

令和 4 年 6 月 8 日現在

機関番号：12612

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K14997

研究課題名（和文）気象用フェーズドアレイレーダに対する適応信号処理を応用した高解像度化に関する研究

研究課題名（英文）High resolution beamforming for phased array weather radar using an adaptive signal processing

研究代表者

菊池 博史（KIKUCHI, HIROSHI）

電気通信大学・宇宙・電磁環境研究センター・助教

研究者番号：40783105

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：現在運用中のフェーズドアレイレーダは方位角方向に機械走査、仰角方向に電子走査で3次元的な降雨分布を観測している。電子走査にはデジタルビーム形成(DBF)を利用している。現在はフーリエビーム形成法を利用しているが、この手法は開口径又は素子数など幾何学的なアンテナ形状によってその空間分解能が決定する。そこで、適応型信号処理を応用したデジタルビーム形成手法を開発し、空間分解能の向上を目指す。具体的にはアダプティブにアンテナゲインを抑圧できる方法として最小二乗誤差(MMSE)法やCapon法などを、高解像度を実現するビーム形成手法として、圧縮センシング技術を用いたビーム形成手法を提案する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

過去数年間で内閣府の激甚災害の指定を受けた多くは、気象現象による災害である。その多くは台風・豪雨など、降雨を起因とした土砂災害や洪水による被害であり、広域かつ高密度な降雨観測システムの構築が社会的背景として、早急かつ非常に重要である。所望の降雨観測システムの構築にC帯の気象レーダは観測範囲が数百kmであり、日本の国土を考慮するとその開発は重要な要素である。特に上空の高密度観測のためには、C帯気象レーダのフェーズドアレイ(PAWR)化技術の開発が早急に求められている。本研究成果は大型のPAWRに適用可能であり、開発上のボトルネックを解決する技術として応用可能であることを示した。

研究成果の概要（英文）：Phased array weather radar currently in operation observes three-dimensional rainfall distribution by mechanical scanning in the azimuth direction and electronic scanning in the elevation direction. A digital beam formation (DBF) is used for electron scanning. Currently, the Fourier beamformer is used in operation, however the spatial resolution of this method is determined by the geometric antenna shape such as the aperture diameter or the number of elements. Therefore, we aim to improve the spatial resolution by developing a digital beam formation method that applies adaptive signal processing. Specifically, we propose the least squares error (MMSE) method and Capon method as methods that can adaptively suppress the antenna gain, and the beam formation method that uses compressed sensing technology as the beam formation method that achieves high resolution.

研究分野：計測工学

キーワード：降雨観測 気象レーダ フェーズドアレイレーダ 適応信号処理 圧縮センシング

## 1. 研究開始当初の背景

まず本研究の学術的背景について述べる。過去5年間で内閣府の激甚災害の指定を受けた22件の事象の内、地震による長野・熊本・北海道地震を除く、実に19件が気象現象による災害である。その多くは台風・豪雨など、降雨を起因とした土砂災害や洪水による被害であり、広域かつ高密度な降雨観測システムの構築が社会的背景として、早急かつ非常に重要である。所望の降雨観測システムの構築にC帯の気象レーダの開発は重要な要素である。特にC帯気象レーダのフェーズドアレイ(PAWR)化技術の開発が早急に求められている。

一方で、C帯PAWRを実現するには工学的ボトルネックが2つ存在する。

(1) PAWRの特徴でもあるデジタルビームフォーミングによる観測精度の方向依存性の問題である。パラボラアンテナは観測方向に依存せずに一定の観測精度を持つ。一方でPAWRはアンテナ正面方向から斜め方向になるにつれて観測精度は劣化(サイドローブが増加しビーム幅が広がる)する。

(2) 更にPAWR及びパラボラ型レーダに関わらず、C帯の気象レーダは観測距離が400kmと長距離であることから現状のビーム幅1度を考慮するとその鉛直分解能は7kmとなる(図2参照)。発達した積乱雲の規模は10km程度であることを考慮すると鉛直方向の空間分解能が不足していることが分かる。現在配置しているCバンドレーダはネットワーク化することで空間分解能を補完している。しかし、ネットワーク化が難しい地域(都市域以外や海岸付近)は非常に分解能が低い降雨観測網となっているのが現状である。

以上の2点ともにPAWRが持つ高密度観測の利点が失われることを意味する。

本研究課題ではC帯PAWRを実現するために新たに適応信号処理を応用した降雨観測領域全体の高分解像度化に関する研究を行う。

## 2. 研究の目的

フェーズドアレイ方式におけるビームフォーミング手法の自由度を生かして、サイドローブ抑圧とビーム幅の縮小による高分解像度化を同時に達成する新たな適応信号処理手法の開発を行う。従来の適応信号処理手法は主に通信分野で開発されてきた。通信分野では送信信号と受信信号は既知という仮定があり、更にそのターゲットはポイントターゲットでありコヒーレントな信号を仮定している場合が多い。一方で降雨をターゲットした場合、その信号は空間的に広がる分散性ターゲットであり、更にその性質はインコヒーレントである。これによってターゲットによって受信信号はガウス分布で仮定されるランダム性を持つ。適応信号処理を気象レーダに応用するための解析的及び実験的に検討を行う部分に独自性と創造性がある。

## 3. 研究の方法

本課題では最初に気象用フェーズドアレイレーダに対して適用可能な超解像(super-resolution)技術に関してサーベイを行う。また、これまでの研究を行ってきたMinimum Mean Square Error(MMSE)規範及びCapon法などの適応型ビームフォーミング手法を発展させる方法を検討する。気象レーダにおける再度ローブはグランドクラッタの影響を受けやすくなり、観測精度が劣化することがこれまでの観測から示されている。本研究では、適応型ビームフォーミング法は非常に効果的にサイドローブを抑圧することを考える。一方で現在の方法ではアンテナ開口径によってビーム幅が固定されてしまうことから、超解像技術としての応用はできない。更に光学機器(画像データ)に適用されている圧縮センシングを利用した高分解像度手法についても検討する。これらを気象レーダの降雨観測データに応用可能な理論的な考察を行い、現在運用されている実観測データに適用し、その実用性についても検討する。具体的には以下の手順で研究を進める。

### (1) 数値シミュレーション及び実データによる提案手法の検証

上記、提案手法を降雨観測データへの適用可能性と観測精度の検証を行うために数値シミュレーションを行う。実際に用いる降雨観測シミュレーションモデルはこれまでの研究で行った手法を利用する[業績①]。シミュレーションによる精度検証を終了した後、実データを用いた検証を行う。実データでは実際に大阪大学及び埼玉大学に設置されているX帯PAWRを用いた実験とデータ解析を行う。また、降雨観測精度を検証するために全国に配備されたアメダスによる地上雨量計のデータとの比較を行い提案手法の有効性を検証する。

### (2) 気象レーダにおける実装及び実用性に関する検討

気象レーダにおける実装を考慮した場合、計算コストがボトルネックとなり実用化が困難となる。特に適応型信号処理に必須の逆行列演算を含む計算コストが問題となる。提案された手法の計算コスト軽減を目的としたアルゴリズムを開発する。

#### 4. 研究成果

現在運用中のフェーズドアレイレーダは方位角方向に機械走査、仰角方向に電子走査で3次元的な降雨分布を観測している。電子走査にはデジタルビームフォーミング(DBF)を利用している。現在はフーリエビームフォーミング法を利用しているが、この手法は開口径又は素子数など幾何学的なアンテナ形状によってその空間分解能が決定する。そこで、適応型信号処理を応用したデジタルビームフォーミング手法を開発し、空間分解能の向上を目指している。具体的にはアダプティブにアンテナゲインを抑圧できる方法として最小二乗誤差(MMSE)法やCapon法などをフェーズドアレイレーダに利用する研究を行った。

Capon法を応用して、更にニューラルネットワークを利用した新たなビームフォーミング手法を開発した。ニューラルネットワークを用いて過去の観測値から最適な係数を算出する方法を開発し、数値シミュレーション及び実データに適用することでその有効性を示した。数値シミュレーションでは特にグラウンドクラッタ及び降雨が混在するモデルを仮定して、観測条件として困難な状況を仮定して行った。この状況ではしばしばグラウンドクラッタが降雨エコーに影響を与える(エコーを過大評価する)が、この提案手法によってグラウンドクラッタによる影響を効率的に抑えることが可能となり、ポイントターゲットに対する分解能の向上の可能性を示した。更にサイドローブの抑圧は分散性ターゲットである降雨分布も高精度に推定可能であることが分かった。最後にフェーズドアレイレーダで観測されたグラウンドクラッタの実データに提案手法を適用することで、実用性についても確認された。図1にその結果を示す。(a)は従来法(フーリエ法)の結果であり、グラウンドクラッタの影響が高仰角にわたって過大評価をもたらしていることがわかる。一方で、提案法であるニューラルネットワークCapon法においてはその影響を低仰角に抑えられていることがわかる。

提案手法はサイドローブの低減化と実用化における議論を行ったが、高解像度化に貢献可能な技術ではない。そこで、新たなビームフォーミング手法として、圧縮センシング技術を用いたビーム形成手法を提案した。これはアレーアンテナの特性を利用して、アレー素子数を疑似的に増加させることによりアンテナ開口径を増加させることにより、アンテナビーム幅を縮小させることを目的としている。本手法の有効性を議論するために、本研究では既存のアンテナ素子数

(128個)を削減した場合の観測精度を評価した。もし、アンテナ素子数を削減した状態で削減前の観測精度同等であれば、本手法を用いて疑似的にアンテナ開口径を増加させることと同等であると考えた。研究の結果、本手法により、従来型のフェーズドアレイレーダに用いられていた128個のアンテナ素子を25%削減した状態でも、フルアレー同等の観測精度が保証されることを示した。本研究では数値シミュレーションを通して観測精度の定量評価を行い、実用性を示すために単偏波フェーズドアレイレーダの実観測データへの適用を行った。図2に研究結果の一部を示す。(a)はフルアレーを用いた降雨観測結果(受信電力)であり、(b)に圧縮センシングL1ノルム再合成の結果、(c)に基底追跡雑音除去(Basis Pursuit Denoising:BPDN)の結果を示している。圧縮センシングの結果はアレー素子数を25%削減した結果となっている。これらの結果から、BPDNの結果はフルアレー相当でありこの技術を応用してフェーズドアレイレーダ開口径を疑似的に拡大することで空間分解能の高度化が可能であるこ

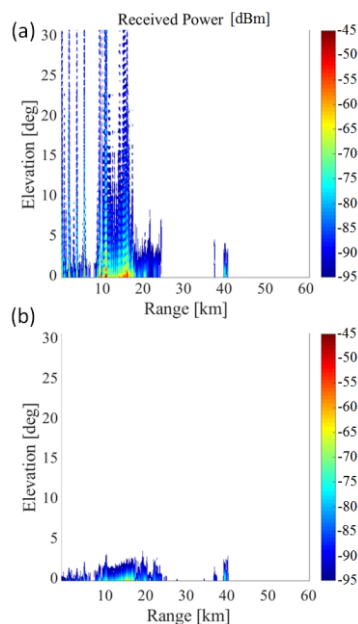


図1 ニューラルネットワークを応用したCapon法の提案[1]

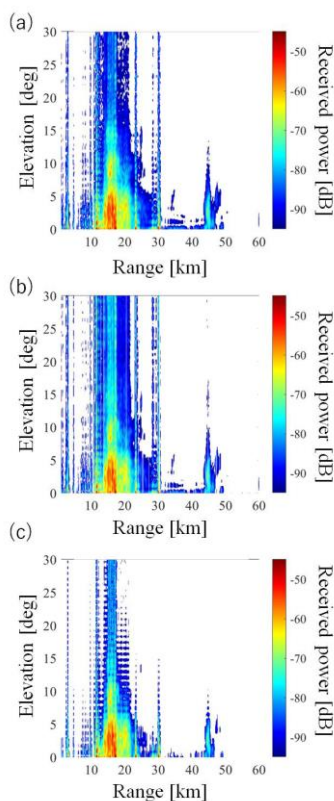


図2 圧縮センシングによる高解像度化手法の提案[2]

とを示した。また本研究内容は、フェーズドアレイレーダの開発コストの削減にもつながり、実用上の面では生産性の向上を実現できる可能性を示した。本手法は既に提案している Capon 法を応用して、更にニューラルネットワークを利用した新たなビームフォーミング手法と組み合わせることで、高分解能かつグラウンドクラッタの影響を受けにくいフェーズドアレイレーダの開発が可能となる。

<引用文献>

- [1] H. Kikuchi, E. Yoshikawa, T. Ushio, and Y. Hobara, "Clutter reduction for Phased-Array Weather Radar using Diagonal Capon Beamforming with Neural Networks," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 17, no. 12, pp. 2065-2069, Dec. 2020.
- [2] H. Kikuchi, Y. Hobara and T. Ushio, "Compressive Sensing to Reduce the Number of Elements in a Linear Antenna Array With a Phased Array Weather Radar," in *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 60, pp. 1-10, 2022.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kikuchi H., Yoshikawa E., Ushio T., Hobara Y.	4. 巻 17
2. 論文標題 Clutter Reduction for Phased-Array Weather Radar Using Diagonal Capon Beamforming With Neural Networks	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters	6. 最初と最後の頁 2065 ~ 2069
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LGRS.2019.2962558	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kikuchi Hiroshi, Yoshikawa Eiichi, Ushio Tomoo, Hobara Yasuhide	4. 巻 14
2. 論文標題 Adaptive Beamforming Using Steering Vector Correction for Phased-Array Weather Radar	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing	6. 最初と最後の頁 8419 ~ 8426
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/JSTARS.2021.3106002	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kikuchi Hiroshi, Hobara Yasuhide, Ushio Tomoo	4. 巻 60
2. 論文標題 Compressive Sensing to Reduce the Number of Elements in a Linear Antenna Array With a Phased Array Weather Radar	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing	6. 最初と最後の頁 1 ~ 10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TGRS.2022.3152998	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 菊池博史, 及川夏衣, 中村賢人, 牛尾知雄, 芳原容英
2. 発表標題 気象用二重偏波フェーズドアレイレーダを用いた高時間分解能降雨観測
3. 学会等名 JpGU Symposium 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 H. Kikuchi, K. Oikawa, K. Nakamura, S. Uchida, T. Ushio, Y. Hobara
2. 発表標題 High temporal resolution observations of Precipitation cores with Dual polarized phased array weather radar
3. 学会等名 URSI General Assembly and Scientific Symposium 2021 c (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Oikawa, H. Kikuchi, K. Nakamura, T. Ushio
2. 発表標題 Initial results of Hydrometeor Classification with X-band Dual-Polarized Phased Array Weather Radar
3. 学会等名 URSI General Assembly and Scientific Symposium 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Asai, H. Kikuchi, T. Ushio, Y. Hobara
2. 発表標題 Comparing the X-band multi-parameter phased array weather radar with a Doppler weather radar using a parabolic dish antenna
3. 学会等名 URSI General Assembly and Scientific Symposium 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------