

# 高レベル確度の校正用受信機

High-Level Accuracy Calibration Receiver

UDC 621.317.38/.78

宇野 剛正

Tsuyomasa Uno

計測器事業本部 デバイス事業部

初鹿 勝也

Katsuya Hatsushika

計測器事業本部 計測器事業部 第2開発部

山崎 俊雄

Toshio Yamazaki

アンリツ計測器カスタムサービス

土井 剛

Tsuyoshi Doi

計測器事業本部 計測器事業部 第2開発部

木邨 伸一

Shin-ichi Kimura

計測器事業本部 計測器事業部 第2開発部

## 1 まえがき

現在、産業界では製造物責任法（通称PL法）やISOによる品質システム概念が導入されるに至り、生産品に対する明確なる品質管理体制の構築の要求が急速に高まっている。またISO/TAG4がガイドラインとして、計測値の不確かさの表現の明確化を打ち出し<sup>\*1)</sup>、計測結果の信頼性に対する世界的な標準化の動きが進んでいる。一方、移動体通信市場の拡大に従い、準マイクロ波帯に対応するさまざまな計測器の需要が増大している。このような背景から、信号発生器等の測定器のレベル確度の保証が重要となってきた。

従来より、信号発生器等の出力レベル校正には校正用受信機が用いられてきた。当社ではARM-5702A/03A以来、ME642Aまで校正用受信機の長い歴史があり、長く好評を得てきたが、ME642Aは開発より十数年を経て現在は生産を終了している。校正用受信機に代わるレベル測定器が計測器各社より供給されているが、現在市販されているレベル校正器には、以下の問題がある。

(1) 単体での測定上限周波数は1.3GHz程度であり、現在の移動通信機器の利用周波数をカバーできない。

(2) 携帯端末機器の受信感度測定のため、信号発生器の低レベルを校正する必要があるが、現状では測定確度が不足である。

(3) 入力信号の状態をモニタできない。また、複雑な同調操作が必要であり、操作が容易でない。

今回これらの問題を解決する広帯域、高確度の校正用受信

機 ML2530A とセンサモジュール MA2540A を新たに開発したので、その概要について述べる。

## 2 設計方針

前述の問題点に対して次のような設計方針をたてた。

### (1) 準マイクロ波帯のカバー

準マイクロ波帯の測定器のレベル校正を1台ですべてカバーできるようにするため、周波数は100kHzから3GHzまで、レベル範囲は+20から-140dBmを測定できるようにする。

### (2) 低レベルでの確度向上

現状機種での低レベル確度の不足を解決するため、-140dBmでの相対レベル確度を±0.5dBを目標とする。



図1 ML2530A 校正用受信機正面パネル  
Front view of ML2530A Calibration Receiver

\*1 : ISO Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, 1995

### (3) モニタの採用

現在の測定器の中で信号状態を観測するには一般にスペクトラムアナライザが使われているので、スペクトラムアナライザと同じ画面と操作性を持たせることにより、信号導入の容易性や信号状態の確認のしやすさの向上を図る。

## 3 回路構成と測定原理

校正用受信機は機構上、本体（ML2530A 校正用受信機）とセンサ部分（MA2540A センサモジュール）の2つの筐体から

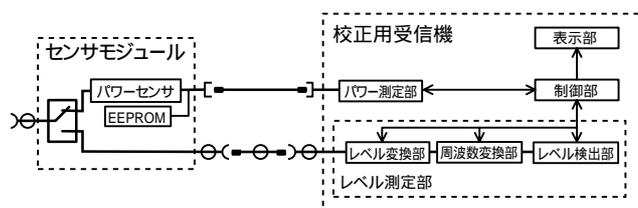


図2 校正用受信機とセンサモジュールの概略ブロック図  
Block diagram of calibration receiver and sensor module

構成される。また、機能的にはパワー測定部とレベル測定部の2つの測定部から構成される。

### 3.1 センサモジュール

センサモジュールは片手で持てる形状・重量であり測定対象のコネクタに直接接続することで、コネクタでのレベルを測定できるようになっている。内部にはパワーセンサとスルーの経路があり、入力されたRF信号をRF同軸スイッチで切換えられるようになっている。パワーセンサにはMA4601Aを流用している。また、シリアルEEPROMを内蔵させることで、パワーセンサの補正係数を記憶し、測定者が補正係数を入力する手間をなくした。

### 3.2 校正用受信機

校正用受信機は、その内部にパワー測定部とレベル測定部を持つ。パワー測定部はセンサモジュール内のパワーセンサと組み合わせ、RF信号のパワーを測定する。ダイナミックレンジは0dBm ± 5dB程度と狭いが、絶対レベル確度が高く、校正用受信機の絶対レベルの基準となる測定部である。

レベル測定部は広ダイナミックレンジで+20 ~ -140dBmのレベル範囲をカバーする。絶対レベル確度はないが、直線性に変優れている。後述の校正用受信機自身の校正によりパワー測定部の絶対レベル確度をレベル測定部に移し校正用受信機としての機能を実現する。

### 3.2.1 パワー測定部

センサーモジュールに入力したRF信号は、内蔵のパワーセンサでRFパワーに比例した直流電圧に変換される。その直流電圧は220Hzのチョッピング信号で交流に変換されて校正用受信機本体のパワー測定部へ送られる。パワー測定部では送られてきた信号を増幅後、同じ220Hzのチョッピング信号で同期検波して直流電圧に戻し、A/Dコンバータでその電圧を制御部に読み込む。

### 3.2.2 レベル測定部

レベル測定部は100kHz ~ 3GHz、+20 ~ -140dBmの広帯域・広ダイナミックレンジのRF信号をレベル検出部に最適な周波数、レベル範囲に変換するレベル/周波数変換部と、変換されたIF信号からレベルを測定するレベル検出部から構成される。

#### (1) レベル/周波数変換部

レベル/周波数変換部は基本的にはスペクトラムアナライザと同じスーパーヘテロダイン構造となっている。100kHz ~ 3GHzのRF信号をミキサ3段で最終的に6.83MHzのIF周波数へ変換している。また、1stLO信号の周波数を掃引することでスペクトラム波形の表示を可能としている。

RF入力段には増幅器・スルー・減衰器を切換えることで+20 ~ -140dBmのダイナミックレンジを3分割し、レベル検出部で扱える60dBのダイナミックレンジ範囲まで変換している。入力信号のレベルの大小により、レベル変換部を自動的に切換え、レベル検出部につねに最適なレベルが入力するようにしている。また、RF入力の直後にはレベル保護回路があり、校正用受信機内部の増幅器等を損傷する恐れのある高レベル信号が入力した場合、次段のRFリレーを切換え内部を保護する仕組みになっている。

A/Dの入力部ではIF信号に雑音を付加し、IF信号と雑音の合計した振幅がA/Dの入力範囲を最大限に変化するように雑音源の振幅をALC制御している。IF信号に雑音を付加することでA/D入力範囲をランダムに変化させ、後続のDSP回路での平均化過程でA/Dコンバータの持つ入出力特性の非直線性が平均化され改善することができる。

#### (2) レベル検出部

レベル検出部では、従来の校正用受信機に付属していた基準ステップ減衰器の代わりに、IF信号をA/Dコンバータで直接サンプリングしデジタルデータに変換後、デジタル信号処理を行う構成としたため、内部構成の大幅な省力化が可能と

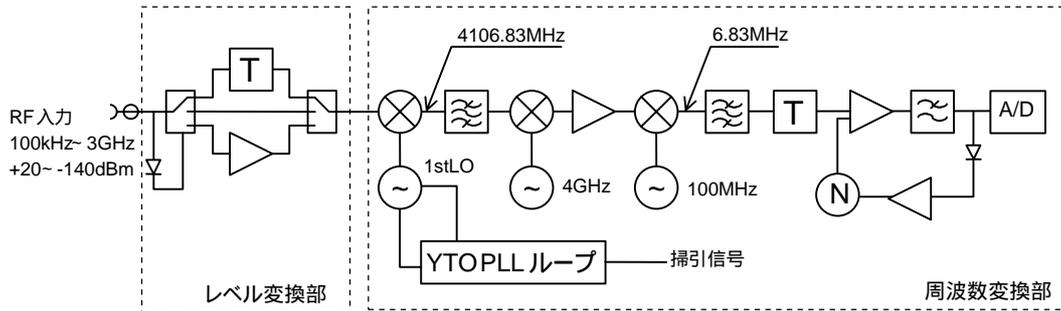


図3 レベル変換部と周波数変換部のブロック図  
Block diagram of level converter and frequency converter

なった。

IF 周波数は 6.83MHz であり、ADC のサンプルレートは 32MHz である。ADC によりサンプリングされた IF 信号は、複素乗算器 (CMAC) と数値制御オシレータ (NCOM) を用いて、複素包絡信号として実項と虚項に分離する。各々別れてフィルタリング処理される。高次デシメーションフィルタ (HDF) では、オーバサンプリングされた信号のサンプルレートを削減すると共に、積分処理により処理 Bit 数が加えられ、後段への信号情報処理量の調節を行っている。次段の有限インパルス応答フィルタ (FIR) では、サンプルレートの削減により生じたエイリアスの除去を行う。その結果を一時メモリに蓄積し、DSP の制御によりメモリ読み出しを行う。ここでレベル測定モードでは、ユーザが指定した BW までフィルタリングした後、複素信号レベルが計算される。一方モニタモードでは、メモリの内容をそのまま複素信号レベル計算する。前者はフィルタリングにより低ノイズ、高 S/N で高精度のレベル測定結果が得られる。後者は、高速処理が可能であるため、信号状態の監視に適している。

レベル測定モードでは、DSP の数値演算によるデジタルフィルタリングにより通過帯域幅 (BW) を制限し、S/N 比を向上させて - 140dBm という低レベルでの測定を実現している。周波数帯域幅 (BW) は最低 1Hz まで設定可能としているが、HDF、FIR を通過しメモリに貯えられる時点の測定データのサンプルレートは 200kHz であり、メモリが 128kbyte であることから、約 640ms の実時間データしか得られず、BW = 1Hz 時には処理データ数が不足する。そこで、設定された BW に応じ、演算処理を数段階に分割し、逐次サンプルレートを落とすことで狭帯域の BW に対応するフィルタリング処理を可能にしている。

フィルタは数値演算によるデジタルフィルタで実現している。これらのフィルタを実現するのに実時間データにガウス型窓関数をカップリングし畳込み積分して所望の通過特性を得ている。

同調の不確かさに影響されないフィルタ形状はフラットトップ型であるが、数値演算によるデジタルフィルタでは、演算データ数が有限であるために処理される実時間データのフ

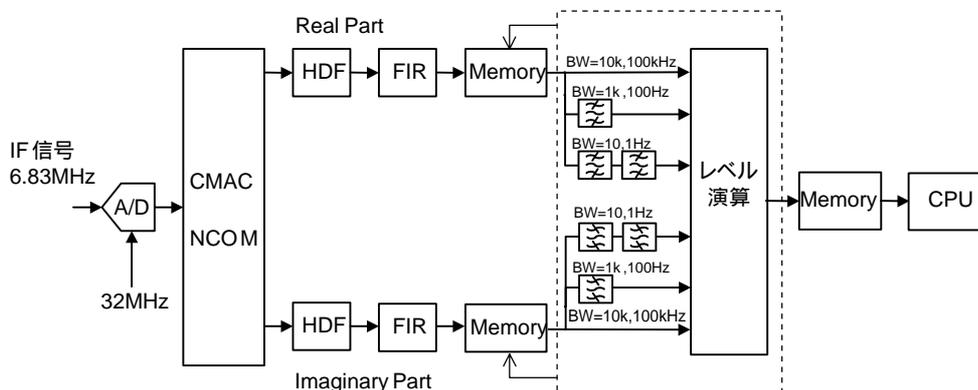


図4 レベル検出部ブロック図  
Block diagram of level detection

ーリエ変換後の周波数特性は完全に平坦とはならず、通過帯域内にリップルが生じるため同一データサンプル数で最も平坦部が広いガウス型窓関数を採用した。

### 3.3 校正

正確なレベル測定をするには、測定前に校正用受信機自身を校正する必要がある。次に述べる3つの校正を行う。

#### (1) センサモジュールのパワーセンサの校正

一般的のパワーメータで使われているパワーセンサと同じようにセンサモジュール内のパワーセンサの校正を行う。この校正には2種類あり無入力時の0点校正と、正確な1mWのパワーを入力した時の感度校正である。校正用受信機にはこの1mW校正用に50MHz発信器を内蔵している。

#### (2) レベル測定部の3つのレンジ間の校正

レベル変換部で区切られた3つのレンジ間のゲイン差は増幅器や減衰器の周波数特性などにより一定でないため、このレンジ間の関係を校正する必要がある。レンジ間にまたがるレベルの信号を入力し、2つのレンジでそのレベルを測定してその間の関係を求める。

#### (3) パワー測定部の絶対レベル確度をレベル測定部へ移す校正

レベル測定部は絶対レベル確度がないため、パワー測定部の絶対レベル確度をレベル測定部に移す。センサモジュール

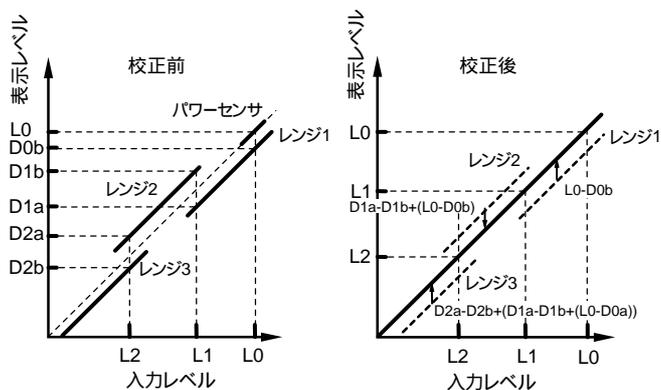


図5 レンジ間の校正と絶対レベルの校正  
Calibration of range and absolute level

に入力したRF信号のレベルをRF同軸リレーを切換え、パワー測定部とレベル測定部で同時に測定することで校正を行う。

## 4 機能

測定する信号の状態により2つの測定モードを設けた。

### (1) Manual Tuning Mode

測定周波数を校正用受信機に直接設定し、その周波数のレベルを測定する。シンセサイズド信号発生器などPLL技術を用いた信号源は表示周波数と実際の周波数が一致するため、このように周波数を直接設定したほうが後述 Monitor Modeよ



図6 Manual Tuning Modeの画面  
Display of manual tuning mode

り測定時間が速くなる。また、信号が一時的に中断した場合でも信号を見失うことがない。

### (2) Monitor Mode

このモードではスペクトラムアナライザと同じような信号波形が表示される、マーカが絶えず信号のピークに追従しそピーク周波数のレベルを測定し、表示する。測定信号

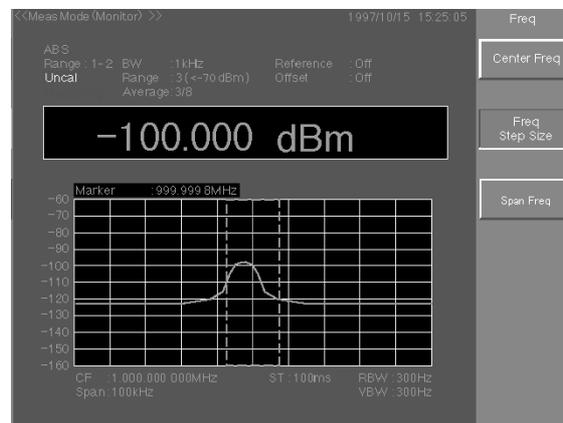


図7 Monitor Modeの画面  
Display of monitor mode

の周波数がはっきりしない時や周波数がふらつくような信号でも測定できる。

## 5 主要規格

### 5.1 規格

表1に校正用受信機の、表2と表3にセンサモジュールの主な規格を示す。

校正用受信機のレベル精度は表1、表2から単純にはでてこない。これは、レベル精度が測定条件によって変化するためであり、その時の測定条件でレベル精度を計算する必要がある。

る。

例として、周波数：1GHz，BW:100Hzのときの相対レベル精度は図8のようになる。

また、周波数：1GHz，BW：100Hz，測定対象のVSWR：1.5，レベル：-100dBmでの絶対レベル精度は表4のようになる。

### 5.2 トレーサビリティ

#### (1) RF電力のトレーサビリティ

今までのパワーセンサ校正では、これまで比較的low域の周波数（10MHz以下）ではインピーダンス特性が若干悪化する

表1 ML2530A 校正用受信機の規格  
Main specifications of calibration receiver

周波数範囲		0.1 ~ 3,000MHz		
レベル範囲		+ 20 ~ - 140dBm		
RF入力コネクタ	種類	N型 (J), 50		
	VSWR	1.25 (レンジ1), 1.40 (レンジ2), 1.50 (レンジ3)		
CAL出力 (15 ~ 35 )		50MHz 1.000mW ± 1.2 % (RSS : ± 0.9 %)		
レ ベ ル 測 定	測定モード	マニュアルチューニングモード	テンキー、エンコーダにて直接入力された周波数のレベルを測定する。	
		モニターモード	モニター上のマーカーで指定された周波数のレベルを測定する。	
	周波数帯域幅	範囲	1Hz ~ 100kHz, 1 ~ 10 シーケンス, ガウス形	
	レンジ種類		レンジ1 : + 20 ~ - 35dBm レンジ2 : - 25 ~ - 80dBm レンジ3 : - 70 ~ - 140dBm	
	精度 (周囲温度 15 ~ 35 の範囲 の一定温度, 余熱1時間, レベル校正後にて)	レンジ内直線性	同一レンジ内にて, BW : 100kHzのときは周波数1MHz以上	
		レンジ切替誤差	レンジ切替レベル ( - 30dBm, - 75dBm ) において ± 0.01dB	
		ノイズフロア	BW : 100Hzの時	
		ノイズフロアによる誤差	BW : 100Hzの時, レンジ内直線性に加算される	
	BW切替誤差	測定信号の残留FMの影響を除き, BW 1Hz ~ 10kHz : ± 0.01dB BW 1Hz ~ 100kHz : ± 0.05dB (周波数1MHz以上)		
	モ ニ タ	中心周波数	0.1 ~ 3000MHz	
周波数スパン		10kHz ~ 1MHz		
分解能帯域幅		300Hz ~ 100kHz, 1 ~ 3 シーケンス		
ビデオ帯域幅		3Hz ~ 100kHz, 1 ~ 3 シーケンス		
オートチューン		30 ~ 3,000MHz, - 30dBm		
寸法, 質量		221.5H x 426W x 451D ( mm ), 17.9kg		

表2 MA2540A センサモジュールの規格  
Main specifications of sensor module

周波数	0.1 ~ 3,000MHz	
RF 入力コネクタ	タイプ	N 型 (J), 50
	VSWR (パワーセンサ側)	1.30 (0.1 ~ 0.3MHz), 1.20 (0.3 ~ 1MHz), 1.36 (1 ~ 3,000MHz)
	VSWR (スルー側)	1.12 (0.1 ~ 100MHz), 1.35 (100 ~ 3,000MHz)
RF 入出力特性	スルー側挿入損失	0.7dB
	スルー側挿入損失再現性	± 0.006dB
寸法, 質量	54H × 63W × 206D (mm), 1kg	

表3 MA2540A センサモジュールの補正係数の代表値  
Typical values of calibration value of sensor module

周波数(MHz)	単純合計 (%)	RSS 合計 (%)
0.1	± 3.0	± 1.4
10	± 2.4	± 1.1
100	± 2.4	± 1.1
1000	± 3.0	± 1.4
2000	± 3.0	± 1.4
3000	± 3.2	± 1.5

表4 総合の絶対レベル精度 (1GHz, BW: 100Hz, -100dBm, VSWR: 1.5)  
Total absolute level accuracy (1GHz, BW: 100Hz, -100dBm, VSWR: 1.5)

誤差要因	誤差
-100dBm での総合相対レベル誤差	± 1.6% (± 0.07dB)
CAL 出力レベル誤差	± 0.9%
校正時の mismatch エラー	± 0.23%
測定周波数でのセンサモジュール校正係数誤差	± 1.4%
校正用受信機本体パワー測定部の直線性誤差	± 1.0%
センサモジュール挿入損失再現性	± 0.14% (± 0.006dB)
被測定器との mismatch エラー センサモジュール + 校正用受信機の VSWR: 1.2 (代表値)	± 3.7%
合計 (RSS)	± 4.5% (± 0.19dB)

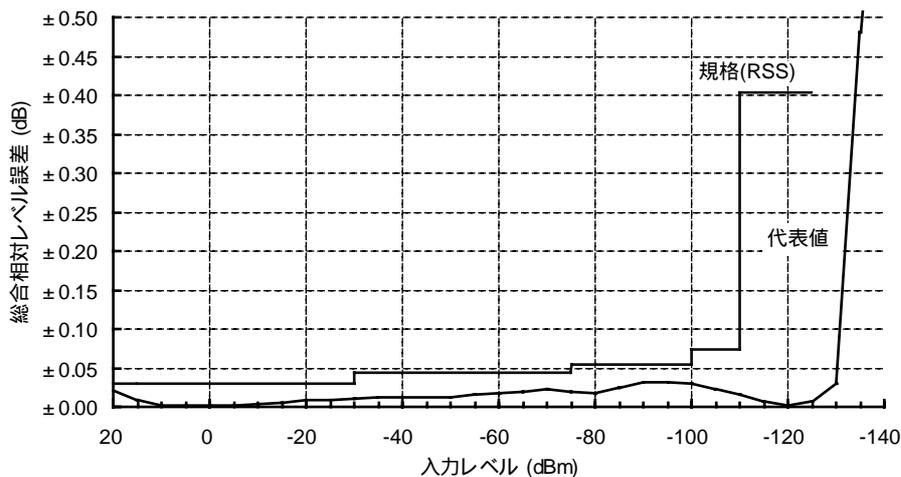


図8 総合の相対精度 (1GHz, BW: 100Hz)  
Total relative accuracy (1GHz, BW: 100Hz)

ので、国家標準へトレースしても仲介標準器自信の校正不確かさが軽減できないために高精度が得にくいという問題があった。そこで、今回は周波数帯域を2つに分け、100kHz ~ 10MHzまでは高周波電圧計を、10 ~ 3000MHzではNISTトレーサブルのサーミスタマウントをそれぞれ仲介標準器として用いた。高周波電圧計は100kHz ~ 10MHzで± 0.1%程度の確

度を得られる。また、サーミスタマウントはRF電力測定の基準として広く認知されており、校正係数は10 ~ 3000MHzで0.28 ~ 0.75% (K = 2)の精度が得られている。

#### (2) 減衰量のトレーサビリティ

減衰量の安定性と再現性に優れた専用のステップ減衰器を用意し、これをJQA (日本品質保証機構) にトレーサブルな

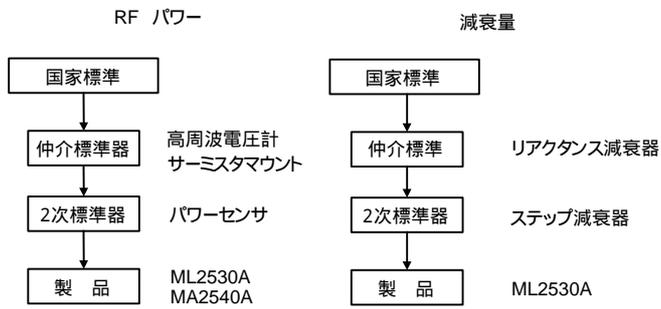


図9 トレーサビリティ体系  
Traceability system

リアクタンス減衰器により校正して  $\pm 0.03\text{dB}/55\text{dB}$  (BW = 1Hz) の確度で値付けして利用している。

## 6 結 び

今回の新しい校正用受信機 ML2530A とセンサモジュール MA2540A の開発により、アンリツ校正用受信機の系列の中に新たな1ページを加えると共に、企業内のトレーサビリティ体系の中で、高確度の企業内標準となり、移動体通信市場などの準マイクロ波帯に対応するさまざまな計測器の測定確度の管理、信頼性の維持に貢献するものである。