

船用 GNSS 受信機への妨害信号入力の実験と軽減対策について

Trial and mitigation measures for interfering signal

to marine GNSS receivers

奥富雄司†, 久保信明†

†東京海洋大学

Yuji Okutomi†, Nobuaki Kubo†

†Tokyo University of Marine Science and Technology

Abstract GNSS receivers play a vital role in the safe operation of ships, and most ships are required to have them installed. However, the satellite signal power is weak and there is a vulnerability problem. The purpose of this study is to investigate the behavior of a GNSS receiver equipped on a general ship when it receives a spoofing signal, and to mitigate the interfering signal. In this paper, we conducted an experiment using a cheap GNSS jamming device which is called PPD and a commercially available SDR transmitter to disable positioning of a ship's GNSS receiver. And we confirmed some troubles of navigational equipment on the ship's bridge that receive GNSS signals. To mitigate the effects of jamming signals, we tried proof-of-concept simulations to see if jamming signals could be canceled, and we found tasks to engage with problems.

1. はじめに

船舶の安全運航において GNSS 受信機が果たす役割は大きく、多くの船舶に装備が義務付けられている。しかし、衛星信号は微弱であり他からの妨害を受ければ受信機は測位不能となる恐れがある。偽の衛星信号（スプーフィング信号）が照射された場合は、船舶の位置が誤った場所に表示され、衝突や座礁のリスクを増大させる恐れがある。ヨットに装備された GNSS 受信機に対するスプーフィングの調査報告^[1]があるが、大型商船が装備する船舶用 GNSS 受信機がジャイロコンパス等の航海計器と接続された状態において妨害やスプーフィングを受けた場合、どのような事象が認められるかについての調査報告は認められていない。本研究では一般的な船舶に装備される GNSS 受信機が妨害やスプーフィング信号を受けた場合の挙動について調査するとともに、妨害信号の影響を緩和するための方策についてシミュレーションを試行した結果を報告する。

2. 妨害信号とスプーフィング信号

2. 1 妨害信号

GNSS の周波数帯と同じ周波数帯で、GNSS よりも強い信号が受信機に入力されると、本来の GNSS 信号が干渉を受けて S/N 比が低下し正しく復調できない問題が起こる。こうした問題を引き起こす信号を妨害信号という。電波妨害をかける行為はジャミング (jamming) と呼ばれる。ジ

ジャミング等による電波障害を防ぐため、国内では電波法によって使用できる電波の周波数や送信電力は定められており一定の電力以上の電波を許可なく送信することは禁止されている。しかしながら、GNSS 信号は非常に微弱であるため、小さな妨害電力であっても測位不能が生じる恐れがある。すでに紛争地域では GNSS を対象とした妨害信号が発生している事例も報告されている。

2. 2 スプーフィング信号

本物の GNSS 信号よりも強い別の GNSS 信号を受信機に加えると、受信機はより強い信号を捕捉・追尾する場合がある。受信機をシミュレーションするためや動作確認を目的として、信号発生器により任意の GNSS 信号を作り出すことができる。悪意のないこうした信号は問題とはならないが、船舶等の移動体を誤った位置に誘導することを目的に、偽の GNSS 信号を発生させ意図的に GNSS 受信機の測位データを操作する行為をスプーフィングという。

本研究では船用で使用される GNSS 受信機が妨害信号やスプーフィング信号を受けた場合、どのような挙動を示すか下記実験により調査した。なお本実験で試行したスプーフィング信号は GPS 信号であり、すべての GNSS に有効なスプーフィング信号ではない。実験対象としたものは GPS 以外の信号を扱える GNSS 受信機（古野電機製 GNSS 受信機 GP-170）も含まれているが、GPS 信号のみのスプーフィング実験に関する記述であるので、本節以下の文章ではすべて GPS 受信機として統一した表現を用いる。

3. 実験方法

3. 1 妨害信号の減衰と微弱電波の範囲内での使用について

妨害信号とスプーフィング信号をかけた対象の受信機は、フルノ製 GPS コンパス SC-50、JRC 製船用 GPS 受信機 JLR-7500 である。使用した妨害信号発生器は PPD(個人用保護デバイス)という GPS 受信機に電波干渉をする信号発生機器であり、インターネット上の通販サイトにて安価にて販売されている（写真1）。そのまま使用すれば微弱電波の範囲を越えてしまい、無免許で電波を発射すれば不法行為となる。



写真1 妨害信号発生器

本実験ではアッテネータを使って放射電力を減衰させ、微弱電波以下の信号強度に落として使

用した。微弱電波とするにはアンテナから 3 m の距離で電界強度が $35 \mu\text{V}/\text{m}$ である必要がある。 $35 \mu\text{V}/\text{m}$ をデシベル表記に換算すると下記の式により、 $30.88\text{dB} \mu\text{V}/\text{m}$ となり、この値以下である必要がある。

$$\text{〔式：電界強度のデシベル換算〕 } 20\log\left(\frac{35[\mu\text{V}]}{1[\mu\text{V}]}\right) = 30.88[\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}]$$

電界強度は電波伝搬特性により、周波数、送信電力、アンテナ利得、アンテナからの距離といったパラメータを与えることで計算できる^[2]。ここで周波数を 1575MHz、送信電力-70dBm、アンテナ利得 5.0dBi としたとき、アンテナから 3 m 離れた地点での電界強度は $30.2\text{dB} \mu\text{V}/\text{m}$ となり上記微弱電波の電界強度以下の値となる。

送信電力の計測は減衰器を使用せず直接スペクトルアナライザを用いて計測し、その後、減衰器が所望の減衰量を有しているかスペクトルアナライザで計測できる測定レンジで計測を行って減衰量を確認した。その上で送信機と減衰器を接続して再度測定することで送信電力が-70dBm 以下であることを確認する方法で行った。

3. 2 送信用アンテナ

スプーフィング信号の送信用アンテナに使用したヘリカルアンテナを写真 1 に示す。実験で使用した送信アンテナのアンテナ利得は 5.0dBi 以下であることの確認は、あらかじめ 1dBi のアンテナ利得を持つ GPS 用アンテナ (Adafruit Industries LLC 製：ProductID2461^[3]) を基準として送信電力を比較した。比較した結果、4.5dBi を下回る利得であることを確認した。よって、前項で計算したように-70dBm 以下の送信電力で使用すれば微弱電波の範囲内の電界強度となる。送信電力を-70dBm 以下とするため減衰方法は送信源とアンテナの間に減衰器を挿入して調整した。

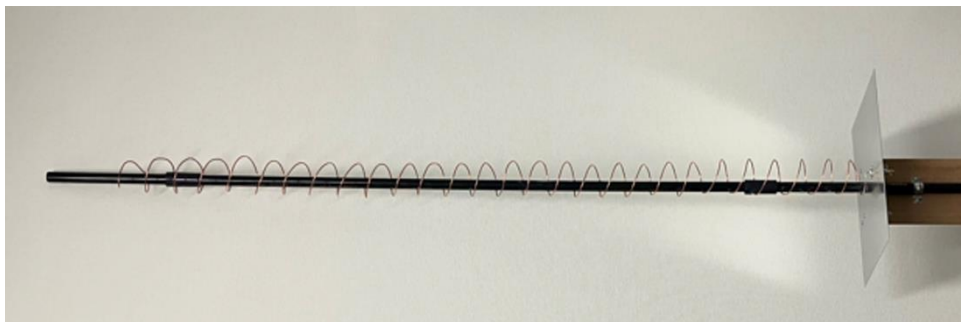


写真 2 送信用ヘリカルアンテナ

3. 3 スプーフィング信号の生成と実験目的

スプーフィング信号の生成は、GPS ベースバンド信号のデータストリームを生成できるソフトウェア gps-sdr-sim⁴を使用し、送信機は市販のソフトウェア無線機 Hack RF one を使用した。送信アンテナは自作したヘリカルアンテナを使用した。実験時の風景を写真 3 に示す。なお、スプーフィングで使用する経路は兵庫県の明石海峡航路内を不規則に旋回して航行するような経路とした。経度を東経 135 度 00 分付近とし、GPS 受信機の経度を確認することでスプーフィングの可否を容易に判断できるようにした。妨害信号を与えた上でスプーフィング信号をかけると、妨

害信号を与えない場合に比べ、より低いスプーフィング電力であってもスプーフィングに成功しやすいという報告が先行研究^[5]にて報告されている。また、スプーフィング信号の電力を低く保ち、真の信号とコード位相およびドップラーが一致するようにスプーフィング信号を送信することで、妨害信号を与えずにスプーフィング信号だけでスプーフィングを行う方法についても報告^[6]されている。ただし、これらの先行研究では日本の船舶が船舶設備規定^[7]に則って装備する一般的な船舶用 GPS 受信機を個別に実験した内容は含まれていない。そのため本実験では船用 GPS 製品を対象としてスプーフィング信号だけを与えた場合どのような挙動を示すかを確認するため、妨害信号とスプーフィング信号を組み合わせた場合とで実験を行い、スプーフィングによる偽の測位結果が出力される状況についての調査を行った。なお実験対象とした 3 機種 of 装備状況が異なるため、同一条件の実験方法は実施できない。本実験は機種 of 比較を目的とはせず、個別の受信機がどのような状況で測位不能や欺瞞信号に乗っ取られてしまうかを調査することを目的とする。船用 GPS 受信機の設置状況が異なるため以下それぞれの実験方法について述べる。

3. 3. 1 古野電機製サテライトコンパス SC-50 を対象とした実験

古野電機製サテライトコンパス SC-50 の受信アンテナはオープンスカイ状況で建物屋上に設置されているアンテナ外観を写真 3 に示す。受信機は屋上の直下の実験室に設置されている。妨害信号は減衰器を介して有線接続で SC-50 の受信機に接続する。有線による接続方法は妨害発生器付属のモノポールアンテナを外したコネクタに SMA ケーブルを接続し、1dB、3dB、5dB、10dB の固定減衰器減を複数組み合わせる減衰量をしながら信号混合器に入力する（以下減衰器を使用する場合は同様の方法を採った）。スプーフィング信号も同様に複数の減衰器を介して出力される電力を調整し上記の送信用ヘリカルアンテナから送信する。スプーフィング信号を受信アンテナ（Novatel 社製 GPS-702）に対して実験室内で照射し、その受信アンテナを信号混合器に接続する。信号混合器から SC-50 受信機に入力して測位結果を受信機画面にて確認する方法をとった。接続ブロック図を図 1 に示す。



写真 3 古野電機製サテライトコンパス SC-50 受信アンテナ外観



図1 SC-50 に対する妨害及びスプーフィング実験接続図

3. 3. 2 JRC 製 GPS 受信機 JLR-7500 を対象とした実験

JRC 製の受信アンテナはオープンスカイ状況で建物屋上に設置されており、受信機は屋上の下の実験室に設置されている。妨害信号は減衰器を介して-72dBm の送信電力まで落として微弱電波範囲として付属のモノポールアンテナから受信アンテナに照射する。スプーフィング信号は減衰器を介して送信用ヘリカルアンテナから受信アンテナに照射する。測位結果を受信機画面にて確認する方法をとった。接続ブロック図を図2に示す。実験の様子を写真4に示す。

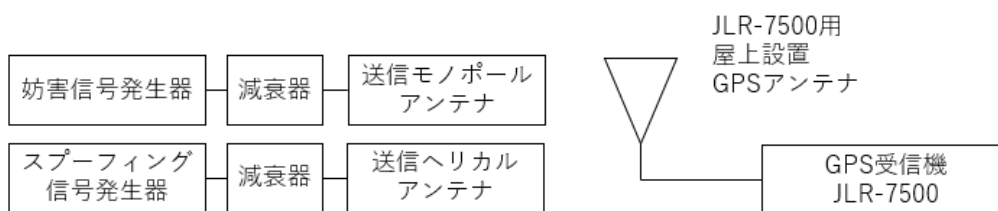


図2 JLR-7500 に対する妨害及びスプーフィング実験接続図

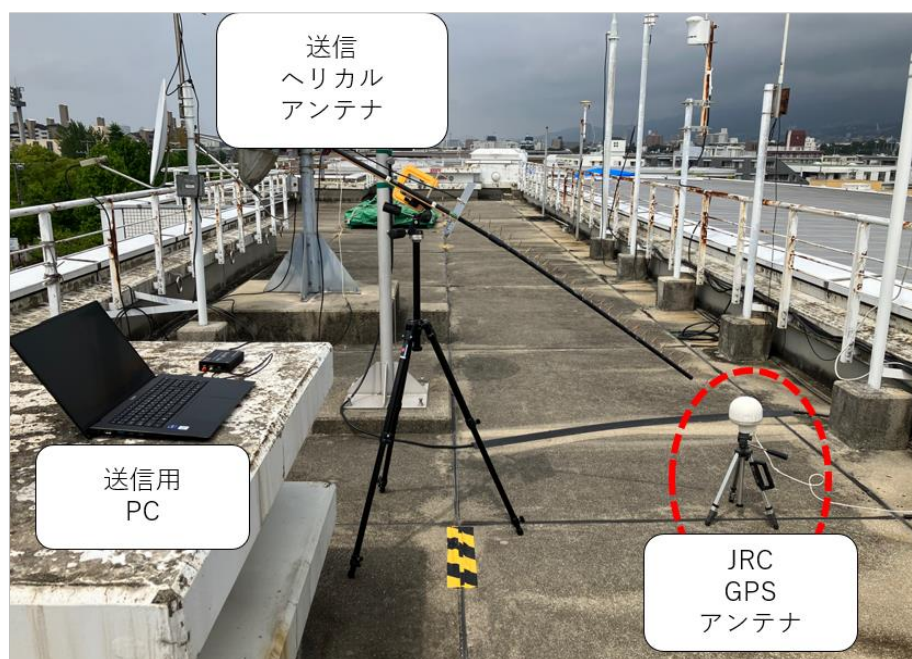


写真4 微弱電波以下の電波によるスプーフィング実験写真

3. 3. 3 古野電機製 GPS 受信機 GP-170 を対象とした実験（船舶装備）

古野電機製の GPS 受信アンテナはオープンスカイ状況で船舶のコンパステッキに設置されており、受信機は船橋に備え付けられている。船舶は岸壁に着岸中の状態である。妨害信号は減衰器を介して-72dBm の送信電力まで落として微弱電波範囲として付属のモノポールアンテナから受信アンテナに照射する。スプーフィング信号は減衰器を介して送信用ヘリカルアンテナから受信アンテナに照射することは前項の実験と同様であり接続方法は同じであるが、受信アンテナが高所に設置されており、スプーフィング信号を受信アンテナ上方から照射することができず、斜め下方からの照射になった。受信状態を受信機画面にて確認する方法をとった。

GP-170 の受信機は BNC コネクタでアンテナと接続されているため、妨害信号とスプーフィング信号を電波で照射する方法とは別に、有線で入力する実験を行った。有線接続した場合の接続図を図 3 に示す。GP-170 受信機の位置情報は船橋内の他の航海計器に接続されており、船橋内で発生するアラームや他の航海計器の挙動を調査する。なお、実験時に船舶の位置や情報を他船に送信する船舶自動識別装置（AIS）の電源は切った状態で行った。

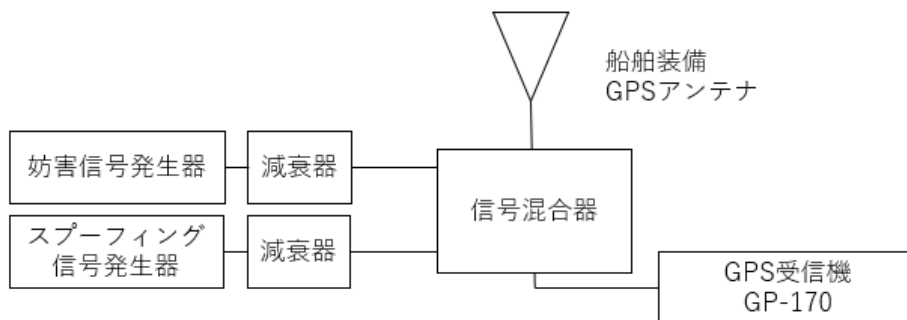


図 3 GP-170 に対する妨害及びスプーフィング実験接続図

4. 実験結果

4. 1 船用 GPS 受信機への実験結果

4. 1. 1 古野電機製サテライトコンパス SC-50 を対象とした実験結果

妨害信号を入力しない場合では一時的にスプーフィングの位置が数秒程度表示された後、また正しい位置を示す画面に切り替わることを繰り返す現象が観測された。スプーフィングのシナリオで設定しておいた緯度経度を示しスプーフィングが成功した現象を確認できた条件は、妨害信号の出力を-39dBm（有線接続）以上とした上でスプーフィング信号をかけた場合であった。

4. 1. 2 JRC 製 GPS 受信機 JLR-7500 を対象とした実験結果

スプーフィングが成功した場合は、受信機起動前からスプーフィング信号を照射した場合と、ジャミングにより測位不能が生じてからスプーフィング信号を照射した場合のみであった。この結果は前項で挙げた先行研究^[2]で報告されている内容、妨害信号とスプーフィング信号を組み合わせる方がスプーフィングに成功しやすいことを追認する結果となった。正常測位ができてから

スプーフィング信号を照射した場合は、測位不能となるのみで、偽の位置を示すことはなかった。妨害及びスプーフィング信号のない正常な測位結果を表示する JRC 製受信機の表示画面を写真 5 に示し、スプーフィングが発生した際の JRC 製受信機の表示画面を写真 6 に示す。正常な測位の緯度経度は GPS アンテナ設置場所である海技大学校の位置を示し、アンテナは固定してあるので速度は 0.0 ノットを表示している。スプーフィングが生じた場合は、スプーフィングシナリオで設定した海域の緯度経度（明石海峡航路内、東経 135 度 00 分付近）を示すとともに、スプーフィングシナリオで設定した速度（54 ノット）、進路が進路 180 度に近い 179.6 度を示した。（写真 5 及び 6 では経度及び速度の表示箇所を点線で囲み強調表示）

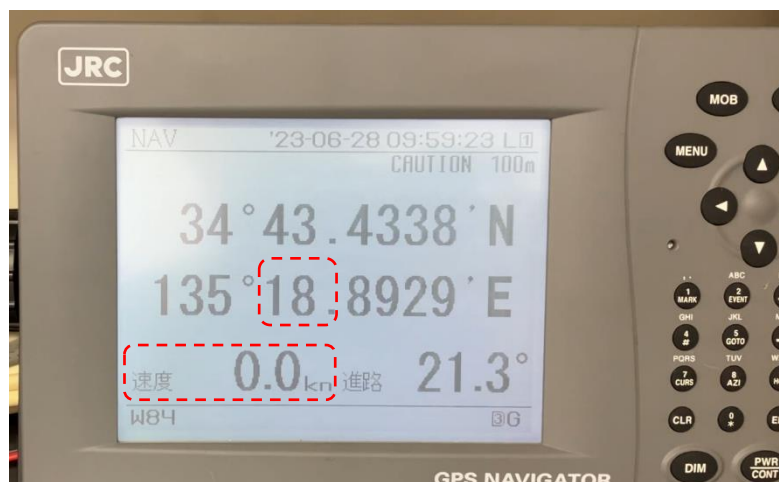


写真 5 正常測位状態の JRC 製受信機の表示画面

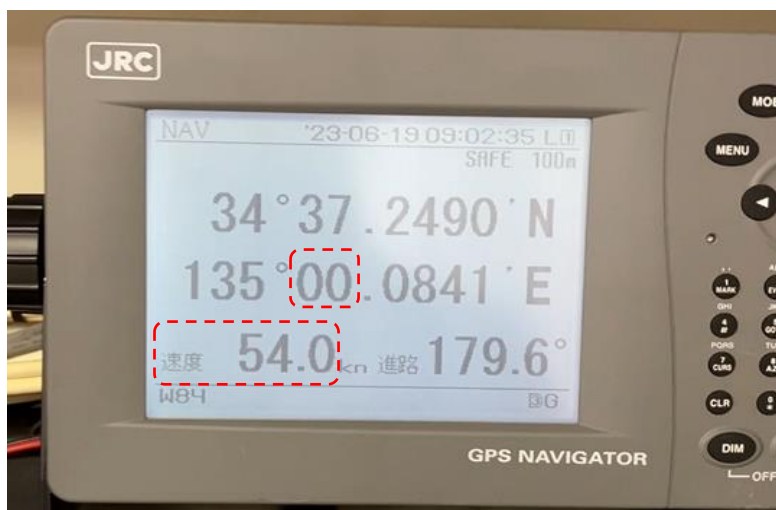


写真 6 スプーフィングが生じた JRC 製受信機の表示画面

4. 1. 3 古野電機製 GPS 受信機 GP-170 を対象とした実験結果

アンテナから微弱電波範囲内で妨害信号を与えたが測位不能は発生しなかった。同様に送信アンテナからのスプーフィング信号を与えても測位不能も位置の乗っ取りも発生せず、正常位置を示す測位結果が受信機に表示され続けた結果となった。

有線接続で妨害信号及びスプーフィング信号を接続した場合は、オープンスカイ状況で実衛星からの信号が入っている状態で妨害信号を-39dBm の出力、スプーフィング信号は-72dBm の出力で受信機に入力したが測位不能が発生するのみでスプーフィングには成功しなかった。本実験では受信機が故障する恐れを勘案してこれ以上強い妨害やスプーフィング信号を与えることはしなかった。

4. 2 フルノ製受信機に対するスプーフィングと ECDIS (電子海図情報表示) 上の表示結果

船舶(海技大学校練習船海技丸)に搭載されたフルノ製 GPS 受信機 GP-170 に対しては上述のとおり、オープンスカイで実衛星信号を受信している場合はスプーフィングに失敗した。そこで正規の受信アンテナを外し、スプーフィング信号を入力して測位結果をスプーフィングシナリオにある明石海峡航路を走る測位信号を与えた。その際、ECDIS(Electronic Chart Display and Information System:電子海図情報表示装置^[8])が示す自船の位置もスプーフィングされた位置を表示した。スプーフィング信号の測位によって ECDIS が航跡を描きながら動作している様子を写真7に示し、航跡を表示した状態の拡大画面のスクリーンショットを写真8に示す。また、実航進路(COG)及び対地速力(SOG)ともにスプーフィングされた情報となった。また、時刻も同様にスプーフィング信号の時刻となった。GNSS 受信機がスプーフィングされた場合、ECDIS 上の PVT(位置, 速度, 時刻)がスプーフィングされることを確認した。本実験では正規の受信アンテナを外し、測位不能な状態からスプーフィングすることによって偽の位置に船位を転移させたので、受信アンテナを外した際には測位不能となり、測位不能を知らせる可視可聴警報が ECDIS から発せられた。しかし、その後スプーフィング信号による測位に切り替わると警報は測位不能の警報は止まり、スプーフィングによる測位位置をプロットし始めた。その後は通常の船舶では生じさせることが困難な速力(40k't 超)や急激な変針(方向転換)が生じても ECDIS から発生する可視可聴警報は認められなかった。

また、当船舶のジャイロコンパスは緯度誤差を補正するためにGPSから位置データを受け取っており、ジャミングやスプーフィングを行ってGPS信号が途切れたとき、緯度誤差の補正ができなくなった異常を知らせるための可視・可聴音のアラームがジャイロコンパスから発生した。

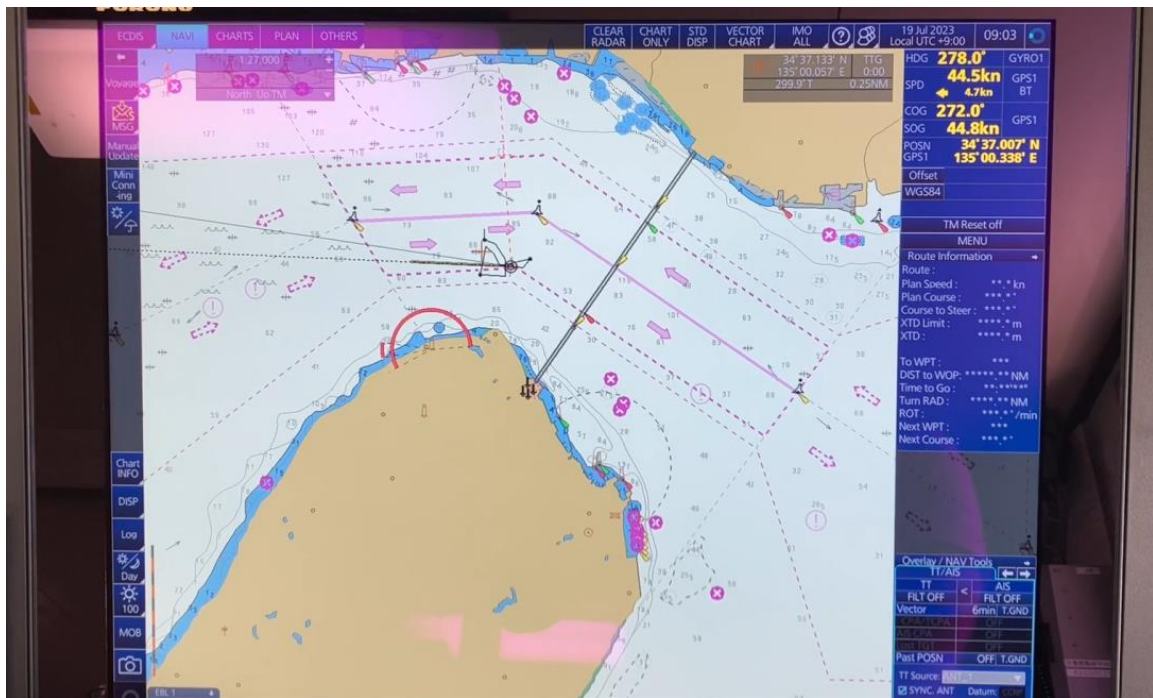


写真7 スプーフィングによる測位で航跡を描きながら動作する ECDIS 画面



写真8 スプーフィングによる測位の航跡を表示する ECDIS 画面（拡大図）

5. ジャミング低減のための検討策

すでに先行研究により妨害信号をかけた後にスプーフィング信号を与えるとスプーフィングが

成功しやすいことが報告されているが、船用 GPS 受信機においても同様の傾向を実験により確認した。妨害信号とスプーフィングを組み合わせた方法による誤った位置への誘導を防ぐためには、スプーフィング信号の前段で測位不能を生じさせるような妨害信号を低減させ、正常な測位を可能な限り維持できるようにすることが有効であると考えられる。

5. 1 ノイズキャンセルの試行

ジャミングと同じ信号を反転させて加えれば、相殺が生じることでジャミングの影響を少なくできる。こうしたノイズキャンセルの方法はイヤフォン等の音響機器に利用されているが、それと同じことを GNSS に加えられるジャミング信号に試す。ジャミング信号を打ち消すためには、元の妨害信号の周期を把握する必要がある。すでに先行研究^[9]により妨害信号発生器の特徴は調査されており、本実験で使用した妨害信号の特徴を把握するため、2.048MHz のサンプリング周波数で A/D 変換して PC に保存し、ヒルベルトフアン変換^[10]による可視化を試みた。その結果を一例として図 4（横軸が時間、縦軸が周波数、垂直軸が振幅）に示す。グラフより 4μ 、 9μ 秒付近にピークが表れることを確認した。

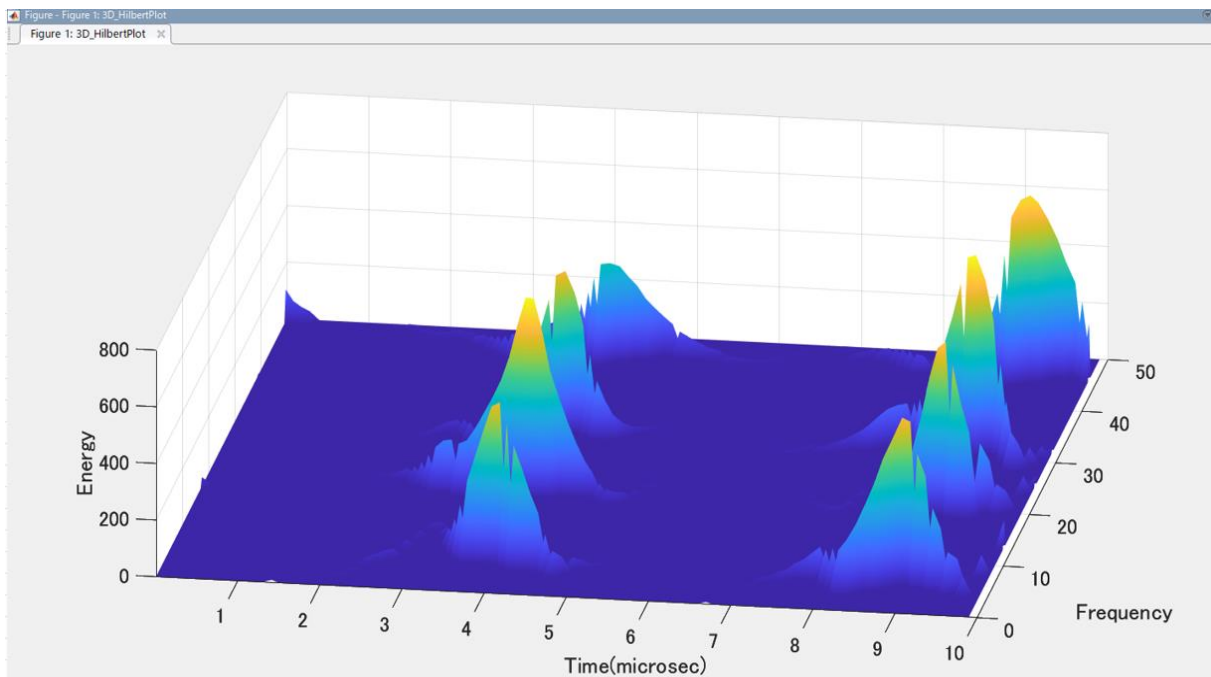


図 4 妨害信号のヒルベルトフアン変換の一例

5. 2 妨害信号の相殺の試行

妨害信号の相殺による効果を評価するため、GPS 信号を復調する MATLAB によるシミュレーションソフト^[11]を用いた。図 5 に MATLAB/Simulink によるブロック図を示す。GPS 信号に妨害信号とまったく同一の妨害信号を反転させ、加算するタイミングを遅延させる接続回路を作成した。妨害信号が相殺され、低減された場合には GPS 信号が復調できる。ジャミングの低減が生じるまでレプリカのジャミング信号を遅延させ加算する。相殺が発生し GPS 信号の復調ができたのは 9μ 秒だけ遅延させた場合であった。復調が認められたシミュレーション結果を図 6 に示す。

す。9 μ 秒の遅延量はヒルベルトファン変換で可視化したピークの位置から求めた。妨害信号の周期の把握にヒルベルトファン変換が有効である可能性が示唆された。しかし、18 μ 、36 μ 、54 μ という9 μ 秒の倍数としたとき、復調は生じなかった。妨害信号の周波数遷移周期の倍数ごとに相殺が生じるはずだと仮説を立てたが、その仮説は否定される結果となった。その理由として、厳密に周期を把握できていないことに加え、妨害信号の位相が揺らいでおり、加算する2つの妨害信号の位相のずれが遅延量の増加に伴って増加していき、相殺が起きなかったためと考える。以上からジャミングの相殺の効果を得るには、妨害信号の位相を追尾して絶えず同期させるための仕組みが必要となると考える。

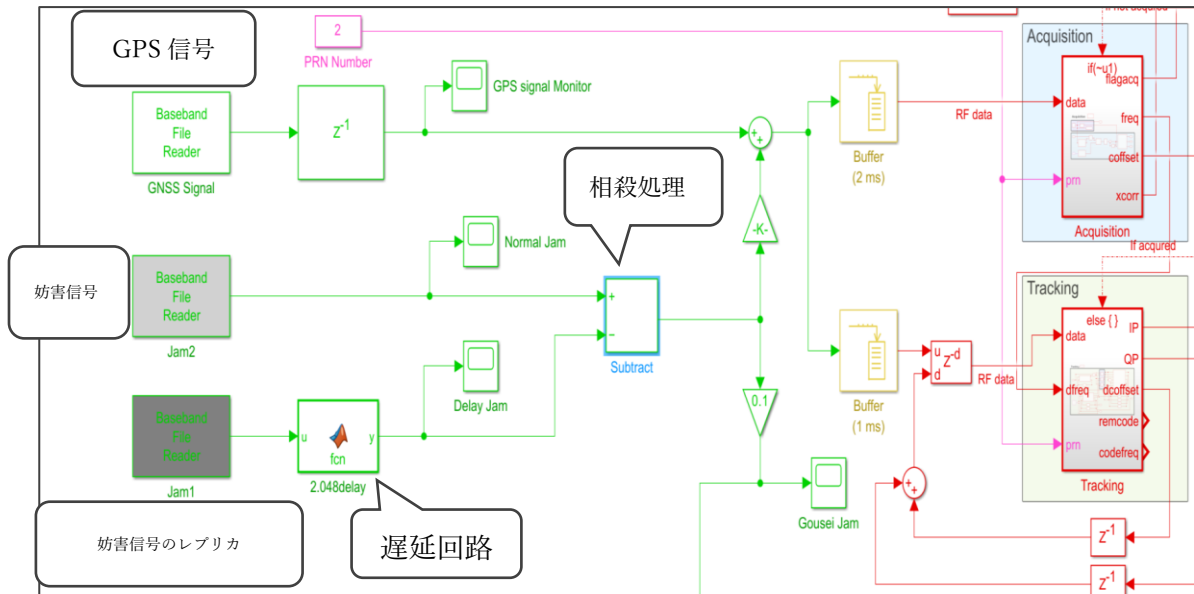


図5 MATLABによる妨害信号の相殺シミュレーションブロック図(Simulink)

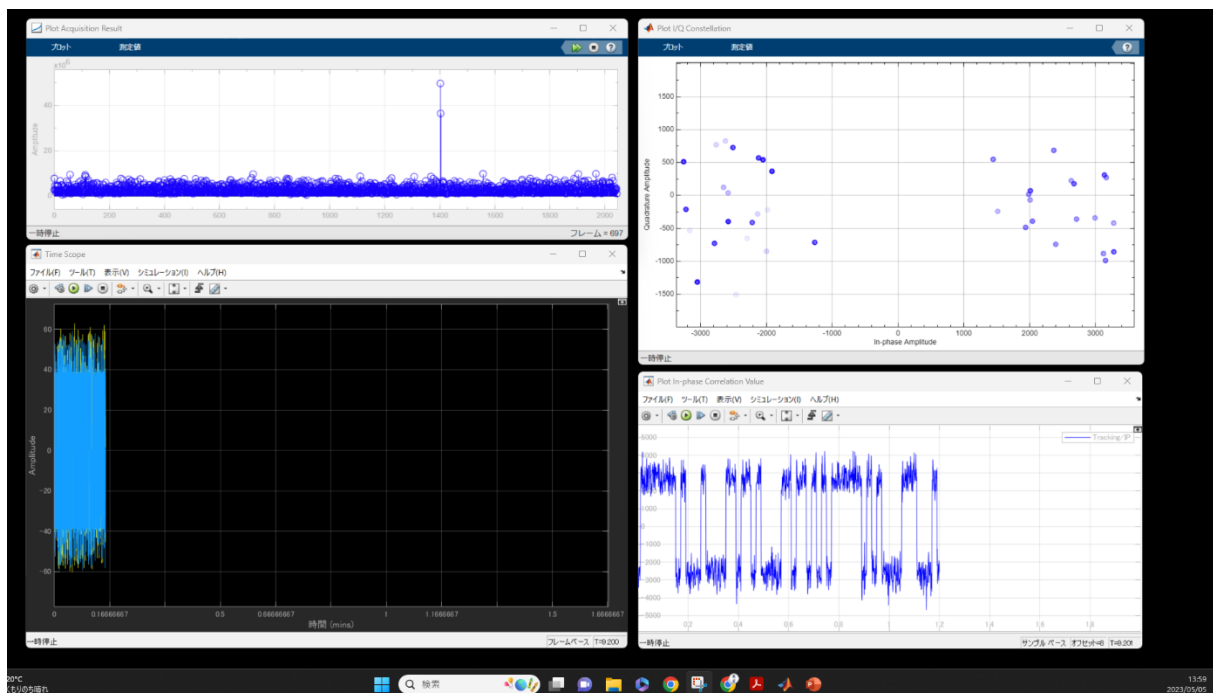


図6 妨害信号の相殺により復調が生じた結果を示すシミュレーション画面

6. まとめ

実機の船用GPS受信機を用いて、微弱電波レベルの弱い電力でもジャミング・スプーフィングによって妨害されることを実験により再現した。スプーフィングされた場合、停泊中の船舶であってもECDIS上では航路を航行しているかのような表示となった。本実験で使用したECDISはGPS受信機からの測位情報が利用できなくなった場合には可視可聴警報を発生するが、GPS受信機の出力を受けて位置を画面上にプロットするため、その位置が実衛星による正しい測位情報であるかスプーフィングによる偽の測位情報であるかを識別する機能は有していない。したがって正しい測位状態が継続している途中でスプーフィングによる偽の測位状態への移行が測位不能状態を経由せずに成功した場合にはECDIS及びジャイロコンパスは可視可聴警報を発生しない可能性が高く、操船者がスプーフィングに気が付かない恐れがある。ジャイロコンパスは船舶にとって重要な航海計器であるが、GPSから受け取る測位データが途絶えることでアラームが生じた。ジャイロコンパスは緯度誤差を修正するための緯度情報をGPS受信機から取得している。妨害による測位不能やスプーフィングによる誤った緯度情報が与えられれば、ジャイロコンパスが出力する方位に誤差が生じる可能性がある。妨害信号とスプーフィング信号は船舶の安全運航にとって悪影響を与える脅威であり、船舶を操船する航海士らに再現実験や事象を確認する機会を提供することで安全に関する教育訓練につなげたい。

妨害とスプーフィングによる影響を緩和するためにはジャミングの低減が有効であると考え、ノイズキャンセルによる妨害信号の相殺が可能かどうか概念実証をシミュレーションにより試行した。その結果、同じ信号を反転させ加算すれば妨害信号の相殺が生じ、GPS信号の復調が起きることを確認した。しかし、妨害信号を確実に低減させるためには位相と周期及び振幅を把握して同期する工夫と処理が必要である。その方策を検討し試行することが今後の課題である。また、妨害信号の特徴を把握する手法についてもさらに調査及び検証する必要がある。

謝辞

本研究調査の実施にあたって東京海洋大学久保信明教授に多大なご指導を頂いた。千葉工業大学未来ロボット技術研究センター鈴木太郎上席研究員にはソフトウェアGNSS受信機について、中部大学海老沼拓史教授にはGNSS信号処理の仕組みについてご教示頂くことができた。東京海洋大学坂井丈泰客員教授にはGNSSのセキュリティの概念についてご教示頂いた。海技教育機構海技大学校練習船海技丸の宮田良史一等航海士には船舶での実験の立ち合いと安全上の施策についてご協力を頂いた。これらの方々に対して謝意をお伝えしたく感謝の御礼を申し上げる。

参考文献

[1] M. L. Psiaki, B. W. O'Hanlon, S. P. Powell, J. A. Bhatti, T. E. Humphreys, and A. Schofield, "GNSS lies, GNSS truth: Spoofing detection with two-antenna differential carrier phase," *GPS World*, vol. 25, pp. 35–48, Feb. 2014

[2] 電波伝搬特性（自由空間&2波モデル）計算ツール，株式会社サーキットデザイン
<https://www.circuitdesign.jp/technical/radio-wave-propagation-characteristics/>
(2024年1月参照)

[3]GPS アンテナ製品情報 <https://www.adafruit.com/product/2461>

(2024年1月参照)

[4] gps-sdr-sim: Generates GPS baseband signal data streams, which can be converted to RF using software-defined radio (SDR) platforms. Copyright © 2015-2023 Takuji Ebinuma.

[5] Experimental Testing and Impact Analysis of Jamming and Spoofing Attacks on Professional GNSS Receivers, Sanja Miljanovic, Francesco Ardizzon, et al. ICL-GNSS 2022 WiP, June 07–09, 2022, Tampere, Finland

[6] GNSS Spoofing and Detection, Mark L. Psiaki and Todd E. Humphreys, Published in Proceedings of the IEEE 1 April 2016 Computer Science, Engineering

[7] 昭和九年逓信省令第六号 船舶設備規程（令和三年国土交通省令第四十二号による改正）第三章 航海用具（衛星航法装置）第百四十六条の二十四

[8] 昭和九年逓信省令第六号 船舶設備規程（令和三年国土交通省令第四十二号による改正）第三章 航海用具（電子海図情報表示装置）第百四十六条の十の二

[9] PPD（個人用保護デバイス）の地上型衛星航法補強システムへの影響 福島 莊之介，齊藤 真二 Effects of Personal Privacy Device (PPD) on Ground-Based Augmentation System 測位航法学会論文誌 2015 Vol.6 No.1

[10] Hilbert-Huang Transform and Its Applications 2nd Edition, Editors Norden E Huang, Samuel S P Shen 2014 by World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.

[11] ソフトウェア GNSS 受信機人材育成プログラムセミナー教材ソフト(2023年2月開催 東京海洋大学 久保 信明, 中部大学 海老沼 拓史, 千葉工業大学 鈴木 太郎)