

TARTU ÜLIKOOL
LOODUS- JA TEHNOLOOGIATEADUSKOND

Füüsika instituut

Martin Valgur

**MAAPINNA JA HOONETE LIIKUMISTE TUVASTAMINE
INTERFEROMEETRILISE TEHISAVARADARI ABIL**

Bakalaureusetöö (12 EAP)

Juhendaja: Kaupo Voormansik

Kaitsmisele lubatud

Juhendaja

Tartu 2014

Sisukord

1	Sissejuhatus.....	4
2	Valdkonna ülevaade	5
2.1	Tehisavaradar (SAR).....	5
2.1.1	Üldine kirjeldus.....	5
2.1.2	Tehisavaradari pildi moodustumine.....	6
2.2	Interferomeetriline tehisavaradar (InSAR).....	8
2.3	Diferentsiaalne InSAR (DInSAR).....	10
2.4	Püsivate peegeldajate InSAR	10
2.5	Interferomeetrilise faasi koherentsus	11
2.6	Veaallikad	12
3	Metoodika	14
3.1	Lähteandmed	14
3.1.1	Tehisavaradari-pildid	14
3.1.2	Täpsed orbiidiparameetrid	18
3.1.3	Digitaalne kõrgusmudel	18
3.2	Andmetöötlus	18
3.2.1	Kasutatud tarkvara	19
3.2.2	Envisat ASAR ja ERS SAR SLC vormingus piltide töötluks ettevalmistamine ..	20
3.2.3	Interferogrammide moodustamine.....	21
3.2.4	Püsivate peegeldajate leidmine	23
4	Tulemused ja arutelu	25
5	Kokkuvõte.....	32
6	Tänuavaldused	34

7	Summary: Buildings and Land Movements Detection with Interferometric Synthetic Aperture Radar	35
8	Kasutatud kirjanduse loetelu.....	37

1 Sissejuhatus

Maa kliima, ökosüsteemide ja geofüüsikaliste protsesside jälgimiseks ning mõõtmiseks on mitmeid meetodeid alates lokaalsetest kontaktmõõtmistest kuni satelliitseireni. Satelliitseire on eriti huvitav ja sobiv rakendusteks, kus on vaja koguda andmeid väga suurte alade (riigid, maailmajaod) kohta väga lühikese aja jooksul. Üks laiemalt satelliitseires levinud instrumentide tüüp on tehisava-radar (ingl k *Synthetic Aperture Radar* – SAR). SAR on unikaalne ja võimas instrument tänu võimalusele registreerida väga täpselt tagasipeegeldunud signaali faasi. Faas omakorda on otseses vastavuses lainepikkusega, mis võimaldab väga täpseid kauguste ja nende ajaliste muutuste mõõtmisi. Seetõttu on maakoore liikumiste ja teiste geofüüsikaliste protsesside uurimiseks SAR üks sobivamaid kaugseire-instrumente.

Käesolevas töös uuritakse kaugseire-satelliidil paikneva tehisava-radari interferomeetrilist kasutamist Eestis maapinnaliikumiste ning hoonete vajumiste ja kerkimiste tuvastamiseks. Tehisavaradariga registreeritud piltide analüüsi tulemusena on võimalik vaadelda üksikute objektide liikumist millimeetrite suurusjärgus kuude ja aastate lõikes. Vaadeldes mitmeid objekte samaaegselt, on võimalik tuvastada ka pinnaseliikumisi mõnes huvi pakkuvast piirkonnast üldisemalt. Kuna käesolevas töös kasutatavad tehisavaradarid on orbiidil olnud nüüdseks enam kui 20 aastat, on võimalik vaadelda pinnaseprotsesse Eesti Vabariigi taasiseseisvumisest alates. Uuritavaks piirkonnaks on Kirde-Eesti, kus maapinna vajumine on põhjustatud pikaajalisest kaevandamisest. Antud töö ei analüüsi mõõdetud vajumiste põhjusi, vaid keskendub optimaalse mõõtemetoodika väljatöötamisele.

Töö koosneb viiest peatükist. Peale sissejuhatust teises peatükis antakse ülevaade radarseire valdkonnast ja maapinna liikumiste mõõtmise võimalustest tehisava-radariga. Kolmas peatükk kirjeldab lähteandmeid ja andmetöötlust. Neljas peatükk esitab valiku huvitavamaid tulemusi ja analüüsib nende usaldusväärsust ja võimalikke vigu. Viies peatükk on kokkuvõte, kus esitatakse töö peamised saavutused ja antakse soovitusi edasisteks uurimusteks, et teha interferomeetrilise tehisava-radariga täpseid ja usaldusväärseid maapinna liikumiste mõõtmisi.

2 Valdkonna ülevaade

2.1 Tehisavaradar (SAR)

2.1.1 Üldine kirjeldus

Tehisavaradar on üks radari tänapäevaseid edasiarendusi, millest tulenevalt on nendel seadmetel mitmeid ühiseid omadusi. Radar on elektromagnetiline instrument, mis kiirgab raadiolaineid ning mõõdab sihtmärgilt (ehk kiirguse hajutajalt) tagasipeegeldunud kiirgust. Vastuvõetud signaali töödeldakse, et eraldada sellest informatsioon sihtmärgi kauguse ja suuna (ehk asimuudi) kohta. Radar leiutati sõjaliseks otstarbeks II maailmasõja ajal ning tema esimeseks laiemalt levinud kasutusala oli lennukite, laevade ja sõidukite tuvastamine ja asukoha määramine. Raadio-sagedusliku sensorina toimib see suure täpsusega pikkadel vahemaadel, olenemata ilmastikutingimustest ja nähtavusest. Algupärastes süsteemides mõõdeti kaugust sihtmärgini levikuks kulunud aja põhjal ja suunda antenni vaatesuuna järgi. Sellele lisaks hakati sihtmärgi liikumiskiiruse mõõtmiseks ära kasutama Doppleri efekti. Hiljem leiti, et koos täiendava andmetöötlusega on võimalik Doppleri efekti kasutada ka radarikiire levikust ristsuunas pildi eraldusvõime oluliseks suurendamiseks, mis võimaldas maapinnast ja muudest objektidest kahemõõtmeliste ülesvõtete tegemist. Kirjeldatud idee autoriks loetakse Carl Wileyt, kes töötas sellel ajal – 1951. aastal – USA firmas Goodyear Aerospace. Meetodi nimetuseks sai tehisava-radar (ingl k *synthetic aperture radar* – SAR), viidates sellega signaalitöötluse abil sünteesitud näiliselt väga pikale antennisüsteemile kuigi füüsiliselt võib seade koosneda vaid ühest lihtsast antennist. [1]

1970ndate lõpupoolel hakkasid kosmoses paiknevad radarisüsteemid mängima olulist rolli kaugseires. Radareid kasutati naaberplaneetide pinna uurimiseks ja hiljem, 1978. aastal, saatis NASA Maa orbiidile tehisavaradariga satelliidi Seasat. Juba esimesed missioonid demonstreerisid tehisavaradari võimet usaldusväärselt Maad kaardistada. Leiti, et tehisavaradari mõõtmised sisaldavad infot mitmete maapinna füüsiliste omaduste kohta nagu topograafia, morfoloogia, karedus ja dielektriline läbitavus. Kosmoses paiknevad SAR-süsteemid opereerivad mikrolainealas (cm kuni dm lainepikkused) ja on ühtlasi ka iseendale valgusallikaks. Tänu sellele suudavad nad informatsiooni hankida üle kogu maailma ja ilmastikutingimustest ning päikesevalguse olemasolust peaaegu sõltumata. Küljele vaatavat geometriat, impulsside tihendustehnikat ja tehisava ideed kasutades saavutatakse meetrite suurusjärgus ruumiline lahutusvõime, vaatamata suhteliselt väikeste mõõtmetega antennidele (1–10 m). Ilma tehisavaradari andmetöötluseta

annaks sama suurte antennide kasutamine kilomeetrite suurusjärku jäävaid ruumilisi lahutusi. Ka raadiosagedustel töötamine on väärtus omaette, olles täienduseks nähtavas spektriosas toimuvale kaugseirele. Erinevalt optilisest kaugseirest pakub raadiolainete sagedussalas töötav radar võimalust näha objektide (nt puude või jää) sisse, pakkudes infot nende siseehituse ja mõõtmete kohta. Nende tehisavaradari kasulike omaduste hinnaks on kõrge saatevõimsus, arvutusmahukas signaalitöötlus ja optiliste seadmetega võrreldes ebaharilik pildistamisgeomeetria. [1, 2]

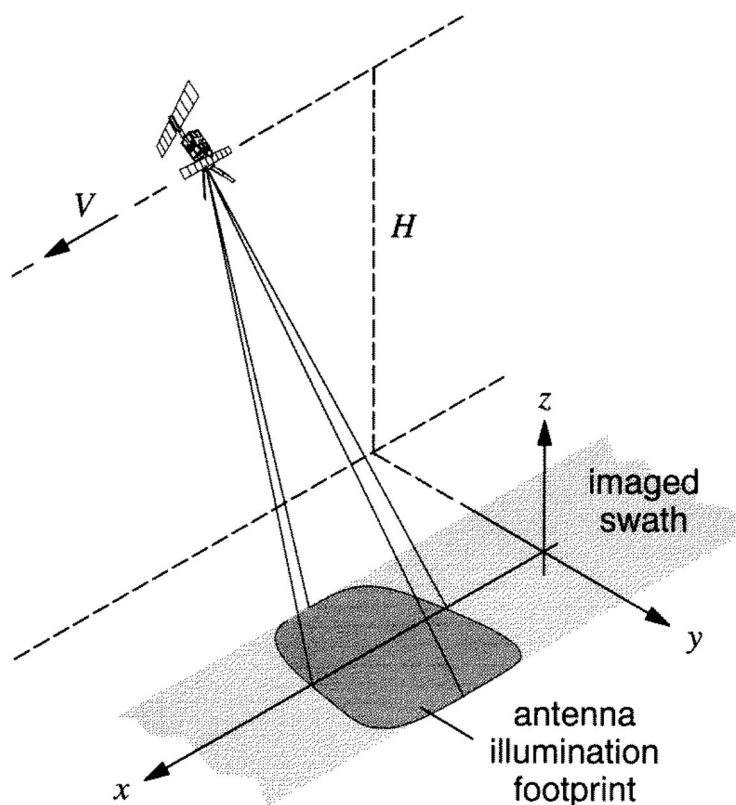
2.1.2 Tehisavaradari pildi moodustumine

Sarnaselt teistele mittetavapärastele pildistamismeetoditele toimub tehisavaradari andmetöötluse protseduur kahe sammuna. Esimesel sammul toimuvale toorandmete kogumisele järgneb signaalitöötlus. Seadme koherentsest radarist saadavad algandmed sarnanevad pigem hologrammile kui pildile selle tavalises tähenduses. Pildi moodustamiseks vajavad andmed märkimisväärses mahus signaalitöötlust, mida nimetatakse tehisavaradari fokuseerimiseks (ingl k *SAR focusing*). [2]

Satelliidil või lennukil paiknev SAR valgustab maapinda raadiolainetega ühe külje, tüüpiliselt lennusuunast parema, suunas (vt joonis 1). Sensor liigub piki trajektoori kõrgusel H ja kiirgab oma impulsikordussagedusel (ingl k *pulse repetition frequency*, PRF) mikrolaineimpulsse valgustavasse alasse maapinnal. Vaheldumisi impulsside saatmisega võetakse vastu Maalt tagasipeegeldunud impulsside kaja. SARi vastuvõtja registreerib selle kajade jada üksikute kajadena koherentselt ehk registreerib samaaegselt nii elektrivälja amplituudi kui ka faasi. Iga vastuvõetud kaja omab vastavust ühega väljasaadetud impulssidest. Andmete töötlemiseks asetakse kajad kül-g-külje kõrvale kahemõõtmelisse maatriksisse, mille telgedeks on signaali edasi-tagasi leviku aeg ja impulsiseeria järjekorranumber. Impulsiseeria järjekorranumber omab vastavust satelliidi asukohaga, viivituse aeg kaldulatusena. [2]

Iga kiirataav impulss skaneerib maapinda samaaegselt kahel viisil, mis on oma olemuselt erinevad. Esiteks, iga impulss laotub üle maapinna valguse kiirusel. Teiseks, samal ajal toimub skaneerimine seadme lennusuunas selle liikumiskiirusega lähedasel kiirusel. Nende kahe mehhanismi ajaskaalad on mitme suurusjärgu jagu erinevad, mis võimaldab neid käsitleda teineteisest sõltumatuna. Seetõttu võib vastuvõetud kajad seada kül-g-külje kõrvale ning moodustada neist toorandmete maatriksi. Saadud kahemõõtmelise esituse (ja ka saadava fokuseeritud pildi) koordinaatideks on ulatus (ingl k *range*) R , mis vastab sensori ja hajutaja vahelisele kaugusele ning kaja hilistusele, ja

asimuut x (ingl k *azimuth*) ehk asukoht sensori lennutrajektoorigil. Nende mõistete sünonüümidenä kasutatakse ka termineid „risti-teeconda“ või „kiire aeg“ ulatuse jaoks ja „piki-teeconda“ või „aeglane aeg“ asimuudi jaoks (vastavalt *cross-track*, *fast time*, *along-track* ja *slow time* inglise keeles). [2]



Joonis 1. SARi pildistamisgeomeetria. Selle kirjeldamiseks kasutatavad terminid on „piki-teeconda“ või „asimuut“ x -i, „ulatuse maapinnal“ y -i ja „kaldulatus“ pinnapunkti ja vastuvõtja vahelise kauguse jaoks. (Ingl k vastavalt „along-track“, „azimuth“, „ground range“ ja „slant range“.) [2]

Levinud impulsside kandesageduste lainepikkused on 3 cm (X-riba), 6 cm (C-riba), 9 cm (S-riba) ja 24 cm (L-riba). Tulevikus võib kasutusele tulla ka 64 cm (P-riba) lainepikkus. Impulsi-kordussagedus jääb tavaliselt vahemikku 1–10 kHz. [2]

Tooreste andmete maatriksi ulatusesuunalisele lahutusvõimele on määravaks nn radariprintsiip, millest järeldub, et lahutusvõime sõltub kiiratud impulsi kestusest (või ribalaiuse pöördväärtusest, kui kasutatakse faasikodeeringuga impulsse). Asimuudi-suunaline lahutusvõime oleneb kiirgusega kaetud ala suurusel maapinnal, mis on suurusjärgus $R\lambda/L$ ja võib olla mitme kilomeetri laiune (L

on füüsilise antenni pikkus piki lennusuunda, tüüpiline kosmoseseire SARi antenni pikkus on 3–10 m). [1, 2]

2.2 Interferomeetriline tehisavaradar (InSAR)

Interferomeetriline tehisavaradar (ingl k *interferometric SAR* – InSAR) kasutab kahe kohakuti asetseva SAR-pildi faasivahet. Tehisavaradari interferogramm (ehk kohakuti olevate pikslite faasivahede maatriks) moodustatakse komplekssignaale korrutades, mitte summeerides nagu optilise interferomeetria puhul. Kui kummagi pildi kohakuti asuvate pikslite kompleksväärtused on vastavalt u_1 ja u_2 , siis interferogrammi piksli väärtus on

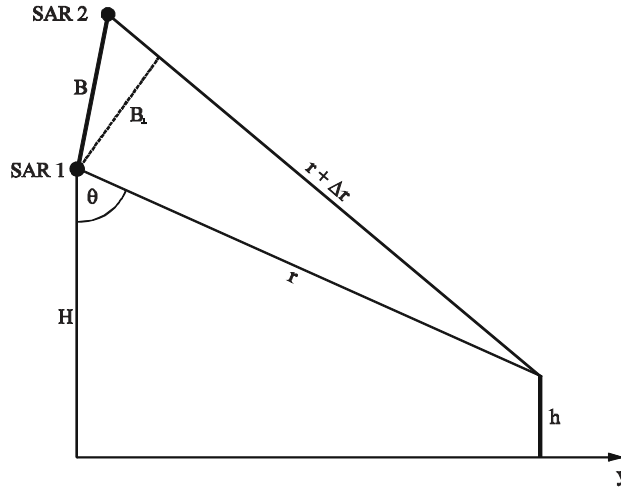
$$s = u_1 \cdot u_2^* = |u_1| \cdot e^{j\phi_1} \cdot |u_2| \cdot e^{-j\phi_2} = |u_1| \cdot |u_2| \cdot e^{j\Delta\phi}. \quad (1)$$

Tehisavaradari faasi mõõtetäpsus on moodsatel seadmetel väiksem kui kaks kraadi, [3] mis vastab millimeetristele muutusele 3–5 cm lainepikkuse korral. Faas $\Delta\phi$ on teada ainult 2π vahemikus. Täisarv lainepikkusi, mis kulub satelliidilt peegeldajani ja tagasi jõudmiseks, pole teada ning see arv on vaja leida kaudsetelt nn faasi lahtipakkimise (ingl k *phase unwrapping*) kaudu.

Interferomeetriline faas $\phi_{int} = \Delta\varphi$ koosneb mitmest komponendist:

$$\phi_{int} = \phi_{topo} + \phi_{ref} + \phi_{orb} + \phi_{atm} + \phi_{defo} + \phi_n, \quad (2)$$

kus ϕ_{ref} ja ϕ_{topo} on vastavalt Maa referentsellipsoidi ja selle peal oleva topograafia geometriast tingitud faasikomponendid, ϕ_{orb} orbiitide ebatäpsusest tingitud faas, ϕ_{atm} signaali levikul atmosfääris tekkiv varieeruv hilistus, ϕ_{defo} radari levikusihis toimuv nihe ning ϕ_n ülejäänud mõjud (näiteks muutused pikslisiseses esemete paigutuses, vead tehisavaradari-pildi fokuseerimisel või vead piltide kohakuti nihutamisel), mis loetakse lihtsalt müraks. [4, 5]



Joonis 2. Interferomeetrilise tehisavaradarisüsteemi geomeetria. r – kaugus peegeldaja ja sensori vahel; Δr – esimese ja teise mõõtmise kauguse vahe; B – vahemaa sensorite asukohtade vahel; $B_{\perp}$ – efektiivne vahemaa ehk sensorite vahemaa mõõdetuna kaldulatusest ristsihis. [6]

Topograafiast tingitud faas on määratud InSAR-süsteemi geomeetriaga (vt joonis 2) ning kehtib seos

$$\phi_{topo} = \frac{4\pi B_{\perp} h}{\lambda r \sin \theta_i}, \quad (3)$$

kus h on peegeldaja kõrgus Maa referentsellipsoidist, θ_i kiire langemisnurk, λ tehisavaradari kandesageduse lainepikkus ja r kaugus sensori ja peegeldaja vahel. [7] Käesolevas töös kasutatakse Maa referentsellipsoidina WGS84 mudelit.

Maa referentsellipsoidist tingitud faas on seotud InSAR geomeetriaga valemiga

$$\phi_{ref} = -\frac{4\pi B_{\perp} \Delta r}{\lambda r \tan \theta_i}, \quad (4)$$

kus Δr on peegeldaja kauguse erinevus esimesel ja teisel mõõtmisel. [8] Orbiidi ebatäpsusest tingitud faas ϕ_{orb} järgib sama seost, omades mõju sensorite kauguse erinevusele Δr .

Piki radari levikusihti toimuv nihe maapinnal mõõtmiste vahelisel ajal tekitab faasikomponendi

$$\phi_{defo} = \frac{2\pi}{\lambda} 2\Delta r. [5, 7] \quad (5)$$

Teades või hinnates kõiki ülejäänud faasikomponente on võimalik eraldada interferogrammi faasist ϕ_{topo} ja ϕ_{defo} komponendid ning neid kasutada vastavalt peegeldaja kõrguse ja nihke määramiseks. Sellel ideel põhinebki kogu järgnev töös kasutatud metoodika.

2.3 Diferentsiaalne InSAR (DInSAR)

Diferentsiaalse InSAR-i eesmärgiks on moodustatud interferogrammi põhjal leida mõõtmiste paari vahel toimunud peegeldajate kaldulatuse-sihiline nihe. Nihkest tingitud faasi ϕ_{defo} väärtuse hinnang leitakse võrrandist (3). Selleks eemaldatakse interferogrammi faasist ϕ_{topo} , mis arvutatakse olemasolevast kõrgusmudelist või kahest teisest SAR pildist arvutatud kõrgusmudeli põhjal. Vastavalt sellele nimetatakse DInSAR töötlust kahe- või kolmesammuliseks.

Pärast ϕ_{topo} faasi ja valemist (4) leitud ϕ_{ref} ja ϕ_{orb} väärtuse mahalahutamist jääb alles vaid deformatsioonist, atmosfäärist ja mürast tingitud faas, mis pakitakse lahti.

DInSAR meetodit on võimalik kasutada väga edukalt suurte deformatsioonide ja tagasihoidliku müra korral, näiteks maavärinate mõjude kaardistamisel.

2.4 Püsivate peegeldajate InSAR

DInSAR loomulikuks jätkuks on töötlusesse täiendavate Interferogrammide lisamine. Selle eelisteks on võimalus jälgida maapinnanihete kulgu ajas, võimalus vähendada üksikmõõtmiste määramatuse mõju maapinnaliikumise kiiruse täpsusele ning võimalus interferogrammide eraldada ja eemaldada mõningaid segavaid efekte, näiteks atmosfäärist tingitud ruumiliselt ebahomogeenne faasikomponent. Tehisavaradari interferomeetrias pole tavapärased meetodid aegridade analüüsiks otseselt rakendatavad, sest interferogrammide faas on ilma täiendava töötluseta teada ainult modulo 2π . Absoluutse faasi teadasaamiseks on vajalik faasi lahtipakkimine ehk teadaolevale faasile sobiva täisarvu 2π väärtuste liitmine. Faasi lahtipakkimine toimub enamasti eeldusel, et tegelik faasi väärtus muutub ruumis enamasti sujuvalt ning järsud erinevused naaberpikslites on tingitud 2π faasihüppest, mida lahtipakkimisalgoritm vastavalt kompenseerib. Müra interferogrammis muudab taoliste faasihüpete eristamise oluliselt keerulisemaks ning väga mürarikaste pikslite korral isegi võimatuks. Seetõttu on InSAR aegridade uurimisel kriitilise tähtsusega kõrge signaali-müra suhtega pikslite kasutamine, eriti kui uuritav ala sisaldab suuri maapinnanihkeid.

Kõrge signaali-müra suhtega ajas stabiilsete mõõtmispunktide saamiseks valitakse välja tugeva ja ühtlase peegeldusega objektid, nn püsivad peegeldajad (ingl k *persistent scatterer*, PS). Need sihtmärgid vastavad tüüpiliselt üksikutele füüsilistele, enamasti inimtekkelistele, objektidele, mis on oma resolutsioonieleменти piires domineerivaks peegeldajaks. Paljud neist käituvad kui punktpeegeldajad ning on seetõttu jälgitavad suures vaatenurkade vahemikus. Taolistelt punktpeegeldajatelt saadav signaal on seetõttu vähem tundlik kahe mõõtmise efektiivse vahemaa (ingl k *perpendicular baseline*) suhtes. Üldiselt pole ühe domineeriva peegeldaja eksisteerimine piksli sees piksli püsivaks peegeldajaks klassifitseerumiseks siiski vajalik. [4]

Vastavaid meetodeid nimetataksegi püsivate peegeldajate InSAR-ks (ingl k *Persistent Scatterer InSAR*, lühendatult PS-InSAR või PSI). Esimene PS-InSAR tehnika töötati välja Ferretti et al. poolt 2001. aasta paiku. [9] Nende kasutatavas terminoloogias nimetatakse püsivaid peegeldajaid „*permanent scatterers*“. Nende meetod kasutab püsivate peegeldajate tuvastamiseks piksli amplituudi dispersiooni suhet keskmise amplituudiga arvutatuna üle interferogrammide seeria. See meetod toimib hästi linnapiirkondades, kuid asustamata aladel leitakse püsivaid peegeldajaid vähe.

2004. aasta paiku töötas Hooper et al. välja alternatiivse PS-InSAR meetodi StaMPS (*Stanford Method for PS*). [10] Selle meetodi eesmärgiks on tõsta asustamata aladel leitavate püsivate peegeldajate arvu ja kvaliteeti. StaMPS tuvastab püsivaid peegeldajaid pikslite faasi ajalise stabiilsuse põhjal ning tänu sellele leitakse erinevalt Ferretti et al. meetodist püsivaid peegeldajaid ka nõrga amplituudiga pikslite seast.

2.5 Interferomeetrilise faasi koherentsus

Tehisavaradari interferomeetria pole kunagi täielikult müravaba. Iga piksli faasi täpsuse ja mürataseme kirjeldamiseks on võimalik kasutada erinevaid omavahel seotud suursi.

Enim kasutatakse interferogrammi pikslite faasi kvaliteedimõõduna faasi koherentsust γ , mis on defineeritud kui

$$\gamma = \frac{E\{y_1 y_2^*\}}{\sqrt{E\{|y_1|^2\} E\{|y_2|^2\}}}, \quad (6)$$

kus $E\{\cdot\}$ tähistab ooteväärtust, ülaindeks $*$ kaaskompleksi ning y_1 ja y_2 on interferogrammi moodustavate piltide kompleksväärtused piksli asukohas. [11]

Koherentsuse valemis sisalduvate ooteväärtuste leidmiseks tuleks ideaalsel juhul kasutada suurt hulka samal ajal ja täpselt samades tingimustes mõõdetud SAR pilte, mis on praktikas võimatu. Seetõttu oletatakse, et piksli faasi täpsus on lokaalselt statsionaarne. Ergoodsuse eeldusel võib koherentsuse arvutamisel kasutada ajaliste keskmiste asemel ruumilisi keskmisi. Sellel eeldusega on võimalik leida suurima tõepära hinnang koherentsuse amplituudile, kasutades hinnanguks N naaberpikslit:

$$|\hat{\gamma}| = \frac{|\sum_{n=1}^N y_1^{(n)} y_2^{*(n)}|}{\sqrt{\sum_{n=1}^N |y_1^{(n)}|^2 \sum_{n=1}^N |y_2^{(n)}|^2}}. [2, 11] \quad (7)$$

Piksli koherentsus γ on seotud piksli signaali-müra suhtega:

$$|\gamma| = \frac{SNR}{SNR+1}. [2, 11] \quad (8)$$

Piksli faasi dispersioon ja koherentsus on omavahel seotud järgnevalt:

$$\sigma_\phi^2 = \frac{\pi^2}{3} - \pi \arcsin(|\gamma|) + \arcsin^2(|\gamma|) - \frac{\text{Li}_2(|\gamma|^2)}{2}, \quad (9)$$

kus Li_2 on Euleri dilogarithm, mis on defineeritud kui $\text{Li}_2(|\gamma|^2) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{|\gamma|^{2k}}{k^2}$. [2]

Punktpeegeldajate jaoks, mille jaoks koherentsus $|\gamma|$ on peaaegu 1, on dispersiooni ja koherentsuse vaheline soes lihtsam,

$$\sigma_\phi^2 = \frac{1-\gamma^2}{2\gamma^2}. [11] \quad (10)$$

2.6 Veaallikad

Interferogrammi faasi müra on tingitud mitmetest teguritest. Hanssen [11] defineerib dekorrelatsiooni kui koherentsushinnangu ruumilisest aknast lühema korrelatsioonipikkusega teguritest tingitud müra ning loetleb dekorrelatsiooniallikatena järgnevaid tegureid:

- sensori asukohtade efektiivsest vahekaugusest tingitud ehk geomeetriline dekorrelatsioon (γ_{geom}), mis tuleneb langemisnurkade erinevusest mõõtmistel;
- Doppleri sageduskeskmete erinevusest tingitud dekorrelatsioon (γ_{DC});

- ruumhajumisest (ingl k *volume scattering*) tekkiv dekorrelatsioon (γ_{ruum}), mis on põhjustatud radarikiire hajumisest objekti sisemusest, mitte pinnalt;
- sensori soojusmüra ($\gamma_{\text{soojuslik}}$);
- ajaline dekorrelatsioon (γ_{ajaline}), mis on põhjustatud hajutamismadusi mõjutavatest füüsilistest muutustest maastikul (nt taimestiku kasv);
- töötusest tulenev dekorrelatsioon ($\gamma_{\text{töötus}}$), mis sõltub töötusalgoritmide valikust (näiteks koosregistreerimise ja interpoleerimise viisidest).

On võimalik näidata, et veaallikad kombineeruvad korrutatult. Dekorrelatsioonikomponentide korrutis annab tulemuseks piksli koherentsuse hinnangu: [11, 12]

$$\gamma_{\text{summarne}} = \gamma_{\text{geom}} \times \gamma_{\text{DC}} \times \gamma_{\text{ruum}} \times \gamma_{\text{soojuslik}} \times \gamma_{\text{ajaline}} \times \gamma_{\text{töötus}}. \quad (11)$$

Lisaks nendele lokaalsetele veaallikatele on ka laiemat mastaapi omavaid faasivigade põhjuseid: [11]

- kasutatud orbiidiinfo erinevine reaalsest orbiidist kutsub esile sujuva faasitrendi lisandumise piki ühte sihti üle kogu interferogrammi;
- turbulentsidest tingitud murdumisnäitaja varieerumine atmosfääris, mis põhjustab radarikiire levikus erinevaid ajalisi viiviseid ja vastavalt ka erinevaid faasierinevusi;
- faasi lahtipakkimisel valesti valitud juurdeliidetav arv 2π kordseid, mis tavaliselt avaldub üle laiema ala.

3 Metoodika

3.1 Lähteandmed

PS-InSAR tötluseks on vaja kolme tüüpi lähteandmeid: fokusseeritud SAR-pilte, täpseid orbiidi-parameetreid ning uuritava ala digitaalset kõrgusmudelit.

3.1.1 Tehisavaradari-pildid

Kasutatud tehisavaradari-pildid pärinesid kahelt Euroopa Kosmoseagentuuri (ESA) kaugseiresatelliidilt: ERS-1 ja ERS-2.

ERS-1 saadeti kosmosesse 17. juulil 1991 ning talle järgnes 21. aprillil 1995 peaaegu identse ehitusega ERS-2. ERS-1 kogus tehisavaradari andmeid kuni 10. märtsil 2000 toimunud riistvararikkeni. ERS-2 on töös praeguseni, kuid 2001. aasta veebruaris toimunud güroskoobi töötlakkamise tõttu pole sellest ajast alates tema tehisavaradari andmed InSAR otstarbeks kasutatavad. Mõlema satelliidi peal paiknevad tehisavaradarid on täpselt sama konstruktsiooni ning parameetritega (loetletud tabelis 1). Käesolevas töös kasutatakse tehisavaradari pildirežiimis tehtud ülesvõtteid.

Tabel 1. Töös kasutatud ERS-1 ja ERS-2 ja võrdluseks ERS satelliitide järeltulija Envisat tehisavaradarite olulisemad parameetrid. [13, 14]

	ERS-1 ja ERS-2 IMS (pildi-režiimis)	Envisat ASAR (pildi-režiimis)
Sagedus	5,300 GHz (C-sagedusala)	5,331 GHz (C-sagedusala)
Lainepikkus	5,6 cm	5,6 cm
Polarisatsioon	VV	VV või HH
Ribalaius	15,5 MHz	Kuni 16 MHz
PRF	1640–1720 Hz	1650–2100 Hz
Vaateala laius	100 km	100 km
Radiomeetriline lahutus	2,5 dB	1,5 dB

	ERS-1 ja ERS-2 IMS (pildi- režiimis)	Envisat ASAR (pildi- režiimis)
Ruumiline lahutus piki- ja risti-lennusuunda	30 m × 26,3 m	28 m × 28 m
Langemisnurk	20,1–25,9°, ala keskel 23°	15–45°

Interferomeetriaks on võimalik kasutada üksnes selliseid ülelende, mis järgivad sama trajektoori. Sama trajektoor kordus kõigi kolme satelliidi puhul 35-päevase intervalliga.

Igas aegreas on välja valitud üks juhtpilt, ülejäänud on alampiltideks. Juhtpildi valikul on kriteeriumiks maksimaalne summaarne korrelatsioon juhtpildi ja iga ülejäänud alampildi vahel. Kahe tehisavaradari-pildi vaheline korrelatsioon sõltub neljast parameetrist: piltide salvestamise ajaline vahe T , efektiivne orbiitide vahemaa $B_{\perp}$, Doppleri keskmete erinevus F_{DC} ja soojusmüra tase. Lihtne korrelatsiooni hindamise mudel on

$$\begin{aligned}\rho_{kogu} &= \rho_{ajaline} \cdot \rho_{ruumiline} \cdot \rho_{Doppleri} \cdot \rho_{soojuslik} \approx \\ &\approx f\left(\frac{T}{T^C}\right) f\left(\frac{B_{\perp}}{B_{\perp}^C}\right) f\left(\frac{F_{DC}}{F_{DC}^C}\right) \rho_{soojuslik},\end{aligned}\quad (12)$$

kus

$$f(x) = \begin{cases} 1 - x, & \text{kui } x \leq 1 \\ 0, & \text{kui } x > 1 \end{cases},$$

ρ tähistab korrelatsiooni, ülaindeks c tähistab parameetri kriitilist väärtust ehk väärtust, millest alates on interferogramm peaaegu täielikult dekorreleerunud. Kriitilised väärtused sõltuvad kasutatavate andmete päritolust, kuid tüüpilised väärtused ERSi tehisavaradari-piltide jaoks on $T^C = 5$ aastat, $B_{\perp}^C = 1100$ m ja $F_{DC}^C = 1380$ Hz. Juhtpildiks valitakse aegreast pilt, mille puhul on $\sum_{i=1}^N \rho_{kogu_i}$ on maksimaalne (N on alampiltide arv). Eeldame, et $\rho_{soojuslik}$ omab konstantset väärtust. [5]

Töös kasutati tehisavaradari-pilte ERS-1/2 suhteliselt orbiidilt number 322. Kõikide kasutada olnud piltide info ja nendest töös kasutatud alamhulk on ära toodud tabelis 2.

Tabel 2. Töös kasutada olnud ERS-1/2 tehisavaradari pildid suhteliselt orbiidilt 322. StaMPS töötluses kasutatud pildid on ära märgitud jämeda tekstiga. Juhtpildiks oli pilt kuupäevast 20.08.1997.

Kuupäev	Efekttiivne vahemaa juhtpildi suhtes	Doppleri keskme sagedus
2.08.1992	-393.3	437.0478
6.09.1992	-21.4	438.2915
11.10.1992	146.6	467.4629
24.01.1993	-559.7	442.5037
4.04.1993	485.9	448.3438
9.05.1993	-1064	458.9183
18.07.1993	-865.2	475.3361
26.09.1993	33.8	478.2586
5.12.1993	763.4	384.1732
28.03.1995	-1296.2	452.5551
2.05.1995	-859.8	444.3941
6.06.1995	-394.6	479.3841
7.06.1995	-505.7	199.3147
12.07.1995	-654.8	218.9452
15.08.1995	-43.1	502.5269
19.09.1995	-613	457.5649
20.09.1995	-511.1	185.8955
24.10.1995	257.7	403.6388
24.10.1995	257.7	404.2679
25.10.1995	351	141.2976
25.10.1995	351	140.7768
2.01.1996	-49.1	470.1206
3.01.1996	-183.1	1884.431
7.02.1996	70.1	160.6954

Kuupäev	Efekttiivne vahemaa juhtpildi suhtes	Doppleri keskme sagedus
12.03.1996	267.9	439.3011
13.03.1996	293.4	171.6447
22.01.1997	-246.3	226.3839
2.04.1997	89.7	255.5509
7.05.1997	-594.9	254.1685
16.07.1997	-387.9	271.7114
20.08.1997	0	194.3019
24.09.1997	-482.4	215.428
29.10.1997	-758.2	302.1643
3.12.1997	117	220.512
7.01.1998	-415.5	242.03
18.03.1998	-290	188.7934
14.10.1998	-76.7	212.3544
3.03.1999	-1347.2	2248.375
7.04.1999	-65.7	241.6344
12.05.1999	63.1	215.0835
16.06.1999	-552.9	237.1016
21.07.1999	296.5	282.1461
25.08.1999	-815.5	2251.166
29.09.1999	-96.5	186.134
3.11.1999	-237.7	166.9413
8.12.1999	-1111.6	2393.78
22.03.2000	498.2	-205.081
26.04.2000	538.8	-304.011
9.08.2000	-257.1	-470.657
13.09.2000	-682.4	-111.426
27.12.2000	-744.5	257.1752
16.05.2001	282.4	-4119.22
29.08.2001	647.5	-1307.11

3.1.2 Täpsed orbiidiparameetrid

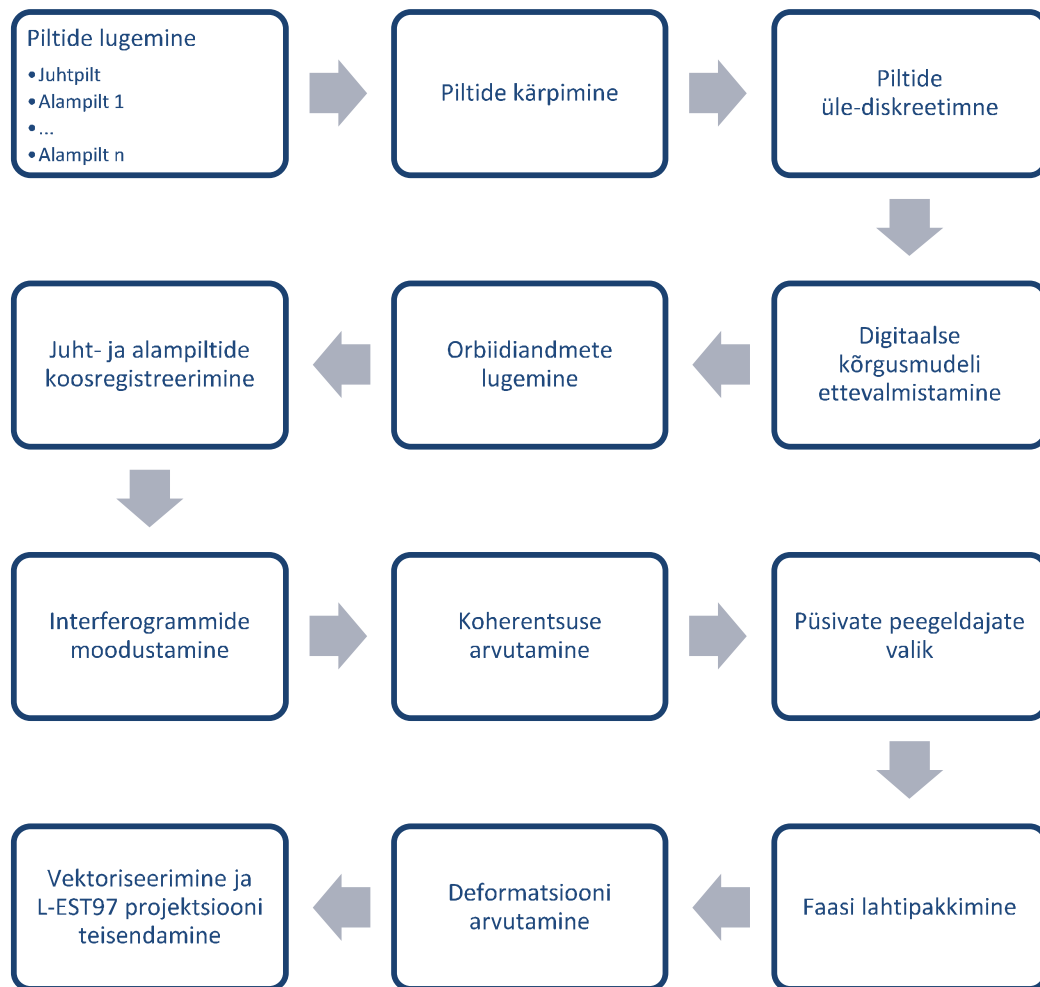
Kõik tehisavaradari andmefailid sisaldavad päises ka salvestamise ajale vastavaid orbiidivektoreid. Nende täpsus ei ole siiski väga suur – vead võivad ulatuda mitme meetrini. Seetõttu kasutatakse nende asemel Delfti Ülikooli täpsed orbiidiandmeid, mille täpsus on vertikaalsihis 4–5 cm ja horisontaalsihis 10–15 cm. Töös kasutatud orbiidiandmed põhinevad ERS-1/2 jaoks DGM-E04. [15, 16]

3.1.3 Digitaalne kõrgusmudel

Interferogrammi topograafilise komponendi kompenseerimine vajab digitaalse kõrgusmudeli olemasolu. Käesolevas töös kasutati selleks Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) kõrgusandmeid. Eesti aladel on selle mudeli horisontaalseks lahutuseks 3 kaaresekundit ehk umbes 90 meetrit. Nominaalne vertikaalne täpsus on 16 meetrit. Kõrgusandmete kogumine toimus 2000. aasta veebruaris. [17]

3.2 Andmetöötlus

Töötlusahela plokk-skeem alates lähteandmete sisselugemisest kuni vektorkaardi väljastamiseni on toodud joonisel 3. Interferomeetrilise tehisavaradari andmetöötluse skeem maapinna ja hoonete deformatsiooni arvutamiseks. Järgnev tekst kirjeldab igat plokk-skeemi töötlussammu detailsemalt.



Joonis 3. Interferomeetrilise tehisavaradari andmetöötluse skeem maapinna ja hoonete deformatsiooni arvutamiseks

3.2.1 Kasutatud tarkvara

Püsivate peegeldajate meetodika, mis on käesoleva töö teemaks, rakendamisel on keskseks tarkvaraks ja algoritmiks StaMPS meetod (*Stanford Method of Persistent Scatterers*). [18, 5] StaMPSi töötlemises kasutatavate interferogrammide moodustamiseks kasutatakse Delfti Ülikoolis välja töötatud Doris tarkvarapaketti. [19] Töös kasutati StaMPSi versiooni 3.3b1 ja Dorise versiooni 4.06b. Mõlemad tarkvarapakettid vajasisid korrektseks toimimiseks mitmeid veaparandusi ja ajakohastamisi lähtekoodis.

StaMPSile ja Dorisele on lisaks vaja veel vaja faasi lahtipakkimise tarkvara SNAPHU [20], Delaunay triangulatsiooni sooritamiseks programmi Triangle [21] ja tarkvarapaketti MATLAB

[22]. StaMPSi kasutamiseks on vaja MATLABi järgmisi lisamooduleid: Signal Processing Toolbox, Mapping Toolbox, Statistics Toolbox ja Optimization Toolbox.

3.2.2 Envisat ASAR ja ERS SAR SLC vormingus piltide töötamiseks ettevalmistamine

3.2.2.1 Piltide lugemine

Esimeseks sammuks on SLC-de StaMPSile esitamine.

3.2.2.2 Piltide kärpimine

Piltide kärpimine, s.o. huviala välja lõikamine, on soovitatav andmetöötluse kiirendamiseks. Isegi võimsa riistvara korral võib ERS SAR ja Envisat ASAR 100 km laiuste täiskaadrite töötlemine võtta kümneid päevi. Piltide kärpimise korral väheneb töötamise aeg peaaegu võrdeliselt välja lõigatud pildi osa pindalaga.

Kõik pildiseeriad on kärbitud samadesse mõõtmetesse 14803 x 3416 pikslit (vastavalt asimuudi ja ulatuse suunas) ning nende kõigi keskmeks on geograafilised koordinaadid on 59.268° N, 27.619° E. Ala füüsilisteks mõõtmeteks on asimuudi suunas 59 km ja ulatuse suunas 67 km. Kirjeldatud ala on ära märgitud joonisel 4. Pildiseeria kärbitud ala kalle põhja-lõuna sihi suhtes varieerub ning on sõltuv orbiidi numbrist. ERS-i ja Envisat-i trajektoor on Eestis põhjasuuna suhtes ligikaudu 16 kraadi kaldu, hommikustel, laskuvatel ülelendudel kirde-edela sihis ning õhtustel, tõusvatel ülelendudel kagu-loode sihis.