

9. マルチパス干渉が信号環境に与える影響

機上等技術領域 ※小瀬木 滋，大津山 卓哉，古賀 禎 通信航法監視領域 住谷 泰人

1. はじめに

信号発生数や干渉発生状況などを示す信号環境は、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。

1090MHz 帯域の信号環境は、現在および将来の航空監視システムの性能に影響を与える。この帯域は、現在は航空機に搭載される ATC トランスポンダや IFF トランスポンダの応答信号に使用されている。将来は、モード S 拡張スキッタ信号など次世代監視システムのための信号にも使用される^[1]。

1090MHz の信号の多くは、1030MHz の質問信号への応答信号である。質問信号は、二次監視レーダ SSR (Secondary Surveillance Radar)、航空機衝突防止装置 ACAS (Airborne Collision Avoidance System)、MLAT (Multilateration)、敵味方識別装置 IFF (Identification Friend or Foe) などのインタロゲータが送信する。

質問信号には、モード S 機能を持つ ATC トランスポンダ（以下、モード S トランスポンダと略称）のためのモード S 信号と、モード S 機能を持たない ATC トランスポンダ（以下、モード A/C トランスポンダと略称）との共用性を保つためのインターモード信号や従来から用いられているモード A/C 質問信号がある^[1]。これらの信号設計では、不要な応答信号送信を防止し信号環境負荷を軽減するよう配慮している^[2]。

しかし、実際は設計意図通りの信号環境が実現されていない。無線機器の想定外の動作^[3]や、多様な原因による信号波形の歪みが ATC トランスポンダの応答動作に影響している^[4]。

マルチパスを伴う質問信号が ATC トランスポンダに誤解读され、余剰な応答動作や誤ったモードの応答信号送信など、想定外の信号発生の原因になる場合がある^[5, 6, 7]。このため、信号環境改善策が ICAO 等で議論されている^[8]。本稿では、飛行実験によりその発生実態を測定した結果を基に、信号環境の予測結果に与えるマルチパスの影響やその補正方法を報告する。

2. 1030MHz 質問信号検出処理

2.1. 1030MHz 質問信号

この帯域内では軍用の信号も使用されているが、ここでは民間航空用施設近傍の信号環境に着目し、民間用質問信号についてまとめる。

図 1 にインターモード信号を示す。P1 と P3 によるパルスペアを用いる通常モード A/C 質問信号に、P4 パルスが追加されている。

これらの質問パルスを送信するビームアンテナのサイドローブ放射より大きな受信電力となるように、別の利得指向性を持つアンテナから P2 パルスが放射される。ATC トランスポンダは、P1 と P2 の電力を比較することにより、サイドローブ方向の質問信号への応答を抑圧する SLS (Side Lobe Suppression) 機能を実現し、偽像表示の防止や信号環境改善に寄与している。

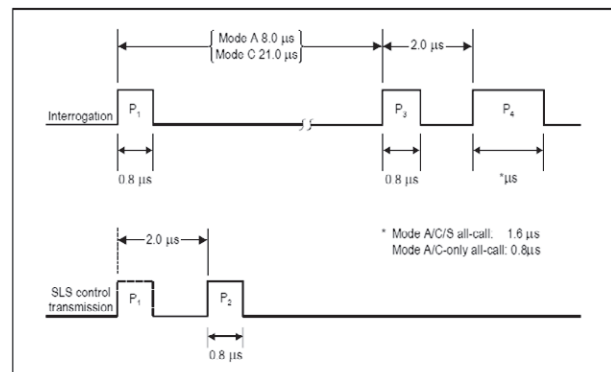


図 1. インターモード質問信号^[1]

図 2 にモード S 質問信号を示す。P1-P2 パルスペアにより SLS 機能が働き、モード A/C およびモード S トランスポンダのモード A/C 応答は抑圧される。さらに、モード S トランスポンダは、DPSK 変調された P6 パルス内に適切なタイミングで同期位相反転（以下 SYNC と略称）を検出したときはモード S 質問信号とみなす。

モード S 質問信号の SLS 機能は P5 を用いて実現される。十分な電力の P5 が P6 と同時に受信された場合、その干渉により同期位相反転を検出できないため応答を抑圧できる。

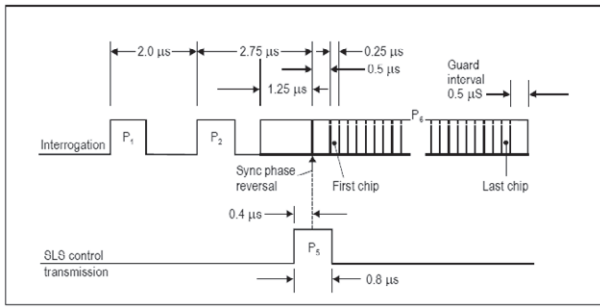


図2. モード S 質問信号^[1]

2.2. 質問信号検出処理

ATC トランスポンダの信号検出閾値 MTL (Minimum Triggering Level) を超える信号に対する検出処理^[1]を表 1～表 3 に示す。

表1. モード A/C 信号処理条件

処理	前縁間隔誤差	パルス電力
応答 >90%	P1~P3:<±0.2μs	P1-1dB<P3<P1+3dB
	P1~P2:>±0.7μs	P2<P1-9dB
無視	P1~P3:>±1.0μs	-
抑圧	P1~P2:<±0.15μs	P2>P1

表2. インターモード信号処理条件

処理	間隔誤差	パルス電力
非 P4	P3LE~P4LE:>±0.3μs	-
	-	P4<P3-6dB
P4long	P3LE~P4TE:<±0.15μs	P4≥P3-6dB
非 P4long	P3LE~P4TE:>±0.3μs	P4≥P3-6dB

P1, P2, P3 はモード A/C 応答の条件を満たす
LE / TE: パルス前縁 / 後縁のタイミング

表3. モード S 信号処理条件

処理	間隔誤差	パルス電力
S	P6LE-SYNC:<±0.05μs	-
非 S	P6LE-SYNC:>±0.2μs	-

P1, P2 は表 1 のモード A/C 抑圧の条件を満たす

モード A/C トランスポンダの信号検出の規定は、無視または抑圧の判定基準を満たさない限り応答を認めている。このとき、P1 と P3 が MTL を超える受信電力と正しいパルス間隔を持つ限りトランスポンダは応答してもよい。このため、P2 や P3 の検出タイミングと P1 と P2 の電力比により応答、抑圧、無視等の動作が決まる。

モード S トランスポンダの信号検出の規定は、

モード A/C トランスポンダのものにインターモード検出判定(表 2)とモード S 検出判定(表 3)が追加されている。

インターモード信号検出判定では、P3 と P4 パルスの電力比と検出タイミングが判定基準となる。非 P4 パルスの条件を満たさないとき P4 パルスが受信されたとし、表の P4 パルス幅の判定処理が行われる。P4long と非 P4long の判定基準の間の条件でも P4long と判定されてモード S 応答信号が送信される場合がある。

モード S トランスポンダは、表 1 の P1 と P2 による抑圧条件を満たすと、表 3 の処理を開始する。P6 と同期位相反転 SYNC の検出タイミングによりモード S 信号検出の可否が決まる。

これらの検出処理方式を考慮し、マルチパス干渉の影響を考慮することができる。

3. マルチパス干渉の影響

3.1. モード A/C 質問信号

無視または抑圧条件のモード A/C 質問信号について、表 4 と表 5 のように、干渉の遅延時間に応じて応答信号送信や抑圧の可能性がある。ただし、表の M はマルチパス受信電力である。

表4. P2 単独パルス等無視条件の場合への干渉

遅延[μs]	受信電力	影響
> 0.7 : P2 有 全 : P2 無	M> MTL	下記以外は干渉する信号に応じた動作
< 0.7	M> MTL	抑圧: P1-P2
7.0~9.0	M> MTL	モード A 応答: P2-P2
9.0~11.0	M> MTL	モード A 応答: P2-P1
20.0~22.0	M> MTL	モード C 応答: P2-P2
22.0~24.0	M> MTL	モード C 応答: P2-P1

表5. モード A/C の抑圧条件信号への干渉

遅延[μs]	受信電力	影響
1.2 ~ 1.7	M> MTL	応答: P2LE 阻害

モード A/C 応答信号を送信させる条件の質問信号については、表 6 のように、応答率劣化または解読モード誤りの可能性がある。表の影響の欄にて、A:はモード A/C トランスポンダ、S:はモード S トランスポンダへの影響を示す。特に指定しないものは共通の影響である。

表6. モード A/C 応答条件信号への干渉

遅延[μs]	受信電力	影響
1.7~2.3	P1-9dB< M<P1-6dB	SLS 抑圧: P1-P1
	P3-6dB< M<P3 M>MTL	A: SLS 抑圧: P1-P1 S: P4 抑圧: P3-P3
7.0~9.0	M> MTL	モード A 応答: P1-P1
12.0~14.0 モード C 質問のみ	M> MTL	A:機種依存:P1-P1-P3 S: モードC 応答正常

3.2. インターモード質問信号

P2 単独パルスなど無視される条件の場合は、モード A/C 質問信号と同じ表 4 を適用できる。
インターモード抑圧条件信号への干渉が P2 と P4 の両方の検出を阻害する場合、表 7 のようにモード A/C 信号として処理される。P4 幅が変化すると不要なモード S 応答も発生し得る。

表7. インターモード抑圧条件信号への干渉

遅延[μs]	受信電力	影響
1.2~1.7	M> MTL	モード A/C 応答: P2LE

表8. インターモード信号への干渉

遅延[μs]	受信電力	影響 S:
0.5~0.8 非 P4long	M> P3-6dB	モード S 応答: P4 幅
1.7~2.3	P1-9dB< M< P1-6dB M>MTL	SLS 抑圧: P1-P1
	P3-6dB< M< P3 M>MTL	モード A/C 応答: P2LE
2.5~2.8 非 P4long	M> P3-6dB	モード S 応答: P4 幅
以下は表 6 と同じ		

モード A/C トランスポンダは表 6 と同じ

3.3. モード S 質問信号

モード S 質問信号では、P2, P6LE, 同期位相反転（以下 SYNC）の検出に着目する必要がある。モード A/C トランスポンダには抑圧条件を定める P2 の検出のみが影響するため、表 5 と同じである。モード S トランスポンダへの影響を表 9 に示す。P6LE 検出の阻害による抑圧や、P2 検出阻害によるモード A 応答の可能性もある。また、DPSK 変調された信号は自身より低

電力の干渉に強いが、マルチパス干渉と他の干渉の合計電力が直接波に近い場合もあり、このとき符号解読誤り率が増加する。

表9. モード S 質問信号への干渉

遅延[μs]	受信電力	影響
0.5~1.2 2.5~3.2	M> MTL	S: 非 S: P6LE
1.2~1.7	M> MTL	モード A 応答: P2LE
1.75~19.0	M~P6	解読率劣化: DPSK

4. マルチパスの発生状況

4.1. マルチパス受信電力と遅延時間

仙台空港面で観測されたマルチパス波の受信電力の関係を図 3 に示す。直接波の受信電力 Pd と伝搬時間 Td, マルチパス波の受信電力 Pm と伝搬時間 Tm = Td + t, 反射面の減衰量 Γ を用いると、次の関係がある。

$$Pm / Pd = \Gamma (Td / Tm)^2 = \Gamma / (1 + t / Td)^2$$

図 3 の仙台空港の例では Γ = 9dB とした計算とよく一致するが、最も減衰が少ない事例では Γ = 6dB であり、多くの国際規格で想定されている反射減衰量想定最悪値と一致する。

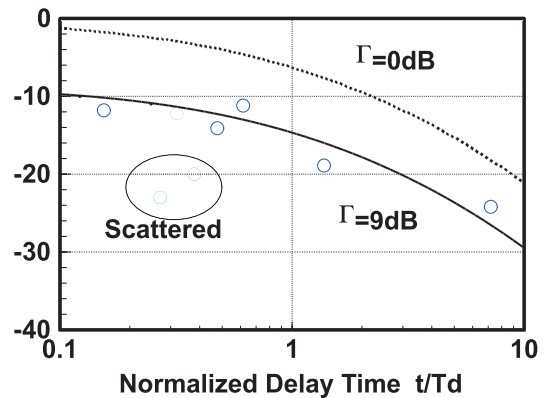


図3. 伝搬遅延と電力の関係

減衰量が t / Td の関数になっているため、直接波に対するマルチパス波の遅延 t が同じ値でも Td が長い遠方では減衰比 Pm / Pd が小さい。

4.2. 有害な反射点の数

多くの空港では滑走路を取り囲むように、反射平面を持つ建物が見られる。また、燃料タンクなど円柱形の建物は、反射後の波面が広がる

ため減衰 Γ が大きい反射方向の範囲が広い。伝搬路を光線近似すると、多くの空港では3~4カ所の反射点がみつかる。受信点が建物等に近いう場合は、建物の角からの回折波も考慮すべきである。伝搬遅延時間は幾何学的に容易に算出でき、表4~表9を用いて、影響する可能性がある有害な反射点を絞り込むことができる。

4.3. 誤解読される信号数と信号環境予測補正

誤解読される信号数は、上記の伝搬時間の条件の他に、質問信号発生数とマルチパス波の受信電力の条件を考慮して求めることができる。

例えば、SSR アンテナ利得指向性からP1パルスのマルチパス波がMTLを超える方向範囲率 R_{az} が求められ、質問送信レート N を用いることで毎秒の干渉発生数は $I_m = R_{az} N$ と算出できる。P2LE検出を阻害する干渉（表5）となる場合、 $R_{az}=0.15$ 、 $N=300$ の例では、マルチパス遅延時間を満たす位置関係にあるトランスポンダ1台あたり $I_m = 45\text{Hz}$ のモードA/C応答信号を送信する可能性がある。これは通常の質問ビーム内応答数（毎秒平均約3Hz）の約15倍である。この現象は飛行実験等により確認され、仙台空港ヘリパッドでホバリングするヘリコプタから大量応答が観測される事例がある。

以上の例のようにマルチパス干渉の影響を計算すれば、空港用SSR周辺などの信号環境予測値に残る大きな誤差を補正可能である。

5. 今後の課題

5.1. 信号環境予測精度の改善

信号環境予測においては、マルチパス伝搬路モデルを含む伝搬モデルを用いて受信信号波形を予測し、ATCトランスポンダ等の動作を予測することで予測精度改善の可能性がある。現在、信号環境予測ソフトウェアを改良中である。

5.2. マルチパス対策

回折板を有害な反射点に置いて入射角と異なる反射角に反射させるなど、既に開発済みのマルチパス対策技術を活用できる^[9]。この他に、建物の形状調整、質問ビームパターンの調整、ATCトランスポンダや信号の規格変更などの可能性があり、今後の検討課題である。

7. まとめ

本報告では、マルチパスを伴う質問信号がATCトランスポンダに誤解読される現象と、これが1090MHz信号環境に与える影響について示すとともに、今後の課題を紹介した。

謝辞

飛行実験や空港面実験は、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] ICAO: "Manual of the Secondary Surveillance Radar (SSR) Systems", ICAO Doc. 9684, chapter 8, First ed., 1997
- [3] 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
- [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] 小瀬木他: 「1030MHz帯の電磁信号環境の予測手法開発」, 第3回電子航法研究所研究発表会予稿集, 平成15年6月
- [6] 小瀬木他: 「将来の航空監視技術と信号環境の変化」, 第9回電子航法研究所研究発表会予稿集, 平成21年6月
- [7] 小瀬木: 「航空機衝突防止装置の受信信号で観測された誤応答」, 電子航法研究所報告, No.63, 1989年12月
- [8] Tom Pagano, et.al.: "A Potential Source of 1090 MHz Interference: Wide P4 Reply from ATCRBS Whisper-Shout Interrogations", ASP TSG Meeting, January 2010
- [9] 水城: 「反射波の透過型消去法とレーダ偽像防止への応用」, 電子航法研究所報告, No.47, 1984年12月