

1.WAM 受信局配置設計に向けた検出率予測モデル

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。

地上における状況認識を担うのは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, 代表的なものは二次監視レーダ (SSR: Secondary Surveillance Radar) である。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は, 現用の SSR よりも高性能な航空機監視システムが求められる。例えば, 短期的な将来位置を正確に予測するには, 高頻度かつ高精度な航空機位置情報が必要となる。

そこで SSR よりも高性能な航空機監視システムとして広域マルチラテレーション (WAM: Wide Area Multilateration) の導入が世界的に始められている。図 1 に WAM の測位原理を示す。まず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 (TDOA: Time Difference of Arrival) 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面同士の交点を求める。この交点が航空機の位置となる。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。

以上の測位原理により, WAM は SSR よりも優れた性能を獲得可能であることが知られており, 前述のように導入が進められている。しかしながら, 導入の際に必要な受信局配置の

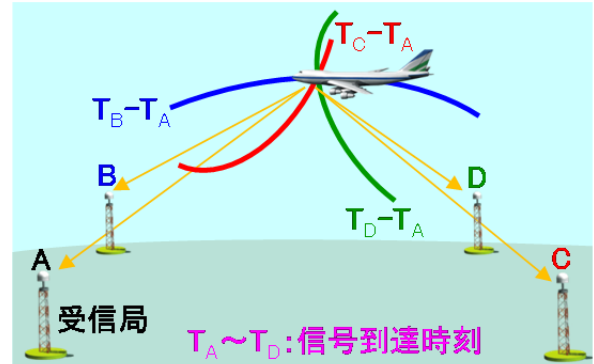


図 1. WAM の測位原理。

決定に課題が残っている。WAM は航空機と受信局の位置関係が性能に大きく影響する。受信局配置決定の方法としては, 従来, 精度劣化指数 (DOP: Dilution of Precision) が用いられてきた。DOP は航空機と受信局の位置関係から計算され, DOP 値と受信局の時刻検出精度を乗算することで, 精度を見積もることができる。所望の精度を達成できることが確認できれば, 受信局配置の決定となる。

しかしながら, このような従来手法では精度と並んで重要な性能指標である検出率および更新間隔が考慮されておらず, 受信局配置が楽観的になる恐れがあった。具体的には, DOP は配置した受信局の全てが測位に寄与するものとして計算される。すなわち, 各受信局が必ずトランスポンダの信号を検出できることが前提になっており, ターゲット検出率は 100%となる。しかしながら, 実際には, 他の航空機が出す信号による干渉や受信電力不足により, 信号検出が失敗することが多い。もし信号検出に成功した受信局数が 4 局以下であれば, 測位計算を行うことができず, ターゲット検出失敗となる。規定の検出率と更新間隔を満たすような WAM を導入するためには, このような状況を想定して受信局配置を決定することが必要である。

以上の背景から、当研究所では受信局配置決定に資する WAM 検出率モデルの構築に取り組んでおり [2]、本稿ではその結果を報告する。なお、WAM 検出率モデルの構築は「航空路監視技術高度化の研究」の一環として実施したものである。当研究では、質問機能を活用した測位方式やアンテナのセクタ化といった高度化技術の評価を行っており [3,4]、提案した検出率モデルはそれら高度化技術の効果予測をも目的としている。さらに、検出率は更新間隔と密接に関連しており、検出率がモデル化できれば更新間隔のモデル化にも成功したことになる。

本稿は以下のように構成される。2 章では、提案モデルの概要を示す。3 章では基礎評価として、限定した条件下でのモデルによる予測値と実験値の比較を示す。最後に 4 章でまとめる。

2 モデルの概要

図 2 に提案した検出率モデルを示す。WAM は様々な信号処理から成るシステムであり、検出率に作用する様々な要因がある。そこで、提案モデルを WAM 検出率に作用する各要因に対応する複数のサブモデルの集まりとして構築した。各サブモデルは発生順番に沿って接続した。以下に各サブモデルの詳細について説明する。

電波伝搬、干渉信号、受信機モデル

まず、始めの 3 つのサブモデル（電波伝搬、干渉信号、受信機）では各受信局における信号検出の問題を考える。信号検出の失敗は、測位機会の喪失であり、検出率の低下につながる。信号検出が成功するには、受信電力が十分高く、信号干渉が許容範囲でなければならない。これらの影響を考慮するために、電波伝搬モデルは受信電力分布を予測し、信号干渉モデルは干渉信号数分布を予測する。その後、受信電力分布と干渉信号数分布に基づき、受信機モデルは信号検出率を予測する。

電波伝搬モデルとして、現状は自由空間モデルを想定しているが、今後種々のモデルを検討する予定である [5]。干渉信号数分布に関しては、測定を伴わない予測は困難であるため、測定データの活用を前提とする。受信機モデルについては、当研究所の評価結果を活用できる [6]。

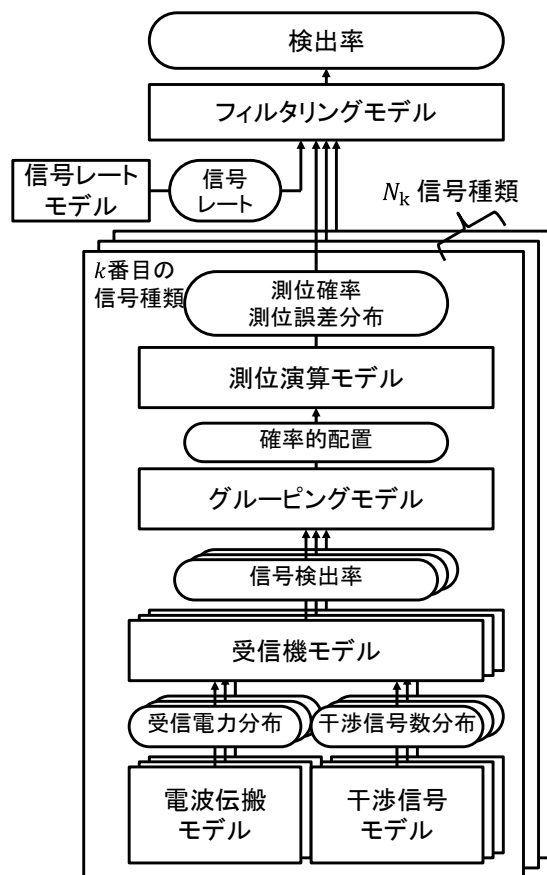


図 2. WAM 検出率モデル。

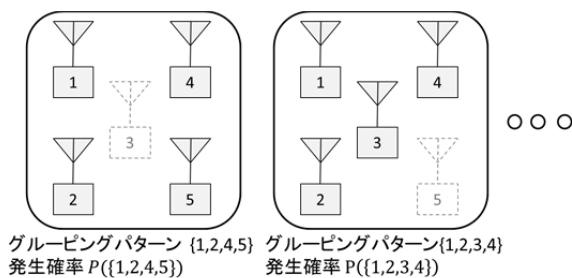


図 3. 確率的配置のイメージ。

グルーピングモデル

各受信局で検出された信号は、ターゲット処理装置に集められ、同じ信号ごとにまとめられる（グルーピング処理）。グルーピング処理に信号を提供できなかった受信局は、測位に寄与できないことになる。言い換えると、グルーピング処理は測位に寄与する受信局を決める処理といえる。このようなグルーピング処理の結果、信号検出の状況に応じて、受信局配置が仮想的に変化していくことになる。測位に有利な受信

局配置が多く発生すれば、検出率の向上が期待できる。一方で、4局以下の受信局配置が多く発生すれば、検出率の低下につながる。このように、検出率の観点からはどのような配置がどれほどの確率で発生するかが重要である。したがって、グルーピングモデルでは、ある受信局配置のパターンとその発生確率の組を“確率的配置”と定義し、これを予測するものとする。図3には確率的配置のイメージを示す。確率的配置は、各受信局の信号検出率から計算可能である。例えば図のように1,2,4,5番目の局がグルーピングされるパターンが発生する確率 $P_G(\{1,2,4,5\})$ は、以下のように計算できる。

$$P_G(\{1,2,4,5\}) = P'_{s,1}P'_{s,2}(1 - P'_{s,3})P'_{s,4}P'_{s,5}$$

ここで $P'_{s,i}$ は*i*番目の受信局における信号検出率である。

測位演算モデル

グルーピングされた信号は、到達時刻差の算出とそれに基づく航空機位置推定に用いられる。到達時刻に誤差があるなどの理由により、測位演算が失敗する場合には検出率の低下につながる。また、測位演算が成功しても、測位誤差が大きいものは妥当な解としては受け付けられないため、測位誤差分布が広がっている場合には検出率が低下する。このように、測位演算は測位確率と測位誤差分布を通じて検出率に影響を与えるため、測位演算モデルはこれらを予測するものとする。測位確率と測位誤差分布は、グルーピングモデルの予測する確率的配置から計算可能である。

まず、測位解は（誤差が大きい可能性はあるが）必ず得られるものとする。測位確率はグルーピングが成立する確率として計算できるため、以下を得る。

$$P_L = \sum_{C \in C_{all}} P_G(C)$$

ここで、 C はあるグルーピングパターン、 C_{all} は4局以上の受信局が得られる全てのグルーピングパターンである。一方、測位誤差分布はDOPによる測位誤差分布の予測を確率的配置に拡張することで得られる。具体的には、ある

グルーピングパターン C に対して、DOPから予測される水平測位誤差 Δ_r の累積分布関数を $F_r(\Delta_r|C)$ と書く。すると、確率的に配置が変化する場合の水平測位誤差 Δ_r の累積分布関数 $F_r(\Delta_r)$ は、グルーピングパターンの発生確率を考慮した期待値として計算でき、以下を得る。

$$F_r(\Delta_r) = \frac{1}{P_L} \sum_{C \in C_{all}} F_r(\Delta_r|C)P_G(C)$$

なお、 $1/P_L$ の項は $\sum_{C \in C_{all}} P_G(C) = 1$ ではないために必要となる。

信号レートモデル

WAMにおける検出率は、ある一定の更新間隔（2秒～8秒に設定）の間に、測位が成立するかどうかの確率である。更新間隔中に航空機が発したトランスポンダ信号の数が増えるほど、測位機会が増すことになり、検出率の増加につながることになる。この効果を考えるために、信号レートモデルが信号レートの予測を行う。

フィルタリングモデル

測位演算により推定された航空機位置について、その妥当性を判断するのがフィルタリングのプロセスである。過去の測位結果に基づき、確からしい航空機位置のみを出力する。フィルタリングはWAMにおける最後のプロセスであるため、フィルタリングモデルは最終的なターゲット検出率を予測するものとする。また、このとき信号レートや更新間隔の影響も考慮に入れることとする。

まず、ある1つの信号に対するターゲット検出率 P_D を考える。水平測位誤差 Δ_r が γ_e 以下の測位結果を妥当なターゲットと判定するとする。フィルタリングが理想的に働くと仮定すれば、 P_D は以下のように得られる。

$$P_D = P_L F_r(\gamma_e)$$

次に更新間隔の影響を考慮する。信号レート R 、更新間隔 n 秒とすれば、 nR の信号数に対して測位を試みることができ、 n 秒更新間隔でのターゲット検出率 P_D^n は以下のように得られる。

$$P_D^n = 1 - (1 - P_D)^{nR}$$

なお、信号種類が複数ある場合にも類似の計算で最終的な検出率を得ることができる。

3 基礎評価

飛行実験における測定データを用いて、構築した検出率モデルの基礎的な評価を行った。実験には、当研究所が整備している WAM 実験システムを利用した。図 4 には飛行経路と WAM 実験システムの受信局配置を示す。

評価として WAM 検出率予測モデルによる予測値と WAM 実験システムによる実測値とを比較した。正確な評価を行うため、信号送信回数がおおむね一定である拡張スキッタ信号のみを測位対象とした。さらに、フィルタリングに関してはオフライン計算を行い、理想的なフィルタリングを仮定した。具体的には、機上で取得した高精度な位置情報と実験システムの推定した航空機位置を比較して、水平誤差が 1690 m のものをターゲット検出に成功したとした。更新間隔は 5 秒とした。

図 5 には各区分における信号検出率の実測値と予測値を示す。検出率予測値については、受信電力に予測値と実測値を用いた場合を示している。実測値と予測値は良好な一致を示しており、受信局配置設計の目安としての可能性を確認できた。また、これにより提案モデルは検出率予測に必要な支配的要因をおおむね網羅していることを確認できた。しかしながら、区分 1,2 のように、受信電力に予測値を用いた場合には検出率を過大に見積もる場合も確認できる。これは受信電力の過大な見積もりから発生しており、今後は適切な電波伝搬モデルの選択を含めて、受信電力の正確な見積もりを検討する。

むすび

本稿では WAM 導入における受信局配置の決定に用いるための検出率モデルを述べた。今後は、提案モデルのより詳細な評価と改善を進める予定である。

参考文献

- [1] 将来の航空交通システムに関する研究室, 将来の航空交通システムに関する長期ビジョン.
- [2] J. Naganawa, H. Miyazaki, H. Tajima, "Detection Probability Estimation Model," in *Proc. 2017 Integr. Commun. Navig. Surveillance Conf.*, Herndon, VA, Apr. 2017.
- [3] 宮崎, 古賀, 松永, 角張, 本田, 田嶋,

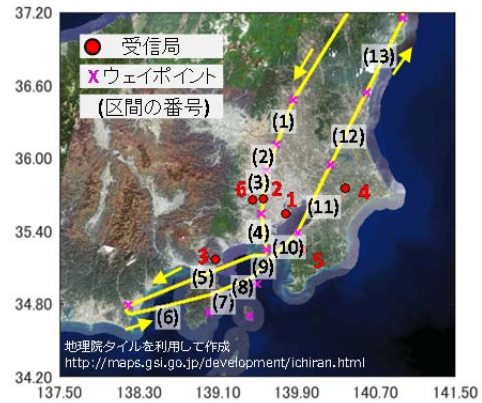


図 4. 飛行実験経路と受信局配置.

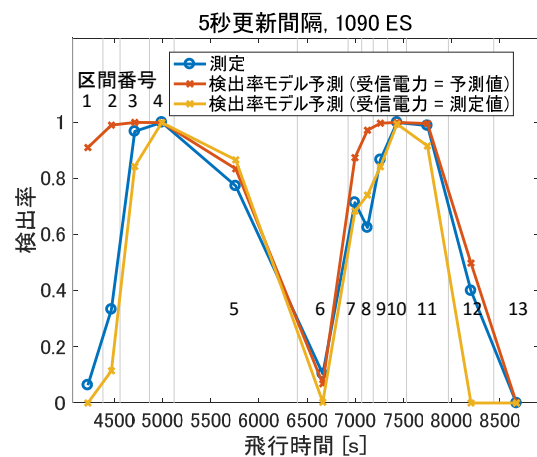


図 5. 各区分における検出率と予測値

“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

- [4] H. Miyazaki, Y. Kosuge, T. Tanaka, "Improvement of Position Accuracy by Combining TDOA and TSOA," in *Proc. Int. Conf. Space, Aeronautical Navig. Electron.* 2016, Taipei, Taiwan, Nov. 2016.
- [5] J. Naganawa, H. Miyazaki, H. Tajima, "Evaluating Path Loss by Extended Squitter Signals for Aeronautical Surveillance," in *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, 2016.
- [6] J. Naganawa, H. Miyazaki, H. Tajima, "Measurement-based Evaluation on Detection Probability of Extended Squitter for Air-to-Ground Surveillance," in *IEEE Trans. Veh. Technol.* (to appear)