijos sistemų: GPS, GLO-NASS, *Galileo* ir *BeiDou*. Padidėjus signalų skaičiui, matavimai Lietuvos teritorijoje atliekami sklandžiau ir patikimiau, atsirado galimybė dirbti urbanizuotose ar miškingose vietovėse (Lietuvos erdvinės informacijos portalas, 2025).

SAR duomenų tikslumui ir patikimumui užtikrinti reikalingas SAR reflektorių tinklas. SAR reflektoriai yra įrenginiai, naudojami radarų signalo atspindžiui sustiprinti tam, kad būtų lengviau aptikti ir analizuoti konkrečius taškus ant žemės. SAR reflektoriai naudojami tiek radiometrinėms, tiek geometrinėms SAR jutiklių savybėms kalibruoti ir tikrinti. Tai užtikrina radarų duomenų tikslumą, remiantis žinomais atskaitos taškais (Czikhardt et al., 2021). Lietuva neturi reflektorių tinklo; tai galėtų būti ateityje. Europos kosmoso agentūra (ESA) atlieka išsamius išskleidžiamų SAR reflektorių šiluminius bandymus, siekdama užtikrinti jų veikimą kosmose. Tai apima griežtų kosmoso sąlygų simuliaciją, siekiant patikrinti reflektorių patvarumą ir funkcionalumą (Speidel & Sauer, 2022).

Florencijos universiteto tyrėjai atliko išsamią literatūros apžvalgą, kurioje išnagrinėjo daugiau nei 190 mokslinių darbų, iš kurių 12 buvo apie teorinę GNSS ir SAR duomenų kombinaciją, o 179 buvo sutelkti į kombinuotus taikomus metodus. Rezultatai surinkti ir analizuoti atsižvelgiant į visus Europos žemyno regionus (Del Soldato et al., 2021). Rezultatai rodo, kad GNSS ir SAR duomenys buvo pritaikyti 9 skirtingose srityse: tektonika, atmosfera, ledynai, vulkanizmas, nusėdimas, nuošliaužos, infrastruktūra, nusėdimas / pakilimas ir pakilimas. Šios sritys buvo suskirstytos į pagrindines sritis, kuriose jų sinergija yra ypač naudinga, įskaitant atmosferos ir klimato stebėjimą; vandens išteklius ir hidrologiją; augalijos ir žemės naudojimo analizę; tektoninių plokščių ir žemės judėjimo stebėjimą ir kt. GNSS plačiai naudojama atmosferos vandens garams, kurie yra svarbus kintamasis orų prognozėms, stebėti, matuojant signalo vėlavimus, kuriuos sukelia atmosferos drėgmė (Kannemadugu et al., 2022). Vandens garai yra svarbūs Žemės spinduliuotės balansui, debesų formavimuisi ir hidrologiniam ciklui (Kannemadugu et al., 2022). Duomenys iš GNSS stočių Europoje ir kitose šalyse yra fiksuojami



1 paveikslas. *LitPOS* GPNS stočių tinklas (Lietuvos erdvinės informacijos portalas, 2025)

kas valandą, jais remiantis analizuojamas paros, sezoninis ir erdvinis kintamumas. SAR duomenis papildo savo gebėjimu fiksuoti paviršiaus atspindžio pokyčius įvairiomis oro sąlygomis, pagerindamas regioninių klimato modelių (angl. *Region Climate Model* (RCM)) įvestis tikslesnėms prognozėms (Lietuvos atvirų duomenų portalas, 2025). Lietuvoje atmosferos ir klimato stebėjimas vykdomas pagal Valstybinę aplinkos monitoringo programą, kurią įgyvendina Lietuvos hidrometeorologijos tarnyba prie Aplinkos ministerijos. Ši programa apima sistemingą natūralios aplinkos būklės ir jos elementų bei antropogeninio poveikio pokyčių stebėjimą, vertinimą ir prognozavimą (Lietuvos hidrometeorologijos tarnyba [METEO], 2024). Pagrindinės sritys:

- Oro stebėjimas: stebi, vertina ir prognozuoja oro kokybę, įskaitant teršalų koncentracijas ir meteorologinius rodiklius.
- Klimato duomenys: duomenys apie temperatūrą, kritulius, vėją, saulės spinduliuotę, atmosferos slėgį ir oro drėgmę renkami iš pagrindinių meteorologinių stočių. Turime 56 stotis, įsteigtas nuo 1778 metų.
- Klimato žemėlapiai: sukuriama žemėlapių, kurie atspindi klimato sąlygas skirtingais laikotarpiais, pvz., mėnesio, sezono ar metinė vidutinė oro temperatūra.

GNSS ir SAR duomenų integracija suteikia išsamesnį atmosferos ir klimato stebėjimą, derinant tikslus atmosferos duomenis su išsamiais paviršiaus stebėjimais. Ši sinergija pagerina orų ir klimato modelių tikslumą, leidžia geriau prognozuoti atmosferos procesus. Prognozės daromos kiekvieną penktadienį, remiantis Europos vidutinio laikotarpio orų prognozių centro duomenimis, kur integruojami įvairūs palydoviniai stebėjimai ir naudojami prognozavimo modeliuose, siekiant padidinti tikslumą (European Center for Medium-Range Weather Forecasts [ECMWF], 2024). Vienas iš tokių metodų yra pasaulinės navigacijos palydovų sistemos radijo okultacijos (GNSS-RO) duomenų asimiliacija, kuri suteikia vertingus atmosferos profilius apie temperatūrą ir drėgmę. GNSS-RO yra nuotolinio stebėjimo metodika, naudojanti Žemės orbitos palydovų GNSS matavimus. Žodis „okultacija“ kilęs iš lotyniško žodžio „occultare“, reiškiančio uždengti. GNSS-RO leidžia atlikti ilgalaikį, visapusišką Žemės atmosferos ir jonosferos profiliavimą su dideliu tikslumu (vidutiniai profiliai $<0,1$ K) ir raiška (~ 100 m apatinėje troposferoje) visomis oro sąlygomis. Kadangi matavimus galima atlikti bet koku oru, ši metodika idealiai tinka orams prognozuoti, atmosferos procesams suprasti, klimato stebėsenai, kosmoso orams ir jonosferos tyrimams. Šis matavimo metodas yra palyginti naujas, pirmą kartą jį 1995 m. pritaikė JAV GPS/MET (GPS/Meteorology) prietaisas, sumontuotas ant *GeoEye* palydovo *OrbView-1*, siekiant atlikti vertikalų Žemės apatinės ir viršutinės atmosferos profiliavimą. GNSS-RO yra unikalus savo duomenų produktais, nes jis teikia nepriklausomus aukščio, slėgio ir temperatūros duomenis, apimančius visą Žemės atmosferą nuo paviršiaus iki 40 km aukščio. Elektronų tankio profiliai matuojami nuo 60 km aukščio iki Žemės orbitos (LEO) aukščio (UCAR, 2025; Shehaj et al., 2025). ECMWF į savo prognozes įtraukia GNSS-RO

duomenis nuo 2006 metų, pripažindamas jų svarbą indėlį į skaitmeninių orų prognozių tikslumą. Priešingai, SAR duomenys, daugiausia naudojami aukštos raiškos paviršiumi vaizduoti, šiuo metu nėra asimiliuojami į ECMWF operacinius prognozavimo modelius. Prognozių duomenys gaunami iš nacionalinių meteorologijos ir hidrologijos tarnybų (NHMS) (METEO, 2024). Kadangi klimato sąlygos sparčiai keičiasi, klimato normų perkalibravimas tampa būtinas, siekiant tiksliai fiksuoti temperatūros, kritulių ir kitų atmosferos kintamųjų pokyčius. Standartinė klimato norma (angl. *The Standard Climate Norm* (SCN)) atlieka svarbų vaidmenį klimato stebėjimo ir prognozavimo procese, suteikdama pagrindą „normalioms“ klimato sąlygoms, padedant kontekstualizuoti dabartinius matavimus pagal istorinius duomenis. Vadovaudamasi Pasaulinės meteorologijos organizacijos rekomendacijomis, Lietuva priėmė atnaujintą 1991–2020 m. SCN, kad tiksliau atspindėtų neseniai įvykusius klimato pokyčius. Šis naujas standartas pakeičia ankstesnę 1981–2010 m. normą ir rodo pastebimą $0,5$ °C vidutinės metinės temperatūros padidėjimą, signalizuojantį apie platesnes atšilimo tendencijas. Ši norma galios iki 2031 m., kai bus apskaičiuota 2001–2030 m. SCN. SCN perkalibravimas kas 10 metų, o ne ankstesniu 30 metų intervalu leidžia Lietuvai greičiau integruoti šiuos pokyčius į klimato modelius ir prognozavimo praktikas, leidžiant laiku prisitaikyti prie klimato pokyčių. Kitas perkalibravimas apims 2021–2030 m.

3. GNSS ir SAR žemės paviršiaus stabilumo tyrimai

GNSS ir SAR plačiai naudojami tektoninių plokščių vertikalų poslinkių ir žemės stabilumo stebėjimo procesuose. EGMS aptinka nedidelius žemės vertikalūs judesius, o SAR vaizdavimas fiksuoja deformaciją didelėse teritorijose, tai yra naudinga vertinant nusėdimą ir seismines grėsmes. EGMS yra reikšminga GNSS-SAR integracijos taikymo sritis, stebinti žemės stabilumą visoje Europoje. Sukurtas EGMS servisas leidžia įvertinti žemės aukščių pokyčius laike, tačiau globaliu mastu (Detektia, 2024). Pavyzdžiui, EGMS apžiūrėtas Kirkilų ežerynas, kuris vienintelis Baltijos šalyse sudaro unikalią pertakomis bei požeminiais kanalais susijungusių vandeningų (virtusių ežerėliais) ir užpelkėjusių smegduobių sistemą. Smegduobių vidutinis skersmuo 20–35 m, gylis iki 10 metrų. Ežeryno plotas 5,9 ha (2 pav.). Šiame plote EGMS sistemoje yra tik keturi tiriami taškai, tai yra per mažas kiekis tokiam objektui.

Poslinkiai nuo 2019 m. iki 2023 m. rugsėjo mėnesio matomi schemeje (3 pav.). Vidutinė vertikalų poslinkių vertė $0,05$ mm per metus. Taikomo modelio tikslumą apibūdina vidutinė kvadratinė klaida (angl. *Root Mean Squared Error* (RMSE)), kuri yra vienas iš pagrindinių regresijos modelio veiklos rodiklių. Matuojamas vidutinis skirtumas tarp modelio numatytų aukščių verčių ir faktinių verčių. Pateikiamas įvertinimas, kaip gerai modelis gali numatyti tikslinę vertę (tikslumą).

Mūsų pavyzdyje RMSE vertė yra 1,28 mm. Vertikalus poslinkis matuojamuose taškuose yra nedidelis, nes taškai parinkti atsitiktinai neasižvelgiant į smegduobių vietas. Tikslėnei smegduobių situacijai vertinti reikia kurti skaičiavimo modelius ir ieškoti naujų technologijų, pritaikytų mūsų regionui, arba integruoti į esamą modelį papildomus matavimo taškus.

Žemės deformacijų tyrimuose taikoma santykinai nauja technologija – SAR interferometrija (*InSAR*). Interferometrinė sintetinės apertūros radarografija (*InSAR*) yra nuoto-



2 paveikslas. Kirklių ežero smegduobių teritorija su taškais

linio stebėjimo metodika, leidžianti atlikti tikslus žemės, statinių ir infrastruktūros deformacijų matavimus, naudojant mikrobangų signalų atspindžius nuo natūralių objektų ar dirbtinių atspindžių: pasyviųjų ar aktyviųjų. Palydovai, aprūpinti SAR jutikliais, siunčia mikrobangų signalus link Žemės paviršiaus ir registruoja atspindėtus signalus. Šie signalai naudojami *InSAR* vaizdai generuoti. Palyginus du *InSAR* vaizdus, gautus iš tos pačios vietovės skirtingu metu, galima aptikti paviršiaus pokyčius. Ši metodika yra naudinga stebint žemės deformacijas, tokias kaip grimzdimas ar kilimas, ir gali būti taikoma įvairiose srityse, įskaitant žemės drebėjimų ir vulkaninės veiklos stebėjimą, žemės naudojimo pokyčių aptikimą ir infrastruktūros stebėjimą (GeoKinesia, 2025). Naudojami palydoviniai vaizdai, gauti iš ERS, Envisat, RadarSat, COSMO-KyMrd, TerraSAR-X. *InSAR* technologijos evoliucija pateikta 2 paveiksle. Pagrindinių SAR palydovų programų trumpa istorija ir ateitis aprašyta straipsniuose (Christian et al., 2019; GeoKinesia, 2025).

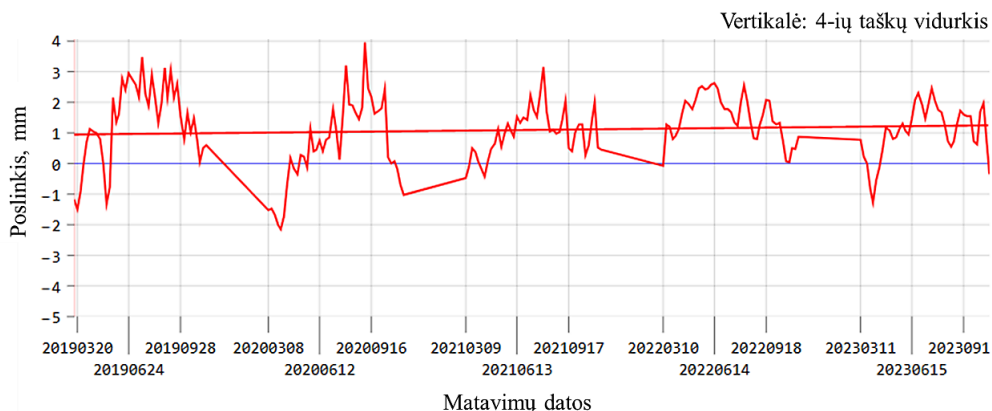
InSAR naudoja palydovinius radarų duomenis Žemės deformacijai matuoti milimetro tikslumu. Siekiant aptikti pokyčius, *InSAR* technologijoje vertinamas fazių skirtumas (t. y. interferometrinė fazė) tarp dviejų palydovinių M ir P vaizdų. Matematinė išraiška (GeoKinesia, 2025):

$$\Delta\Phi_{geom_Int} = \Delta\Phi_{geom_S} - \Delta\Phi_{geom_M} = \frac{SP' - MP}{\frac{\lambda}{4 * \pi}};$$

$$\Delta\Phi_{geom_Int} = \Phi_{geom_S} - \Phi_{geom_M} = \frac{SP' - MP}{\frac{\lambda}{4 * \pi}},$$

čia SP , MP – atstumas nuo palydovų M ir P iki paviršiaus; Φ_{geom_S} ir Φ_{geom_M} – atspindžiai nuo P paviršiaus iki S ir M palydovo. Galime atskirti komponentą, susijusį su topografija Φ_{topo} , ir komponentą, susijusį su poslinkiu Φ_{disp} :

$$\Delta\Phi_{geom_Int} = \Phi_{topo} - \Phi_{disp} = \frac{SP - MP}{\frac{\lambda}{4 * \pi}} + \frac{SP' - SP}{\frac{\lambda}{4 * \pi}}.$$



3 paveikslas. Kirklių ežero smegduobės taškų poslinkiai 2019–2023 m.

Lygtyje matome, kad topografinis komponentas Φ_{topo} priklauso nuo santykinės palydovų M ir S padėties; konkrečiai, kuo didesnis skirtumas $SP - MP$, tuo stipresnis yra Φ_{topo} . Ši technologija leidžia labai tiksliai stebėti Žemės paviršiaus deformacijas, o tai yra labai naudinga įvairiose srityse, tokiose kaip kasyba, vulkanų stebėjimas, tektoniniai judėjimai, statybos inžinerija ir kt. (Christian et al., 2019). Jutiklio užregistruota interferometrinė fazė taip pat apima kitus komponentus, tokius kaip atmosferos ir triukšmo, taip pat fazės dviprasmybės. Norint išgauti poslinkį, reikia įvertinti šiuos komponentus juos pašalinant. Norint pašalinti triukšmą ir atmosferos poveikį *InSAR* vaizdams, taikomi du metodai: taikomos erdvinės filtravimo technikos, tokios kaip linijinis ar nelinijinis filtravimas, siekiant pašalinti triukšmo komponentus, esančius *InSAR* vaizduose. Šie filtrai gali būti pagrįsti vidurkio, medianos, adaptyvaus filtravimo, bangyčių transformacijos ir kt. operacijomis. Tikslas – sumažinti trumpalaikius svyravimus, kurie paprastai yra susiję su triukšmu. Laikinas filtravimas: naudojant *InSAR* vaizdų seriją, gautą per tam tikrą laikotarpį, galima taikyti laiko filtrus, kad būtų pašalintas atmosferos poveikis. Atmosferos svyravimai paprastai vyksta lėtai ir gali būti atskirti nuo greitų Žemės paviršiaus judesių. Šiems svyravimas pašalinti gali būti naudojamos tokios technikos kaip skirtuminio filtravimo, laikinio polinominio modeliavimo ar atmosferos komponentų įvertinimas.

InSAR duomenims apdoroti taikomi du skirtingi metodai: nuolatinė sklaidos interferometrija (angl. *Persistent Scatterer Interferometry* (PSI)), diferencialinė SAR interferometrija (*DInSAR*), mažo bazinio intervalo poskyris (angl. *The small baseline subset* (SBAS)). PSI analizuoja didelį SAR vaizdų rinkinį, kad nustatytų stabilias ypatybes (nuolatinius sklaidos taškus), kurios gali būti stebimos laikui bėgant; teikiama aukšto tikslumo žemės deformacijos matavimus, net ir nedideliams pokyčiams; tinkamas ilgalaikiam infrastruktūros ir miesto teritorijų stebėjimui. PSI apribojimas yra tas, kad reikalingas didelis SAR vaizdų kiekis ir daug skaičiavimų. *DInSAR* naudoja du SAR vaizdus, gautus skirtingu laiku, žemės deformacijai matuoti; idealus didelio masto, greitų deformacijos įvykių, tokių kaip žemės drebėjimai ar nuošliaužos, aptikimui, tačiau jis yra jautrus atmosferos trikdžiams ir topografinės fazės pokyčiams (He et al., 2022).

4. Išvados

Apibendrinant galima išskirti šias GNSS ir SAR duomenų panaudojimo aplinkos tyrimuose perspektyvas:

- Vis daugiau šalių ir organizacijų dalijasi GNSS ir SAR duomenimis, todėl jie tampa vis prieinamesni moksliniams tyrimams.
- Nuolat atsiranda nauja programinė įranga, kurią naudojant vykdomos analizės, leidžiančios išgauti vis daugiau informacijos iš naudojamų duomenų.
- GNSS ir SAR duomenys lengvai integruojami į kitus duomenų šaltinius, tokius kaip meteorologiniai duomenys, socialiniai duomenys ir kt., tai leidžia sukurti išsamesnį aplinkos vaizdą.

Tikslesnei Žemės paviršiaus vertikalinių judesių situacijai vertinti reikia kurti savo modelius, pritaikyti algoritmus ir ieškoti naujų technologijų, nes globaliu mastu prieinami rezultatai neapibūdina nedidelės teritorijos deformacijų.

Literatūra

- Christian, T. W., Marsh, O. J., & Rack, W. (2019). Differential interferometric synthetic aperture radar for tide modelling in Antarctic ice-shelf grounding zones. *The Cryosphere*, 13(12), 3171–3191. <https://doi.org/10.5194/tc-13-3171-2019>
- Czikhhardt, R., Marel, H., & Papko, J. (2021). GECORIS: An open-source toolbox for analyzing time series of corner reflectors in *InSAR* geodesy. *Remote Sensing*, 13(5), Article 926. <https://doi.org/10.3390/rs13050926>
- Del Soldato, M., Confuorto, P., Bianchini, S., Sbarra, P., & Casagli, N. (2021). Review of works combining GNSS and *InSAR* in Europe. *Remote Sensing*, 13, Article 1684. <https://doi.org/10.3390/rs13091684>
- Detektia. (2024). *European ground motion service*. [https://detektia.com/en/egms-european-ground-motion-service/#:~:text=This%20service%2C%20the%20European%20Ground,2018%2D2022\)%20are%20available](https://detektia.com/en/egms-european-ground-motion-service/#:~:text=This%20service%2C%20the%20European%20Ground,2018%2D2022)%20are%20available)
- Elliott, J. R. (2020). Earth observation for the assessment of earthquake hazard, risk and disaster management. *Survey in Geophysics*, 41, 1323–1354. <https://doi.org/10.1007/s10712-020-09606-4>
- European Center for Medium-Range Weather Forecasts. (2025). <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets>
- GeoKINESIA. (2025). *What is InSAR*. <https://geokinesia.com/interferometric-synthetic-aperture-radar/>
- He, X., Montillet, J. P., Li, Z., Kermarrec, G., Fernandes, R., & Zhou, F. (2022). Recent advances in modelling geodetic time series and applications for earth science and environmental monitoring. *Remote Sensing*, 14(23), Article 6164. <https://doi.org/10.3390/rs14236164>
- Kannemadugu, H., Ranganathan, K., Gharai, B., & Seshasai, M. V. R. (2022). GNSS-GPS derived integrated water vapor and performance assessment of ERA-5 data over India. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 227, Article 105807. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2021.105807>
- Lietuvos atvirų duomenų portalas. (2025). <https://data.gov.lt/>
- Lietuvos erdvinės informacijos portalas. (2025). <https://www.geoportal.lt/geoportal/>
- Lietuvos hidrometeorologijos tarnyba. (2024). *Monitoringas*. <https://www.meteo.lt/istaiga/monitoringas/>
- Parseliunas, E., Buga, A., Marozas, L., Petniunas, M. ir Urbanas, S. (2012). LitPOS – a part of EUPOS. *Geodezija ir kartografija*, 34(2), 50–57. <https://doi.org/10.3846/1392-1541.2008.34.50-57>
- Rajabbi, M. (2024). *Climate and environmental monitoring using GNSS remote sensing* [Doctoral thesis, Norwegian University of Science and Technology]. <https://hdl.handle.net/11250/3132067>
- Richards, J. A. (2009). *Remote sensing with imaging radar*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-02020-9>
- Shehaj, E., Leroy, S., Cahoy, K., Geiger, A., Crocetti, L., Moeller, G., Soja, B., & Rothacher, M. (2025). Global Navigation Satellite System (GNSS) radio occultation climatologies mapped by machine learning and Bayesian interpolation. *Atmospheric Measurement Techniques*, 18(1), 57–72. <https://doi.org/10.5194/amt-18-57-2025>

- Speidel, C., & Sauer, A. (2022). *Thermal testing of a space-borne deployable reflector (SAR antenna)* [Conference presentation abstract]. European Space Thermal Engineering Workshop. https://indico.esa.int/event/406/contributions/7097/attachments/4651/7096/Abstract_Speidel_2022.pdf
- UCAR. (2025). *Developing innovative global navigation satellite systems observational techniques for the earth science community*. <https://www.cosmic.ucar.edu/>

APPLICATION OF GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEMS AND SYNTHETIC APERTURE RADAR TECHNOLOGY IN ENVIRONMENTAL AND EARTH SURFACE STABILITY RESEARCH: A REVIEWS

R. Bražiūnas, J. Sužiedelytė Visockienė

Abstract

Environmental monitoring technologies have advanced, offering reliable data to assess and mitigate the impacts of climate and ecosystem changes on the planet. Global Navigation Satellite Systems (GNSS) and Synthetic Aperture Radar (SAR) technology have contributed to this progress. The combined use of GNSS and SAR enriches environmental assessments, supporting programs for climate monitoring, water cycle analysis, and vegetation mapping. This integration is also crucial for tracking the movement of Earth's tectonic plates and monitoring its stability, with GNSS measuring precise surface displacements and SAR providing detailed images of ground deformation. Several models and systems have been developed for large-scale global area monitoring, where GNSS and SAR data provide accurate measurements used to evaluate various parameters such as soil moisture, vegetation cover, glacier melting, and more. GNSS and SAR are widely used in monitoring tectonic plate shifts and Earth's stability. A study conducted by the European Earth Movement Monitoring Service in the Kirkilai sinkhole area, covering 5.9 hectares, found that the system uses only four measurement points in such an area, which does not fully describe the situation of height changes over time. Therefore, it would be beneficial to create a local model or system for monitoring the Lithuanian territory using the same GNSS and SAR technologies.

Keywords: GNSS, SAR, InSAR, environmental monitoring, climate changing, land stability research.