

1 3. 航空路監視用 WAM 技術の評価について

監視通信領域 ※宮崎 裕己，古賀 禎，松永 圭左，

角張 泰之，本田 純一，田嶋 裕久

1 まえがき

航空機監視システムは、航空管制官に航空機の位置情報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）^[1]が挙げられる。

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^[2]。このTBOでは、航空機の現在位置と将来位置（空間，時間）を「正確に把握」することが重要とされている。例えば、短期的な将来位置を正確に把握するには高精度な追尾予測技術が必要であり、このためには、高頻度かつ高精度な航空機位置情報の更新が要求される。

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る。このためSSRと比較して、より高性能が実現できる、広域マルチラテレーション（WAM: Wide Area Multilateration）^{[1],[3]}の導入が期待されている。

以上の背景から、当研究所では「航空路監視技術高度化の研究」を計画して、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・評価を進めている^{[4][5]}。特に、我が国の航空路監視にWAMを導入する場合、質問機能を活用した高性能化が必須である。このため本研究では、本機能を実装するための高利

得セクタ型空中線の開発と測位計算方式の改良に重点を置いて進めている。

本稿では、まず初めにWAMの概要として、測位原理や課題を述べる。次に、航空路WAMで必要な技術である、質問機能を活用した測位方式（Ranging 測位）について説明する。そして、当研究所で整備を進めているWAM実験装置を利用したRanging測位の予備試験結果を示す。最後に、Ranging測位の課題とその対応策を説明する。

2 WAMの概要

2.1 測位原理

図2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。

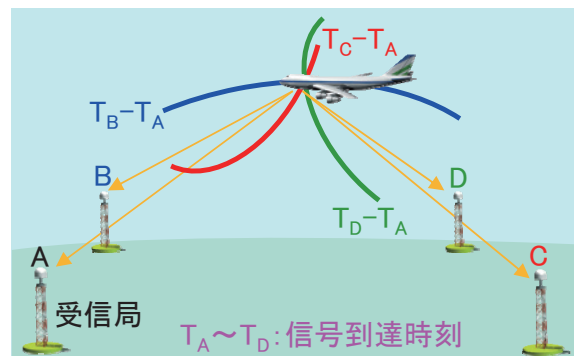


図2 WAM測位方式の概要図

トランスポンダが送信する信号には、SSR 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^[7] や ADS-B（Automatic Dependent Surveillance-Broadcast）[1]で利用される拡張スキッタ信号がある。測位を行うには、最低 4 局の受信局が必要である。しかしながら、信号到達時刻を測定する場合に測定誤差が生じるため、4 局以上の受信局で信号を検出して、最小自乗法などの推定手法を利用して位置を決定することになる。

2.2 WAM の課題

広域マルチラテレーション（WAM）は、名前が示すとおり、広い覆域が要求される。WAM は、受信局を単純に増加させた場合でも覆域の拡大が可能である。しかしながら、この方法では受信局数が必要以上に増大してしまい、現実的ではない。このため、受信局の受信感度を（弱い信号も検出可能とする）鋭敏に設定して、受信局単体の覆域を拡大させる必要がある。このように受信感度を鋭敏化した場合、受信局数を増やさずに WAM の広域化が可能になる。

しかしながら、受信感度を鋭敏に設定すると困難な状況に直面する。受信局単体の覆域が拡大することは、受信局 1 局が取り扱う航空機が増えることを意味する。そして、遠方の航空機が送信する微弱な信号を検出することが必要になる。すなわち WAM の受信局では、多数の航空機から送信される様々な強度の信号を正しく検出する性能が求められる。特に、遠方の航空機から送信された微弱な信号に近傍航空機からの強力な信号が重畳（干渉）した場合、微弱な信号を正常に検出することは非常に困難になる。これに加えて、微弱な信号は波形が明瞭ではなく、ノイズの影響も受けやすいため、困難さが増す状況になる。

このような状況において、信号の検出時刻を誤測定した場合は測位精度が低下

する。一方、データ内容を誤解読した場合は検出率が低下する。以上を踏まえると、WAM の課題は、遠方からの微弱な信号を如何に正確に検出するか、と言い表すことができる。

3. 航空路 WAM で必要な技術

3.1 広域化のポイント

WAM の課題である“微弱な信号を正確に検出する”対策として、高度な信号処理技術の適用が挙げられる。この対策は実現できた場合は非常に有効であるが、現実的には難易度が高い状況にある。一方、受信局配置に冗長性を持たせる現実的な方法がある。この方法は、ある受信局において、干渉等の影響により信号検出ロスが生じた場合、同じ信号を検出した、冗長的に配置された受信局を代わりに利用して測位するものである。この冗長性を持たせた受信局配置手法は、一般的に“ $n-1$ 冗長性”と呼ばれており、比較的容易に高い信頼性を確保できる利点を持つため、広く活用されている。

しかしながら、この冗長的な配置は弊害も招く。まず、受信局数が増加するため、各受信局から転送されるターゲットレポート数が増えるため、ターゲット処理装置の負荷が増大する。空港面マルチラテレーション（MLAT）と比較して、WAM は取り扱う航空機数が多いことから、この傾向が顕著に現れる。これに加えて、整備や維持に係る費用も増大する。受信局を広範囲に多数配置する WAM は、遠隔地における電源や通信線の確保が容易ではない。特に通信線は広域ネットワークを利用するため、回線費用が高額となり、大きな課題となっている。

冗長性が十分に確保された理想的な受信局配置を形成することは、費用的な制約から、現実的に困難な状況にある。以上のことから、広域化のポイントは、コスト（受信局数）と性能（覆域、検出率、位置精度）とのトレードオフ（バランス）と言える。

このように WAM の導入は、一般的に覆域が広がるほど難しく、航空路監視では最も困難になる。一方、どうしてもバランスが取れない場合、費用対効果の悪いエリアは SSR に任せることや、長期的には ADS-B^[1]により解決するなどの対応策も考慮する必要がある。

3.2 質問機能の活用

先に述べたとおり、信号検出時刻の測定誤差は、位置計算時において測位誤差の増大をもたらす。特に DOP (Dilution of Precision) の悪いエリアにおいては計算解が得られない状況になり、検出率の低下も発生する。これらの性能低下を改善させる技術として、WAM に送信局を追加して航空機に対して SSR 質問を行う、質問機能の活用が挙げられる。WAM は基本的に受動監視 (Passive) 方式であるが、送信機能を持つ WAM は、Active 方式と呼ばれている。

Active 方式では、干渉等により信号検出ロスが発生した場合、その航空機に質問して応答を引き出し、再測位を行うことで検出率の向上が図れる。更に、質問送信から応答受信までの時間を測定して、求めた距離も利用して測位計算を行うことで、測位精度の改善が図れる。この求めた距離を利用する測位方式は Ranging 測位と呼ばれ、DOP の悪いエリアに対して特に有効である。図 2 に Ranging 測位の概要図を示す。

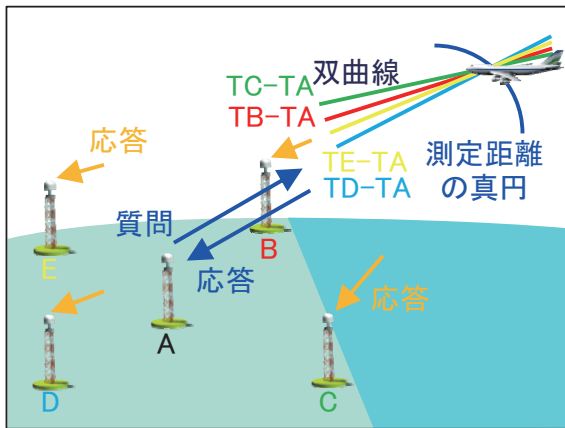


図 2 Ranging 測位の概要図

簡単のため 2 次元で説明すると、受信局配置の外側では双曲線がほぼ平行に交わるため、測位誤差の増大や計算解が得られない検出率の低下が発生する。これに対して、質問から応答までの時間より得られる真円は双曲線とほぼ直角に交わるため、測位精度と検出率 (更新頻度) の改善が可能になる。この Ranging 測位の活用により、受信局数を増加させずに WAM の覆域を拡大することが可能になる。しかしながら、高出力および高頻度での質問送信は、信号環境の悪化を招く恐れがある。このため当研究所では、航空路監視への WAM の導入を踏まえて、信号環境に配慮した、高利得セクタ型空中線の開発を進めている。

4. Ranging 測位の予備試験

前章で述べた、Ranging 測位に適した高利得セクタ型空中線の評価は、平成 27 年度中旬に開始する計画である。これに先立ち、通常は無指向性空中線を使用した Ranging 測位の予備試験を実施した。試験の目的は、Ranging 測位の性能確認と課題の抽出である。

4.1 WAM 実験装置

図 3 に WAM 実験装置の受信局配置を平面の DOP (HDOP) 分布とともに示す。

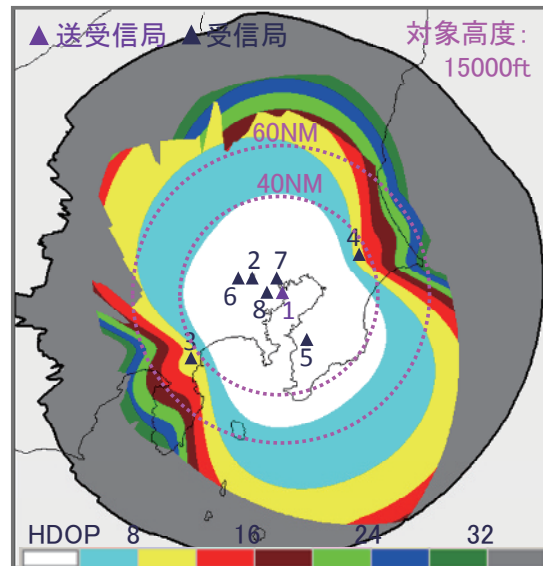


図 3 受信局の配置と HDOP 分布

実験装置は、送受信局 1 局と受信局 8 局から構成される。このうち 3 局は、共同研究を締結している日本電気株式会社の設備品である。監視覆域は、東京国際空港（羽田）を中心とした 60NM を想定している。図 3 の HDOP 分布が示すとおり、受信局に囲まれた 40NM 以内では良好な測位精度が期待できる。一方、受信局配置の外側になる 40NM 以遠では、測位誤差が急激に増加することが予想される。Ranging 測位のために質問を送信する送受信局は羽田に設置しており、質問の到達距離は 60NM を想定している。

4.2 試験内容

当研究所の実験用航空機を監視覆域内に飛行させ、Active 方式（Ranging）による性能を受動監視方式（Passive）と比較して評価した。図 4 に実験用航空機の飛行航跡を示す。評価対象エリアは、図 4 に示される調布から伊豆までの区間である。Ranging 測位のための質問は、1 秒間に 2 回の頻度で定期的送信した。信号環境を配慮して、質問は実験用航空機にのみ送信した。評価項目は、測位精度と検出率である。測位精度を算出する際の真位置にはキネマティック方式により算出した GPS 位置情報を利用した。測位精度は、自乗平均誤差（RMS: Root Mean Square）により算出した。一方、検出率は、Ranging 測位の性能を評価するため、2 秒間隔（航空路性能要件は 8 秒）^{[3],[7]}により算出した。

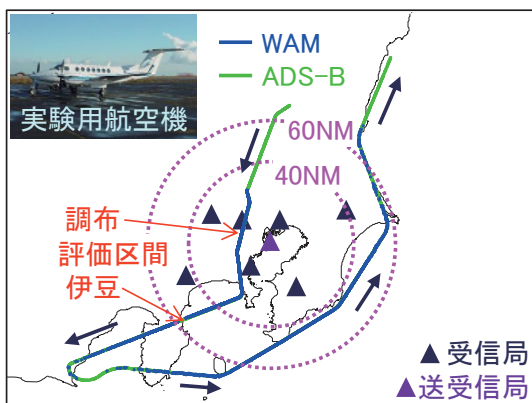


図 4 実験用航空機の飛行航跡

4.3 試験結果

(1) 測位精度

図 5 に羽田からの距離に対する測位誤差の分布を Passive と Ranging とで比較して示す。また、表 1 に測位精度値の比較を示す。図 5 と表 1 から、受信局配置の内側（10～40NM）では、Passive および Ranging とともに良好な測位精度が得られているが、外側（40～60NM）では、Passive は急激に測位誤差が増大していることが分かる。また、Ranging では、受信局配置の外側においても、比較的良好な測位精度が維持されていることも分かる。これらの結果から、Ranging 測位は、HDOP 値が悪いエリアに対して、受信局を追加せずに良好な測位精度が得られることが確認できた。

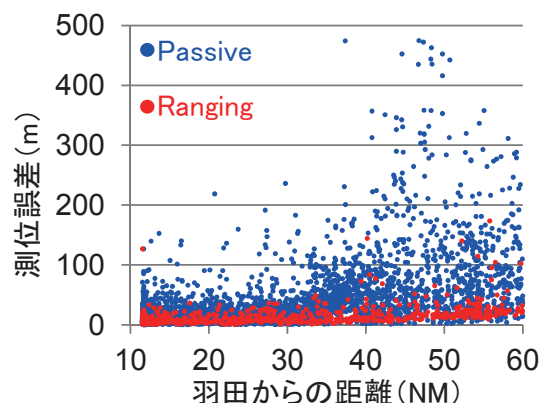


図 5 測位誤差の分布

表 1 測位精度値の比較

測位誤差(RMS)	10-40NM	40-60NM
Passive	28m	144m
Ranging	14m	35m
性能要件 ^[3]	空港	航空路
	150m	350m

(2) 検出率

表 2 に検出率の比較を示す。表 2 から、Passive における検出率は、2 秒間隔との厳しい条件でも高い検出性能が得られていることが分かる。一方、Ranging では、

2秒間隔において質問を4回送信しているが、受信局配置の内側では約20%、外側では約40%の時間で、Ranging測位結果が1回も得られていない状況となった。この原因を把握するための解析結果として、表3に羽田周辺（10～20NM区間）での質問応答状況の分類を示す。表3から、測位結果が得られない主な原因は、質問に対する応答が羽田で検出されないことと、誤目標であることが判明した。これらの状況は、応答信号検出時の信号干渉に起因するものと想定される。誤目標になる要因として、信号干渉により応答信号の時刻検出誤差が増大して、異なる位置に計算解が収束してしまうことが挙げられる。

表2 検出率の比較

検出率(2秒間隔)	10-40NM	40-60NM
Passive	100%	100%
Ranging	79.5%	59.7%
性能要件 ^[3]	空港	航空路
	97%(5秒)	97%(8秒)

表3 質問応答状況の分類

質問数: 560	回数	比率
質問が届いていない	62	11%
正しく測位された	236	42%
誤目標となった	155	28%
羽田で検出されない	93	17%
検出局数が4局以下	14	2%

(3) Ranging 測位の課題

表4に羽田周辺（10～20NM区間）での各受信局の応答検出率の比較を示す。表4に示されるとおり、受信局の位置が羽田から遠ざかるに伴い、応答検出率が低下していることが分かる。一方、表5に在空機（エアライン機）測位データから算出した、質問・応答成功率を夜間

（22時頃）と日中（11時頃）で比較して示す。表5に示されるとおり、日中の成功率は、夜間と比較して低下していることが分かる。夜間と日中を比較した場合、大きく異なる条件として、航空機数（信号数）が挙げられる。すなわち、成功率の低下要因として、信号干渉の影響が考えられる。以上の結果から、Ranging測位の課題として、WAM送受信局と航空機トランスポンダとの間のLink Marginを十分に確保することと、信号干渉の影響を軽減することが挙げられる。

表4 応答検出率の比較

受信局	応答検出率	距離(羽田)
羽田	75%	0NM
玉川	78%	約5NM
田町	77%	約5NM
調布	76%	約15NM
府中	75%	約15NM
鹿野山	66%	約20NM
成田	53%	約30NM
箱根	46%	約40NM

表5 質問・応答成功率の比較

質問・応答成功率	2-40NM	40-60NM
夜間(22時頃)	81.4%	70.6%
日中(11時頃)	53.1%	33.5%

5. 課題への対応策

5.1 空中線のセクタ化

前章で述べたRanging測位の課題である、Link Marginの確保ならびに信号干渉の軽減を図るには、空中線のセクタ化が有効と考えられる。予備試験において、調布サイトでは、無指向性空中線による受信局の他、高利得セクタ型空中線の受信局も設置して同時にデータを取得した。

高利得セクタ型空中線のビーム幅は 45° である。表 6 に羽田周辺（10～20NM 区間）での応答検出率を両空中線で比較して示す。表 6 から、高利得セクタ型空中線では応答検出率が増加しており、この対応策が有効であることが分かる。

表 6 応答検出率の比較

空中線	応答検出率
高利得セクタ型(17dB)	84%
無指向性(9dB)	76%

5.2 測位方式の改良

(1) 楕円測位

前章における検出率の解析では、測位結果が得られない一つ原因に、質問に対する応答が羽田で検出されないことを示した。このため、羽田で送信された質問に対する応答を、羽田以外の受信局で検出した場合でも Ranging 測位ができれば、Ranging 測位の成功率が向上すると考えられる。このような測位方式は楕円測位と呼ばれる。本測位方式は、平成 26 年度に WAM 実験装置に実装済みである。

(2) 気圧高度を活用した 2 次元測位

測位結果が得られないもう一つ原因は誤目標であり、異なる位置に計算解が収束するとの要因を示した。このため、Ranging 測位用の応答信号内に含まれる気圧高度値を活用して、その値を高さ情報に設定して 2 次元測位を行った場合、異なる位置への計算解の収束が軽減できるものと考えられる。本測位方式は、平成 27 年度に WAM 実験装置に実装する予定である。

6. まとめ

本稿では、WAM の概要を述べ、航空路 WAM に必要な技術である Ranging 測位を説明して、WAM 実験装置による Ranging 測位の予備試験結果を示した。

試験の結果、Ranging 測位を行うことにより、受信局を追加せずに良好な測位精度が得られることを確認できた。一方、Ranging 測位の成功率が低いことも判明した。この原因を把握するためにデータ解析を行った結果、Ranging 測位の課題として、質問・応答の Link Margin を十分に確保すること、信号干渉の影響を軽減させることを確認した。そして最後に、本課題への対応策である、空中線のセクタ化と測位方式改良について説明した。これら対応策の評価は、平成 27 年度中に開始する計画である。

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感謝の意を表します。ありがとうございました。

参考文献

- [1] ICAO: “Aeronautical Surveillance Manual”, Doc9924, First Edition, Amendment1, April 2012.
- [2] 将来の航空交通システムに関する研究会：“将来の航空交通システムに関する長期ビジョン”，事務局（国土交通省航空局），2010 年
- [3] EUROCAE: “Technical Specification for Wide Area Multilateration (WAM) System”, Version 1.0, ED-142, October 2009.
- [4] 島田他：“WAM における性能改善方式の評価”，第 14 回電子航法研究所発表会講演概要，平成 26 年 6 月
- [5] Miyazaki et al.: “Performance Evaluation of a WAM System using Measured Range”, Proceeding of the ESAV '14, September 2014.
- [6] ICAO: “Aeronautical Telecommunications”, Annex10 Volume IV, Fourth Edition, July 2007.
- [7] 国土交通省航空局：“WAN-14 型広域マルチラテレーション装置仕様書”，ARG-14-01，平成 26 年 5 月