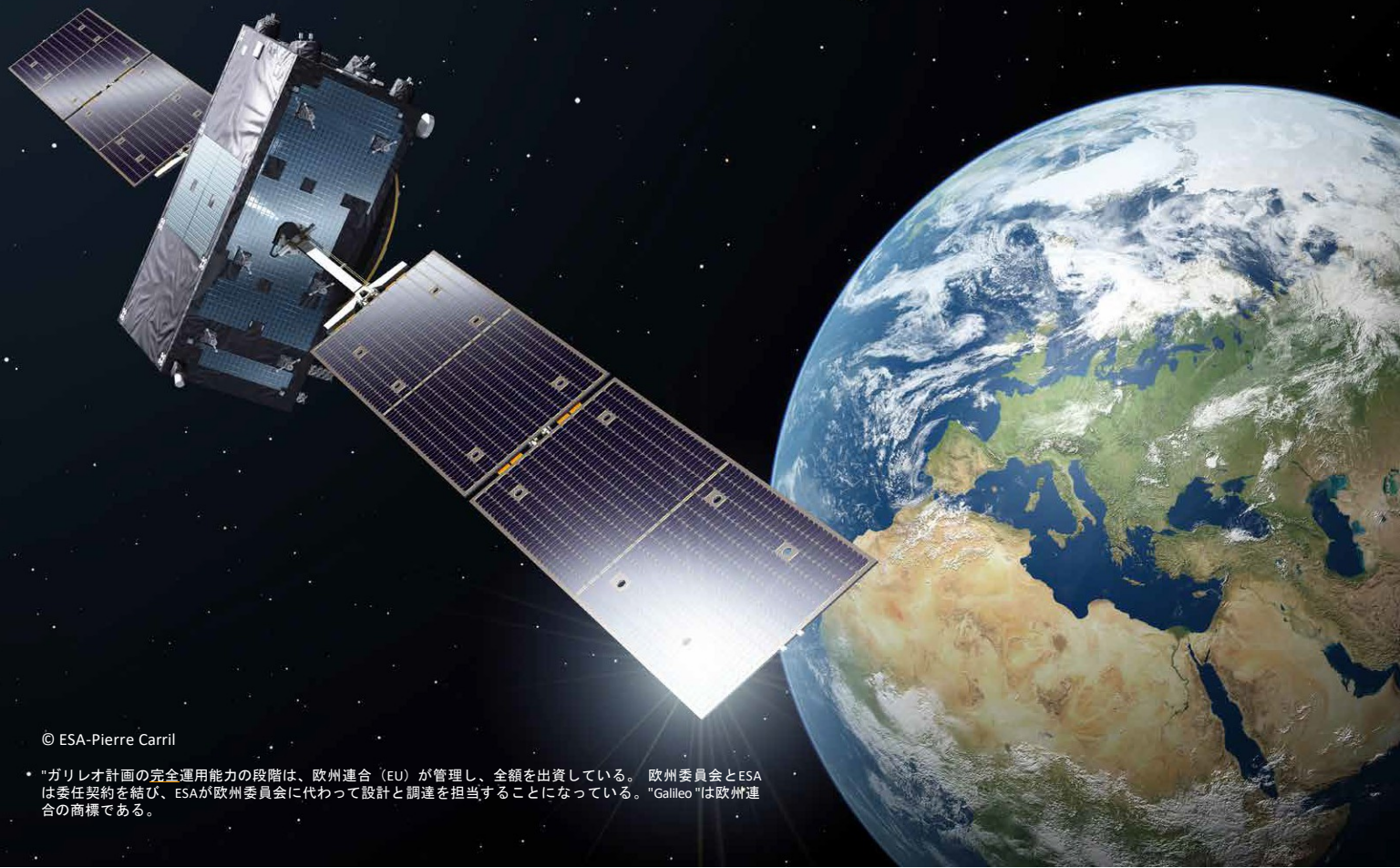




GNSS干涉



© ESA-Pierre Carril

- “ガリレオ計画の完全運用能力の段階は、欧州連合（EU）が管理し、全額を出資している。欧州委員会とESAは委任契約を結び、ESAが欧州委員会に代わって設計と調達を担当することになっている。”Galileo”は欧州連合の商標である。

【概要】

GNSS信号は電波干渉の影響を受けやすいことが課題です。
この脅威に対処するため、Septentrio社は15年以上に渡り、
独自の干渉緩和技術を完成させ、実用化してきました。

これらの対策には、適応型ノッチフィルタリング、パルスブ
ランキング、独自の広帯域干渉低減などがあります。
これらの対策と、その他のアナログおよびデジタル対策が
協調して機能することで、Septentrio社のAIM+
(Advanced Interference Mitigation)が構成されています。

AIM+の有効性は、様々な実際のフィールドアプリケーション
で繰り返し実証されており、Septentrio社の革新的な製品群の
一部として、あらゆる状況下でも測位精度と可用性を確保
することが可能です。

この20年の間に、GNSSは今日の世界における重要なインフラの一部として、その地位を
確立しました。測位やナビゲーションに留まらず、陸上、空中、海上の自律走行車をはじめ
とする様々なアプリケーションや市場にまで及んでいます。

しかし、これらの衛星航法信号は非常に微弱であり、干渉の影響を受けやすく、他の無線信
号がGNSS信号を妨害し、測位精度の低下や測位不能を引き起こす現象があります。

このパンフレットでは、様々な種類の高周波干渉(RFI)、GNSS信号や受信機への影響、そし
てSeptentrio社のGNSS受信機がこのような有害な干渉の影響をどのように識別、監視、克服
しているのか、実例を交えて紹介しております。

様々な信号が混在

電磁波・電波のスペクトル

地球上で受信されるGNSS信号は、他の無線信号の干渉の約100倍という非常に弱いものです。

特別な技術がなければ、汎用の高周波受信機とアンテナを使っても、背景の雑音の中で信号を「聞く」ことすらできません。これは、100Wの電球が20,000kmの高さを飛んでいるのを見ようとしても、見るができないのと同じことです。

RFスペクトラムには、VHF、マイクロ波、3G、WiFi、Bluetoothなど多くの既存の信号バンドがありますが、4G LTEや5Gなどの新しいプロトコルの導入により、さらに混雑しています。

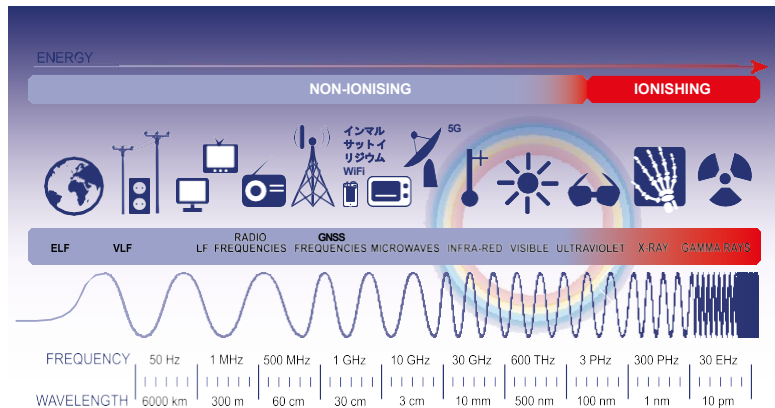


図1 - RFスペクトル

さまざまなGNSS（GPS、GLONASS、Galileo、BeiDou）が専用の周波数帯で送信しているにもかかわらず、GNSSの「すぐそば」では多くのRF信号が放射されています。それらの信号の一部はGNSSの帯域に波及し、位置の品質や精度に影響を与え、時にはGNSSの信号を完全にかき消してしまうこともあります。更に、意図せず、あるいは故意に、人が直接GNSS信号を妨害することもあります。海上テレビのアンテナに欠陥があると、GNSS信号が妨害されるという報告もあります。また、車両追跡システムやGNSSを利用した道路通行料の普及に伴い、違法だが安価なGNSS Carジャマーの存在が増えてきています。

干渉がGNSSに与える影響

高精度なGNSS受信機は、スピルオーバー信号によって、干渉波が増加した場合でも、GNSS情報を抽出することができます。

GNSSを利用するアプリケーションのほとんどの目的は測位です。



正確性



信頼性



可用性

主要なGNSS測位性能の評価指標

GNSSの測位性能は、衛星の測定値（コード疑似距離と搬送波位相）の可用性と精度に依存する。高精度と耐障害性を実現するために、このような高精度な受信機は、以下のように様々な周波数や複数のGNSSコンステレーションの信号を追跡することが可能です。

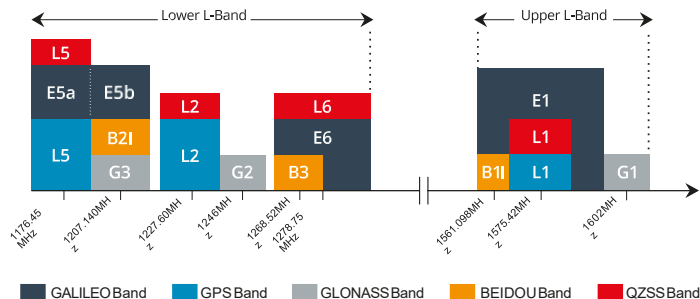


図2 - GNSSのRFスペクトラム

この冗長性により、少数の衛星の測定値が干渉を受けても、高精度な受信機の測位精度には影響がない。しかし、干渉源は同じGNSS周波数帯の複数の信号に影響を与える可能性が高く、GNSSバンド全体の受信を完全に遮断してしまうこともあります。この場合、測位レベルでの影響はより深刻なものとなります。

GLONASSのL2（G2以上）の受信が完全に失われた場合、GPSとGLONASSの2周波RTKモードを使用している受信機は、GPSのみの2周波RTKモードに切り替えなければならず、その結果、精度が低下する可能性があります。GPSとGLONASSの両方でL2の受信が完全に失われた場合、同じ受信機は、L1のみのRTK、DGNNSS運用、あるいはスタンドアロン・モードなど、他の測位モードにフォールバックする必要があります。

単一周波数のスタンドアロン

コンシューマー向け携帯電話およびタブレット端末

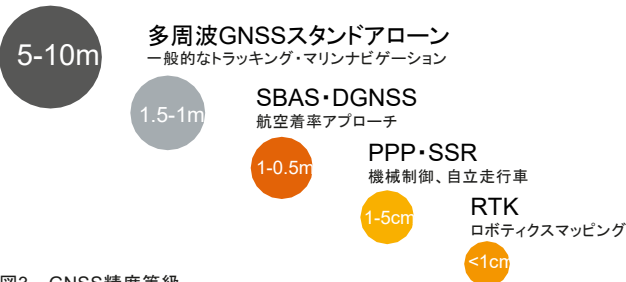


図3 - GNSS精度等級

数cmのRTKソリューションの精度に依存するアプリケーションでは、非RTKモード（ディファレンシャルコードなど）にフォールバックすることは、アプリケーションが機能しなくなる可能性があります。

干渉について

干渉は様々な形で発生しますが、まず干渉がどのように発生するかを考えることが重要です。最も一般的な発生源は、家庭、オフィス、ショッピングセンター、建設現場などにある日用品から、空港、軍事施設、船舶、産業機械、通信塔などに特有のものまで、電気や電子機器です。

例としては、携帯電話が近くで操作されている場合やラジオが鳴る際に様々な干渉物がRFスペクトラムが検出されます。ウェブサイトseptentrio.com/insightsでは、複数の干渉に関する考察をご覧いただけます。

干渉を物理的に表現すると、以下の2つの動作となります。

①Temporally : 干渉が時間と共にどのように変化するか？

・妨害信号には次のようなものがあります。

- ノンパルス（連続して常に点灯している状態）、またはパルス状（点滅する光のような動作）

②周波数：RFスペクトラムのどこから干渉が来るのか

- In band : GNSS信号と同じ周波数で直接受信すること。
- Partly in band : GNSS信号と同じ周波数で重なっていること。
- Out of band : GNSS信号の周波数に隣接または近接していること。
- Narrow-band or wide-band : 干渉が占めるRFバンドの幅。

ワイドバンドジャマー

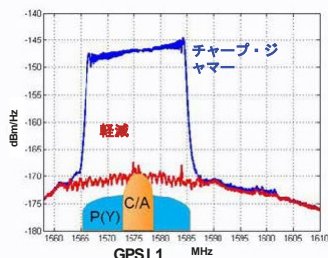


図4: チャープ・ジャマー信号で汚染されたGPS L1信号
・WIMUの起動前（青）と起動後（赤）

※広帯域干渉緩和ユニット

複数の狭帯域干渉

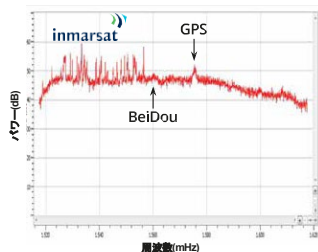


図5: 衛星通信信号がL1バンドのGPS信号に干渉する場合

自己干渉

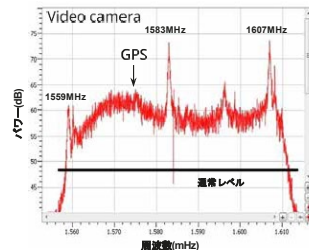


図6: GoPro™ Hero 2ビデオカメラからの
L1バンド干渉をGPSアンテナが取得している様子

干渉対策

あらゆる形態の干渉は、高精度GNSS受信機のアーキテクチャ、設計、開発において、設計プロセスの初期段階から考慮しなければならず、受信機のすべての部分に影響を与えます。

RFフロントエンド（アンテナや高周波信号を捕捉して処理する受信機の部品）のアナログ設計から、デジタル信号への変換、さまざまなデジタルフィルタや対策による信号の処理まで、干渉に効果的に対処するためには、全てが協調して動作する必要があります。

それぞれの干渉信号には固有のフィンガープリントがあるため、実生活で遭遇する様々な形態の干渉に効果的に対処するには、適応型フィルタリングと革新的な信号処理技術が必要です。

AIMHは、ジャミングを軽減するためのさまざまな技術を組み合わせています。設定可能な適応型ノッチフィルタと特殊なパルスブランキング技術に加えて、GNSSチャージャーマーや航空機器からの周波数ホッピング信号、高出力のインマルサット送信機など、より複雑なタイプの干渉を除去できる適応型ワイドバンドフィルタを搭載しています。

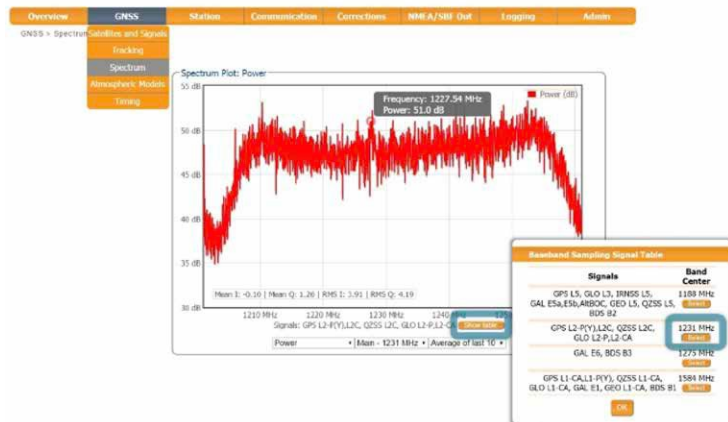


図7: RF干渉の視覚化 - スペクトル表示のプロット

干渉信号の種類と周波数であるRFスペクトラムを視覚化することで、ユーザー、特に法執行機関の担当者は、RF干渉が存在するかどうか、またその原因は何かを簡単に調べることができます。受信機に内蔵されているリアルタイムのスペクトラムアナライザーを使用して、ユーザーは受信機に入力されるすべての信号の周波数スペクトラムを評価することができます。

このパンフレットに掲載されているスペクトル図は、この受信機内蔵のスペクトルプロット機能を使って作成されています。

図7は、L2周波数帯のうち、1227.60MHzのGPS L2P信号を示しています。直感的なユーザーインターフェースにより、他のバンドも簡単に選択して表示することができます。

適応型ノッチフィルタリング

アダプティブ・ノッチ・フィルタは、連続波や狭帯域の干渉が受信機の性能に与える影響を最小限に抑えるために、入力される信号を継続的に監視して干渉物の存在を確認します。干渉物が確認されると、狭いデジタルフィルタ（ノッチフィルタ）が干渉信号に合わせて調整され、特定の干渉物が緩和または抑制されます。このノッチフィルタの動作は、帯域幅や中心周波数の適応的な微調整を含めて完全に自動化することができますが、必要に応じて手動で設定や調整を行うこともできます。

ノッチフィルタ適用前のL2バンド

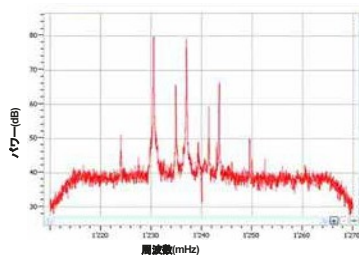


図8：局所的な干渉が大きなスパイクとして現れている

ノッチフィルタ適用後のL2バンド

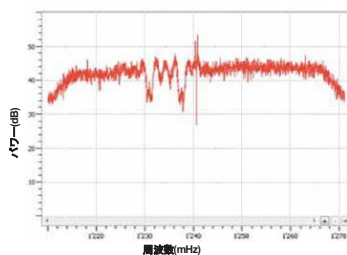


図9：ノッチフィルタでピークが抑制されている

【USER STORY】

～フィールド上でのジャミング対策～

ロシアのチュメン近郊にある地元の農業協同組合は、オートステアや精密農業用の高精度システムを追加するために農機をアップグレードし、必要なRTK補正を提供するために地元の基地局を設置していました。

基地局の補正データサービスを有効にしようとしたところ、局地的な干渉が激しく、すべてのローバーがRTK位置を取得できなかったが、基地局にAIM+機能を搭載し、適応型ノッチフィルタリングを有効にすることで、局所的な干渉が抑えられ、cm単位での正確な測位が可能になりました。



【USER STORY】

～RFIを修正してRTKの実現～

オランダ・ヒルバーサムの地域では、多くのGNSS測量受信機がRTKフィックス（センチメートル精度に必要）を維持するのに苦労していました。調べてみると、アマチュア無線の送信機が設置されている電波塔に原因があることがわかりました。この送信機の中心周波数は1240.4MHzであり、GLONASS L2バンドの狭帯域ジャマーとなっていたのです（図2）。

図10: AIM+を有効にする前のL1とL2の信号パワーの観測結果

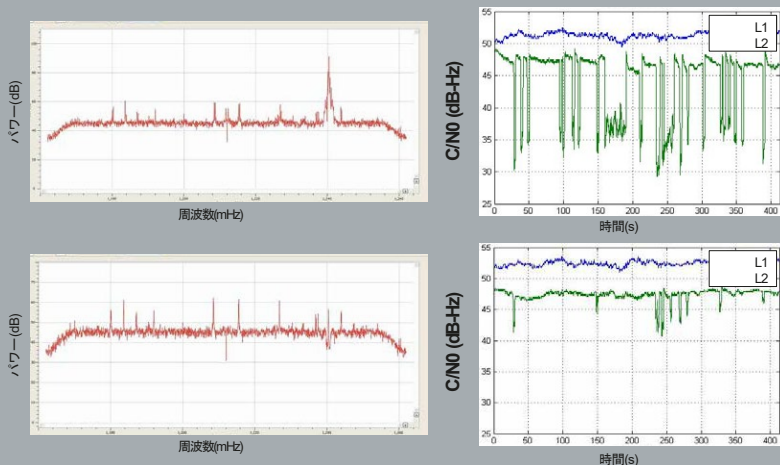


図11: AIM+を有効にした後のL1とL2の信号パワーの観測結果



AIM+対策を有効にしていない場合、L2信号のC/N0（バックグラウンドノイズに対するGNSS信号の強さを示す指標）は大きく劣化していました（図10）。

しかし、適応型ノッチフィルターを有効にしたところ、外来信号が抑制され、何よりもL2信号のC/N0の影響が少なくなったため、再びcmの正確な測位が可能となりました（図11）。

広帯域干渉緩和ユニット (WIMU)

ほとんどの妨害電波は断続的に発生するため、検知が難しく、克服や予測はさらに困難です。

そのため、Septentrioは妨害電波に対する保護機能を標準で搭載しています。

例えば、GNSSチャープジャマーは、インターネットを介して入手できる携帯用の小型低電力機器で、GNSS衛星を追跡できないほど簡単にGNSS信号を遮断することができます。12Vの自動車用ソケットから電源を供給する10mWのチャープジャマー1台は、半径数百メートルのGNSS信号を遮断するのに十分なパワーを持っています。

チャープ・ジャマーは、ナローバンドの偶発的なジャマーよりもはるかに防御が難しく、その理由は、信号の急速な周波数変動（または「チャープ」）の性質により、ノッチ・フィルタが効かないためです。

この効果を説明するために、フロリダ州タンパでGNSSシミュレーターを使ったテストが行われ、測位への実際の影響を確認しました。タンパの中心部に10mWのPPDチャープジャマーを設置すると、半径400mの範囲でGNSS信号が妨害され、図13に示す赤いゾーン内のGNSS受信機は「RTKなし」となります。図12の下のチャープ・ジャマーの青いトレースは、GPS L1バンドに干渉したときの劇的な結果を示しています。

AIM+対応のGNSS受信機で干渉緩和策が適用されると、図12の赤いトレースは、正常な信号が表示される様子を示しています。

AIM+を有効にすると、赤い「No RTK」ゾーンが約400mから数mに減少し、ジャマーの範囲が接続された車に限定されます。尚、AIM+を搭載していない赤いゾーンにある他のGNSS受信機は、そのエリア内ではRTK固定ができません。

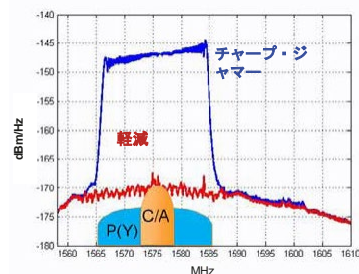


図12: チャープ・ジャマー信号で汚染されたGPS L1信号: WIMUの起動前(青)と起動後(赤)。(広帯域干渉緩和ユニット)

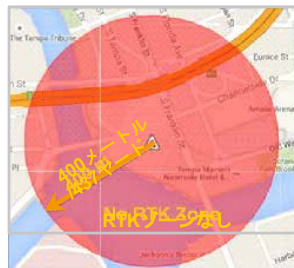


図13: ミティゲーションなしの10mWチャープ・ジャマー

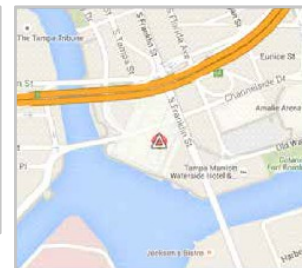


図14: AIM+を起動した10mW Chirpジャマー

ドライバーレス・カーとGNSS道路料金徴収の準備はできていますか？

GNSS測位を必要とする路上走行車両の増加と自律走行車の増加に伴い、路上での違法な妨害装置の数も増加しています。

妨害信号は数kmに渡ってGNSSの利用可能性に影響を与えるため、妨害装置を搭載した車両を確実に識別することは困難です。

【USER STORY】

～車載ジャマーを捉えるための罠～

この新技術では、有料道路に設置されたガントリーにAIM+を搭載し、料金所を通過するGNSSジャミングの有無を監視します。2つのGNSSアンテナで干渉を監視することで、ジャマーを搭載した車両の正確な車線を特定する非常に信頼性の高い手段を提供しました。

また、このシステムは、ジャマーが検知システムを通過した瞬間の正確なタイムスタンプを提供し、カメラに接続してナンバープレートを識別することもできます。

全文はseptentrio.com/insightsの「GNSSジャミングと道路料金徴収」をご覧ください。

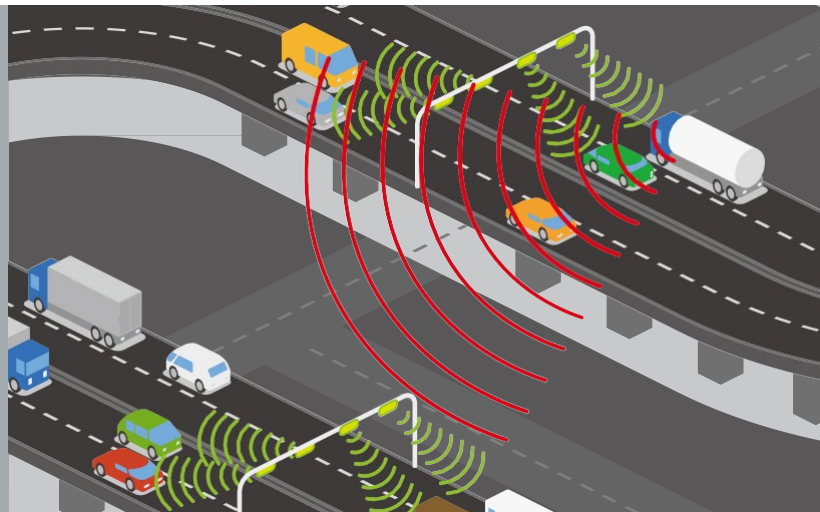


図15-道路通行料の支払いを避けるために違法な妨害装置を搭載した白いトラック

最近の実験では、わずか7日間で115時間のデータが収集され、45件の妨害イベントが発生しました。

内訳は、チャープジャマーから16件、パルスジャマーから10件、その他のソースが19件です。これらのジャマーは、違反した車やトラックのGNSS受信機を無効にするだけでなく、その車を取り巻く広い範囲のGNSS受信機を無効にする可能性を持っています。

ドローンとジャミング

日常生活におけるドローンの利用は急増しており、不動産写真やイベントのビデオ撮影、宅配便、監視、検査、航空地図の作成など、様々な用途に利用されています。ドローンの安全性を脅かす最大の要因の一つがGNSS干渉です。

GNSS信号が途絶えると、位置の品質に影響を与え、高精度のRTKよりも精度の低い測位モードになり、高精度なアプリケーションの一部が妨げられます。最も極端なケースでは、干渉によってドローンが位置認識を失い、自分がどこにいるのか分からなくなる可能性があります。

【USER STORY】

～10mWのジャマーの効果～

わずか10mWのジャマーは、陸上では数百メートルのGNSS信号を打ち消すのに十分な威力を持っています。空中では、木や建物などに邪魔されないため、ジャミング信号の到達距離は最大1km以上になります。下の図17は、空中で保護されていない高精度の受信機で、10mWのジャマーが1km以上にわたってRTK測位を停止させる様子を示しています。ドローンのナビゲーションシステムによく使われているような、精度が低く、干渉の影響を受けにくい民生用グレードのL1受信機（図16）でも、干渉源から数100mまでの範囲で測位情報が失われます。

AIM+対策を有効にすると（図18）、この受信機はシミュレーションフライト中にRTK固定を維持することができ、位置の劣化も見られません。

この事例に関する詳細は、septentrio.com/insights/JamProofingDronesに掲載されています。

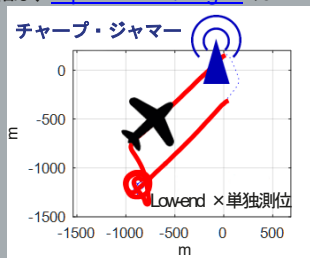


図16

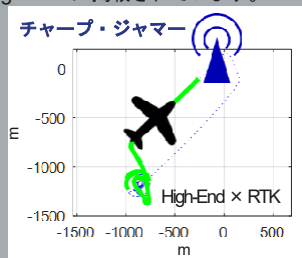


図17

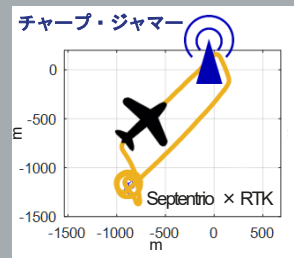


図18

内部干渉: カメラによるドローンのセルフジャミング

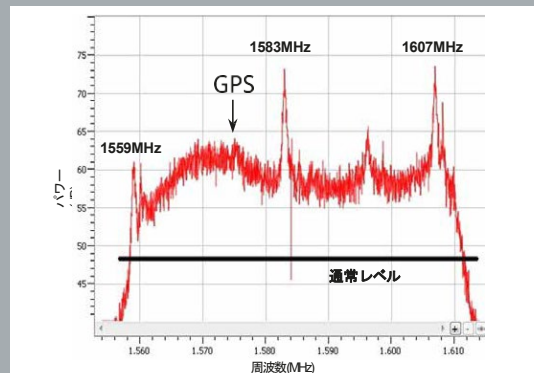
ドローンはサイズが小さいため、多くの異なる電子システムが密集してGNSSアンテナに近接していることが多く、モーターやカメラなどの他の電子機器は、GNSS測位を低下させたり阻害したりする有害な干渉を引き起こします。

[USER STORY]

～ドローンとセルフジャミング～



図19: GoPro™ Hero 2カメラのピックアップをAsteRx4でモニター



上の図19は、民生用アクションカメラをクアッドコプターに搭載した際に、GPS L1バンドのスペクトルに起こった現象を示しています。

スペクトルの3つのピークはちょうど24MHz間隔であり、その起源を示しています。設計エンジニアにとって、このRFスペクトラムアナライザの表示は、干渉源を特定し、セットアップの変更やシールドの追加などの対策の有効性を判断するための貴重なツールであり、AIM+などの受信機ソリューションを補完する重要なものです。

この例のクアッドコプターの場合、RTKの喪失は、カメラをシールドケースに入れ、AIM+の干渉緩和機能を有効にすることで解決しました。

軍事向け干渉との戦い

【USER STORY】

～軍事用ジャマーが民間プロジェクトに支障を与えないために～

商業用の海洋浚渫作業は、国際貿易のために忙しい水路や港を維持するために不可欠です。しかし、最近起こったように、通常は軍事演習に使用されている軍用システムの通信が商業用水路に「漏れる」と、これらの作業に大きな影響を与えてしまいます。この軍用システムの影響は大きく、すべての商業用受信機でL2バンド（GPSとGLONASSの両方）を完全にノックアウトするほどの周期的な帯域内干渉が発生しました。

7秒の間に数百ミリ秒（ms）の差があります。

陸上の基準受信機と船舶の受信機にAIM+対策を施したことで、GPSとGLONASSのL2バンドから帯域内干渉がすべて確実に除去され、浚渫作業に必要な高精度のリアルタイム測位に必要な高品質のGNSS信号が利用できるようになりました。

AIM+技術がこれらのSeptentrio社の受信機に搭載されているおかげで、外部からの干渉による遅延を最小限に抑えて浚渫作業を続けることができ、高価な浚渫船の1時間あたりの操業中断による1万ドル単位の損失を回避することができました。



干渉 ～日々の生活における例～

GNSSに隣接する地域通信システム

世界各地の既存および計画中の通信インフラが、GNSS測位の性能に大きな影響を与える有名な例がいくつかあります。

<例①>

世界では、LTE（Long-term Evolution）携帯電話通信、インマルサット、イリジウム、
地域的には、米国ではLigado（旧Light Squared）、日本ではdocomo。

Light SquaredとLigadoのGPS L1周波数に近い運用の例は、RFスペクトラムが益々希少なものになっていることを示しており、

より多くの人々にインターネットやデータへのアクセスを拡大しようとする中で、

GNSSのような他の既存システムに影響を与えることを避けて通れない。

東京都心部におけるLTE干渉に対するロバスト性

東京都心部に設置されたLTE基地局は、より高速な携帯電話データと音声通信を提供することができ、半径100メートル以上の範囲でGNSS信号を打ち消してしまいました。



この場所で運用されているAIM+対応の受信機は、LTE信号の影響を受ける衛星よりも多くの衛星からの信号を一貫して追跡しており、正確で信頼性の高い位置情報を提供するためには欠かせません。

GNSS測位における干渉対策

ますます混雑するRFスペクトラムで動作する接続デバイスの数が増え続けると、意図しないGNSS信号の干渉が発生する可能性があります。位置精度、信頼性、可用性を維持することは、この混雑したRF干渉環境で動作するGNSS受信機にとって、深刻な課題です。GNSSの新しいアプリケーションがますます開発されるにつれ、世界中でより複雑な形態の干渉が現れ、課題は拡大しています。

干渉を特定し、高度な緩和技術を適用して克服することは、GNSSの測定と測位の品質を確保するために重要です。

1.RF干渉はどこにでもある！？

RF信号は、意図せずあるいは意図的に、GNSSの運用に干渉を引き起こす可能性があります。

ますます多くの電子機器があらゆる場所で使用されるようになったため、干渉の存在は驚くべき速さで増加しています。

GNSSとそのユニークな機能により、自律システム（車両、ドローン、機械、船舶）などの多くの既存および新規技術において、GNSSは測位の重要な提供者となっています。

2.GNSS干渉の解決

あらゆる形態の干渉が存在することで、GNSS測位システムの精度、信頼性、可用性、そして最終的なアプリケーションが制限されます。

干渉の克服を確実に、そして効果的に行うためには、GNSSの特性に関する経験と、複雑な技術やアルゴリズムの習得が必要です。

これらのソリューションは、最初からGNSS受信機に設計されています。

3.適応し、進化し、克服する

ミティゲーション(AIM+)技術はSeptentrioの全ての製品のアナログおよびデジタル領域で使用されています。受信機に組み込まれたリソースにより、技術は進化し続け、新しい経験、新しい信号、新しい干渉物に基づいて調整することができます。

Septentrio社のソリューション

Septentrio社のAIM+技術は、アナログおよびデジタル領域で市場をリードする一連の干渉対策と、空にあるすべてのナビゲーション信号を追跡するというSeptentrioの継続的なコミットメントによって、この課題に正面から取り組んでいます。

15年以上にわたる干渉対策の経験をもとに、最新のAIM+テクノロジーは、ハードウェア/ソフトウェアのあらゆる最新技術を駆使し、連続波、狭帯域、パルスなどの干渉を緩和するための専用ハードウェア、ソフトウェア、対策を継続的に設計しています。ほとんどの場合、GNSSバンド全体が妨害されても位置精度と可用性を維持できるのは、複数のコンステレーションによる複数の周波数のGNSS信号が豊富に存在するためです。受信機が追跡できる信号、周波数、コンステレーションが多ければ多いほど、AIM+対策が追跡された信号の干渉を克服できる可能性が高くなります。

SeptentrioのAIM+技術の有効性は、実際のフィールドアプリケーションで何度も実証されており、RF環境がいかに厳しいものであっても、あらゆる状況下で最高のGNSSパフォーマンス（測位精度、信頼性、可用性）をお客様へ約束します。

Septentrio社のテクノロジー: AIM+

Septentrioは、洗練されたRF干渉監視・緩和システム（AIM+）を開発しました。このAIM+技術は、すべてのSeptentrio製受信機に組み込まれています。一緒に調和して働く、SeptentrioのAIM+ツールを形成するアナログおよびデジタル対策のスイートには、通常以下のものが含まれます。

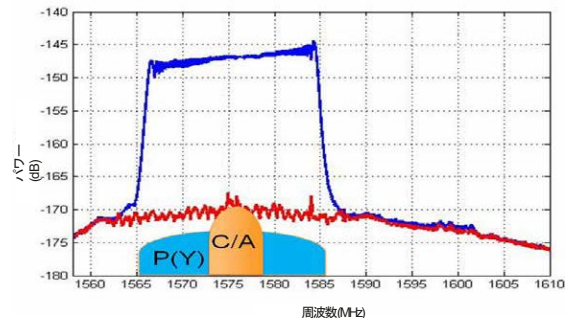
- ・適応型マルチプルノッチフィルタ
- ・パルスブランキングユニット
- ・広帯域干渉低減ユニット（WIMU）
- ・統合されたSpectrum Analyserの可視化ツールにより、アンテナからのRF入力をタイムドメインと周波数ドメインの両方で表示。

狭帯域の干渉の影響を軽減するために、複数のノッチフィルターをオートまたはマニュアルモードで設定することができます。これらのノッチフィルターは、干渉する信号の周辺のRFスペクトルの狭い部分を効果的に除去します。アマチュア無線家のために開放されているL2バンドは、特にナローバンドの干渉を受けやすいです。意図的なものもそうでないものも含めて、広帯域干渉の影響は、広帯域干渉防止ユニットを有効にすることで軽減することができます。また、このシステムは、従来のパルスブランキング方式よりも効果的にパルス干渉の影響を軽減することができます。

終わりのない戦い

Septentrioは、高精度GNSS受信機のトップメーカーとして、増え続ける干渉信号を克服するチャンスをお客様に提供するために、AIM+技術の開発と最適化を継続的に行っています。

これからも、新たな干渉や脅威に対応するために進化し続けます。



チャープ・ジャマー信号で汚染されたGPS L1信号

・WIMUの起動前（青）と起動後（赤）

EMEA

Greenhill Campus (HQ)

Interleuvenlaan 15i
3001 Leuven, Belgium

Espoo, Finland

Americas

Suite 200

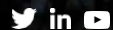
23848 Hawthorne Blvd
Torrance, CA 90505, USA

septentrio.com/contact

Asia-Pacific

Shanghai, China
Yokohama, Japan
Seoul, Korea

septentrio.com



septentrio