

遠距離海洋レーダによる 対馬暖流分岐流のバイスタティック観測

杉谷 茂夫¹・雨谷 純¹・岩井 宏徳²・
森本 昭彦³・久島萌人⁴・藤井 智史⁵
滝川哲太郎⁶・市川香⁷

1. 情報通信研究機構 沖縄電磁波技術センター
2. 情報通信研究機構 センシングシステム研究室
3. 愛媛大学 沿岸環境科学研究センター
4. 名古屋大学 宇宙地球環境研究所
5. 琉球大学工学部
6. 長崎大学院水産
7. 九州大学応用力学研究所

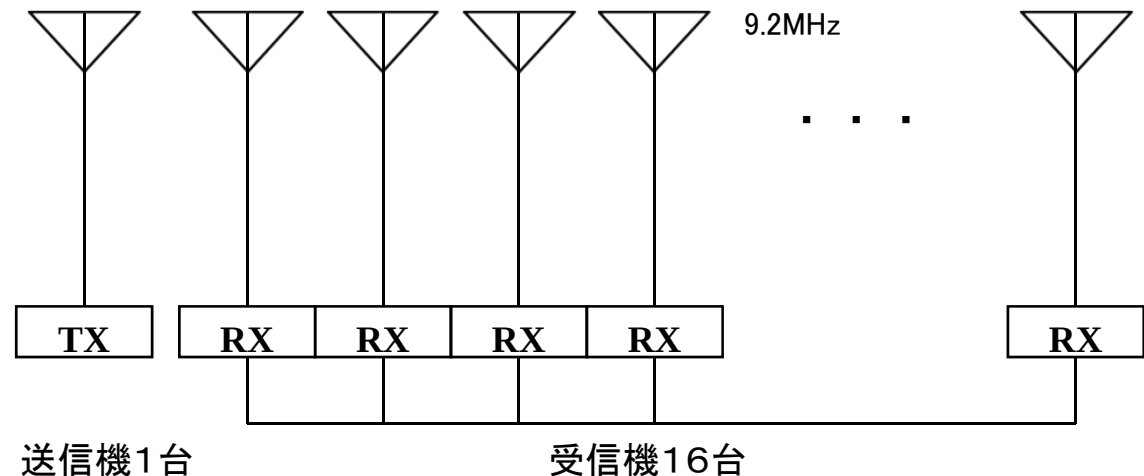
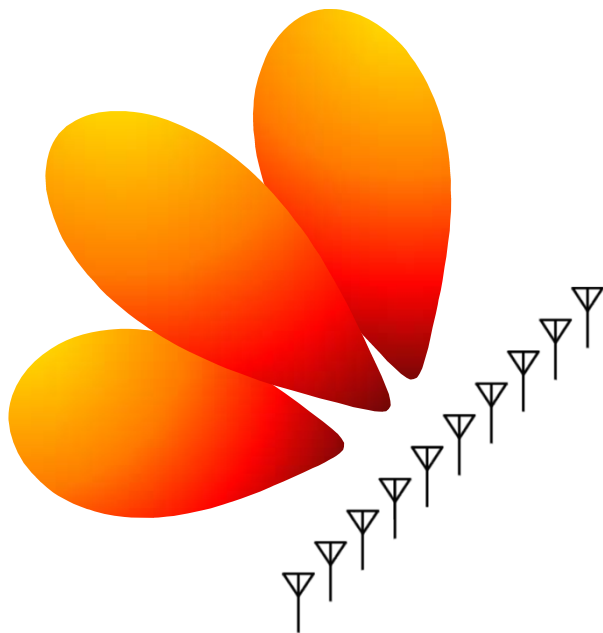
海洋レーダ研究集会 2016年12月15日

お話の概要

- ✓ 観測に用いる海洋レーダと対馬暖流観測実験の概要
- ✓ バイスタティック観測とバイスタティック受信機の開発
- ✓ 干渉波による観測困難への技術対応
- ✓ 今後の予定（分散型受信機の実証実験）

遠距離海洋レーダのアンテナシステム

- NICT遠距離海洋レーダ局は9MHz帯の周波数を用いて海況情報を取得するレーダ局である。
- NICT遠距離海洋レーダ局は送信用に3素子の八木アンテナ1本を用いてファンビーム送信を行うのに対して、受信用には2素子の八木アンテナを16本用いることよりデジタルビームフォーミングを行うフェーズドアレイ方式で、ビーム幅を狭くして必要な海域を観測する手法を用いている。(旧与那国と石垣局の場合)



対馬暖流観測実験海洋レーダサイト



対馬局と相島局の概要

2016年12月現在

相島局のレーダは石垣島に設置されていた既存の遠距離海洋レーダを設置

対馬局にはバイスタティック受信によるレーダサイトを設置

送信しない

レーダサイト

対馬局



レーダサイト

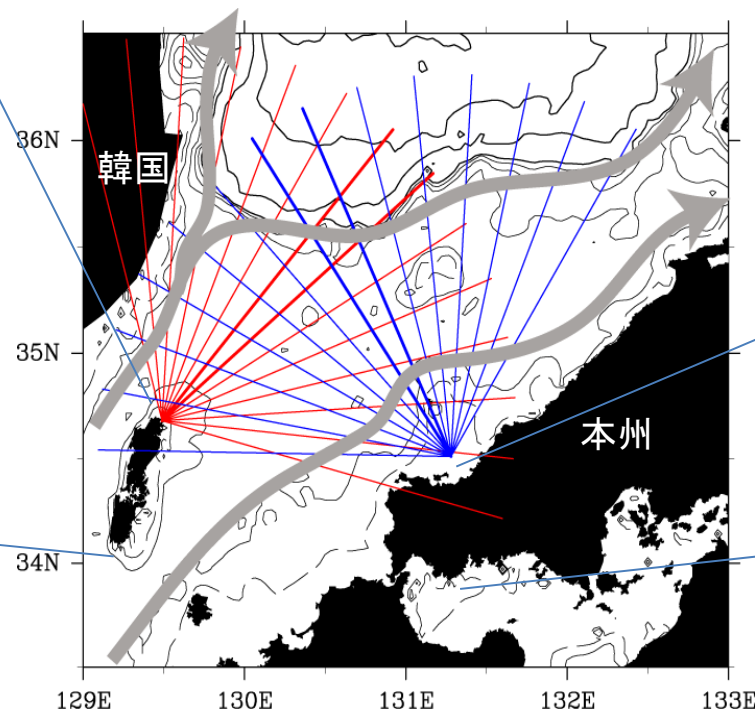
相島局設置場所の航空写真



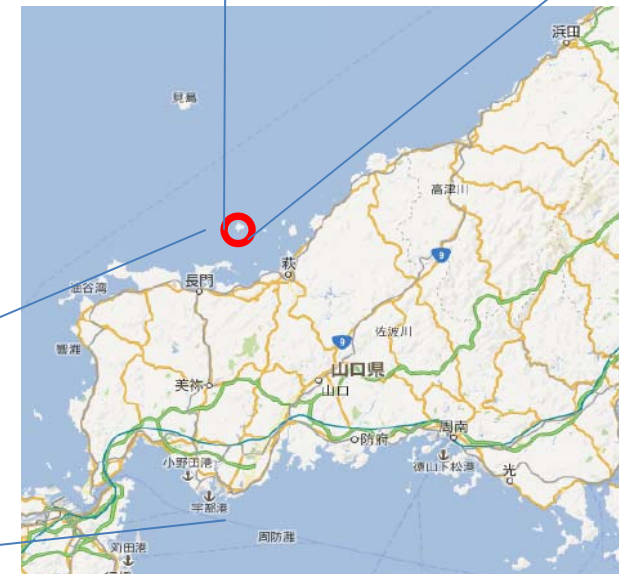
相島局



モノスタティック局の探査距離は約200Km

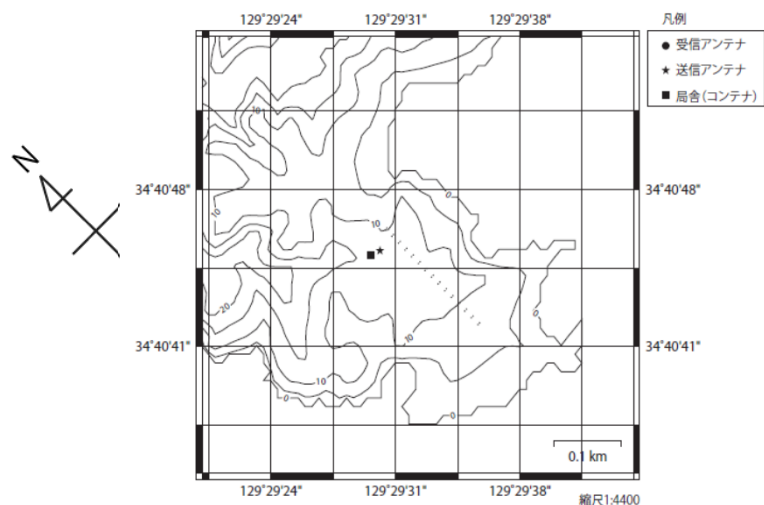


対馬暖流観測範囲



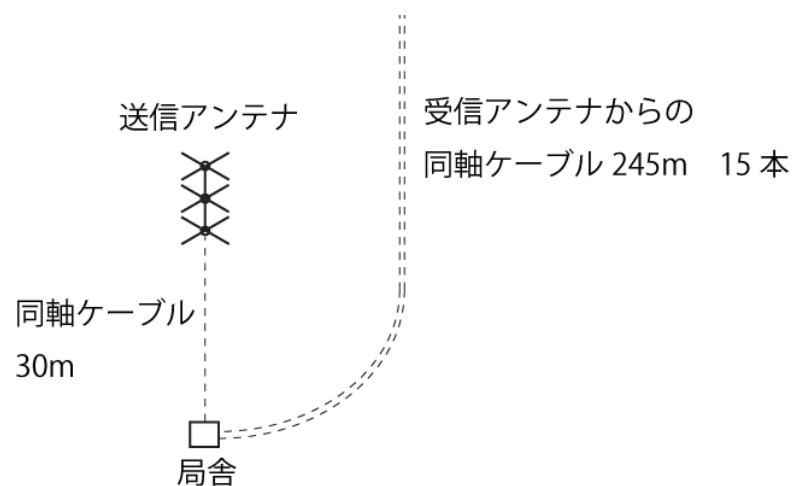
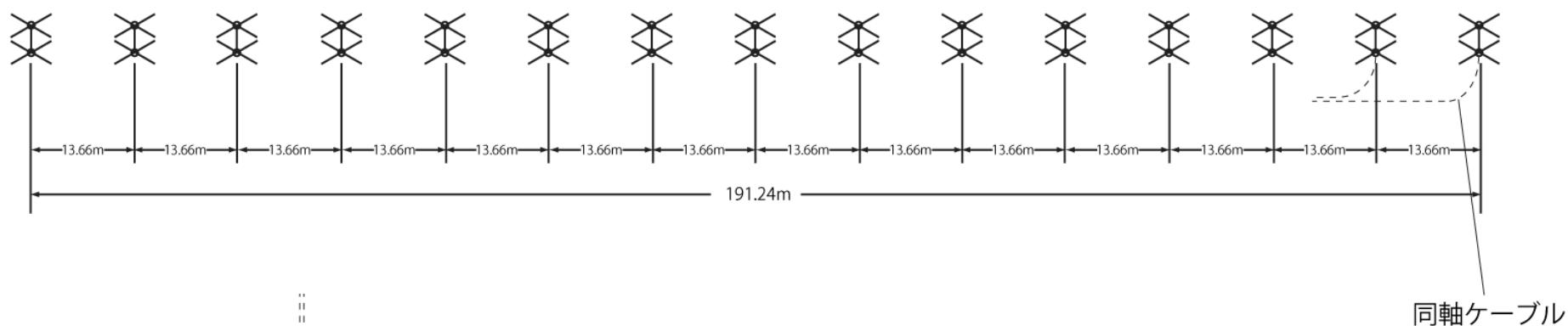
送受信アンテナ設置場所 (対馬局)





対馬局アンテナ配置

受信アンテナ



短波海洋レーダアンテナ配置
縮尺 1:500

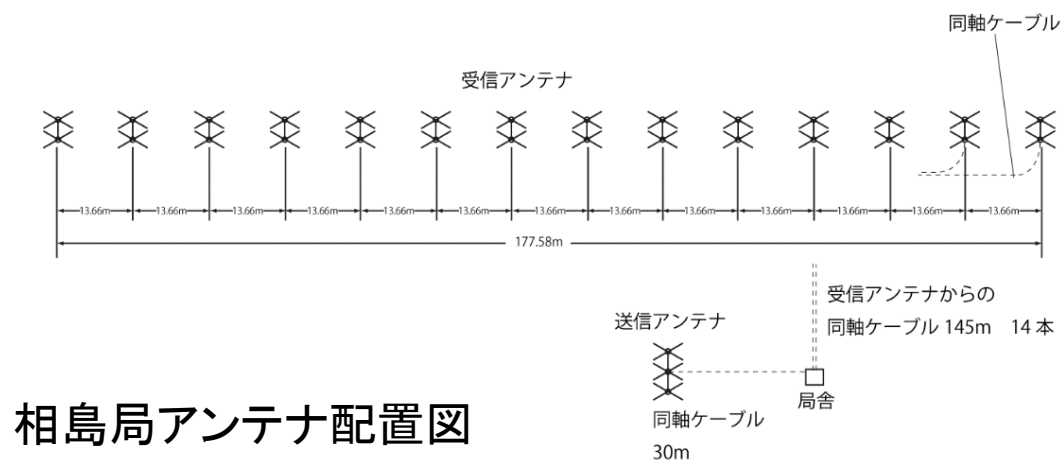
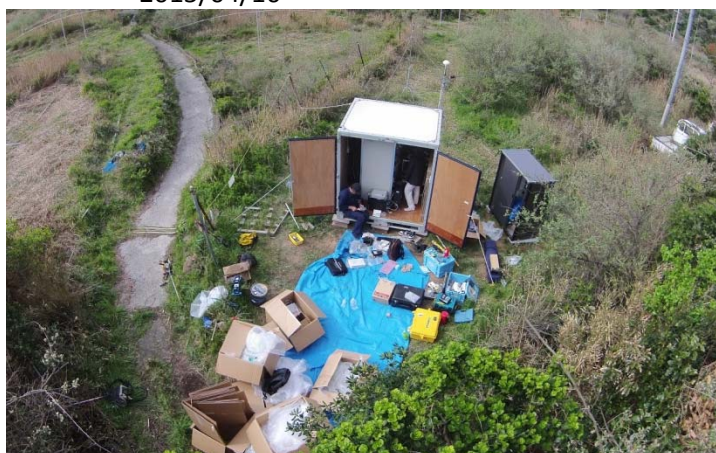
相島局



送受信アンテナ設置場所 (相島局)



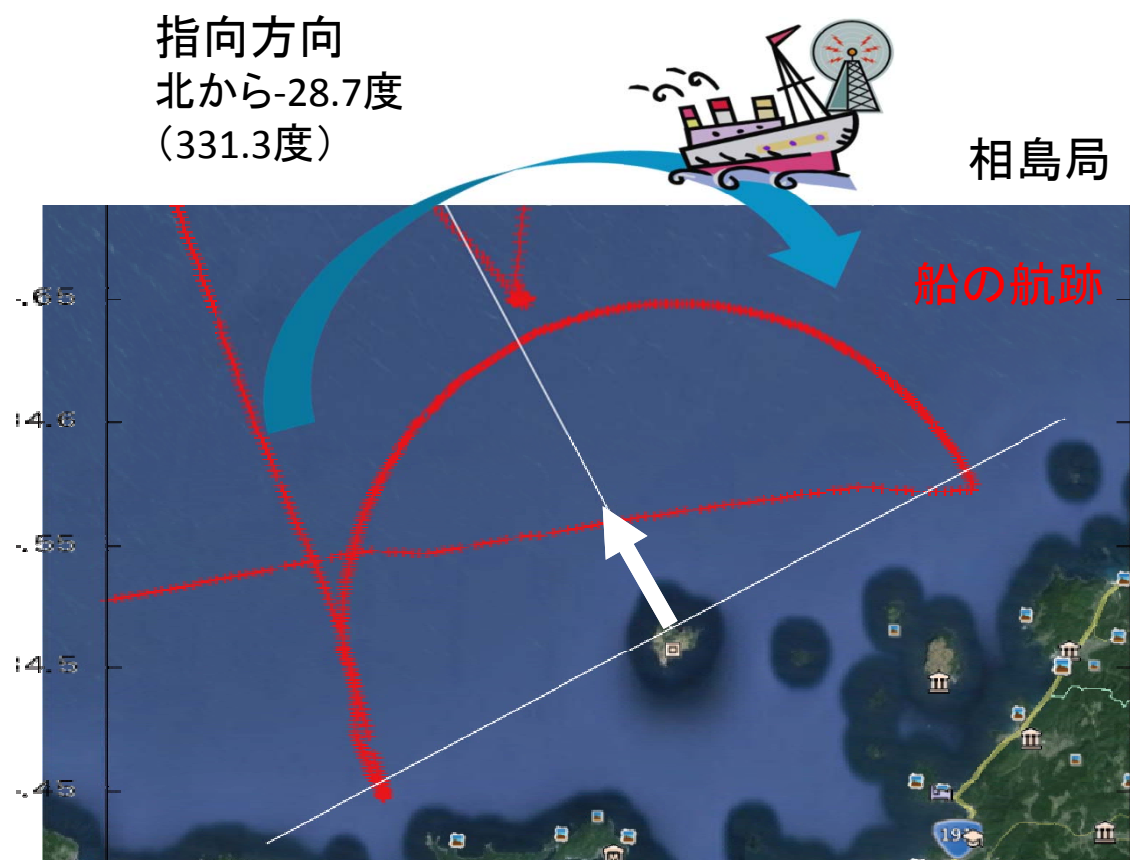
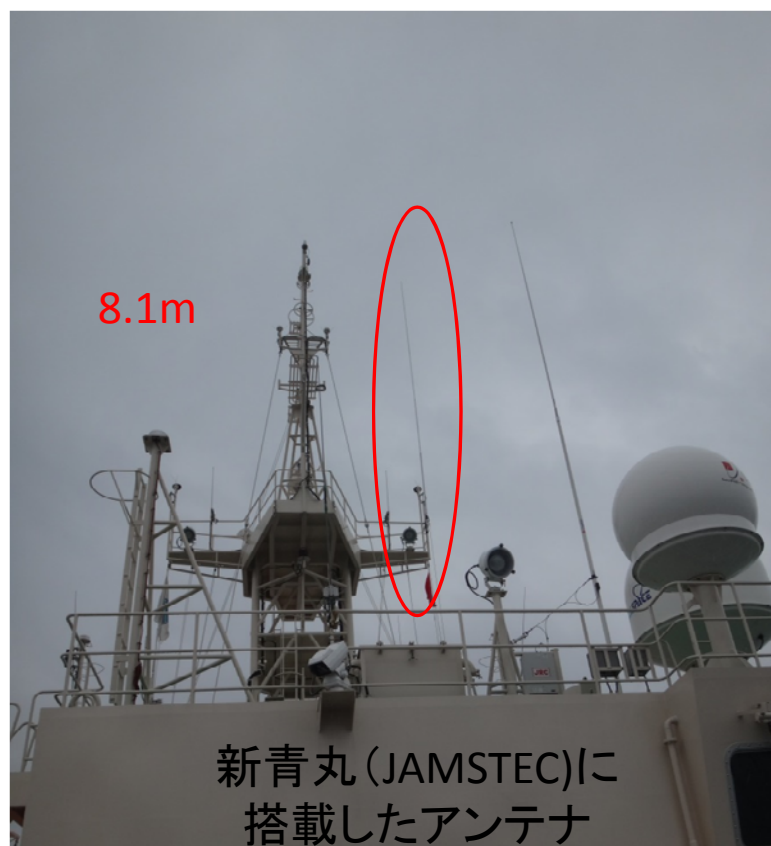
2015/04/10



相島局アンテナ配置図

ビーコン局を用いたアンテナパターン測定 の概念図

- ✓ ビームパターンの検証を行うために船舶に搭載可能で遠距離海洋レーダと同じ周波数帯を送信可能なビーコン局を用いた。
- ✓ ビーコン局は船舶に搭載して受信用アンテナのビーム方向に垂直になるように受信局から等円上線に船舶を航行させ、海上からの送信によるビーコン局の追尾を陸地に設置した遠距離海洋レーダの受信アンテナで行うことにより受信アンテナのビームパターンの検証に用いた。



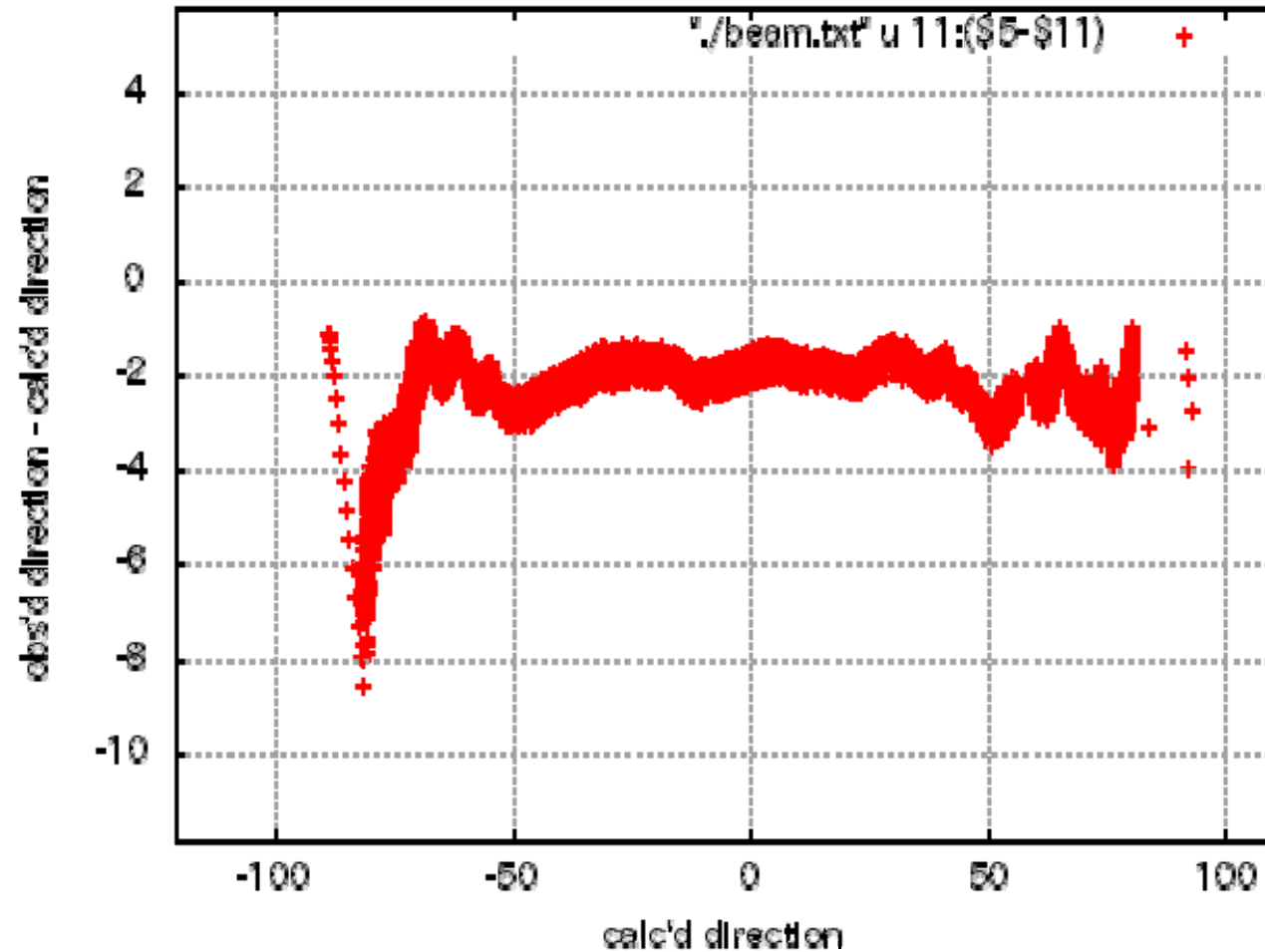
DBFの結果

2014年6月17日

相島局

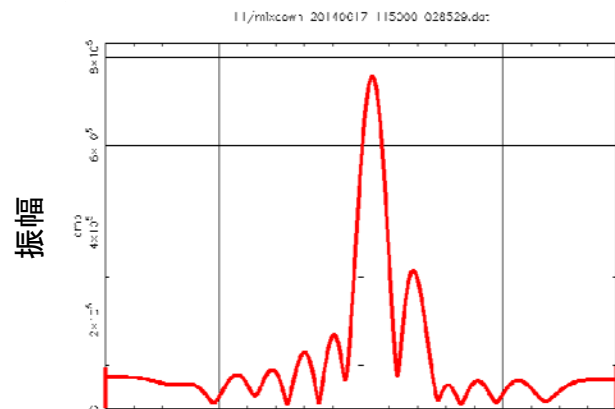


アンテナ正面の方位を330度と仮定してDBFしたら約-2度ずれた



Obs'd direction : DBFにより得られた船の方位

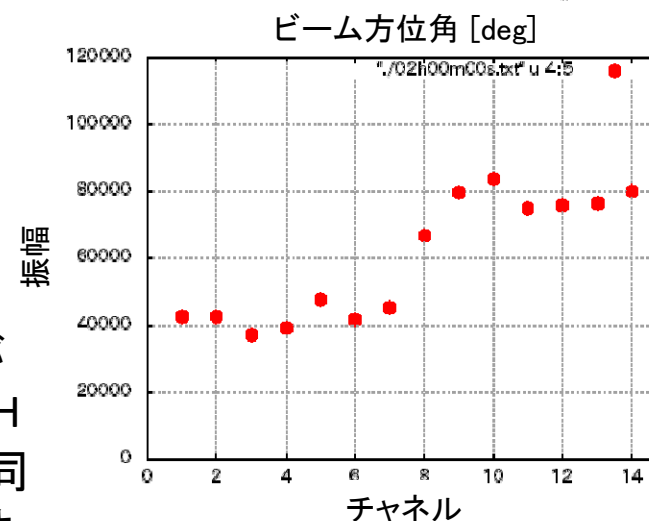
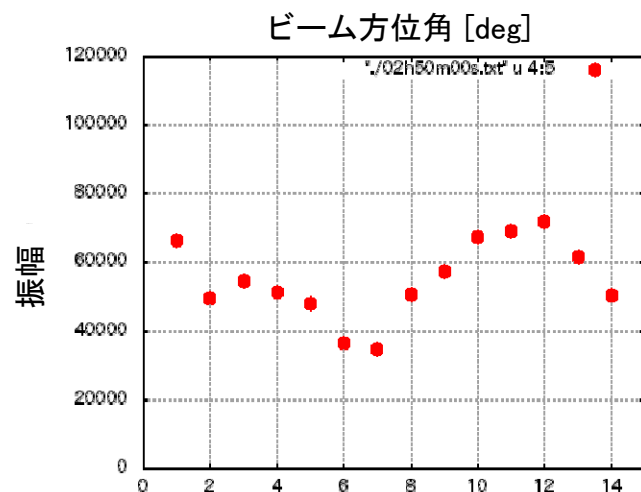
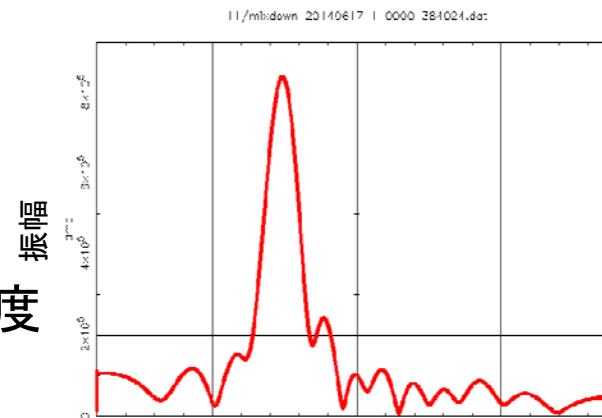
Calc'd direction : 船の位置から求めた船の方位



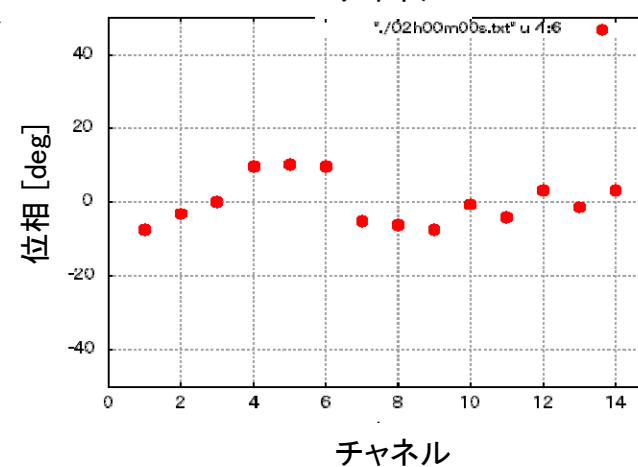
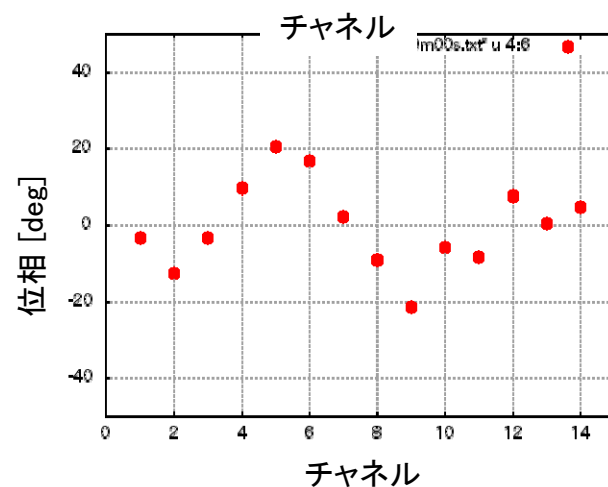
方位角: +4.0度



方位角: -27.5度



船の方位方向が
変化したら、各CH
の振幅・位相は同
じように一定では
変化しないよう
だ?

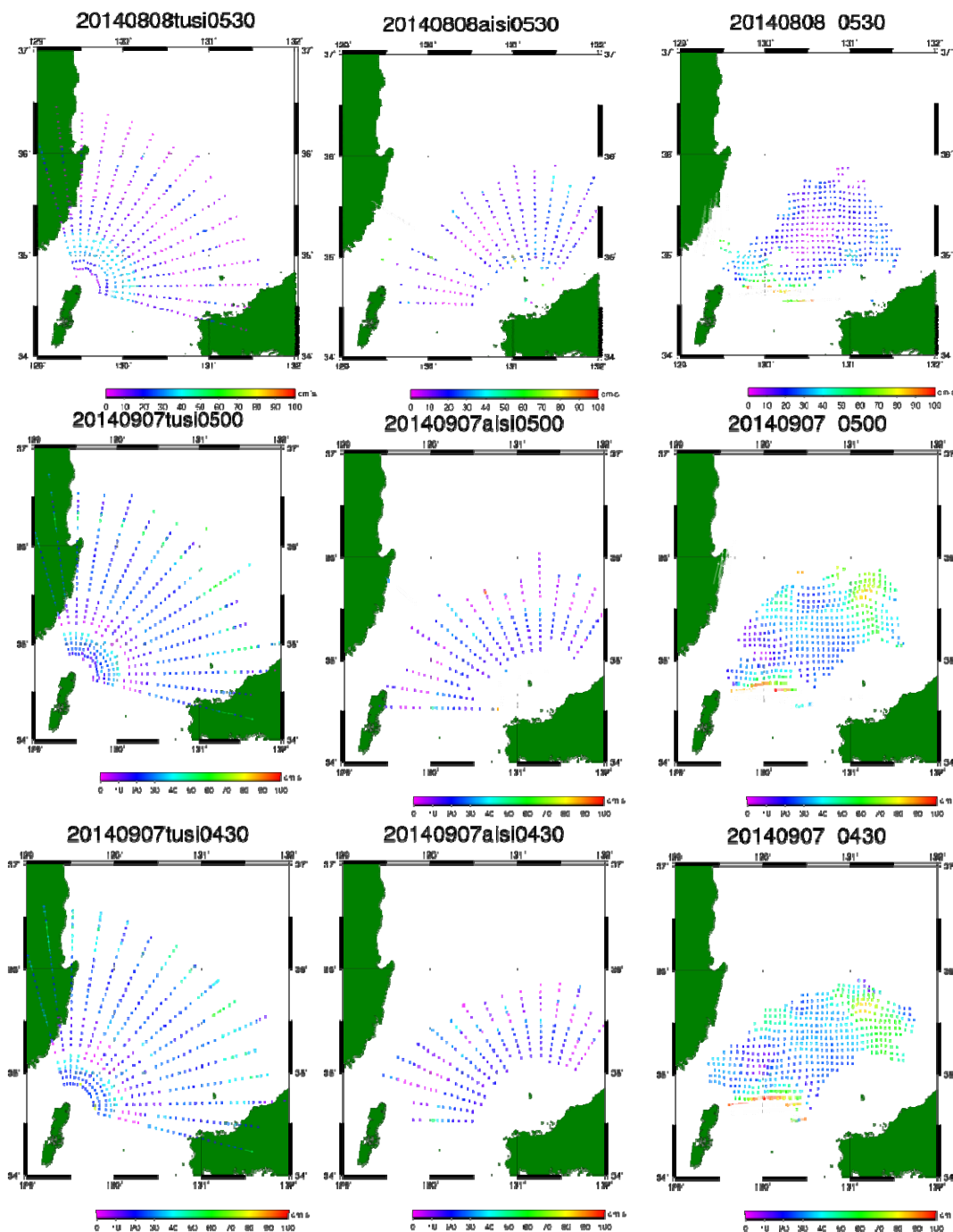


モノスタティック2局による QL視線流速図の例 (補正なし)

対馬には旧石垣の装置
相島には与那国の装置を設置

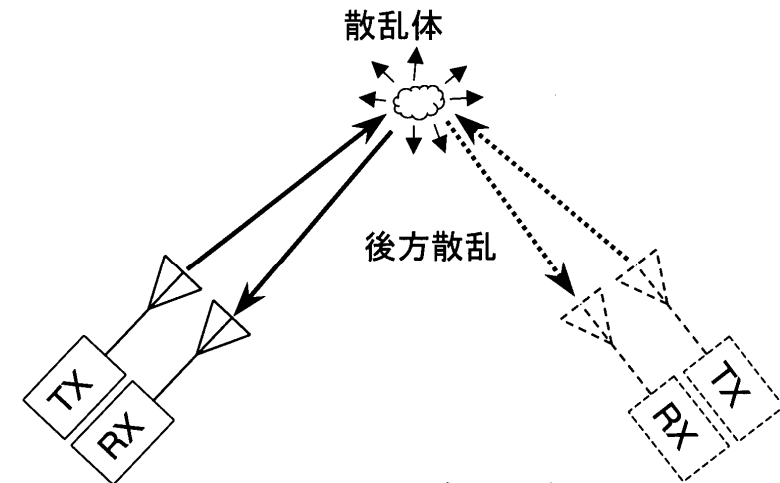
左の図は相島局からもよく見えて
いる時の例 対馬局はおおむね良
好な観測ができていた。

相島局に関しては
夜間はドップラーの検出がほとんど
できなくなるが、日によっては昼間
もかなり苦しい。

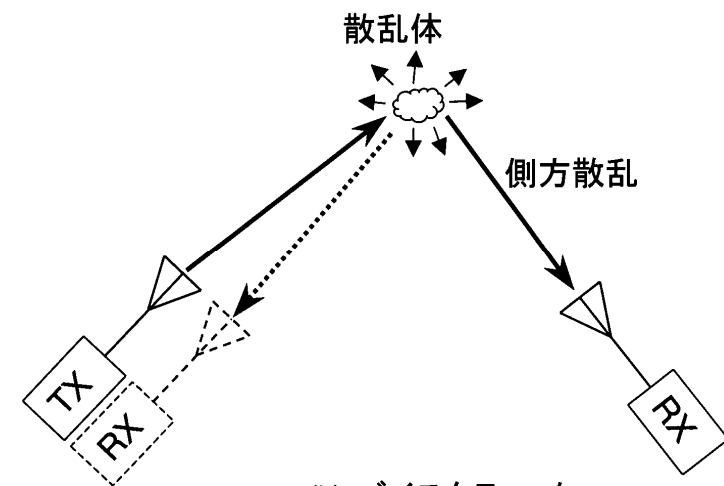


バイスタティック受信とは

- モノスタティックレーダとバイスタティックレーダ
- 側方散乱を利用して散乱体の様子を調べる→バイスタティック
- 1送信機に対して複数の受信機を展開可能→コスト削減、周波数資源の有効利用
- 技術的な課題→ブラッグの散乱条件がモノスタティックより複雑
送受信局が遠隔地となることでの時刻同期技術



(a) モノスタティック



(b) バイスタティック

バイスタティック受信の概念図

バイスタティック海洋レーダ受信機開発方針



・最小限のアナログ部

- ・受信アンテナからADボード(サンプラー)までアンプとバンドパスフィルタ(9MHz帯)のみで9.2595MHz $\pm$ 11kHzの送信信号(直達波)および海面からの散乱波を受信する
- ・アナログ部の開発には時間とお金がかかる、一度作ってしまうと変更がきかない

・複数チャンネルの同期

- ・16本(1~16)の受信アンテナ(チャンネル)からの信号を同期サンプリング
- ・各アンテナでの受信信号の同期が取れないと、デジタルビームフォーミングができない
- ・ADボードで各チャンネルの同期が完全に取りれることを保証するか、各チャンネルの位相のずれを後で補正できるようにする

・広いダイナミックレンジ

- ・対馬・相島間は直線距離で約160km離れている(* 与那国・石垣、与那国・台湾間は約120km)
- ・送信局および散乱波源から受信局への距離が遠いため、微弱な信号を検出できるように広いダイナミックレンジが必要

バイスタティック海洋レーダ受信機開発

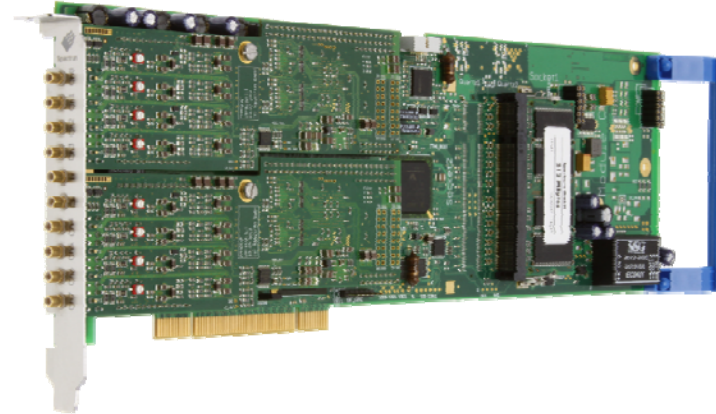
ソフトウェア無線機

USRP (Universal Software Radio Peripheral)



8チャンネルADボード

M2i.4932-exp (SPECTRUM社)



- 台湾レーダからのバイスタティック
散乱波受信実験他で利用実績あり
- 100MHzでサンプリングして、任意の
レートまでデシメーション(間引き)可能
- △ADボードの分解能は14ビット
- △16チャンネルの受信にはUSRPを
16台使用
- △各USRPの同期のずれをある程度の
頻度で確認しなければならない

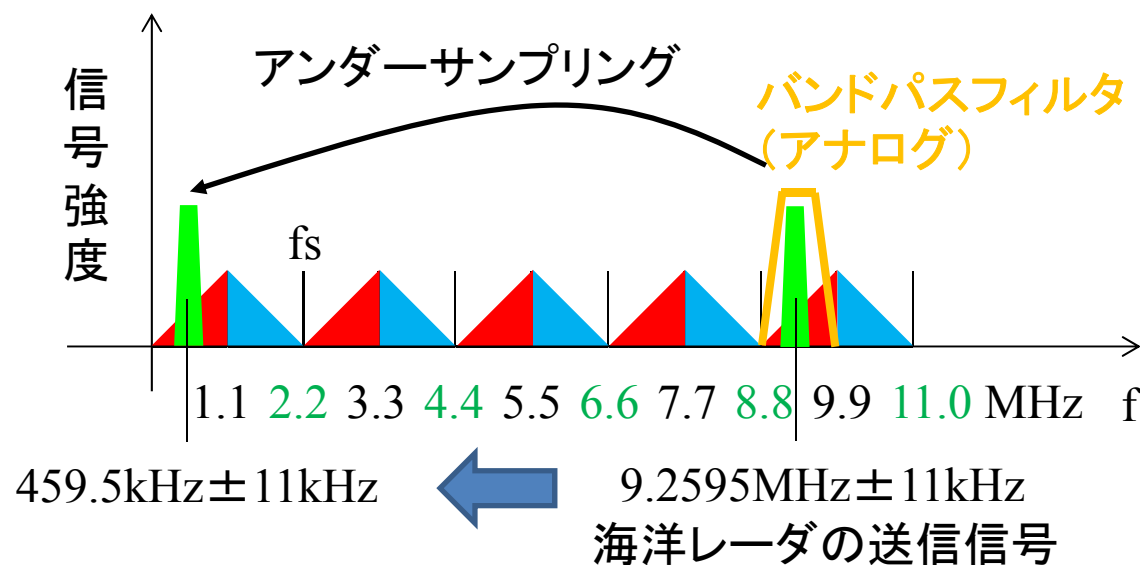
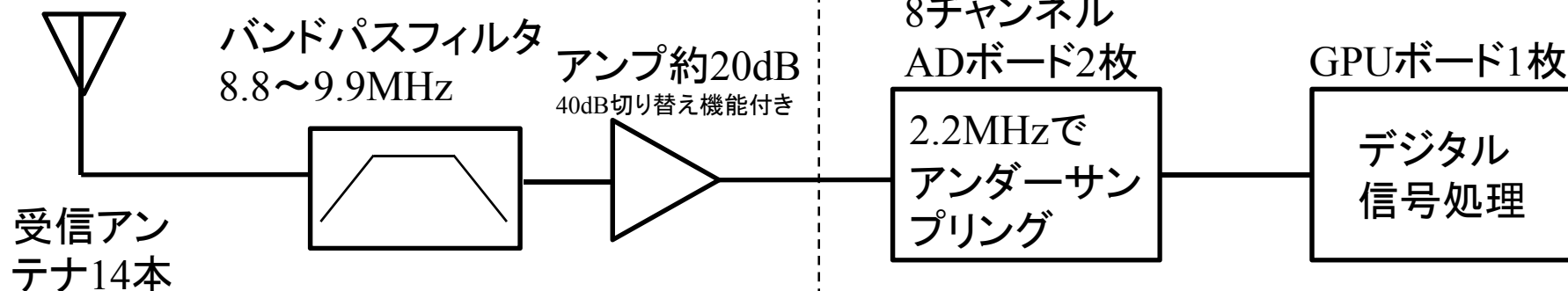
- M2i.4932-expを2台使用で、16チャンネルの
信号を同期サンプリング可能
- ADボードの分解能は16ビット
- 最大サンプリング周波数31.25MHz,
帯域>15MHz
- △純粹にADしかしないので、IQ分離やデシ
メーションなどのデジタル信号処理をソフトウェア
で行わなければならない



デジタル信号処理部分をGraphics
Processing Unit (GPU) 上に実装
(* 処理の並列化による高速化を図る)

14チャンネル受信(相島局)の場合

できるだけ簡易な構成で！

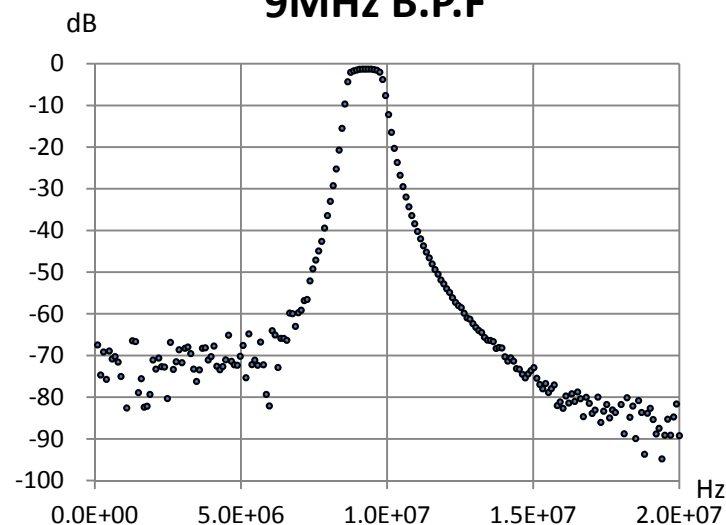


デジタル信号処理の流れ

- ・IQ分離(中心周波数459.5kHzを0Hzに変換)
- ・通過帯域50kHz(±25kHz)のローパスフィルタをかける
- ・22点おきに間引き(デシメーション)して、レート100kHzの信号に変換
- ・各アンテナのIQ成分68096点(=680.96ms = 1掃引の時間)ごとに1ファイルとして保存

バンドパスフィルタ(Band Pass Filter): 特定の周波数領域だけを通過させる濾波器

バンドパスフィルタ
(アナログ)の特性
9MHz B.P.F



バイスタティック受信@相島



- ・30分で1観測とする
- ・2014年12月14日07:30からリアルタイム観測開始
- ・2015年3月14日23:30までの統計
- ・2015年1月29日10:00から2月5日13:00までは停電のため観測停止
- ・ADボードの入力レンジ:2014年12月と2015年1月は±1V, 2015年2月と3月は±200mV

	2014/12	2015/01	2015/02	2015/03	合計
総観測回数	843	1358	912	668	3781
スペクトルデータ作成回数	807 (95.7%)	1344 (98.9%)	808 (88.6%)	616 (92.1%)	3575 (94.5%)
スペクトルでピークが見える回数	35	68	10	28	141

スペクトルが作成されないのは、レプリカとの相互相関が異常に低く(0.1以下)、直達波の頭出しができないため。2015年2月と3月は8時ごろと18時ごろにスペクトル作成失敗が集中している。

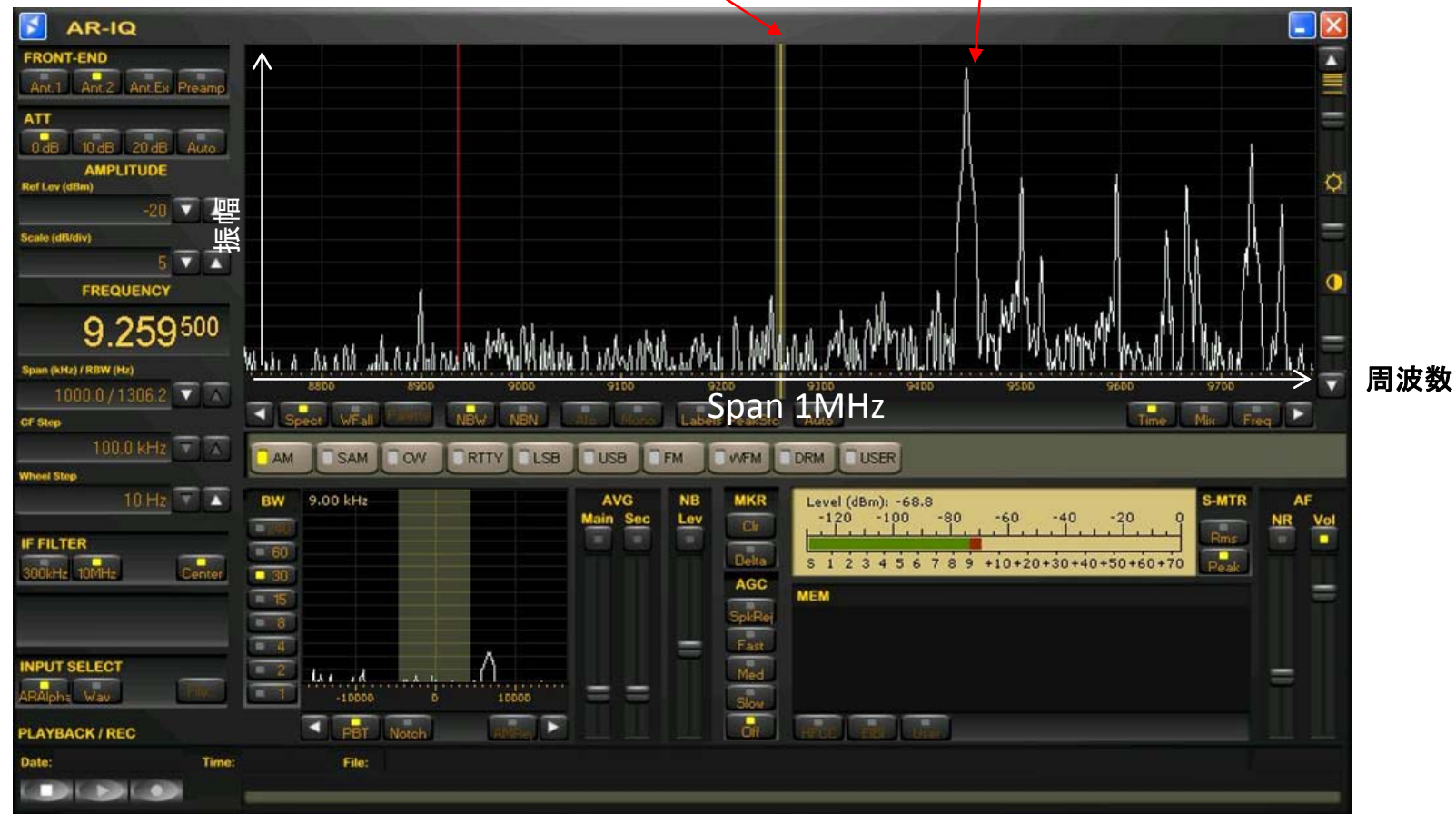
スペクトルでピークが見える回数のうち、視線流速が出せる程度ははっきりとしたピークがみえるのは、2015年3月3日10時30分、2015年3月6日13時30分、2015年3月6日14時00分の3回だけ。相互相関の値が0.6程度と高い。

バイスタティック受信@相島

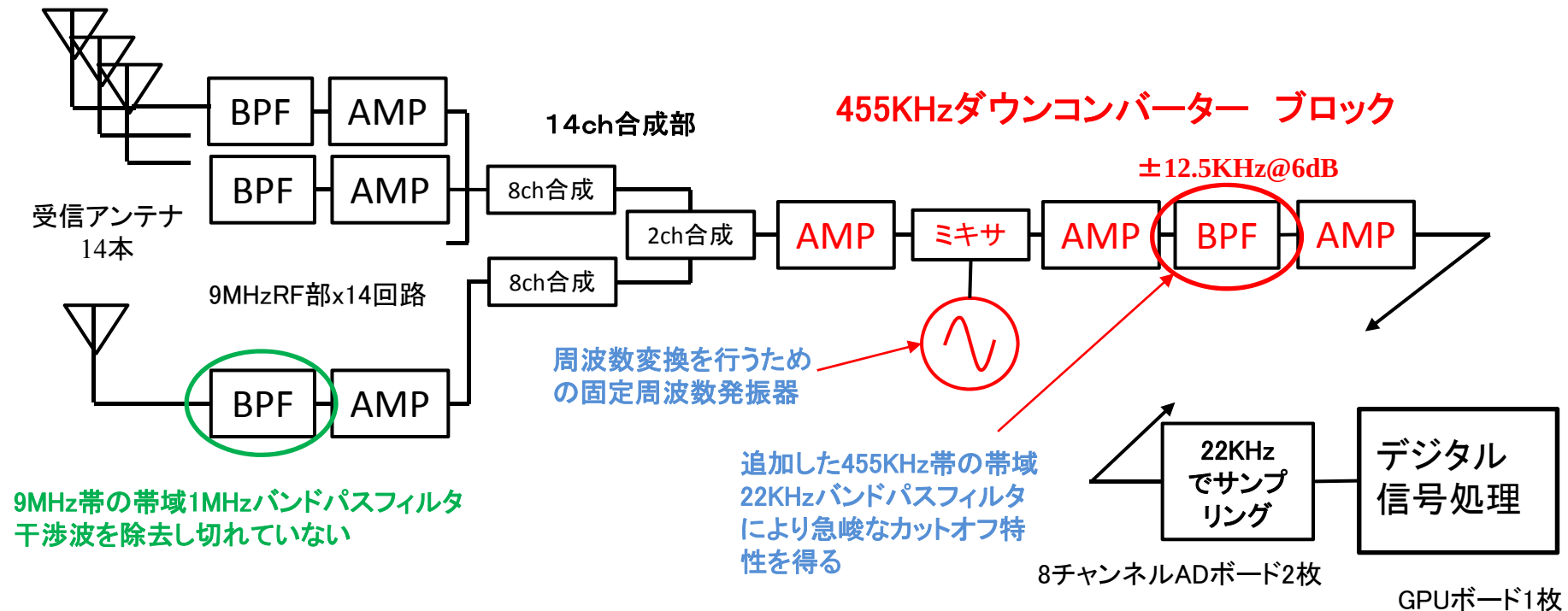
いったい何が受信を妨げているのか？

受信周波数中心

強力な干渉波の数々
これは放送の例



2015年2月 455KHzダウンコンバート受信実験



干渉波除去の考え方

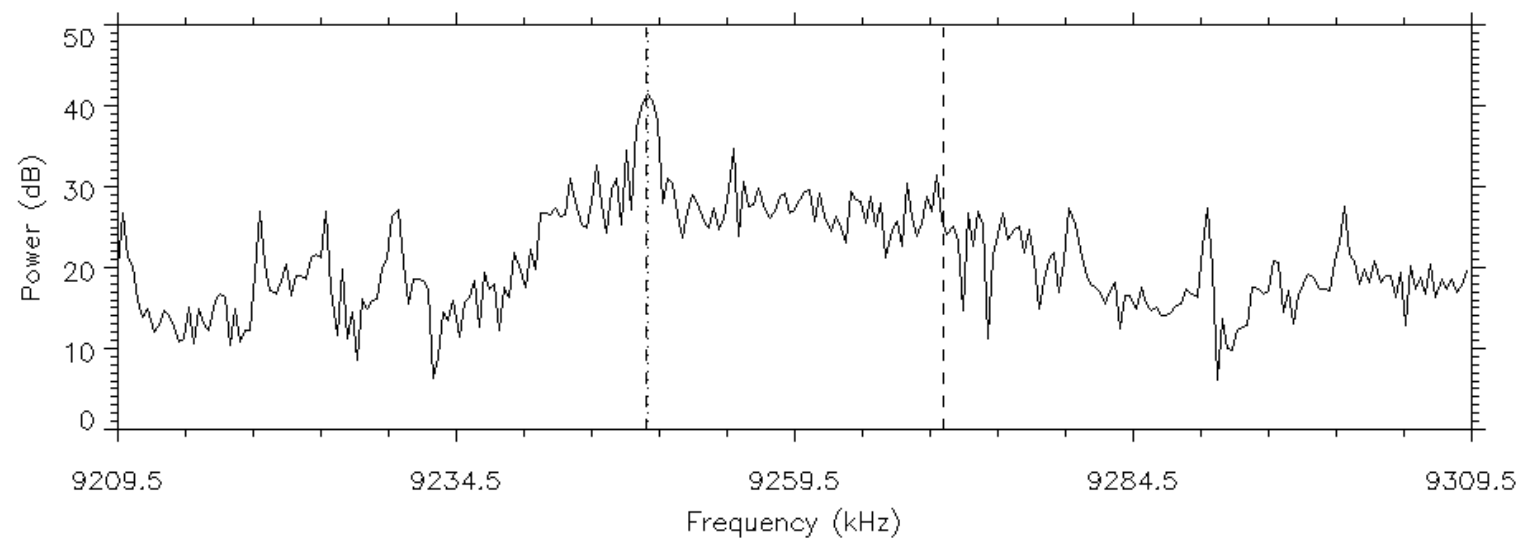
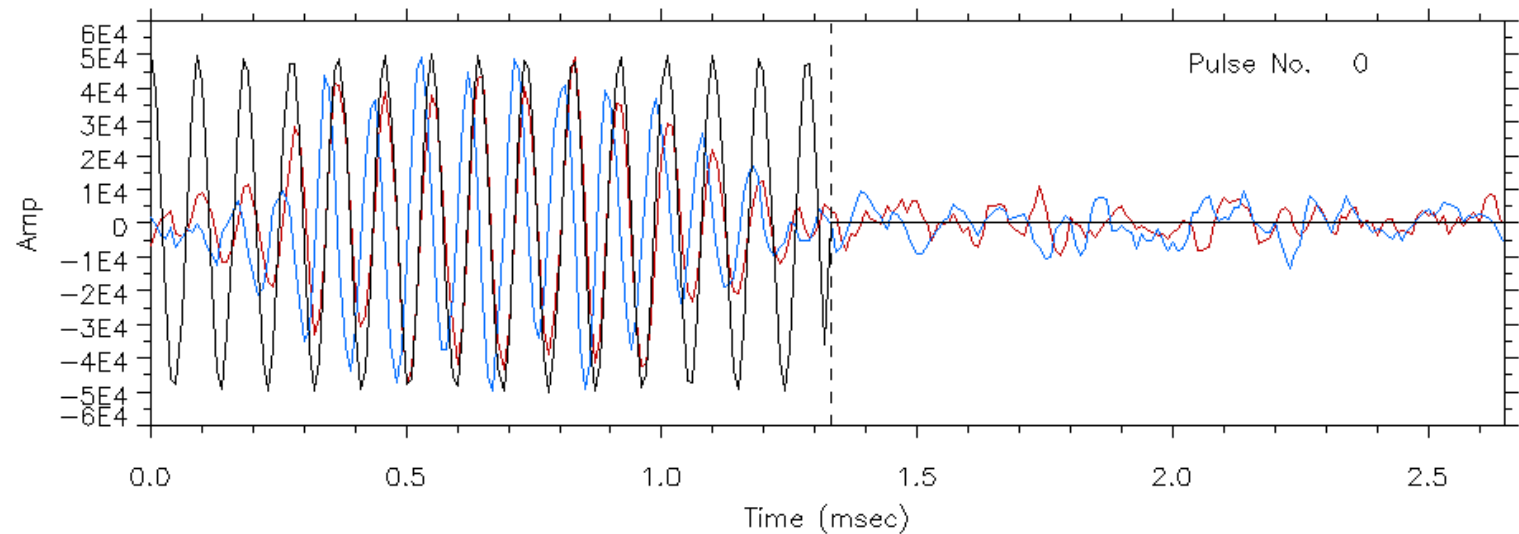
- ・海洋レーダの送信周波数9MHzの帯域でより必要とされる急峻なバンドパスフィルタを作るとは技術的にも製造コストも厳しさが要求される。
- ・受信電波を処理がやさしい低い周波数帯に変換する。
9000KHz帯から455KHz帯へ周波数変を行う(ヘテロダイン)受信方式を用いる。
455KHz帯域はラジオなどの通信機器が標準的に用いている処理周波数
急峻なバンドパスフィルタを得ることは容易である。

バンドパスフィルタ(Band Pass Filter) : 特定の周波数領域だけを通過させる濾波器

相島局でのバイスタ観測結果 RF 9MHz



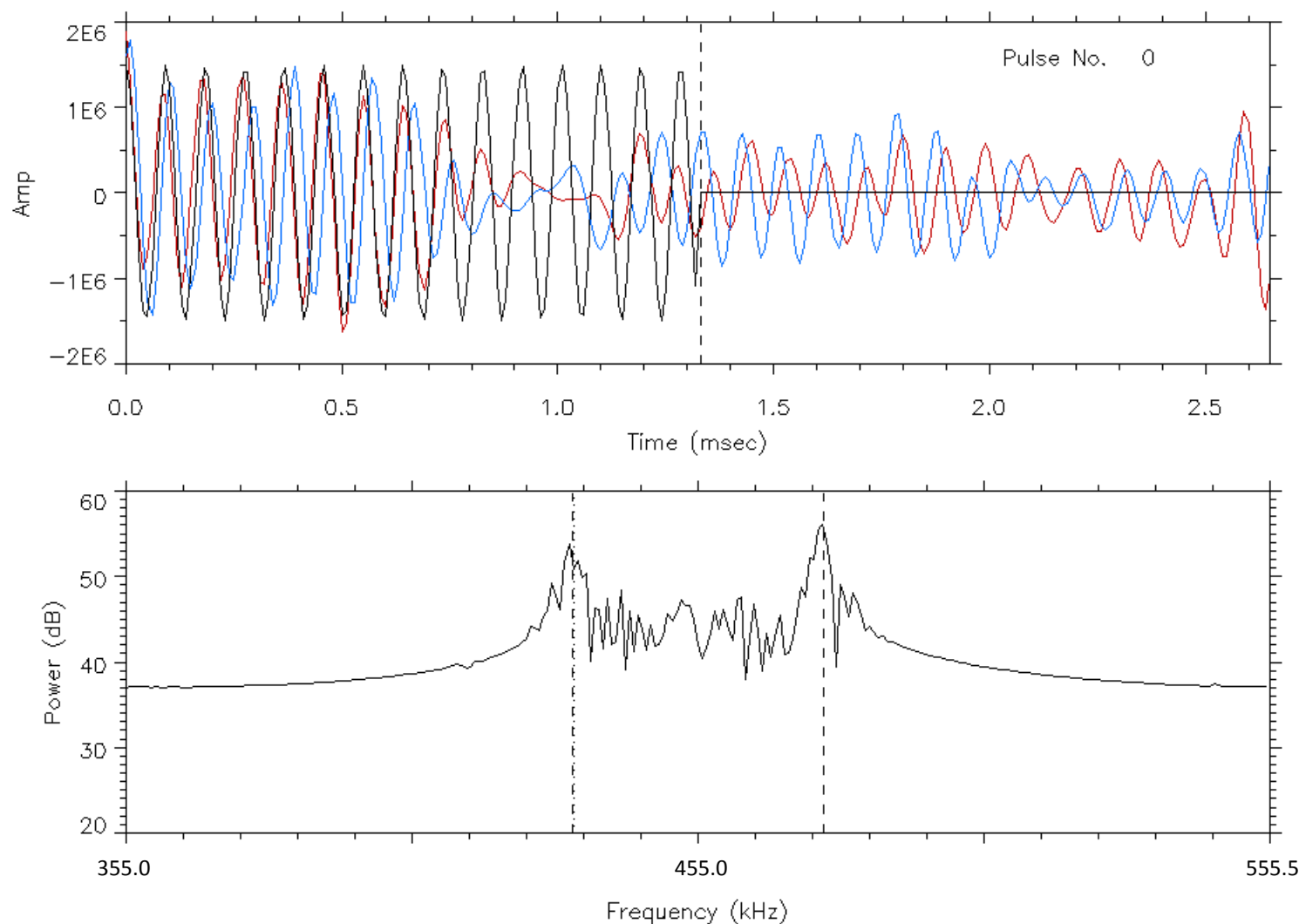
2015年02月07日 04時36分 12ch単独 相島



相島局でのバイスタ観測結果 IF 455KHz



2015年02月07日 10時06分 14ch合成→455KHzダウンコンバーター→BPF 相島

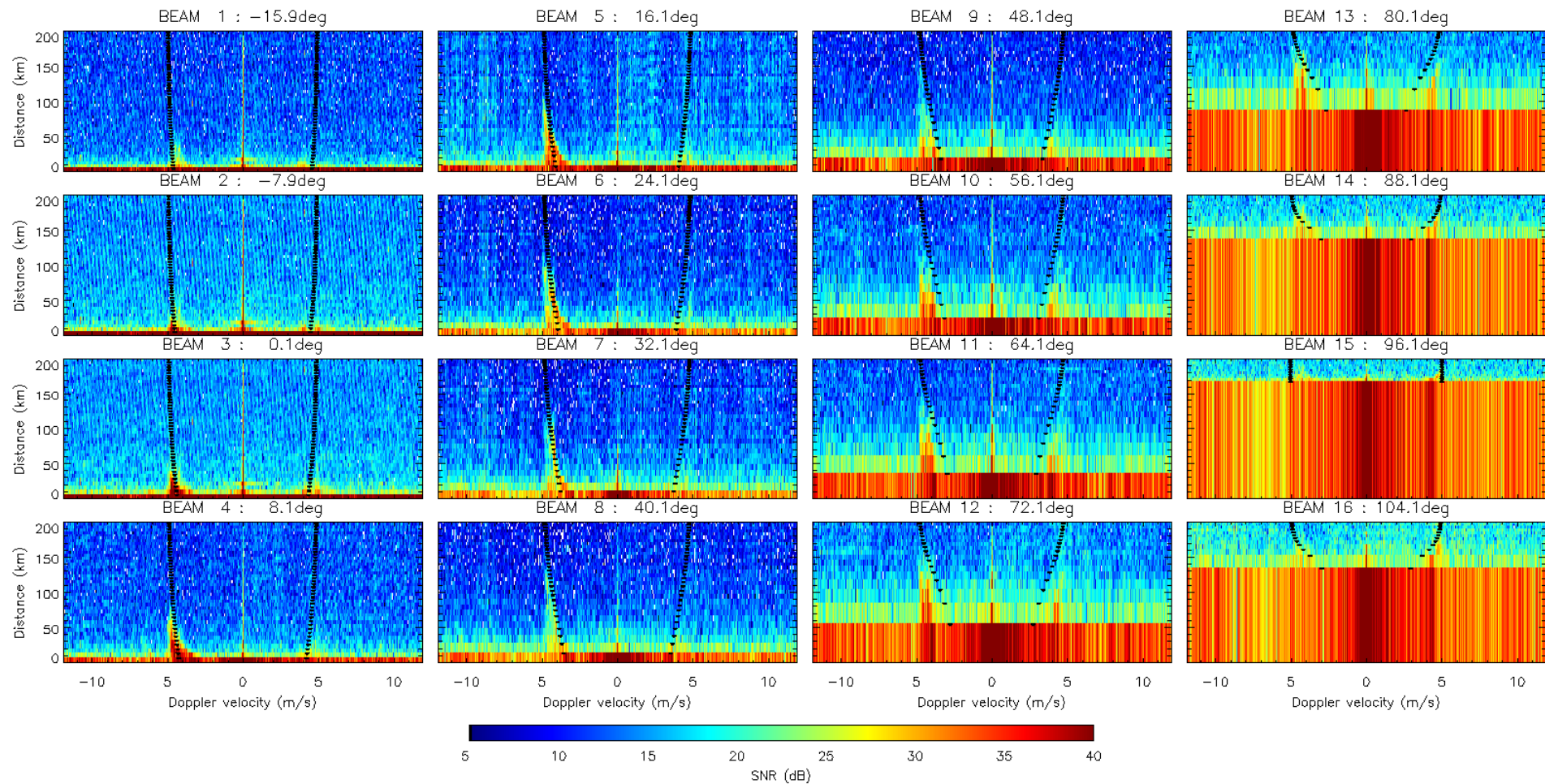


帯域外の干渉波を低減させるため455KHzにダウンコンバートし、狭帯域BPF(22KHz)を通過させた

バイスタティック受信@対馬



2015年10月17日23時30分



455KHzダウンコンバート方式に変更後、バイスタティック局を対馬局に変更した。
(送信局は相島局)

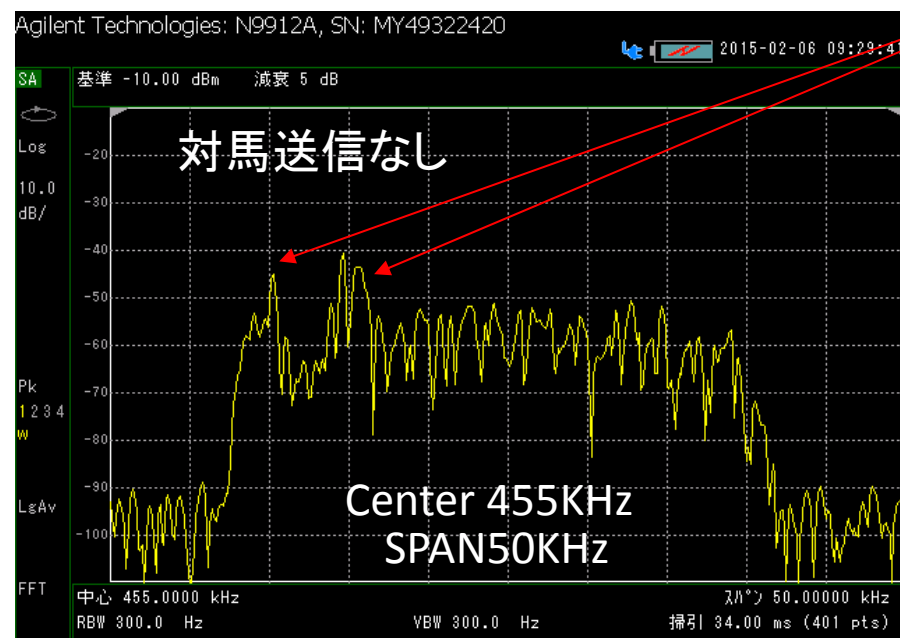
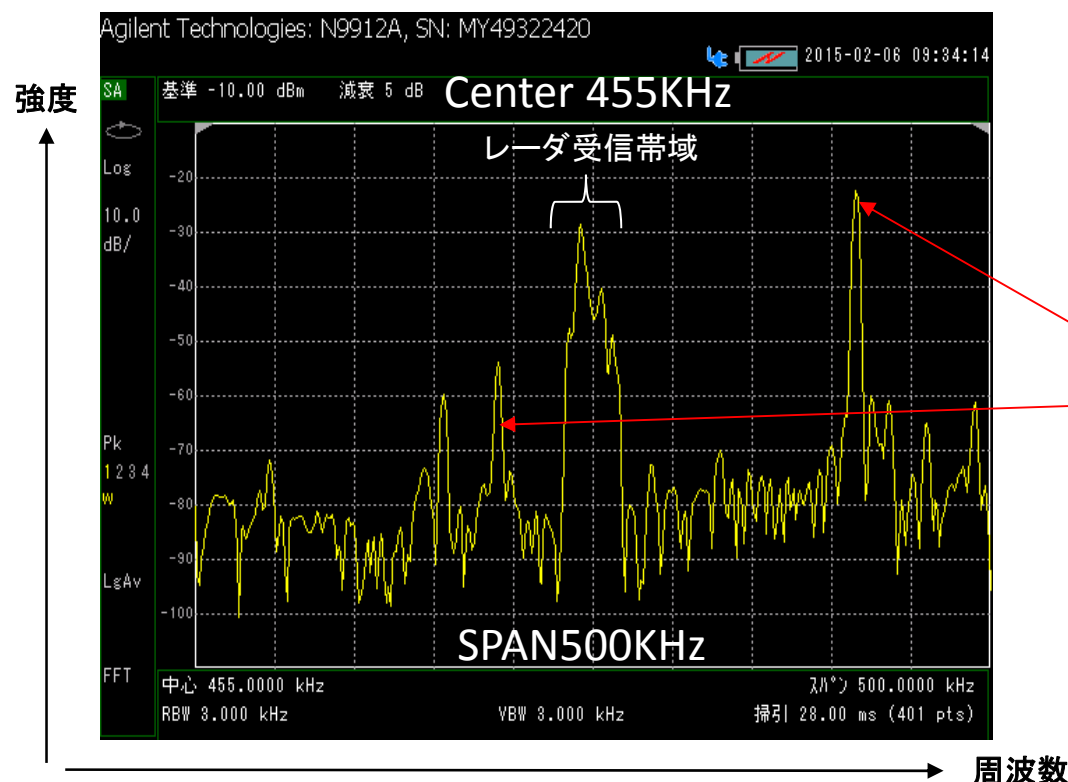
近傍に存在する 強い干渉波

帯域外にもとても
強い干渉波(放送局)

強い干渉波(放送局&パルス)
受信帯域内に存在する
これはフィルタでは除去できない

測定: 2015年2月6日午前9時@相島局

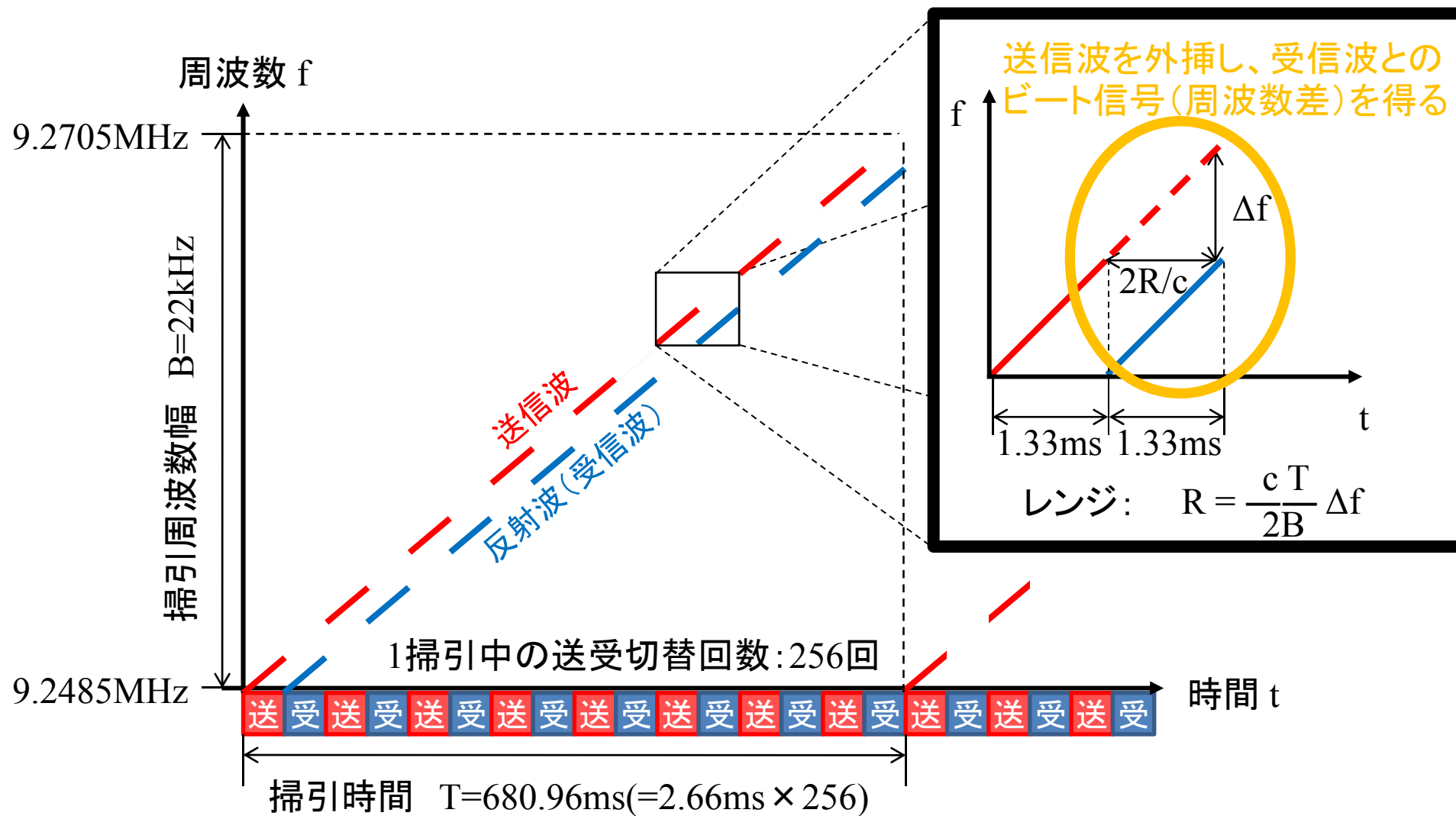
TXアンテナ→BPF→AMP(ZFL500)→455KHzダウンコンバーター→スペアナ



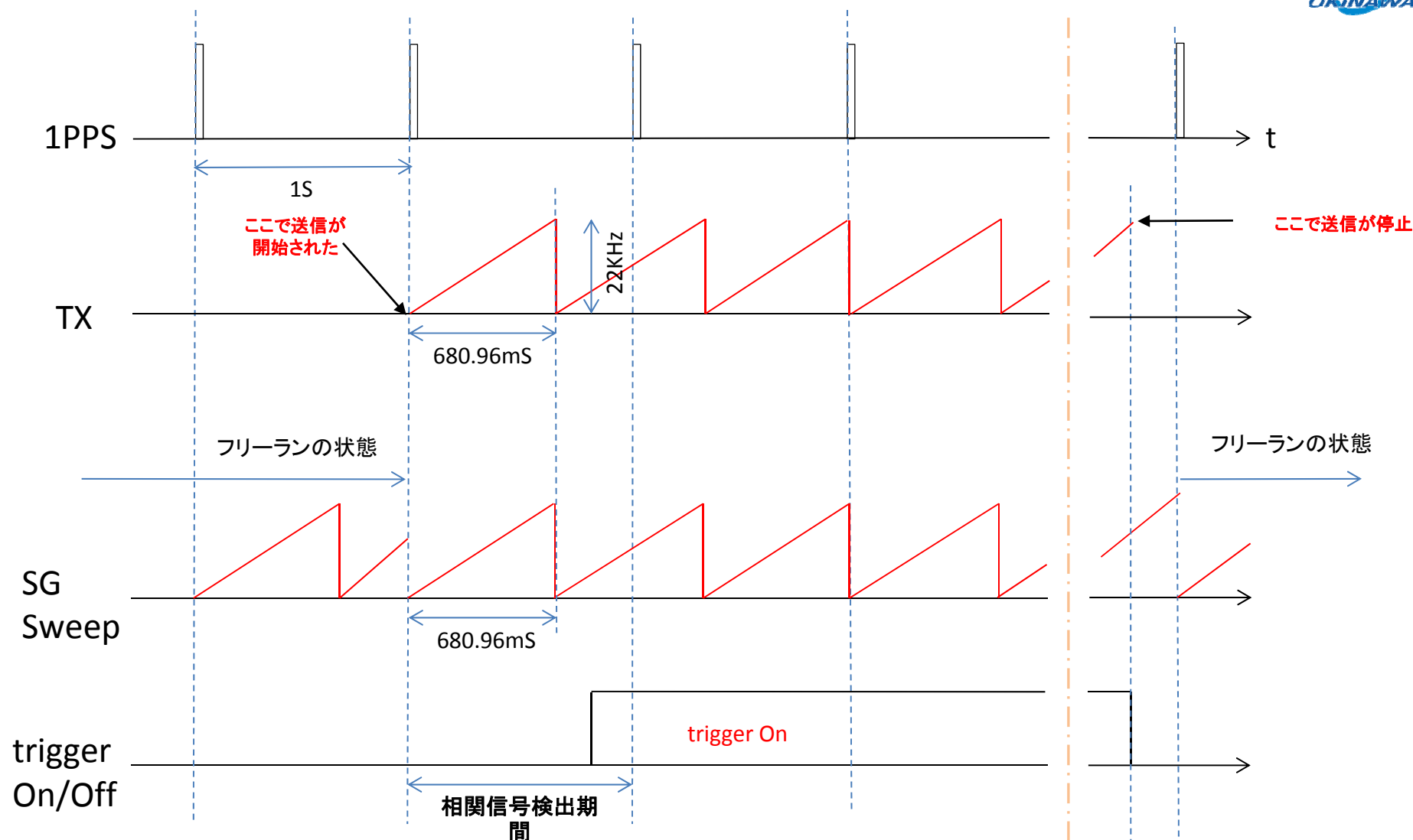
IF455KHz B.P.F22KHzダウンコンバートでバイスタ受信の問題点

- ドップラーの検出は格段に向上した。しかし・・・
- 観測レンジが良くて100Kmくらいしか取れないようだ。
- まだ受信波のSNRに問題あり。
- 一定離れた周波数近傍の強力な放送波や正体不明の干渉波による妨害は、フィルタによる抑圧は効果があった。
- しかし、B.P.Fの窓である22KHz帯域内に混入してくる干渉波に対して効果は相変わらず無い。
- より鮮明なドップラーを得るにはSNRの向上が最も良い。
- 送信波は掃引しているので固定周波数発振でのダウンコンバートには限界がある。 ← 22KHzB.P.Fの利用に限定される
- バイスタ受信において、送信波と同期して局部発振周波数を掃引させると一定の受信周波数となるので、より狭帯域のB.P.Fの利用が可能となる。

遠距離海洋レーダ (FMICWレーダ) の観測原理



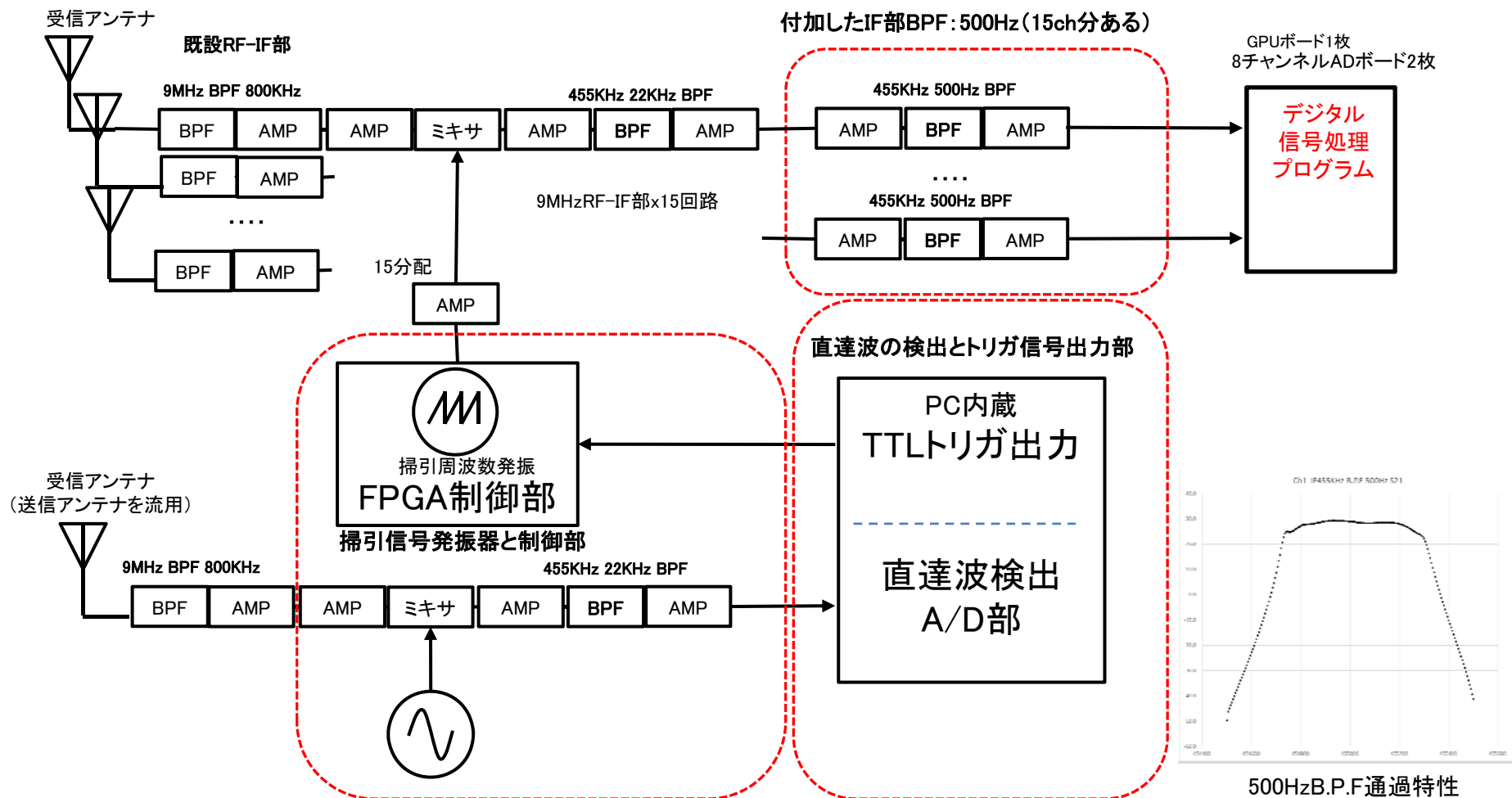
同期式バイスタティック掃引受信信号源の動作概要



動作説明:

掃引信号源(SG Sweep)は相関検出信号(trigger)が入力されるまで、1PPS信号の立ち上がりエッジで680.96ミリ秒の掃引を最初から繰り返す。掃引信号源(SG Sweep)は、送信波(TX)の存在を常時監視し、相関検出信号(trigger)が入力されると、1PPS信号の立ち上がりエッジにかかわらず680.96ミリ秒の周期で掃引を繰り返し継続する。

ビートダウン方式のために追加した500Hz B.P.F 部と検出部および掃引発振器

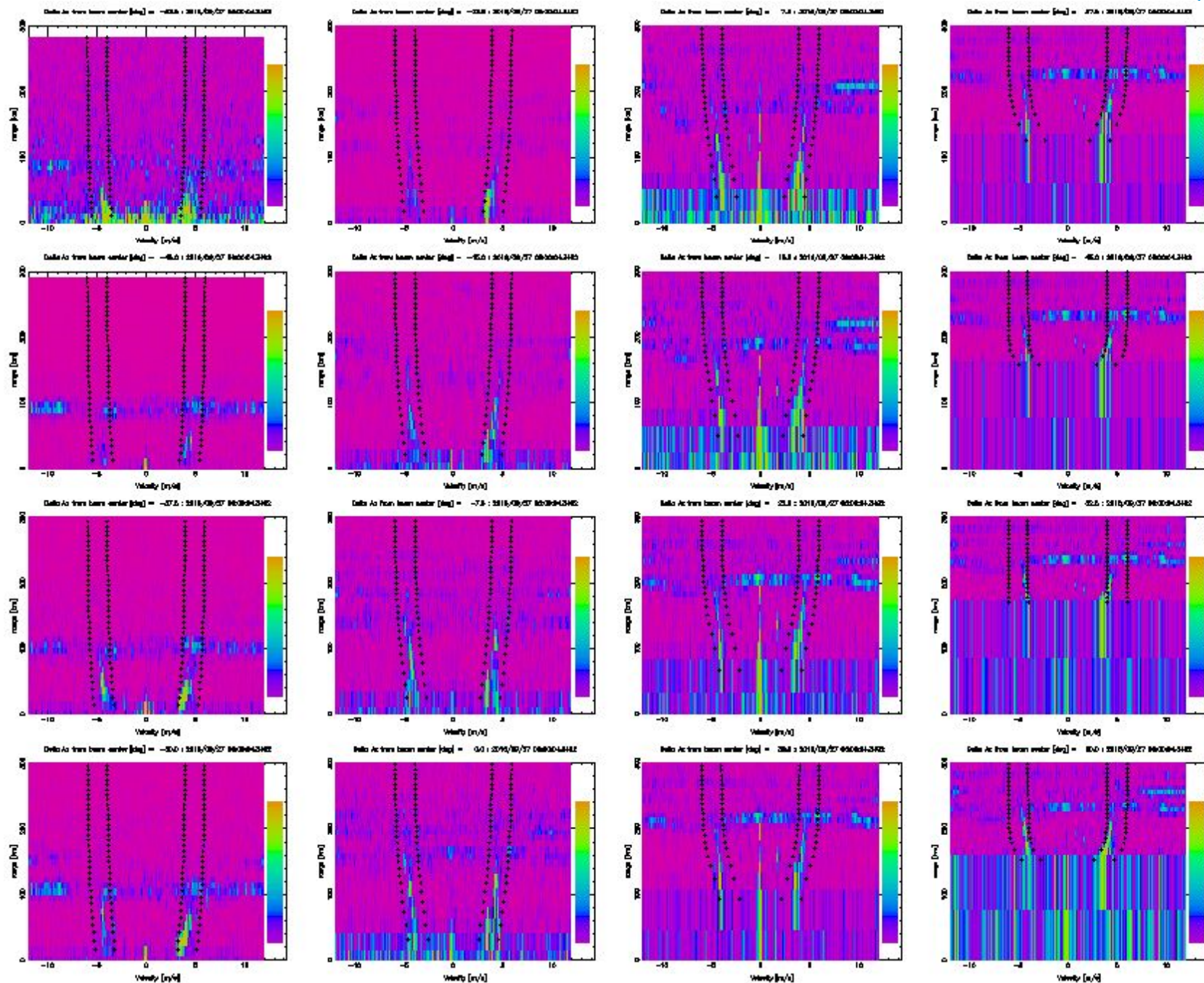


赤い部分がビートダウン方式のために追加した箇所

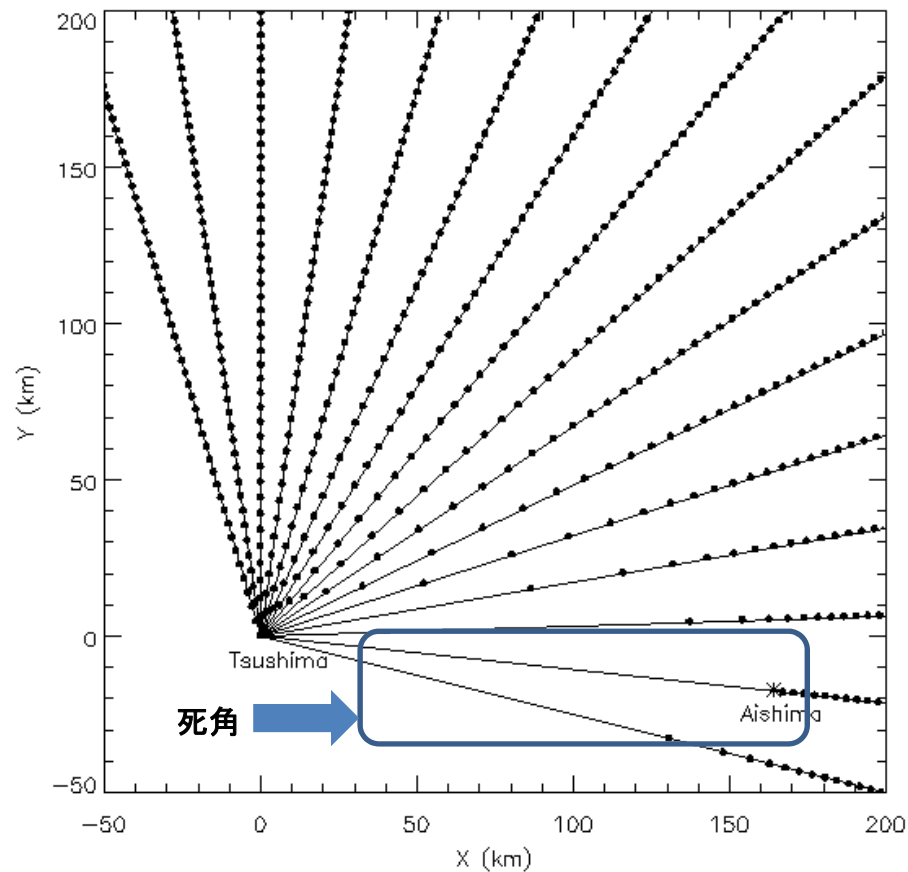
動作概要: 赤点線の囲い部分がビートダウンコンバート方式に必要な追加機能部

1. 既設の22KHz・セラミックBPFの出力に水晶フィルタで構成される500Hz・BPFを追加した。15ch分
2. 増設の22KHz・BPFの出力1ch分を直達波検出部A/Dへ入力する。
3. 直達波検出A/D部では入力の直達波から相関処理を行い直達波の送信開始時間を推定し、掃引発振制御部へトリガを出力する。
4. 掃引信号はトリガ信号により直達波と同期して連続掃引を開始する。

2016年9月27日同期式ビートダウンで受信したドップラーの図

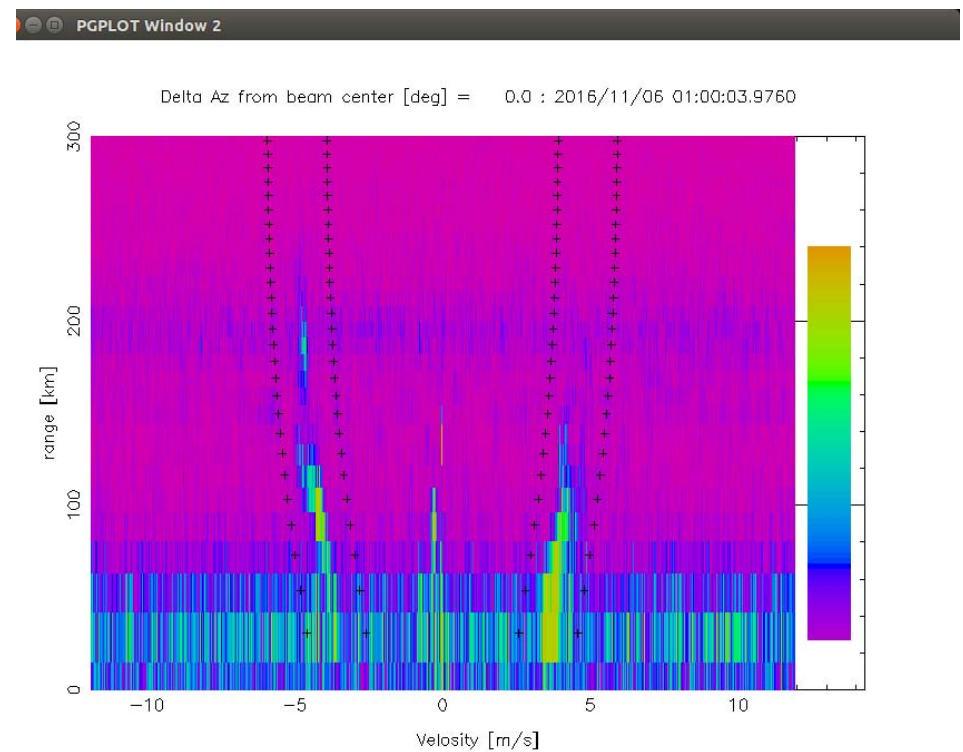


2016年11月6日 同期式ビートダウンで受信したドップラーと バイスタティック受信時の観測点の図



バイスタティック受信点の図

受信の観測点黒点がバイスタティック

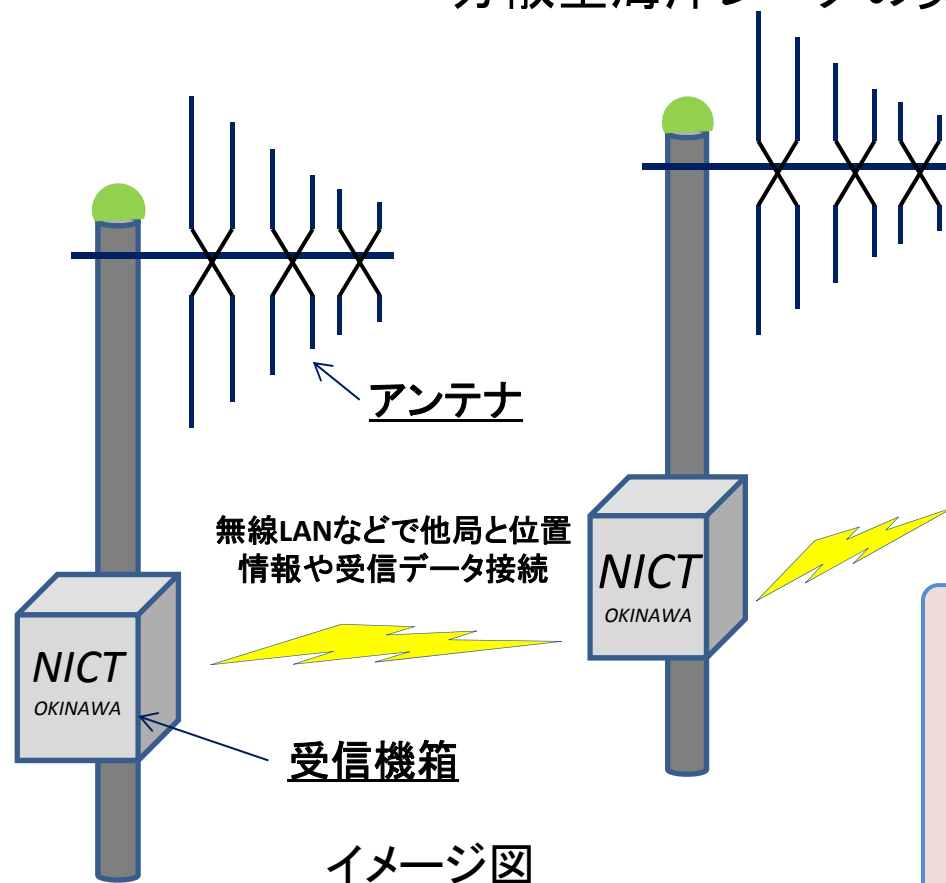


ドップラースペクトル図の例

対馬暖流観測実験 今後の予定



分散型海洋レーダの実験 2017年1月



イメージ図

分散型海洋レーダの開発コンセプト

無線機に安価で汎用性の高いソフトウェア無線装置をアンテナ毎に1台ずつ受信機(RF+A/D変換器)として取付、利用する。これにより1本1本のアンテナに受信機を備えた無線機が展開されることとなり、各受信機のタイミングおよびデータのやり取りを無線機間の無線で共有する事によりアンテナ構成全部が一つの無線システムとして稼働する実証実験を目指す。

技術課題1 分散型レーダでの位相同期技術

・アンテナとレーダー受信機能が一体となったレーダー素子をアレイ合成し、それぞれのレーダー素子を位相制御することで、複数の受信機を位相同期し、希望方向へのアンテナパターン形成するための分散型受信機の位相同期技術の開発。(同期信号供給の基礎技術は開発済み・**特許取得**)

技術課題2 コンパクト化とコストダウン技術

・通信技術開発の進んでいるソフトウェア無線技術を応用することによる機器のコンパクト化と廉価な機器の開発。

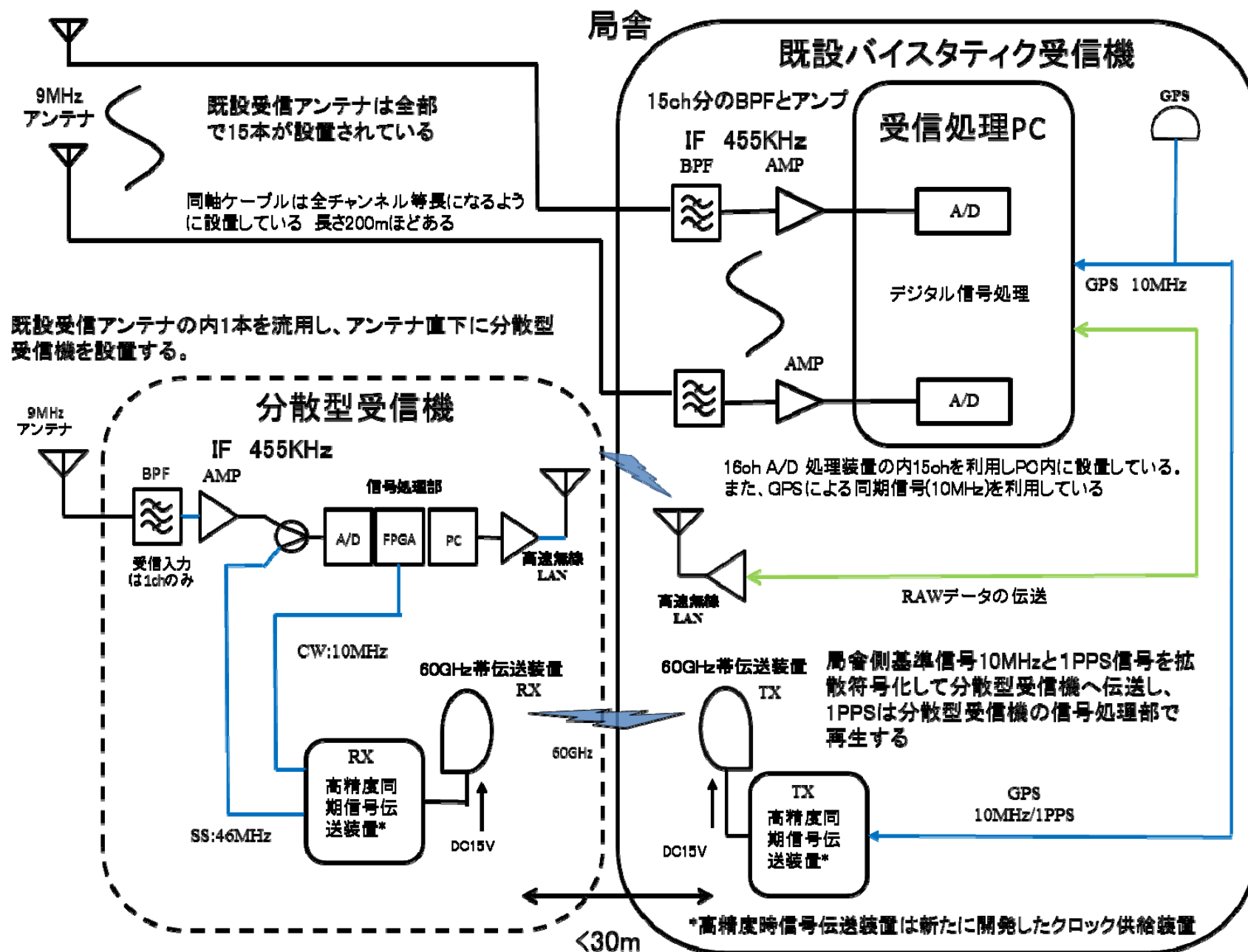
従来のレーダー技術では、大型・高コストである。

実用・普及のためには、小型化・廉化である事が不可欠。

→ 量産化を前提にし、ソフトウェア無線で利用されているFPGAなどのデバイスを利用することによる機器のコンパクト化を行い、併せて廉価なレーダの製造を目指す。

どこにでも 簡単に 配線いらず

分散型海洋レーダ受信システムの実証実験概要



まとめ



- 2013年5月科研費採択・土地電力通信交渉・測量伐採開始
 - 2014年5月環境配慮型移動式アンテナ設置完了・局舎施設完成
6～8月与那国局装置を相島に設置 2局によるモノスタティック観測を実施
 - 2014年12月 RF1MHzB.P.F+A/D受信システム観測開始
対馬局を送信局とし相島局をバイスタ受信局として観測を開始したが相島局において雑音レベルが高いことが原因と推測される理由によって、相島局でドップラスpekトルの検出に失敗が続いており、実質的な観測ができていなかった。
 - 2015年12月 IF455KHzB.P.F22KHzリアルタイムダウンコンバート観測開始
 - 2016年9月同期式ビートダウンIF455KHz・500HzB.P.F受信実験
 - 2016年10月同期式ビートダウンリアルタイム観測開始
 - 2017年1月分散型海洋レーダの受信実験を行う予定
-
- 短波帯での観測は、近隣国などの強力な電波干渉との分離作業。加えて電離層反射による世界中の短波帯利用者の干渉波との分離作業でもある。
 - 現在のところ有効な手法は、自局の希望する信号に合わせた強力な濾波(B.P.F)効果による信号対雑音比の向上を図ること。
- A blue arrow pointing upwards, indicating a transition or continuation of the content.
- 新しい信号処理法などの開発を考える技術課題