

4-7-3 音声放送実験用 OFDM 端末局

4-7-3 *An OFDM terminal for experiment of a satellite audio broadcasting*

山本伸一

YAMAMOTO Shin-ichi

要旨

音声放送実験用 OFDM 端末局は、技術試験衛星Ⅷ型(ETS-Ⅷ)を用いた CD クラスの高品質な音声放送実験に用いられる。本端末は、OFDM 信号発生装置と OFDM 信号評価受信システムで構成されており、変調方式はマルチキャリアによる OFDM 方式を用いている。OFDM 方式は遅延波のある伝送路でも良好な伝送特性が得られる特長があり、ビル等からの反射波が多く存在する都市部などでの固定受信、移動受信に向いている。

しかし、マルチキャリアであるため伝送路に非線形特性があると相互変調の影響で伝送特性が劣化する欠点がある。このため、電力効率を重視する衛星の搭載中継器を用いた場合、この影響によってビット誤り率が劣化すると考えられる。

ここでは、音声放送実験用 OFDM 端末局の概要について紹介する。また、本端末局と ETS-Ⅷの電気モデルを用いた地上試験の結果について報告する。

An OFDM terminal, with sound quality equivalent to that of a compact disk, is used for experiments on satellite audio broadcasting using Engineering Test Satellite Ⅷ (ETS-Ⅷ).

The terminal consists of an OFDM signal generator, and a test receiver for estimating OFDM signals. The modulation method used is a multi-carrier OFDM system. A feature of this OFDM method is that good transmission characteristics are acquired even if a delay wave exists in a transmission path. It is suitable for reception of signals in urban areas where delay waves often exist as a result of reflections from buildings, etc. However, since it is a multi-carrier, when there are nonlinear characteristics in the transmission path, the transmission characteristic deteriorates due to the influence of inter-modulation. For this reason, when a satellite transponder designed to achieve electric-power efficiency is used, it is thought that a bit error rate may deteriorate under this influence.

This paper describes an outline of an OFDM terminal for satellite audio broadcasting experiments. The results of a ground test using an electric model of ETS-Ⅷ (SEM) and an OFDM terminal are also reported.

[キーワード]

技術試験衛星Ⅷ型, 衛星音声放送, OFDM
ETS-Ⅷ, Satellite audio broadcasting, OFDM

1 まえがき

技術試験衛星Ⅷ型(ETS-Ⅷ)では OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) による移動体向けの高品質なデジタル音声放送実験を計画している。OFDM は、遅延波があっ

ても良好な伝送特性を有することから、ヨーロッパでは移動体向けの高品質デジタル音声放送(DAB: Digital Audio Broadcasting)の伝送方式として用いられており、また、日本でも地上デジタル TV 放送の伝送方式に採用された。これは、都市部のような高層建築が密集した環境におけ

るマルチパスによる遅延波の妨害対策に、本伝送方式が有効であることが大きな理由の一つである。

一方、衛星通信では、衛星に搭載する装置に高い電力効率が要求されるため、増幅器では飽和領域で用いる場合も多いことから、OFDM伝送方式の欠点である相互変調による伝送特性の劣化が問題となるだろう。

ここでは、ETS-Ⅷを用いたOFDM伝送方式による高品質な衛星音声放送実験に用いるOFDM端局装置の紹介及びETS-ⅧのSEM(System Engineering Model)を用いた地上試験の結果について報告する。

2 衛星音声放送実験の概要

図1に衛星音声放送実験の概要を示す。

Ka帯フィーダリンク局[1]から送信されたOFDM信号は、衛星でS帯の信号に周波数変換され、地上に再送信される。地上では車載局[2]あるいはS帯基準局[3]で信号を受信し、ビルなどの建造物によるマルチパスの影響及び伝送路の非線形性の影響などについてデータを取得する予定である。

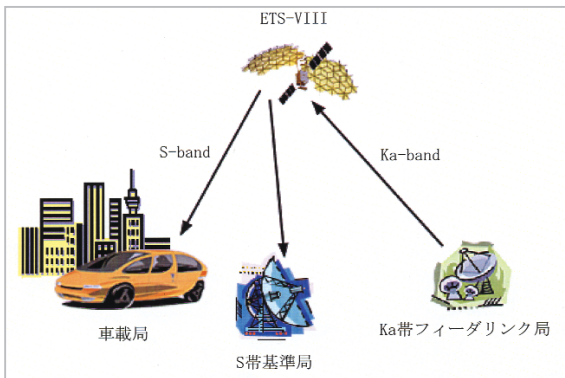


図1 音声放送実験の概要

3 実験システム

音声放送実験用OFDM端局は、送信部のOFDM信号発生装置及び受信部のOFDM信号評価受信システムで構成されている。

基本的にOFDM信号はKa帯フィーダリンク局から送信し、衛星でS帯の信号に変換されて地

上に再送信され、車載局やS帯基準局で受信する。したがって、OFDM信号発生装置はKa帯フィーダリンク局に、OFDM信号評価受信システムは、車載局あるいはS帯基準局に設置される。

図2にOFDM信号発生装置の外観を示す。

上側はOFDM信号発生器、下側はベクトルシグナルジェネレータ(ベクトルSG)で、OFDM信号発生器から出力されるOFDM変調されたI及びQ信号をベクトルSGで直交変調し、140MHz帯のIF信号を得る。

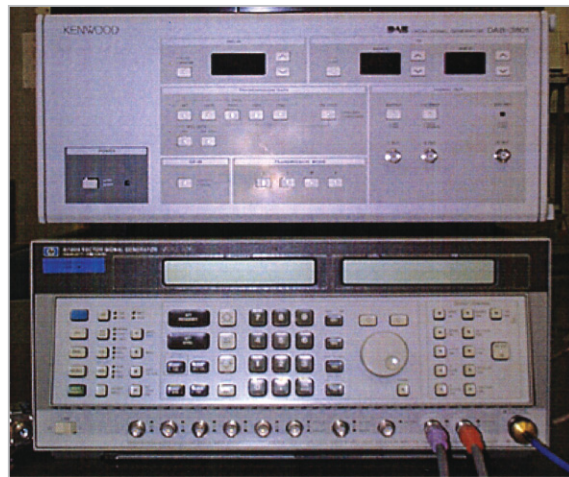


図2 OFDM信号発生装置外観

図3にOFDM信号発生器のブロック図を示す。

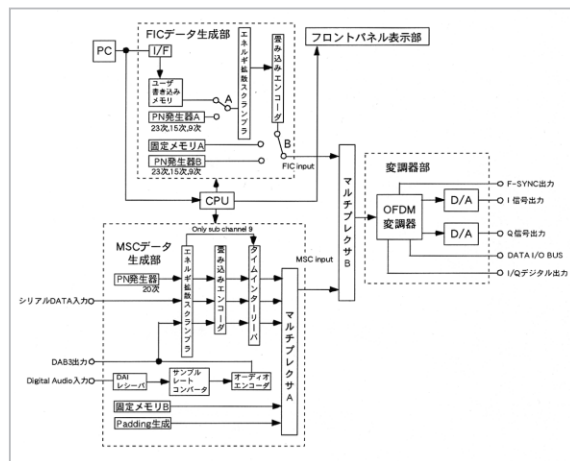


図3 OFDM信号発生器ブロック図

OFDM信号発生器はFIC(First Information Channel)生成部、MSC(Main Service Channel)生成部及び変調器部で構成されている。

FICはサービスに関する付加情報を伝送するためのものであり、その生成部は、あらかじめ用

意した固定データ、ユーザ作成データ及び疑似ランダム符号(PN符号)を選択して出力することができる。また、ユーザが作成したデータを保存するための書き換えが可能なメモリを有する。PN符号は、CCITT準拠の三通り(PN9、PN15、PN23)の発生回路を有している。

MSCは実際のサービス情報を伝送するものであり、その生成部では、入力されたデジタルオーディオインターフェースデータをDAB Audio frameに変換し、外部シリアルデータ及びPN符号とともにエネルギー拡散スクランブラ、畳み込みエンコーダ及びタイムインターリーブにおいて所定のスクランブル、畳み込み符号化、タイムインターリーブが行われる。その後、Padding生成で生成されたデータ及び固定メモリBのデータとともにマルチプレクサAにおいて、FICの内容に従って多重化され、MSCデータとして出力される。

変調器部では、送信モードに従ってマルチプレクサBにおいてFICとMSCデータが多重化され、OFDM変調器で、OFDM変調が行われI、Q信号が出力される。

送信モードは四つ用意されているが、ETS-Ⅷでの実験ではMODEⅢを用いる。表1にそれぞれの送信モードの送信パラメータを示す。これらは、使用する周波数帯や有線・無線などの伝送路に応じて使い分けられており、MODEⅢは3GHz以下の衛星放送に用いられる。

表1 送信モードごとのパラメータ

	MODE I	MODE II	MODE III	MODE IV
OFDMシンボル数 (NULLを除く)	76	76	153	76
キャリア数	1536	384	192	768
キャリア間隔	1KHz	4KHz	8KHz	2KHz
フレーム長	96ms	24ms	24ms	48ms
NULLシンボル長	1.297ms	0.324ms	0.168ms	0.648ms
OFDMシンボル長	1.246ms	0.312ms	0.156ms	0.623ms
有効シンボル長	1ms	0.250ms	0.125ms	0.5ms
ガードインターバル長	0.246ms	0.062ms	0.031ms	0.123ms
変調波帯域幅	1536KHz			

図4に送信フレームの構成を示す。

$l=0$ のNULLシンボルは信号OFFの区間であり、受信側でタイミングを合わせるために用いられる。

$l=1$ のシンボルはPRSと呼び、固定データとなっている。受信側ではこれを用いてオフセット

周波数やタイミングの推定、遅延検波における基準位相とする。 $l=2\sim L$ が送信データを含むシンボルである。

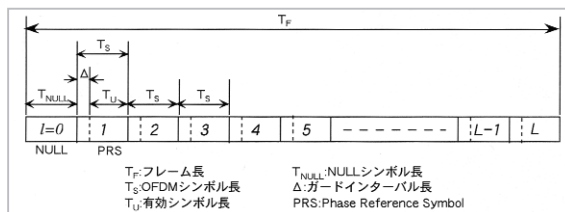


図4 送信フレームの構成

図5にOFDM信号評価受信システムの外観を示す。装置は19インチラックに取り付けられる構造となっている。

図6にOFDM信号評価受信システムのブロック図を示す。



図5 OFDM信号評価受信システム

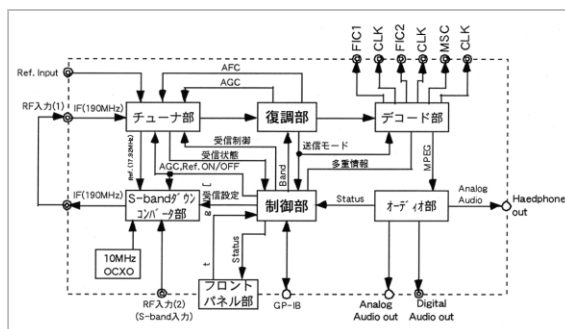


図6 OFDM信号評価受信システムブロック図

受信したSバンドRF信号は、Sバンドダウンコンバータで190MHz帯のIF信号に変換される。このIF信号はUリンクでチューナ部に入力される。

チューナ部に入力されたIF信号は、さらに3.072MHz帯のIF信号に変換され、復調部で直交検波によりベースバンド信号となり、この信号を有効シンボル期間でFFTし、OFDMの各キャリアで伝送された複素データに遅延検波を施し、復調データを得ている。この復調データは、デ

コード部で周波数デインターリーブ、タイムデインターリーブ、誤り訂正及びエネルギー拡散除去を行い、サービスデータを得る。

フロントパネルで選択されたサービスがオーディオであればオーディオ部でMPEGデコードされ、アナログ音声として出力される。データであれば、外部へクロックとデータの形式で出力される。

同期は、フレームのNULLシンボルで荒いフレーム同期を取った後、PRS (Phase Reference Symbol) を基に周波数ずれを検出し、チューナ部のVCXOにAFCを掛けている。AGCは、遅延検波されたOFDMシンボルの電力を計算し、その値が目標値になるようにチューナ部にAGC電圧を出力している。

表2にOFDM信号評価受信システムの電氣的仕様を示す。

項目	仕様	
RF入力(1)	周波数 (BAND II) (BAND III) (L-BAND)	87.5~108.0MHz 175.0~250.0MHz 1452~1492MHz
	周波数分解能	1KHz
	入力レベル (BAND II,III) (L-BAND)	-94~10 dBm -91~0 dBm
	雑音指数 (BAND II,III) (L-BAND)	8 dB 11 dB
	RF入力(2)	周波数 (S-BAND) 周波数分解能 入力レベル 雑音指数
IF出力	周波数 出力レベル	190MHz -10 dBm
BER出力(1) (誤り訂正前FIC)	データ, クロック 出力レベル	TTL
BER出力(2) (誤り訂正後FIC)	データ, クロック 出力レベル	TTL
BER出力(3) (誤り訂正後MSC)	データ, クロック 出力レベル	TTL
アナログ音声出力	最大出力レベル	2V r.m.s
デジタルオーディオ出力	出力レベル	5Vp-p

図7に本システムのIFでの単体折り返しのBER特性(誤り訂正前)を示す。送受信周波数は176MHzで、受信システムへの入力点はRF入力(1)である。すべての送信モードについて行っている。

BERが1.0E-4までの理論値に対する固有劣化は、1dB以下となっている。

また、図8にS帯における単体折り返しでのBER特性(誤り訂正前)を示す。受信システムへの入力点はRF入力(2)である。測定では、Sバンドダウンコンバータ部の出力(190MHz)で雑音

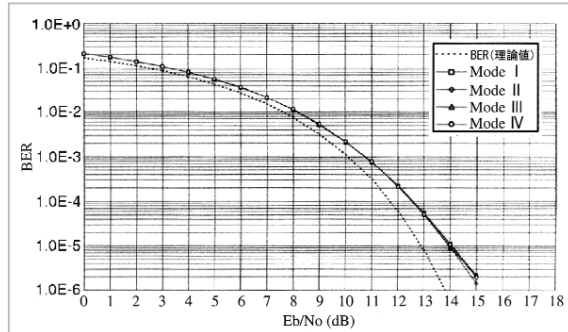


図7 IF単体折り返しBER特性(訂正前)

を付加している。

S-bandでは1.0E-4での理論値に対する固有劣化は約1.2dB程度となっており、176MHzでの測定結果に対して、やや悪い結果となっている。

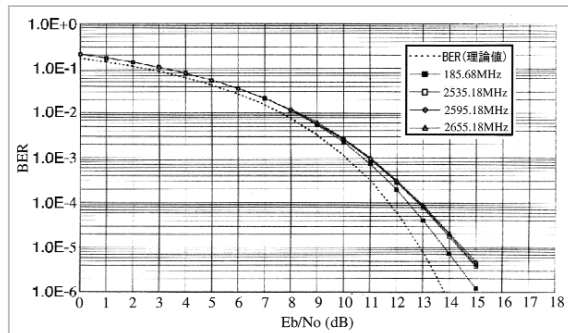


図8 S-band単体折り返しBER特性(訂正前)

4 SEMを用いた地上試験

地上試験は、電力効率を重視する衛星の中継器(特に電力増幅器)の非直線性による伝送特性の劣化について事前に測定することを目的に行った[4]。

また、実験に用いたETS-ⅧのSEM (System Engineering Model)は、実際に軌道上へ打ち上げるフライト品で構成されており、本試験は音声放送実験を軌道上で正常に行えるか、について検証したものと考えてよい。

図9はSEM試験の系統図の一例である。音声放送実験を行うときは衛星内部のルートを幾つか選ぶことができる。ここでは代表的なものを示す。

SEMの入力周波数はKa帯であるため、OFDM信号発生装置から出力されたS帯OFDM信号はアップコンバータでKa帯に周波数変換し

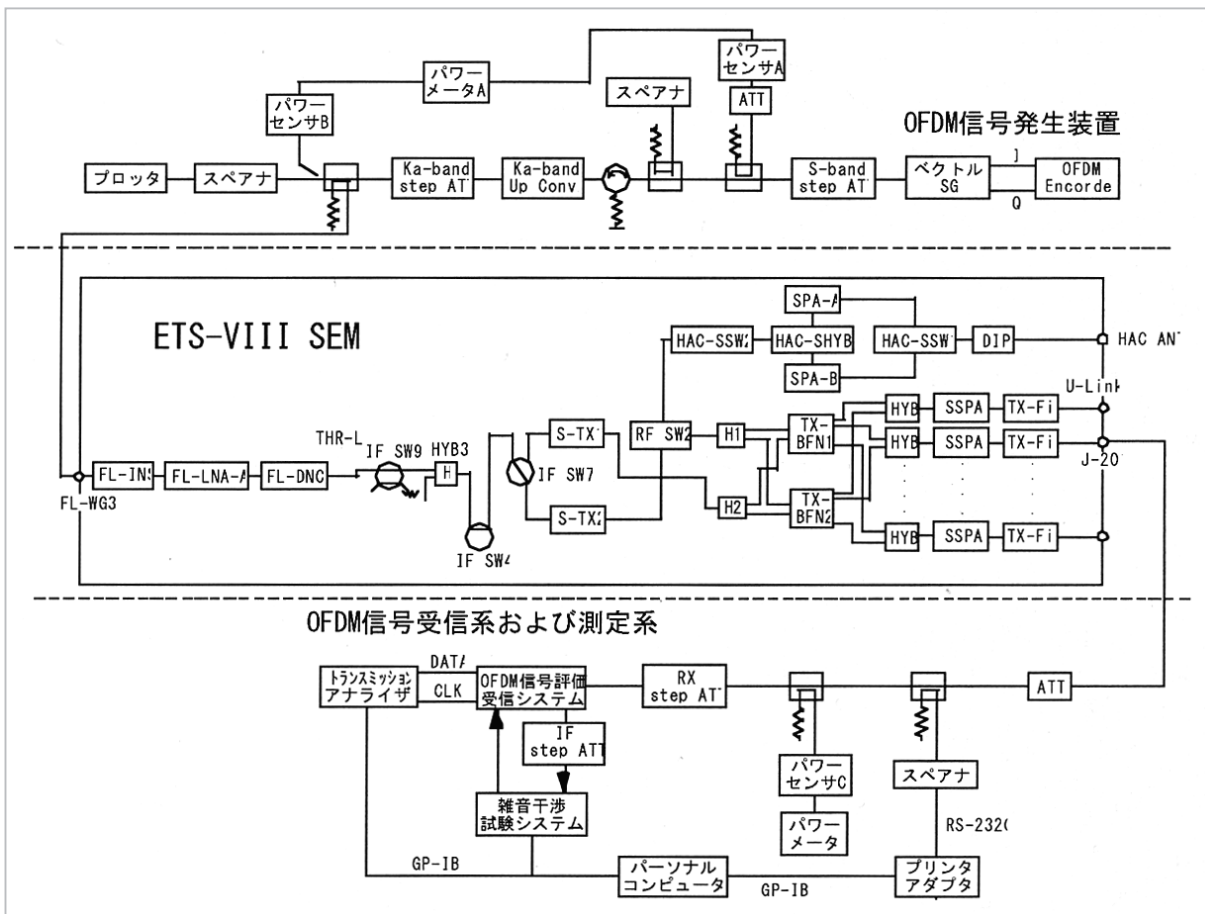


図9 SEM試験系統図の一例

てSEMに入力する。

SEM内部では、入力回路、低雑音増幅器、ダウンコンバータを通り140MHz帯のIF周波数に変換される。その後、S帯アップコンバータ、ビームフォーミングネットワーク、SSPAを経由してS帯の信号を出力する。SSPAは31系統あり、軌道上ではそれらの合成されたものが送信信号となるが、本試験ではそのうちの1系統(10W又は20W SSPAの一方)のみを外部に出力している。

図10はSEMの入出力特性である。

図ではCWとOFDM信号の入出力特性について示している。OFDM信号はCWよりも小さな入力レベルで利得が低下する傾向がみられる。これは、多数の信号波を共通増幅する際に見られる特徴であり、OFDM信号は192波の搬送波で構成されていることから、相互変調の影響が顕著に表れるものと考えられる。

本試験では、SEMの入力電力の制限から最大入力レベルを-79.6dBmとしている。これは、表3に示す回線設計の一例から推定される同インタ

フェース点での入力電力(-78.9dBm)とおおむね同じとなっている。

SEMの最大入力レベルを基準レベルとして、このレベルからのバックオフ(BO:Input Back Off)をパラメータとして各特性を取得した。

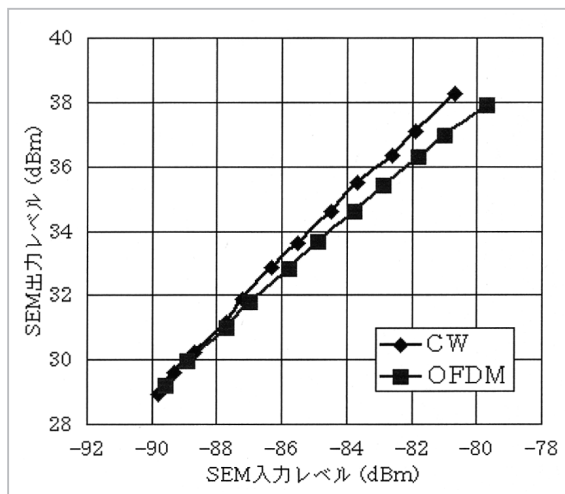


図10 SEM入出力特性

表3 音声放送実験回線設計の一例(晴天時)

項目	単位	音声放送	
		基地局→衛星	衛星→移動局
EIRP	dBW	60.9	61.8
ホッピング損失	dB	0.0	-2.0
自由空間損失	dB	-213.7	-192.1
大気吸収損失	dB	-0.3	0.0
降雨損失	dB	0.0	0.0
偏波損失	dB	-0.3	-0.5
フェージング損失	dB	0.0	0.0
伝搬損失	dB	-214.3	-192.7
ホッピング損失	dB	0.0	0.0
G/T	dB/K	13.1	-21.6
受信C/No	dBHz	88.3	74.1
相互変調雑音	dBHz		
干渉雑音	dBHz		
総合C/No	dBHz	88.3	74.1
総合C/No(2way)	dBHz	74.0	
要求C/No	dBHz	74.4(固有劣化含む)	
マージン	dB	-0.4	

図11に、SEMに入力するKa帯アップコンバータの出力スペクトラムを示す。OFDM信号発生装置からSEM入力までの伝送経路では、信号を線形領域で扱い、相互変調による影響を受けないようにした。

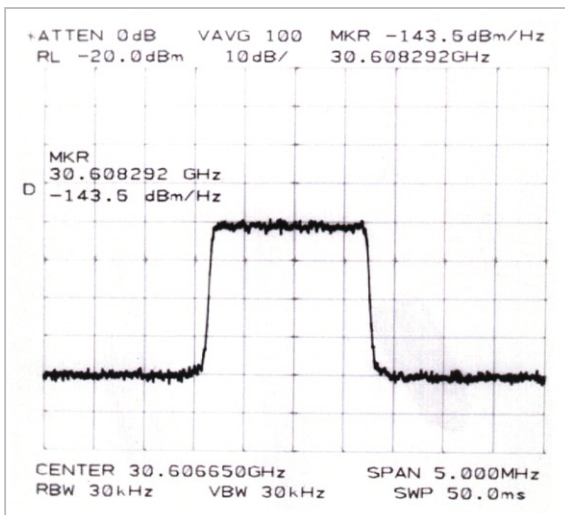


図11 Ka帯アップコンバータ出力スペクトラム

図12は基準入力レベル(IFO=0dB)における、出力スペクトラムである。スペクトラムの観測は、OFDM信号受信評価システムに内蔵されたS帯ダウンコンバータの出力(186MHz帯)で行った。

図が示すように、OFDM信号の両側のノイズレベルに傾きがみられ、これは相互変調による影響と考えられる。

図13、14はIFOを-3dB、-6dBとしたときの出力スペクトラムである。

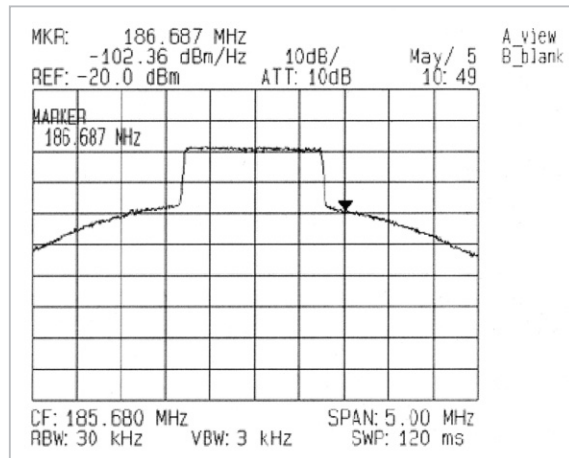


図12 SEM出力スペクトラム(IFO=0dB)

IFOが大きくなるに従って、ノイズレベルの傾きが小さくなり、相互変調による影響が軽減されることが分かる。

なお、図14において、スペクトラムの両端でノイズレベルの低下が見られるが、これはSEM内部の信号ルートにある帯域制限フィルタの特性によるものである。

図15は各IFOにおけるBER特性(誤り訂正前)である。

IFOが大きくなると、C/Noが高いところでBERが改善される傾向が見られるが、C/Noが低いところでは全体的に顕著な差は見られない。

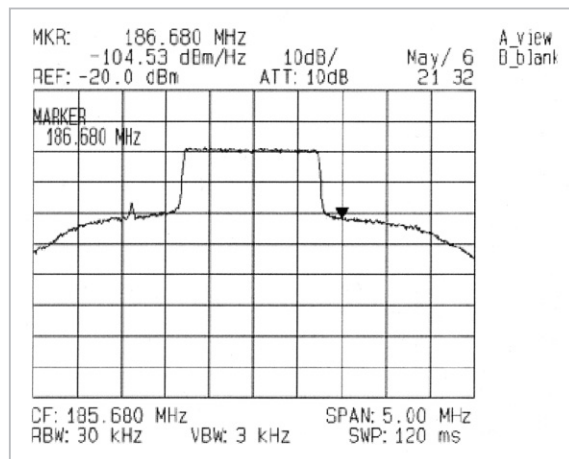


図13 スペクトラム(IFO=-3dB)

音声放送実験で要求する通信品質は、誤り訂正後のBERで $1.E-4$ 以下と考えている。誤り訂正前のBERでは $1.E-2$ 以下であり、回線に要求される総合のC/Noは、IFO=0dBで72.6dBHz以上必要である。

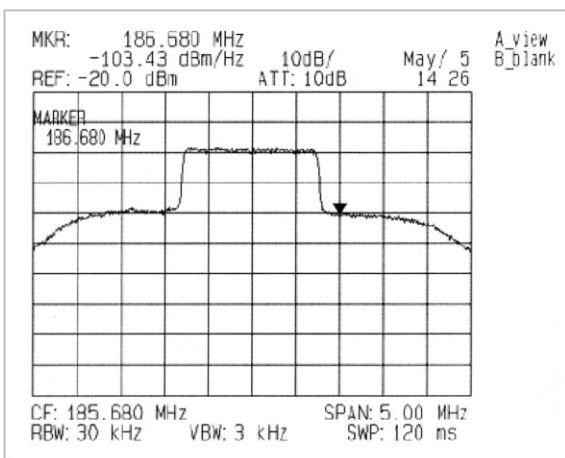


図 14 スペクトラム (IBO=-6dB)

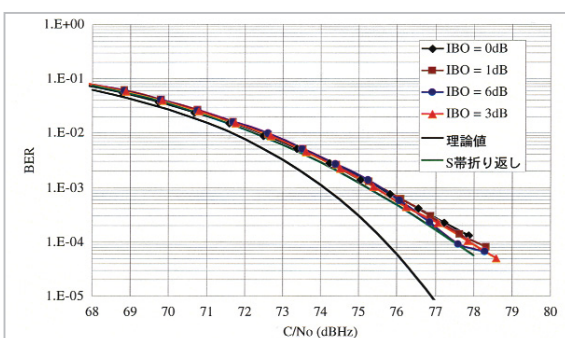


図 15 各バックオフにおける BER 特性

表3の音声放送実験の回線設計の一例から、要求C/Noは74.4dBHzとなっているが、これは固有劣化を見込んだ値である。SEM試験の結果から、要求されるC/Noは72.6dB以上となり、1.4dBのマージンが得られることが分かる。回線設計で想定している移動局の性能は、利得6dBiのアンテナとNFが3dB程度のLNAである。ただし、本回線設計は、降雨損失がない状態を想定している。また、相互変調雑音及び干渉雑音については、試験で得られた固有劣化に含まれるものとする。

5 おわりに

ETS-Ⅷでの音声放送実験に用いるOFDM端局について報告した。また、本端末とETS-ⅧのSEMを用いて、BER特性等を取得し、軌道上実験を行うことができる見通しを得た。

OFDM伝送方式は、電力効率が重視される衛星放送では搭載機器の非線形性の点から回線品質の劣化が問題にされるが、地上放送と同様にマルチパスの多い環境下での遅延波による妨害の対策に有効であると考えられ、ETS-Ⅷでの実験結果が期待される。

参考文献

- 1 山本, 小原, 大橋, “Ka帯フィーダリンク局”, 本特集.
- 2 三浦, 佐藤, 山本, “車載局”, 本特集.
- 3 山本, 小原, 山崎, “移動体通信実験用S帯基準局”, 本特集.
- 4 山本, 高野, 光本, 坂井, 一橋, 浜, “OFDM方式を用いた衛星デジタル音声放送実験－ETS-Ⅷ(SEM)を用いた地上試験－”, 信学ソ大, B-2-20, 2000.
- 5 塩見正, 羽鳥光俊, “ウェーブサミット講座 デジタル放送”, オーム社, 1998.
- 6 飯田尚志, “ウェーブサミット講座 衛星通信”, オーム社, 1997.



やまもと しんいち
山本伸一

無線通信部門鹿島宇宙通信研究センター
モバイル衛星通信グループ主任研究員
移動体衛星通信

