

17. WAM 受信局配置設計に向けた信号検出率測定

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，航空交通管理の変革の方向性として，軌道ベース運用（TBO: Trajectory Based Operation）への移行が示されている[1]。この TBO の実現に向けては，地上・機上での状況認識能力の向上が必要とされている。例えば，高頻度かつ高精度な航空機位置情報が利用できれば，追尾予測技術を適用することで，短期的な将来位置を正確に予測でき，安全性向上に寄与できる。

地上における状況認識能力の要となるのが航空機監視システムである。航空機監視システムは航空管制官に航空機の位置情報等を提供するものであり，航空交通管理に必要不可欠なシステムである。代表的な航空機監視システムとして，二次監視レーダ（SSR: Secondary surveillance Radar）[2]が挙げられる。しかしながら，TBO のような高度な運用方式に対応するためには，現用の航空路用 SSR では更新頻度等が十分ではないと考えられ，より高性能な広域マルチラテレーション（WAM: Wide Area Multilateration）[2,3]の導入が期待されている。そこで，当研究所では，平成25年度より，「航空路監視技術高度化の研究」に着手し，我が国の航空路監視に WAM を導入する際に必要な技術の試作・評価を進めてきた[4,5]。

WAM の導入にあたって課題となるのは受信局の配置を決めることである。WAM は航空機が発する信号を複数の受信局で検出することで測位を行う。そして，航空機と受信局の位置関係が性能に大きく影響する。したがって，性能とコストのバランスが取れた適切な受信局配置を決定することは，WAM 導入を成功させるためのキーポイントである。

しかしながら，従来の受信局配置決定方法では，信号干渉の影響を考慮できないという課題があった。すなわち，所望の航空機の出す信号

に対して，異なる航空機からの信号が重畳すると，受信局での信号検出が失敗する。その結果，精度や測位頻度が低下してしまうが，従来の受信局配置決定方法ではこのような信号干渉の影響を考慮しておらず，楽観的に配置を決める恐れがあった。さらに，従来の受信局配置決定方法では質問機能活用，空中線のセクタ化，測位計算方式の改良といったこれまで当研究所が実装した高性能化技術を適切に導入してシステム全体の最適化を実現するには制限があった。

このような背景から，当研究所では，「航空路監視技術高度化の研究」の一環として信号干渉の影響を考慮した WAM 受信局配置設計手法の構築をも目指しており，その準備段階として，実環境における信号検出率を測定した。

本稿の構成は以下の通りである。第2節では WAM の測位原理，受信局配置，信号干渉の説明を通して，本研究の目的を明らかにする。第3節では実環境における信号検出率の測定を説明する。また，受信局配置決定への応用を目指し，測定結果に基づく検出率推定モデルを示す。第4節では，本モデルの有効性を飛行実験のデータを用いて確認した結果を示す。第5節では，本モデルが WAM 高性能化技術の導入にも有益であることを示す。具体的には，セクタ型空中線による性能を見積もり可能であることを示す。最後に第6節でまとめる。

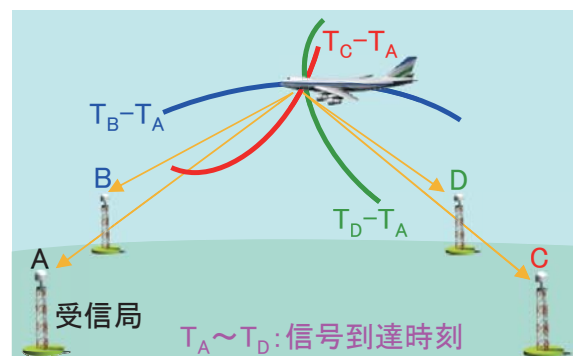


図1 WAM 測位方式の概要図

2 WAM の概要

2.1 測位原理

図1にWAM測位方式の概要図を示す。まずWAM測位するにあたり、航空機に搭載されたトランスポンダが送信する信号を、地上に配置した複数の受信局で検出して到達時刻を測定する。

次に、受信局間の到達時刻差を航空機と各受信局との距離差に変換して、“距離差が一定”との条件からなる双曲線（双曲面）同士の交点を求める。そして、この交点が航空機の位置となる。トランスポンダが送信する信号には、SSRへの応答信号の他、航空機衝突防止装置（ACAS: Airborne Collision Avoidance System）で利用されるスキッタ信号、放送型自動従属監視（ADS-B: Automatic Dependent Surveillance - Broadcast）で利用される拡張スキッタ信号などがある。3次元で測位を行うには、未知数が3個あるため最低3組の距離差、すなわち4局の受信局で信号を検出する必要がある。

2.2 受信局配置設計

前述のようにWAM測位は最低4局あれば成立するが、実際には信号到達時刻を測定する場合に測定誤差が生じるほか、後述する信号干渉の影響により全ての受信局が信号を確実に受信できるわけではない。そのため、4局以上の受信局を用意して冗長性を持たせ、最小二乗法などの計算手法を利用して位置を推定することになる。

そこで課題となるのが、受信局の数と位置を決める受信局配置決定である。一般に、受信局を密に配置すれば性能向上が見込める一方で、設置・維持のコストが増加する。また、同じ受信局数でも、受信局と航空機の位置関係によって、性能が大幅に変化する。

受信局配置設計においては、精度劣化指数（DOP: Dilution of Precision）と呼ばれる指標が良く知られている。DOPはWAM地上局と航空機の位置関係から算出され、時刻誤差に乗算することで、測位誤差を見積もることができる。図2に当研究所が整備しているWAM実験システムを対象としたDOPの計算例を示す。これに、例えば50 nsの時刻誤差を想定すると、東京国際空港を中心とした40NM以内の大部分

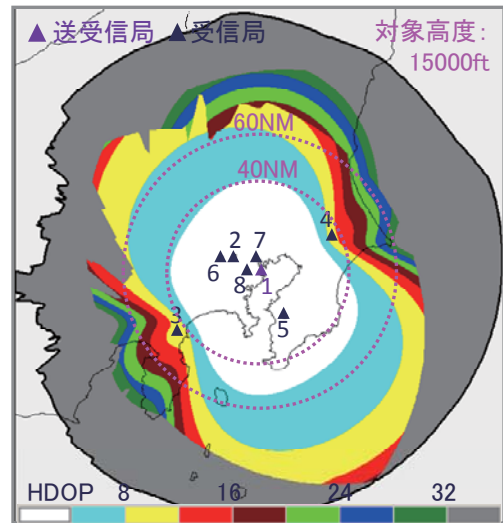


図2 受信局の配置と水平 DOP 分布

で60 mの精度を実現可能であることが示される。このように、ある受信局配置を仮定し、所望の性能が達成できることを確認すれば、受信局配置の決定となる。すなわち、受信局配置設計の核となるのは、性能の見積もり手法である。

2.3 信号干渉の影響

しかしながら、DOPは航空機からの信号が確実に受信できることを前提としている。実際には、トランスポンダ信号が送信される周波数帯域は複数の航空機で共有されており、かつSSR、ACAS、ADS-Bさらには敵味方識別装置といった様々なシステムもこの周波数帯域を使用する。したがって、複数の航空機が多数の信号を発するため、信号干渉が容易に発生しうる。その結果として受信局が信号検出に失敗すれば、不十分なDOPで測位計算が実行され、測位精度が悪化する。さらに4局以上の受信局で信号を検出することができなければ、そもそも測位が成立しなくなり、更新頻度が低下する。DOPはこのような信号干渉の影響を含めることができないため、DOPのみに基づく性能見積もりは楽観的になりすぎる可能性がある。

さらに、当研究所がこれまでに取り組んできた質問機能活用、空中線のセクタ化、測位計算方式の改善といった高性能化技術に関しても、その導入を適切に行うためには、信号干渉の影響を考慮することが必須である。例えば、セクタ型空中線の効果として利得向上と干渉低減による信号検出率の改善が挙げられるが、この効

果を DOP により定量的に評価することは極めて困難である。そのため、受信局配置設計の際に、どの場所にセクタ型空中線に設置すれば、どれだけの効果があるのかを見積もることができない。また、質問機能の活用においても、実際には信号干渉により質問に対する応答を検出できない状況が存在するため、それを考慮した質問数を設定する必要がある。

以上のように、適切な WAM 受信局配置の決定にあたっては、信号干渉の効果を組み込んだ WAM 性能見積り手法が必要である。そして、その手法構築のためには、信号干渉の存在する実環境において信号検出率を正確に把握することである。

3 測定・解析

WAM 性能見積り、ひいては受信局配置決定の寄与に向けて、信号検出率の測定を実施した。本節では、測定方法と解析結果を述べる。

3.1 信号検出率測定方法

WAM が用いる様々な信号のうち、拡張スキッタによる航空機位置放送を対象として測定を行った。拡張スキッタによる位置放送は 0.4 秒～0.6 秒間隔で放送されており、ある時間内に送信された母数を推定できる。このとき、地上で受信できた拡張スキッタを計測し、送信された母数で除算することで、信号検出率を測定できる。なお、拡張スキッタによる位置放送は、航空機の機体の上下に取り付けられた空中線から交互に送信される。そのため、送信に使用された空中線を推定するアルゴリズムを開発したうえで、機体上下の空中線それぞれに対して、個別に信号検出率を評価した。機体上部の空中

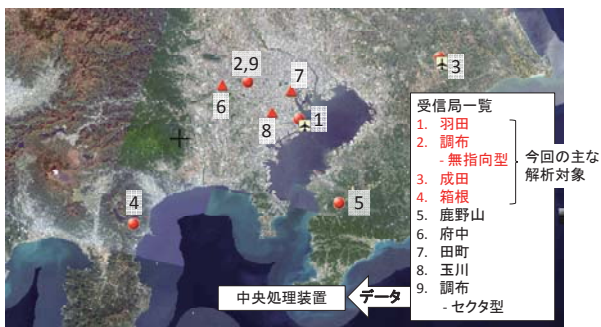


図3 WAM 実験システムの受信局（測定時）
 地図データは国土地理院タイル利用

線は胴体や翼により地上側からは隠れるため、機体下部の空中線と比較して信号検出率が低下することを確認している。本稿では、これ以降、機体下部の空中線を対象とした結果を示す。また、干渉源となる信号には主にモード S 信号とモード AC 信号の2種類が存在する。予備検討において、モード AC 信号量が極めて多いことを確認したため、1秒あたりのモード AC 信号数を干渉の強さの指標として測定した。

測定は、当研究所が整備している WAM 実験システムを用いた。図3に実験システムにおける受信局の配置を示す。このうち、東京国際空港（羽田局）、電子航法研究所（調布局）、成田国際空港（成田局）、箱根対空受信所（箱根局）の4局から得られたデータを主に解析に使用した。2015年10月10日9:00～17日9:00までのデータを使用した。

3.2 測定結果

図4に例として、調布局における測定結果を示す。モード AC 信号数（グラフ横軸）の増加に従って、信号検出率（グラフ縦軸）が顕著に低下することが分かる。これは、信号数増加に従って、所望の信号とモード AC 信号が重畳する確率が増すためである。

さらに、受信電力によって信号検出率に大きく差がでることが確認できる。すなわち、受信電力が弱いほど、干渉信号に対してより脆弱である。例えばモード AC 信号数が最も少ないときに、-79 dBm から -67 dBm の電力を持つ信号は 0.8 以上の検出率を持ち、その検出率の差は小さい。しかしながら、モード AC 信号が最も

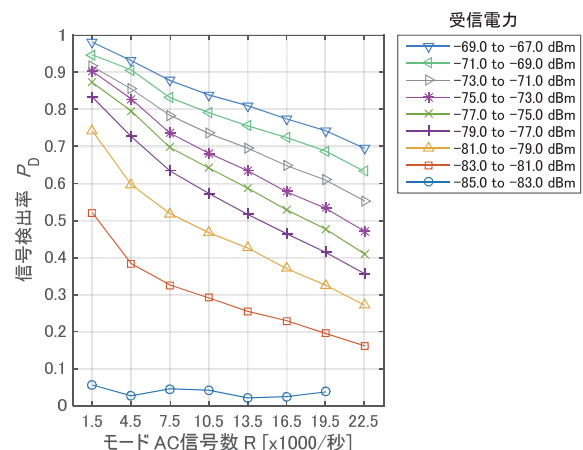


図4 調布局測定結果

多いときには 0.3 以上の差が生じており、-79.0 dBm から -77.0dBm の電力を持つ信号の検出率は 0.4 を割り込んでいる。

特に WAM においては、同一の信号を複数の受信局で検出しなければ測位ができないため、このグラフで表示されている値以上に、測位成功の確率が低下することに注意が必要である。仮に受信局数を n とすると、全ての受信局で信号を検出できる確率は単独の信号検出率の n 乗となるためである。

なお、調布局以外の 3 局においても、同様のグラフが得られた。

3.3 信号検出率のモデル化

前述のような信号検出率の特性をモデルによって表現することができれば、信号検出率の推定、ひいては受信局配置設計に役立てることができる。そこで、モデルとして以下の多項式を構築した。

$$P = a_{00} + a_{10}M + a_{01}R + a_{20}M^2 + a_{02}R^2 + a_{30}M^3 + a_{03}R^3 + a_{40}M^4 + a_{04}R^4$$

ここで、 P 、 M 、 R 、 a_{ij} は信号検出率、リンクマージン、モード AC 信号数、多項式の係数である。リンクマージン M は受信電力と最小トリガレベル（しきい値）の差である。係数 a_{ij} は測定データを基に最小二乗法で推定した。また多項式の次数は決定係数への影響を鑑みて決定した。図 5 にモデル化された信号検出率と測定結果を示す。色つきの面は、モデル式による

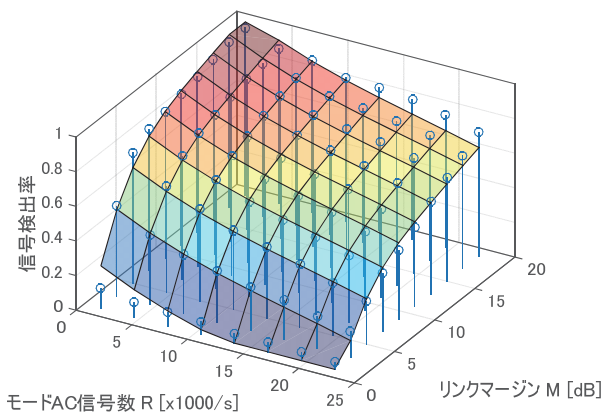


図 5 信号検出率の測定結果（軸つき青丸）と多項式によるモデル化（曲面）

値を示す。また、軸つきの青丸は測定結果を示す。モデルと測定は良好に一致したため、提案した多項式で信号検出率の特性を適切に表現できている。すなわち、リンクマージン M とモード AC 信号数が既知の場合に、それらを本モデル式に代入することで、信号検出率を予測することができるようになる。

4 飛行実験による検出率の予測性能の評価

構築したモデルの有効性を確認するために、飛行実験における測定データを利用した。実験用航空機が送信する拡張スキッタに対する検出率を予測し、実測値との一致を評価した。本稿では例として、調布局の結果を示す。図 6 に飛行経路および調布局（赤丸）の位置を示す。飛行経路には区間ごとに数字を割り当てた。

4.1 検出率予測におけるモデルへの入力

検出率予測にはリンクマージンおよびモード AC 信号数が必要となる。リンクマージンは自由空間の伝搬式を用いて受信電力を予測したうえで、最小トリガレベル -85dBm との差を取ることで予測した。しかしながら、地形・建物は存在せず機体による放射パターン変化が無いなど、極めて理想的な状況を想定しているため、受信電力との誤差も見られた。そこで検出率予測に際しては、実測した受信電力値を利用した場合も計算した。

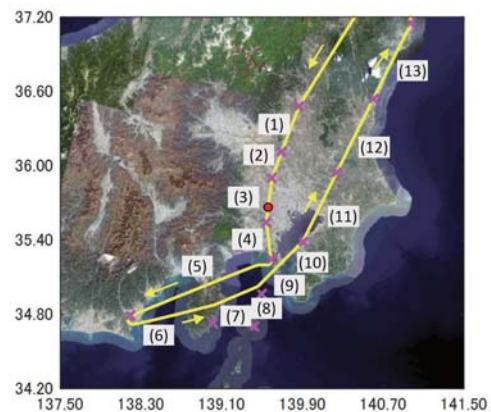


図 6 検出率予測を行う飛行経路と受信局（調布）の位置
地図データは国土地理院タイル利用

次に、モード AC 信号数に関しては、モデル化のときに用いた 10 月 10 日～10 月 17 日におけるモード AC 信号数を 1 時間ごとに平均化した値を用いた。干渉信号量に関しては、おおむねモデルと実測値の一致を確認した。

4.2 結果

図 7 に各航空路の区間ごとの信号検出率の予測値と実測値を示す。調布局にもっとも近づく区間(3)および(11)においてピークを取り、その近傍で良好な検出率を得ている。一方で、受信局から最も遠ざかる(6)(13)において、検出率の低下が確認できる。これらの傾向は提案モデルによる予測でも正確に表現されている。

実測された電力を予測に用いた場合には、全区間で平均した誤差（絶対値）は 0.04 であった。検出率推定の観点からは、有効な精度であると考えている。ただし、今後の WAM 測位性能見積もりにおいて、この誤差が存在することを踏まえて、性能保証できるマージンを検討する必要がある。

電力も予測した場合には、平均した誤差は 0.07 であった。特に、区間(1)での過大な予測と区間(13)における過小な予測の誤差が大きい。したがって、正確な受信電力の見積もりが鍵であることも確認された。

5. セクタ型空中線の性能予測

無指向型空中線は全方位からの電波を受信する一方で、セクタ型空中線は受信できる方位を限定する。これにより利得を改善でき、より微弱な信号が検出可能になる。さらに、空中線の

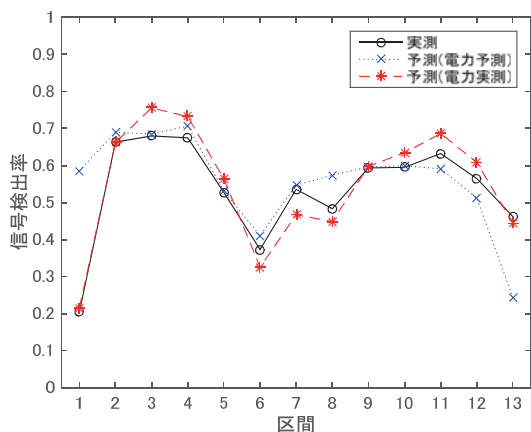


図 7 区間ごとの検出率予測値と実測値

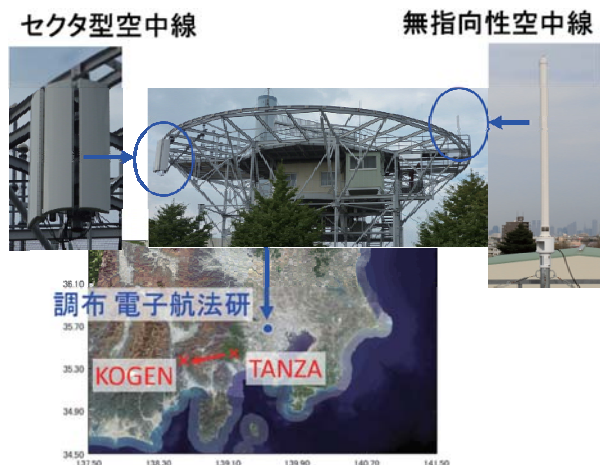


図 8 セクタ型空中線と性能評価に用いた航空路

地図データは国土地理院タイル利用

向いていない方向からの干渉信号をカットできるため、信号干渉の影響を低減できる。このような利得改善と干渉低減の効果により、セクタ型空中線により信号検出率の改善を図ることができる。もし、改善効果を事前に見積もることができれば、受信局配置の決定に役立てることができる。これに向け、信号検出率モデルを用いたセクタ型空中線の性能予測を試みたので、本節で説明する。

5.1 評価方法

調布に設置したセクタ型空中線は 3 つあり、そのうち最も西側を向いているものと無指向型空中線を比較した。2015 年 4 月 9 日（木）9：00～2015 年 4 月 10 日（火）9：00 の 24 時間に航空路 TANZA-KOGEN を通過する在空機に関して、信号検出率を測定した。図 8 に空中線の写真および航空路との位置関係を示す。また、予測にあたって、検出率モデルに代入したパラメタは表 1 に示す。

5.2 セクタ化による性能向上の予測

図 9 に 1 時間ごとの信号検出率を示す。まず、セクタ型・無指向型ともに、夜間と比較して日中の時間帯では信号検出率の低下が確認できる。日中の信号数の増加は確認しており、信号干渉による影響である。

セクタ型と無指向型を比較すると、セクタ型のほうがより高い信号検出率を示していること

表1 空中線性能予測に用いたパラメタ

無指向型	M	当日に実測された受信電力
	R	2015年10月15日（木）における測定データを1時間ごとに平均
セクタ型	M	無指向型の M に仕様上の利得差8.0 dBを加算
	R	無指向型の R に干渉低減係数 $F=0.74$ を乗算 干渉低減係数は利得およびビーム幅から推定

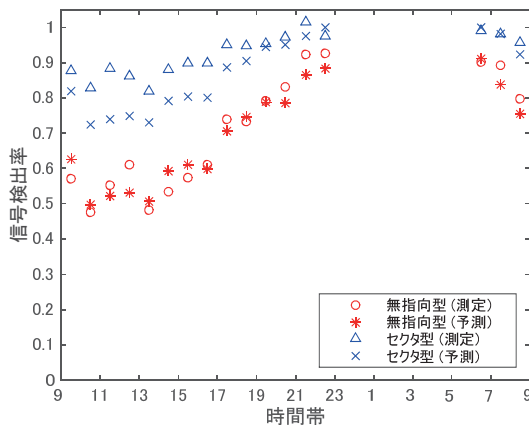


図9 セクタ型および無指向型空中線の性能比較

がわかる。すなわち、セクタ化による利得改善と干渉低減により、検出率の向上を得ることができている。特に干渉の影響の大きい9:00～21:00において、セクタ化による検出率改善は平均して0.27であり、優れた改善効果を示した。

また、セクタ型と無指向型の信号検出率はともに、今回提案のモデルによる予測値とおおむね一致していることが分かる。9:00～21:00におけるモデルによる検出率の改善効果は0.19であった。改善効果はやや過小評価されており、同様の傾向は他の曜日でも確認された。受信局配置設計においては、性能の下限を示すという意味で悲観的な値は望ましい。したがって、今回得られた検出率のモデルはセクタ化による性能改善の見積もりに有益であると確認できた。

6 むすび

本稿では、WAM 受信局配置設計に向けて、信号検出率の測定を行い、測定データに基づくモデル化を行った。モデルとして、検出率をリンクマージンとモード AC 信号数で表現する多項式を得た。本モデルにより、飛行実験における検出率予測およびセクタ化による性能向上予測が可能であることを確認した。

今後は、本モデルを用いて、WAM 測位性能の推定の実現を目指す。具体的には WAM 測位に必要な4局以上の受信局において信号検出が可能であることを確認する。また、今回評価対象とした拡張スキッタ以外の信号（SSR 応答や補足スキッタ）に関しても、本モデルの適用または同様のアプローチでのモデル化を検討する。

謝辞

実験装置の設置・調整、ならびに評価試験を実施するにあたり、多大なご協力をいただきました関係各位に深く感謝の意を表します。

参考文献

- [1] CARATS 事務局, CARATS 航空交通システムの長期ビジョン.
- [2] ICAO, *Aeronautical Surveillance Manual*, Doc9924, First Edition, Amendment1, April 2012.
- [3] EUROCAE, *Technical Specification for Wide Area Multilateration (WAM) System*, Version 1.0, ED-142, October 2009.
- [4] 宮崎, 古賀, 松永, 角張, 本田, 田嶋, “航空路監視用 WAM 技術の評価について,” 平成27年度(第15回)電子航法研究所研究発表会 講演概要, 2015年6月.
- [5] H. Miyazaki, H. Shimada, T. Koga, Y. Kakubari, and S. Nihei, “Performance evaluation of a WAM system using measured range,” *Proc. 2014 TIWDC/ESAV*, pp.78-81, Sept. 2014.