



沿岸域の環境影響評価のための UHF帯海洋レーダの開発

電力中央研究所

新井田靖郎、坪野考樹

琉球大学/ORNIS

藤井智史

沖縄科学技術大学院大学 御手洗哲司

ORNIS

石垣善教

「海洋レーダを用いた海況監視システムの開発と応用」

2025年12月3日
電力中央研究所

沿岸域の環境影響評価

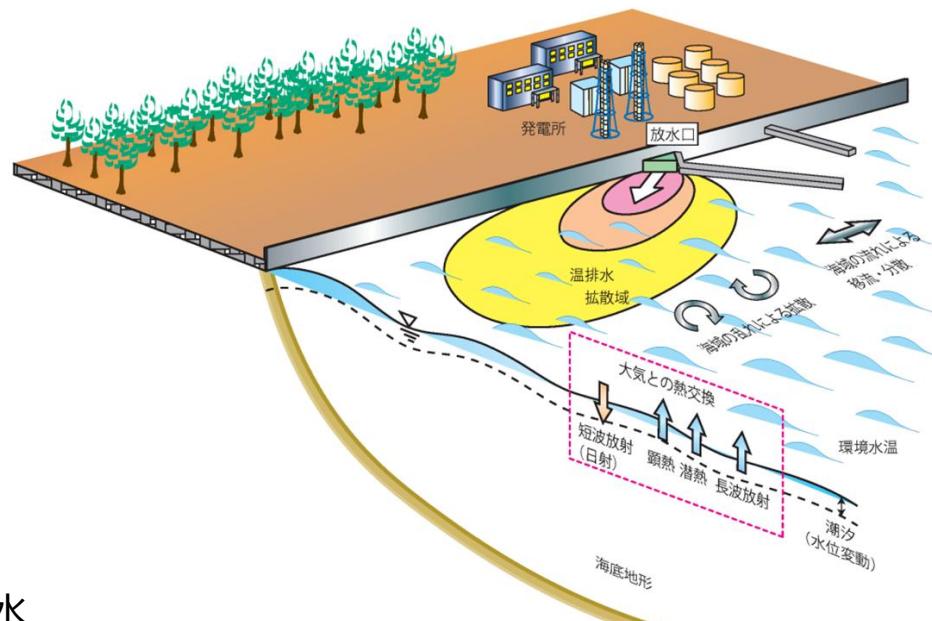
- 沿岸域での事業のうち一定の規模以上の発電所建設などを実施する際には、環境影響評価が必要となる。

発電所の環境影響評価における水環境の環境影響評価項目の例

大区分	中区分	小区分	影響区分	条件
水環境	水質	水の汚れ	施設の稼働	排水を行う場合
		富栄養化	施設の稼働	排水を行う場合
		水の濁り	建設機械の稼働	浚渫工事を行う場合
		水の濁り	造成等の施工による 一時的な影響	土地の造成工事実 施時
		水温	施設の稼働	温排水
	底質	有害物質	建設機械の稼働	浚渫工事を行う場合
	その他	流向・流速	地形改変及び施設 の存在	港湾施設の設置や 埋立を行う場合
		流向・流速	施設の稼働	温排水

沿岸域の環境影響評価

- ▶ 海洋環境への人為的な影響の評価は、沿岸域にきわめて近い範囲が特に対象となる。
- ▶ 沿岸域の流動観測が重要



取・放水水温度差は通常7°Cに設定される



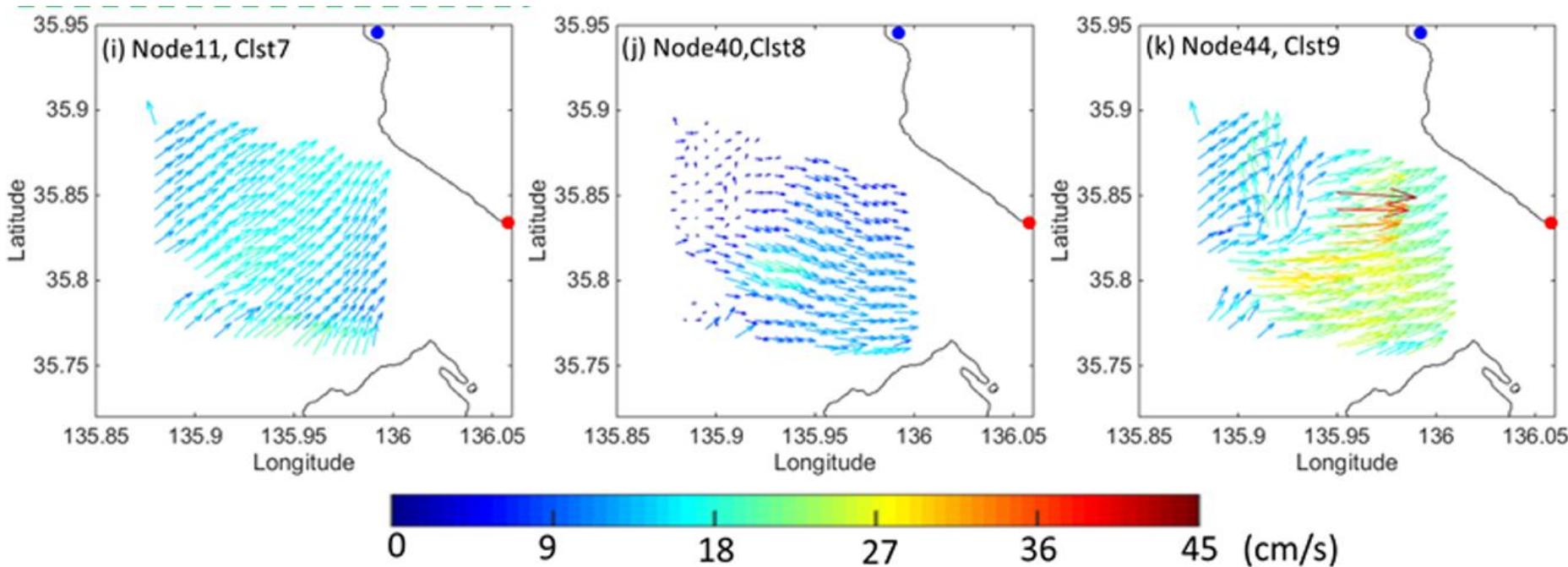
周囲の海水温(環境水温)より高温の水が放水

温排水

排水の拡散過程には沿岸域の流れが
大きな影響を与える

既存の海洋レーダの観測範囲

- ▶ 海洋観測を目的として開発されたHF帯あるいはVHF帯のレーダは流動場を連続的・2次元的に計測することができる。
- ▶ 沿岸域を対象とした場合は解像度が不足することが課題であった。



VHF帯海洋レーダによる流動場の観測例

参考)新井田ら、自己組織化マップを用いた冬季若狭湾東部海域の表層流動パターン抽出、土木学会論文集(海岸工学)、2015

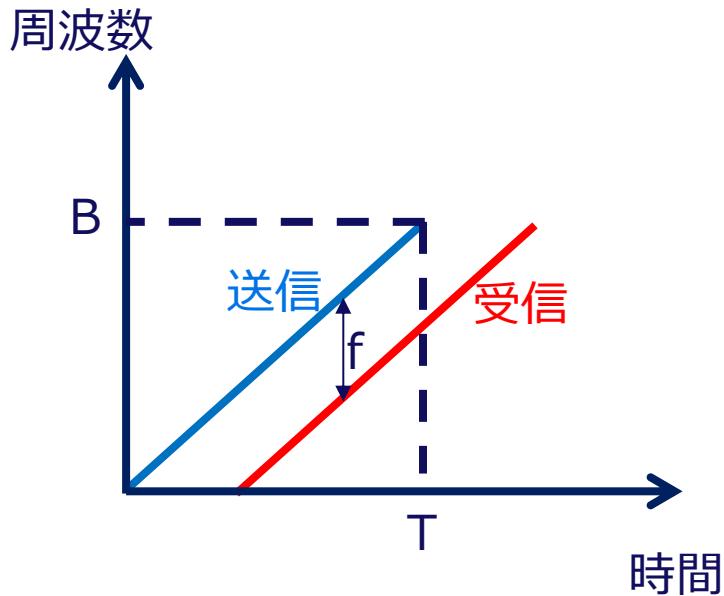
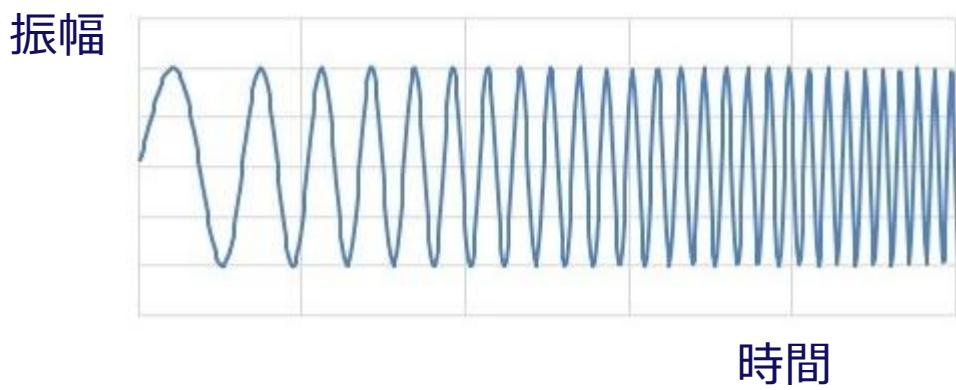
UHF帯海洋レーダへの期待と本研究の目的

- HFレーダ、VHFレーダでは環境影響評価が対象とする比較的狭い範囲の海洋流動観測は難しい
- より高い周波数の電波を使えば、陸地に近い場所を高解像度計測できるかもしれない。
- 本研究ではUHF帯の海洋レーダを開発することを目的とする

	アセス要求性能	HFレーダ	VHFレーダ	UHFレーダ
代表的な周波数	-	24.515MHz	41.9MHz	412.718MHz
観測範囲	200~2000m	2,000~40,000m	1,500m~20,000m	(理論上) 131~10,000m
解像度	100~200m	1000m	500m	(理論上) 131m

海洋レーダにおける空間解像度

- ▶ FMCWレーダでは送信波の周波数を変化させて、返ってきた受信波の周波数差から距離特性を算出する。



$$f = \Delta f \frac{2r}{c} = \frac{B}{T} \frac{2r}{c}$$

海洋レーダにおける空間解像度

- ▶ 空間解像度をあげるためには高周波の電波を用い、周波数掃引幅を大きくすることが有効
- FMCWレーダは用いる周波数掃引幅 B によって空間解像度 Δr が決まっている
- 使用周波数に対する掃引幅の割合が高いとアンテナ特性に影響を与え、送受信電力の減衰要因となる。
- 沿岸域の流速の空間解像度を上げるためには、さらに高周波数のUHF帯を使用し、周波数掃引幅を大きくすることが有効である。

$$\Delta r = \frac{c}{2B}$$

開発するUHF帯海洋レーダの仕様について

- ◆ 琉球大学は総務省と協議を行い、特定実験試験局として、中心周波数412.718MHz、周波数掃引幅B=1.1375MHzの使用許可を得た。
- ◆ B=1.1375MHzの海洋レーダの距離分解能 Δr は以下の通りとなる。

$$\Delta r = \frac{c}{2B} = \frac{3 \times 10^8}{2 \times 1.1375 \times 10^6} = 131.9 \text{ m}$$

- ◆ $f_r=412.718\text{MHz}$ の波長 λ_r は

$$\lambda_r = \frac{c}{f_r} = \frac{3 \times 10^8}{412.718 \times 10^6} = 0.7269 \text{ m}$$

- ◆ ブラック散乱共鳴機構の共鳴条件を満たす波浪波長 λ_w は

$$\lambda_w = \frac{\lambda_r}{2} = 0.3634 \text{ m}$$

- ◆ 測定水深 d は

$$d = \frac{\lambda_w}{4\pi} \sim 0.029 \text{ m}$$

開発するUHF帯海洋レーダの仕様について

- ◆ 既存の海洋レーダと同じく、深海波を仮定すると波浪の位相速度は

$$V_w = \sqrt{\frac{g\lambda_r}{2\pi}} = 0.753 \text{ m/s}$$

- ◆ ドップラ一周波数 f_0 は

$$f_0 = \frac{2V_w}{c} f_r = 2.07 \text{ Hz}$$

- ◆ 表層流速 V_s は

$$V_s = \frac{c(f_d \pm f_0)}{2f_r} = 0.363(f_d \pm 2.07)$$

- ◆ 観測された一次散乱スペクトルピーク周波数から共鳴した波浪成分の2.07Hzを引いて表層流速成分のドップラーシフトを得て、表層流速を算出する。
- ◆ 観測最大流速を $\pm 2 \text{ m/s}$ とすると、ドップラ一周波数偏移の範囲は約 $\pm 8 \text{ Hz}$ となり、サンプリング周期に相当する掃引時間を $1/16 = 0.0625 \text{ s}$ とする。

開発するUHF帯海洋レーダの仕様について

- ◆ 許可を得ている送信電力は10Wである.
- ◆ 右図より, UHF帯では10km～20kmの伝播で電力が8dB減衰する.
- ◆ この時, 受信電力Yは1.5W程度であり, 観測には十分である.

$$Y = 10W \times 10^{(-8/10)} = 1.5W$$

図. UHF帯電波の海上での地表波電波曲線

USRP

- ◆ 本研究では無線周波数の信号入出力モジュールであるEttus Research社 USRP N210を使用する。
- ◆ USRP N210はDaughterboardを変更することで取り扱える周波数を変更できる。



図. Ettus Research社USRP N210

ソフトウェアの開発

▶ ソフトウェアの開発はGNU RadioとMatlabを使って実施している。

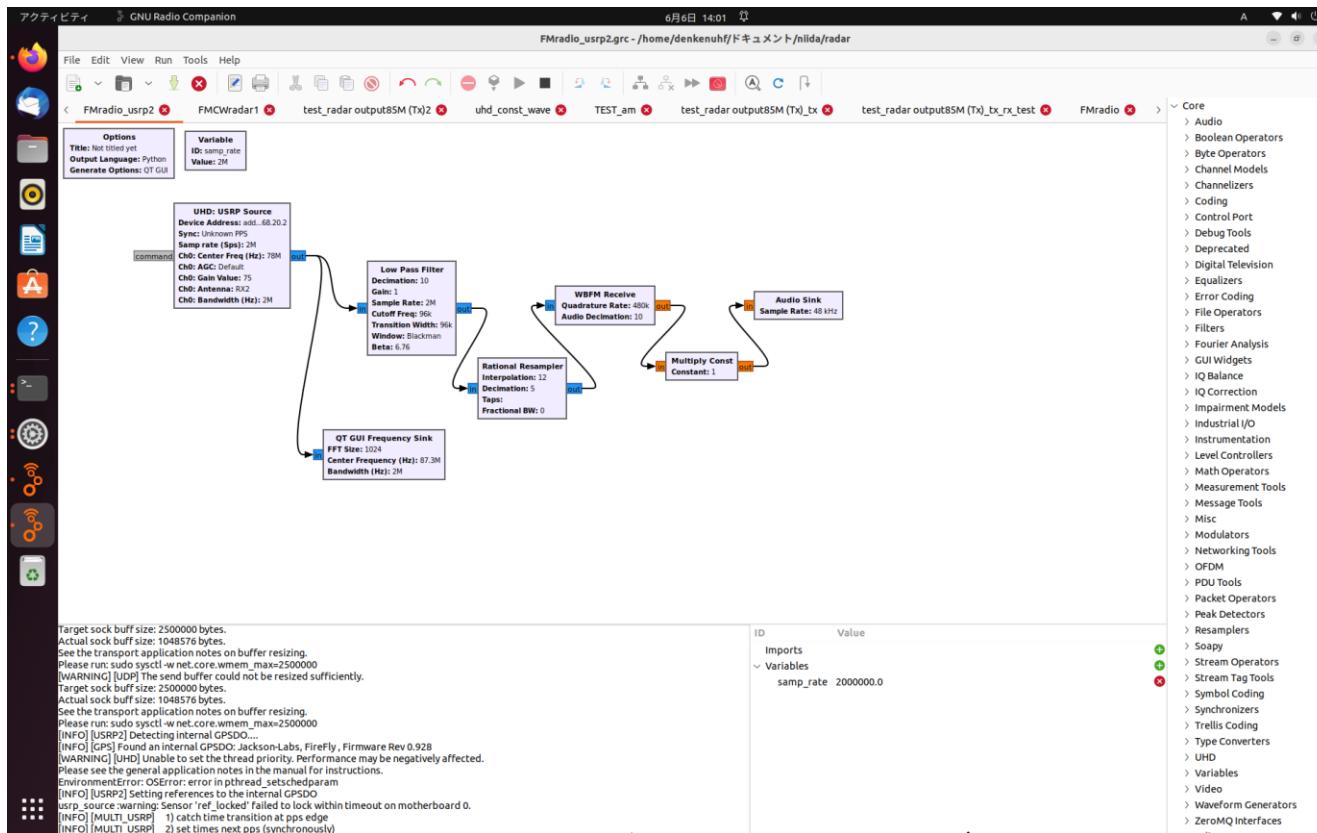
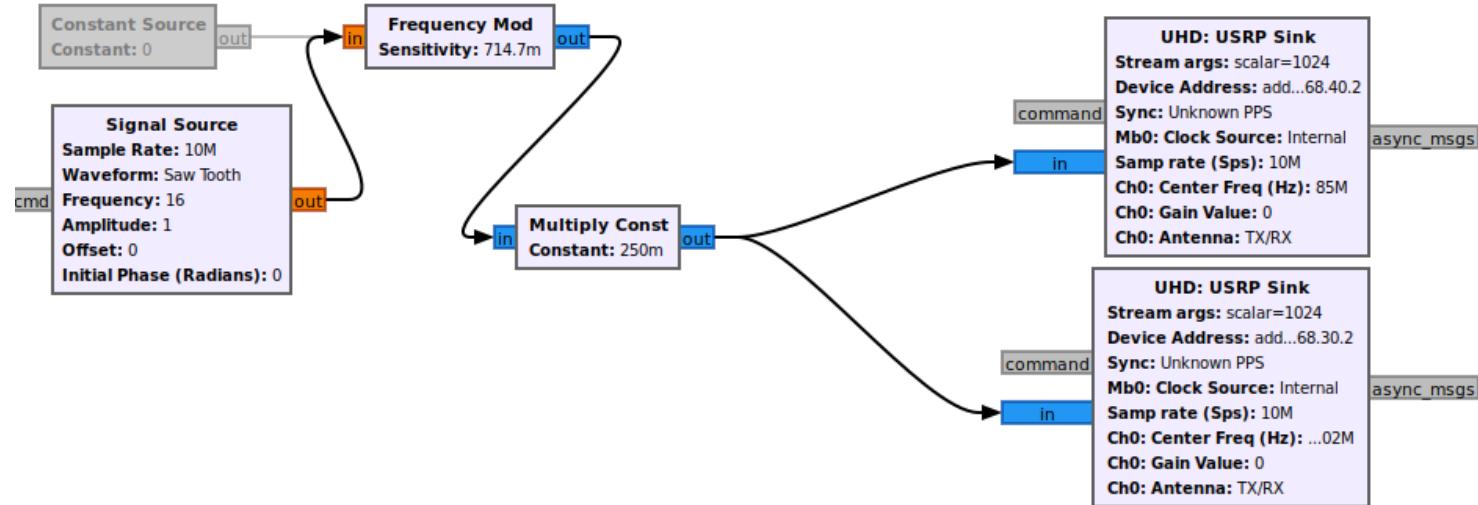


図. GNU Radio(FMラジオを聞くフローグラフ)

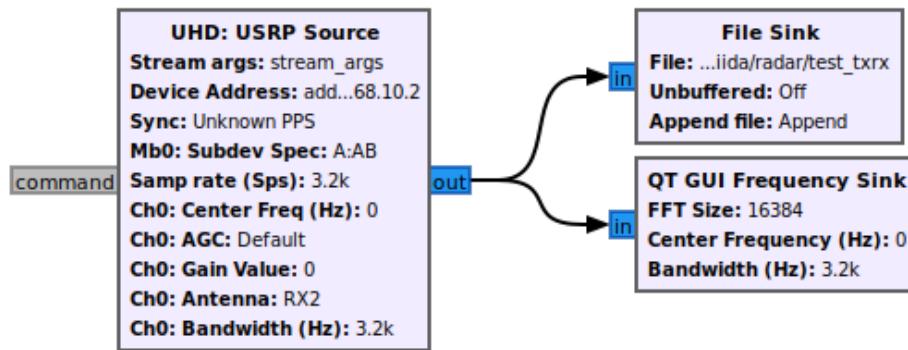
送信部の構成

- ◆ 送信部のGNU Radioのフローグラフは波形を生成するSignal SourceとFM変調を行うFrequency Mod, 振幅を調整するMultiple Const, USRPから出力するUSRP Sinkで構成される。

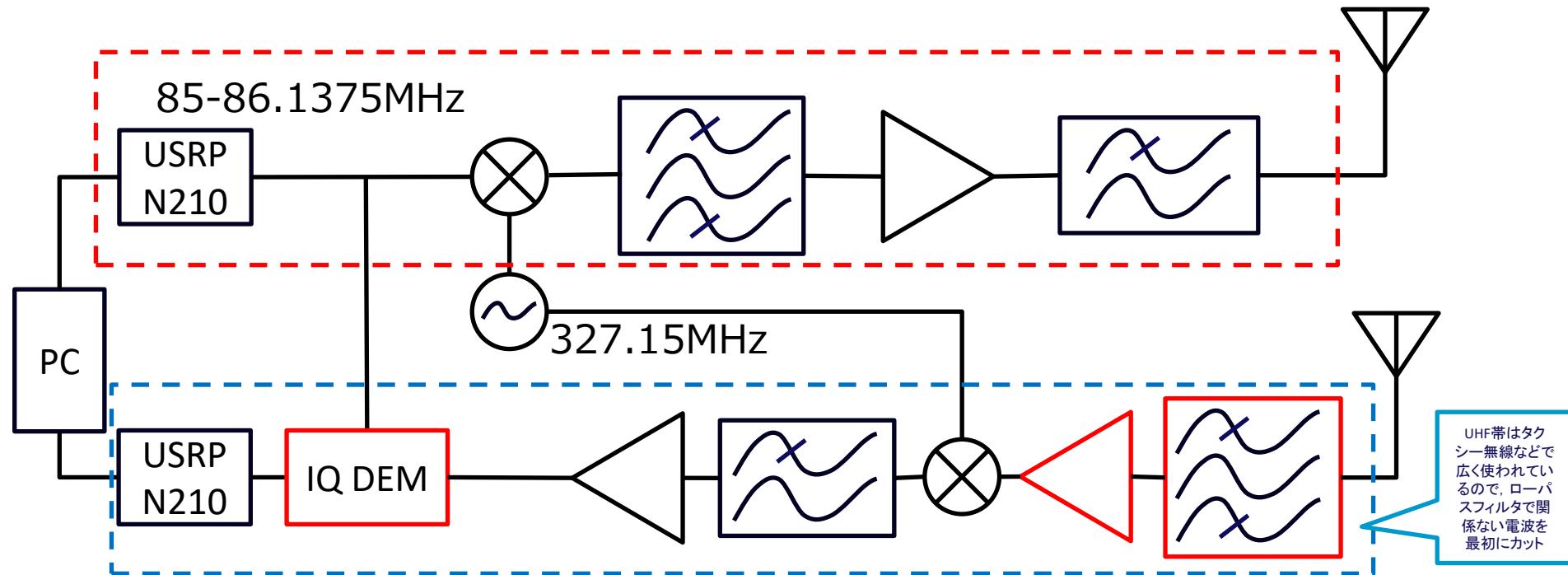


受信部の構成

- ◆ 受信部のGNU RadioのフローグラフはUSRP SourceとFile Sinkのみで構成される。

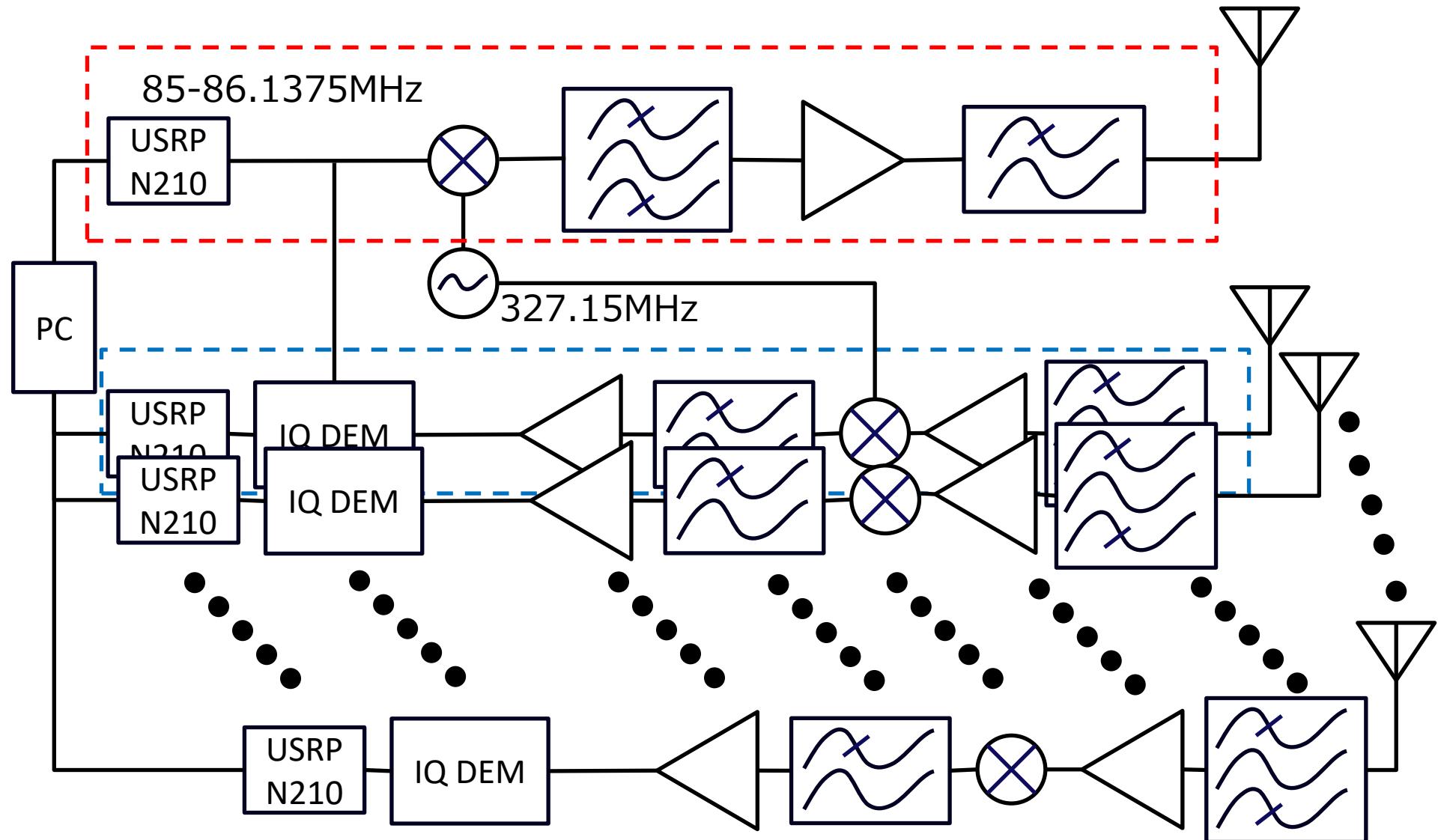


海洋レーダのシステムの構成



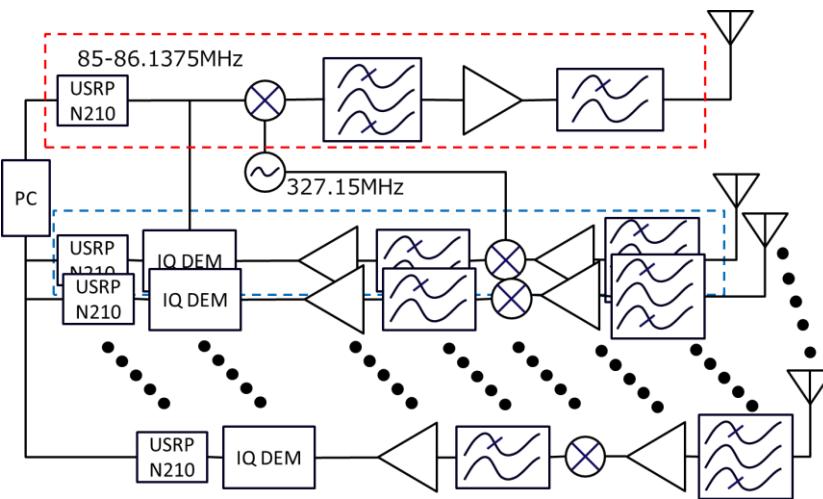
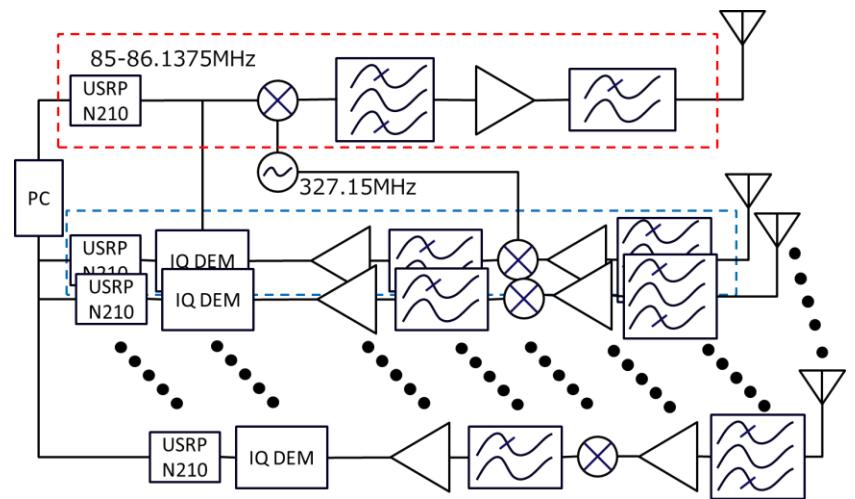
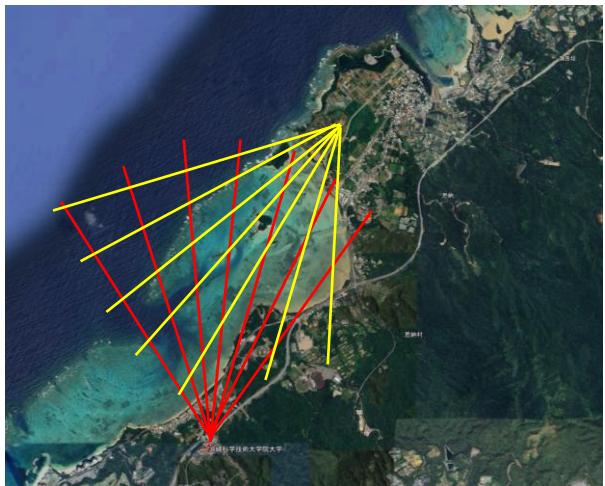
1. 送信機として使用するUSRPからは掃引時間0.0625 sで85MHzから1.1375Hz掃引させる信号を出力させる。USRPからの信号をLocal Oscillator(LO)の出力327.15MHzをミキサーで合成することで、中心周波数412.718MHzで周波数掃引幅1.1375MHzの信号を生成し、スリップアスを抑えるためのアナログフィルタやアンプを通したあとアンテナから送信する。
2. 受信部では、PC上での信号処理の負担を減らすため、受信アンテナで捉えた信号に対してLOの出力を用いて周波数を落とした後、送信側のUSRPの出力で同期検波を行って生成した送信信号と受信信号の周波数差をUSRPに入力する。

海洋レーダ 1 基分のシステムの構成



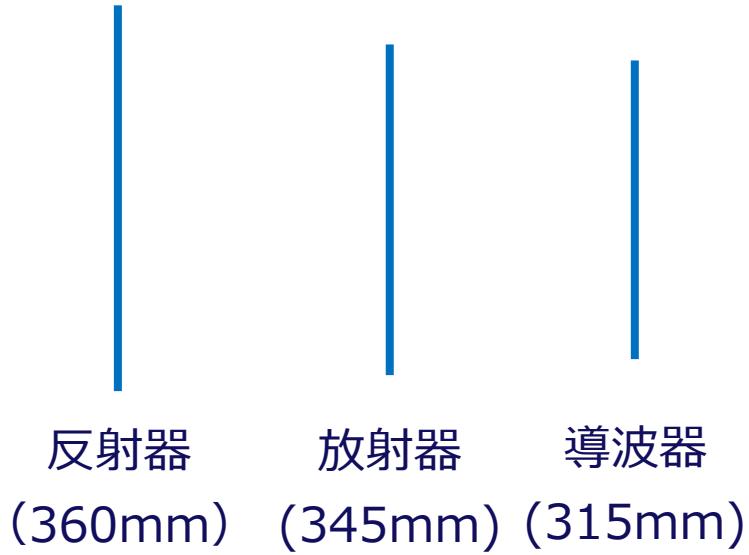
海洋レーダ 2 基分のシステムの構成(最終目標)

2基のUHF海洋レーダによる計測のイメージ



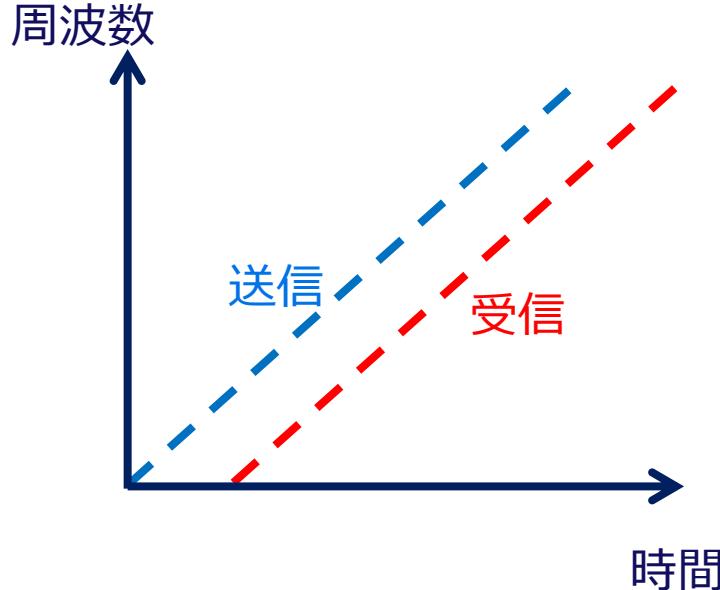
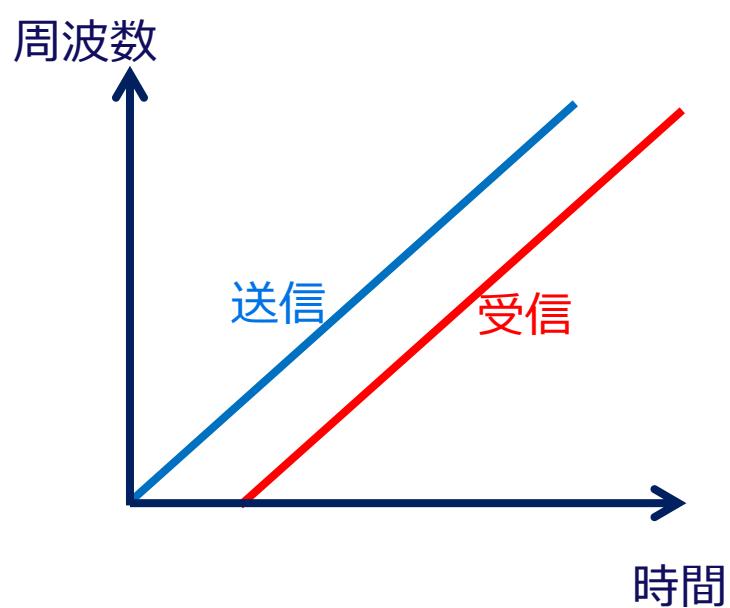
受信アンテナ

- 受信アンテナは3エレメントハムアンテナとする。
- 中心周波数412.9725MHzに適したもの
- 3エレメントハムアンテナを8本リニアに並べてアレイアンテナとする。



送信アンテナ

- ▶ 現在の一般的な海洋レーダはFMICWレーダ
- ▶ FMICWレーダでは、送信信号がOFFのときに後方散乱波を受信する仕組みで、近傍に設置された送信アンテナからの送信波が直接受信アンテナへ混入するのを防ぐ
- ▶ FMICWレーダでは不感距離が生じてしまう欠点もある。
- ▶ 近距離になればなるほど受信波到達までの時間が短く、反射した電波が受信できず計測できることになる



送信アンテナ

- 本研究では近距離計測を目的とするため、FMCWレーダを採用する
- FMCWレーダは受信時にも送信電波を放射するため、受信アンテナに送信アンテナから直達波が入り込む。したがって送信アンテナから電波が受信機に与える影響を低減する必要がある。
- 特定の方向に指向性をもたせ、NULL点をつくる必要がある。



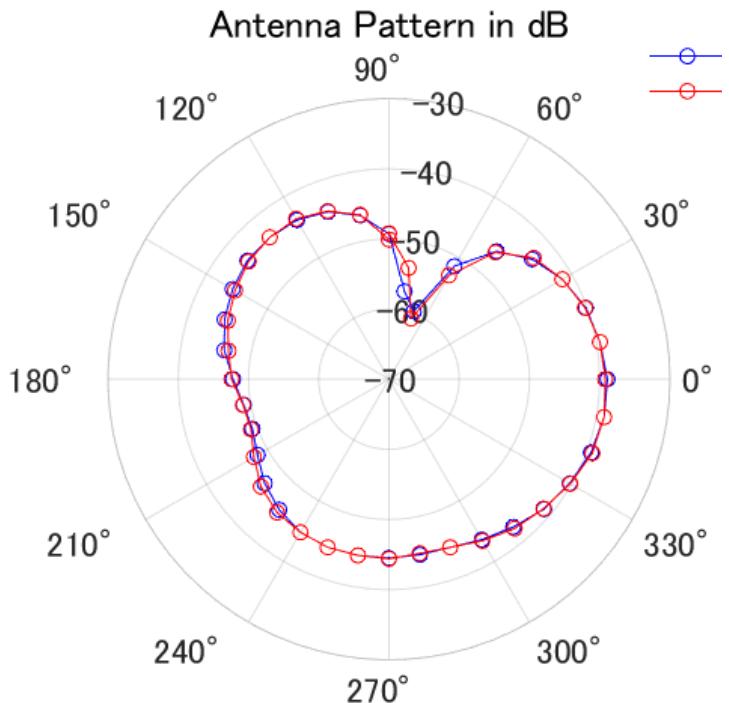
アンテナパターンのテスト

- 0度から360度まで10度刻みでアンテナ各方位の受信電力測定



アンテナパターンのテスト結果

- 90度付近でNULL点を観測
- 正面に指向性を持つアンテナパターン



- 2回計測し、1回目、2回目ともほぼ同じ値
- 90度付近(正確には70度)でNULL点(20dB以上減衰)を観測。
- 正面で指向性をもつアンテナパターンとなり、設計で3dB減衰する40度と-70度で、それぞれ3.1dB、4.5dBの減衰が観測
- 3dBの減衰の範囲は30度～-50度

まとめと今後の計画

- UHF帯の海洋レーダについて開発を進めている。
- UHF帯の海洋レーダについては観測実績が無いため、海面に照射したときの特性などについてもわかつていないので実際に確認する必要がある。
- 今後は実際に、UHF帯の電波を海面に向けて照射し、後方散乱を受信する。受信電波を解析し、海洋観測への適用性について検証する。