

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

小瀬木 滋, 住谷 泰人, 白川 昌之

Statistical model for asynchronous interference to Mode S extended squitter

Shigeru OZEKI, Yasuto SUMIYA, Masayuki SHIRAKAWA

Abstract

The Mode S extended squitter is a signal to implement the random access data link in 1090 MHz channel. The International Civil Aviation Organization, ICAO, has reported on this data link as one of the candidate media for Automatic Dependent Surveillance-Broadcast, ADS-B. It is also expected that the communication with Mode S extended squitter will be applied to minimize the transponder utilization for the surveillance interrogation of Airborne Collision Avoidance System, ACAS. The estimation of communication performance of Mode S extended squitter is essential to estimate the surveillance performance for each application.

This paper describes statistical models of asynchronous interference to the Mode S extended squitter. The determination of statistical model is an essential part of the evaluation of communication performance. It is well known that the communication performance of Mode S extended squitter is degraded by the asynchronous interference with exceeding the power level that is derived from the receiving power level of Mode S extended squitter. The dominant source of asynchronous interference is the transponder replies in 1090 MHz channel.

For the model determination, the measured data on interference signal count are analyzed to compare with the Poisson distribution and the binomial distribution. They are farther compared with the Akaike Information Criterion, AIC. The Poisson distribution has been used to represent the distribution of interference signal count without verifying by measurement. The result of analysis shows that the Poisson distribution is suitable for the performance estimation model on the communication with Mode S extended squitter. Finally, an example of performance estimation is shown for the Tokyo airspace with measured interference parameters.

1. まえがき

国際民間航空機関（ICAO：International Civil Aviation Organization）では、航空機の位置や移動状況を監視する手段となる放送型自動従属監視（ADS-B：Automatic Dependent Surveillance-Broadcast）のデータリンク媒体が検討されている。

ADS-Bは、各移動体の位置、速度、識別番号などの情報を相互に交換するために放送型データリンクを用いる監視方式である。各送受信機を一对一の通信で接続する方式とは異なり、放送型データリンクは宛先を指定することなく多数の受信者へ一括してデータ伝送する。監視への応用を考えると、一对一の通信方式では1回の情報更新のために監視者数×被監視者数の信号送信回数が必要であるが、放送型データリンクでは被監視者数に等しい送信回数で十分である。このため、航空機など多数の移動体が相互監視する応用における信号発生量は、一对一の通信方式では航空機数のほぼ自乗に比例するが、放送型データリンクでは航空機数に比例する。このように、放送型データリンクを利用するADS-Bは監視者や被監視者が増加しても通信チャネルへの負荷が急増しない利点があり、多数の移動体による相互監視への応用に適している。

ICAOでは、応用毎の要求性能に応じて、監視用に提案されている各種の放送型データリンク媒体の通信性能を評価することが検討課題になっている。ADS-B用データリンク媒体の有力な候補の一つとして、モードS拡張スキット信号が提案されている。モードS拡張スキット信号は、SSRモードSのロング応答信号⁽¹⁾と同じ波形の信号をランダムなタイミングで送信するものである。この信号を用いて、1090MHzチャネルにランダムアクセス方式の監視用放送型データリンクを実現できる可能性がある。例えば、航空機衝突防止装置（ACAS：Airborne Collision Avoidance System）の監視方式の改良を目的として、モードS拡張スキットを用いる放送型データリンクを応用した複合監視方式⁽²⁾が提案され、ICAO標準方式とするための規格改訂が進められている。さらに、モードS拡張スキットを用いる監視方式がADS-Bの要求性能を満たす可能性を検証するため、各国で研究が行われている。

モードS拡張スキットの通信性能を決定する一要因である信号解読率は、非同期混信妨害により劣化する。非同期混信妨害は、主にモードS拡張スキットと通信チャネルを共用する信号との間で発生する。モードS拡

張スキットを用いる通信を実用化する前提として、この性能劣化が許容範囲内にあることの検証が必要である。平均的な通信性能を定量的に評価する計算方法には、非同期混信妨害の統計的性質を用いて解読率を求める手法が知られている⁽³⁾。この計算結果の妥当性を議論するためには、計算に使用する非同期混信妨害の統計モデルが現実的であることの検証が必要である。これまでの通信性能予測では、非同期混信妨害によりあるモードS拡張スキットに混信する信号数の分布を表す統計モデルとしてポアソン分布が使用されている。しかし、実際の非同期混信妨害の統計的な性質について実験的な検証が行われていない。

そこで、本報告では、モードS拡張スキットの通信性能の予測計算について根拠を得るため、計算に使用される非同期混信妨害の統計的性質を実験データにより検証する。最初に、モードS拡張スキットの概要と非同期混信妨害の影響について述べる。次に、非同期混信妨害の統計的性質として、あるモードS拡張スキットに混信する信号数の確率分布を表現するために用いられる統計モデルの例をまとめる。さらに、非同期混信妨害の受信測定結果を分析して混信する信号数の分布を求め、赤池情報量基準を用いて統計モデルに対する分布形状測定値の適合度を検証した結果を示す。最後に、モードS拡張スキットの解読率の予測計算方法を示し、東京空域で測定したデータをもとにした計算結果について考察する。

2. モードS拡張スキットの概要

2.1 モードS拡張スキット信号

SSRモードSは、二次監視レーダ（SSR：Secondary Surveillance Radar）の改良型である。その信号には、各種の質問信号や応答信号の他に、モードSスキット（Mode S squitter）と呼ばれる信号が2種類定義されている⁽⁴⁾。これらは、モードSスキット（またはモードS補足スキット：Mode S acquisition squitter）およびモードS拡張スキット（Mode S extended squitter）と呼ばれる。これらの信号は、航空機に搭載されたモードSトランスポンダが送信する短時間の信号である。モードSスキットは、ACASの初期捕捉を援助する目的で既使用されている⁽⁴⁾。モードS拡張スキットは、モードSスキットの信号長を拡張してデータ伝送量を増加させたものであり、将来の応用が研究されている。

図1に、モードS拡張スキット信号の波形を示す。また、モードS拡張スキットの諸元を表1に示す。詳細は

表1 モードS拡張スキットの諸元

信号波形	モードS ロング応答信号と同じ（図1） プリアンプル 8 μ s データブロック 112 μ s
搬送波周波数	1090 $\pm$ 1 MHz
信号電力	モードS トランスポンダの出力 アンテナ端子にて18.5~27dBW
変調方式	データブロック内2値パルス位置変調 ビットレート1Mbit/s
送信レート	位置情報、速度情報 飛行中：2Hz 空港面：速度適応 識別情報 0.2Hz イベント情報 適宜送信
符号化方式	24ビット巡回符号 24 μ sの範囲内の誤り検出訂正可能

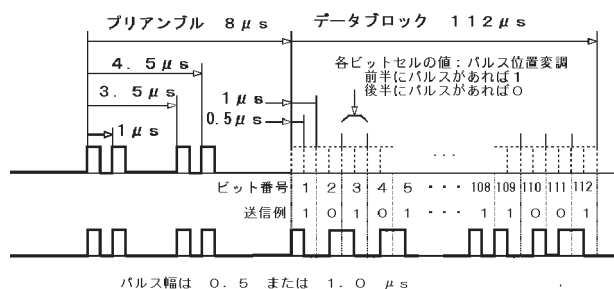


図1 モードS拡張スキット信号

ICAO ANNEX 10 Volume IVに記載されている⁽⁴⁾。

モードS スキットおよびモードS 拡張スキットは、モードS トランスポンダが送信するモードS 応答信号と同じ波形と搬送波周波数（1090MHz）を持つ。モードS 応答信号は、プリアンプルとデータブロックから構成され、データブロックの長さによりモードS ショート応答信号とモードS ロング応答信号に分類される。モードS スキットは、モードS ショート応答信号と同じ波形である。また、図1のモードS 拡張スキットは、モードS ロング応答信号と同じ波形である。これらの信号のデータブロックは誤り検出訂正符号化されており、若干のバースト誤りは許容される。

モードS スキット信号の通信手順は、送信時に受信者を指定せず、すべての受信者がデータを解読できる放送プロトコルである。また、送信タイミングが質問信号により決定される応答信号とは異なり、トランスポンダが決定するランダムなタイミングで自発的に信号が送信される。このため、ランダムアクセス方式の放送型データ

リンクを実現できる。

2.2 非同期混信妨害

モードS スキットのような短時間のバースト信号に対する混信妨害は、同期性混信妨害と非同期混信妨害に分類される。同期性混信妨害は、目的の信号と同期して発生する別の信号による混信妨害である。非同期混信妨害は、この同期現象が見られない混信妨害である。スキットはランダムなタイミングで送信されるため、他の送信機の信号による干渉は、原理的に非同期混信妨害のみである。

スキットの送信側では、事前の信号衝突回避や、受信側で発生する信号衝突に応じた信号再送信を行わないため、スキット相互の非同期混信妨害が発生する。また、モードS 拡張スキットが使用する1090MHz チャンネルは、前述のSSRや、敵味方識別装置（IFF：Identification Friend or Foe）、ACASなどの質問信号に対する応答信号に割り当てられている。これらの応答信号を送信するATC/IFF トランスポンダなど、1090MHz チャンネルを共用する他のシステムも、信号衝突回避機能を持たない。このため、これらの信号は、相互に非同期混信妨害の原因となる。このように、目的の信号送信に同期していないインタロゲータ（質問装置）に対する応答による非同期混信妨害は、特にフルーツ（FRUIT：False Replies Unsynchronized to Interrogator Transmission または False Replies Unsynchronized In Time）と呼ばれる。SSR などインタロゲータへの応答信号には、前述のモードS 以外の応答モードとそれに応じた信号波形が定義されている^(1,4)。これらの各モードの応答信号も、短時間のパルス列である。モードS 拡張スキットに対するフルーツには、モードA/C 応答信号やIFF モード1/2 応答信号に代表される従来型の応答信号と、モードS 応答信号によるものが主要要因であると考えられる。

以上より、非同期混信妨害は、スキット相互の混信の他にも、図2に示すフルーツなど他のシステムの信号による混信が考えられる。本稿では、これら2種類の非同期混信妨害を総称して、非同期混信妨害と呼ぶ。

2.3 非同期混信妨害が解読率に与える影響

非同期混信妨害が発生すると、データ解読誤りや解読不能な状況が発生し得る。このため、モードS 拡張スキットが正しく受信解読される確率を考えるとときには、これらの混信の発生を考慮する必要がある。

モードS 拡張スキットが正しく受信解読される確率

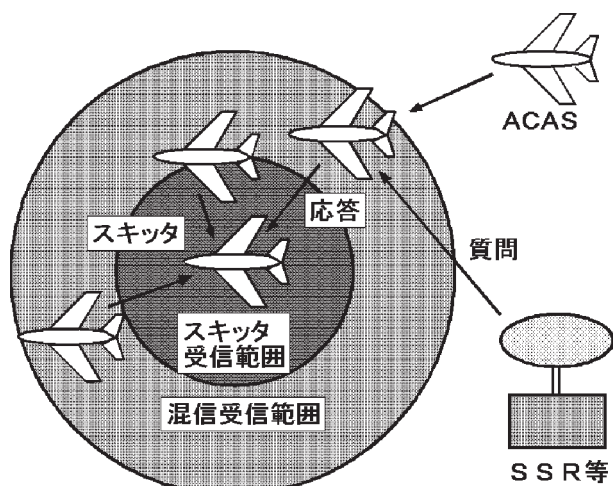


図2 スキッタへの非同期混信妨害の発生

P_r は、次の式で求めることができる⁽⁵⁾。

$$P_r = P_m P_d \quad (1)$$

ただし、各変数は次の意味を持つ。

P_m ：検出率：受信信号電力が受信機 MTL (Minimum Triggering Level) を超えて、信号が受信機に検出される確率

P_d ：解読率：データの解読誤りが発生しない確率

検出率 P_m は、送信電力、伝搬距離、受信機 MTL、使用するアンテナの利得指向性特性と送受信機の方向の分布などから算出される。

解読率 P_d は、モード S 拡張スキッタに混信する信号数が誤り検出訂正符号の性能の限界を越えない確率として算出できる。この計算において、あるモード S 拡張スキッタに混信する信号数の確率分布を示す統計モデルが使用される。統計モデルの例を本報告の 3. に示す。また、計算例を、本報告の 6. に示す。

3. 非同期混信妨害の統計モデル

3.1 ポアソン分布モデル

ポアソン分布モデルは、トランスポンダ数が十分多くそれぞれの送信時間率（デューティーレシオ）が十分低い場合に適している⁽⁶⁾。同じ継続時間を持つ k 個の信号 B が信号 A に混信する場合を考える。このとき、ポアソン分布モデルは、次の式で表される。

$$p(k, r) = r^k \exp(-r) / k! \quad (2)$$

ただし、変数は次の意味を持つ。

r ：平均混信数：ある信号 A に混信妨害している信号 B の数の平均

k ：混信数：ある信号 A に混信妨害している信号 B

の数。ただし、 k は 0 または正の整数。

ここで、 r は次のように求められる。

$$r = Tf = (T_A + T_B)f \quad (3)$$

ただし、各変数は次の意味を持つ。

f ：平均信号発生レート：混信妨害となる信号 B の単位時間当たり平均発生数

T ：混信期間：ある信号 A に別の信号 B が混信できる時間範囲

T_A ：混信を受ける信号 A の継続時間

T_B ：混信する信号 B の継続時間

ここで、信号 B が混信期間 T に発生する場合、ある信号 A に混信する。

ポアソン分布モデルは、モード S 拡張スキッタの検出確率を予測計算する際に使用された例がある^(3,7)。また、ポアソン分布モデルは、SSR への応答信号に対するフルーツの影響に関する理論的分析にも用いられており⁽⁸⁾、簡便であるためランダムに近い混信の分析に広く使用されている。

3.2 二項分布モデル

トランスポンダ数が少ない場合やトランスポンダの送信時間率が高い場合は、理論的に二項分布モデルが適している⁽⁶⁾。前述のポアソン分布の場合と同様に、同じ継続時間を持つ k 個の信号 B が信号 A に混信する場合を考える。混信する信号の発生が相互に独立な過程であるとすると、二項分布モデルは次の式で表される。

$$b(n, k, s) = {}_n C_k s^k (1-s)^{n-k} \quad (4)$$

ただし、 k はポアソン分布と同じ混信数であり、その他の各変数は次の意味を持つ。

n ：最大混信数：ある時間内においてある信号と衝突する信号数の最大値

s ：混信確率：混信し得る n 個の信号の中からある一つの信号に着目したとき、この信号が混信する確率

ここで、 n 個の信号についてこれらの混信確率 s をすべて同じ値としたため、前述の平均混信数 r を用いて s を求めることができる。

$$s = r / n \quad (5)$$

ただし、 n は混信し得る最大の信号数であって、トランスポンダ数に等しいとは限らない。ある 1 台の ATC トランスポンダが応答後に次の応答が可能になるまでの時間（デッドタイム）は、通常 $50\mu s$ 前後に設定されている例が多く⁽¹⁾、この値はモード S 拡張スキッタ信号の継続時間の $120\mu s$ より短い。このため、混信を発生させるトランスポンダが 1 台であっても、モード S 拡張スキッタには

複数の応答信号が混信し得ることになる。

二項分布モデルは、 r を一定に保ちながら n を大きくし同時に s を小さくすると、ポアソン分布になることが知られている⁽⁶⁾。

3.3 統計モデルの妥当性

3.2に示した混信数の確率分布を示す統計モデルでは、各信号の送信がそれぞれ独立した確率過程であるとみなしている⁽⁶⁾。しかし、各トランスポンダの応答は SSR/IFF や ACAS の質問信号に同期しており、トランスポンダの配置は航空路上に整列している場合が多い。さらに、SSR/IFF の質問信号に応答するトランスポンダは、数秒周期で回転する細いビームパターン内のものが主である。このため、短時間内の現象では非同期混信妨害発生過程の独立性の低下が懸念され、上記の統計モデルの妥当性について意見が分かれるところである。

さらに、統計モデルが有効な時間範囲の問題がある。例えば、ACAS が特定の航空機と遭遇する時間は数分間であり、これに長時間測定の結果得られた統計モデルを適用できるかが問題になる。長時間にわたる測定には多数の航空機が関与するが、数分程度の短時間の測定では混信に関与する航空機数は少なく、適用する統計モデルの形が変化する可能性があるためである。

さらに、空域に存在する航空機数は時間とともに大きく変動し、混信を発生させる条件は一定ではない。

このため、性能予測に使用する統計モデルについて、実際に観測される混信数の分布に適合していることを確認する必要がある。

4. 非同期混信妨害の測定実験

非同期混信妨害について、混信数の度数分布や電力分布の性質を知るため受信測定実験を行った。実験装置の構成を図3に示す。測定には当研究所の ACAS 実験装置を使用した。ACAS 実験装置は、1090MHz 受信機とデコーダを持ち、この周波数帯の信号を受信解読できる。半波長ダイポールアンテナと同じ利得を持つ無指向性アンテナを当研究所の建物屋上に設置し、全方位から到来する電波を測定対象にした。

実験では、毎秒1回設定する約250 μ s の受信期間内について、受信機 LOG ビデオ信号波形およびデコーダに使用されているパルスプロセッサの出力を記録した。信号波形のサンプルレートおよびパルスプロセッサの出力更新レートは 8 MHz である。パルスプロセッサの出力

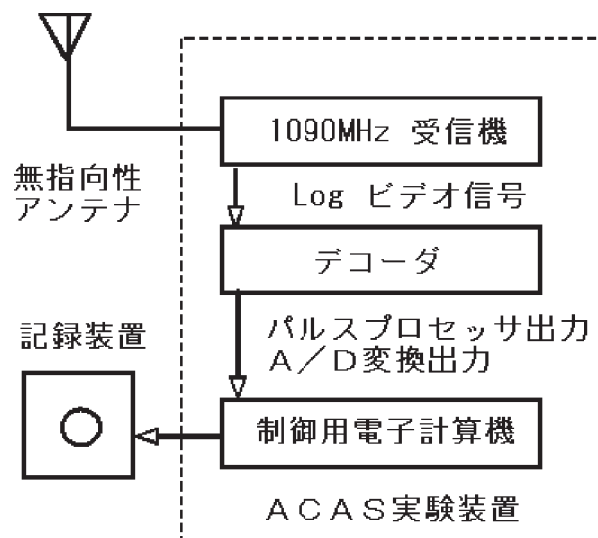


図3 実験装置の構成

には、受信機の MTL(−77dBm) を超える電力を持つパルスや各種応答信号の検出フラグが含まれている。これらの記録結果を用いて、混信する信号を計数した。パルスプロセッサの信号検出処理方式は、TCAS-II MOPS に記載されているものと同じである⁽⁹⁾。

受信期間の範囲約250 μ s は、データ処理において考慮する信号の継続時間から算出した。モード S 拡張スキッタの信号継続時間である120 μ s の範囲を記録された受信期間内に設定し、これに重畳する部分を持つ受信信号を計数すれば、これがモード S 拡張スキッタに混信する信号の数つまり混信数になる。受信期間の長さは、モード S 拡張スキッタとこれに混信する信号の継続時間の和より長くする必要がある。将来の実験においてはモード S ロング応答信号も検出できるようにするため、両信号の継続時間の和である240 μ s より長い時間として約250 μ s を受信期間の長さに設定している。また、毎秒の受信期間設定回数は、使用した実験装置がこの受信期間のデータ記録に対応可能な最高速度に近い値としたため、毎秒1回になった。

今回のデータ処理の対象にした信号は、従来型の応答信号とモード S 応答信号の2種類である。

本実験装置で観測される従来型の応答信号(以下、モード A/C 非同期混信信号という)は、モード1/2またはモード A/C 応答信号による非同期混信妨害であり、日本国内で多く使用されている従来型の SSR/IFF や ACAS の質問信号に対する応答信号または従来型トランスポンダのスキッタとして発生する。従来型トランスポンダの中にも受信機雑音などによりトリガされて従来型応答信号

をスキッタとして送信するものがあるが、その送信レートは30Hz 以下になるよう製造されている⁽¹⁾。

本実験装置で観測されるモード S 応答信号（以下、モード S 非同期混信信号という）は、ACAS がモード S トランスポンダに質問信号を送信したときの応答信号や従来型のモード S スキッタとして発生したものである。

この他の種類の信号も存在すると予想されるが、実験中に記録された受信信号波形からは上記以外の信号と考えられる波形を見いだせなかった。このため、このような信号は、存在しないか無視できるほど少ない送信量であると、今回の混信の分析では無視している。

記録されたパルスプロセッサ出力データを用いて、受信された信号から非同期混信妨害になり得る信号を抽出した。モード S 拡張スキッタの信号継続時間である120 μ s（式(3)の T_A ）を記録された250 μ sの受信期間内に設定し、これに混信する非同期混信妨害を計数した。この仮想的なモード S 拡張スキッタの開始時刻は、記録開始から125 μ s 後とした。計数対象とする混信信号の継続時間（式(3)の T_B ）を120 μ s に加えた受信範囲内にその最初のパルスが検出される場合を、混信発生とみなした。この追加受信範囲は、仮想的なモード S 拡張スキッタの直前に設定した。このため、混信信号の検出対象となる時間（式(3)の T ）は、信号継続時間に応じて表 2 の値を用いた。モード S ロング応答信号は、日本国内では ACAS が RA を発生したときにのみ送信され、非常に稀であるため今回のデータ処理では無視した。このほか、仮想的なモード S 拡張スキッタがあるとした120 μ s の期間内に受信されたパルス数を計数した。以上のようにして計数された非同期混信妨害数などは、モード S 拡張スキッタに重畳する実際の数になる。

また、記録された受信波形を用いて、非同期混信妨害の受信電力分布を求めた。受信電力は、パルス毎および各種信号毎に計数した。信号毎の計数には、他のパルスと混信していないブラケットまたはプリアンプパルスの受信電力を用いた。ブラケットパルスとは、モード A/C 応答信号などの従来型応答信号を構成するパルス列の最初と最後のパルスである。

表 2 モード S 拡張スキッタとの混信期間 T の値

混信する信号	T_B	T
モード A/C 応答信号	20.75 μ s	140.75 μ s
モード S ショート応答信号	64 μ s	184 μ s
モード S ロング応答信号	120 μ s	240 μ s

5. 測定実験の結果

5.1 混信数の分布

想定した受信期間に検出された非同期混信妨害の数の分布と確率分布モデルの値を表 3 と図 4 に示す。

これらの図表では、非同期混信妨害となる信号について単位時間当たりの平均検出数を平均信号発生レート f

表 3 モード A/C 非同期混信妨害の混信個数の分布

混信数	相対度数	ポアソン分布	二項分布
0	0.6024	0.6006	0.6001
1	0.3018	0.3062	0.3069
2	0.0808	0.0781	0.0780
3 以上	0.0140	0.0151	0.0150

備考：1996年 3 月 5 日20000回測定 $r=0.5099$ $n=170$

混信数	相対度数	ポアソン分布	二項分布
0	0.591	0.588	0.588
1	0.309	0.312	0.313
2	0.081	0.083	0.083
3 以上	0.019	0.017	0.016

備考：1996年 3 月 6 日7000回測定 $r=0.5309$ $n=170$

混信数	相対度数	ポアソン分布	二項分布
0	0.608	0.608	0.608
1	0.301	0.302	0.303
2	0.078	0.075	0.075
3 以上	0.013	0.015	0.014

備考：1996年 3 月 7 日5000回測定 $r=0.4970$ $n=170$

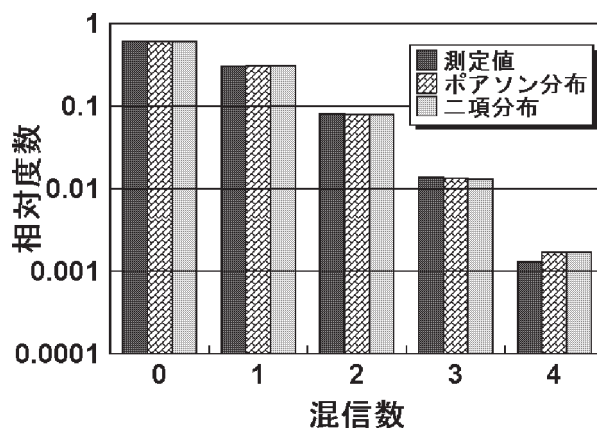


図 4 混信数の分布形状の比較
(1996年 3 月 5 日20, 000回測定の例)

とみなし、(3)式を用いて平均混信数 r を求め、確率分布モデルの値を算出している。

一般に、多数の信号が混信した状態で検出される場合は、パルスプロセッサの性能の限界により検出される信号数が実際の信号発生数より少なくなる。しかし、使用したパルスプロセッサは、モード A/C 応答信号が2個重畳しても約97%の確率で検出できる。また、モード S 応答信号のプリアンプルにモード A/C 応答信号が混信しても、95%以上の確率でプリアンプルを検出できる。

今回の実験の場合、設定した受信期間はモード A/C 応答信号の数倍の長さがあるため、この期間内に発生した少数の信号が相互に混信する確率は十分低いと予想される。また、受信信号が相互に混信したとしてもパルスプロセッサにより十分高い確率で検出される。このため、上記のように、ACAS 実験装置が受信検出した単位時間当たりの信号数から平均検出数を求め、これを平均信号発生レート f の値として近似している。

表3に示すように、1996年3月5日9時35分から15時10分の間の20,000秒に観測された平均信号発生レートは、モード A/C 非同期混信信号が毎秒約3,600回、モード S 非同期混信信号が毎秒約20回であった。測定時間に差があるが、3月6日および7日においてもほぼ同じ平均信号発生レートであった。

表3より、混信数の実測値はポアソン分布モデルや二項分布モデル ($n=170$) と非常に近い値を持つことがわかる。測定日により平均混信数が変化するが、どの日も同様の結果を得た。

ADS-B 応用機器や ACAS を搭載した航空機がある他の航空機に遭遇する時間は数分以内であり、上記の測定時間よりはるかに短い時間である。しかし、表4のように、集計時間を100秒間に減少しても混信数の実測値はポアソン分布や二項分布に近い分布形状であった。

モード S 非同期混信妨害についても、表5のように、同様の結果を得た。

これらの図表に示すように、これら二種類の分布は同様に良好な一致を見ることができる。ただし、二項分布を測定データにフィッティングするためには、 r と n の値を調整する必要がある。平均混信数 r は測定結果から得られるが、最大混信数 n は分布形状の適合度を見ながら調整する必要がある。表の値を求めるために使用した $n=170$ は、使用した計算ソフトウェアで用いることができる最大の値であり、このときに計算可能な数値範囲内で最良の適合度が得られた。

測定値と各統計モデルの分布形状の適合度について

表4 モード A/C 非同期混信妨害の混信個数の分布

混信数	相対度数	ポアソン分布	二項分布
0	0.47	0.48	0.48
1	0.39	0.35	0.35
2	0.09	0.13	0.13
3以上	0.05	0.04	0.04

備考：1996年3月5日100回測定 $r=0.74$ $n=170$

表5 モード S 非同期混信妨害の混信個数の分布

混信数	相対度数	ポアソン分布	二項分布
0	0.9968	0.9964	0.9964
1	0.0029	0.0036	0.0036
2以上	0.0003	0.0000	0.0000

備考：1996年3月5日20000回測定 $r=0.00364$ $n=170$

は、次節で定量的に検討する。

5.2 混信数の分布モデルの検証

測定された混信数の分布に統計モデルを当てはめることにより、その適合度を検討する。測定された分布データが無制約な多項分布から得られたか、ポアソン分布や二項分布などの何らかのパラメータに応じた制約を持つ分布から得られたかを検証する必要がある。そこで、測定された分布データをそのまま無制約な多項分布とみなしたものを比較対象とし、平均混信数 r でフィッティングしたポアソン分布や二項分布とともに、測定された混信数の分布への適合度の比較を試みた。

確率分布モデルの適合度を比較する手法として、赤池情報量基準(AIC：Akaike Information Criterion)が知られている。AICの算出方法や応用上の注意事項は、文献⁽¹⁰⁾に解説されている。同じデータを用いて比較したAICの値が小さいほど分布の適合度が高く、少ないパラメータで分布形状を正確に表現できていることを示している。

測定された度数分布について、ポアソン分布、多項分布、二項分布に対するAICをそれぞれAIC0、AIC1、AIC2とする。AICの計算結果を表6に示す。

ポアソン分布と無制約な多項分布を比較すると、AICの差であるAIC0-AIC1の値は負でありポアソン分布のAICの方が小さい。一般に、AICの差に1以上の差があれば適合度に有意な差があるとされる。このため、ポアソン分布の方が測定された度数分布を少ないパラメータでより正確に近似することがわかる。このため、測定さ

表6 AICの比較

日時	測定回数	AIC0	AIC0 -AIC1	AIC0 -AIC2
3月5日	20000	37538.1	-0.91	-0.18
3月5日	100	230.7	-2.03	-0.05
3月6日	7000	13463.1	-3.35	-0.59
3月7日	5000	9234.9	-5.95	-0.15

備考：AIC0：ポアソン分布，AIC1：多項分布，
AIC2：二項分布（n=170）

れた度数分布は、無制約な分布ではなく、ポアソン分布のように何らかのパラメータに制約された分布形状を持つことがわかる。

二項分布の適合度は、nの値に応じて変化する。そこで、AIC2を最小にするようにnの値を求めることを試みた。しかし、二項分布の適合度を向上させるためにはどのデータについてもrを一定にしたままnの値を計算可能な最大値である170まで増加させる必要があった。これは、3.2に記載したように、二項分布をポアソン分布に近づけていることに他ならない。また、ポアソン分布と二項分布（n=170）のAICの差であるAIC0-AIC2は、1よりも小さな値であり両者には有意な差が見られない。

二項分布は、各トランスポンダの応答過程をもとに、より正確なモデルを構成できる可能性がある。しかし、確率を算出するために必要なパラメータがポアソン分布より多く、特に混信数の最大値nを選択する必要があるなど、分布形状のフィッティングに比較的手間がかかる。このとき、nが実際のトランスポンダ数に等しいとは限らないなど、nの値を理論的に求めることには困難が伴う。また、一般に空域内の質問信号発生量の分布が不均一であるため、空域内の各トランスポンダの送信信号が原因である混信の発生が均一であるとは限らない。

表3や5.4に示すように、二項分布とポアソン分布のモデルの違いと比較して平均混信数の時間変動による分布形状の変化が大きい。表3から表5に示すように、分布の値は小数点以下2から3桁の精度を持っているため、簡便に計算できるポアソン分布によって実用的に十分な計算精度が得られる。

以上の実験結果より、次のことがわかった。

- モードS拡張スキッタへの混信数の分布形状は、無制約な多項分布ではなく、何らかの制約を受けている。
- 混信数の分布形状は、平均混信数rを用いるポアソン分布により少ないパラメータで効果的に近似され

る。

- 混信数の分布形状は、二項分布よりポアソン分布の方が簡便に算出可能である。また、二項分布の適合度を高くするためには最大混信数を示すパラメータnを大きくする必要がある、結果的にポアソン分布に近くなる。

これにより、これまで行われてきたポアソン分布を用いる性能予測⁹⁾について、実験による根拠を与えることができた。少なくとも、実験した東京空域においては実用的に十分な近似である。

5.3 混信の電力分布

モードS拡張スキッタのデータブロックは、パルス位置変調されている。このため、受信信号のS/Nが十分大きい場合は、混信する信号の受信電力がモードS拡張スキッタの受信電力の6dB下を越える場合に混信によるビット誤りなどの影響が現れる。このように混信の影響の有無はその電力に依存するため、モードS拡張スキッタに対する非同期混信妨害の影響を考えるためには、非同期混信妨害となる信号の電力分布が必要になる。この電力分布がわかれば、モードS拡張スキッタの受信電力に応じて平均混信数を求めることができ、前述のポアソン分布を用いて混信数の分布を求めることができる。

一般に、非同期混信妨害の電力分布は、受信位置に対するトランスポンダ搭載航空機の距離分布、考えている空域内での質問信号発生量分布、トランスポンダの送信電力と受信点方向へのアンテナ指向性も考慮した実効放射電力の分布など、多くの要因が関与していると考えられる。

非同期混信妨害の電力分布の測定値を図5に示す。この図では20,000秒間に20,000回測定した結果を集計した。図5において、受信電力が約-65dBm以上の場合に混信信号の検出数が受信電力に反比例している。これより低電力では、グラフの傾斜に段差が見られるなど、別の傾向を示している。低電力の領域では測定に使用した受信機の雑音やMTLなどの影響も考えられるため、詳細な検討のためには低雑音高感度受信機を用いてさらに低電力の非同期混信妨害を測定する必要がある。

一方、100秒毎の短時間集計では、受信電力分布に一定の形状が見られなかった。短時間集計では、近傍の航空機の有無が比較的大電力の受信信号の数に大きく影響するためである。近距離の航空機が存在する場合には、図6のように大電力の信号が比較的多く受信される場合もある。

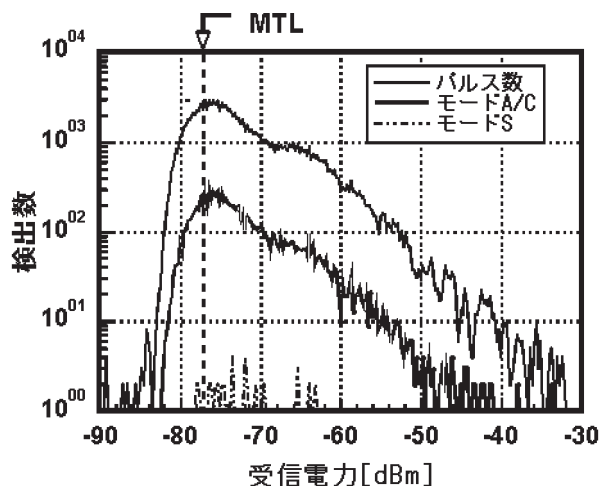


図5 フルーツの電力分布 (20,000秒集計)

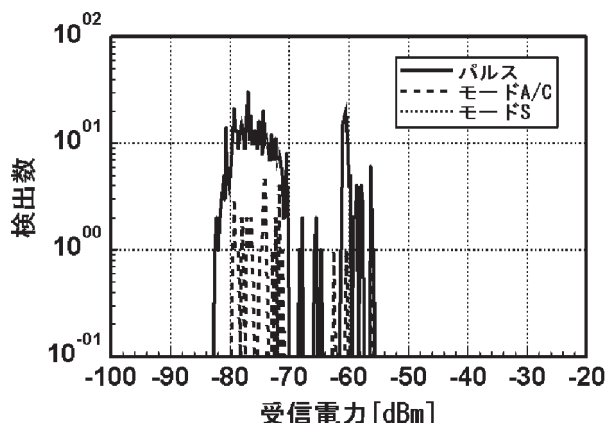


図6 フルーツの電力分布 (100秒間集計)

5.4 平均混信数の時間変動

前述のように、混信数はポアソン分布により良好に近似されることがわかった。しかし、ポアソン分布の形状を決定するパラメータである平均混信数 r の測定値は、時間経過に伴って激しく変動した。

平均混信数の時間変化について例を図7に示す。図では、ACASが他の航空機と遭遇する時間を考慮して100秒毎に平均混信数を求めてプロットした。変動の理由は、受信位置周辺を飛行する航空機数の変化により、非同期混信妨害となる信号の送信源になるATCトランスポンダや、これらに対する質問信号発生源の一つであるACASの数が増えるためである。また、一部のIFFは、必要な場合にのみ質問信号を送信するため、質問信号の発生量が大きく変化する場合もある。

100秒毎に測定された平均混信数の分布を、図8に示す。測定された平均混信数は、その平均値の約2倍までの範囲で分布している。混信数の分布形状がポアソン分

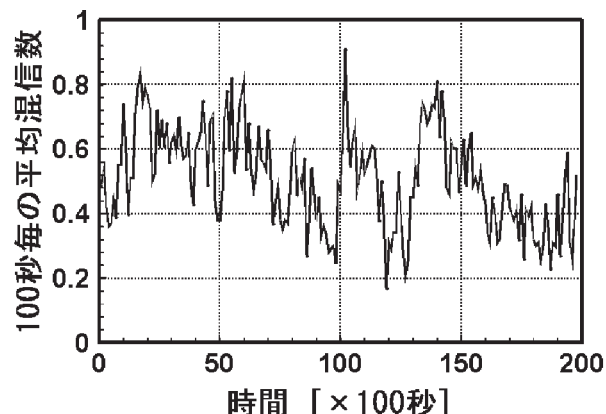


図7 平均混信数の時間変動

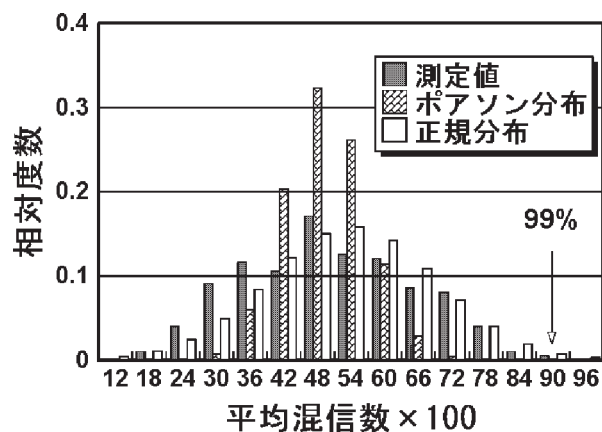


図8 平均混信数の分布

布で近似されても、その分布形状パラメータである平均混信数 r はポアソン分布で近似できるとは限らない。

6. モードS拡張スキッタ解読率の予測計算

実験結果より、ポアソン分布モデルを用いて非同期混信妨害の混信数の分布を表現できることが確認された。混信数がポアソン分布する性質の応用例として、モードS拡張スキッタの解読率 P_d を算出した例を示す。

6.1 解読率の予測計算の方法

ポアソン分布を用いて、非同期混信妨害がスキッタに混信するタイミングで k 個受信される確率を平均混信数 r から算出できる。モードS拡張スキッタのデータブロックは誤り検出訂正符号化されているが、誤り検出訂正できる混信数には限界がある。混信数 k の値が許容範囲になる確率として、非同期混信妨害のもとでモードS拡張スキッタの解読率 P_d の値を求めることができる。

異なるモードの応答信号によるフルーツは異なるモー

ドの質問信号によって発生するため、独立性が高いと考えられる。また、異なるモードの応答信号波形を持つスキッタを送信する場合も、各トランスポンダに発生する雑音などがその発生に関与するため、独立性が高い。このため、解読率 P_d は、非同期混信妨害する信号毎に分離して、次のように算出できる。

$$P_d = P_{da} P_{ds} \quad (6)$$

ただし、各変数は次の意味を持つ。

P_{da} ：モード A/C 非同期混信妨害に対するモード S 拡張スキッタの検出確率

P_{ds} ：モード S 非同期混信妨害に対するモード S 拡張スキッタの検出確率

ここで、モード S 非同期混信妨害による P_{ds} の値は、次のように、2 種類の継続時間を持つ信号に分けて考える必要がある。

$$P_{ds} = P_{dss} P_{dsl} \quad (7)$$

ただし、各変数は次の意味を持つ。

P_{dss} ：モード S ショート応答信号や従来型のスキッタによる劣化率

P_{dsl} ：モード S ロング応答信号とモード S 拡張スキッタによる劣化率

これらの確率を算出するため、許容される混信数を求める。モード S 応答信号は $24\mu s$ の範囲内のバースト誤りを検出訂正可能である⁽¹¹⁾。同形式の拡張スキッタも信号の長さが $20.75\mu s$ のモード A/C 非同期混信信号の混信数 k が 1 以下なら信号解読に影響しない。また、混信数 k が 2 以上の場合でも、 $24\mu s$ 以内の範囲に限定された混信の場合は解読可能である場合がある。しかし、混信数 k が 2 以上の場合は信号解読が不可能とみなして控えめな性能を算出することにした。このとき、モード A/C 非同期混信妨害を受けた場合のモード S 拡張スキッタの検出確率 P_{da} は、次の式で算出できる。

$$P_{da}(r_a) = p(0, r_a) + p(1, r_a) \quad (8)$$

ここで、各記号は次の意味を持つ。

$p(k, r)$ ：(2)式に示したポアソン分布

r_a ：モード A/C 非同期混信妨害の平均混信数

モード S 非同期混信信号の信号長は $64\mu s$ または $120\mu s$ であり、信号内のほとんどの期間がパルスであるため、1 個でも重なればスキッタは検出不能とみなして控えめな性能を計算した。このため、モード S 非同期混信を受けた場合のモード S 拡張スキッタの検出確率 P_{ds} は、次の式を用いて算出できる。

$$P_{ds}(r_{ss}, r_{sl}) = P_{dss}(r_{ss}) P_{dsl}(r_{sl}) = p(0, r_{ss}) p(0, r_{sl}) \quad (9)$$

ここで、各記号は次の意味を持つ。

r_{ss} ：モード S ショート応答信号とモード S スキッタによる平均混信数

r_{sl} ：モード S ロング応答信号とモード S 拡張スキッタによる平均混信数

各モードの信号による平均混信数 r は、式(3)により求められ、各モードの平均信号発生レート f と対応する混信期間 T の積である。モード S 拡張スキッタの混信期間 T は、モード S 拡張スキッタの継続時間と各モードの信号継続時間の和である。この混信期間は、前述の実験で混信を検出する受信期間としても使用されており、表 2 の値と同じである。

計算に使用する平均信号発生レート f は、モード S 拡張スキッタの受信電力に応じて変化する。受信電力がスキッタに対して 6dB 下より低い非同期混信妨害は、符号解読に影響しないため無視でき、混信数に含める必要はない。

6.2 解読率劣化の予測計算結果

各モードの非同期混信妨害の平均信号発生レートとモード S スキッタの解読率の関係を図 9 から図 11 に示す。拡張スキッタ相互の混信など、図 11 に示したモード S ロング応答信号と同型式の信号の混信による解読率劣化については、Orlando 他による詳細な分析が発表されている⁽³⁾。

これらの図より、モード S 拡張スキッタの解読率は、モード S スキッタと比較して、非同期混信妨害の影響による劣化が大きいことがわかる。例えば、図 9 に示すモード A/C 非同期混信信号の影響を見ると、信号発生レートが 3.6kHz ではモード S スキッタの解読率が 0.95 であるのに対して、モード S 拡張スキッタの場合は 0.91 まで劣化している。これは、モード S スキッタと比較して、混

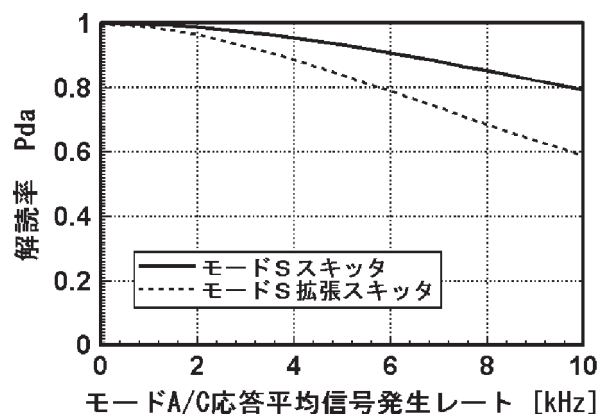


図 9 モード A/C 非同期混信妨害による解読率の劣化

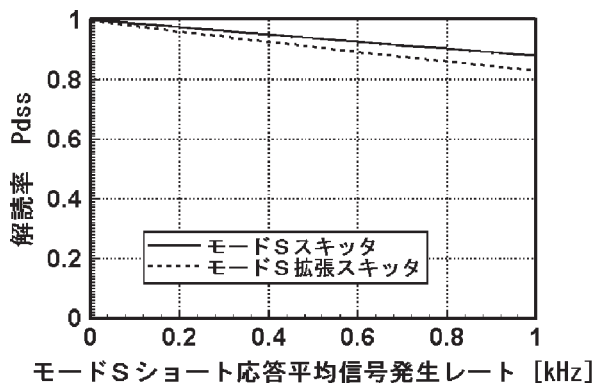


図10 モードS非同期混信妨害による解読率の劣化
(モードSショート応答信号などによる場合)

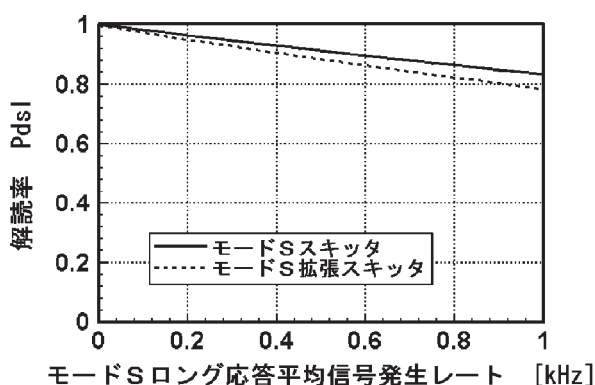


図11 モードS非同期混信妨害による解読率の劣化
(モードSロング応答信号などによる場合)

信期間 T が $56\mu\text{s}$ 増加し約2倍になるためである。

これらの図より、ある平均信号発生レートにおけるスキッタ解読率を求めることができる。例として、東京空域で測定された -77dBm を越える平均信号発生レートは、モードA/C非同期混信信号が 3.6kHz 、モードS非同期混信信号が 20Hz である。この場合は、受信電力が -71dBm のモードS拡張スキッタについて解読率を算出していることになる。この値は、ACASのMTL公称値である -74dBm よりやや高い。モードS非同期混信妨害による解読率劣化は P_{ds} が1に近いため無視でき、主にモードA/C非同期混信妨害により解読率が 0.91 に劣化することがわかる。

測定された平均混信数の時間変化を用いて、東京空域における解読率 P_d の値の時間変化を算出した結果を、図12に示す。この平均混信数がACASと同等の受信機を用いて測定されたため、ACAS受信機を東京空域にてスキッタの受信に用いた場合の解読率になる。計算に使用した平均混信数の値は、図7と同じ期間に測定されたものである。図の中で解読率 P_d の最低値は 0.76 であるが、

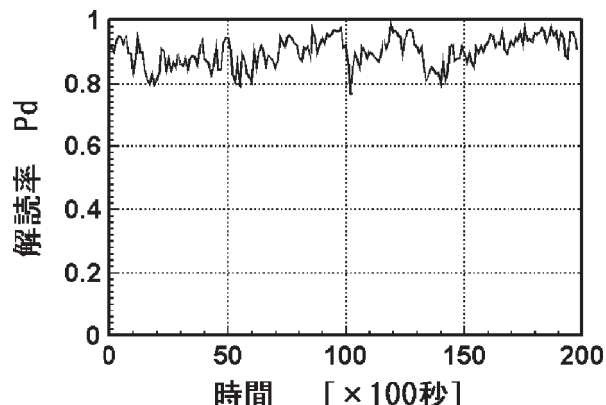


図12 解読率 P_d の時間変化

0.8 以下の値になる例は極めて希であることがわかる。

この計算において、モードSショート応答信号またはモードSスキッタによる劣化は、最も大きい場合でも $P_{dss}=0.97$ であり、モードA/C非同期混信妨害による劣化が主であることがわかる。この計算では、モードSロング応答信号やモードS拡張スキッタによる非同期混信妨害の発生を無視しているため $P_{dsI}=1$ としているが、図11に示したように $P_{dsI}=0.9$ になるのはその平均信号発生レートが約 400Hz になる場合である。例としてモードS拡張スキッタまたはモードSロング応答信号の送信レートを航空機1機あたり 5Hz とすると、干渉する電力レベルのスキッタを送信する航空機が受信機周辺に80機ある場合に相当する。

また、受信機感度を高くして覆域を拡張する場合、低電力の非同期混信妨害の影響を受けるようになるため、平均混信数が増加する。例としてモードA/C非同期混信信号の平均信号発生レートを上記の2倍とし 7.2kHz にすると、解読率は 0.74 まで劣化することが図9からわかる。一方、図10を見ると現在のモードS非同期混信信号の平均信号発生レートが 20Hz と非常に低いため、その値のみが現状の10倍に増加しても解読率は 0.88 までの劣化にとどまっている。

6.3 今後の課題

6.3.1 将来の信号環境の予測

1090MHz チャネルの平均信号発生レートの値は 1030MHz チャネルの質問信号発生量の影響を受けるため、考えている空域におけるSSR/IFF、ACAS、ATCトランスポンダなどの運用状況によって変化する。

特に、モードS非同期混信信号の平均信号発生レートは、モードS拡張スキッタの導入以外にも、SSRモード

S の運用開始や ACAS の搭載率向上によって大幅に変化すると考えられる。一方、SSR モード S の導入は、モード A/C 非同期混信信号の発生量を減少させる効果があると予想され、総合的な信号環境の変化を考慮して解読率の劣化を算出する必要がある。

将来の平均信号発生レートなど信号環境の変化の予測は、今後の研究課題である。特に、ACAS や航空機間隔維持支援装置 ASAS (Airborne Separation Assistance System) など航空機搭載機器については、飛行中の航空機において観測される信号環境の性質が重要である。

6.3.2 応用システムの性能予測

モード S 拡張スキットが正しく受信解読される確率 P_r は、その応用システムの性能予測に使用される。例として、能動的に質問信号を送信する従来の監視方式と質問信号を送信する必要がないモード S 拡張スキットを用いる受動監視を組み合わせた複合監視方式が ACAS のために提案されている。また、モード S 拡張スキットを ADS-B に応用し、将来の航空機搭載監視装置として期待されている ASAS の実現も期待されている。

これらの監視用データリンクへの応用では、受信される位置データなどに対してレーダと同様にトラッキング処理が行われるため、位置や速度のデータを受信できない場合はその予測値を使用できる。このため、若干のデータ欠落は許容される。これらのシステムにモード S 拡張スキットを応用する場合の性能評価では、スキットを用いるデータリンクのデータ欠落がこの許容範囲内であるかどうかを検証する必要がある。

このように、実際の応用においてモード S 拡張スキットが実現できるシステム性能を予測計算することも今後の課題である。

6.3.3 混信する信号の電力分布

今回の実験においては、受信機感度の限界などにより、低電力の信号に関して十分な電力分布測定を実施できていない。将来の ADS-B では覆域拡張のために高感度受信機が使用されることも予想され、その性能予測には低電力の非同期干渉妨害に関して受信電力と発生量の関係を知る必要がある。

7. まとめ

将来の ADS-B や ACAS 複合監視方式への導入が検討されているモード S 拡張スキットについて、非同期混

信妨害による解読率劣化の算出に使用される統計モデルの妥当性を実験により検証した。これまで、統計モデルとしてポアソン分布を用いる解読率の予測計算が行われていたが、その統計モデルの妥当性に関する検証が行われていなかった。

そこで、非同期混信妨害となる信号を受信測定し、混信数の分布や電力分布を求めた。実験の結果、東京空域において航空機が ACAS の覆域を通過する時間にほぼ等しい100秒の短時間集計をしても、混信妨害の相対度数はポアソン分布モデルによる予測結果と一致することがわかった。また、赤池情報量規準 AIC を用いて、ポアソン分布が実際の分布形状を近似できることを確認した。この結果は、これまで行われてきたポアソン分布を用いる性能評価に、実験的な根拠を与えるものである。

実験により検証されたポアソン分布を用いて、モード S 拡張スキットの解読率を算出した。測定結果から得られた平均信号発生レートをもとに、東京空域の環境で予測されるモード S 拡張スキットの解読率を試算した。

将来の航空機上で観測される平均信号発生レートや、これを考慮したモード S 拡張スキット応用システムの性能予測については、今後の課題である。

謝辞

本研究の実施にあたり協力を得ました関係各位に感謝申し上げます。特に、MIT Lincoln Laboratory の V. A. Orlando 博士からは、ポアソン分布モデルが使用される経緯などに関して有益な助言をいただきました。また、当研究所の長岡栄博士には、赤池情報量基準に関する有益な助言をいただきました。

参考文献

- [1] M. C. Stevens: "Secondary Surveillance Radar", Artech House, 1988
- [2] R. G. Sandholm, V. A. Orlando: "Revised ACAS Hybrid Surveillance Concept", SICASP-WG2/WP-514, Frankfurt, 1996.
- [3] V. A. Orlando, W. H. Harmann: "GPS-Squitter Capability Analysis", Project Report ATC-214, MIT Lincoln Lab., May, 1994.
- [4] ICAO: "Annex 10, Vol. IV", 1998
- [5] E. J. Koenke, S. Boczenowski: "The Effect of Whisper/Shout on Active BCAS Performance", FAA-EM-80-5, FAA, June, 1980
- [6] 国沢 清典:「確率論とその応用」, 岩波全書, 1982

年 2 月

- [7] 東洋通信機(株), 航空振興財団:「航空機衝突防止装置調査研究報告書」, 昭和56年 2 月
- [8] S. Thaler and D. L. Ashcroft: “Radar Beacon System Performance”, IRE Trans. ANE, pp65-71, June, 1957
- [9] RTCA: “Minimum Operational Performance Standards for Traffic alert and Collision Avoidance System II, TCAS-II”, RTCA DO-185
- [10] 坂元ほか「情報量統計学」共立出版, 1993年 6 月
- [11] R. Sandholm: “Draft TCAS-III MOPS, Section 2.2”, SICASP/WG2/WP 269, April 1990

(平成14年 9 月30日受付, 平成14年12月16日再受付)

独立行政法人 電子航法研究所報告編集委員会

委員長：東福寺則保

副委員長：山本 憲夫

委員：星野尾一明

矢田 士郎

板野 賢

事務局：総務課企画室

電子航法研究所報告の編集は、編集委員会が行う。

編集委員会は2名の査読委員の意見に基づいて論文の採録の可否を判定する。

本誌に掲載された論文は編集委員会で採録と決定されたものである。

本誌に掲載された論文の著作権は独立行政法人電子航法研究所（以下研究所という）に帰属する。本誌に掲載された論文を引用する場合は、出所を明示すれば研究所の許諾を必要としない。本誌に掲載された論文の全部又は一部を複製、転載、翻訳、あるいはその他に利用する場合は、個人が研究、学習、教育に使用する場合を除き、研究所の許諾を得なければならない。

ELECTRONIC NAVIGATION RESEARCH INSTITUTE PAPERS

No.102 February 2003

電子航法研究所報告 ISSN 1341-9102
(第102号)

平成15年2月25日 発行

編集兼発行人 独立行政法人 電子航法研究所

発行 独立行政法人 電子航法研究所
〒182-0012 東京都調布市深大寺東町7丁目42番地23
電話 0422-41-3168

印刷所 (株)丸井工文社
〒102-0073 東京都千代田区九段北1-12-4

Electronic Navigation Research Institute. Independent Administrative Institution
7-42-23. Jindaijihigashi-machi, Chofu, Tokyo, 182-0012, Japan