

# 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

久保田 匡亮      橋口 浩之      万城 孝弘      山本 衛 \*

## 概要

大気レーダー観測において、しばしば地形性クラッター（山や建造物からのエコー）や航空機クラッター（航空機からのエコー）が問題となっている。クラッター抑圧手法として、NC-DCMP(Norm-Constrained and Directionally Constrained Minimization of Power)法が提案され、オフラインにおいてMUレーダー（中層・超高層大気観測用大型レーダー；Middle and Upper atmosphere radar）の実観測データに適用し、有効であることが実証されている[1]。本稿では、NC-DCMP法を用いて、MUレーダーの観測データを実時間に処理するシステムの開発を検討する。また、より十分な航空機クラッター抑圧を実現するためにADS-B(Automatic Dependent Surveillance-Broadcast)を用いた新規抑圧システムの提案をする。

## 1 大型大気レーダー：MUレーダー

大気レーダーは、大気の屈折率のゆらぎによって生じる電波散乱を受信することで、大気観測を行うものである。大気レーダーは、その観測対象となる高度によって種類が分けられている。中間圏、成層圏、対流圏を観測する大気レーダーをMSTレーダーと呼び、代表例として、京都大学が滋賀県甲賀市信楽町に所有するMUレーダーがある[2]。MUレーダーの主要諸元を表1に示す。MUレーダーは、475本の八木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システムを採用している。475本のアンテナは19本ずつの25グループに分けることができ、2004年より超多チャンネルデジタル受信システムが導入されたことにより、それぞれのアンテナグループで信号を独立に受信できるようになっている。

表1 MUレーダー主要諸元

周波数	46.5MHz
帯域幅	3.5MHz
アンテナ開口面積	8.330m <sup>2</sup>
ビーム幅	3.6度
送信電力	1MW(尖頭値)
	50kW(平均値)
パルス反復周波数	2.5kHz以下
パルス幅	1-500 $\mu$ sec
受信ダイナミックレンジ	70dB
受信帯域幅	1.65MHz
偏波	右旋円偏波

## 2 研究背景

対流圏から中間圏までの領域では、乱流により屈折率が変動しブラッグ散乱が起こる[3]。この現象によるエコーは、乱流エコーもしくは晴天大気エコーと呼ばれている。この乱流エコーが背景風とともに移流するので大気運動を測定することができる[4]。MUレーダーによる大気観測では、DBS(Doppler Beam Swinging)法

\* 京都大学生存圏研究所

が用いられている[5]. DBS法とは、レーダービームを3方向以上に走査し、それぞれの視線方向でドップラー速度を求めることで風速の3成分を求める手法である。MUレーダーの標準観測においては、天頂と天頂角10度で東西南北にビームを走査し、鉛直流、東西風、南北風の観測を行っている。実際の観測では、大気エコーだけでなく、地形性クラッター（山や建造物からの反射波）や航空機クラッター（航空機からの反射波）がサイドローブで受信される。一般にクラッターは大気エコーに比べて非常に大きいため風速推定に大きな影響を及ぼすことがある[6]。特に地形性クラッターに関しては、常にレーダー付近に存在するため対策が必要である。

MUレーダーのレンジ10km付近のドップラースペクトルの例を図1に示す。従来法では、ドップラーシフトが0m/sのところのみ地形性クラッターが存在すると仮定して、中点で内挿していた。しかし、フェージングにより地形性クラッターが広がりを持つ場合に、クラッターの抑圧が不十分になる問題がある。またドップラーシフトが0m/s付近の大気エコーを過小評価し、特に鉛直風の推定に影響を及ぼす可能性がある。

先行研究[7]において、観測したい方向の感度を保持したまま、地形性クラッター方向の感度を抑圧するようにアダプティブ処理を行うNC-DCMP法がMUレーダーの実観測データに適用され有効であることが実証されている。先行研究では、このNC-DCMP法の適用はオフラインにおいて検討されている。そこで本研究では、MUレーダーの実観測データに対して、NC-DCMP法を実時間に適用し処理するシステムの開発を検討する。また航空機クラッターの抑圧も含め、より十分なクラッター抑圧を実現するためにADS-Bを用いた新規抑圧システムを提案する。また本稿では、中間圏に関しては省略し、対流圏・下部成層圏についてのみ述べる。

実時間クラッター抑圧を実現するシステムの開発には、3つの意義がある。1つ目は、実時間処理を行うことで、取得データ容量が削減されることでHDDなどの記憶装置の制約の少ない連続観測が可能となることである。オフライン処理の場合1日に取得されるデータは数100GB程度だが、実時間処理を実現すると数100分の1程度となる。2つ目は、クラッター抑圧手法として用いるNC-DCMP法はソフトウェアでの実装が可能であり、多チャンネル受信が可能なMUレーダーでは、ハードウェアの変更を必要としないため実装が容易にできることである。3つ目は、本研究の成果は現在建設計画中の赤道MUレーダーにも応用可能である点である。

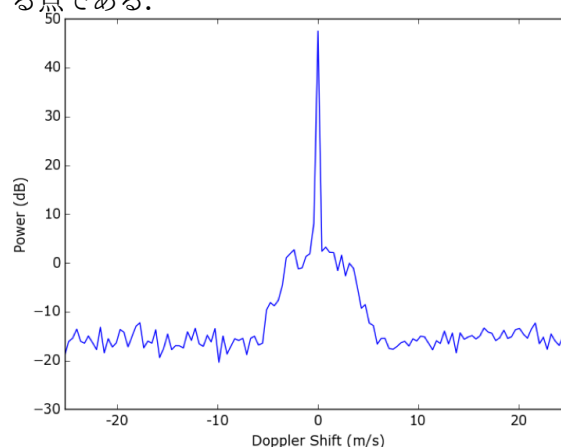


図1 MUレーダーのレンジ10km付近のドップラースペクトル

### 3 NC-DCMP法

NC-DCMP法は、所望波の方向に対する応答を方向拘束により保ち、更にウェイトベクトルの大きさに関する拘束によりメインローブの形状を保持したまま、全体の出力を最小化するアダプティブアンテナの最適化アルゴリズムである。N本で構成されるアレーアンテナを考える。そのとき、NC-DCMP法は次のような凸最小化問題で表される。

$$\begin{aligned} & \underset{\mathbf{W}}{\text{minimize}} \quad \left( P_{\text{out}} = \frac{1}{2} \mathbf{W}^H \mathbf{R} \mathbf{W} \right) \\ & \text{subject to} \quad \mathbf{C}^H \mathbf{W} = \mathbf{N} \text{ and } |\mathbf{W}|^2 \leq \delta \mathbf{N} \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{W}$ は複素ウェイトベクトル、 $\mathbf{H}$ は複素共役転置作用素、 $\mathbf{R}$ は受信信号の相関行列を表し、複素入力ベクトル $\mathbf{X}$ 、 $\mathbf{E}$ を分散共分散行列とすると、 $\mathbf{R} = \mathbf{E}[\mathbf{X}\mathbf{X}^H]$ と表される。また、 $\mathbf{C}$ は所望方向の方向ベクトルであり、 $\delta$ は拘束値を表している。このように方向拘束条件とノルムに関する拘束条件のもと、 $P_{\text{out}}$ を最小にする $\mathbf{W}$ がNC-DCMP法による解である。この解は、Lagrangeの未定乗数法で次のような解を得る。

$$\mathbf{W}(\alpha) = \frac{(\mathbf{R} + \alpha\mathbf{I})^{-1}\mathbf{C}}{\mathbf{C}^H(\mathbf{R} + \alpha\mathbf{I})^{-1}\mathbf{C}} \quad (2)$$

ここで、 $\alpha$ は擬似雑音であり、 $\mathbf{I}$ は単位行列である。

#### 4 最適なノルム拘束値の検討

前節で示したNC-DCMP法におけるノルム拘束値 $\delta$ は、許容するSN比の劣化量 $G_{\text{SNR}}$ により決定でき、 $G_{\text{SNR}}$ は次のように表される。

$$G_{\text{SNR}} = 1/\delta \quad (3)$$

$\delta$ が大きくなると、クラッターの抑圧能力は上がるが、上述したようにSN比が劣化する。そこで本節では、最適なノルム拘束値の検討を行う。

ノルム拘束値を変化させた時のゼロドップラーの電力を図2に示す。この図の通り、 $\delta$ が1.2よりも小さい範囲では、クラッター抑圧能力が低いことがわかる。また $\delta$ を大きくするとクラッター抑圧能力が高くなるが、 $\delta$ が1.4より大きい範囲ではクラッター抑圧能力に大きな差異が生じなくなることがわかる。これより、 $\delta$ の範囲は、 $1.2 < \delta < 1.4$ とするのが適当であることがわかる。

次に、ノルム拘束値を変化させた時のノンアダプティブ処理の大気エコー電力とNC-DCMPを用いたアダプティブ処理をした大気エコー電力とのピーク値の差を図3に示す。この図より、大気エコーの損失を1dB以内にするためには $\delta$ を1.3以下にする必要がある。

この二つの考察より、 $\delta$ の範囲は、 $1.2 < \delta < 1.3$ とするのが最適であることがわかる。現在運用中のクラッター抑圧システムにおけるノルム拘束値 $\delta$ は、計算量の関係で $\delta = 1.25$ で固定している。しかし、MUレーダーのレンジごとにクラッター環境が変化すると考えられるため、今後レンジごとの最適ノルム拘束値 $\delta$ を検討する予定である。

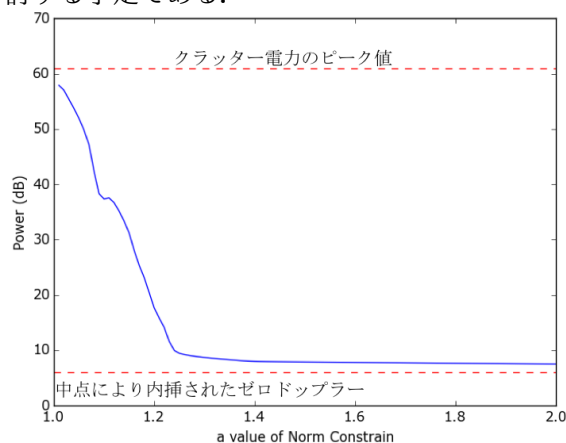


図2 ノルム拘束値を変化させた時のゼロドップラーの電力

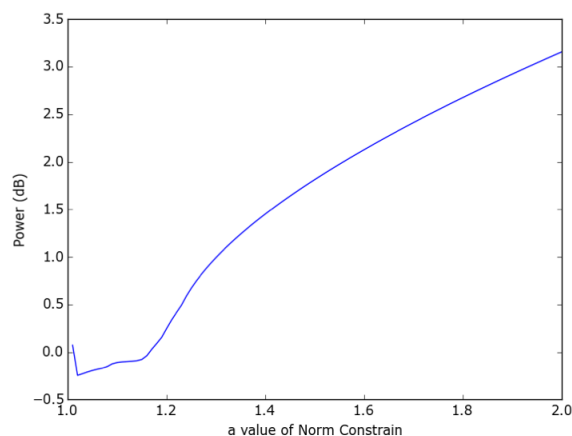


図3 ノルム拘束値を変化させた時のノンアダプティブ処理の大気エコー電力とアダプティブ処理した大気エコー電力のピーク値の差

#### 5 用いるレコード数の検討

受信信号の相関行列 $\mathbf{R}$ は到来波の相関を低下させるために、一般に一定の観測時間を平均したものが用いられる。MUレーダーの標準観測においては、約8秒の観測を1レコードとしてお

り、相関を低下させるためにはこの1レコードで十分だとされていたが、本節ではより最適なレコード数の検討を行う。このとき前節での検討より、NC-DCMP法のノルム拘束値 $\delta$ を1.25、すなわち許容するSN比の劣化を0.97dBとする。また観測時間が日中と深夜帯においてゼロドップラー電力に異なる傾向が見られたので、それぞれについて検討を行う。

用いるレコード数を変化させた時の日中のゼロドップラー電力を図4に示す。レコード数1の時はノイズ成分もキャンセルし数値計算上ゼロ( $-\infty$ dB)となってしまう。レコード数を増加させると、ゼロドップラー電力がクラッターの電力のピーク値に近づきクラッター抑圧が不十分となることがわかる。また用いるレコード数を20以上にすると、大気エコーの電力より大きくなり、風速推定に影響を及ぼす可能性があることがわかる。これにより、用いるレコード数は20以下にする必要がある。

次に、レコード数を変化させた時の深夜帯のゼロドップラー電力を図5に示す。用いるレコード数が5または7のときにゼロドップラー電力が中点により内挿されたゼロドップラー電力と等しくなり、クラッター抑圧が十分にできているとわかる。

これらの検討から、用いるレコード数は5または7とすることが望ましいことがわかる。MUレーダーの標準観測モードにおいて制御コンピュータに7レコード分まとめてデータ転送が行われているため、実装の簡便さを考慮して、用いるレコード数は7レコードとする。

## 6 現行のクラッター抑圧システム

現行のクラッター抑圧システムは、2015年11月より運用を開始し、NC-DCMP法を用いてMUレーダーの観測データを実時間処理し、地形性クラッターの抑圧に効果を発揮している。現在はノンアダプティブ処理のデータとNC-DCMPを用いてアダプティブ処理をしたデータの両方を保存しており、それぞれのデ

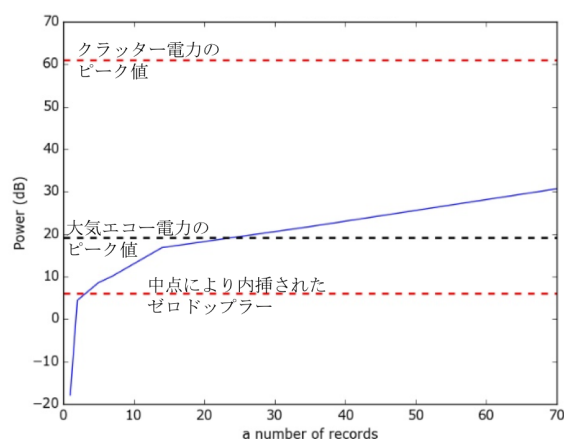


図4 用いるレコード数を変化させた時の日中のゼロドップラー電力

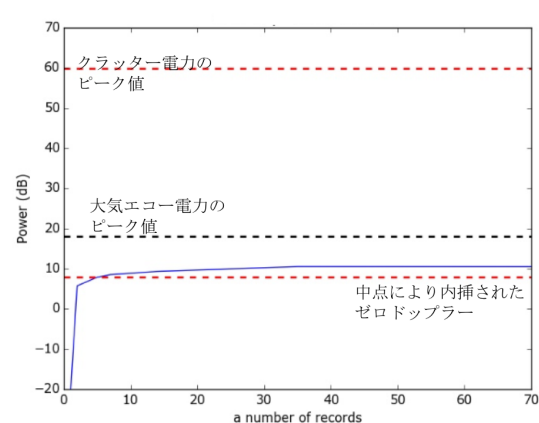


図5 用いるレコード数を変化させた時の深夜帯のゼロドップラー電力

ータのドップラーズペクトルを図6に示す。大気エコーを損なうことなく地形性クラッターと考えられるゼロドップラーを抑圧できていることがわかる。

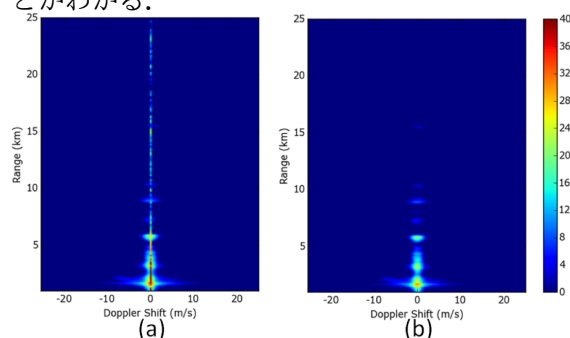


図6 (a)ノンアダプティブ処理のデータから得られたドップラーズペクトル (b)NC-DCMP法を用いたアダプティブ処理のデータから得られたドップラーズペクトル

## 7 新規クラッター抑圧システムの提案

NC-DCMP法は移動する目標に対しては高い効果を得られないことが示されており、航空機クラッターを十分に抑圧することはできていない。そこで本節では、ADS-Bと2段階NC-DCMP法を用いた航空機クラッターの抑圧システムの提案を行い、現行のクラッター抑圧システムに追加することでより十分なクラッター抑圧を実現することを目指す。

ADS-Bは、GPS信号を用いて航空機が絶えず、精度の高い位置情報や高度などを放送するシステムである。ADS-Bのデータは各航空機ごとに112ビットのデータで送られてくるためデコードする必要がある[8]。2016年9月30日に信楽MU観測所で取得した一機の航空機のデータを解析して得られたMUレーダーからのレンジ、仰角、方位角の時間変化を図7に示す。ADS-Bで取得したデータがMUレーダーを東から南方向に飛行していることがわかる。また、ADS-Bから得られた航空機のデータを、横軸をMUレーダーからの東方向の距離、縦軸をMUレーダーから北方向の距離としたものと、同時刻にMUレーダーで取得したノンアダプティブ処理のデータから得られたドップラースペクトルを図8に示す。距離13km辺りに航空機からと思われるエコーが得られている。また図

reffig.7c, 8より、ADS-Bのデータより確認できた航空機がMUレーダーで取得したデータより得られたドップラースペクトルでも確認できることがわかる。これにより、ADS-Bにより航空機の位置情報が正しく取得できることが確認できる。

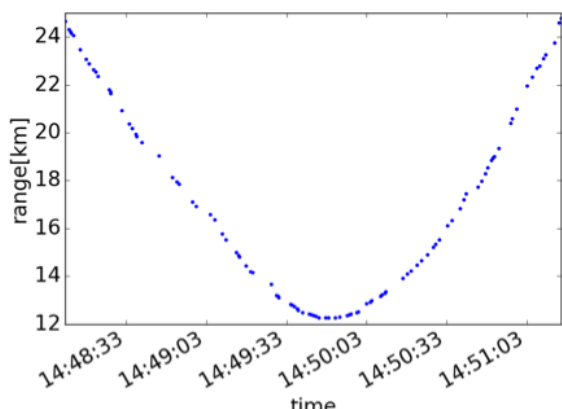
ここで本節では、NC-DCMP法を拡張した航空機クラッター抑圧手法を用いた新規抑圧システムの提案をする。先行研究において、航空機クラッターを抑圧する手法として2段階NC-DCMP法が提案されている[9]。

2段階NC-DCMP法による航空機クラッター抑圧は、2つの手順からなる。まず、各時刻における航空機クラッターの到来方向を推定し、NC-DCMP法を用いて航空機クラッターを分離再生した後、元の受信信号から差し引く。次に再度NC-DCMP法を用いて地形性クラッターを抑圧する。この2段階NC-DCMP法を用いることで、地形性クラッターと航空機クラッターを抑圧することが可能である。先行研究では、オフライン検討のため上空を全探索し航空機クラッターの到来方向を推定していたが、本研究では実時間でのクラッター抑圧システムの開発をするため、ADS-Bを利用して航空機クラッターの探索範囲の限定を行う。

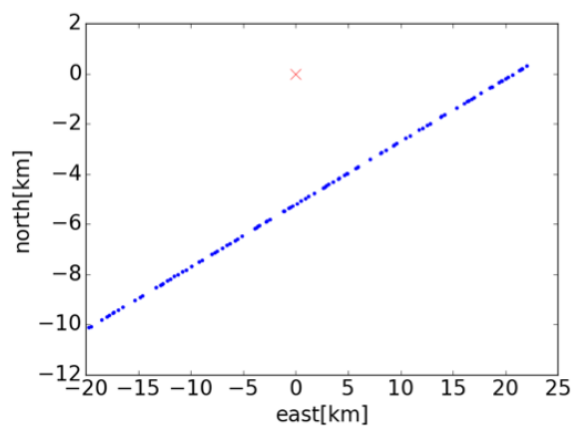
## 8 まとめと今後の課題

本稿では、NC-DCMP法を用いたクラッター抑圧アルゴリズムを用いて、クラッター抑圧を検討し、最適なノルム拘束値 $\delta$ と受信信号の相関行列 $\mathbf{R}$ を求めるために用いるレコード数の検討を行った。また、検討した最適なノルム拘束値 $\delta$ と最適なレコード数を考慮したNC-DCMP法を用いてクラッター抑圧システムの運用を開始し、安定的に動作していることを確認した。また、現行のクラッター抑圧システムでは航空機クラッター抑圧が不十分であることを示して、ADS-Bを用いた航空機の位置情報の取得をし、2段階NC-DCMP法を用いた新規クラッター抑圧システムの提案を行った。

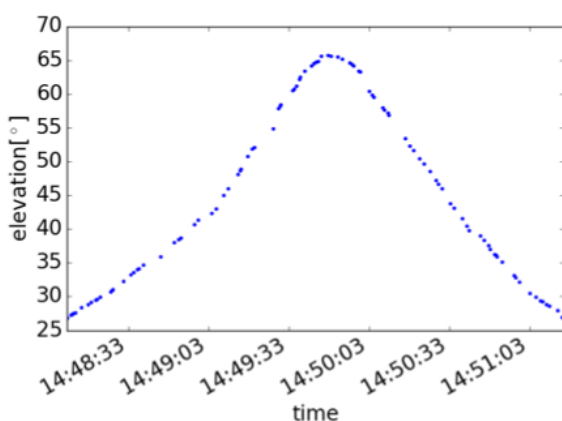
今後の課題は、ADS-Bで受信できるデータが被監視側の航空機に依存しているため、 $\alpha - \beta$ フィルタを用いた航空機の位置予測を検討する。またオフラインにおいて、本稿で提案した新規抑圧システムをMUレーダーの実観測データに適用し検討をする。最後に、現行のクラッター抑圧システムに本稿で提案した新規抑圧システムを追加し、運用することを目指す。



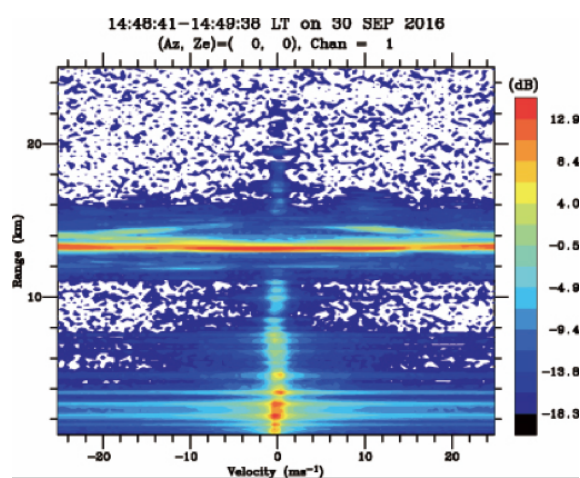
(a)



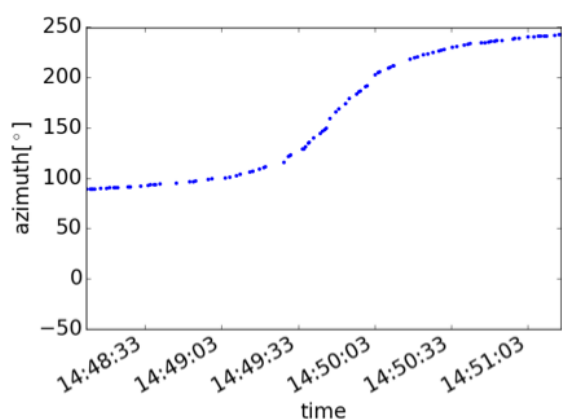
(a)



(b)



(b)



(c)

図7 ADS-Bにより得られた(a)MUレーダーからのレンジ (b)MUレーダーからみた仰角(c)MUレーダーからみた方位角

図8 (a)ADS-Bから得られた航空機の位置を示したもの、バツ印はMUレーダーの位置 (b)ADS-Bと同時刻に取得したノンアダプティブ処理のデータから得られたドップラースペクトル

## 参考文献

- [1] K. Kamio, K. Nishimura, and T. Sato, "Adaptive sidelobe control for clutter rejection of atmospheric radars," *Annales geophysicae*, vol.22, no.11, pp.4005–4012, 2004.
- [2] 深尾昌一郎 and 浜津享助, "気象と大気のレーダーリモートセンシング," 2005.
- [3] R.F. Woodman and A. Guillen, "Radar observations of winds and turbulence in the stratosphere and mesosphere," *Jour-*

- nal of the atmospheric Sciences, vol.31, no.2, pp.493–505, 1974.
- [4] S. Kato, “Validity on radar observation of middle-and upper-atmosphere dynamics,” *Earth, planets and space*, vol.61, no.4, pp.545–549, 2009.
- [5] 津田敏隆, “小特集: 電波とリモートセンシング MU レーダーによる大気運動のリモートセンシング,” *日本リモートセンシング学会誌*, vol.12, no.1, pp.82–87, 1992.
- [6] T. Sato and R. Woodman, “Spectral parameter estimation of cat radar echoes in the presence of fading clutter,” *Radio Science*, vol.17, no.4, pp.817–826, 1982.
- [7] K. Nishimura, T. Nakamura, T. Sato, and K. Sato, “Adaptive beamforming technique for accurate vertical wind measurements with multi-channel mst radar,” *J. Atmos. Oceanic Technol.*, vol.29, no.12, pp.1769–1775, 2012.
- [8] J. Sun, *ADS-B Decoding Guide Release0.3*, 2016.
- [9] 橋本大志, “南極大気レーダートレーニングシステムを用いた航空機クラッター抑圧,” *京都大学情報学研究科通信情報システム専攻修士論文*, 2012.