

拡張スキッタADS-B受信局の基本特性

航空システム部

宮崎裕己 三吉 襄

1. まえがき

航空需要の増加に対処して、安全性確保のもとに輸送の効率化を図るためには、従来の地上からの航空交通管理(ATM)を、空対地間および空対空間の協調的なATMに発展させることが必要である。

放送型自動従属監視(ADS-B)⁽¹⁾は、管制官とパイロットが航空機の位置、速度等の情報を共有する媒体を提供でき、地上ベースの監視、航空交通情報のコクピット表示、空港面監視、レーダ監視の補完、フリーフライト等の広い分野で利用できることから⁽²⁾、協調型ATMを促進する将来の監視システムとして期待されている。また、国際民間航空機関(ICAO)では、ADS-Bを新しいCNS/ATM構想に適合する安価な汎用システムと位置づけており、諸外国で開発評価が進められている。

このような背景から当所では、我が国におけるADS-Bの導入に備えて、「放送型データリンクによる航空機監視の研究」を計画し⁽³⁾、マルチラテレーション対応のモード拡張スキッタ(以下、拡張スキッタ)方式ADS-Bの開発評価を進めている。

本稿では、初めにADS-Bと拡張スキッタの概要、および拡張スキッタ受信処理技術の改良について述べ、次に当所で開発を進めている拡張

スキッタ受信局について説明する。そしてターゲット模擬装置を用いて実施した拡張スキッタ受信局の基本特性試験の結果を示す。

2. ADS-Bの概要

2.1 運用形態

図1にADS-Bの全体的な運用概念を示す。ADS-Bでは、航空機が衛星航法システム(GNSS)などの航法システムから取得した位置情報等を放送型データリンクを用いて送信する。地上側では、ADS-B地上局が受信した情報をターゲットレポートにまとめて管制システムに転送し、航空機の監視が行われる。同様に周囲を飛行する航空機では、受信した情報がコクピットにおいて表示され、パイロットに監視情報を提供する。

このように、管制官とパイロットがリアルタイムで同じ情報を共有できるため、周辺航空機との間隔を機上でも確認できるなど空対地と空対空の協調的ATMが可能となる。

しかし、航空機監視に機上の航法データを使用するので、監視と航法の独立性維持や機上装置やGNSSの障害対策が指摘されている。さらに全航空機がADS-B対応になるまでの遷移期における対応が必要であり、二次監視レーダ(SSR)やマルチラテレーション等と組み合わせたシステムが提案されている。

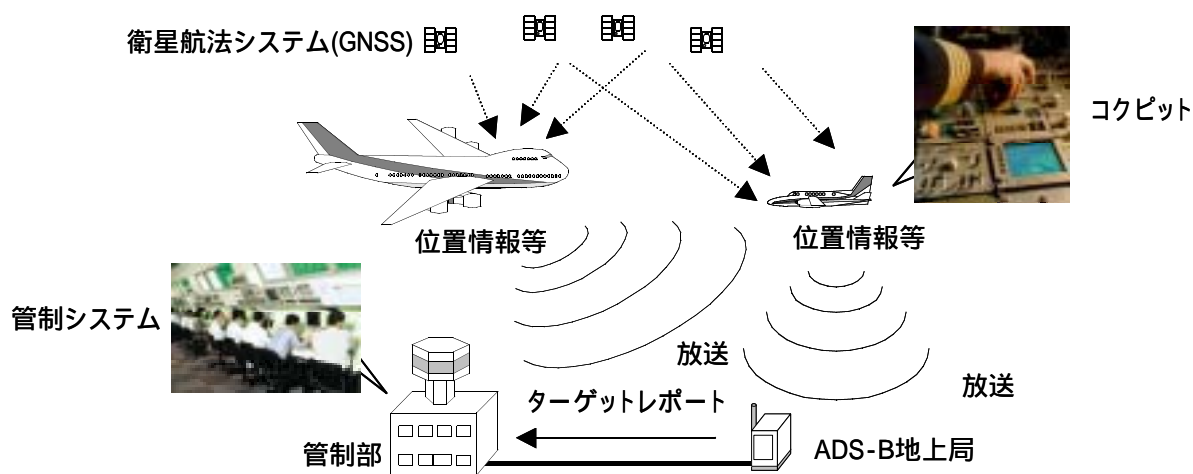


図1 全体的なADS-Bの運用概念

2.2 マルチラレーション

マルチラレーションは、航空機からのスキッタを3カ所以上の受信局で受信し、受信時刻差からターゲットの位置を測定する監視システムである。スキッタの受信に加え、ターゲットに対して質問を行ってビーコンコードと高度情報を取得するとともに、受信応答からも位置を測定する。マルチラレーションは、悪天候下での性能劣化やマルチパスによるフォルスタターゲット等の問題が少なく、特に空港面でレーダがカバーできない領域の監視に有効であるとして、マルチラレーションとADS-Bを組み合わせた空港面監視システムが諸外国で評価もしくは導入が進められている。

2.3 モードS拡張スキッタ

ADS-B用の放送型データリンクメディアには、拡張スキッタ、VDL(VHF Digital Link)モード4、UAT(Universal Access Transceiver)の3方式が提案されている。拡張スキッタ方式は、周波数が割り当てられ国際標準⁽⁴⁾が制定されていること、モードSトランスポンダの搭載が進んでおり機上の二重投資を避けるのに最も適していること等から、ADS-Bのデータリンク媒体として導入が有望視されている。

拡張スキッタ方式はSSRモードSや航空機衝突防止装置(ACAS)と同じ信号形式⁽⁴⁾を利用しており、キャリア周波数もこれらと同一の1090MHzである。本方式ではスキッタと呼ばれる信号がランダムなタイミングで自発的に送信される。図2に拡張スキッタの信号形式を示す。拡張スキッタは、4つのパルスによるプリアンブル部と112ビットのデータブロック部で構成される。プリアンブルはスキッタの検出およびデータブロックの同期に利用される。データブロック部の変調にはパルス位置変調(PPM)方式が用いられており、パルスがビット位置前半にあれば1、後半にあれば0を表す。データレートは1Mbit/sである。図3にデータブロックの構成を示す。データブロックは、制御情報、航空機アドレス(モードSアドレス)、ADSデータ、パリティの各フィールドから構成される。ADSデータフィールドは56ビット長であり、パリティフィールドにおいてCRC(冗長度符号チェック)方式誤り訂

正が行われ、データの信頼性が高められている。表1にメッセージの内容を示す。56ビットのADSデータフィールドで位置や高度等を送信するため、24ビットの緯度経度情報を17ビットに圧縮して転送される。送信は±100ミリ秒の範囲でジッタを掛けられている。ジッタ幅を拡張スキッタ長の 10^3 倍以上に取ることで同期性干渉の防止が図られている。

3. スキッタ受信処理技術

拡張スキッタADS-Bおよびマルチラレーションでは干渉下におけるスキッタ信号を正確に受信して処理することが重要である。スキッタ信号の受信処理技術としては、SSRモードSや航空機衝突防止装置(ACAS)で利用されている従来方式がACASの最小運用要件(MOPS)⁽⁶⁾で提案されている。一方、これらの方式はビーム幅が狭い場合やレンジが短い場合を想定して設計されているため、全方位からの信号を同時に受信するADS-Bでは十分な性能が得られないことが指摘されており、スキッタ受信性能を向上させる改良方式がADS-BのMOPS⁽⁶⁾で提案されている。

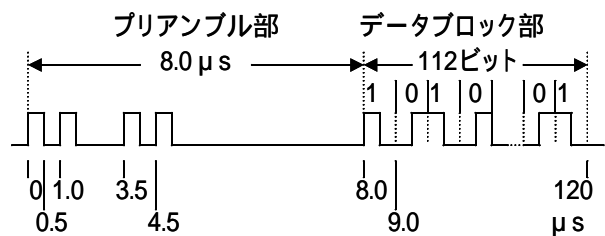


図2 拡張スキッタの信号形式

制御 8ビット	アドレス 24ビット	ADSデータ 56ビット	パリティ 24ビット
------------	---------------	-----------------	---------------

図3 データブロックの構成

表1 メッセージの種類

種類	内容	送信間隔
位置(飛行中)	緯度・経度・高度	0.5秒
位置(空港面)	緯度・経度・速度	0.5秒 5秒
速度	速度・回転率	0.5秒
識別	コールサイン	5秒 10秒
インテント	TCP, TCP1	1.7秒

停止中

スキッタ受信処理は、プリアンプルの検出、データビットの検出(信頼性宣言)、および誤り訂正に大別される。以下に当所で開発を進めている拡張スキッタ受信局で採用した受信処理技術を説明する。

3.1 プリアンプル検出

プリアンプル検出では、プリアンプル候補として認識したパルスのリーディングエッジを基準タイミングに設定して、これに続くプリアンプルパルスや以降のデータビットの位置を計測する。また、先頭パルスの振幅に対する-6dBをスレッシュホールドレベルに設定して、このレベル以上の振幅を持つパルスのみ検出する。このスレッシュホールドレベルの設定は、低レベルのマルチパスの除去に有効である。プリアンプルパルスとして決定する条件としては、基準タイミングに対する4つの各パルス位置における振幅レベルが、75%以上スレッシュホールドレベルを上まわっていること、および4つのプリアンプルパルスのうち、2つ以上のパルスが有効なリーディングエッジを持つことが要求される。

3.2 データビット検出(信頼性宣言)

従来方式のデータビット検出では、図4(a)に示すように、プリアンプル検出において設定されたスレッシュホールドレベルに対して、データビットの両チップ(前後)のどちらか一方にのみパルスが検出された場合、そのデータビットを高信頼度として宣言する。両チップの両方にパルスが検出された場合は、中心振幅の大きい側のパルスを採用して、低信頼度として宣言する。この方式では、弱い干渉パルスの重畳に対しては有効であるが、スキッタ信号よりも強い干渉パルスに対しては、誤ったビット値を決定してしまう。

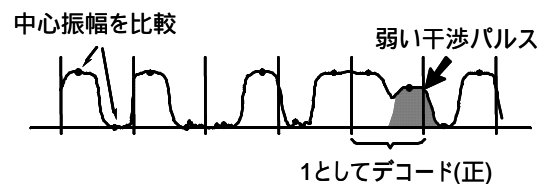
当所が採用した改良方式では、図4(b)に示すように、プリアンプル検出において設定された基準レベルに対して $\pm 3\text{dB}$ ウィンドウを設定して、このウィンドウ内のパルスのみを処理する。データビットの両チップのどちらか一方にのみがウィンドウ内でパルスが検出された場合、高信頼度として宣言する。両チップの両方がウィンドウ内でパルスが検出された場合、または両

方ともウィンドウ内でパルスが検出されない場合は低信頼度として宣言する。これにより、スキッタ信号よりも強い干渉パルスがデータビットに重畳した場合でも正確なビット値を決定できる。

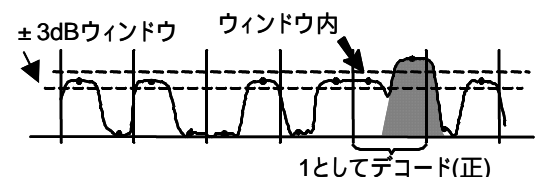
3.3 誤り訂正

従来方式の誤り訂正では、低信頼性ビットが連続する24ビット内に集中して発生している場合、すなわちデータブロック部に一つのモードA/C応答が重畳した場合にのみ誤り訂正を実行できる。この方式では、高密度でSSR応答が発生する空域では誤り訂正の実施が困難となる。

当所が採用した改良方式の誤り訂正はBrute Force方式と呼ばれ、データブロック部に発生している低信頼性ビットについて、個々に値を反転させて全ての組み合わせを検証するもので、誤りの存在範囲には制限がない。ただし、低信頼性ビットの総数が6以上では見逃し誤りが多発することや、処理時間の関係から、5以下に制限されている。これより、データブロック部に二つ以上のモードA/C応答が重畳した場合でも、ビット数に制限はあるが、誤り訂正が実行可能となる。



(a)従来方式のビット検出



(b)改良方式のビット検出

図4 両方式のデータビット検出

4. 拡張スキッタ受信局の概要

4.1 構成

図5に当所で開発を進めている拡張スキッタ受信局の機能構成を示す。また、表2に拡張スキッタ受信局の主要諸元を示す。以下に各部の機能概要を説明する。

(1)受信部

受信部では、アンテナで受信された高周波信号からシステムで使用する帯域の信号抽出、増幅、およびログビデオへの変換等が行われる。表3に受信部の基本特性を示す。

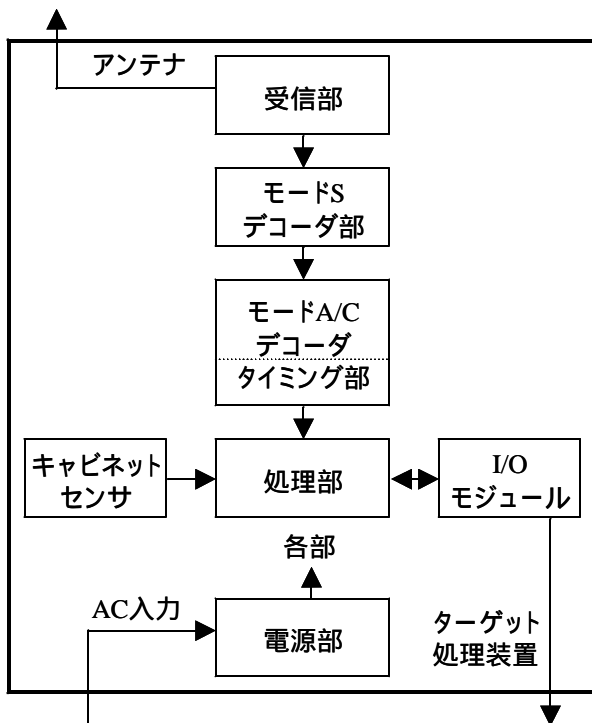


図5 拡張スキッタ受信局の機能構成

表2 拡張スキッタ受信局の主要諸元

覆域：	60NM
処理信号：	DF=0, 4, 5, 11, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 24 モードA/C
処理容量：	モードS(ADS-B)機 8,000応答/秒 モードA/C機 20,000応答/秒
サンプリングレート：	100MHz
ターゲットレポート更新率：	1Hz以上

(2)モードSデコーダ部

モードSデコーダ部では、受信部から送られたログビデオのA/D変換、モードS信号のプリアンブルパルスの検出、データビットの解読、および誤り訂正等が行われる。

(3)モードA/Cデコーダ・タイミング部

モードA/Cデコーダ・タイミング部では、モードA/C信号の解読、モードS,A/C受信信号への時刻スタンプの付加等が行われる。

(4)処理部

処理部では、モードA/Cデコーダ・タイミング部から送られてきたモードS,A/C信号からのターゲットレポートの作成、レポートのターゲット処理装置への送出等が行われる。

5. 基本特性試験

5.1 試験方法

当所では、拡張スキッタ受信局の処理容量や干渉下における信号解読特性を確認するため、拡張スキッタやSSR応答等の信号を発生できるターゲット模擬装置を製作した。表4にターゲット模擬装置の主要諸元を示す。

表3 受信部の基本特性

RF入力	最小受信レベル	-88dBm
	周波数範囲	1087 ~ 1093MHz
低雑音増幅	利得	30.7dB
	NF	1.3dB
受信選択	中心周波数	1090MHz
フィルタ	帯域幅	8.5MHz
ログアンプ	ダイナミックレンジ	63dB以上
検波機	直線性	55dB以上

表4 ターゲット模擬装置の主要諸元

発生信号：	拡張スキッタ
	捕捉スキッタ
	モードS応答
	モードA/C応答
性能：周波数範囲	1090 ± 3MHz
出力レベル	-80dBm以上 ~ -20dBm以下
信号重畳数	3応答までの重畳可

拡張スキッタ受信局の基本特性試験は、ターゲット模擬装置を用いて実施した。以下に試験項目を示す。

- (1)処理容量
- (2)最小トリガレベル
- (3)ダイナミックレンジ
- (4)帯域通過特性
- (5)帯域外除去特性
- (6)重畳ターゲット識別特性

5.2 試験結果

(1)処理容量

処理容量の試験は、1秒あたりの受信応答数に対する受信局のCPU負荷を測定することで評価した。表5にモードS応答およびモードA/C応答に対する試験結果を示す。試験の結果、CPU負荷は、モードS応答では8,000応答時で18%、モードA/C応答では20,000応答時で13%であり、仕様値の応答数を受信した場合でもCPU負荷に余裕があることが確認できた。

(2)最小トリガレベル(MTL)

最小トリガレベル(MTL)はMOPS⁽⁶⁾において、信号を入力して90%以上の検出率が得られる値として、1087MHz～1093MHzに対して-74dBm+2dBと規定されている。加えて、-21dBm～MTL+3dBの信号に対する検出率は99%以上、-78dBm以下の信号に対しては10%未満と規定されている。本試験では、これらの規定値に対して評価した。表6にMTLの試験結果、表7に規定の信号レベルに対する検出率の試験結果を示す。試験の結果、全ての測定値は規定値を満たしていることが確認できた。

表5 処理容量の試験結果

モードS応答数	CPU負荷
1,200応答/秒	5%
6,000応答/秒	16%
8,000応答/秒	18%
モードA/C応答数	CPU負荷
1,500応答/秒	3%
15,000応答/秒	11%
20,000応答/秒	13%

(3)ダイナミックレンジ

図6にダイナミックレンジの試験結果を示す。ダイナミックレンジは、-80dBmから-15dBmまでの65dBであり、また、変動幅が±1dB以下の直線性は-20dBmから-75dBmまでの55dBにおいて得られており、ともに仕様値を満たしていることが確認できた。

(4)通過帯域特性

SSR受信機では、一般的に8.1MHz以上の通過帯域幅が要求されている⁽⁷⁾。図7に受信部の通過帯域幅の試験結果を示す。試験の結果、中心周波数が若干マイナス側にシフトしていたが、通過帯域幅(3dB)は1085MHzから1094MHzまでの約9MHzであることが確認できた。

(5)帯域外除去特性

帯域外除去特性は、ACASのMOPSにおいて、指定周波数に対して、MTLからの規定の増加分以上で検出率が90%となることが要求されている。

表6 MTLの試験結果

周波数	規定値	測定値
1087MHz	-74dBm+2dB	-73.4dBm
1090MHz	-74dBm+2dB	-73.6dBm
1093MHz	-74dBm+2dB	-72.4dBm

表7 信号レベルに対する検出率

信号レベル	規定値	測定値
-21dBm ~ MTL+3dB	99%以上	100%
-78dBm	10%未満	0%

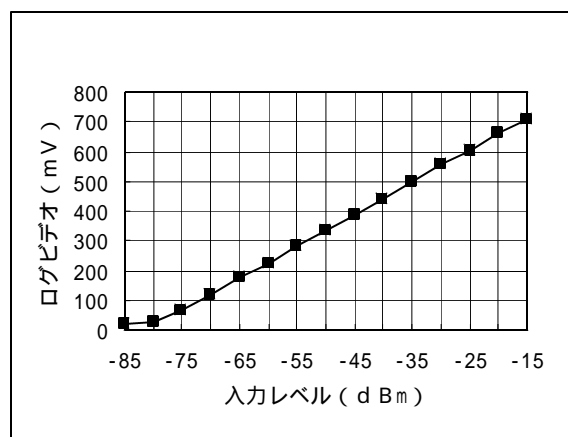


図6 ダイナミックレンジの測定結果

本試験では、この規定値により評価した。表8に帯域外除去特性の試験結果を示す。試験の結果、周波数差が-10MHzの場合を除き、測定値は規定値を満たしていることが確認できた。周波数差が-10MHzの場合は、規定値から3.7dB程度除去特性が低下しているが、これは通過帯域特性において説明した中心周波数のシフトが原因と考えられる。

(6)重畳ターゲット識別特性

重畳ターゲット識別特性の試験では、拡張スキッタ信号にモードA/C応答による干渉パルスを重畳させ、メッセージを正確に解読できる割合により評価した。試験内容としては、プリアンブル検出、データビット検出(信頼性宣言)、誤り訂正の各スキッタ受信処理技術を確認した。なお、本試験では拡張スキッタ信号のパルスとモードA/C応答のパルスの位相関係は考慮していない。

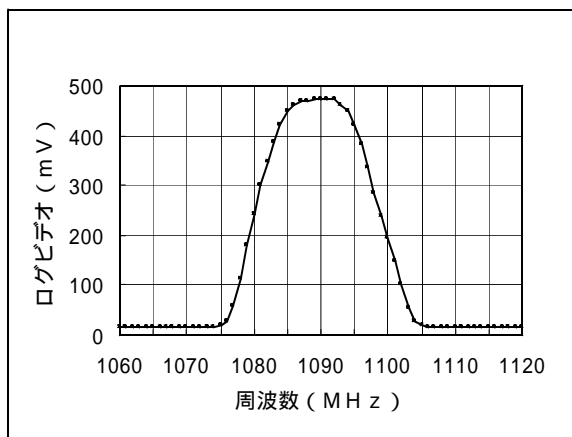


図7 帯域通過特性の測定結果

表8 帯域外除去特性の試験結果

周波数差	規定値	測定値(検出率90%)
± 5.5MHz	MTL+ 3dB	+5.5MHz : 7.0dB -5.5MHz : 3.0dB
± 10MHz	MTL+20dB	+ 10MHz : 23.9dB - 10MHz : 16.4dB
± 15MHz	MTL+40dB	+ 15MHz : 60.4dB以上 - 15MHz : 60.4dB以上
± 25MHz	MTL+60dB	+ 25MHz : 60.4dB以上 - 25MHz : 60.4dB以上

[試験1]プリアンブルの検出

拡張スキッタのプリアンブルパルスの前後および中間にモードA/C応答パルスがインターリーブした場合を評価した。図8に本試験のパルス設定を示す。プリアンブルの前に位置する干渉パルスは先頭のプリアンブルパルスから1μsとした。干渉パルスの振幅レベルは拡張スキッタと同一とした。この設定では、先頭のプリアンブルパルスの前に受信した干渉パルスをプリアンブルの先頭パルスと誤認識するが、3番目のプリアンブルパルスが得られないため、プリアンブルとして決定されないことが予想される。表9に試験結果を示す。信号総数は182応答である。試験の結果、約30%の応答において誤り訂正が失敗する結果となった。このような結果となった原因は調査中であるが、プリアンブル検出において改良技術採用の検討が必要と考えられる。

[試験2]データビット検出(信頼性宣言)

拡張スキッタのデータビットに、低信頼度のビットが発生するようにモードA/C応答パルスを重畳した場合について、振幅レベルを変化させて試験した。図9に本試験のパルス設定を示す。表10に干渉パルスの振幅レベルをスキッタ信号と同一とした場合の試験結果を示す。信号総数は184応答である。この場合では、低信頼度のビットは発生するが全て誤り訂正されることが分かる。一方、表11に干渉パルスの振幅レベルをスキッタ信号に対して+5dBとした場合の

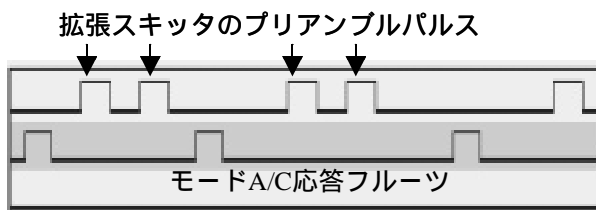


図8 試験1のパルスパターン

表9 試験1の解読状態

解読状態	応答数(比率)
確実にデコード	127応答(70.0%)
誤り訂正失敗	55応答(30.0%)

試験結果を示す。信号総数は180応答である。試験の結果、全ての応答に誤りが検出されず問題なく解読できることが確認できた。この結果から、従来方式では誤ったビット値として決定される重畳に対しても、改良方式では基準レベルに対して $\pm 3\text{dB}$ のウィンドウを設定することにより、高信頼度で宣言できることが分かる。

[試験3]誤り訂正

拡張スキッタのデータビットに二つのモードA/C応答が重なった場合について、干渉パルスの重畳状態を変化させて評価した。図10および図11にパルスパターンを設定を示す。図10の設定ではモードA/C応答による干渉パルスをデータビットの空側チップに5個重畳させており、図11の設定では空側チップに9個重畳させている。干渉パルスの振幅レベルは拡張スキッタと同一である。従来型の誤り訂正方式では、一つのモードA/C応答が重なった場合(低信頼度ビットが連続する24ビット内に集中して発生する場合)にのみ訂正できるので、この設定ではメッセージの誤り訂正が困難となる。表12に空側に5個重畳させた場合の試験結果を示す。信号総数は184応答である。試験の結果、約33%の応答に誤りが検出され全て訂正されていることが確認できた。表13に空側に9個重畳させた場合の試験結果を示す。信号総数は182応答である。

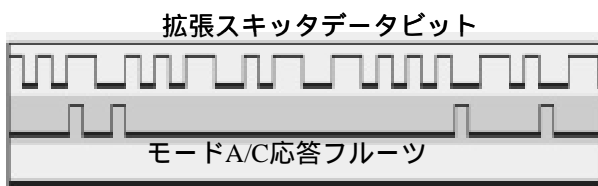


図9 試験2のパルスパターン

表10 試験2の解読状態(振幅レベル同一)

解読状態	応答数(比率)
確実にデコード	93応答(50.5%)
誤り訂正成功	91応答(49.5%)

表11 試験2の解読状態(振幅レベル+5dB)

解読状態	応答数(比率)
確実にデコード	180応答(100%)



図10 試験3のパルス設定(空側5個重畳)

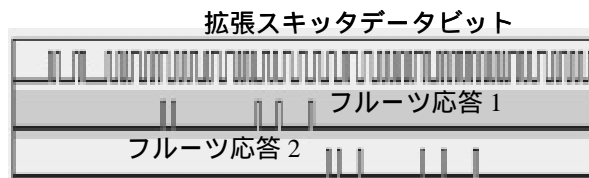


図11 試験3のパルス設定(空側9個重畳)

表12 試験3の解読状態(空側5個重畳)

解読状態	応答数(比率)
確実にデコード	123応答(66.8%)
誤り訂正成功	61応答(33.2%)

表13 試験3の解読状態(空側9個重畳)

解読状態	応答数(比率)
確実にデコード	82応答(45.1%)
誤り訂正成功	63応答(34.6%)
低信頼性ビット多数	37応答(20.3%)

試験の結果、約35%の応答に誤りが検出され訂正されたが、約20%の応答では低信頼度のビットの発生数が最大値の5個以上として、誤り訂正が実行されない結果となった。これらの結果から、改良型のBrute Force方式を利用すると、一つ以上のモードA/C応答が重なり、ビット誤りが分散して発生した場合でも、低信頼度のビット数が設定値以下では誤り訂正が可能となることが確認できた。

6. まとめ

本稿では、当所で開発を進めている拡張スキッタ受信局の基本特性試験の結果について説明した。試験の結果、改良型のスキッタ受信処理技術を採用すると、解読特性が向上することが確認できた。今後は、評価システムを設置調整して、実験用航空機等を利用した評価試験を実施する計画である。

[参考文献]

- (1)RTCA: Minimum Aviation System Performance Standards For Automatic Dependent Surveillance Broadcast (ADS-B), RTCA/D0-242A, June 25,2002
- (2)宮崎他：放送型データリンクによる航空機監視、日本航海学会誌第151号、pp.53-59、平成14年3月
- (3)三吉他：拡張スキッタによる航空機監視の実験計画、第2回電子航法研究所研究発表会講演概要、pp.61-64、平成14年6月
- (4)ICAO: Aeronautical telecommunications ANNEX 10 Volume4, July 1998
- (5)RTCA: Minimum Operational Performance Standards for Traffic Alert and Collision Avoidance Systems (TCAS) Airborne Equipment Vol.1, RTCA/D0-185 September 6,1990
- (6)RTCA: Minimum Operational Performance Standards for 1090MHz Automatic Dependent Surveillance - Broadcast (ADS-B), RTCA/D0-260, September 13, 2000
- (7)Stevens: Secondary Surveillance Radar, ARTECH HOUSE, pp.80-84, 1988