

GNSS妨害波に関する 試験的実施と軽減対策の検討

2023年 6 月 4 日

GPS・GNSS研究会

東京海洋大学

修士課程1年

奥富 雄司

目次

1. 背景
2. 動機と目的
3. GPS信号発生器による試行
4. 市販のジャマーによる試行
5. アンテナレベルによる軽減対策
6. SDRによる信号観測と軽減対策
7. まとめ

背景

安全で効率的な航海の実現にGNSS が大きく寄与

GNSS信号は微弱であり妨害信号の脅威が存在

安全運航への影響が懸念



画像引用元：

<https://www.maritimeglobalsecurity.org>

動機と目的

船用GNSS受信器が妨害された場合の挙動を調査

妨害による測位不能が起こりうるか調査する実験環境づくり

軽減対策の検討

妨害信号の入力

1. 有線接続で行う
2. 微弱電波の範囲で行う
3. 妨害電波が外部に漏れない工夫をする（電波暗室）

目次

背景

動機と目的

GPS信号発生器による試行

市販のジャマーによる試行

アンテナレベルによる軽減対策

SDRによる信号観測と軽減対策

まとめ

GPS信号発生器（妨害信号発生）

基本仕様

Basic a Method

		MSG-2051A
1. Frequency	1. 周波数	
Frequency	周波数	1.57542GHz(L1 Band)
Doppler frequency	ドップラー	$\pm 10000.0\text{Hz}$
Accuracy	確度	2×10^{-8}
Frequency step	周波数ステップ	0.1Hz
External reference clock	外部 Ref. Clock	10MHz
VFD display	表示	Doppler frequency
Setting	設定	Shuttle knob, RS-232C, GP-IB, USB

2. Output	2. 出力	
Level range	レベル範囲	$-80 \sim -149.9\text{dBm}$ ($-60 \sim -129.9\text{dBm}$)
VFD display	表示	$-80 \sim -149.9$ ($-60 \sim -129.9$)
Accuracy	確度	$\pm 1.0\text{dB}$
Output impedance	出力インピーダンス	50 Ω , VSWR 1.2 or less
Spurious output	スプリアス出力	-50dB or better at 2nd harmonic
Setting	設定	Shuttle knob, GP-IB, RS-232C, USB (Min. 0.1dB)

3. Modulation	3. 変調	
Modulation method	変調方式	Direct diffusive modulation of BPSK spectrum
Modulation code	変調コード	37 kinds C/A codes(1023-bit series gold codes)
Channel	チャンネル	SV1~SV37
Modulation frequency	変調周波数	1.023MHz clock
Data modulation	データ変調	C/A code synchronized frequency division, 50bps BPSK
NAVI data	NAVIデータ	50bps Test patterns
Setting	パネル設定	Shuttle knob, GP-IB, RS-232C, Non-modulation, USB
Z count	Zカウント	Automatic increment function being synchronized with real time clock(RTC) is provided
VFD display	表示	Displayed with VFD

MEGURO

GPS信号発生器

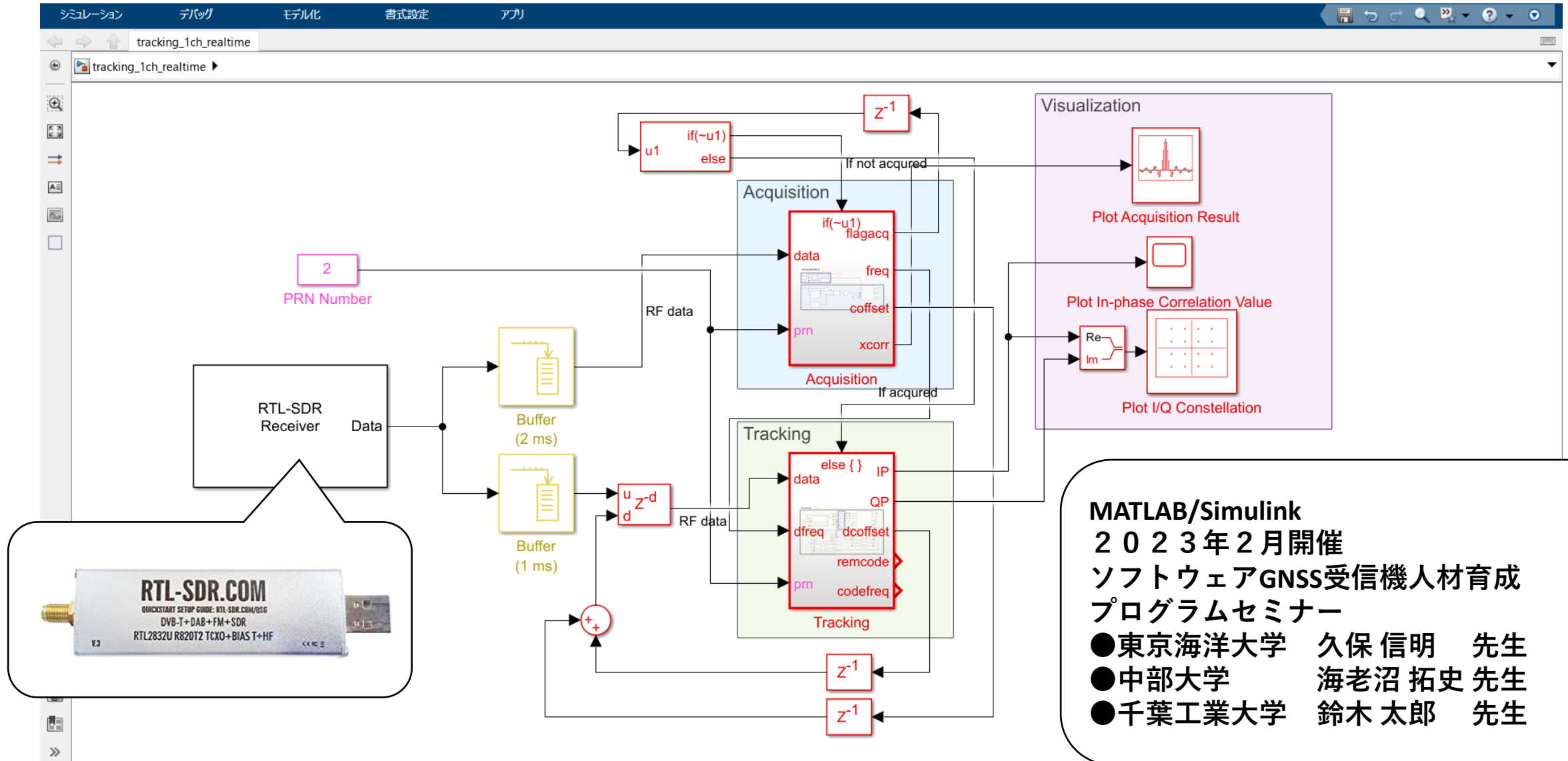
GPS Signal Generator

MSG-2050A / MSG-2051A



株式会社目黒電波測器

Simulinkによる信号捕捉・追尾



MATLAB/Simulink

2023年2月開催

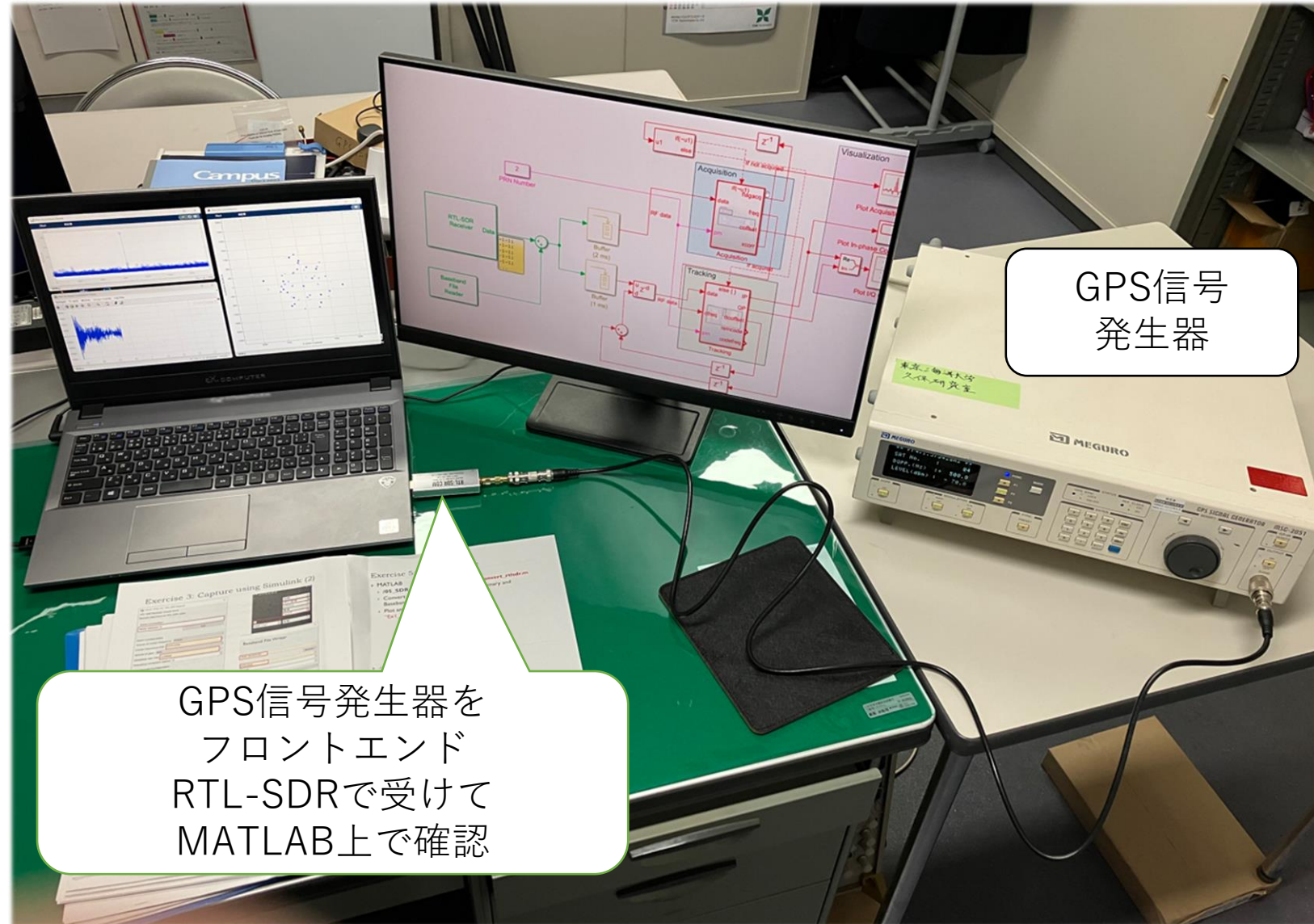
ソフトウェアGNSS受信機人材育成
プログラムセミナー

- 東京海洋大学 久保 信明 先生
- 中部大学 海老沼 拓史 先生
- 千葉工業大学 鈴木 太郎 先生

RTL-SDRでの妨害信号の確認

GPSシミュレータ信号
を妨害信号として入力

MATLAB/Simulinkの
ソフトはセミナー解説版
をベースに信号加算回路
を追加して使用

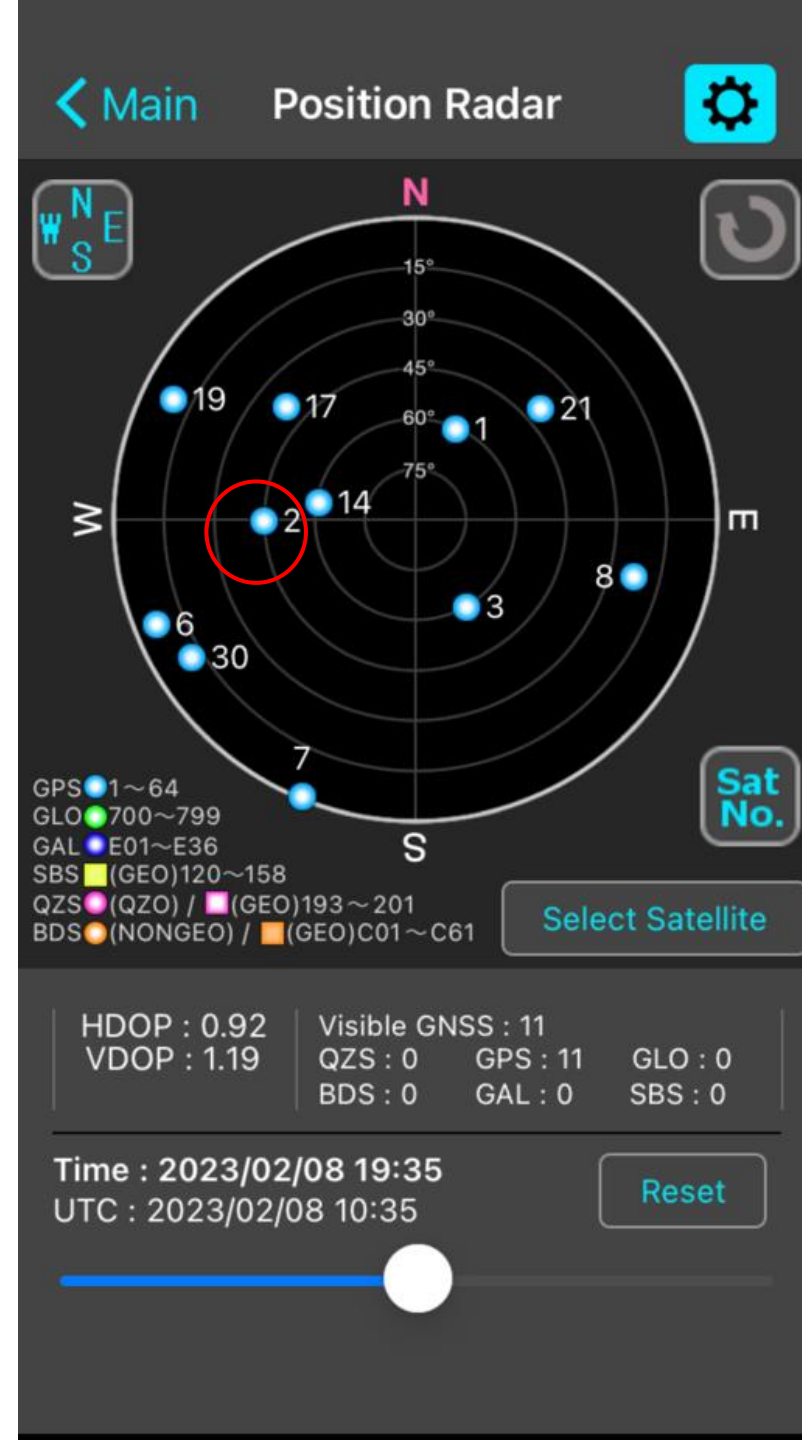


あらかじめGNSS信号を ベースバンドファイルに保存

日時：2023/02/08
JST 19:35
UTC 10:35

場所：東京江東区
東京海洋大学

復調する衛星： 衛星番号 2 番
方位角 270度
仰角 45度



妨害信号を混合しない

妨害信号
の入力

2
PRN Number

RTL-SDR
Receiver

Data

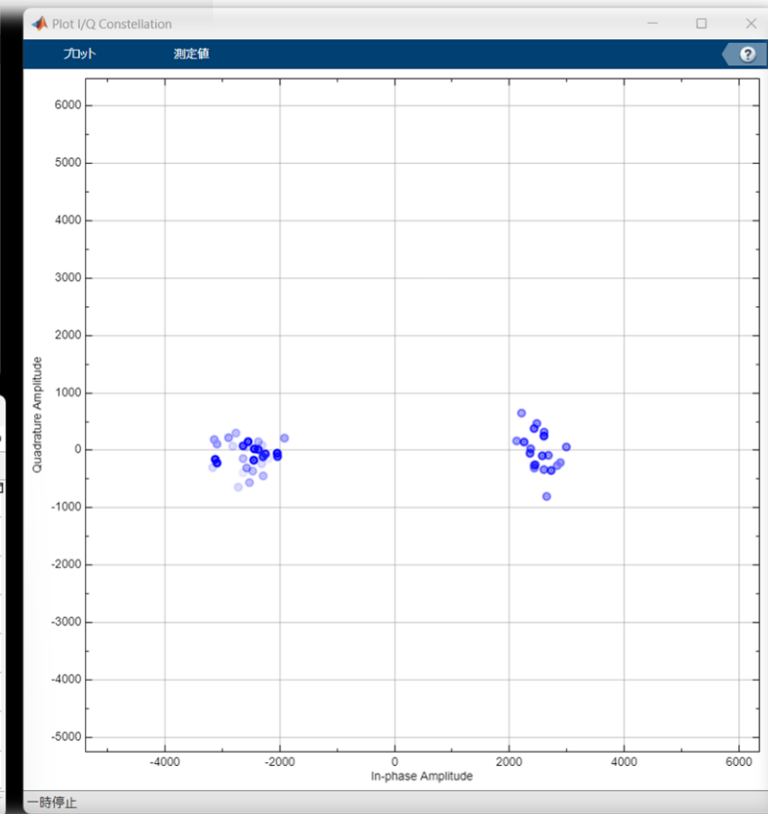
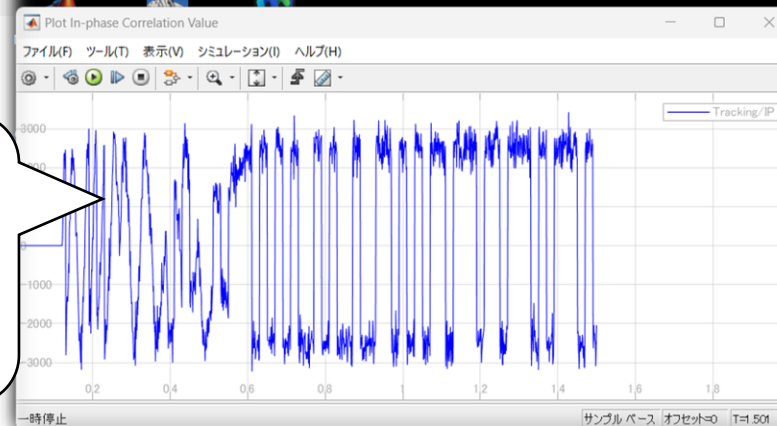
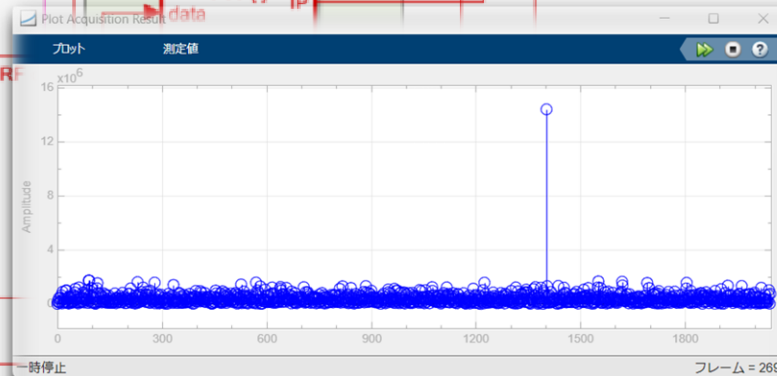
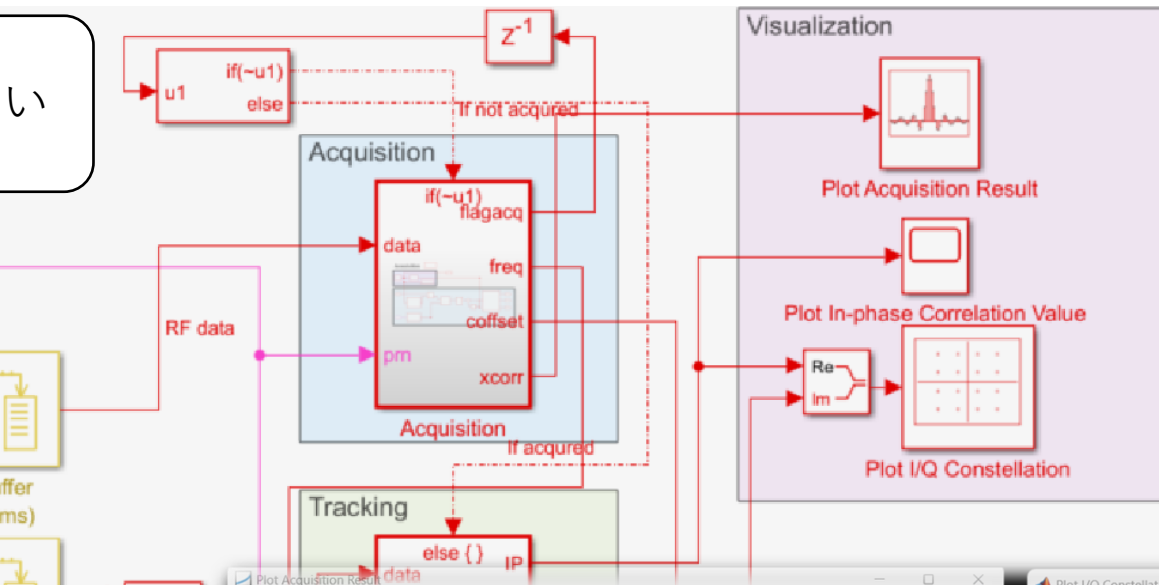
未使用

Baseband
File
Reader

保存してあるGNSS信号
ベースバンドファイル

【ベースバンドファイルの復調】

妨害信号の混合がない場合
デコードできることを確認



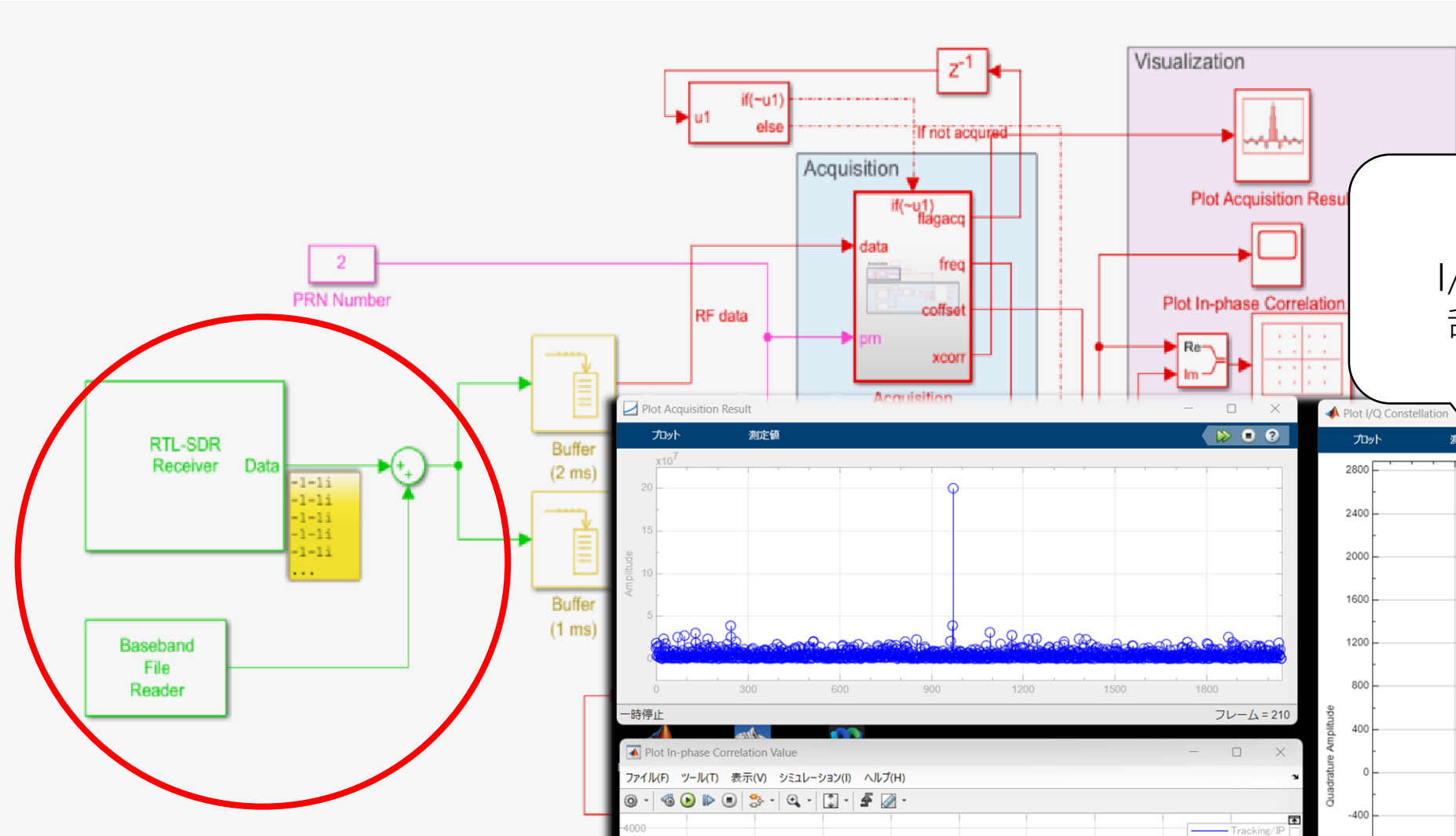
妨害信号の発生源 GPS信号発生器の設定

GPS衛星番号：4 番

Dopp.Freq.：+500Hz

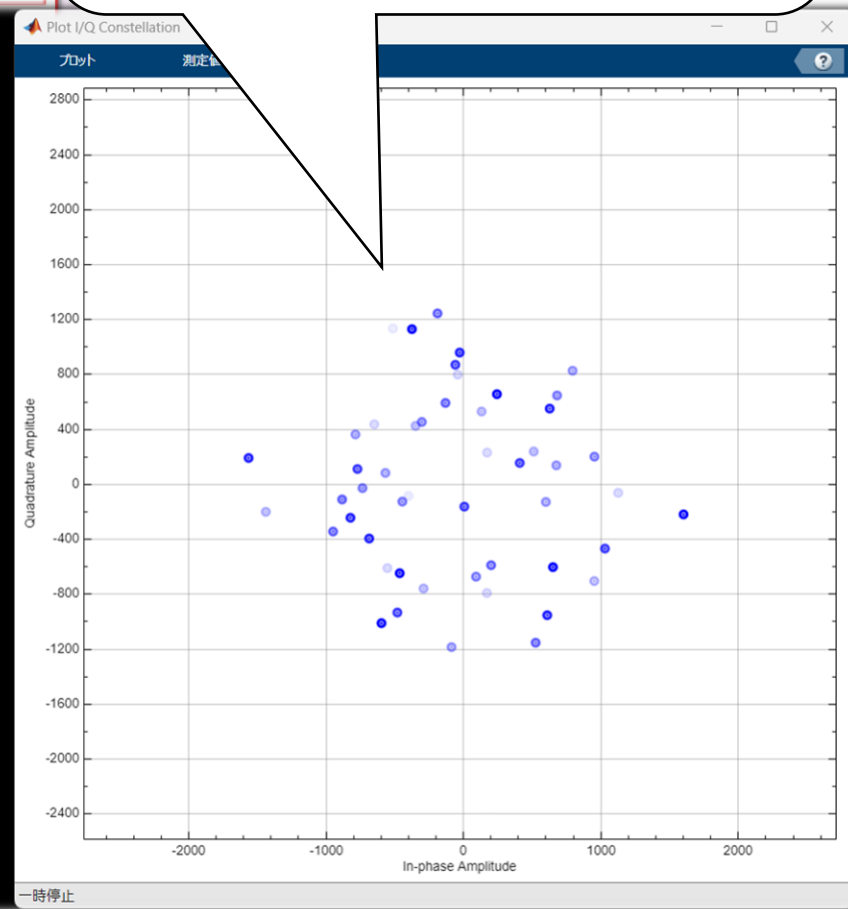
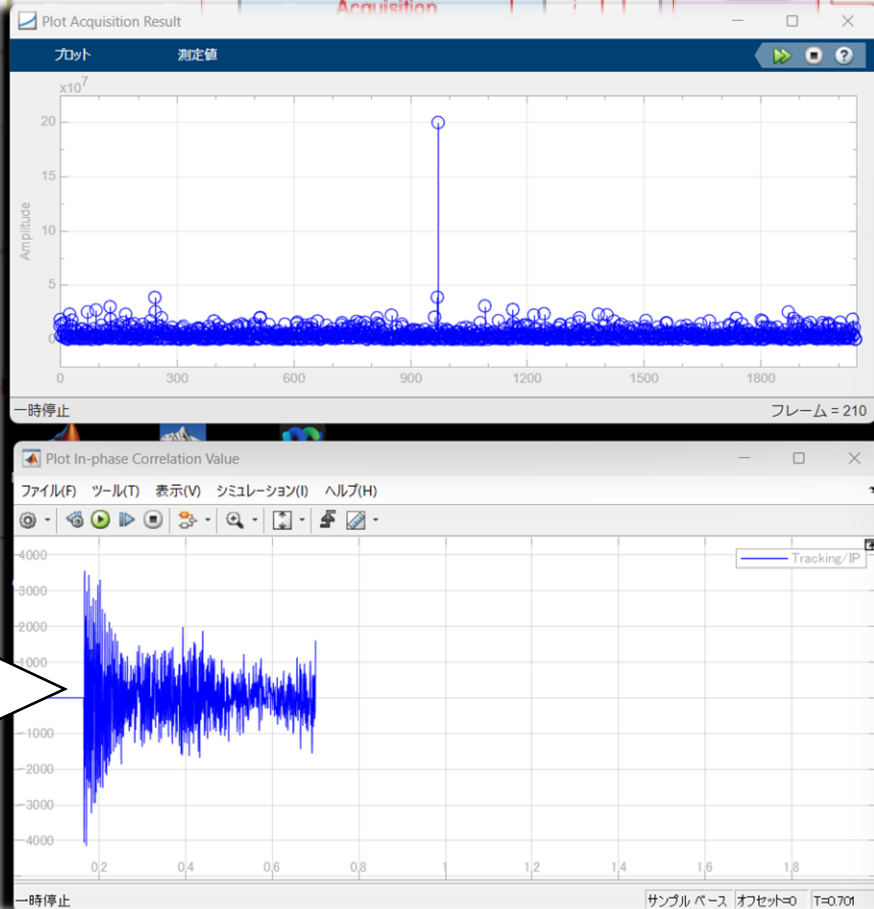
信号レベル：-70 d Bm





信号を混合した場合
I/Qコンステレーションが
乱れてデコードできない

【ベースバンドファイルの復調】
復調できない
妨害信号による測位不能の発生



船用サテライトコンパス 古野製SC-50

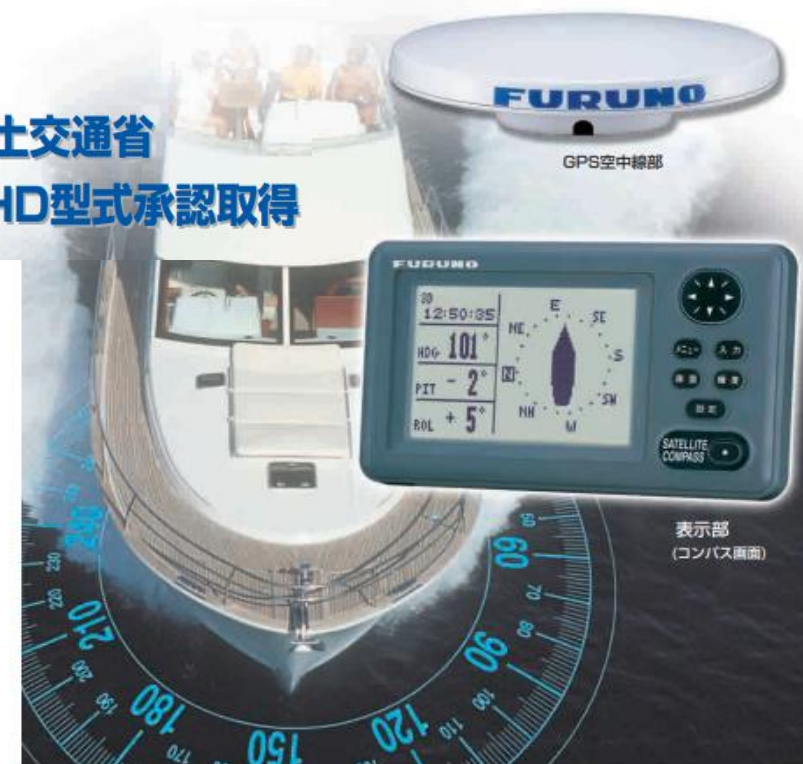
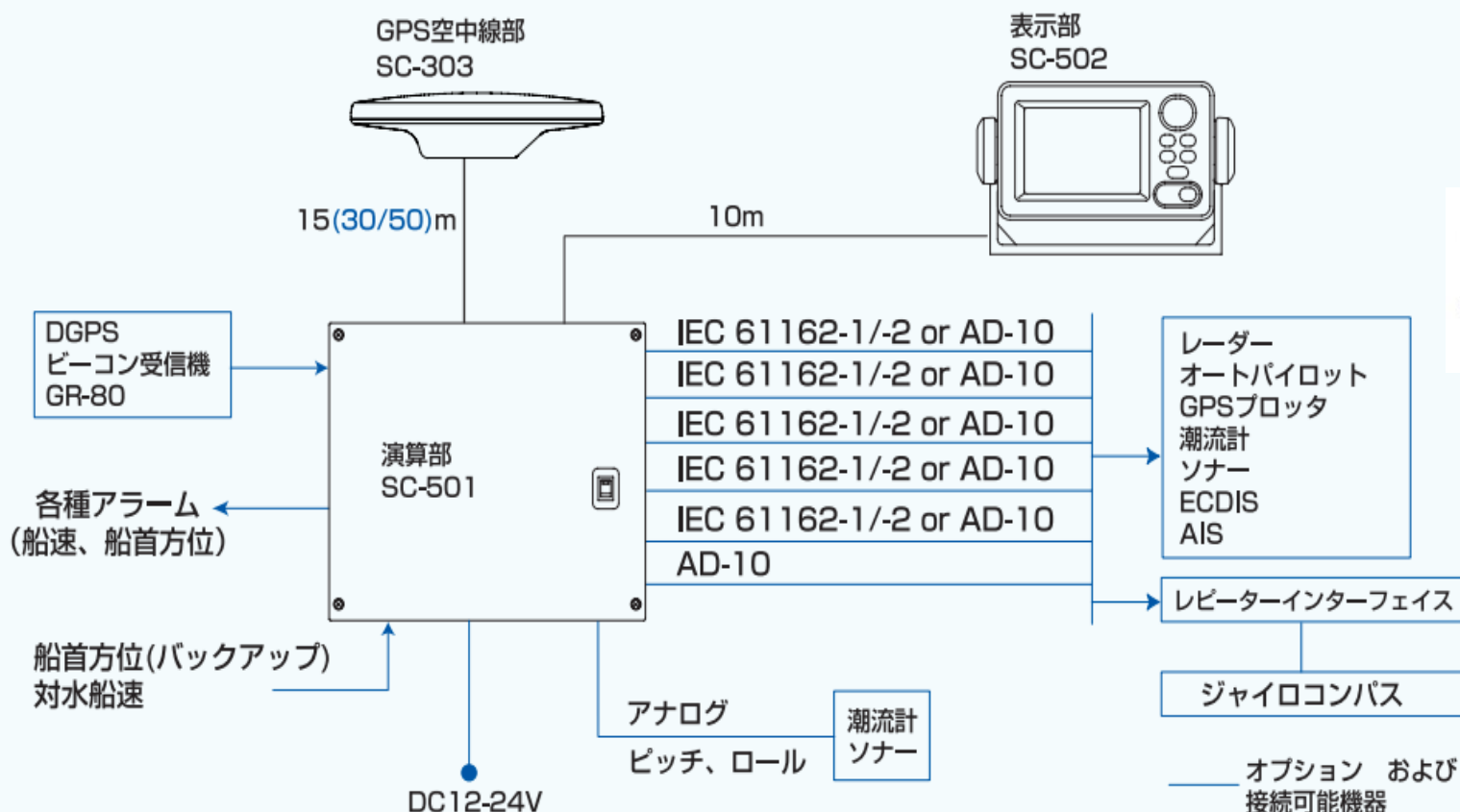
FURUNO

サテライトコンパス

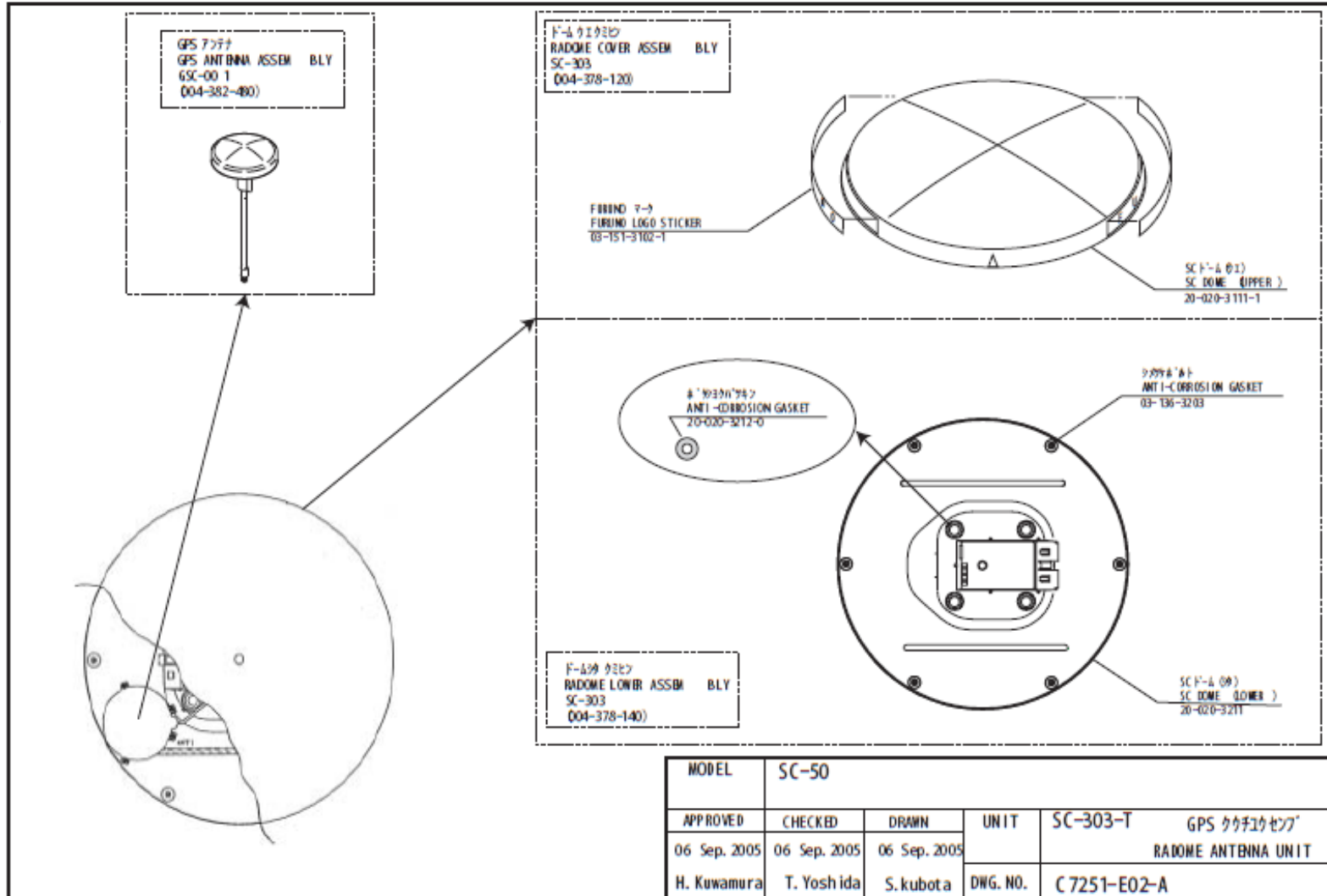
SC-50

静定時間わずか3分
0.5° RMS以内の高精度方位測定を実現！

国土交通省
THD型式承認取得

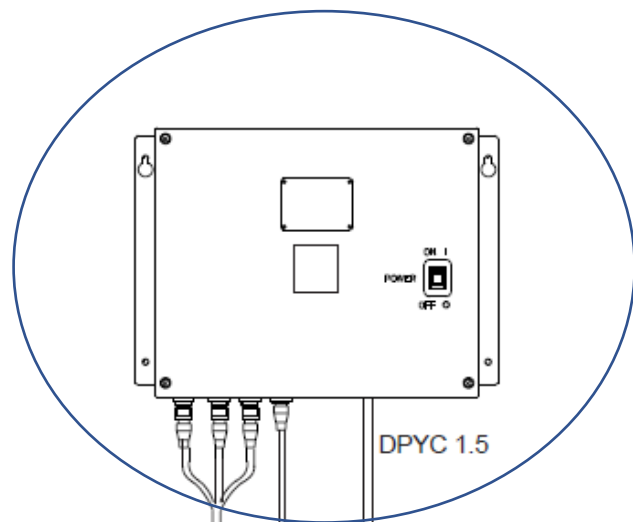
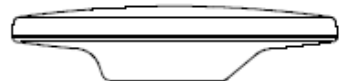


アンテナ部分について



接続図

ANTENNA UNIT
SC-303



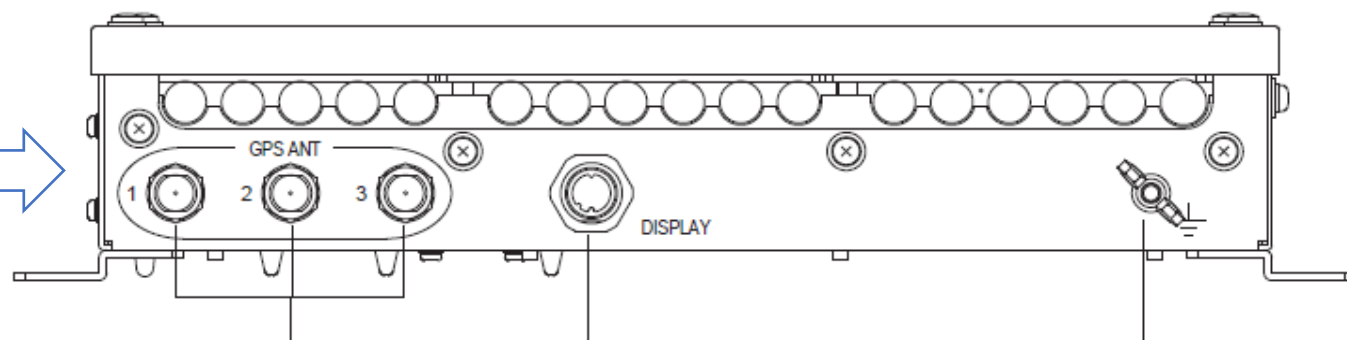
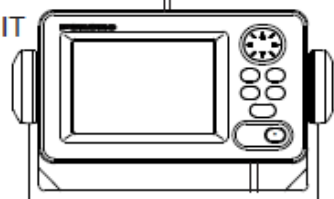
TPPX6-3D2V-15M, 15m
or
TNC-PS-3D-15 (3 pcs.)

DPYC 1.5

12-24 VDC

MJ-A7SPF0006-100,
10m

DISPLAY UNIT
SC-502



ANTENNA Terminals

GPS ANT1: No color

GPS ANT2: Yellow line

GPS ANT2: Red line

(using cable TPPX6-3D2V-15M)

Cable from display

Ground Terminal

Connect IV-2.0 sq
ground wire to
ship's superstructure.

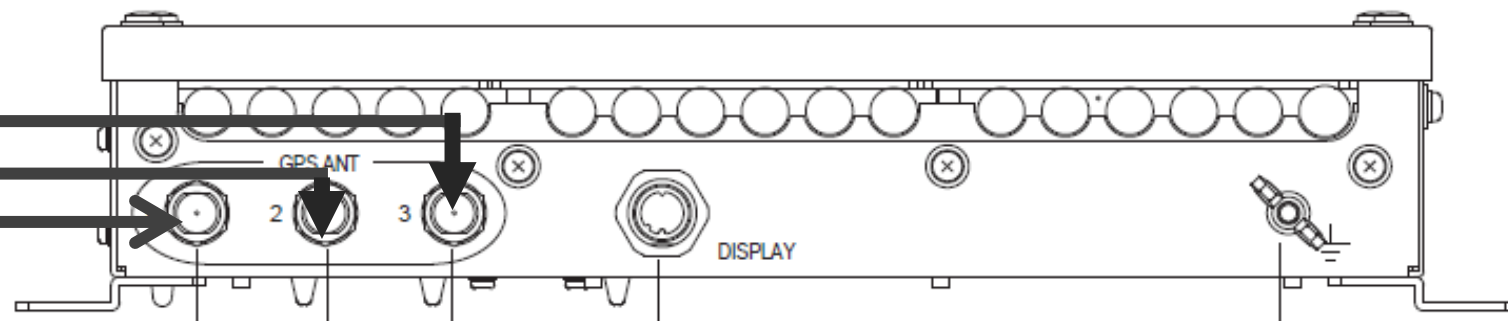
MATLABで試したことを舶用機器に試す フルノコンパスへの妨害信号の接続図

ANTENNA UNIT
SC-303

サテライトコンパス演算部

GPS
信号発生器
(妨害)

分波器

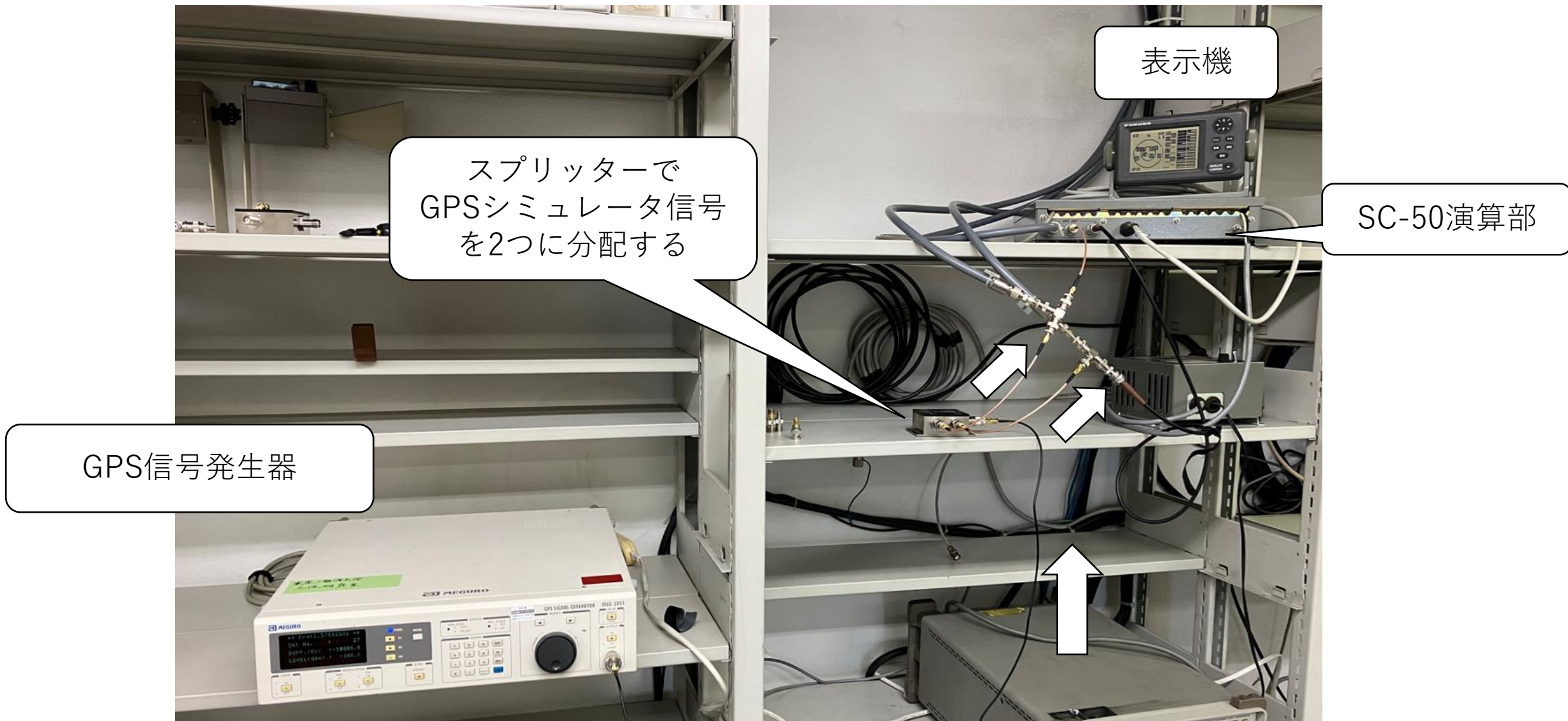


ANTENNA Terminals
GPS ANT1: No color
GPS ANT2: Yellow line
GPS ANT2: Red line
(using cable TPPX6-3D2V-15M)

Cable from display

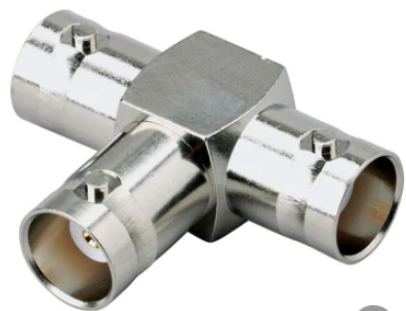
Ground Terminal
Connect IV-2.0 sq
ground wire to
ship's superstructure.

接続写真全体像



接続方法

BNCコネクタ
T型分岐アダプタで混合



RS PRO

同軸 変換アダプタ RS Pro T型分岐 BNC ジャック

[商品レビューを投稿する](#)

☐ 当日出荷 ☐ 当日出荷とは

内容量 1個 注文コード 41266795 品番 546-4932

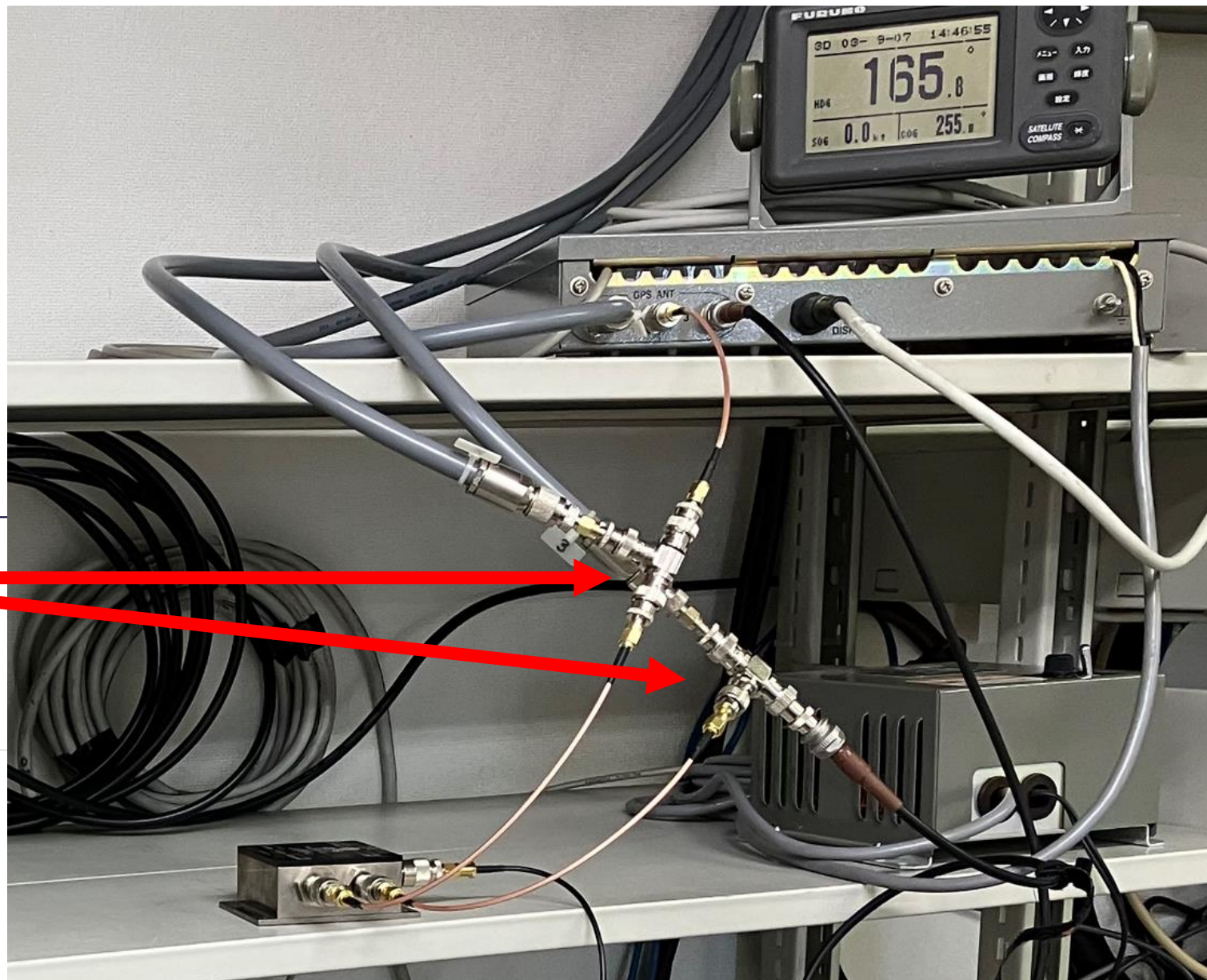
販売価格(税込) ¥1,419

販売価格(税別)

¥1,290

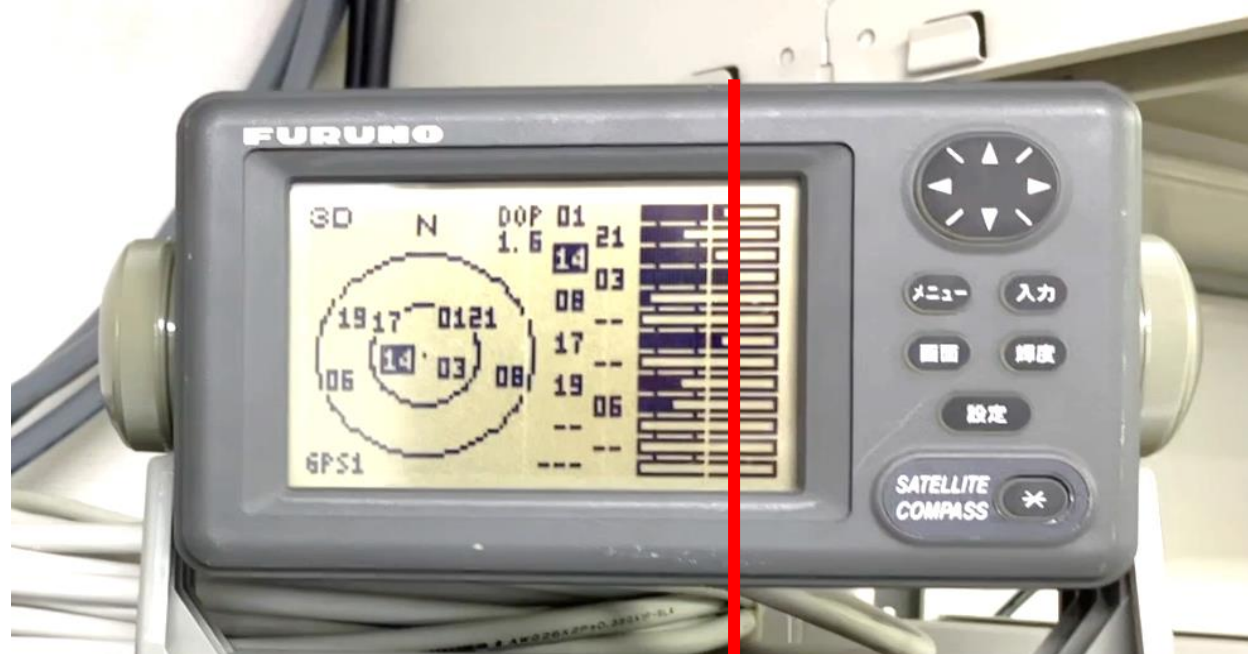
1

☐ バスケットに入れる

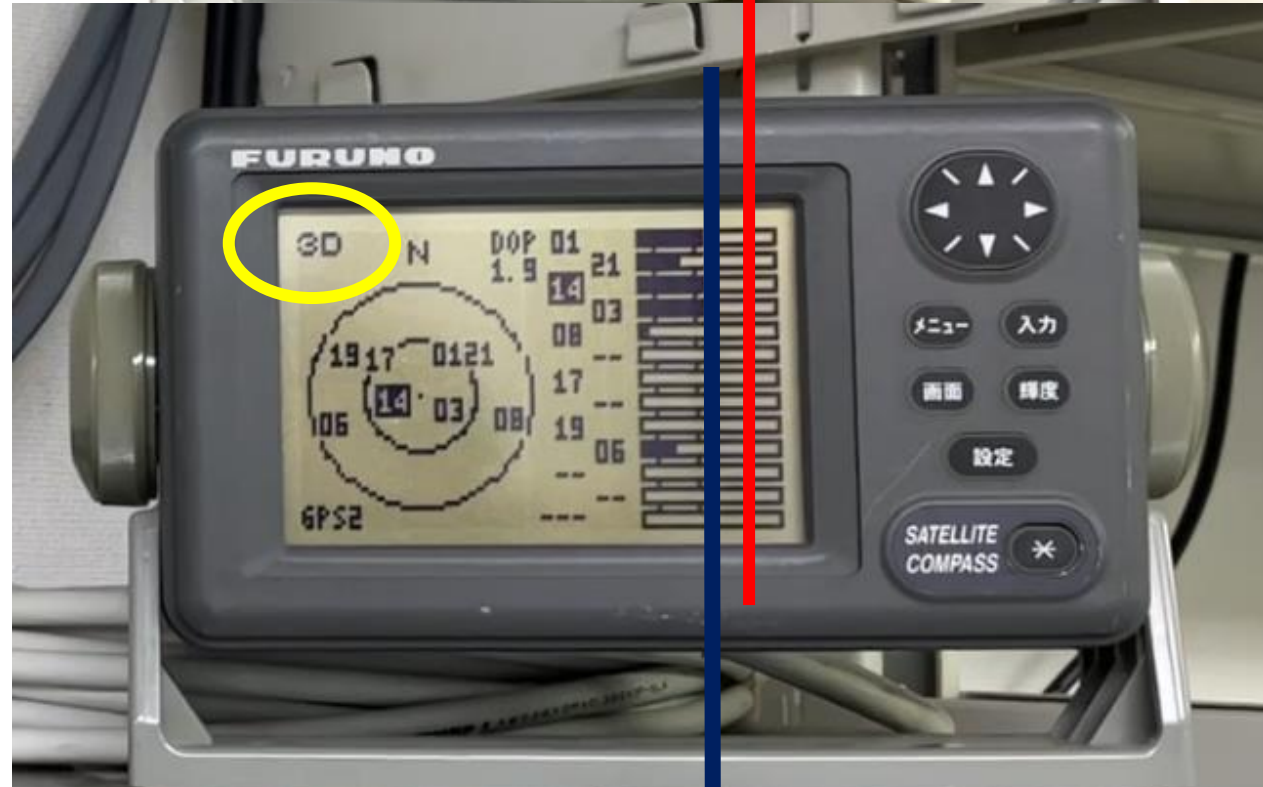


受信レベルの比較

GPS 1 : 混合なし



GPS 2 : 混合あり



信号レベルは下がるものの
3D Fix は継続した

ときどき 3 DFixが外れたり復旧したりを
繰り返すが方位算出は継続した



GPS信号を-60 d Bmで有線接続にて混合

RTL-SDRとMATLABでのシミュレーション結果

(ベースバンド信号ファイルであってリアルな生信号ではない)

→**復調できないことを確認**

船用GPSコンパス → 受信信号レベルを低下させることが可能

3 D Fix を外すことができる程度

(復旧とNo Fixを繰り返す)

-60 d Bm以上の電力は仕様により出力できない

より大きな妨害電力を出力して妨害が生じるか検証したい

→**より強い妨害信号の使用を検討**

目次

- 背景
- 動機と目的
- GPS信号発生器による試行
- **市販のジャマーによる試行**
- アンテナレベルによる軽減対策
- SDRによる信号観測と軽減対策
- まとめ

妨害信号発生装置：ジャマー（Jammer）



画像をクリックして拡大イメージを表示



車のGPS信号ジャマー、追跡車を防止するためのポータブル車のGPS信号遮断装置、シガレットライター信号遮断装置、あらゆる種類の車と互換性があります

ブランド: Vbestlife

Amazonの新着商品

¥1,546 税込

さらにおトク ☐ 5% OFFクーポンの適用 [規約](#) | [買い物をする](#)



出品者による発送



安心・安全への取り組み



お客様の情報の保護

購入を強化する

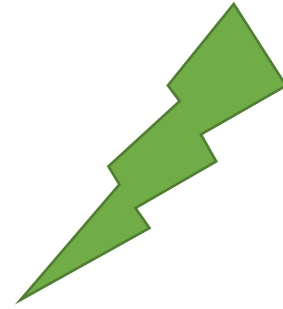
お支払いプラン

¥773/月 (2か月) 実質年率 0%から

- 超高感度: 追跡、監視、傍受を防ぐために、より強力な干渉防止、カーメーター GPS ジャマーの高速アップロードの正確な検出と発見。
- 持ち運びが簡単: 車のGPS信号遮断装置は、長さ3.6インチ、小型、軽量、柔軟なクロムシエルを備えており、さまざまなサイズのキー FOB や小型デバイスに適合します。
- 用途: この車載用ポータブル GPS 信号ジャマーは高出力で、広範囲をカバーし、持ち運びも簡単です。外観は普通のシガーライターと同じ、あらゆる車種のカバーです。

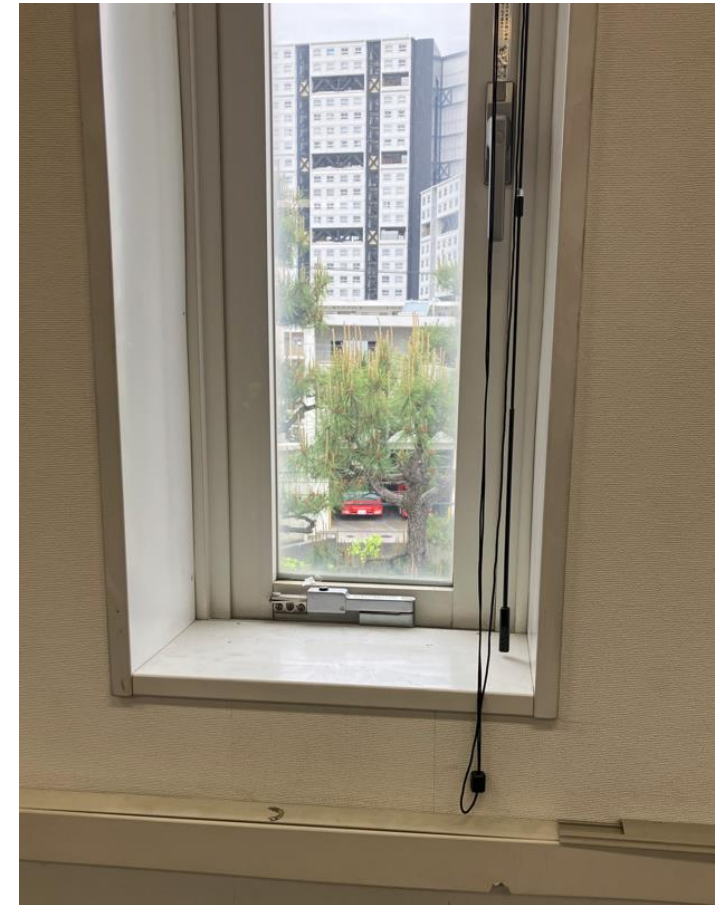
GNSS妨害への対処方法を検討したい

市販の容易に入手可能なジャミング装置により船用GNSS受信機の測位は妨害されるか



ジャミング波の漏洩防止の措置

窓をアルミ箔で覆うことで外部への電波漏れを防ぐ





妨害信号の電力測定

スペクトラムアナライザによる測定

ピーク時

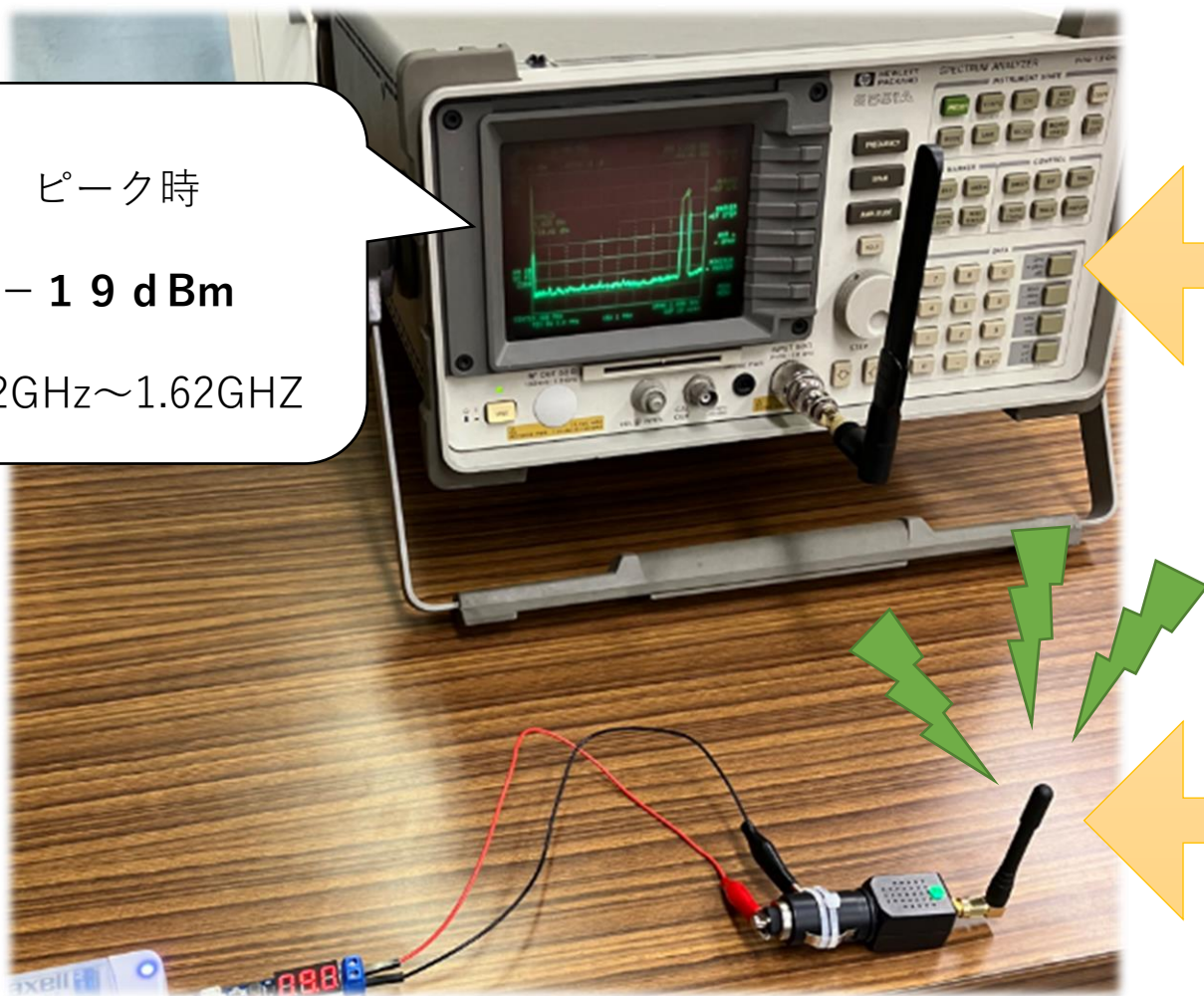
− 19 dBm

1.52GHz~1.62GHz

受信用の
ホイップアンテナ

(RTL-SDR付属アンテナ)

市販ジャミング装置
による送信
動作電圧：9V~15V

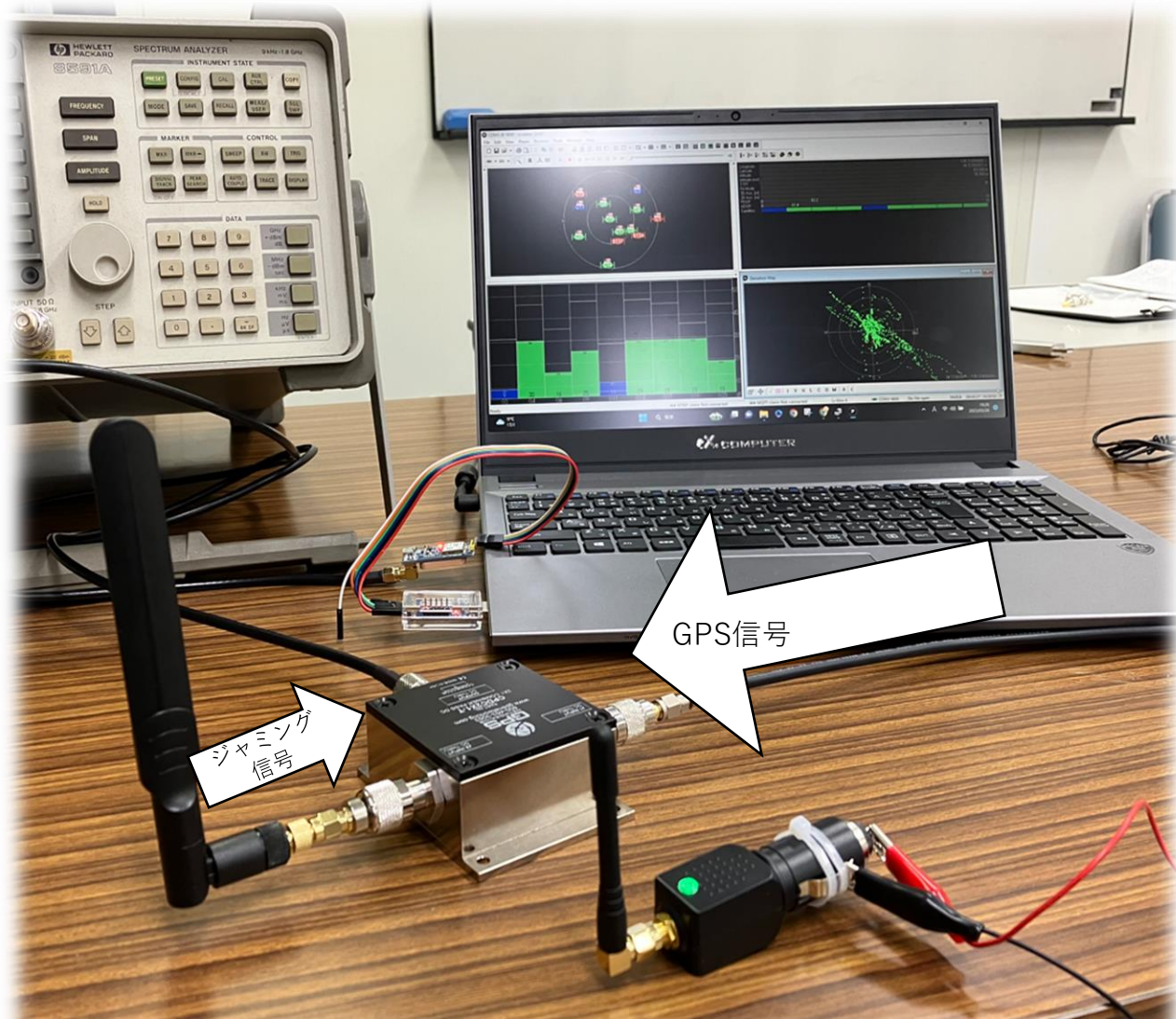


GNSS受信機へ妨害信号を入力

コンバイナーで
GPS信号とジャミングを混合し
するもFixが継続

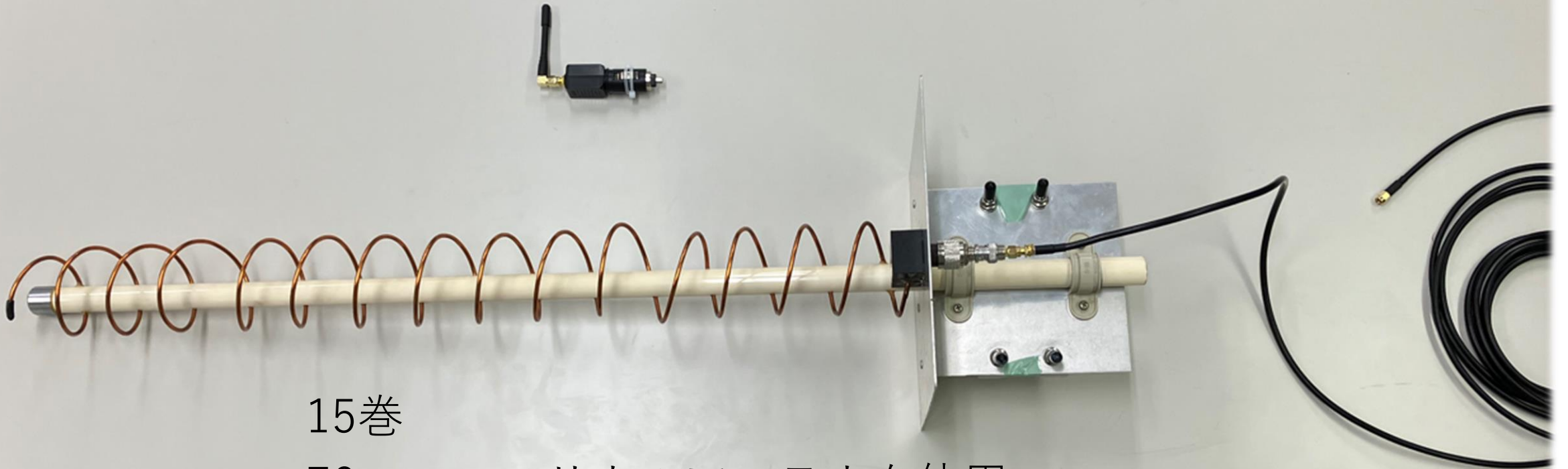
受信機：u-blox M8M
GPSアンテナ NobatelGPS-600

誤差は大きくなるも
衛星の捕捉・追尾が継続
3D-Fixを保持



ヘリカルアンテナを送信アンテナに

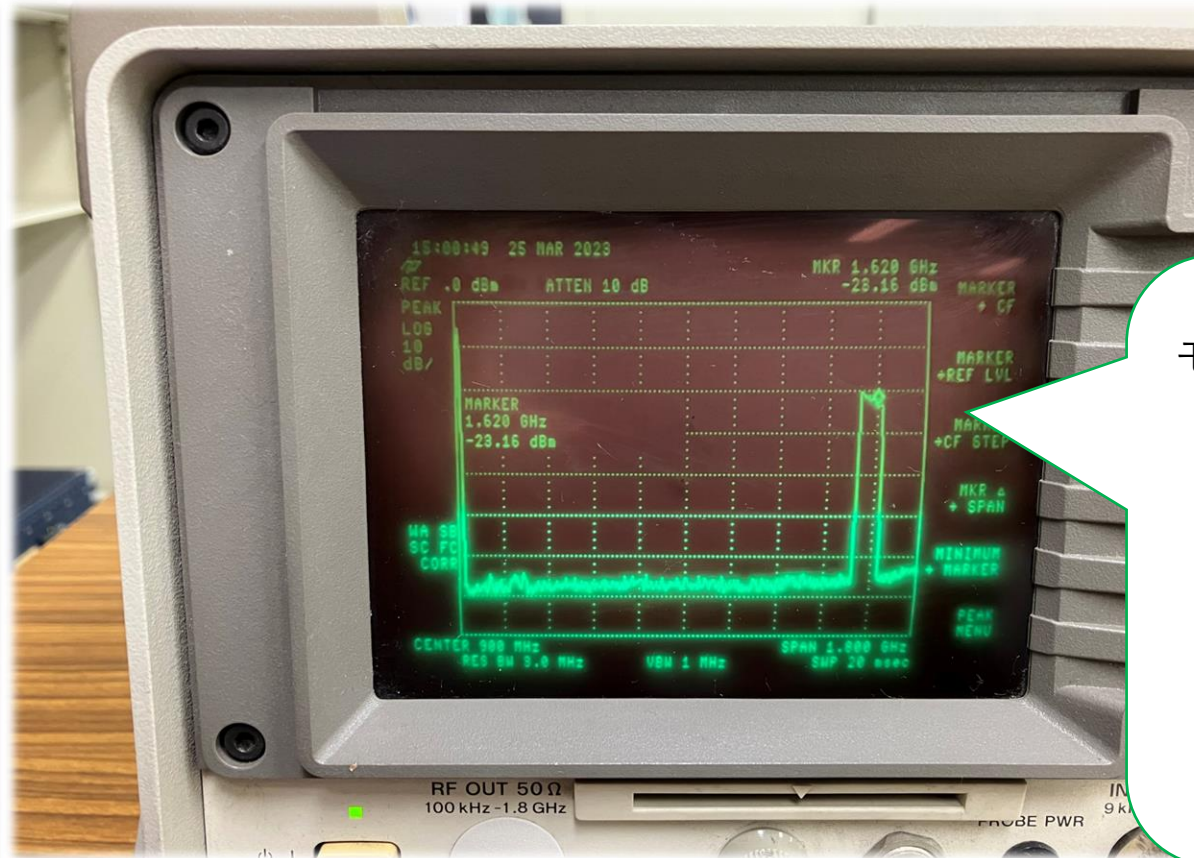
アンテナを変えれば
ジャミングできるのではないか



15巻

70 c mのヘリカルアンテナを使用

ヘリカルアンテナにした場合の電力測定



モノポールアンテナ
-60dBm



ヘリカルアンテナ
-23dBm

37dBm
ほど上がった

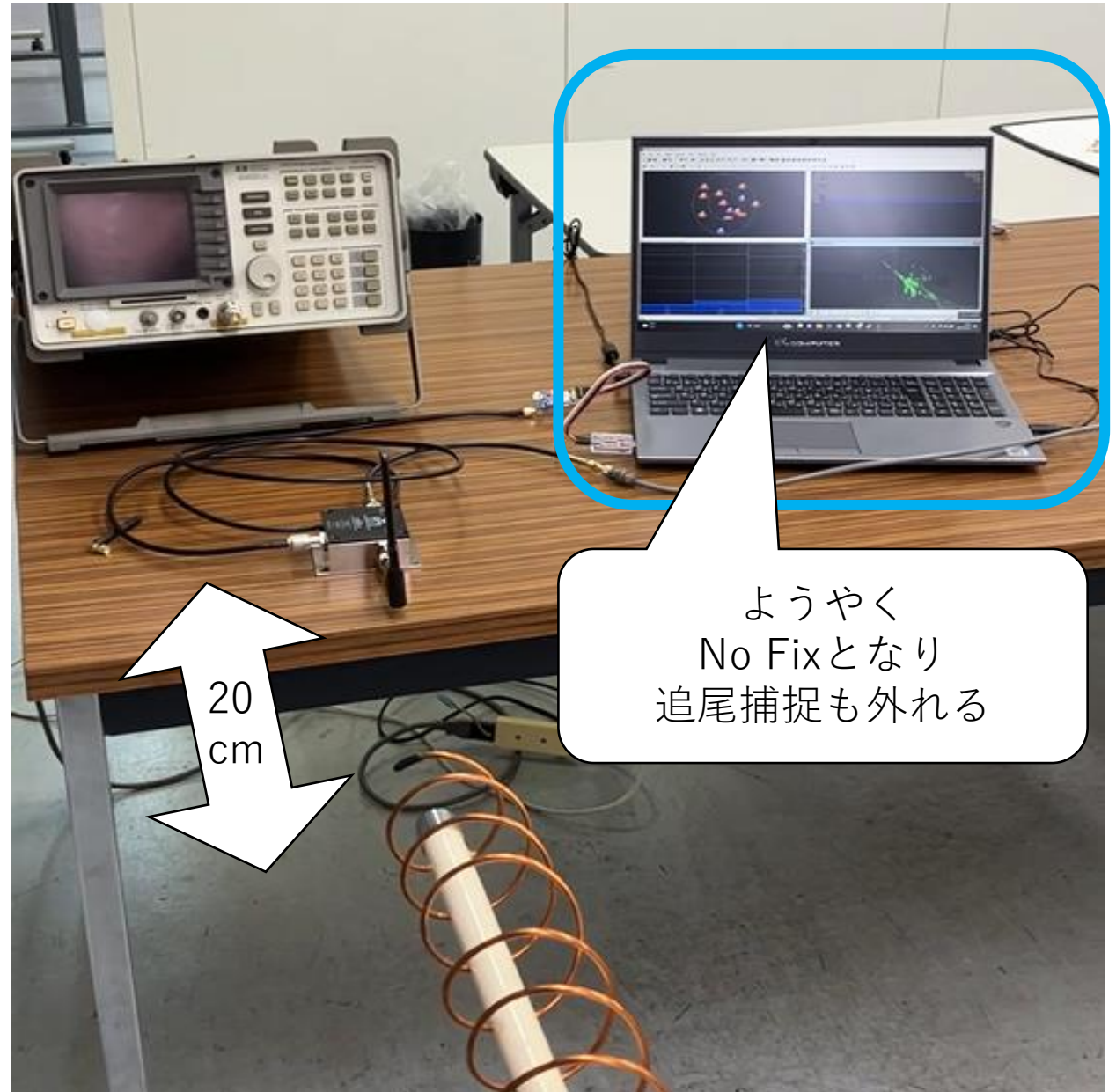
相当近づかないと測位不能は生じなかった

ヘリカルアンテナでも
20cmくらいまで近づけないと
No Fix とはならない

市販のジャミング装置では

- ①ごく至近距離で
- ②ヘリカルアンテナ使用

によりジャミングが可能となる



モノポールアンテナでのジャミング

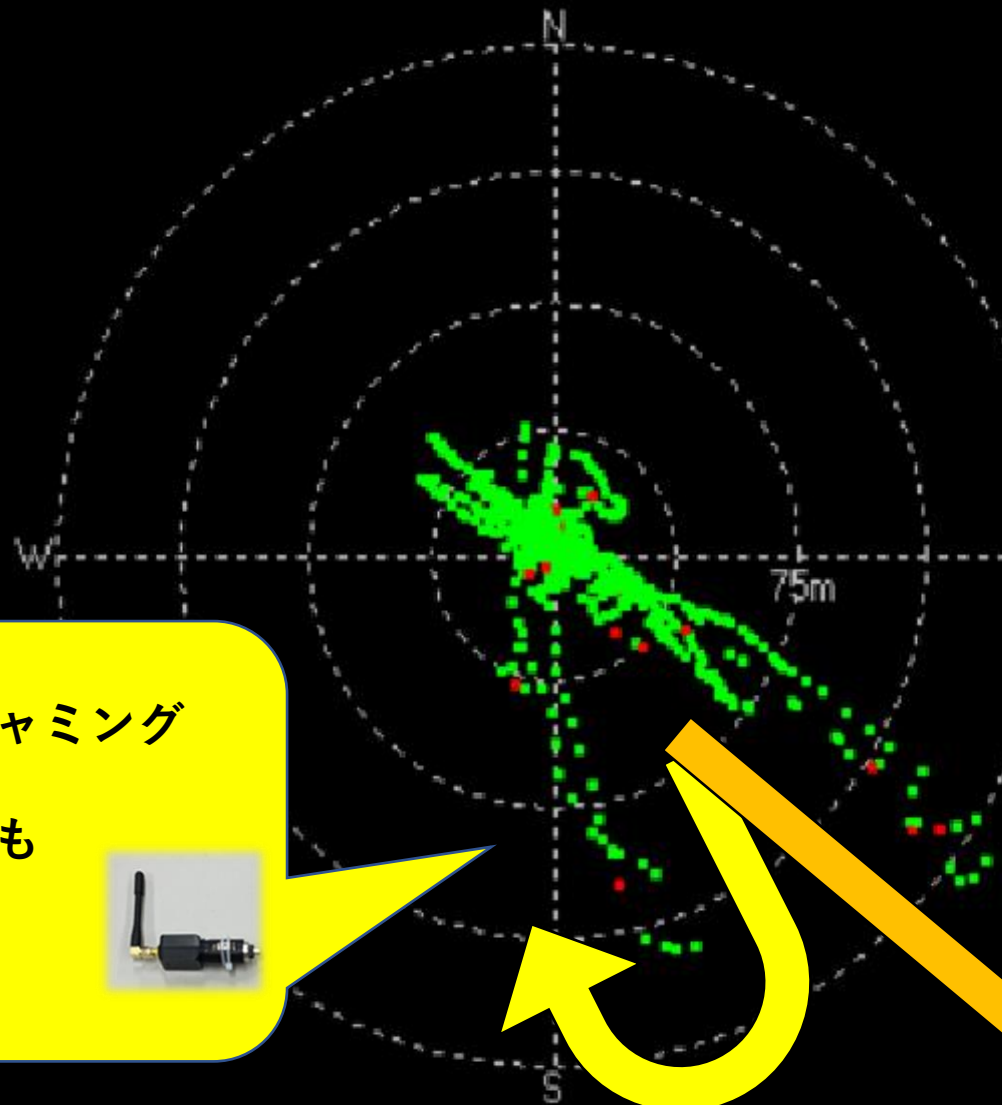
100mほど離れるも
Fixが継続



ヘリカルアンテナでの
ジャミング



150m以上離れたあと
No Fixとなった

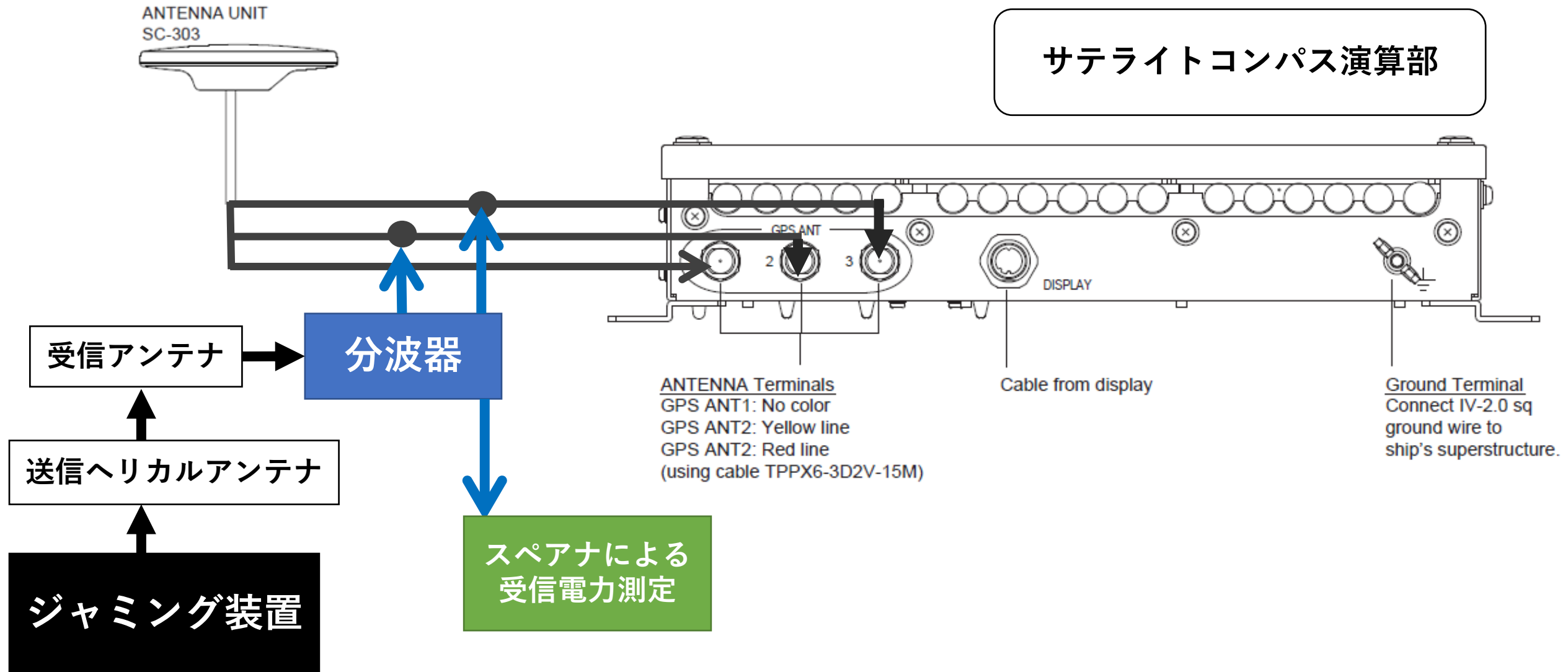


34.72380600—135.31502533—

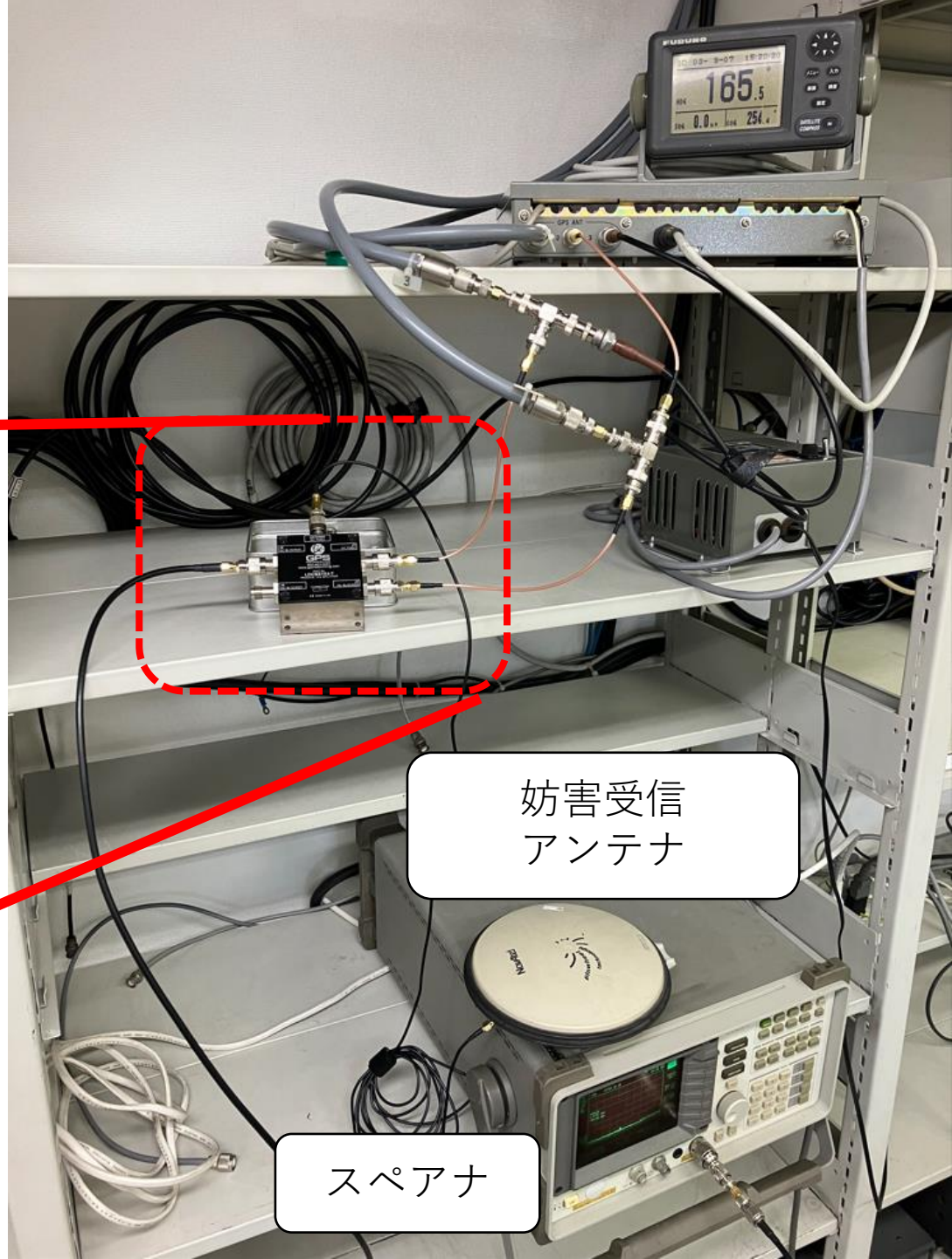
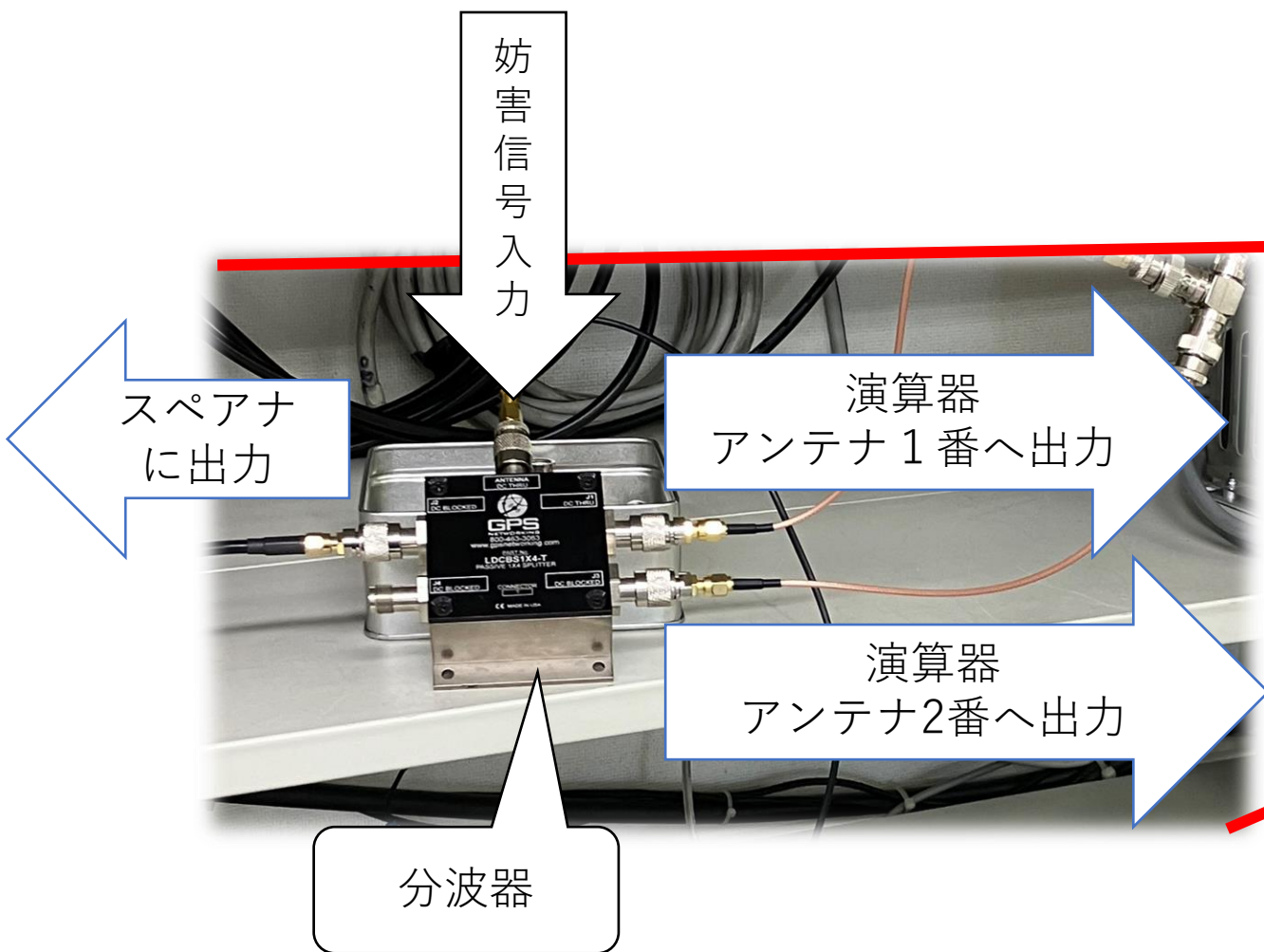
MQTT client: Not connected | u-blox 6 | COM3 9600 | No file open | NMEA | 00:44:15 | 10:31:38



船用GPSコンパスに試験する：接続図

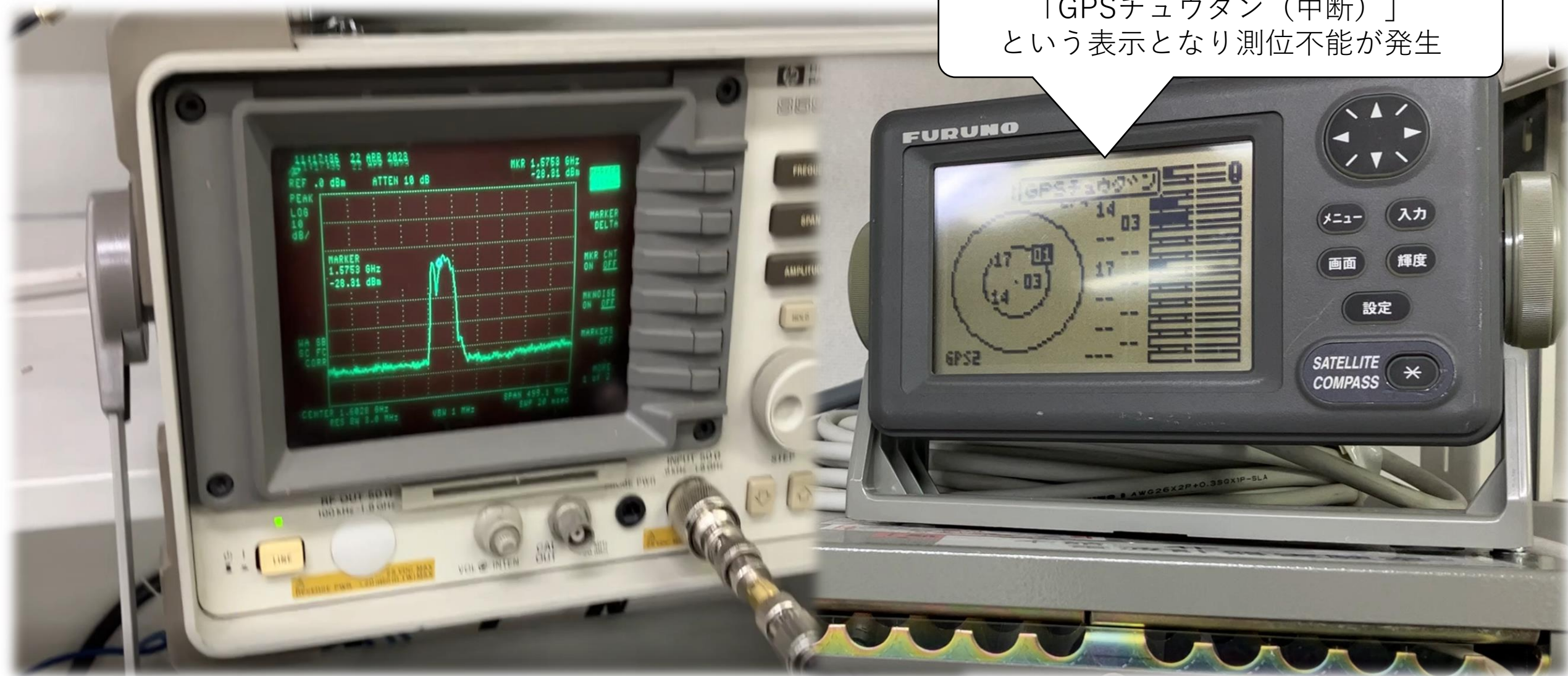


接続写真



測位不能：-28dBmで発生

「GPSチュウダン（中断）」
という表示となり測位不能が発生



方位演算不能が発生：-17~-18dBm

方位算出が停止



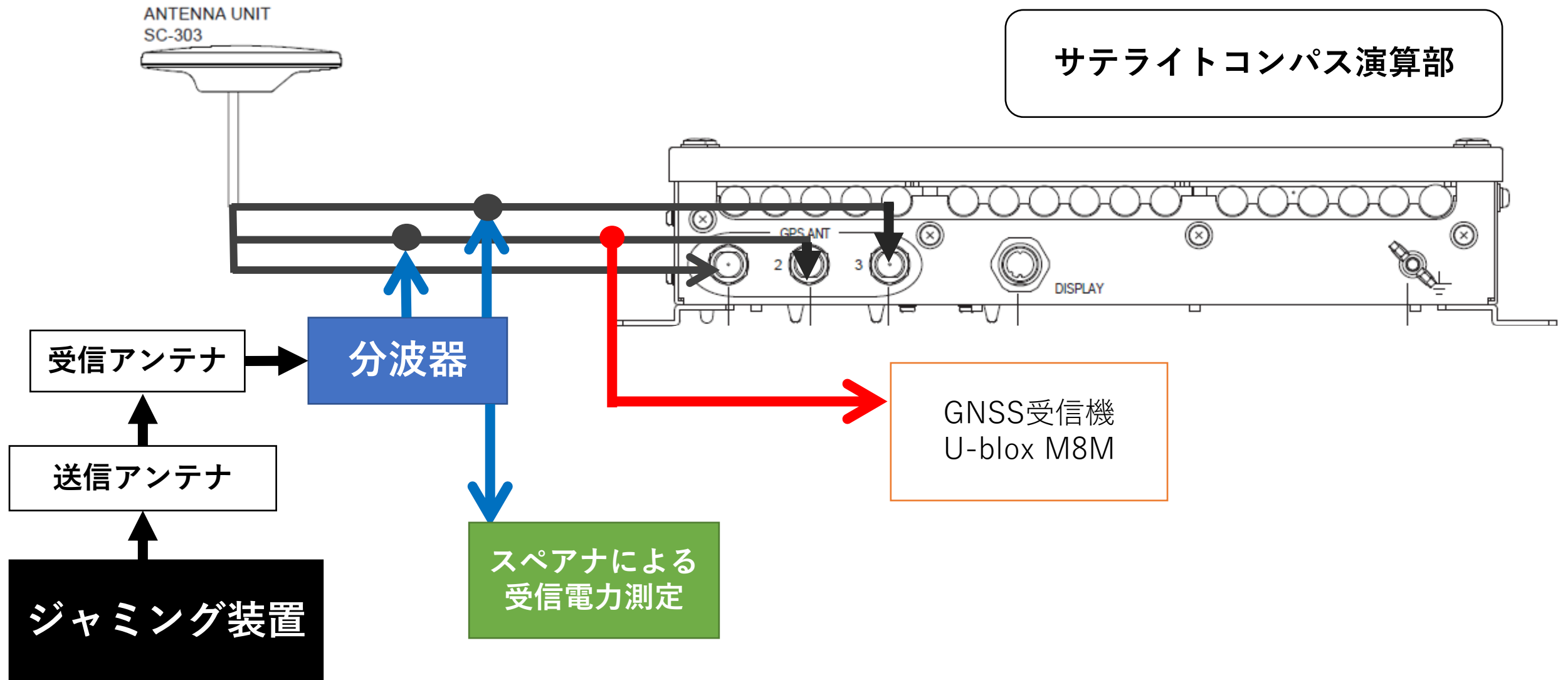
低仰角の衛星からロストしていく
天頂方向の衛星は残りやすい



ジャミングを切れば1分程度で復旧する



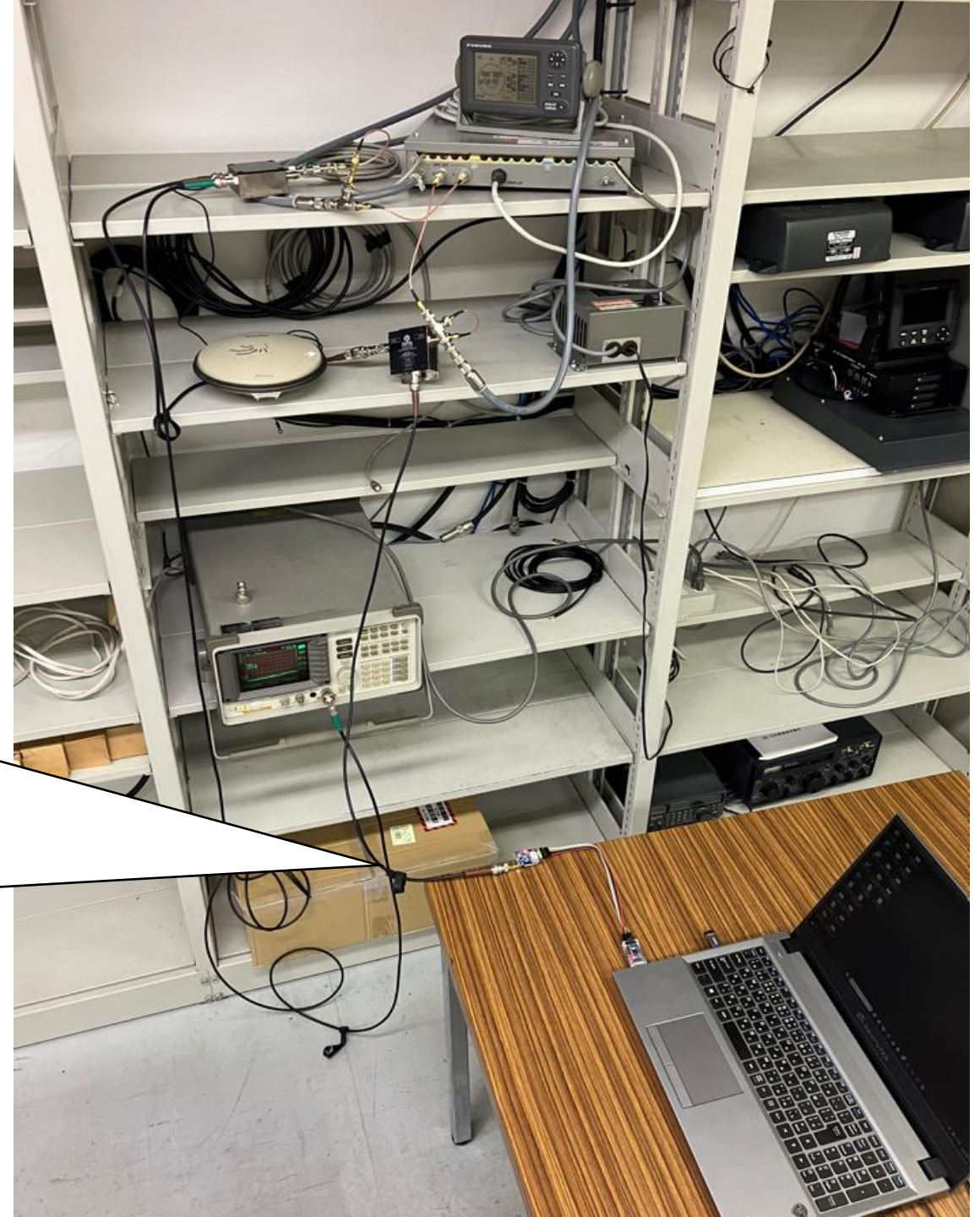
妨害信号：接続図（CNR測定）



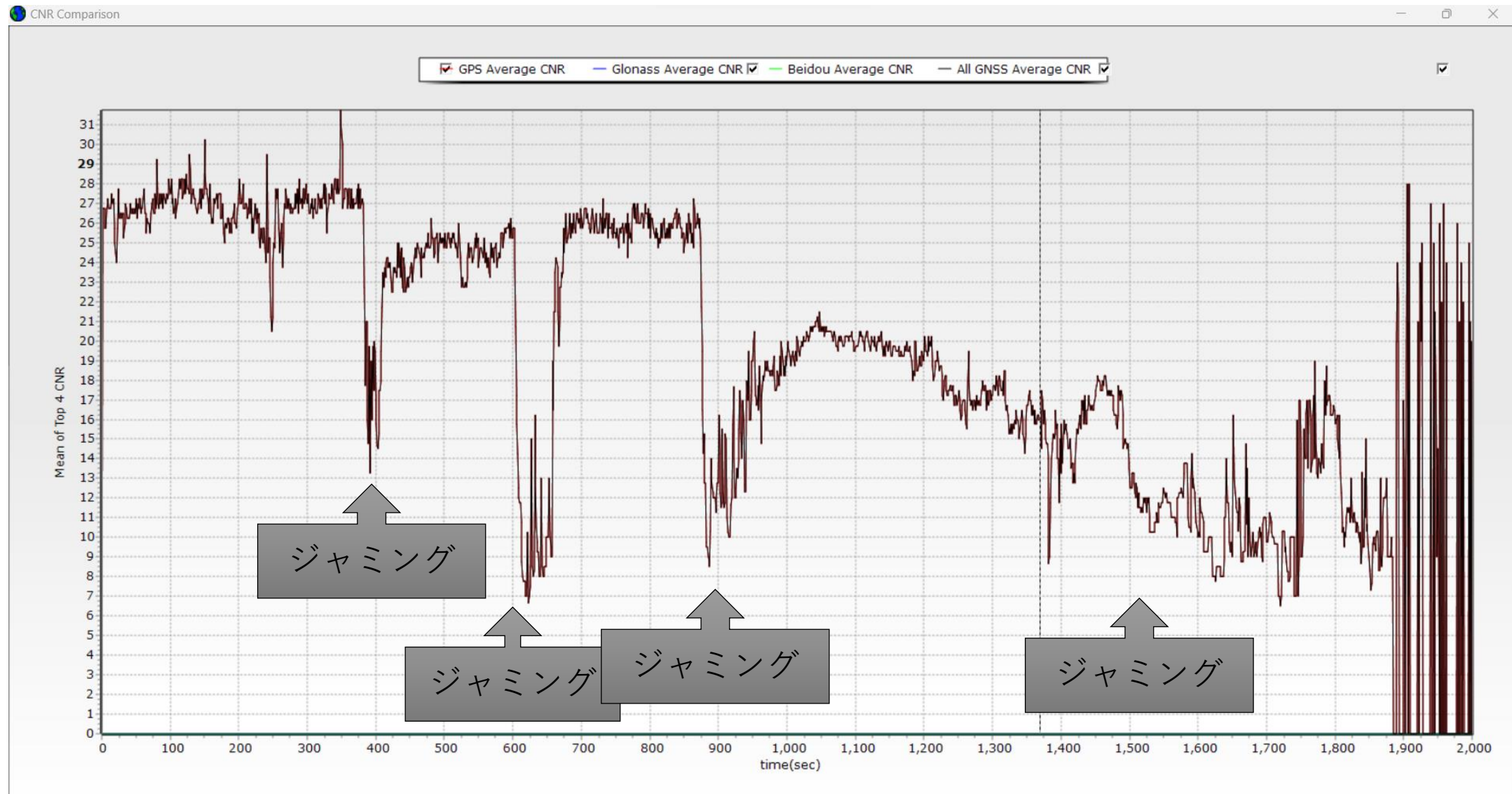
測定写真

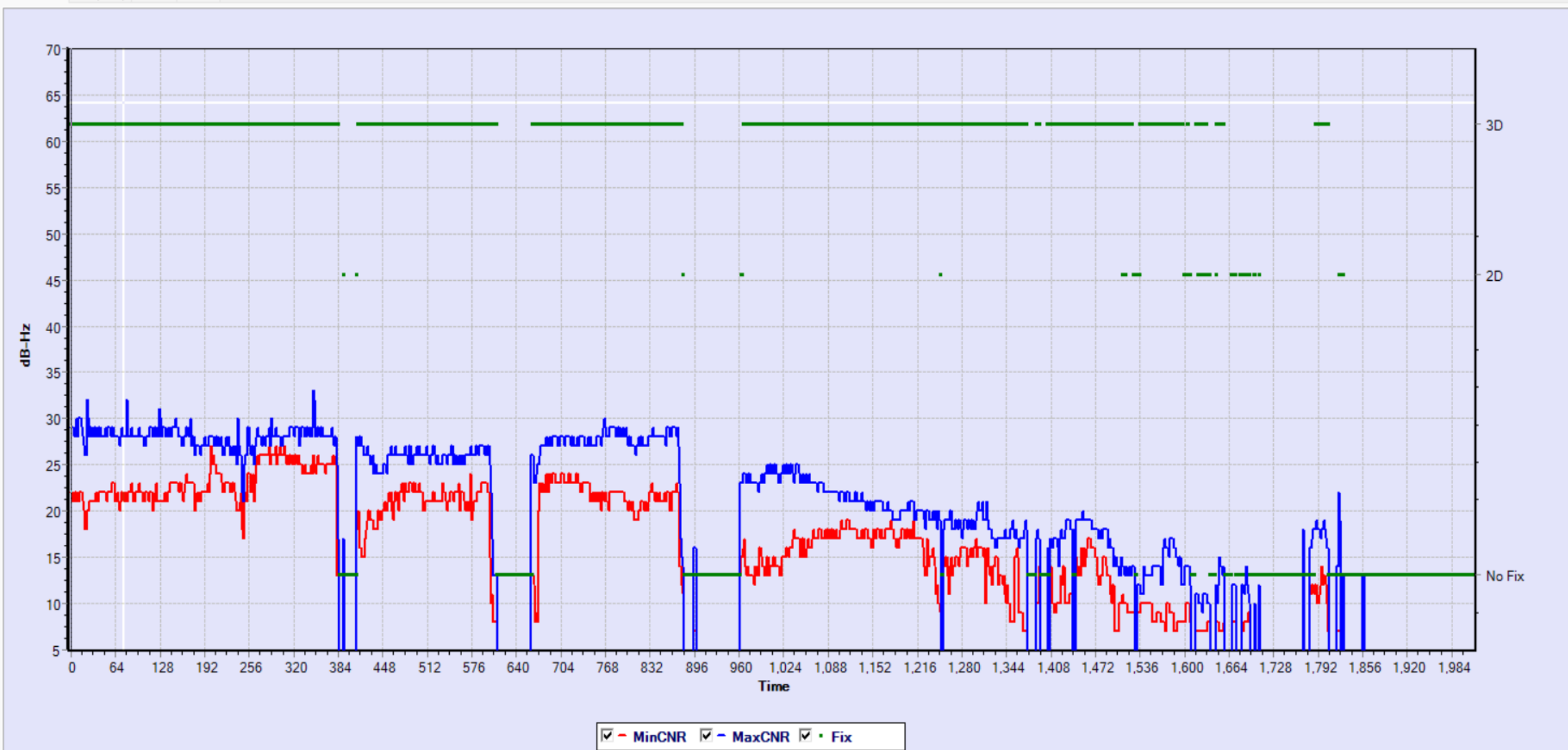
U-blox M8Mにて
CNRを測定する

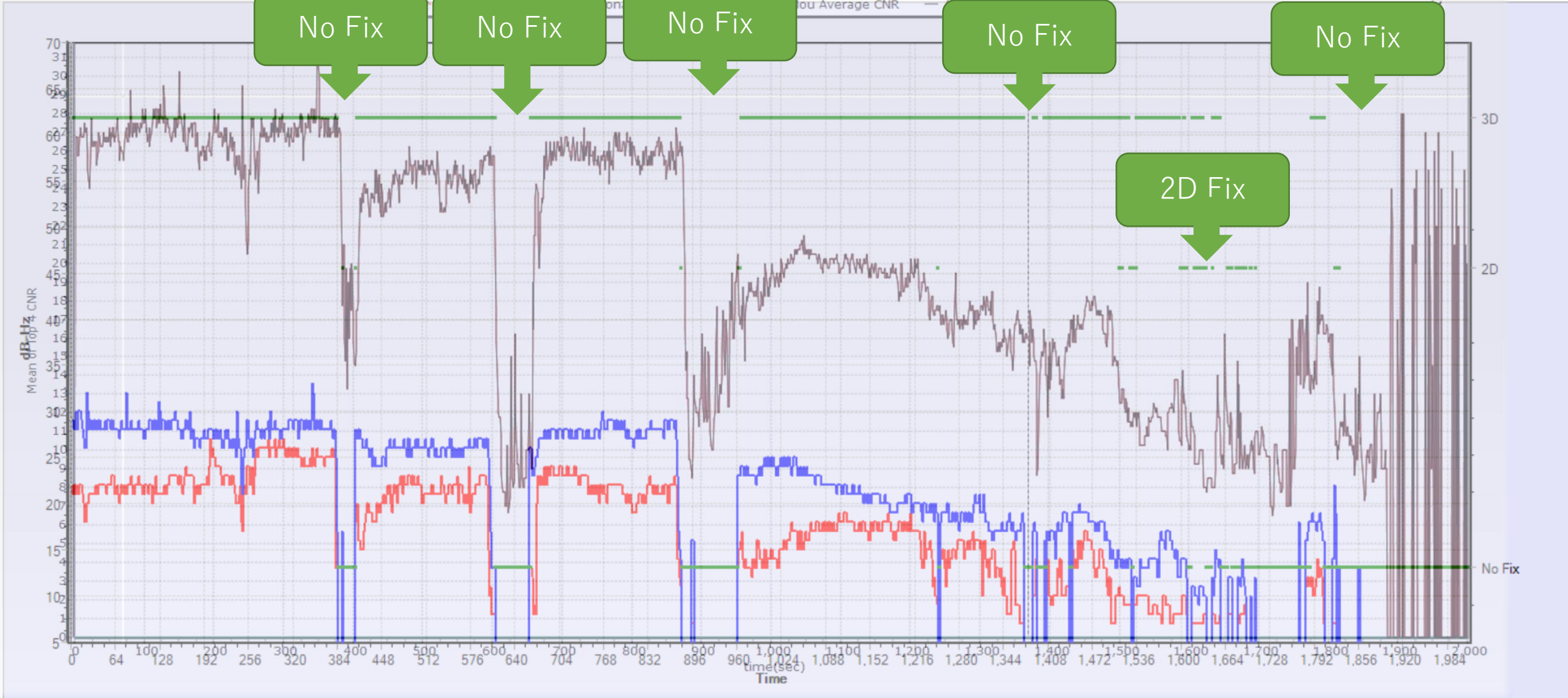
使用したソフト
Power GPS v3.0.0
秋月電子通商

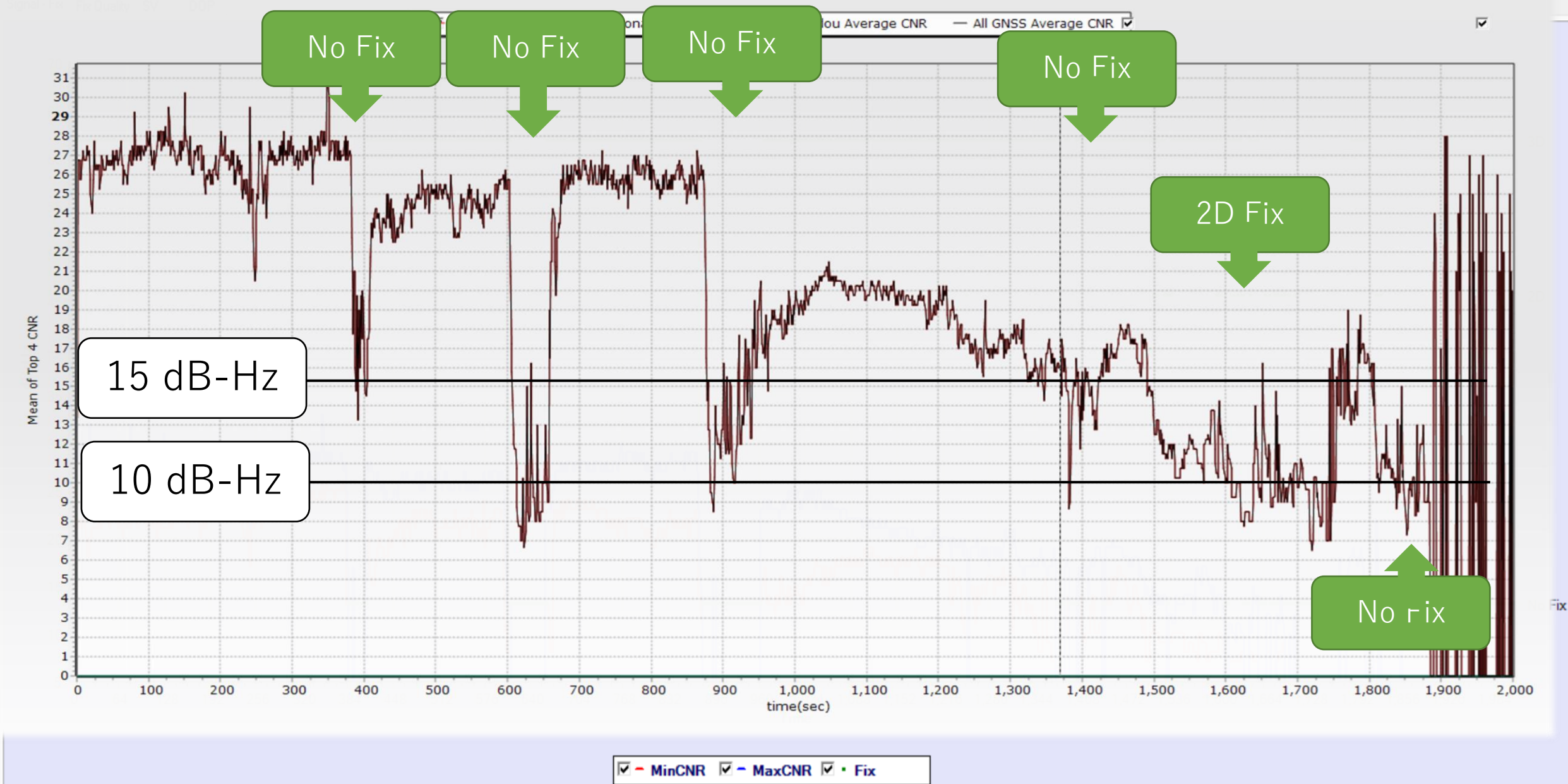


CNRの低下レベル：Mean of Top 4 CNR

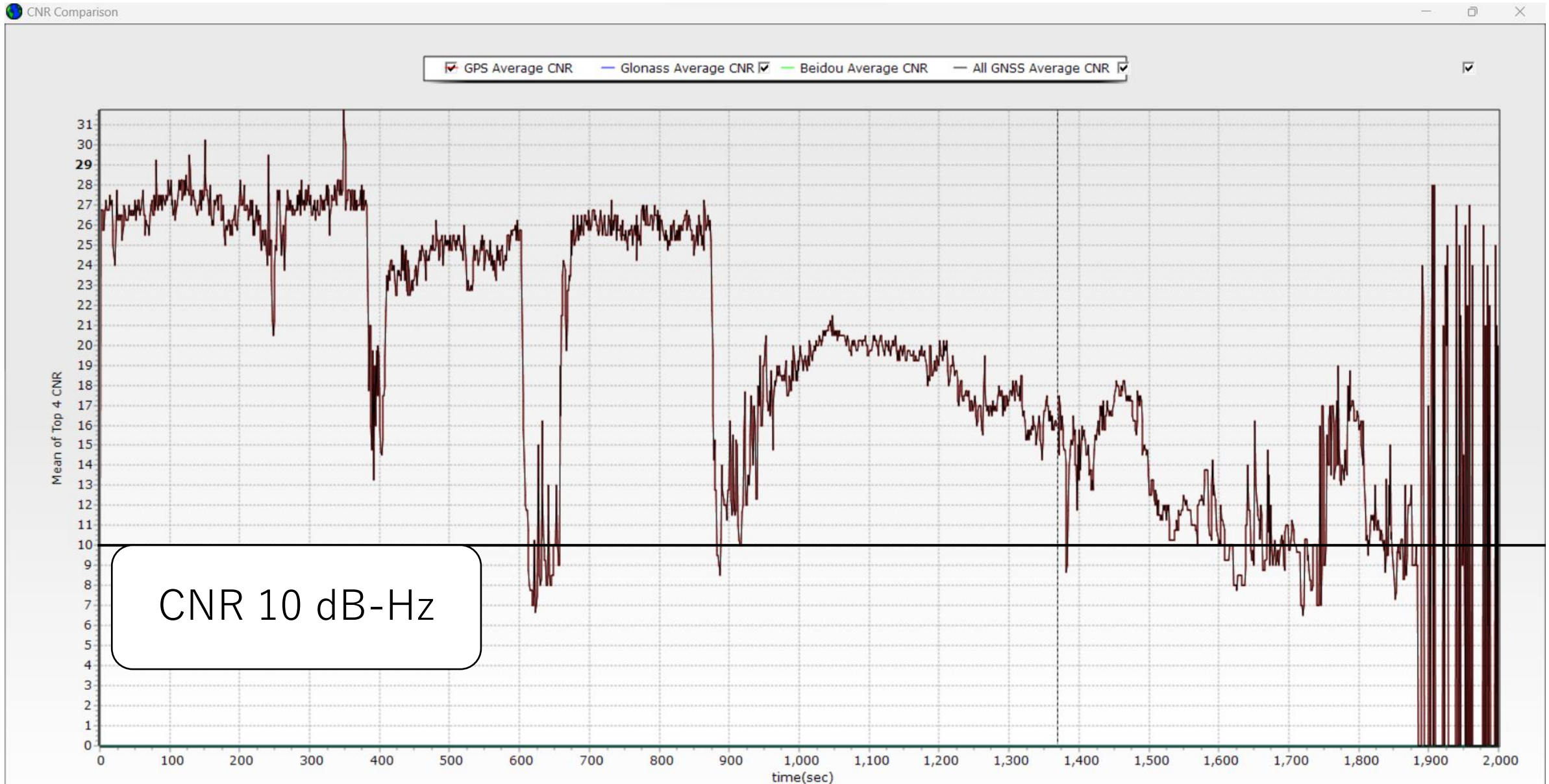








CNRの低下レベル：10dB-Hz以下でNoFix



船用GPSコンパスへの妨害結果

GPSシミュレータ（-60 d Bm）で有線接続により混合

- ① 3 D Fixが不可能となった
- ② 2 D Fixが継続した
- ③ 方位算出も継続した

ジャミング信号をヘリカルアンテナで送信

- ① 3 D・2 Dともに測位不可能となった
- ② 方位算出が不可能となった

妨害を受けても天頂方向の衛星はロストしにくいため

天頂方向に鋭い指向性がある受信アンテナがあるとよい

目次

背景

動機と目的

GPS信号発生器による試行

市販のジャマーによる試行

アンテナレベルによる軽減対策

SDRによる信号観測と軽減対策

まとめ

アンテナ製作の動機と狙い

1. アンテナを安価に入手したい
2. 既製品よりも鋭いビーム幅のアンテナがほしい

$$\text{ビーム幅（半値幅）} \simeq \frac{52 \lambda^{3/2}}{\pi D \sqrt{NS}}$$

λ : 波長 D : コイル直径 N : コイルの巻き数 S : コイル間の距離

出典：『円偏波アンテナの基礎』 福迫 武 著：コロナ社



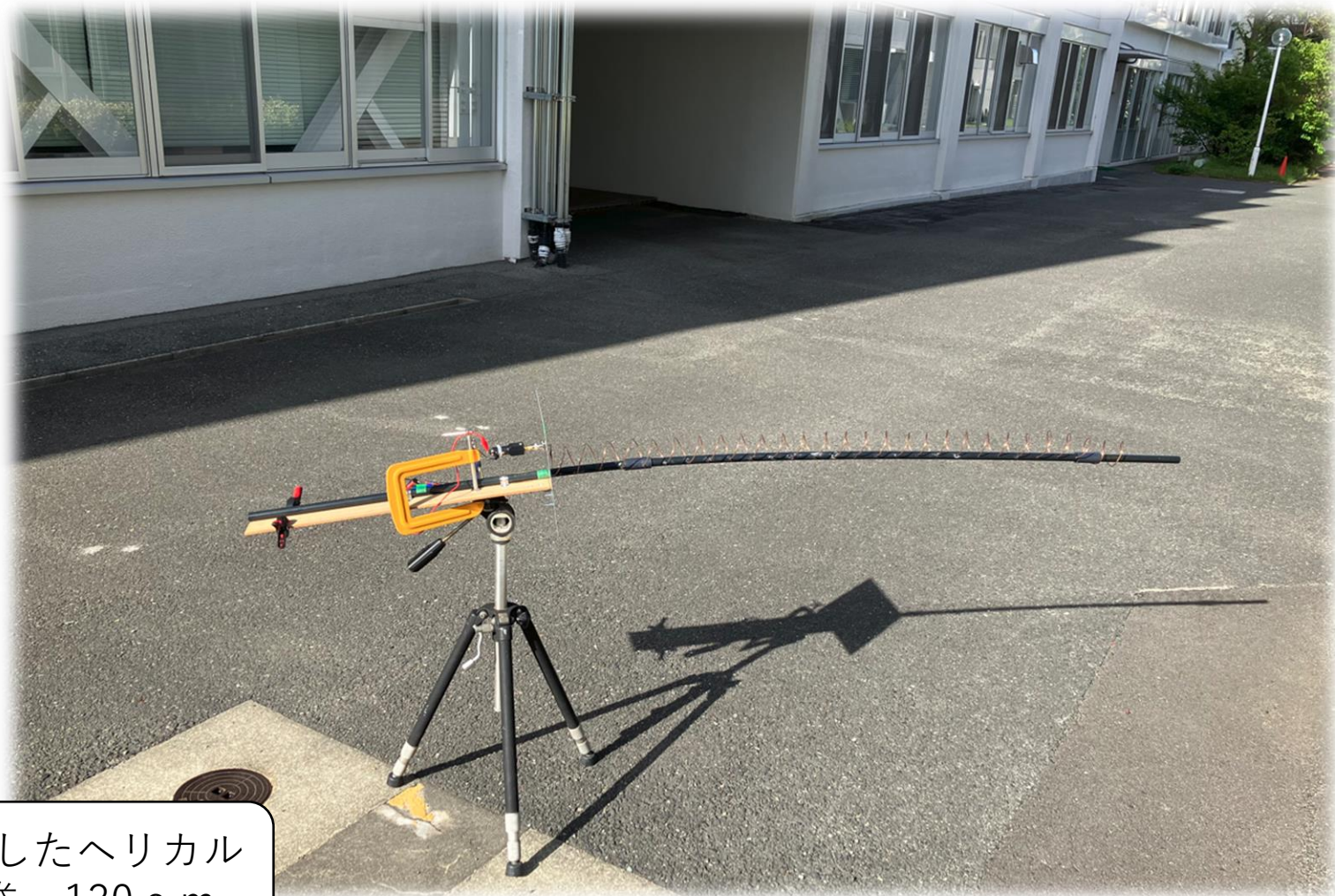
制作したアンテナの外観



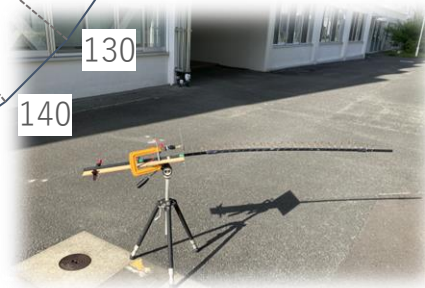
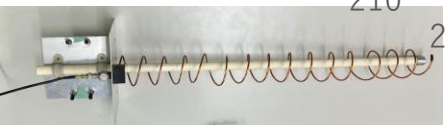
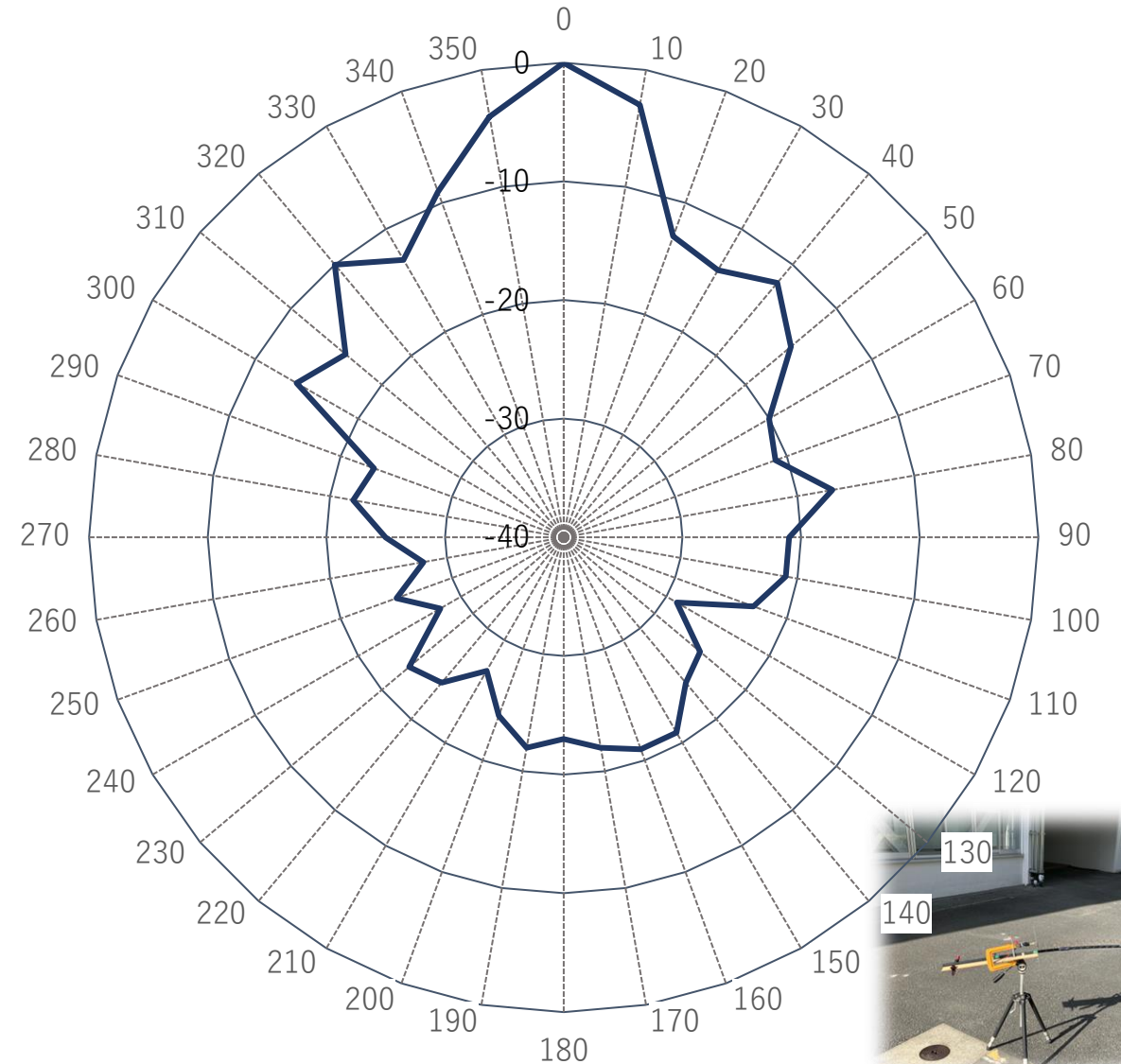
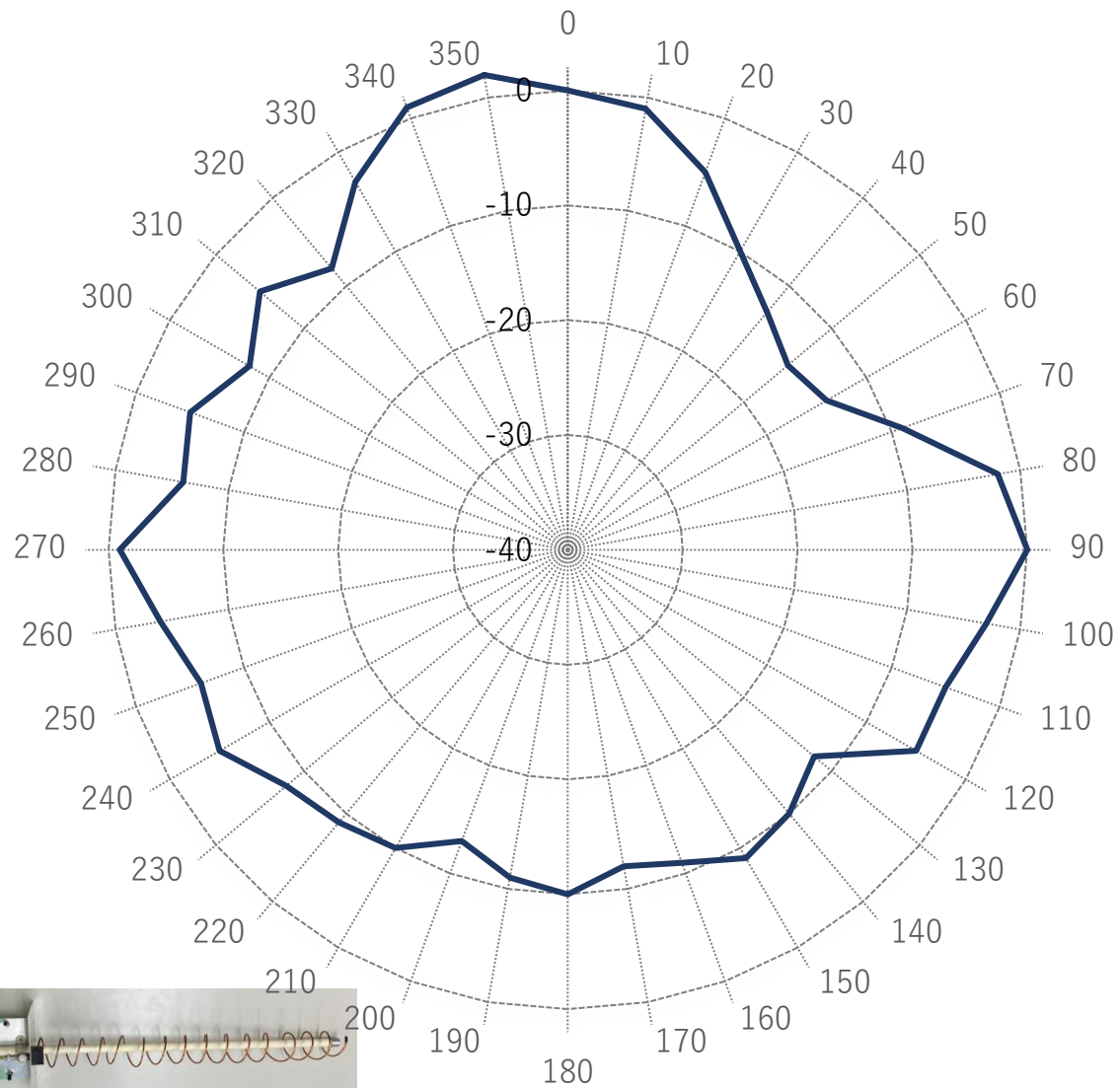
既存のヘリカル
15巻 70cm



製作したヘリカル
28巻 130cm



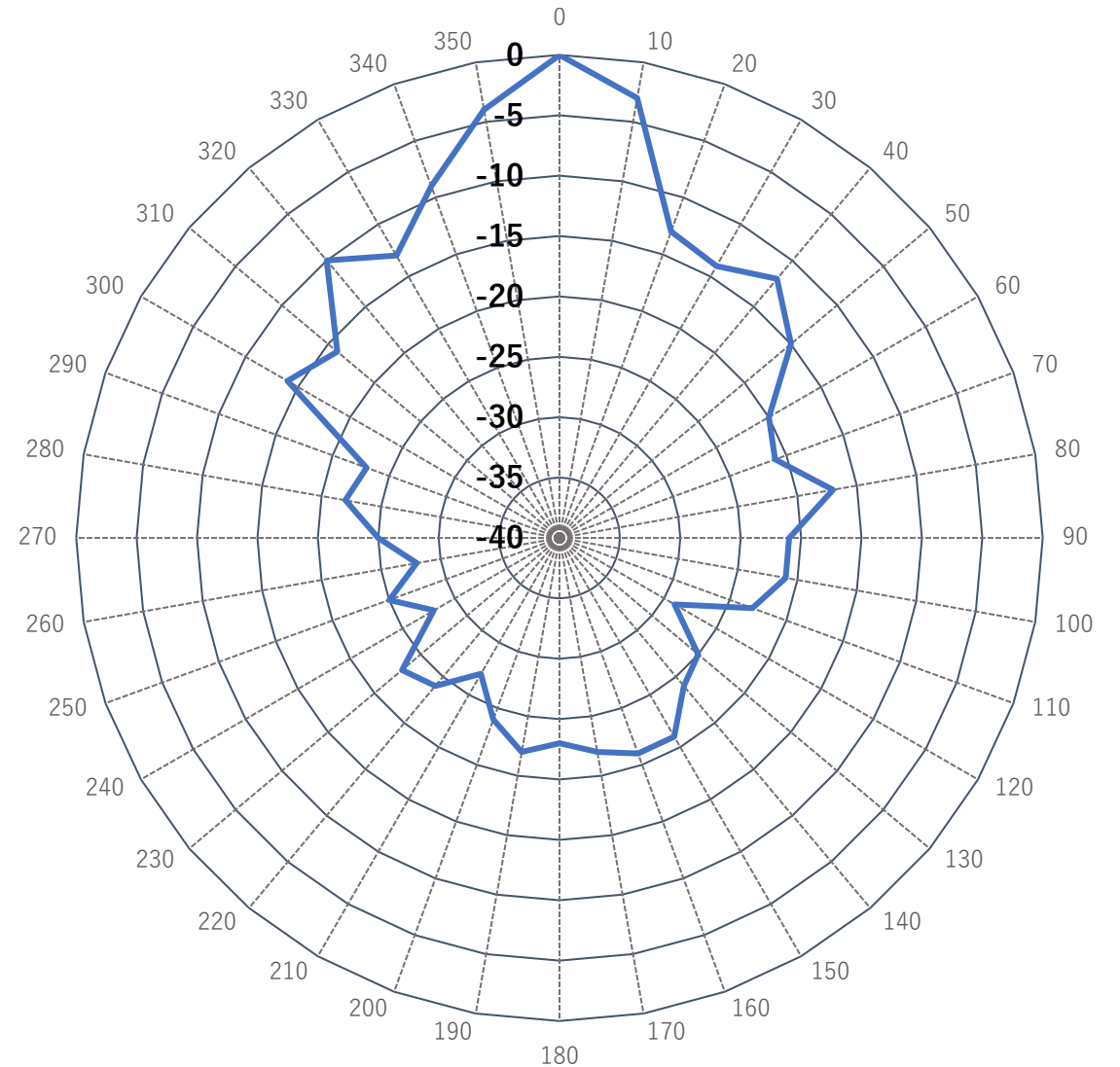
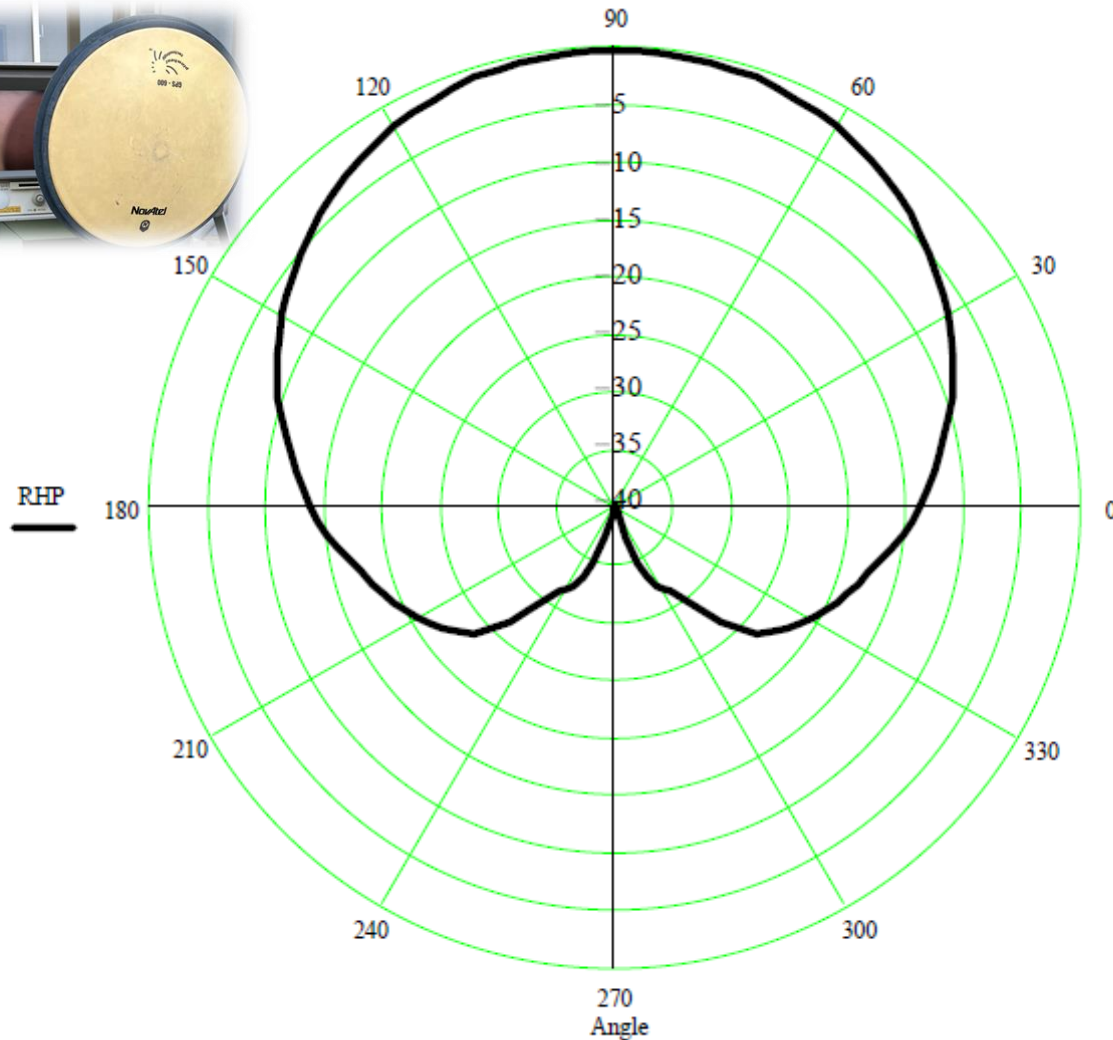
既存ヘリカルアンテナとの比較 (-40 dBレンジ)



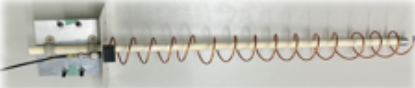
受信アンテナとのパターン比較 (-40 dBレンジ)

Novatel GPS-600

アンテナカタログより抜粋



ヘリカルアンテナ比較表（概算値）

	15巻70cmヘリカルアンテナ	28巻130cmヘリカルアンテナ
ビーム幅 (半値角)	40度	20度
第一ヌル点	45度	20度
FB比	-10dB	-23dB
SWR	3.2	2.2
アンテナ利得	5.0dBi	4.5dBi
市販ジャミング 接続時の消費電力	480mW	510mW
外観		

部材について

ヘリカルアンテナ作成

部材一覧

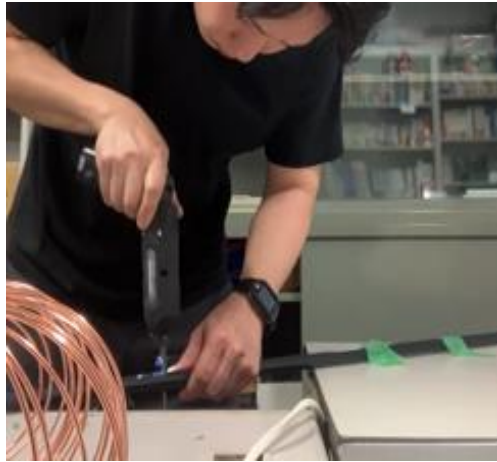
物品	寸法など	個数	価格	入手先
銅線	太さ2mm 5m	1	1980	モノタロウ
塩ビパイプ	1m	1	200	ホームセンター
塩ビパイプ継ぎ手		1	150	//
アルミ板	225*300	1	2980	//
L字金具		2	300	//
U字金具		2	300	//
BNCコネクタマウント		1	200	マルツパーツ
ビス		1式	600	//
ナット		1式	600	//
ノギス		1	980	//
板材	10cm×50cm	1	1500	//
接着剤		1	980	//
合計			10770	



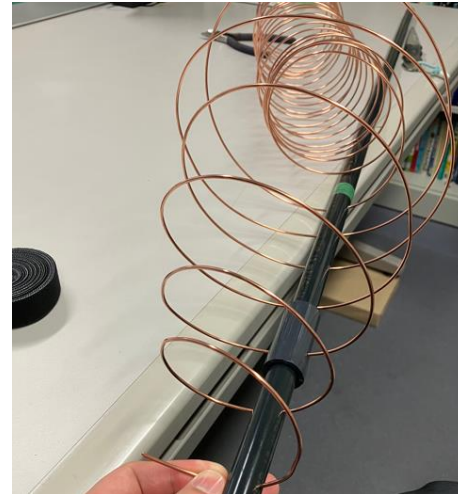
作成過程



寸法計測
印付け



パイプ穴あけ
加工

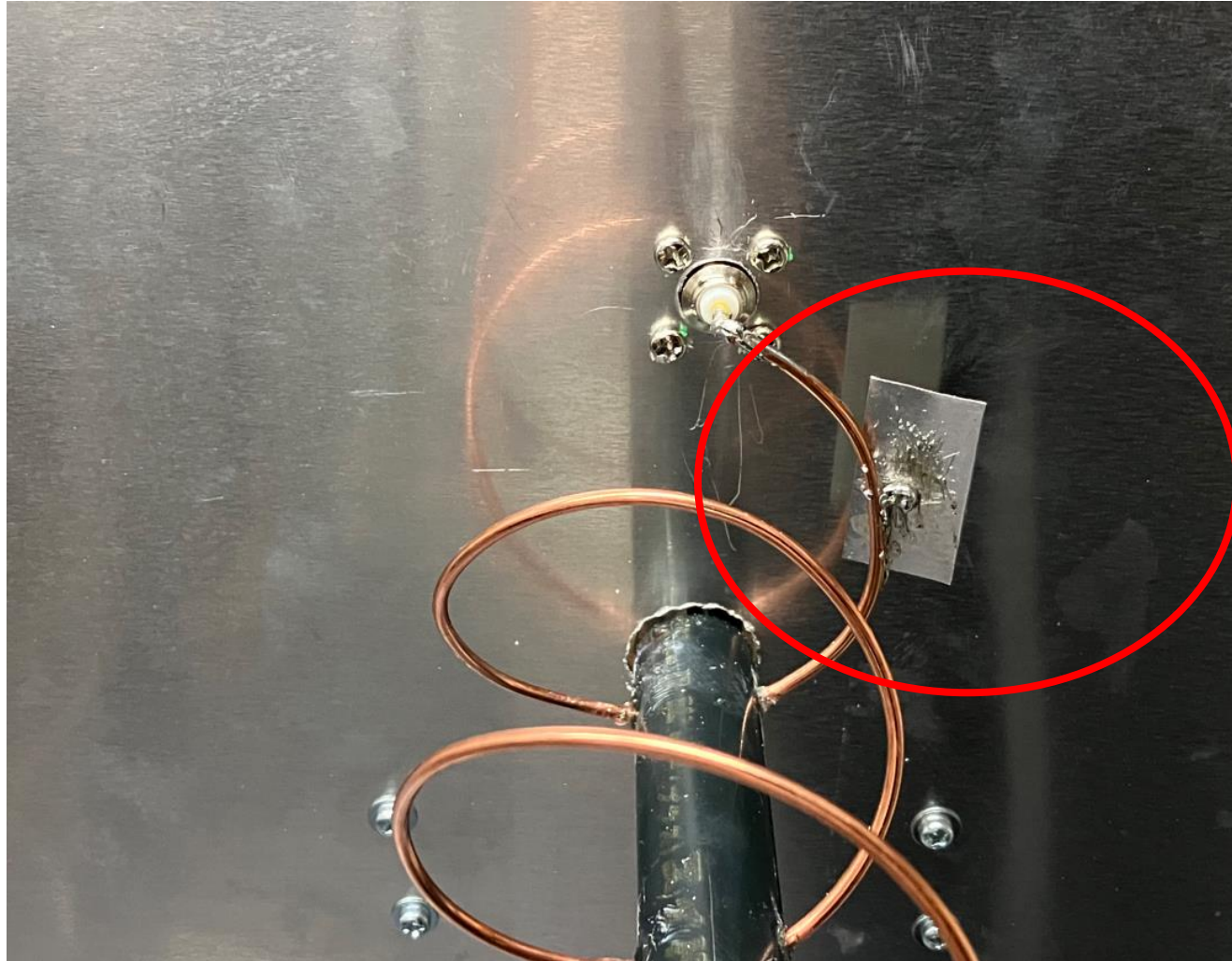


銅線を通す
コイル成形

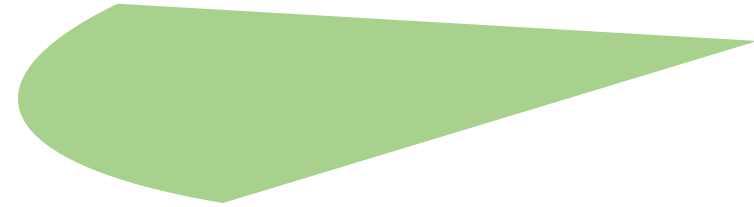
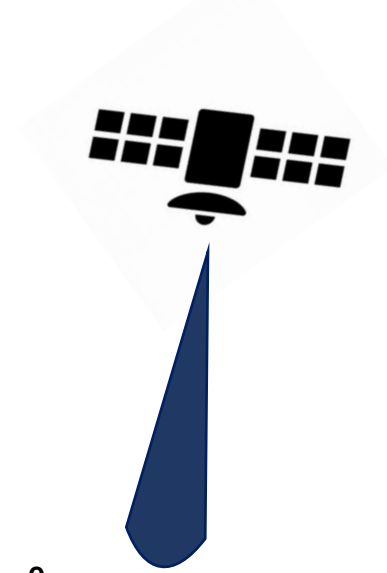
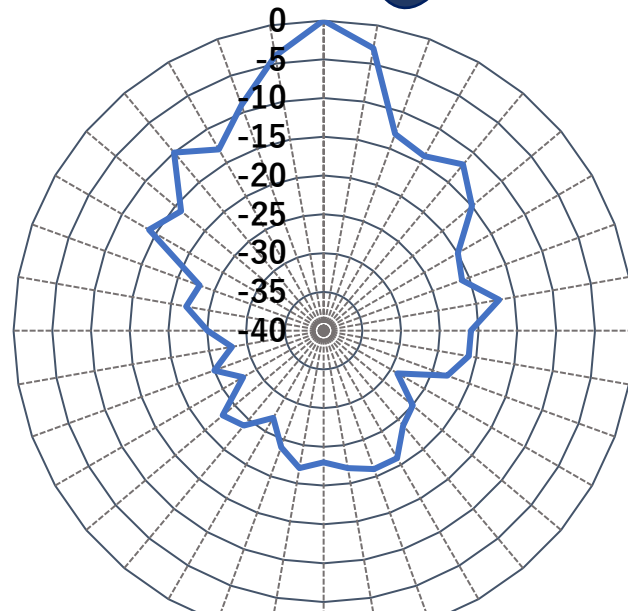


コネクタ部分
の接合

インピーダンス整合のための
キャパシタンスを持たせる工夫



指向性アンテナで妨害波を軽減したい



アンテナ改善のために

コイルを15巻から28巻に増やしても
アンテナ利得があまり向上しない
コイルの不整形が原因か

ビーム幅の向上は巻き数の増加と
GNDプレーンの面積を大きくしたことも
貢献したか

アンテナが弓形にになる問題は
支持棒を強化することで改善できるか

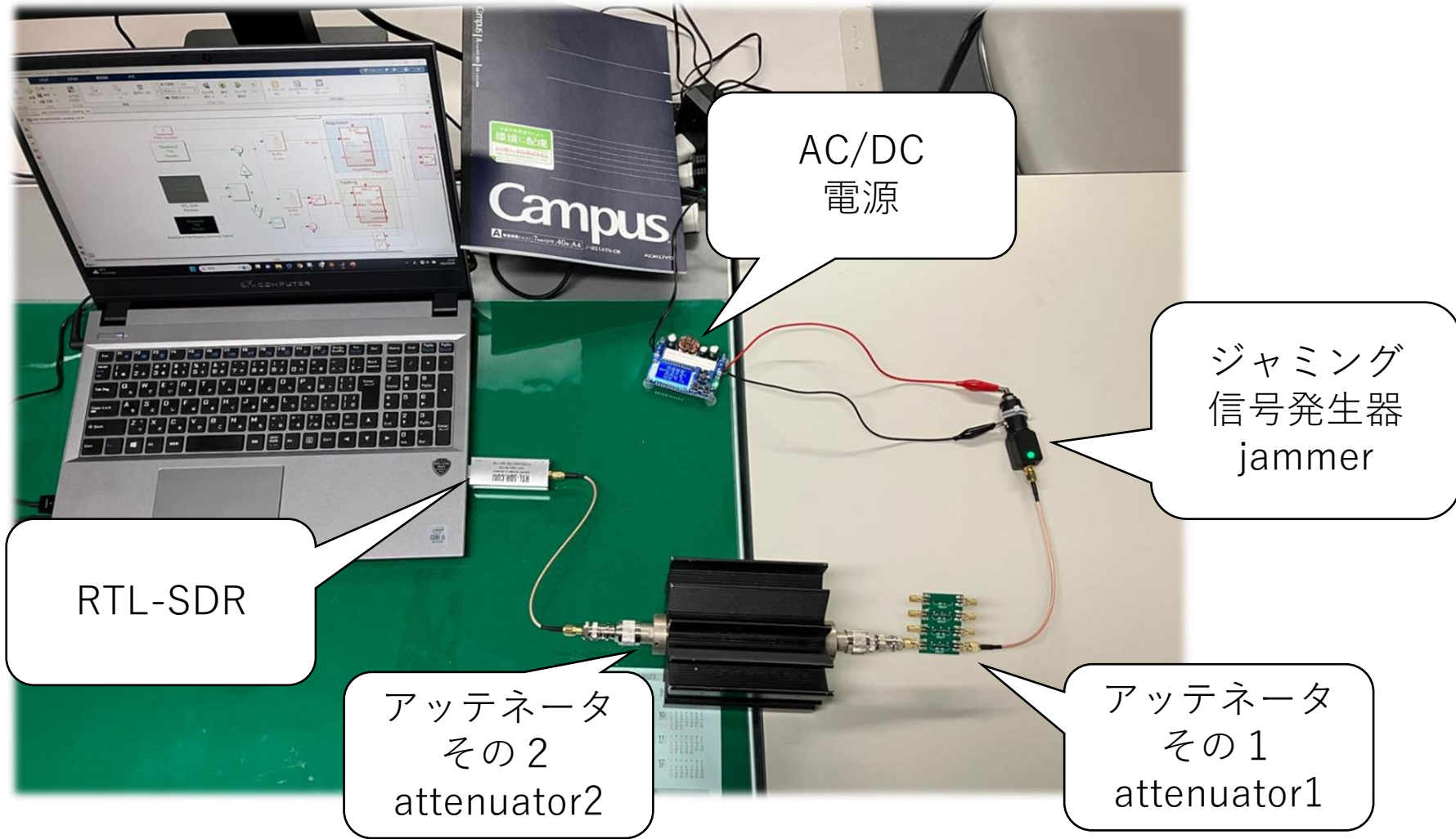


目次

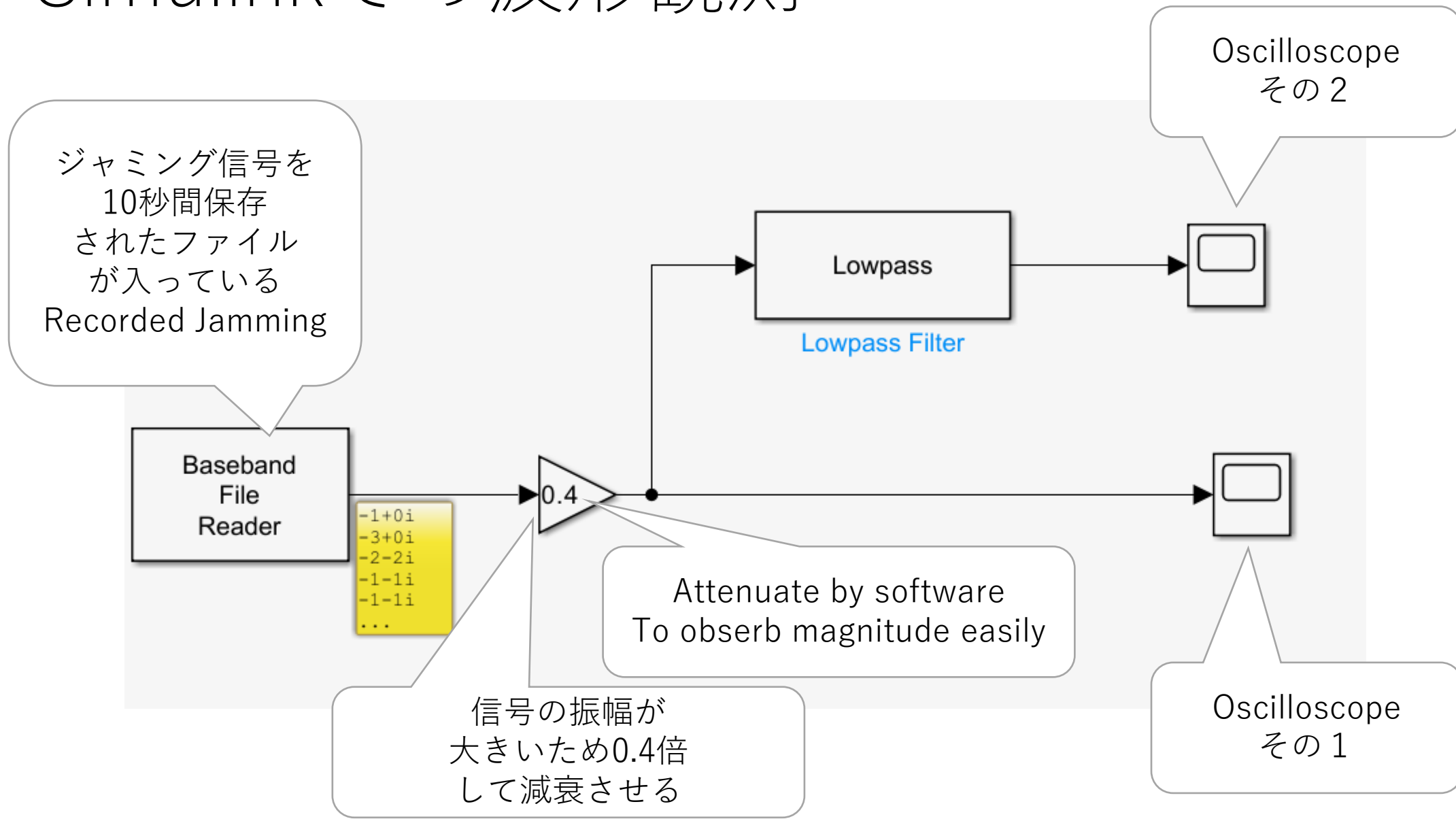
- 背景
- 動機と目的
- GPS信号発生器による試行
- 市販のジャマーによる試行
- アンテナレベルによる軽減対策
- **SDRによる信号観測と軽減対策**
- まとめ

妨害波を観測し特徴を把握

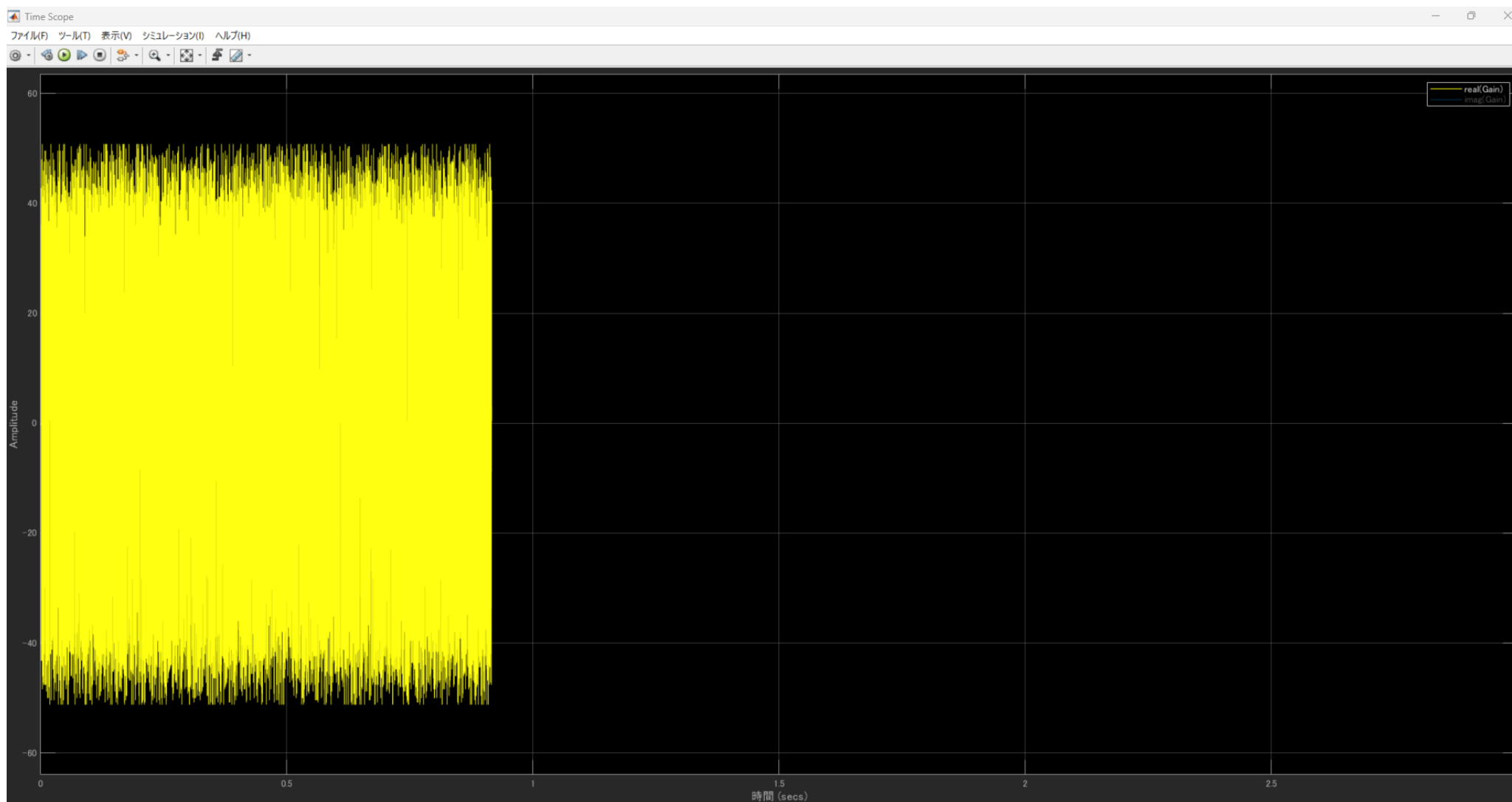
ジャミング信号をSDRで受信してログファイルとして保存



Simulinkでの波形観測



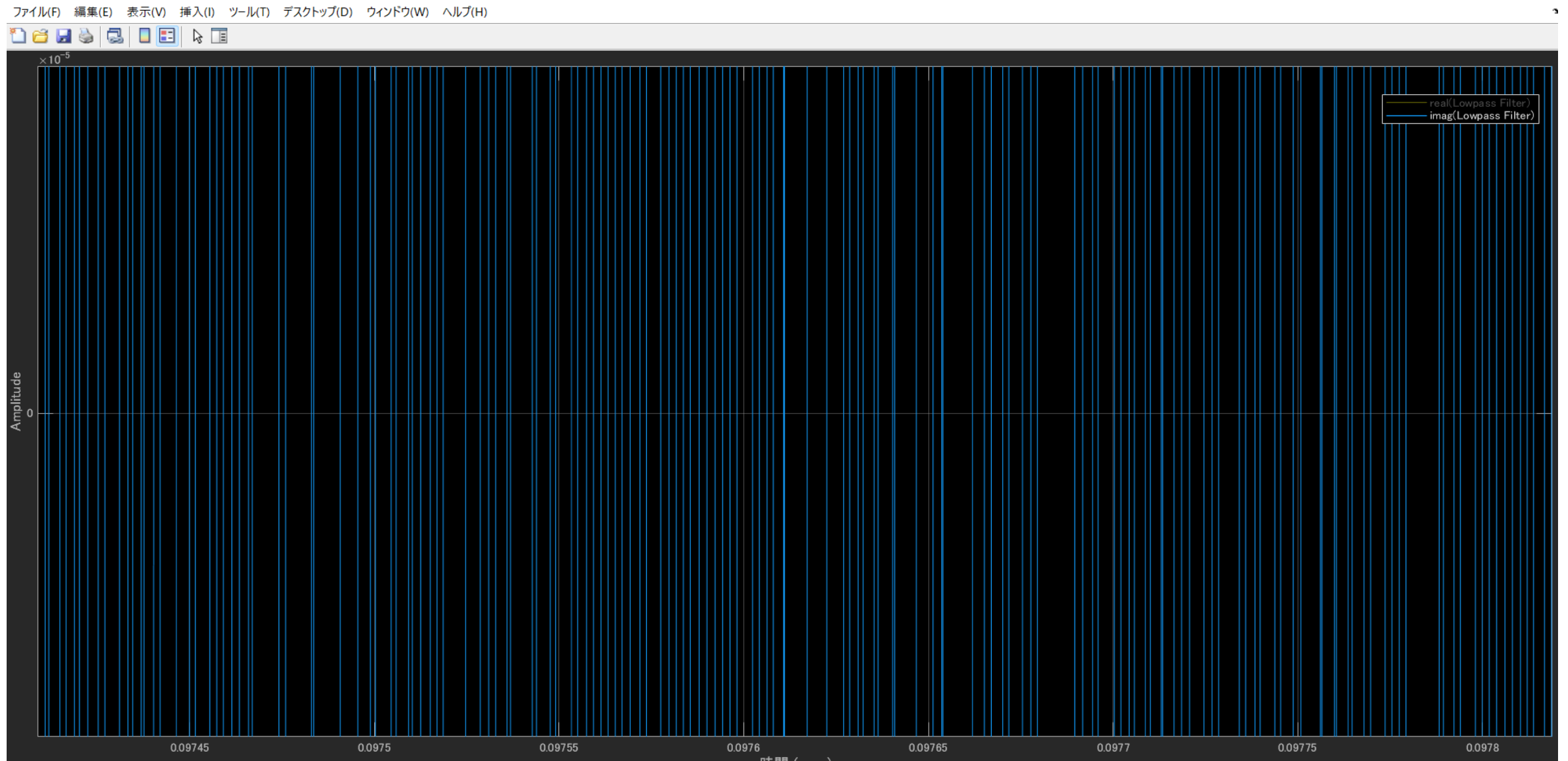
Oscilloscope その 1



一時停止

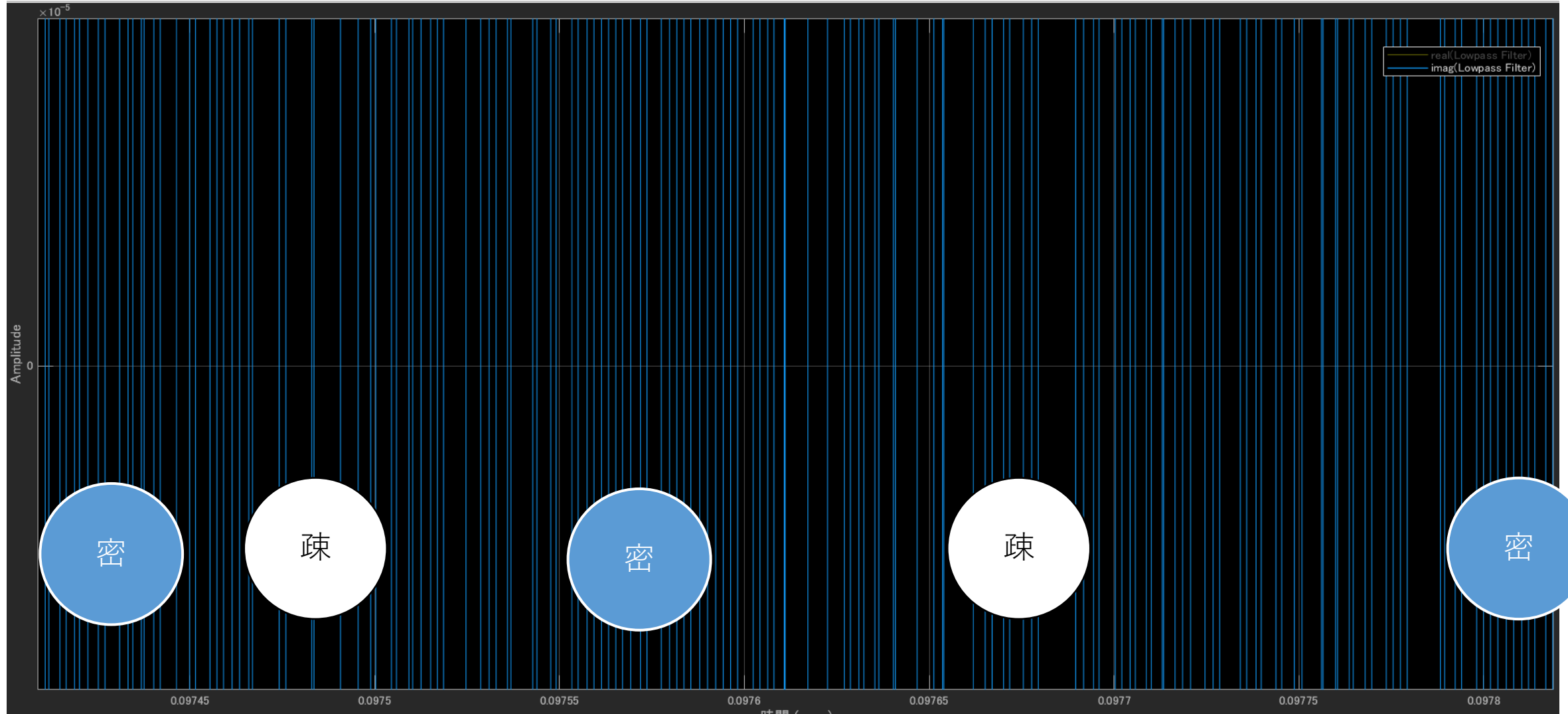
フレームベース T=0.916

オシロスコープその2 (拡大)



チャープ信号のように見えるが
周期・パターンがわからない

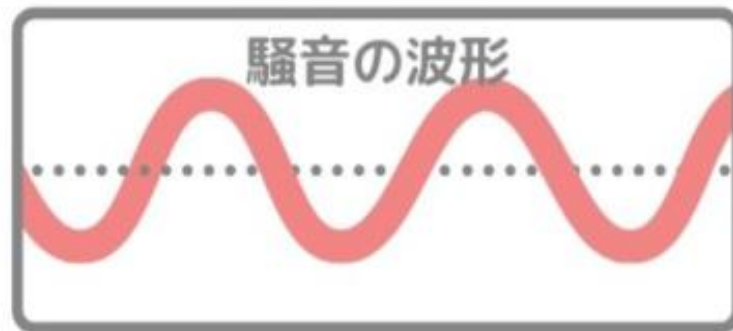
ファイル(F) 編集(E) 表示(V) 挿入(I) ツール(T) デスクトップ(D) ウィンドウ(W) ヘルプ(H)



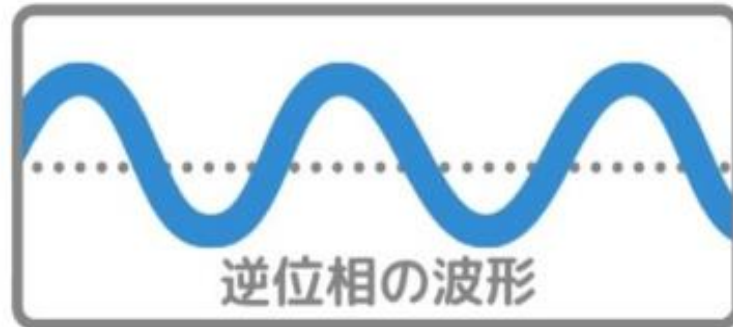
ジャミング信号だけを消せないか

ノイズキャンセルの仕組みと同様のことを試す
a concept of Noise cancellation

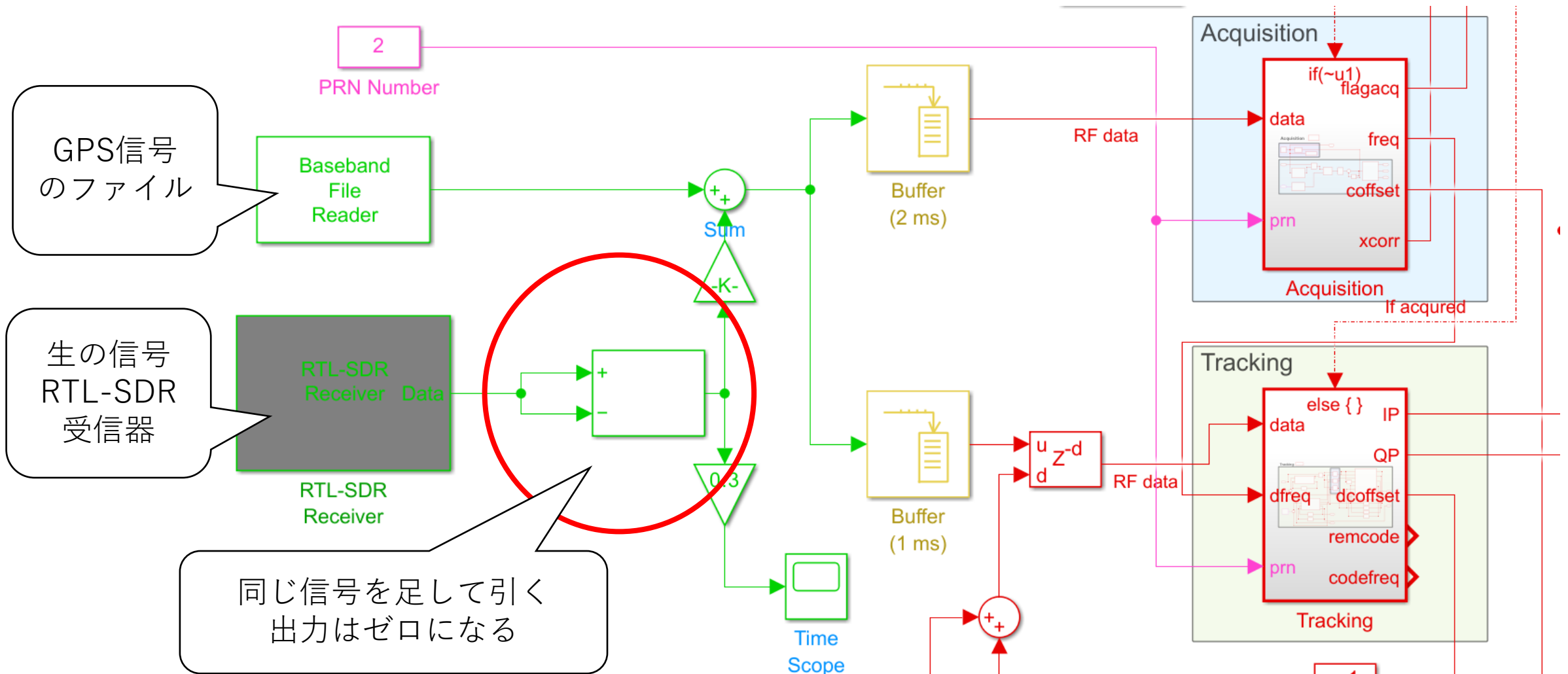
ジャミング信号

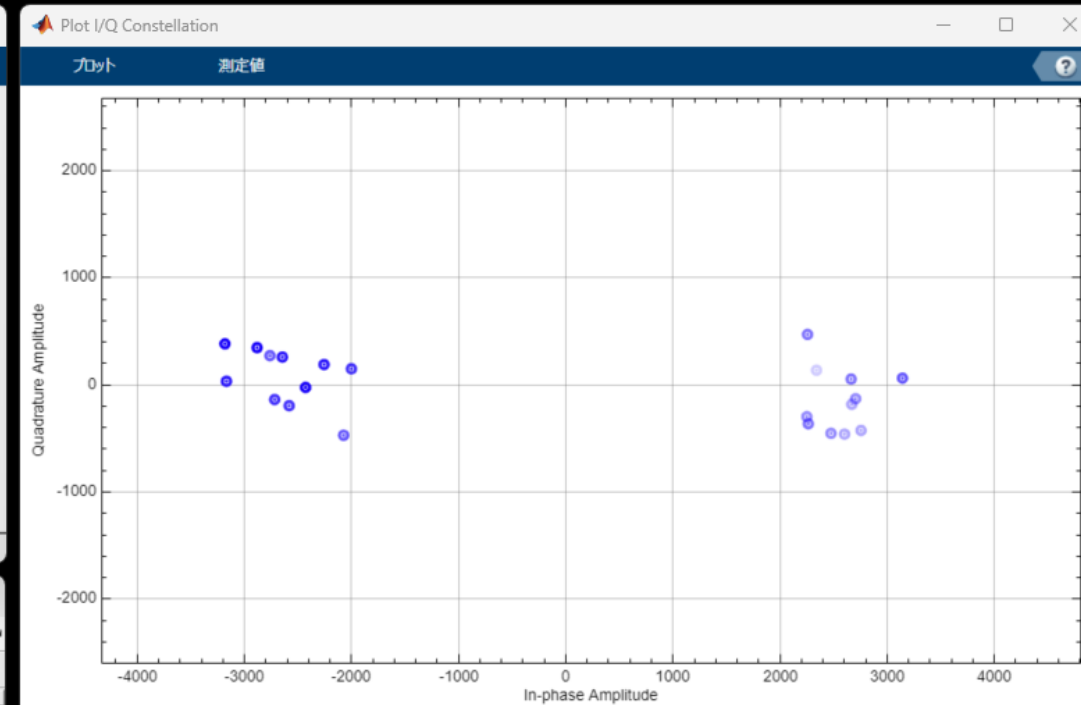
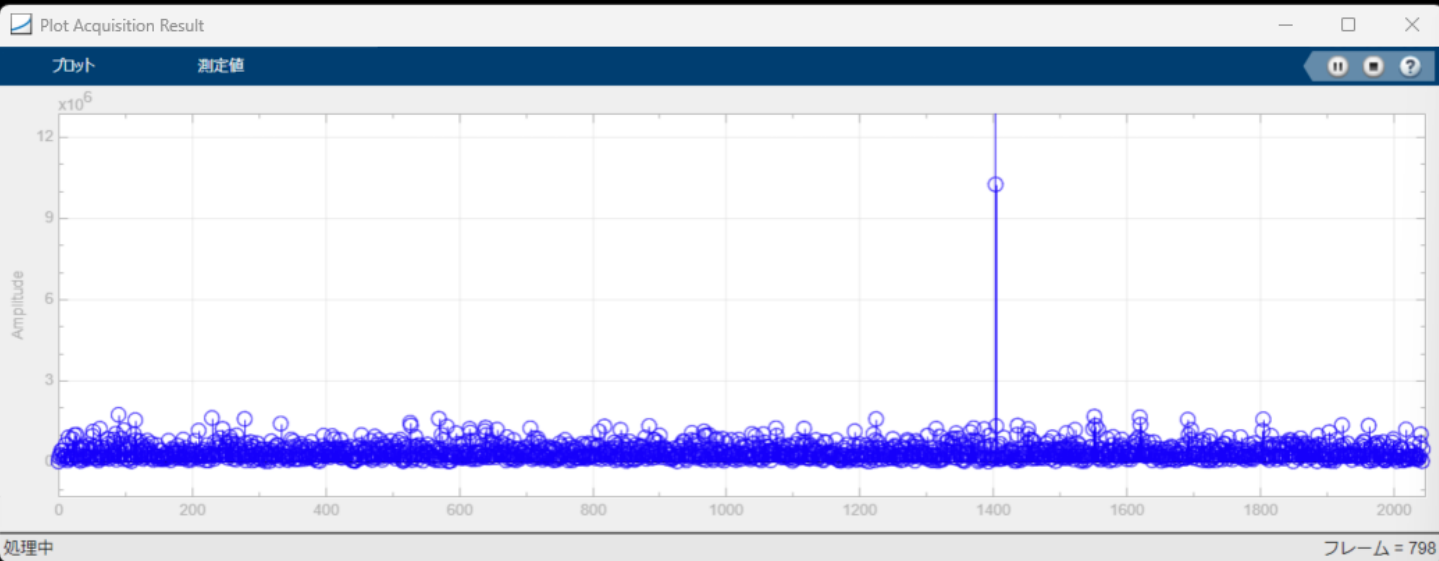


逆位相の
ジャミング信号

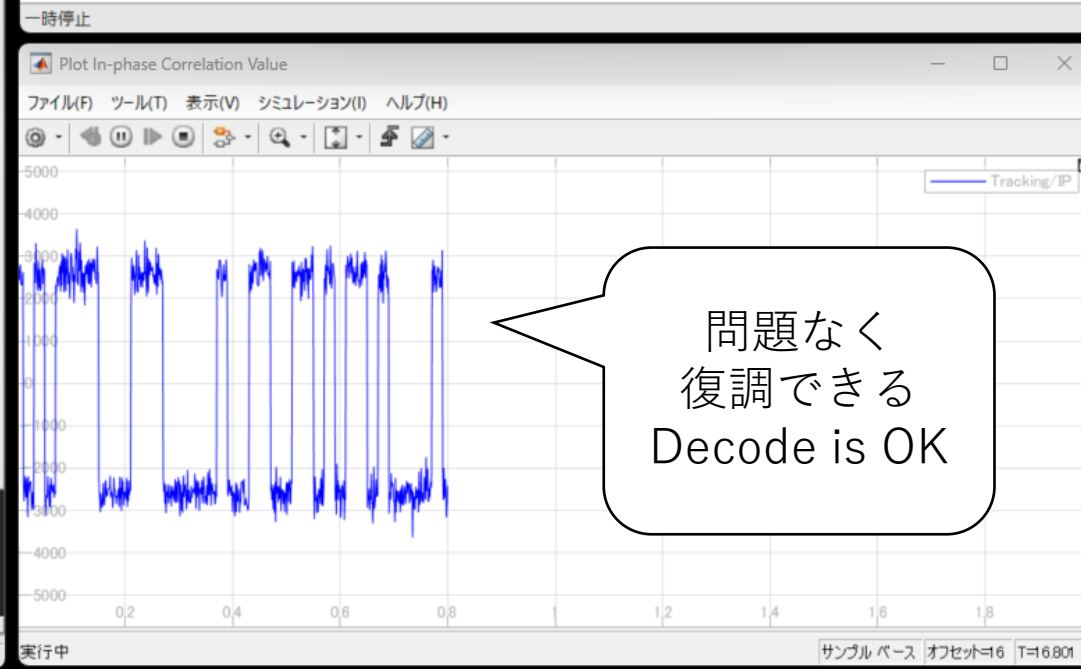


相殺が発生するか確認する (proof of concept on Matlab-Simulink)



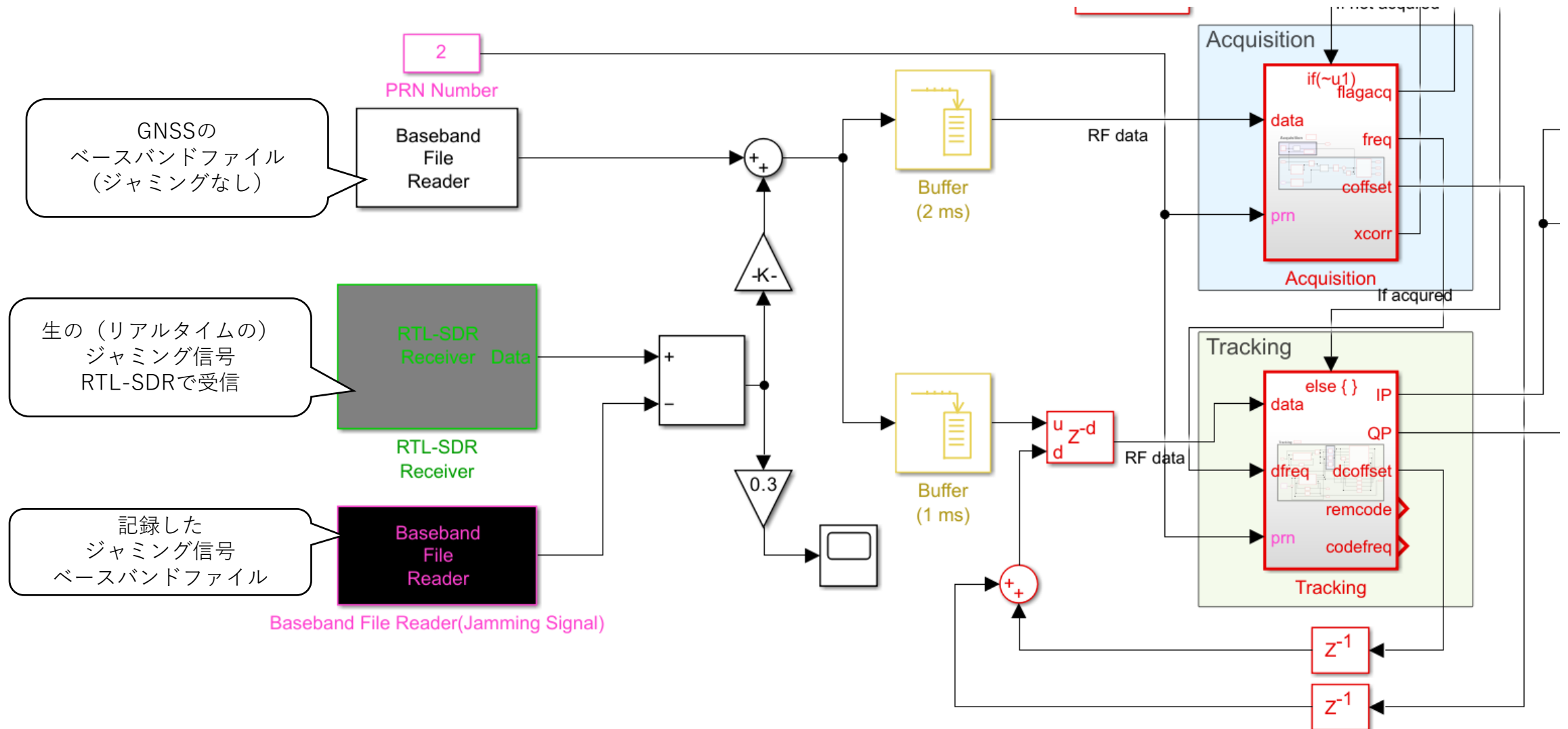


ジャミングは相殺されて出力はゼロ
Jamming is Zero

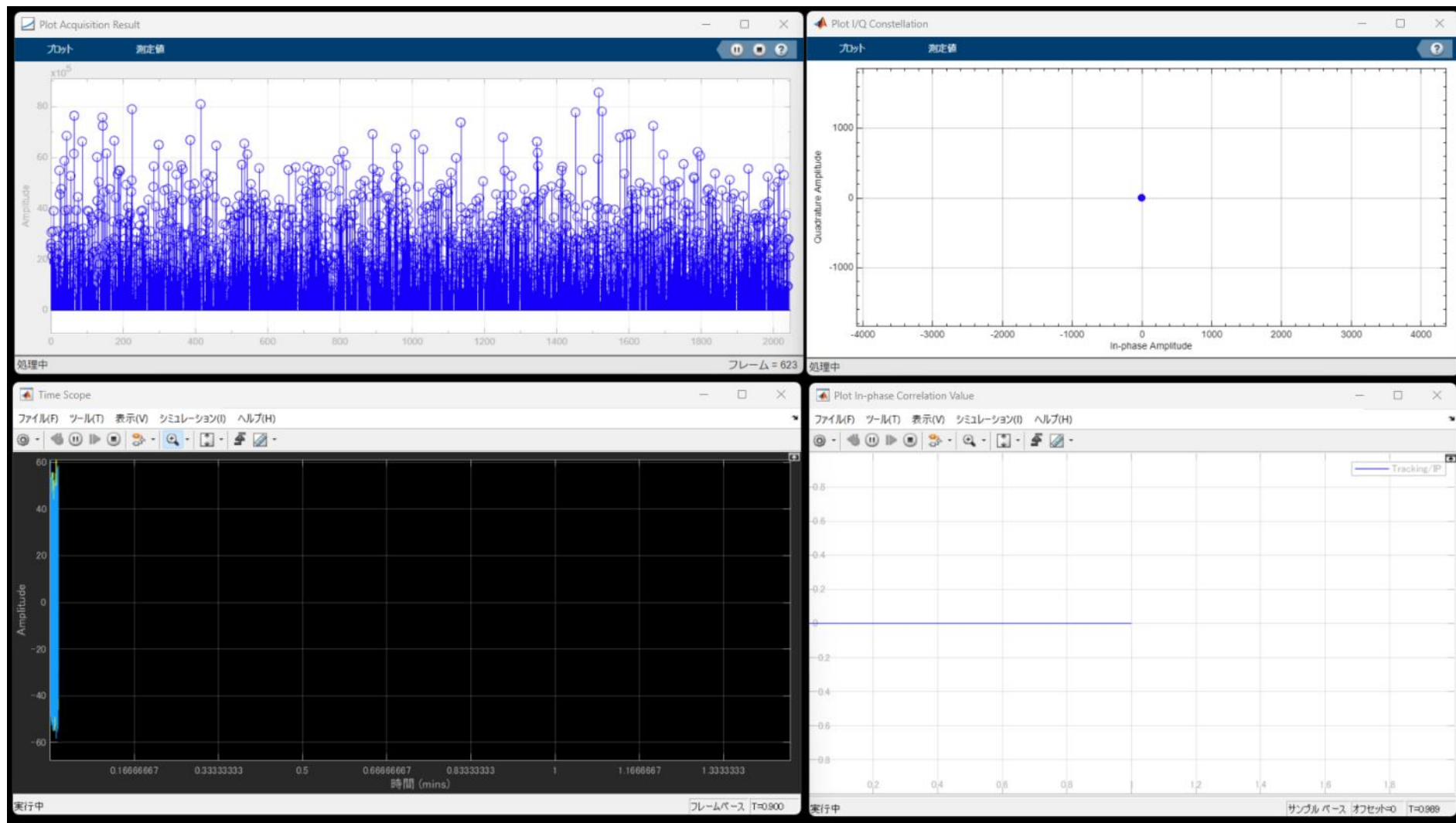


問題なく
復調できる
Decode is OK

生のジャミング信号から別のジャミングを引き算する
→位相が合えば相殺されるはずだという仮説を
MATLAB (Simulink) 上で試す

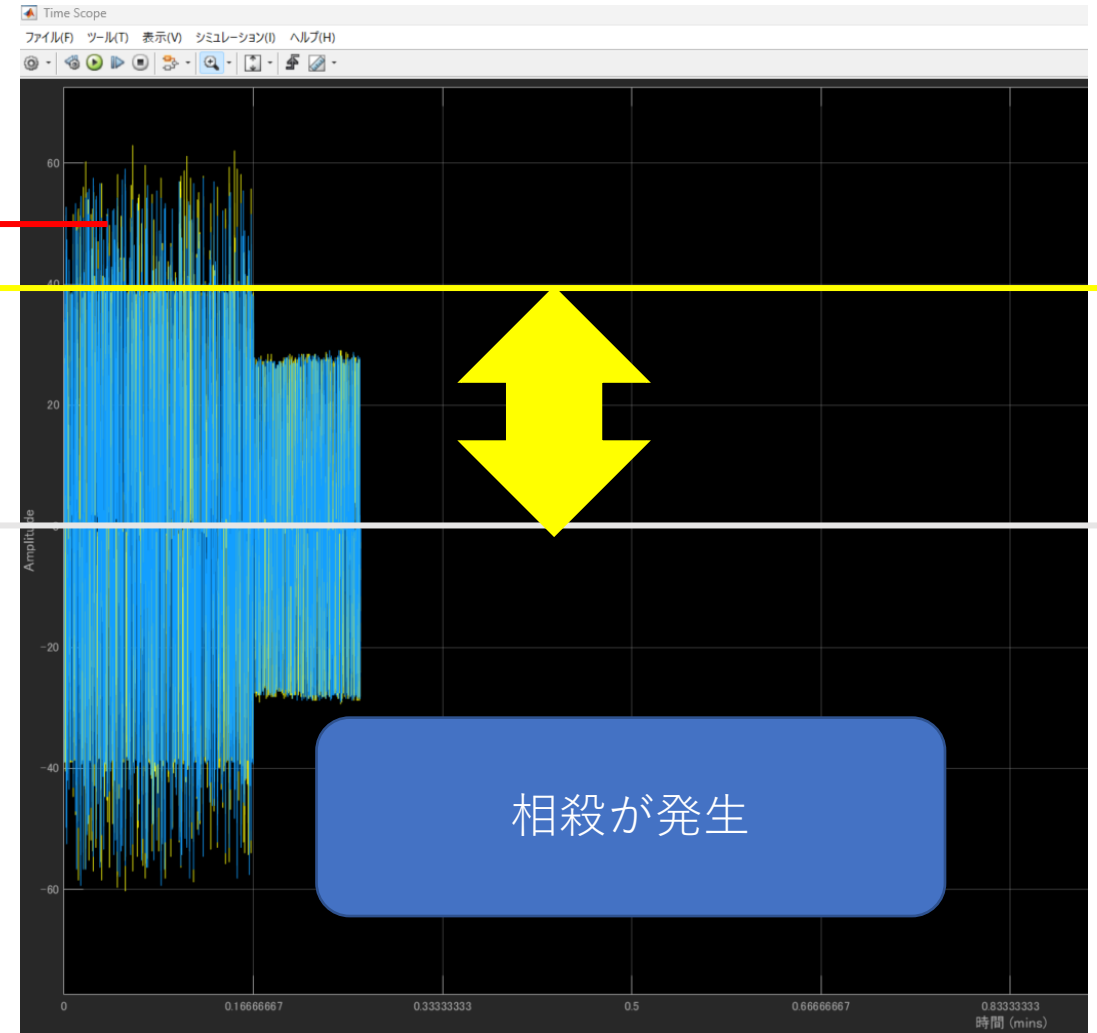


結果は失敗：Concept failed
ジャミング信号は相殺されない





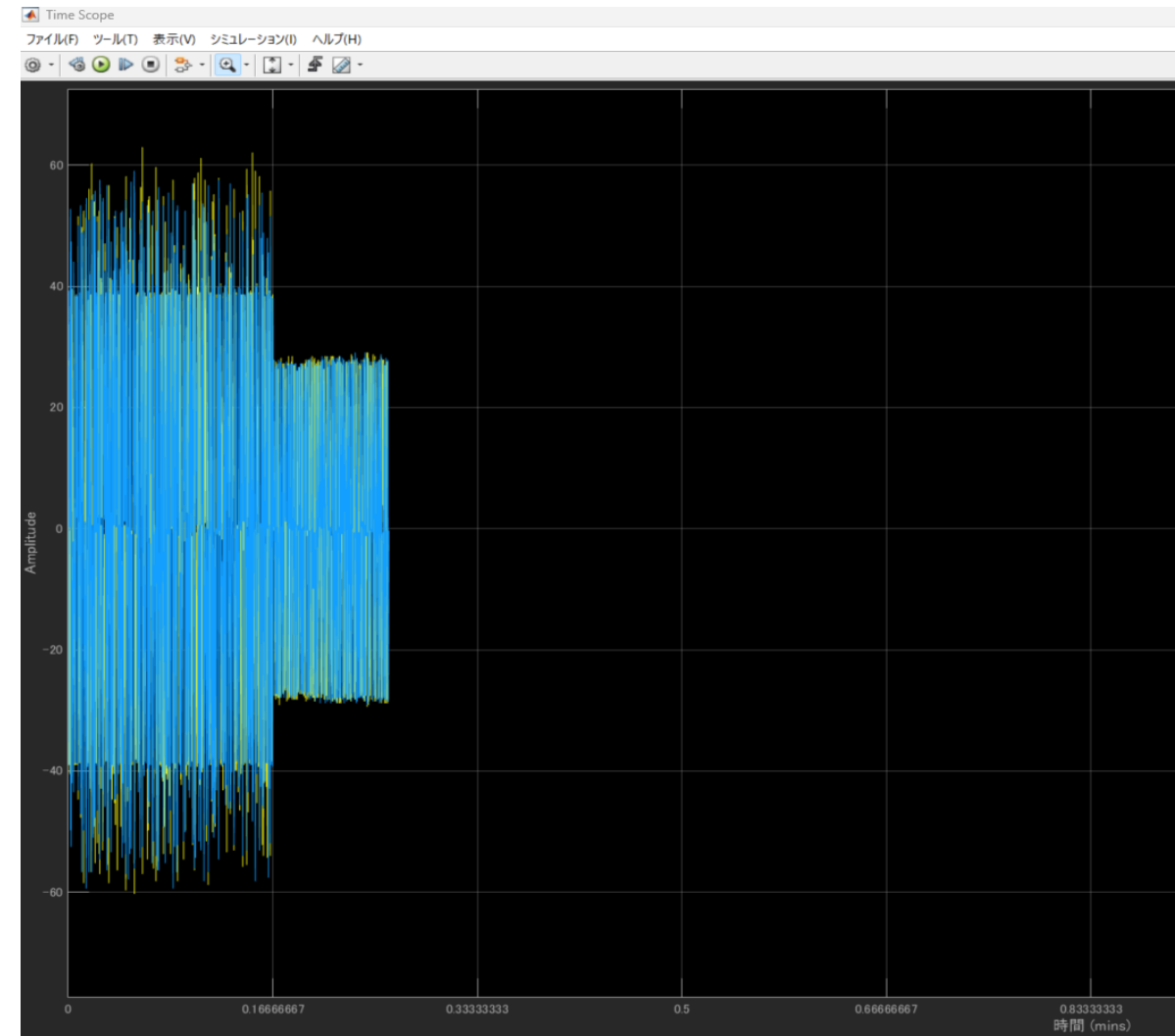
複数回試す中で合成信号が弱まるときがあった
タイミングがあえば相殺されジャミングが減衰される場合がある
(sometime offset is occurred by subtracting same jamming signal)



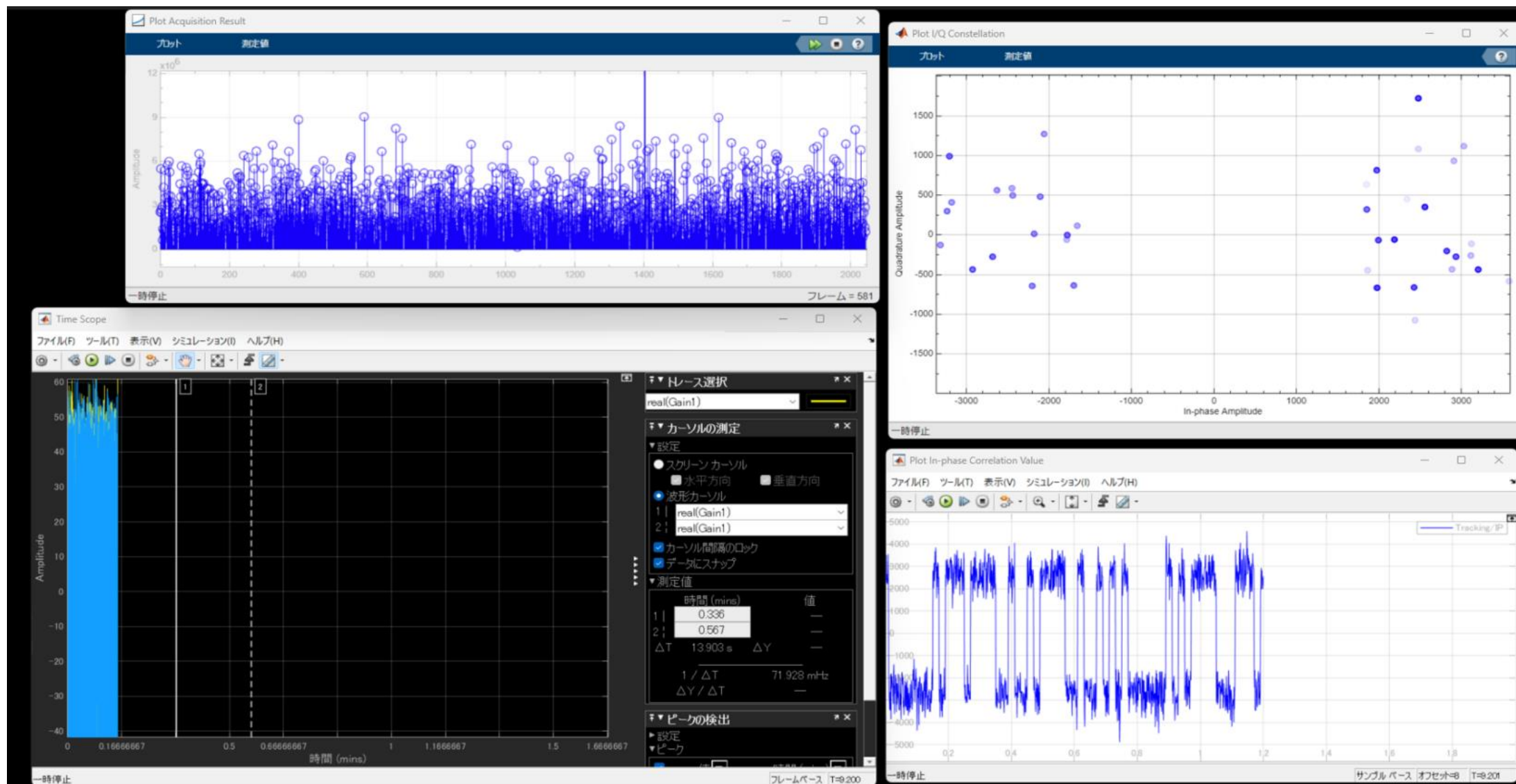
相殺が発生するかどうかは
合成開始時のタイミングが合うかどうか
If I am lucky enough to get the timing right, it will happen.

位相が完全にあえば
相殺されるて
振幅はゼロとなるはず
→ 50回くらい試すも発生しなかった

位相が180度ズレれば
加算され
振幅は元の2倍になる
→発生しなかった

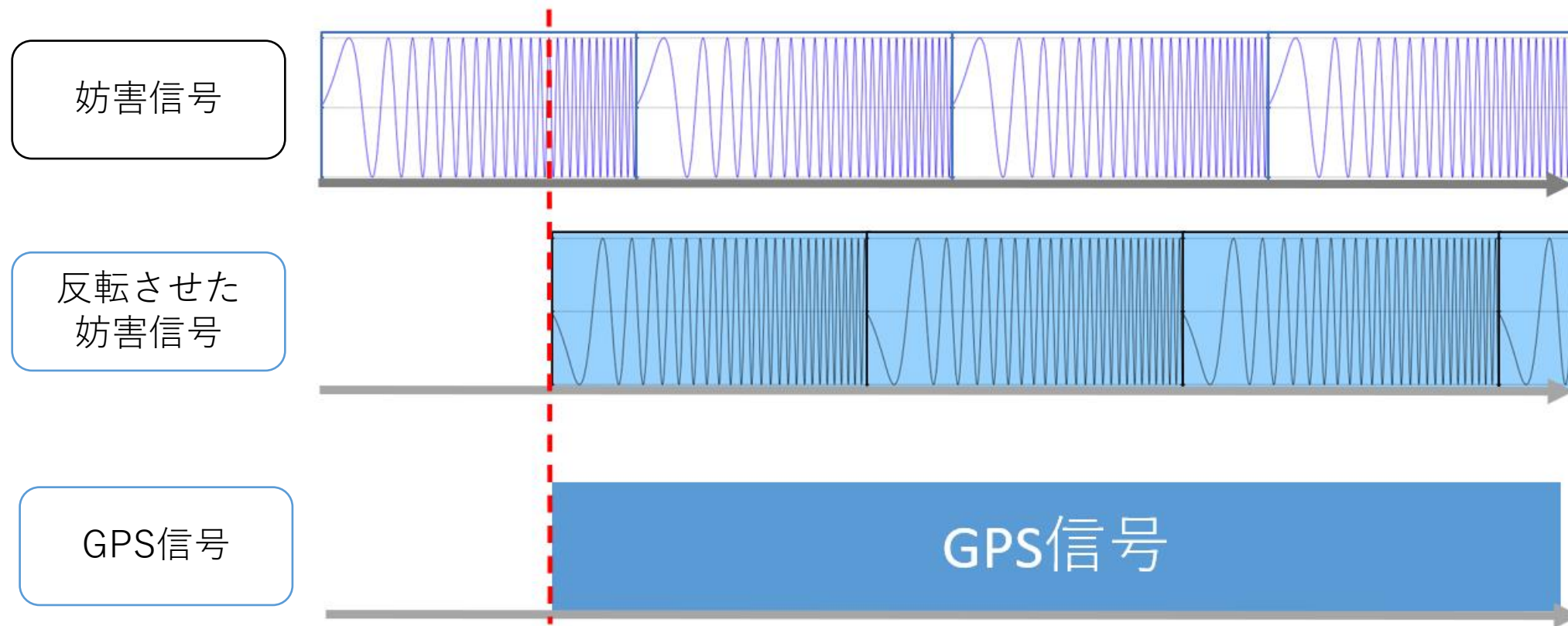


弱めあい起きるとデコードできる場合もあった
On the rare occasion that a compromise occurs, it can be decoded.



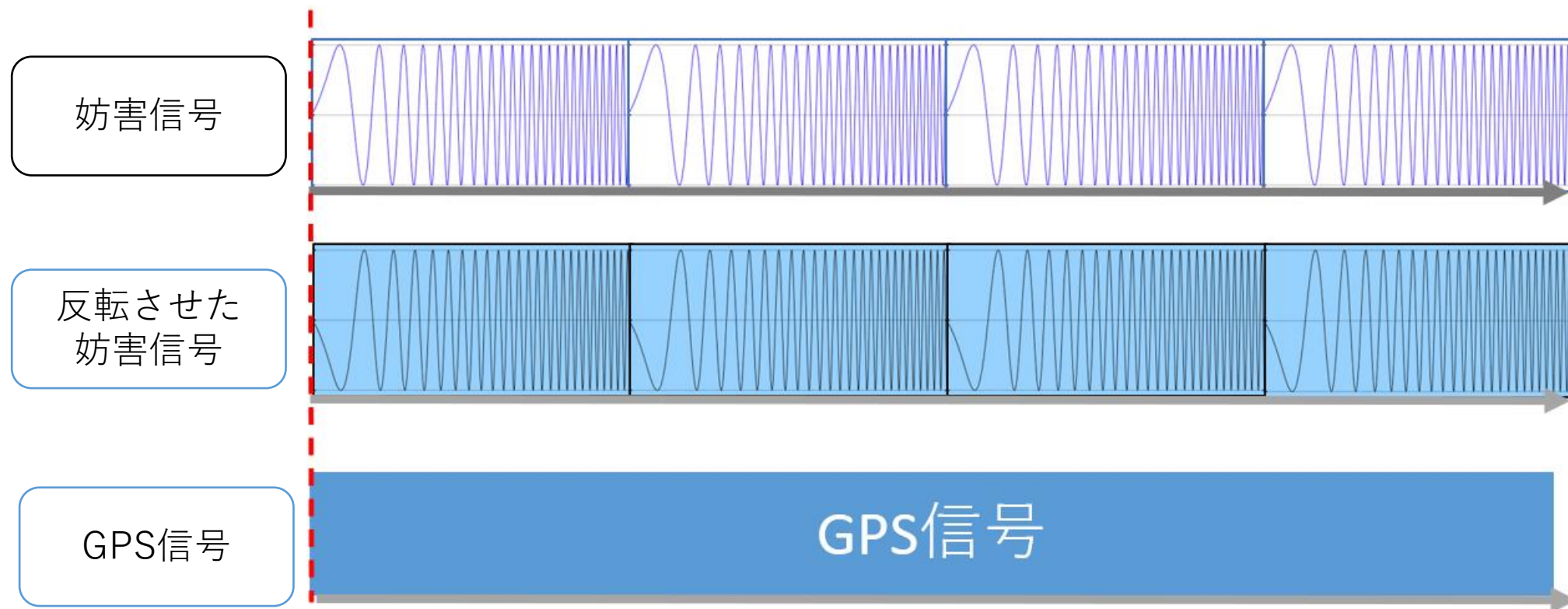
タイミングチャート

位相がずれているとき相殺しない



タイミングチャート

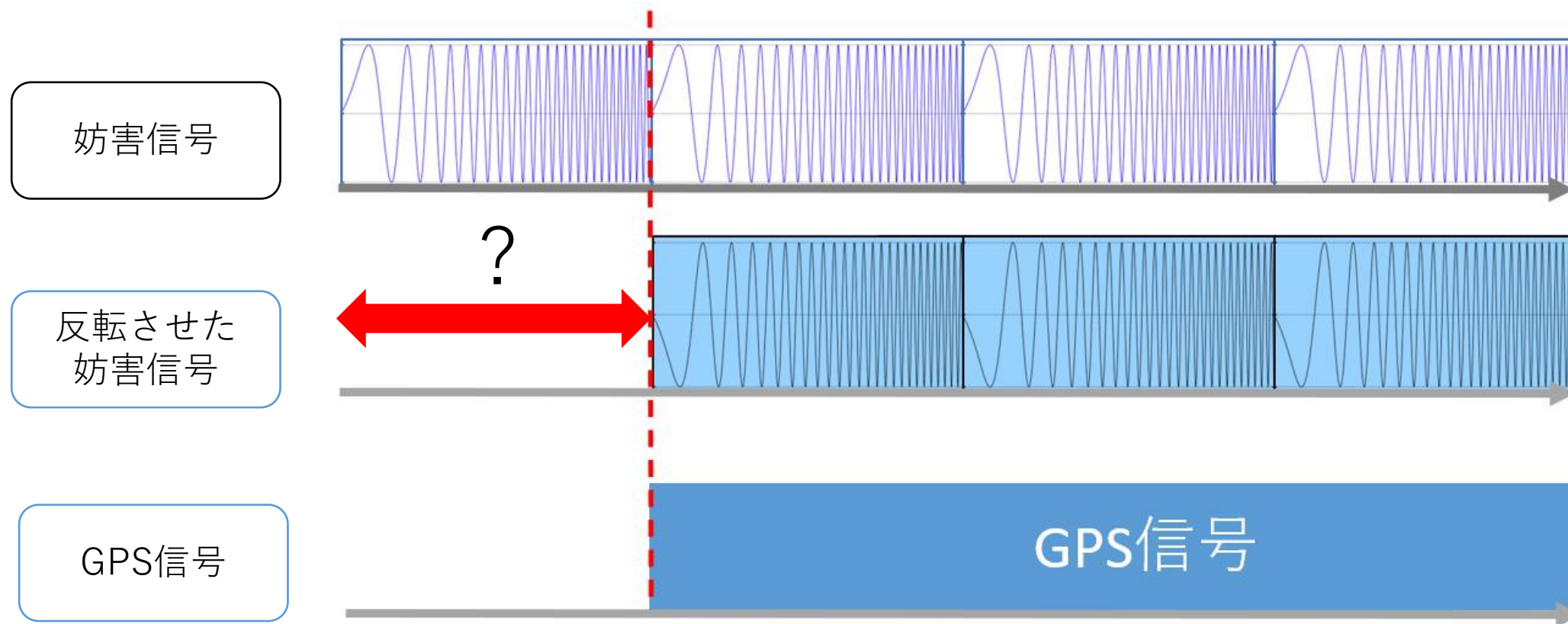
位相があれば相殺される



タイミングチャート

1 周期遅れて位相が合う場合も相殺されるはず

1 周期の長さを求めたい



先行研究で信号特性が調査されている

【測位航法学会論文誌 2015 Vol.6 No.1】

福島 荘之介, 齊藤 真二

『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』

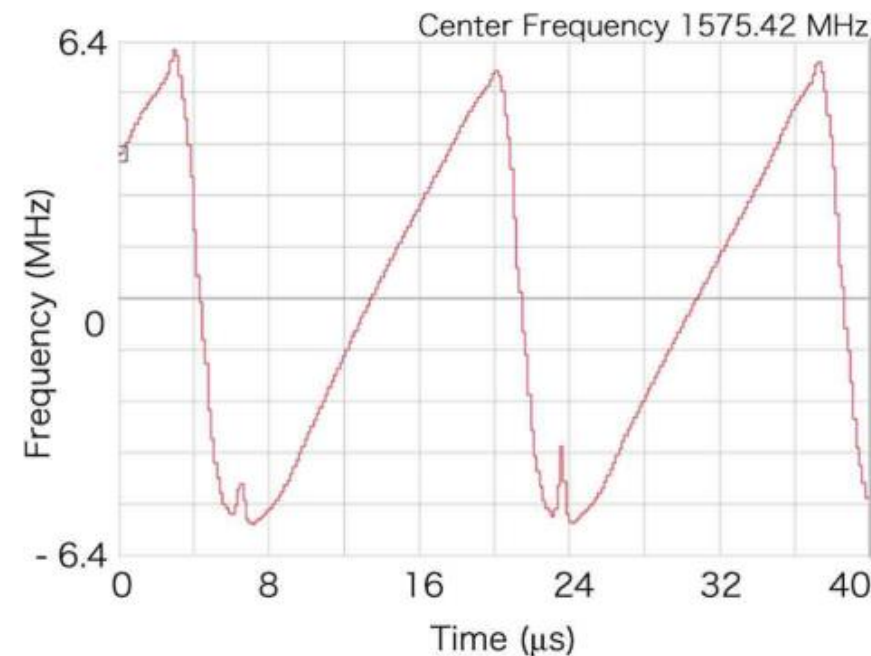
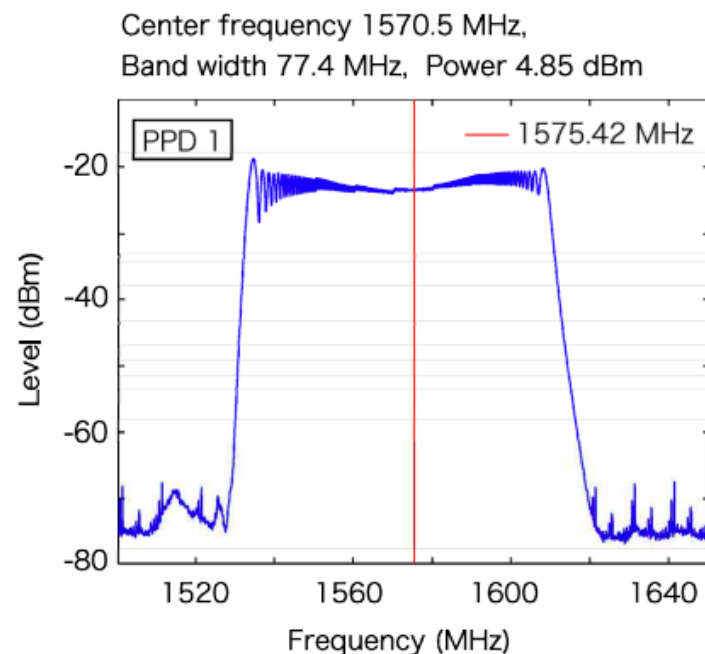
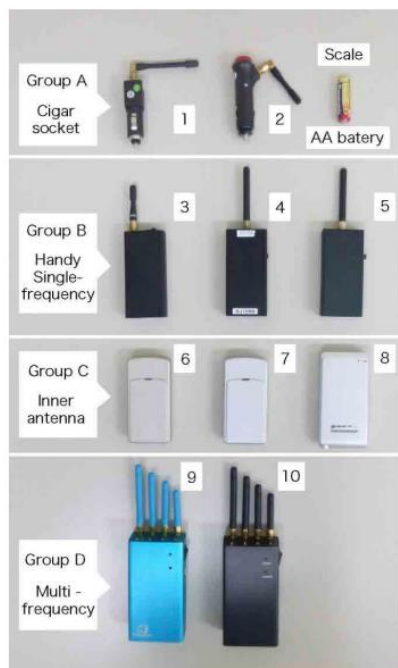
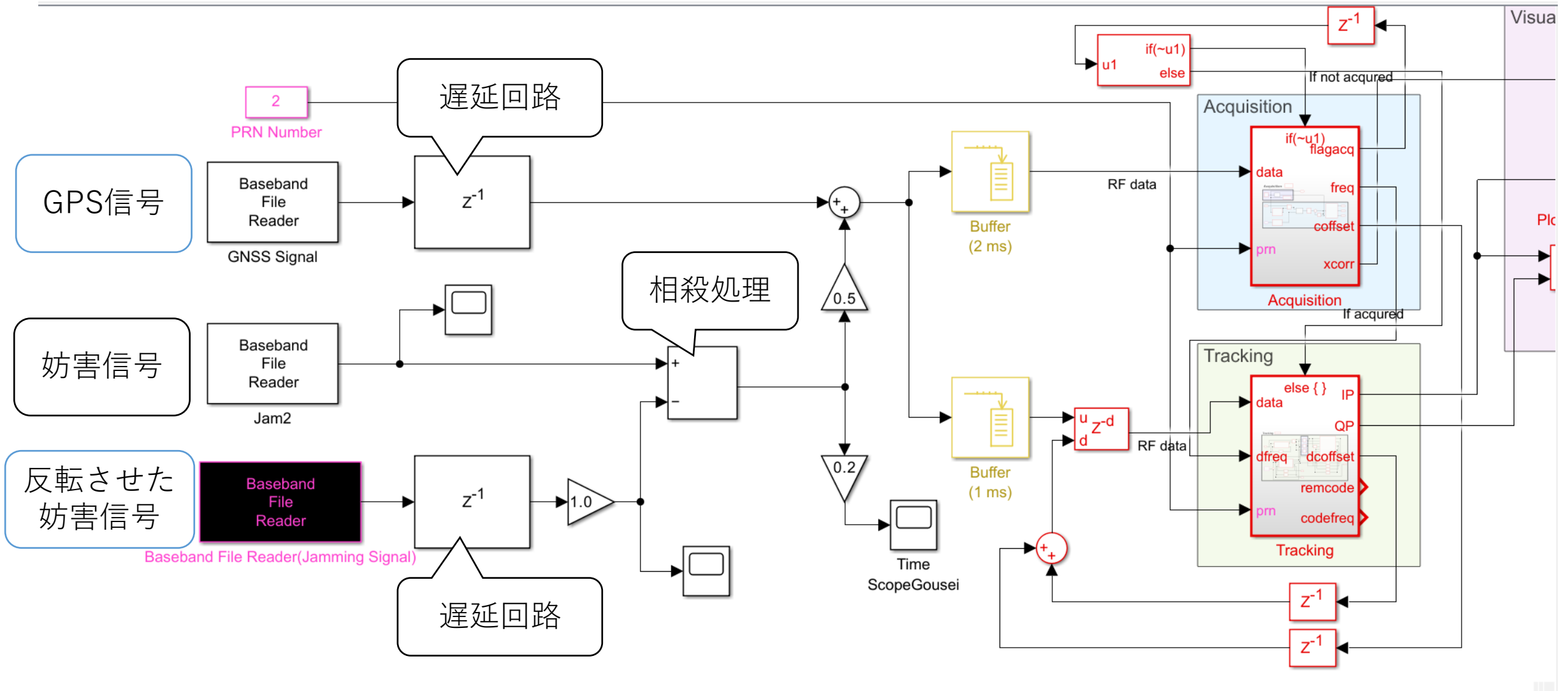


図1 試験されたPPDとグループ分け
Fig. 1 PPDs tested and grouping.

遅延量をずらしながら相殺を試す



遅延させながら相殺をかける

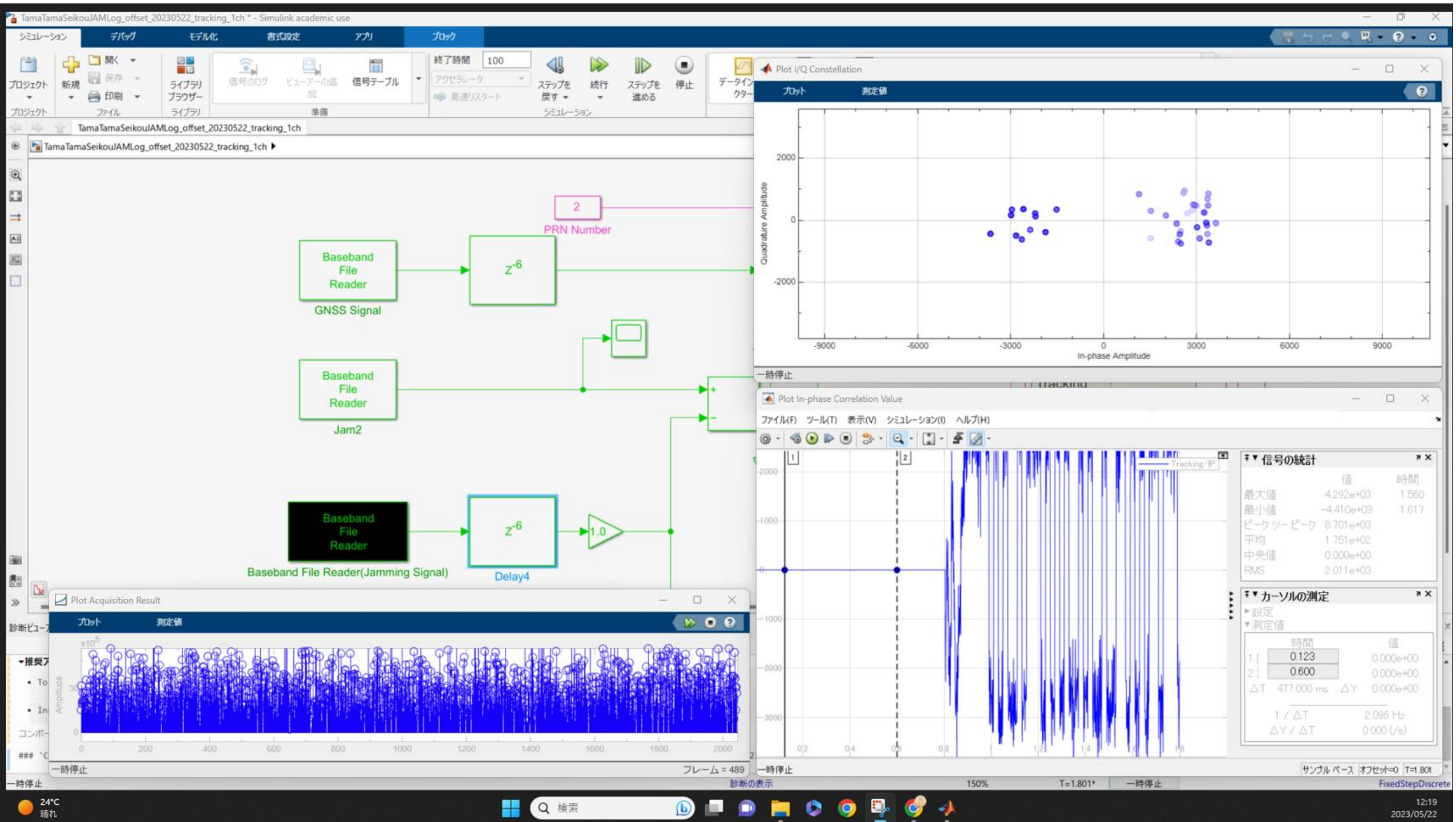
2つの妨害信号をタイミングをずらしながら検証した

はじめから相殺が生じるデータを用意しておき
片方を遅延させながら、再びGPSがデコードできるまでの
遅延量を求める

MATLABで μ 秒単位で遅延させる方法がわからなかったため
試みに0.1秒ずつの粗い遅延量を試したところ

遅延量を0.6秒とすると再びデコードできたため

周期性があり位相が合えば相殺できることを確認した



SDRでジャミング波の周期・波形を取得

ジャミングの位相を逆にして足せば相殺ができる
(ノイズキャンセルの概念)

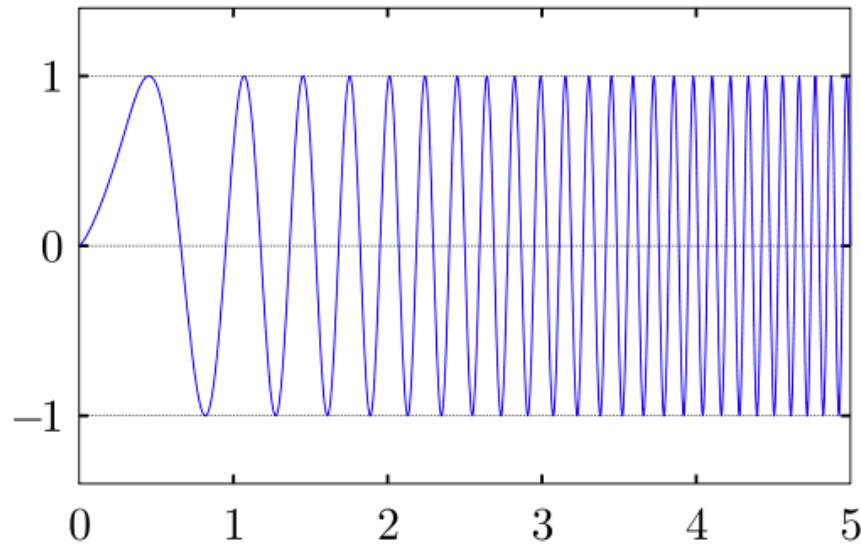
→Simulink上で概念と現象の再現性を確認した

高額な測定器を用いずにSDRを用いて妨害波の周期と位相を
把握し相殺させることができないか処理方法を検討

チャープ信号

ジャミング波は1500MHz～1600MHzの広い周波数を持つ
振幅と周波数が時間とともに変化する信号

→ そのような信号の代表例はチャープ（chirp）信号
（下図は周波数のみ時間変化で振幅は一定）



チャープ信号の解析手法

高速フーリエ変換 (Fast Fourier transform)

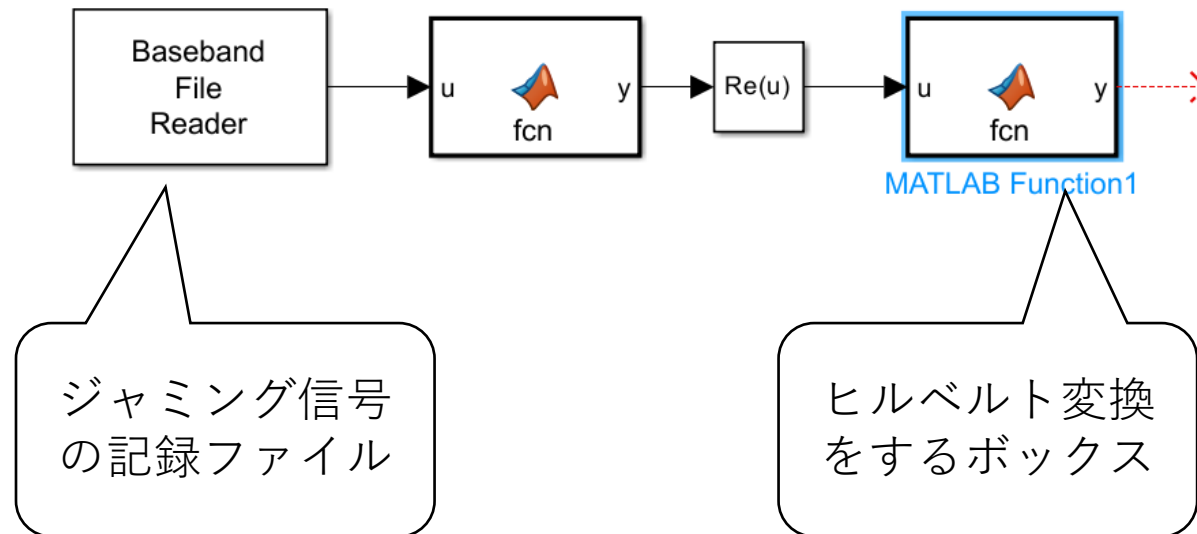
窓つきフーリエ変換 (Windowed Fourier transform)

短時間フーリエ変換 (Short-time Fourier transform)

ウェーブレット変換 (Wavelet transform)

ヒルベルト・ファン変換 (Hilbert-Huang transform)

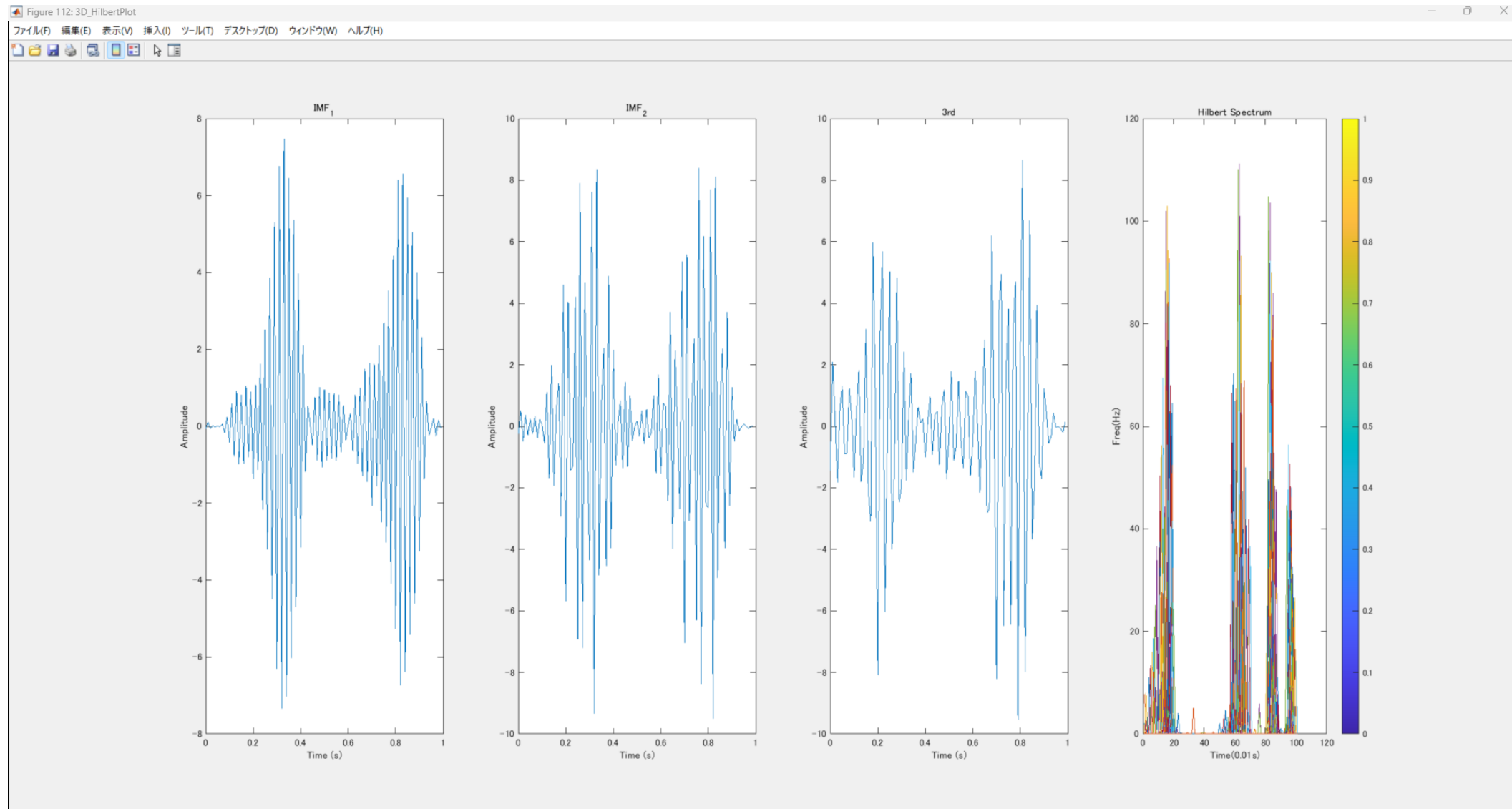
SimulinkとMATLABコードで ヒルベルト・フアン変換をかける



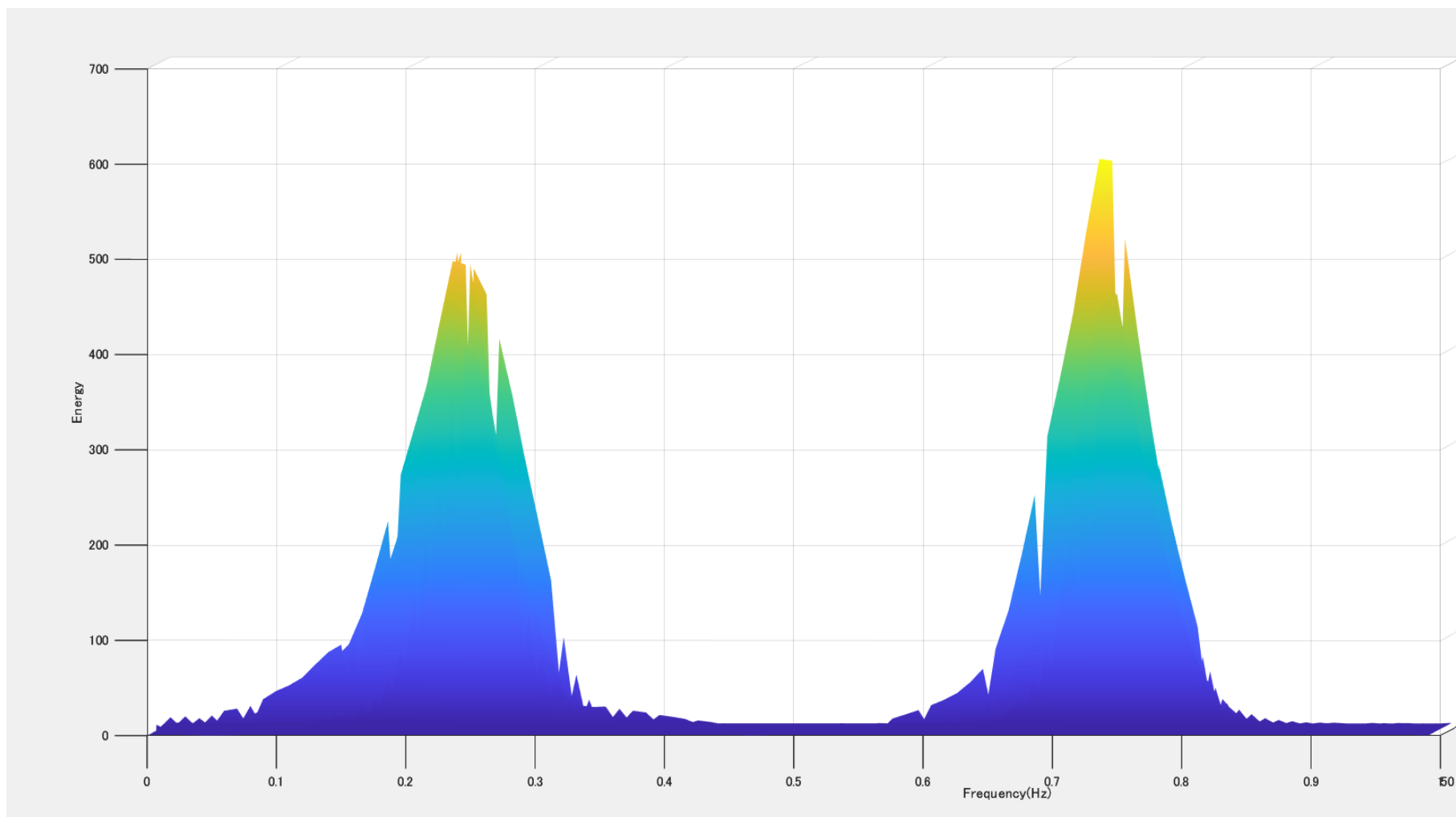
```
Hilbert_SiKouAnalsticJAMscopesakusei20230508JAM x MATLAB Function1 x
Hilbert_SiKouAnalsticJAMscopesakusei20230508JAM MATLAB Function1

1 function y = fcu(u)
2 y = vmd(u);
3
4 fs = 100;
5 t = 0:1/fs:1-1/fs;
6
7 [imf,res] = vmd(u,'NumIMFs',4);
8
9 len = length(imf);
10 tlen = length(t);
11
12 subplot(1, 4, 1);
13 plot(t,imf(:,1));
14 title('IMF_1');
15 ylabel('Amplitude');
16 xlabel('Time (s)');
17
18 subplot(1, 4, 2);
19 plot(t,imf(:,2));
20 title('IMF_2');
21 ylabel('Amplitude');
22 xlabel('Time (s)');
23
24
25 subplot(1, 4, 3);
26 plot(t,imf(:,3));
27 title('3rd');
28 ylabel('Amplitude');
29 xlabel('Time (s)');
30
31 subplot(1, 4, 4);
32 hs = hht(imf,fs);
33 plot(hs);
34 colorbar;
35 title('Hilbert Spectrum');
```

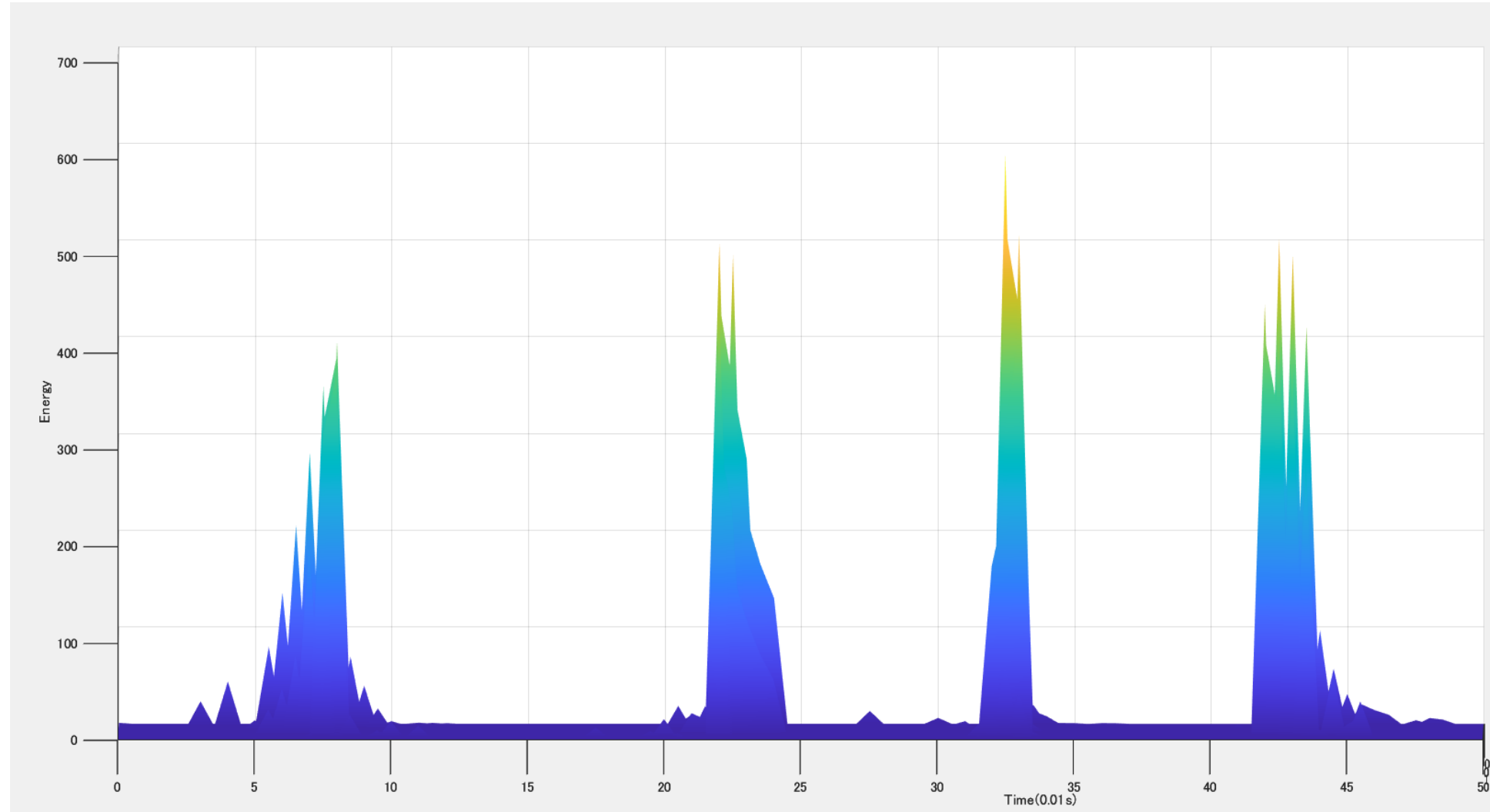
実施結果



周波数ドメイン (Freq.Domain)

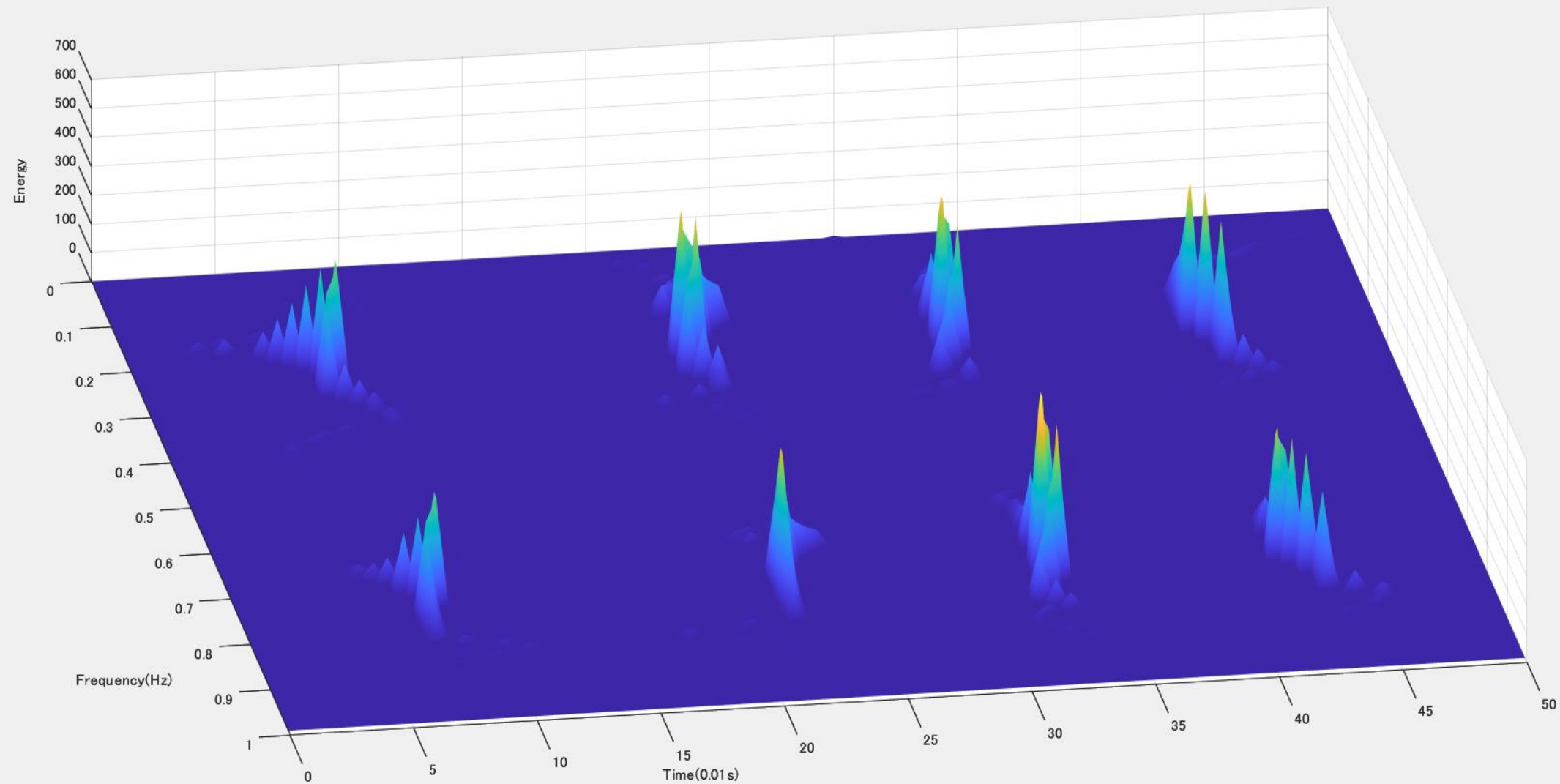


時間ドメイン (Time domain)



ヒルベルトスペクトログラムの取得

瞬時周波数分布を可視化：周波数と振幅が時間変化する信号であることを確認



目次

背景

動機と目的

GPS信号発生器による試行

市販のジャマーによる試行

アンテナレベルによる軽減対策

SDRによる信号観測と軽減対策

まとめ

まとめ

船用GPSコンパスが妨害信号により測定不可となることを確認
そのときの受信レベルの目安を把握

軽減対策

1.指向性の鋭いアンテナを試作した

課題：低い仰角の妨害波を軽減する効果があるか確かめる

2.妨害波を位相をずらすことで相殺を試みた

課題：位相を追尾し同期させる処理を工夫する必要

ヒルベルト・フアン変換で音響ノイズを取り除けるという研究論文

ResearchGate

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/224358934>

Suppression of Residual Noise From Speech Signals Using Empirical Mode Decomposition

Article in *Signal Processing Letters, IEEE* · February 2009

DOI: 10.1109/LSP.2008.2008452 · Source: IEEE Xplore

CITATIONS

51

READS

182

2 authors, including:

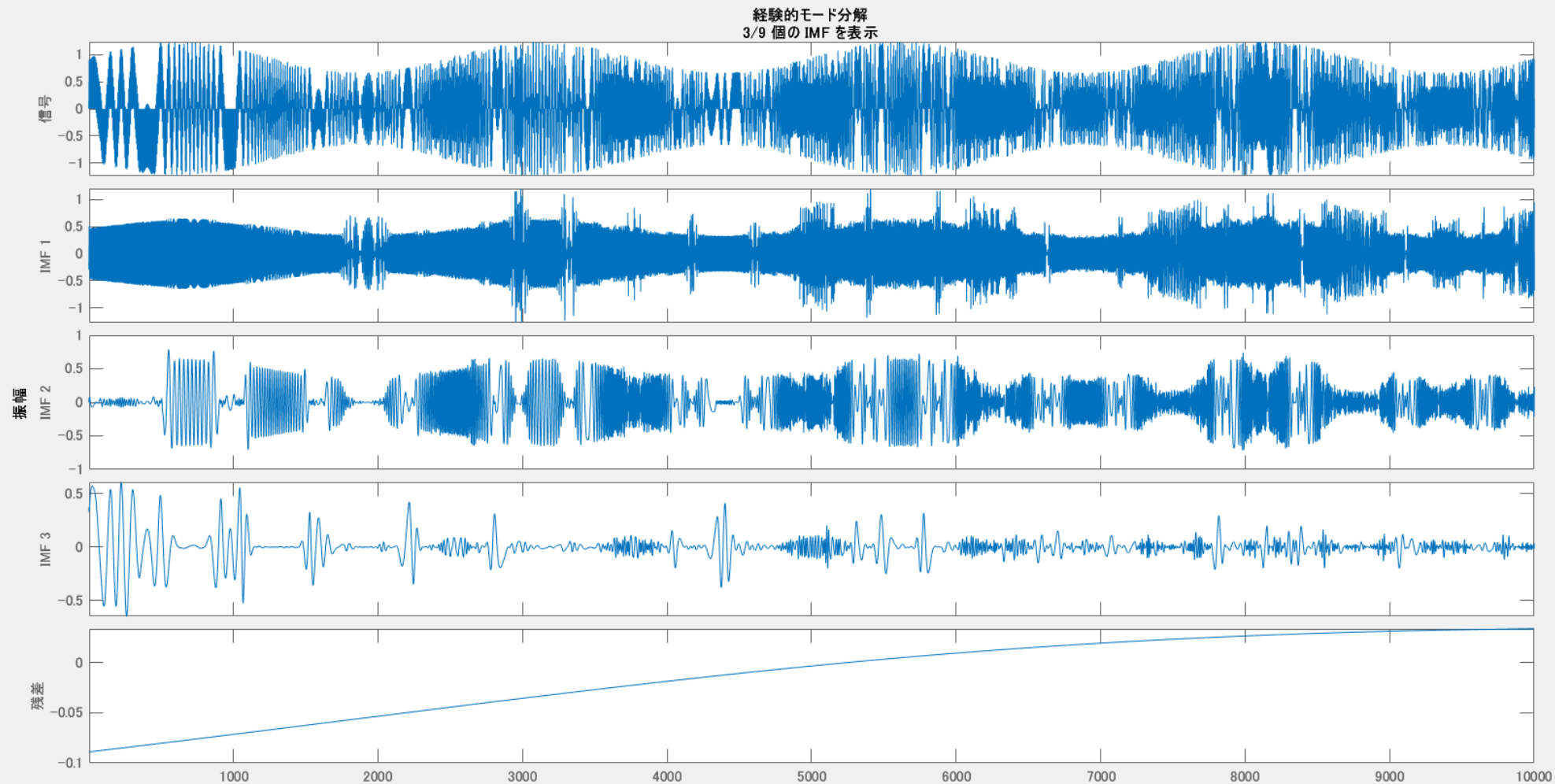


Taufiq Hasan

Bangladesh University of Engineering and Technology

75 PUBLICATIONS 1,654 CITATIONS

SEE PROFILE



Jammingの特徴をとらえて、取り除いたあとに合成したい
ただしGPSとJammingは同じ周波数帯なので簡単には分離できない
可聴音 (KHz) で可能でもマイクロ波 (GHz) では難しいのではないか

船舶用GPSコンパス 補足資料

-船舶の搭載状況について-

GPSコンパス（サテライトコンパス）

真方位を測定するセンサーでジャイロコンパスにも匹敵する精度
1度以内の誤差（旋回中など測位条件によって精度は変動）



船首方位伝達装置としてのGPSコンパス

船首方位伝達装置（THD：Transmitting Heading Device）

300総トンから500総トンの船舶と

乗客100名未満の高速旅客船に搭載義務

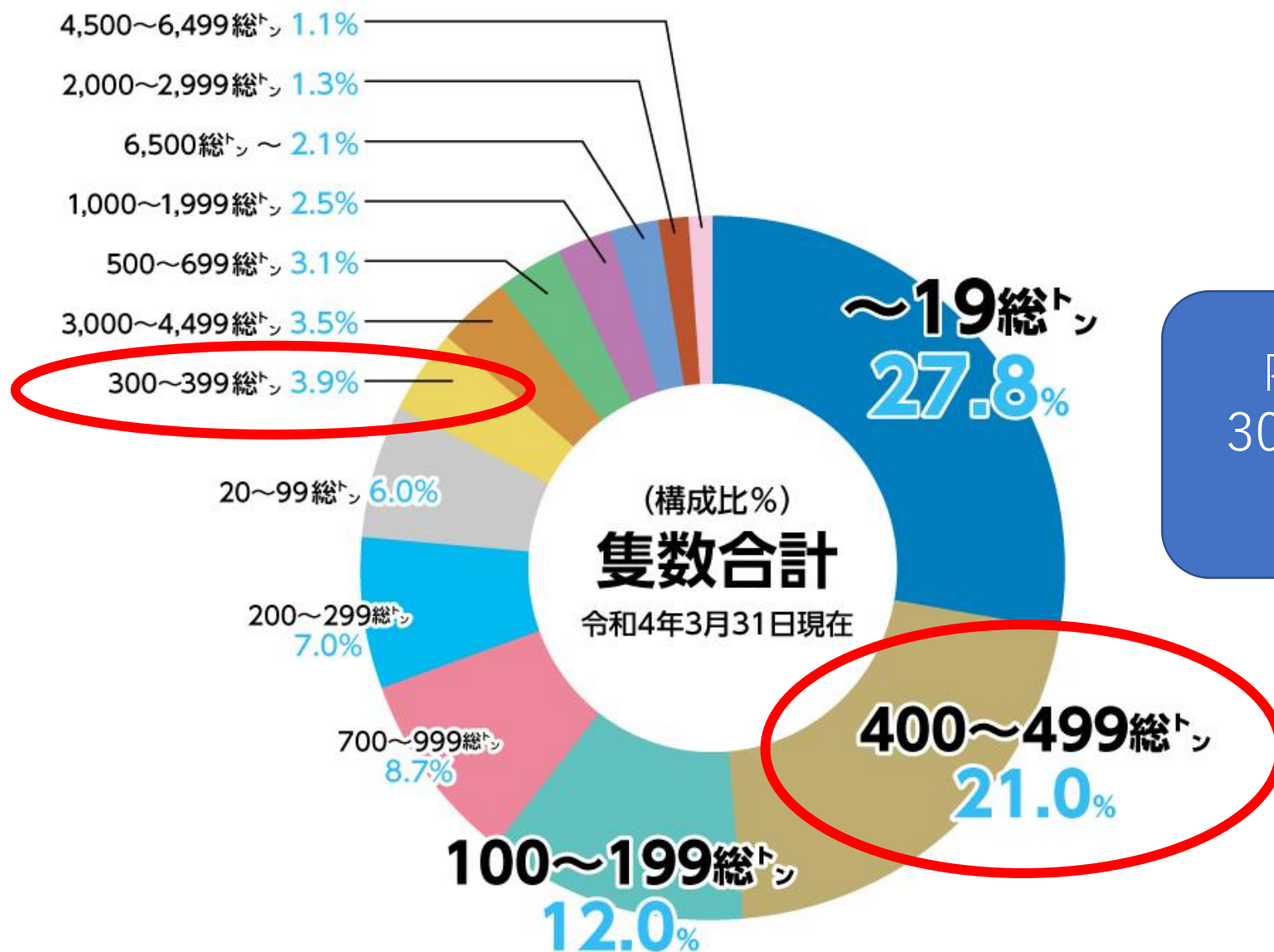
THDはAISの方位センサとして用いられることを目的としており
方位検出原理は、

- （1）地磁気を利用したもの
- （2）外部の影響を受けない独立したジャイロ等の方式のもの
- （3）**電波を利用したもの** ← **GPSコンパスのこと**

船舶設備規則より

船型別状況

内航船舶の船型別構成を登録船（100総トン以上）で見ると、隻数比で499総トン以下が77.7%、1,000総トン以上が10.5%となっています。
また船型の大型化が年々進み、内航船舶全体の平均総トン数は、10年前に比べ11.8%の大型化がみられます。



内航船のうち
300～500トンは
約25%

内航船は現在
5 0 0 0 隻以上

そのうち
1 0 0 0 隻以上（2 5 %）が
ジャイロコンパスは非義務

GPSコンパスのみ搭載の
船舶は多数あると推察

ジャミングは脅威であり
対策が望まれる

船種別状況

内航船舶は令和4年3月31日現在5,136隻、395万7,707総トンとなっています。船種別ではその他貨物船が隻数比67%、総トン数比55%を占めており、また油送船は隻数比18%、総トン数比24%となっています。

平均総トン数では自動車専用船が4,136総トンと最も大きく、セメント専用船が2,971総トン、油送船が1,027総トン、その他貨物船が624総トンとなっています。

令和4年度 船種別状況

