

Metsähovin satelliittijärjestelmä lähiavaruuden kohteiden luonnehdinnassa

Markku Poutanen

Jenni Virtanen, Olli Wilkman, Arttu Raja-Halli, Jyri Näränen

Paikkatietokeskus FGI

MATINE tutkimusseminaari 16.11.2017



NLS
FINNISH GEOSPATIAL
RESEARCH INSTITUTE
FGI



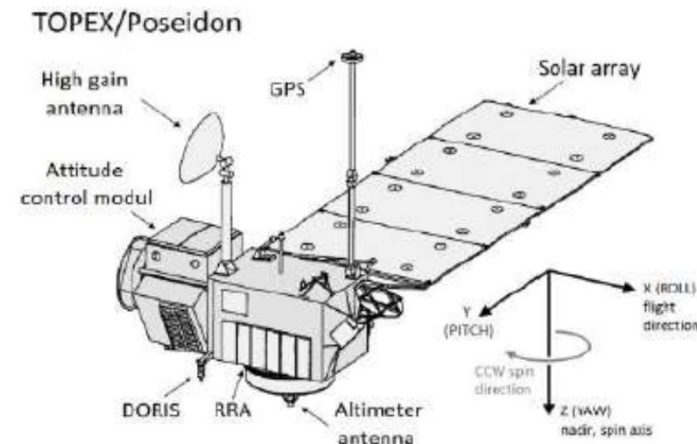
Tutkimuksen tausta ja tavoite

- Lähiavaruuden kohteiden luonnehdinta:
 - Rata, radan muutokset, koko, muoto, pyörimistila, hallinnassa/hallitsematon, ...
- Tarvitaan:
 - Rataennusteiden / näkyvyysennusteiden / putoamisennusteiden laskentaa varten
 - Toimivien satelliittien tueksi häiriötilanteissa (contingency support): esim. muuttuneen pyörimistilan havaitseminen
 - Avaruusromuongelman hallintaan: maahan palaavien satelliittien (re-entry) ennusteissa & romukappaleiden poistamisyrityksissä (active debris removal, ADR)
 - Myös tuntemattomien kohteiden tunnistuksessa: onko kohde aktiivisesti hallittu (pyöriminen vakio) vai hallitsematon (pyör.tila muuttuu); kohteen luonne



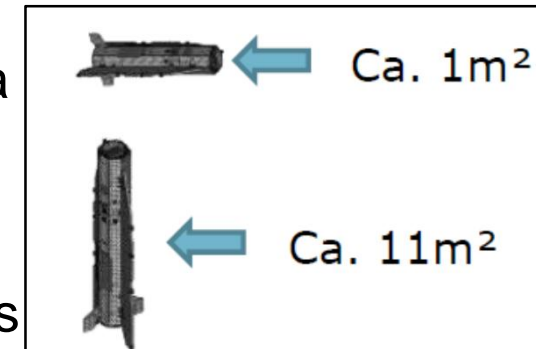
Tutkimuksen tausta ja tavoite II

- Tässä projektissa erityisesti:
 - Avaruuskappaleiden pyörimistilan määrittely
- Menetelmät:
 - Aktiiviset: Tutka, Satelliittilaser (SLR)
 - Passiiviset: Optiset havainnot
 - Tutkaa ja optisia havaintoja voidaan käyttää etsintään; SLR tarvitsee tarkan rataennusteen
- Kohteiden tyypit:
 - Prismaheijastimet = n. 150:ssä navigointi- ja tutkimussatelliitissa; merkitystä vain SLR-havainnoissa
 - Ei heijastimia tai ei kontrolloitu asento = avaruusromut, toimivat satelliitit ilman prismoja (esim. kaupallisia satelliitteja), muut *non co-operative* -kohteet

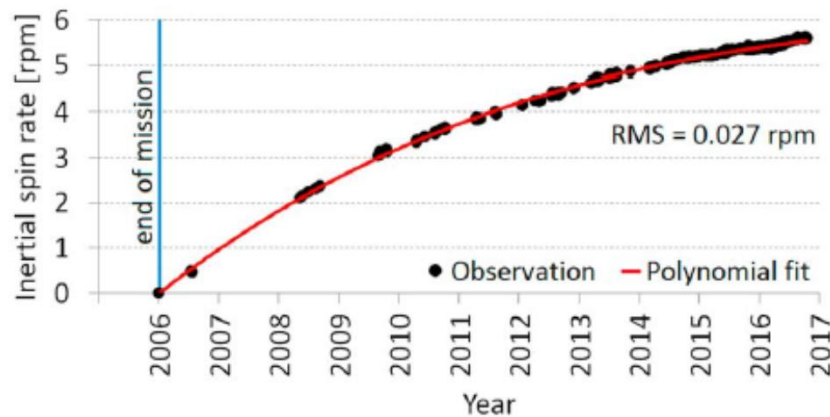


Pyörimistilan vaikutus

- Kohteen luonne: hallittu / hallitsematon
- Kohteen havaitseminen: suuri/pieni poikkipinta-ala
Esim. GOCE-satelliitin putoaminen 2013
- Ratamuutokset riippuvat myös poikkipinta-alasta: mitä suurempi pinta-ala, sitä suurempi ilmanvastus ja sitä nopeammin vajoaa radalla alemmaksi

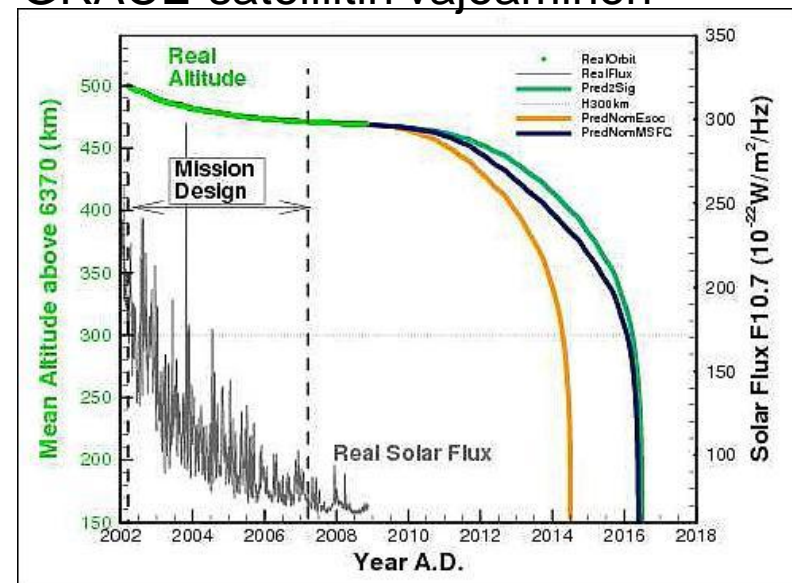


Topex pyörimisnopeuden muutos



The history of T/P inertial spin rate: SLR and photometric data combined

GRACE-satelliitin vajoaminen



Tutkimuksen tavoite

- Non-cooperative -kohteen pyörimistilan määrittäminen optisesta datasta (= SLR ja valokäyrät)
 - Nykytilanteen kartoitus: mitä menetelmiä / haasteita / kehitystarpeita?
 - Menetelmien testaus & vertailu tunnetuilla kohteilla
 - Prismalliset kohteet (1. vuosi, meneillään)
 - Prismattomat kohteet (2. vuosi, jatkohakemus)
- Kehitetään valmius pyörimistilan määrittämiseen Metsähovin SLR-aseman havainnoista ja aiheeseen liittyvä menetelmäkehitys
- Lähiavaruuden tilannekuvan rakentaminen Suomeen & osallistuminen kansainväliseen SST-toimintaan

SST = Space Surveillance and Tracking

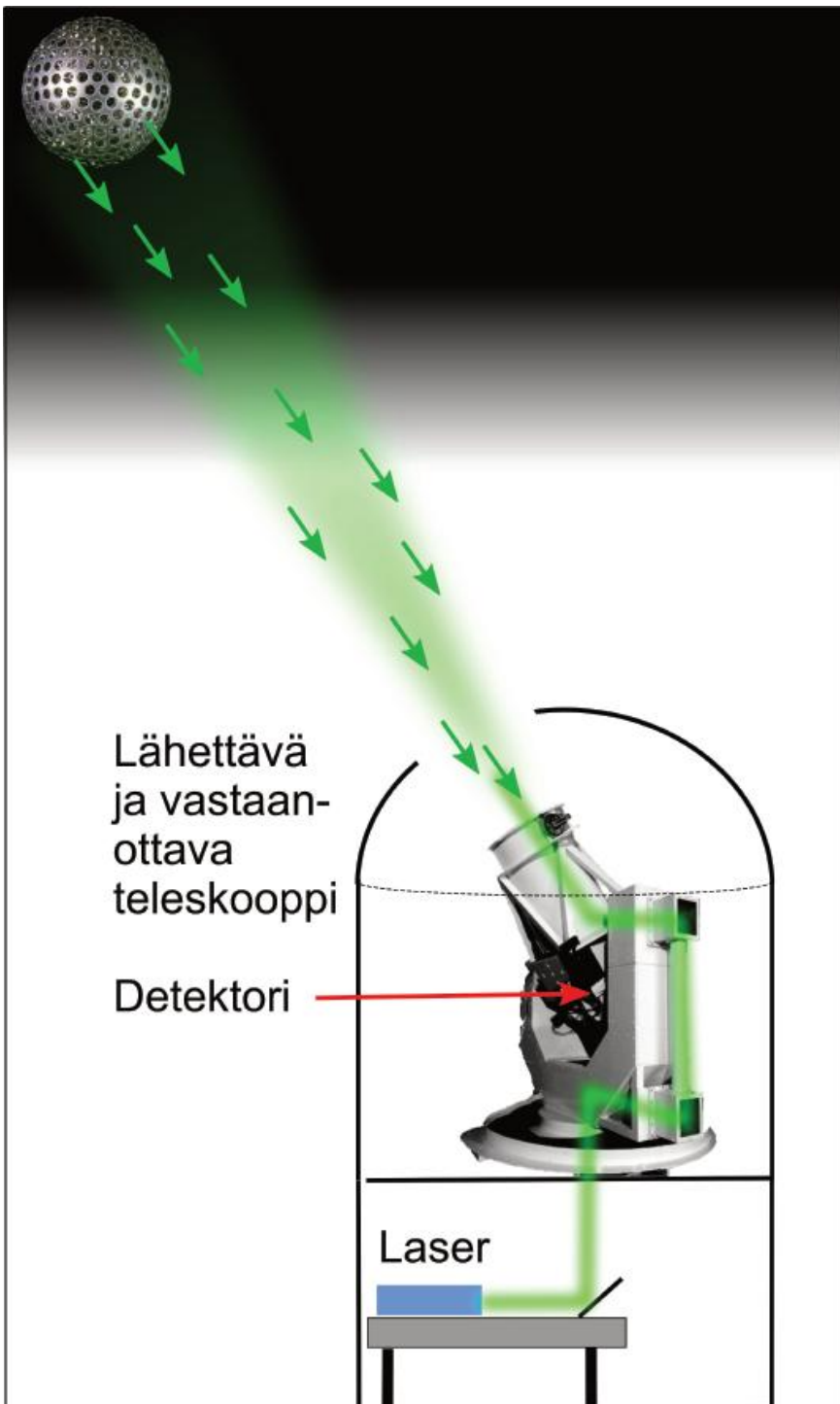


Hankkeen työvaiheet

2017: Prismaheijastimella varustetut kohteet

1. SLR-järjestelmän suorituskyvyn simulointi: havaittavien kohteiden määrä, eri laserien vaikutus (nykyinen, nykyinen infrapuna (IR), tehokkaampi debris-laser)
2. SLR-datan käsittely: datan hankinta & case studyt, prosessointivalmius
3. Pyörimistilan määrittäminen, SLR-data: menetelmäkehitys & testaus
4. Passiivisten havaintojen optimointi: havaintostrategioiden suunnittelu
5. Fotometrisen datan käsittely: datan hankinta, prosessointivalmius
6. Pyörimistilan määrittäminen, fotometria: menetelmäkehitys & testaus





SLR Satelliittilaser

Lähetää lyhyitä (muutama pikosekunti) laserpulsseja, jotka heijastuvat takaisin satelitissa olevasta prismasta

Pulssin kulkuajasta saadaan satelliitin etäisyys muutaman millimetrin/senttimetrin tarkkuudella

Ilmaisimen tulevan signaalin voimakkuus riippuu mm.

- lähetystehosta,
- kohteen etäisyydestä ja
- heijastuspinta-alasta

$$n_e = \eta_q \left(E_T \frac{\lambda}{hc} \right) \eta_t G_t \sigma \left(\frac{1}{4\pi R^2} \right)^2 A_r \eta_r T_a^2 T_c^2$$

SLR in Metsähovi



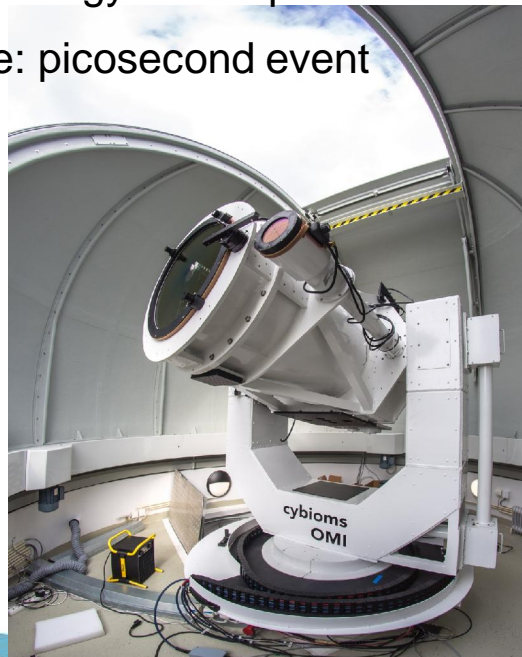
- Started 1978
- Second generation system 1990's
- Paused since 2005
- New observatory and 2 kHz laser 2015-17
- Expected operational 2018



Metsähovi SLR system

SLR (2018)

- Transmitting (0.1m) & receiving telescope (0.5m)
- Detector: Single Photon Avalanche Diode (SPAD) – detects single photons
- Pulse laser: repetition rate 2 kHz, freq:532nm, Energy:0.4mJ/pulse
- Timing device: picosecond event timer



Optical (passive)

- Receiving telescope (15 cm)
- Detector: high-QE CCD

State-of-the art optical system

- Accurate tracking ...
- Fast pointing ...
- Optics optimized both for green laser beam (532nm) and native NIR (1064nm)
- Possibility for upgrading: secondary laser, additional detectors (e.g. NIR detector)

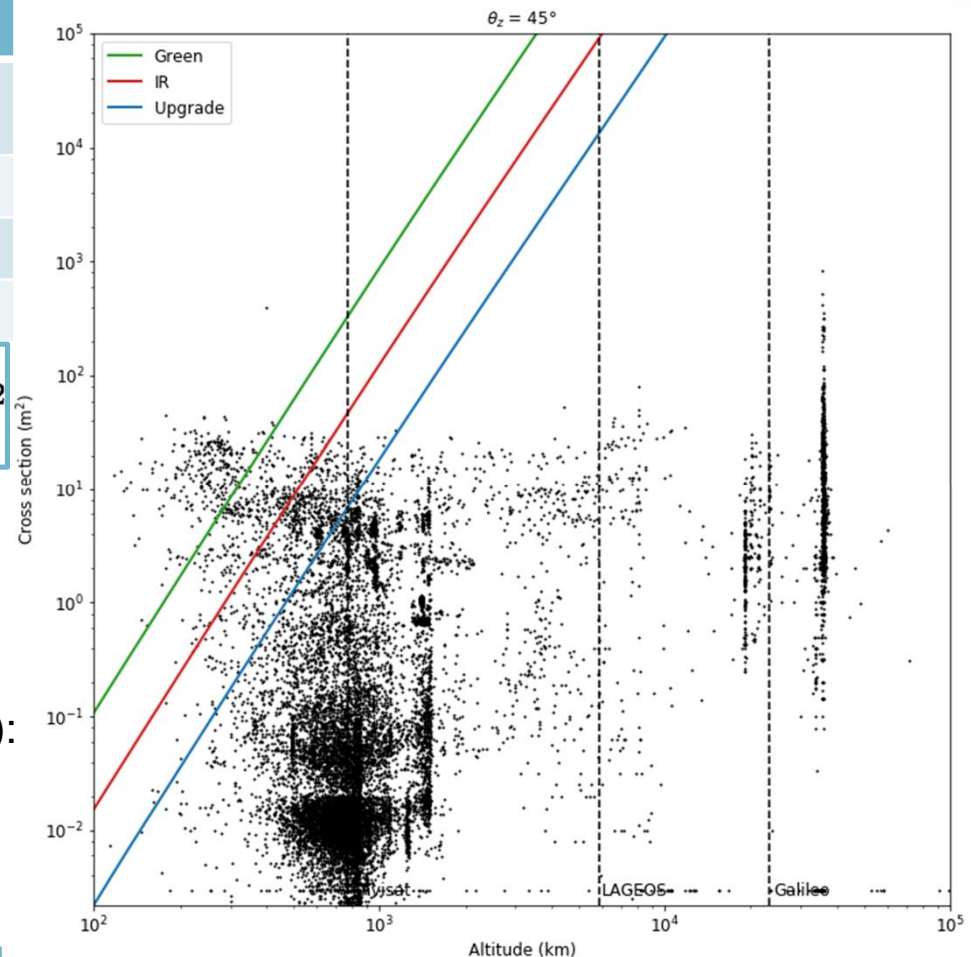
Metsähövin SLR:n suorituskyvyn simulointi

Pienin havaittava kohde annetulla korkeudella. Kuvaan piirretty 17000 tunnetun avaruuskohteen korkeus ja poikkipinta-ala. Vihreä, punainen ja sininen viiva kuvaavat eri laserien teoreettista havaintorajaa.

	Green	IR	Upgrade
Aallonpituus	532 nm	1064 nm	532 nm
Energia	0.4 mJ	0.8 mJ	80 mJ
Taajuus	2 kHz	2 kHz	200 Hz
Kohteita	270	563	1218

$$n_e = \eta_q \left(E_T \frac{\lambda}{hc} \right) \eta_t G_t \sigma \left(\frac{1}{4\pi R^2} \right)^2 A_r \eta_r T_a^2 T_c^2$$

- Current system @ 1064 nm (IR):
 - > up to 500 LEO objects
 - > ~10m² object @ 800km
- Powerful laser (0.4->80mJ, 2kHz->200Hz):
 - > up to 2000 LEO objects
 - > ~1m² object @ 800km



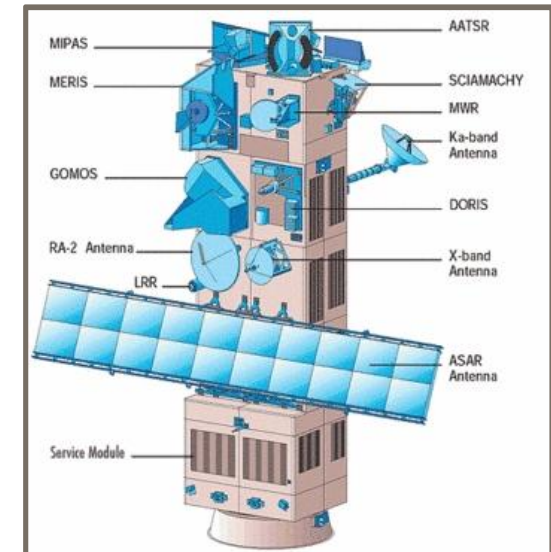
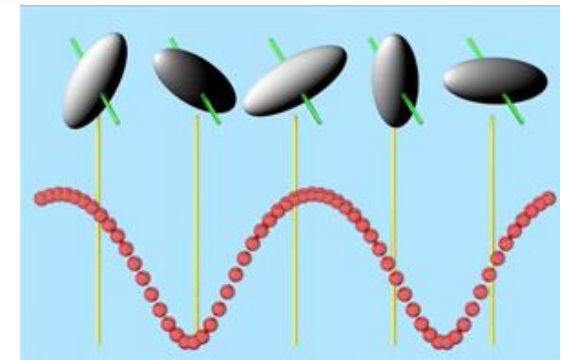
Optinen data

SLR:

- omia havaintoja 2018 aikana
- Testidataa yhteistyökumppaneilta: Graz
Datankäsittelymenetelmä valmis
- Havaintojen optimointi
 - Työkalu havaintostrategioiden suunnitteluun

Passiiviset:

- omia havaintoja 2018
- Testidataa yhteistyökumppaneilta ja avoimista lähteistä:
(mm Kazanin yliopisto <http://astroguard.ru/satellites>)
- Datankäsittelymenetelmä:
esim. StreakDet koodi (ESA projekti) - testattavana



Pyörimistilan määrittäminen

SLR-havaintojen käsittely

- Datan esikäsittely: kohinan poisto; rataliikkeen poisto yms.
- periodin määrittäminen, eri spektrianalyysimenetelmien testaus, esim.
 - Fourier
 - Phase dispersion minimization
 - Autocorrelation
 - Etc...
- Simuloinnit ja pyörimisakselin suunta havaitun pistepilven amplitudista ja periodista

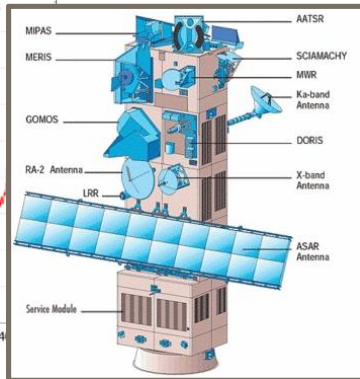
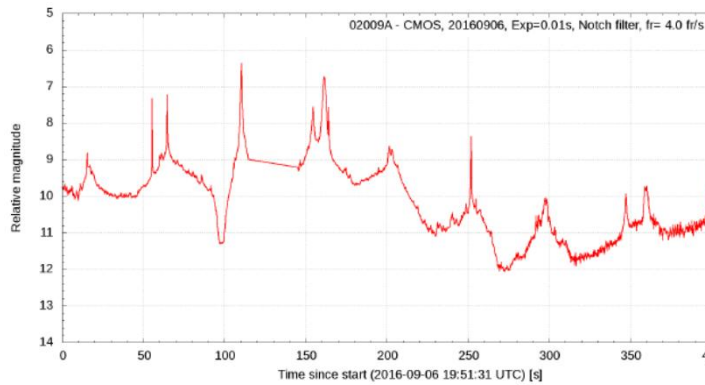
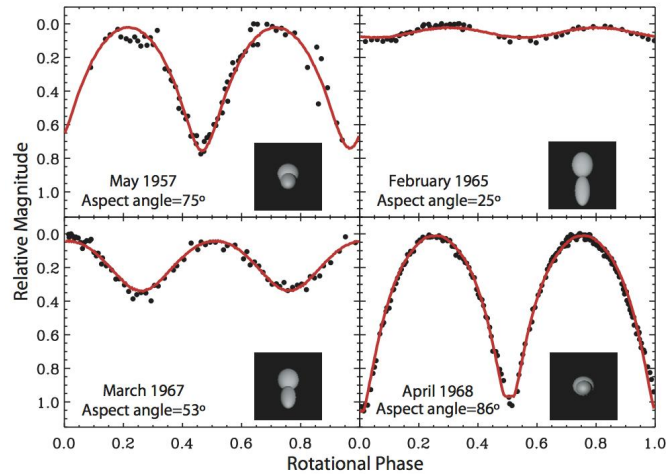
Fotometria (= passiivinen)

- Valokäyrän muodostus valokuvista
- periodin määrittäminen spektrianalyysimenetelmin
- Haaste: Valokäyrä riippuvainen mm. kohteen ja auringon välisestä kulmasta; aseman ja kohteen kulmasta; kohteen heijastuvuudesta yms.

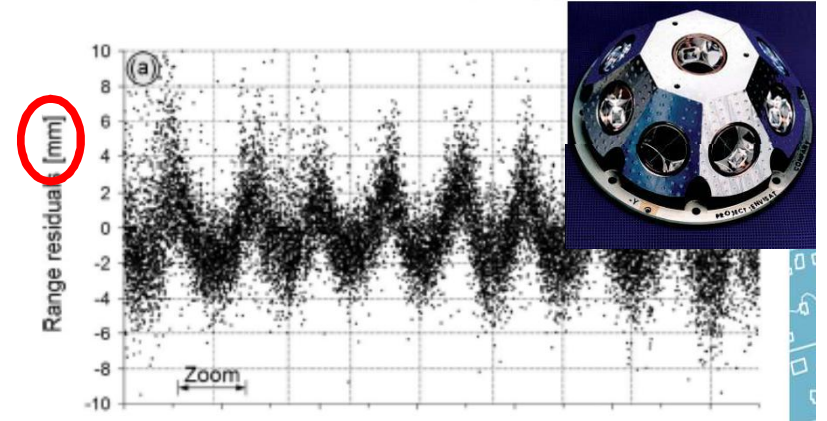
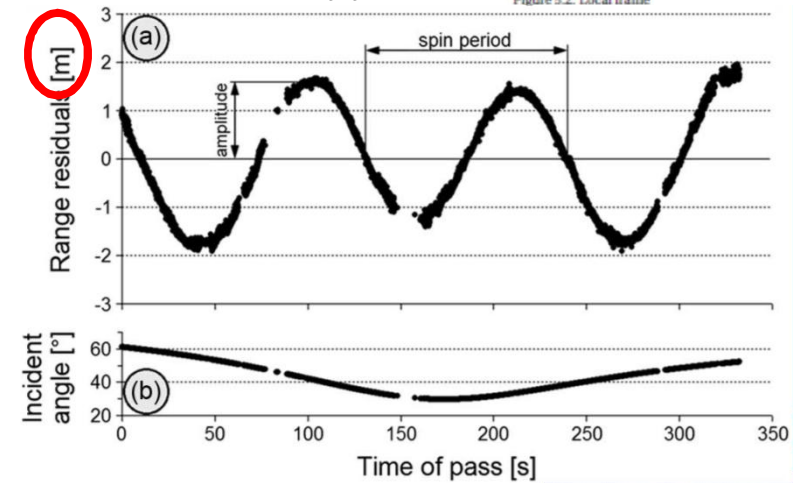
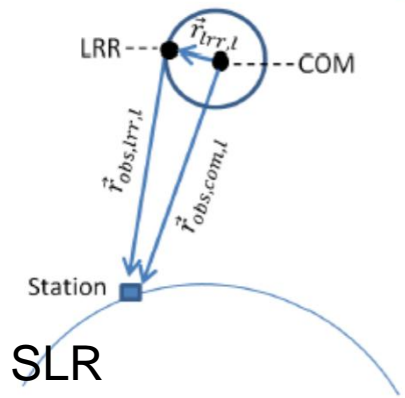


Pyörimistila optisista havainnoista

Passiivinen optinen
-> Kokonaiskirkkaus (fotometria)

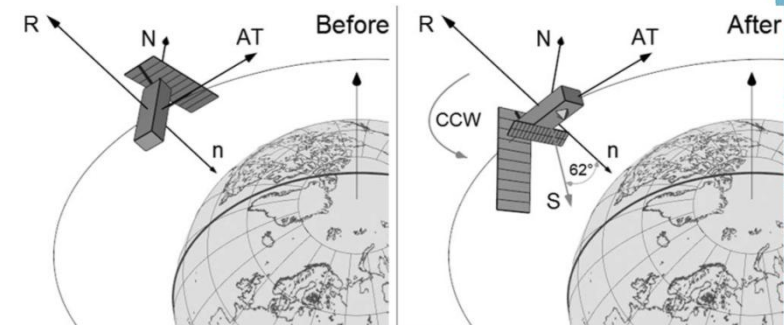
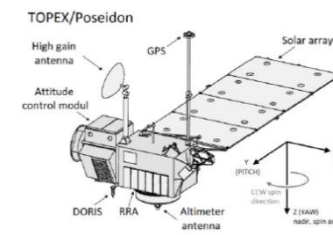
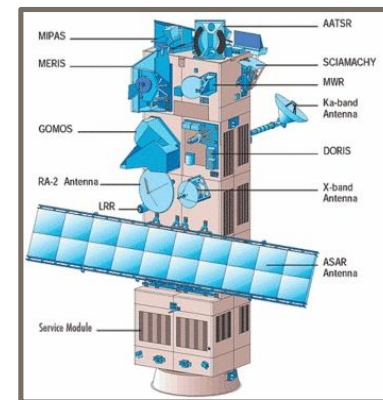
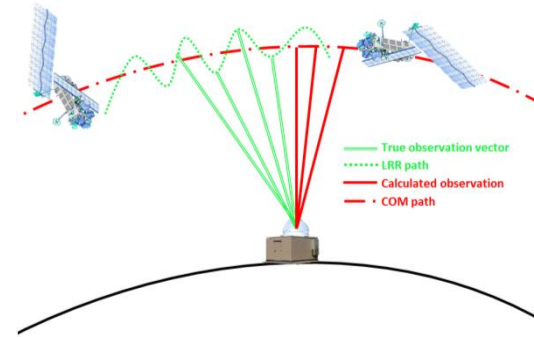


Aktiivinen SLR
-> Etäisyyden muutos



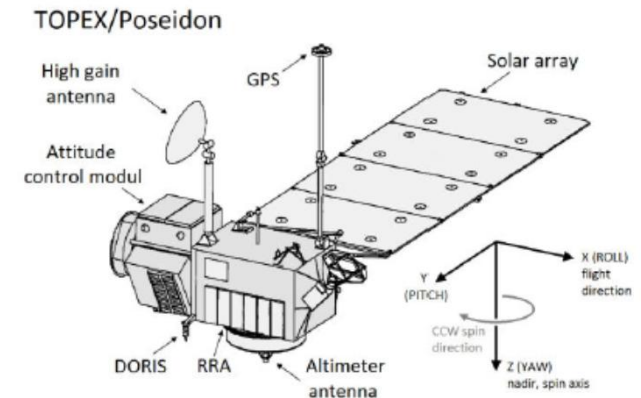
Pyörimistila optisista havainnoista: SLR etäisyydet

- Epäsäännöllisille kohteille olemassa vain muutamia pyörimistilan määrytyksiä.
- Haasteellinen erityisesti pitkille periodeille, joilla rataliike ja pyöriminen vaikea erottaa toisistaan
- Periodin määrytykseen vakiintuneita menetelmiä - spektrianalyysi
- Pyörimisakselin suunnan määrytyks ei yhtä yksikäsitteistä, tarvitaan *a priori* tietoa
 - Prismojen sijainnista satelliitin pinnalla (Envisat; Kucharski et al. 2014)
 - Realistisia satelliittimalleja mm. pinnan optiset ominaisuudet (Topex; Kucharski et al. 2017)
 - Tai oltava paljon dataa esim. eri asemilta & geometrioista



Pyörimistila & SLR - periodi

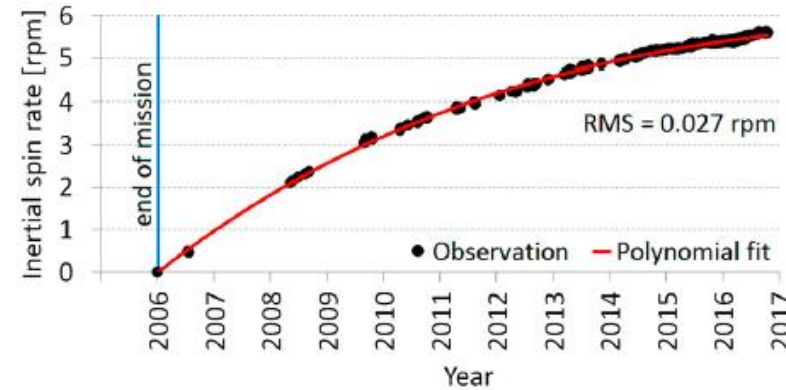
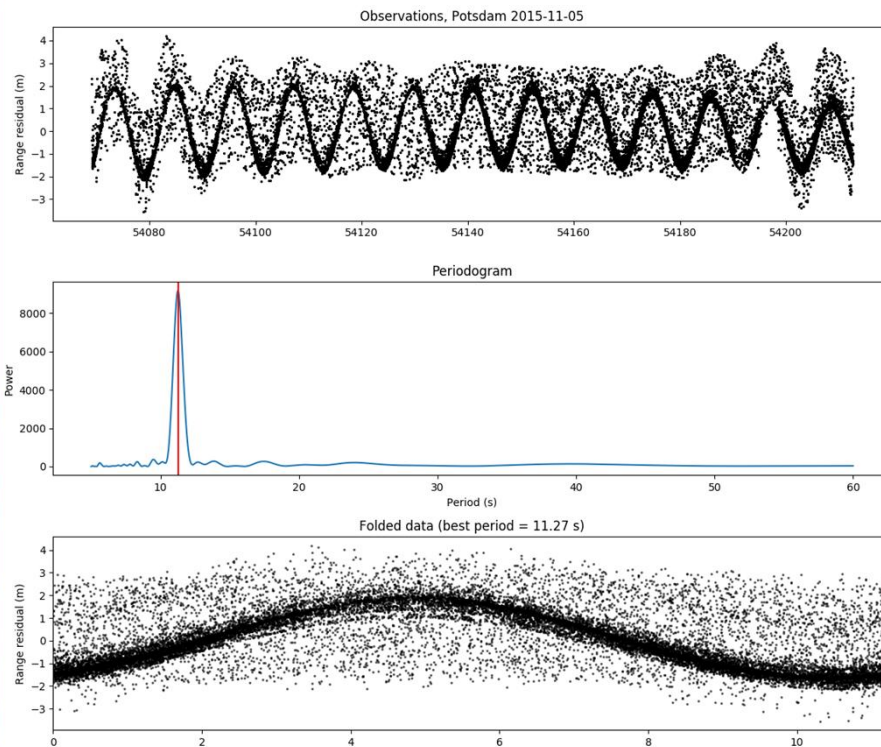
- Testattu vakiintuneita menetelmiä
 - Lomb-Scargle periodogram (e.g. Scargle 1982)
 - Fourier spectrum
 - Phase dispersion minimization (PDM; e.g. Schwarzenberg-Czerny 1997)
- SLR data yhdeltä asemalta & ylilennolta
 - $dT \sim \text{min}$ LEO-radoilla (vrt. periodit 10-100s)
 - nobs $\sim 1\text{k}-1\text{M}$, riippuu laserin toistotaajuudesta & näkyvyydestä
 - Mittaustarkkuus $\sim 1\text{mm}-1\text{cm}$, riippuu järjestelmästä & korkeudesta
- Case study: Topex/Poseidon – tunnettu periodi $\sim 10\text{s}$



Topex/Poseidon
Launched 1992
Decomissioned 2005
Perigee 1340 km
Inclination 66 deg

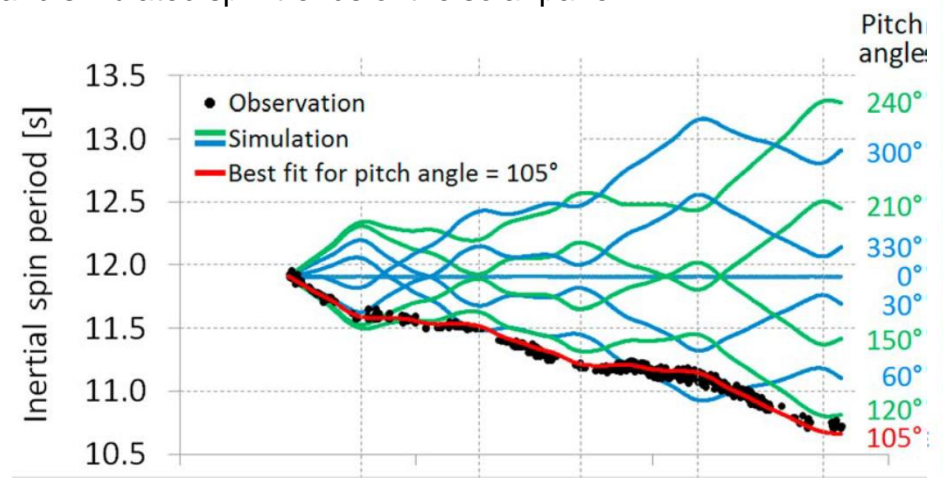
Pyörimsitilan muutokset

- Esimerkki Topex/Posidon
- Suuri kohde, tunnettu, ei enää toiminnassa / kontrollissa
- Pyöriminen kiihtyy



The history of T/P inertial spin rate: SLR and photometric data combined
Kucharski et al, 2017

Determination of the solar panel orientation. The observed and simulated spin trends of the solar panel.



Pyörimistila & -akselin suunta

P
Period

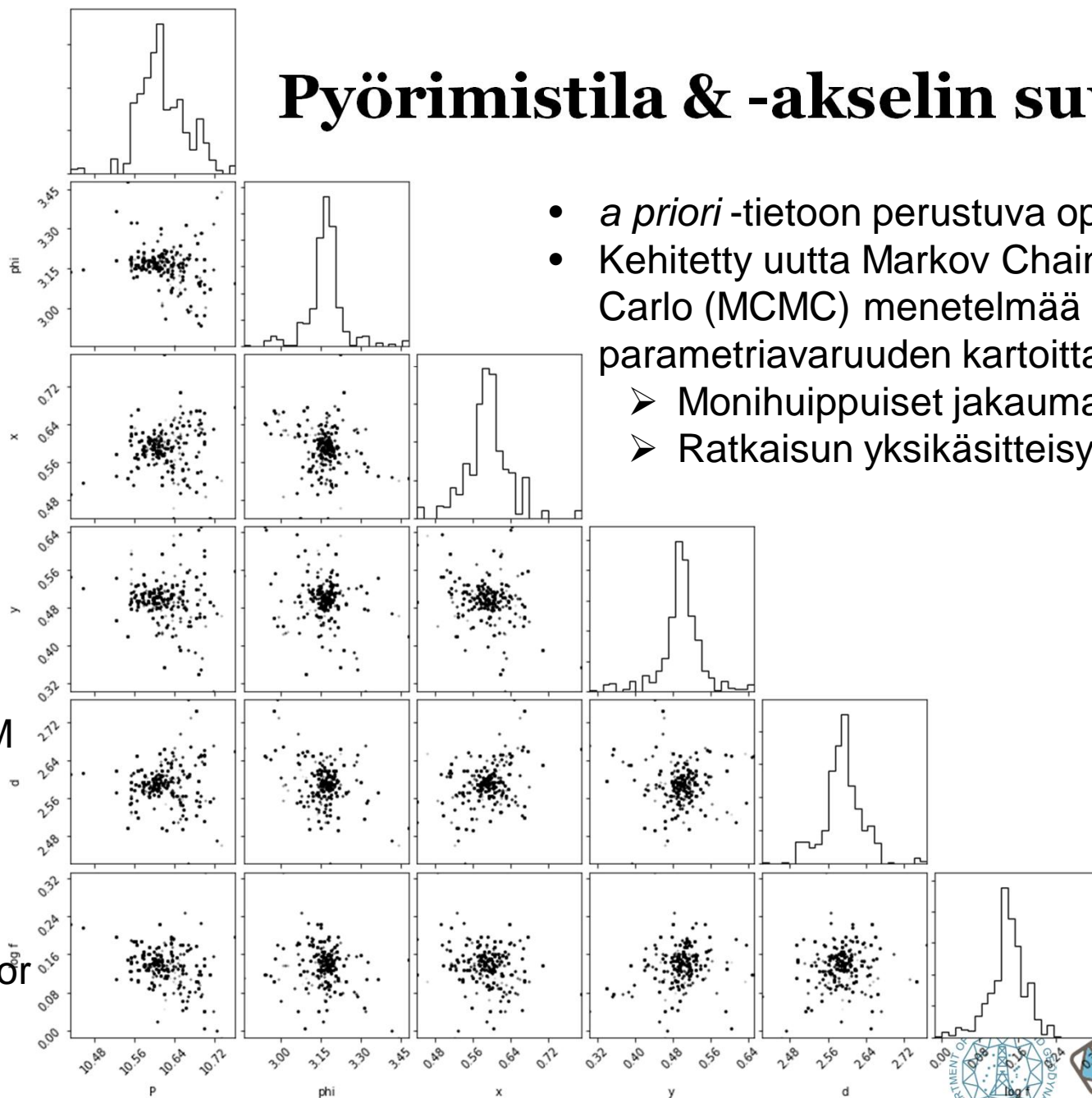
Phi
Phase

X Axis
parameter1

Y
parameter2

D
R_retro_CM

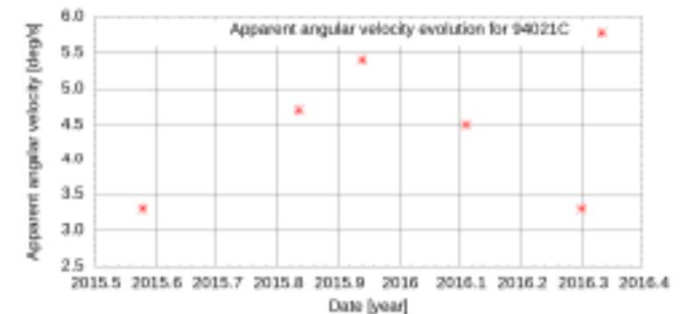
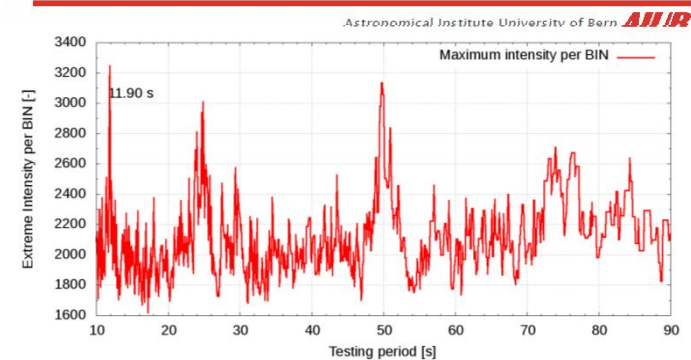
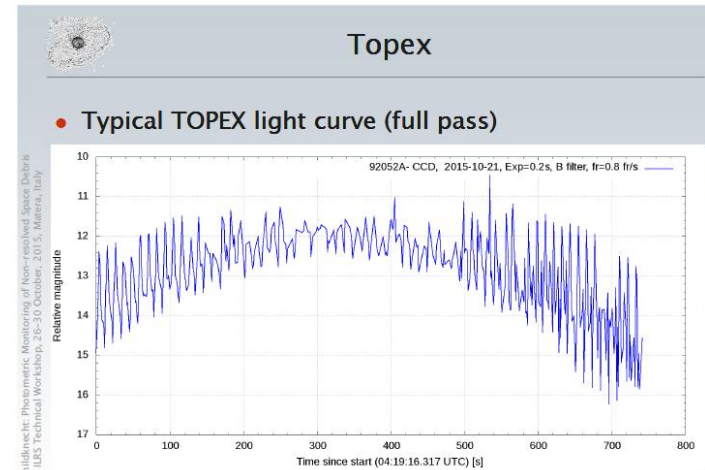
f
Noise
scaling factor



- *a priori* -tietoon perustuva optimointi
- Kehitetty uutta Markov Chain Monte Carlo (MCMC) menetelmää parametriavaruuden kartoittamiseen
 - Monihuippuiset jakaumat?
 - Ratkaisun yksikäsitteisyys???

Pyörimistila optisista havainnoista: Valokäyrät

- Fotometrinen valokäyrien tulkintaan sovellettu spektrianalyysiin perustuvia menetelmiä
 - Asteroidien pyörimistilan & muodonmääritys tähtitieteessä
- Satelliiteille haasteita epäkonveksista muodoista – epäsäännölliset/kompleksiset käyrä
- Testataan PDM-menetelmää jota käytetty mm. Topexille
- Suunnitteilla havaintokampanja Aalto-1 satelliitista: pyörimistilan muutos plasmajarrutestin aikana (vrt. Pittet et al. 2017 for Swisscube)



Johtopäätökset & jatko

- Metsähovin SLR-järjestelmä on ainoa kansallinen SST-sensori
 - Järjestelmän viimeistely – tavoitteena geodeettinen SLR v.2018 ja samalla mahdollisuus passiivisiin havaintoihin
 - **Simuloinnin tulokset:** prismallisten kohteiden (Galileon radalle saakka) lisäksi 1 m²-kokoisia prismattomia kohteita voidaan havaita 200-500 km korkeudelle
- Menetelmien kehitys pyörimistilan määrittämiseen
 - Kehitetty **menetelmä periodimäärittämiseen SLR datasta** (single pass & lyhyt periodi) sekä periodin muutos.
 - Esimerkki: Topexin pyöriminen; Topexin rakenne ja prismojen sijoittelu haaste
 - Asennon määrittämisessä *a priori* -tiedon käyttö. Datan saatavuus sekä datan pieni määrä ongelmia – **luotu uusi MCMC-menetelmä**
- **Seuraavaksi:** Pitkän periodin määrittäminen (Envisat), asennon määrittämisessä eri menetelmien vertailu & testaus, fotometriset valokäyrät ja valokäyrien käyttäminen lisäinformaationa SLR-datan kanssa

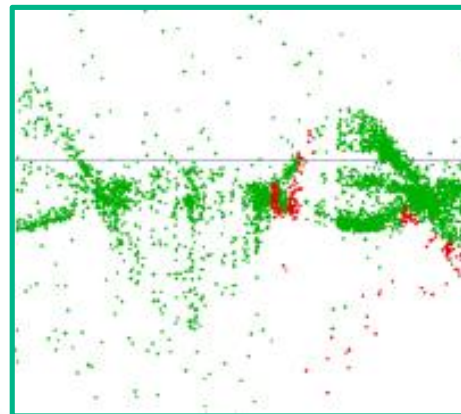
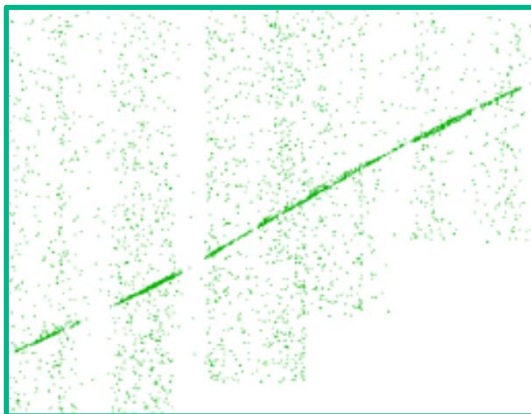


Projektin jatko - 2. vuosi

- Jatkohakemus jätetty 14.6
 - Prismattomien kohteiden havaitseminen / pyörimistila
 - Havaintojen yhdistäminen
 - Uutta: single-photon valokäyrät & Aalto-1 testikampanja
 - Tilannekuvan rakentaminen (jatkuu myös projektin jälkeen)

Työvaiheet:

1. Prismattoman kohteen SLR-havainnot: datan prosessoinnin haasteet (useita heijastuspisteitä eri kohdasta kappaletta)
2. Yhtäaikaiset SLR- ja fotometriset havainnot: havaintostrategiat
3. Pyörismistilan määrittäminen SLR ja/tai fotometrisistä havainnoista
4. Eri menetelmien & tekniikoiden vertailu: optimaalinen havaintostrategia ja määrittäminen?



Tilannekuvan rakentaminen

Sensorit

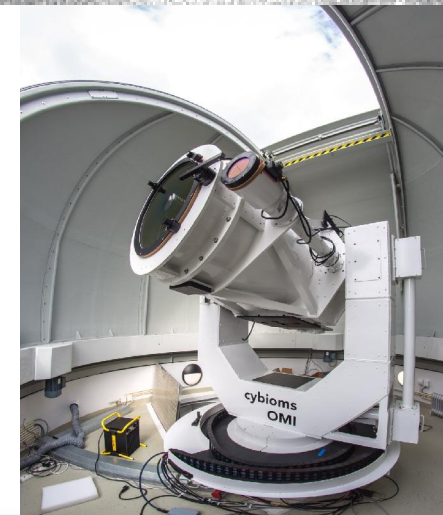
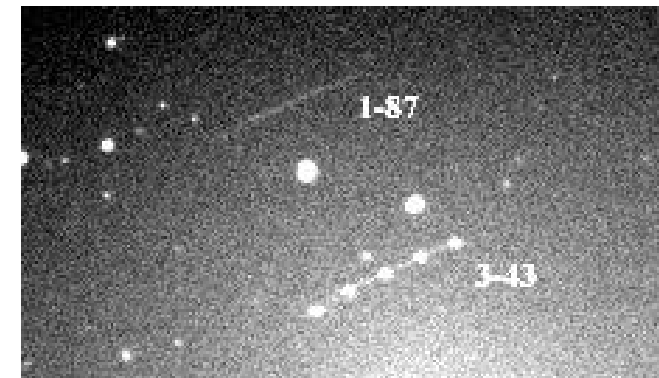
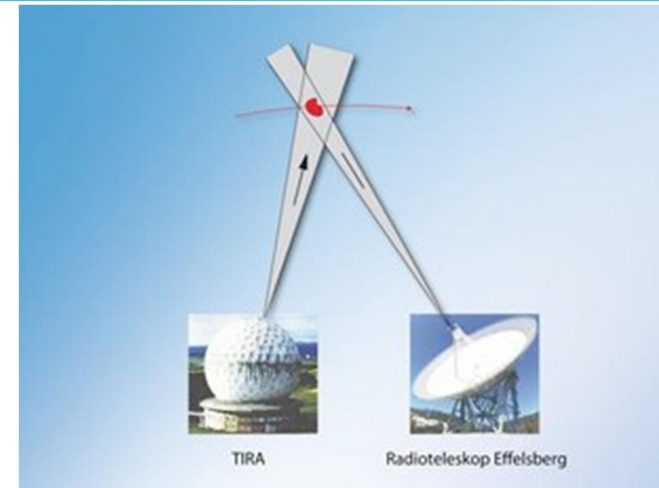
- tutka: LEO-radat, etsintä
- optinen, passivinen: GEO-radat, etsintä & seuranta
- optinen, aktiivinen: LEO-radat, seuranta

Prosessointi

- Datan käsittely
- Radanmääritys & ratakatalogien ylläpito
- Mallinnus, mm. ilmakehä

Rataennusteisiin perustuvat palvelut

- Ylilennot
- lisähavainnot luonnehdintaan esim. pyörimistila
- törmäykset
- maahan palaamiset (re-entry)



Tilannekuvan rakentaminen Suomessa

Sensorit

- tutka: LEO-radat, etsintä
- optinen, passivinen: GEO-radat, etsintä
- optinen, aktiivinen: LEO-radat, seuranta

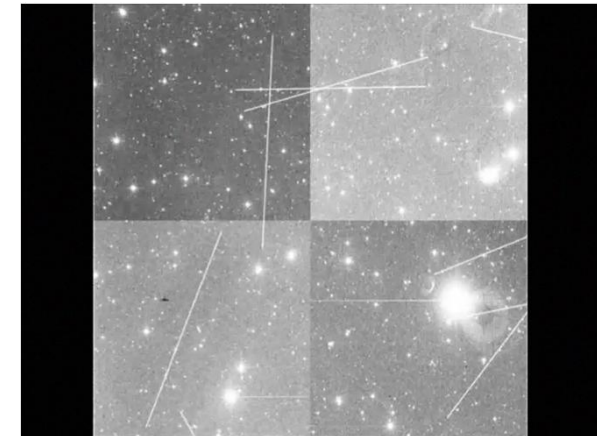
Prosessointi

- Datan käsittely
- Radanmääritys & ratakatalogien ylläpito
- Mallinnus, mm. ilmakehä

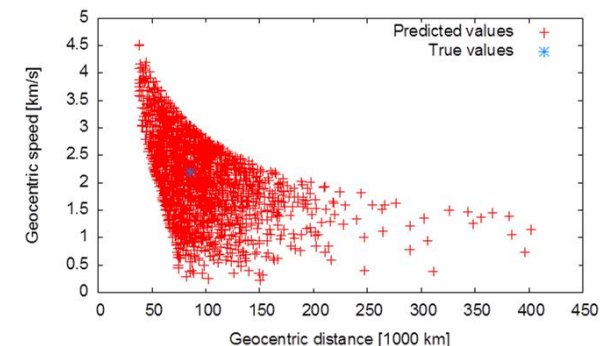
”SSA keskus”

Rataennusteisiin perustuvat palvelut - Yliennot

- lisähavainnot luonnehdintaan esim. pyörimistila
- törmäykset
- maahan palaamiset (re-entry)



Automated processing pipeline developed in ESA funded project “Streak Detection and Astrometric Reduction” (StreakDet)



ESA & Matine projects: statistical orbit computation from sparse data

=> Sisäministeriön tilannekortti putoavista kappaleista

