

Avaruuskappaleiden seuranta aktiivisin ja passiivisin optisin menetelmin

Projekti 2500M-0027, Sensorit ja toimintaympäristö

Markku Poutanen, Jenni Virtanen, Mikael Granvik,
Diego Meschini, Jyri Näränen, Arttu Raja-Halli

Paikkatietokeskus, FGI

Vuodelle 2015 myönnetty rahoitus: 61 875 €



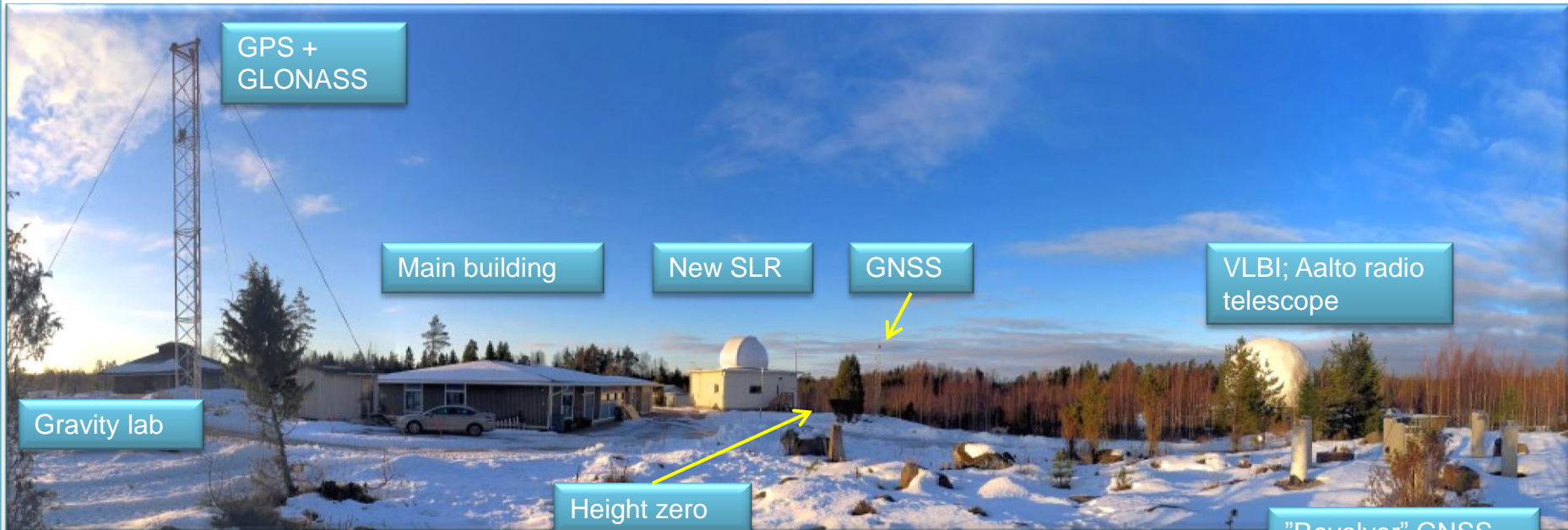
Sisältö

”Projektissa tutkitaan sekä aktiivisten että passiivisten optisten havaintojen käyttömahdollisuuksia Maan lähiavaruudessa liikkuvien kappaleiden seurannassa, sekä havaintojen yhdistämisestä syntyvää synergiaa.”

Sisältö:

- Metsähovin geodeettinen perusasema
- Satelliittilaser
- Radanmäärittäminen ja tunnistaminen (WP1)
- Satelliittilaserin käyttö avaruuskappaleiden havaitsemisessa (WP2)
- Lähiavaruuden tilannekuvan muodostaminen

Metsähövin geodeettinen perusasema



"Revolver" GNSS antenna test

- Havainnot Metsähovissa alkoivat v. 1978
- Yksi geodeettisen maailmanverkon perusasemista
- Havaintoja käytetään mm. paikannussatelliittien radanmääritykseen ja Maan asennon määritykseen avaruudessa.
- Ilman perusasemien verkkoa nykyisten navigointisatelliittien käyttö ei olisi mahdollista.



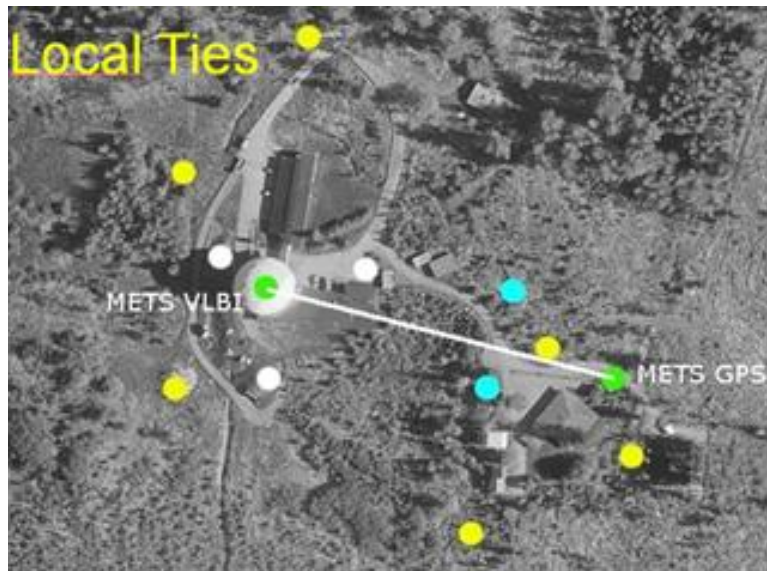
Metsähovin infrastruktuuri

- 1) Satellite laser ranging (SLR), since 1978, renewal 2015 (ILRS)
- 2) Geodetic VLBI since 2004 (IVS)
- 3) Geodetic GPS/GNSS receiver, since 1992, 2014 (IGS)
- 4) Geodetic GLONASS receiver (IGS)
- 5) Superconducting gravimeter (GGP, ICET) since 1994, 2014
- 6) Absolute gravimeter FG5X-221, (1988), 2004, 2013
- 7) A site for absolute gravimeter intercomparison
- 8) Doris beacon owned by CNES, France (IDS) 1992, 2013
- 9) Photogrammetric test field
- 10) GNSS receiver, in a real-time NASA tracking network (NASA)
- 11) Seismometer (Seismological Institute, University of Helsinki)
- 12) Fundamental gravity point of Finland
- 13) Fundamental point of the new Finnish height system N2000, 2006
- 14) Precise levelling test field
- 15) Pillar network for local ties, GNSS antenna and EDM tests
- 16) A soil moisture tracking network
- 17) Vaisala weather station (2015)
- 18) A 60-m deep borehole, previously used for a borehole tiltmeter
- 19) TerraSAR-X retroreflector (DLR, TuM) 2013
- 20) GPS antenna calibration test field, 2014



Metsähovin uudistus 2013-2019

- GNSS 2013
- DORIS (CNES ja IGN) 2013
- Painovoimalaitteet (suprajohtava gravimetri, absoluuttigravimetri) 2013-2014
- Satelliittilaser (SLR) 2014-2016
- VLBI radioteleskooppi 2016-2019



SLR



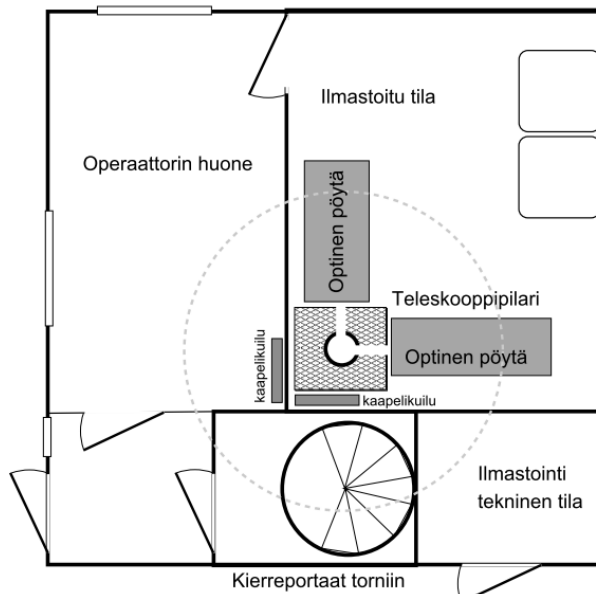
- Ensimmäinen laitteisto (60 cm teleskooppi) rakennettiin 1975-1978. Toinen (100 cm teleskooppi) valmistui 1992. Itse valmistetut laserit.
- Uusi 0.5 metrin teleskooppi ja laserlaitteisto valmistuu 2016; nopea (2 kHz) kaupallinen laser, nopea teleskooppi, joka pystyy seuraamaan kaikkia kohteita.

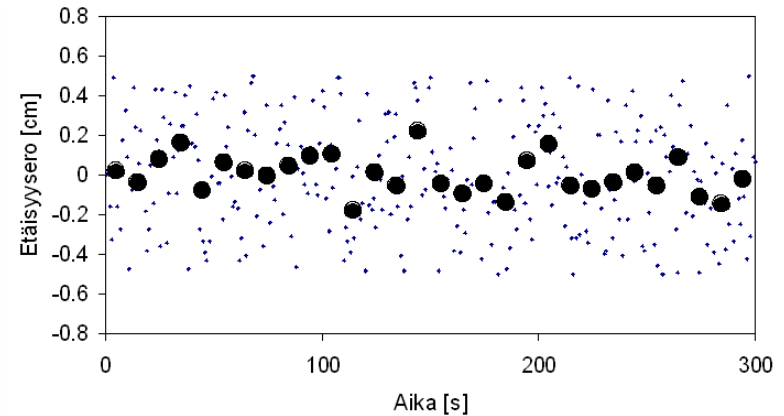
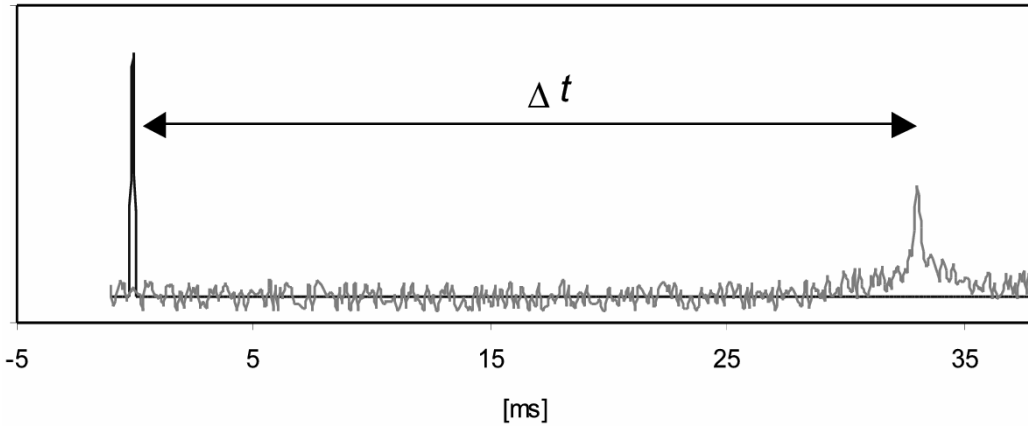
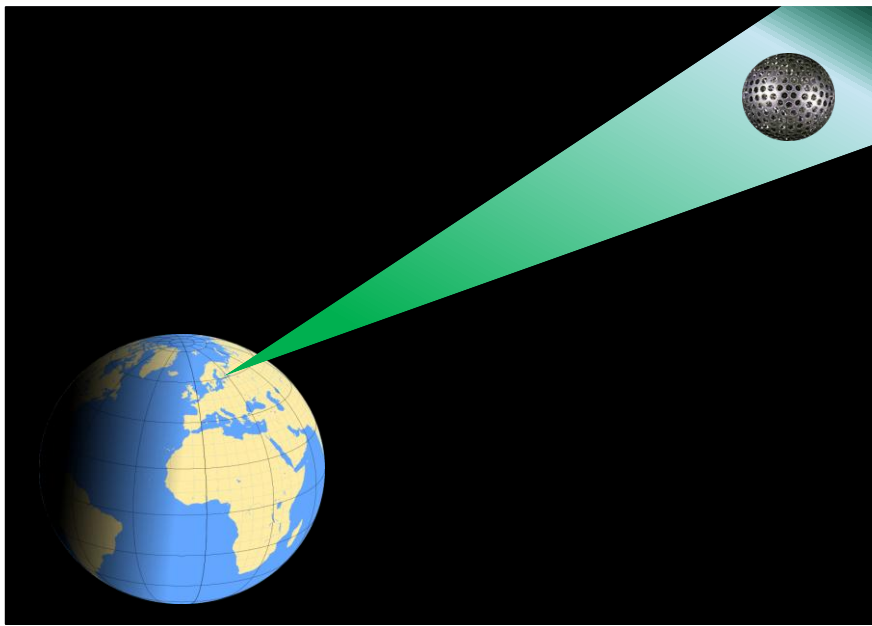
Metsähovi SLR

Alakerta: laser ja sen elektroniikka, aikavälilaskurit ym ilmastoidussa laboratoriossa. Kaksi optista penkkiä joilla varauduttu siihen että tulevaisuudessa mahdollista sijoittaa toinenkin laser.

Kupoli: Teleskooppi, pääpeili: 0.5m, lähettävä teleskooppi 0.1m

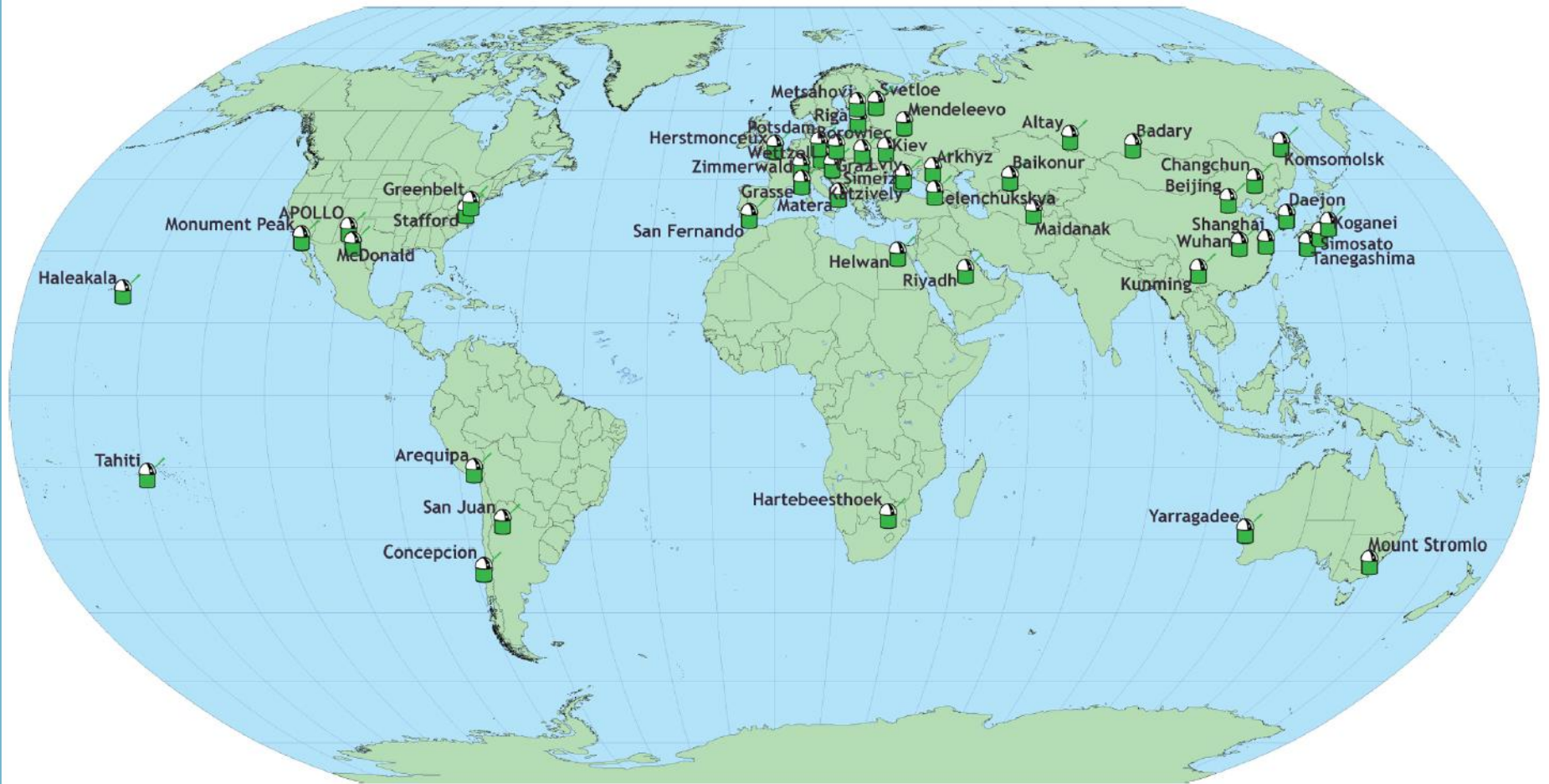
Nopeus: az, max: 10 °/s, acc: 5 °/s²
el, max: 5 °/s, acc: 3 °/s²





Short pulses, a few ps, frequency 1-2 kHz ; Flight time Δt ; satellite distance $d = \Delta t / 2 * c + \sigma$

Metsähovi: wavelength 532nm; power: 0.85W @ 532nm @2kHz repetition;
energy: 0.4mJ @ 532nm @2kHz; pulse length: 12 ps



Kansainvälisen laserpalvelun (International Laser Ranging Service, ILRS) havaintoasemat. (Kaikki asemat eivät ole tällä hetkellä aktiivisia)

Sample of SLR Satellite Constellation (Geodetic Satellites)



Etalon-I & -II



LAGEOS-1



LAGEOS-2



Ajisai



Starlette



Stella



GFZ-1



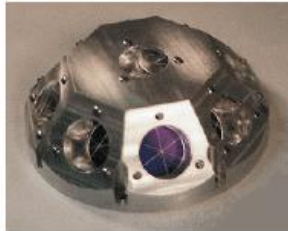
Inclination	64.8°	109.8°	52.6°	50°	50°	98.6°	51.6°
Perigee ht. (km)	19,120	5,860	5,620	1,490	810	800	396
Diameter (cm)	129.4	60	60	215	24	24	20
Mass (kg)	1415	407	405.4	685	47.3	47.3	20.6

12

September 14 – 19, 2009
Metsovo, Greece

International Technical Laser Workshop on
SLR Tracking of GNSS Constellations

Sample of SLR Satellite Constellation



	GFO-1	ERS-1	Terra-SAR-X	ERS-2	CHAMP
Inclination	108°	98.5°	97.4°	98.5°	87.27°
Perigee ht. (km)	800	780	514	785	474
Mass (kg)	300	2,400	1,230	2,516	400
	Meteor-3M	Jason-1	GRACE	Envisat	ANDE-RR
Inclination	99.64°	66°	89°	98.5°	51.6°
Perigee ht. (km)	1,012	1,336	450	796	250
Mass (kg)	2.477	500	432/sat.	8,211	50

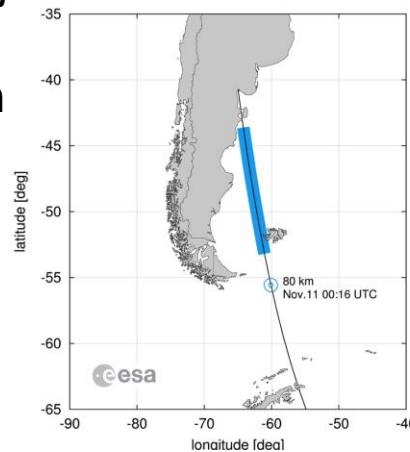
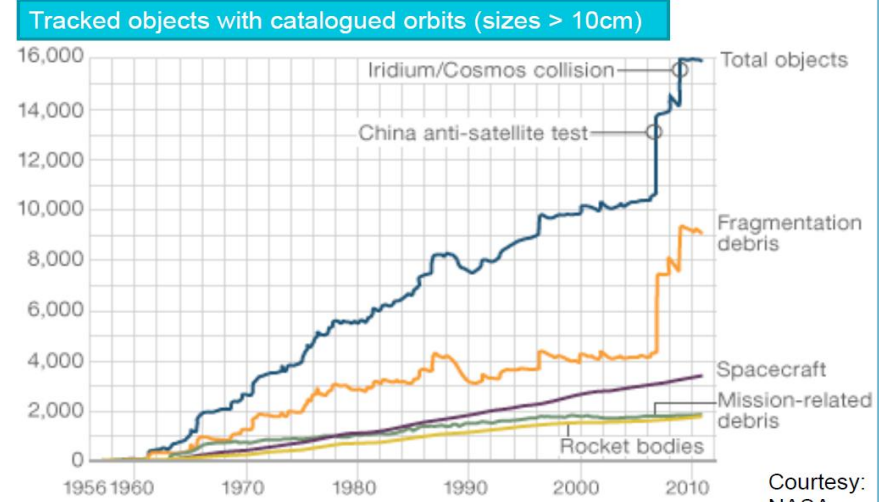
September 14 – 19, 2009
Metsovo, Greece

International Technical Laser Workshop on
SLR Tracking of GNSS Constellations

13

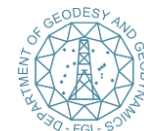
Avaruuskohdeet ja turvallisuus

- FGI/GEOGEO on se taho Suomessa, joka seuraa avaruuskappaleiden putoamista ja informoi tarvittaessa mm. viranomaisia
- Globaalisti osa Space Situational Awareness (SSA) seurantaa
- FGI/GEOGEO yhdessä Helsingin yliopiston kanssa osallistuu mm. ESAn ja YK:n työryhmiin, kehittää ohjelmistoja ja menetelmiä avaruuskappaleiden seurantaan ja identifiointiin, sekä kehittää mm. satelliittilaseria avaruuskohdeiden havaitsemiseksi.



Avaruuskappaleiden seuranta aktiivisin ja passiivisin optisin menetelmin

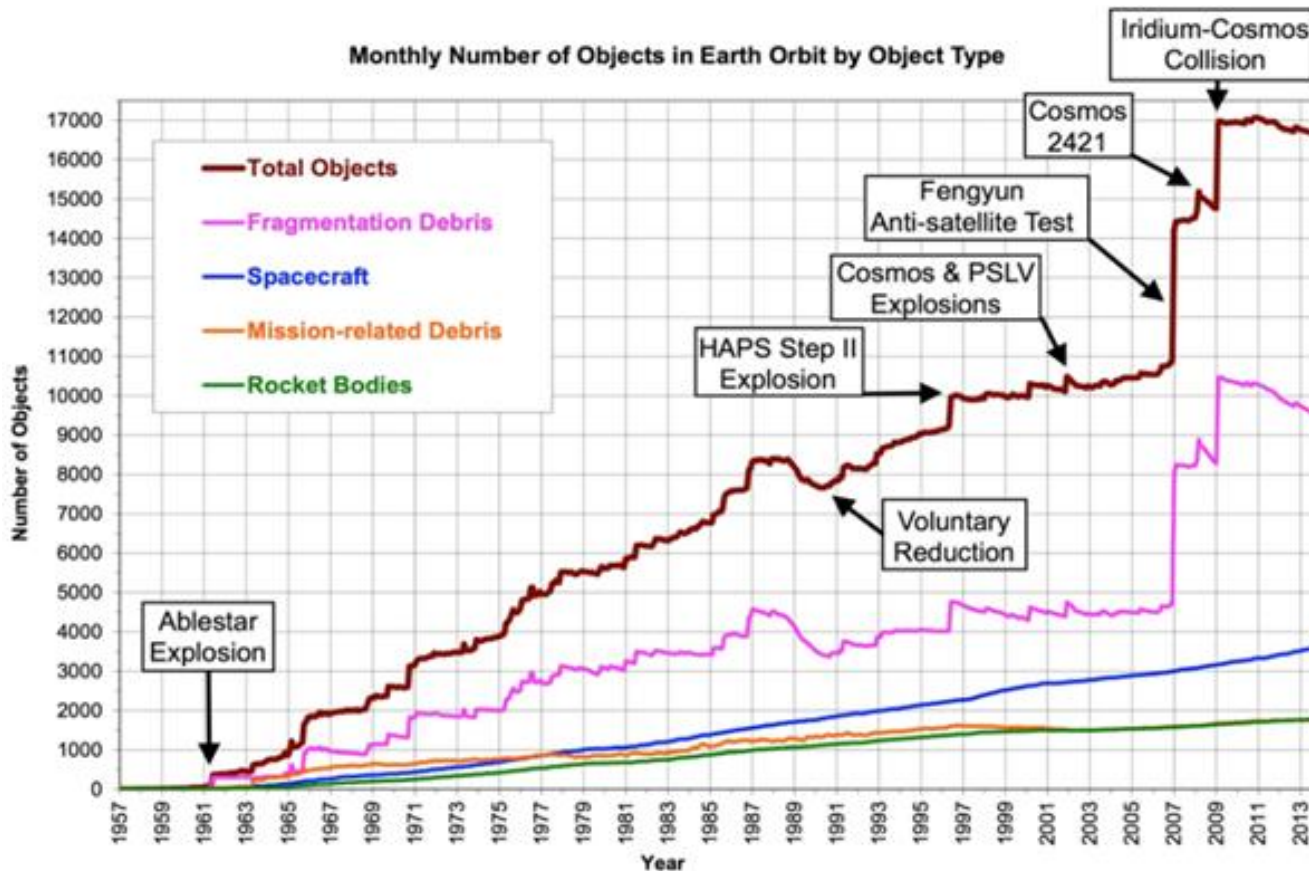
- Projektissa tutkitaan sekä **aktiivisten** että **passiivisten** optisten havaintojen käyttömahdollisuuksia **Maan lähiavaruudessa liikkuvien kappaleiden seurannassa**, sekä havaintojen yhdistämisestä syntyvää synergiaa.
- Hanke on pilottiprojekti, jonka avulla selvitetään mahdollisuus luoda Paikkatietokeskukselle operatiivinen luonnollisten ja keinotekkoisten avaruuskappaleiden **seuranta- ja varoitusjärjestelmä**.



Avaruusrummujen määrä lisääntyy

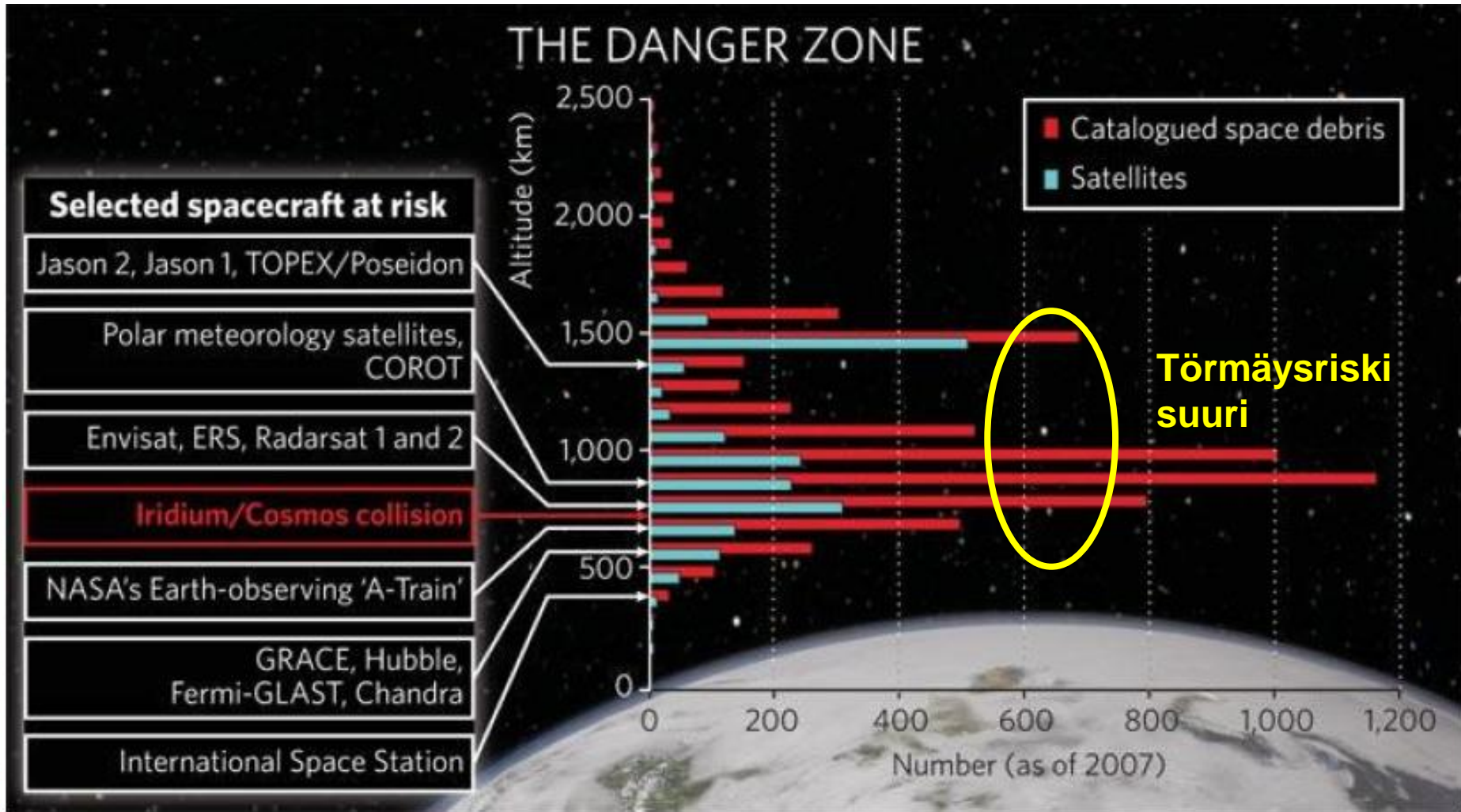
Kuolleet satelliitit, kantorakettien osia ja muuta jätettä, törmäyksissä ja räjähdyksissä pilkkoutuneita kappaleita, ... arvio: > 700 000 kappaletta > 1 cm

Määrä lisääntyy koko ajan; seurattavia kohteita (>10 cm) 10 000 (2008); 18 000 (2015)



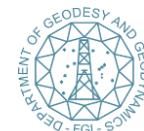
Matalat radat ruuhkaisia

Riski toimiville satelliiteille ja uusille satelliittilaukaisuille kasvaa koko ajan. Paluu ilmakehään kestää kymmenistä satoihin vuosiin 500->1500 km korkeudelta.



Non-cooperative kohteiden seuranta

- **Passiivisia optisia havaintoja** tehdään perinteisillä tähtitieteellisillä teleskoopeilla. Digitaalinen kuvankäsittely-tekniikka mahdollistaa havaintojen automatisoinnin ja jopa tulosten lähes tosiaikaisen tulkinnan.
- **Aktiivisia havaintoja** tehdään satelliittilaser-tekniikalla (SLR) ja myös tutkalla. FGI on vuodesta 1978 lähtien tehnyt SLR-havaintoja Metsähovin avaruusgeodeettisen tutkimusaseman satelliittilaserilla.
- Tutkat tehokkaita matalien ratojen (LEO) monitorointiin, optiset tekniikat soveltuvat myös korkeille radoille
 - Passiiviset teleskoopit etsintään: laaja kuvakenttä ja suuri herkkyys
 - SLR seurantaan: erittäin tarkkoja etäisyyshavaintoja

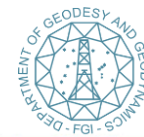


Non-cooperative kohteiden seuranta – haasteita

- Kohteet liikkuvat nopeasti, matalilla radoilla ylitysajat lyhyitä
- Pieniä ja himmeitä, vaativat suorituskykyisiä havaintolaitteita (suuri teleskooppi, tehokas laser)
- => Havaintoja käytettävissä usein vähän, voivat olla hajanaisia, eri tekniikoilla tehtyjä
- => Radanmääritys vähäisistä havainnoista, ratojen ja ennusteiden epävarmuudet suuria ja radat muuttuvat nopeasti

Ratkaisuja

- Radanmääritysmenetelmien kehittäminen: tilastollinen inversio => WP1
- Havaintotekniikoiden kehittäminen: SLR:n mahdollisuudet => WP2



WP1: Radanmääritysmenetelmien kehittäminen

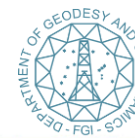
Tilastollinen ratainvertio eri havaintotyyppinä käyttäen

- Inversio-ongelman ratkaisu Bayeslaisittain (e.g. Muinonen & Bowell 1993)
 - 1) Passiivisia teleskooppihavaintoja, ts. kohteen kulmakoordinaatit taivaanpallolla,
 - 2) Aktiivisia havaintoja eli etäisyysmittauksia

Tavoitteita

- Numeeristen menetelmien kehittäminen geosentrisille radoille
- Eri havaintotyyppien yhdistäminen radan parannuksessa
- Toimivimman menetelmän löytäminen, erit. LEO-kohteille ja re-entry-tilanteisiin

=> Kansalliset valmiudet ratojen seurantaan



Non-cooperative kohteet & vähäinen data

Tilastollinen inversio

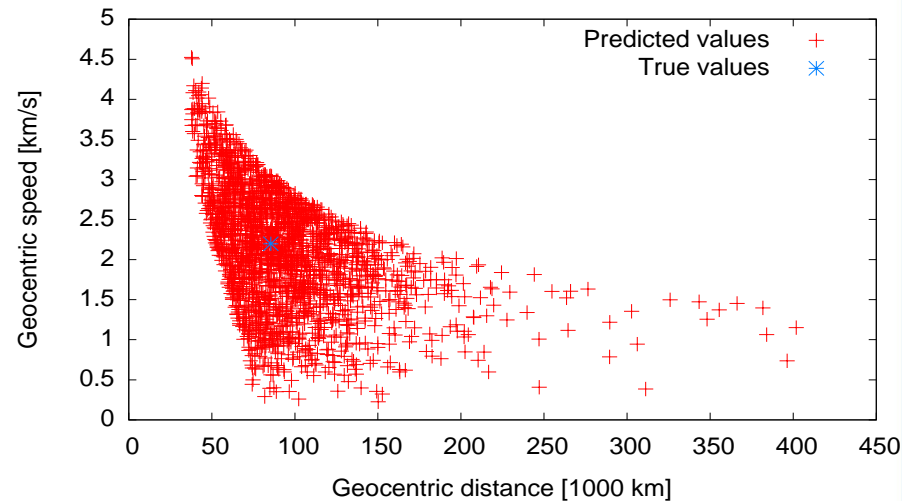
- Ratkaisu esitetään parametrien todennäköisyysfunktiona (p.d.f)
- Kuvaa rataparametrien epävarmuuksia
- Mahdollistaa erilaiset todennäköisyysarviot (radan tyyppi LEO/GEO/..., törmäys)
- Käytännössä p.d.f. usein monimutkainen vähäiselle datalle -> ratkaistaan Monte Carlo -simuloinneilla
- mm. Markovin ketjuihin perustuvia Monte Carlo (MCMC) menetelmiä

OpenOrb

- Avoin radanmääritysohjelmisto (Granvik et al. 2009), <https://github.com/orb/orb>
- Kehitetään erityisesti Helsingin yliopistossa ja FGI:ssä
- Numeerisia menetelmiä luonnollisten kohteiden (asteroidit) kulmahavainnoille
- Erityisesti vähäisille havainnoille kehitetty nk. luotausmenetelmä (statistical ranging, Virtanen et al. 2001)
- Menetelmä käytössä mm. ESA:n Gaia-satelliitin data-analyysissä

Non-cooperative kohteiden tunnistaminen - luotausmenetelmä

- Kuuden rataparametrin ratkaisemiseksi tarvitaan väh. kuusi havaintoparametria
- Luotausmenetelmä käyttää kahta havaintoa, mitatut kulmakoordinaattiparit (R.A., Dec.), sekä oletettuja etäisyyksiä havaitsijaan (“range”)
- Three variants
 - **MCMC ranging**: Markov chains formed using Metropolis-Hastings algorithm (Oszkiewicz et al. 2009)
 - **Random-walk ranging**: uniform sampling of the phase-space within given $\Delta\chi^2$ level (Muinonen et al. 2015)
 - **Original ranging**: uniform sampling using an independent sampler (Virtanen et al. 2001)
- Menetelmien vertailu (Virtanen et al. 2015, in revision): random-walk tehokas

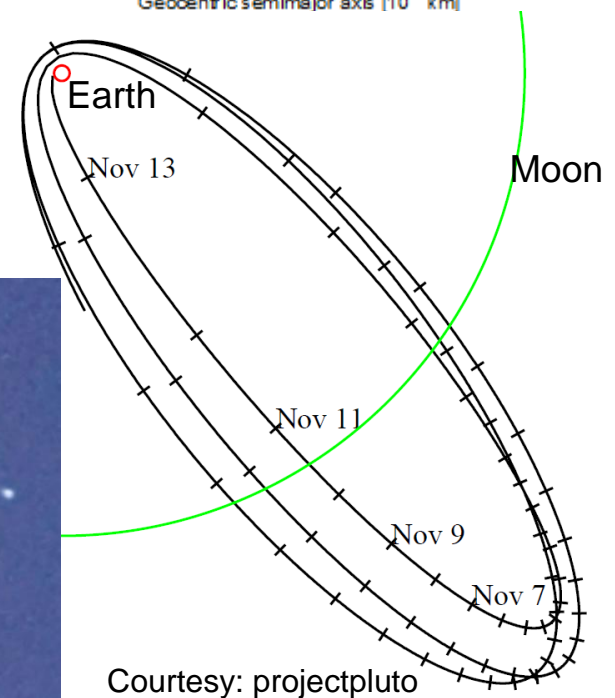
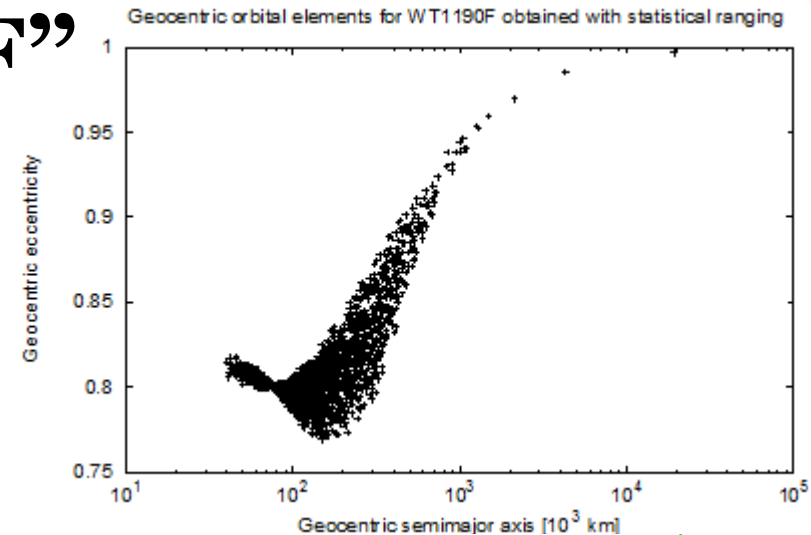


- INTEGRAL satellite & random-walk ranging (Virtanen et al. 2015)
- Data: single “streak” spanning ~20 seconds.
- Possible to distinguish between Earth vs. non-Earth bound orbits:
 - High-Earth orbit ~62%,
 - Earth impact is 33%,
 - Non-Earth-bound orbit is 5%.

Avaruusromut & re-entry: case “WTF”

- Löydettiin kahdesti 2013 (UDA34A3, UW8551D) ja taas 2015 (WT1190F), jolloin linkitettiin
- Seurannan ja kohteen tunnistamisen vaikeus!
- Tilapäisesti kiertoradalla oleva “minikuu” vai avaruusromua?
- Re-entry varmistui kahden yön 3-5.10.2015 havaintojen jälkeen
 - Ennuste 13.11.2015, putosi @06:18:34 UTC
- Analysoitu myös luotausmenetelmällä

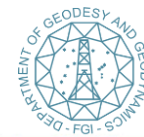
Tarkka törmäysennuste vaatii maan painovoimakentän sekä ilmakehän ominaisuuksien mallintamista



Courtesy: projectpluto

WP2: Satelliittilaserien käyttö non-cooperative -kohteiden ratojen mittaamiseen

- Tässä työpaketissa hyödynnetään WP1:n tuloksia ja tutkitaan mitä Metsähovin kaltaisen satelliittilaserjärjestelmän muokkaaminen avaruusrumujen havaitsemiseksi vaatii.
- Selvitys eurooppalaisten yhteistyökumppaneiden kanssa millaisia vaatimuksia non-cooperative -avaruuskappaleiden havainnot asettavat SLR-järjestelmälle. State-of-art ratkaisut.
- Metsähovin uuden SLR-teleskoopin optiikkaan ja ohjausjärjestelmään tarvittavat lisäoptiot, jotka parantavat tai mahdollistavat avaruuskappaleiden havaitsemisen
- Havaintojen simuloinnit, jolla selvitämme Metsähovin uuden SLR-järjestelmän havaintomahdollisuutta ja -tarkkuutta erilaisille kohteille ja teknisille ratkaisuille.



$$N \propto \frac{E_t}{h\nu} G_t A_r G_s A_s \frac{1}{D^4} T_a^2 T_r$$

E_t on lähetysenergia,

$h\nu$ fotonin energia,

G_t lähettimen vahvistus,

$G_t = 1/(\pi/4 \theta^2)$ lähtökeilan θ avautumiskulma,

A_r vastaanottimen tehollinen pinta-ala,

A_s satelliitin prismojen heijastuspinta-ala,

G_s satelliitin vahvistus,

D satelliitin etäisyys,

T_a ilmakehän läpäisykerroin ja

T_r teleskoopin optiikan läpäisykerroin.

Jos havaittavassa kohteessa ei ole prismaheijastinta, satelliitista takaisin heijastuu vain pieni murto-osa siitä signaalista kuin sellaista kohteista, joissa heijastin on.



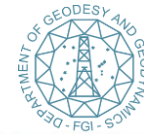
Heikoimmillaan takaisin tulee vain yksittäisiä fotoneita (tai ei mitään).

Mitä voidaan tehdä:

- Lisätään pulssin energiaa E_t (voimakkaampi laser)
- Herkempi vastaanotin ja parempi teleskoopin optiikan läpäisykyky T_r

Metsähovi SLR simulointi

- Tutkitaan millaisia kohteita nykyisellä laitteistolla voidaan havaita tai millaisia muutoksia tarvittaisiin, jotta kohteiden havaitseminen olisi mahdollista
- Teleskoopin nopeus: riittää nopeimpienkin kohteiden seurantaan
- Teleskoopin seurantatarkkuus: riittävä matalille/nopeille kohteille. Suurin epävarmuus kohteen rataennusteet
- Teleskoopin 24/7 operointi: suunniteltu myös päivähavaintoja varten
- Optinen seuranta: tilattu laserteleskoopin optiona 15 cm teleskooppi, jolla kohteita voidaan seurata optisesti mikäli ne ovat Auringon valaisemina eivätkä Maan varjossa
- Laser: Nykyinen laser liian heikkotehoinen pienten, ilman prismaheijastimia olevien kaukaisempien kohteiden havaitsemiseen. Matalilla radoilla (~200-400 km) olevien kohteiden havaitseminen mahdollista.
 - toinen, tehokkaampi laser (otettu huomioon teleskoopin ja rakennuksen suunnittelussa)
 - Nykyisen laserin käyttö infrapuna-alueella, suurempi energia 0.4 → 0.7 mJ, parempi ilmakehän läpäisevyys (muutos mahdollinen nykyisellä laitteistolla)
 - Optisten osien, mm. suodatinten optimointi; paremmat läpäisy/heijastusominaisuudet



Simulointi,

nykyinen systeemi, nykyinen laser @532nm 2kHz

Paras tapaus: lähellä zenittiä, ei utua, hyvät olosuhteet

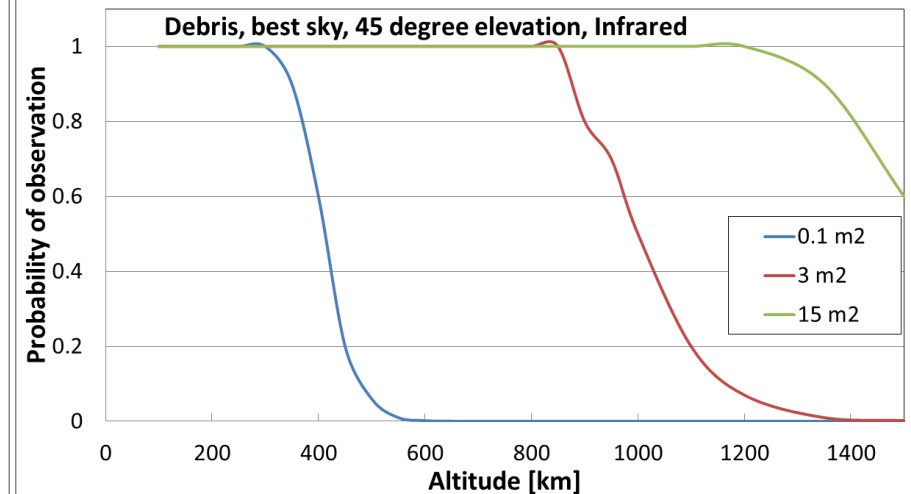
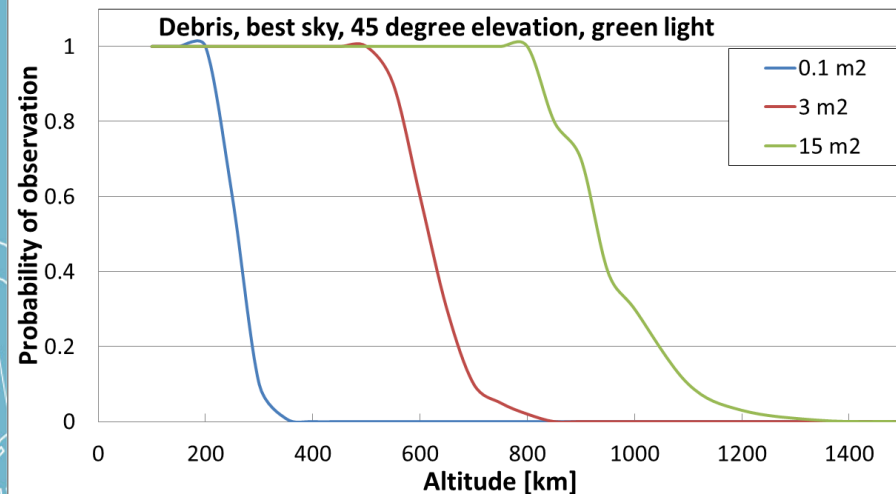
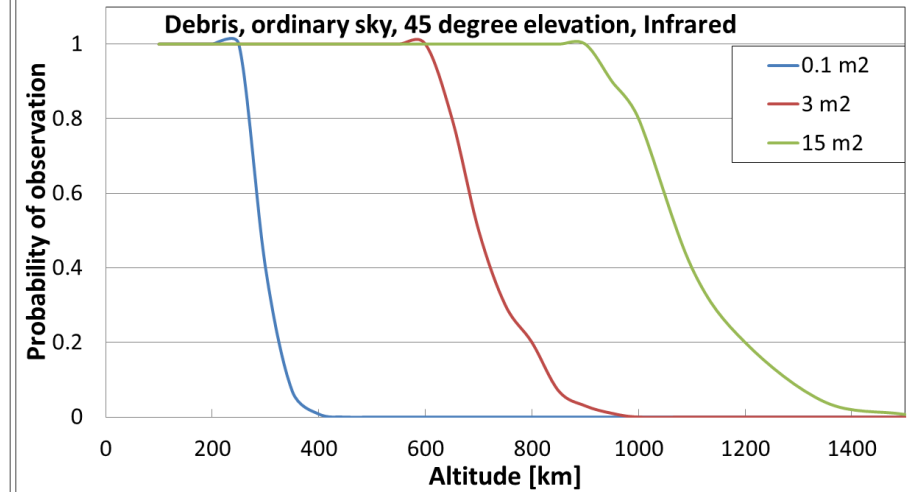
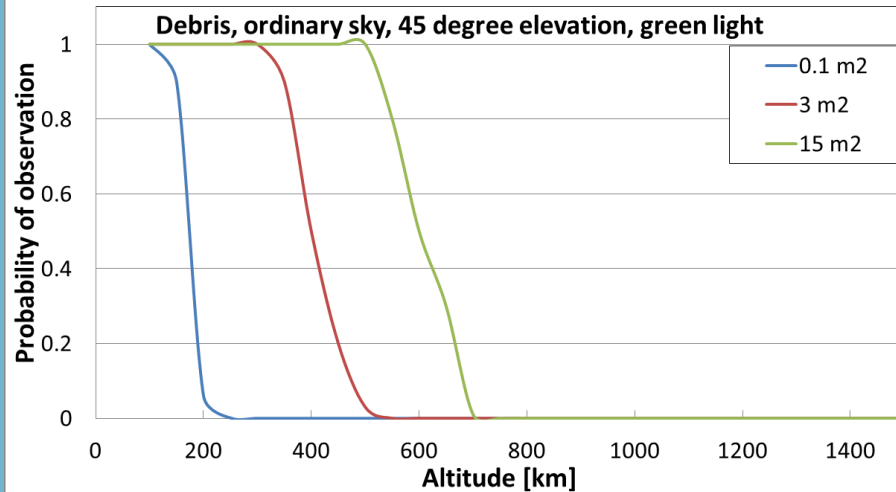
Huono tapaus: korkeuskulma 20°, utua, huonot havainto-olosuhteet

Paluuprosentti on laskettu käyttäen mahdollisimman realistisia arvoja satelliitille, ilmakehälle ja Metsähovin teleskoopin parametreille

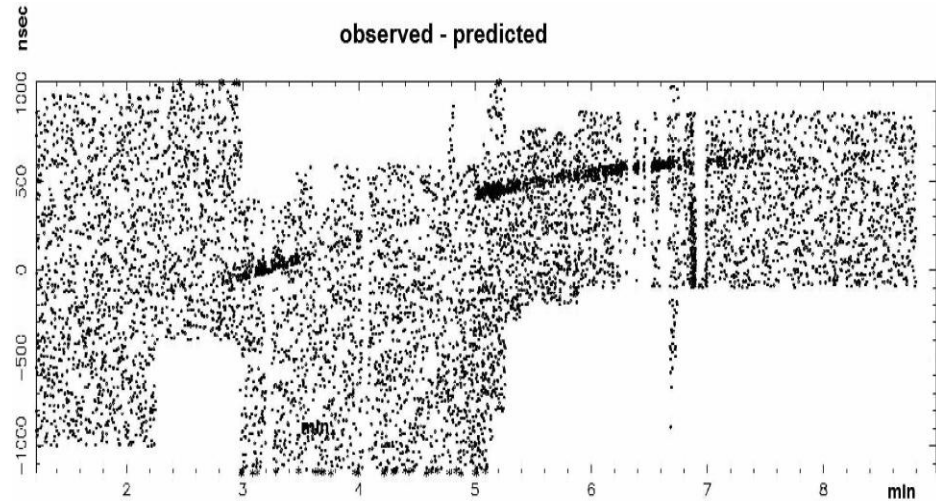
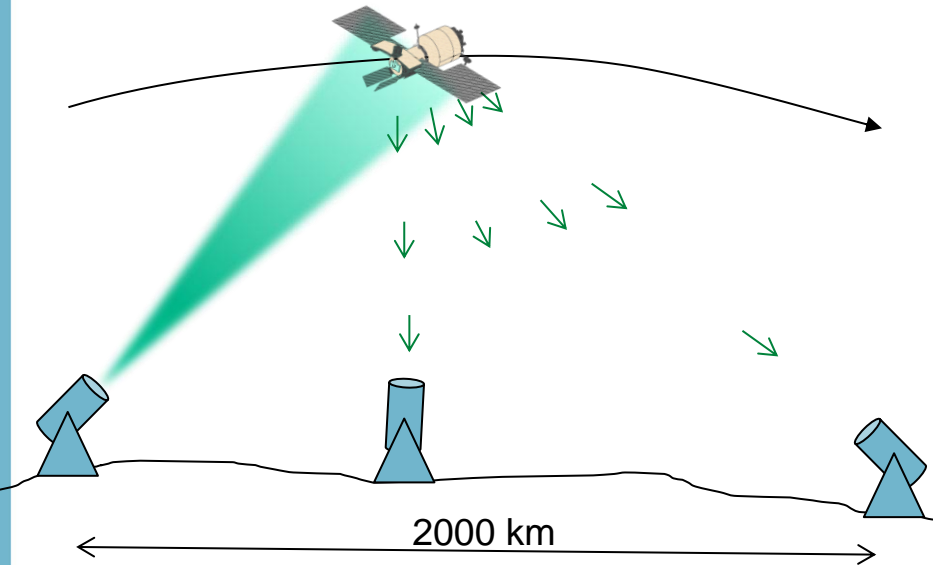
Dark object = satelliitti tai romukappale, jossa ei ole prismaheijastinta

Object	Distance km	Best case %	Worst case %
GPS	20000	2	0.001
GLONASS	20000	19	0.01
Lageos	6000	40	0.01
Envisat	800	100	0.7
Dark object 3 m ²	800	0.07	0
Dark object 15 m ²	800	0.4	0
Dark object 3 m ²	200	16	0.001
Dark object 15 m ²	200	60	0.008

Simulointi, vihreä ja infrapun laser



Moniasema-menetelmä



Graz-Zimmerwald test with Envisat

Georg Kirchner, Franz Koldl, Martin Ploner, Johannes Utzinger 28.03.2012

Yksi voimakkaalla laserilla varustettu SLR-asema “valaisee” satelliitin. Muilta asemilta havaitaan satelliitista tulevat heijastukset.

- + Rataparametrien määrittystarkkuus paranee
- + Voidaan käyttää automaattiteleskooppeja; yksikertaisempi rakenne kuin koko SLR-systeemillä
- + Vain muutama asema tarvitsee voimakkaan laserin
- Tarvitaan tarkka ajoitus ja ajansiirto

Jatkotoimet

WP1

- Etäisyyshavaintojen käyttö
- Havaintotyyppien yhdistäminen
- Törmäysennusteet
- Ratojen nopea muuttuminen vaatii kehittyneitä malleja mm. Auringon säteilypaine, ilmakehän jarrutus

WP2

- havaintostrategioiden optimointi
- multistaattisen menetelmän mahdollisuudet
- optisten havaintojen mahdollisuus
- Uuden SLR-teleskoopin ensimmäiset testit

Lähiavaruuden tilannekuvan muodostaminen

Kappaleiden tunnistaminen ja seuranta, re-entry ja mahdolliset törmäysvaroitukset

SSA-ohjelmiin osallistuminen

