

信号環境の良否判定手法参考資料

電子航法研究所 小瀬木 滋

信号環境の良否判定

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。

受信信号電力が受信機感度を超える確率

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。

$$P_r = P_t G_t G_r \left\{ \frac{\lambda}{4 \pi R} \right\}^2 / L$$

ただし、送信電力 P_t 、送信アンテナ利得 G_t 、受信アンテナ利得 G_r 、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。

1030MHz 質問信号リンクに関する計算をすると、次の結果が得られる。標準的なエンルート用 SSR 送信機と ATC トランスポンダを想定し、送信電力 $P_t = 1.5\text{kW}$ 、送信アンテナ利得 $G_t = 26\text{dBi}$ 、受信アンテナ利得 $G_r = 0\text{dBi}$ 、1030MHz の電波の波長 $\lambda = 0.291\text{ m}$ 、送受信アンテナの距離 $R = 250\text{ NM}$ 、伝搬吸収損失等による減衰 $L = 1.5\text{ dB}$ とすると、トランスポンダアンテナ出力における受信電力 $P_r = -59.8\text{ dBm}$ となり、リンクマージンは 8.2 dB である。従来型の ATC トランスポンダが規格内でもっとも受信閾値 (MTL) が高い電力 (もっとも低感度) になった場合は -68 dBm である。また、ターミナル用 SSR として送信電力を $P_t = 0.5\text{kW}$ に低減しても、 $R = 100\text{ NM}$ では $P_r = 56.8\text{ dBm}$ となり、リンクマージンは約 11 dB である。このように、通常は 8 dB を超えるリンクマージンが設定されている。

1090MHz 応答信号リンクに関する計算をすると、次の結果が得られる。1030MHz 質問信号リンクに関する計算をすると、次の結果が得られる。標準的な ATC トランスポンダ送信機と SSR を想定し、送信電力 $P_t = 250\text{ W}$ 、送信アンテナ利得 $G_t = 0\text{dBi}$ 、受信アンテナ利得 $G_r = 26\text{dBi}$ 、1090MHz の電波の波長 $\lambda = 0.275\text{ m}$ 、送受信アンテナの距離 $R = 250\text{ NM}$ 、

伝搬吸収損失等による減衰 $L = 1.5 \text{ dB}$ とすると、SSR アンテナ出力における受信電力 $P_r = -68.0 \text{ dBm}$ となる。従来型の SSR がもっとも受信閾値 (MTL) が高い電力 (もっとも低感度) になった場合は -78 dBm である。このように、通常は 10 dB を超えるリンクマージンが設定されている。

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 2.2 dB 、分散 3.4 dB 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-to-Air 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 2.4 dB 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、 8.2 dB のリンクマージンは標準偏差 2.4 dB 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。

トランスポンダ占有率

トランスポンダは、受信信号の解読結果に応じて、応答信号の送信、受信機能の一時停止 (抑圧)、受信感度の低下などの動作をする。また、DME, ACAS, ATC トランスポンダなど近い周波数を使う航空機搭載無線機器は、ARINC-720 に規格が記載されている相互抑圧バスを用いて信号送信中に他の機材の受信信号処理を停止させ、相互干渉を防止している。これらの影響により、ATC トランスポンダは先に入力された信号等の処理により占有されている時間があり、その時間率をトランスポンダ占有率という。任意の信号がトランスポンダに受信処理される確率は、 $(1 - \text{トランスポンダ占有率})$ に等しくなる。

トランスポンダ占有率は、トランスポンダに応答や抑圧動作をさせる 1030 MHz 帯域の信号の受信解読状況と他の搭載品から送られてくる抑圧信号の発生量で決まる。

SSR や ACAS などのインタロゲータの数 (密度) が少ないほどトランスポンダに動作を要求する信号が減少し、トランスポンダ占有率が低くなる。

トランスポンダ占有率の計算においては、 1030 MHz 帯域の信号発生数そのものではなく、ATC トランスポンダがその信号をどのように解読するかを知る必要がある。このためには、

各種の誤解読現象も正確に評価する必要がある。

搭載品の相互抑圧によるトランスポンダ占有時間

DME によるものは、初期捕捉動作における一時的な増加を除き一般に 0.1%を超えることは希であり無視できる。

ACAS は周辺を飛行する ACAS の数を常に計測し、その結果を用いて質問信号送信数や送信電力などを自動制御 (ACAS 干渉制限方式: ACAS Interference Limiting, ICAO Annex 10, Volume IV) している。これにより、自機搭載の ACAS による相互抑圧バスによる占有時間と他機搭載の ACAS からの質問信号等による占有時間の合計が 2.0%を超えないようになる。

このため、SSR 等、その他のインタロゲータによる占有時間が 3%を超えないようにする必要がある。

インタロゲータの信号によるトランスポンダ占有時間

各種の信号によるトランスポンダ占有時間は、信号受信開始から信号への反応を開始するまでの時間 (reference time)、応答信号の送信や抑圧など信号への反応にかかる時間、反応後に正常動作に復帰するまでの時間 (recovery time) などの和である (ICAO DOC 9684 - Manual of the Secondary Surveillance Radar (SSR) systems, chapter 8, table 8-1 and 8-2)。

十分な電力の信号を受信した場合のトランスポンダの応答率 r は、他の信号を処理することに占有されている時間率を w とした場合、

$$r = 1 - w$$

となる。ただし、

$$w = 1 - \prod_{n=1}^N (1 - w_n) \quad \prod_{b=1}^B (1 - w_b)$$

w_n は、インタロゲータ n がこのトランスポンダを占有する時間率である。

$$w_n = \sum_{s=1}^S w_{ns}$$

w_{ns} は、インタロゲータ n が送信する信号 s を受信しその弁別処理や信号に応じた応答をするために必要な時間率である。ただし、

$$w_{ns} = T_{ns} N_{ns}$$

T_{ns} は、信号の種類とトランスポンダの機能に応じて決まる信号あたりの占有時間である。

N_{ns} はインタロゲータ n が信号 s を送信する毎秒の回数である。

なお、上記の計算において、ATC トランスポンダに接続される相互抑圧バスの信号についても同様に計算可能である。wb は、相互抑圧バスに接続されている搭載装置 b がこのトランスポンダを占有する時間率である。

wb は、搭載装置 b がこのトランスポンダを占有する時間率である。

$$wb = \sum_{s=1}^S wbs$$

wbs は、搭載装置 b が相互抑圧バスに送信する抑圧信号 s を受信しその種類に応じた抑圧動作の時間率である。ただし、

$$wbs = Tbs Nbs$$

Tbs は、搭載装置 b が送信する信号の種類で決まる信号あたりの占有時間である。Nbs は搭載装置 b が信号 s を送信する毎秒の回数である。

これまで計算の容易な単純なポアソン分布を用いる占有時間率の計算が行われてきているが、この方法を用いれば同じ送信機から送信され重なり得ない信号の配慮が可能であるため計算結果の精度向上を期待できる。

各種インタロゲータによる標準的なトランスポンダ占有率

計算結果を表に示す。ただし、運用環境によりマルチパスの影響により信号の誤読が発生し、この値に若干の誤差が生じる。また、トランスポンダの機種によっては低電力の信号を誤読して不要な動作をする場合があり、この現象も誤差の原因になる。

誤差の大きさについては研究が各国で進められているところであるが、ここに記載した値は機材が正常動作の場合の目安である。

質問信号によるトランスポンダ占有率概算値

モード S トランスポンダ 100 台運用の場合

地上のトランスポンダ

	ATCRBS	mode S 改訂 77 前	mode S 改訂 77 対応	mode S ADS-B
SSR-T	0.0033	0.00330	0.00327	0.00327
SSR-EN	0.00212	0.00212	0.00211	0.00211
MSSR-T	0.00198	0.00198	0.00196	0.00196
MSST-EN	0.00127	0.00127	0.00127	0.00127
mode S-T	0.00372	0.00212	0.00212	0.00212
mode S-EN	0.00150	0.00085	0.00085	0.00085
MLAT	0.00122	0.00105	0.00105	0.00105

飛行中のトランスポンダ

	ATCRBS	mode S 改訂 77 前	mode S 改訂 77 対応	mode S ADS-B
SSR-T	0.00330	0.00330	0.00330	0.00330
SSR-EN	0.00212	0.00212	0.00212	0.00212
MSSR-T	0.00198	0.00198	0.00198	0.00198
MSST-EN	0.00127	0.00127	0.00127	0.00127
mode S-T	0.00372	0.00212	0.00212	0.00212
mode S-EN	0.00150	0.00085	0.00085	0.00085
MLAT	0.00122	0.00105	0.00105	0.00105

モード S スキッタ信号によるトランスポンダ占有率

	ATCRBS	mode S 改訂 77 前	mode S 改訂 77 対応	mode S ADS-B
Squitters	0	0.000001	0.000001	0.0000057

以上