



101 tapaa tappaa satelliitti tai ainakin pahoittaa jonkun mieli

Arttu Tiainen 2023-02-15



Miksi on kiinnostavaa häiritä tai tuhota satelliitteja?

- Suursota Euroopassa, jossa avaruus on entistä suuremmassa roolissa
- Avaruusteollisuuden ja -liiketoiminnan arvo 2022 arvioitu olevan 469 miljardia dollaria (Forbes)
- Haavoittuvainen kohde



Sisällys

Yleistä satelliiteista

- Sopimuksista
- Radoista ja rataparametreista
- Ratamuutoksista
- Muodostelmista muutama sana
- Maa- ja avaruussegmentit ja viestitie

Hyökkäystavoista

- Suoraviivaisemmista hienovaraisempiin
- Konventionaalisista eksoottisempiin
- Miten puolustautua niitä vastaan



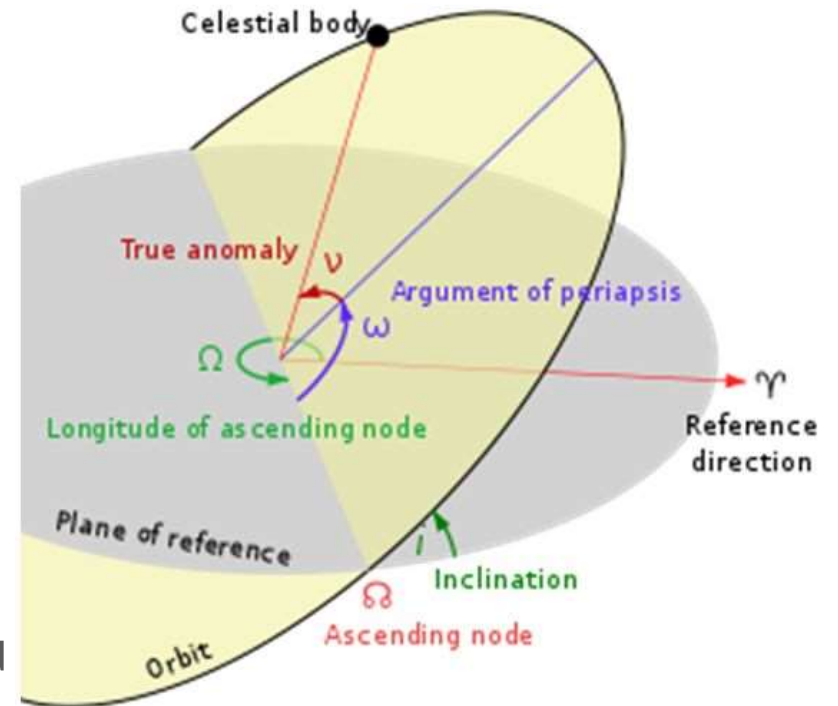
Sopimuksia, lakeja ja rojua

- Outer Space Treaty of 1967
- U.S.-led initiative to ban destructive direct-ascent, kinetic-energy anti-satellite (ASAT) weapons testing 2022

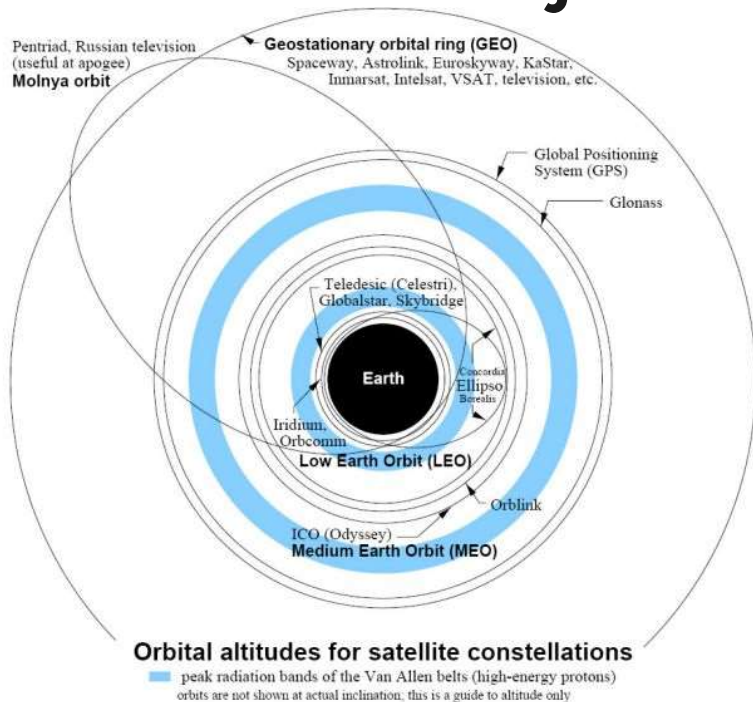
Space Debris Mitigation Guidelines 2002.
IADC määrittelee “space debris”
(avaruusromu) as
“all man-made space objects including
fragments and elements thereof, in Earth
orbit or re-entering the atmosphere, that are
non-functional” (IADC, 2002, Revision 1,
2007, 3.1. Space Debris)

Rataparametrit

- a : length of the semi-major axis
Kuinka suuri ellipsi on
- e : eccentricity
Kuinka pyöreä ellipsi on
- i : inclination
Kuinka paljon kallellaan päiväntasaajaan
- Ω : right ascension of the ascending node
Kuinka paljon ratakiertynyt napa-akesin ympäri
- ω : argument of periapsis
Periapsiksen suunta
- v : true anomaly / time of periapsis passage (also designated with θ)
Missä kohtaa rataa kappale on



Erlaisia ratoja



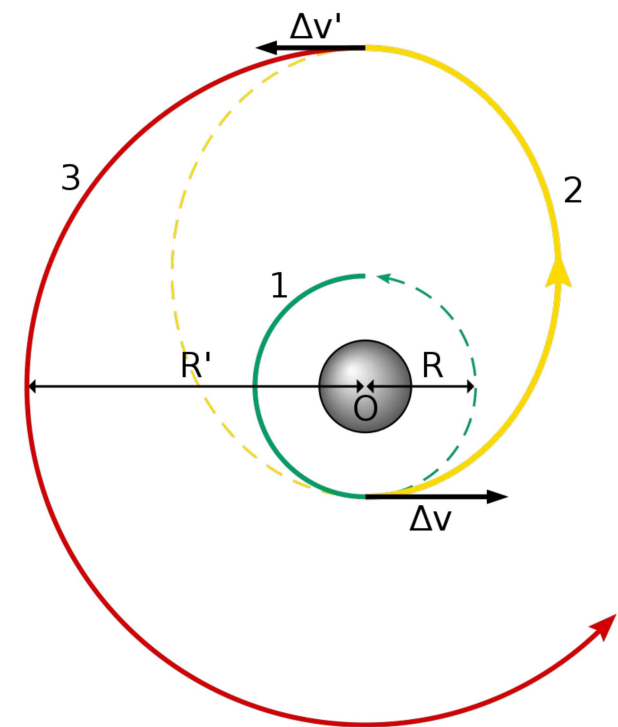
- Very Low Earth Orbit VLEO <450 km
 - Hyvin lyhyt ikäinsä
 - Lyhyet mittaus- ja viestitetysetäisyydet
- Low Earth Orbit LEO 450 km - 2000 km
 - Lyhyet mittaus- ja viestitetysetäisyydet
 - SSO erityisen mielenkiintoinen
- Medium Earth Orbit MEO 2000 km - 35 786 km
 - Pääosin viestiliikenne- ja navigaattiosatelliitteja
 - Hyvä kattavuus
- Highly Elliptical Orbit HEO
 - Ei ympyrärata
- Geosynchronous Earth Orbit GEO 35 786 km
 - Lähes paikallaan taivaalla, erityisesti Geostationaarinen rata
 - Erittäin kaukana

$$P_r = \frac{P_t G_r G_t \lambda^2}{d^2 4^2 \pi^2}$$

<https://lloydwood.users.sourceforge.net/Personal/L.Wood/publications/lloyd-wood-iwssc-08-tutorial.pdf>

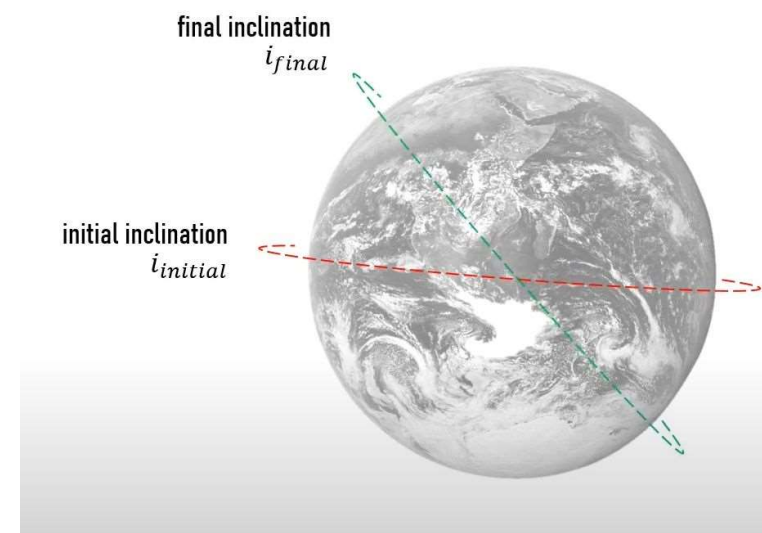
Ratojen muutokset - Samassa tasossa

- Samassa tasossa tapahtuvat ratamuutokset ovat "halpoja"
- Hohmannin siirtorata oikealla on klassisin ja yksinkertaisin.
- Käytännössä lisäävät ja vähentävät radan korkeutta ja eksentrisyyttä



Ratojen muutokset - Tason muutokset

- Tason muutokset erittäin kalliita
- Tyypillisesti suoritetaan tasojen leikkauskohdissa
- Voivat olla erittäin monimutkaisia ja aikaa vieviä

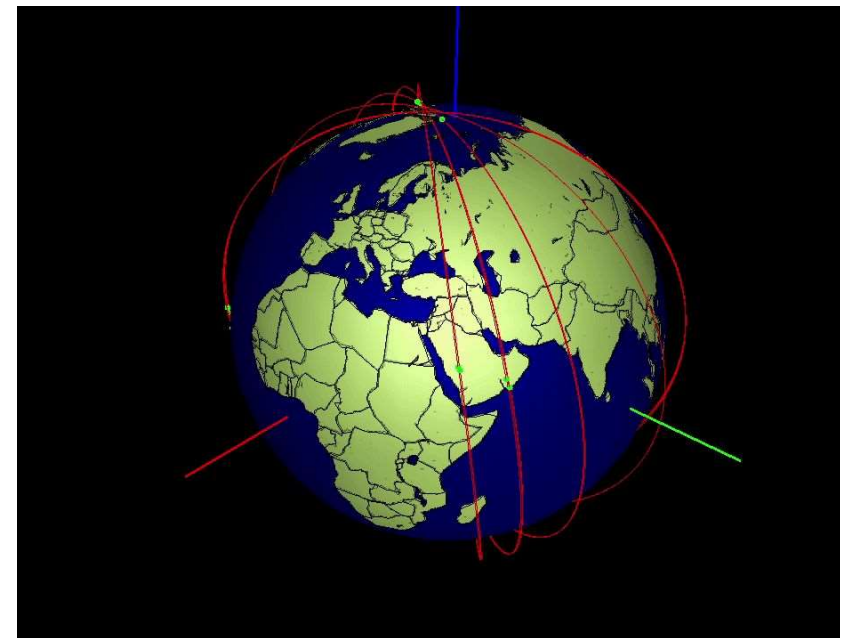


Pullonkauloja - Aurinkosynkroninen rata

Suuri osa kaukokartoitussatelliiteista (Earth Observatio) on aurinkosynkronisilla radoilla (sun synchronous orbit)

Erityinen LEO rata, jossa ratataso siirtyy noin asteen idemmäksi joka päivä ja satelliitti kiertää vuoden kierron mukana, jolloin valo-olosuhteet eivät muutu niin paljoa

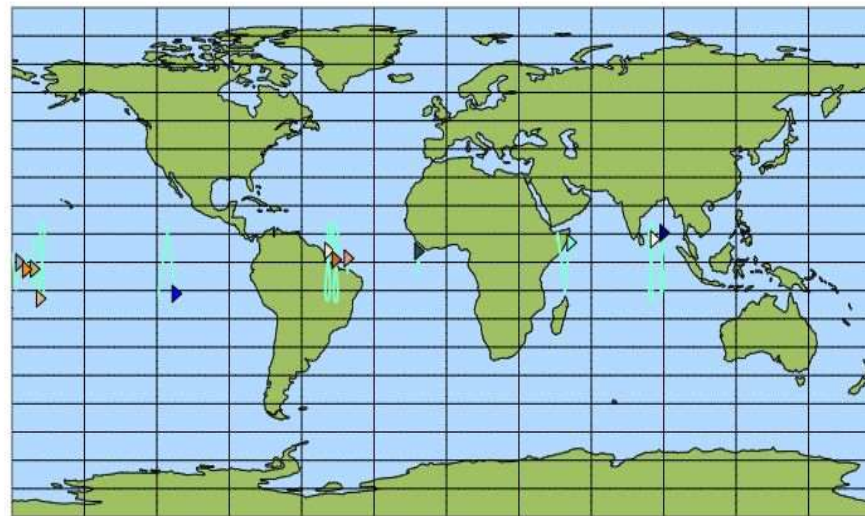
Orbits per day	Period (h)	Altitude (km)	Maximal latitude	Inclination
16	$1\frac{1}{2}$ = 1:30	274	83.4°	96.6°
15	$1\frac{3}{5}$ = 1:36	567	82.3°	97.7°



Hawkeye360 satellites using L. Wood, P. Worfolk *et al.*, *SaVi - Satellite constellation Visualization software*, <http://savi.sf.net/>, 2017.

Pullonkauloja - Geostationaarinen rata

- Satelliitit käytännössä paikallaan taivaalla tällä radalla
- Yksi satelliitti kattaa lähes kolmanneksen maasta
- Käytännössä ikuinen rata, jos ei eläköitetä satelliitteja hautausmaarakadalle



- TDRS 1 aquamarine
- TDRS 3 bisque
- TDRS 4 blue
- TDRS 5 burlywood
- TDRS 6 chocolate
- TDRS 7 cornsilk
- TDRS 8 darkblue
- TDRS 9 darkgray
- TDRS 10 darkkhaki
- TDRS 11 darkorange
- TDRS 12 darksalmon
- TDRS 13 darkslategray

TDRS Satelliitteja simuloituna Poliastro-kirjastolla

Muodostelmista ja konstellaatioista

- Suuret konstellaatiot vaikeampia häiritä suuren kohdemäärän takia. Esim Starlink
- Muodostelmissa, jossa tarvitaan useita saman hetkisiä mittauksia voi riittää jo yhdenkin kohteen neutralointi. Esim radiopaikannussatelliitit tai jaettu downlink

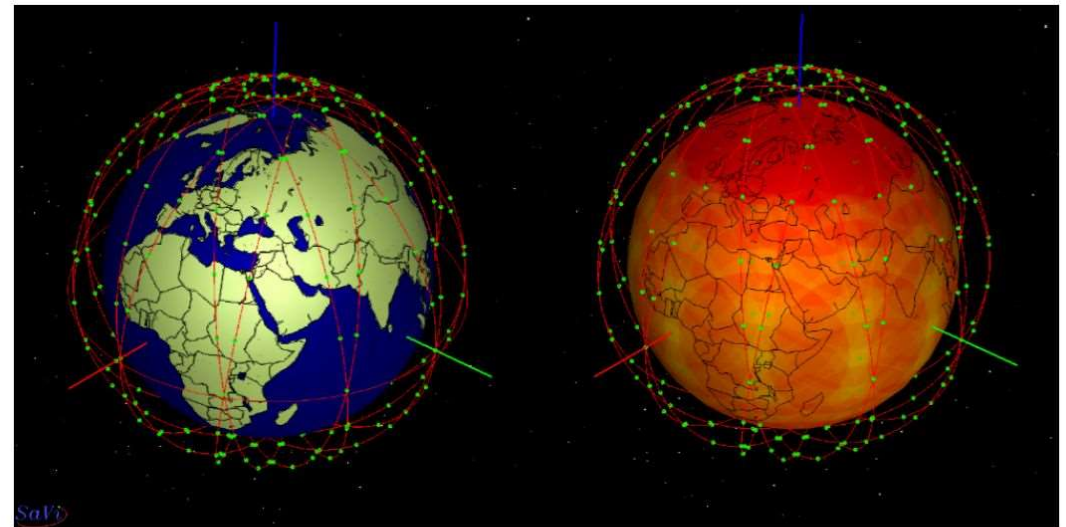


Figure 32: Left: HypoCon constellation visualisation. Right: Simulated field of view coverage of the S/C. Image made with SaVi [145].

Arttu Tiainen, "Master's Thesis* Inter-Satellite Link Antennas: Review and The Near Future The Approved Version." (n.d.): 237.

Muodostelmista ja konstellaatioista

- Suuret konstellaatiot vaikeampia häiritä suuren kohdemäärän takia. Esim Starlink
- Muodostelmissa, jossa tarvitaan useita saman hetkisiä mittauksia voi riittää jo yhdenkin kohteen neutralointi. Esim radiopaikannussatelliitit tai jaettu downlink

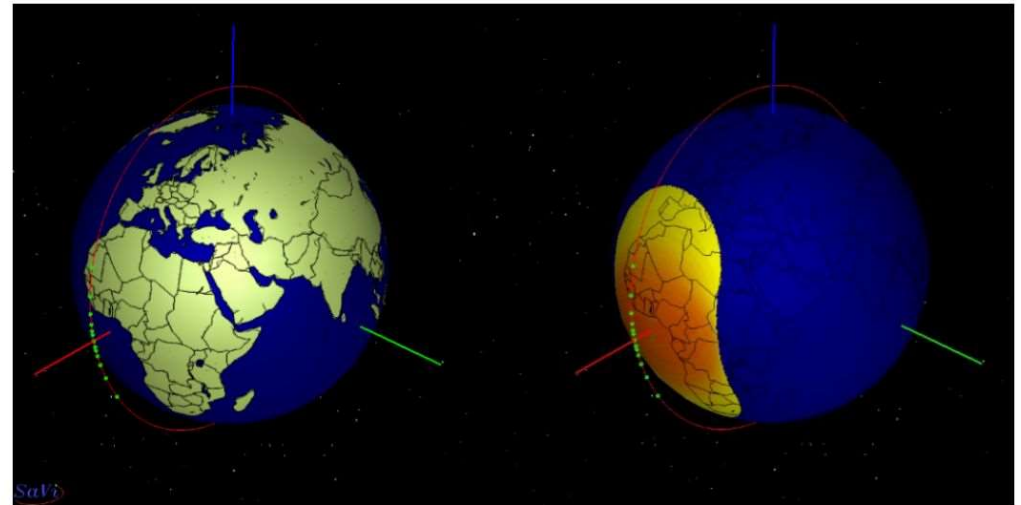


Figure 33: Left: The Goose constellation visualisation. Right: Simulated field of view coverage of the S/C. Image made with SaVi [145].

Arttu Tiainen, "Master's Thesis* Inter-Satellite Link Antennas: Review and The Near Future The Approved Version." (n.d.): 237.

Hyökkäyksistä

Hyökkäykset voivat kohdistua

- Maasta avaruuteen
 - Suoraan avaruudesta satelliitteihin
 - Maalinkkiasemiin
 - Maasegmentin muihin osiin kuten datakeskuksiin
-
- Tuhoavia
 - Sieppaavia
 - Pysyvästi vahingoittavia
 - Väliaikaisesti vahingoittavia
 - Huijaavia
 - Sokaisevia
 - Hankaloittavia
- Stable Diffusion made image



ASAT-ohjukset

Anti-Satellite ohjuskokeita tehneet maat

- Kiina 2007
- Yhdysvallat 2008
- Intia 2012
- Venäjä 2015

Voidaan laukaista lentokoneesta tai samalla tapaa maasta kuin raketit kiertoradalle

Kuvassa Vought ASM-135A Anti-Satellite Missile



<https://www.nationalmuseum.af.mil/Visit/Museum-Exhibits/Fact-Sheets/Display/Article/198034/vought-asm-135a-anti-satellite-missile/#:~:text=T he%20ASM%2D135A%20anti%2Dsate llite,U.S.%20reconnaissance%20and%20communication%20satellites.>

Hinauspalvelu

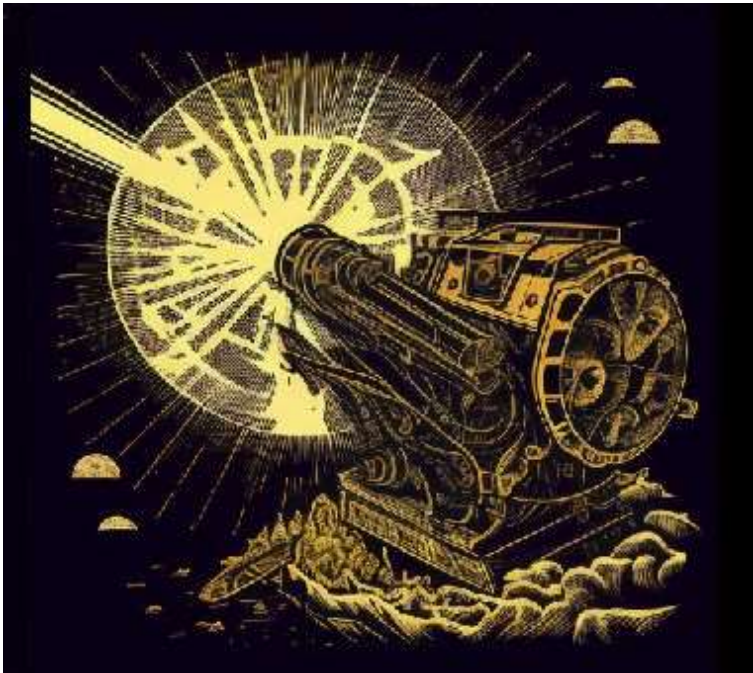
Mikä tahansa Orbital Service -satelliitti joka voi poistaa rikkinäisen satelliitin radaltaan, voi siirtää toimivan satelliitin radaltaan tai rikkoa sellaisen

2022 Tammi-helmikuussa Shijian-21 hinasi Beidou-2 G2 -satelliitin GEO-radalta hautausmaarakadalle



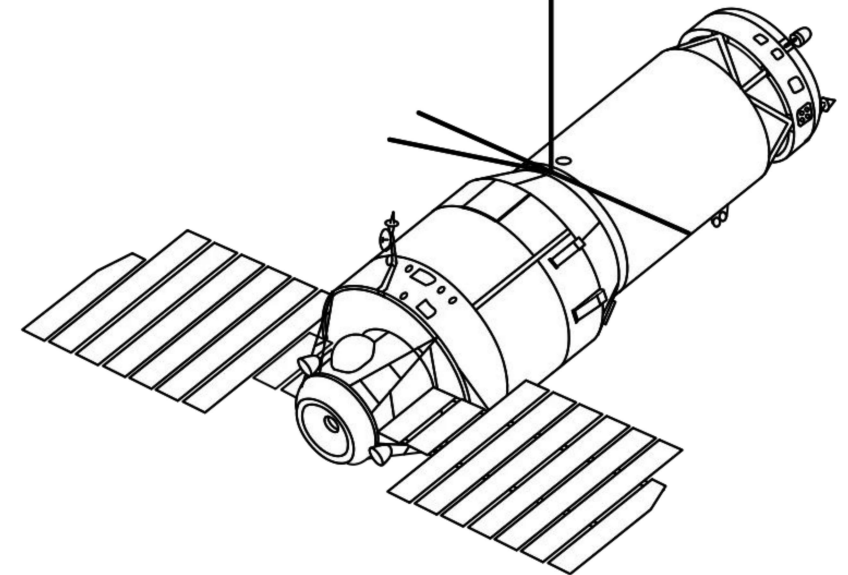
Space Forces S1E1, Netflix

ASAT Kineettiset aseet



Stable Diffusion made image
<https://www.sandboxx.us/blog/the-soviet-unions-space-cannon-that-actually-fired-in-orbit/>

- Hitaita, mutta tyhjiössä hyvin pitkä kantama
- Alttiimpia ympäristölle kuin energia-aseet -> Osuminen vaikeaa
- Kokeiltu 1970-luvulla R-23M Kartech
- Työntää ja kääntää ampujaa



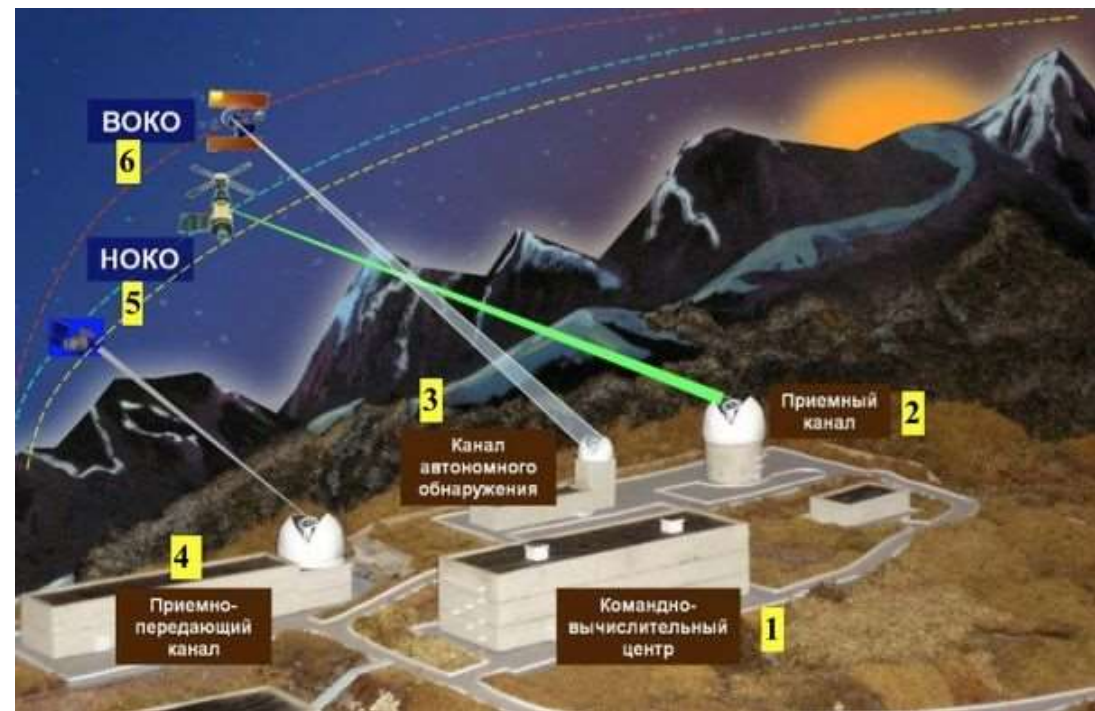
ASAT Energia-aseet

- LASER tai MASER, mutta paljon tehoa tarvitaan
- Voi vahingoittaa sensoreita tai järjestelmiä, mutta voi ihan rehellisesti kuumentaaakin
- Tehokkaampi ilmakehän ulkopuolelta, mutta toteutus vaikea tehon ja hukkalämmön takia
- Pienempi vaikutus ympäristöllä
- Tutkittu esim ohjuskilveksi (Project Excalibur)



Laser sokaistu

- Optisen alueen payloadeja voidaan sokaista voimakkaalla laserilla
- Periaatteessa ilmakehän tutkimus LIDARit ovat ihan toimivia tähän
- Voidaan myös sokaista erittäin kaukaa avaruudesta
- Toimii myös laserlinkkeihin
- Vaatii tarkan sijainnin



<https://www.thespacereview.com/article/4416/1>

Radiotaajuinen häirintä - Jamming

- Häirittävien kohteiden signaalit heikkoja ja etäisyydet pitkiä
- Soveltuu esim tutkien, viestijärjestelmien ja signaalitiedustelun häiritsemiseen
- Erityisen hyvin soveltuu navigaatio-signaalien häirintään



<https://www.securityoutlines.cz/the-current-rise-of-anti-satellite-weaponry/>
Kuvassa Venäläinen Krasukha-4

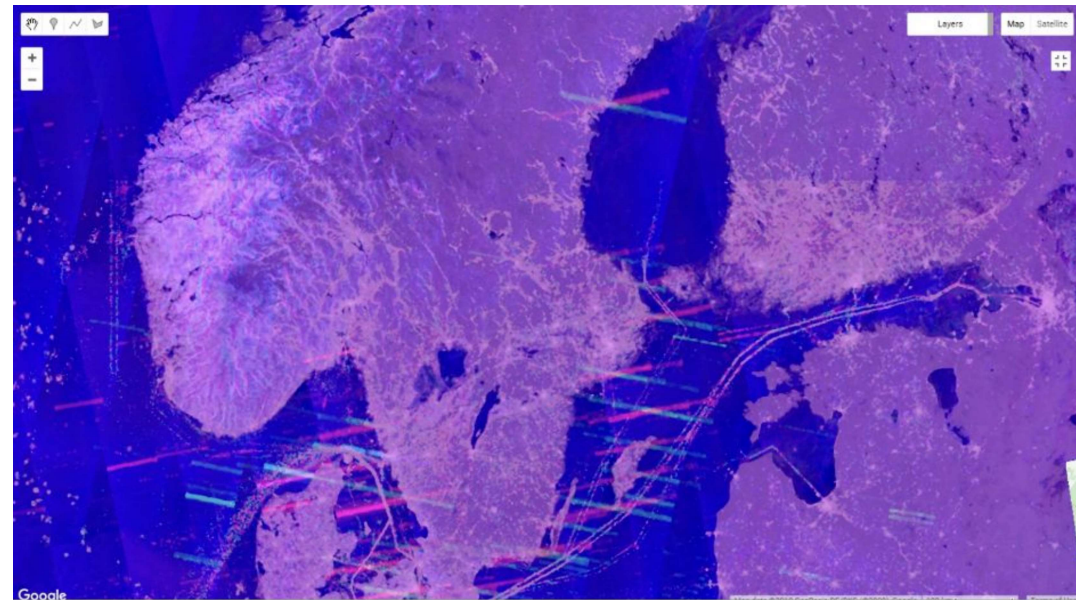
Radiotaajuinen häirintä - Jamming Kommunikaatio

- Kommunikaatio linkkien häirintä mahdollista datan latauksen tai käskyttämisen yhteydessä
- TTC-yhteyden estäminen todennäköisesti estää korkeampi taajuisen datalinkin
- Maa-aseman häirintä vaatii tyypillisesti vähemmän tehoja

KSAT Tromssa, Omat lomakuvat

Radiotaajuinen häirintä - Jamming Payload

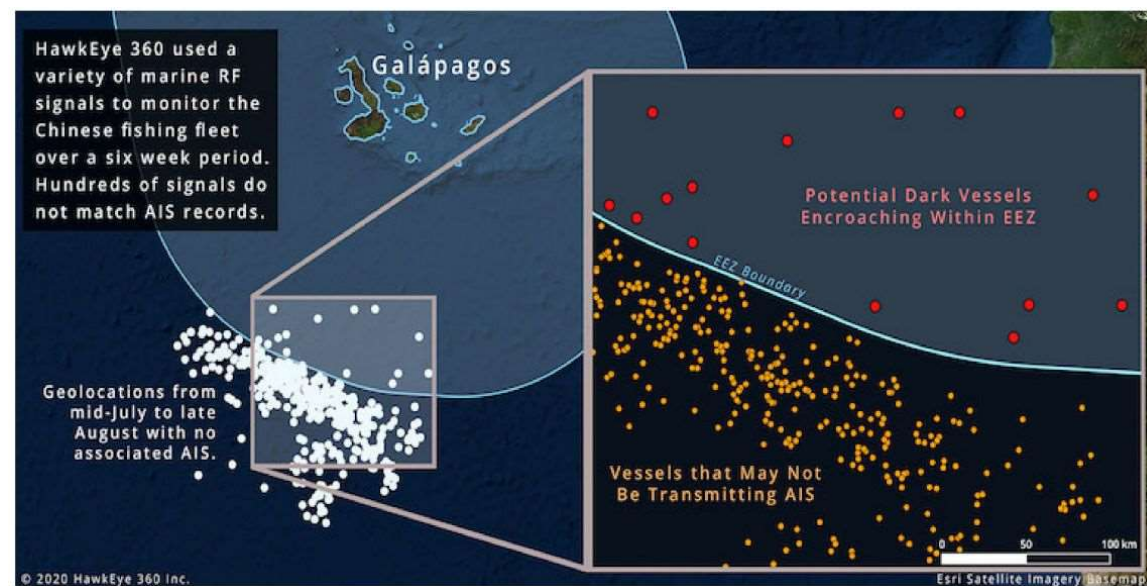
- Häirintä tapahtuu payloadin käytön yhteydessä
- Erityisesti tutkasatelliittein kuten SAR-järjestelmien häirintä mahdollista radiotaajuisilla signaaleilla



<https://ollielballinger.users.earthengine.app/view/bellingcat-radar-interference-tracker#lon=49.9507;lat=26.6056;zoom=4;>
<https://www.bellingcat.com/resources/2022/02/11/radar-interference-tracker-a-new-open-source-tool-to-locate-active-military-radar-systems/>

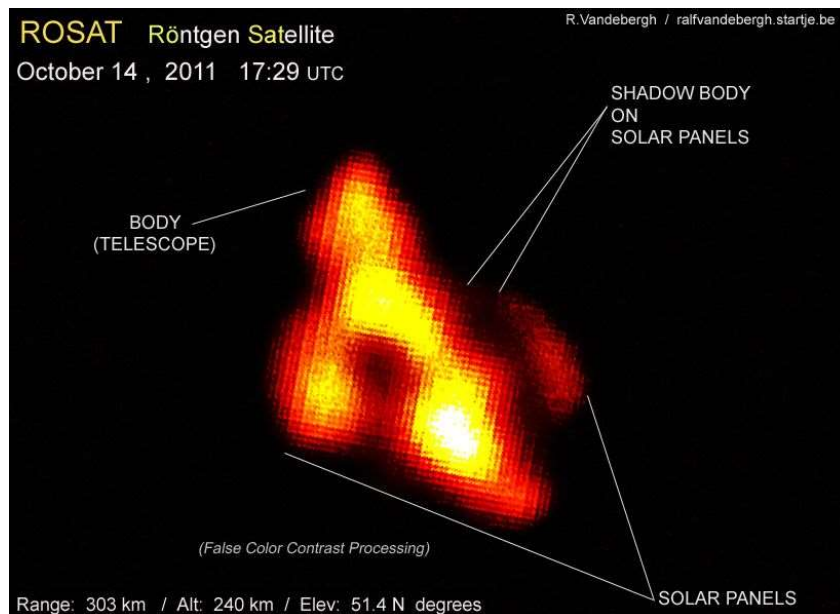
Radiotaajuinen huijaus - Spoofing

- Merkittävästi häirintää vaikeampaa
- Mahdollista huijata esim tutkia, AISia ja navigaatiojärjestelmiä
- Suojautuminen vaatii suurempaa laskentatehoa
- Rinnakkaisiin havainnoiteihin perustuvat järjestelmät vaikeampia



Andrej Androjna et al., "AIS Data Vulnerability Indicated by a Spoofing Case-Study," *Applied Sciences* 11, no. 11 (January 2021): 5015, accessed February 9, 2023, <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/11/5015>.

Kyber satelliitin kaappaus



- Satelliitit ovat lopulta vain tietokoneita, joissa on hyvin kallis kotelointi
- Väylä tarvitaan, esim oma radiolinkki tai maa-aseman
- Lyhyelläkin kaappauksella voidaan rikkoa satelliitti, kuten mahdollisessa ROSAT röntgen teleskoopin kanssa (kuvassa)

<https://www.satellitoday.com/government-military/2008/12/01/nasa-computers-hacked-by-intruders/>

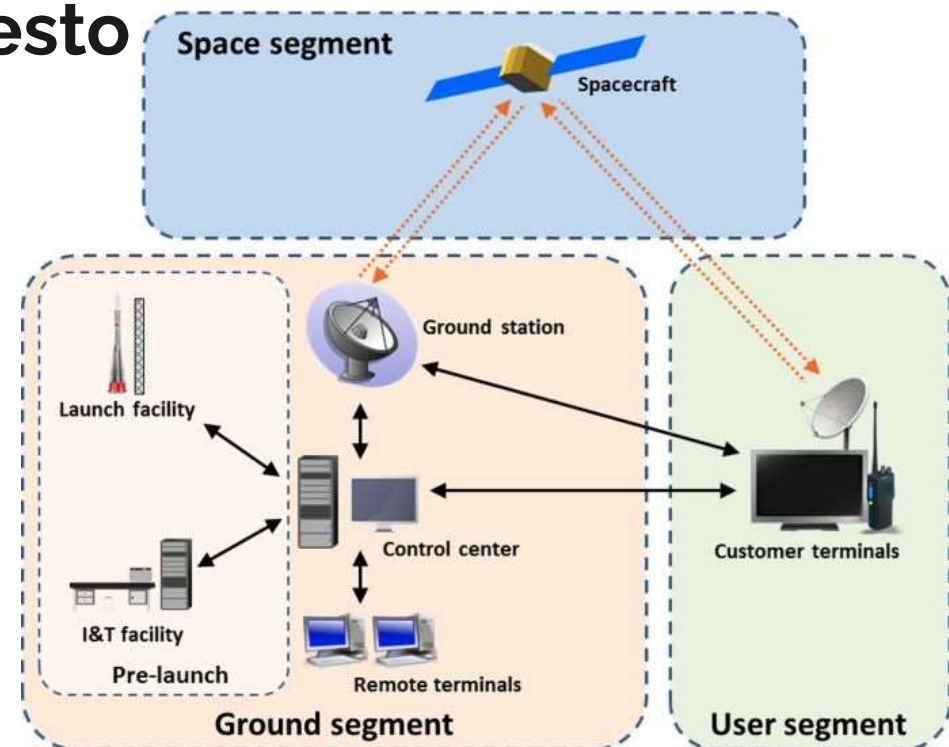
Kyber payloadin kaappaus

- Payloadit usein ovat erillisiä “tietokoneita” satelliittialustassa
- Niillä saattaa olla eri operointi ja eri tietoturvaso kuin alustassa
- Voidaan potentiaalisesti käyttää hyökkäyspintana
- Satelliitissa voi olla useita toissijaisia payloadeja (kuvassa Glonass-M nr. 53, launched as Kosmos-2516 vuonna 2016)



Kyber Maa-aseman käytön esto

- Maa-asemille tehtävä kyberhyökkäys ei välttämättä poikkea muun kriittisen infran kohteista
- Palvelunestohyökkäykset tai ransomware lukitukset estävät käytön
- Myös vahva epäily hyökkäyksestä voi pysäyttää toiminnan selvityksen ajaksi.



Maa-aseman käytön esto fyysisesti



- Osa maa-asemista on hankalasti päästävissä paikoissa ja osa kaupunkien keskellä
- Eri suojautumistaso: Sotilas vs kaupalliset
- Vandalismi vs aseelliset hyökkäykset
- Infran haavoittuvaisuus

<https://www.ksat.no/news/news-archive/2022/celebrating-15-years-at-Troll-Station/>

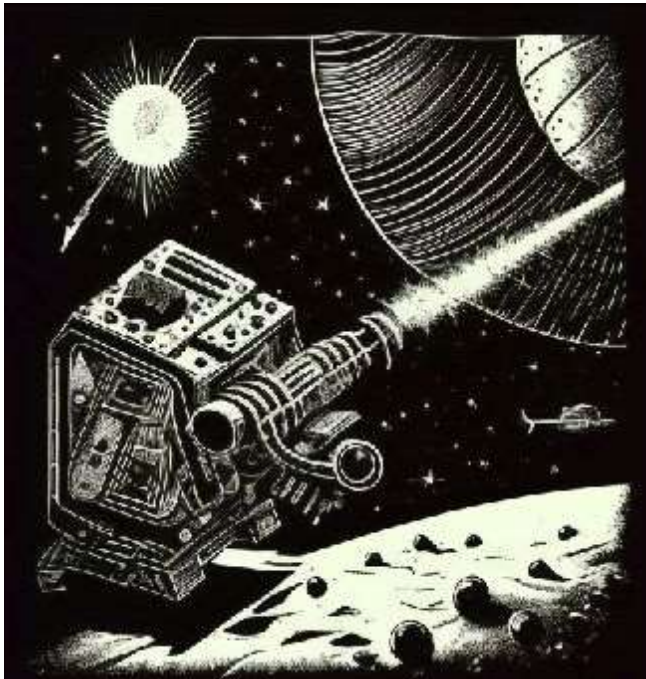
Kyber ICT-infrastruktuuriin vaikuttaminen

- Satelliittijärjestelmien ICT-infra ei merkittävästi eroa maanpäällisestä
- Laitteita voidaan lukita jopa kokonaan käyttökeltottomaksi, kuten KA-SAT hyökkäys
- Myös tietokantoja, kuten satelliittilinkkien asiakastietokantoja tuhoamalla voidaan palvelu estää (kuvassa OneFist ja CRM)



<https://www.difesaesicurezza.com/en/defence-and-security/cyber-warfare-team-onefist-hits-russia-in-space-again/>
<https://www.wired.co.uk/article/viasat-internet-hack-ukraine-russia>

Eksoottisempia ASAT Hiukkasaseet



Stable Diffusion made image

- Kiihdytettyjä raskaita hiukkasia
- Pienempi liikemäärä kuin kineettisillä aseilla
- Ympäristön sähkömagneettiset kentät vaikuttavat varattuihin hiukkasiin
- Tarvitsee tarkan sijainnin
- Käytetään jo tutkimukseen
- Myös “hiekkapuhallus” toimii

Eksoottisempia: Liimat, musteet ja maalit

- Voidaan käyttää sokaisemaan antenneja ja kameroita
- Pienikin määrä voi rampauttaa satelliitin
- Suhteellisen raskaita
- Enemmän puolustusellisia



Stable Diffusion made image

Eksoottisempia: Harppuunat ja verkot



- Toimimattomien satelliittien poistamiseen suunnitellut harppuunat ja verkot toimivat toimivien satelliittien poistamiseen
- RemoveDEBRIS satelliitti 2018 kokeili verkkoa ja harppuunaa onnistuneesti
- Toimivat vain erittäin läheltä

Stable Diffusion made image

<https://www.nhm.ac.uk/discover/news/2018/september/net-to-catch-space-debris-around-earth-is-successfully-deployed.html>

Suojautumiskeinoista

Voidaan jakaa

- Teknisiin metodeihin
- Operatiivisiin metodeihin
- Aktiiviseen puolustukseen



Stable Diffusion made image

"Defense Against the Dark Arts in Space," *Aerospace Security*, last modified February 26, 2021, accessed February 26, 2021, <http://aerospace.csis.org/defense-against-the-dark-arts-in-space/>.

Suojautumiskeinoista: Teknisiä metodeja

- Elektromagneettinen suojaus ja kovetus
- Antennien suuntaus
- Ohjattavat antennit, varsinkin kognitiivisien radiolinkkien kanssa
- Häiriäiden poisto inverttoimalla (EM)
- Häirintää sietävät aaltomuodot
- Laserkaihtimet
- Salaus
- Ilmaväleillä ja “datadiodeilla” eristetyt järjestelmät



Stable Diffusion made image

“Defense Against the Dark Arts in Space,” *Aerospace Security*, last modified February 26, 2021, accessed February 26, 2021, <http://aerospace.csis.org/defense-against-the-dark-arts-in-space/>.

Suojautumiskeinoista: Operatiivisia metodeja

- Nopea käyttöönotto ja radalle vasta kun tarvitaan
- Nopea menetysten paikkaus
- Ratamuutokset ja väistöt
- Häiveratkaisut
- Valemaalit

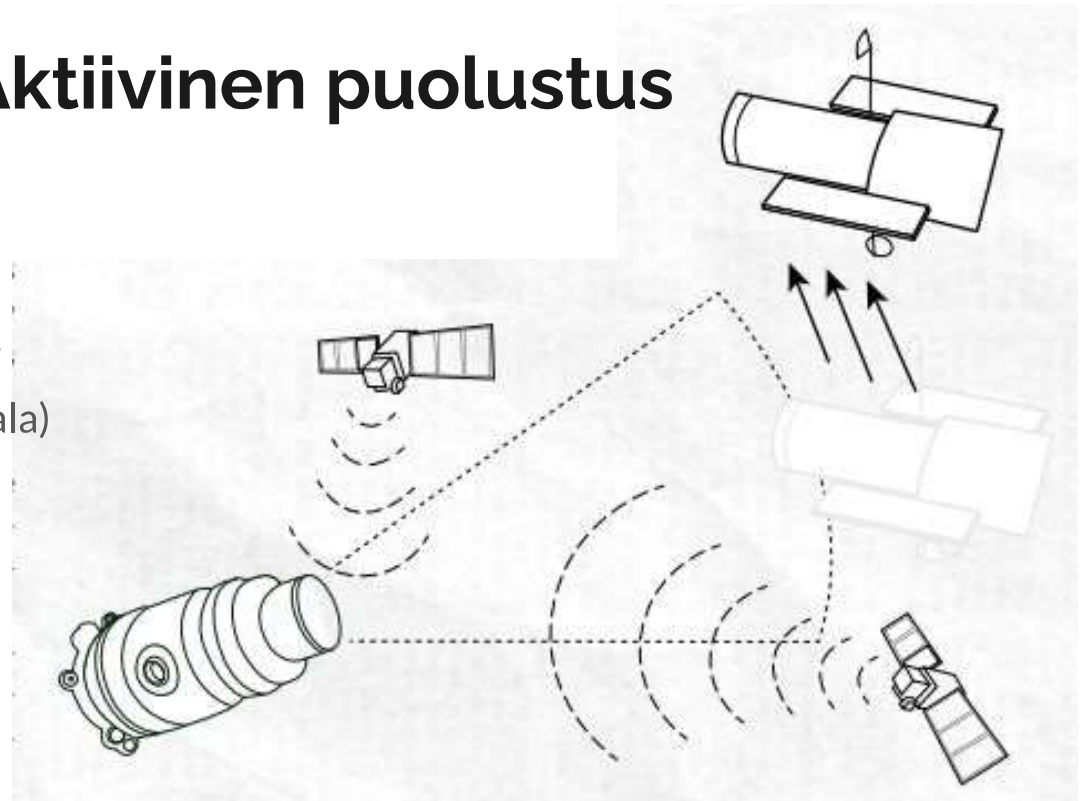


Stable Diffusion made image

"Defense Against the Dark Arts in Space," *Aerospace Security*, last modified February 26, 2021, accessed February 26, 2021, <http://aerospace.csis.org/defense-against-the-dark-arts-in-space/>.

Suojautumiskeinoista: Aktiivinen puolustus

- Ampua takaisin
- Hyökkääjän EM tai laser häirintä
- Hyökkääjän maa-aseman neutralointi
- Mustesuihku ja pakoon (kuin mustekala)
- ASAT ase maasta käsin



“Defense Against the Dark Arts in Space,” *Aerospace Security*, last modified February 26, 2021, accessed February 26, 2021, <http://aerospace.csis.org/defense-against-the-dark-arts-in-space/>.