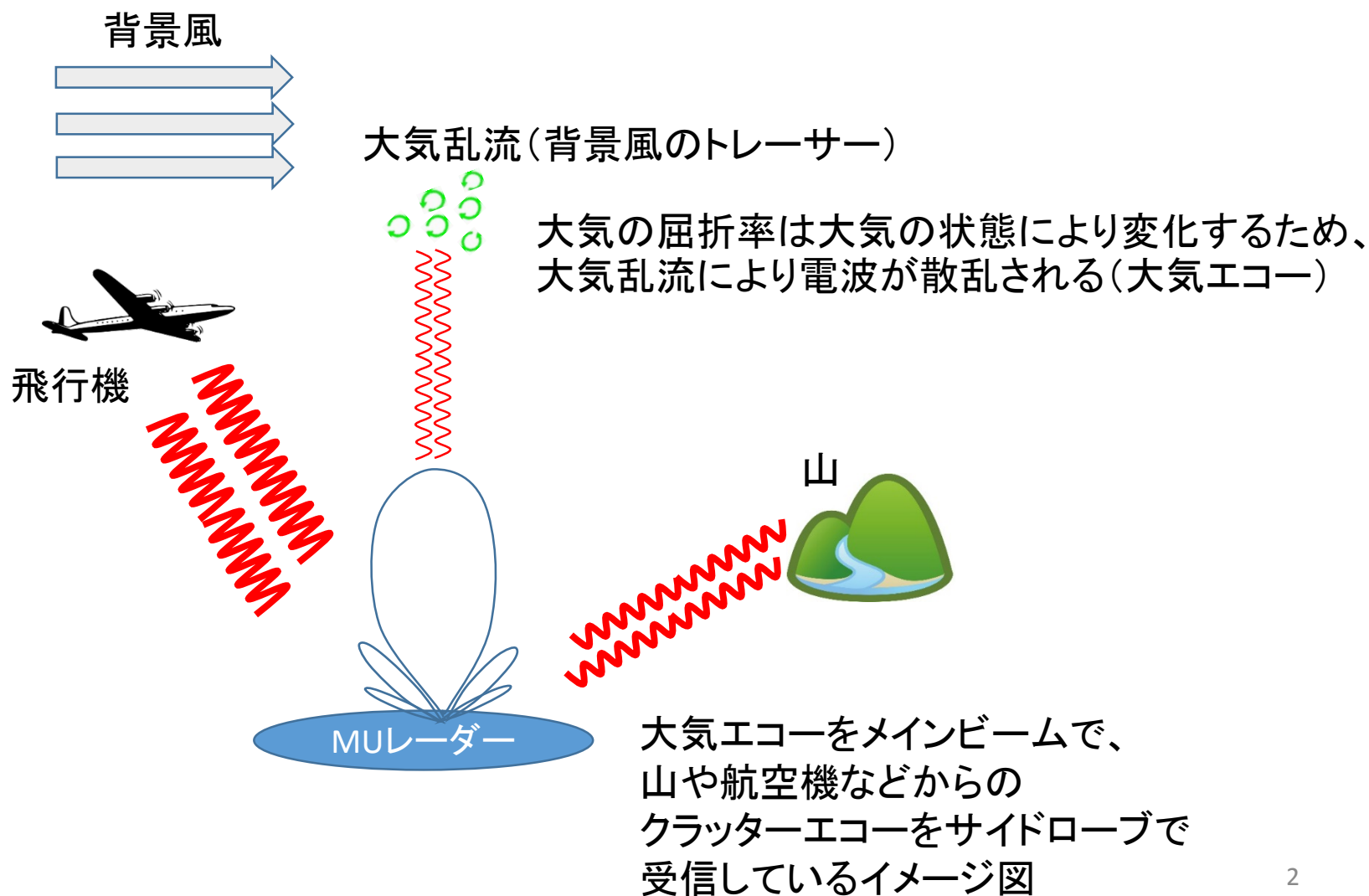


MUレーダー実時間アダプティブ クラッター抑圧システムの開発

* 万城 孝弘¹ 橋口 浩之¹ 山本 衛¹ 佐藤 亨²
¹ 京大生存在圏研究所
² 京大情報学研究科

研究背景

大気レーダーの観測対象：大気エコー（≪クラッターエコー≫）



MUレーダー (Middle and Upper atmosphere radar)

航空写真と主要諸元

475本のアンテナそれぞれに送受信機が取り付けられており
それらを個別に制御し、高速にビーム方向を変更できる
アクティブフェーズドアレイアンテナ



| Parameter | Value |
|-----------------|---|
| Location | Shigaraki, Shiga, Japan (34.85° N, 136.10° E) |
| Radar System | monostatic pulse radar, active phased array system |
| Frequency | 46.5 MHz |
| Antenna | circular array of 475 crossed Yagi's |
| aperture | 8330 m ² (103 m in diameter) |
| beam width | 3.6 ° (one way; half power for full array) |
| steerability | steering is completed in each IPP |
| beam directions | 1657; 0° -30° off zenith angle |
| polarizations | linear and circular |

| Parameter | Value |
|------------------|---------------------------------|
| Transmitter | 475 solid state amplifiers |
| peak power | 1 MW (maximum) |
| average power | 50 kW (duty ratio 5%) (maximum) |
| bandwidth | 3.5 MHz (maximum) |
| Range resolution | 150 m |

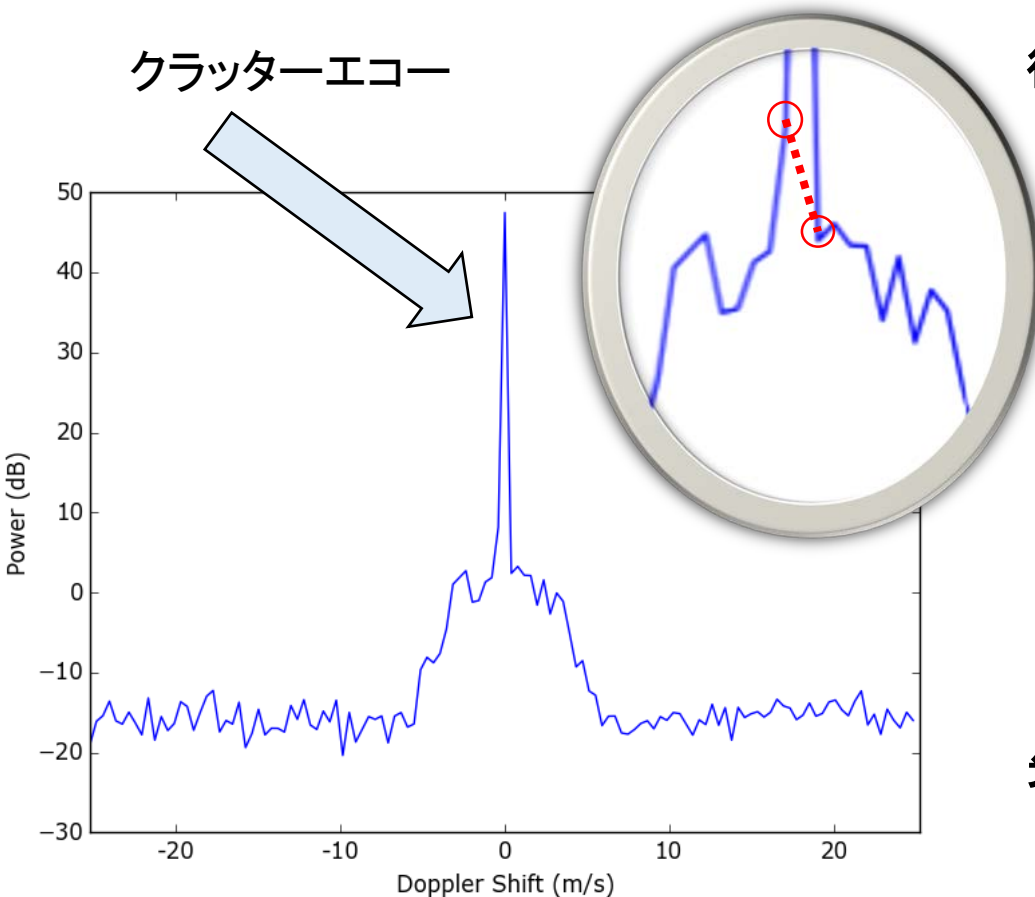
主な成果と発表内容

- ✓ 実時間(リアルタイム)処理としてクラッター抑圧システムを開発し、対流圏・下部成層圏標準観測モードに導入・運用開始(2015/11～)
 - 実観測データを用いて2つのパラメータの決定
 - ノルム拘束値 δ
 - 受信信号の自己相関行列の平均を求めるためのデータ数 n
 - 実時間処理の実現
 - 要求時間:8.2 秒 → 最悪でも1.4 秒程度 → 0.2 秒程度
 - 500時間以上安定に動作している
- ✓ 中間圏標準観測モードに導入・運用開始(2015/11～)
 - 発表時間の関係で割愛

本研究の意義

- 実時間(リアルタイム)処理
(対流圏・下部成層圏標準観測モード、中間圏標準観測モード)
 - 信号処理の簡便化
 - 取得データ容量の削減
 - 現状 数100 GB/日 → 数100分の1程度
 - HDD等の記憶装置の制約の少ない連続観測が可能に
- 用いる手法: NC-DCMP法 (DCMP法を改良した手法)
(ノルム拘束付方向拘束付電力最小化法; Norm Constrained-Directionally Constrained Minimum Power)
 - ソフトウェアで実装可能
 - ハードウェアの変更を必要としない
 - 鉛直風の推定の改善
- 本研究の成果は、現在建設予定の赤道MULレーダーにも応用可能

研究背景：大気エコーとクラッターエコー



大気エコーがゼロドップラー付近に存在し
ゼロドップラーでの地形性クラッターが非常に
大きい場合のドップラースペクトル

従来法

ゼロドップラーにのみクラッターエコー
が存在すると仮定し、
中点で内挿している

問題点

フェージングにより地形性クラッター
がスペクトルに広がりをもつ場合に
クラッターの抑圧が不十分となる。
また、ゼロドップラーでの大気エコー
を過小評価し、特に、鉛直風の推定
に悪影響を及ぼす場合がある。

先行研究

アンテナパターンを制御するNC-DCMP法
が有効である (Nishimura et al., 2012)
オフライン処理で行われている

本研究

オンライン処理化

NC-DCMP法 (Nishimura et al., 2012)

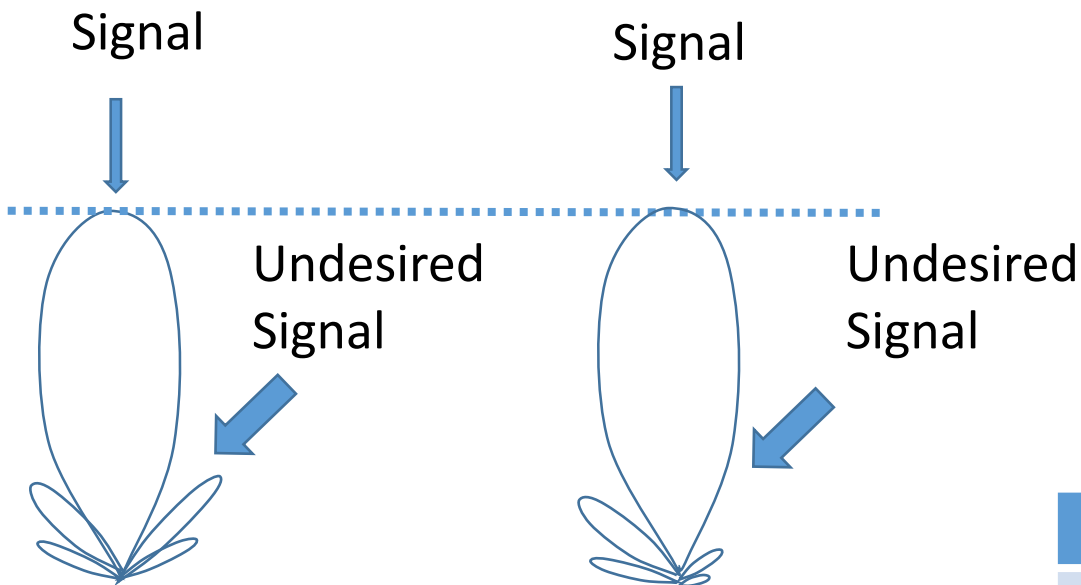
minimize $P = \frac{1}{2} w^H R_{xx} w$

subject to $C^T w^* = N$ and $|w^H w| \leq \delta N$

$$w = \frac{(R_{xx} + \sigma I)^{-1} C}{C^H (R_{xx} + \sigma I) C}$$

δ : ノルム拘束値 (許容するSN損失)

DCMP法では、所望方向の電力をNに保ちつつ全体の電力を $|w^H w|$ 倍する。NC-DCMP法では、これを δN 以下に制限することでSNの損失を保障している。



ノルム拘束のトレードオフ

| ノルム拘束値 δ | 大 | 小 |
|-----------------|---|---|
| クラッター抑圧能力 | ○ | × |
| 大気エコーの損失 | × | ○ |

NC-DCMP法 (Nishimura et al., 2012)

$$\begin{aligned} \text{minimize} \quad & P = \frac{1}{2} w^H R_{xx} w \\ \text{subject to} \quad & C^T w^* = N \text{ and } |w^H w| \leq \delta N \end{aligned} \quad \longrightarrow \quad w = \frac{(R_{xx} + \sigma I)^{-1} C}{C^H (R_{xx} + \sigma I) C}$$

When $\sigma = 0$,
this is the solution to the DCMP.

オンライン観測システムに組み込むために検討すべきこと

検討項目1.

ノルム拘束値 δ を実際の観測データを用いて適切な値を決める必要がある(先行研究では数値計算により決めていた)

検討項目2.

受信信号の自己相関行列 R_{xx} は、受信信号の相関を低下させるため、一定の時間(一定の観測データ点数)を平均して求められる。その適切な時間長(データ長) n を決める必要がある

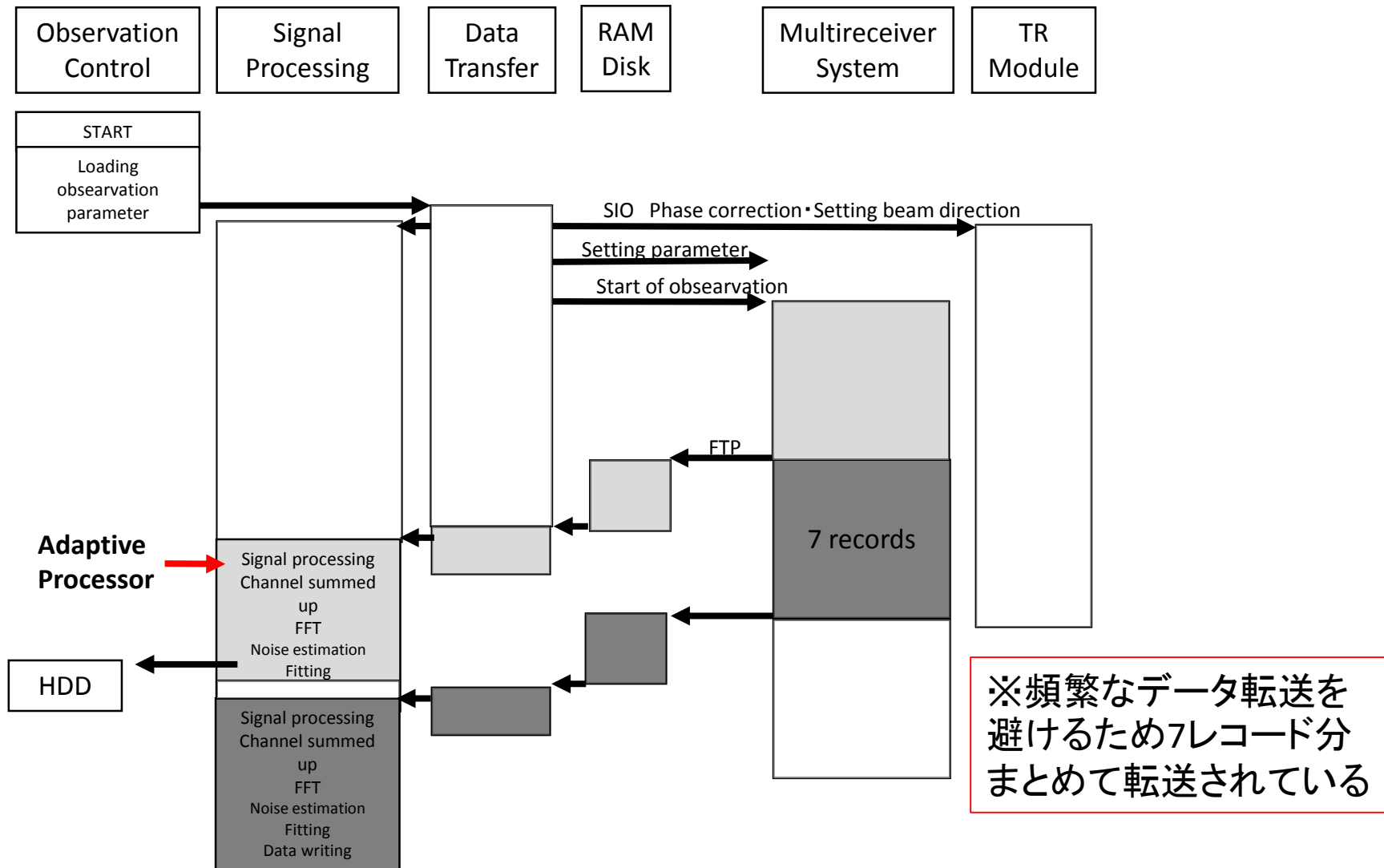
対流圏・下部成層圏観測モード : 観測パラメータ

- ビーム数 5 (天頂、東西南北)
 - コヒーレント積分 32
 - FFT 128
 - IPP 400 μ s
 - 距離方向のサンプル数 160
 - 距離分解能 150 m
-
- 観測データは約8秒に1回(1レコード)取得される
 - 信号処理をリアルタイムに行うためには1レコードあたり8秒以内にすべての処理を完了する必要がある
 - 観測データは全ての時系列データの複素信号を実部と虚部それぞれをfloat型で保存しているため1レコードあたりの容量は25チャンネルで20.5 MB程度になる。1日あたり200 GB程度になる。

観測システムのフローチャート

Dell Computer/RedHat Linux

MU Radar

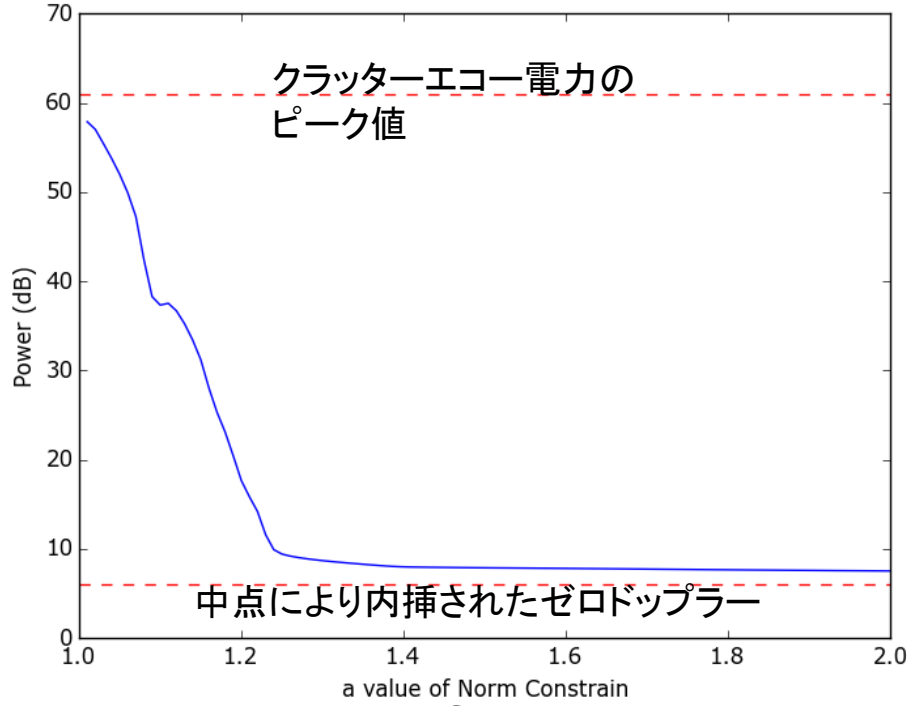


※頻繁なデータ転送を避けるため7レコード分まとめて転送されている

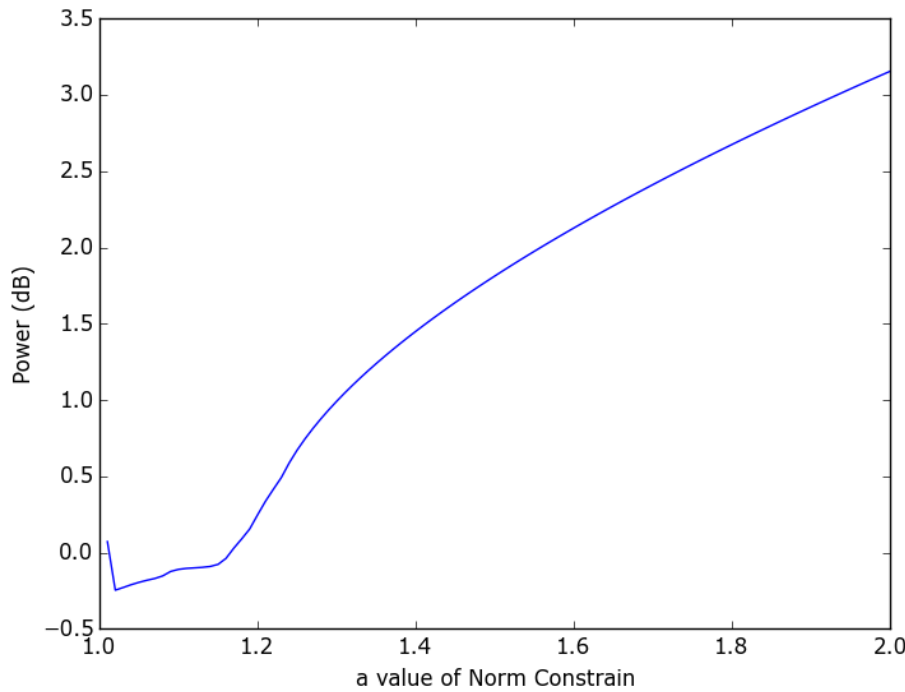
検討項目1. 最適なノルム拘束条件 δ の検討

ノルム拘束値 δ の平面から見た場合

ノルム拘束値を変化させたときの
ゼロドップラー電力の変化



ノンアダプティブ処理とアダプティブ処理
との大気エコー電力のピーク値の差



δ を大きくすると、クラッターをより抑圧するが、

$\delta > 1.4$ の範囲では、 δ を大きくしてもクラッター抑圧能力に大きな差異が生じなくなる

- δ の増加に伴い、劣化量が増加する。
- 劣化量は、 $1/\delta$ とおおよそ一致する

計算時間の見積もり ($\delta = 1.25$)

NC-DCMP法 (Nishimura et al., 2012)

$$\text{minimize } P = \frac{1}{2} w^H R_{xx} w$$

$$\text{subject to } C^T w^* = N \text{ and } |w^H w| \leq \delta N$$

$$w = \frac{(R_{xx} + \sigma I)^{-1} C}{C^H (R_{xx} + \sigma I) C}$$

When $\sigma = 0$,
this is the solution to the DCMP.

σ : pseudo-noise

I : identity matrix

NC-DCMP法の解法

手順1 DCMP法を解く

手順2 ノルム拘束条件を満たせば解

手順3 疑似雑音 σ を加え、手順2へ

- 疑似雑音 σ を加えることで、強い干渉波信号以外を雑音に埋もれさせ、所望信号の抑圧を抑える

この繰り返し処理がNC-DCMP法の律速段階となる

この繰り返し処理が律速段階

初期値のDCMP法による
ウェイトノルムが大きいと
ステップ数が増える。

Newton法を適用すると
高々6ステップ程度となった。
(中央値は1.5ステップ程度)

最悪の場合の計算時間

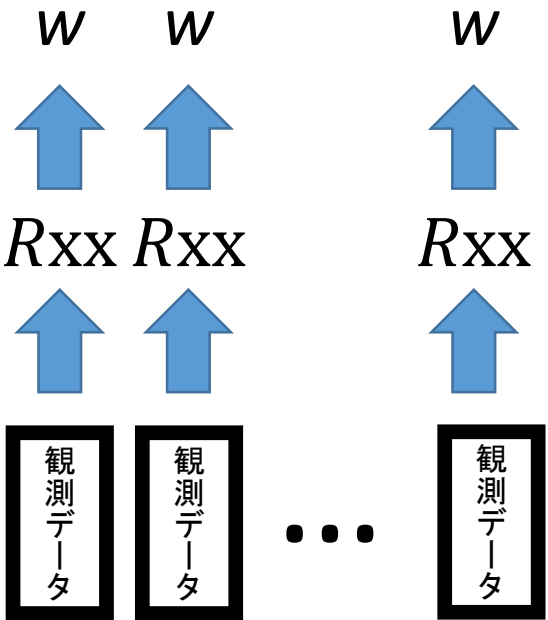
$$5 \text{ beam} \times 160 \times 6 \text{ steps} \times 0.3 \text{ (ms)} \\ = 1.4 \text{ (s)}$$

1レコードあたり8秒以内を十分に
満足できる。

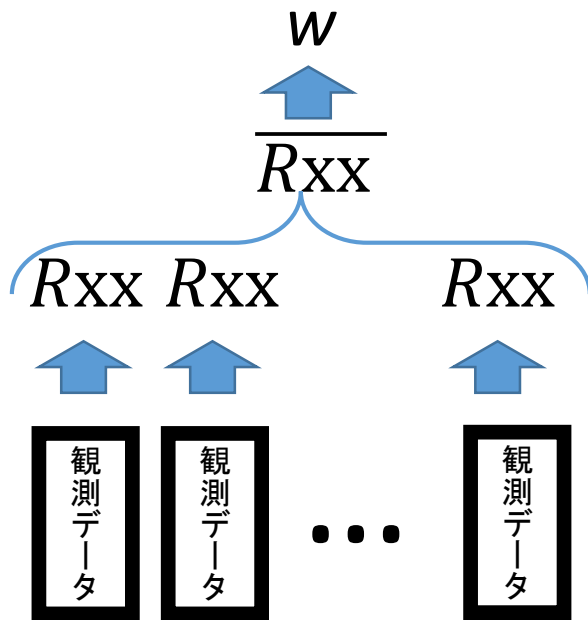
検討項目2. 用いるデータ長(時間長)の検討

受信信号の相関行列 R_{xx} は、到来波の相関を低下させるため、一定の時間を平均したものが一般に用いられる。従来、1レコード分(8秒)で十分とされていたが、より長時間のデータを用いることを検討する。

1レコードに対し1つのウェイトベクトルを求めアダプティブ処理を行う



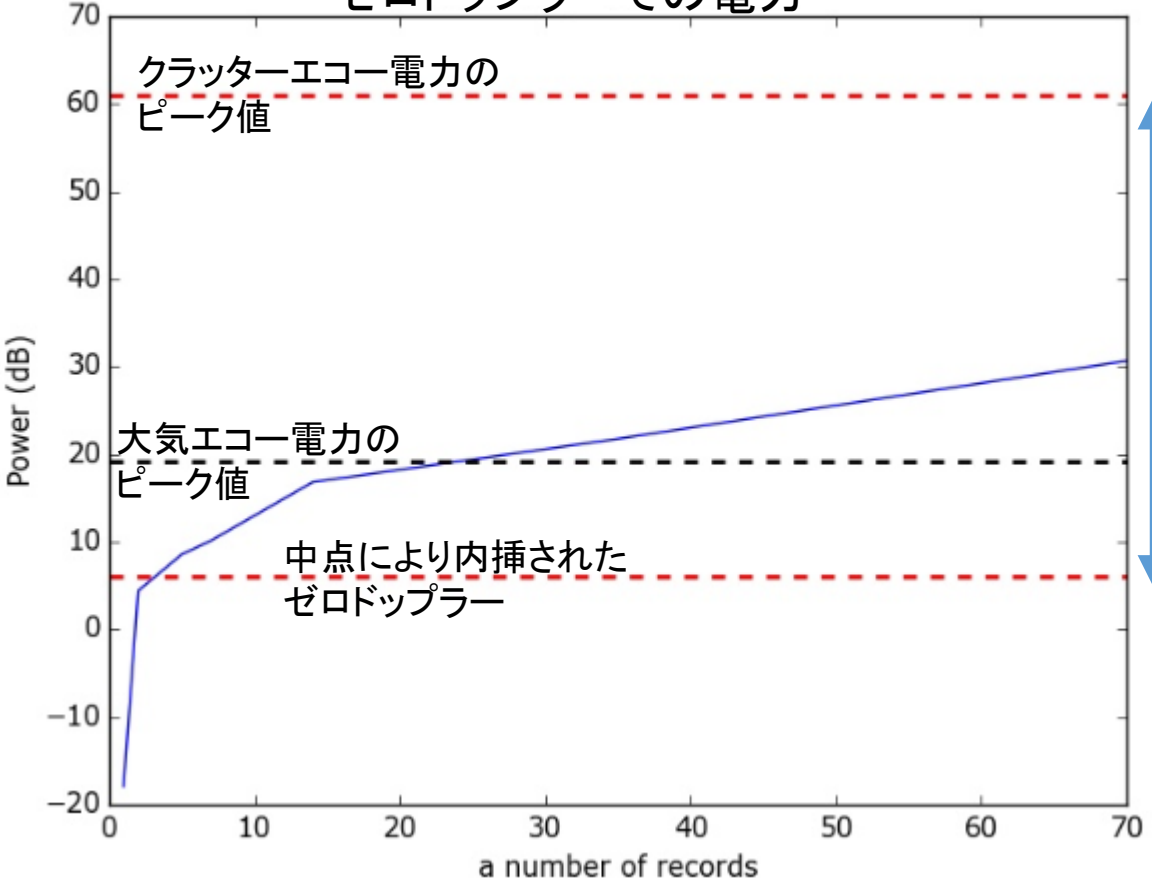
複数のレコードに対し、1つのウェイトベクトルを求めアダプティブ処理を行う



計算量を削減できる

用いるレコード数の検討: 検討結果(日中のデータ)

ゼロドップラーでの電力



抑圧すべきクラッターエコーの電力

nを10以上になるとクラッター抑圧が不十分となる傾向がみられた。

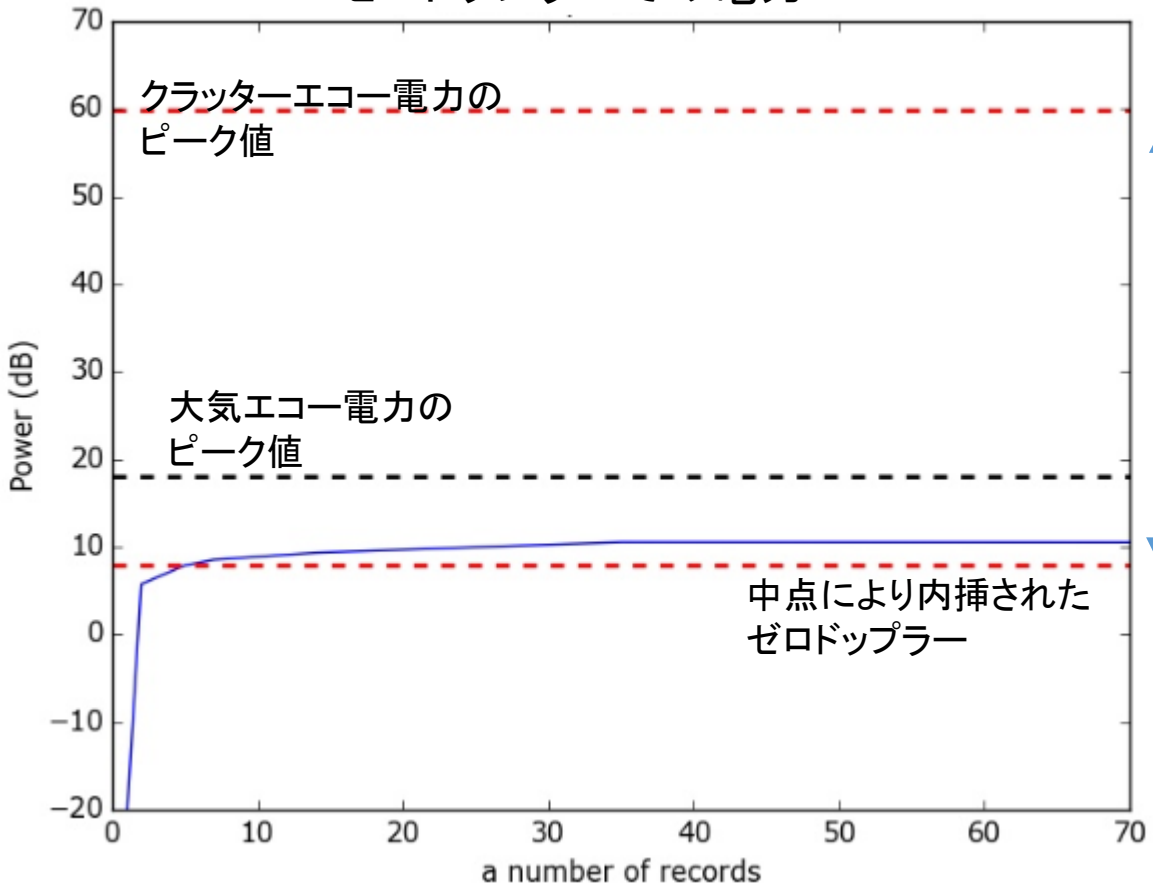
用いるレコード数を多くするのは好ましくないことが示唆された。

横軸: 受信信号の自己相関行列を求めるために用いたレコード数n

2015年11月11時55分から12時15分に取得された、東方向・高度2.5 kmのデータを用いた

用いるレコード数の検討: 検討結果(深夜帯のデータ)

ゼロドップラーでの電力



抑圧すべきクラッターエコーの電力

n = 5, 7の場合
抑圧すべきクラッター電力と抑圧しているクラッター電力がほぼ等しい

nを増加させてもクラッター抑圧に大きな差は生じていない。この傾向は夜から朝までのデータで多くみられた。

横軸: 受信信号の自己相関行列を求めるために用いたレコード数

2015年11月18日2時16分から2時26分
取得された東方向・高度2.5 kmのデータを用いた

用いるレコード数の検討：検討結果の考察

| n | 日中 | 日没後 |
|------|----|-----|
| 1 | 過剰 | 過剰 |
| 2から7 | 適当 | 適当 |
| 14以上 | 適当 | 不十分 |

• 用いるレコード数

- n=2～7が適当
- 実装の容易さの観点からn=7を採用することにした
 - 7レコードずつホストPCに転送されるため

• 観察された傾向

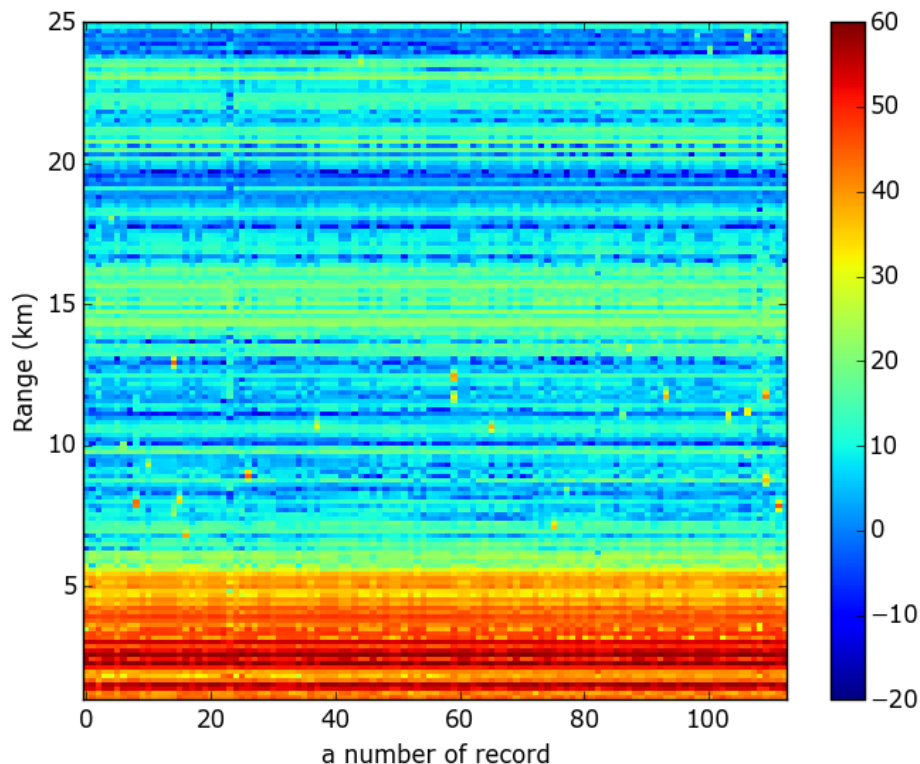
- nが増加するとクラッター抑圧が不十分となる傾向が見られた。
 - 特に日中において顕著である。

• 考えられる原因

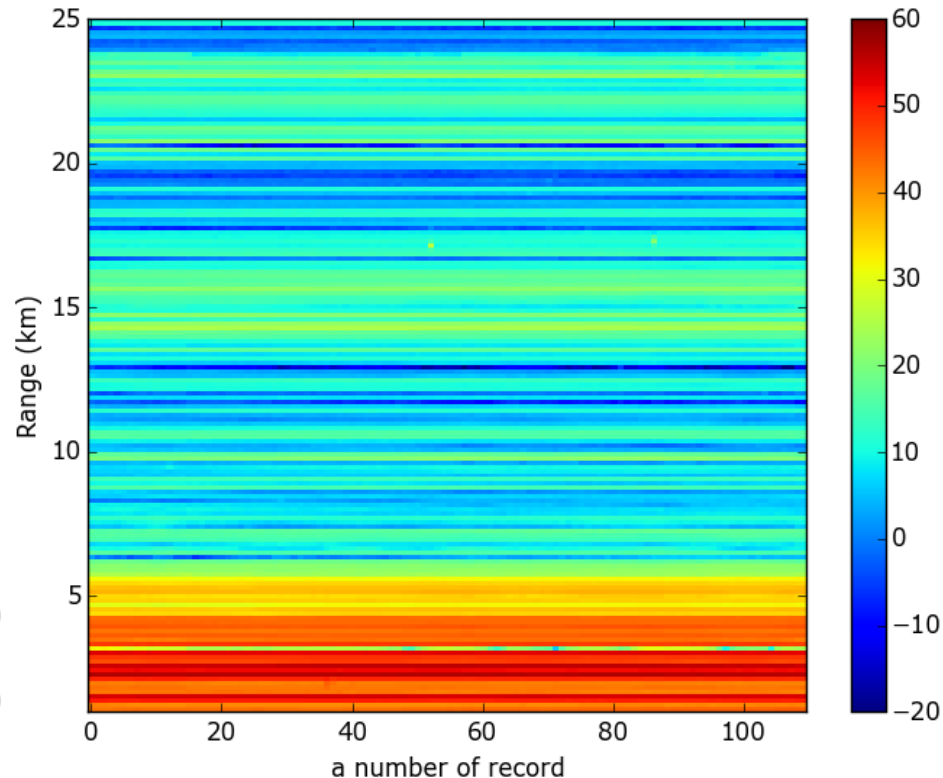
- MUレーダーからクラッター源までの空間の気温分布の変化により、クラッターエコーの伝搬経路が変化したと考えられる

ゼロドップラー電力(ノンアダプティブ処理)の高度時系列変化

日中(840レコード:約4時間)



深夜帯(840レコード:約2時間)



それぞれの高度でのゼロドップラーの電力の時系列変化を示す。
深夜帯に比べ日中は時系列変化が大きい。
日射により、クラッター伝搬経路が変化していることが示唆された

対流圏・下部成層圏標準観測モードへの NC-DCMP法の実装方法

- 検討項目1. ノルム拘束値
 - $\delta = 1.25$ と決定した
- 検討項目2. 受信信号の自己相関行列の求め方
 - 7レコードで平均処理し、1つのウエイトベクトルを求め、それぞれのレコードでアダプティブ処理を行う

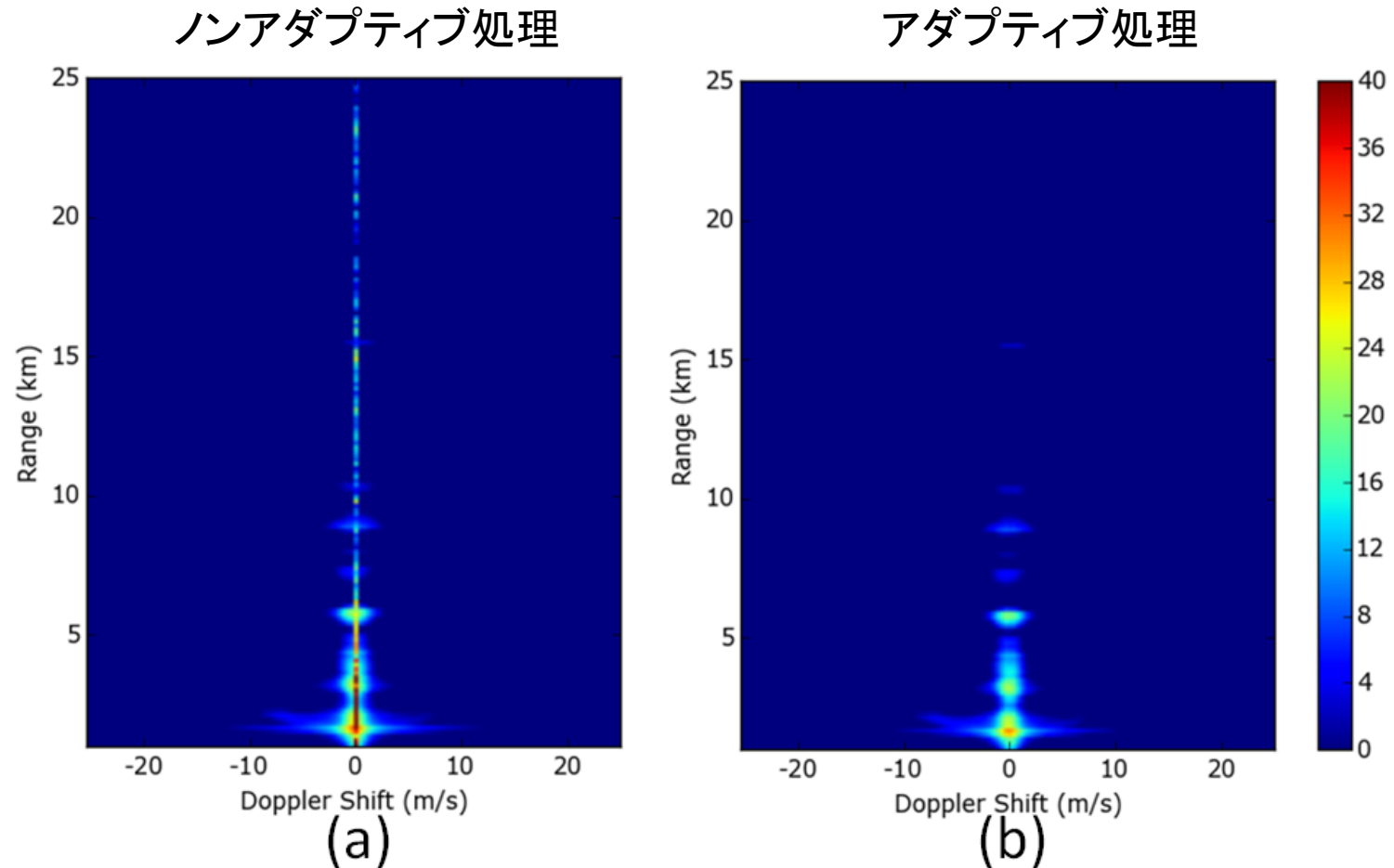
2015年11月より

アダプティブクラッター抑圧処理システムを
実時間処理として運用を開始。

約500時間の観測が行われ、安定動作してる。

※現在は、ノンアダプティブ処理、アダプティブ処理両方のデータを残している

オンライン観測システムへの実装と取得できたデータ

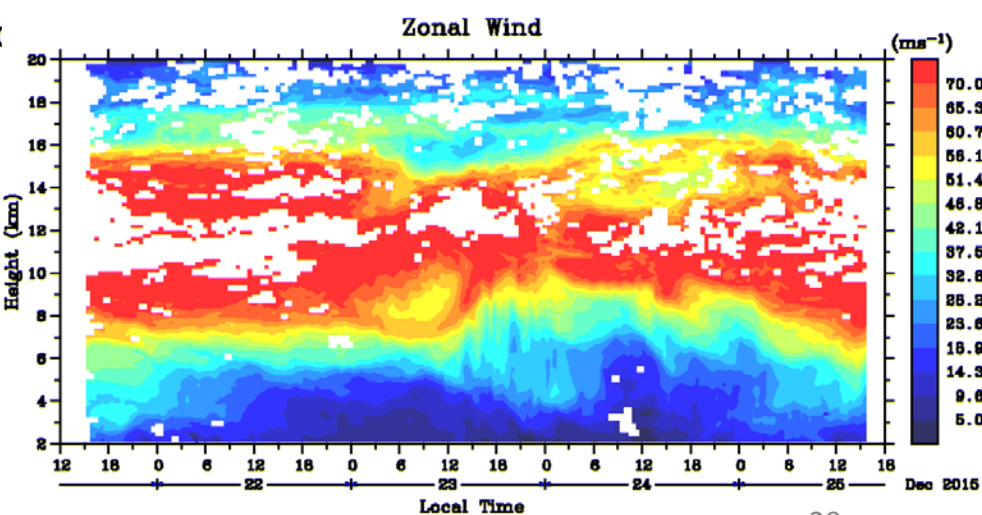
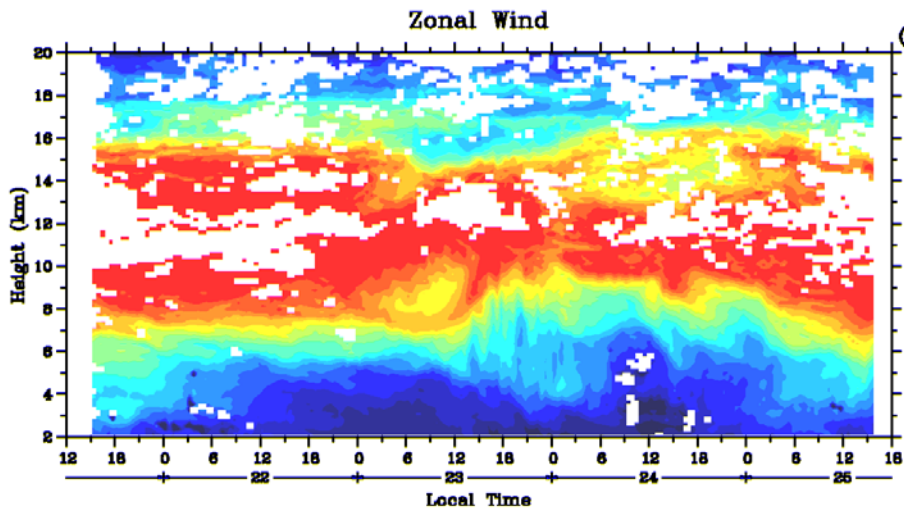
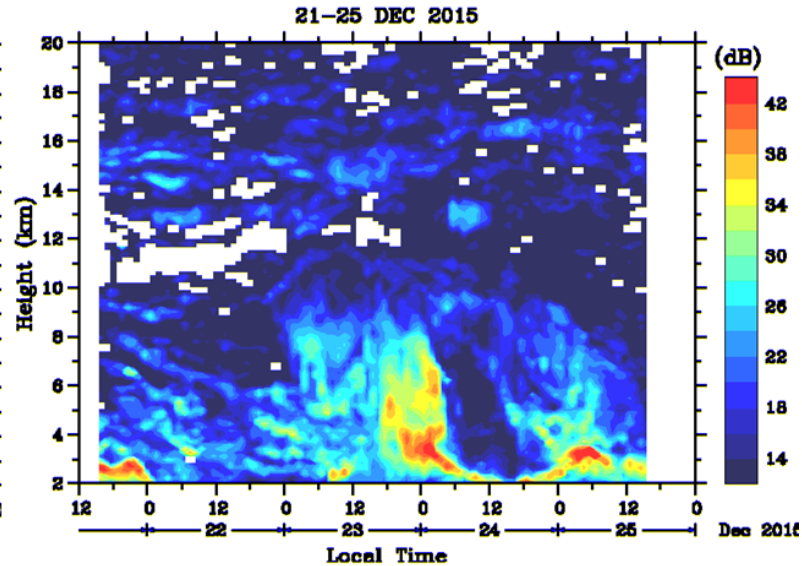
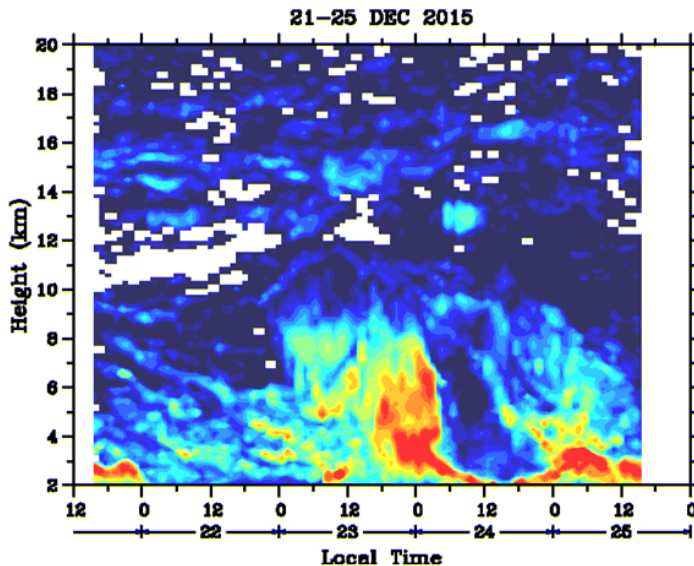


2015年12月22日0時0分49分から3時29分42分までの観測データをインコヒーレント積分し得られたドップラースペクトル

オンライン観測システムへの実装と取得できたデータ エコー強度(東方向)と東西風

ノンアダプティブ処理

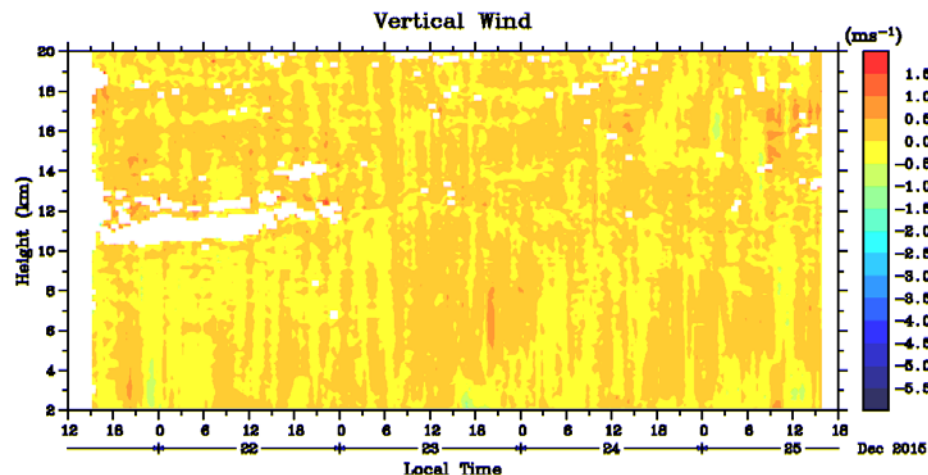
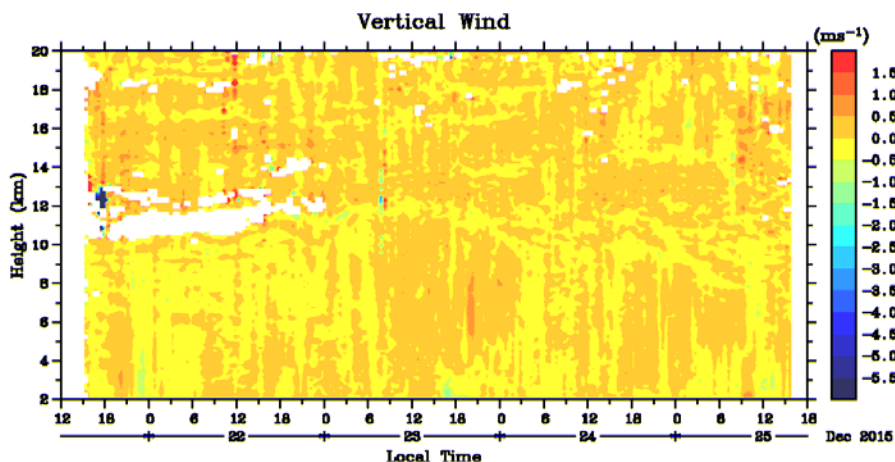
アダプティブ処理



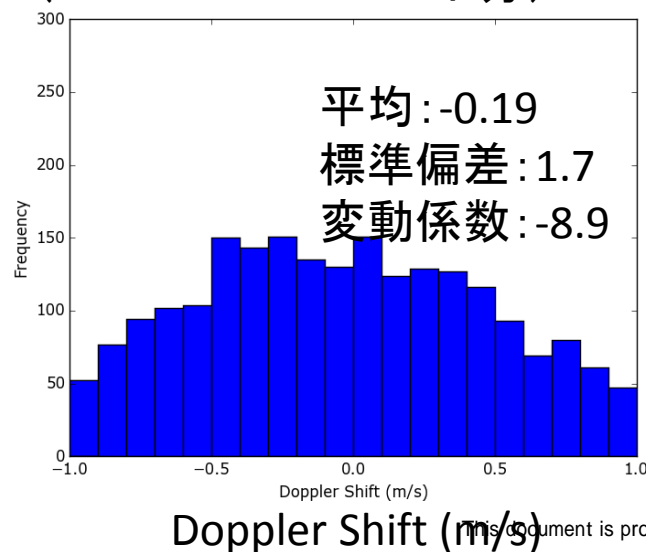
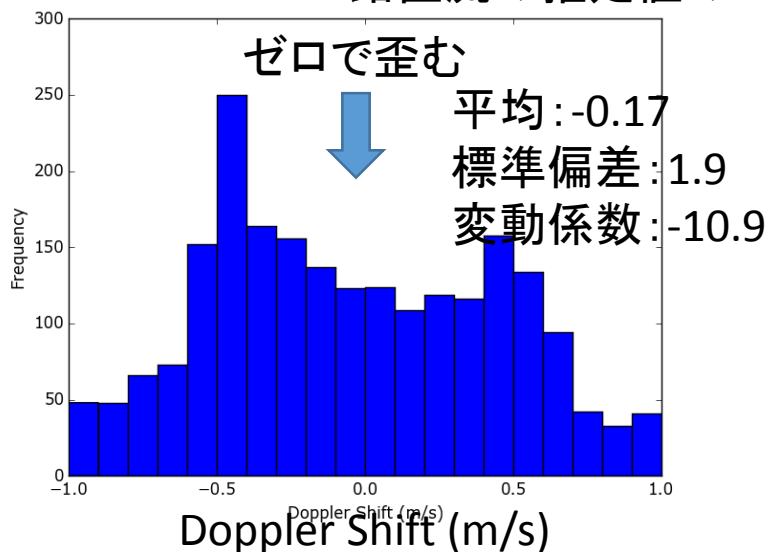
オンライン観測システムへの実装と取得できたデータ 鉛直流

ノンアダプティブ処理

アダプティブ処理



鉛直流の推定値のヒストグラム (8.1 km : 2500レコード分)



まとめ

- MULEレーダーの対流圏・下部成層圏標準観測モードに、NC-DCMP法による実時間アダプティブクラッター抑圧処理を実現した。
- アダプティブ処理を適用する最適な時間長(データ長)やノルム拘束値 δ を検討し、決定した。
- 実環境に実装し、2015年11月から運用を開始した。これまで500時間ほど安定に運用できている。
- アダプティブ処理により、風速データに悪影響を及ぼしていないこと、特に弱い鉛直流の推定が改善されていることを確認した。
- 同様の検討を行い、中間圏標準観測モードにもアダプティブ処理を実施した。クラッターエコーだけでなく、流星エコーの抑圧にも効果がある。

今後の発展

- 最適なノルム拘束値 δ は、各ビーム・各高度において時々刻々と変化する可能性が高い。アダプティブに最適な δ を決めることで、SN劣化の小さい、クラッター抑圧を実現できる。
- 現状でも、航空機エコーの軽減効果はあるが、十分ではない。ADS-B信号による、現在位置・高度・速度などの情報も利用することで、航空機エコーの抑圧が期待される。

航空機エコーの存在するドップラースペクトル

