

アダプティブビーム形成による干渉波抑圧と Bragg散乱エコー明瞭化

高橋龍平^{*}，小柳智之^{**}，鈴木信弘^{*}，若山俊夫^{*}

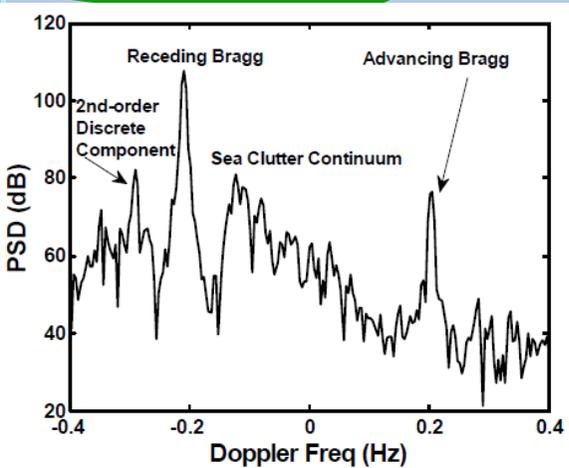
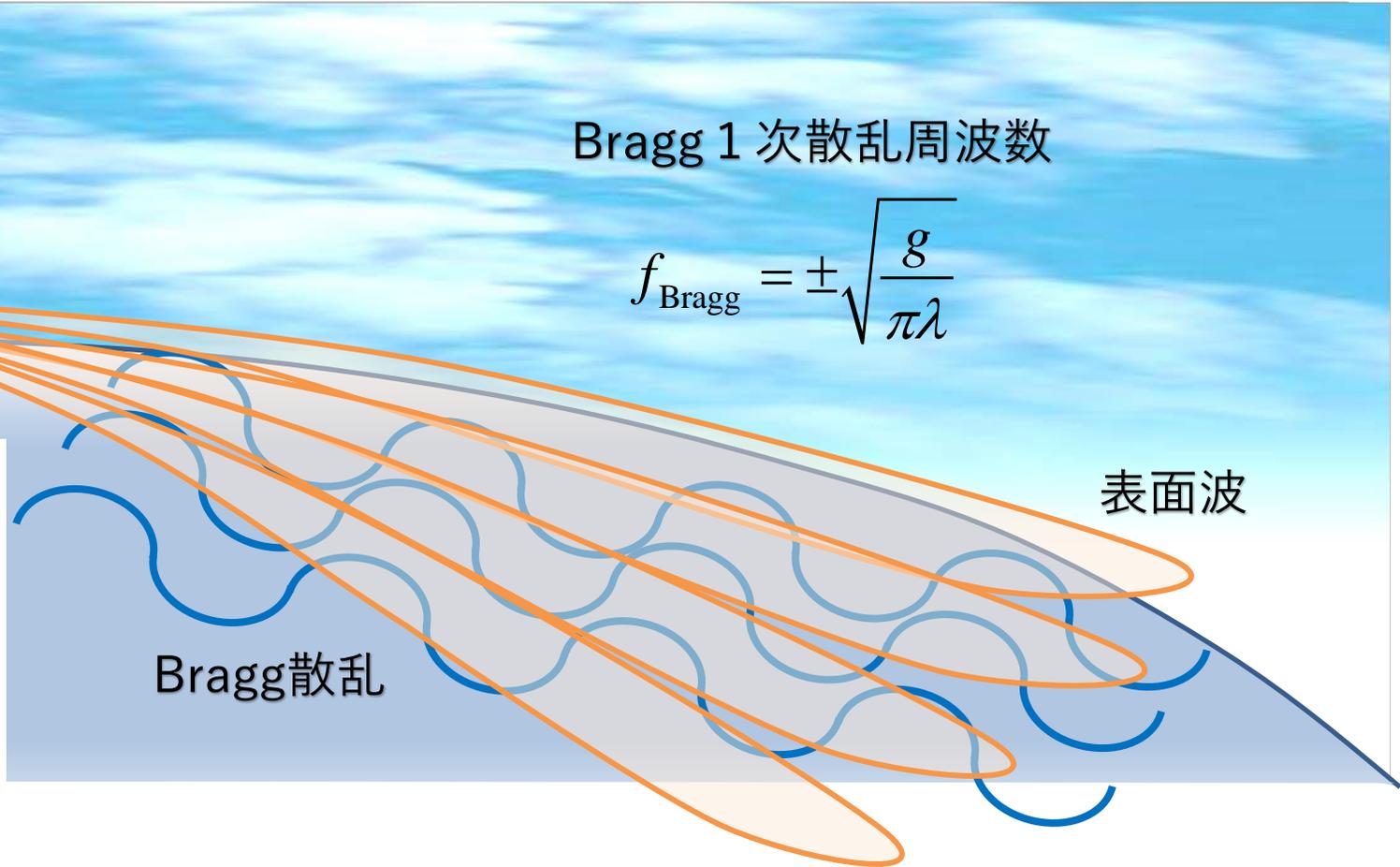
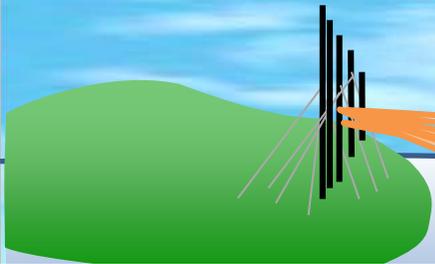
^{*} 三菱電機株式会社 情報技術総合研究所

^{**} 三菱電機株式会社 通信機製作所

短波レーダ

Bragg 1 次散乱周波数

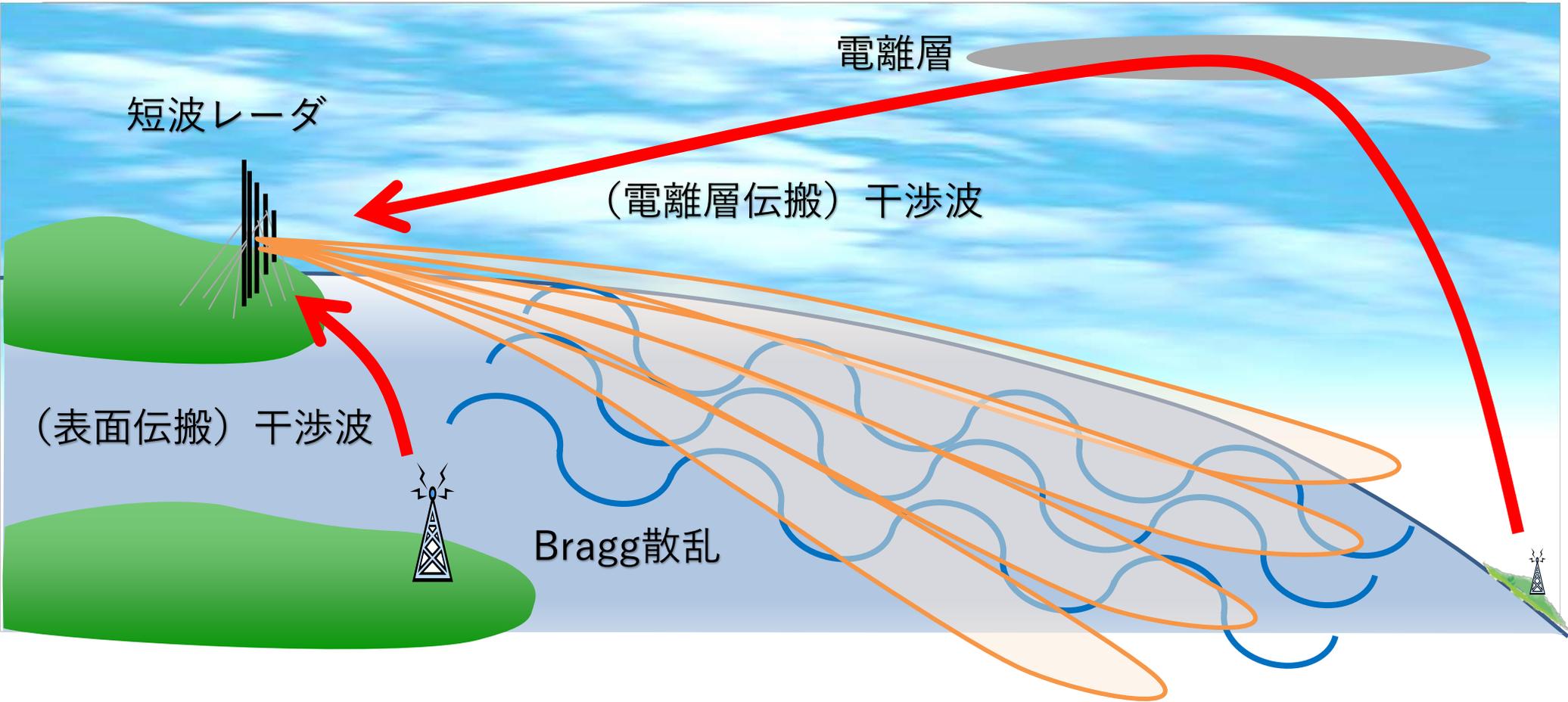
$$f_{\text{Bragg}} = \pm \sqrt{\frac{g}{\pi\lambda}}$$



DRDC, HFSWR limiting factors and mitigation techniques, IEEE Radarcon, 2010.

短波レーダは、見通し外伝搬特性を有する表面波を用いて海面Bragg散乱エコーを観測し、レンジビン毎のドップラスペクトルから、海流、波浪等の計測パラメータを求めるレーダである。

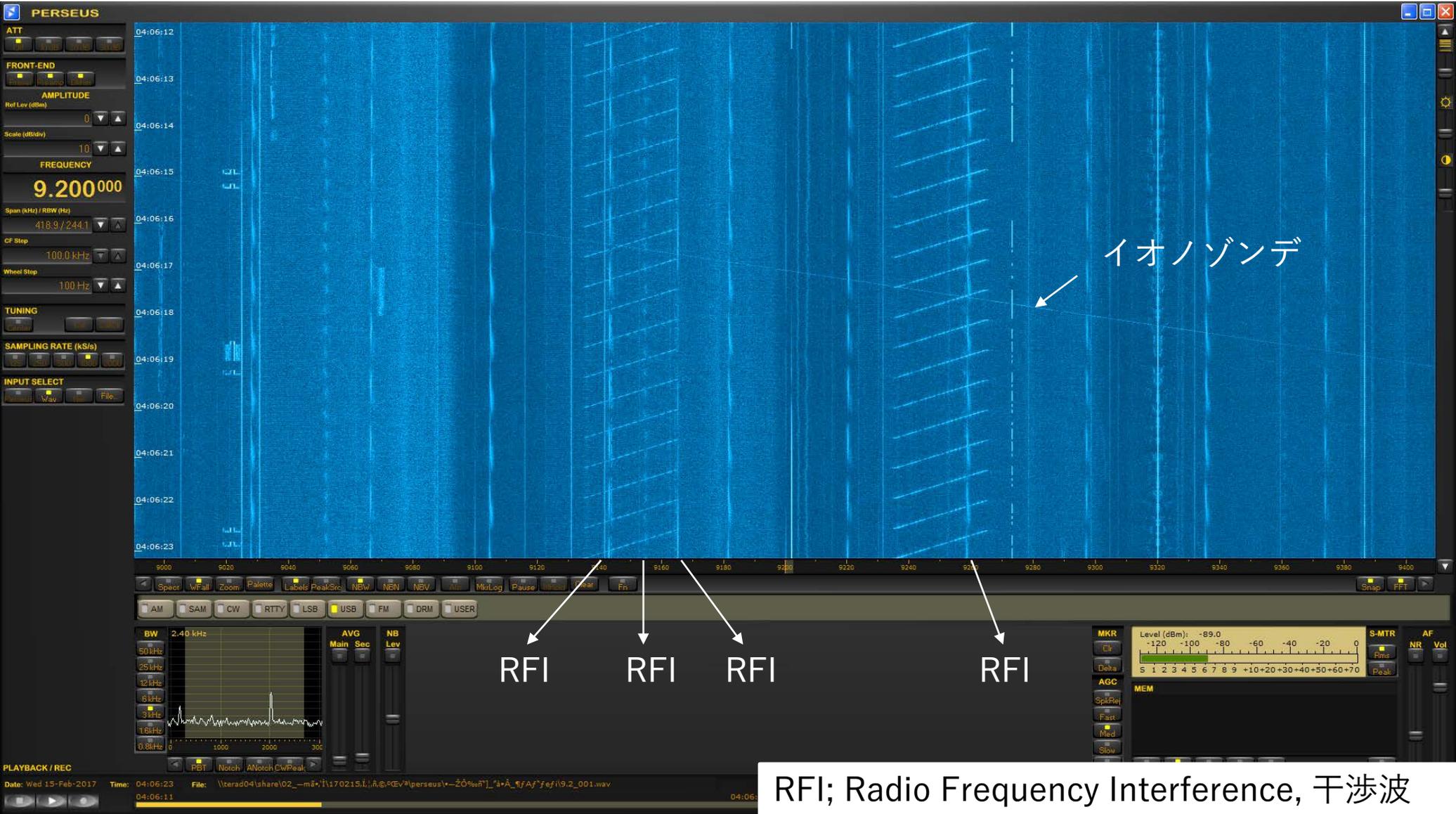
短波レーダに到来する干渉波



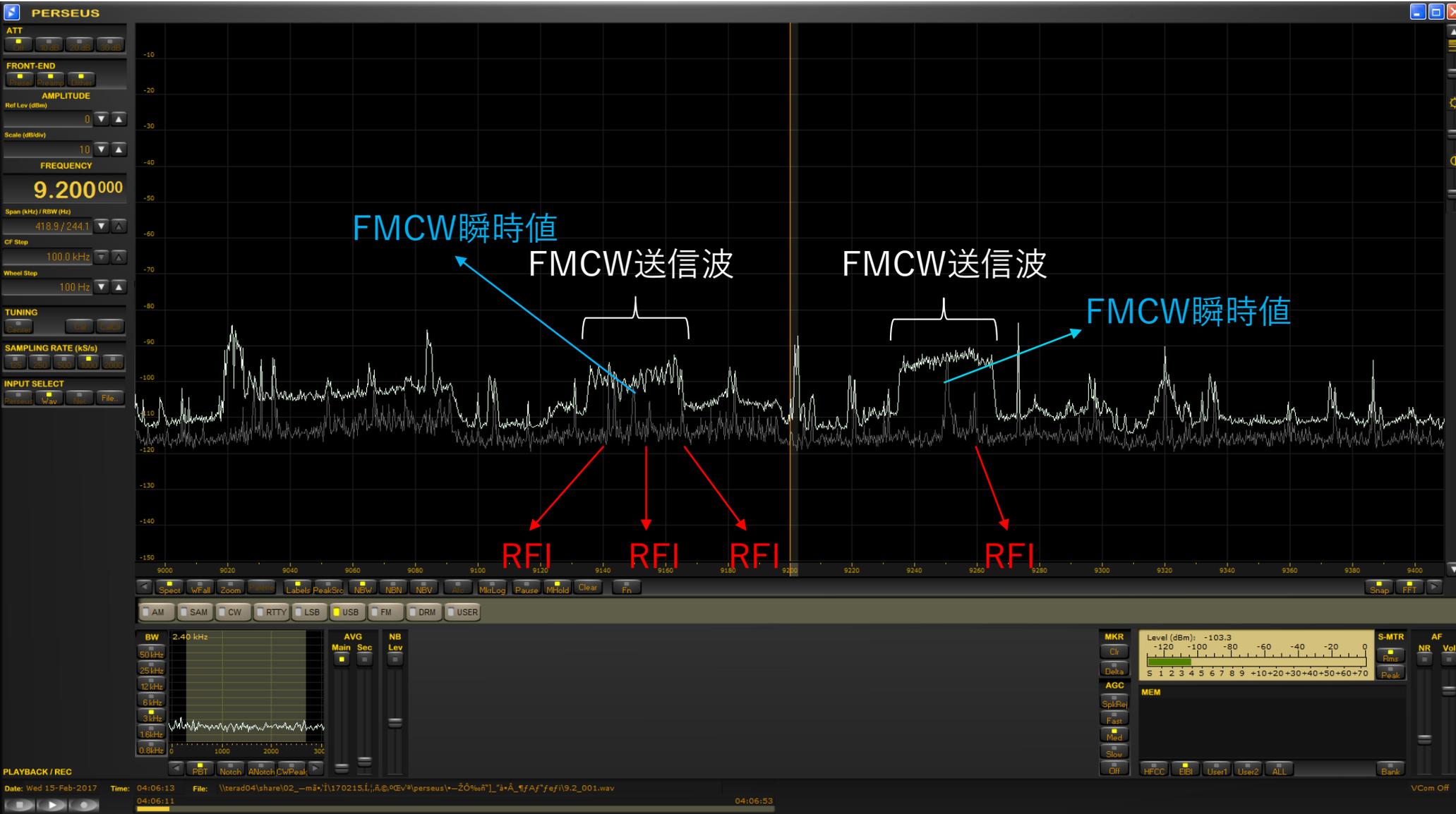
短波レーダの運用課題として、Bragg散乱エコーと同時受信される干渉波への対策がある。干渉波は他の送信源に由来する不要波で、Bragg散乱のドップラスペクトルが不明瞭になる原因となる。

FMCW送信波

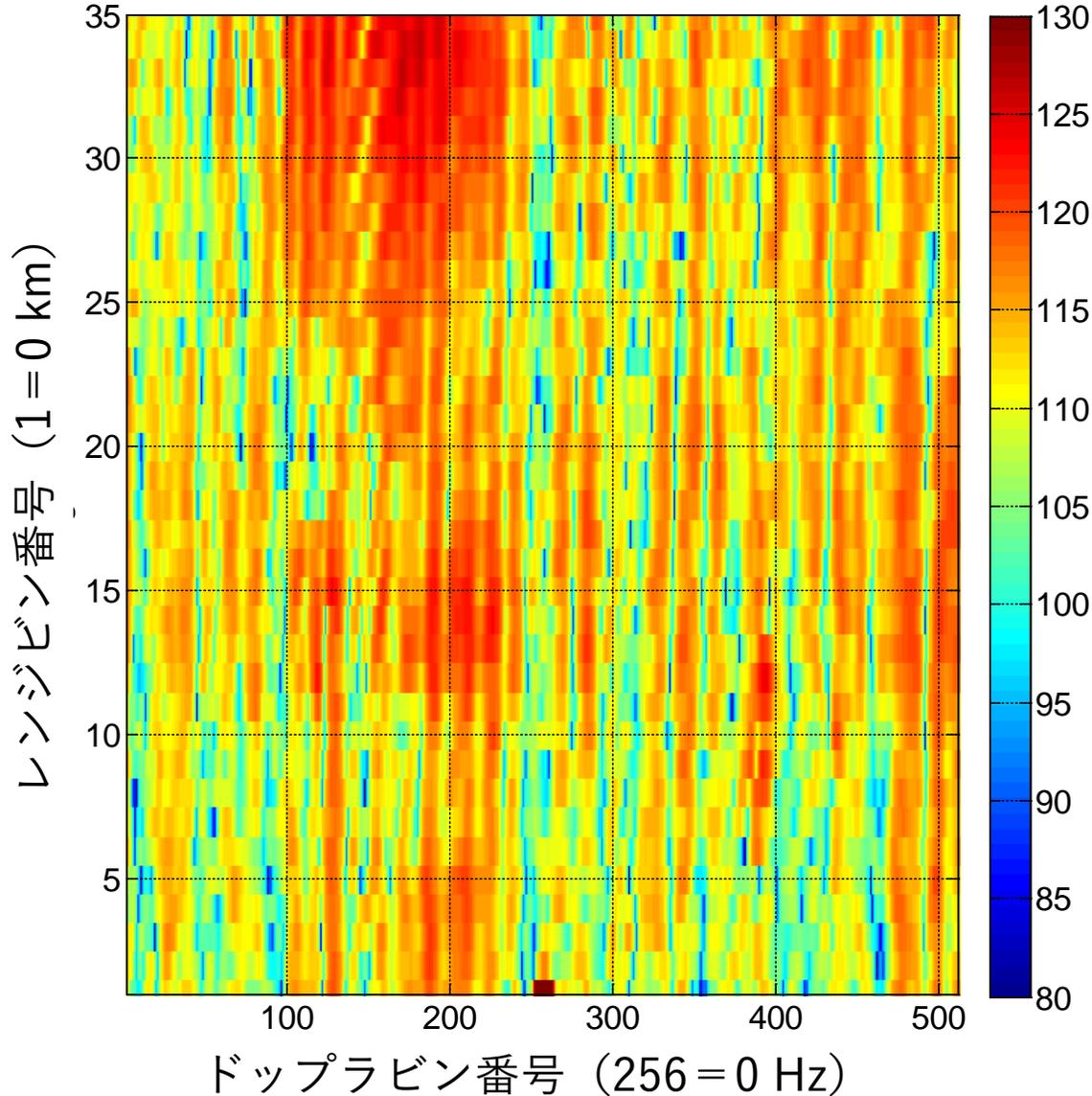
FMCW送信波



RFI; Radio Frequency Interference, 干渉波



[20150206134549] Beam#10 with CBF



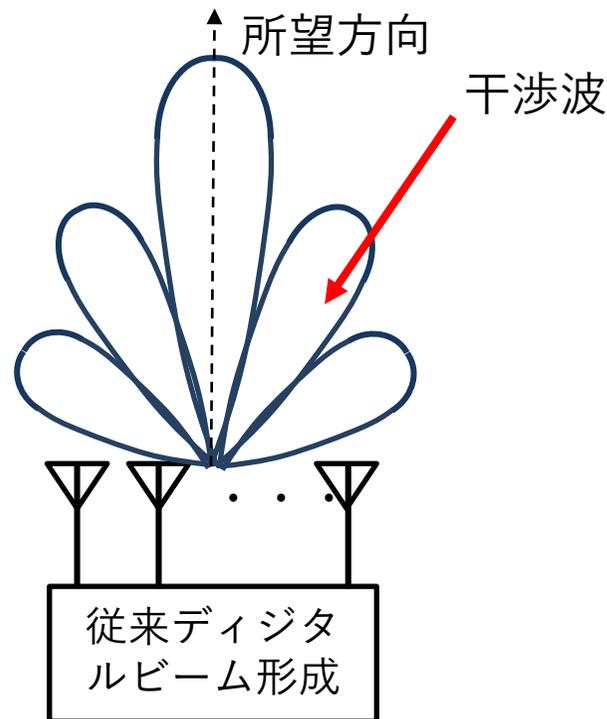
- レンジドップラマップに電波干渉の影響が現れている。
- 干渉成分が同マップ上全体に分布。本図は一例で、実際の干渉パターンは様々に変化
- Bragg散乱が不明瞭となり、対策が必要。

短波レーダの干渉波抑圧の一手法として、干渉波が特定方位より到来する特性を有することに着目したアダプティブビーム形成がある*。

* G. Fabrizio, *High Frequency Over-the-Horizon Radar: Fundamental Principles, Signal Processing, and Practical Applications*, McGraw-Hill Education, 2013, and references therein.

従来のデジタルビーム形成

- 所望方向ビーム感度は最大化するが、干渉波方向ビーム感度は一般にゼロでない。
- 干渉波との混信により、レンジドップラマップ上のBragg散乱エコーが不明瞭になる。

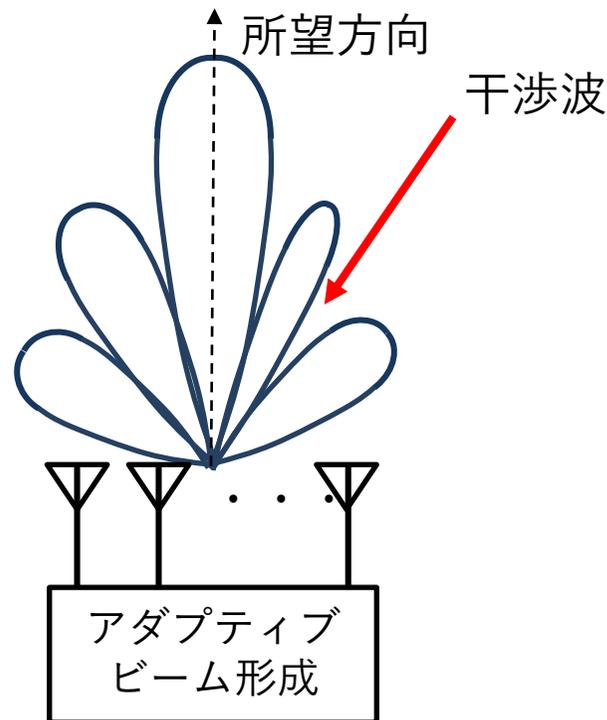


短波レーダの干渉波抑圧の一手法として、干渉波が特定方位より到来する特性を有することに着目したアダプティブビーム形成がある*。

* G. Fabrizio, *High Frequency Over-the-Horizon Radar: Fundamental Principles, Signal Processing, and Practical Applications*, McGraw-Hill Education, 2013, and references therein.

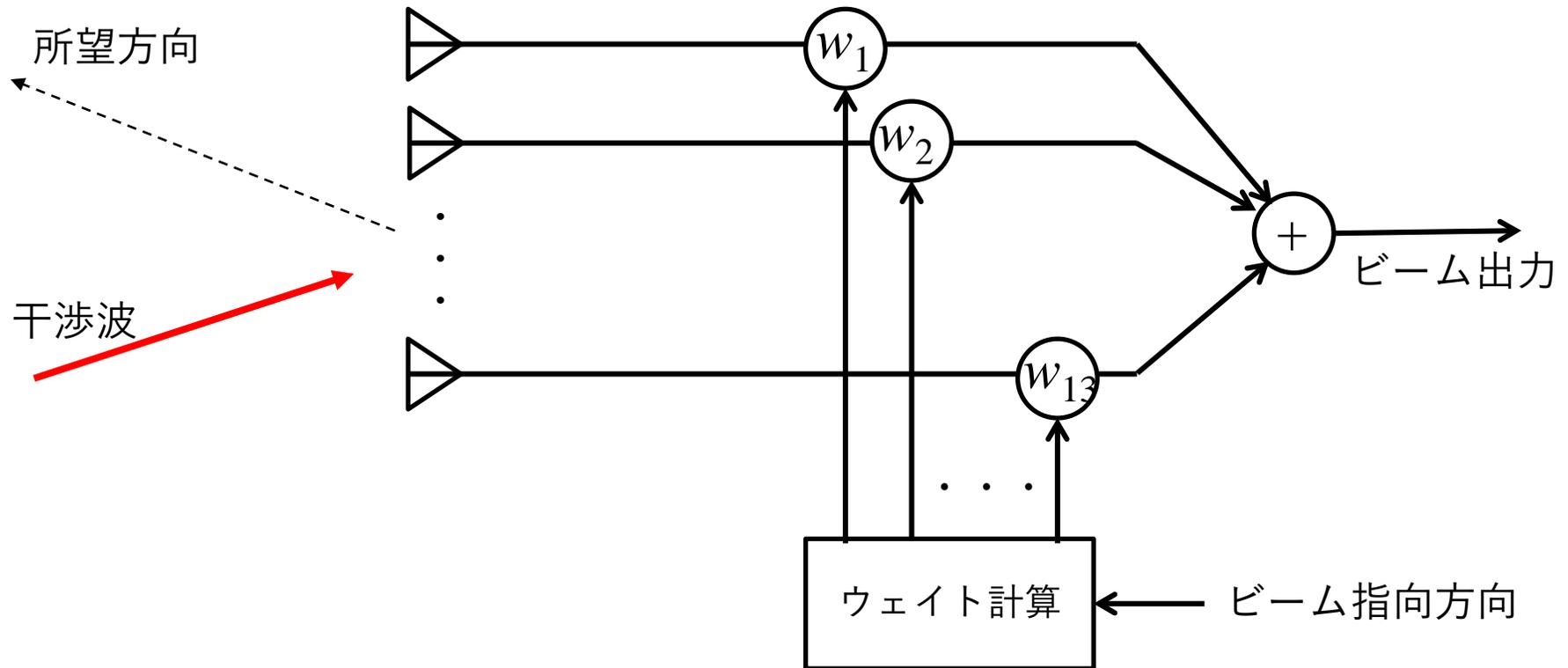
アダプティブビーム形成

- 所望方向ビーム感度を最大化しつつ、干渉波方向ビーム感度をゼロにする。
- 干渉波混信を回避でき、レンジドップラマップ上のBragg散乱エコーが明瞭になる。



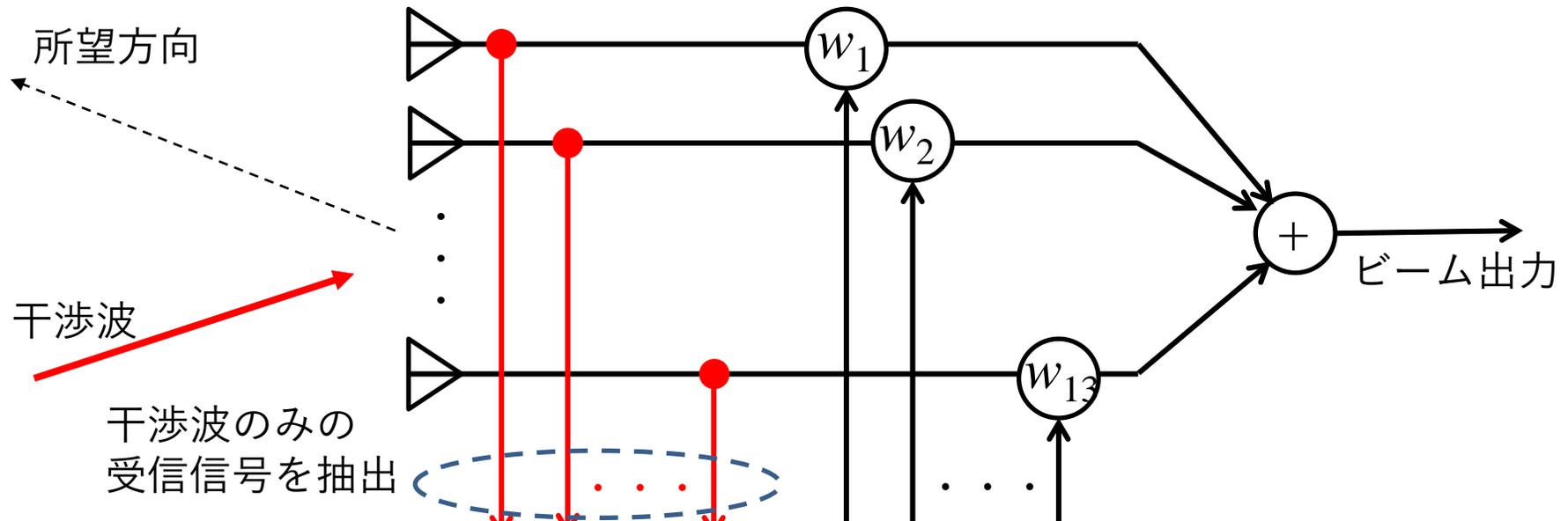
アダプティブビーム形成処理ブロック図 (1 / 2)

- 従来デジタルビーム形成処理ブロック図.
- 図は単一ビームのみ表示だが, 実際はマルチビーム形成を実施.



アダプティブビーム形成処理ブロック図 (2 / 2)

- アダプティブビーム形成の処理構成は、従来デジタルビーム形成の処理構成に、干渉波パラメータ推定処理（赤色部分）を追加する。
- 従来のビームウェイトをアダプティブウェイトに変更してアダプティブビーム形成を行い、干渉波抑圧を実現する。本検討ではMVDRウェイトを用いる。



- 干渉波相関行列とその逆行列を算出
- 干渉波到来方位は未知のままでOK

干渉波特性の推定

干渉波相関行列およびその逆行列を求める

ウェイト計算

ビーム指向方向

$$\mathbf{w}_a = \frac{\mathbf{R}^{-1} \mathbf{a}(\theta_b)}{\mathbf{a}^H(\theta_b) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{a}(\theta_b)}$$

- 方位ベクトル (単位ベクトル)

$$\mathbf{u}(\theta, \phi) \cong [u \quad v \quad w]^T$$

$$= [\sin \theta \cos \phi \quad \cos \theta \cos \phi \quad \sin \phi]^T$$

- 第 m -素子アンテナ位置ベクトル

$$\mathbf{p}_m = [x_m, y_m, z_m]^T$$

$$= [x_m, 0, 0]^T$$

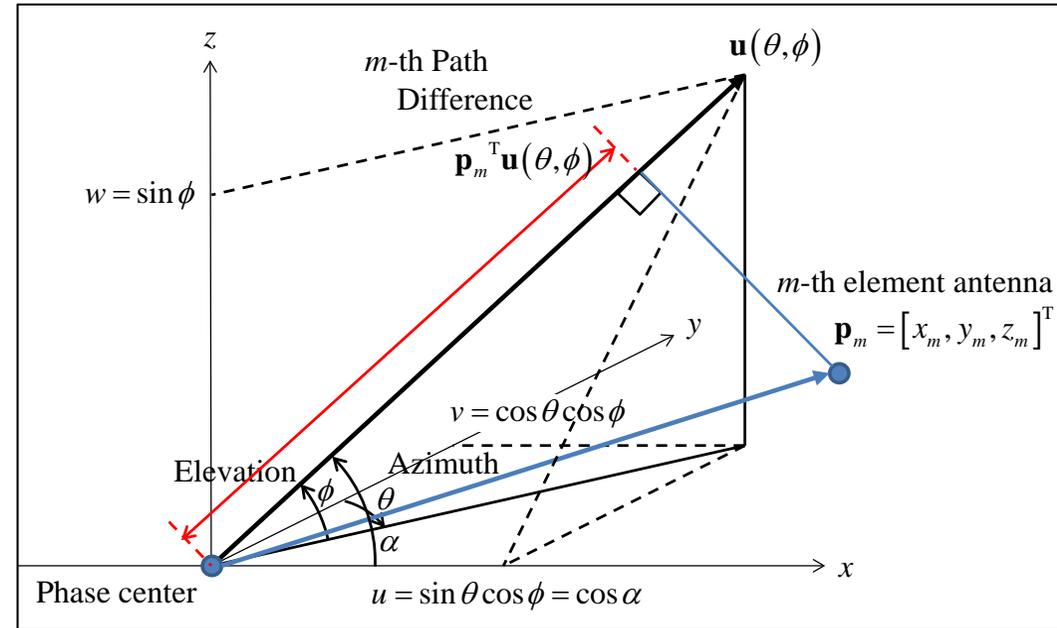
$$= [(m-1)d, 0, 0]^T$$

- 伝搬行路差

$$\mathbf{u}(\theta, \phi)^T \mathbf{p}_m = x_m \sin \theta \cos \phi$$

- アレーステアリングベクトル (各素子アンテナでの伝搬行路差を並べたもの)

$$\mathbf{a}(\theta, \phi) = \left[1 \quad \cdots \quad \exp\left(j \frac{2\pi(m-1)d \sin \theta \cos \phi}{\lambda}\right) \quad \cdots \quad \exp\left(j \frac{2\pi(M-1)d \sin \theta \cos \phi}{\lambda}\right) \right]^T$$



- アダプティブウェイト (MVDR)

$$\mathbf{w}_a = \frac{\mathbf{R}^{-1} \mathbf{a}(\theta_b, 0)}{\mathbf{a}^H(\theta_b, 0) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{a}(\theta_b, 0)}$$

ただし、 \mathbf{R} は干渉波相関行列であり、以下のとおり。

$$\begin{aligned} \mathbf{R} &= E \left[|i(t)|^2 \right] \mathbf{a}(\theta_{\text{RFI}}, \phi_{\text{RFI}}) \mathbf{a}^H(\theta_{\text{RFI}}, \phi_{\text{RFI}}) + E \left[\mathbf{n}(t) \mathbf{n}^H(t) \right] \\ &= p_{\text{RFI}} \mathbf{a}(\theta_{\text{RFI}}, \phi_{\text{RFI}}) \mathbf{a}^H(\theta_{\text{RFI}}, \phi_{\text{RFI}}) + \sigma^2 \mathbf{I} \end{aligned}$$

- アダプティブビーム形成

$$y(t) = \mathbf{w}_a^H \mathbf{x}(t)$$

ただし、 $y(t)$ はビーム出力、 $\mathbf{x}(t)$ は受信信号ベクトルである。

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{a}(\theta_s, 0) s(t) + \mathbf{a}(\theta_{\text{RFI}}, \phi_{\text{RFI}}) i(t) + \mathbf{n}(t)$$

所望信号 干渉波 外部雑音

短波レーダでは、秒オーダにおよぶ観測時間中の干渉波特性変動（電離層変動による到来角変化等）を考慮したウェイト推定が必要。

方法	概要	評価
パッシブサンプルサポート (Passive Sample Support)	CPI冒頭にリスニング時間を設け、干渉波のみデータを取得し、ウェイト推定	× ウェイト陳腐化により、抑圧性能低い
アクティブサンプルサポート (ASS; Active Sample Support)	各スイープの遠方レンジビンにて干渉波データを取得し、ウェイト推定。	○ 干渉波特性変動によりアレー自由度増加するが、干渉波数が少なければ良好な抑圧を期待できる。
サブCPI毎ウェイト更新	干渉波特性変動に追従すべく、サブCPI毎に、上記ASSによるウェイト推定	× ビームサイドローブ変調のため、Bragg散乱スペクトルが歪む。
Fabrizio法*	クラッタ部分空間拘束付の上記サブCPI毎ウェイト更新	△ サイドローブ変調回避できるが、レンジビン毎処理となり、演算負荷が大きい。

* G. Fabrizio, *High Frequency Over-the-Horizon Radar: Fundamental Principles, Signal Processing, and Practical Applications*, McGraw-Hill Education, 2013,

CPI : Coherent Processing Interval

本検討では短波レーダにおける干渉波抑圧の初期評価の位置づけとして、アクティブサンプルサポート法を適用。

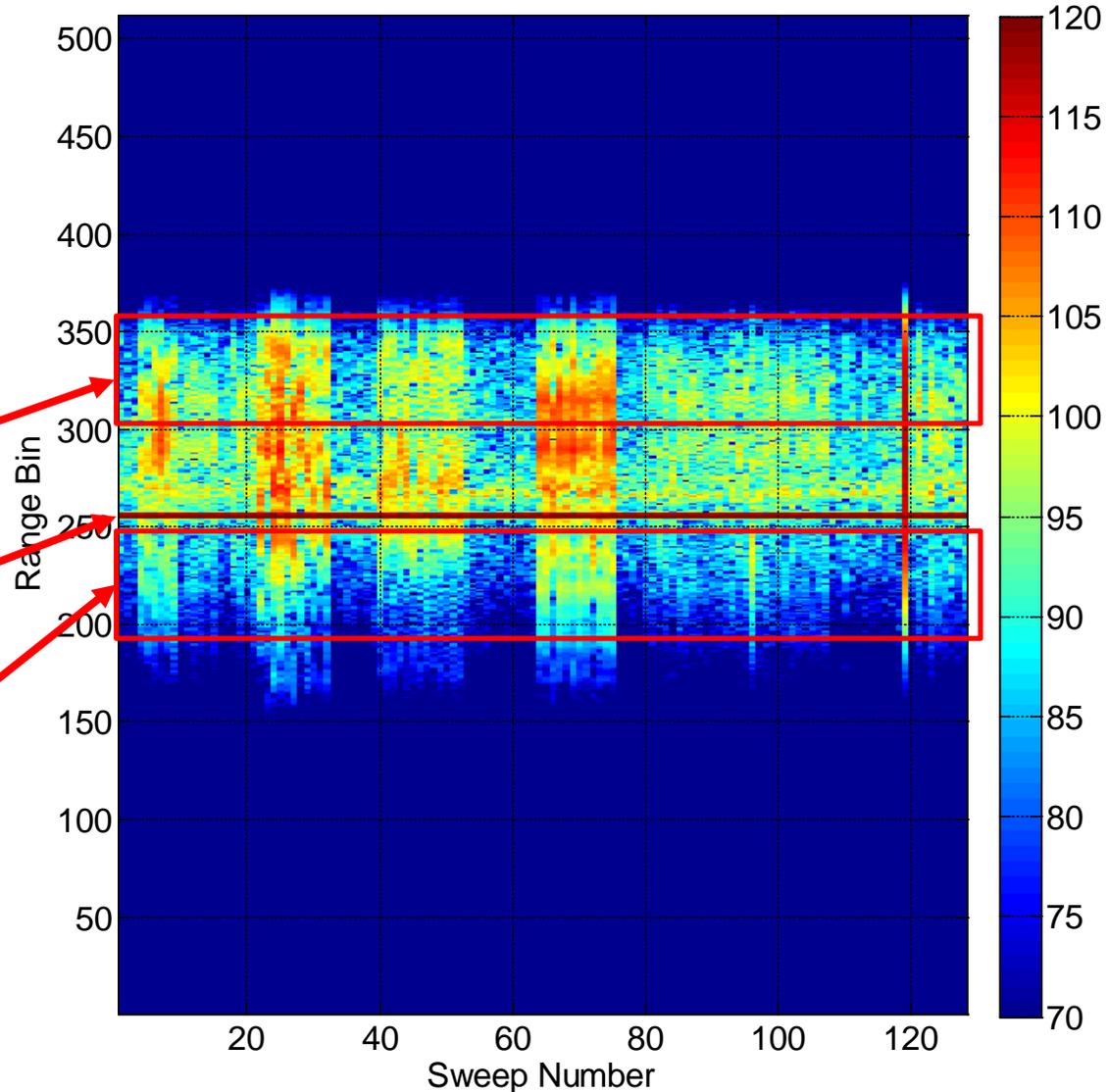
Range FFT Envelope
[20150206134549]

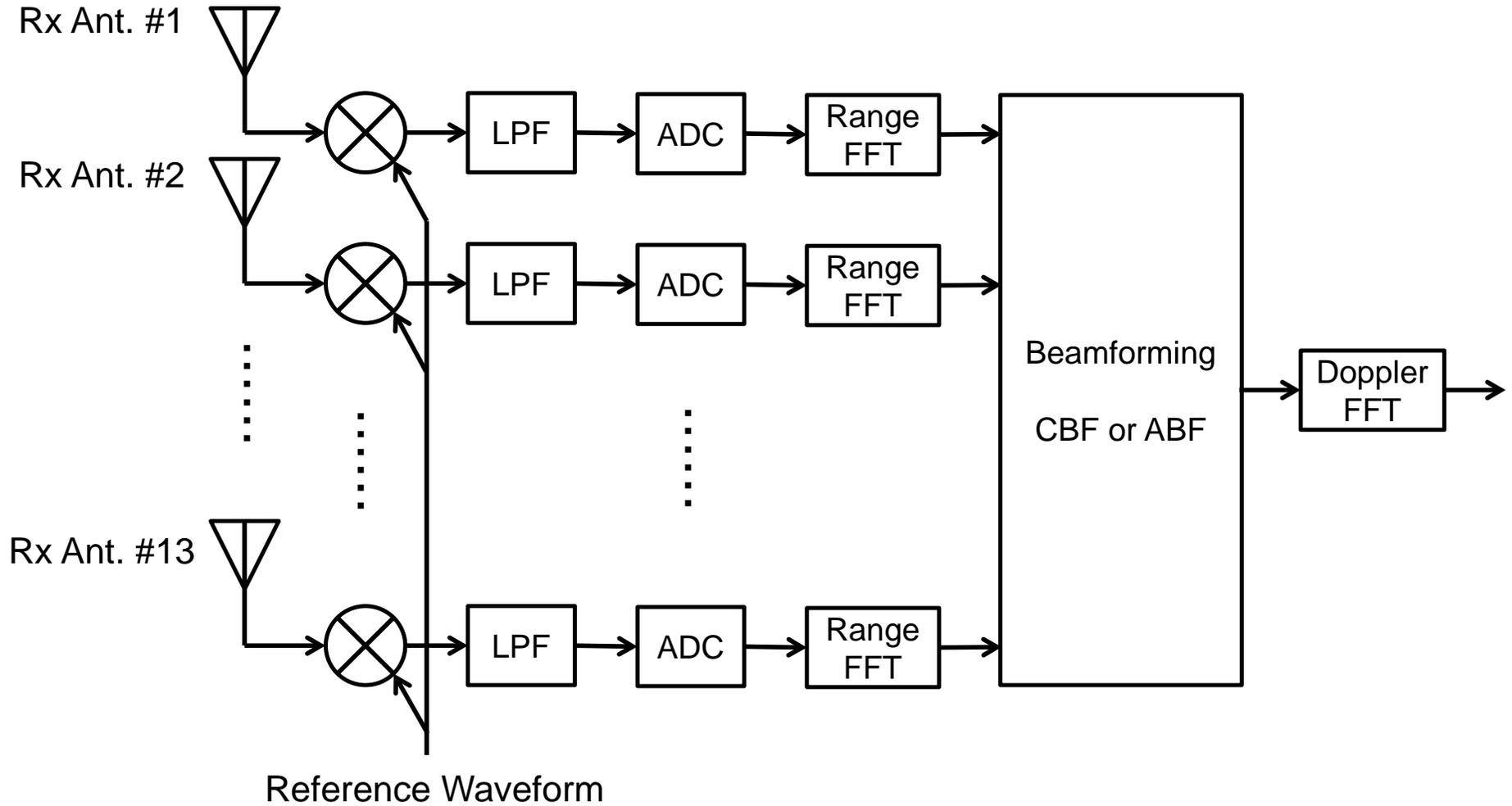
レンジFFT後のレンジ・スイープマップ上において、Bragg散乱を含まない領域の干渉波を用いて、干渉波相関行列およびアダプティブウェイト推定を実施。

Bragg散乱が微弱な遠方レンジ

距離ゼロビン@256レンジビン

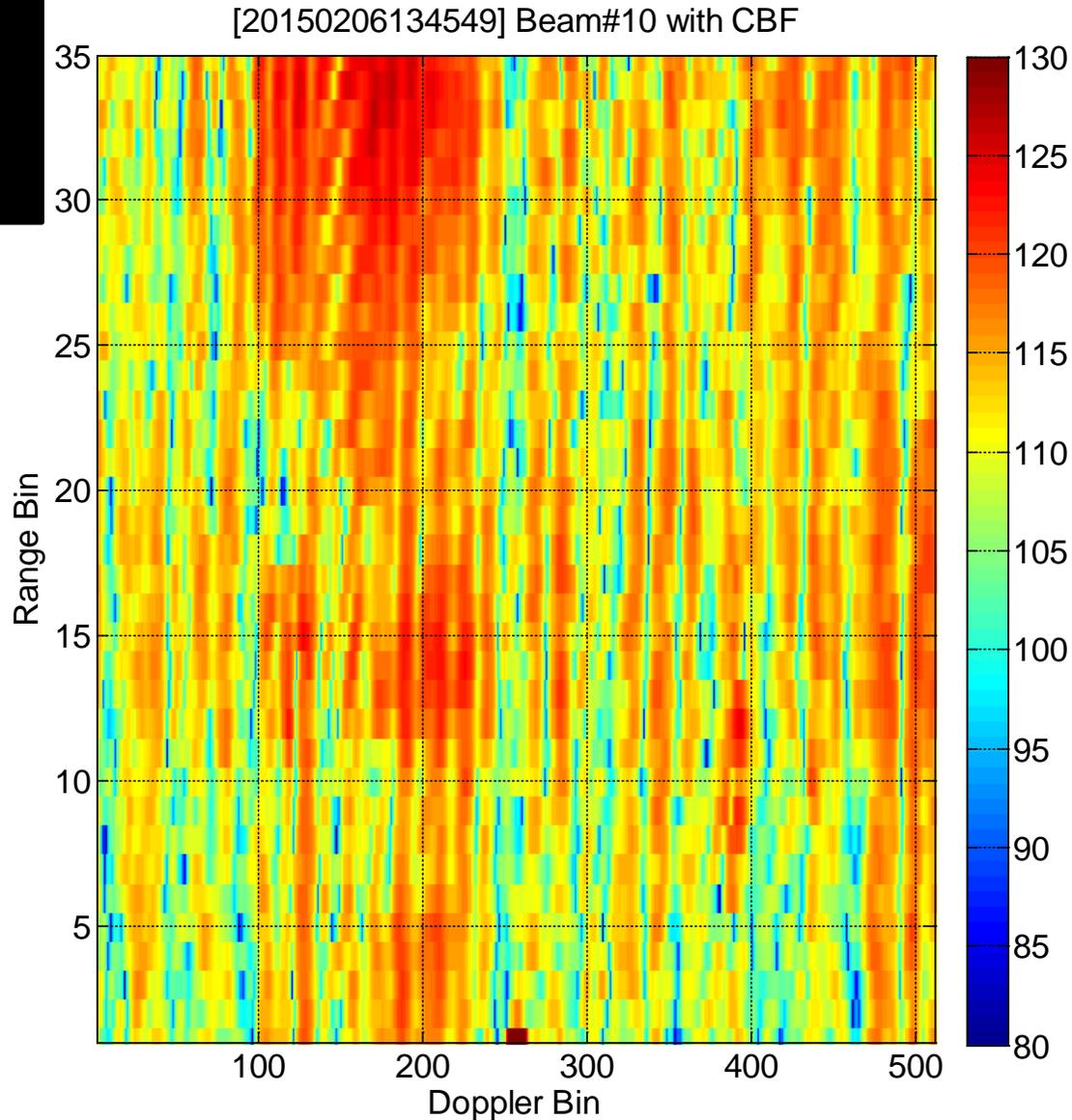
Bragg散乱が微弱な負レンジビン



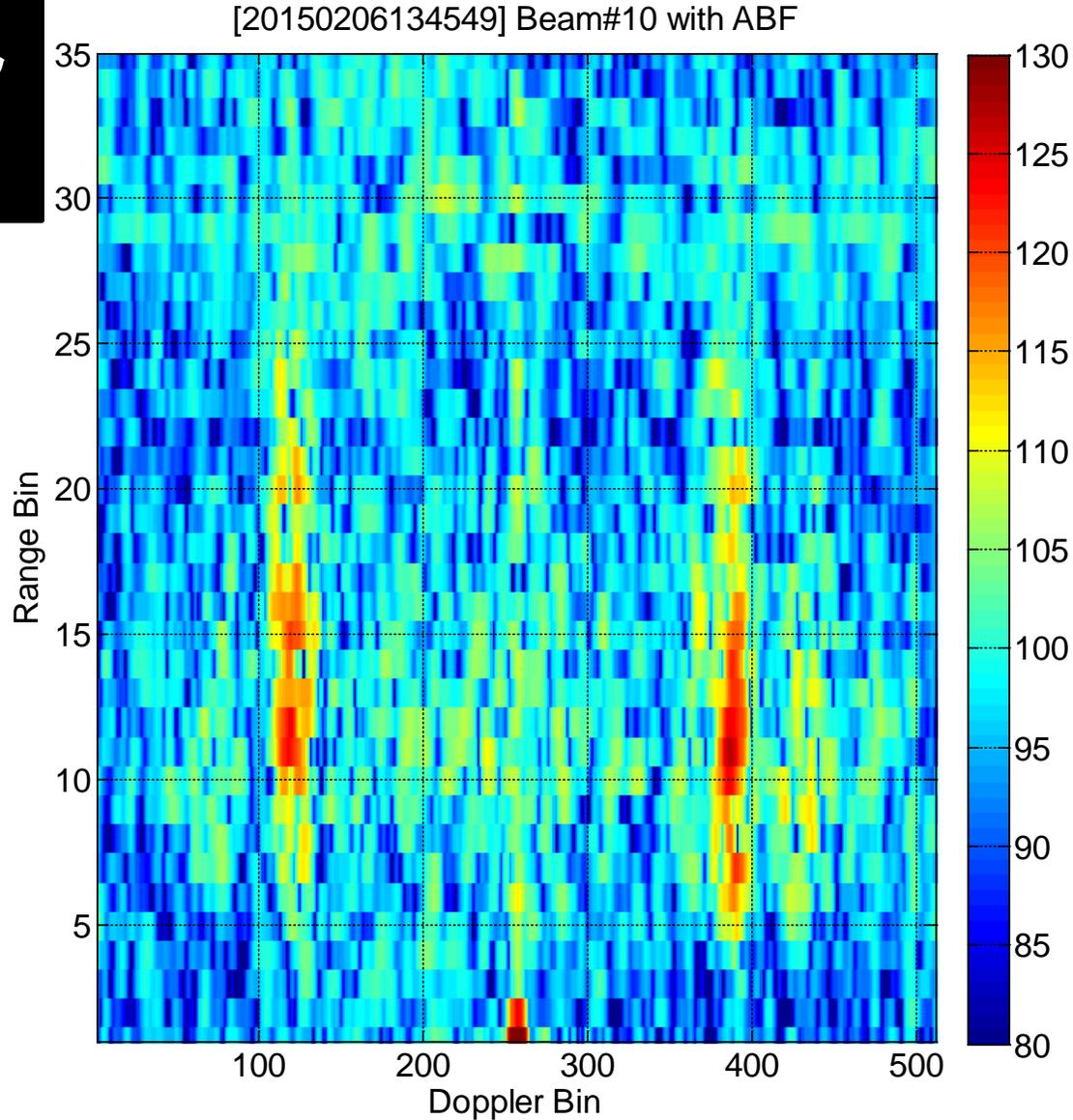


項目	設定値	備考
送信周波数	24.515 MHz	中心周波数
変調方式	FMICW	
スイープ帯域幅	100 kHz	24.515 ± 0.05 MHz
スイープ周期	0.5 s	
スイープ数	128 swp	CPI = 64 s
Duty比	50%	
レンジビン数	512	
ドップラビン数	512	スイープ数は128 swp
ビーム形成用窓関数	実機と同一	
レンジFFT用窓関数	実機と同一	
ドップラFFT用窓関数	実機と同一	
ABFウェイト算出法	MVDR法	ただし、Diagonal Loadingあり
受信チャンネル数	13 ch	
マルチビーム数	13ビーム	

従来ビームによる
レンジドップラマップ
(ビーム#10)

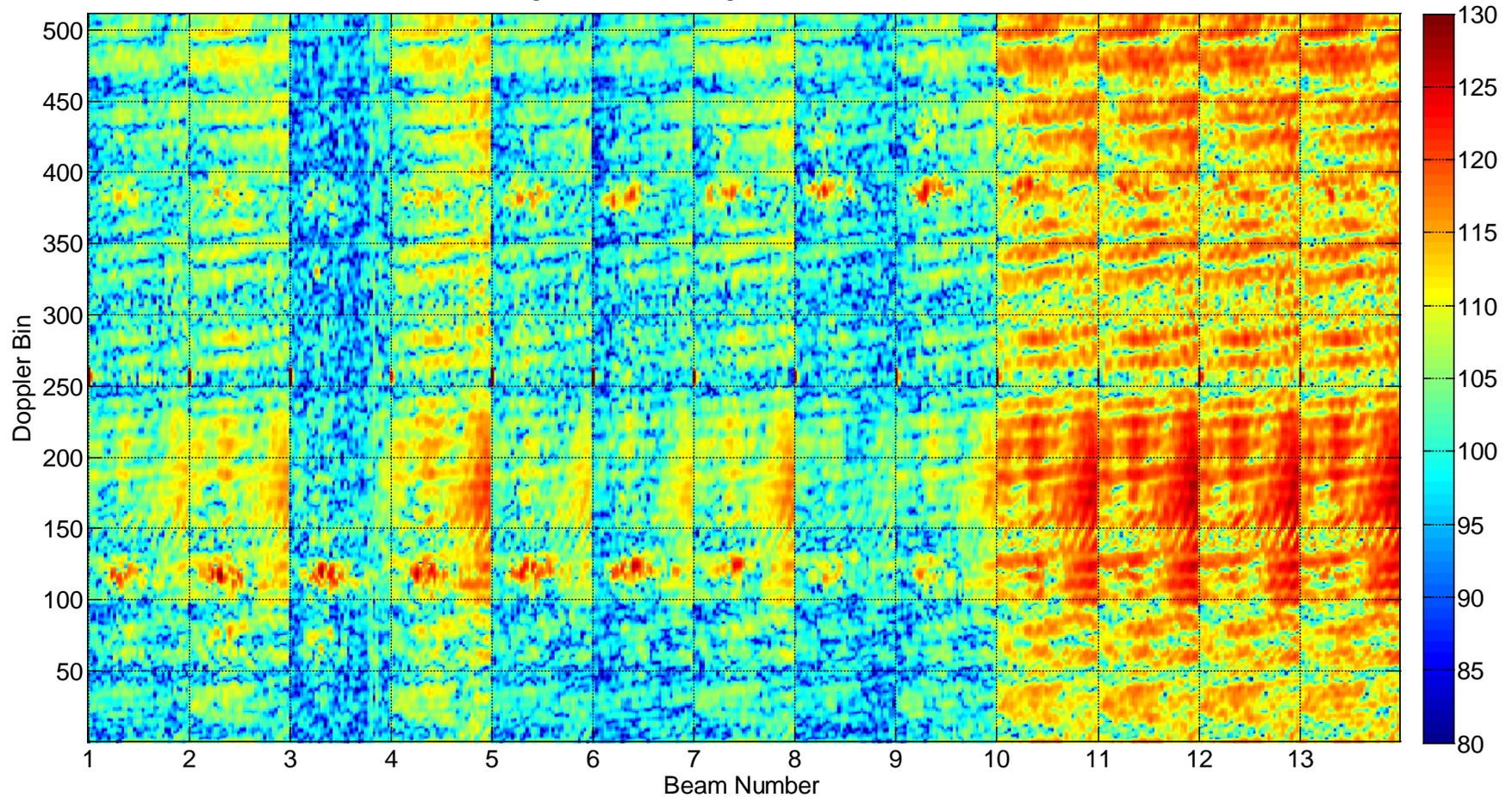


アダプティブビーム
によるレンジドップラ
マップ
(ビーム#10)



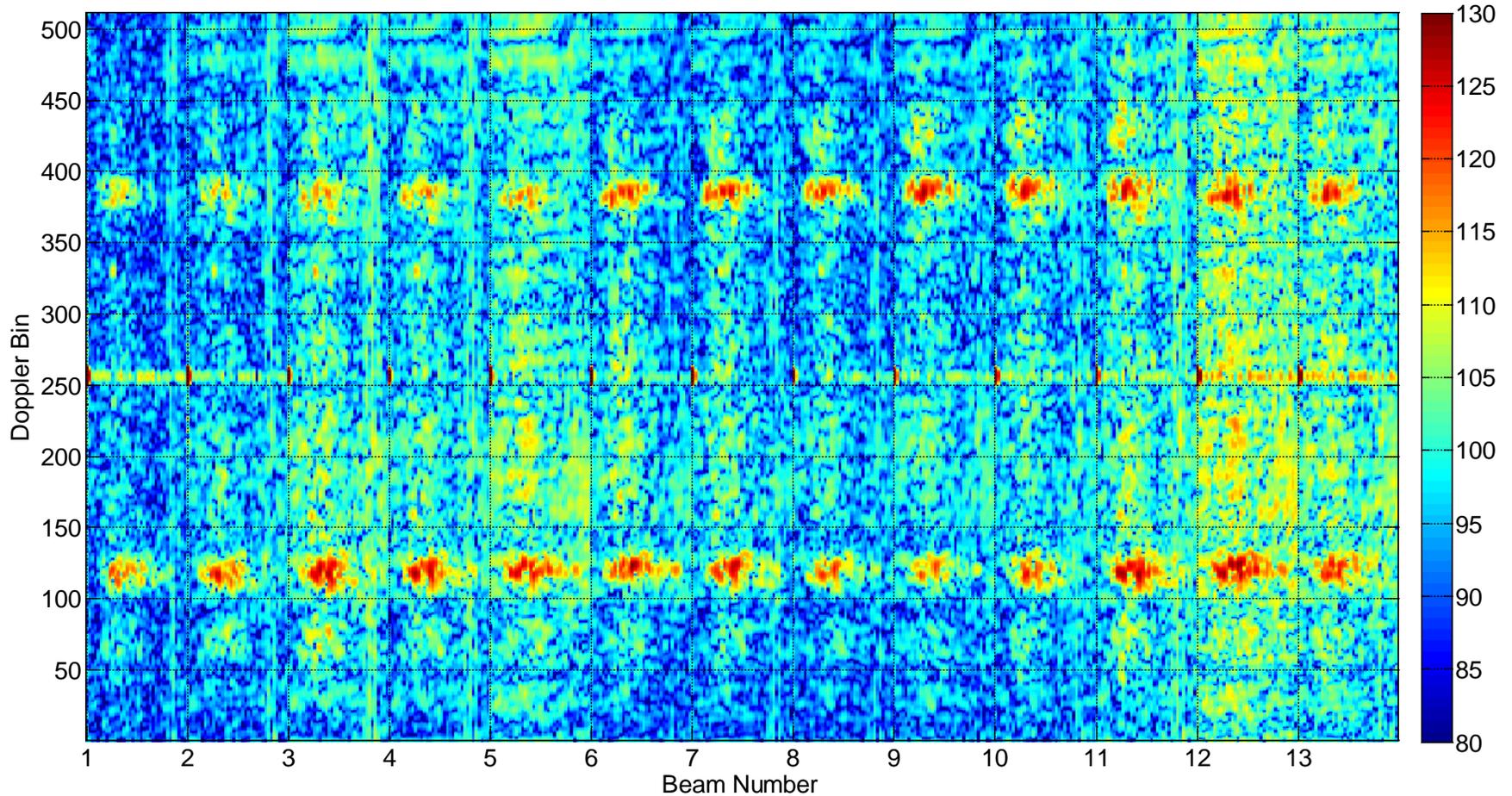
従来ビームによるレンジドップラマップ(ビーム#1~#13)

[20150206134549] All Beams with CBF

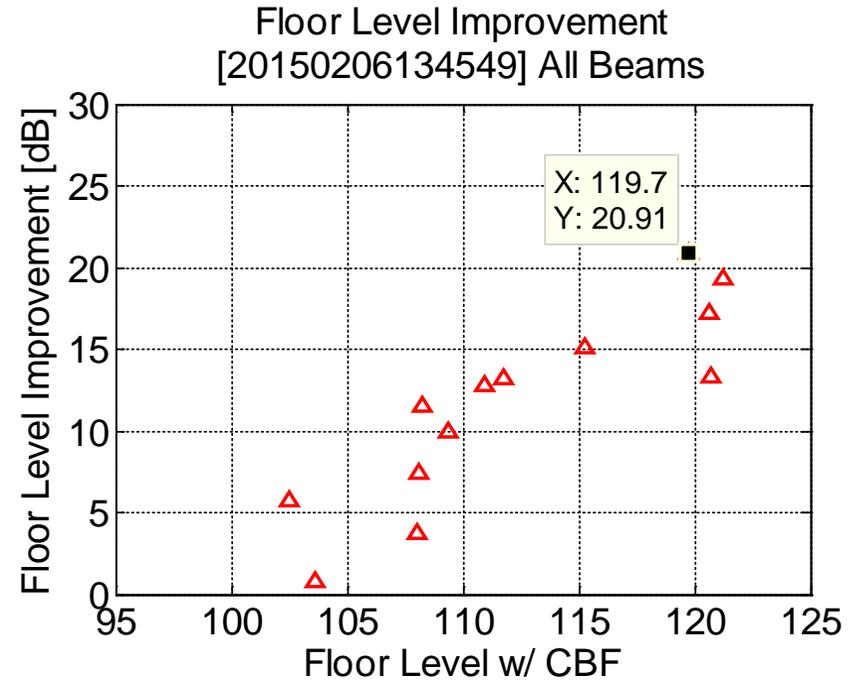
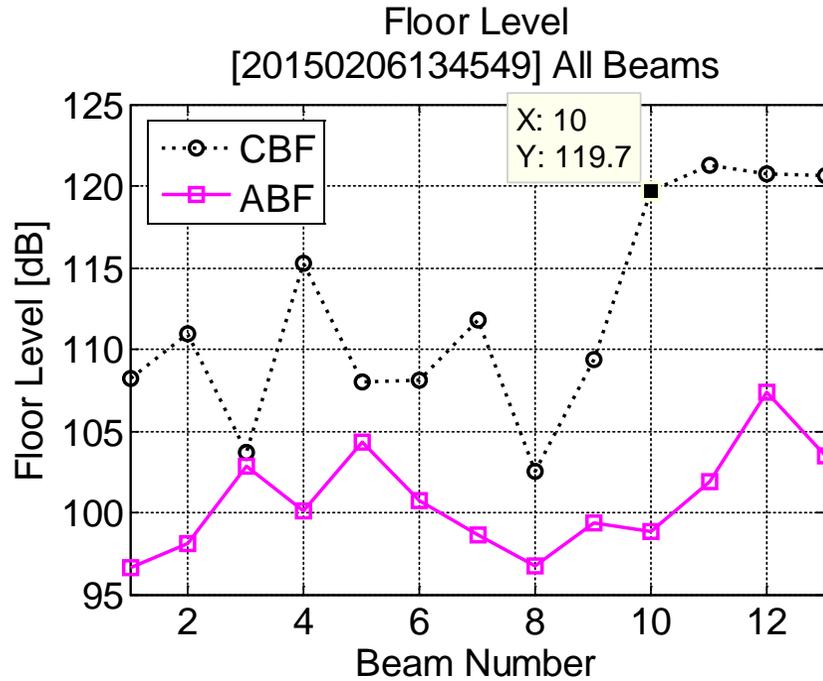


アダプティブビームによるレンジドップラマップ(ビーム#1~#13)

[20150206134549] All Beams with ABF



フロアレベル改善 (左図) およびフロアレベル改善比 (右図) を示す. 本例ではアダプティブビーム形成により, ビーム#10にて最大の改善比21dBを達成.



- 短波レーダにて，アダプティブビーム形成により干渉波が抑圧され，Bragg散乱エコーの明瞭化が可能なことを，実データを用いて示した。
- 本例では，フロアレベルが最大21dB改善した。
- 今後は，短波レーダにおけるアダプティブビーム形成に関する以下の課題に取り組む予定である。
 - 干渉波相関行列への孤立目標（船舶や航空機等）混信対策
 - 電離層クラッタ抑圧への応用（遠距離短波レーダの場合）