

Wanneer GPS faalt op het slagveld

Jamming GNSS geleide Air-to-Ground wapens en tegenmaatregelen

LTZ3 Jochem Ras BSc*

Dit artikel is gebaseerd op de bachelorscriptie van de auteur. Aanleiding waren berichten dat de door Oekraïne ingezette Amerikaanse JDAM-ER precisiebommen in de oorlog tegen Rusland minder effectief bleken dan verwacht. Gelekte rapporten wezen uit dat Russische elektronische tegenmaatregelen, in het bijzonder GPS-verstoring, de nauwkeurigheid van deze GPS-gestuurde wapens ernstig kunnen ondermijnen. Dit onderzoek richt zich daarom op de kwetsbaarheid van GPS-geleide Air-to-Ground (A2G) wapens en de rol van het Inertial Navigation System (INS) als back-up bij signaalverlies bij jamming. Hiervoor is een simulatiemodel ontwikkeld dat onderzoekt welke effecten invloed hebben op de nauwkeurigheid. De resultaten tonen aan dat zowel de jamming-to-signal (J/S) threshold van de ontvanger als de kwaliteit van de gebruikte INS bepalend is voor de nauwkeurigheid van A2G-wapens. Hogere J/S-thresholds en geavanceerdere INS beperken de negatieve effecten van jamming aanzienlijk.

Onlangs gelekte Amerikaanse inlichtingenrapporten hebben zorgen gewekt over de effectiviteit van de aan Oekraïne geleverde JDAM-ER-bommen. Hoewel deze GPS-gestuurde precisiewapens aanzienlijke voordelen zouden bieden bij het raken van Russische doelen, suggereren de rapporten dat Russische elektronische oorlogvoering, met name GNSS-jamming, hun nauwkeurigheid ernstig kan ondermijnen.¹ Voor de Koninklijke Luchtmacht is het daarom essentieel inzicht te krijgen in de mate waarin haar air-to-ground (A2G) wapens kwetsbaar zijn voor dergelijke verstoringen en welke maat-

regelen getroffen kunnen worden om de risico's te beperken.

Een Global Navigation Satellite System (GNSS) is een overkoepelende term voor verschillende satellietconstellaties. GNSS is tegenwoordig de ruggengraat van positiebepaling, navigatie en tijd in zowel civiele als militaire context. Het Amerikaanse GPS is het bekendste, maar ook het Europese Galileo, het Russische GLONASS en het Chinese BeiDou behoren hiertoe. Voor militaire operaties is het gebruik van GNSS cruciaal, maar ze vormen ook een kwetsbaarheid: doordat de signalen met een laag vermogen vanuit satellieten worden verzonden, zijn deze zwak bij ontvangst op aarde en kunnen vijanden ze relatief eenvoudig verstoren door middel van jamming.

Om deze kwetsbaarheid op te vangen beschikken A2G-wapens over een Inertial Navigation System

* LTZ3 Jochem Ras is leerling- vlieger voor de Koninklijke Marine. Dit artikel is gebaseerd op een bacheloronderzoek uitgevoerd aan de Nederlandse Defensie Academie (MS&T). De auteur dankt dr. R. Jurrius (NLDA) en ir. Y. Naaman (NLR) voor hun begeleiding. Aanvullende details zijn te vinden in de bijbehorende bachelorscriptie, beschikbaar via de NLDA-bibliotheek.

1 Ö. Ekşi, 'Leaked Documents Totters JDAM's Reputation', *TurDef.com*, februari 2024. Zie: <https://turdef.com/article/leaked-documents-totters-jdam-s-reputation>.



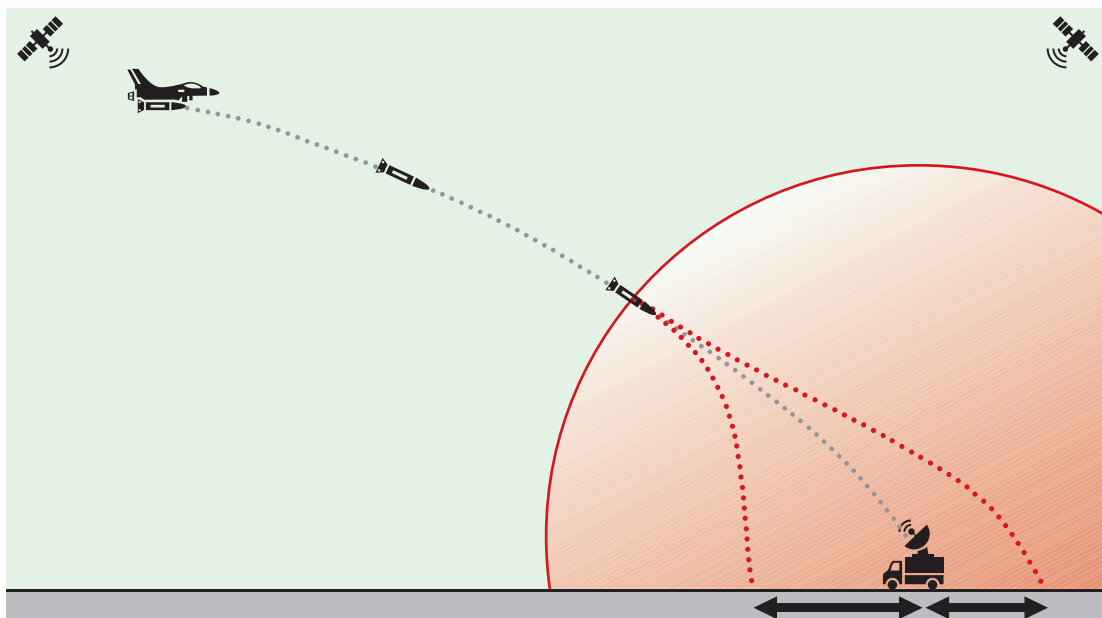
FOTO US NAVY, RYAN O'CONNOR

Personeel van de US Marines laadt JDAM's op het bomb rack van een F/A-18C Hornet aan boord van de carrier USS Harry S. Truman

(INS). Dit systeem combineert GNSS-gegevens met metingen van een Inertial Measurement Unit (IMU), die versnellingen en hoeksnelheden registreert. Bij verlies van GNSS-signalen schakelt het wapen over op INS-only navigatie. Dit zorgt ervoor dat de vlucht kan worden voortgezet zonder het hebben van een GNSS-positie. Hoewel een IMU zeer nauwkeurig kan meten, zorgt het wegvallen van het constant corrigeren via het GNSS-signaal ervoor dat de meetfouten in de loop van de tijd steeds groter worden.

Dit artikel kent de volgende hoofdvraag: Wat is de invloed van GNSS-jamming, GNSS-ontvangers en verschillende IMU's op de nauwkeurigheid van GNSS-geleide Air-to-Ground wapens in een scenario waarin GNSS-jamming plaatsvindt?

Om deze vraag te beantwoorden is een simulatiemodel gemaakt dat een A2G-scenario nabootst, zoals in figuur 1 te zien is. Hierin wordt een wapen gelanceerd vanaf een vliegend platform en met behulp van GNSS- en IMU-data naar zijn doel geleid. Tijdens de vlucht overschrijdt de Jamming-to-Signal (J/S) ratio op een bepaald



Figuur 1 Visuele weergave van het scenario. Het A2G-wapen navigeert in het groene gebied op basis van GNSS-data en IMU-data. Vanaf de rode cirkel zal de J/S-threshold worden overschreden en gaat het INS over op IMU-only navigatie. Hier neemt de onnauwkeurigheid toe met de tijd. Bron: J. Ras, Nauwkeurigheid van GNSS-geleide Air-to-Ground wapens in GNSS-ontzegd gebied (bachelorscriptie, Nederlandse Defensie Academie, Den Helder, 2025)

moment een kritische drempel, waardoor het GNSS-signaal wegvalt en het wapen overstapt op INS-only navigatie. Dit leidt tot toenemende onnauwkeurigheid, afhankelijk van verschillende factoren, zoals de mate van jamming-bestendigheid van de GNSS-ontvanger en de gebruikte IMU.

Eerst wordt het theoretisch kader geschetst waarin de onderwerpen GNSS-jamming, INS-navigatie en IMU-fouten worden toegelicht. Vervolgens wordt de opzet van het simulatiemodel en het gebruikte scenario beschreven. Daarna worden de resultaten gepresenteerd en geanalyseerd, met aandacht voor de invloed van jamming, ontvangerkwaliteit en IMU-keuze. Het artikel sluit af met conclusies over deze bevindingen voor de inzet van GNSS-geleide A2G-wapens.

Theoretisch kader

Zwakheden van GNSS-signalen

GNSS-signalen zijn bij ontvangst op aarde extreem zwak, vaak rond -160 dBW (decibel-Watt), omdat zij grote afstanden moeten overbruggen. GNSS-satellieten zenden hun signalen uit met een relatief laag vermogen van 25 tot 50 watt, dat is vergelijkbaar met het vermogen van een gloeilamp. Na een reis van circa 20.000 kilometer verzwakt dit signaal tot het genoemde niveau van ongeveer -160 dBW. Dit maakt GNSS-signalen gevoelig voor storingen, zowel onbedoelde, bijvoorbeeld door atmosferische effecten, als opzettelijke, zoals jamming en spoofing.²

Jamming werkt door sterke storingssignalen op dezelfde frequenties uit te zenden, waardoor het satelliet signaal overstemd raakt. De ontvanger ontvangt hierdoor slechts de storingssignalen en niet meer het originele satelliet signaal. Spoofing zendt daarentegen valse, maar plausibele signalen om een ontvanger te misleiden en een verkeerde positie te laten berekenen. In A2G-

² Inertial Labs, 'What are the limitations of GNSS?', oktober 2024. Zie: <https://inertiallabs.com/what-are-the-limitations-of-gnss>.

scenario's speelt spoofing doorgaans geen rol, omdat militaire systemen vaak met versleutelde GNSS-signalen werken, wat succesvolle spoofing technisch veel lastiger maakt. Daarom richt dit onderzoek zich primair op de effecten van jamming.

GNSS-signalen en varianten

Binnen GNSS zijn er verschillende signaaltypen met uiteenlopende eigenschappen en resistentie tegen verstoring. Civiele signalen (zoals het GPS C/A-signaal) zijn relatief eenvoudig te verstoren. Militaire signalen, zoals de GPS M-code, gebruiken bredere bandbreedtes en encryptie, wat hun weerstand tegen jamming en spoofing vergroot. Een jammer moet zijn energie dan namelijk over een groter spectrum verdelen, waardoor het effectieve storingsvermogen per frequentieband afneemt. Om dit te compenseren moet het

jammingsysteem of dichterbij staan, of met aanzienlijk meer vermogen uitzenden.

GNSS-jamming: principes en maatstaven

Bij jamming is de verhouding tussen het ontvangen vermogen van de jammer en die van het GNSS-signaal bepalend, uitgedrukt als de Jamming-to-Signal ratio (J/S). Voor praktische evaluaties wordt vaak een *J/S-threshold* gehanteerd: de maximale J/S-waarde waarbij een ontvanger nog bruikbare GNSS-data kan verkrijgen. Zodra deze drempel wordt overschreden, verliest de ontvanger het GNSS-signaal.

De hoogte van de J/S-threshold hangt sterk af van het type ontvanger, aanpassingen aan de ontvanger of het signaaltype. Zo kunnen ontvangers met bijvoorbeeld gerichte antennes,

Oefening van de Amerikaanse krijgsmacht met een high-power GPS jammer



die vooral naar de satellieten kijken, beter weerstand bieden tegen storingen. Toch verliezen ook deze systemen hun signaal wanneer de afstand tot de jammer klein genoeg wordt of het storingsvermogen hoog genoeg is.

Verschillende soorten jammers

Systemen voor jamming kunnen variëren van eenvoudige consumentenapparaten met bereik van enkele meters tot militaire systemen met tientallen kilometers bereik. Voorbeelden van operationele systemen (zoals sommige Russische mobiele jammers) tonen aan dat één mobiel platform meerdere GNSS-constellaties tegelijk kan verstoren.³ In dit onderzoek wordt in de simulatie een isotrope jammer gebruikt, dat wil zeggen een storingsbron die in alle richtingen even sterk uitzendt, om de effecten op ontvangers en INS-backups te analyseren.

Tegenmaatregelen tegen jamming

Tegen jamming bestaan meerdere technische maatregelen, zoals het vergroten van de signaalbandbreedte (bijvoorbeeld door M-code), het gebruik van adaptieve of gespreide antennes en verbeterde ontvangeralgoritmes, die de J/S-threshold verhogen. Daarnaast is het combineren van GNSS met alternatieve navigatietechnieken, zoals een INS/IMU, cruciaal om continuïteit te behouden wanneer het GNSS-signaal wegvalt. Een INS/IMU is namelijk ongevoelig voor jamming, omdat het zijn positie

en beweging berekent op basis van de versnellingen en bewegingen van het object zelf. Het heeft alleen een beginpunt nodig en kan van daaruit de positie blijven doorrekenen. In de praktijk blijkt deze gecombineerde aanpak de meest robuuste oplossing tegen sterke storingsbronnen.

IMU: werking en foutbronnen

Een Inertial Measurement Unit (IMU) meet versnellingen en hoeksnelheden met versnellingsmeters en gyroscopen. Door integratie van deze metingen ten opzichte van een bekende beginpositie kan een IMU de positie, snelheid en oriëntatie volgen. IMU's kennen deterministische fouten (zoals bias, schaalfactorfout en *turn-on bias*) die gekalibreerd kunnen worden, en stochastische fouten (witte ruis, bruine ruis, *bias instability*) die naarmate de tijd vordert steeds groter kunnen worden.

De grootte van de fouten hangt sterk af van de gradatie van de IMU, zoals ook te zien is in tabel 1. De productclassificaties consument, industrieel, tactisch en navigatie verschillen daarom aanzienlijk in nauwkeurigheid na verloop van tijd: de fout van een consument-klasse IMU loopt na enkele minuten tot uren veel sneller op dan een navigatie-klasse IMU. Het grootste verschil tussen deze klassen zit niet alleen in formaat, maar vooral in prijs. Hoge kwaliteit navigatie-IMU's kunnen aanzienlijk duurder zijn, terwijl bij toepassingen zoals JDAM-bommen, die bekend staan om hun kostenefficiëntie, rekening gehouden moet worden met de kosten van deze componenten.

INS als hybride navigatiesysteem

Een Inertial Navigation System (INS) combineert IMU-metingen met periodieke GNSS-correcties om korte- en langetermijnnauwkeurigheid te verenigen. Wanneer GNSS beschikbaar is, corrigeert het INS de bias en drift van de IMU; bij verlies van GNSS schakelt het systeem over op IMU-only modus, waarna de positie onnauwkeuriger wordt naarmate het signaalverlies langer duurt. De snelheid waarmee de fout toeneemt hangt direct samen met de kwaliteit van de IMU: een betere IMU vertraagt de foutopbouw substantieel.

Gradatie	Tijd	1 s	10 s	60 s	10 min	1 uur
Consument		6 cm	6,5 m	400 m	200 km	39.000 km
Industrieel		6 mm	0,7 m	40 m	20 km	3.900 km
Tactisch		1 mm	8 cm	5 m	2 km	400 km
Navigatie		<1 mm	1 mm	50 cm	100 m	10 km

Tabel 1 Fouten over de tijd van verschillende sensorgradaties van Inertial Navigation Systems. Bron: VectorNav, Learn how to determine the INS error budget for your application (via: <https://www.vectornav.com/resources/inertial-navigation-primer/specifications--and--error-budgets/specs-inserrorbudget>)

3 Administrator, 'R-330ZH', ArmyRecognition, <https://www.armyrecognition.com/military-products/army/electronic-warfare/r-330zh-jamming-station-russia-uk>.

Geleide Air-to-Ground wapens

Geleide A2G-bommen (zoals JDAM-achtige kits) combineren stuurvlakken op de staart, een GNSS-ontvanger en een INS/IMU om een conventionele bom in een precisiewapen te transformeren. Onder ideale omstandigheden levert dit beperkte nevenschade op. In een omgeving met jamming verliest de GNSS-component echter zijn correcties; het wapen blijft dan op basis van IMU-navigatie vliegen, met lagere nauwkeurigheid tot gevolg.

Fabrieksopgaven en operationele rapporten geven indicaties van performanceverschillen in GNSS- versus IMU-only modus, maar exacte operationele waarden hangen sterk af van de gebruikte IMU en de vluchttijd, en juist deze gegevens worden niet graag gedeeld.

Methode

Opbouw van het simulatiemodel

Om de kwetsbaarheid van GNSS-geleide Air-to-Ground (A2G) wapens bij jamming te onderzoeken, is een simulatiemodel ontwikkeld dat de vlucht van een precisiebom nabootst. Dit model bestaat uit vier hoofdcomponenten:

1. Equations of Motion (EoM) beschrijven de beweging van het wapen onder invloed van zwaartekracht, luchtweerstand en lift;
2. Guidance module die het A2G-wapen naar het doel stuurt. Deze methode combineert navigatie richting het doel met de eis dat het projectiel met een vooraf ingestelde impacthoek inslaat. Daarnaast zorgt de module voor realistische bewegingsbeperkingen van het wapen, waardoor de berekende banen binnen de operationele limieten blijven;
3. GNSS-module bepaalt het omslagpunt tijdens de vlucht waarop het satelliet signaal door jamming onbruikbaar wordt. Hiervoor wordt de verhouding tussen het satelliet signaal en het storingssignaal (de J/S-ratio) berekend. Zodra het storingssignaal sterker is dan het GNSS-sig naal plus de drempelwaarde (J/S-threshold), valt de GNSS-navigatie uit;
4. INS-module simuleert hoe de interne sensoren van het wapen, de Inertial Measurement

Unit(IMU), de navigatie overnemen zodra het GNSS-sig naal wegvalt. De nauwkeurigheid van een IMU wordt beperkt door fouten in de versnellingsmeters en gyroscopen, die leiden tot drift in positie, snelheid en oriëntatie. In de simulatie is rekening gehouden met de belangrijkste stochastische foutbronnen:

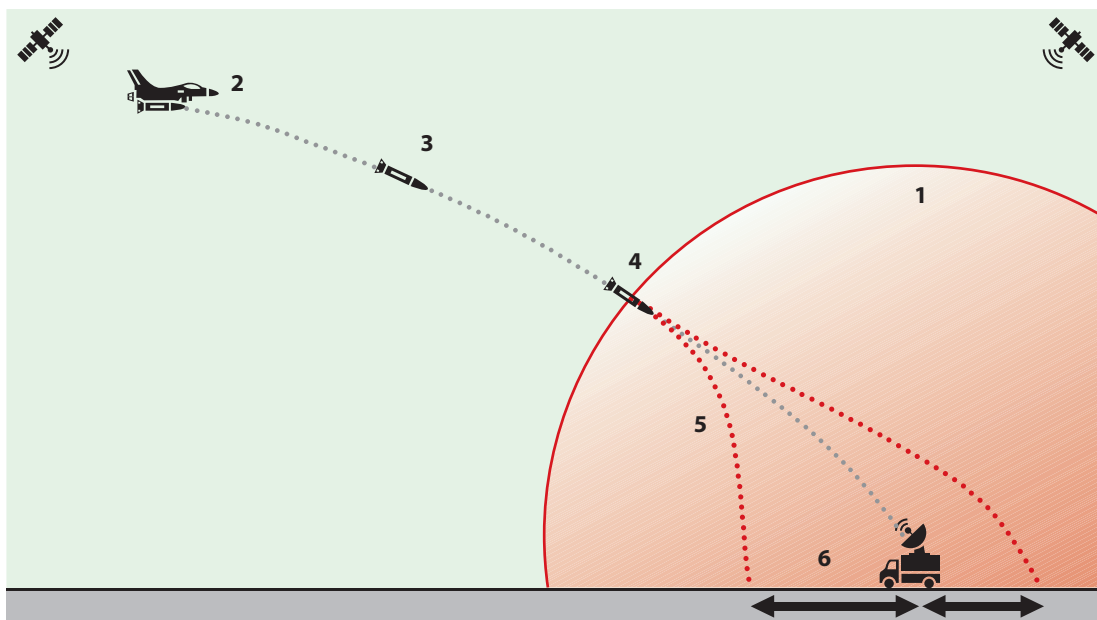
- Angular Random Walk (ARW) is een willekeurige ruis in de gyroscopen die leidt tot een fout in de berekende oriëntatie;
- Velocity Random Walk (VRW) is een willekeurige ruis in de versnellingsmeters die resulteert in een fout in de snelheid en positie.

Om de invloed van sensorkwaliteit te analyseren, zijn vier verschillende IMU's getest. Dit zijn hoogwaardige militaire modellen (zoals de Honeywell HG1700) tot compactere varianten (MEMS HG1900). Het verschil in de simulaties zit in hun ARW- en VRW-waarden. Juist de ARW en de VRW zijn specificaties die bekend zijn van de geteste IMU's. Deze waarden kunnen hierdoor in de simulatie worden verwerkt.

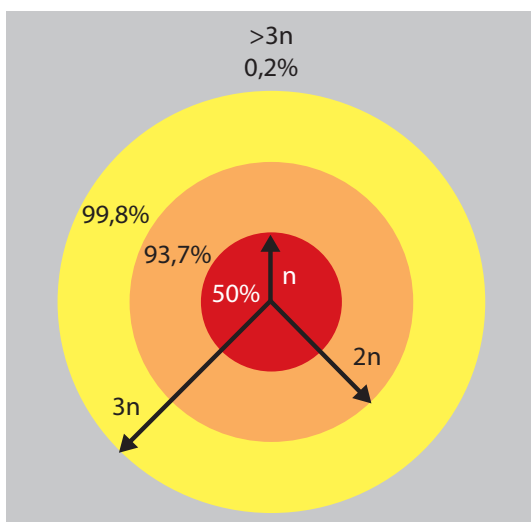
Simulatiescenario

De simulatie bootst een scenario na waarin een Air-to-Ground (A2G) wapen vanaf een vliegend platform wordt losgelaten en zijn doel nadert op basis van GNSS-signalen (in de simulatie: GPS). Zodra deze GPS-signalen door een jammer worden verstoord, schakelt het Inertial Navigation System (INS) over op IMU-only navigatie, wat leidt tot een toenemende positionele onnauwkeurigheid. Het scenario doorloopt de volgende fases in figuur 2:

1. Het doel is een jammer die een isotroop storingssig naal uitzendt;
2. Een A2G-wapen wordt losgelaten vanaf een vliegend platform op een bepaalde hoogte en afstand;
3. Het wapen navigeert in eerste instantie op basis van GPS-signalen; in de simulatie wordt het vliegp ad berekend met de guidance-module;



Figuur 2 Visuele weergave van het scenario. Het A2G-wapen navigeert in het groene gebied op basis GPS-data en IMU-data. Vanaf de rode cirkel zal de J/S-threshold worden overschreden en gaat het INS over op IMU-only navigatie. Hier neemt de onnauwkeurigheid toe met de tijd. Bron: J. Ras, Nauwkeurigheid van GNSS-geleide Air-to-Ground wapens in GNSS-ontzegd gebied (bachelorscriptie, Nederlandse Defensie Academie, Den Helder, 2025)



Figuur 3 Visuele representatie van de Circular Error Probable (CEP). In het rode gebied met straal n , bevindt zich 50% van de treffers. De oranje zone met straal $2n$, bevat 93,7% van de treffers, en de gele zone met straal $3n$, bevat 99,8%. Slechts 0,2% van de treffers valt buiten een straal van $3n$. Bron: J. Ras, Nauwkeurigheid van GNSS-geleide Air-to-Ground wapens in GNSS-ontzegd gebied (bachelorscriptie, Nederlandse Defensie Academie, Den Helder, 2025)

4. Wanneer de J/S-threshold wordt overschreden, raakt het GPS-sigitaal verstoord en schakelt de navigatie over op IMU-only;
5. Het INS vertrouwt uitsluitend op de IMU, waardoor de positionele fout in de loop van de vlucht toeneemt;
6. De uiteindelijke nauwkeurigheid wordt beoordeeld door de afwijking van het inslagpunt ten opzichte van het doel te analyseren (CEP).

Voor elke IMU-configuratie en J/S-threshold is de simulatie 500 keer uitgevoerd. De nauwkeurigheid van de inslagen is geëvalueerd met de Circular Error Probable (CEP), waarbij 50% van de treffers binnen de CEP-straal valt, 93,7% binnen $2 \times$ CEP en 99,8% binnen $3 \times$ CEP. In figuur 3 is dit visueel gemaakt. Door de J/S-threshold stapsgewijs met 0,5 dB te verhogen, wordt het effect van toenemende jammingbestendigheid op de nauwkeurigheid inzichtelijk gemaakt.

Resultaten

Effect van jamming en IMU-kwaliteit op de nauwkeurigheid van GNSS-geleide wapens

In dit deel worden de uitkomsten van de simulaties gepresenteerd en geanalyseerd. Daarbij is gekeken naar de spreiding van de inslagpunten onder invloed van jamming, de tijdsduur waarin het wapen gejammed werd, de mate van jammingbestendigheid en de invloed van verschillende typen IMU's. De resultaten maken inzichtelijk hoe de combinatie van GNSS-jamming, ontvangerkwaliteit en IMU-keuze de nauwkeurigheid van een GNSS-geleide precisiebom beïnvloeden.

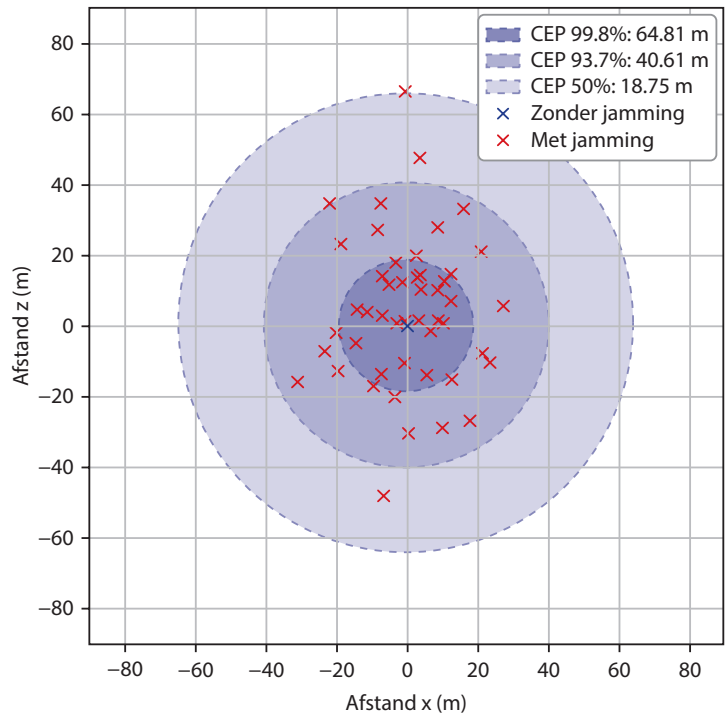
Spreiding van inslagpunten bij een vaste J/S-threshold

Om de effecten van jamming inzichtelijk te maken, is eerst gekeken naar de spreiding van inslagen bij een vaste J/S-threshold. Figuur 4 toont de resultaten van 50 gesimuleerde vluchten met de Honeywell HG1700AG68 IMU en een J/S-threshold van 72 dB. Elk kruisje in de scatterplot staat voor een afzonderlijke inslag. De spreiding rond het doel laat zien dat het wapen onder deze omstandigheden aanzienlijk aan precisie verliest.

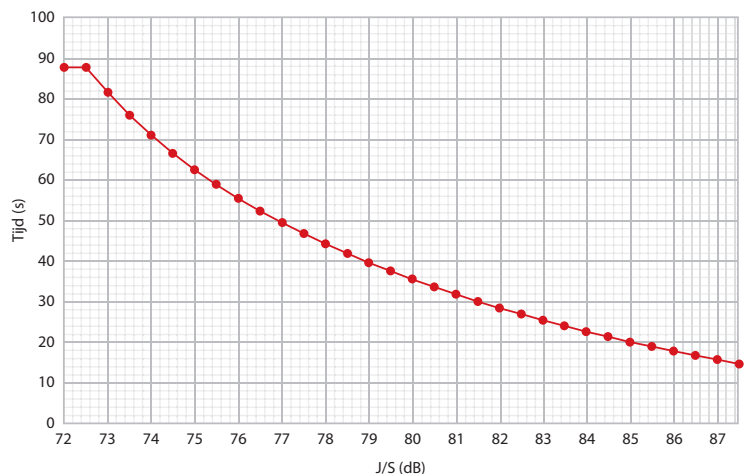
In de uiteindelijke analyses zijn de simulaties telkens 500 keer herhaald om voldoende statistische betrouwbaarheid te garanderen. Op basis hiervan is voor elk scenario de Circular Error Probable (CEP) berekend, oftewel de straal waarbinnen 50% van de treffers valt. Vervolgens wordt de J/S-threshold verhoogd en wordt de simulatie weer opnieuw gestart.

Tijdsduur van jamming tijdens de vlucht

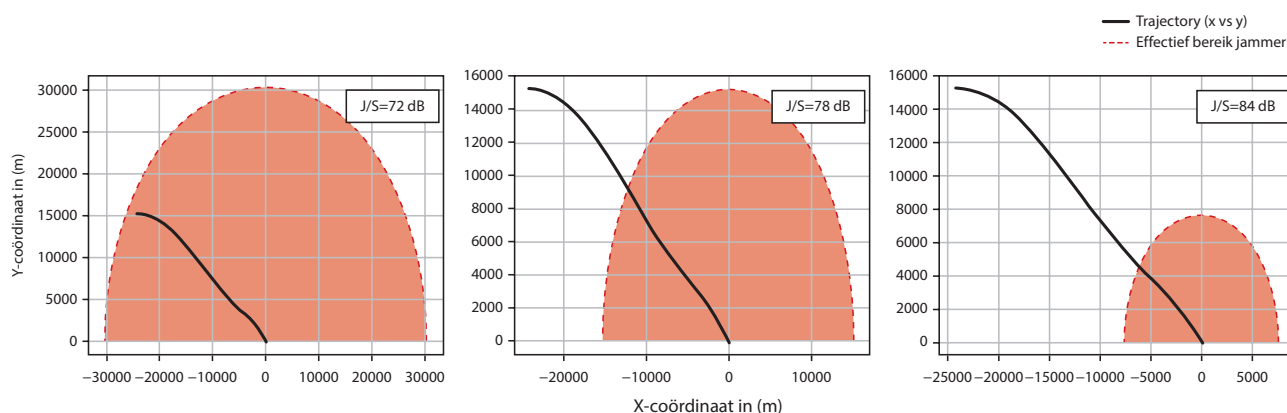
Naast de spreiding van de treffers is ook onderzocht hoe lang het wapen tijdens zijn traject werd blootgesteld aan jamming. Figuur 5 toont de tijd dat het wapen zonder GNSS-sigitaal heeft gevlogen bij verschillende J/S-thresholds. Dit geeft inzicht in de mate waarin een wapen afhankelijk is van IMU-only navigatie en laat zien dat de totale foutopbouw sterk afhangt van de drempelwaarde van de GNSS-ontvanger.



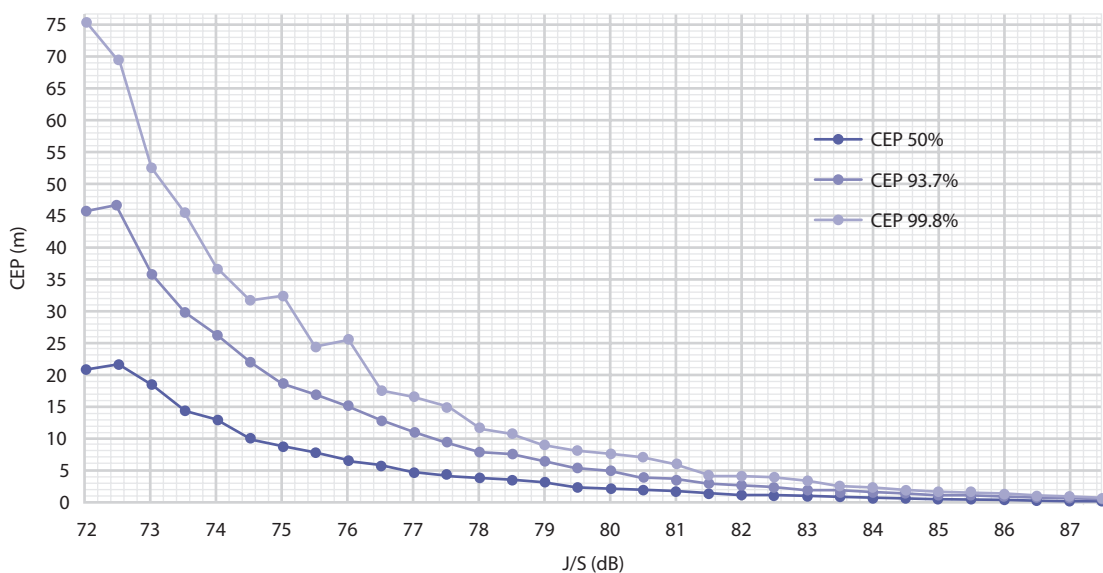
Figuur 4 Scatterplot van de inslagen van 50 simulaties met een J/S-threshold van 72 dB en de HG1700AG68 als IMU. Bron: J. Ras, Nauwkeurigheid van GNSS-geleide Air-to-Ground wapens in GNSS-ontzegd gebied (bachelorscriptie, Nederlandse Defensie Academie, Den Helder, 2025)



Figuur 5 De J/S-threshold van de GNSS-ontvanger van het A2G-wapen, uitgezet tegen de tijd dat het A2G wapen gejammed is gedurende het gehele vliegtraject. Bron: J. Ras, Nauwkeurigheid van GNSS-geleide Air-to-Ground wapens in GNSS-ontzegd gebied (bachelorscriptie, Nederlandse Defensie Academie, Den Helder, 2025)



Figuur 6 Het gewenste vliegtraject van het A2G wapen in het xy-vlak, waarbij in het rood het effectieve bereik van de jammer wordt getoond, voor drie verschillende J/S-thresholds. Bron: J. Ras, Nauwkeurigheid van GNSS-geleide Air-to-Ground wapens in GNSS-ontzegd gebied (bachelorscriptie, Nederlandse Defensie Academie, Den Helder, 2025)



Figuur 7 J/S-thresholds uitgezet tegen CEP-afstanden, berekend voor de Honeywell HG1700AG68. Bron: J. Ras, Nauwkeurigheid van GNSS-geleide Air-to-Ground wapens in GNSS-ontzegd gebied (bachelorscriptie, Nederlandse Defensie Academie, Den Helder, 2025)

Ter ondersteuning toont figuur 6 het geplande vliegtraject en het effectieve bereik van de jammer bij drie verschillende drempelwaarden. Hieruit blijkt dat een lagere J/S-threshold leidt tot een groter effectief jamming-bereik. Dit

betekent dat het wapen langer in de verstoorde zone vliegt en dus meer tijd uitsluitend op IMU-navigatie moet vertrouwen.

Invloed van IMU-kwaliteit op de nauwkeurigheid

Vervolgens is gekeken naar de invloed van verschillende IMU's. Vier Honeywell-modellen zijn vergeleken, wat realistische IMU's zijn voor het gebruik in A2G-wapens:⁴

4 Aviation Week, 'Honeywell to build 8,000 JDAM inertial measurement units', december 2019, <https://aviationweek.com/honeywell-build-8000-jdam-inertial-measurement-units>.

- HG1700AG68
- HG1700AG37
- HG1900AA50
- HG1900CA50

De resultaten laten zien dat de nauwkeurigheid van de inslag sterk samenhangt met de J/S-threshold én de kwaliteit van de IMU.

Figuur 7 toont de CEP-afstanden voor de HG1700AG68, waarbij drie betrouwbaarheidspercentages zijn weergegeven: 50%, 93,7% en 99,8%. Bij lage thresholds (72 dB) bedraagt de CEP 50% circa 20 meter, terwijl de CEP 99,8% boven de 70 meter ligt. Naarmate de thresholds toenemen, nemen alle CEP-waarden duidelijk af. Boven 85 dB zijn de afwijkingen minimaal en naderen de inslagen vrijwel het doel.

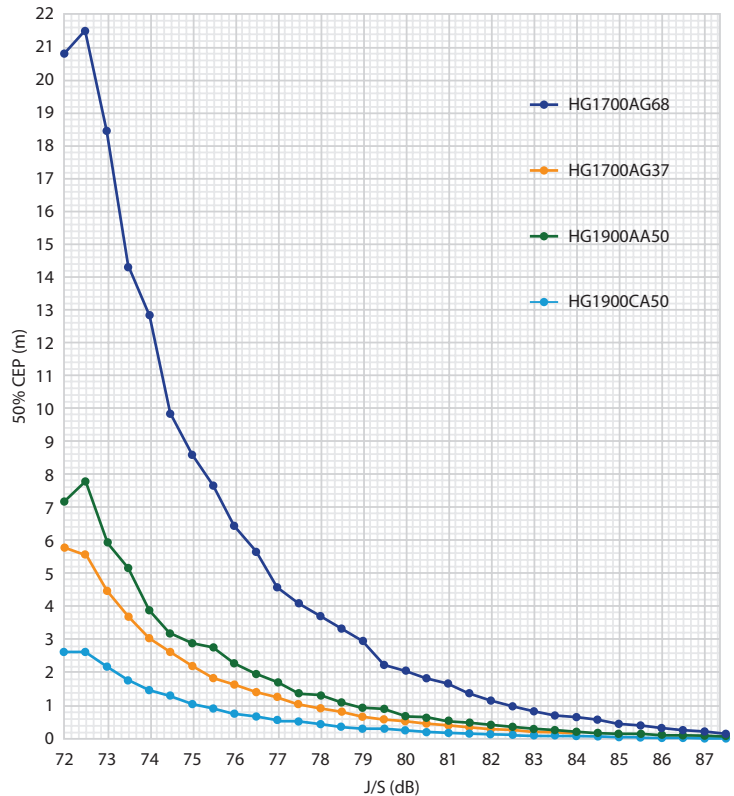
Een opvallend detail is dat de CEP 99,8%-curve fluctuaties laat zien. Dit komt doordat de simulatie per J/S-threshold 500 keer is herhaald, en dit maakt de uiterste percentielen gevoeliger voor variaties. Om deze fluctuaties eruit te halen zou de simulatie nog vaker gedraaid moeten worden.

In Figuur 8 zijn de CEP50-waarden van alle vier de IMU's vergeleken. Dit bevestigt dat de IMU-kwaliteit een belangrijke factor is, met name bij lage drempelwaarden. Bij 72 dB scoort de HG1700AG68 het slechtst (meer dan 20 meter afwijking), terwijl de HG1900CA50 aanzienlijk beter presteert en ook bij lagere thresholds relatief nauwkeurig blijft.

Trends en betekenis

Samenvattend laten de resultaten zien dat:

- Bij lage J/S-thresholds de spreiding van treffers aanzienlijk groter is, wat leidt tot verlies van precisie;
- De totale foutafwijking samenhangt met de tijd dat het wapen binnen het effectieve bereik van de jammer vliegt;
- De keuze van de IMU een doorslaggevende rol speelt bij de mate waarin nauwkeurigheid behouden blijft tijdens jamming;



Figuur 8 J/S-thresholds uitgezet tegen de CEP 50%-afstanden voor alle vier de IMU-modellen. Bron: J. Ras, *Nauwkeurigheid van GNSS-geleide Air-to-Ground wapens in GNSS-ontzegd gebied* (bachelorscriptie, Nederlandse Defensie Academie, Den Helder, 2025)

- Bij hoge thresholds (boven circa 85 dB) de invloed van jamming vrijwel volledig verdwijnt en alle IMU-modellen convergeren naar een CEP dichtbij nul.

Deze bevindingen maken duidelijk dat zowel de GNSS-ontvanger als de IMU-kwaliteit bepalend is voor de effectiviteit van GNSS-geleide A2G-wapens in een omgeving met vijandelijke elektronische verstoring.

Conclusie en discussie

Effect van GNSS-jamming en sensorkwaliteit op A2G-nauwkeurigheid

Dit onderzoek laat zien dat GNSS-jamming een aanzienlijke impact kan hebben op de nauw-

keurigheid van GNSS-geleide Air-to-Ground (A2G) wapens. De mate waarin precisie verloren gaat blijkt sterk afhankelijk van de samenhang tussen de jammingsbestendigheid van de GNSS-ontvanger, de duur van GNSS-uitval en de kwaliteit van de toegepaste Inertial Measurement Unit (IMU).

Een eerste belangrijke bevinding is dat de kwaliteit van de IMU doorslaggevend wordt zodra het wapen gedurende langere tijd uitsluitend op INS-navigatie is aangewezen. Waar geavanceerdere IMU's, zoals modellen uit de Honeywell HG1900-serie, ook bij een volledig gejammed traject nog bruikbare nauwkeurigheid konden behouden, leidde het gebruik van minder nauwkeurige IMU's tot een aanzienlijk grotere spreiding van inslagen en daarmee tot een beperktere operationele inzetbaarheid. Daarnaast blijkt de mate van jammingsbestendigheid van de GNSS-ontvanger een bepalende factor. Een hogere J/S-threshold vertaalt zich direct naar betere prestaties, omdat het wapen langer GNSS-correcties kan blijven ontvangen voordat het moet overschakelen op IMU-only navigatie. Uit de simulaties blijkt dat bij een J/S-threshold boven circa 85 dB de effecten van jamming, voor het in deze studie gemodelleerde jammerscenario, grotendeels konden worden gecompenseerd en de navigatiefout beperkt bleef. Tegelijkertijd moet worden benadrukt dat het in de praktijk onzeker is welke J/S-thresholds technisch en operationeel haalbaar zijn.

Navigatiefout, validatie en beperkingen

De verkregen fout uit de simulaties betreft uitsluitend de navigatiefout. Deze vormt slechts één component van de totale fout bij wapeninzet; ook *guidance*-fouten en *target location errors* dragen bij aan de uiteindelijke operationele afwijking. Desondanks laten de resultaten zien dat verbeteringen in IMU-kwaliteit en GNSS-jammingsbestendigheid de navigatiefout significant kunnen verkleinen, waardoor

de totale fout beter beheersbaar wordt.

Om de geloofwaardigheid van de resultaten te toetsen, zijn de simulatie-uitkomsten vergeleken met bekende operationele data. JDAM-specificaties geven aan dat bij verlies of jamming van het GPS-signaal een CEP van 30 meter of minder wordt behaald bij een vrije vluchttijd tot 100 seconden.⁵ In dit onderzoek bedroeg de totale vluchttijd 88 seconden, wat een vergelijkbare of iets kleinere CEP doet verwachten. Daarnaast tonen testprogramma's van de U.S. Air Force aan dat JDAM-systemen met verbeterde anti-jam GPS/INS in sterk verstoorde omgevingen CEP's van circa 4,4 meter kunnen bereiken (exclusief *target location error*).⁶ De in dit onderzoek gevonden CEP50-waarden van 21, 7, 6 en 2,6 meter voor een volledig gejammed traject, afhankelijk van de gebruikte IMU, vallen binnen dezelfde orde van grootte en bevestigen dat het simulatiemodel een realistische benadering biedt van de werkelijke prestaties.

Bij de interpretatie van deze resultaten moet rekening worden gehouden met enkele beperkingen. Zo is aangenomen dat deterministische IMU-fouten vooraf zijn gekalibreerd en dat de initiële GNSS-positie foutloos is. Ook is de jammer gemodelleerd als een isotrope bron met een antenneversterking van 3 dB, terwijl operationele jammers vaak beschikken over gerichte antennes en hogere vermogens. De gehanteerde J/S-thresholds geven daarom vooral inzicht in trends en gevoeligheden en mogen niet zonder meer als praktisch haalbaar worden beschouwd. Daarnaast is de JDAM ontworpen als kostenefficiënt precisiewapen, waardoor het toepassen van de hoogst mogelijke IMU-kwaliteit of extreem jammingsbestendige ontvangers niet per definitie de meest rendabele keuze is.

Operationele relevantie en implicaties

Tegen deze achtergrond bieden de resultaten ook een eerste duiding van de operationele relevantie. Jammers zijn complexe systemen en de exacte capaciteiten van vijandelijke jammers zijn in de praktijk vaak slechts beperkt bekend. De in deze studie gebruikte jammerconfiguratie vormt echter een redelijke schatting van een potentiële dreiging. Binnen dit kader laten de simulaties zien dat conventionele JDAM-

5 Wikipedia-bijdragers, 'Joint Direct Attack Munition', *Wikipedia*, maart 2025. Zie: https://en.wikipedia.org/wiki/Joint_Direct_Attack_Munition.

6 J. Pike, 'Joint Direct Attack Munition (JDAM)', *GlobalSecurity.org*. Zie: <https://www.globalsecurity.org/military/systems/munitions/jdam-antijam.htm>.



Werk aan een GPS airborne jammer rack op luchtmachtbasis Holloman in New Mexico

FOTO US AIR FORCE, ISAIAH PEDRAZZINI

systemen met korte vluchttijden, in de orde van 100 seconden, zelfs onder volledige GNSS-jamming met vrijwel elke onderzochte IMU nog een aanzienlijke mate van robuustheid en effectiviteit behouden. Dit suggereert dat dergelijke systemen, binnen de aannames van dit onderzoek, relatief ongevoelig zijn voor GNSS-jamming zolang de blootstellingsduur beperkt blijft.

De situatie kan echter wezenlijk veranderen bij langere vliegtijden, zoals bij extended-range varianten (JDAM-ER). Deze varianten kennen een vliegtijd die tot ongeveer drie keer langer kan zijn dan die van conventionele JDAM's, waardoor ook de blootstelling aan GNSS-jamming aanzienlijk toeneemt. Juist over deze systemen verschenen recente berichten waarin hun effectiviteit onder GNSS-jamming ter discussie werd gesteld.¹ Dit onderzoek richtte zich daarom bewust op de kortere afstandsvarianten, om vast te stellen of ook deze systemen kwetsbaar zijn. De resultaten wijzen erop dat dit voor

short-range JDAM's, binnen het gesimuleerde scenario, niet of slechts in beperkte mate het geval is. Over de exacte gebruikte IMU's of specifieke varianten binnen nationale capaciteiten worden in dit artikel geen uitspraken gedaan.

Samenvattende conclusie

Samenvattend laat dit onderzoek zien dat de kwetsbaarheid van GNSS-geleide A2G-wapens sterk contextafhankelijk is. Bij korte vluchttijden en beperkte GNSS-uitval blijken deze systemen robuust, zelfs in een verstoorde omgeving. Naarmate de GNSS-uitval langer duurt en de vliegtijd toeneemt, wordt de kwaliteit van zowel de IMU als de GNSS-ontvanger steeds bepalender voor de uiteindelijke nauwkeurigheid. Daarmee biedt dit onderzoek handvatten voor een beter onderbouwde afweging tussen prestaties, kosten en operationele inzetbaarheid van GNSS-geleide precisiewapens in een omgeving met elektronische verstoring. ■