

5. ADS-B 位置検証技術の評価

監視通信領域 ※長縄 潤一，宮崎 裕己，田嶋 裕久

1 まえがき

我が国における「将来の航空交通システムに関する長期ビジョン（CARATS）」では、航空交通管理における変革の方向性として、軌道ベース運用を中核とした8つの方向性が示されている[1]。それら変革の方向性の1つとして、地上・機上での状況認識能力の向上が掲げられている。地上での状況認識の提供は航空機監視システムの役割であり、代表的なものには二次監視レーダ（SSR: Secondary Surveillance Radar）がある。しかしながら、軌道ベース運用のような高度な運用方式へ対応し、安全性や効率性のさらなる向上を実現するために、より高性能な航空機監視システムが求められている。

そこで SSR よりも高性能な航空機監視システムとして放送型自動従属（ADS-B: Automatic Dependent Surveillance – Broadcast）が検討されている。ADS-B は航空機が自身の位置などを自発的に放送し、それを地上側で受信することで航空機監視を実現するものである。ADS-B は地上側設備をシンプルに構成できる一方で、監視情報を航空機からの自己申告に頼っていることから、妨害電波および不正位置への対策が求められる[2-5]。

以上の背景から、電子航法研究所（以下、当所）では「従属監視補完技術に関する研究」において ADS-B の課題解決に向けた研究開発を進めている。本稿では前述の課題のうち不正位置に着目し、その対策である ADS-B 位置検証技術について、概要の説明と当研究所における評価結果を述べる。

本稿は以下のように構成される。2 章では、様々な位置検証技術を紹介し、それらの性質を

議論する。特に無線信号に基づく位置検証技術である受信電力法・レンジチェック，到達時刻差(TDOA: Time Difference Of Arrival)法，到来角(AOA: Angle of Arrival)法，質問応答法について詳しく述べる。3 章では、それらの基礎的な評価結果を述べる。4 章では、TDOA 法を当所実験システムにプロトタイプ実装し、不正位置除去実験を行った結果を報告する。最後に 5 章でまとめる。

2 ADS-B 位置検証技術

2.1 信号到達時刻差の例

ADS-B 位置検証技術は ADS-B により得られた位置（以下、ADS-B 位置）を何らかの別の情報と比較することで、ADS-B 位置の正当性を調べる技術である。その代表例として、図 1 に信号の到達時刻差 TDOA を用いた場合の模式図を示す。まず、受信局 2 局により ADS-B 信号を受信し、受信時刻を測定する。受信時刻の差が信号の到達時刻差 TDOA である。また、信号に格納された ADS-B 位置を読み出す。すると、ADS-B 位置と受信局の位置関係から TDOA の予測値が計算できるので、予測値を実測値と比較して矛盾が無いかどうかを調べる。以上により ADS-B 位置の正当性を検証できる。

図 2 には TDOA 法による判定をより詳しく説明する。TDOA 実測値は送信源の存在する双曲線を示す。一方、ADS-B 位置から計算された TDOA 予測値は ADS-B 位置を通る双曲線を示す。

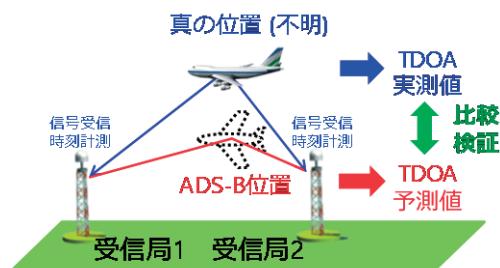


図 1 信号到達時刻差(TDOA)による ADS-B 位置検証法

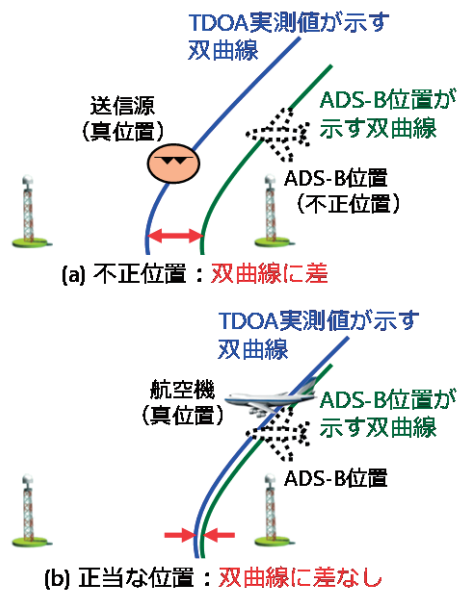


図 2 TDOA 法による判定の様子

図 2(a)に示すように位置が不正のときは双曲線に差が生じ、同図(b)のように位置が正当なときは双曲線の差が小さくなる。したがって、TDOA 差あるいは双曲線差をしきい値判定すれば位置検証ができる。

2.2 手法の種類

前述の TD OA 法以外にも多様な方法があるため、文献[3-12]において提案されている代表的な手法をピックアップして説明する。

受信電力法・レンジチェック法

受信電力法は受信電力の値から送信源の距離を逆算し、ADS-B 位置までの距離と比較するものである。これの簡易なものがレンジチェック法であり、ADS-B 位置までの距離を計算し、それが受信可能な覆域を越えていれば不正だと判定する。

AOA 法

ADS-B 信号の到来角 AOA について、実測値と ADS-B 位置に基づく予測値の差に基づいて判定を行う。到来角の測定にはアレーアンテナ等を用いる。

質問応答法

SSR や広域マルチラテレーション(WAM: Wide Area Multilateration)と同様に質問信号を送信し、航空機からの応答信号を受信する。応答が得られたかどうかを確認するとともに、応答

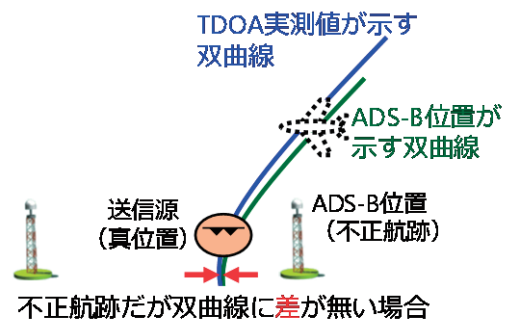


図 3 TD OA 位置検証に失敗する場合

までの時間から距離を測定し、ADS-B 位置の示す距離と比較する。質問送信には無指向性やセクタ型のアンテナを用いる。

位置相関法

SSR や WAM といった他のシステムから得られた位置と ADS-B 位置を比較する。

航跡のふるまい検証

ADS-B では速度も得られるため ADS-B 位置と速度の整合性を確認する。その他、物理上不可能な動きをしていないかなど、航跡のふるまいを確認する。

フライトプランとの整合性検証

航空機の有無や飛行経路をフライトプランと比較する。

2.3 性質

ここでは、ADS-B 位置検証技術の性質を議論する。まず、ADS-B 位置と別の情報を比較するため、どのような比較対象を選ぶかによって無数の対策が可能だという性質がある。実際に 2.2 節で述べた以外にも、ドップラを用いたものなど多数提案がされている[13]。その一方で、位置の保証ができるのは位置相関法のみであることは留意されたい。位置相関法以外では位置の保証がなされない。例えば TD OA 法の場合、図 3 に示すように不正な ADS-B 位置と送信源の TD OA が一致し、位置検証をパスすることがありうる。これを防ぐには受信局を追加して 3 局の受信局で 2 つの TD OA を利用することが考えられるが、これは WAM による二次元測位と同一になる。したがって、WAM や SSR の位置が利用できる場合には、ADS-B 位置との比較を行うことが強力な検証方法となる。

しかしながら、コストとの兼ね合いもあるため、どのような位置検証方法を採用していくかは注意深く決めていく必要がある。

また、位置検証方法の性能を評価するにあたっては、未検出と誤検出の2つの視点が必要である。未検出とは不正位置を見逃すものであり、誤検出は正当な位置を不正な位置だと誤判定するものである。一般に、未検出と誤検出はトレードオフの関係がある。

2.4 無線信号に基づく手法

2.1 節および 2.2 節で示した手法の中で、レンジチェック、TDOA 法、AOA 法、質問応答法は無線信号の性質を利用した方法だと言える。本研究ではこれらを重点的に検討している。

手法の位置づけ

無線信号に基づく手法はアンテナ・受信機から航跡統合装置や管制卓等に至るまでの一連のシステムを考えたときに、最も前段で適用可能なものである。システム全体を適切に動作させるためには、不正位置を”入り口”で可能な限り除去しておくことが望ましい。これは大量の不正位置が流れるような場合に、後段への負荷低減という意味でも重要である。一方で、無線信号を取り扱うことから、後段の情報処理で対応する位置検証技術よりも技術的課題が多いと考えられる。このような理由から、本研究では無線信号に基づく手法を重点的に検討している。

表 1 無線信号に基づく位置検証手法の比較

手法	実装要件	性能要因
TDOA	受信局 2 局	TDOA 精度 位置関係
AOA	測角用アンテナ	測角精度 位置関係
受信電力	なし	測距精度
レンジチェック	なし	なし
質問応答	質問機	測距精度

各手法の性質

表 1 には各手法の比較を示す。まず、無線信号に基づく手法は位置検証に用いる検定量の測定精度が位置検証性能に大きな影響を与える。また、位置関係が性能に影響する場合がある。例えば、TDOA 法では TDOA 測定精度すなわち信号受信時刻の測定精度が位置検証性能に影響する。また、遠方では双曲線間の間隔が広がることから性能が低下する。

表 1 には実装上特に求められる要件についても記載した。TDOA 法では受信局が 2 局必要である。AOA 法では測角のできるアンテナが必要である。具体的には、モノパルス測角の可能なセクタ型アンテナおよびフェーズドアレーアンテナならびにアレー信号処理の可能なアレーアンテナなどがある。質問応答を行う場合には、送信機が必要であるほか、信号環境への配慮も求められる。

3 基礎評価

3.1 実験システムによる飛行実験

無線信号に基づく手法の基礎的な評価として当所 ADS-B/WAM 実験システムおよび実験用航空機を用いた飛行実験データを解析した。図 4(a)には実験システムの写真を、同図(b)には実験用航空機の飛行経路を示す。

まず、TDOA 精度を評価した。実験時の全 10 局のうち箱根局と調布局を代表例として選択した。実験用航空機に搭載の GPS 受信機から得た位置を真位置とし、受信局との位置関係から TDOA の理論値を計算した。つまり、2.1 節で述べた ADS-B 位置と同様な計算を行った。そのようにして得られた理論値と 2 局で取得した TDOA の実測値を比較して、TDOA 精度を評価した。その結果、図 4(c)の誤差分布を得た。誤差の標準偏差は 30.9 nsec であった。この精度の解釈については 3.2 節で後述する。

次に、セクタ型アンテナを活用した振幅モノパルス測角の AOA 精度を評価した[14]。実験用航空機の真位置から計算した AOA 理論値とセクタ型アンテナで計測した AOA 実測値を比較した。その結果、測角誤差の標準偏差は 4.6° となった。

また、質問応答による測距精度を評価した。

TDOA や AOA 同様に，実験用航空機の真位置に基づく理論値と実測値を比較した結果，測距誤差の標準偏差として 21.5 m を得た[15]。

最後に受信電力の距離特性を評価すると，図 4(d) のようになった。受信電力の変動は極めて大きく，機上アンテナのパターンやマルチパスの影響が考えられた。また，追加の実験において，機体ごとの送信電力のばらつきも確認された[16]。したがって，直接的な距離の逆算は困難であることが確認された。

3.2 考察

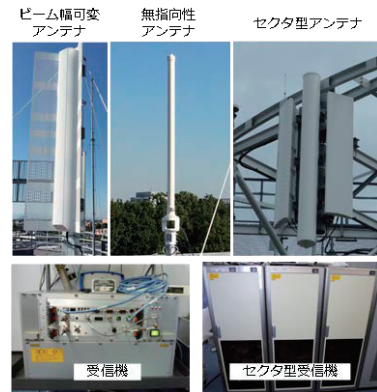
直接的な距離逆算に基づく受信電力法は実現が困難であるが，レンジチェック法は容易なため，実装しておくことは望ましい。その他の手法に関しては，飛行実験の結果に基づいて比較することができる。ここでは，比較の指標として各種測定精度を距離換算したときの 1.96σ 値を考える。これは誤検出率を一定にするためのしきい値を想定したものである。厳密には位置関係や ADS-B 位置誤差などの考慮が必要だが[14,17]，ここでは目安として採用する。

すると，TDOA 精度は 18.2 m，測角精度は航空機までの距離を 50 NM とした場合に 14.6 km，質問応答法は 21.5 m となった。そのため，TDOA 法と質問応答法は効果的な性能が得られると考えられる。AOA 法については，測角精度の向上が求められることが分かった。

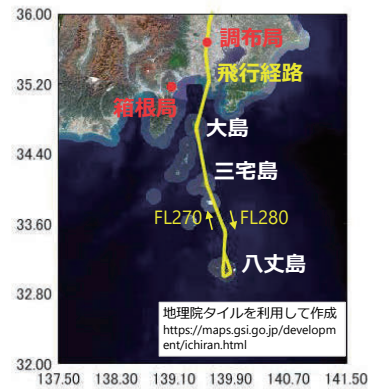
3.3 4 素子リニアアレーによる測角精度評価

3.2 節で述べたように AOA 法の実現には測角精度向上が必要である。3.1 節および 3.2 節で用いた振幅モノパルス測角は，振幅情報のみを用いるため一般的な WAM/ADS-B 受信機のハードウェア改修が不要（または少ない）という利点がある。その一方で，測角に有効な位相情報を利用していない。また，位相を用いた指向性制御技術は妨害電波対策や信号環境対策としても有効である。

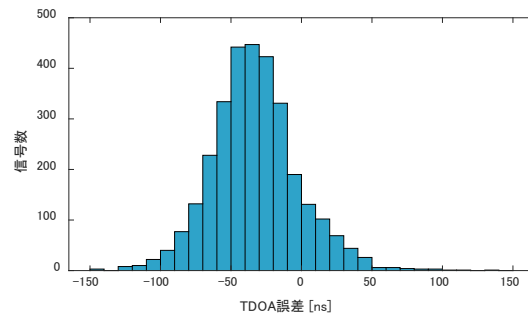
そこで，位相情報も利用した測角精度の向上を検討するために，4 チャンネル受信機と 4 素子リニアアレーを用いた実験を電波無響室内で行った[18]。この様子を図 5 に示す。



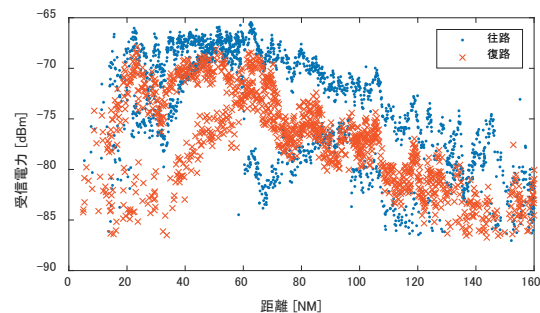
(a) 実験システム機材



(b) 飛行経路



(c) TDOA 誤差分布



(d) 受信電力の距離特性

図 4 実験システムによる飛行実験

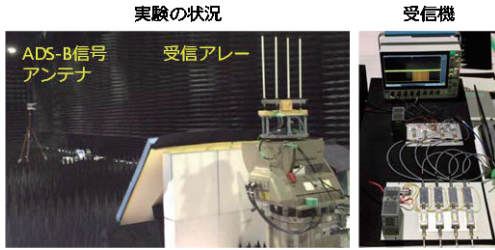


図5 アレーアンテナ実験の様子

アレーアンテナは既製品を素子として半波長間隔で配置したものである。受信機はダウンコンバートの回路とデジタルオシロスコープで構成した。信号処理はオフラインで実施した。測角誤差は到来角により変化したため、アレー正面 120° 範囲における最悪値を取れば、標準偏差 0.13° となった。50 NM での距離換算値 1.96σ は 411 m であり、大幅な改善が確認できた。しかしながら、より遠方では誤差が拡大するため、測角精度向上を引き続き検討していく。

4 実験システムによる TDOA 法実証実験

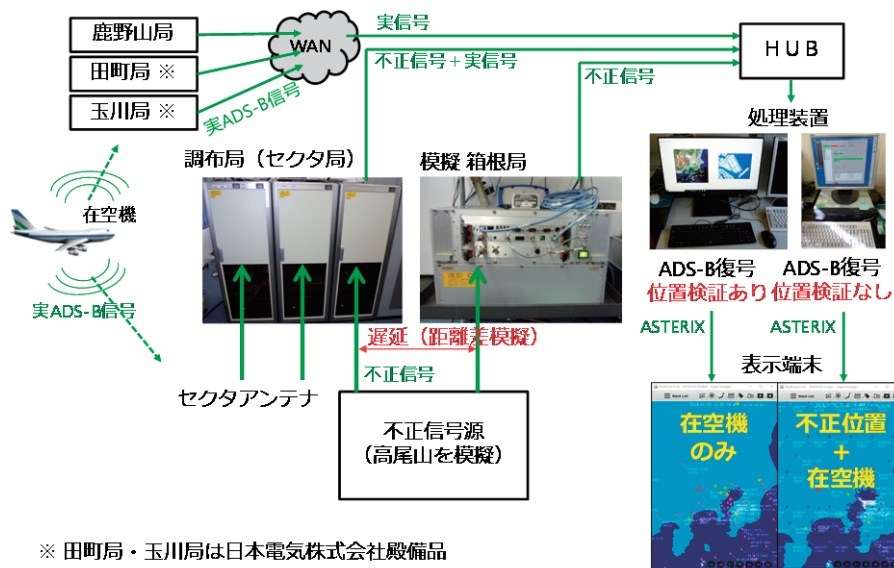
3章の評価結果から TDOA 法は有望な位置検証手法であることが分かった。そこで実際に TDOA 法を当所 ADS-B/WAM 実験システムにプロトタイプ実装し、不正位置の除去が可能かどうかの評価を行った[19]。実験の想定は、高尾山に送信源があり、箱根局と調布局に不正な ADS-B 信号が届いているとした。図 6 には実験構成を示す。信号源を2つの受信局（調布セ



図7 TDOA 法の実証実験結果

クタ局と模擬箱根局) に有線で接続し、不正信号を送信した。不正信号には人工的な遅延を設定し、信号源位置を模擬した。不正位置は関東に一樣に分布させた。その他の受信局は通常通りの動作とした。すなわち在空機の実 ADS-B 信号を受信させ、実信号と不正信号を収集できるようにした。そして、処理装置を2つ用意し、一方を従来の位置検証が無いもの、他方を TDOA 法の位置検証を有するものとして、それらの出力を比較した。

図7には出力表示画面のスクリーンショットを示す。同図左が位置検証あり、同図右が位置検証なしの場合である。位置検証が無い場合、不正位置が表示された。一方で、位置検証を行った場合には、不正位置をほぼ除去することができた。ADS-B 位置と送信源の TDOA が一致し不正位置が残るケース（図 3）はわずかで



※ 田町局・玉川局は日本電気株式会社設備品

図6 TDOA 法の実証実験

あった。したがって、TDOA 法により不正位置を効果的に除去できることが確認できた。

5 むすび

無線信号に基づく位置検証手法は監視システムの”入り口”において不正な ADS-B 位置を除去するために重要な技術である。このうち、距離逆算に基づく受信電力法は受信電力ばらつきが大きく実装が困難であるが、簡易なレンジチェックは可能だと考えられる。AOA 法の実現にはさらなる測角精度の向上が求められる。TDOA 法と質問応答法は現在の監視システム実装技術で実現可能である。実際に TDOA 法を実験システムでプロトタイプ実装したところ、効果的に不正位置を除去できることを確認した。今後は複数の手法を組み合わせるなどして検証性能向上を検討していく。

謝辞

実験システムの設置、飛行実験、電波無響室実験など本研究にご協力を頂いた関係各位に深く感謝申し上げます。

参考文献

- [1] 将来の航空交通システムに関する長期ビジョン, 2010.
- [2] M. Strohmeier, et al, “On the Security of the Automatic Dependent Surveillance-Broadcast Protocol,” IEEE Commun. Surveys Tuts., pp. 1066-1086, vol.17, no.2, 2015.
- [3] M.R. Manesh, et al, “Analysis of vulnerabilities, attacks, countermeasures and overall risk of the ADS-B system,” Int. J. Critical Infrastructure Protection, vol.19, pp.16-31, Dec. 2017.
- [4] FAA, 14 CFR Part 91, Federal Register, vol.75, no.103, May 2010.
- [5] SESAR JU, Final Project Report, Surveillance Ground System Enhancements for ADS-B (Prototype Development), 15.04.05_b, D01, May 2015.
- [6] G. Graziano, et al, “TDOA based ADS-B Validation,” ESAVS 2013, Berlin, Germany, 2013.
- [7] H. Neufeldt, “ADS-B Security,” ESAV 2016, Berlin, Germany, April 2016.
- [8] A. Schuttpelz, et al, “Security Functions in Cooperative Surveillance Sensors,” ESAV 2018, Berlin, Germany, Oct. 2018.
- [9] P. Mariano, et al, “Data Integrity Augmentation by ADS-B SSR Hybrid Techniques,” ICNS 2018, VA, USA, April 2018.
- [10] C. Reck, et al, “Verification of ADS-B positioning by direction of arrival estimation,” IJMWT, vol.4, no.2, pp.181-186, April 2012.
- [11] Method and Apparatus for Improving ADS-B Security, U.S. Patent 7423590 B2, 2008.
- [12] Device, System, and Methods using Angle of Arrival Measurements for ADS-B Authentication and Navigation, U.S. Patent 9476962 B2, 2016.
- [13] N. Ghose, et al, “Verifying ADS-B Navigation Information through Doppler Shift Measurements,” 34th IEEE/AIAA DASC, Prague, Czech Republic, Sept. 2015.
- [14] J. Naganawa, et al, “ADS-B Anti-Spoofing Performance of Monopulse Technique with Sector Antennas,” 2017 IEEE CAMA, Tsukuba, Japan, Dec 2017.
- [15] 長縄ほか, “ADS-B/WAM 機能強化に向けたアレーアンテナ技術の検討,” 平成 30 年度（第 18 回）電子航法研究所研究発表会 講演概要, pp.39-42, 平成 30 年 5 月.
- [16] J. Naganawa and H. Miyazaki, “Comparison between Opportunistic Measurement and Nominal Link Budget for Aeronautical Surveillance Signal,” EuCAP 2019, Krakow, Poland, Mar. 2019.
- [17] 長縄, 宮崎, “TDOA を用いた ADS-B 成りすまし検出の理論的検討,” 信学ソ大, B-2-24, 2018 年 9 月.
- [18] J. Naganawa et al, “Jamming and Spoofing Protection for ADS-B Mode S Receiver through Array Signal Processing,” Air Traffic Management and Systems III, Springer, 2019.
- [19] J. Naganawa and H. Miyazaki, “Experimental Evaluation on Effectiveness of TDOA-based ADS-B Position Verification,” 2019 IEEE/AIAA DASC (発表予定)