GNSS信号干渉の脅威：過去の経緯、現状の課題、および将来展望

1. 序論 (Introduction)

GNSSの現代社会における不可欠性と信号干渉問題の深刻化 (The Indispensable Role of GNSS in Modern Society and the Escalating Problem of Signal Interference)

全地球航法衛星システム（GNSS）は、米国のGPS、ロシアのGLONASS、欧州のGalileo、中国のBeiDou、そして日本の準天頂衛星システム「みちびき」（QZSS）などを含み、現代社会における測位（Positioning）、航法（Navigation）、時刻同期（Timing）—総称してPNT—サービスの根幹を成している。これらのシステムは、経済活動、国家安全保障、市民生活のあらゆる側面に深く浸透しており、その恩恵は計り知れない[1]。実際、GNSSの機能停止は広範囲にわたる深刻な影響を引き起こしうることが指摘されている[9]。

しかしながら、GNSSはその利便性の裏で、信号の脆弱性という大きな課題を抱えている。この脆弱性に起因する信号干渉問題は、偶発的なものから悪意のある妨害行為に至るまで、その形態を多様化・深刻化させており、社会経済システムに対する重大な脅威として認識され始めている[7]。現代社会がGNSSに深く依存する構造となっていることは、干渉によるPNTサービスの途絶が単なる機能停止に留まらず、連鎖的に重要インフラの麻痺を引き起こす可能性を示唆している。金融、電力網、通信、運輸といった基幹産業は、GNSSの正確な時刻同期や測位情報に大きく依存しており[3]、GNSSへの攻撃は、これらの分野全体への間接的な攻撃となり得る。その波及効果は、PNT情報の直接的な損失を遥かに超える規模に達する可能性がある。

さらに、干渉技術の民主化とも言える状況、すなわち安価なジャマーやオープンソースのスプーフィングソフトウェアの出現は[8]、脅威の様相を根本的に変えつつある。従来、高度な干渉攻撃は国家レベルの主体によるものと想定されていたが、現在ではより広範な悪意を持つ組織や個人による攻撃も現実的な脅威となっている[8]。この状況は、国家レベルの防衛策に加え、利用者レベルでの対策や意識向上、さらには干渉装置の流通規制といった新たなアプローチの必要性を示している。

本報告書は、このGNSS信号干渉問題の全体像を専門的見地から深く掘り下げ、その技術的背景、歴史的経緯、現状の課題、そして将来の展望を包括的に提示することを目的とする。

本報告書の目的、範囲、および構成 (Purpose, Scope, and Structure of this Report)

本報告書は、GNSS信号干渉問題に関する包括的な分析を提供し、過去の事例から学び、現在の技術的・政策的課題を明らかにし、将来の脅威と対策の方向性を示すことを目的とする。具体的には、干渉の物理的メカニズム、GNSSシステムへの影響、過去の主要な干渉事例（国内外）、現在および開発中の対策技術、各国の政策動向と国際協力の枠組み、そして将来予測される脅威の進化とそれに対する戦略的アプローチについて詳述する。

報告書の構成は以下の通りである。まず、GNSS信号の基本原理と干渉の分類・影響について解説する。次に、世界及び日本国内における主要な干渉事例を時系列で概観し、その教訓を抽出する。続いて、受信機技術、アンテナ技術、システムレベルでの耐性強化策、代替PNT技術といった多岐にわたる対策技術の現状と将来性を評価する。さらに、日本国内の省庁、研究機関、企業の取り組みを紹介するとともに、米国、欧州、ロシア、中国などの主要国・地域の政策動向や、ITU、ICAO、IMO、ICGといった国際機関の役割と提言を分析する。最後に、これらを踏まえ、GNSS信号干渉の将来展望と克服すべき課題を提示し、技術開発、政策推進、国際連携強化に向けた具体的な提言を行う。

2. GNSS信号干渉の基礎的理解 (Fundamental Understanding of GNSS Signal Interference)

GNSS測位の基本原理と信号特性 (Basic Principles of GNSS Positioning and Signal Characteristics)

GNSSによる測位は、基本的には三辺測量の原理に基づいている。複数のGNSS衛星から送信される信号を受信し、各衛星までの距離を測定することで受信機の位置を特定する[1]。各衛星は、自身の精密な軌道情報（エフェメリス）と正確な時刻情報を含む航法メッセージ、衛星固有の識別コードであるPRN（Pseudo-Random Noise）コード、そしてこれらの情報を乗せる搬送波をLバンド（主にL1, L2, L5帯）で送信する[30]。

GNSS信号の最も顕著な特性の一つは、その微弱さである。衛星が約2万kmという遠大な距離から信号を送信するため、地球上で受信される信号強度は極めて低く、例えばGPSのL1 C/A信号の場合、受信電力は-120dBmから-130dBm程度となる[7]。これは、他の多くの無線通信信号と比較して約100倍も弱く[13]、背景雑音レベルを下回ることもある[14]。この微弱性こそが、GNSS信号が干渉に対して脆弱である根本的な理由である。特別な信号処理技術を用いなければ、汎用の

高周波受信機では背景雑音の中から信号を「聞く」ことすら困難である[13]。この信号の弱さは、比較的低電力の衛星送信機で全地球をカバーすることを可能にする一方で、地上からのわずかな出力の干渉波によっても容易に影響を受けてしまうという、いわば諸刃の剣と言える。

干渉の種類とそのメカニズム (Types of Interference and Their Mechanisms)

GNSS信号への干渉は、その発生原因や意図の有無によって、偶発的干渉と意図的干渉に大別される。

偶発的干渉 (Unintentional Interference):
偶発的干渉は、悪意なく発生するもので、主に環境要因と他の電子機器からの不要電波が原因となる。

- **環境要因:**
  - **大気遅延:** GNSS信号は地球の大気圏を通過する際に遅延を受ける。電離層（高度約50〜1000km）ではプラズマの影響で、対流圏（高度約10kmまで）では水蒸気や気圧の影響で信号伝播速度が変化し、測位誤差の原因となる[32]。特に電離層の擾乱（太陽フレアや磁気嵐に伴うもの）は深刻な影響を及ぼすことがある[1]。
  - **マルチパス:** 信号が建物、地形、樹木などの障害物で反射し、直接波と反射波が干渉したり、遅れて到達した反射波を受信機が誤って直接波として処理したりすることで測位誤差が生じる[1]。特に高層ビルが密集する「都市峡谷」と呼ばれる環境では、この影響が顕著である[34]。
  - **信号遮蔽:** 樹木が密集した場所や屋内などでは、GNSS信号が遮蔽され、受信強度が低下したり、信号が完全に途絶したりすることがある[1]。
- 電磁両立性 (EMC) の問題:
  現代社会は多種多様な電子機器で溢れており、これらの機器から放射される電波がGNSS信号に干渉することがある。これらはスペクトル規制によりGNSS帯域内での放射は厳しく制限されているものの、帯域外（Out-of-Band）の強力な信号や、その高調波・相互変調積がGNSS帯域内（In-Band）に影響を及ぼすことがある 31。具体的には、テレビ・ラジオ放送塔、高圧送電線、レーダーシステム、産業機械、さらには家庭内の電子レンジや無線LANルータ、ワイヤレスカメラ、LED照明、太陽光発電システムのパワーコンディショナなども干渉源となりうる 13。例えば、日本では過去に工事現場のクレーンに設置されたワイヤレスカメラ 35 や、不適切な配線がされたテレビ受信用ケーブル 35 がGNSS受信に障害を引き起こした事例が報告されている。

意図的干渉 (Intentional Interference):
意図的干渉は、GNSSの利用を妨害したり、欺いたりすることを目的として行われる。

- ジャミング (Jamming):
  ジャミングは、GNSS信号が使用する周波数帯域に、意図的に強力な妨害電波やノイズを放射し、受信機が正規の衛星信号を正常に受信・追尾・復調することを不可能にする行為である 8。ジャマー（妨害装置）には、特定の周波数のみを狙う狭帯域ジャマー、広範囲の周波数に影響を与える広帯域ジャマー、周波数を掃引するチャープジャマー、断続的に妨害波を出すパルスジャマーなど、様々な種類が存在する 13。これらのジャミングにより、受信機における信号対雑音比（SNRまたはC/N0）が著しく低下し、最悪の場合、測位が完全に不可能になったり、追尾ループがロックを失ったりする 13。
- スプーフィング (Spoofing):
  スプーフィングは、正規のGNSS衛星信号を模倣した偽の信号を送信し、受信機を欺いて誤った位置情報や時刻情報を計算させる、より高度で悪質な攻撃である 8。攻撃手法は、単純に記録したGNSS信号を再放送するものから、受信機の追尾ループと同期を取り、徐々に偽信号の強度を上げて正規信号から引き離し、受信機を完全に制御下に置く「キャリーオフ攻撃（carry-off attack）」のような洗練されたものまで多岐にわたる 26。スプーフィングの最大の問題点は、受信機が偽のPNT情報を正しいものとして処理してしまうため、攻撃を受けていることに利用者が気づきにくく、結果として誤った判断や行動を誘発するリスクが高いことである 14。

ジャミングがGNSSの「可用性」を奪うサービス妨害であるのに対し、スプーフィングはPNT情報の「信頼性（インテグリティ）」を根本から揺るがす欺瞞行為であり、検知されなければより深刻な事態を引き起こす可能性がある。この脅威の質の変化は、単なるノイズ除去に留まらない、信号の真正性を検証する認証技術の重要性を浮き彫りにしている。

GNSS測位精度および可用性への影響 (Impact on GNSS Positioning Accuracy and Availability)

GNSS信号への干渉は、測位精度、可用性、信頼性（インテグリティ）の全てに悪影響を及ぼす。

- **測位精度の低下:** 干渉によりC/N0が劣化すると、測位計算に用いられる擬似距離測定値のノイズが増加し、測位誤差が数メートルから数百メートル、あるいはそれ以上に増大する[13]。
- **可用性の低下:** 強力な干渉下では、受信機は衛星信号の追尾を維持できなくなり、測位解が得られなくなる（測位不能）。また、高精度なRTK（Real Time Kinematic）測位モードから、より精度の低い単独測位モードへのフォールバックを余儀なくされることもある[13]。これにより、高精度測位を前提とするアプリケーション（例えば、ド

ローンの自律飛行や精密農業機械の自動操舵）は機能不全に陥る可能性がある[13]。
- **信頼性（インテグリティ）の喪失:** 特にスプーフィング攻撃の場合、受信機は誤った位置や時刻を正しい情報として出力し続けるため、PNT情報の信頼性が著しく損なわれる[14]。これは、利用者が誤情報に基づいて危険な判断を下すリスクを高める。例えば、航空機が誤った飛行経路を辿ったり、船舶が危険水域に進入したりする事態が想定される。

干渉はまた、受信機が最初の測位解を得るまでの時間（TTFF: Time To First Fix）を増大させ、特にバッテリー駆動のデバイスでは消費電力の増加にも繋がる[36]。

3. GNSS信号干渉の歴史的経緯と主要事例 (Historical Trajectory and Major Incidents of GNSS Signal Interference)

GNSS信号干渉の歴史は、初期の偶発的なものから、近年ではより意図的かつ組織的な活動へとその様相を変えてきている。特に紛争地域や地政学的に緊張が高い地域では、GNSS干渉が常態化しつつある。

世界的な干渉事例の変遷と顕著なインシデント (Evolution of Global Interference Incidents and Notable Events)

GNSS干渉の報告は年々増加しており、その手口も巧妙化している。以下に主要なインシデントと傾向を示す。

- **アゼルバイジャン航空機墜落事故（2024年末、グロズヌイ）:** 2024年末、アゼルバイジャン航空のエンブラエルE190型機がロシア連邦チェチェン共和国の首都グロズヌイへの着陸進入中に墜落した事故は、GPS妨害が要因の一つとして調査されている。ロシア当局は当時、ウクライナのドローン攻撃に対応するためGPS妨害を行っていたことを認めている[69]。一部報道では、ロシア側の対空ミサイルシステムも干渉の影響を受け、民間航空機を正しく識別できなかった可能性が指摘されており[69]、GNSS干渉が航空安全に及ぼす深刻な影響を改めて浮き彫りにした[19]。
- **中東・北アフリカ（MENA）地域における広範な干渉:** 2021年には、MENA地域および隣接諸国で586件のGNSS/GPSジャミングまたはその疑いのある事象が15のオペレーターから報告され、さらに38のオペレーターからは46,936件のGPS信号喪失イベントが記録された[70]。特にトルコのアンカラFIR（飛行情報区）およびイスタンブールFIRでの報告が際立っており、この地域におけるGNSS干渉の深刻さを示している[70]。
- **バルト海地域における干渉:** 近年、バルト海地域、特にロシアの飛び地であるカリーニングラード周辺から強力なジャミングが発生し、広範囲（半径200海里以上）の航空機や船舶の航行に影響を与えている[38]。2024年6月から11月にかけてグディニャ海洋大学とGPSPATRONが実施した調査では、バルト海沿岸で合計84時間のGNSS干渉が検出され、その多くはジャミングによるものであった。移動する船舶からのジャミングの可能性も指摘されている[72]。
- **ロシア・ウクライナ紛争に伴う干渉の激化:** ロシアによるウクライナ侵攻以降、両国および周辺地域では、軍事作戦の一環としてGPSジャミングやスプーフィングが日常的に使用されている[19]。これは、敵の航法システムを無力化し、自軍の行動を秘匿する目的で行われていると考えられる[37]。
- **スプーフィング事例の増加と巧妙化:**
  - 2011年、イランが米国のドローンをスプーフィングによって捕獲したとされる事例[52]。
  - 2017年、黒海で多数の船舶が実際の位置とは異なる場所にいると誤認させられる大規模スプーフィングが発生[52]。
  - 2020年、中国沿岸の20箇所以上で船舶が円を描くように航行しているように見せかける「サークルスプーフィング」が報告された[52]。 これらの事例は、スプーフィング技術が高度化し、広範囲に影響を及ぼしうることを示している。
- **航空分野でのインシデント急増:** OPSGROUPの報告によると、2024年の夏には1日あたり平均1500便がスプーフィングの影響を受けており、これは2024年第1四半期/第2四半期の約300便から大幅な増加である[75]。また、IATA.orgの報告では、2021年8月から2024年6月までの間に1840万便のフライトで58万件以上のGPS信号喪失が記録されている[76]。これらの数字は、航空分野におけるGNSS干渉が常態化しつつあることを示している。

以下の表に、主要なGNSS干渉インシデントの年表を示す。

表1: 主要なGNSS干渉インシデント年表

年代	地域/場所	干渉タイプ	推定原因/主体	影響を受けた分野	主要な影響	典拠
2011年	イラン	スプーフィン	イラン軍	軍事（ドロー	米国ドローン	[52]

		グ		ン）	の捕獲	
2017年	黒海	スプーフィング	不明（国家主体が疑われる）	海事	数百隻の船舶が誤った位置情報を表示	[52]
2020年12月	日本・小松空港周辺	偶発的干渉（広帯域ノイズ）	工事現場クレーンのワイヤレスカメラ	航空	航空機のGPS受信障害、運航遅延・欠航	[35]
2020年	中国沿岸	スプーフィング（サークルスプーフィング）	不明（国家主体が疑われる）	海事	20箇所以上で船舶が実際とは異なる円運動を表示	[52]
2021年	中東・北アフリカ（MENA）地域	ジャミング、信号喪失	不明（紛争、軍事活動に関連する可能性）	航空	586件のジャミング報告、46,936件の信号喪失イベント	[70]
2022年～継続	ロシア・ウクライナおよび周辺地域	ジャミング、スプーフィング	ロシア軍、ウクライナ軍	軍事、航空、海事、民生	広範囲なPNT情報の信頼性低下、航法障害	[37]
2024年	バルト海地域（特にカリーニングラード周辺）	ジャミング	ロシア（カリーニングラードからと推定）	航空、海事	広範囲なGPS信号妨害、航空機のルート変更、船舶の航行困難	[38]
2024年末	ロシア・グロズヌイ	ジャミング（スプーフィングの可能性も）	ロシア軍	航空	アゼルバイジャン航空機墜落事故の一因と調査中	[19]
2024年～継続	複数地域（特に紛争地域周辺）	スプーフィング	不明（国家主体、非国家主体を含む可能性）	航空	1日あたり最大1500便が影響、航空機の誤誘導リスク	[41]

日本国内における干渉事例とその教訓 (Interference Incidents within Japan and Lessons Learned)

日本国内においても、GNSS信号への干渉事例は発生しており、その多くは偶発的なものであるが、重要な教訓を含んでいる。

- **小松空港でのGPS受信障害（2020年12月）:** 石川県の小松空港において、駐機中の航空機がGPS信号を受信できなくなり、運航に遅延や欠航が発生した。調査の結果、空港から約3.8km離れた大規模工事現場で使用されていたクレーンのアーム先端に取り付けられたワイヤレスカメラのトランスミッターから発射された広帯域の電波が原因と特定された[35]。このカメラはクレーン運転手が個人的に設置したものであり、GPSだけでなく、電波天文、携帯電話、気象レーダーゾンデなど、広範な周波数帯に影響を及ぼす可能性があった。当該カメラの撤去により干渉は解消された。この事例は、意図しない電波源であっても、航空機の安全運航に不可欠なGNSSシステムに深刻な影響を与えうることを示している。
- **SUPERBIRD衛星音楽放送の受信障害:** 2019年頃から、SUPERBIRD衛星を利用したCS音楽放送において断続的な受信障害が発生した。広範な調査の結果、特定のメーカーの車載レーダー探知機からのスプリアス発射（規定外の不要な電波）が原因であることが判明した[35]。レーダー探知機の局部発振器からの漏洩電波がCS受信用パラボラアンテナに入り込み、衛星からの微弱な信号をマスキングしていた。この事例は、民生用電子機器の設計不備や品質管理の問題が、広範囲の衛星通信サービスに影響を及ぼす可能性を示唆している。

これらの国内事例は、紛争地域のような意図的な妨害がない環境下においても、偶発的な干渉源によって重要システムが脆弱であることを示している。これは、電磁両立性（EMC）に関する国内規制の遵守徹底、不法無線局の監視強化、そして干渉源の迅速な特定と除去を行うための体制整備の重要性を強調している。軍事的脅威とは独立して、国内にお

ける電波利用環境の健全性を維持するための継続的な努力が不可欠である。

特定分野における影響分析 (Analysis of Impacts on Specific Sectors)

GNSS干渉は、測位・航法・時刻同期に依存するあらゆる分野に影響を及ぼす。

- **航空 (Aviation):** 航空分野では、航法システム（RNAV、RNP）、着陸支援システム（LPVアプローチ等）、監視システム（ADS-B）、通信システム（CPDLC）、そして地上接近警報装置（EGPWS/TAWS）などがGNSSに依存している [77]。干渉が発生すると、これらのシステムの機能が低下または喪失し、航空機の位置情報が不正確になったり、EGPWSが誤作動して不必要な急上昇操作を誘発したりする危険性がある [51]。実際、2024年末のアゼルバイジャン航空機墜落事故では、GPS妨害が状況を悪化させた可能性が指摘されている [69]。また、スプーフィングによって航空機が誤った経路に誘導されるリスクも存在する [51]。航空管制（ATC）においても、ADS-Bからの誤った位置情報により、航空交通管理に混乱が生じる可能性がある [79]。
- **海事 (Maritime):** 船舶の航行において、GNSSは安全かつ効率的な運航に不可欠である。ジャミングやスプーフィングは、船舶を正しい航路から逸脱させ、座礁や衝突のリスクを高める [27]。特に、自動船舶識別装置（AIS）はGNSS測位情報に依存しているため、スプーフィングによって船舶の位置が偽装され、密輸や違法操業などの不正行為に悪用されるケースも報告されている [27]。バルト海や東地中海などの高リスク海域では、GNSS干渉が常態化しつつあり、代替航法手段を持たない船舶は深刻な危険に晒されている [38]。
- **重要インフラ (Critical Infrastructure):**
  - **電力網 (Power Grids):** 電力系統の安定運用には、広域に分散した観測点（PMU: 位相計測装置など）からのデータをミリ秒以下の精度で同期させる必要があり、その時刻源としてGNSSが広く利用されている [3]。GNSS時刻同期が失われると、系統の監視・制御が困難になり、最悪の場合、大規模停電を引き起こす可能性がある [23]。2016年に発生したGPSの時刻情報が13マイクロ秒ずれたインシデントでは、通信網や電力網を含む精密な時刻同期を必要とするシステムが広範囲にわたり影響を受けた [9]。
  - **金融 (Finance):** 金融取引においては、取引の順序性やトレーサビリティを確保するため、高精度な時刻同期が不可欠であり、多くの金融機関がGNSSを時刻源として利用している [3]。スプーフィング攻撃によるタイムスタンプの改竄は、取引の正当性を損ない、市場に混乱をもたらす可能性がある [23]。
  - **通信 (Telecommunications):** 携帯電話基地局やデジタル放送網など、多くの通信システムが周波数・位相同期のためにGNSS時刻を利用している [3]。干渉による時刻同期の喪失は、通信品質の低下やサービス停止に繋がる。
- **その他分野 (Other Sectors):**
  - **精密農業:** 農機の自動操舵、可変施肥・散布、収量マッピングなど、精密農業の多くの側面で高精度GNSSが利用されている [43]。干渉は作業精度を低下させ、収量減や資源の無駄遣いを引き起こす。
  - **自動運転・ドローン:** 自動運転車やドローンの安全な自律走行・飛行には、正確で信頼性の高いPNT情報が不可欠である [13]。干渉、特にスプーフィングは、車両の誤誘導やドローンの墜落・逸走といった重大事故に直結する。
  - **建設ICT:** ICT施工における建機の自動制御や測量にもGNSSが活用されており、干渉は作業効率の低下や施工不良の原因となる。

これらの多様な分野への影響は、GNSS干渉が単なる測位の問題ではなく、広範な経済・安全保障上の脅威であることを示している。特に、金融や通信分野におけるGNSS時刻同期への依存度は、測位への依存度ほど一般に認識されていない場合が多く、潜在的な脆弱性となっている。したがって、GNSSの脆弱性評価とレジリエンス確保においては、測位情報だけでなく時刻情報の重要性も十分に考慮する必要がある。

4. GNSS信号干渉への対策技術動向 (Trends in Mitigation Technologies for GNSS Signal Interference)

GNSS信号干渉の脅威増大に対応するため、受信機レベル、アンテナレベル、そしてシステム全体レベルでの様々な対策技術が研究開発され、実用化が進められている。

受信機ベースの耐干渉技術 (Receiver-based Anti-interference Technologies)

受信機内部の信号処理によって干渉の影響を軽減する技術は、対策の第一線として重要である。

- 適応フィルタリング (Adaptive Filtering):
  受信信号の特性に応じてフィルタのパラメータを動的に調整し、干渉波を選択的に除去する技術群である。
  - **ノッチフィルタ:** 特定の狭帯域干渉（例えば、連続波干渉）を効果的に除去する。干渉波の周波数を検出し、その周波数成分のみを鋭く減衰させるフィルタを適応的に形成する [13]。LMS（Least Mean Squares）アルゴリズムやRLS（Recursive Least Squares）アルゴリズムを用いた適応型FIR（Finite Impulse Response）ノッ

チフィルタなどが提案されている [88]。
    - **パルスブランキング:** 短時間の強力なパルス性干渉を検出し、その期間の信号を一時的に無効化（ブランキング）することで影響を軽減する [13]。
    - **広帯域干渉低減:** チャープジャマーのような周波数が変動する広帯域干渉に対しては、より高度な適応フィルタリング技術が用いられる [13]。
    - **FFTベースの干渉除去:** 高速フーリエ変換（FFT）を用いて信号を周波数領域に変換し、干渉成分を特定・除去した後に時間領域に戻す手法も、特に強力な干渉除去方法として提案されている [91]。
    - **ウェーブレット変換:** 信号の時間–周波数解析に優れ、パルス性干渉や狭帯域干渉など、多様な干渉の検知・除去に応用されている [93]。
    - **時間–周波数領域処理:** STFT（Short-Time Fourier Transform）などの時間–周波数表現を利用し、干渉信号を2次元平面上で分離・除去するアプローチも研究されている [95]。
    - **カルマンフィルタ:** 主にGNSSと他のセンサー（INS等）を統合する際に用いられるが、観測ノイズの特性を適応的に推定することで、干渉による測位誤差の増大を抑制する効果も期待される [90]。
- 自律的健全性監視 (Autonomous Integrity Monitoring):
  受信機自身が受信信号の品質や測位解の一貫性を監視し、異常を検知・警告・排除する機能である。
    - **RAIM (Receiver Autonomous Integrity Monitoring):** 複数の衛星からの擬似距離測定値の冗長性を利用し、統計的な手法（最小二乗残差法など）に基づいて、いずれかの衛星信号に大きな誤差（障害）が含まれていないかを検査する [97]。障害が検知された場合、その衛星を測位計算から除外するFDE（Fault Detection and Exclusion）機能を持つものもある。
    - **ARAIM (Advanced RAIM):** マルチGNSSコンステレーション環境での利用を想定し、より高度な障害検知・排除能力を持つRAIMの進化版である。地上監視網からの衛星健全性情報（ISM: Integrity Support Message）も活用する [97]。航空分野での利用が先行しているが、海事、UAS、鉄道など他分野への応用も検討されている [97]。
- 信号認証 (Signal Authentication):
  スプーフィング攻撃に対抗するため、受信したGNSS信号が正規の衛星から送信されたものであるか、また航法メッセージが改竄されていないかを検証する技術である。
    - **OSNMA (Open Service Navigation Message Authentication):** Galileoが提供するオープンサービス向けの航法メッセージ認証。秘密鍵と公開鍵を用いたデジタル署名技術に基づき、航法データの真正性を保証する [55]。TESLA（Timed Efficient Stream Loss-Tolerant Authentication）プロトコルの変種を利用し、遅延鍵開示によって真正性を担保する [55]。
    - **Chimera:** GPS近代化信号（L1C等）に導入が計画されている信号認証技術。航法メッセージ認証に加え、拡散符号の認証も行うことで、より強力なスプーフィング対策を目指す [55]。
    - **QZNMA (QZSS Navigation Message Authentication):** 日本の準天頂衛星システム「みちびき」（QZSS）が2024年4月から提供を開始した航法メッセージ認証サービス。デジタル署名と公開鍵暗号方式を利用し、受信機側で航法メッセージの改竄有無を検証可能とする [60]。

受信機ベースの対策技術は、ジャミングのようなノイズ除去から、スプーフィングのような巧妙な欺瞞行為への対抗へと進化しており、これは脅威の性質変化を反映している。初期の対策は既知の干渉パターン（例えば連続波干渉）に対するフィルタリングが主であったが [13]、RAIM/ARAIMは衛星信号の冗長性に基づく信頼性評価を加えた [97]。そして、正規信号を模倣するスプーフィングの台頭は、信号源とデータ内容の暗号論的な認証（OSNMA、Chimera、QZNMAなど）という、より高度な防御策を必要とさせている [55]。

アンテナベースの耐干渉技術 (Antenna-based Anti-interference Technologies)

アンテナ自体に干渉波を抑制する機能を持たせることで、受信機の前段で干渉の影響を軽減する技術である。

- **CRPA (Controlled Reception Pattern Antenna) / アレイアンテナ:** 複数のアンテナ素子を配列し、各素子で受信した信号の位相や振幅を適応的に制御することで、アンテナの指向性パターンを動的に変化させる [5]。
    - **ヌルステアリング:** 干渉波の到来方向に受信感度の低いヌル（零点）を形成し、干渉波の受信を抑圧する [5]。
    - **ビームフォーミング:** 目的とするGNSS衛星の方向に受信感度の高いビームを形成し、衛星信号の受信電力を最大化する [5]。 CRPAは特に軍事分野や重要インフラ防護など、高度な耐干渉性が求められる用途で有効であるが、一般に大型で高価になる傾向がある [5]。
- **チョークリングアンテナ (Choke Ring Antenna):** アンテナのグラウンドプレーンに同心円状の溝（チョークリング）を設けることで、地面や周辺構造物からの反射波（マルチパス波）を効果的に抑制する [33]。主に固定局（電子基準点など）で高精度測位のために用いられる。
- **マルチパス軽減アンテナ設計:** アンテナ素子の形状や配置、材質などを工夫することで、マルチパスの影響を低減するように設計されたアンテナ [34]。デュアル周波数CMC（Code-Minus-Carrier）法などの技術と組み合わせて評

価されることもある [115]。

CRPAのような高度なアンテナ技術は非常に効果的である一方、そのサイズ、コスト、複雑性の面で制約があり、全てのユーザーセグメント、特に民生用デバイスへの広範な搭載は現状では限定的である [5]。このため、マスマーケット向けの小型かつ低コストで実用的な耐干渉アンテナソリューションの開発が求められている。

システムレベルでの耐性強化と代替PNT技術 (System-level Resilience Enhancement and Alternative PNT Technologies)

単一のGNSSシステムや技術に依存するのではなく、複数のシステムや技術を組み合わせることで、全体としてのPNT情報の信頼性と頑健性を高めるアプローチである。

- **マルチGNSS/マルチ周波数受信:** 複数のGNSSコンステレーション（GPS、GLONASS、Galileo、BeiDou、QZSS等）および複数の周波数帯（L1、L2、L5等）の信号を同時に利用することで、可視衛星数の増加による測位ジオメトリの改善、周波数ごとの干渉特性の違いを利用した耐性向上、一部のシステムや周波数帯が利用不能になった場合の冗長性確保などが期待できる [14]。ただし、受信帯域幅の増大は新たな干渉対策の課題も生む [31]。
- **LEO-PNT (Low Earth Orbit PNT):** 従来のMEO（Medium Earth Orbit、中軌道） GNSS衛星（高度約2万km）よりも低い軌道（数百〜数千km）を周回する衛星コンステレーションを利用したPNTシステム [4]。衛星と受信機間の距離が近いため信号強度が高く、ジャミングに対する耐性が向上する [121]。また、衛星の動きが速いためジオメトリ変化が大きく、RTKやPPPの収束時間短縮にも寄与する [131]。CバンドなどLバンド以外の周波数帯を利用することで周波数ダイバーシティも確保できる [121]。StarlinkやIridium STLなどが代表例として挙げられる [121]。
- **eLoran (Enhanced Loran):** 地上系の中波帯電波航法システムであるLoran-Cを近代化したもの。GNSSとは全く異なる物理層を利用するため、GNSSが利用不能な場合の強力なバックアップとして期待されている [25]。広域をカバーでき、信号強度も比較的強い。
- **慣性航法システム (INS) / センサーフュージョン:** 加速度センサーやジャイロスコープからなるIMU（Inertial Measurement Unit）は、外部からの信号に依存せずに自身の動きを積分して位置や姿勢を推定する [19]。ただし時間とともに誤差が累積するため、GNSSやオドメータ（車輪速センサー）、カメラを用いたVisual SLAM（Simultaneous Localization and Mapping）/VIO（Visual-Inertial Odometry）、LiDAR SLAMなど、他のセンサー情報と統合（センサーフュージョン）することで、GNSSが利用できない環境下でもPNT情報を補完・維持する [90]。
- **量子センサー (Quantum Sensors):** 量子力学的な現象を利用した超高感度センサー。原子時計（チップスケール原子時計（CSAC）を含む）による時刻ホールドオーバー [137]、原子干渉計を用いた慣性センサー（加速度計、ジャイロスコープ）、量子磁力計、重力計・重力勾配計などが研究されており、従来のセンサーを凌駕する精度や長期安定性が期待される [131]。GNSSが利用できない環境での自律航法への応用が期待される。
- **Signals of Opportunity (SoOp):** Wi-Fi、Bluetooth、携帯電話基地局の電波、FM/AMラジオ放送波、地上デジタルテレビ放送波など、測位専用ではない既存の様々な無線信号を「機会信号」として捉え、それらを利用して測位を行う技術 [34]。特に都市部などGNSSの受信が困難な環境での補完技術として注目されている。

これらの代替PNT技術の多様化は、GNSS特有の干渉に対するレジリエンスを高める一方で、システム間の統合、標準化、そして新たな脆弱性の出現といった新たな複雑性をもたらす可能性も秘めている。「システム・オブ・システムズ」としてPNTを捉え、アーキテクチャ全体としての堅牢性を設計していく必要がある。

AI・機械学習を活用した先進的干渉検知・軽減技術 (Advanced Interference Detection and Mitigation using AI/ML)

人工知能（AI）および機械学習（ML）技術は、GNSS干渉の検知、分類、軽減において新たな可能性を拓いている。

- **干渉パターンの学習と識別:** 大量のGNSS信号データと干渉データを学習させることで、既知の干渉だけでなく、未知の、あるいは巧妙に偽装された干渉パターンを識別する能力を獲得することが期待される [26]。深層学習ネットワークモデルを用いて、受信信号のスペクトログラムなどから干渉の種類を自動分類し、最適な干渉軽減手法を選択する研究が進められている [45]。
- **異常検知:** 時系列データとしてGNSS観測値を捉え、通常とは異なる振る舞い（例えば、C/N0の急激な変動、測位解の跳びなど）を異常として検知する。LSTM（Long Short-Term Memory）ネットワークなどが応用されている [65]。
- **データ圧縮と特徴抽出:** VAE（Variational Autoencoder）のような手法を用いて、GNSS信号から干渉種別、信号強度、帯域幅、干渉源までの距離といった本質的な特徴を抽出し、効率的なデータ圧縮と伝送を可能にする研究もある [141]。

AI/MLの活用は、従来のプログラムベースの対策では対応が難しかった未知の脅威や動的に変化する干渉環境への適応能力向上に繋がる。しかし、その性能は学習データの質と量に大きく依存し [65]、特に稀な攻撃パターンや新しいタイプの干渉に対する汎化性能の確保が課題となる。また、AIの判断根拠の透明性（説明可能性）も、特に安全性が重視され

る分野では重要となる。

以下の表に、主要なGNSS干渉対策技術の比較評価を示す。

表2: GNSS干渉対策技術の比較評価

技術カテゴリ	具体技術	動作原理	主な対象干渉	長所	短所/課題	代表的な製品/研究例	典拠
受信機ベース	適応ノッチフィルタ	特定周波数の狭帯域干渉を適応的に除去	狭帯域ジャミング（CW等）	実装容易性、低コスト	広帯域干渉には不向き	Septentrio AIM+ [13], NovAtel ANF [89]	[13]
	パルスブランキング	短時間パルス性干渉を時間領域で除去	パルスジャミング	高速応答	連続的な干渉には不向き	Septentrio AIM+ [13]	[13]
	RAIM/ARAIM	衛星信号の冗長性を用いた整合性チェック	衛星故障、一部のマルチパス/RFI	受信機単独でインテグリティ確保	多数の衛星が必要、計算負荷	航空用受信機 [97]	[97]
	信号認証 (OSNMA, Chimera, QZNMA)	暗号技術による航法メッセージ等の真正性検証	スプーフィング	高いスプーフィング耐性	鍵管理、システム全体の対応が必要	Galileo OSNMA [55], QZSS QZNMA [60]	[55]
アンテナベース	CRPA/アレイアンテナ	複数素子アンテナで指向性を制御し干渉を抑圧	広範なジャミング、一部スプーフィング	高い干渉抑圧能力	高コスト、大型、複雑	GAJT (NovAtel) [47], 軍事用アンテナ	[5]
	チョークリングアンテナ	地面反射波（マルチパス）を物理的に抑制	マルチパス	高いマルチパス除去性能	大型、固定局向け	測量用基準局アンテナ [113]	[113]
システムレベル/代替PNT	マルチGNSS/マルチ周波数	複数システム・周波数の利用による冗長化	システム障害、一部干渉	可用性・堅牢性向上	受信機複雑化、コスト増	最新の業務用・民生用受信機	[14]
	LEO-PNT	低軌道衛星によるPNT情報提供	GNSSの弱点補完（信号強度、ジオメトリ）	高信号強度、対ジャミング性向上	システム構築コスト、軌道安定性	Starlink [126], Iridium STL [128]	[121]
	eLoran	地上系電波による広域PNT	GNSS障害時のバックアップ	GNSSと異なる干渉特性	カバレッジ限定、インフラ整備	UrsaNav [84]	[25]
	INS/センサーフュージョン	自律センサーとGNSS等を統合	GNSS途絶時のPNT維持	GNSS非依存性（短時間）	誤差累積、初期アライメント	航空機FMS [77], 自動運転システム	[51]
	量子センサー	量子現象を利用した超高精度PNT	未知の脅威への潜在的耐性	超高精度、長期安定性	技術成熟度、コスト、サイズ	研究開発段階 [139]	[139]
AI/ML活用	干渉検知・分類・軽減	機械学習による干渉パ	未知・適応型干渉	新規脅威への適応性	学習データ依存、説明	研究開発段階 [45]	[45]

		ターン認識と対策選択			性		

5. 日本におけるGNSS干渉対策の取り組み (Japan's Initiatives for GNSS Interference Countermeasures)

日本は、GNSSの安定的利用を国家の重要課題と位置づけ、政府機関、研究機関、民間企業が連携し、多層的な干渉対策に取り組んでいる。その中核を成すのが、準天頂衛星システム「みちびき」（QZSS）の整備と、それを通じた高精度・高信頼PNTサービスの提供である。

関連省庁の政策と役割 (Policies and Roles of Relevant Government Ministries and Agencies)

- **内閣府宇宙開発戦略推進事務局 (Cabinet Office, Secretariat of Space Policy):** QZSSの開発、整備、運用を統括し、国家宇宙政策の一環としてPNTサービスの強化を推進している [87]。特に、ジャミングやスプーフィングへの耐性を高めるため、政府または政府が認定した機関のみが利用可能な「公共専用信号」（欧州のGalileo PRSに類似した高セキュリティ信号）の配信や、民生分野向けのスプーフィング対策として「信号認証サービス」（QZNMA）を2024年4月から開始するなど、QZSSを通じた耐干渉性向上策を主導している [60]。
- **総務省 (Ministry of Internal Affairs and Communications, MIC):** 電波法に基づき、国内の電波利用環境の保護、不法無線局の監視・取り締まり、GNSS用周波数帯の国際的な保護活動、干渉源の特定・排除、無線設備の技術基準策定などを所管している [28]。過去の国内干渉事例（小松空港事例など）においては、迅速な原因究明と対策指導で中心的な役割を果たした [35]。電波法では、不法に無線局を開設・運用した場合や、重要無線通信（航空・海上無線などGNSSも含まれうる）に妨害を与えた場合には罰則が科される [149]。
- **国土交通省 (Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, MLIT):** 航空、海事、陸上交通といった社会インフラ分野におけるGNSSの安全かつ効率的な利用を推進し、関連する技術開発や標準化、安全基準の策定を行っている [35]。公共測量におけるマルチGNSSの活用や、災害時の地殻変動監視など、高精度測位技術の応用も進めている [154]。GNSS干渉発生時の影響評価や、代替手段の確保といった観点からの対策も検討している。
- **海上保安庁 (Japan Coast Guard, JCG):** 海上における航行安全のため、GNSS信号の監視、干渉情報の収集・提供、ディファレンシャルGNSS（DGNSS）局の運用などを行っている [155]。船舶に対し、GNSS干渉に関する注意喚起も行う。
- **防衛省・自衛隊 (Ministry of Defense, JSDF):** 国家安全保障の観点から、GNSSの安定利用確保は極めて重要である。防衛装備品におけるPNT情報の信頼性向上、電子戦環境下での測位能力維持のため、耐干渉技術の研究開発や、QZSSの公共専用信号の利用などを検討している [157]。長期的な研究開発ビジョンにおいては、「妨害波の影響を回避または緩和する対妨害技術」の獲得が重点項目の一つとして挙げられている [158]。

準天頂衛星システム「みちびき」(QZSS)による耐干渉性向上への貢献 (Contribution of QZSS "Michibiki" to Enhancing Interference Resilience)

QZSS「みちびき」は、GPS補完機能に加え、日本およびアジア・オセアニア地域に対して高精度な測位・時刻情報サービスを提供するとともに、信号の信頼性向上や耐干渉性強化にも貢献している。

- **CLAS (Centimeter Level Augmentation Service) および MADOCA-PPP (Multi-GNSS Advanced Orbit and Clock Augmentation - Precise Point Positioning):** CLASはセンチメータ級、MADOCA-PPPはサブメータからセンチメータ級の高精度測位を可能にする補強サービスである [60]。これらのサービスは、地上監視網からのデータに基づき精密な補正情報を生成・配信する過程で、衛星軌道やクロックの異常を検知し、その情報を利用者に提供することで測位の信頼性向上に寄与する。MADOCA-PPPは2024年4月1日から正式運用を開始し、L6E信号で衛星ごとの誤差補正情報、L6D信号（QZS-6、7から配信予定）で電離層補正情報を提供し、初期収束時間の短縮を目指している [104]。
- **QZNMA (QZSS Navigation Message Authentication) / 信号認証サービス (Signal Authentication Service):** スプーフィング攻撃への対策として、2024年4月から提供が開始された航法メッセージ認証サービスである [60]。QZSS管制局が秘密鍵を用いて生成したデジタル署名データを航法メッセージに含めて配信し、利用者は事前に配布された公開鍵と受信した署名データ、航法メッセージ（ハッシュ値）を用いて演算処理を行うことで、航法メッセージが改竄されていないか、正規の衛星から送信されたものかを確認できる [60]。これにより、偽の測位信号に基づく誤測位のリスクを低減する。
- **公共専用信号 (Public Regulated Service - PRSに類似):** 政府が認定した利用者のみが利用可能な、暗号化され秘匿性の高い信号であり、ジャミングやスプーフィングに対する高い耐性を有することを目的としている [64]。国家の安全保障や危機管理など、特に高い信頼性が求められる用途での利用が想定される。
- **QZSS-SAIF (Sub-meter class Augmentation with Integrity Function):** L1帯で送信されるSBAS（Satellite

Based Augmentation System）互換の補強信号であり、サブメータ級の測位精度向上とともに、衛星の健全性に関する情報（インテグリティ情報）を提供する[7]。これにより、利用者は測位結果の信頼性を評価し、安全な運用に役立てることができる。

QZSSは、単に測位衛星の数を増やすだけでなく、CLAS/MADOCA-PPPによる精度向上と異常検知、QZNMAによるスプーフィング対策、公共専用信号による高セキュリティ確保、SAIFによるインテグリティ情報提供といった多層的なサービスを通じて、日本のPNTレジリエンス戦略の中核を担っている。これは、多様な脅威に対応し、利用者のニーズに応じた信頼性の高いPNT情報を提供するための国家戦略の表れと言える。

国内研究機関・大学・企業の最新研究開発動向 (Latest R&D Trends from Domestic Research Institutions, Universities, and Companies)

日本のGNSS干渉対策は、政府主導の取り組みに加え、研究機関、大学、民間企業における活発な研究開発によって支えられている。

- **情報通信研究機構 (NICT):** 日本標準時の生成・供給機関として高精度な時刻同期技術を開発するとともに、太陽フレアや磁気嵐といった宇宙天気現象が電離層に与える影響を監視・予測し、GNSS信号伝播への影響評価や警報配信を行っている[33]。高分解能TEC（Total Electron Content）観測網を用いた電離層擾乱の研究は、測位精度向上に不可欠である[171]。
- **宇宙航空研究開発機構 (JAXA):** QZSSの開発・運用に深く関与し、衛星本体や搭載機器の研究開発を行っている。近年では、MetCom社との共創イニシアチブにおいて、地上基地局の衛星信号受信アンテナにJAXAが開発中のアレイアンテナ技術を組み込むことで、耐干渉性と安全性を向上させる研究を進めている[110]。また、航空安全イノベーションハブなどを通じて、複数のアンテナ素子で受信したGNSS信号を合成し干渉影響を低減する技術など、耐障害高信頼性航法技術の研究も行っている[112]。
- **産業技術総合研究所 (AIST):** GNSS受信機の測位アルゴリズムの高精度化、ロバスト化に関する研究を推進している。特に、マルチパス環境下での搬送波位相測位における整数値不定性決定問題や、GNSS受信機ソフトウェアの干渉下での挙動の不確かさの定量化など、基礎的かつ重要な課題に取り組んでいる[63]。
- **大学における研究:** 各大学の研究室においても、GNSS干渉の検知・除去アルゴリズム、AI/MLの応用、代替測位技術など、多岐にわたる研究が行われている。例えば、深層学習を用いたインテリジェントな干渉軽減手法の研究[45]や、低コストSDR（Software Defined Radio）を用いた空間ダイバーシティによる干渉軽減技術の研究[143]などが報告されている。文部科学省の事業として、衛星測位技術分野の人材育成プログラムも実施されており、大学と企業が連携して干渉・欺瞞信号に関する研究開発や実証実験が行われている[179]。
- **国内企業（古野電気、日本無線、トプコン/ソキア等）の耐干渉受信機・アンテナ技術:**
  - **古野電気:** アクティブアンチジャミング機能を搭載したマルチGNSS受信チップ・モジュールを開発・提供しており、特に狭帯域ノイズやジャミング信号の検知・除去に効果を発揮するとしている[118]。同社のタイミング用マルチGNSS受信機は、ジャミング環境下でも高精度な1PPS信号を出力し続ける性能が示されている[119]。
  - **日本無線 (JRC):** マルチGNSSに対応し、スプーフィングやジャミングの検知機能を備えた高精度GNSSコンパス「JLR-41」などを製品化している[120]。
  - **トプコン/ソキア:** 同社のGNSS受信機「GRX5」は、アンチジャミング・アンチスプーフィング機能を搭載している[181]。また、トプコンは適応型ノッチフィルタを用いたGNSS信号干渉軽減方法に関する特許も出願している[89]。
  - その他、Septentrio社（ベルギーの企業だが日本市場でも活動）の製品も、適応型ノッチフィルタリング、パルスブランキング、広帯域干渉低減といった独自の干渉緩和技術（AIM+）を搭載している[13]。

日本におけるGNSS干渉対策は、内閣府主導のQZSSプロジェクトを核としつつ、総務省、国土交通省、防衛省といった関係省庁がそれぞれの所管分野で政策を推進し、NICT、JAXA、AISTといった国立研究開発法人が専門的な研究開発を担い、大学が基礎研究と人材育成を、そして民間企業が具体的な製品・技術開発を行うという、産学官が連携した「オールジャパン」体制で進められている。この包括的なアプローチは、宇宙セグメントからユーザーセグメントに至るエンドツーエンドでのPNTレジリエンス構築と、国内技術基盤の強化を目指すものである。

6. GNSS信号干渉問題に関する国際的動向と連携 (International Trends and Cooperation on GNSS Signal Interference)

GNSS信号干渉は国境を越える問題であり、その対策には国際的な協調が不可欠である。主要国・地域は独自のPNT戦略を進める一方、国際機関を通じた協力も模索されている。

主要国・地域（米国、欧州、ロシア、中国等）の政策と戦略 (Policies and Strategies of Major Countries/Regions:

US, EU, Russia, China, etc.)

- **米国 (USA):** GPSの近代化（Block III/IIIF衛星によるL1C信号等の提供）を継続し、PNT情報の一層の信頼性向上を目指している [182]。2020年の大統領令13905号「測位、航法、タイミングサービスの責任ある利用を通じた国家レジリエンスの強化」に基づき、PNT国家R&D計画が策定され、GPSへの過度な依存を避け、多様な代替PNT技術の開発と重要インフラの防護を推進している [4]。連邦通信委員会（FCC）も、GPSを補完・代替するPNT技術の開発支援策を検討している [4]。
- **欧州連合 (EU):** 独自のGNSSであるGalileoシステムにおいて、オープンサービス向けの航法メッセージ認証（OSNMA）を導入し、スプーフィング耐性を強化している [25]。EU宇宙戦略では、PNTを含む宇宙アセットのセキュリティとレジリエンス強化、戦略的自律性の確保が重要課題とされている [102]。欧州委員会は、GNSSと地上系サービスを組み合わせた強靭な「タイミングバックボーン」の構築も目指している [25]。
- **ロシア (Russia):** GLONASSシステムを運用し、軍事利用においてはジャミングやスプーフィング技術を積極的に活用しているとされ、その影響はウクライナ紛争やバルト海地域などで広範囲に及んでいる [4]。一方で、2004年には米国との間でGPSとGLONASSの電波周波数適合性維持などに関する協力声明も発表されているが [4]、近年の地政学的状況下ではその実効性は疑問視される。
- **中国 (China):** BeiDouシステムのグローバル展開を完了し、一帯一路構想（BRI）やデジタルシルクロード（DSR）を通じて、その利用を国際的に推進している [185]。BeiDouは地上局ネットワークと組み合わせることで高いPNT精度を提供し、中国のソフトパワー拡大に寄与している [185]。一方で、中国沿岸での船舶スプーフィング事例など、国家による干渉への関与が疑われるケースも報告されている [52]。

これらの主要宇宙大国は、自国のGNSS能力向上（多くは耐性強化機能を含む）を進めると同時に、一部の国は干渉能力の開発・展開にも関与していると見られている。この状況は、PNTが共有される地球規模の公益であると同時に、戦略的競争の舞台でもあるという複雑な地政学的力学を生み出している。各国が「PNT自律性」を追求する動き [102] は、この二重性を象徴している。

国際機関の役割と提言 (Roles and Recommendations of International Organizations)

GNSS干渉問題への対応において、国際機関は基準策定、情報共有、協力促進などの重要な役割を担っている。

- **国際電気通信連合 (ITU):** 無線周波数の国際的な分配、無線通信規則の策定・施行、干渉調整を担う国連の専門機関である [1]。ITUは、無線航行衛星サービス（RNSS）用周波数帯の保護を加盟国に強く要請しており [48]、世界無線通信会議（WRC）-23では、特定の周波数帯におけるGNSSおよびRNSSの有害な干渉からの保護を促す決議676が採択された [49]。
- **国際民間航空機関 (ICAO):** 航空分野におけるGNSS利用に関する国際標準・勧告方式（SARPs）を策定し、干渉リスク評価や対策を勧告している [22]。世界航空航法計画（GANP）への干渉対策の反映や、加盟国へのリアルタイム情報共有、アンチジャミング・アンチスプーフィング技術の開発・導入促進などを提言している [79]。
- **国際海事機関 (IMO):** 海事分野におけるGNSS利用の安全基準（SOLAS条約等）を定め、干渉による航行安全への影響について警告を発している [22]。加盟国に対し、RNSSの保護、従来型航法インフラの維持、関係当局間の協力強化、包括的な干渉報告メカニズムの実施などを求めている [186]。
- **国連宇宙空間平和利用委員会 (COPUOS) / 国際GNSS委員会 (ICG):** ICGは、GNSS提供者と利用者の間の自発的な協力を促進するための非公式なフォーラムであり、GNSSシステム間の互換性・相互運用性の向上、干渉検知・軽減（IDM）技術に関する議論、情報共有、能力構築支援などを行っている [1]。ICGのシステム・信号・サービス作業部会（WG-S）では、スペクトラム保護、LEO-PNTや月PNTとの互換性・相互運用性などが議論されている [130]。また、IDMに関する3つの柱（プロバイダー、ハードウェア、エンドユーザー）に基づくレジリエンス強化策を提言している [20]。

国際協力の現状と今後の展望 (Current Status and Future Prospects for International Cooperation in Spectrum Protection and Interference Mitigation)

周波数保護、干渉源の特定と情報共有、対策技術の標準化などにおいて、国際協力は一定の進展を見せている。ICGのようなフォーラムは、GNSS提供国間の技術的調整や情報交換に貢献している [20]。しかし、これらの国際的な取り組みの実効性は、PNTの軍民両用性（デュアルユース）と、一部の国家主体が戦略的目的のために干渉行為を行う（あるいはその能力を保持する）現実によって制約を受けている。ITU決議においても、国家安全保障や防衛目的の干渉を例外とする場合があることが示唆されており [190]、これはPNTの安定供給という地球益と、各国の安全保障上の利益との間に緊張関係が存在することを示している。このため、国際的な規制や協力の呼びかけだけでは、特に国家が関与する意図的な干渉を完全に抑制することは困難であり、真のレジリエンス確保は、外交努力に加え、技術的な堅牢性の追求と多様な代替手段の確保に大きく依存すると考えられる。

7. GNSS信号干渉の将来展望と克服すべき課題 (Future Outlook and Challenges to

Overcome in GNSS Signal Interference)

GNSS信号干渉の脅威は、技術の進歩とともに常に進化しており、将来的にもその巧妙化・高度化が予測される。これに対し、対策技術もまた進化を続けるが、克服すべき課題は依然として多い。

干渉技術の高度化・巧妙化と新たな脅威の出現 (Increasing Sophistication of Interference Techniques and Emergence of New Threats)

- **AI/MLを活用した適応型ジャミング・スプーフィング攻撃:** 将来的には、AIや機械学習（ML）を利用して、受信環境や対策技術をリアルタイムに学習・適応し、より効果的にGNSS利用を妨害するジャミング・スプーフィング攻撃が出現する可能性がある [57]。これらは、従来の静的な干渉パターンとは異なり、予測や対策がより困難になることが予想される [66]。
- **サイバー攻撃との融合:** GNSS受信機や関連システムへのサイバー攻撃と、電波干渉を組み合わせた複合的な脅威が増加する可能性がある [8]。例えば、受信機のソフトウェアの脆弱性を突いて誤動作させたり、認証情報を窃取したりした上で、スプーフィング攻撃を仕掛けるといったシナリオが考えられる。
- **宇宙空間からの干渉:** 衛星に搭載されたジャマーや、指向性エネルギー兵器など、宇宙空間から広範囲にGNSS信号を妨害する新たな脅威が出現するリスクも否定できない [8]。これは、特に広域インフラや国家安全保障に対する深刻な脅威となりうる。
- **干渉技術のアクセシビリティ向上:** ソフトウェア無線（SDR）技術の発展や、オープンソースの信号生成ツールの普及により、高度な干渉攻撃を実行するための技術的・経済的ハードルが低下している [26]。これにより、国家以外の主体（テロリスト、犯罪組織、あるいは個人）による巧妙な干渉攻撃が増加し、脅威がより広範かつ予測困難になる可能性がある。

対策技術の進化、標準化、および社会実装の動向 (Evolution of Mitigation Technologies, Standardization, and Societal Implementation Trends)

脅威の進化に対応するため、対策技術も継続的に進化している。

- **AI/MLによるインテリジェントな干渉検知・対処:** AI/MLを活用し、干渉信号のパターンを学習・識別し、異常をリアルタイムに検知、さらには最適な軽減策を自動的に選択・実行するインテリジェントな受信システムの開発が進められている [45]。
- **信号認証技術の普及:** GalileoのOSNMA、GPSのChimera、QZSSのQZNMAといった信号認証技術が実用化され、対応受信機への搭載が進むことで、スプーフィングに対する基本的な防御層が形成されることが期待される [55]。
- **次世代PNT技術の実用化:** LEO-PNTコンステレーションの構築 [4] や、量子センサー [121]、eLoran [84] といった代替PNT技術の実用化が進み、GNSSへの依存を低減し、PNT情報源の多様化によるレジリエンス向上が期待される。
- **国際標準・認証制度の確立:** GNSS受信機や関連機器の耐干渉性能に関する国際的な標準規格や認証制度の整備が進むことで、一定レベル以上の対策が施された製品の普及が促進される [14]。

EUSPA（欧州連合宇宙プログラム庁）のレポートでは、マルチ周波数対応、高度なPNT処理戦略、アンテナ設計の進歩、そしてGalileo OSNMAのような認証機能、複数アンテナを持つ耐性型受信機、センサーハイブリッド化などが将来の重要なトレンドとして挙げられている [100]。また、GNSS耐干渉ソリューション市場は、防衛や重要インフラのニーズを背景に大幅な成長が見込まれており、AI/ML統合やマルチコンステレーション対応が主要な技術トレンドとなっている [144]。

宇宙空間からの干渉源探知・特定技術の可能性 (Potential of Space-based Interference Detection and Localization Technologies)

地上からのGNSS干渉源を、逆に宇宙空間から探知・特定する技術も研究されている。LEO衛星コンステレーションに搭載されたセンサー（GNSS-Rペイロードに類似したものなど）を利用して、地上や海上から放射される干渉波を検出し、その位置を特定する試みである [46]。この技術が実用化されれば、広範囲を効率的に監視し、特にアクセスが困難な海域や他国領土内からの干渉源に対しても、ある程度の情報収集が可能になることが期待される。

GNSSの頑健性（レジリエンス）向上のための多層的アプローチの重要性 (Importance of a Multi-layered Approach to Enhance GNSS Resilience)

GNSS干渉の脅威は多様かつ進化し続けるため、単一の対策技術に依存するのではなく、複数の防御層を組み合わせた多層的なアプローチが不可欠である。これは、衛星系PNT（GNSS、LEO-PNT）、地上系PNT（eLoran等）、自律系PNT（INS、Visual SLAM等）といった異なる物理原理に基づくPNTソースを適材適所で組み合わせ、「システム・オブ・システムズ」として全体のPNTレジリエンスを確保するという考え方である [4]。Iridium STLのようなLEOベースの補完システムは、そのような多層防御の一翼を担う [128]。さらに、ハードウェア（耐性型受信機・アンテナ）、ソフトウェ

ア（高度な信号処理アルゴリズム、AI/ML）、運用手順（干渉検知時の対応プロトコル）、そして政策・規制（周波数管理、不法電波の取り締まり）といった各レベルでの包括的な対策を講じることが、真のPNTレジリエンス確立には不可欠である [20]。

社会経済的影響の評価と持続可能なGNSS利用環境の構築 (Assessment of Socio-economic Impacts and Establishment of a Sustainable GNSS Operational Environment)

GNSS障害が社会経済に与える影響は甚大である。英国政府の試算では、GNSSが長期間利用不能になった場合、1日あたり10億ポンド（約1900億円）の経済損失が生じるとされている [9]。米国においても、1ヶ月間のGPS停止で約582億ドル（約8.7兆円）、短期間でも1日あたり10億ドルの損失との試算がある [11]。これらの試算は、GNSSが現代経済の基盤としていかに重要であるかを示している。

このような甚大な影響を回避するためには、重要インフラにおけるPNT依存度の正確な評価と、それに基づくリスク管理体制の強化が急務である [3]。GNSS脆弱性に対する認識の高まりは、単なる技術的対策を超え、PNTレジリエンスを国家戦略上の優先課題として位置づける動きへと繋がっている。これは、PNTがもはや単なるユーティリティではなく、能動的な保護と多様化を必要とする重要な国家資産として認識され始めたことを意味する。米国の大統領令13905号に基づく国家PNT R&D計画 [82]、国際機関による加盟国への行動喚起 [48]、耐干渉ソリューション市場の成長 [144]、そしてQZSSやGalileo OSNMAのような各国独自のPNT自律性・耐性強化の取り組み [102] などは、このパラダイムシフトの現れと言えるだろう。

8. 結論と提言 (Conclusion and Recommendations)

GNSS信号干渉問題の重要性と継続的取り組みの必要性 (Reiteration of the Significance of GNSS Interference and the Need for Continuous Efforts)

本報告書で詳述してきたように、GNSSは現代社会の神経系とも言える不可欠な社会基盤であるが、その信号の脆弱性に起因する干渉問題は、偶発的なものから悪意のある攻撃まで多様化・深刻化しており、我々の生活や経済活動、安全保障に対する広範かつ重大なリスクとなっている。干渉技術と対策技術は「いたちごっこ」の様相を呈しており、脅威は常に進化し続けるため、この問題に対する継続的な警戒、研究開発、そして国際的な協調体制の強化が不可欠である。

技術開発、政策推進、国際連携強化に向けた具体的提言 (Specific Recommendations for Technological Development, Policy Advancement, and Strengthening International Cooperation)

GNSS信号干渉の脅威に効果的に対処し、PNTサービスの持続的な信頼性を確保するため、以下の提言を行う。

技術開発 (Technological Development):

1. **耐干渉型受信機・アンテナ技術の高度化と普及促進:**
    - 適応フィルタリング、RAIM/ARAIM、CRPAなどの既存技術の性能向上、小型化、低コスト化を推進し、より広範なユーザーセグメント（民生機器を含む）への搭載を促進する。
    - 特に、スプーフィングに対する防御の要となる信号認証技術（OSNMA、Chimera、QZNMA等）の国際標準化を加速し、全ての新規GNSS受信機への搭載を奨励する。
2. **AI/MLを活用した次世代型干渉検知・特定・対処技術の研究開発強化:**
    - 未知の、あるいは適応的に変化する干渉パターンをリアルタイムに検知・分類し、最適な対処法を自律的に選択・実行可能なインテリジェントPNTシステムの開発を国家プロジェクトとして推進する。
    - 多様かつ大規模な実環境干渉データセットの構築と共有を進め、AIモデルの学習と検証を加速する。
3. **代替PNT技術の実用化加速と社会実装:**
    - LEO-PNT、eLoran、量子センサー、慣性航法システム、Signals of Opportunityなど、GNSSとは異なる物理原理に基づく多様な代替PNT技術の研究開発を支援し、早期実用化と重要インフラへの段階的導入を促進する。
    - これらの代替技術とGNSSをシームレスに統合し、状況に応じて最適なPNTソースを自動選択するセンサーフュージョン技術の高度化を図る。

政策推進 (Policy Advancement):

1. **国内におけるGNSS干渉に関する法規制の整備・執行強化:**
    - 電波法に基づき、意図的なGNSS信号妨害（ジャミング、スプーフィング）に対する罰則を明確化・厳格化するとともに [149]、不法なジャマー等の製造・販売・所持・使用に対する取り締まりを強化する。
    - 偶発的干渉を未然に防ぐため、電子機器の電磁両立性（EMC）基準を強化し、市場監視を徹底する。

2. **重要インフラ事業者に対するPNTレジリエンス確保策の指針策定と導入支援:**
    - 電力、通信、金融、交通などの重要インフラ分野におけるPNT依存度評価を定期的に実施し、その結果に基づいた事業継続計画（BCP）の策定を事業者に求める。
    - 代替PNTシステムの導入や耐干渉型受信機の装備など、レジリエンス強化策の導入に対する技術的・財政的支援制度を検討する。
3. **QZSS「みちびき」の高度化とサービスの安定運用:**
    - 計画されている7機体制への早期移行と、将来的な11機体制への拡張を着実に進め、日本独自の持続測位能力を確立する [87]。
    - 信号認証サービス（QZNMA）および公共専用信号の安定的な提供と利用拡大を図り、国内PNTインフラの信頼性を向上させる。
4. **干渉インシデント報告・情報共有体制の強化:**
    - 国内外で発生したGNSS干渉インシデントに関する情報を迅速に収集・分析し、関係省庁、重要インフラ事業者、研究機関、一般利用者の間で共有するためのプラットフォームを構築・運用する。

国際連携強化 (Strengthening International Cooperation):

1. **国際機関を通じたルール形成と周波数保護:**
    - ITU、ICAO、IMO、ICGなどの国際機関における議論に積極的に参画し、GNSS用周波数帯の国際的な保護、干渉許容基準の策定、意図的干渉の禁止といったルール形成を主導する。
2. **GNSS提供国・地域間での協力:**
    - 主要なGNSS提供国・地域（米国、EU、ロシア、中国、インド等）との間で、システムの互換性・相互運用性の向上、干渉情報や対策技術の共有、宇宙空間の安定的利用に関する対話を継続・強化する。
3. **国際共同研究・実証実験の推進:**
    - GNSS干渉の検知・特定・軽減技術や、代替PNT技術に関する国際共同研究プロジェクトや実証実験を積極的に推進し、知見と技術の国際的な共有を図る。
4. **宇宙空間の安定的利用に関する国際規範形成への貢献:**
    - 宇宙空間からの干渉といった新たな脅威に対し、宇宙空間の平和的かつ持続可能な利用を確保するための国際的な規範作りや信頼醸成措置に積極的に貢献する。

GNSS信号干渉問題は、技術、政策、国際協力が複雑に絡み合う地球規模の課題である。本報告書が提示した現状分析と将来展望、そして提言が、この課題に対する我が国の取り組みを一層深化させ、より安全で信頼性の高いPNT利用環境の実現に資することを期待する。

引用文献

1. GNSSの理解: 仕組み、主要システム、アプリケーションのすべて, 5月 29, 2025にアクセス、 https://www.taoglas.com/jp/understanding-gnss-what-it-is-and-how-it-works/
2. GNSS and Satellite Navigation Explained - Inertial Labs, 5月 29, 2025にアクセス、 https://inertiallabs.com/gnss-and-satellite-navigation-explained/
3. sites.calian.com, 5月 29, 2025にアクセス、 https://sites.calian.com/app/uploads/sites/11/2025/01/Calian-AntiJamming-GNSS-Antenna-A250122WP-WEB.pdf
4. docs.fcc.gov, 5月 29, 2025にアクセス、 https://docs.fcc.gov/public/attachments/DOC-410031A1.pdf
5. CRPA Antennas Explained: Choosing and Testing the Best Anti-Jam Solutions for GPS/GNSS Resilience - Spirent, 5月 29, 2025にアクセス、 https://www.spirent.com/blogs/crpa-antennas-explained-choosing-and-testing-the-best-anti-jam-solutions-for-gps-gnss-resilience
6. GNSS timing solutions - u-blox, 5月 29, 2025にアクセス、 https://www.u-blox.com/en/time
7. Quasi-Zenith Satellite System (QZSS) First Quasi-Zenith Satellite System 'MICHIBIKI' - Japan Aerospace Exploration Agency, 5月 29, 2025にアクセス、 https://global.jaxa.jp/countdown/f18/pdf/presskit_michibiki_e.pdf
8. Internet-exposed GNSS receivers pose threat globally in 2024 ..., 5月 29, 2025にアクセス、 https://securelist.com/internet-exposed-gnss-receivers-in-2024/114548/
9. The Problem with GNSS (Understanding Resilient PNT) | Insights ..., 5月 29, 2025にアクセス、 https://steatite-embedded.co.uk/insights/tech-explained/the-problem-with-gnss-understanding-resilient-pnt/
10. How GNSS Receivers Empower Smart Cities | Septentrio, 5月 29, 2025にアクセス、 https://www.septentrio.com/en/learn-more/insights/how-gnss-receivers-empower-smart-cities
11. Counting the cost of GPS vulnerability: Why the US needs a terrestrial backup - Blog - Adtran, 5月 29, 2025にアクセス、 https://www.blog.adtran.com/en/counting-the-cost-of-gps-vulnerability-why-the-us-needs-a-terrestrial-backup
12. Strengthening PNT to Avert Economic Setbacks - Geospatial World, 5月 29, 2025にアクセス、 https://geospatialworld.net/prime/technology-and-innovation/strengthening-pnt-to-avert-economic-setbacks/
13. GNSS干渉, 5月 29, 2025にアクセス、

https://www.marubun.co.jp/wp-content/uploads/a7ijkd0000006z4j/a7ijkd000000urtb.pdf
14. GNSS Interference, 5月 29, 2025にアクセス、 https://www.ion.org/gnss/upload/files/2157_Septentrio_GNSS_Interference_A5_LR.pdf
15. www.icao.int, 5月 29, 2025にアクセス、 https://www.icao.int/MID/Documents/2024/ATM%20SG10/RSA%2014-GNSS%20Vulnerabilities.docx
16. swfound.org, 5月 29, 2025にアクセス、 https://swfound.org/media/108538/swf_rfi_fact_sheet_2013.pdf
17. GNSS Jamming: An Omnipresent Threat - Geospatial World, 5月 29, 2025にアクセス、 https://geospatialworld.net/prime/special-features/gnss-jamming-an-omnipresent-threat/
18. Let's Talk About Satellite Signal Interference - Safran - Navigation & Timing, 5月 29, 2025にアクセス、 https://safran-navigation-timing.com/lets-talk-about-satellite-signal-interferences/
19. Satellite jamming is a real and growing threat. How can we protect ..., 5月 29, 2025にアクセス、 https://www.space.com/space-exploration/satellites/satellite-jamming-is-a-real-and-growing-threat-how-can-we-protect-our-space-infrastructure
20. www.gps.gov, 5月 29, 2025にアクセス、 https://www.gps.gov/cgsic/meetings/2023/gadimova.pdf
21. Why aviation needs space-based surveillance now, not later - Spire, 5月 29, 2025にアクセス、 https://spire.com/blog/space-reconnaissance/why-aviation-needs-space-based-surveillance-now-not-later/
22. Disruption of GNSS Signals - IFATCA, 5月 29, 2025にアクセス、 https://ifatca.org/disruption-of-gnss-signals/
23. GPSPATRON White Paper | GPSPATRON.com, 5月 29, 2025にアクセス、 https://gpspatron.com/gpspatron-white-paper/
24. Time Synchronization Techniques in the Modern Smart Grid: A ..., 5月 29, 2025にアクセス、 https://www.mdpi.com/1996-1073/18/5/1163
25. Europe's JRC Makes Resilient Timing a Priority - Inside GNSS - Global Navigation Satellite Systems Engineering, Policy, and Design, 5月 29, 2025にアクセス、 https://insidegnss.com/europes-jrc-makes-resilient-timing-a-priority/
26. GNSS Spoofing and Detection, 5月 29, 2025にアクセス、 https://radionavlab.ae.utexas.edu/images/stories/files/papers/gnss_spoofing_detection.pdf
27. What is GPS Jamming? - Windward, 5月 29, 2025にアクセス、 https://windward.ai/glossary/what-is-gps-jamming/
28. GPS・GNSSへのジャミング・スプーフィングが脅威に！対策をわかりやすく解説 - アカサカテック, 5月 29, 2025にアクセス、 https://www.akasakatec.com/blog/5976/
29. GNSS測量の基礎知識と活用事例 - 基幹構造株式会社, 5月 29, 2025にアクセス、 https://key-s-c.co.jp/column/gnss%E6%B8%AC%E9%87%8F%E3%81%AE%E5%9F%BA%E6%9C%AC
30. How Does GNSS Positioning Work? | Swiftnav, 5月 29, 2025にアクセス、 https://www.swiftnav.com/resource/blog/how-does-gnss-positioning-work
31. Unintentional Interference | NovAtel, 5月 29, 2025にアクセス、 https://novatel.com/tech-talk/velocity-magazine/velocity-2015/unintentional-interference
32. GNSS Timing and Atmospheric interferences: How GNSS is Solving These Problems, 5月 29, 2025にアクセス、 https://globalgpssystems.com/gnss/gnss-timing-and-atmospheric-interferences-how-gnss-is-solving-these-problems/
33. GNSS測量とTS測量の違いとは？ ～作業手順や誤差について比較 ..., 5月 29, 2025にアクセス、 https://digital-construction.jp/column/1052
34. GNSS精度の向上: 技術の仕組みと影響要因を徹底解説 - Taoglas, 5月 29, 2025にアクセス、 https://www.taoglas.com/jp/precision-matters-exploring-the-importance-of-gps-precision-accuracy/
35. www.soumu.go.jp, 5月 29, 2025にアクセス、 https://www.soumu.go.jp/main_content/000844653.pdf
36. How to reduce the impact of RF interference on GNSS performance |, 5月 29, 2025にアクセス、 https://www.u-blox.com/en/blogs/tech/reducing-rf-interference-gnss-performance
37. GPS Spoofing At Russia's Borders: What to Know - GNSS Jamming, 5月 29, 2025にアクセス、 https://www.gnssjamming.com/post/gps-spoofing-report-october-2024
38. GPS jamming & spoofing threaten maritime navigation, 5月 29, 2025にアクセス、 https://www.satelliteevolution.com/post/gps-jamming-spoofing-threaten-maritime-navigation
39. Drone GPS Jammers | GNSS Jamming, 5月 29, 2025にアクセス、 https://www.unmannedsystemstechnology.com/expo/drone-gps-jammers/
40. Mitigating Jamming & Spoofing risks in drones with GNSS Systems, 5月 29, 2025にアクセス、 https://www.dronescelab.com/mitigating-jamming-spoofing-risks-with-gnss-systems/
41. Meeting the challenges of “jamming” and “spoofing” in civil aviation | Safran, 5月 29, 2025にアクセス、 https://www.safran-group.com/news/meeting-challenges-jamming-and-spoofing-civil-aviation-2025-01-15
42. Jamming and Spoofing of Global Navigation Satellite Systems (GNSS), 5月 29, 2025にアクセス、 https://www.maritimeglobalsecurity.org/media/1043/2019-jamming-spoofing-of-gnss.pdf
43. JammerTest results - which GNSS receivers are more resilient, 5月 29, 2025にアクセス、 https://www.septentrio.com/en/learn-more/insights/most-resilient-receiver-withstanding-gnss-jamming-and-spoofing
44. GNSS Anti-Interference Technologies for Unmanned Systems: A Brief Review - MDPI, 5月 29, 2025にアクセス、 https://www.mdpi.com/2504-446X/9/5/349
45. GNSS interference mitigation method based on deep learning - Frontiers, 5月 29, 2025にアクセス、 https://www.frontiersin.org/journals/physics/articles/10.3389/fphy.2025.1535906/epub
46. ION GNSS+ - NICT, 5月 29, 2025にアクセス、 https://www.nict.go.jp/en/asean_ivo/gden8c0000000492-att/si56da00000007vh.pdf
47. Mitigating jamming and spoofing with GRIT - NovAtel, 5月 29, 2025にアクセス、 https://novatel.com/tech-talk/velocity-magazine/velocity-2023/mitigating-jamming-and-spoofing-with-grit

48. Protect satellite navigation from interference, UN agencies urge - ITU, 5月 29, 2025にアクセス、https://www.itu.int/en/mediacentre/Pages/PR-2025-03-25-radio-navigation-satellite-service-harmful-interference.aspx
49. www.itu.int, 5月 29, 2025にアクセス、https://www.itu.int/en/ITU-R/Documents/FAQs%20on%20GNSS%20Interference.pdf
50. ITU issues warning on interference with radio navigation satellite service, 5月 29, 2025にアクセス、https://www.itu.int/hub/2022/08/warning-harmful-interference-rnss/
51. ops.group, 5月 29, 2025にアクセス、https://ops.group/dashboard/wp-content/uploads/2024/09/GPS-Spoofing-Crew-Guidance-WG2024-OG1.pdf
52. gnss-imu.com, 5月 29, 2025にアクセス、 https://gnss-imu.com/down/upload/20240401/1711968244.pdf
53. Spoofing attack - Wikipedia, 5月 29, 2025にアクセス、 https://en.wikipedia.org/wiki/Spoofing_attack
54. GPS spoofing: a cyber security threat to in car navigation & AVs ..., 5月 29, 2025にアクセス、https://focalpointpositioning.com/insights/gps-spoofing-a-cyber-security-threat-to-in-car-navigation-avs
55. Sensitivity Analysis of Galileo OSNMA Cross-Authentication ... - MDPI, 5月 29, 2025にアクセス、https://www.mdpi.com/2673-4591/88/1/12
56. Insight: Galileo OSNMA for GPS/GNSS receivers - Septentrio, 5月 29, 2025にアクセス、https://www.septentrio.com/en/learn-more/insights/osnma-latest-gnss-anti-spoofing-security
57. [2501.02352] GNSS/GPS Spoofing and Jamming Identification Using Machine Learning and Deep Learning - arXiv, 5月 29, 2025にアクセス、 https://arxiv.org/abs/2501.02352
58. (PDF) GNSS Spoofing - Advanced Mechanizms of Detection - ResearchGate, 5月 29, 2025にアクセス、https://www.researchgate.net/publication/371774315_GNSS_Spoofing_-_Advanced_Mechanizms_of_Detection
59. Advanced GNSS Spoofing Detection: Aggregated Correlation Residue Likelihood Analysis, 5月 29, 2025にアクセス、 https://www.mdpi.com/2072-4292/16/15/2868
60. Signal Authentication Service | Service Overview | QZSS (Quasi ..., 5月 29, 2025にアクセス、https://qzss.go.jp/en/overview/services/sv14_sas.html
61. Galileo OSNMA as a Contribution to Resilient PNT | Technical Program - ION GNSS+ 2025, 5月 29, 2025にアクセス、 https://www.ion.org/gnss/abstracts.cfm?paperID=15955
62. Japanese QZSS Authentication for Spoof-Proof Drone Delivery - Inside GNSS - Global Navigation Satellite Systems Engineering, Policy, and Design, 5月 29, 2025にアクセス、https://insidegnss.com/japanese-qzss-authentication-for-spoof-proof-drone-delivery/
63. (PDF) GNSS Spoofing Detection and Mitigation Based on Maximum Likelihood Estimation, 5月 29, 2025にアクセス、https://www.researchgate.net/publication/319113380_GNSS_Spoofing_Detection_and_Mitigation_Based_on_Maximum_Likelihood_Estimation
64. Public Regulated Service | Service Overview | QZSS (Quasi-Zenith ..., 5月 29, 2025にアクセス、https://qzss.go.jp/en/overview/services/sv10_public.html
65. Self-Supervised Federated GNSS Spoofing Detection with Opportunistic Data, 5月 29, 2025にアクセス、https://www.researchgate.net/publication/391658528_Self-Supervised_Federated_GNSS_Spoofing_Detection_with_Opportunistic_Data
66. Unmasking GNSS Attacks Through Machine Learning: Advanced Jamming and Spoofing Detection in GMV GSharp® | Technical Program - ION GNSS+ 2025 - The Institute of Navigation, 5月 29, 2025にアクセス、https://www.ion.org/gnss/abstracts.cfm?paperID=15927
67. www.unoosa.org, 5月 29, 2025にアクセス、https://www.unoosa.org/documents/pdf/icg/providersforum/2017/04.pdf
68. www.unoosa.org, 5月 29, 2025にアクセス、 https://www.unoosa.org/documents/pdf/icg/2017/wgs/wgs-7.pdf
69. The dangers of GNSS interference – IFATCA, 5月 29, 2025にアクセス、https://ifatca.org/article/the-dangers-of-gnss-interference/
70. www.icao.int, 5月 29, 2025にアクセス、https://www.icao.int/MID/Documents/2022/SEIG4%20and%20NASP/PPT5.pdf
71. Electromagnetic Interference and GNSS: the threat to civil aviation, 5月 29, 2025にアクセス、https://www.ospreyflightsolutions.com/casestudy/electromagnetic-interference-and-gnss-the-threat-to-civil-aviation
72. Study shows GNSS interference in the Baltic Sea - SAFETY4SEA, 5月 29, 2025にアクセス、https://safety4sea.com/study-shows-gnss-interference-in-the-baltic-sea/
73. EU to upgrade GPS systems as Russian jamming efforts spark response - Defense News, 5月 29, 2025にアクセス、https://www.defensenews.com/global/europe/2025/03/12/eu-to-upgrade-gps-systems-as-russian-jamming-efforts-spark-response/
74. Russian Jamming Is Wreaking Havoc on GPS in Eastern Europe. But Is It Hybrid Warfare?, 5月 29, 2025にアクセス、 https://www.airandspaceforces.com/russian-gps-jamming-nato-ukraine/
75. GPS Spoofing Final Report - OpsGroup, 5月 29, 2025にアクセス、https://ops.group/dashboard/wp-content/uploads/2024/09/GPS-Spoofing-Final-Report-OPSGROUP-WG-OG24.pdf
76. The Growing Threat to GPS That Policymakers Can't Ignore ..., 5月 29, 2025にアクセス、https://www.sandboxaq.com/post/the-growing-threat-to-gps-that-policymakers-cant-ignore
77. GNSS Interference - Safety First | Airbus, 5月 29, 2025にアクセス、https://safetyfirst.airbus.com/gnss-interference/
78. www.eurocontrol.int, 5月 29, 2025にアクセス、https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2025-01/eurocontrol-nmuf-2025-day2-s5-mitigating-gnss-rfi.pdf

79. www.icao.int, 5月 29, 2025にアクセス、 https://www.icao.int/Meetings/anconf14/Documents/WP/wp_151_en.pdf
80. BACKGROUND: GNSS spoofing in China and beyond - Risk Intelligence, 5月 29, 2025にアクセス、 https://www.riskintelligence.eu/background-and-guides/background-gnss-spoofing-in-china-and-beyond
81. TU Graz Risk Assessment Tool Evaluates Potential Dangers of GNSS Interference Signals, 5月 29, 2025にアクセス、 https://www.tugraz.at/en/tu-graz/services/news-stories/tu-graz-news/singleview/article/risikoeinschaetzungs-tool-der-tu-graz-bewertet-potenzielle-gefahren-von-gnss-stoersignalen
82. bidenwhitehouse.archives.gov, 5月 29, 2025にアクセス、 https://bidenwhitehouse.archives.gov/wp-content/uploads/2021/08/Position_Navigation_Timing_RD_Plan-August-2021-1.pdf
83. GNSSによる高度タイミング用途と、みちびきの役割, 5月 29, 2025にアクセス、 https://qzss.go.jp/usage/userreport/ntt_181027.html
84. eLoran timing system reduces reliance on GPS, 5月 29, 2025にアクセス、 https://www.edgecomputing-news.com/news/eloran-timing-system-reduces-reliance-on-gps/
85. Advanced GNSS Tech Boosts Precision Agriculture Today, 5月 29, 2025にアクセス、 https://farmonaut.com/precision-farming/advanced-gnss-tech-boosts-precision-agriculture-today
86. A comparative analysis of the performance of various GNSS positioning concepts dedicated to precision agriculture - ResearchGate, 5月 29, 2025にアクセス、 https://www.researchgate.net/publication/377959878_A_comparative_analysis_of_the_performance_of_various_GNSS_positioning_concepts_dedicated_to_precision_agriculture
87. 準天頂衛星システムみちびき 「衛星測位に関する取組方針」 2024 の策定 - 内閣府, 5月 29, 2025にアクセス、 https://www8.cao.go.jp/space/comittee/27-anpo/anpo-dai61/siryou2-1.pdf
88. GNSS Signal Acquisition in The Presence of Narrowband Interference - University of Calgary, 5月 29, 2025にアクセス、 https://www.ucalgary.ca/engo_webdocs/GL/09.20388_MohammadAbdizadeh.pdf
89. WO2023229479A1 - Method and apparatus for mitigation of gnss-signal interference - Google Patents, 5月 29, 2025にアクセス、 https://patents.google.com/patent/WO2023229479A1/en
90. www.arxiv.org, 5月 29, 2025にアクセス、 http://www.arxiv.org/pdf/2504.06015
91. Interference Mitigation for GNSS Receivers Using FFT Excision Filtering Implemented on an FPGA - CORE, 5月 29, 2025にアクセス、 https://core.ac.uk/outputs/622447080/?source=2
92. Interference Mitigation for GNSS Receivers Using FFT Excision Filtering Implemented on an FPGA - ResearchGate, 5月 29, 2025にアクセス、 https://www.researchgate.net/publication/365071922_Interference_Mitigation_for_GNSS_Receivers_Using_FFT_Excision_Filtering_Implemented_on_an_FPGA
93. Waveletsand notch filtering - Inside GNSS, 5月 29, 2025にアクセス、 https://insidegnss.com/auto/IGM_janfeb11-WP.pdf
94. Use of the Wavelet Transform for Interference Detection and Mitigation in Global Navigation Satellite Systems - ResearchGate, 5月 29, 2025にアクセス、 https://www.researchgate.net/publication/275071571_Use_of_the_Wavelet_Transform_for_Interference_Detection_and_Mitigation_in_Global_Navigation_Satellite_Systems
95. Interference Mitigation in GNSS Receivers by a Time-Frequency Approach - ResearchGate, 5月 29, 2025にアクセス、 https://www.researchgate.net/publication/258792367_Interference_Mitigation_in_GNSS_Receivers_by_a_Time-Frequency_Approach
96. RL-AKF: An Adaptive Kalman Filter Navigation Algorithm Based on Reinforcement Learning for Ground Vehicles - MDPI, 5月 29, 2025にアクセス、 https://www.mdpi.com/2072-4292/12/11/1704
97. Advanced Receiver Autonomous Integrity Monitoring for ..., 5月 29, 2025にアクセス、 https://defence-industry-space.ec.europa.eu/calls-tenders/advanced-receiver-autonomous-integrity-monitoring-applications-beyond-aviation-sector-araimtoo_en
98. Q: Are RAIM and Advanced RAIM useful for applications that take ..., 5月 29, 2025にアクセス、 https://insidegnss.com/q-are-raim-and-advanced-raim-useful-for-applications-that-take-advantage-of-differential-gnss-corrections-for-integrity/
99. Service Comparison｜Service Overview｜QZSS (Quasi-Zenith Satellite System), 5月 29, 2025にアクセス、 https://qzss.go.jp/en/overview/services/sv11_comparison.html
100. EUSPA launches GNSS and Secure SATCOM User Technology Report, 5月 29, 2025にアクセス、 https://www.euspa.europa.eu/newsroom-events/news/euspa-launches-gnss-and-secure-satcom-user-technology-report
101. www.icao.int, 5月 29, 2025にアクセス、 https://www.icao.int/MID/Documents/2024/PBN%20SG9/PBN%20SG9%20-%20PPT5-ECTL%20GNSS-Interference.pdf
102. EU Space a bedrock for building a more autonomous Europe | EU ..., 5月 29, 2025にアクセス、 https://www.euspa.europa.eu/newsroom-events/news/eu-space-bedrock-building-more-autonomous-europe
103. 衛星測位に関する取組方針 2025 （案） - 内閣府, 5月 29, 2025にアクセス、 https://www8.cao.go.jp/space/comittee/dai118/siryou3-1.pdf
104. Update of QZSS, 5月 29, 2025にアクセス、 https://home.csis.u-tokyo.ac.jp/~dinesh/GNSS_Train_files/202501/PresentationMaterials/04_QZSS.pdf
105. CRPA for Anti-jamming Capability | Asian Journal For Convergence ..., 5月 29, 2025にアクセス、 http://www.asianssr.org/index.php/ajct/article/view/1378
106. Controlled Reception Pattern Antennas - Spirent, 5月 29, 2025にアクセス、 https://www.spirent.com/blogs/controlled-reception-pattern-antennas-the-next-frontier-in-gnss-resilience

107. Understanding GNSS Antennas: The ultimate guide - FocalPoint - Focal Point Positioning, 5月 29, 2025にアクセス、 https://focalpointpositioning.com/insights/understanding-gnss-antennas-the-ultimate-guide
108. GNSS Constellations Monitoring Using a Phased Array Antenna System - MDPI, 5月 29, 2025にアクセス、 https://www.mdpi.com/2673-4591/88/1/9
109. Distributed Sensitivity and Critical Interference Power Analysis of Multi-Degree-of-Freedom Navigation Interference for Global Navigation Satellite System Array Antennas, 5月 29, 2025にアクセス、 https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11154335/
110. JAXA and MetCom commence collaborative efforts on the Terrestrial PNT＊1 System., 5月 29, 2025にアクセス、 https://global.jaxa.jp/press/2024/02/20240229-1_e.html
111. JAXA、MetCom、「地上波方式測位システム」に関する共創活動を開始 - JAXA, 5月 29, 2025にアクセス、 https://www.jaxa.jp/press/2024/02/20240229-1_j.html
112. スマートフライト（高度判断支援）技術の研究 | 安全と利用の研究開発プログラム（Sky4ALL）, 5月 29, 2025にアクセス、 https://www.aero.jaxa.jp/research/star/smart-flight/
113. C220 GR2: High-Precision GNSS Choke-Ring Antenna | CHCNAV - Navigation, 5月 29, 2025にアクセス、 https://navigation.chcnav.com/products/chcnav-C220GR2
114. Overview and Progress of GNSS Anti-multipath Antenna Designs - Sensors and Machine Learning Applications, 5月 29, 2025にアクセス、 https://www.smlajournal.com/pdf-187849-110013?filename=Overview%20and%20Progress%20of.pdf
115. GNSS Antenna Innovation: CMC Technique Whitepaper - Taoglas, 5月 29, 2025にアクセス、 https://www.taoglas.com/blogs/taoglas-whitepaper-multipath-analysis-using-code-minus-carrier-technique-in-gnss-antennas/
116. What is GNSS multipath mitigation? - u-blox, 5月 29, 2025にアクセス、 https://www.u-blox.com/en/technologies/multipath-mitigation
117. A GNSS/INS/Odometer Filter Bank Using Next Generation DFMC SBAS Augmentation for Rail and Road Users - The Institute of Navigation, 5月 29, 2025にアクセス、 https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=17656
118. Active Anti-Jamming | Technology | GPS Receiver Chips & Modules - FURUNO, 5月 29, 2025にアクセス、 https://www.furuno.com/en/gnss/technical/anti-jamming
119. Technology Anti-jamming performance of FURUNO Multi-GNSS timing receivers, 5月 29, 2025にアクセス、 https://www.furuno.com/en/gnss/technical/anti_jamming_timing
120. Release of GNSS Compass JLR-41, Which Supports Multi-GNSS and Realizes High-accuracy Heading Measurement and Positioning - 日本無線, 5月 29, 2025にアクセス、 https://www.jrc.co.jp/en/news/2025/0116-1
121. The Case for LEO GNSS at C-Band - Inside GNSS - Global ..., 5月 29, 2025にアクセス、 https://insidegnss.com/the-case-for-leo-gnss-at-c-band/
122. Enhancing GNSS with a Low Earth Orbit layer: ESA's LEO-PNT In-Orbit Demonstration Mission | Technical Program - ION GNSS+ 2025 - The Institute of Navigation, 5月 29, 2025にアクセス、 https://www.ion.org/gnss/abstracts.cfm?paperID=16038
123. LEO-PNT end-to-end in-orbit demonstration: an ESA initiative to pave the way for a European GNSS constellation in LEO - Journal of Nanophotonics - SPIE Digital Library, 5月 29, 2025にアクセス、 https://nanophotonics.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/13546/1354633/LEO-PNT-end-to-end-in-orbit-demonstration--an/10.1117/12.3062635.full
124. Survey on positioning technology based on signal of opportunity from low earth orbit, 5月 29, 2025にアクセス、 https://www.frontiersin.org/journals/physics/articles/10.3389/fphy.2025.1592447/full
125. Spatial Sensitivity of Navigation Using Signal-of-Opportunity (SoOP) from Starlink, Iridium-Next, GlobalStar, OneWeb, and Orbcomm Constellations - MDPI, 5月 29, 2025にアクセス、 https://www.mdpi.com/2673-4591/88/1/29
126. Starlink PNT For SOF: How Proliferated Low Earth Orbit Satellite Constellations Can Increase Operational Resilience in GPS Degraded Environments - DTIC, 5月 29, 2025にアクセス、 https://apps.dtic.mil/sti/html/trecms/AD1225335/index.html
127. SpaceX Says Starlink Provides GPS Alternate For PNT - Aero-News.net, 5月 29, 2025にアクセス、 https://www.aero-news.net/index.cfm?do=main.textpost&id=C40479DA-8BC8-4B1C-AE62-2F9FCEC6677E
128. Iridium STL: Protecting PNT as Part of a Layered Approach - Inside GNSS - Global Navigation Satellite Systems Engineering, Policy, and Design, 5月 29, 2025にアクセス、 https://insidegnss.com/iridium-stl-protecting-pnt-as-part-of-a-layered-approach/
129. Eutelsat America Corp. and OneWeb Technologies to offer Iridium Certus and STL® Services to the U.S. Government, 5月 29, 2025にアクセス、 https://onewebtechnologies.net/eutelsat-america-corp-and-oneweb-technologies-to-offer-iridium-certus-and-stl-services-to-the-u-s-government/
130. home.csis.u-tokyo.ac.jp, 5月 29, 2025にアクセス、 https://home.csis.u-tokyo.ac.jp/~dinesh/GNSS_Train_files/202501/PresentationMaterials/05_ICG_Nepal_2025.pdf
131. LEO PNT – reality or hype? - Electronic Specifier, 5月 29, 2025にアクセス、 https://www.electronicspecifier.com/products/communications/leo-pnt-reality-or-hype
132. What is the Future of GNSS? - Geospatial World, 5月 29, 2025にアクセス、 https://geospatialworld.net/prime/future-gnss/
133. A Study on GNSS Interference Signal Detection Using CYGNSS - ResearchGate, 5月 29, 2025にアクセス、 https://www.researchgate.net/publication/389567506_A_Study_on_GNSS_Interference_Signal_Detection_Using_CYGNSS
134. What's the difference between vision-based and LiDAR-based SLAM? - Exyn Technologies, 5月 29, 2025にアクセス、 https://www.exyn.com/news/vision-vs-lidar-slam

135. How are Visual SLAM and LiDAR used in Robotic Navigation? - Ceva, 5月 29, 2025にアクセス、 https://www.ceva-ip.com/blog/how-are-visual-slam-and-lidar-used-in-robotic-navigation/
136. A Loosely Coupled Extended Kalman Filter Algorithm for Agricultural Scene-Based Multi-Sensor Fusion - PubMed Central, 5月 29, 2025にアクセス、 https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9082075/
137. 5 FAQ About Using Chip-Scale Atomic Clocks (CSAC) in Your Timing Applications, 5月 29, 2025にアクセス、 https://blog.bliley.com/5-questions-and-answers-about-using-csacs-in-timing-applications
138. CSAC-SA65 - Microchip Technology, 5月 29, 2025にアクセス、 https://www.microchip.com/en-us/product/csac-sa65
139. Quantum Sensing for Position, Navigation and Timing Use Cases - QED-C, 5月 29, 2025にアクセス、 https://quantumconsortium.org/publication/pnt2024/
140. Quantum Sensors for Positioning, Navigation, and Timing (PNT) - WEST 2025, 5月 29, 2025にアクセス、 https://www.westconference.org/WEST25/Custom/Handout/Speaker0_Session11709_1.pdf
141. VAE-based Feature Disentanglement for Data Augmentation and Compression in Generalized GNSS Interference Classification - arXiv, 5月 29, 2025にアクセス、 https://arxiv.org/html/2504.10556v1
142. GNSS interference mitigation method based on deep learning - Frontiers, 5月 29, 2025にアクセス、 https://www.frontiersin.org/journals/physics/articles/10.3389/fphy.2025.1535906/full
143. Low-Cost SDR for GNSS Interference Mitigation Using Spatial Diversity Techniques - MDPI, 5月 29, 2025にアクセス、 https://www.mdpi.com/2673-4591/88/1/7
144. GNSS Anti-Jamming Solutions Market's Tech Revolution ..., 5月 29, 2025にアクセス、 https://www.datainsightsmarket.com/reports/gnss-anti-jamming-solutions-496085
145. Military GNSS Anti-Jamming And Anti-Spoof Solutions Market Size, 5月 29, 2025にアクセス、 https://www.verifiedmarketresearch.com/product/military-gnss-anti-jamming-and-anti-spoof-solutions-market/
146. (PDF) Evaluation of (Un-)Supervised Machine Learning Methods for GNSS Interference Classification with Real-World Data Discrepancies - ResearchGate, 5月 29, 2025にアクセス、 https://www.researchgate.net/publication/384594870_Evaluation_of_Un-Supervised_Machine_Learning_Methods_for_GNSS_Interference_Classification_with_Real-World_Data_Discrepancies
147. 衛星測位に関する取組方針 2024 - 内閣府, 5月 29, 2025にアクセス、 https://www8.cao.go.jp/space/comittee/sokui-wg/s_w-dai3/sankou1.pdf
148. 情報通信審議会が「実用準天頂衛星システムの技術的条件」を一部答申｜関連ニュース, 5月 29, 2025にアクセス、 https://qzss.go.jp/info/archive/soumu_160707.html
149. 【技適マークを要確認】外国製無線機の違法電波が予想外の事故に - BONX, 5月 29, 2025にアクセス、 https://bonx.co/work/tips/transceiver-illegal/
150. ドローンの電波周波数は？電波法や電波干渉の対策を紹介 ｜お役立ち情報, 5月 29, 2025にアクセス、 https://product.acsl.co.jp/useful/post-2285/
151. 電波に関するＱ＆Ａ よくある質問・ご相談 - 電波適正利用推進員協議会, 5月 29, 2025にアクセス、 https://www.cleandenpa.net/qanda/qanda.html
152. 電波監視のQ＆A - 東海総合通信局 - 総務省, 5月 29, 2025にアクセス、 https://www.soumu.go.jp/soutsu/tokai/denpa/kansiqa/index.html
153. 電波法 | e-Gov 法令検索, 5月 29, 2025にアクセス、 https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=325AC0000000131
154. 高度な国土管理のための 3数の衛星測位システム(マルチGNSS)による 高精度測位技術の開発, 5月 29, 2025にアクセス、 https://www.mlit.go.jp/tec/gijutu/kaihatu/pdf/happyou_gnss_20100721.pdf
155. 2 災害に強い安全な国土づくり・危機管理に備えた体制の充実強化 - 国土交通省, 5月 29, 2025にアクセス、 https://www.mlit.go.jp/hakusyo/mlit/r02/hakusho/r03/html/n2722000.html
156. 1 災害に強い安全な国土づくり・危機管理に備えた体制の充実強化, 5月 29, 2025にアクセス、 https://www.mlit.go.jp/hakusyo/mlit/h25/hakusho/h26/html/n2721000.html
157. 宇宙・サイバー・電磁波の領域での対応 - 防衛省 情報検索サービス, 5月 29, 2025にアクセス、 http://www.clearing.mod.go.jp/hakusho_data/2020/pdf/R02030103.pdf
158. 研究開発ビジョン - 防衛省, 5月 29, 2025にアクセス、 https://www.mod.go.jp/atla/soubiseisaku/vision/rd_vision_print.pdf
159. Quasi-Zenith Satellite System (QZSS), 5月 29, 2025にアクセス、 https://qzss.go.jp/en/overview/downloads/isos7j0000000bl4-att/pamphlet-eng_202407-3sides.pdf
160. Multi-GNSS Advanced Orbit and Clock Augmentation - Precise Point Positioning (MADOCA-PPP) | Service Overview | QZSS (Quasi-Zenith Satellite System) - Cabinet Office (Japan), 5月 29, 2025にアクセス、 https://qzss.go.jp/en/overview/services/sv13_madoca.html
161. Centimeter Level Augmentation Service (CLAS) | Service Overview ..., 5月 29, 2025にアクセス、 https://qzss.go.jp/en/overview/services/sv06_clas.html
162. 1月 1, 1970にアクセス、 https://qzss.go.jp/en/overview/services/sv05_madoca-ppp.html
163. 1月 1, 1970にアクセス、 https://qzss.go.jp/en/overview/services/sv08_slas.html
164. systems and techniques for quasi-zenith satellite system (qzss) signal acquisition, 5月 29, 2025にアクセス、 https://patents.justia.com/patent/20240061128
165. Preparations for Galileo PRS in Poland - PMC, 5月 29, 2025にアクセス、 https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9966886/
166. Quasi-Zenith Satellite System Interface Specification Satellite Positioning, Navigation and Timing Service (IS-QZSS-PNT-004), 5月 29, 2025にアクセス、 https://qzss.go.jp/en/technical/download/pdf/ps-is-qzss/is-qzss-pnt-004.pdf
167. 1月 1, 1970にアクセス、 https://qzss.go.jp/en/overview/services/sv07_prs.html
168. Implementation of the QZSS L1-SAIF message generator | Request PDF - ResearchGate, 5月 29, 2025にアクセ

ス、
https://www.researchgate.net/publication/290048429_Implementation_of_the_QZSS_L1-SAIF_message_generator
169. 1月 1, 1970にアクセス、
https://www.unoosa.org/documents/pdf/icg/2017/wg1/ICG-12_WG1_NPA_QZSS_Program_Status.pdf
170. 情報通信研究機構における 宇宙天気予報の取り組み概要, 5月 29, 2025にアクセス、
https://www.soumu.go.jp/main_content/000788110.pdf
171. Report of Working Group B: Enhancement of GNSS Performance, New Services and Capabilities - UNOOSA, 5月 29, 2025にアクセス、 https://www.unoosa.org/documents/pdf/icg/2017/wgb/wgb-reportICG12.pdf
172. GNSS Interference in the Baltic Sea: A Collaborative Study by GPSPATRON and Gdynia Maritime University, 5月 29, 2025にアクセス、
https://gpspatron.com/gnss-interference-in-the-baltic-sea-a-collaborative-study-by-gpspatron-and-gdynia-maritime-university/
173. NEWSLETTER OF IPNTJ - 一般社団法人 測位航法学会, 5月 29, 2025にアクセス、
https://www.gnss-pnt.org/wp-content/uploads/2025/04/0409_NLV16_No.1_final_rev.2_pdf.pdf
174. Evaluating GNSS Receiver Resilience: A Study on Simulation Environment Repeatability, 5月 29, 2025にアクセス、 https://www.mdpi.com/2079-9292/14/9/1797
175. Non-Parametric GNSS Integer Ambiguity Estimation via Positional Likelihood Field Marginalization, 5月 29, 2025にアクセス、 https://staff.aist.go.jp/aoki.takanose/assets/pdf/ICRA2025.pdf
176. GNSS Jamming and Spoofing: Building Resilience - YouTube, 5月 29, 2025にアクセス、
https://www.youtube.com/watch?v=I2Kc5fV7ITk
177. パーキンソン博士らGPS開発の功労者4氏が、エリザベス女王工学賞を受賞, 5月 29, 2025にアクセス、
https://qzss.go.jp/info/archive/qeprize_190311.html
178. 国 研究開発法 産業技術総合研究所 令和５年度計画 令和５年３ 令和５年４ 改正 - 経済産業省, 5月 29, 2025にアクセス、 https://www.meti.go.jp/shingikai/kempatsushin/sangyo_gijutsu/pdf/023_s05_00.pdf
179. 「新しいフェーズに入った衛星測位技術を加速させる人材育成」の成果概要, 5月 29, 2025にアクセス、
https://www.mext.go.jp/content/20250422-mxt_uchukai02-000019567_010.pdf
180. HOME | JRC（Japan Radio Co.,Ltd.）, 5月 29, 2025にアクセス、 https://www.jrc.co.jp/en/
181. Sokkia GRX5 - GNSS Receiver - Topotrade, 5月 29, 2025にアクセス、
http://www.topotrade.ro/Documents/sokkia_grx5_sok-1057_engl25broc_rev_b.pdf
182. U.S. Statement - Agenda Item 9 - Global Navigation Satellite ..., 5月 29, 2025にアクセス、
https://vienna.usmission.gov/u-s-statement-agenda-item-9-gnss-60th-session-of-the-stsc-of-copuos-2/
183. Resiliency of the Global Positioning System (GPS) Infographic, 5月 29, 2025にアクセス、
https://www.volpe.dot.gov/our-work/resiliency-global-positioning-system-gps-infographic
184. 2004 U.S.-Russia Joint Statement on GPS-GLONASS Cooperation, 5月 29, 2025にアクセス、
https://www.gps.gov/policy/cooperation/russia/2004-joint-statement/
185. China's BeiDou: New Dimensions of Great Power Competition - Belfer Center, 5月 29, 2025にアクセス、
https://www.belfercenter.org/sites/default/files/pantheon_files/files/publication/Chinas-BeiDou_V10.pdf
186. Protect satellite navigation from interference, UN agencies urge, 5月 29, 2025にアクセス、
https://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/pages/Joint-IMO-ICAO-ITU-statement-satellite-interference.aspx
187. IMO: states must tackle GNSS interference to protect ships and crew, 5月 29, 2025にアクセス、
https://www.rivieramm.com/news-content-hub/news-content-hub/states-must-tackle-gnss-interference-to-prevent-ship-accidents-84348
188. Global Navigation Satellite Systems (GNSS) and Regulation ..., 5月 29, 2025にアクセス、
https://telecomworld101.com/gnss-regulation/
189. Spectrum Management at NASA - NASA, 5月 29, 2025にアクセス、
https://www.nasa.gov/directorates/somd/space-communications-navigation-program/spectrum-management/
190. ITU - 'Nations jamming and spoofing GNSS is OK!' - RNTF, 5月 29, 2025にアクセス、
https://rntfnd.org/2024/09/20/itu-nations-jamming-and-spoofing-gnss-is-ok/
191. Seminar on GNSS Spectrum Protection Presentations - UNOOSA, 5月 29, 2025にアクセス、
https://www.unoosa.org/oosa/en/ourwork/psa/schedule/2022/un-international-meeting-gnss_gnss-spectrum-protection.html
192. Protect satellite navigation from interference, UN agencies urge - ICAO, 5月 29, 2025にアクセス、
https://www.icao.int/Newsroom/Pages/Protect-satellite-navigation-from-interference-UN-agencies-urge.aspx
193. Protect satellite navigation from interference, UN agencies urge - Asian Aviation, 5月 29, 2025にアクセス、
https://asianaviation.com/protect-satellite-navigation-from-interference-un-agencies-urge/
194. BeiDou - Wikipedia, 5月 29, 2025にアクセス、 https://en.wikipedia.org/wiki/BeiDou
195. COPUOS - UNOOSA, 5月 29, 2025にアクセス、 https://www.unoosa.org/oosa/en/COPUOS/copuos.html
196. Report of “Seminar on GNSS Spectrum Protection and Interference Detection Mitigation” during ICG Expert Meeting in December - UNOOSA, 5月 29, 2025にアクセス、
https://www.unoosa.org/documents/pdf/icg/IDM/IDM5/IDM5_2016_01.pdf
197. 20 January 2025 - UNOOSA, 5月 29, 2025にアクセス、
https://www.unoosa.org/documents/pdf/icg/2025/Extracts_from_the_ICG_Reports_edited_20-01-2025.pdf?lng=en
198. GNSS Simulators Market Size, Share & Trends Report, 2030 - Grand View Research, 5月 29, 2025にアクセス、
https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/gnss-simulators-market-report
199. GNSS-R: GNSS jamming and spoofing source localization from space - NTNU, 5月 29, 2025にアクセス、
https://www.ntnu.edu/smallsat/gnss-jamming-and-spoofing-detection-and-localization-from-space-25-26