

平成 21 年 5 月 25 日

空港面のモード S 拡張スキッタ信号環境

独立行政法人電子航法研究所

概要

空港面においてモード S 拡張スキッタ信号を送受信する場合の 1090MHz 信号環境についてまとめる。

空港面の受信機にて観測される 1090MHz 信号環境は、通常空域内信号環境と比較してマルチパス干渉の原因となる反射物体の立体角が比較的大きく、マルチパス反射の影響が大きい。

また、空港面にて ADS-B やマルチラレーションを使用する場合、ATC トランスポンダが密集運用される影響を配慮する必要がある。特に、ATC トランスポンダが、マルチパス干渉を伴う質問信号や低電力の質問信号を誤解釈する現象を無視することはできない。

空港面の 1090MHz 信号環境

1090MHz 信号環境は、次の二つの要素から構成される。

- ・ 1030MHz 帯域の信号を ATC トランスポンダが質問信号として受信解読したものへの応答信号
- ・ ATC トランスポンダによるスキッタ信号の送信

空港面において観測される 1090MHz 信号環境は、次のような特徴がある。

- ・ 地上の ATC トランスポンダがスキッタ信号と一部の応答信号を送信
- ・ 周辺を飛行中のトランスポンダが背景となる信号環境を形成
- ・ 格納庫など大きな平面を持つ建築物によるマルチパス発生が顕著

質問信号に対するマルチパスの影響

空港面では質問信号や SLS (Side Lobe Suppression) 信号にマルチパス反射波が重畳するため、トランスポンダの信号解読が正常に機能しない場合がある。

- ・ 質問信号のマルチパス反射にトランスポンダが応答する
- ・ 質問信号にマルチパス反射が重畳し、別の信号に誤解釈される
- ・ SLS 信号にマルチパス反射が重畳し、SLS 機能が動作しない

応答信号に対するマルチパスの影響

マルチパスの発生によりモード S 拡張スキッタ信号に干渉する信号の統計的

性質が変化する（小瀬木：「空港面のモード S 拡張スキッタ信号環境」、電子情報通信学会総合全国大会、2008 年 3 月）。

- ・ 直接波に対するマルチパス波の受信電力の減衰量は、最も少ない場合で約 6dB（RTCA の DME 規格、ENRI 測定で確認）
- ・ 受信処理方式によりモード S 拡張スキッタの解読性能に大差があるが既存技術により実用的な性能を実現済み
 - 固定閾値ではマルチパス干渉により高率で解読不能
 - 直接波受信電力から 6dB 下までの間に閾値を動的に設定する可変閾値ではマルチパス干渉の影響を受けにくい（ACAS 受信機に使用されている既存技術）

計算方法の確認

上記の想定を用いて、地上の ATC トランスポンダで受信される 1030MHz 信号数を概算し、これにトランスポンダの応答率と ICAO 規格に定められたスキッタ信号送信レートを用いて応答信号数とスキッタなど 1090MHz 信号数を概算した。信号環境を考える位置に ATC トランスポンダ（試行トランスポンダ）を置いたと想定し、そこで ATC トランスポンダが受信解読する質問信号、その結果に応じて送信する応答信号を算出する。

1030MHz の信号環境は、考えている地域にある SSR、IFF、ACAS 等の質問信号発生量を元に概算した。考える SSR 等は、試行トランスポンダを覆域内に持つ物を選択する。質問信号の送信電力、ATC トランスポンダの受信機感度、各機材のアンテナ利得や給電系損失は、公称値を用いた。

ただし、前述のように、ATC トランスポンダが解読する信号の数はこれらの機材が送信する質問信号発生量とは異なる値になるため、次の手順を用いた。

最初に、ATC トランスポンダの信号受信範囲内にある SSR 等の 1030MHz 信号送信機器の数と各機器の信号送信数を信号モード毎に想定する。この想定値を用いて、ATC トランスポンダに受信される信号の発生量を信号モード毎に算出する。

次に、マルチパス干渉による信号誤解読の影響を配慮して補正を加える。この計算では、マルチパスが質問信号解読に与える影響を考えて、トランスポンダ受信機のデコーダが検出する信号数を求めている。ここでは、1090MHz 信号環境に影響を与える現象として、SSR のサイドローブ抑圧（SLS）信号が質問信号に誤解読される現象（SLS の機能不全）や別方向へのメインビーム送信信号の反射波への応答を考える。SLS 信号は、SSR のアンテナサイドローブ方向に送信される信号であるため、メインビームより受信電力が低く、またアンテナの回転方向に応じて大きく変化する。このため、SSR との距離に応じて受信率

を想定する。SSR から 5NM 以内では、受信率 0.9 を想定している。10NM を超える場合は、希に発生する SLS パンチアウト現象を配慮して、受信率 0.01 を想定している。これらの受信率は、アンテナサイドローブの信号受信電力が ATC トランスポンダの MTL を超える方向の割合を用いて概算できる。このようにして得られる SLS 信号受信数に、マルチパスによる誤解読発生率をかける事により、マルチパスが原因で発生する誤解読による質問信号数を算出できる。誤解読発生率は、SSR、ATC トランスポンダ、反射物体の位置関係や反射物体の材質や反射面の状態により変化する。空港面の特定の位置では誤解読率がほぼ 100% になるが、別の場所では 0% である。P1 パルスマルチパス遅延時間が 1.2~1.85 μ s の範囲にある場合に P2 パルスの検出が妨害されるため、誤解読率が高くなるためである。この遅延時間の範囲は、伝搬距離差にして 360~555m の約 200m の範囲に相当する。これを用いてインタロゲータとトランスポンダを焦点とする楕円を考えると、誤解読が発生し得る地理的範囲を求める事ができる。動作中のトランスポンダの移動範囲に重なる部分の割合から、空港や空域等、その地域の誤解読率を概算できる。

次に、低電力の質問信号に対する誤解読の影響を補正する。民間用 ATC トランスポンダでは、低い受信電力のモード S 信号やインターモード信号がモード A 質問信号に誤解読される現象が知られている (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)。この誤解読率はトランスポンダの機種に依存し、最大で 30% の誤解読率が測定されている。MTL の下約 6dB の受信電力範囲にて誤解読率は三角形に分布しているため、トランスポンダの受信機 MTL からその 6dB 下までの電力範囲内で受信されるモード S 質問信号の平均 15% がモード A と誤解読されると想定した。なお、実際の ATC トランスポンダと ACAS の間には公称覆域に対してリンクマージンが約 2.2dB あるため、トランスポンダの受信覆域を 1.29 倍に補正して計算する必要がある。また、ACAS やトランスポンダアンテナの利得指向性は、機体各部の反射等の影響を受けるため方向によって大きく変動する。この効果を考えると、トランスポンダが質問信号受信できる ACAS の数は、理想的な無指向性アンテナを想定する場合より約 2.26 倍になる。

以上の計算方式の確認のため、羽田空港近傍上空における 1030MHz 信号数の測定値と計算値を比較した。マルチパスによる誤解読率については、SSR から 3000m の細長い範囲に航空機が存在しその内の約 200m (面積比 0.08) にて受信された SLS 信号が質問信号に誤解読されると想定した。また、メインビームの主たる反射点を 10 カ所 (格納庫、ターミナルビル、燃料タンク、他の航空機等)

想定し、この方向がメインビーム内になる率 (0.08) をメインビーム反射によるマルチパス波に応答する率とした。以上合計の、0.15 を空港面におけるマルチパス誤解読率と想定した。

羽田空港近傍約 10000ft を飛行するモード S トランスポンダが解読する質問信号の構成を比較すると次の表のようになる。この表では、1 秒あたりの信号発生数を Hz として示している。

トランスポンダが解読する質問信号の構成の比較

信号モード	A / C	P1-P2 SLS	A / C only	S short
計算値	169 Hz 内誤解読 118 Hz	419 Hz	8.3 Hz	26 Hz 全機合計
測定値	170 Hz	400 Hz	8 Hz	25 Hz 全機合計

日本空域: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 (測定データは 2000 年 11 月)

この計算では、2000 年 11 月の羽田空港周辺におけるインタロゲータが次のように運用されると想定した。

空港周辺の運用インタロゲータの想定規格の構成

機器	台数	アンテナ ビーム幅	PRF	モードシーケンスおよび 備考
SSR	0	3 度	300	A, A, C
MSSR	空港内 2	3	180	A, A, C
MSSR	エンルート 2	3	180	A, A, C
SSR mode S	空港内 0	3	180	A only/S, A only/S, C only/S
SSR mode S	エンルート 0	3	180	A only/S, A only/S, C only/S
ACAS MLAT	飛行中 ACAS 7 MLAT 0	110		C only W/S, S 公称覆域内に ACAS は 7 機
IFF 地表等	11	3	300	2, A, C
IFF 機上	1	90	120	2, A, C

台数は 2000 年の値 (軍用機器のパラメタは推計値)

PRF はモード S ロールコール以外の信号について記載

質問信号解読数の計算結果は、全般的に測定値よりやや多めに評価しているが、測定値とよく一致していることがわかる。特にモード A/C 質問信号について誤解読がないとする単純な計算より多めに算出されている理由は、低電力質

問信号への誤応答現象に比較的劣悪な条件を想定して計算したためである。毎秒の誤解読数 118 の内、低電力質問の誤解読が 53 であり、ほぼ半分をしめる。測定に使用したモード S トランスポンダにも誤解読現象が観測されている。また、質問信号のドループ特性に応じて誤解読率は変化すると予想される。

1090MHz 信号発生量評価のためのパラメタの推定

以上のように算出された 1030MHz 質問信号解読数に、ATC トランスポンダ数と応答率をかけると応答信号発生数を概算できる。ただし、ATC トランスポンダの応答機能レベルに応じて、応答可能な信号のみを計算する必要がある。これに、各 ATC トランスポンダや ESNT（非トランスポンダの拡張スキッタ送信機）が送信するスキッタ信号の数を加算して 1090MHz 信号発生数を求める事ができる。このため、ATC トランスポンダ数等を機能レベルに応じて想定する。

羽田空港のスポット数は、現在約 160 である。また、瞬時のスポット利用率に 80%を想定すると、駐機数は 126 機である。ATCトランスポンダが運用状態（スキッタ等を送信できる Standby 以上の設定）になるのは、最多で駐機数の約 3 分の 1 と見込まれる（離発着時空港面走行合計 30 分弱、スポットにて離発着準備 1 時間）。このとき、運用状態のトランスポンダは 42 台になる。

また、将来は 2 倍弱の離発着量実現のためスポット数を 300 まで増加させるとして、空港面には最多で 60 台の ATC トランスポンダが運用されると想定する。

このようにして予測計算した総数の変化比は、航空局の統計予測発表値（年率 2.9%増加）に従い設定したものとよく一致している。

この他に、機体の牽引移動も見られ、この牽引車両に ESNT を搭載すると想定する。導入初期は 10 台、その後、空港拡張に応じて 15 台を想定する。

空港面における信号の送信は、トランスポンダの規格に依存するため、運用中の機材についてその構成比（地上数／飛行数）を次の表のように想定する。想定においては、今後の航空機増加等を配慮し、新造機には新しい規格のトランスポンダが搭載されるとした。

運用トランスポンダ等の想定規格の構成
(数字は地上/飛行中)

ESNT 導入 シナリオ	ATCRBS モード A/C	モード S 機能有り			ESNT	総数	ACAS
		改訂 73	改訂 77	ES			
導入前: 2008	2/2	25/17	13/8	2/3	0/0	42/30	7.5/8
導入初期: 2012	1/1	22/12	10/7	9/12	10/0	52/32	9/8
普及期: 2025	1/1	22/12	10/7	28/25	15/0	76/45	13.5/12

また、着陸経路の航空機間隔や交通量の増加を考慮し、ACAS の覆域内にある他の ACAS 搭載機数も上記の表のように変化すると想定した。

空港周辺のその他のインタロゲータの運用については、次の表のように想定した。2000 年当時とは異なり、羽田空港 SSR は 2 基とも SSR モード S に換装されている。

空港周辺の運用インタロゲータの想定規格の構成

機器	台数	アンテナ ビーム幅	PRF	モードシーケンス
SSR	0	3 度	300	A, A, C
MSSR	エンルート 2	3	180	A, A, C
SSR mode S	空港内 2	3	180	A only/S, A only/S, C only/S
SSR mode S	エンルート 1	3	180	A only/S, A only/S, C only/S
ACAS MLAT	MLAT 導入後 は ACAS 数 +5	110		C only W/S, S
IFF 地上海上	11	3	300	2, A, C
IFF 機上	6	90	120	2, A, C

台数は 2009 年段階の値（軍用機器は推計値）

PRF はモード S ロールコール以外の信号について記載

ACAS は航空機数に比例して増加と想定

信号発生量の概算結果

同じ計算方法を羽田空港に当てはめて、シナリオに応じた 1030MHz 信号発生量を概算した結果を表に示す。

計算結果には、航空機密度の増加による ACAS 増加の影響が見られる。ACAS の増加の影響は、モード S 質問信号の増加、モード A/C only 質問信号を用いる Whisper/Shout 質問信号列による P1-P2 SLS 信号の増加やモード A/C only 質問信号の増加として観測される。しかし、モード A/C に解読される信号の増加も予想され、その主な原因は、低電力のモード S 信号や強力なマルチパス波の誤解読である。

また、送受信機等はすべて空港建築物の片方に集中している最悪の条件を想定している。実際には建物の遮蔽等があるため、これより少ない信号数になる。

また、新しいトランスポンダには低電力誤解読がみられないことが FAA から報告されているため、ESNT 普及期には誤解読がないと想定し MLAT を運用する場合についても計算も試みた。低電力のモード S 質問信号をモード A と誤解

読する現象については、RTCA/EUROCAEにて規格改定案がまとまり、ICAOでも改定案が検討されている。今回の計算では最悪の条件としてすべてのトランスポンダが誤解読することを想定しているが、実際の誤解読率はトランスポンダの機種や製造時期に依存しており、誤解読率は低下傾向にある。

トランスポンダが解読する質問信号の構成の変化

信号	モード A/C	P1-P2 SLS	モード A/C only	モード S
ESNT 導入前	170 Hz (46Hz)	419 Hz	12.8 Hz	37 Hz
	277 Hz (46Hz)	470 Hz	18.0 Hz	57 Hz
ESNT 導入初期	178 Hz (46Hz)	419 Hz	12.8 Hz	41 Hz
	288 Hz (46Hz)	470 Hz	18.0 Hz	138 Hz
ESNT 普及後	269 Hz (46Hz)	460 Hz	17.9 Hz	81 Hz
	503 Hz (46Hz)	512 Hz	22.2 Hz	257 Hz
ESNT 普及後 低電力誤解読無	- 150 Hz (46Hz)	- 512 Hz	- 22.2 Hz	- 257 Hz

() 内は低電力信号の誤解読がない場合：SSR 等が一定の想定のため一定
上段は MLAT なし、下段は MLAT 送信機を空港内で 5 台運用を想定

このときに予想される 1090MHz 信号発生数概算値は次の表のようになる。この表では、空港面のトランスポンダ等からの送信数を示す。また、半分のトランスポンダ等が十分低速度であると想定し、可変送信レートを適用した場合も計算した。どの値も、現在の欧米の値（モード A/C：約 16000Hz 等）より低い。

空港面のトランスポンダ等による 1090MHz 信号発生数の構成の変化

シナリオ	モード A/C	モード S short 捕捉スキッタ	モード S long、拡張スキッタ	
			可変送信無し	可変送信有り
ESNT 導入前 2008	4610 Hz	198 Hz	8.4 Hz	5 Hz
	7519 Hz	201 Hz		
ESNT 導入初期 2012	4101 Hz	203 Hz	81 Hz	48 Hz
	6643 Hz	205 Hz	81 Hz	48 Hz
ESNT 普及期 2025	11269 Hz	296 Hz	182 Hz	108 Hz
	11569 Hz	300 Hz	182 Hz	108 Hz
ESNT 普及期 低電力誤解読無	3152 Hz	297 Hz	182 Hz	108 Hz

上段は MLAT なし、下段は MLAT 送信機を空港内で 5 台運用を想定

この概算結果より、次のことがわかる。

- ・ 質問信号は機材導入や航空機の増加に伴い増加傾向にある
- ・ 空港面から送信されるモード A/C 応答信号は、誤解読を含む質問信号解読数急増を想定したにもかかわらず、改訂 77 対応のトランスポンダの構成比増加により影響が緩和される
- ・ ESNT は、モード S 拡張スキッタを送信するのみで応答信号を送信しないため、信号環境への負荷は限定的である

また、この概算のための計算方法に関する調査から、次の事がわかる。

- ・ 能動型 MLAT が持つ送信機 1 台が信号環境に与える影響は、飛行中の ACAS 送信機 1 台とおおむね同等である

一般に、空港面ではマルチパス対策のため可変閾値方式を採用した受信機を使用することになる。空港面では多数のマルチラレーション受信機が使用され、スキッタ送信機との距離比を大きく取ることができるため信号受信電力の比が大きくなる。このため、多数の拡張スキッタが混信しても最も大電力の信号を正常に受信することができる。

諸外国の信号発生量との比較

国際民間航空機関 ICAO に設置された航空監視パネル会議 Aeronautical Surveillance Panel (以下 ASP と略称) では、参加国から 1030/1090MHz 信号環境に関する検討結果や測定等による現状評価結果が寄せられている。このなかで、欧州が飛行実験により測定した信号環境に関する報告があった。

トランスポンダが解読する質問信号の構成の比較

信号モード	A / C	P1-P2 SLS	A / C only	S short 全機 (自機)
測定値：東京空域 誤解読含む	170Hz	400Hz	8Hz	25 (-) Hz
計算値：東京空域	178 Hz	419 Hz	12.8 Hz	41 (6.0) Hz
ESNT 導入初期	288 Hz	470 Hz	18.0 Hz	138 (9.3) Hz
測定値：米国空域 誤解読含む	平均 280Hz 最大 600Hz	データなし	データなし	平均 170 (-) Hz 最大 250 (-) Hz
測定値：欧州空域 誤解読量不明	平均 241Hz	データなし	データなし	- (15.9) Hz
ATC トランスポンダ 応答能力規定値	1200Hz	注 1	注 2	応答すべき質問が 50 Hz

注1：明確な限界の規定はないが、トランスポンダ占有率の余裕（応答動作に対応するために必要な占有率を差し引いた残り）が限界を決める要因になる

注2：モード S 機能を持つトランスポンダは、応答することもなく処理時間が短いため影響をほとんど受けない。モード S 機能を持たないトランスポンダは通常モード A/C 質問信号と同じ動作をする。

表のデータの根拠：

東京空域：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（測定データは 2000 年 11 月）

米国空域：FAA: “Low level mode S interrogations”, RTCA SC-209, WP05-13, February, 2008

欧州空域：Eric Potier: “Example of mode S transponder activities measured in Europe”, ICAO/ASP/TSG WP06-14, February, 2009（測定データは 2008 年 9 月）

これらを比較すると、マルチラレーションや ESNT 導入後の信号環境は、空港面建築物による遮蔽を無視する最悪の条件であっても、現在の欧米の信号環境と同等である。トランスポンダの応答能力は、モード A/C 質問信号に対して毎秒 1200 回、モード S 質問信号に対して毎秒 50 回であり、十分な余裕がある。モード S 質問信号については、全質問信号の中で応答すべきものは一部であり、表では自機と記載した数である。また、応答信号の発生数も、多めに見積もっても現在の欧米の信号環境と同等（フランクフルト空域ではモード A/C が 16000Hz 等）までの増加であり、無線機器の正常な運用を期待できる。

以上のように、将来の日本の信号環境でも、信号発生数は増加するが無線機器の正常な動作を期待できる範囲である。

また、ATCRBS 質問信号解読数の多くは低電力のモード S 質問信号の誤解読によるものであり、RTCA や ICAO でもこの問題を解決する規格改定を進めている。現在も一部のトランスポンダにその症状が見られるが、今後はトランスポンダの世代交代が進むにつれてその影響は無視できるようになると期待され、ここに計算した信号環境より良好な環境になると見込まれる。

今後の無線機器の導入運用に関する考察

SSR などインタロゲータはトランスポンダの応答信号の検出率が 95% 以上にて円滑に動作し十分な性能を発揮できる。多くの機材は 90% 程度の応答率であっても十分な情報を利用者に提供できるが、ここでは余裕を見て応答検出率の劣化が 5% 以下であることを目安とする。(ICAO Doc.9684: Manual of the Secondary Surveillance Radar (SSR) Systems, 2.2.1.)

一般に、応答信号の受信検出率は、受信信号電力が受信機感度を超える確率

(=ATC トランスポンダにて質問信号受信電力が受信機感度を超える確率×インタロゲータにて応答信号受信電力が受信機感度を超える確率) と、ATC トランスポンダが他の信号の処理に占有されていない確率 (= 1 - トランスポンダ占有率) の積になる。

付録参考資料に示したように、受信信号電力が受信機の信号検出閾値を超える確率は十分1に近くなるよう機器は設計運用されている。このため、トランスポンダ占有率に着目する必要がある、SSR 等が十分な性能を発揮するためには、その値を5%以下に保つことが望ましい。

トランスポンダ占有率は、受信した質問信号や抑圧信号などの受信解読とこれらへの対応動作に必要な時間の和である。これらの対応動作に必要な時間は規格に定められており、その詳細も ICAO マニュアルにも記載されている (ICAO DOC 9684 - Manual of the Secondary Surveillance Radar (SSR) systems, chapter 8, table 8-1 and 8-2)。このため、ATC トランスポンダが受信解読する信号の種類毎に発生数を求め、これに種類毎の対応動作時間をかけることによりトランスポンダ占有率を概算できる。

現状のトランスポンダ占有率は、表のように予想される。トランスポンダ占有率は、トランスポンダの動作に依存するため、ATC トランスポンダの規格ごとに求めた。表のように、5%までには十分な余裕があり、特に、低電力質問信号の誤解読をしない機種種の ATC トランスポンダには誤解読による誤応答の動作負荷がないため余裕のある環境であることがわかる。

トランスポンダ占有率 (羽田空港周辺における現状の最大値)

トランスポンダの規格	ATCRBS	Amendment 77 前	Amendment 77 以降	ADS-B-OUT 機能付き
現状	3.7 %	4.0 %	4.0 %	4.1 %
	2.5 %	2.5 %	2.5 %	2.6 %

上段：低電力質問信号の誤解読有り、下段：低電力質問信号の誤解読無し

なお、ACAS については、一緒に搭載されているモード S トランスポンダから観測して、占有率が2%以下になるように質問信号の送信動作が自動制御されている (ICAO ANNEX 10, Volume IV, 4.3.2.2 INTERFERENCE CONTROL)。このため、ACAS を搭載する航空機数が増加しても、他の SSR 等の監視性能に与える影響は限定的であり、運用に影響が出ないよう設計されている。

また、従来型 SSR 等を1台増設することによるトランスポンダ占有率への影響は、次の表のように予想される。一般に、サイドローブ抑圧 (SLS) のための信号が受信される範囲ではトランスポンダ占有率への影響が大きいが、SSR や

IFF が密集運用されない限りこのような SLS 覆域の重複は発生しない。

なお、この表には SSR モード S による影響を記載していない。SSR モード S は、周辺で運用されるモード S トランスポンダの数に応じて質問信号発生数が変化する。さらに、情報交換機能（航空機が持つ情報のダウンリンク等）をどこまで活用するかに応じてトランスポンダ占有率への影響が大きく異なる。このため、増設 1 台あたりのトランスポンダ占有率への影響は導入時の運用方式を配慮して算出する必要がある。ただし、監視のみの通常運用ではモノパルス SSR とほぼ同等と見込まれる。

MLAT によるトランスポンダ占有率への影響は、空港に設置されるモノパルス SSR (SLS 覆域内) より小さいと予想される。MLAT インタロゲータ 5 台設置しこれらすべての信号を受信する例（空港上空を低空飛行する航空機）でも、従来型（スライディング・ウインドウ処理型）の SSR2 台分と同程度と予想される。空港面においては、建物等の遮蔽により MLAT インタロゲータの内 2～3 台分の信号しか受信できないと見込まれるため、この表の値より影響が小さいと予想される。

1 台増設することによるトランスポンダ占有率への影響

トランスポンダ の規格	ATCRBS	Amendment 77 前	Amendment 77 以降	ADS-B-OUT 機能付き
ターミナル SSR	0.33 %	0.33 %	0.33 %	0.33 %
	0.013 %	0.013 %	0.013 %	0.013 %
エンルート SSR	0.21 %	0.21 %	0.21 %	0.21 %
	0.013 %	0.013 %	0.013 %	0.013 %
ターミナル SSR モノパルス型	0.20 %	0.20 %	0.20 %	0.20 %
	0.008 %	0.008 %	0.008 %	0.008 %
エンルート SSR モノパルス型	0.13 %	0.13 %	0.13 %	0.13 %
	0.008 %	0.008 %	0.008 %	0.008 %
MLAT 注 1	0.12 %	0.11 %	0.11 %	0.11 %
	0.12 %	0.11 %	0.11 %	0.11 %

上段：SLS 覆域内、下段：メインビーム覆域内（SLS 覆域外）

PRF：従来型 SSR=300Hz、モノパルス型=180Hz を想定

トランスポンダは飛行中と想定

注 1：モード S 質問信号の発生数は周辺で運用されるモード S トランスポンダ数（表では 100 台想定）に応じて変化するため、この表の値も変化する

まとめ

動作原理を考えると、能動型（インタロゲータを持つ）の空港面マルチラレーションは ACAS とほぼ同じ質問信号発生数を持つため、1030MHz 信号環境に与える影響は MLAT インタロゲータ 1 台あたり飛行中の ACAS 1 台と同じである。

ESNT は応答機能を持たないため、スキッタの送信のみである。このため、ATC トランスポンダのように 1030MHz 質問信号環境の影響を受けることなく、1090MHz 信号環境に与える影響の予測も容易で限定的である。

また、新しい世代の ATC トランスポンダは各種の不要送信の軽減が期待され、航空機増加に伴う ATC トランスポンダ増加が信号環境に与える影響は従来の機種より小さく緩和される。このため、1090MHz 信号環境劣化の速度は従前ほど速くはないと期待される。

関連無線機器が多く日本で最も信号発生量が多いと考えられる羽田空港周辺において今後の航空機数の増大を想定しても、1030/1090MHz 信号環境に与える MLAT や ESNT の影響は限定的である。最悪の条件でも現在の欧米空域の信号環境と同等程度までと予想でき、無線機器の正常な運用を期待できる。

このため、我が国に MLAT や ESNT を導入しても 1030/1090MHz 信号環境に有害な影響を与えることなくその便益を教授できるものと期待される。

付記：ここに記載した各種の計算値は、現段階において得られている実験結果と計算結果が一致するよう各種無線機器の運転パラメータや混信の影響を示すパラメータを推定して得ている。測定結果によれば、無線機器は必要に応じて通電運用される機材もあり、常に一定の運用状態にあるわけではない。このため、想定とは異なる運用機器数や運転パラメータが選択された場合には、計算結果に誤差が発生する。

マルチパスの影響

マルチパスの発生によりモード S 拡張スキッタ信号に干渉する信号の統計的性質が変化する（小瀬木：「空港面のモード S 拡張スキッタ信号環境」、電子情報通信学会総合全国大会、2008 年 3 月）。

- ・ 反射物体により遮蔽される空間にある信号源からの干渉が減少
- ・ 遮蔽される信号源の代わりにマルチパス反射と等価な信号源が発生
 - 信号源の空間一様分布を想定すると、マルチパス反射と等価な信号源は遮蔽された信号源と同数
 - 信号源の空間分布に著しい偏りがある場合、受信機から見た信号源の数はマルチパスにより最大 2 倍になる
- ・ 目的の信号に干渉する信号の統計的性質がマルチパスにより変化
 - マルチパスがない場合、干渉信号数はポアソン分布で近似可能
 - マルチパスがある場合、これが目的の信号にほぼ確実に干渉
- ・ 干渉波の電力分布はマルチパスにより大きく変化する
 - マルチパスがない場合の干渉信号数の受信電力分布
 - ◇ 空間に一様分布する信号源からの干渉信号数は受信電力に反比例
 - ◇ 離発着経路に航空機が 1 列に並ぶ場合など距離一様分布する信号源からの干渉信号数は受信電力の平方根に反比例
 - マルチパスがある場合の干渉信号数の受信電力分布
 - ◇ 遮蔽されない信号源からの干渉信号数の受信電力分布はマルチパスがない場合と同じ
 - ◇ マルチパス波の受信電力分布は直接波からの遅延時間と反射物体の反射係数の関数
 - ◇ 直接波に対するマルチパス波の受信電力の減衰量は、最も少ない場合で約 6dB（RTCA の DME 規格、ENRI 測定で確認）
- ・ 受信処理方式によりモード S 拡張スキッタの解読性能に大差
 - 固定閾値ではマルチパス干渉により高率で解読不能
 - 直接波受信電力から 6dB 下までの間に閾値を動的に設定する可変閾値ではマルチパス干渉の影響を受けにくい（ACAS 受信機に使用されている既存技術）

トランスポンダが空港面にて高密度運用される影響

ADS-B やマルチラレーションなどの目的でトランスポンダが空港面におい

て運用される場合、次のような動作をする（ICAO ANNEX10, Volume IV）。

- ICAO ANNEX10 amendment77以降のモード S トランスポンダの場合
 - モード S 捕捉スキッタを送信
 - 送信機能を持つ物はモード S 拡張スキッタを送信
 - モード S ロールコール（個別質問）に応答
 - 在海上状態を判別し、モード S オールコールやモード A/C などには応答しない
- ICAO ANNEX10 amendment77以前のモード S トランスポンダの場合
 - モード S 捕捉スキッタを送信
 - モード S ロールコール（個別質問）に応答
 - 在海上状態を判別できず、モード S オールコールやモード A/C などにも応答
- モード A/C トランスポンダの場合
 - 全てのモード S スキッタおよびモード S 応答信号を送信しない
 - 在海上状態を判別できず、モード A/C 応答

このため、空港面においては次のような信号送信が考えられる。

- すべてのモード S トランスポンダより
 - ACAS からのモード S ロールコールへの応答
 - SSR モード S からのモード S ロールコールへの応答
 - モード S 捕捉スキッタの送信
- Amendment 77 以降に対応するモード S トランスポンダと ESNT より
 - モード S 拡張スキッタの送信
- Amendment 77 以降には対応しないモード S トランスポンダより
 - SSR モード S からのモード S オールコールへの応答
- Amendment 77 以降には対応しない全ての ATC トランスポンダより
 - SSR モード S からのインターモード質問への応答
 - ACAS からの Whisper/Shout 質問への応答
 - 従来型 SSR 等からのモード A/C 質問への応答

受信信号電力が受信機の信号検出閾値を超える確率

受信信号電力が受信機感度を超える確率は、リンクマージン[単位は dB]（＝受信信号電力[dBm]－受信検出閾値 [dBm]）と受信性能の確率分布を用いて算出できる。リンクマージンの値から、受信信号が受信機の信号検出閾値を超える確率を求めることができる。

リンクマージンの算出に必要な受信信号電力 P_r の計算には次の式が用いられる。

$$Pr = Pt Gt Gr \left\{ \frac{\lambda}{4 \pi R} \right\}^2 / L$$

ただし、送信電力 Pt、送信アンテナ利得 Gt、受信アンテナ利得 Gr、電波の波長 λ、送受信アンテナの距離 R、伝搬吸収損失等による減衰 L を用いている。

1030 MHz 質問信号リンクおよび 1090MHz 応答信号リンクに関する計算結果を表に示す。表のように、通常は 8dB を超えるリンクマージンが設定されている。

1030 MHz 質問信号リンクの計算結果

送信機	エンルート型 SSR	ターミナル型 SSR	ATC トランスポンダ
送信機出力	1.5 kW (64 dBm)	0.5 kW (57 dBm)	0.25 kW (54 dBm)
送信アンテナ系利得	26 dBi	26 dBi	0 dBi
監視距離	250 NM	100 NM	250 NM
信号波長 (周波数)	0.291 m (1030 MHz)	0.291 m (1090 MHz)	0.275 m (1090MHz)
監視距離における伝搬損失	- 146.0 dB	- 138.0 dB	- 146.0 dB
大気吸収損失	1.5 dB	1.5 dB	1.5 dB
受信アンテナ系利得	0 dBi	0 dBi	26 dBi
信号受信電力	- 59.8 dBm	- 56.8 dBm	-68.0 dBm
受信信号検出閾値 (最悪値)	ATC トランスポンダ: - 68.0 dBm	ATC トランスポンダ: - 68.0 dBm	SSR: - 78dBm
リンクマージン	8.2 dB	11.2 dB	10.0 dBm

SSR や ATC トランスポンダの受信信号電力の変動に最も大きく影響する要素は、ATC トランスポンダ用に航空機に搭載されたアンテナの利得変動である。航空機搭載アンテナの特性は、アンテナ周辺の機体構造による遮蔽や反射により、複雑な指向性になることが知られており、測定結果も報告されている (Harmann: “Effects of RF Power Distributions on BCAS Link Probability”, FAA-RD-77-78 (AD-A044312), June, 1977)。最近の機体については、航空機搭載アンテナを使う ACAS と ATC トランスポンダの間ではリンクマージン平均 2.2dB、分散 3.4dB になることが報告されている (Harmann: “Cockpit Display of Traffic Information (CDTI) Feasibility of Long Range Air-toAir Surveillance”, MIT

Lincoln Laboratory, October 10, 1996)。このとき、送信側と受信側双方のアンテナがこの分散に同じ寄与をする場合、それぞれの分散が 2.4dB になる。その確率分布は正規分布で良好に近似されるため、8.2dB のリンクマージンは標準偏差 2.4dB の 3.42 倍である。このとき、受信信号電力 P_r が受信機の信号検出閾値を超える確率は 0.9997 である。

このように、SSR などインタロゲータと ATC トランスポンダの間は、必要とする覆域内にて十分な信号受信電力が得られるようリンクマージン（受信機感度に対する受信電力の比）が設定されている。以上の計算結果により、公称覆域内で質問信号や応答信号の受信信号が受信機感度を超える確率は 1 で近似できる。

以上