

## 資料8：FM同期放送用 SFN フィールとアナライザの開発と実用化



THE JOURNAL OF THE INSTITUTE OF  
IMAGE INFORMATION AND TELEVISION ENGINEERS



一般社団法人 映像情報メディア学会 (<http://www.ite.or.jp>)  
THE INSTITUTE OF IMAGE INFORMATION AND TELEVISION ENGINEERS

# FM同期放送用SFNフィールドアナライザの開発と実用化

Development and Practical Realization of SFN Field Analyzer for FM Synchronous Broadcasting

正会員 恵良 勝治<sup>†1</sup>, 正会員 山崎 浩介<sup>†1</sup>, 正会員 貝嶋 誠<sup>†2</sup>,  
正会員 河野 憲治<sup>†2</sup>, 正会員 上田 大一郎<sup>†3</sup>

Masaharu Era<sup>†1</sup>, Kousuke Yamasaki<sup>†1</sup>, Makoto Kajijima<sup>†2</sup>, Kenji Kawano<sup>†2</sup> and Daiichiro Ueda<sup>†3</sup>

あらまし FM補完放送のエリア拡張を行うに際し新しく開発した同期放送システムで行ってきた。このFM同期放送エリアを構築するにあたり課題となるのは異なる二つの送信所からの放送波が重なる点で干渉する放送波のD/Uや遅延時間差の計測、並びに同期放送品質の確認である。従来はこの計測は特殊な信号をスタジオより送出するため、試験放送を行う期間中の深夜の放送休止時間にしか実施できなかったが、今回開発した新しいアルゴリズムを用いたFM復調器により試験放送期間においても通常の放送波での実施が可能となった。

キーワード：FM補完放送，FM同期放送，選択分離受信，遅延時間差測定，同期放送品質測定

## 1. ま え が き

2014年4月、山口放送はFM補完放送の放送ネットワークを構築するにあたり、全県域カバーをするための周波数の確保と聴取者への優しい放送を前提として、従来アナログ型の変調器では困難とされていた「FM同期放送」(以下「同期放送」)の実現に向けて取り組みを開始し種々の実験を通して実用に供しうる「高精度全デジタル型FM変調器」<sup>1)</sup>を開発し、県内のFM送信局を順次開局してきた。

2018年12月末現在、13局のFM補完局を開局し県内を日本海側(5局所を86.4MHz)と瀬戸内海側(8局所を92.3MHz)で二つの周波数を使用して同期放送を行っている(図1)。

この同期放送ネットワークを構築・展開・維持するにあたり、従来はスタジオより特殊な信号を送出することが必要であったため放送休止時の深夜の限られた時間内での同期放送用のパラメータ設定(後述)や品質確認が行えず作業効率も悪く、また従来法による通常の放送中での遅延時間測定では測定値の変動が大きいといった欠点があった。このため通常の放送中で昼間に同期放送のパラメータ設定や同期品質を正確に測定できる装置の開発を行った。2018年8月に開局した須佐田万川局では試験放送期間中に本装置を用いて同期放送設定を行い装置の有効性を確認した。



図1 山口放送 FM放送エリア図(2018年12月末現在)

## 2. 同期放送の概要

### 2.1 FM同期放送について

先に報告した論文<sup>1)</sup>で述べたように、アナログ変調方式のFM放送では地上デジタルテレビのように受信機側で伝送路の等化をすることができないため、同期放送を実用的に成立させる条件を求めることが必要であった。すなわち、同期放送を行う二つの送信所に設置されるFM変調器の(1)物理的な特性の同一性、と(2)音声信号とその変調に関わる時間的な同期性、を担保することである。

そしてこのように設置された条件で送信された2波を同時受信する環境ではいずれかが他方の干渉波となり受信品質を劣化させるが、その劣化特性は「2局間の受信波のD/Uと遅延時間差に関係し、遅延時間差が大きいほど良好な受信品質を得るためのD/Uは大きくなる。」そして「等電界(D/U = 0 dB)地点では遅延時間差が等しければ劣化は生じない」ことが実証され、現在実用放送を実施している。同一性と同期性を確保したFM変調器の性能を表1.1、表1.2に再掲する。

2018年11月5日受付、2019年4月9日再受付、2019年5月7日採録

<sup>†1</sup> 山口放送

(〒745-8686 周南市公岡区, TEL 0834-32-1118)

<sup>†2</sup> 日本通信機株式会社

(〒242-0018 大和市深見西, TEL 046-264-7111)

<sup>†3</sup> 株式会社NHKアイテック 中国支社

(〒730-0051 広島市中区大手町2-11-10 NHK広島放送センタービル12階, TEL 082-542-4314)

表 1.1 同期放送用・高精度デジタル型FM変調器の主要性能

| 主要諸元              | 単体性能                       | 個体間偏差                   |
|-------------------|----------------------------|-------------------------|
| ・無変調時の出力周波数       | 偏差 $\leq 0.2\text{Hz}$     | $\leq \pm 0.4\text{Hz}$ |
| ・最大周波数偏移量         | 偏差 $\leq 1\text{Hz}$       | $\leq 2\text{Hz}$       |
| ・平均変調周波数の中心の揺れ量   | 偏差 $\leq 1\text{Hz}$       | $\leq 0\text{Hz}$       |
| ・プリエンファシスの周波数特性偏差 | 偏差 $\leq \pm 0.5\text{dB}$ | $\leq 0.00\text{dB}$    |
| ・ステレオ変調パイロット位相偏差  | 偏差 $\leq 1^\circ$          | $\leq 0^\circ$          |

表 1.2 音声同期タイミング誤差(独立同期の場合)

| 同一伝送路  | 1号系/2号系 | 0.1 $\mu\text{s}$ 以下 |
|--------|---------|----------------------|
| 異経路伝送路 | SFN局間   | 0.2 $\mu\text{s}$ 以下 |

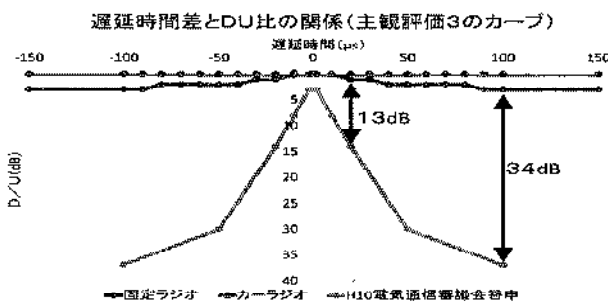


図2 平成10年電気通信技術審議会答申データとの比較

また、この実証した結果について高精度FM同期放送における主観評価と「H10電通技審規格」<sup>2)</sup>を図2に再掲する(この比較カーブは約6ヵ月の受信調査結果に基づき作成したものである)。

例えば遅延時間差に対し評価3を得るD/Uについてその所要D/Uを大きく改善することができた。

この実測結果では、等電界(D/U = 0 dB)になる地点で遅延時間差を0 $\mu\text{s}$ (実際には0.5 $\mu\text{s}$ 以内の精度)に設定すると、遅延時間差が大きくなる地点(実際にはいずれかの送信所方向に移動することになる車による移動受信)ではD/Uが一般的に大きくなることで受信品質を担保できることとなっている。

また固定受信の場合は受信者が無意識に受信機の受信指向性をD/Uが大きくなるように調整してもらうことを利用している。

## 2.2 FM同期放送のフィールドにおける設定事項

一般的に同期放送はエリア拡大に併せて順次開局していく。このため新局はすでに放送を行っている先発局の放送に被せる形で試験放送を開始していくことになる。

新局を開局していく上で、同期放送として確認している手順を下記に示す。

### (1) 音声遅延時間の計測

新局までのマイクロ波伝送等による音声伝送時間測定は、演奏所で1PPSを基準にトーンバースト信号(前述の論文<sup>1)</sup>参照)を送信して、新局で受信するトーンバースト信号を同じく新局での1PPS基準信号との時間差をもって測定する(このように基準とする1PPS信号からの遅延時間をここでは絶対遅延時間と定義する)。

### (2) 音声変調タイミングの設定

測定した遅延時間にあわせて音声信号の変調タイミングを他のネットワーク全体で設定した一定の絶対遅延時間に等しくなるように変調器内の音声遅延機能で設定する。

### (3) 音声レベルの計測と変調度の設定

スタジオから連続トーン信号を送出しTTL伝送でのレベル変化を変調器内のレベル測定機能で計測し、変化分を補償して変調度をネットワーク内の規定値に合わせる。

### (4) D/U=0 dB地点の確認

新局での電波発射前に新局エリア内において既存局の電界強度を移動測定し、放送休止中に既存局を停波し新局のみの電界強度を移動測定することで、既存局と新局の電界強度が等しくなる地点をD/U = 0 dBの地点として登録する。その後、新局の周波数をオフセットさせて2波を同時に受信しスペクトラムアナライザで等電界を確認する。

### (5) RF伝送遅延時間の測定

D/U=0 dBの地点において2波の相対遅延時間差が0 $\mu\text{s}$ となるように新局側のRF遅延時間設定を行う。

相対遅延時間差測定は2局からのトーンバースト信号を2台の受信機で同時に選択分離受信<sup>1)</sup>をして行う。この時の選択分離度は10 dB以上とれるよう5素子八木アンテナ等の指向性を持った受信アンテナで受信調整をする。

この選択分離受信の分離度測定は新局並びに既存局の送信波を交互に発射して確認することができる。

### (6) RF伝送遅延時間の設定

上記により分離して受信されたトーンバースト信号の復調信号のそれぞれをシンクロスコープに加えて、表示された音声信号(1 kHzの場合が一般的である)の時間波形を2波が重なるように新局側のRF遅延時間設定を行う。

## 2.3 従来法による同期設定手順の欠点と課題

### 2.3.1 絶対遅延測定での欠点

従来法による絶対音声遅延およびRF遅延時間測定に誤差が含まれやすい点や人的な環境について以下に述べる。

#### (1) 受信機の遅延性能

- ・FMを受信する受信機によって復調処理時間の遅延時間が表示されるシンクロスコープ上では時間誤差として観測される。

#### (2) 測定器の遅延特性

- ・上記復調信号をシンクロスコープに入力して管面表示までに遅延時間が生じる場合があり絶対遅延時間誤差となる。

#### (3) 調整の効率性

- ・放送休止時間は夜間で通常1ヵ月に数回の限られた時間帯のため遅延調整の効率が悪く、労働環境としても厳しい条件となる。

### 2.3.2 相対遅延差測定での欠点

選択分離受信をする際は5素子八木アンテナ等の指向性を持った受信アンテナを使用して、2台の受信機で復調信号のそれぞれをシンクロスコープに加えて、表示された音

声信号の時間波形を比較して2局間の相対遅延時間を測定する。この場合の問題点として

(1) 2台の受信機の同一性

- ・受信機によってアナログ音声出力レベルに差があるとシンクロスコープ上では時間誤差として観測される。
- ・受信機によってアナログ復調処理の時間的な同期性が等しくない。

(2) 測定器の同一性

- ・シンクロスコープの表示において2入力のパネル表示までの時間に遅延時間差が生じる。

2.3.3 測定条件の効率化の課題

絶対遅延時間測定や遅延時間差の測定においては、既存局への人員の配置(交互発射のための送信機のON/OFF作業)が必要であり、深夜作業では安全性の確保のため最低2名当てねばならない。このことを解決するために既存局の電波を止めることなく選択分離度を計測する手段(2局間の受信D/Uの推定法)を検討してきた。

多くのFM補完局では先行するNHKのFM局や県域FM局が存在する。そして上記で選定された任意の電界地点でもこの先行のFM局が受信可能である。この既存FM局の受信比を測定することで今回の同期放送局間のD/Uとして概ね一致することが確認できた。

選択分離度は10 dB以上確保できれば良いためこの方法は概ね有効であることが実験を通して確認できた(前記論文の図20参照)。

3. SFN フィールドアナライザ

3.1 装置の概要

先に述べたように、同期放送を順次拡大していくにあたって上記の課題を解決できる同期放送用測定器(以下SFNアナライザと略す)の開発を行った。

SFNアナライザの概略系統を図3に示す。

系統図に示すようにRF入力は選択分離受信の2波に対してそれぞれ受信する2系統とし、それぞれが共通の1ppsの入力タイミングで同期して動作するデジタル型の復調器を装備した(復調器の概略系統を図4に示す)。

また各復調器のFM主要諸元について表2に示す。この中で本FM復調器の特徴は2台の復調器がまったく同一の

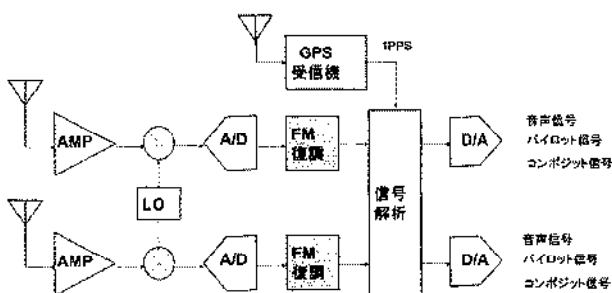


図3 SFNアナライザ 概略系統図

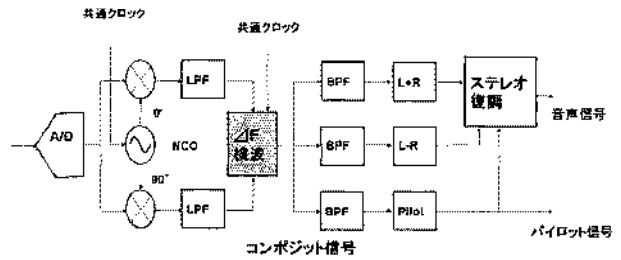


図4 SFNアナライザ 復調部(1系統分)

表2 デジタル型FM復調器 仕様&性能

| 仕様       | 仕様                       |
|----------|--------------------------|
| 受信周波数    | 76.1MHz ~ 94.9MHz の任意の1波 |
| 受信感度     | 10dBμV                   |
| 受信入力数    | 2                        |
| ディエンファシス | 50μs                     |

| 項目    | 性能                   | 2台間偏差 |
|-------|----------------------|-------|
| 周波数特性 | ±0.5dB以内(50Hz~15KHz) | 0.0dB |
| 左右分離度 | 60dB以上(100Hz~10KHz)  | 0.0dB |
| ひずみ率  | 0.3%以下(50Hz~15KHz)   | 0.0dB |
| S/N   | 70dB以上               | 0.0dB |

(注)AES-EBU デジタル出力端で規定  
(入力レベル: 60dBμV)

タイミングで動作し同一の復調性能を有している。また復調デジタル出力は変調側の変調度を絶対値で計測できる機能を有している。すなわち、最大変調度75kHz時の出力は838861(-20dBFS時 24bitMAX 2<sup>23</sup>の1/10)と校正された値を取るように構成している。

また、二つの復調器は1個のFPGA(Field Programmable Gate Array)の中で構成し同一のクロックで並列動作させることで物理的、時間的な同一性を確保した。

復調器の同一性の確認については、RFの入力1および2にFM変調波を分配して、同一の入力としてそれぞれ得られた復調出力をD/A変換する前のデジタル部で比較することにより確認した。

また後述するすべてのパラメータの計測はデジタル形式のベースバンド処理により実行しアナログ要素の誤差の影響を受けない状態で実現した。

3.2 装置の機能

この新たに開発したSFNアナライザの固有の機能について以下に述べるが、最大のポイントは選択分離受信波を前提に通常の放送波を受信して計測することである。

(1) 2局間の遅延時間差測定

受信する2局の各送信所からのRF遅延時間差を測定する。

(2) 2局間の変調器間の物理特性偏差の測定

同一のタイミングで動作しているデジタル型復調器の特性を利用して、同期放送の受信品質に大きな影響を与える2局間の送信機の、平均変調度の偏差および、平均中心周波数偏移の偏差を測定する。

(3) 同期放送下での音声品質特性測定

同期放送の品質の評価法としては従来主観評価が用いら

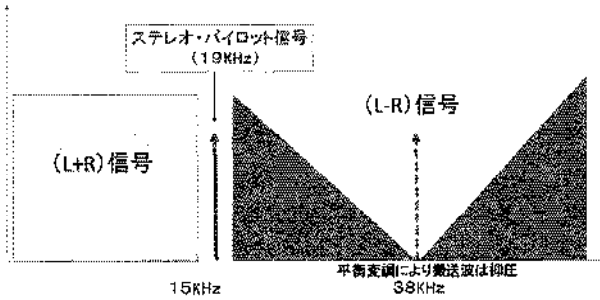


図5 FM変調のステレオ・コンポジット信号スペクトラム

れてきたが、客観的な数値として評価できる評価パラメータを選定し通常の放送波での同期放送音声品質を測定する。これらの機能の実現法について以下に述べる。

3.3 放送波を使用した遅延時間差測定について

通常の放送波を用いて遅延時間差を測定する方法について新しく開発したアルゴリズムによる方法を含め以下の三つの手法による計測を行い、それぞれの手法による測定結果を相互参照できるようにした。

図5にFM波をデジタル復調した時のスペクトラム(ステレオ・コンポジット信号)を示す(ただし、実際に取り扱うデータは通常見慣れたアナログの形式ではなく信号の安定性と再現性を確保するため復調後のデジタル値のまま利用している)。

(1) ステレオ・パイロット信号による計測

先の論文<sup>1)</sup>に述べたように独立同期方式で同期放送を実現する条件として、各送信所の変調器は1pps信号に同期して変調波を送出しているため、任意の受信点で受信するパイロット信号の位相を1ppsのタイミングで計測すれば、その地点までの遅延時間を知ることができることになる。

以下その手法について述べる。

図5の復調されたステレオコンポジット信号からパイロット信号のみを抽出する。そのパイロット信号をヒルベルト変換してI, Q成分の信号に変換する。このRF入力1とRF入力2のパイロット信号のI, Q成分から $\theta (= \tan^{-1}(Q/I))$ を用いて各パイロット波の位相を計測することができる。このことを図6に示す。

例えば、位相差の計測値が $\theta$ (rad)、パイロット周波数 $f_p$

$= 19\text{kHz}$ とすると遅延時間差 $\tau$ は

$$\tau = (1/f_p) * \theta / (2\pi) \quad (\text{mS})$$

として得られる。

この方法は遅延時間差がパイロット周波数の1周期にあたる $52.6\mu\text{s}$ 以内であることが予め知れていれば有効であるが、位相差計測値が周期性を持つため長い遅延時間差がある場面では絶対値を知ることができない欠点がある。

また、今回の計測では2局の送信所の変調器が先に示した表2の性能を満たしていることを前提としているが、従来からFM同期放送として同一の周波数を用いて実施している場合は一般に音声信号とパイロット信号の時間同期が管理されていない場合があり、その場合も本計測法で遅延時間差を計測することはできない。

(2) 音声信号を時間軸で計測する方法(特許出願中<sup>3)</sup>)

上記の欠点を補う方法として復調したデジタル音声信号(ここでは上記コンポジット信号の(L+R)成分)を利用して計測を行う方法を考案した。それは、選択分離度が充分取れていない場合に干渉雑音は周波数成分の高い方から影響を与えるため、ステレオ復調後のLおよびRの信号はステレオ副搬送波に含まれる干渉雑音が畳み込まれてくるからである。このためもっとも干渉雑音が少ない(L+R)成分を対象とした。また一般の放送波では高域の周波数成分は少ないので取り扱う信号は5kHzの低域濾波器を通して使用している。

二つのデジタル形式の音声信号からその時間差を計測する方法を図7に示す。パイロット信号による計測とは異なり時間軸での比較減算を行う。

移動減算を行うクロック周波数が音声信号周波数に対して充分大きくないため減算の最小値は必ずしもクロック周波数精度とは同期しない。このため図8に示すように極小値計測から最小値が起こる時間を補間して計測値として求めている。

この方式の特徴は回路構成にもよるが、遅延時間差を20mSの範囲で計測することが容易である。

ただし、先に述べたように2局間の信号の同一性を利用して最小値計測を行っているため、それぞれのFM変調器がアナログ信号入力による変調の場合は表2の変調度の同

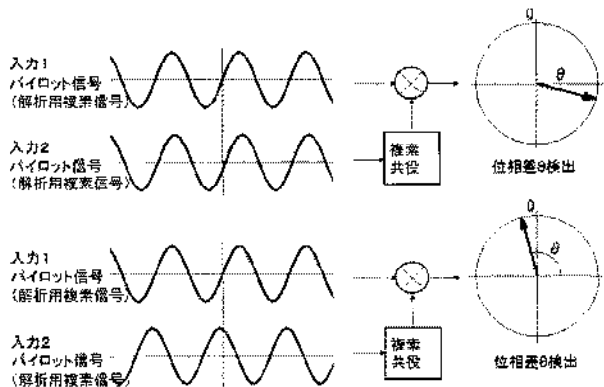


図6 パイロット信号の位相検出

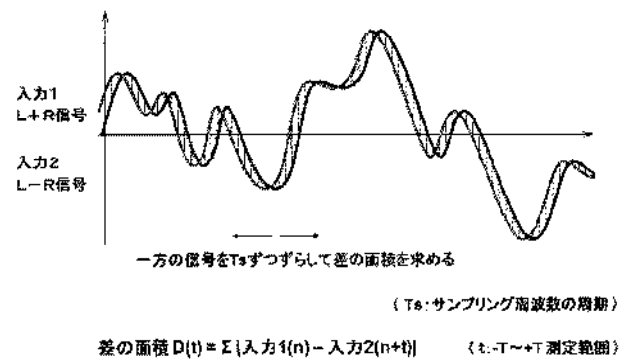


図7 音声信号の遅延時間計測(L+R)信号

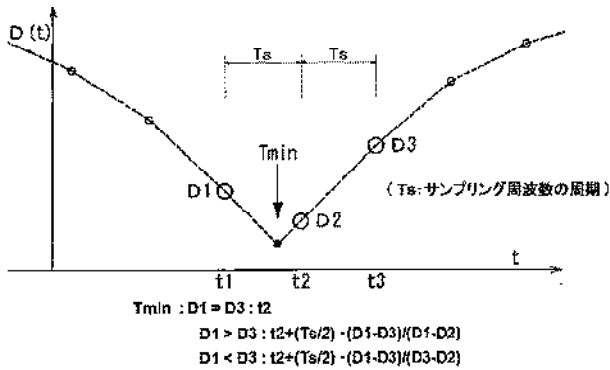


図8 サンプルング点からはずれた最小値の予測手法

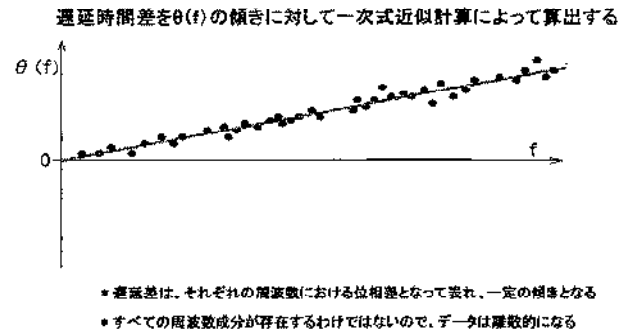


図10 周波数軸に表現された位相差

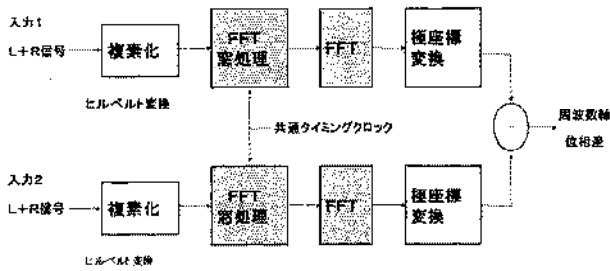


図9 周波数軸を用いた遅延時間計測 系統図

一性が担保されていないことが多く、その場合は十分な精度で計測することは困難となる。

(3) 音声信号を周波数軸で計測する方法 (特許出願中<sup>4)</sup>)

上記(1)(2)の方式とも計測にはそれぞれ制約条件が伴う。このため(2)で用いるデジタル音声信号(L+R)の周波数成分の比較を行うことで二つの遅延時間差を求める方法を考案した。

概略の系統を図9に示す。

二つの復調されたデジタル音声信号(L+R)をまったく同一のタイミングで一定の時間軸幅で取り込む。この取り込んだ二つのデジタル音声信号をそれぞれ直交した二つの搬送波(I, Q成分と呼ぶ)を用いてヒルベルト変換を行い、その変換された信号をFFT(Fast Fourier Transform)により周波数成分として取り出す。このIに含まれる周波数成分とQに含まれる周波数成分は当然同一のものであるので各周波数成分のIとQの値でその周波数成分の位相角 $\theta (= \tan^{-1}(Q/I))$ を知ることができる。

すなわち、二つの信号のそれぞれの周波数成分の各々について計測位相 $\theta_1(f), \theta_2(f)$ が得られる。

これについて $\theta_0(f) = \theta_1(f) - \theta_2(f)$ として表したものを図10に示す。

横軸は周波数方向であり $\theta_0(f)$ の離散点を結んだ線の傾きは二つの信号の遅延時間差に従うことになるので、遅延時間差 $\tau_0$ は

$$\tau_0 = (\theta_0(f_1) - \theta_0(f_2)) / (f_1 - f_2)$$

として計測できることになる。

この方法は音声信号の周波数成分の位相差のみに着目しているので2局間のFM変調器の変調度偏差等には依存し

ないで正確な測定が可能である。

3.4 送信所間の性能偏差測定について

同期放送においては同期を形成する二つの送信所のFM変調特性の同一性が重要であることはすでに述べた。ここでは二つの送信所間の物理的な変調特性の偏差を通常の放送波を受信しながら測定する方法<sup>5)</sup>について述べる。

以下に述べる計測法は今回開発したデジタル型FM復調器にFM変調度を校正した復調感度を持たせたことで実現したものである。

(1) 局間の平均変調度偏差測定

平均変調度を測定するために使用するデータは先の2.4.2項および2.4.3項で遅延時間差計測に用いたものと同じくRF入力1とRF入力2の復調信号を同一のタイミングで抜き取った音声デジタル信号(L+R)である。

FM復調は送信側のFM変調波の周波数偏移に比例して音声レベルを出力することであるので、絶対値校正されたFM復調器で出力される音声信号レベル(デジタル値)はその値が瞬時の周波数偏移量を示している。

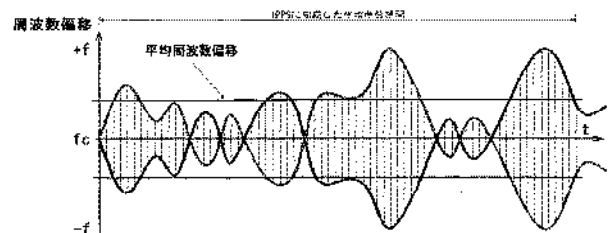
このためある一定区間(時間平均を取るのに十分な時間)の音声デジタル信号データ列をプラス側に絶対値として折り返してその平均処理を行うことで平均周波数偏移が計測できる。

この様子を図11に示す。こうして得られる各入力の平均周波数偏移の差が平均周波数偏移偏差となる。

(2) 局間の平均中心周波数(DCオフセット)偏差

同期放送で干渉雑音の大きな要因となるのが2局間の送信波の平均中心周波数の変化が時間的に異なる場合である。

この平均中心周波数を計測する方法について述べる。



2系統の復調信号に対し基準時刻(1PPS)に同期した同じタイミングで、絶対値平均処理を行

図11 平均変調度偏移の測定

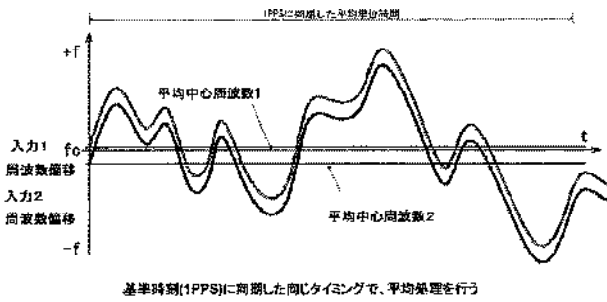


図 12 平均中心周波数の測定

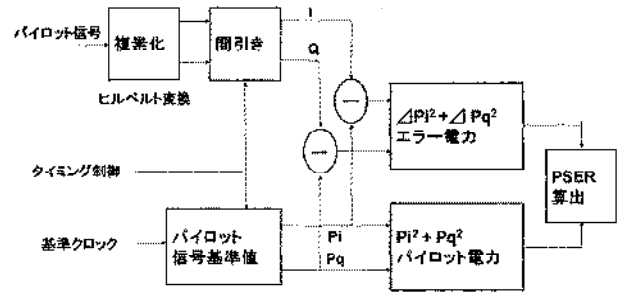


図 14 パイロット信号エラー比 (PSER) 測定系統図

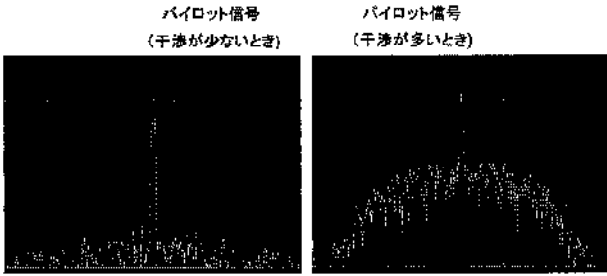
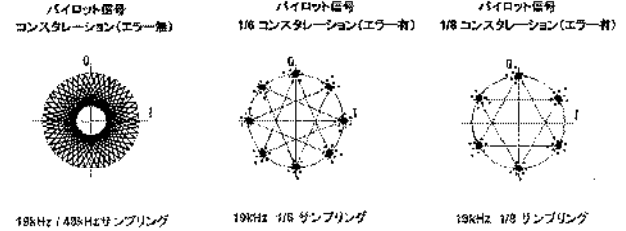


図 13 パイロット信号の復調後のスペクトラム



・19kHz コンスタレーションをそのまま表示すると、基準点間が近くエラーがあると見づらくなる  
 ・基準とする点を間引くことで見やすくする (サンプリング周波数は 48kHz)  
 ・間引くと情報量が少なくなるので、適度な間引きとして 1/8 または 1/8 とした

図 15 パイロット信号のコンスタレーション

平均中心周波数はデジタル音声信号の正負の符号をつけたまま一定区間の加算と平均処理を行うことで計測できる。

2入力間の差をとることで平均中心周波数偏差として計測できる。この様子を図12に示す。

3.5 同期放送の音声品質の測定について

同期放送においては干渉しているフィールドにおいて放送波音声の受信品質を客観的に測定する手段はなかった。今回実際の放送波の中に常に存在するパイロット信号(図5参照)に着目し音声品質測定の代替手段とできないかを検討した。すなわち、先に述べたように同期放送下では干渉D/Uと遅延時間差に応じて受信音声品質が変化する。これはパイロット信号も同様に影響を受けることが観測された。この様子を図13に示す。図ではパイロット信号をスペクトラムアナライザで観測した時の波形を示しており左が干渉が少ないとき、右が干渉が多いときのそれである。

この観測データから下記の方法<sup>9)</sup>によりパイロット信号の干渉雑音比(ここではパイロット信号エラーレシオと定義する)を計測してその値と主観評価のデータ(後述)との相関を調査することとした。

(1) パイロット信号エラーレシオ (Pilot Signal Error Ratio) の計測

PSER (Pilot Signal Error Ratio) の計測の系統図を図14に示す。デジタル方式でFM復調されたコンポジット信号からパイロット信号をBPFを用いて抽出しヒルベルト変換により複素化を行う。

この複素化されたパイロット信号は複素平面では図15の左に示すコンスタレーションを描くことになる(サンプリング周波数は48kHz)。この48の点の隣接する距離は位相角では7.5°(360°/48)と近接するので本システムでは干渉

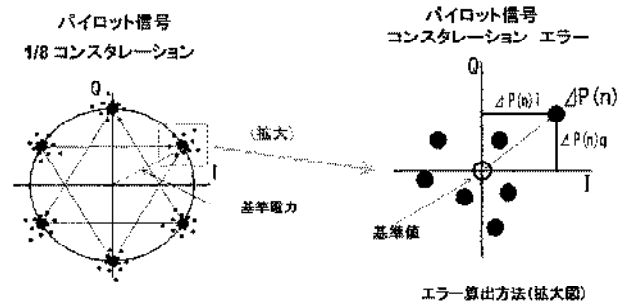


図 16 パイロット信号エラー比の計測

雑音の誤判定を避けるためにこのコンスタレーション全体の点の1/8の6点を計測の対象とした(図15の右図参照、系統図では間引きに相当する)。

一方干渉がない場合のパイロット信号のコンスタレーションは既知であるので基準となるクロックを用いて複製し、受信したパイロット信号との差分をとり干渉がおきたときの干渉雑音によりこの基準星座点から離れる距離を測定する(図16)。

(2) PSER (Pilot Signal Error Ratio) の定義

上記にて得られたパイロット信号のI成分をPi、Q成分をPqとするとパイロット電力Ppowerは

$$Ppower = P_i^2 + P_q^2$$

でありまた干渉により生ずるエラーを $\Delta P(n)$ としその直交成分を $\Delta P(n)_i$ 、 $\Delta P(n)_q$ とするとエラー電力は

$$\Delta P(n) = \Delta P(n)_i^2 + \Delta P(n)_q^2$$

と計測できる。

これを用いてPSER (Pilot Signal Error Ratio) を下記にて定義する。すなわち



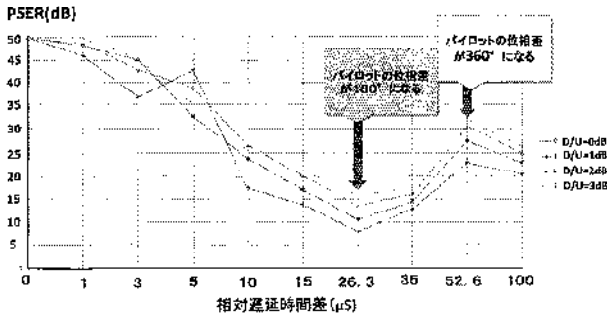


図17 PSER対遅延時間差特性

$$PSER(dB) = 10 * \text{LOG}(\Sigma(N * P_{power}) / \Delta P(n))$$

である。

(3) PSERの計測例

2波干渉時のD/Uと遅延時間差に対してPSERを測定した結果を図17に示す。計測条件は評価素材としてラジオ放送で多くの割合を占めるアナウンサによる読み上げトークシーン(1分間の尺)を作成し、2台の変調器で同期して変調をかけた上で干渉が起こらない無変調時(音声の無音検知を行い)を除いて1分間の平均値を採用した。

図に示すように、26.3μs(パイロット信号の位相差が互いに180°となる)でPSERの極小値が生ずる。これは二つの干渉し合う信号で受信機ではパイロットが打ち消されて受信できなくなるために劣化が起きていることがわかる。それ以降53μs(パイロットの位相が1周して互いに同相となる)まではPSERは増加傾向になる。

3.6 主観評価の例

同期放送時の受信音声の品質について、干渉D/Uと遅延時間差に対して主観評価実験を行った。

評価素材はPSER計測に使用したトークシーンを20秒の尺に短縮して使用した。

評価者は同期放送の関係者7名で行い、通常の5段階評価とし評点の最高点と最低点を1個ずつ除いて5名の平均値を評点とした。評価点の基準は下記とした。

- 評点5：原音との違いがわからない
- 評点4：干渉音を認めるが気にならない
- 評点3：干渉音があるのがやや気になる
- 評点2：干渉音が多く原音との違いが気になる
- 評点1：干渉音で原音が聞きづらい

その結果を表3に示す。

PSERと主観評価の詳しい相関については次章で述べるが、表3からはパイロットの位相差が180°になる26.3μsまでPSERと主観評価は減少(品質が悪い方向)していく。また、パイロットの位相差が360°となる53μsではPSERと主観評価はともに増大して100μsでは減少する。このことからPSERと主観評価は同一の傾向を示し相関があることがわかる。したがって、PSERは同期放送の遅延時間差に限らずFMステレオ放送なら音声品質の評価に使用できる。

3.7 Pilot品質と主観評価の相関について

図18に0~26.3μs以内でのPSER-主観評価の相関図を

表3 音声主観評価(トークシーン)

| D/U(dB) | 遅延時間差(μs) |     |     |     |     |     |      |     |     |     |
|---------|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|
|         | 0         | 1   | 3   | 5   | 10  | 15  | 26.3 | 35  | 53  | 100 |
| 0       | 5         | 5   | 5   | 5   | 5   | 2   | 1    | 1   | 1   | 1   |
| 1       | 5         | 5   | 5   | 5   | 5   | 2   | 1    | 1   | 1.2 | 1   |
| 2       | 5         | 4.6 | 4.2 | 5   | 5   | 2.6 | 1.4  | 1   | 2   | 1.4 |
| 3       | 4.4       | 4.6 | 5   | 4   | 5   | 2.6 | 2    | 1   | 2.2 | 2   |
| 4       |           |     | 5   | 5   | 5   | 2.8 | 1.4  | 2   | 2.4 | 2   |
| 5       |           |     | 4.2 | 4   | 4   |     | 1.8  | 1.8 |     | 1.8 |
| 6       |           |     |     | 4.6 | 4   |     | 1.8  | 2.2 |     | 2.2 |
| 7       |           |     |     | 4.4 | 4.2 |     | 1.8  | 2   |     | 2.6 |
| 8       |           |     |     |     | 4   |     | 2    | 2.2 |     | 2.6 |
| 9       |           |     |     |     |     |     |      | 2.4 |     | 3   |
| 10      |           |     |     |     |     |     |      |     |     | 3.2 |

評点値 2以下      評点値 2~3      評点値 3~4      評点値 4以上

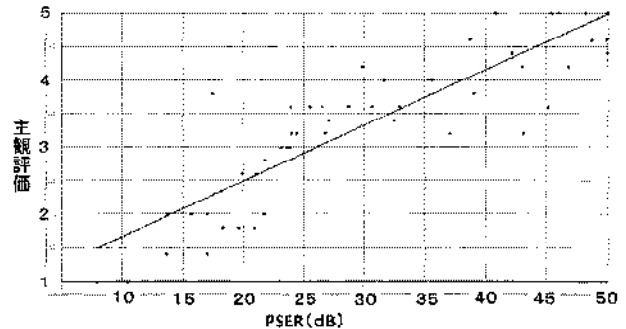


図18 PSER対主観評価 相関図

表4 本装置のその他の計測・表示機能

|                |                                  |
|----------------|----------------------------------|
| FM帯域のRFスペクトル表示 | 2RF(76.1~94.9MHz)入力に対して(分離受信機採用) |
| RF入力レベルの表示     | 2受信入力に対して(dBμV)                  |
| RF入力レベル比の表示    | 上記2入力の差分(dB)として                  |
| 復調音声信号の波形表示    | 2受信入力に対して                        |
| 復調音声信号のスペクトル表示 | 0~5KHz帯域にて                       |
| パイロット信号の位相     | 基準1PPSの立ち上がりで0°基準として(0°±180°)    |
| SINAD測定        | 試験トーン信号(1kHz等)受信時                |
| S/N測定          | 同上                               |

示す。

PSERと主観評価の間には強い相関が見られ、PSERを同期放送の品質を示す客観値として利用できることがわかった。

なお、一般に市販されているカーチューナやポケット型携帯ラジオは弱電界時や強いマルチパス信号を受けて(同期放送時の干渉に酷似)パイロット信号を良好に再生できない場合は自動的にモノラル受信に切り替えて品質を維持する等の手段が取られていることが多いが、今回製作したFM復調器は干渉時のパイロット信号をそのまま用いてステレオ復調後の音声を出力しているので音声品質とパイロット信号品質の関係は保たれている。

このため、カーチューナで試聴するときの主観評価値とは異なることになる(一般にカーチューナの方が受信品質は良くなることを事前の実験で確認済である)。

3.8 その他の機能

本装置をFM同期放送はもとより通常のFM放送についてもフィールドでの使用を便利にする補助的な機能を持たせた。その機能を表4に示す。

4. 実フィールドにおける検証

今回試作した装置の外観を写真1に示す。

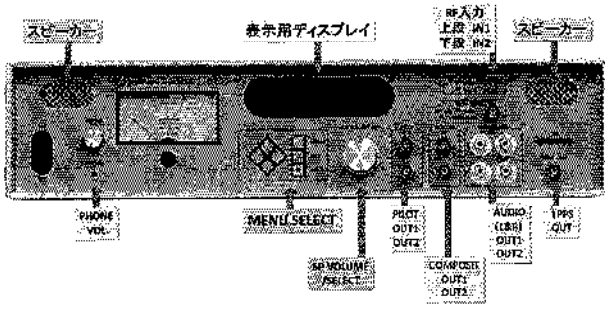


写真1 FM-SFNフィールドアナライザ

本装置を実際の同期放送エリアで試験した結果を測定例を用いて以下に述べる。

4.1 試験エリアの特徴

今回の試験地点はFM-KRY山口局とそのエリア内に建設したFM-KRY柳井局の同期放送エリアで行った。試験地点(山口県上関町)を図19に示す(図中において赤線で山口局の放送エリア、青線で柳井局の放送エリアを示している)。

この地点は山口局と柳井局が弱電界(50 dB $\mu$ V以下)で等電界で重なる地点であり、特に山口局からは海上伝搬受信で、柳井局からは丘回折で受信する複雑な地形のポイントである。受信試験の様子を図20に示す。

試験は2018年10月14日(日)夕方に実際のオンエア放送波を用いて行った。図に示すように2基の2素子八木アンテナを用い、それぞれ山口局(アンテナ1)と柳井局(アンテナ2)を選択分離受信するように設置した。

選択分離受信の様子を図21に示す。



図19 実フィールドにおける測定試験地点



図20 実フィールドにおける検証の様子  
(測定地点:山口県上関町)

図21は受信アンテナ1で山口局の選択分離受信の様子を示しているが、受信アンテナ2では柳井局を選択受信している(スペクトラム写真は略)アンテナ1では約10~15dBの分離受信ができていることがわかる。

4.2 送信所間のFM変調波の偏差測定

図22に各送信所のFM波の変調特性とその偏差についての測定結果を示す。

図に示すように平均中心周波数(DCオフセット量)は偏差-0.1Hzであり平均変調度(トークシーンにて)は0.0023 dBの誤差を持っていることがわかる。

4.3 送信所間の遅延時間差測定

図23に2局間の遅延時間差についての測定結果を示す。

図において、上段が時間軸で音声信号の畳み込み法(2.4.2項(2)に示す)で計測した結果、下段に周波数軸FFT(2.4.2項(3)に示す)で測定した結果を示す。先に2局の変調度が一致していることを示したようにこのような環境下では時間軸法と周波数軸法では大きな差異は生じないことがわかる。なおこの遅延時間差は当初の設計値通りの値を示している。

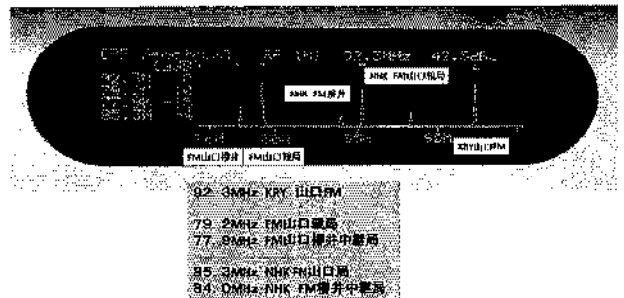


図21 選択分離受信の状態  
(受信アンテナ(RF IN1):山口県大平山方向)

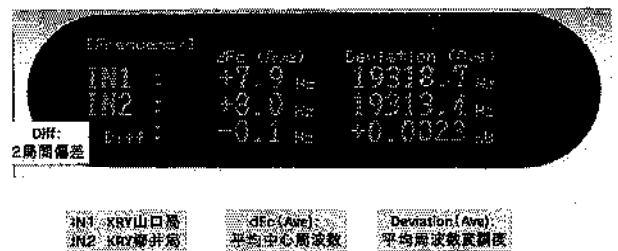


図22 2局間周波数変調特性の測定

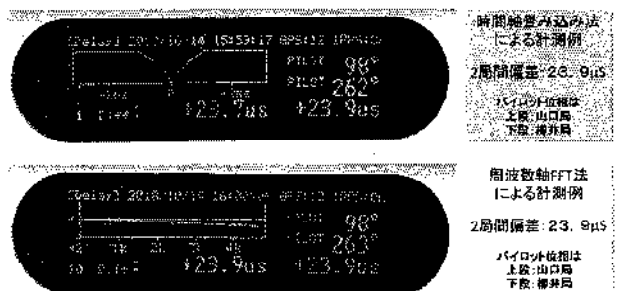


図23 遅延時間差測定例

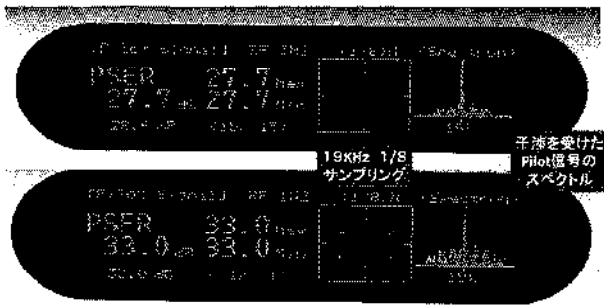


図24 同期放送時のPSERによる品質測定例

また、画面右側に2局を受信したパイロット信号の位相とパイロット位相差から計測される遅延時間差を表示している。すなわち、遅延時間差 $\Delta t$ は下記により求めている。

$$\Delta t = 1/19\text{kHz} \times (262^\circ - 98^\circ) / 360^\circ = 23.97\mu\text{S}$$

であり、上記の2方式による計測値と一致している。

注) この山口局と柳井局の同期放送エリアでは他にも2局の電波が等電界となる地点が複数存在する。このうち強電界(70 dB $\mu$ V以上)で等電界となる地点を選んで2局の遅延時間差が0 $\mu$ Sとなるように設定しており、結果として上関町地点ではこの遅延時間差となっている。

#### 4.4 同期放送受信の品質測定

図24にPSERを用いて計測した同期放送受信の測定例を示す。

PSERの測定値は前述と同じ選択分離受信を行った時のD/U条件下(10~15 dB)での計測値である。それはこの地点(D/U=0 dB, 2波の遅延時間差=23.9 $\mu$ S)で一般家庭の聴取者が固定受信機で受信し、2素子八木アンテナ程度の選択指向性を持つアンテナで良好な受信状況を確認した時の得られる受信品質と想定した。この時RF-IN1(山口局)はPSER=28 dB;主観評価換算3+) RF-IN2(柳井局)はPSER=32 dB(主観評価換算4-)が得られることがわかる。

また移動時の受信環境ではカーチューナ等が用いられ、その場合はこのような環境下ではモノラル受信に切り替わり主観評価は4以上が得られることを確認している。

#### 5. 考察と今後の課題

FM同期放送の同期状態や放送品質を計測できる装置を開発することができた。現在(2019年3月時点)これまで従来法で同期放送の遅延調整を実施してきた地点で本装置を使用して比較測定を行っているが、多くの地点で $\pm 2\sim 5\mu\text{S}$ の誤差が確認され本装置による再調整を行っている。これも本装置により通常の放送時間に調整確認作業を容易に行えるようになったおかげである。また同期放送にとって最も重要なパラメータである遅延時間差測定については三つの方法を考案しその3通りでの計測結果が良く一致しており、その結果干渉しているフィールドでPSER測定による値が向上したことを確認し、本装置の実証性が確認できた。

本装置の計測の精度は冒頭にのべた選択分離受信ができることが前提であり、フィールドでそのような状況を得る

ためには周囲環境や空中線の指向性等種々工夫することが必要である。また必要となる分離度は同期放送を構成する変調器の性能とその同一性に依存することを確認しており今後はそのような条件を調査し定式化したうえで本装置を容易に使用できるようにしていきたい。

#### 6. むすび

同期放送を実施する上で重要な要素である2局間の変調度偏差、平均中心周波数偏差や相対遅延時間差を通常の放送中に計測できることが確認できた。また同期放送の品質を客観的な物理量に置き換える試みとしてPSERの概念を導入し主観評価との相関を明らかにした。今後は異なる音声素材を用いての相関を検証していく所存である。

このSFNフィールドアナライザがこれからのラジオ受信技術の一助となることを期待しております。

謝辞 終わりに、FM同期放送の実現にあたり総務省、並びに中国総通より現地視察を含め、種々のご指導を賜りました。ここに感謝の意を表します。

#### 〔文 献〕

- 1) 恵良, 山崎, 貝嶋, 河野, 櫻尾, 岩木: “高精度デジタル型FM変調器の開発とFM同期放送の実現”, 映像学誌, 71, 12 (2017)
- 2) 平成10年度電気通信審議会答申: “諮問92号FM放送の置局に関する技術的条件参考資料3(別紙6)”
- 3) 特許出願番号, 特願2018-187448
- 4) 特許出願番号, 特願2018-187449
- 5) 特許出願番号, 特願2018-187450
- 6) 特許出願番号, 特願2018-195854



**恵良 勝治** 1989年、徳山高等機械電気工学科卒業。同年、山口放送(株)入社。技術局送出部送出課、2004年、報道制作局制作技術課長、2011年、技術局技術部次長、2014年、技術局技術部次長(部長待遇)、2016年、技術局技術部長、2018年、技術局次長となり、現在に至る。正会員。



**山崎 浩介** 1978年、明治大学商学部卒業。同年、山口放送(株)入社。報道部報道課、1992年、報道課長、1995年、テレビ制作課長、2000年、山口支社長、2005年、取締役報道制作局長、2010年、技術局長兼務、2011年、常務取締役、2015年、専務取締役となり、現在に至る。正会員。



**貝嶋 誠** 1969年、九州大学工学部電子工学科卒業。同年、東京芝浦電気(株)(現 東芝(株))入社。放送衛星、通信衛星(SNG)、地上デジタル放送等の放送・伝送・送信設備の開発・設計に従事。2005年、日本通信機(株)入社。常務取締役、代表取締役社長、取締役会長を経て、現在、同社相談役。正会員。



**河野 憲治** 1985年、茨城工業高等専門学校電気工学科卒業。同年、日本通信機(株)入社。以来、CPUソフトウェア、FPGAデジタル信号処理技術を用いた製品の開発に従事。現在、同社取締役技師長。正会員。



**上田 大一郎** 1995年、信州大学工学部電気電子工学科卒業。同年、住友電設(株)入社。2005年、(株)NHKアイテック入社。以来、デジタルテレビ・FM中継放送所等の設計・施工業務に従事し、現在に至る。正会員。