

13. ILS ローカライザと隣接帯域の新放送システムとの共用条件の検討

航法システム領域 ※福島荘之介，齊藤真二

1 まえがき

航空機に最終進入経路を示す ILS（計器着陸システム）のローカライザ送信機は、VHF 帯の電波で進入コースを形成し、滑走路中心延長線からの水平偏移を航空機上の指示器に表示する。この送信周波数は、ITU-R（国際電気通信連合無線通信部門）により、ARNS（航空無線航法サービス）として他の航空無線システムと共に 108～111.975 MHz の周波数帯に割り当てられる。この下側隣接となる 108 MHz 以下の周波数帯は従来から放送用に分配されている。

近年、アナログテレビジョン放送の終了に伴い、同周波数帯域に基幹放送局として新しい放送システム（マルチメディア放送）の開局が計画され、ILS との周波数の共用検討が必要となった[1]。しかし、新放送システムは、従来のアナログテレビジョン放送とは異なる地上デジタル音声放送方式（ISDB-TSB）を用いており占有周波数帯域幅や変調方式が異なる[2]。このため、国際標準（SARPs）である FM 音声放送に対する ILS 受信機の性能要求を根拠として共用性を検討できない[3]。諸外国においてもデジタル音声放送方式と ARNS との共用基準は確定しておらず、欧米と異なる我が国の方式が ILS と共用検討された例はない[4]。

本研究では、新放送システムと ILS の周波数の共用性検討に資するため、新放送システム信号の ILS 受信機への影響を調査し、新放送システムの共用条件を検討した。本稿では、まず FM 音声放送の共用性検討に基づいた保護比（Protection Ratio）による、共用性検討の手法を示す。次に、信号発生器や放送設備と複数の ILS 受信機を用いた室内実験により保護比を求める実験方法とその結果を示す。さらに、干渉のメカニズムを検討し、OFDM 信号の非線形ひずみによる帯域外放射に加え、従来あまり指摘されていないマルチキャリアによる ILS 受信機の相互変調ひずみについて考察する。また、保護比から共用条件を検討した例を示す。

2 保護比に基づく共用評価手法

ITU（国際電気通信連合）勧告である ITU-R SM.1009-1[5]は、ILS ローカライザ及び VOR と FM 音声放送の共用性に関する技術基準である。これは 1990 年代に高出力 FM 音声放送局との共用検討において策定された国際標準であり、無線航法施設の ICAO マニュアルにも付録される[6]。このため本文書を参考に、新放送システムとの共用を評価する手法を検討した。

本文書では、干渉のメカニズムとして、(A1) スプリアス、(A2) 帯域外放射、(B1) 相互変調、(B2) 感度抑圧、をあげている。保護比（dB）は ILS 周波数における ILS 信号電力（dBm）から干渉を生じない妨害波電力の許容値（dBm）を減じた値である。共用条件は、ILS 周波数における保護比を基準とし、試験点における妨害波の受信電力、希望波の受信電力から許容される実効輻射電力、周波数離隔、離隔距離の関係として求められる。試験点は、ローカライザ覆域内に高度を持つ固定試験点（図 1 及び表 1 の A～M, X0～X9, Y0～Y9）を 33 カ所設ける。また、放送局がローカライザ覆域内に存在する場合は、次に示す追加試験点を設ける。

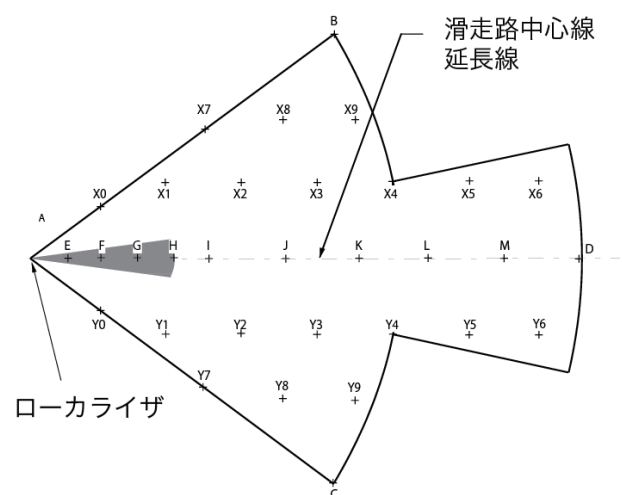


図 1：ローカライザ覆域と試験点

表 1：試験点の位置と高度

滑走路中心線延長線上の評価点		
名称	距離 (km)	最小高度 (m)
A	0	0
E	3	0
F	6	150
G	9	300
H	12	450
I	15	600
J	21.25	600
K	27.5	600
L	33.75	600
M	40	600
D	46.3	600
滑走路中心線延長線以外の評価点		
名称	距離 (km)	相対方位 (度)
B, C	31.5	-35, 35
X0, Y0	7.7	-35, 35
X1, Y1	12.9	-25.5, 25.5
X2, Y2	18.8	-17.2, 17.2
X3, Y3	24.9	-12.9, 12.9
X4, Y4	31.5	-10, 10
X5, Y5	37.3	-8.6, 8.6
X6, Y6	43.5	-7.3, 7.3
X7, Y7	18.5	-35, 35
X8, Y8	24.0	-27.6, 27.6
X9, Y9	29.6	-22.1, 22.1

(1) 放送局が図 1 のハッチ部分（ローカライザ局から 12 km で滑走路中心延長線から ± 7.5° 以内）に存在する場合は、放送局位置を含みかつ放送局アンテナと同高度を追加試験点とする。

(2) 放送局が図 1 の ILS 覆域内でハッチ部分以外に存在する場合は、放送局位置を含み、放送局アンテナ上空 150 m、またはローカライザ局上空 600 m の高い方を追加試験点とする。

3 保護比を定めるための実験

3.1 基本構成と計測手順

新放送システム信号の保護比を定めるため、ITU-R SM.1140[7]を参考に実験方法を検討した。本文書は、同様に FM 音声放送信号とローカライザ及び VOR の保護比を定める実験方法を示した ITU 勧告である。

図 2 に実験の基本構成を示す。妨害波信号源は、V-Low マルチメディア放送と同等の 9 セグメント信号を発生する ISDB-TSB 信号発生器、または V-Low マルチメディア放送機器の送信設備とする。希望波信号源は、ILS 信号発生器を用いる。ILS 受信機の出力は ARINC 429 規格でデジタル出力されるため、対応したインターフェースを持つ PC で取得し計測する。ノッチフィルタは、干渉メカニズムの探求に用い、妨害信号の ILS 周波数帯域を阻止して、帯域外放射と相互変調を区別する。

ILS 受信機は、受信信号の変調度差 DDM (Difference in Depth of Modulation) に比例する電流値によりローカライザのコース偏移を指示する。コース偏移のフルスケールは 0.155 DDM (150 μA) である。保護比を定める実験手順は以下とする。

(a) ILS 信号発生器より 0.093 DDM (90 μA) のローカライザ信号を発生し、ILS 受信機への信号入力を最低受信電力である -86 dBm とする。

(b) 妨害波を入力しない状態で、DDM 値の平均と標準偏差 σ を計測し、その 2σ をベースライン値とする。DDM の測定は 50 ms 間隔に 1,000 点とする。

(c) しきい値は、ベースライン値に 0.093 DDM (90 μA) の 5% である 0.00465 DDM (4.5

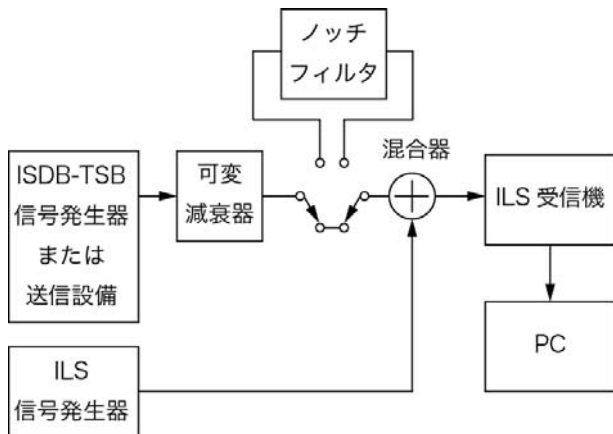


図 2：保護比計測の基本構成

μA) を加えた値とする。

(d) 妨害波を ILS 受信機に入力し、可変減衰器を調整して、 2σ がしきい値を超えない、かつフラグしない妨害波の許容電力を測定する。フラグは、指示器に表示される警報であり、受信機の異常、または受信信号のレベルや品質が許容値以下であることを示す。

(e) 測定時の ILS 周波数における希望波の受信電力 (dBm) から妨害波の許容電力 (dBm) を減じた値を保護比 (dB) とする。

3.2 実験方法

妨害波の許容電力を測定し、干渉メカニズムを検討するため、前節の基本構成と計測手順により、以下の3種類の室内実験を実施する。

(実験1) 信号発生器の保護比

妨害波の許容電力は受信機の耐干渉性能によって異なるため、複数の ILS 受信機による測定が必要である。このため、B737 クラス以上の旅客機で利用される受信機 A (デジタル)、ILS の試験に利用される受信機 B (デジタル)、及び受信機 C (アナログ) を実験室内で単体動作させる。ISDB-TSB 信号発生器は、V-Low マルチメディア放送信号と同様に 16QAM 変調、9 セグメントの信号形式を設定し、前節の手順により妨害波の保護比を計測する (図3)。ILS 信号は、受信機入力において -86 dBm を基本とする。また、機体側のアンテナパターン・ケーブル損失 (AIL: Aircraft Implementation Loss) などを考慮した共用性を検討可能とするため、補間計算が可能なように複数の入力を測定する。



図3：保護比を求める室内実験

(実験2) 送信設備の保護比

実際の放送設備は、送信機出力に大電力フィルタを有する。このため、(実験1)の保護比のみから共用条件を検討すると、現実より保守的な結果となる可能性がある。このため、複数の放送設備のフィルタ出力の信号を用いて、3.1の手順で保護比を計測する。

(実験3) 干渉メカニズムの探求

大電力フィルタにより帯域外放射を低減すれば、希望波帯域における干渉は減少する。このため、減衰量の大きなフィルタにより保護比の低減が期待される。ただし、フィルタの減衰量と保護比の低減量が線形関係にあるかどうかは、よく解っていない。そこで、妨害波源に ISDB-TSB 信号発生器を用い、希望波周波数 (108.1 MHz) に同調させたノッチフィルタを挿入して保護比を計測し、ノッチフィルタの減衰量を可変してキャリアの影響を調べる。

4 実験結果

(実験1) 信号発生器の保護比

図4に妨害波及び希望波信号の周波数スペクトルを示す。妨害波は、ISDB-TSB 信号の OFDM セグメントを連結した9セグメントから構成され、中心周波数は 105,571.429 kHz (A チャンネル)、伝送帯域幅 (モード3) は、3,857.143 kHz である。このため信号波形の右端は 107,500.000 kHz となる。妨害波は、スペクトルマスク、スプリアス発射又は不要発射の強度

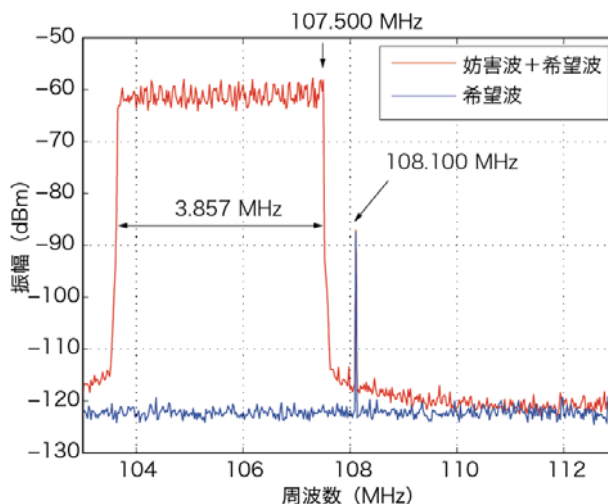


図4：妨害波と希望波信号の波形

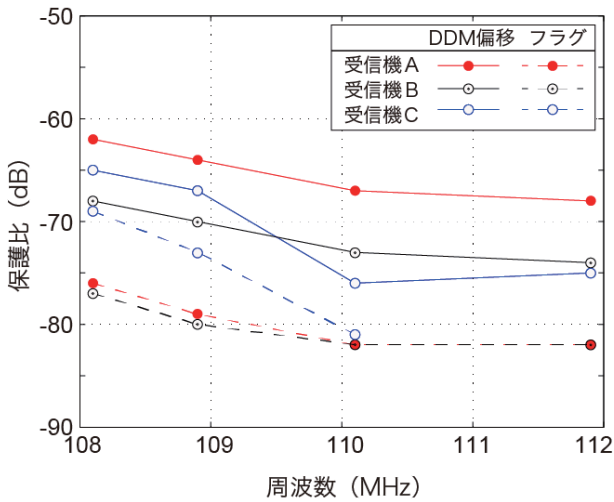


図 5：ISDB-TSB 信号発生器による ILS 受信機（3 機種）の保護比

の許容値の規格を満足する[2]。ただし、108 MHz 以上の周波数において、平均電力レベルから-55 dB 以下の帯域外放射が確認される。図 5 に-86 dBm の ILS 信号に対して測定した各受信機の許容電力から求めた保護比と ILS 周波数の関係を示す。測定には、1 dB ステップの可変減衰器を用いるため、保護比は最大±1 dB 未満の誤差を持つ。測定結果は、受信機の耐干渉性能に依存する。DDM 偏移に比較して、フラグを基準とした保護比は、常に 5~10 dB 少ない。測定した周波数において保護比が大きいのは受信機 A であった。

(実験 2) 送信設備の保護比

図 6 に放送設備の送信機 C (10 kW) の送信機出力の周波数スペクトルを示す。大電力フィルタは、108.1 MHz を 40 dB 以上減衰する BPF (LPF 付き) である。このため、108.1 MHz 以上のレベルは平均電力から-65 dB となる。

図 7 に-86 dBm の ILS 信号に対して求めた放送設備の送信機 A (0.5 kW), B (1 kW), C (10 kW), D (10 kW) の保護比と ILS 周波数の関係を示す。大電力フィルタについては、A 及び B は 108.9 MHz を減衰する LPF, D は 108.5 MHz を 40dB 以上減衰する BPF を備えている。実験には、妨害波の許容電力が最も低い受信機 A を用いた。

(実験 3) 干渉メカニズムの探求

表 2 にノッチフィルタの減衰量を異なる値に

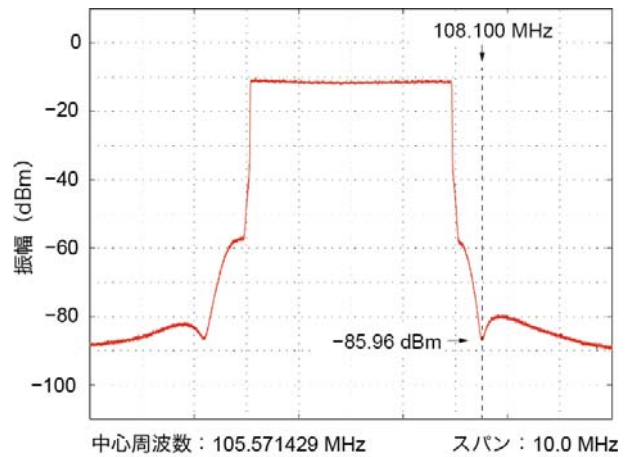


図 6：放送設備:送信機 C の送信出力波形

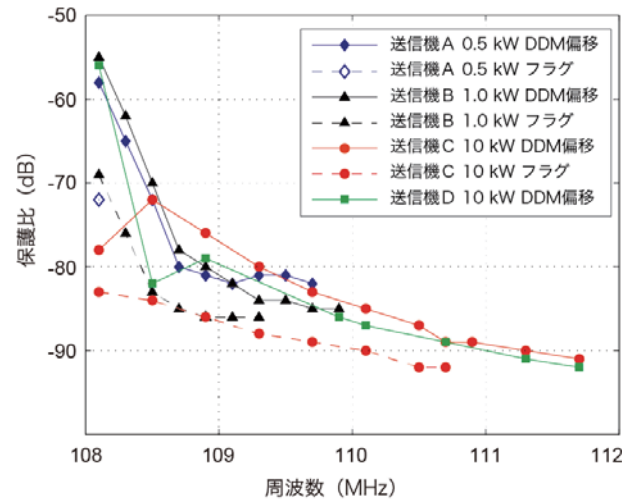


図 7：放送設備送信機による保護比 (受信機 A：ILS 受信機入力-86 dBm)

表 2：ノッチフィルタの減衰量と保護比の関係

減衰量 (dB)	妨害波 (dBm) 受信機入力	保護比 (dB) (DDM 偏移)
10	-12.4	-75.8
20	-8.4	-79.8
30	-8.4	-79.8
40	-7.4	-80.8

設定し、同様に測定した妨害波許容電力から求めた保護比 (DDM 偏移の場合) の結果を示す。実験には、(実験 2) と同様に受信機 A を用いた。ILS 受信機への希望波入力レベルは-88 dBm とした。

5 考察

（実験1）信号発生器の保護比

図4で生じている帯域外放射は、OFDM変調の非線形ひずみの影響である。OFDM信号はその平均電力レベルに対するピーク電力の比（PAPR：Peak to Average Power Ratio）が非常に大きいため、送信機の電力増幅器の非線形性により帯域外放射が生成される[8]。OFDM信号にはPAPRの低減など帯域外の信号レベルを下げる対策が施されている。しかし、この対策のみで帯域外放射を完全に除去することはできない。

図5からISDB-TSB信号発生器で発生させた妨害波信号の保護比は、受信機AのDDM偏移に対する許容電力から求めた値であり、ILS周波数に応じて-62~-68dBとなった。

（実験2）送信設備の保護比

図7から放送設備の保護比は-55~-95dBであり、ILS周波数に応じて線形に低下する。この値は信号発生器の保護比とは異なる。特に、送信機C以外の108.1MHzにおける放送設備の保護比が信号発生器より大きいのは、送信機の大電力増幅器の非線形ひずみによる帯域外放射が信号発生器より大きいことが要因と考えられる。また、108.5MHz以上および送信機Cの108.1MHzにおける保護比が信号発生器より小さいのは、大電力フィルタにより帯域外放射が低減されるからである。従って、信号発生器の実験結果のみから共用条件を検討すれば、希望波の周波数によっては、不十分な結果、または過度に保守的な結果となる。

さらに、図7から108.1MHz及び108.5MHzにおける大電力フィルタの減衰量が40dB以上であるにも関わらず、保護比の低減量は限定されることが解る。このため、保護比は帯域外放射のみではなく、キャリアの影響を受けていると予測できる。

（実験3）干渉メカニズムの探求

表2からノッチフィルタの減衰量を20dB以上としても、保護比は変化しないことが解る。この原因は、ILS受信機で発生するマルチキャリアによる非線形ひずみの影響と考えられる。OFDMの非線形ひずみは、通常送信機の電力増幅器で発生して帯域外放射となるが、ILS受信

機の高周波回路においても同様に非線形ひずみを発生させ、相互変調ひずみにより希望波の感度を劣化させる。ILS受信機は、国際標準のFM音声放送の耐干渉要求に対応するためRFフロントエンドにバンドパス特性を持つプリセレクタを有する場合が多い。ただし、急峻なフィルタ特性は要求されないため、大電力フィルタにより帯域外放射を低減しても、保護比の低減には限界がある。

共用条件の検討

2.に基づき、（実験2）の保護比から、共用条件を簡易に検討した例を示す。108.1MHzのローカライザが運用される空港付近に放送設備送信アンテナが設置される場合を検討する。例えば、放送設備の送信アンテナがローカライザ覆域外で試験点D付近に存在すると仮定する。このとき、表3に示すように放送設備の実効輻射電力（ERP：Effective Radiation Power）に10%の許容誤差（無線設備規則第14条二）を考慮し、試験点Dに存在する航空機が搭載するILS受信機における妨害波の許容電力とマージンから妨害波の要求伝送損失（dB）を算定する。伝送損失は、以下の見通し内の自由空間伝搬損失の式から最低離隔距離に換算できる。

$$L(\text{dB}) = 20 \times \log(4 \times \pi \times r / \lambda)$$

ここで、

L ：自由空間伝搬損失（dB）

r ：距離（m）

λ ：妨害波の波長（m）

とする。以上から、試験点Dにおいては、放送設備アンテナが最低離隔距離以上の場所に配置されれば保護比を確保できて、3.1に示したILSのDDM誤差とフラグの基準を満足できる。

クリチカルな場合は、図1の33カ所の固定試験を全て評価する。このとき、各固定試験点のローカライザの受信電力は、補間法により求める[5]。図5ではILS受信機の希望波信号の受信電力が-86dBmの場合を示したが、この場合は、固定試験点の希望波受信電力に対応した保護比を使う。

また、例では機体側の損失であるAILを保守的にゼロと仮定したが、当該ローカライザを利用する航空機のAIL（最悪値）が調査可能であれば、同様にAILを加味して最低離隔距離を計

表 3：試験点における共用検討の例

	項目		単位	備考
1	ERP	78.5	dBm	70 kW
2	ERP+10%	78.9	dBm	許容誤差
3	希望波受信電力	-86.0	dBm	D 点
4	保護比	-78	dB	108.1MHz
5	妨害波許容電力	-8	dBm	3-4
6	大地反射マージン	6	dB	最大
7	受信機マージン	3	dB	
8	要求伝搬損失	95.9	dB	2+6+7-5
9	最低離隔距離	14.2	km	

算できる。さらに、ERP の算定に送信アンテナの水平パターン損失を考慮し、垂直パターン損失から大地反射マージンを見直せば、より現実になる。

同様に、放送設備アンテナがローカライザ覆域内（図 1 のハッチ以外）にある場合は、2.

(2) に基づき共用検討する。このとき、サイドローブを含む送信アンテナの垂直パターンが必要であり、航空機が送信アンテナ上空 150 m または、ローカライザ局上空 600 m のいずれか高い方を水平飛行すると考えて、仰角毎に同様に最小離隔距離を求め、斜距離を比較する。

6 まとめ

本稿では、108 MHz 以下の下側隣接帯域に割り当てられる新放送システムとローカライザの共用条件を検討し、複数の ILS 受信機と信号発生器及び大電力フィルタを備えた放送設備の送信機による室内実験により保護比を求めた。また、この保護比から共用条件を検討した例を示した。さらに、ノッチフィルタにより希望波周波数帯の帯域外放射の減衰を可変する実験により、大電力フィルタにより帯域外放射を低減しても、保護比の低減には限界があることを示した。この原因は、OFDM 信号の帯域外放射に加え、マルチキャリアにより ILS 受信機の高周波回路で相互変調ひずみを生じるためである。

今後の課題は、さらに多くの ILS 受信機を実験し、より確実な保護比を定めることである。

(謝辞)

本研究の実施にあたり、新放送システム及び国土交通省航空局・技術管理センターの各位には、研究の機会を与えて頂いた。また、放送設備による実験は、新放送システムの各位にご尽力頂き、製造メーカ各位には実験環境をご提供頂くなどご協力を頂いた。実験方法や手順については、ドイツの航空管制機関である DFS の Müller 博士から貴重な助言を頂いた。関係各位に深く感謝致します。

参考文献

- [1] 基幹放送用周波数使用計画，総務省告示第 242 号，平成 25 年総務省告示第 442 号による改正
- [2] 電波産業振興会，セグメント連結伝送方式による地上マルチメディア放送の伝送方式，ARIB STD-B46，1.1 版，平成 23 年 3 月
- [3] ICAO, DOC9718, Handbook on Radio Frequency Spectrum Requirements for Civil Aviation, Volume I, Attachment G, p.G-14, 2014.
- [4] ITU, “Resolution 413, Use of the band 108–11.975 MHz by the aeronautical mobile (R) service” in Final Acts WRC-12, 2012.
- [5] ITU Recommendation, “Compatibility between the sound-broadcasting service in the band of about 87–108 MHz and the aeronautical services in the band 108–137 MHz,” ITU-R SM.1009-1, Oct. 1995.
- [6] ICAO DOC 8071, “Manual on testing of radio navigation aids, Testing of ground-based radio systems”, vol. I, fourth edition, 2000.
- [7] ITU Recommendation, “Test Procedures for measuring aeronautical receiver characteristics used for determining compatibility between the sound-broadcasting service in the band of about 87–108 MHz and the aeronautical services in the band 108–137 MHz,” ITU-R SM.1140, Oct. 1995.
- [8] 伊丹, “OFDM の基礎と応用技術”, 電子情報通信学会, 基礎・境界ソサイエティ Fundamentals Review, Vol. 1, No.2, pp.35–43, 2011 年 3 月