

# 地上デジタル放送用送信機器

Devices for ISDB-T Transmitter

澤田 健志

SAWADA Takeshi

須賀 卓

SUGA Masaru

笹近 秀樹

SASACHIKA Hideki

2003年12月から関東、中京、近畿の三大都市圏で本放送が始まったISDB-T(Integrated Services Digital Broadcasting-Terrestrial)方式による地上デジタル放送は、多様な放送サービスを実現できるとして期待されている。その放送用送信機には、地上アナログ放送用送信機とは異なるデジタル信号を伝送するため、従来のシステムにはなかったデジタル信号送信用機器が必要となる。

東芝は親局(放送局の主送信所)送信機用に、伝送路符号化とOFDM(直交周波数分割多重)変調を行うOFDM変調器、非線形補償機能を持った励振器及び高性能・高効率のPA(電力増幅器)を開発した。これらの機器により、映像・音声などをデジタル信号化した放送TS(Transport Stream)信号を、ISDB-T方式に準じたUHF(Ultra High Frequency)帯の放送波信号に変換し、送信電力まで増幅することができる。

Digital terrestrial television broadcasting (DTTB) began in December 2003 in the metropolitan areas of the Kanto, Chukyo, and Kinki regions. With integrated services digital broadcasting-terrestrial (ISDB-T), which is the Japanese standard for DTTB, viewers can enjoy various types of broadcasting services.

The transmission system of ISDB-T demands new digital technologies that do not exist in the conventional analog transmission system. Toshiba has therefore developed several devices for the ISDB-T transmission system.

This paper introduces three of these devices: an orthogonal frequency division multiplex (OFDM) modulator for channel coding and OFDM modulation, an exciter for nonlinear compensation, and a power amplifier offering high performance and high efficiency. By means of these devices, the transport stream signal is converted to a high-power OFDM RF-signal in the UHF band.

## 1 まえがき

ISDB-T(Integrated Services Digital Broadcasting-Terrestrial)方式による地上デジタル放送システムで使用する送信機(以下、デジタル送信機と略記)は、従来のアナログ送信機に要求されていた特性を上回る要求仕様となっている。特に、ISDB-T方式で採用しているOFDM(直交周波数分割多重)信号が増幅器の非線形ひずみに弱いことから、高性能送信機の開発が大きな課題として挙げられていた。

OFDM信号は、名前が示すとおり、多数の直交したキャリアを周波数分割多重した信号である。OFDM信号において瞬時的に発生するピーク電力は、従来のアナログ放送信号と異なり、実効電力に対するピーク電力の比が極めて大きい(約20倍)という特徴がある。

東芝は、ISDB-T方式に準じたOFDM信号を出力する変調器を国内で最初に製作し、OFDM信号の特性を解析したうえで、高安定・高効率・高性能なデジタル送信機を開発した。

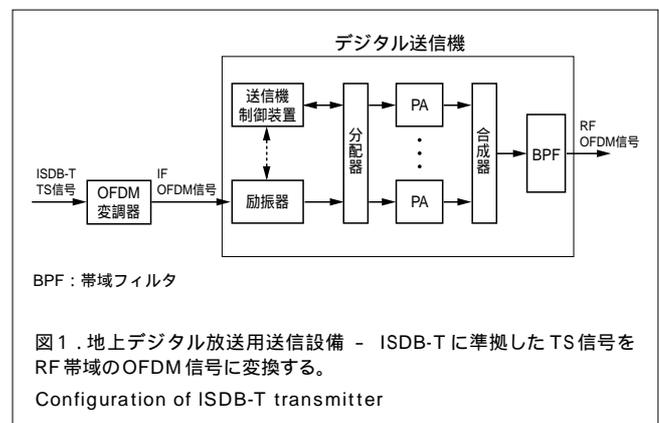
ここでは、デジタル送信機を構成する主要ユニットで、高品質OFDM信号を生成するOFDM変調器、PAで発生するひずみを補償する機能を実現した励振器、及び高性能・高

効率を実現したPAの構成や特徴について述べる。

## 2 システム概要

デジタル送信機の基本構成を図1に示す。

OFDM変調器は、ISDB-Tの放送TSを入力信号とし、高品質なIF(Intermediate Frequency)帯OFDM信号をデジタル送信機へ出力する。送信機は、励振器と複数台のPAか



ら構成され、PA出力を合成することでUHF帯の大電力信号を得ている。励振器は、37.15 MHzのIF帯OFDM信号をUHF帯の放送波に周波数変換して出力するとともに、OFDM信号をPAで増幅する際に発生する相互変調積(IM: Inter Modulation)を、内蔵されている非線形ひずみ補償器で抑圧する。非線形ひずみ補償器はフィードバック型プリディストーション方式を採用し、送信機の出力信号からひずみ成分を抽出し、送信機に対して前置補償するため、以下に示すように高安定、高効率、高性能な送信機を実現できる。

- (1) 高安定 出力レベル安定度  $\pm 0.3$  dB以下
- (2) 高効率 PA効率 18%以上
- (3) IM 補償前 - 35 dB 補償後 - 50 dB以下

### 3 OFDM変調器

OFDM変調器は、地上デジタル放送システム設備のうち、スタジオ側又は送信所側に設置して使用される。ISDB-Tの放送TS信号を入力とし、伝送路符号化及びOFDM変調を行い、IF帯のOFDM変調信号を出力する。

OFDM変調器に関する規格として、(社)電波産業会(ARIB: Association of Radio Industries and Businesses)によって“地上デジタルテレビジョン放送の伝送方式”(ARIB STD-B31)が定められている。また、日本放送協会(NHK)と民放が送信設備仕様の共通化を図ることを目的に設置した全国デジタル送信設備検討会から、デジタル送信設備の共通仕様書が発行されている。OFDM変調器は、これらの仕様に準拠することが必要とされる。

地上デジタル放送においては、非常に厳しい送信信号品質が求められており、OFDM変調器には、高性能(低C/N(キャリア対ノイズ比)劣化、低IM劣化)、高安定が必要とされる。

ここでは、OFDM変調器の概要と求められる性能、及び実測データについて述べる。

OFDM変調器の外観を図2に示す。

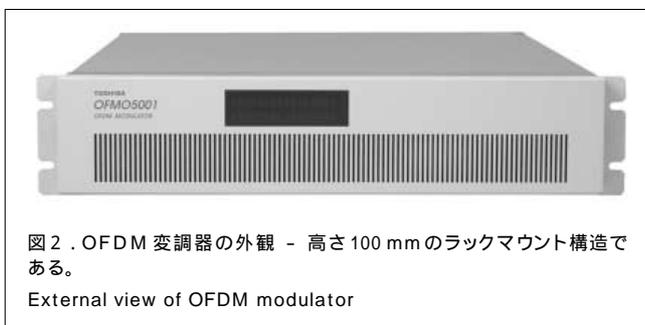


図2. OFDM変調器の外観 - 高さ100 mmのラックマウント構造である。  
External view of OFDM modulator

#### 3.1 特徴

- (1) ARIB STD-B31に準拠した地上デジタル放送のIF信号を出力

- (2) デジタル送信設備の共通仕様書に準拠
- (3) 内部データ発生機能として、ITU-T O.151(国際電気通信連合 - 電気通信標準化部門規格O.151)に準拠した擬似ランダムバイナリ数列(PRBS<sup>23</sup>-1, PRBS<sup>15</sup>-1)を各階層別に発生
- (4) TS内の制御信号(ISDB-T Information, ISDB-T Information Packet(IIP))により、伝送モード、TMCC(Transmitting Multiplexing Configuration Control)の自動制御が可能
- (5) 外部制御装置により制御(リモート制御)が可能
- (6) 搬送波の周波数測定用信号を出力

#### 3.2 機能ブロック

OFDM変調器の概略システムを図3に示す。各ブロックの機能は次のとおりである。

- (1) TS入力部 TS再多重装置から出力された放送TS信号を、クロック信号にタイミングを合わせて同期させる。フレーム同期信号(F SYNC)がある場合には、F SYNC信号の先頭位置にタイミングを合わせる。放送TSのダミーバイト部分に多重されたISDB-T Informationはここで抽出され、各種制御に利用される。
- (2) 伝送路符号化部 TS入力部からの信号を外符号化、階層別符号化、時間及び周波数インタリーブ、OFDMフレーム化を行う。
- (3) OFDM変調部 パラメータに応じて2K、4K、8KのIFFT(逆高速フーリエ変換)を行った後、ガードインターバル付加及び直交変調を行う。
- (4) IF出力部 OFDM変調部からの信号は、IF出力部のD/A(Digital to Analog)コンバータによりアナログ信号に変換された後、アップコンバータ(U/C)によってIF帯の送信周波数に変換される。U/Cには周波数変換に使用するローカル信号が位相同期系PLL(Phase Locked Loop)から供給される。PLLは送信周波数の安定化のため外部基準信号を入力できるようになっており、ルビジウム発振器などからの基準信号(10 MHz)を入力することによって、送信周波数安定度を外部基準信号の安定度( $10^{-10}$ オーダー)と同様な精度で得ることができる。
- (5) リモート制御機能 OFDM変調器の各種パラメータ(伝送モード、TMCC情報など)の設定をリモート制御端子(Ethernet又はRS232C)から行うことができる。また、機器がどのようなパラメータで動作しているか、また、異常がないかをOFDM変調器からモニタ情報として表示することができる。リモート制御は市販のパソコンから実行できる。

制御画面例を図4に示す。

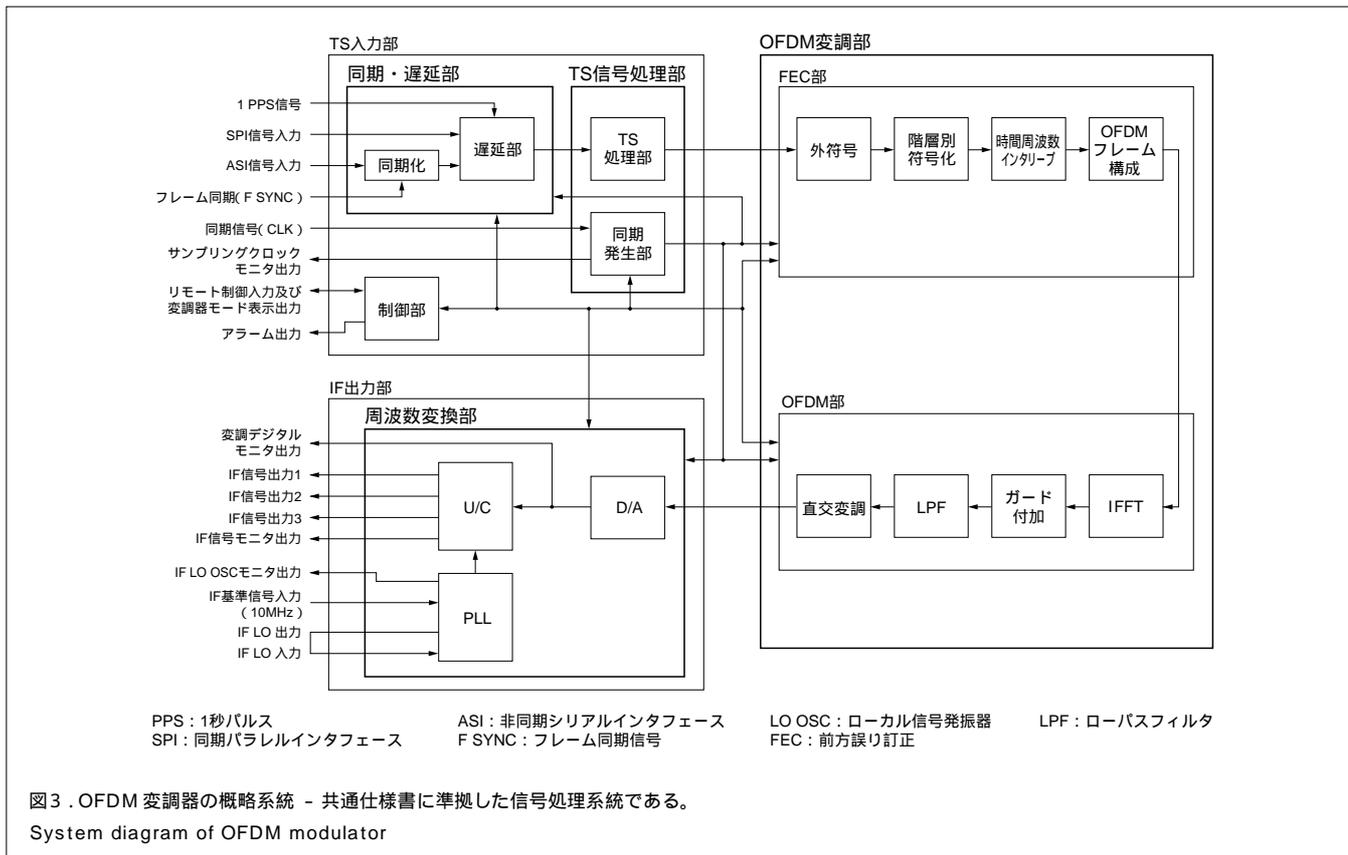


図3 . OFDM 変調器の概略系統 - 共通仕様書に準拠した信号処理系統である。  
 System diagram of OFDM modulator

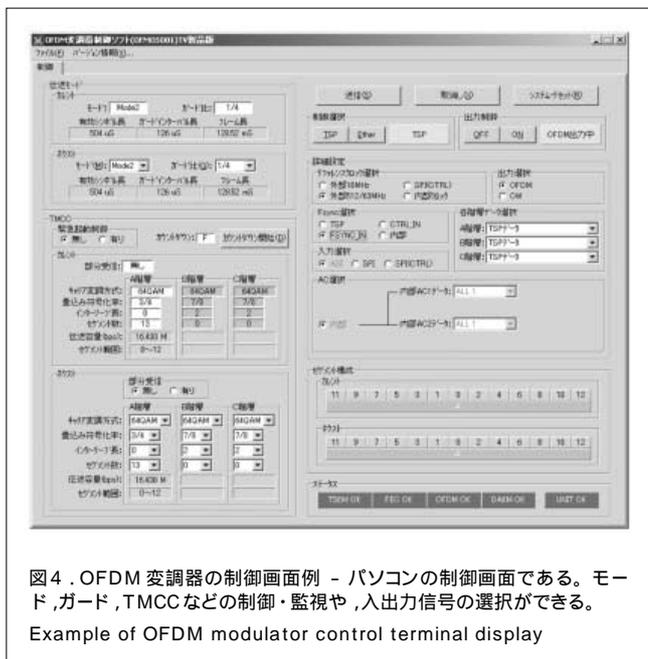


図4 . OFDM 変調器の制御画面例 - パソコンの制御画面である。モード, ガード, TMCCなどの制御・監視や, 入出力信号の選択ができる。  
 Example of OFDM modulator control terminal display

表1 . OFDM 変調器の性能  
 Specifications OFDM modulator

項目	摘要	実測値(参考)
出力変動	定格出力の ±0.5 dB 以内	±0.2 dB 以内
周波数偏差	0.2 Hz 以内 (外部基準周波数に従う)	0.1 Hz 以内
振幅周波数特性	$f_c \pm 2.79$ MHz において ±0.3 dB 以内	スペクトラム参照
群遅延時間特性	$f_c \pm 2.79$ MHz において 80 ns(ピーク間)以内	10 ns(ピーク間) 以下
IM 特性	- 53 dB 以下	スペクトラム参照
位相雑音	- 56 dB 以下	- 69 dB 以下

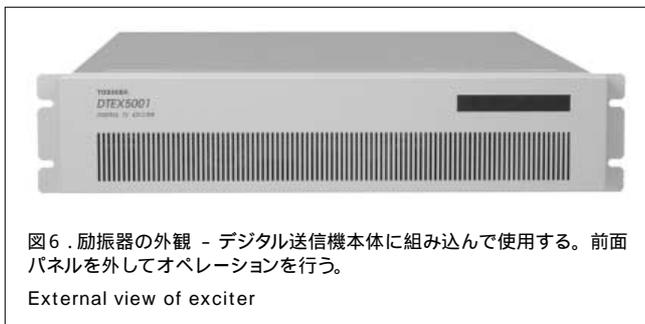
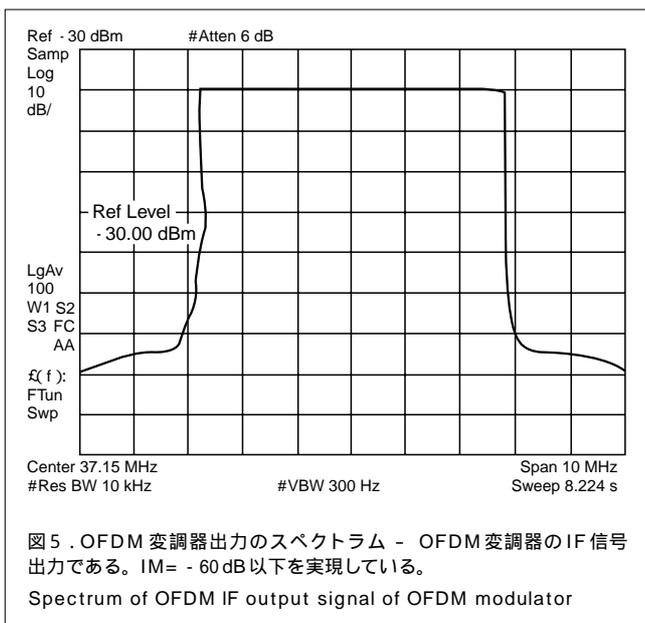
$f_c$  : 中心周波数

における基準信号となるため, 低C/N劣化, 低IM劣化, 高安定が必要とされる。

共通仕様書における摘要値とOFDM変調器の実測値を表1に, OFDM変調器のスペクトラム実測値を図5に示す。

## 4 励振器

励振器は, IF帯のOFDM信号をUHF帯の送信周波数に変換する。励振器は, 電力増幅器におけるIMの発生を抑える非線形ひずみ補償機能と, システムで発生する線形ひずみ(周波数チルト)を補償する線形ひずみ補償機能を持つ。



ここでは、励振器の概要と求められる性能、及び実測データについて述べる。

励振器の外観を図6に示す。

#### 4.1 特徴

- (1) フィードバック型プリディストーション方式による非線形ひずみ補償器を内蔵
- (2) 送信機出力信号のAGC(Auto Gain Control)がかかるため出力レベル安定度が良好
- (3) 高安定(高周波数安定度・低位相雑音特性)なU/Cを採用
- (4) 送信機出力信号の振幅周波数特性を補償できる線形ひずみ補償器を内蔵
- (5) 送信機出力信号のIM検出と監視が可能
- (6) 励振器のシームレス切替えに対応
- (7) フィードバック信号の遅延時間を自動検出可能
- (8) IPA(中間電力増幅器)を内蔵し高い出力信号レベルを実現
- (9) モニタ表示用パソコンを用い送信機特性のモニタリングが可能

#### 4.2 構成

図7に励振器の系統を示す。

OFDM変調器出力の無ひずみOFDM信号(IF入力)が励振器の誤差検出の基準信号となる。OFDM変調器出力のOFDM信号をルックアップテーブル型の補償器にて前置補償し、RF(Radio Frequency)に周波数変換後出力する。

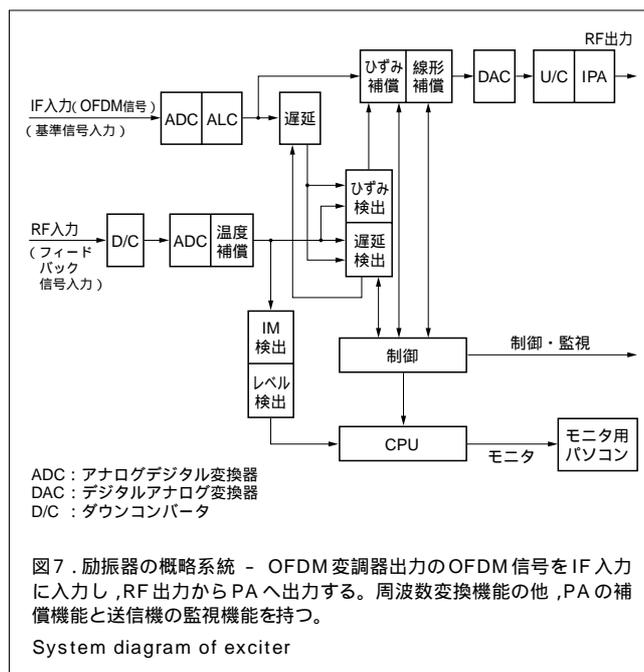
ひずみ検出器は、基準信号と送信機出力のフィードバック信号から、送信機出力のOFDM信号に含まれるひずみ成分を検出する。検出したひずみ成分は、ひずみ補償器内のループフィルタに蓄積される。ループフィルタデータは補償データとして用いられる。これらの検出・補償動作は高速アダプティブ補償(100ms周期で補償データを更新)するため、非シームレス切替えや電源投入時の劣化を最小限に抑えることができ、5秒以内にIM=-50dBまで改善できる。また、補償用の特殊信号が必要ないため、本線信号は通常のプログラムを送送でき、レベルや温度などの環境変化に対しても安定した放送を継続できる。

基準信号入力にデジタルALC(自動レベル調整)回路を採用するとともに、フィードバック信号入力に高精度の温度補償回路を内蔵することにより、出力電力安定度 $\pm 0.3$ dB以下(単体での実力値 $\pm 0.1$ dB)を実現した。

無補償状態での送信機出力レベルを微調整する機能、及び補償状態での送信機出力レベルを微調整する機能を持つ。

非線形補償を継続することにより、送信機出力信号はAGCが働いた状態となる。このAGC範囲は、励振器が組み込まれるシステム設計に合わせて、AGCがかかる範囲を変更することができる。

フィードバック型プリディストーション方式では、基準信号



と送信機出力のフィードバック信号との差分からひずみ成分を抽出する。IM = -50 dBを実現するには、フィードバック信号遅延時間を正確に測定し、基準信号との信号遅延を一致させ、ひずみ成分を精度よく抽出する必要がある。

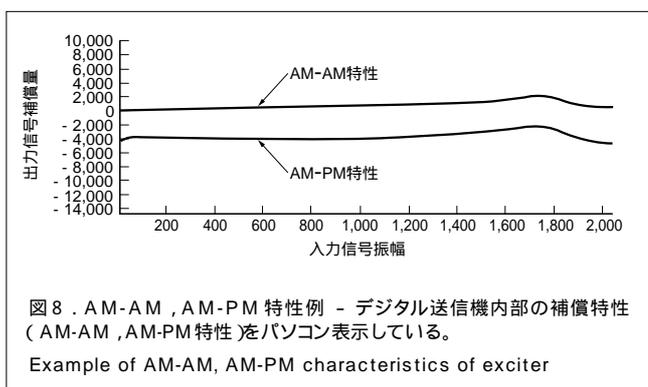
同軸ケーブルの遅延時間が温度で変化するように、送信機の遅延時間は若干変化する場合がある。また、保守で機器を交換・修理したときも遅延時間が変化する。そのため、送信機出力のフィードバック信号遅延時間を自動測定・自動設定する機能として、遅延時間検出器を内蔵した。これにより、送信機出力の信号遅延時間を管理することなく送信システムを構築することができる。

線形ひずみ補償器はPAの周波数特性を補償し、システムとしての周波数特性偏差を±0.5 dB以下に補償する。

励振器は外部ローカル仕様と内部ローカル仕様がある。内部ローカル仕様(共通仕様書対応)は、外部から入力する10 MHz基準にPLLをかけてローカル信号を生成しアップコンバートする。主に現用送信機と予備送信機との切替システム及び励振器切替システムにて使用する。一方、外部ローカル仕様は、共通ローカル信号でアップコンバートする。複数台の送信機出力を出力合成するシステムで使用される。

保守時に必要な操作は、励振器の前面から簡単に操作できる。また、減力スイッチを用意しており、減力運転が必要なときはワンタッチで減力可能である。

外部にモニタ用パソコンを接続することで、励振器の内部データ(主に補償データ)をモニタできる。表示例を図8に示す。内部データには送信機のAM-AM(振幅対振幅)特性、AM-PM(振幅対位相)特性など送信機を監視できる情報があり、保守時に測定し、送信機の特性変化を記録・管理することが可能で、将来的にはリモート監視やメンテナンスへの展開も可能である。



#### 4.3 定格・性能

励振器の定格と性能は、次のとおりである。

##### (1) 定格

- (a) IF 入力 : 37.15 MHz( - 10 dBm / 50 )

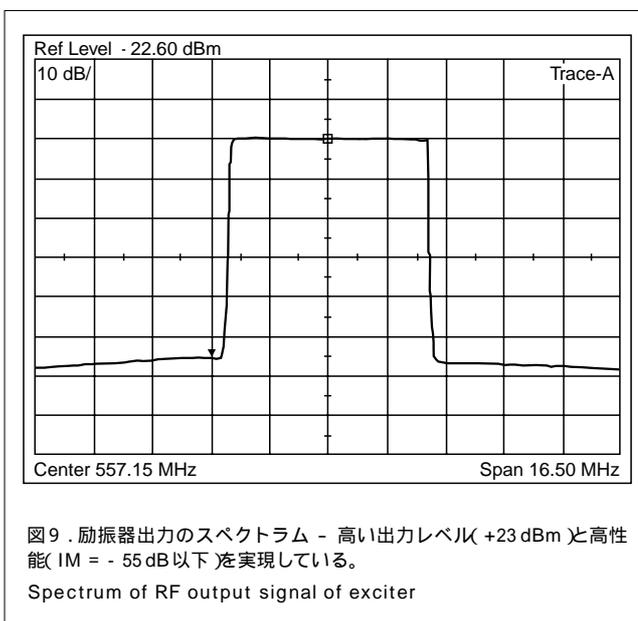
- (b) RF 入力 : 470 ~ 770 MHz( - 10 dBm / 50 )

- (c) RF 出力 : 470 ~ 770 MHz( + 23 dBm / 50 )

##### (2) 性能

- (a) IM : - 50 dB 以下  
 (b) 振幅周波数特性偏差 : ± 0.5 dB 以内  
 (c) スプリアス : - 75 dBc 以下(電力比)  
 (d) 搬送波雑音 : 等価 C/N 比 53 dB 以上  
 (e) C/N : 55 dB 以上  
 (f) PLL ロックアップ時間 : 3s 以下  
 (g) 出力レベル安定度 : 送信機出力変動 ± 0.3 dB 以内

励振器の出力スペクトルの例を図9に示す。



## 5 PA

デジタル送信機用PAは、UHF帯に周波数変換された小電力OFDM信号を所定の電力に増幅するユニットである。出力電力はPAの冷却方式で異なり、空冷では平均電力で200 W、水冷では300 Wである。

ここでは、PAの特徴と求められる性能、及び実測データについて説明する。

水冷PAの外観を図10に示す。

### 5.1 特徴

- (1) 高性能・高出力・高効率である
- (2) 内部の動作状態を監視するためデジタルデータを送出する
- (3) セルフプロテクション機能を持っている
- (4) 部品点数が少なく信頼性が高い
- (5) PAにPS(Power Supply)ユニットが内蔵されている

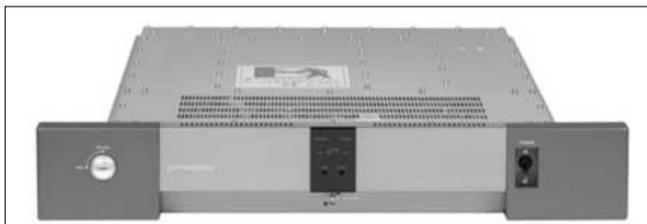


図10. 水冷PAの外観 - PSユニットが内蔵されており,コンパクトな設計になっている。

External view of water-cooled power amplifier

ため保守性に優れる

- (6) 高効率フィン,コールドプレートの使用により安定性が良い

### 5.2 構成

PAの系統を図11に示す。

励振器からの信号はPM(Phase Modulation)補償器に入力される。ここでは,位相変化によるIM劣化を補償している。これにより,万が一,外部補償器の故障という重大な不具合が発生して補償がかからない状態になっても,IM= - 35 dB以下を実現できる。

PM補償器から出力された信号は増幅部に入力される。PPA(Pre-PA)はA級動作の増幅器ICとLDMOS(Laterally Diffused Metal-Oxide-Semiconductor)電界効果トランジスタ(FET)を合計3段にカスケード接続して構成されている。増幅された信号は8分配され,FIPA(Final PA)に入力される。FIPAはAB級で動作させたpush-pull型LDMOS FETを平行に接続して構成されている。各FETで増幅された信号は8合成され,高電力で出力される。

FETのマッチング回路は最適化されており,効率を最大

限に引き出すことで,PAユニットとして効率18%以上を実現している。MOSFETの採用により,ゲート側インピーダンスが高いため電解コンデンサが不要になり,バイアス回路が簡素化できる。また,利得が高いためカスケード段数が削減でき,部品点数が大幅に減少した。そのため,ユニット単体の信頼性が高くなっている。

コントロール部は,RF出力電力値とRF反射電力値,FETの取付け面温度,FETの動作電流,PSユニットの出力電圧などを,シリアルデータで送信機本体のコントロール部へ送出する。また,PA出力における反射電力,FETの取付け面温度,出力バランス抵抗器のフランジ温度及び過電流を検知し,異常値であればPAみずから電源を切ってユニット故障を未然に防ぐセルフプロテクション機能を持っている。

PS部はPAに内蔵されており,交流(AC)200V電圧を直流(DC)電圧に変換して各部へ供給する。また,DCバックアップのためにDC端子が準備されており,DC215Vを送信機本体に供給することによりACとの突合せ動作が可能である。

### 5.3 構造と冷却方式

PAの上下両面に増幅回路が配置されており,ユニット中心の放熱フィンに風を流す,又はコールドプレートに水を循環させることにより,FETなどの発熱部を冷却するようになっている。これは,冷却効率を高めるとともに構造をコンパクトにしている。また,AC/DC電源コネクタ,水コネクタ(水冷の場合のみ),RF入出力コネクタ,及び制御コネクタは背面に配置され,プラグイン式で送信機本体の棚板と接続されるため,ユニットの着脱が容易になっており,保守性に優れている。更に,PAの取っ手は引き出しやすいように引出し形状を採用しており,PAを外す際,力を入れやすくなっている。また,PAを装着する際は,パネル面がフラット構造になっているので,パネル面を押すことによりスムーズに装着できる。PAの着脱は,水が循環しているときでも可能である。MCCB(配線用遮断器),LED(発光ダイオード),RFモニタ及び調整VR(ボリューム)は前面パネルに配置し,操作性のよい構造になっている。

水冷PA用に使用しているカブラは,他の装置で運用実績のある構造のものを放送機の使用条件に合うように改良した。カブラ結合のロックは,他の部品を介してロックしているのではなく,カブラのオス-メス間の部品の構造として直接ロックを行っているので,シャーシ部品などの組立寸法ばらつきには影響されることなく確実に結合を行える構造になっている。PAを押し込むことにより電気コネクタとカブラのはめあいと同時にできる構造となっている。また,外す際は,一般のカブラのようにカラーを手でしゅう動させてロック解除するような操作をなくし,引っ張るだけでカブラが外れるようになっている。また,本体側のカブラはPAとの位置ずれを許容できるように,電気コネクタと同様にフレキシブル板

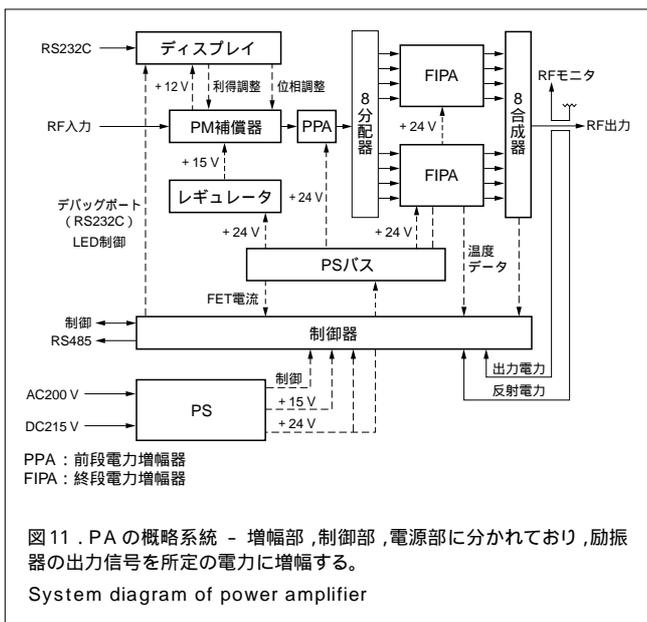


図11. PAの概略系統 - 増幅部,制御部,電源部に分かれており,励振器の出力信号を所定の電力に増幅する。

System diagram of power amplifier

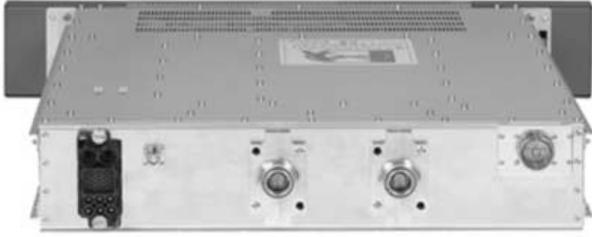


図 12 . 水冷 PA の背面 - 全コネクタがプラグイン式になっており,保守性に優れている。

Rear view of water-cooled power amplifier

で位置合せするようにしているのです,はめあい不良は生じない構造になっている。水冷 PA の背面図を図 12 に示す。

空冷 PA 用に使用しているフィン,ピッチ,高さ,ベース厚を見直すことで低圧損化を行い,ファンによる冷却を可能にした。それと同時に,騒音やダクトの目詰りを低減でき,運用全体の安定性や熱効率を最適にすることができた。

#### 5.4 性能

求められる IM の規格は以下のとおりであり,高性能が要求されている。

- (1) 外部補償なし IM= - 35 dB 以下
- (2) 外部補償あり IM= - 50 dB 以下

IM の発生を抑えるためには,直線性の良い増幅器が必要である。そのためには A 級で動作させる必要があるが,効率が悪くなってしまう。そこで増幅器は AB 級で動作させて効率を上げ,IM は外部の非線形ひずみ補償器で抑圧している。

外部補償なしとありの PA 出力でのスペクトラムを図 13 と図 14 に示す。

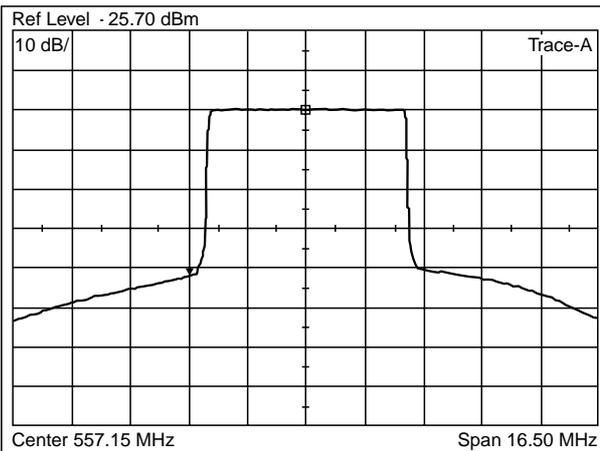


図 13 . PA 出力のスペクトラム(外部補償なし) - 外部補償なしでも IM= - 35 dB 以下を実現している。

Spectrum of RF output of power amplifier ( no compensation )

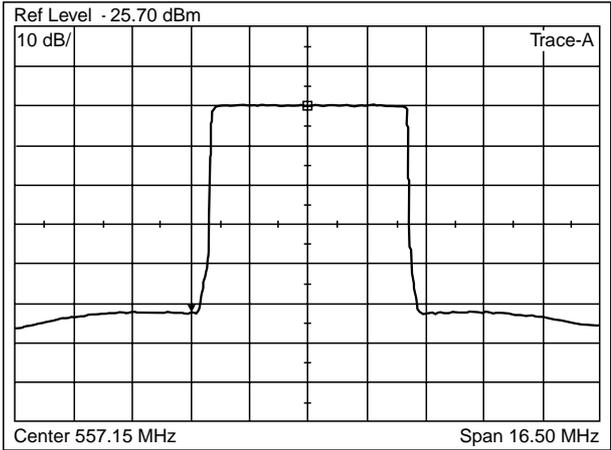


図 14 . PA 出力のスペクトラム(外部補償あり) - 外部補償器と組み合わせることで,IM= - 50 dB 以下を実現している。

Spectrum of RF output of power amplifier ( with compensation )

## 6 あとがき

地上デジタル放送は,2003年12月に関東,中京,近畿の三大都市圏で本放送が開始され,2006年の全国展開に向けて準備が急がれている。

当社は,高安定・高効率・高性能なデジタル送信機と関連ユニットを開発し,関東・中京・近畿地区の地上デジタル放送のインフラ整備に貢献することができた。今後は,全国展開に向けた準備と放送ネットワーク網の発展を視野に入れた開発を進めていく。

## 文 献

- (1) 高橋泰雄 . 地上デジタル放送システムの開発 . 東芝レビュー . 54 , 2 , 1999 , p.49 - 52 .



澤田 健志 SAWADA Takeshi

社会ネットワークインフラ社 府中社会ネットワークインフラ工場 送信機器部主務。放送局向け OFDM 変調器,送信システムの開発・設計に従事。

Fuchu Operations · Social Network & Infrastructure Systems



須賀 卓 SUGA Masaru

社会ネットワークインフラ社 府中社会ネットワークインフラ工場 送信機器部主務。放送局向け送信機用励振器,各種ユニットの開発・設計に従事。映像情報メディア学会 電子情報通信学会会員。

Fuchu Operations · Social Network & Infrastructure Systems



笹近 秀樹 SASACHIKA Hideki

社会ネットワークインフラ社 府中社会ネットワークインフラ工場 送信機器部。放送局向け送信機用電力増幅器の開発・設計に従事。

Fuchu Operations · Social Network & Infrastructure Systems