

RUIMTEPUIN: HOGE SNELHEID, GROTE IMPACT

Het wordt steeds drukker in de ruimte. Het lanceren en uitbaten van satellieten is de afgelopen jaren veel goedkoper geworden en dus toegankelijk voor meer partijen dan voorheen. Dit brengt vele mogelijkheden met zich mee in een wereld waarin de maatschappij steeds afhankelijker wordt van het ruimedomein. Het zorgt echter ook voor problemen in de ruimte. Het raakt er vol.

“ISS wijkt uit voor ruimtepuin” [1], “Rusland blaast satelliet op” [2]; de laatste tijd staan er steeds vaker nieuwsberichten in de kranten over ruimtepuin en activiteiten die ruimtepuin veroorzaken. In zowel november [3] vorig jaar als april [4] en juni van dit jaar moest het International Space Station (ISS) uitwijken voor ruimtepuin dat was veroorzaakt door de vernietiging van een Russische satelliet met een eigen ASAT (Anti-SATelliet) wapen. Verder zorgde de onbedoelde ontploffing van een satelliet voor een toename van ruimtepuin [5] en zijn er anderzijds vele ontwikkelingen gaande om ruimtepuin op te ruimen [6].

Cijfers

De meer dan 6200 lanceringen die na de Spoetnik in 1957 zijn uitgevoerd, hebben ruim 13.000 satellieten in een baan om de aarde gebracht. Ongeveer 8400 daarvan bevinden zich nog steeds in de ruimte, hoewel ‘slechts’ 5600 actief

zijn. De lanceringen hebben echter niet alleen satellieten in een baan om de aarde gebracht, maar ook raketdelen, schroeven, adapters enzovoorts. In totaal bevindt zich nu ongeveer 9900 ton aan materiaal in een baan om de aarde. De European Space Agency (ESA) houdt bij hoeveel objecten zich in de ruimte bevinden [7]. Op 10 mei 2022 waren dat:

- 36.500 objecten >10 cm
- 1.000.000 objecten >1 cm en <10 cm
- 130.000.000 objecten >1 mm en <1 cm

Uit deze cijfers blijkt duidelijk dat de kleine objecten de grote objecten in aantal ver overstijgen.

De hoeveelheid ruimtepuin is in de afgelopen decennia enorm toegenomen. Alleen de vele lanceringen zorgen al voor ruimtepuin in de vorm van rakettrappen, verbindingstukken en de satellieten zelf (op het einde van hun leven). Maar daar-

naast maakten een aantal botsingen en ontploffingen dat de hoeveelheid ruimtepuin met grote sprongen toenam. Twee van deze sprongen zijn goed te zien in figuur 2: in 2007 voerde China een ASAT-test uit op een van hun eigen satellieten en in 2009 botste de inactieve COSMOS-2251 met de actieve Iridium-33-satelliet. Beide gebeurtenissen vonden plaats op een hoogte waarbij het ruimtepuin nog vele jaren in een baan om de aarde zal blijven gaan, waardoor het nog lang invloed zal hebben op satellietoperaties in deze banen.

Wat figuur 2 ook duidelijk maakt, is dat de hoeveelheid payloads (de objecten die daadwerkelijk de missie uitvoeren) in de ruimte niet meer een lineaire groei vertoont, maar vanaf ongeveer 2017 een exponentiële groei laat zien. Dit komt mede door de miniaturisering van de technische componenten van satellieten: waar bijvoorbeeld eerst een satelliet van miljarden euro's en meters groot ontwikkeld moest worden om de



Figuur 1. ESA Optical Ground Station, Tenerife. Foto: QOQI Vienna, Austrian Academy of Sciences.

aarde te observeren, kan dat nu al gedaan worden met een satelliet van een aantal miljoenen euro's en een grootte van minder dan 50cm.

Deze vermindering in grootte zorgt tevens voor lagere lanceerkosten en dit houdt in dat het ruimedomein ineens toegankelijk is geworden voor veel meer spelers dan voorheen. Bedrijven, universiteiten, kleinere landen en individuen maken daar dankbaar gebruik van. De hoeveelheid raketdelen (*rocket bodies*) laat niet diezelfde exponentiële groei zien. Dat komt doordat kleine satellieten vaak in een groter aantal met één raket gelanceerd worden. Zo worden bijvoorbeeld bijna vijftig StarLink-satellieten tegelijk gelanceerd met één raket.

StarLink is een goed voorbeeld van een andere ontwikkeling die door de lagere kosten ineens toegankelijk is geworden: de megaconstellatie. Inmiddels heeft StarLink meer dan 2200 werkende satellieten [9] in een baan om de aarde. Een punt van aandacht daarbij is dat elke

satelliet een verbinding nodig heeft met een grondstation op aarde om aangestuurd te worden en data terug naar aarde te verzenden. Zonder radioverbinding kan er geen nut uit een satelliet worden gehaald. Een megaconstellatie heeft dus over het algemeen grote banden op het frequentiespectrum nodig. Daarmee is de verzadiging van het ruimedomein tweeledig: het aantal objecten dat een botsingsgevaar voor elkaar oplevert groeit en het frequentiespectrum raakt steeds voller, waardoor het moeilijker is een vrije radiofrequentie te vinden voor nieuwe satellieten.

Gedrag van objecten in de ruimte

Om een object in een baan rond de aarde te houden, moet het een enorme voorwaartse snelheid hebben en houden, die als volgt te berekenen is:

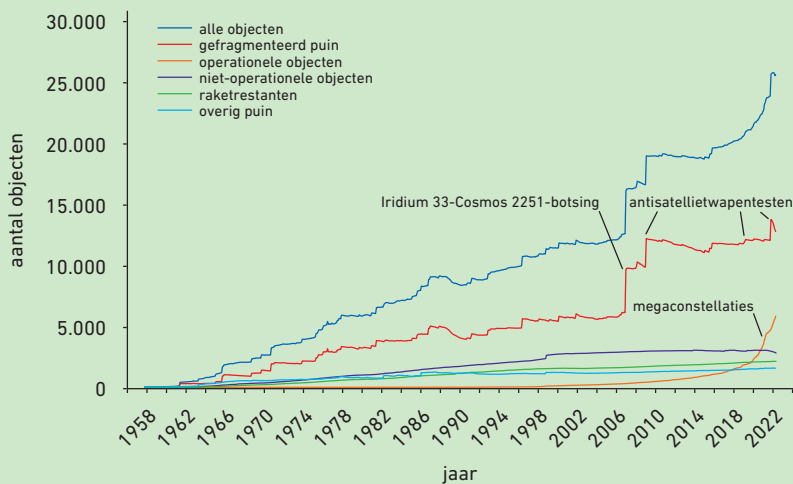
$$v = \sqrt{\frac{G * m_A}{r}}.$$

Hierbij is m_A de massa van de aarde, G de gravitatieconstante, r de afstand van het object tot het midden van de aarde en v de snelheid. Hierbij valt meteen op dat de snelheid van een object in een baan om de aarde niet afhangt van zijn massa. Een schroefje dat zich in dezelfde baan als het ISS bevindt, zal dus ook dezelfde snelheid als het ISS hebben.

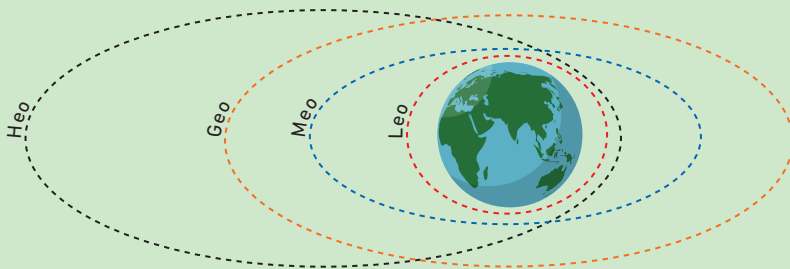
De snelheden voor een aantal veelgebruikte cirkelvormige banen zijn:

- 400 km hoogte: 7,7 km/s
- 2000 km hoogte: 6,9 km/s
- 24.000 km hoogte: 3,6 km/s
- 35.786 km hoogte: 3,1 km/s

Deze grote snelheden betekenen dat elk object een enorme hoeveelheid kinetische energie heeft. Kijkend naar het scenario waar een klein deeltje ruimtepuin van één gram op 400 kilometer hoogte in tegengestelde richting in botsing komt met een operationele satelliet, dan is de energie die daarbij vrijkomt:



Figuur 2. De ontwikkeling van het aantal objecten in de ruimte van 1957-2021 Bron: [8] TU Delft.



Figuur 3. Overzicht van de verschillende veelgebruikte satellietbanen [11], afbeelding aarde: Freepik.com.



Figuur 4. Een RF monitoring station waarmee satellieten gevolgd kunnen worden in hun baan [12]. Foto: Ham Lince 1.0.

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot 0,001 \cdot (2 \cdot 7,67 \cdot 10^3)^2 = 118 \text{ kJ}.$$

Dat is ongeveer de kinetische energie van een middenklasse auto (1200kg) in de bebouwde kom (50km/u). De grote kinetische energie maakt dat ook kleine stukjes ruimtepuin een groot gevaar opleveren voor satellieten. Grofweg wordt aangehouden dat een botsing met een stuk ruimtepuin groter dan 10 cm een satelliet compleet verwoest, een stuk van 1 cm tot 10 cm minstens voor grote schade zorgt en dat de afscherming van de satelliet in staat moet zijn stukken kleiner dan 1 cm tegen te houden. Dat laatste houdt trouwens niet in dat er door deze deeltjes geen schade ontstaat. Alles is afhankelijk van de plaats van de inslag; een zonnecel is bijvoorbeeld niet te beschermen, omdat deze direct moeten worden blootgesteld aan zonlicht. Een directe impact is niet het enige risico dat een satellietoperator tegenkomt. Sommige satellietoperators kunnen hun satelliet iets bewegen om een object te vermijden. Dit veroorzaakt echter wel hoge kosten: de operators moeten mankracht beschikbaar stellen om alles in de gaten te houden en mogelijke botsingen op tijd op te merken, er moet in kaart gebracht worden welke acties mogelijk zijn om het gevaar te ontwijken, de brandstof van een satelliet moet gebruikt worden om uit te wijken en tijdens de uitwijkactie kan de satelliet geen data vergaren. Dit kost satellietoperators jaarlijks enorm veel geld [10].

Banen om de aarde

Er zijn verschillende banen waarin een satelliet geplaatst kan worden. De keuze is afhankelijk van de missie van de satelliet: een aardobservatiesatelliet wordt bijvoorbeeld vaak in een lage baan geplaatst, zodat de beelden een goede resolutie hebben zonder dat een zeer grote (en zware) camera noodzakelijk is. Communicatiesatellieten hebben juist een groot dekkingsgebied nodig en worden daarom vaak in hogere banen geplaatst.

Low Earth Orbit (LEO)

Een lage baan (LEO) reikt typisch tot ongeveer 2000 km boven het aardoppervlak. Hier bevinden zich satellieten die de aarde observeren, maar ook constellaties van communicatiesatellieten (Iridium, StarLink). Typische snelheden van objecten in deze banen zijn tussen de 7 en 8 km/s. Het nadeel van satellieten in deze baan is dat ze een beperkte dekking hebben op het aardoppervlak en bewegen ten opzichte van het aardoppervlak.

Medium Earth Orbit (MEO)

De meeste satellietnavigatieconstellaties (GPS, Galileo, GLONASS) bevinden zich in een MEO-baan tussen de 19.000 en 24.000 km. De satellieten in deze baan bewegen zich met snelheden die ongeveer de helft zijn van die in een lage baan en hebben een grotere dekking op het aardoppervlak (ongeveer een derde van de hele aarde).

Geostationary of Geosynchronous orbit (GEO)

Satellieten in een geostationaire baan bevinden zich op precies 35.786 km van het aardoppervlak. Op deze hoogte is de snelheid van de satellieten zodanig laag (ongeveer 3 km/s) en de omtrek van de baan zo groot dat ze precies meedraaien met de aarde. Als de baan precies in het vlak van de evenaar wordt gekozen, staan de satellieten stil ten opzichte van het aardoppervlak. Satellieten die worden gebruikt voor televisie of communicatie maken vaak gebruik van deze baan. Daardoor hoeven mensen die via de satelliet tv kijken niet continu de positie van hun schotel aan te passen. Omdat deze baan zo gewild is, is de GEO-baan de enige baan waar een internationale instantie de plaatsing van satellieten coördineert: de ITU (International Telecommunication Union). Deze coördinatie omvat zowel de plek waar de satelliet mag staan als de frequentie waarop hij mag communiceren, zodat vermeden wordt dat de satellieten elkaar storen. Door de internationale afspraak dat de

ruimte toegankelijk is voor iedereen, is deze coördinatie echter niet bindend.

Highly Elliptical Orbit (HEO)

De laatste baan die veel voorkomt is een HEO-baan, waarbij een satelliet zich eerst boven het noordelijk halfrond zeer hoog bevindt en daarvoor vanaf de aarde bijna stil lijkt te staan, en daarna bij het zuidelijk halfrond zich zeer laag en snel over het aardoppervlak beweegt. Deze satellieten zijn bedoeld voor communicatie op hoge breedtegraden van het noordelijk halfrond, waar GEO-satellieten vaak slechte dekking hebben doordat het signaal door een groot stuk atmosfeer moet reizen voor het bij de ontvanger aankomt. Snelheden hier variëren van minder dan 3 km/s in het hoge gedeelte van de baan tot meer dan 8 km/s in het lage gedeelte.

Objecten in de ruimte detecteren en volgen

Zonder te weten waar de objecten in de ruimte zich bevinden, kan er ook niet gewerkt worden aan actieve risicovermijding. Om ruimteobjecten in kaart te brengen, kunnen verschillende sensoren worden gebruikt. Geen enkele sensor kan het volledige ruimtedomein in kaart brengen. Daarom is het nodig een goede mix van sensoren en locaties te hebben, zodat de beste *space situational awareness* (SSA) opgebouwd kan worden. De meest voorkomende sensoren zullen hieronder benoemd worden.

Telescoop

De meest gebruikte sensor om ruimteobjecten te observeren is een telescoop. De lichtreflectie van de zon op de satelliet wordt door de telescoop opgevangen en verwerkt tot een positie. Deze positie wordt bepaald aan de hand van de positie van de sterren en kan heel nauwkeurig worden bepaald. De hoogte van de satelliet valt er niet uit af te leiden.

De beste tijd om een telescoop te gebruiken is in het donker. Dan zijn

de satellieten het beste te onderscheiden ten opzichte van de donkere hemel. Overdag is het verschil tussen de hemel en de reflectie van het zonlicht op de satelliet te klein. Ook bewolking kan ervoor zorgen dat satellieten niet te zien zijn. De hoeveelheid licht die de satelliet terugkaatst en op de telescoop valt, is afhankelijk van een aantal factoren: de grootte van de satelliet, de reflectiviteit van de materialen (wat vaak samenhangt met de grootte van de zonnecellen), de hoek naar de zon en de afstand van de satelliet tot de telescoop. Een kleine satelliet reflecteert weinig licht, maar omdat deze vaak in een lage baan zitten, kunnen ze – tot een bepaalde grootte – toch geobserveerd worden. Door de grote snelheid zien we echter geen lichtpunt op de foto, maar een lijn: de satelliet beweegt tijdens het maken van de observatie. Satellieten in een geostationaire baan daarentegen zijn vaak zeer groot en dragen grote zonnepanelen en antennes mee, waardoor ze veel licht reflecteren. Daarnaast kunnen de observaties met een zeer grote sluitertijd genomen worden (de positie aan de hemel staat immers toch vast ten opzichte van de aarde), dus is een telescoop ideaal om de geostationaire ring in kaart te brengen.

Radar

In tegenstelling tot een telescoop is een radar een sensor die zelf een signaal uitzendt, dat gereflecteerd wordt door de satelliet en weer opgevangen wordt door de radar. Hieruit volgt een zeer nauwkeurig bepaalde afstand met een goede indicatie van de hoeken ten opzichte van de sensor. Satellieten met vlakke kanten die naar de sensor wijzen hebben een goede reflectie. Hoe groter het oppervlak, hoe beter de reflectie. Doordat een radar zelf een signaal uitzendt en bovendien in een frequentiegebied dat geen hinder heeft van een wolkendek, kunnen ook overdag en bij slecht weer objecten geobserveerd worden. Dit is een groot voordeel ten opzichte



Figuur 5. GRAVES radar van de Franse Armée de l'Air et de l'Espace [13].
Foto: Armée de l'air.

van een telescoop. Er is echter ook een nadeel: het signaal van de radar verspreidt zich door de ruimte, het reflecteert op een satelliet en komt weer terug. Er blijft dus maar een klein restsignaal over dat weer bij de radar aankomt. De terugkerende intensiteit neemt af met de vierde macht van de afstand. Satellieten in hoge banen blijven hierdoor buiten bereik, behalve voor zeer krachtige (en dus dure) radarsystemen. Typische afstanden waarop satellieten over het algemeen geobserveerd

kunnen worden met een radar zijn slechts enkele duizenden kilometers, dus lage banen.

Laser

Een andere actieve sensor is de laser, waarmee een zeer nauwkeurige afstandsmeting uitgevoerd kan worden. Het is daarvoor nodig dat de satelliet die geobserveerd wordt een reflector meedraagt die het lasersignaal reflecteert. Niet alle satellieten zijn daarom geschikt om met een laser te observeren.

Een laserstraal is zeer gericht. Dit heeft als voordeel dat hij veel verder kan komen dan een radarbundel en dus ook op grote afstanden satellieten kan observeren (het is zelfs mogelijk een laser op de maan te richten en het reflectiesignaal weer op aarde terug te ontvangen, via reflectoren die op de maan zijn geplaatst). Het nadeel is dat de positie van de satelliet al bekend moet zijn om hem gericht te kunnen aanstralen. Het is dus geen sensor waarmee gemakkelijk nieuwe objecten gezocht kunnen worden, maar wel kan de positie van bekende objecten gecontroleerd worden.

Radio Frequency monitoring

Radio Frequency monitoring is het observeren en analyseren van signalen die satellieten uitzenden. Uit deze signalen wordt bepaald wat de dopplerverschuiving is van het signaal tijdens de overkomst. Hieruit kan de baan van de satelliet afgeleid worden. Een RF-monitor is dus ook een passieve sensor, die afhankelijk is van uitzendingen van de satelliet. Als de satelliet 'stil' is, of als er gezocht wordt naar ruimtepuin (dat geen radiosignalen uitzendt), dan is een RF-monitoringstation dus niet geschikt.

Combinaties van sensoren

Door de verschillende eigenschappen van de sensoren is het van belang dat er een juiste mix is om alle objecten nauwkeurig in kaart te brengen. Idealiter worden ze zo gekozen dat ze elkaars beperkingen opheffen. Als de observaties verzameld zijn, worden ze aan de hand van speciale algoritmes verwerkt tot een gemodelleerde baan van de satelliet. Deze algoritmes nemen daarbij ook de invloed van zwaartekracht, atmosfeer en mogelijk ruimteweer mee.

Uitdagingen

Door de grote snelheid van satellieten resulteert een zeer kleine afwijking of fout in de observatie al in een grote afwijking in de berekende baan. Ook de invloed van externe
