

13. 将来の航空監視技術と信号環境の変化

機上等技術領域 ※小瀬木 滋、大津山 卓哉、古賀 禎

1. はじめに

航空無線航法サービス（ARNS: Aeronautical Radio Navigation Service）に使用される電波は、960から1215MHzの周波数に割り当てられている。この周波数帯域（以下 ARNS 帯域と略称）には、DME など既存システムに加え、GPS-L5 やデータリンクなど新しい航空無線システムの電波が割り当てられた。しかし、航空機搭載機器の世代交代には比較的長い移行期間が必要であり、この間は新旧の航空無線システムが周波数を共用することになる。

新旧のシステムが周波数を共用することで、信号発生数や干渉発生状況などを示す信号環境が大きく変化する。信号環境は、無線システムの運用環境の一つであり、実現可能な運用性能の決定要因である。

本稿では、新しい航空監視技術が信号発生量など信号環境に与える影響について MLAT (Multilateration)を例に概算結果を報告する。

2. 航空無線航法用周波数の状況

世界電気通信連合（ITU: International Telecommunication Union）は世界無線通信会議（WRC: World Radio-communication Conference）を開催し、多国間の周波数割り当て調整をしている。ARNS 帯域は、航空の安全性維持や効率的運用のために国際的な調整の上で保護されている。この帯域内では、DME/TACAN, SSR/IFF, ACAS などが使用されてきている[1]。

その他の周波数帯域において、携帯電話の普及など、航空分野以外の電波利用も著しく進展している。このため、新たに別の周波数帯域を航空用に割り当てる事が困難であり、将来の航空無線システムの信号も従来の ARNS 帯域内に追加割り当てされつつある。

民間航空用の例では、GPS-L5 や Galileo-E5 など GNSS 用周波数が ARNS 帯域内に割り当てられた。また、航空移動通信サービス（AMRS: Aeronautical Mobile Radio Service）も新たに割り

当てられ、960～1024MHz を想定して新しい民間航空用データリンクが標準化されつつある。

一方で、多様な軍用無線システムもこの帯域に導入されている。軍用データリンク JTIDS (Joint Tactical Information Distribution System) は、SSR 用の周波数帯域を除く ARNS 帯域のほぼ全域を周波数ホッピングしながらパルス信号を送信する[2]。JTIDS は、先に導入されている DME 等に対して有害な干渉を与えない条件で運用が認められている。

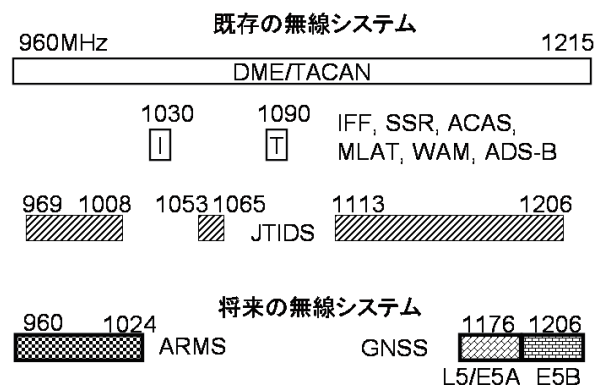


図1 ARNS 帯域内の周波数利用状況

新旧無線システムの移行期間が長い場合、新しい無線システムは既存の無線システムに有害な干渉を与えないことが求められる。また、既存の無線システムからの干渉を配慮して、新しい無線システムを標準化する必要がある。

3. 航空監視システムの概要

3.1. 航空監視システムの周波数共用手法

ARNS 帯域内では、航空監視システムの信号帯域が割り当てられている。監視者が送信する質問信号等に 1030MHz、被監視者が送信する応答信号等に 1090MHz がそれぞれ用いられる。

この帯域に最初に導入された SSR と ATC トランスポンダは、多数の送受信機が周波数を共用するが、相互干渉による性能劣化を前提にシ

システム設計されている[1]。これは、SSRの前身であるIFFが実用化された1950年代は精密時刻同期や符号処理機能が普及する以前であり、干渉を回避する手段がなかったためである。

現在の航空監視システムは、質問装置であるSSRやACASと応答装置であるATCトランスポンダで構成され、パルス列を用いる質問信号や応答信号を送受信する。質問装置は、質問信号を他の質問装置とは独立したタイミングで送信し、質問からほぼ同じ遅延時間で受信される応答信号を選別検出する。これにより、多数の応答装置が多数の質問装置に対して同じ周波数で応答信号を送信しても、質問装置は自らの質問信号に対する応答信号のみを選択検出できる。応答信号には、SSR側では測定が困難な識別情報や気圧高度情報が含まれる。

この他に、スキッタと呼ばれる信号も使用されている。これは、ランダムなタイミングで送信され、情報を多数の受信機に同報する目的で使用される。この信号に対するトラッキング処理は不可能である。現在はモードSトランスポンダがACASに捕捉されるために必要なモードSアドレスの同報に使用されている。

SSRやACASの受信機において希に複数の信号がほぼ同時に受信され、相互に干渉する可能性がある。しかし、信号の継続時間と単位時間あたりの発生数の積を十分小さく維持できれば、干渉発生確率が減少し、性能劣化を軽減できる。このため、適切な送信レートで運用すれば、十分な性能が得られることが知られている[3]。

3.2. 次世代監視方式

近年、次世代の監視方式の実用化に向けた試験研究が行われている。監視方式毎に分類すると、表1のようになる。各監視装置の詳細は、関連する研究発表等を参照されたい。

表1 監視方式毎の次世代監視装置

| 監視方式 | 既存装置 | 次世代装置 |
|-------|------------------|-------------------------------------|
| 独立非協調 | PSR | MS-PSR |
| 独立協調 | SSR 距離, ACAS | MLAT, WAM, TIS-B, 複合監視 ACAS |
| 従属協調 | SSR 高度, ADS-C | ADS-B, ADS-R, DAPs, 複合監視 ACAS |

監視方式の分類において、独立方式はレーダ等監視者の装置が被監視者の位置など必要な監視情報を測定する方式である。これに対して、従属方式は、被監視者が監視情報を測定し、監視者に通報する。また、協調方式は被監視者がトランスポンダ等監視に寄与する装置を持つ必要がある方式であり、非協調方式は監視者の装置のみで監視が可能な方式である。

これらの監視方式は、それぞれ精度や信頼性などの性能バランスが異なる。また、監視装置の導入に置いて、監視者と被監視者のコストバランスも異なっている。

なお、表にある複合監視ACASは、衝突する可能性が低い航空機の監視には、低レートの位置検証をする場合を除いて、ADS-B監視を使用する方式である。

表にある監視装置は、PSR, MS-PSR, および一部のADS-B / TIS-B装置を除き、1030 / 1090 MHz帯域を使用する。

3.3. 信号環境予測の必要性

1030 / 1090MHz帯域の信号を使用する航空監視システムは、3.1.に示すようにランダムなタイミングの混信の発生確率が十分低ければ、周波数共用しても実用的性能を発揮できる。このため、信号環境の維持管理が性能維持改善のために重要である。

次世代監視システムの多くもこの周波数帯域を使用しており、システム導入の前に周波数共用の前提などの確認が必要となる。信号環境予測は、航空無線システムの増設や世代交代など、導入シナリオ策定から運用維持まで各段階の検討に必要な情報を得るために必要である。

4. 信号環境の予測手法

4.1. 信号発生量の近似計算手法

現段階では信号発生量の電力分布について精密な計算が困難であるため、1090MHz帯域の信号発生量の概算を試みる。ある1台のトランスポンダが送信する信号数の概算には次の式を用いる。

$$t = (1 - c) \int R(p) d(p) dp + s$$

t は応答信号ベクトルであり、各応答モードの波形を持つ信号数を要素とする。捕捉スキッ

タ信号や拡張スキッタ信号も、それぞれ同じ信号形式であるモードSショート応答信号またはモードSロング応答信号として扱われる。

c はトランスポンダ占有率であり、他の受信信号や抑圧信号を処理中の時間などに質問信号が検出され応答できない確率である。通常の運用環境では、0~0.05の値であり、当研究所の測定結果も東京空域にて0.01~0.02であった[4]。ただし、ATCトランスポンダとともに航空機に搭載されるACAS等の機器とも機内抑圧バスを介した相互抑圧動作をするため、この値は航空機にも依存する[5]。

d(p)は質問信号ベクトルであり、受信電力がpである各質問モードの信号数を要素とする。ただし、干渉による検出率劣化を配慮した有効質問信号数を用いる。

R(p)は受信電力pにおける各モードの質問信号に対する応答率を行列で表現している。行列の対角要素が正しいモードの応答率であり、非対角要素が誤応答率を示す。

s はスキッタ送信数を示すベクトルであり、質問信号に関係なく送信される信号数を示す。まれに受信機雑音により少量のモードA/Cスキッタが送信される。しかし、多くの場合はその影響を無視できる量であり、捕捉スキッタや拡張スキッタなど意図的に送信される信号の主要な要素となる。

4.2. 想定する計算条件

R(p)の値は、FAA他による測定値を参考として最悪の条件を考える[6]。ここでは、モードA応答数への誤解読の影響に着目する。モードA質問信号への応答率Raa(p)とモードS質問信号をモードAとする誤解読率Rsa(p)を次のように近似する。(MTL: Minimum Threshold Level)

$$\begin{aligned} R_{aa}(p) &= 1 && : \text{MTL} \leq p \\ &0.25 && : -81\text{dBm} < p < \text{MTL} \\ &0 && : p \leq -81\text{dBm} \\ R_{sa}(p) &= 0 && : \text{MTL} \leq p \\ &0.15 && : -81\text{dBm} < p < \text{MTL} \\ &0 && : p \leq -81\text{dBm} \end{aligned}$$

ACASやSSRなど質問信号の送信機が面積一様分布するとき、これらが送信する信号の発生数を長時間平均したものは受信信号電力に反比

例することで近似できる[8, 9]。受信信号電力は送受信距離の自乗分の1になるため、あるモードの質問信号についてMTL以上の電力で受信される信号の発生数がNのとき、MTLからMTL-6dBの電力範囲で発生する信号数は3Nになる。ここでは、MTLとして-75dBmを想定する。ただし、覆域の計算においては、ACASとATCトランスポンダのリンクマージンが約3dBであるため[8]、1.4倍の覆域半径を考える。

国内で最も信号発生量が多い東京近傍の空域を想定し、d(p)を算出する。MTLを超える質問信号発生数は、トランスポンダの信号受信範囲内にあるインタロゲータ毎にアンテナビーム幅、送信レート、アンテナ回転数などを用いて算出される受信信号数の総和である。なお、信号受信範囲は、インタロゲータ毎にリンクバジェットを計算して求められる。MTL以下の電力については、上記の方法による概算値である。

また、スキッタによるモードA応答送信を無視する。トランスポンダ占有率cも十分低いと見なせるため、ここでは1-cを1で近似する。

SLS信号にマルチパスが重畳する事による誤解読率は、航空機近傍の空港内SSRの2基について0.15を想定している。

5. 信号環境の予測例

低電力質問信号を誤解読するトランスポンダが受信解読する等価質問信号数の計算結果を表2に示す。計算では、空港面にMLATインタロゲータを5台配置する事を想定し、その有無の影響も求めた。

表2 2009年東京空域の等価質問信号数計算値

| 信号モード | A, C | S |
|---------|-----------|----------|
| 送信信号数 | 46 / 46 | 37 / 131 |
| マルチパス | 59 / 76 | 0 / 0 |
| 低電力誤解読 | 65 / 154 | 0 / 0 |
| 等価質問信号数 | 169 / 277 | 37 / 131 |

数字は毎秒の信号数

MLATなし/MLATあり

トランスポンダが解読する等価質問信号数は、低電力質問信号の誤解読の影響を大きく受けることがわかる。これは、低電力の質問信号数が多いためである。この計算ではすべてのト

ランスポンダがこの誤解読現象を持つと想定したが、誤解読率が少ないランスポンダではモード A/C 質問信号数が 100~120Hz と予想される。

すべてのランスポンダが低電力信号の誤解読をすると想定した 1090MHz 信号発生数の計算値を表 3 に示す。誤解読をするのは一部のランスポンダのみであるため、実際の信号発生数は、この値より少ないと予想される。

また、MLAT 増設による信号環境への影響は小さく、等価質問信号数への誤解読の影響を考えても、許容範囲といえる。

表 3. 2009 年東京空域の 1090MHz 信号数計算値

| 信号モード | A, C | S short | S long |
|---------|------|---------|--------|
| MLAT なし | 4610 | 198 | 9.3 |
| MLAT あり | 7518 | 201 | 9.8 |

数字は毎秒の信号数

6. 今後の課題：信号環境予測の応用

6.1. 監視性能の信頼性因子の予測

監視に必要な信号を正しく受信できる確率は、受信電力が十分である確率と有害な干渉を受けていない確率の積で近似できる。このようにして、信号発生量から干渉発生量や環境内での性能は予測可能である。

この限界を超えない信号発生量となる確率が監視の信頼性を示す有用性 Availability や継続性 Continuity を決める主要な因子となる。

今後の課題として、監視装置が提供する情報の信頼性を予測するため、信号発生量の確率分布の予測が必要である。このためには、信号発生時間変化を知る必要があるため、信号発生の順序関係も配慮したシミュレーションが必要になる。その結果は測定により確認される[10]。

6.2. PSR など他の帯域の信号環境予測

今回は 1030 / 1090MHz 帯域の監視装置について計算例を示した。他の周波数帯域では、ASR や ARSR などの PSR が使用されている。

次世代の PSR として回転アンテナを使用しない MS-PSR (Multi Static - PSR) が提案されており、その信号環境の評価では参照波源、干渉波源、クラッタなどについて、1030 / 1090MHz

帯域とは異なる配慮が必要である。

7. まとめ

本報告では、信号環境予測の必要性と予測例を示すとともに、今後の課題を紹介した。

謝辞

信号環境の予測結果の活用については、国土交通省航空局各位のご指導を得ました。また、飛行実験は、多くの皆様のご支援ご協力により実施されています。ご協力くださいました関係各位に感謝申し上げます。

参考文献

- [1] ICAO: "ANNEX 10, Volume-I, IV", 2003
- [2] Lokuta: "JTIDS Electromagnetic Compatibility in the 960-1215 MHz Band", AD-A247834, January, 1992
- [3] ICAO: "Manual of the Secondary Surveillance Radar (SSR) Systems", ICAO Doc. 9684, chapter 8, First ed., 1997
- [4] 小瀬木他：“1030MHz 帯の信号環境測定”，電子航法研究所報告 No.107，2004 年 1 月
- [5] 岡田他：“航空電子システム”，日刊工業新聞社，昭和 58 年 12 月
- [6] Phillip J. Woodall: "ATCRBS Transponder Issue with Decoding Mode S P6 as a Result of Failure to Detect the Mode S Interrogation (preamble) P1 Pulse that Produces False Targets at Interrogators", RTCA SC-209, WG#1, ModeS-WP01-18, April 2007
- [7] 小瀬木他：“モード S 拡張スキッタへの非同期混信妨害の統計モデル”，電子航法研究所報告，No.102，2003 年 2 月
- [8] 小瀬木他：“ACAS 受動監視性能の概算法”，信学技報 SANE97-39，平成 9 年 7 月
- [9] 小瀬木他：“航空機衝突防止装置への混信妨害の測定”，電子航法研究諸研究発表会，平成元年 5 月
- [10] 小瀬木他：“航空無線航法用周波数の信号環境測定とその応用”，第 8 回電子航法研究所研究発表会予稿集，平成 20 年 6 月