

SSR モード S の開発と監視機能の評価試験

宮崎 裕己* 三吉 襄* 古賀 禎*

Development of SSR Mode S and Experiments on Surveillance

Hiromi MIYAZAKI, Noboru MIYOSHI, Tadashi KOGA

Abstract

Secondary Surveillance Radar (SSR) is an important aircraft surveillance system, which provides aircraft's position, altitude and identification. However, because of the increase of air traffic in recent years, many problems, such as interference, insufficient accuracy, limitation of data handling, have occurred. In order to solve these problems, International Civil Aviation Organization (ICAO) has adopted the international standards of SSR mode S which has improved surveillance and air-ground datalink. Electronic Navigation Research Institute (ENRI) has developed SSR mode S experimental system and conducted experiments on surveillance. The results shows that ENRI's SSR mode S satisfies the surveillance criteria of ICAO. This paper describes development of SSR mode S and the results of the experiments.

* 航空施設部

1. まえがき

二次監視レーダ (SSR: Secondary Surveillance Radar) は、航空路レーダ情報処理システム (RDP: Radar Data Processing System) やターミナルレーダ情報処理システム (ARTS: Automated Radar Terminal System) 等の管制情報処理システムに航空機の位置、高度および識別符号を提供する重要な管制施設として空港や航空路の主要地点で運用されている。しかし、近年の航空交通量の増大に伴い、測位精度の不足、干渉によるターゲットの欠落、過剰質問によるトランスポンダの飽和、管制通信の自動化を促進するには不十分なデータ取扱量等の問題が生じてきた。

これらの問題を解決するために、国際民間航空機関 (ICAO: International Civil Aviation Organization) において、監視機能を向上するとともにデータ通信機能を付加した SSR モード S の国際標準が制定された。この SSR モード S は監視性能が優れており、信頼性の高いデータ通信機能を有していることから、前述の問題の解決が期待できる。また、SSR モード S は管制官とパイロットの作業負荷の軽減と新しい情報サービスの提供により、航空交通量の増大に対処できる新しい管制施設として実用化が望まれており、各国において研究開発が進められている。

当研究所では、我が国の SSR モード S の導入に備え SSR モード S 実験システムを開発し⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾、実験用航空機を使用した監視機能の評価試験を実施した。本報告では SSR モード S の特徴を述べ、当所で開発した SSR モード S 実験システムの概要及びモード S センサの基本特性を示す。そして、評価試験の解析結果を示し、実験システムの監視性能を ICAO 指針⁽⁴⁾との対比のもとに報告する。

2. SSR モード S の特徴

2.1 モノパルス測角方式の採用

SSR モード S は方位の測定にモノパルス測角方式⁽⁵⁾を採用している。モノパルス測角方式は、和 (Σ) パターン及び差 (Δ) パターンと呼ばれる 2 つのビームパターンを形成し、両パターンの信号強度の比 (Δ/Σ) が、航空機の方位とアンテナボアサイト方位との差 (θ) に 1 対 1 に対応することを利用して (S カーブ特性)、単一の応答パルスにより航空機の方位を測定するものである。図 1(a) (b) にビームパターン及び S カーブ特性を示す。モノパル

ス測角方式は従来のスライディングウィンドウ方式に比べて高精度な方位測定を行うことができる。また、質問数を少なくすることでフルーツ (非同期性干渉) 等の干渉の軽減やトランスポンダの飽和を解消することができる。

2.2 航空機への個別質問

SSR モード S では、航空機に固有のアドレスを付与しており、固有のアドレスを用いて個別に質問を行う。個別質問では、チャンネルを有効に利用するためにビーム内の最も遠い位置の航空機から質問を開始し、航空機からの応答が重複しないように計画的に質問を行う。図 2 に個別質問のスケジューリングを示す。このように、個別質問により、ガブール (同期性干渉) を解消できるとともに反射による偽ターゲットを除去することができる。また、応答が受信されない場合でも、航空機がビーム内に存在する間は再質問を行い、高い検出率が達成できる。

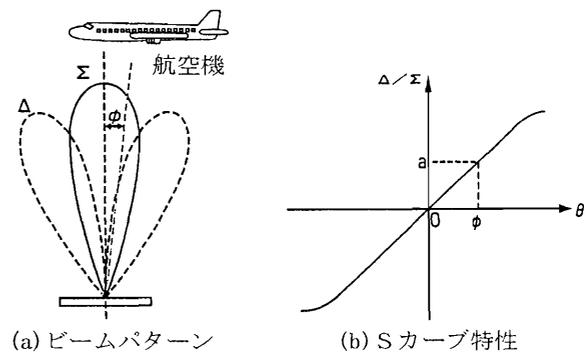


図 1 モノパルス測角

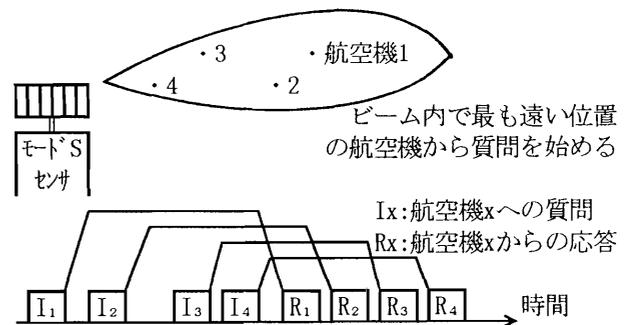
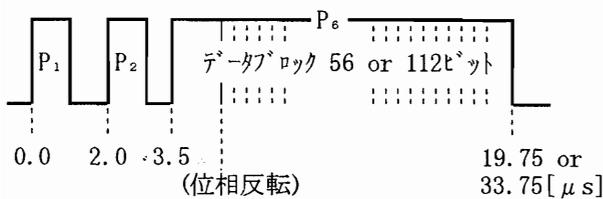


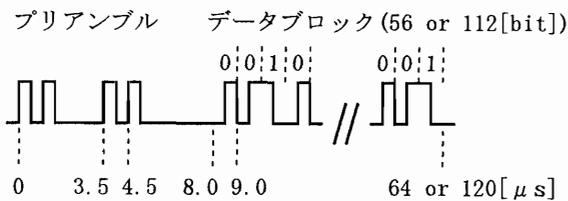
図 2 個別質問のスケジューリング

2.3 データ通信機能の付加

SSRモードSでは個別質問においてデータ通信を行うことができる。図3(a)(b)にモードSの質問及び応答のフォーマットを示す。質問では、データブロックは P_6 パルス内にあり、干渉に強いDPSK変調が採用されている。応答では、データブロックにパルス位置変調を採用している。質問及び応答ともにデータブロックは56ビット長または112ビット長である。監視のみ行う場合は56ビット長のデータブロックを、データ通信を行う場合は112ビット長のデータブロックを使用する。データ通信を行う112ビット長のデータブロックでは、監視とデータ通信を同時に行う場合は標準長メッセージ(SLM: Standard Length Message)を、データ通信のみ行う場合は拡大長メッセージ(ELM: Extended Length Message)を使用する。図4に標準長及び拡大長メッセージフォーマットを示す。SLMでは56ビット、ELMでは80ビットをユーザデータとして使用でき、SLMでは4個連結す



(a) 質問フォーマット



(b) 応答フォーマット

図3 モードS質問・応答フォーマット

標準長メッセージ(SLM)

0 5 32 88 112[bit]

フォーマット番号	アドレス高度他	ユーザデータ56ビット	アドレスパリティ
----------	---------	-------------	----------

拡大長メッセージ(ELM)

0 8 88 112[bit]

フォーマット番号他	ユーザデータ80ビット	アドレスパリティ
-----------	-------------	----------

図4 メッセージフォーマット

ることにより最大224ビットのメッセージを、ELMでは16個連結することにより最大1280ビットのメッセージを同時に送ることができる。データ転送速度はアップリンクで4 Mbps、ダウンリンクで1 Mbpsであり、無線データ通信としては高速な転送速度を実現している。また、CRC (Cyclic Redundancy Check) 誤り訂正符号によりデータ転送の信頼性を高めている。SSRモードSではデータ通信機能を利用することにより管制通信の自動化の促進が期待できる。

2.4 現用SSRとの両立性

SSRモードSでは、図5に示すように現用SSRとの両立性を持たせている。SSRモードSでは、質問および応答周波数を現用SSRと同一としており、個別質問のほかに、一括質問によりモードA/C機の監視とモードS機の初期補足を行う。モードA/C機の監視には、図6に示すような現用SSRの質問に P_4 パルスを付加したインターモード質問を利用する。モードS機の初期補足には一括質問専用のモードS質問を利用する。一方、モードS機は現用SSRの質問に対してモードA/C応答を行う。このように、SSRモードSは現用SSRとの両立性により、順次モードSへの移行を可能としている。

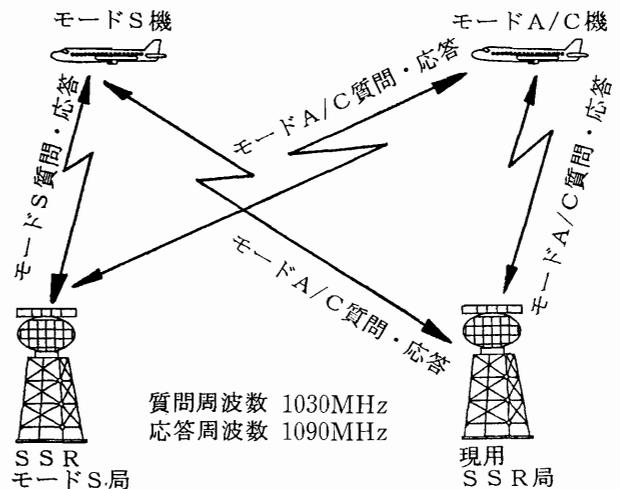


図5 現用SSRとの両立性

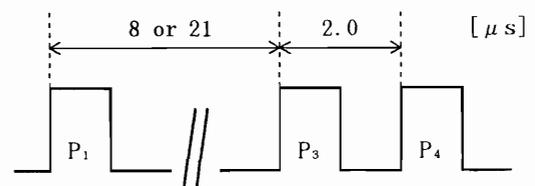


図6 インターモード質問フォーマット

3. SSR モード S 実験システムの概要⁽⁶⁾⁽⁷⁾

3.1 SSR モード S 実験システムの構成

図7に当所で開発したSSRモードS実験システムの構成を示す。実験システムは当所岩沼分室に設置したモードS地上局、三鷹の航空施設部に設置した評価試験装置、実験用航空機に搭載したモードS機上装置、及び仙台空港内に設置したフィールドモニタより構成される。モードS地上局と評価試験装置はINSネット64により監視回線とデータ通信回線の2チャンネルで接続されている。評価試験では、モードS地上局で得られた航空機情報は監視回線を通して評価試験装置に送られて表示される。また、評価試験装置で入力されたアップリンクメッセージは、データ通信回線を経由してモードS地上

局よりモードS機上装置に送信される。機上装置からのダウンリンクメッセージはモードS地上局が受信し、評価試験装置に通知される。本実験システムでは、我が国に適したモードSデータリンクの応用を検討するため、モードS機上装置やレーダ表示装置を用いてデータリンク化管制通信の模擬実験を行えるようにした。また、モードSデータ通信の性能を評価するために、データ通信実験入出力装置及びモードS機上装置ではシナリオに沿ったデータリンクメッセージの送受信制御機能を持たせた。データ収集解析装置では、収集したデータによりモードSセンサの性能解析を行うことができる。

3.2 モード S 地上局

図8にモードS地上局の外観を示す。モードS地上局

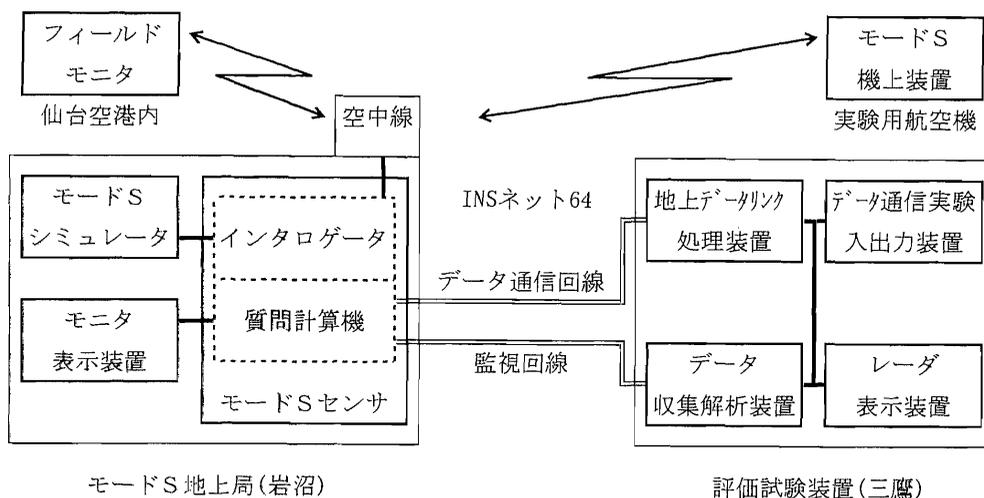


図7 SSRモードS実験システムの構成

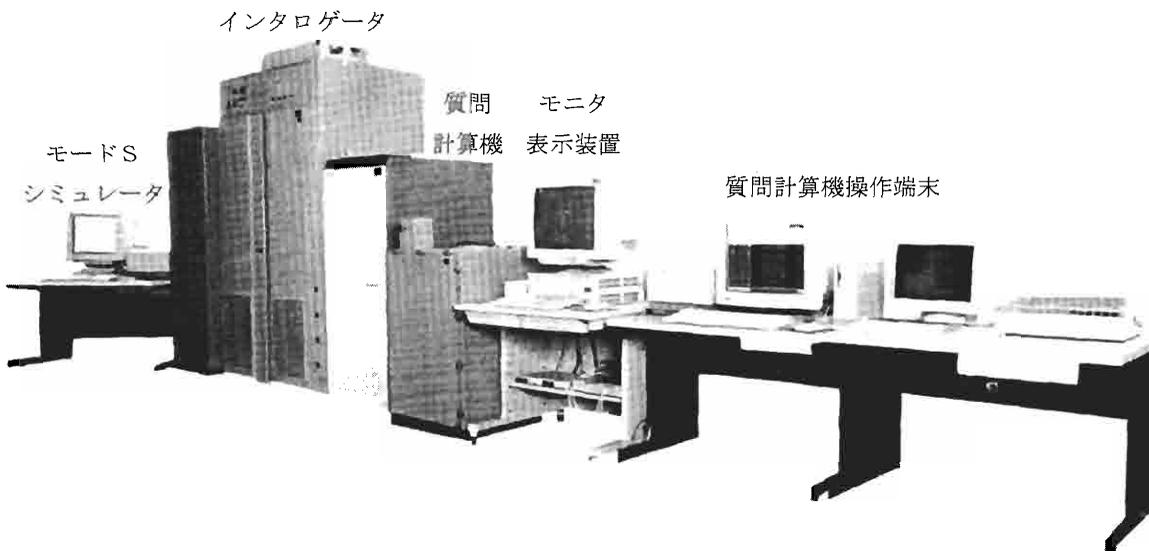


図8 モードS地上局の外観

はモード S センサ、モード S シミュレータ、モニタ表示装置から構成される。

(1) モード S センサ

モード S センサは、質問・応答の送受信や応答信号の処理を行うインタロゲータと、監視処理やデータリンク処理などを行う質問計算機に大別される。以下、インタロゲータと質問計算機の機能概要を説明する。

[インタロゲータ]

インタロゲータは、質問計算機からの制御信号によりモード S またはモード A/C 質問を送信し、また、航空機からの応答を受信処理して応答データを質問計算機に送る。図9にインタロゲータの構成を示す。インタロゲータは、送信部、受信部、モード S 応答処理部、モード A/C 応答処理部、システムタイミング発生部等により構成される。

インタロゲータは、質問計算機が故障した場合、あるいは、インタロゲータと質問計算機との間の通信が不可能な場合、自立的にモード A/C 運用を行い、適切なバックアップ動作を行うことができる。

①送信部

図10に送信部の構成を示す。送信部は、主送信機及び副送信機からなる二つの RF チャネルを持ち、主送信機ではメインビームにより質問パルスを送信し、副送信機ではオムニビームによりサイドローブ抑圧パルスを送信する。各チャネルは、信号変調器、電力増幅器、及び出力レベル制御ユニット等から構成される。

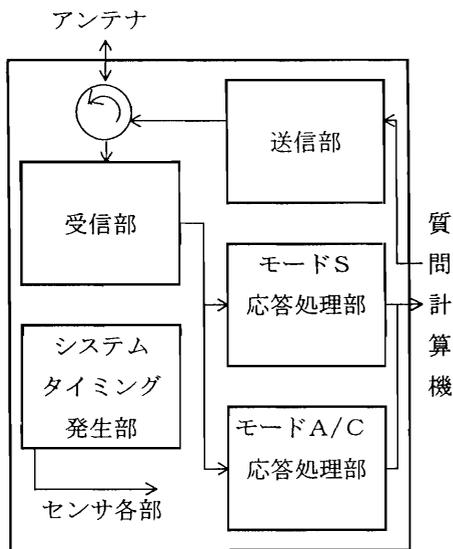


図9 インタロゲータの構成

信号変調器は、ローカル発信器より RF 信号を受け取り、質問計算機から送られてくる変調制御信号により変調して、必要な送信波形を生成する。主送信機の信号変調器ではパルス振幅変調及び DPSK 変調、副送信機の信号変調器ではパルス振幅変調を行う。

電力増幅器⁽⁶⁾は、信号変調器において変調された RF 信号を増幅する。インタロゲータでは、長いモード S 質問信号の高デューティ送信に対応しており、表1に示す間隔で112ビット長のモード S 質問を送信することができる。

出力レベル制御ユニットは、各チャネルの電力増幅器で増幅された RF 信号を質問計算機から送られてくる制御信号により最終出力に調整する。

②受信部

受信部は、モノパルス測角処理に対応するマルチチャネル受信機であり、アンテナで受信した三つのチャネル (Σ , Δ , Ω) の RF 信号をデジタルモノパルスデータと量子化ビデオ信号に変換して応答処理部に出力する。図11に受信部の構成を示す。受信部は RF 受信機、IF モノパルス受信機、ビデオ処理機より構成される。

RF 受信機は、アンテナより1090MHz の Σ , Δ , Ω の

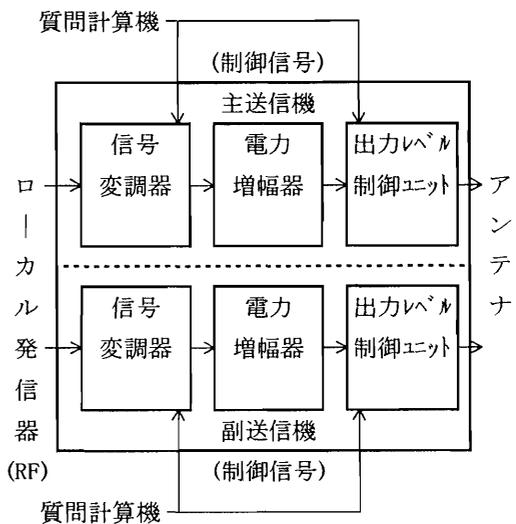


図10 送信部の構成

表1 質問の送信間隔 (112ビット長)

間隔	50 μ sec	4m sec	100m sec
回数	1回以上	24回	60回

三つのRF信号を受け取り、ローカル発信器からの信号と混合して、60MHzのIF受信信号を生成する。

IFモノパルス受信機は、RF受信機より送られてくるIF信号を検波して変調信号を再生する。また、 Σ と Δ の応答よりアンテナボアサイトからの角度に1対1に対応したモノパルス信号を生成する。当所で開発したインタロゲータでは、受信部にモノパルス測角処理に適した半角位相処理法⁹⁾を採用している。

ビデオ処理部では、変調信号から量子化ビデオ信号の生成、並びに、モノパルス信号のアナログからデジタル値への変換を行う。

③モードS 応答処理部

モードS 応答処理部では、受信部の出力を受けて、モードS 個別質問応答と一括質問応答の検出、距離と方位の推定、並びにメッセージの解読等を行う。図12にモードS 応答処理部の構成を示す。モードS 応答処理部は、モノパルス処理、アンテナ方位検出、距離検出、メッセージ解読等のユニットより構成される。

モノパルス処理は、受信部より受けたデジタルモノパルスデータを処理し、応答パルス列よりモノパルス値

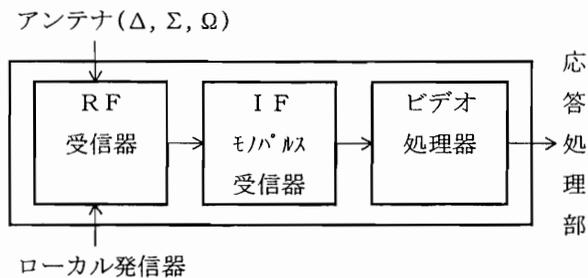


図11 受信部の構成

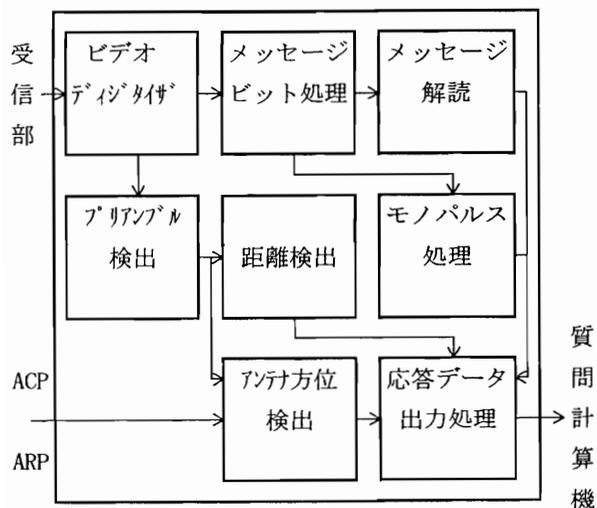


図12 モードS 応答処理部の構成

を推定する。

アンテナ方位検出・距離検出では、アンテナボアサイトの方位およびターゲットの距離を検出する。当所で開発したインタロゲータは、方位角を検出する角度信号をアンテナ1回転あたり16,384個発生させており、1回転あたり4,096個発生させる従来のSSRに比べて正確な方位測定を行えるようにした。また、システムクロックを16MHzとしており、システムクロックが約8MHzであるモノパルスSSRと比べても精度の高い距離測定が行えるようにした。

メッセージ解読では、データの信頼度のテスト、アドレスの計算、誤りの検出・訂正等を行う。

④モードA/C 応答処理部

モードA/C 応答処理部は、受信部から受けたモードA/C 応答の解読やターゲットの方位と距離の検出を行いターゲットレポートを作成する。図13にモードA/C 応答処理部の構成を示す。モードA/C 応答処理部は、応答処理部、アンテナ方位検出、距離検出、及び応答関連処理等のユニットより構成される。応答処理部は、モノパルス値の推定、コードパルスの推定、信頼度ビット列の生成等を行う。応答関連処理では、距離、方位、モードAコードとモードCコードについて相関をとり、同一航空機からの応答をまとめて、一つのターゲットレポートに編集する。

⑤システムタイミング発生部

システムタイミング発生部では、16MHzの基準クロックによるバイナリ時刻データや年時刻を内蔵し、モードS センサ各部に供給する。

[質問計算機]

図14に質問計算機の構成を示す。質問計算機は、チャ

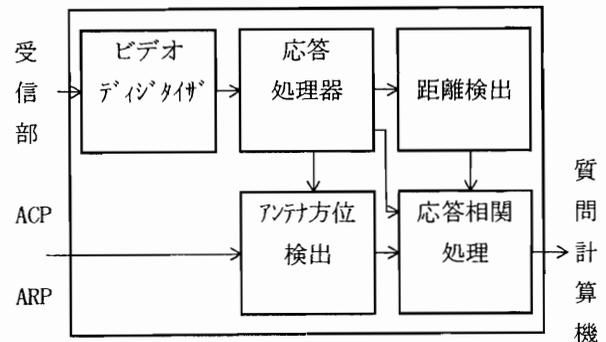


図13 モードA/C 応答処理部の構成

ネル管理、監視処理、データリンク処理、ネットワーク管理、パフォーマンスモニタ等の機能を有している。

質問計算機は、モードSセンサの最大取扱い機数やデータ通信容量等の性能に大きく関わる、システムの中核を成す装置である。米国の質問計算機では、8個のプロセッサをバス結合したマルチプロセッサ方式を採用している。これに対し、当所で開発した質問計算機では、マルチプロセッサ方式におけるプロセッサ間通信のオーバーヘッドの解消やメモリやファイルの共有化等を図って、システム性能が最大に発揮できる最小の分割構成とした。チャンネル管理等を行うチャンネル制御・質問管理系と、監視処理、データリンク処理、ネットワーク管理等を行うデータ処理系の二つの分割構成である。

以下に質問計算機の各機能を説明する。

①チャンネル管理

チャンネル管理では、一括質問期間と個別質問期間の割当て、個別質問期間におけるスケジューリング等を行う。図15に一括質問期間と個別質問期間の割り当て例を示す。

一括質問の開始時刻は、ビームデュエルタイム内での一括質問の回数より決定される。この開始時刻を基に、一括質問期間はセンサの覆域より応答受信の終了時刻を決定することで割り当てられる。個別質問期間は、ビームデュエルタイム内で一括質問期間以外の期間が割り当てられる。

個別質問期間のスケジューリングでは、RFチャンネル

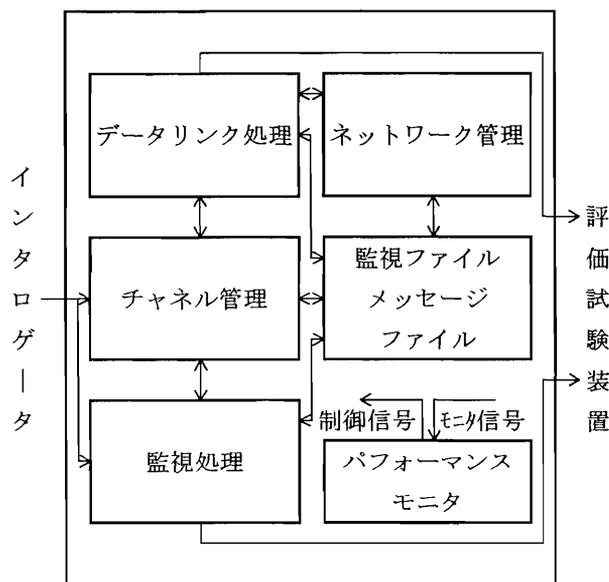


図14 質問計算機の構成

を有効に活用するために距離の遠い航空機より順番に質問を行う。また、航空機の位置や質問・応答の長さ等を考慮して、質問と応答が重ならないように質問の送信時刻を決定する。このようにモードSでは、個別質問のスケジューリングによりガブル干渉の解消を図っている。また、個別質問において応答が得られない場合、その航空機がビーム内にいる間は再質問を行う。再質問においては送信出力を増加して実行する。

②監視処理

監視処理ではモードA/C機とモードS機を別々に処理している。

モードA/C機の監視処理は、インタロゲータからターゲットレポートを入力し、レンジ補正や高度情報の変換を行い、モードA/C機の追尾を実行する。また、この追尾情報からフルーツによって発生したターゲットレポートの除去を行い、信頼性の高いレポートのみ使用してターゲットレポートを作成する。

モードS機の監視処理は、インタロゲータからモードS一括質問応答を入力し、レンジ及びアジマスを補正した後にスイープ相関を行い、モードS一括質問応答レポートを作成する。モードS一括質問レポートが2スキャン連続して取得された場合、監視ファイル上に次スキャンにおける予測位置や質問の送信タイミング等を記録したモードSトラックを作成し、モードS機の追尾を開始する。追尾を開始した後は、チャンネル管理を経由して得られる個別質問応答のレンジ及びアジマスの補正や高度情報の変換を行い、ターゲットレポートを作成する。

個別質問応答が得られない場合は、ターゲットがコーストしたと判定し、距離範囲や方位範囲等の予測位置範囲の拡大を行う。指定スキャン以上、個別質問応答が得

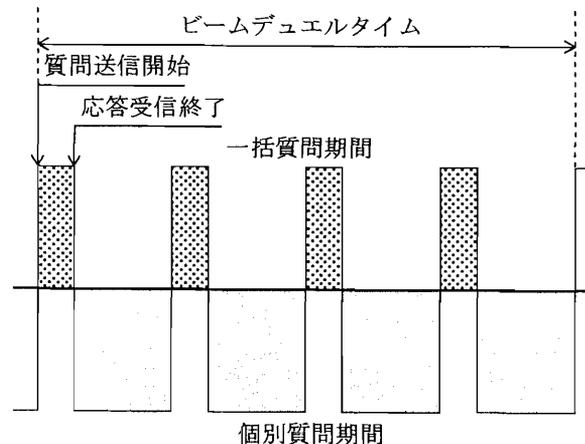


図15 一括質問期間と個別質問期間の割り当て例

られない場合は、該当するモードSトラックを削除する。

ターゲットレポートは同一セクタ単位にまとめられて評価試験装置やモニタ表示装置に提供される。

③データリンク処理

データリンク処理では、評価試験装置の地上データリンク処理装置から受信したアップリンクメッセージをチャンネル管理に通知することや、ターゲットから送信されたダウンリンクメッセージを地上データリンク処理装置に送信するなど、質問計算機と地上データリンク処理装置との間でメッセージの送受信の制御を行う。

図16にアップリンクメッセージの処理概要を示す。地上データリンク処理装置からアップリンクメッセージを受信すると、データリンク処理では対象ターゲットの存在を確認する。対象ターゲットが監視ファイルに存在しない場合は、メッセージ拒否通知を地上データリンク処理装置に送信する。対象ターゲットが存在する場合は、チャンネル管理においてアップリンクメッセージをメッセージリストに登録してスケジューリングを行う。そして、対象ターゲットに対して質問を送信し、対象ターゲットよりその応答を受信する。応答を受信すると、チャンネル管理は質問の送信完了をデータリンク処理へ通知する。質問の送信完了が通知された場合、アップリンク送信通知メッセージを地上データリンク処理装置に送信する。また、指定された期間内に質問の完了がチャンネル管理より通知されない場合は、アップリンク送信失敗通知メッセージを地上データリンク処理装置に送信する。

④ネットワーク管理

ネットワーク管理では、センサ覆域の重複部における効率的で連続な監視と通信を確保するために、隣接セン

サで個別質問が確立されるまでのトラックデータの供給や、トラック状態の変化に伴った隣接センサ間とのトラックデータの送受等を行う。また、隣接センサに障害が発生した場合や通信回線に障害が発生した場合は、覆域の更新等を行って航空機の監視とデータ通信を維持する。

⑤パフォーマンスモニタ

パフォーマンスモニタでは、フィールドモニタを用いた監視機能およびデータリンク機能のモニタやテストターゲット発生器を用いた応答解読機能の自律試験を行う。また、チャンネル管理や監視処理およびデータリンク処理が使用する共有データ領域の利用状態のモニタ、センサが捕捉しているトラック数や、インタロゲータの状態のモニタ等を実行して、モードSセンサの運用状態の監視を行う。

(2) モードSシミュレータ

モードSシミュレータは、モードSセンサの監視機能及びデータ通信機能を最大定格の負荷状態において試験を行うため、模擬航空機を発生させる装置である。表2にモードSシミュレータの主要性能を示す。本装置では、固定機250機、移動機40機をシナリオに沿って発生することができる。また、モードSデータリンクの応用を検討するため、進入フェーズ等におけるデータリンク化管制通信のシミュレーション評価を行えるようにした。

(3) モニタ表示装置

モニタ表示装置はモードSセンサの運用状況の監視に利用する。本装置では、最大250機の航空機ターゲットを表示することができる。また、データリンクメッセージの入出力やモードSセンサとの間で送受される監視情報及びデータ通信情報の収集を行えるようにした。

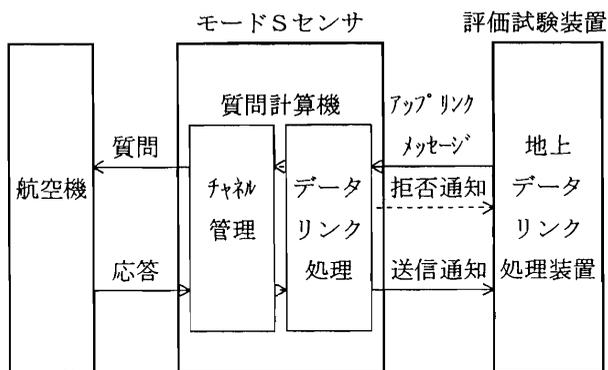


図16 アップリンクメッセージの処理概要

表2 モードSシミュレータの主要性能

模擬航空機最大発生機数	250機
移動機の制御機数	
自由移動機：設定可能機数	24機
：同時発生機数	8機
直線移動機：設定可能機数	16機
：同時発生機数	16機

3.3 評価試験装置

図17に評価試験装置の外観を示す。評価試験装置は地上データリンク処理装置、データ通信実験入出力装置、レーダ表示装置、データ収集解析装置より構成される。

(1) 地上データリンク処理装置

地上データリンク処理装置は、ICAO国際標準⁽¹⁰⁾のモードSサブネットワーク層の処理を行うもので、航空交通通信業務への適応性を重視したモードS固有サービスやサブネットワーク管理等の機能に従ってデータリンクメッセージの処理や転送を行う。

(2) データ通信実験入出力装置

データ通信実験入出力装置は、モードSセンサのデータ通信機能の性能評価において、データリンクメッセージの作成や送受信制御を行う装置である。本装置では、シナリオに沿ってデータリンクメッセージを送受信することにより通信容量、転送速度、誤り率等の性能評価を行うことができる。

(3) レーダ表示装置

レーダ表示装置は、航空機ターゲットの表示やデータリンクメッセージの入出力等を行う装置である。本装置は航空機ターゲットやマップ、データリンクメッセージ

などを表示する主表示部、飛行計画や評価者入力のマーキング情報などを表示する補助表示部、キーボードやトラックボールの入力部で構成される。また、本装置では通信移管や高度割当などの管制業務をデータ通信で行う、データリンク化管制通信の模擬実験をできるようにした。図18に主表示部の表示例を示す。

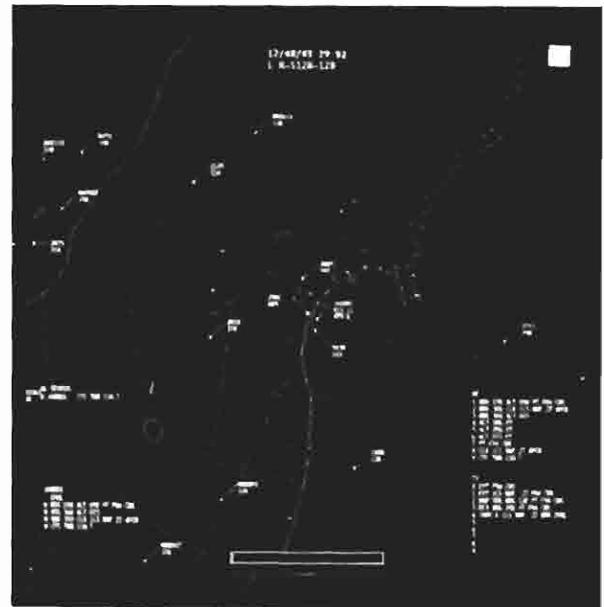


図18 主表示部の表示例

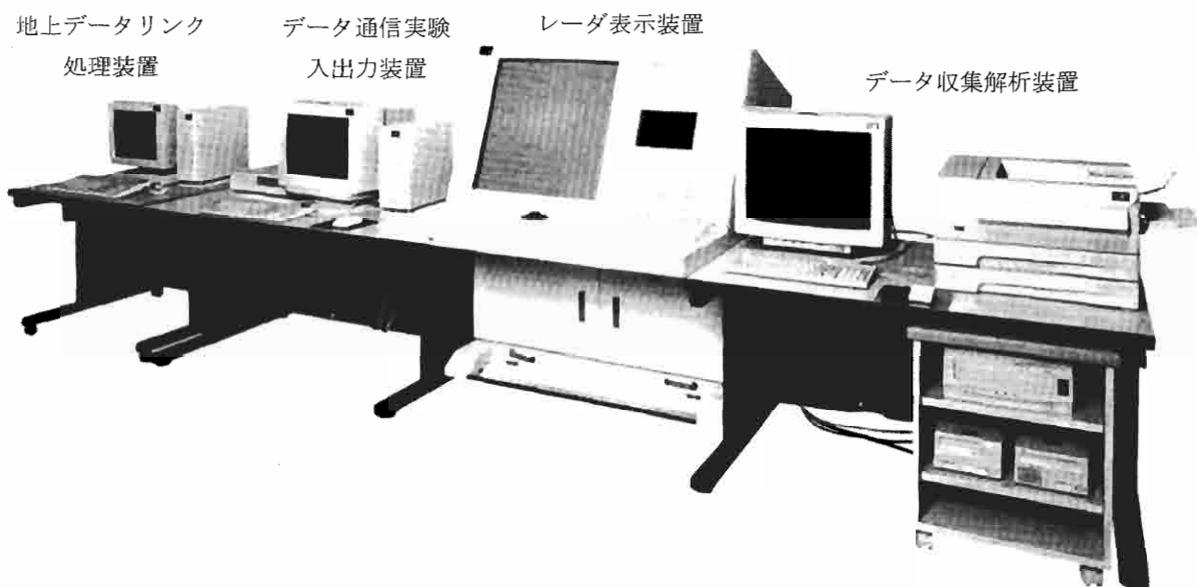


図17 評価試験装置の外観

(4) データ収集解析装置

データ収集解析装置は、監視及びデータ通信のデータを収集並びに解析する装置である。本装置では収集したデータより、水平・垂直航跡図の作成、方位・距離精度の算出、転送率・転送時間の算出などを行うことができる。図19に水平航跡図の表示例を示す。

3.4 モードS機上装置

モードS機上装置は、実験用航空機に搭載してモードSセンサの監視機能やデータ通信機能の性能試験、データリンク化管制通信の模擬実験などを行う装置である。図20にモードS機上装置の外観を示す。本装置はモードSトランスポンダ、機上データリンク処理装置、コントロールパネル等より構成される。機上データリンク処理装置はモードSサブネットワークの機能に準拠したメッセージの処理、シナリオに沿ったメッセージの送受信制御等を行うことができる。図21にデータリンクメッセージの表示例を示す。画面では、左側に地上より送られてくるアップリンクメッセージが表示され、右側に機上より送信したダウンリンクメッセージが表示される。

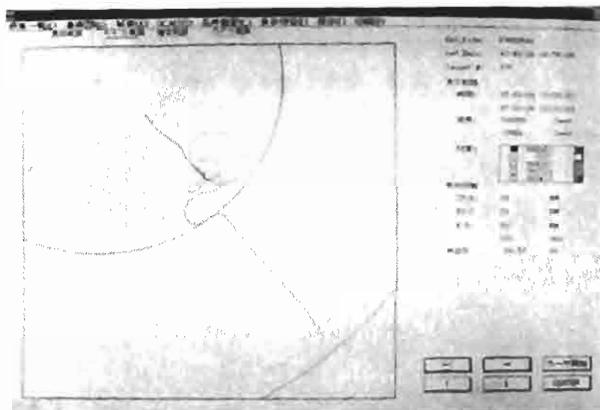


図19 水平航跡図の表示例



図20 モードS機上装置の外観

モードSトランスポンダは、ICAOの規定により応答遅延の許容値とジッタをモードA/Cトランスポンダに対して縮小しているため、SSRモードSでは現用のSSRに比べて正確な距離測定を行うことができる。表3に各トランスポンダの応答遅延の許容値とジッタを示す。

3.5 フィールドモニタ

フィールドモニタはモードSセンサとの間で監視情報及びデータ通信情報を送受して、モードSセンサの校正や性能監視、並びにデータ通信試験などを行う。図22にフィールドモニタの外観を示す。



図21 データリンクメッセージの表示例

表3 トランスポンダの応答遅延

	モードS	モードA/C
応答遅延	128±0.25μ sec	3±0.5μ sec
ジッタ	0.08μ sec	0.1μ sec

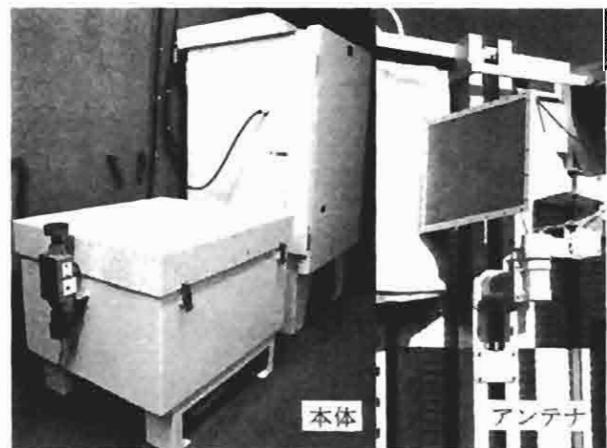


図22 フィールドモニタの外観

4. モード S センサの基本特性⁽¹¹⁾

モード S センサの基本特性を ICAO 規定値⁽¹²⁾との対比のもとに示す。

4.1 送信周波数

表 4 に送信周波数の測定値及び ICAO 規定値を示す。測定値は 1030.003MHz であり、ICAO 規定値を満たすことを確認した。

4.2 パルス特性

図 23 にモード S 質問 (112 ビット) の測定波形を示す。また、表 5 にパルス特性、表 6 にパルス位置特性を示す。上段は測定値、下段は ICAO 規定値を示す。表より、モード S センサの各パルス特性は ICAO 規定値を満たしていることを確認した。

表 4 モード S センサの送信周波数

測定値	ICAO 規定値
1030.003MHz	1030±0.01MHz

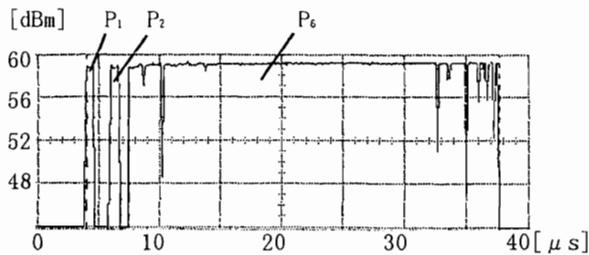


図 23 モード S 質問の測定波形

表 5 パルス特性

	パルス幅	パルス	
		立上時間	立下時間
P ₁	0.76	0.05	0.07
	0.8±0.09	0.05~0.1	0.05~0.2
P ₂	0.75	0.05	0.07
	0.8±0.09	0.05~0.1	0.05~0.2
P ₆	30.10	0.07	0.05
112bit	30.25±0.20	0.05~0.1	0.05~0.2

4.3 DPSK 変調特性

図 24 に DPSK 変調の位相反転波形を示す。位相反転時間の測定値は 44ns であり、ICAO 規定値の 80ns 以下を満たすことを確認した。

4.4 主要諸元

表 7 にモード S センサの主要諸元を示す。

表 6 パルス位置特性

[μs]		
P ₁ ~P ₂	P ₂ ~位相反転	P ₆ ~位相反転
2.0	2.78	1.26
2.0±0.04	2.75±0.04	1.25±0.04

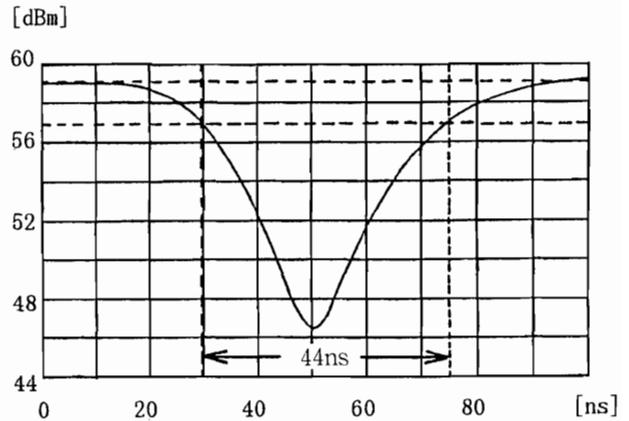


図 24 位相反転波形

表 7 モード S センサの主要諸元

受信周波数	1090MHz
最低受信感度 (カウントダウン感度)	-87dBm
送信デューティ比 (4ms 平均)	19.1%
覆域	250NM
監視処理機数	250機
検出確率	0.99 以上
データ通信容量 (ビーム幅 2.5° 内において)	
[10機のモード S 機に対して]	
標準長メッセージ (SLM) 送信	42回
標準長メッセージ (SLM) 受信	12回
拡大長メッセージ (ELM) 送信	1回

5. 監視機能の評価試験

実験用航空機を用いて実施した監視機能の評価試験の解析結果を示す。なお、処理容量についてはモードSシミュレータを用いて評価試験を実施した。⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾

5.1 実験・評価方法

実験では仙台 VOR を中心とした放射状飛行と周回飛行を実施した。本報告では方位110度、距離65NM から中心に向かって飛行した放射状飛行と、距離20NM で方位90度から270度方向へ飛行した周回飛行の実験結果を示す。飛行高度は各々10,500ft、9,500ftである。モードS地上局のアンテナチルト角は覆域や反射の影響を考慮して6度とした。表8には実験用航空機の空中線系および送受信系の諸元を示す。

解析結果において方位精度及び距離精度はランダム誤差成分を示す。各精度は測定値より推定航跡を求め、測定値と推定値の差を誤差として計算した。推定航跡は測定値の前後合わせて9スキャン分の応答を最小二乗法により2次曲線に近似して求めた。

図25に実験用航空機の放射状飛行及び周回飛行の水平航跡図を示す。これより、各飛行ともターゲットの欠落やスプリットが発生していないことが分かる。

表8 空中線系及び送受信系の諸元

[空中線系]			
種類	ブレード型	垂直偏波	8cm
利得	2.14dB		
配置	Top, Bottom (ダイバシティ)		
給電線損失	1.5dB		
[送受信系]			
送信出力	500W		
受信感度	-77dBm		

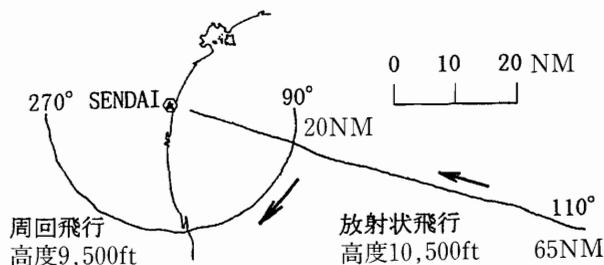


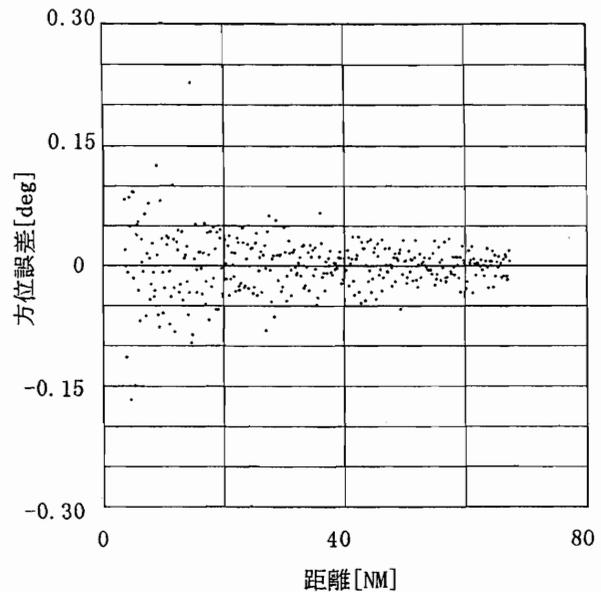
図25 水平航跡図

5.2 方位精度

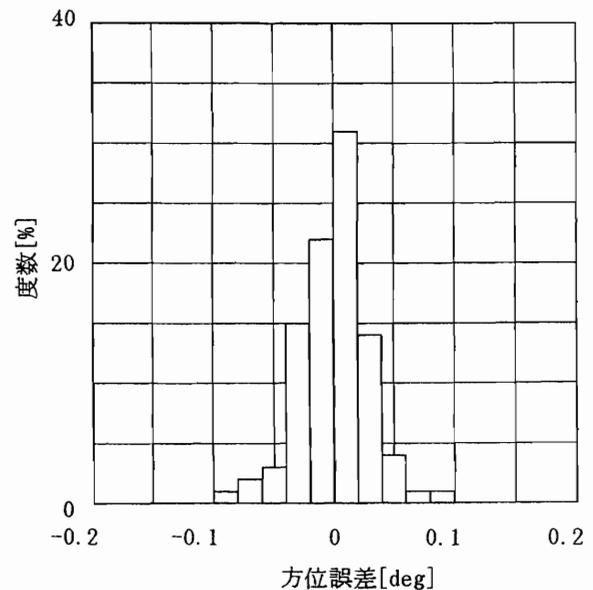
表9に各飛行における方位誤差の標準偏差を示す。また、図26(a)(b)に放射状飛行における距離に対する誤差の分布と度数分布を示す。標準偏差は各飛行ともに0.04°

表9 方位誤差の標準偏差

	[deg]			
	放射状飛行	周回飛行	ICAO指針モードS	ICAO指針SSR
方位誤差	0.04	0.04	0.06以下	0.15以下



(a) 誤差分布



(b) 度数分布

図26 方位誤差

であり、ICAO 指針の0.06°以下を満たしていることを確認した。また、表よりモードS センサの方位精度は現用 SSR に対して大幅に改善されていることが分かる。

5.3 距離精度

表10に各飛行における距離誤差の標準偏差を示す。また、図27(a)(b)に周回飛行における距離に対する誤差の分布と度数分布を示す。各飛行の標準偏差は放射状飛行で7.0m、周回飛行で5.7mであり、ともにICAOの指針である100m以下を満たすことを確認した。また、表よりモードS センサの距離精度は現用 SSR に対して大幅に改善されていることが分かる。

5.4 検出率

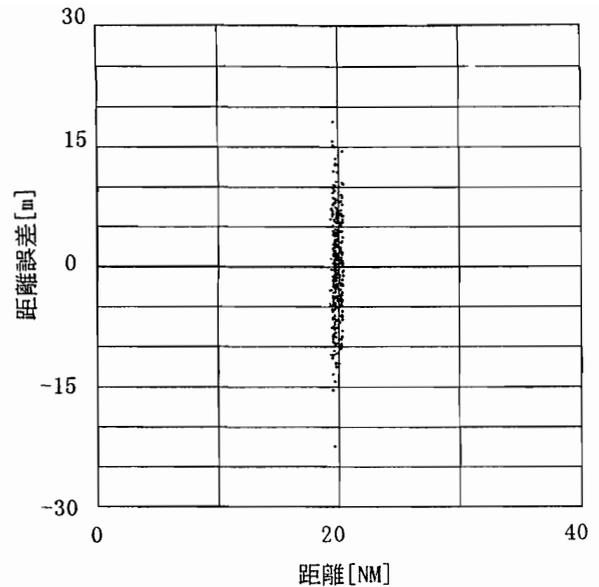
表11に放射状飛行及び周回飛行の検出率を示す。検出率は本実験では各飛行とも100%であり、ICAOの指針である95%以上を満たしていることを確認した。なお、測定した距離範囲は放射状飛行で65NMから5NM、周回飛行で20NMである。

5.5 処理容量

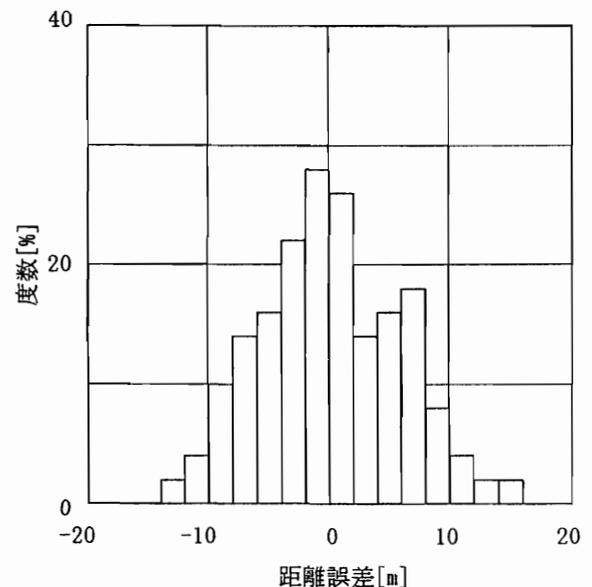
モードS センサの処理機数は当所仕様値である250機の航空機が監視できることを確認した。また、表12にはターゲットの分布が偏った場合の処理機数の当所仕様値を示す。試験では当所仕様値である、90°クオドラントで217機、11.25°セクタで43機、2.5°ウェッジで28機の航空機が監視できることを確認した。なお、処理機数の当所仕様値は過去の調査⁽¹⁶⁾で明らかにされた我が国のSSRモードS 処理機数の要求要件に基づいたものであり、これらの処理容量があれば十分なものと考えられる。

表10 距離誤差の標準偏差

	放射状飛行	周回飛行	ICAO指針 モードS	ICAO指針 SSR
距離誤差	7.0	5.7	100以下	250以下



(a) 誤差分布



(b) 度数分布

図27 距離誤差

表11 検出率

	放射状飛行	周回飛行	ICAO指針 SSR
検出率	100%	100%	95%以上

表12 ターゲットの分布が偏った場合

	90° クオドラント	11.25° セクタ	2.5° ウェッジ
処理機数	217機	43機	28機

6. まとめ

本報告では SSR モード S の特徴を述べ、当所で開発した SSR モード S 実験システムの概要を説明し、モード S センサの基本特性、実験用航空機を使用した監視機能の評価試験結果を示した。モード S センサの基本特性は ICAO 規定値を満たす値が得られた。モード S センサの監視性能は、方位精度、距離精度、検出率において ICAO 指針を満たし、現用 SSR に対して大幅に改善されていること確認した。処理容量においては当所仕様値を満たすことを確認した。今後は、ケーブル等に対する耐干渉性や誤警報確率、マルチパス特性などの監視機能の性能評価⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾を行っていく計画である。

また、当所では、データ通信機能の評価試験もっており、標準長メッセージ、拡大長メッセージ、モード S 固有サービス等の通信プロトコルの機能を確認するとともに、データ転送率やデータ誤り率などの性能評価を実施している。

最後に、本評価試験に御協力いただいた関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

- [1]三吉襄：“SSR モード S システムの研究について”，第 1 回 FANS シンポジウム，平成 5 年 3 月，pp.162-169
- [2]三吉襄：“電子航法研究所における SSR モード S の研究開発について”，航空無線 4 号，平成 7 年 6 月，pp.64-69
- [3]三吉襄：“新しい航空監視レーダ“SSR モード S””，1998 年電子情報通信学会通信ソサイエティ大会講演論文集 1，平成 10 年 9 月，pp.604-605
- [4]ICAO：MANUAL OF SECONDARY SURVEILLANCE RADAR (SSR) SYSTEMS, Doc 9684-AN/951, 1997, p.14
- [5]電子情報通信学会：“レーダ技術”，電子情報通信学会，平成 6 年 3 月，pp.275-279
- [6]古賀禎，三吉襄，宮崎裕己：“SSR モード S の開発とその基本特性について”，第 28 回電子航法研究所研究発表会講演概要，平成 8 年 6 月，pp.25-30
- [7]古賀禎，三吉襄，宮崎裕己：“SSR モード S システムの開発について”，1996 年電子情報通信学会通信ソサイエティ大会講演論文集 1，平成 8 年 9 月，p.195
- [8]宮崎裕己，三吉襄：“SSR モード S 用電力増幅器の評価試験について”，第 26 回電子航法研究所研究発表

会講演概要，平成 6 年 5 月，pp.61-64

- [9]ICAO：MANUAL OF SECONDARY SURVEILLANCE RADAR (SSR) SYSTEMS, Doc 9684-AN/951, 1997, p.61
- [10]ICAO：Aeronautical Telecommunications Annex 10 Volume 3 (PART1-DIGITAL DATA COMMUNICATION SYSTEMS), JULY 1995
- [11]宮崎裕己，三吉襄，古賀禎：“SSR モード S センサの基本特性について”，1996 年電子情報通信学会通信ソサイエティ大会講演論文集 1，平成 8 年 9 月，p.196
- [12]ICAO：Aeronautical Telecommunications Annex 10 Volume 4 (SURVEILLANCE RADAR AND COLLISION AVOIDANCE SYSTEM), JULY 1995
- [13]宮崎裕己，三吉襄，古賀禎：“SSR モード S 監視機能の評価試験について”，第 28 回電子航法研究所研究発表会講演概要，平成 8 年 6 月，pp.31-34
- [14]宮崎裕己，三吉襄，古賀禎：“SSR モード S の開発と監視機能の評価試験について”，電子情報通信学会宇宙・航行エレクトロニクス技術報告 96-33，平成 8 年 7 月
- [15]三吉襄，宮崎裕己，古賀禎：“SSR モード S による監視機能の向上について”，1996 年電子情報通信学会通信ソサイエティ大会講演論文集 1，平成 8 年 9 月，p.197
- [16]運輸省航空局：“昭和 60 年度 SSR モード S システム導入基礎調査報告書”，昭和 61 年 3 月
- [17]宮崎裕己，三吉襄，古賀禎：“SSR モード S センサの航空機追尾特性について”，第 29 回電子航法研究所研究発表会講演概要，平成 9 年 6 月，pp.45-48
- [18]古賀禎，三吉襄，宮崎裕己：“DGPS と SSR モード S の測位精度比較”，第 30 回電子航法研究所研究発表会講演概要，平成 10 年 6 月，pp.65-68
- [19]古賀禎，宮崎裕己，三吉襄：“GPS を用いた SSR モード S の較正について”，電子情報通信学会宇宙・航行エレクトロニクス技術報告 98-32，平成 10 年 7 月
(平成 10 年 8 月 31 日受付，10 年 11 月 16 日再受付)

この論文に関するご意見・お問い合わせ
独立行政法人 電子航法研究所
総務課企画室 企画第 1 係
TEL：0422-41-3168
FAX：0422-41-3169
お問い合わせフォーム