

アレーアンテナを活用した監視技術高度化の研究

監視通信領域 ※長縄 潤一, 北折 潤, 古賀 権, 宮崎 裕己

1 まえがき

我が国では航空路監視における技術革新として複数のセンサの出力を統合するマルチセンサー型システムの整備が進められている。本システムを構成するセンサとして、従来の二次監視レーダ（SSR: Secondary Surveillance Radar）に加え、広域マルチラテレーション（WAM: Wide Area Multilateration）の運用が開始されたほか、ADS-B（Automatic Dependent Surveillance—Broadcast）の整備が進められている。

マルチセンサー型のシステムは各センサの長所を取り入れた監視機能を実現できる一方、冗長性の高い構成となっており、それらをより一元的に実現できればさらなる効率化・高性能化につながることが期待される。しかしながら、各センサに使われるアンテナは送受信要件が異なるため、指向性を電子的に変更可能なアレー アンテナやアレー信号処理の技術が必要となる。さらに、電子走査はSSRの課題である機械式回転に伴う更新頻度の制限や保守負担の解決に繋がることも期待される。

このような背景から、電子航法研究所（以下、当所）では令和3年度から令和5年度までの3年間において重点研究「高機能空中線を活用した監視技術高度化の研究」を実施した。本研究では、指向性を電子的に可変し、かつ、WAMやADS-B等の受信局と連携機能を有するアレー アンテナを高機能空中線と呼ぶこととし、その要素技術開発に取り組んだ。本稿では本研究の成果を4つのトピックにまとめた形で報告する。

- (1) アクティブフェーズドアレー評価機材に関する分析
- (2) デジタルビームフォーミング実験システムの開発・評価
- (3) ADS-B脆弱性対策（なりすまし対策）の発展
- (4) WAMとの連携測位技術の開発・評価

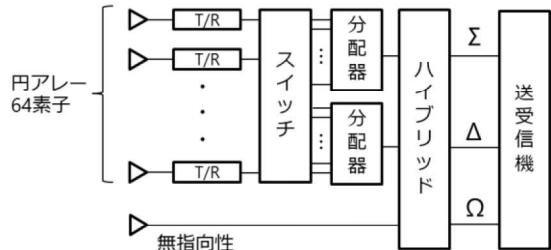


図1 評価機材の概要

各トピックの位置づけを述べると、(1)・(2)は高機能空中線技術を主にSSRに適用することを意図したものである。同様に、(3)はADS-Bへの適用、(4)はWAMへの適用となっている。なお、本稿の内容は、既発表の文献をベースとしているが、実験データの追加やアルゴリズム等に改良を加えるなどアップデートした部分も一部含んでいる。

2 アクティブフェーズドアレー評価機材に関する分析 [1]

アクティブフェーズドアレーは各アンテナ素子に振幅・位相を制御可能な送受信モジュールを接続することで指向性制御を実現する方式である（本稿では、以下アクティブ方式と呼ぶ）。本方式については、航空局が主にDAPs(Downlink Aircraft Parameters)用に開発した評価機材を保有していたため、借用させて頂いた。そして、アクティブ方式によるSSRの電子化という観点で実験データの分析等を行った。

2.1 評価機材の基本性能評価

まず、借用した評価機材について概要を述べる。本機材の概要を図1に示す。直径約4mの円状に64素子を配置しており、 Σ ビームと Δ ビームを生成する。無指向性のアンテナも設置されている（ Ω ビーム）。本構成により、任意方向に対する即時の質問応答の送受信、測角、測距が可能である。測角は Σ と Δ の振幅比、 Σ と Ω の振幅比により角度を推定する準モノパル

ス方式である。目標性能については、受信系利得 14 dB 以上、最小受信感度は SSR 等の従来装置を参考に -87 dBm 以下、水平ビーム幅 10° 以内、距離分解能 150 m である。主に DAPs 評価を目的とし、中央処理装置と連携して動作することを前提としている。一般的な SSR と異なり初期捕捉、ロックアウト、再送、モード A/C 機能を有さない。

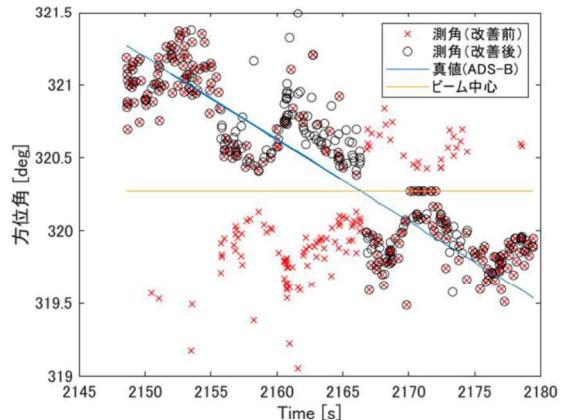
本研究では、空中線本体の性能に着目するため、中央処理装置との連携を外した状態で実験を行った。実験では、当所実験機や在空機に対する測位を行い、覆域・測距精度・測角精度といった基本性能を評価した。その結果、航跡が安定的に取得できたのは概ね 50 NM 以下で、測位可能な最大距離は 187 NM であった。測角精度については、誤差の平均 0.023°、標準偏差 0.44° となった。測距誤差は、平均は -44.6 m、標準偏差は 43.3 m となった。いずれも、航空路 SSR [2] と比較すると改善が必要である。

2.2 性能向上に向けた選択肢の整理

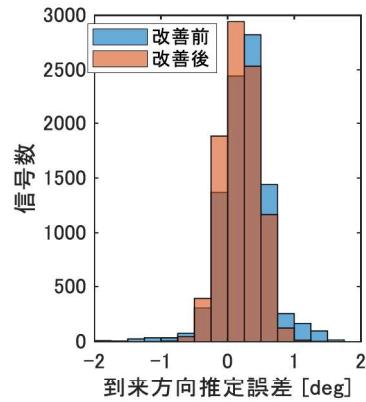
実験データをもとに、性能向上に向けた技術的な選択肢の整理と改善効果の試算等を行った。ここでは紙面の都合上、モノパルス化と大型化の 2 点について述べる。

1 点目について、現在の振幅のみを利用する準モノパルスを、位相も利用するモノパルスに変更する改善を検討した。実験データから準モノパルスの課題として、ビーム中心から航空機が左右のどちらにずれているかの判別に失敗する傾向を確認した。図 2(a)はその一例で、ビーム中心に対して測角結果が左右対称に分布しており、真値と反対側のものが大きな誤差となっている。そこで、モノパルス化による改善効果を仮定して、左右判定の成功を仮定したデータ処理を行った結果、誤差の統計量が軽減することが分かった。同様の処理を多数の機体に対して行い、図 2(b)に示す誤差分布が得られた。誤差の標準偏差は 0.37° から 0.28° となり、25.5% の誤差削減が得られた。以上から、モノパルス化の必要性を確認できた。

2 点目について、空中線を大型化することで利得やビーム幅（指向性の鋭さ）が向上し、覆域と精度を改善できる。そこで、現在の SSR 要



(a) ある機体の評価結果例



(b) 複数機体の評価結果

図 2 モノパルス化の評価結果

件[2]を満たすために必要なサイズを試算した。回線設計や実験結果等に基づき設計目標として 2.9 dB の利得改善、2.5° のビーム幅を目標として設定した。ここで、ビーム幅は測角精度の要件から設定した。本目標を満たすように設計した結果、垂直方向は 3 段のアンテナスタック、水平方向は半径 4.75 m・素子数 192（このうち 48 を選択利用）という結果を得た。また、特にビーム幅、すなわち測角精度の要件がサイズを決定づけることが分かった。

3 デジタルビームフォーミング実験システムの開発・評価 [3-5]

前章で述べたようにアクティブ方式のみで SSR の必要精度を目指すと大型化することが分かった。そこで、小型化と測角の高精度化の両立に向けて、デジタルビームフォーミング（以

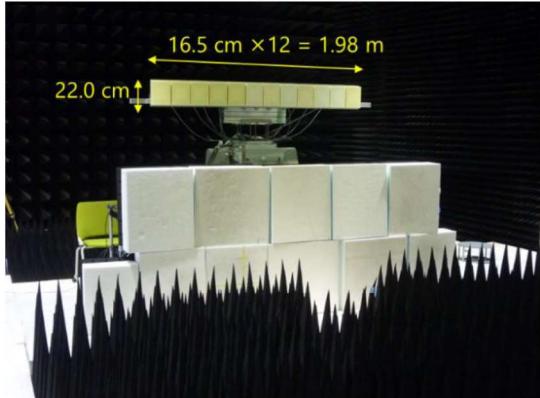
(a) 無響室での 1×12 素子評価(b) 屋外での 1×12 素子評価(c) 屋外での 3×4 素子評価

図3 デジタル方式の実験

下、デジタル方式) 技術の開発に取り組んだ。デジタル方式は、各アンテナ素子で受信した信号をプロセッサに取り込み、デジタル信号処理する方式である。アクティブ方式とデジタル方式の併用は気象レーダの事例などが知られている。本研究では要素技術開発として、実験システムを開発・評価した。

実験システムはソフトウェア無線技術により構築した。実験中は信号の検知と記録を行い、実験後に様々な測角のアルゴリズムを適用することとした。これにより、様々なアルゴリズムを評価できる。ハードウェアとしては4チャネルのソフトウェア無線機 USRP X300 および USRP NI 2945 を合計3台利用し、12チャネルの同時受信を可能とした。各チャネルはアレー・アンテナを構成する各アンテナ素子に接続される。素子としては、配置を柔軟に変更可能な金属パッチ型のものを開発した。アレー・ベクトルは在空機の ADS-B 信号を使って取得し

表1 アルゴリズムの比較

| 種類 | 精度 (誤差標準偏差) | はずれ値 割合 |
|-----------------|----------------|------------|
| Beamformer | 0.365° | 2.3 % |
| Capon | 0.374° | 4.2 % |
| MUSIC (波数固定) | 0.337° | 1.7 % |
| MUSIC (波数可変) | 0.348° | 0.65 % |

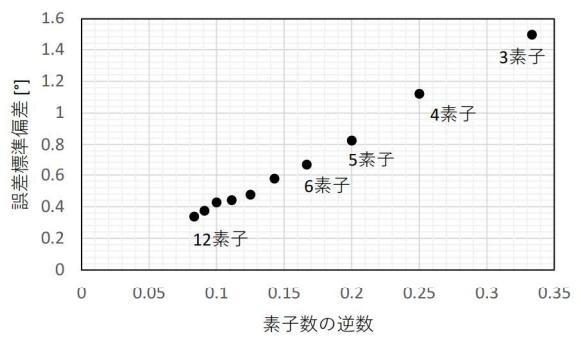


図4 素子数と精度の関係

た。

まず、電波無響室内において縦1×横12素子にアレーを構成した場合の評価実験を行った。実験の様子を図3(a)に示す。到來方向推定アルゴリズムである MUSIC(Multiple Signal Classification)法を適用した結果、誤差の標準偏差は 0.04° となり、既存の SSR (0.06°) よりも優れた精度を達成した。さらに、横方向のサイズは約 2 m であり、既存の SSR (8.1 m) よりも小さい。すなわち、デジタル方式により、既存 SSR よりも小型に同程度の測角精度を持つ空中線を実現できる可能性を示すことができた。

そこで、屋外環境においても実験を行った。この様子を図3(b)に示す。この場合、誤差は悪化し、標準偏差 0.34° となった。無響室と屋外の最も大きな違いはマルチパスの有無であるため、精度悪化の原因はマルチパスと言える。また、MUSIC 以外のアルゴリズムも適用・比較した。その結果を表1に示す。表中の「はずれ値の割合」は 5° 以上の誤差の割合を意味する。はずれ値は精度(誤差標準偏差)の評価からは

除いてある。表1から、Beamformer法およびCapon法と比べるとMUSIC法が最も良い結果となった。さらに、MUSIC法については、動作パラメータである波数を固定とする場合と、固有値をもとに可変にする場合を比較し、可変にした場合、精度は劣化するがはずれ値割合を低減できることが分かった。加えて、素子数と精度の関係性を確認し、図4に示すように素子数への比例関係を確認できた。

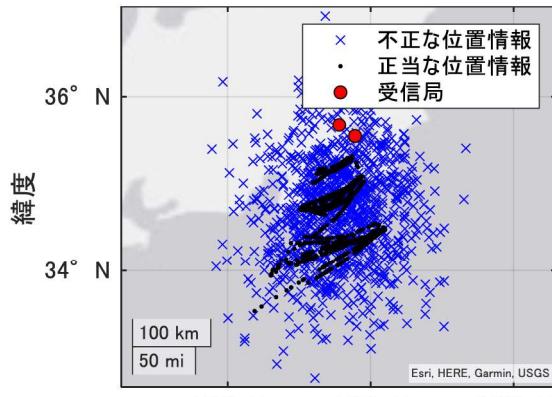
最後に、屋外実験で明らかとなったマルチパスによる精度悪化への対策を検討した。具体的には、垂直方向にもアンテナを並べて地上からのマルチパスを低減するパターンを形成した。この効果を確認するため、図3(c)に示すように縦3×横4素子での実験を行った。マルチパス対策のみを効果を抽出するため、横方向素子数を揃え、縦1×横4素子と縦3×横4素子の結果を比較した。前者の精度は 1.1° 、後者の精度は 0.71° となり、大幅な改善効果を確認できた。

3 ADS-B 脆弱性対策の発展

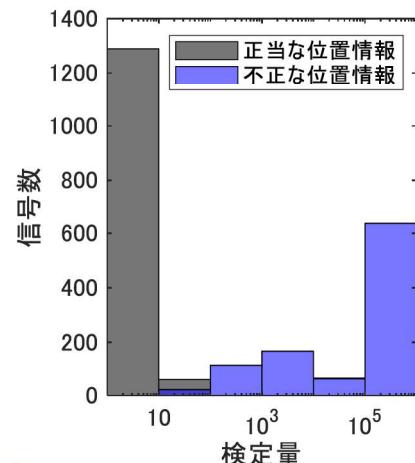
航空機による位置放送であるADS-Bには成りすましの脆弱性があり、その対策として位置検証技術が必要である。先行研究では信号到達時間差(TDOA: Time Difference of Arrival)を使った位置検証技術を開発した。本研究では、主に高機能空中線を活用して先行研究を発展させるための研究開発を行った。

3.1 システム設計法による性能概算 [6-9]

脆弱性対策の性能は受信局配置等によって変化するため、期待される性能を設計段階で見積もることができれば有益である。そこで、受信局位置、判定しきい値(誤報率から設定)、監視範囲、不正な送信源の想定される範囲、受信局性能といったパラメータを与え、平均的な不正検知率を計算するシステム設計法を開発した。そして、提案法を用いて、様々な条件下における概算を行い、脆弱性対策の導入効果を分析した。その結果、平均検知率を決める支配的な要因は受信局間の距離、測定精度であることが分かった。そして、距離と測定精度を極端に悪く



(a) 位置情報



(b) 検定量の計算結果

図5 高機能空中線による位置検証実験

しない限り、一般的な状況ではTDOA法で平均検知率90%を満足できることが分かった。

3.2 高機能空中線による補強技術 [9-12]

3.1節でTDOA法は概ね良好な性能が期待できることを述べたが、逆に言えば特定の条件下では性能が悪化することを意味する。また、将来的により強固な脆弱性対策ができれば望ましい。そこで、高機能空中線を活用した脆弱性対策の補強技術を開発・評価した。提案法は、高機能空中線で測定した信号到来方向と信号到達時間差(TDOA)という2種類の情報をもとに位置検証を行うものである。

提案法を評価するため、2章で述べたデジタル方式の実験システムと当所が東京国際空港に

設置した受信局を使った実験を行った。実験では在空機のデータを収集した。そして、在空機データは正当だと仮定し、これに人工的に生成した不正な位置情報を混入させ、提案法で検知できるかどうかを確認した。その結果を図5に示す。図5(a)が位置情報であり、これらに対して不正の度合いを示す検定量を計算した結果が図5(b)である。不正な情報は検定量が大きくなり、不正を検知できた。検知率は98.5%となつた。従来の手法である信号到達時間差のみを用いた場合は検知率が88.2%であったため、大幅な性能向上となつた。さらに、3.1節で述べたシステム設計法を利用して、様々な条件下での性能向上を概算し、提案法の有効性を確認した。

4 WAMとの連携測位技術の開発・評価 [13-15]

高機能空中線は航空機までの距離と信号到来方向を測定できる。これをさらに周辺のWAM受信局と連携させれば、信号到達時間差も測定できるようになる。このような様々な情報を活用して航空機位置を測位する連携測位機能について開発・評価を行つた。

開発した技術はWAMで使われるティラー級数法と呼ばれるアルゴリズムを拡張し、距離や信号到来方向を含められるようにしたものである。本技術を評価するため、2章で述べたアクティブ評価機材と、当所のWAM受信局2局

（東京国際空港および調布）を利用したデータ収集実験を行つた。実験で得られたデータに対して提案法を適用し、その精度を評価した。なお、実験機材は製造業者が異なる等の理由で、時刻同期に課題があつたため、補正を導入する必要があつた。図6には実験での位置関係および測位結果を示す。評価の結果、測位精度を表すRMSEは89.9mとなり、航空路WAM要件である350mを満たすことができた。また、従来WAMの動作には最低4局必要であったところ、本結果は地上局数が3局のみで得られたものであり、地上局数の削減効果も実験的に確認できた。

さらに、本測位機能について、シミュレーションにより様々な条件下での性能評価を行つて、その有効性を確認したほか、高機能空中線

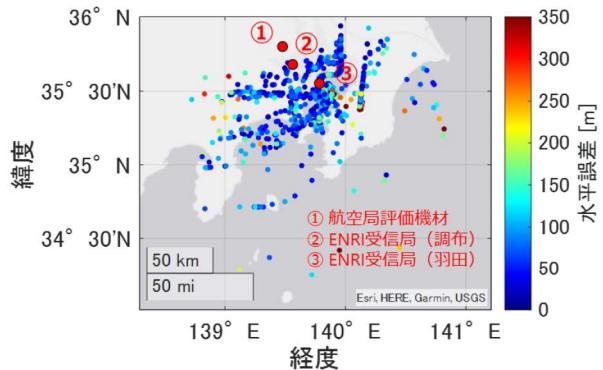


図6 連携測位機能の評価結果

と受信局の距離が広いほうが効果的であることを確認した。

5 まとめ

本研究では指向性を電子的に可変し、かつ、WAMやADS-B等の受信局と連携機能を有するアーレアンテナを高機能空中線と呼ぶこととし、その要素技術開発に取り組んだ。アクティブ方式の分析を行つたほか、デジタル方式・ADS-B脆弱性対策の補強・連携測位といった要素技術の開発・評価に成功した。高機能空中線技術はSSR、ADS-B、WAMの各センサに適用可能で、様々な利点を有することが明らかとなつた。しかしながら、SSR相当の測角精度を求めるに大型化するといった課題も明らかとなつた。今後はアーレアンテナの小型化やADS-B・WAM受信局への搭載に向けた研究開発を行う計画である。

参考文献

- [1] 長縄, 宮崎, 古賀, 北折, 田嶋, “航空機二次監視に向けたアーレアンテナ実験システムの基礎評価と性能向上の検討,” 電子情報通信学会 宇宙・航行エレクトロニクス研究会, 信学技報, vol. 122, no. 248, SANE2022-59, pp. 49-54, 2022年11月.
- [2] 川田, 航空無線工学概論, 鳳文書林出版販売, 平成15年.
- [3] 長縄, 宮崎, 古賀, 北折, 田嶋, “航空機監視信号の到来角推定に関する初期的実験,” 電子情報通信学会 宇宙・航行エレ

- クトロニクス研究会, 信学技報, vol. 122, no. 136, SANE2022-29, pp. 38-43, 2022年7月.
- [4] 長繩, 北折, 田嶋, 古賀, 宮崎, “航空機監視信号の到来角推定精度向上に向けた実験的検討,” 電子情報通信学会 宇宙・航行エレクトロニクス研究会, 信学技報, vol. 123, no. 104, SANE2023-29, pp. 43-48, 2023年7月.
- [5] 田嶋, 長繩, “アレイアンテナ開口分布の最急降下法による最適化の検討,” 電子情報通信学会 宇宙・航行エレクトロニクス研究会, 信学技報, vol. 123, no. 255, SANE2023-54, pp. 40-45, 2023年11月.
- [6] 長繩, 宮崎, 古賀, 田嶋, 角張, “TDOAとAOAを用いた航空機位置検証法のシステム設計に関する検討,” 電子情報通信学会 宇宙・航行エレクトロニクス研究会, 信学技報, vol. 121, no. 78, SANE2021-14, pp. 29-34, 2021年6月.
- [7] 長繩, 宮崎, 田嶋, 古賀, 北折, 角張, “ADS-B位置検証技術の性能概算,” 令和5年度（第23回）電子航法研究所 研究発表会講演概要, 2023年6月.
- [8] 長繩, 宮崎, 田嶋, 古賀, 北折, 角張, “ADS-B位置検証技術の性能概算,” 航空無線, 第118号, 2023年.
- [9] 長繩, 宮崎, 田嶋, 古賀, 北折, “ADS-B位置検証技術に関する研究,” 第60回飛行機シンポジウム, 2022年10月.
- [10] 長繩, 宮崎, 田嶋, 古賀, 北折, “AOAとTDOAを併用した航空機位置検証における誤差の考慮,” 電子情報通信学会 ソサイエティ大会, B-2-10, 2021年9月.
- [11] J. Naganawa, H. Miyazaki, H. Tajima, T. Koga, J. Kitaori, “Numerical Simulation of Aircraft Position Verification using AOA and TDOA for ADS-B,” ISAP 2021, Oct. 2021.
- [12] J. Naganawa, H. Miyazaki, H. Tajima, T. Koga, J. Kitaori, “TDOA and AOA Measurement System for Investigating Aircraft Position Verification,” ICSANE 2021, Nov. 2021.
- [13] 長繩, 小菅, 宮崎, “二次監視レーダと受信局を用いた TSOA-AOA 測位における高度の取り扱い,” 電子情報通信学会 ソサイエティ大会 講演論文集, B-2-7, 2023年9月.
- [14] 長繩, 小菅, 宮崎, “二次監視レーダと受信局を連携した TSOA-AOA 測位の基礎検討,” 電子情報通信学会 宇宙・航行エレクトロニクス研究会, 信学技報, vol. 123, no. 156, SANE2023-43, pp. 52-57, 2023年8月.
- [15] J. Naganawa, Y. Kosuge, H. Miyazaki, “Improved Model on Aircraft Localization using a Secondary Surveillance Radar and Cooperative Receivers,” ICSANE 2023, Nov. 2023.