

1030MHz 帯の電磁信号環境の予測手法開発

電子航法開発部 ※小瀬木 滋、住谷 泰人

1. はじめに

二次監視レーダ SSR (Secondary Surveillance Radar)、航空機衝突防止装置 ACAS (Airborne Collision Avoidance System)、敵味方識別装置 IFF (Identification Friend or Foe) などの二次レーダは、監視側の質問装置として 1030MHz の質問信号を送信する。移動体など被監視側の応答装置が送信する応答信号などには、1090MHz の信号が使用される。しかし、信号の混信を相互に回避調整する機能を持たないため、多数の装置が同時運用されると受信信号が相互に混信して装置の性能を劣化させる。一般に、性能劣化が問題にならない範囲で、装置運用数や信号送信数が設定される。

現在の日本の空域では、観測される信号発生数に比較的余裕があり、相互干渉による性能劣化は問題になっていない。しかし、モード S 拡張スキッタ信号[1]を用いる放送型自動従属監視 ADS-B (Automatic Dependent Surveillance - Broadcast) や放送型交通情報サービス TIS-B (Traffic Information Service - Broadcast)、これらを応用する航空機間隔維持支援装置 ASAS (Airborne Separation Assistance System) などの導入が国際民間航空機関 ICAO において検討されている。図 1 に示す例のように、新旧の装置間で混信妨害の発生が懸念されている。

将来の運用環境では、在来装置の性能を維持しつつ新規導入装置が十分な性能を持つことが求められる。このため、装置運用数や信号送信数の限界を求める手法が研究されている[2]。前述の信号干渉を考慮するためには、受信機で観測される信号発生量や電力分布で特徴づけられる信号環境の予測が重要な課題である。特に、移動体搭載の応答装置における 1030MHz 信号環境の予測は、応答信号が送信される 1090MHz 信号環境の予測の課題でもある。このため、1090MHz 帯域のモード S 拡張スキッタ信号の応用装置や各種の二次レーダの性能予

測では、移動体で観測される 1030MHz 信号環境を正確に予測する必要がある。

しかし、1030MHz 帯域の信号環境予測については、従来の解析的な計算手法[3]の誤差が問題になっている[4]。特に二次レーダ質問装置近傍の質問信号数には、計算では予測されない著しい増加が飛行実験により観測されている。

本報告では、これらの事例について受信信号波形を用いて原因を説明するとともに、従来手法[3]の改良として提案した電磁信号環境の予測計算手法[5]に追加する改良を紹介する。

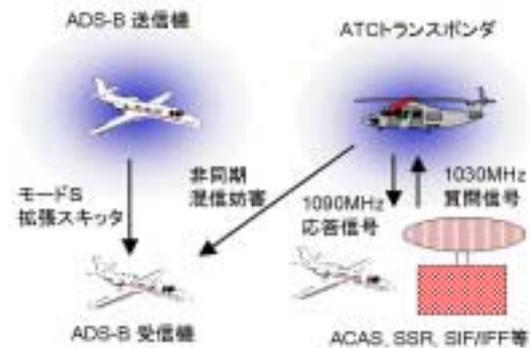


図1 モードS拡張スキッタへの混信妨害

2. 1030MHz 帯域の信号

1030MHz/1090MHz の電磁信号環境に影響を及ぼす各システムの関係を図 2 に示す。

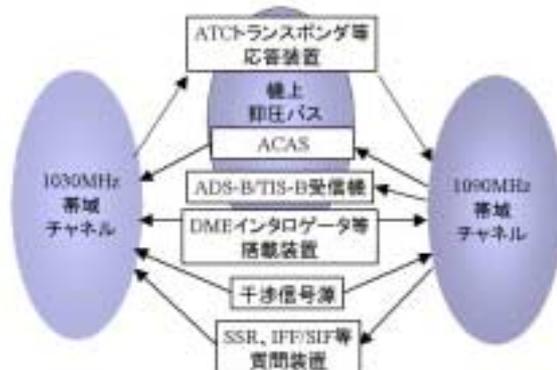


図2. 1030MHz/1090MHz 関連システム

各種の二次レーダが送信する 1030MHz 帯域の信号はパルス列で構成され、パルス間隔や変調方式により、質問/抑圧の区別や、質問の種類(モード)などが定義されている[6]。

1090MHz 帯域の信号は、各種の応答装置から送信される応答信号やスキッタである。応答信号の送信は、1030MHz 帯域の信号や搭載装置間の抑圧バス[7]の信号で制御されている[6, 8]。

図 2 の矢印は信号の流れを示す。1030MHz/1090MHz 帯域の信号環境は、各種の質問装置や応答装置を通して相互作用する。ACAS や SSR モード S は、質問に対する応答信号が受信できない場合の再質問や、航空機数と配置に応じた質問信号のスケージュリングなどの送信制御をする[8, 9]。この送信制御は、1090MHz 帯域の信号に応じた質問信号の制御を含み[9]、1030MHz/1090MHz 帯域の信号発生を変化させる帰還要素である。また、過去の質問数の記憶と航空機配置などを入力にした判断処理を含み[9]、送信機近傍の航空機数と各帯域の信号数は非線形な関係にある。

3. 従来の信号環境予測手法

従来の信号環境予測手法[3]では、信号が十分な電力で受信検出される条件を近似し、各送信装置の送信繰り返し周波数をもとに、受信機における受信信号数を求めている。

例えば従来型 SSR からの質問信号の受信信号電力が応答装置の受信機デコードレベルを越える空域においてサイドローブ抑圧 SLS (Side Lobe Suppression)が有効に働いている場合、質問信号はメインビーム内でのみ受信されると近似する。このとき、質問信号数は SSR の覆域内ではほぼ一定の値になり、その受信電力が減少する SSR の直上や遠方など覆域の境界において減少する。

この手法を用いて定常状態における平均的な信号環境を予測し、性能を概算できる。しかし、実際の運用でも観測されるマルチパス干渉や、応答信号弁別回路の性能限界などが無視されている。また、ACAS や SSR モード S などの再質問動作による非線形な帰還要素の影響は予測困難である。このため、信号発生量の時間変化など信号環境の動的性質や、その影響を受

ける装置の性能を予測することも困難である。

4. 提案する信号環境予測手法

信号環境の予測精度向上のためには、時間遅延や記憶要素を持つ非線形な帰還要素を無視できない[10]。帰還要素を考慮するためには、帰還要素の入力になる周囲の航空機の分布や応答信号の受信状況を求める必要がある。また、帰還要素である送信制御方式をモデル化し、入力の時間経過に応じた状態変化と送信信号の発生状況を表現する必要がある。

これらを満たす電磁信号環境の予測手法として、各送受信装置の受信処理と信号の受信解読を阻害する現象をモデル化し、時間経過に従って信号送受信をシミュレーションする手法がある[5, 11, 12]。

4.1. 信号環境予測のための送受信信号の表現

各装置の性能予測を目的とした信号環境予測では、各装置の動作性能に著しく影響する要因を全て考慮すべきである。提案手法では、下記の信号送受信の阻害要因を考える。

- ・ 送信機の抑圧など送信側の阻害要因
- ・ マルチパス波の干渉
- ・ 機体などによる伝搬路遮蔽
- ・ 非同期混信妨害や同期性ガブル
- ・ 受信機の感度制御
- ・ 受信機雑音
- ・ 受信信号弁別回路の動作と性能限界

マルチパス波の伝搬路を考慮するため、各送受信機における各信号の振幅、位相、送受信される時間関係を計算する。このとき、反射、回折などの現象が関わる伝搬路損失の算出に UTD (Uniform geometrical Theory of Diffraction) [13]などの高周波近似手法を応用できる。

各送受信機における信号送受信時刻の順序関係は、時刻で順序が管理される線形リスト[14]として表現できる。リストの各ノードは対応する信号を表現するデータ構造へのポイントを持つ。この線形リストを生成・検索しながら送受信処理をシミュレーションする。送信は、他の受信機の受信信号列を示す線形リストに伝搬遅延時間後の受信信号ノードを追加することで表現される。このとき、直接波とマルチパス波を独立したノードとできる。また、受信

処理では、考えている時刻において受信される全ての信号を検索し、これらが合成された受信波形を算出する。この受信波形を信号弁別回路モデルで処理する。信号弁別処理の結果は送信制御モデルの入力に用いる。

以上の処理をノードが対応する時刻順に実施する。過去の不要ノードは、適宜処分する。

4.2. 電磁信号環境予測に必要な情報

シミュレーションでは次の情報を想定する。

- ・ 関連機器の種類と運用数
- ・ 想定空域内の各送受信機の運動、性能、運用方式、地形、その他想定運用環境

また、次の要素をモデル化する。

- ・ 各送信機の送信制御
- ・ 各受信機の受信信号検出や弁別処理
- ・ 使用されるアンテナの指向性特性
- ・ マルチパス波などを含む電波伝搬
- ・ アンテナの回転や姿勢変化と移動
- ・ 隣接周波数チャンネルからの混信
- ・ 搭載装置間の相互抑圧バスの作用

より厳密なモデルを使用するほどシミュレーションの精度向上が期待されるが、計算コストが上昇する。このため、実際の信号環境を参考にモデル化の要点を確認すべきである。

4.3. 提案手法の特徴

この手法は、図2の関連システムの全てについて同時に性能予測が可能になるなど、今後の発展性を期待できる。特に、性能を制限する要因や、関連システムの改良または運用方式変更の効果などを検討するためのツールとしての活用が期待できる。装置モデルを拡張し、例えばSSRモードSデータリンクの導入後の信号環境予測にも活用できると期待される。

5. 飛行実験結果にみられる予測誤差

実際の応答装置により観測される1030MHz帯域の信号発生量を測定するため、飛行実験を実施した。モードS応答装置を当研究所の実験用航空機に搭載し、その質問信号弁別回路の出力を用いて受信信号の種類毎に計数した。この測定値は、実際のトランスポンダの応答や抑圧動作を示す。

従来型質問装置からの信号について、受信レートの測定例を図3に示す。

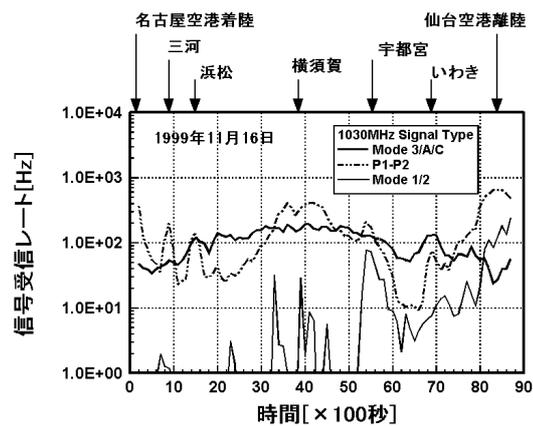


図3 1030MHz 信号発生量の測定例

質問信号の受信レートが質問装置近傍で増加しており、従来の手法による計算値とは傾向が異なる。特に、いわきSSR近傍では、計算値の数倍の信号発生量が観測された。

従来型質問装置の送信信号は、P1, P2, P3の3パルス構成である。航空機に搭載運用されている応答装置が応答したときの質問信号受信波形の観測例を図4に示す。例では、P1-P3パルスペアよりもP2パルスの電力が大きく、応答装置が質問装置アンテナのメインビーム外にあることを示している。このとき、図4に示すように、P1-P3パルスペアとP2パルスのタイミングが規格外であり、質問信号弁別回路はSLSとみなさない。一方、P1とP3は応答装置受信機のMTL (Minimum Triggering Level) を越えており、質問信号として処理される。

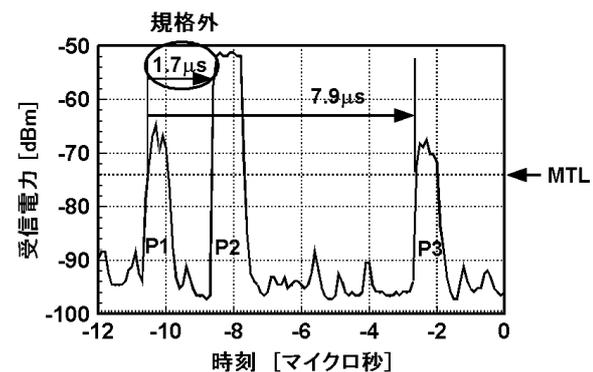


図4 メインビーム外で応答させた信号

P2パルスと比較して、P1とP3パルスは、パルスの立ち上がり時間が長く、波形が歪んでいる。また、P2パルスを基準にすると、P1-P3パルスペアは正しいタイミングより遅れている。以上より、P2パルスは直接波、P1-P3パルスベ

アはマルチパス波であると考えられる。

飛行実験では、上記の例の他にも、応答装置の質問信号弁別回路が受信信号を別種類の信号に誤解読する例が見られた。

6. 提案手法の改良

提案手法[5]では、質問装置の信号弁別回路の性能限界を考慮し、応答装置の信号弁別回路の誤解読を無視していた。しかし、飛行実験の結果、この誤解読を無視できないとわかった。

提案手法は、マルチパス干渉を考慮して応答装置受信機における受信信号波形を算出できる。そこで、応答装置の質問信号弁別回路モデルを改良し、動作を正確に模擬できれば、今回の実験で判明した信号環境予測の誤差要因も表現できる。これにより、1030MHz/1090MHz信号環境の予測精度向上が期待される。

7. まとめ

将来の二次レーダや ADS-B など監視装置の性能を予測するため、1030MHz/1090MHz 信号環境予測手法を開発している。1030MHz 信号環境の予測精度は、応答装置の動作予測精度に影響し、1090MHz 信号環境の予測精度にも影響する。これは各種の質問装置やモード S 拡張スキッタ応用装置の性能予測精度にも影響する。

飛行実験の結果、SSR など質問装置の近傍でその送信信号が別の種類の信号に誤解読されることがわかった。このため、質問信号送信数のみから信号環境を算出しても、応答装置の動作を必ずしも正確に予測できないことがわかった。各種装置の性能予測を目的とした信号環境予測では、受信信号のみならず信号弁別モデルを無視できないことがわかった。

筆者らが既に提案した信号環境予測手法は受信信号波形を算出できるため、適切な信号弁別モデルを追加し波形を処理すれば、信号環境や機器性能の予測精度の向上が期待される。

現段階では、誤差の発生要因を定性的に推定したのみであり、計算方式の妥当性を定量的に検証していない。今後は、改良型の信号環境予測シミュレーションソフトウェアを作成し、飛行実験結果と比較しながら予測精度を検証する予定である。このとき、本稿で着目したマル

チパス以外の原因についても信号環境予測誤差への影響も確認する予定である。

謝辞

飛行実験に際して東洋通信機(株)および(株)TIKに機器製作に関する協力を得ました。実験用航空機の運航には、共立航空(株)と(株)ジャムコの協力を得ました。関係各位に感謝申し上げます。

参考文献

- [1] E. T. Bayliss, et al. : "Demonstration of GPS Automatic Dependent Surveillance of Aircraft Using Spontaneous Mode S Broadcast Messages", Navigation, Vol.41, No.2, 1994
- [2] V. A. Orlando, et al. : "GPS Squitter Capability Analysis", ATC-214, MIT Lincoln Lab., May 1994
- [3] M. C. Stevens, et. al. : "Model of the secondary-surveillance-radar environment of the United Kingdom", Proc. IEE, Vol. 121, No. 5, May 1974
- [4] 小瀬木他 : 「1030MHz 帯の信号環境測定」、信学技報 SANE2002-15、平成 14 年 5 月
- [5] 小瀬木他 : 「スキッタ通信性能予測のための信号環境予測手法」、電子航法研究所研究発表会講演概要、平成 10 年 6 月
- [6] M. C. Stevens : "Secondary Surveillance Radar", Artech House, 1988
- [7] ARINC : "Mark 3 Air Traffic Control Transponder (ATCRBS/DABS)", ARINC characteristics 718-3, pp45-46, Sep. 10, 1981
- [8] ICAO : "ANNEX-10", vol. I, 2000
- [9] ICAO : "ANNEX-10", vol. IV, 2000
- [10] 小瀬木他 : 「スキッタを用いる ADS-B の性能予測」、信学技報 SANE97-142、平成 10 年 2 月
- [11] G. Patrick, et. al. : "The impact of a Traffic Alert and Collision Avoidance System on the Air Traffic Control Radar Beacon System and Mode S System in the Los Angeles Basin", DOT/FAA/PM-84/30, May, 1985
- [12] ESG, Albert Walberer : "Mode S Evaluation, ACAS Interference Limiting and Mode S Extended Squitter", final report, BT3_1_0.DOC, DFS, Dec. 6, 1996
- [13] P. H. Pathak, et. al. : "A uniform GTD analysis of the diffraction of electromagnetic waves by a smooth convex surface", IEEE Trans., AP-28, 5, p631, 1980
- [14] N. Wirth (浦他翻訳) : 「アルゴリズムとデータ構造」、近代科学社、1990