

高性能導波管ミキサ MA2806A/08A の開発

Development of High Performance Waveguide Mixer MA2806A/08A.

大嶋真一郎 Shinichiro Oshima, 富崎巧一郎 Koichiro Tomisaki, 呉 志輝 Zhihui Wu,
マカバスコ ジェシ パウロ Jesse Paulo Macabasco

[要旨]

ミリ波の市場は、次世代の無線通信システムを担う周波数帯として注目が高まっている。一方でユーザの要求を満足する測定器がなく、ユーザは、個別に測定環境を構築して評価を実施している状況である。そのため、R&D 市場、認証市場のユーザ等から、次世代無線通信システムに対応した測定器の開発が待ち望まれている。こうした要求に対応するため、高性能導波管ミキサの開発と、従来の外部ミキサ機能の拡張を行い、市場要求を満足する高ダイナミックレンジの受信機を開発した。

1 市場と要求

無線インフラの拡充により、無線通信で使用される情報量は年々増加傾向にある。第 5 世代移動通信方式(5G)では、LTE の 1000 倍の大容量を目指して、世界中で研究・開発が進められている。その中で 1 Gbps 以上のデータレートを実現可能な周波数として、ミリ波帯の利用が注目されている。

6 GHz 以下の周波数帯では、周波数資源の枯渇から使用できる周波数範囲が制限されるのに対し、ミリ波帯は広帯域な信号を取り扱える。このため、将来的な大容量無線通信システムにおいて、ミリ波帯の利用は不可欠と考えられ、実用に向けた研究・開発が活性化している。

一方で、ミリ波帯ではプロアノイズや歪み性能の点で、顧客要求を十分に満足する測定器はない。そこで、アンリツはミリ波帯での各種評価を可能とするために、高性能導波管ミキサ MA2806A/MA2808A の開発、およびスペクトラムアナライザ MS2830A の外部ミキサ機能の拡張を行った。

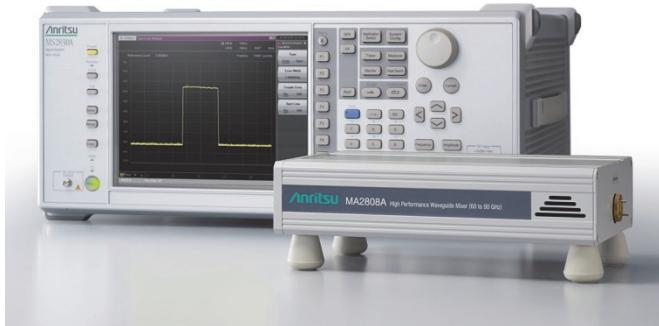


図 1 MS2830A Signal Analyzer

MA2806A/08A High Performance Waveguide Mixer
(50 to 75 GHz) / (60 to 90 GHz)

2 開発方針

ミリ波帯アプリケーションの開発者が、測定器に求める性能は多岐にわたっている。特に無線通信アプリケーションの開発者にとつては、開発するアプリケーションの通信品質と、電波法規等の遵守のために、測定器を使用したいという要求がある。通信品質は各種の規格で定められている通信規格を満たしているかの確認のための変調解析等が要求機能となる。法令遵守についても通信品質試験と同様に、各種の法令で定められているパワー、スプリアス等の規定範囲を遵守しているかの確認のために必要な、感度性能、歪み性能、位相雑音等の電気性能が求められる。

今回開発した高性能導波管ミキサ MA2806A/08A は、後者の法令遵守に関わる測定器である。

2.1 電気性能

ミリ波帯では広帯域な信号を取り扱うため、ほかのアプリケーションよりも高いダイナミックレンジが要求される。一例として、総電力: -10 dBm 、帯域幅:1 GHz の信号を考えたとき、1 Hzあたりに正規化された信号の電力(Spectrum Density)は -100 dBm/Hz となる($-10 \text{ dBm} - 10 \log(1 \text{ GHz}) = -100 \text{ dBm/Hz}$)。

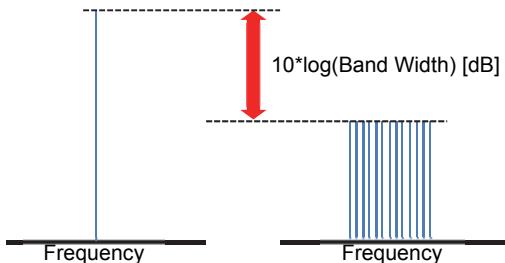


図 2 CW 信号と広帯域信号の Spectrum Density

このような信号を正しく測定するためには、 -100 dBm/Hz の信号を観測するための低雑音性能と、総電力 -10 dBm を入力可能な高歪み性能を両立した測定器が必要となる。すなわち、ミリ波帯

の測定においては、高ダイナミックレンジが必須機能となる。

(1) 低雑音性能

ミキサ入力レベル: -10 dBm とした場合に、1 GHz 帯域幅の信号の電力密度(Spectrum Density)は -100 dBm/Hz となる($-10 \text{ dBm}/1 \text{ GHz}$)。このため、測定器には -100 dBm/Hz を十分に下回る感度性能が要求される(測定信号とノイズレベルの比(SNR)が 40 dB の信号を測定する場合、測定器は -140 dBm/Hz を下回る雑音性能が要求される)。高性能導波管ミキサは、 $\text{NF} \leq 15 \text{ dB}$ の雑音性能を実現することにより、要求される感度性能を満たす。

(2) 高歪み性能

一般的にマイクロ波帯以上で用いられるスペクトラムアライザは不要応答(主に Image Response)を除去するためプリセレクタを備えている。プリセレクタは、その安定性や挿入損失によりレベル確度の悪化や NF 悪化の要因となる一方で、帯域を持った入力信号を帯域制限することでミキサへの入力電力を制限する効果もある。プリセレクタがない測定器では、広帯域信号を取り扱う場合に、入力する信号の全電力がミキサに入力されることとなり、初段のミキサの歪み性能が測定結果に大きく寄与する。

高性能導波管ミキサでは、 $P1 \text{ dB} \geq 0 \text{ dBm}$ の高歪み性能を実現することで、ミキサ入力: -10 dBm を可能とすることを目標とする。また高歪み性能により、帯域を持った信号を観測するにあたって、十分なサイドローブ特性が得られる。

(3) 低スプリアス

測定系に起因したスプリアスは、SEM 測定やスプリアス測定時の問題となる。高性能導波管ミキサでは、基本波ミキシングによる周波数変換と、基本波ミキシングのために内部構造として備えている LO Multiplier Chain でのフィルタリング処理により、入力信号に近接する領域でのスプリアスを低減する。

2.2 測定機能拡張

製品の機能として、煩雑なミリ波帯の測定を簡易化するため、周波数特性の補正、測定機能拡充を目標とした。

また、外部ミキサを使用する場合、前述したプリセレクタがないことにより Image Response の影響が生じる。このため、所望信号と、不要信号を識別するための機能を拡張することにより、汎用性を向上させる。さらに、各種 Measure 機能を高性能導波管ミキサへ対応させることで、各種測定におけるユーザの利便性を向上させる。

(1) 補正機能の追加

測定システムにおけるレベル誤差を抑えるため、下記の補正機能を追加し測定の簡易化を目指した。

- Conversion Loss 補正
- Cable Loss 補正

(2) 信号識別機能の強化

プリセレクタのない測定器では、イメージレスポンスに代表されるさまざまなスプリアスが発生する。このため、所望信号と測定系に起因する信号を切り分ける従来機能として、Signal ID 機能を持っている。Signal ID 機能(Image Suppress モード)は、その動作原理上 Min. Hold 処理を行うため、RMS 検波を必要とする Measure 機能と組み合わせた測定を行うことができない問題がある。このため、原理的にスプリアスを回避する、新しい信号識別機能(PS 機能)を実装することで、各種 Measure 機能を使用することが可能となり、測定の利便性向上を実現する。

(3) 外部ミキサ接続ポートの補正機能追加

外部ミキサを使用時は、MS2830A の 1st Local Output ポート(外部ミキサ接続用ポート)に接続するが、1st Local Output ポートはレベル補正がされていない。このため、1st Local Output ポートに、パワーメータで校正した信号を直接入力して、測定器のレベル誤差分を補正する機能を実装することで、表示レベルの誤差を低減する。

(4) 信号解析機能の拡張

高性能導波管ミキサ使用時に、ETSI および IEEE 802.11ad 仕様^{1)~3)}で定められているミリ波帯での SEM 測定、OBW 測定、TOI 測定、および Chirp 信号などの信号解析を可能とすることで、ミリ波測定における利便性向上を実現する。

(5) 位相雑音測定機能の拡張

ミリ波帯での位相雑音測定は、専用の測定器がなく、また測定そのものが困難である。そのため、位相雑音測定機能を外部ミキサ使用時にも対応させることで、簡易な位相雑音測定を可能とする。

3 設計の要点

3.1 システム設計方針

高性能導波管ミキサでは、基本波ミキシングを実現することで、ミリ波帯に要求される高ダイナミックレンジを実現している。高性能導波管ミキサのブロックダイヤグラムを図3に示す。MA2806AとMA2808Aでは、取り扱う周波数の違いから、内部の LO Multiplier Chain 構造が異なっており、MA2806Aでは入力される LO 信号を8倍、MA2808Aでは12倍することで、基本波ミキシングを可能としている。従来の高調波ミキサ(Harmonic Mixer)は、ミキサで生じる高調波を利用して周波数変換を行うため、LO 周波数を低く抑えることができた。このため、価格や構成の面で優位であるが、Conversion Loss、スプリアス性能の面では基本波変換に対し、大きく悪化してしまう構成となっている。

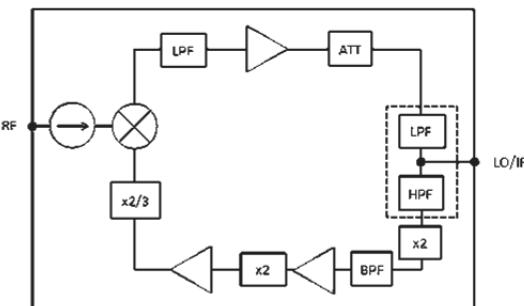


図3 高性能導波管ミキサのブロックダイヤグラム

3.2 低雑音

高ダイナミックレンジのために、基本波ミキシング方式を採用し、低ノイズ特性を実現している。ミキサにおける周波数応答は式(1)で表されることが知られている。このとき、変換次数(m, n)が大きくなるにつれ、Conversion Loss が大きくなることが、一般的に知られている。

$$IF = mRF \pm nLO \quad (1)$$

このため、ミキサ段での損失を低減するためには、変換次数が最少となる基本波変換、すなわち $m=n=1$ とすることが望ましい。一方で、ミリ波帯で基本波変換を行うためには、LO 周波数を使用する周波数帯まで上げる必要がある。

図4に、高性能導波管ミキサ:MA2808A の Conversion Loss 特性を示す。

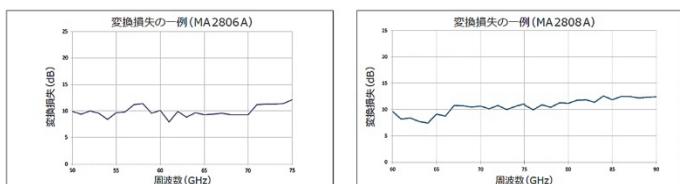


図4 MA2806A/MA2808A の Conversion Loss 周波数特性

3.3 高歪み性能

高歪み性能は、前述のミキサ入力レベル-10 dBm を許容することや、広帯域信号のサイドローブ特性を正しく測定するために必須性能となる。

3.4 低スプリアス

ハーモニックミキサや外部ダウンコンバータを使用したミリ波測定では、スプリアス性能についても注意する必要がある。これらの測定方法では、プリセレクタを備えていないため、イメージレスポンスに代表されるさまざまなスプリアスが生じる。ユーザは所望の周波数範囲でスプリアスが観測された場合に、それが測定系に起因するものか、もしくは被測定物(DUT)によって生じているスプリアスなのかを適切に判断しなくてはならない。

また広帯域信号を取り扱う場合に、入力信号に近接する位置にスプリアスが生じた場合、図5に示すように、所望信号とスプリアスが重複することが懸念される。

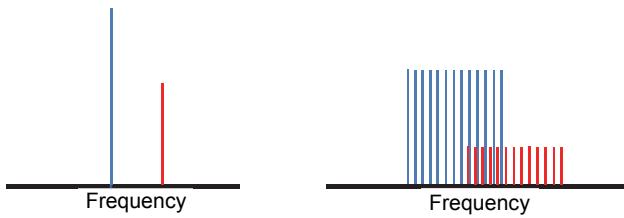


図5 CW 信号および変調波時のスプリアス

高性能導波管ミキサでは、内部の LO Path におけるフィルタ処理により、LO に起因したスプリアスを低減し、Image Response については、後述する PS 機能により、回避を可能とし、その他のスプリアスについては-50 dBc 以下とした。

4 外部ミキサ機能拡張の要点

4.1 補正機能

従来の外部ミキサ機能では、周波数特性を補正する手段がなく、ユーザは測定系の性能を含めた評価を実施している。MS2830A の外部ミキサ機能では、下記の補正機能を追加することで利便性の向上を実現した。

(1) Conversion Loss 補正

従来、Conversion Loss 値は、使用するミキサにより固有の値を持ち、ミキサの周波数特性を一定とみなしたものであった。今回の機能拡張により、MS2830A には Fixed モードと Table モードの 2 通りの機能を追加した。MA2806A/08A を組み合わせて使用する場合には、Table モードが使用可能となる。

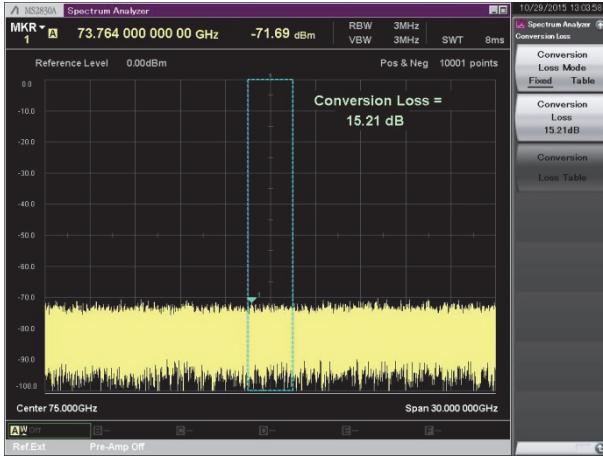


図 6 Conversion Loss Fixed 設定

Table モードでは、接続する高性能導波管ミキサの Conversion Loss を入力することで、ミキサの周波数特性を補正することが可能となる。Conversion Loss Table データは MA2806A/08A に添付される USB メモリから自動で読み込むことができる。

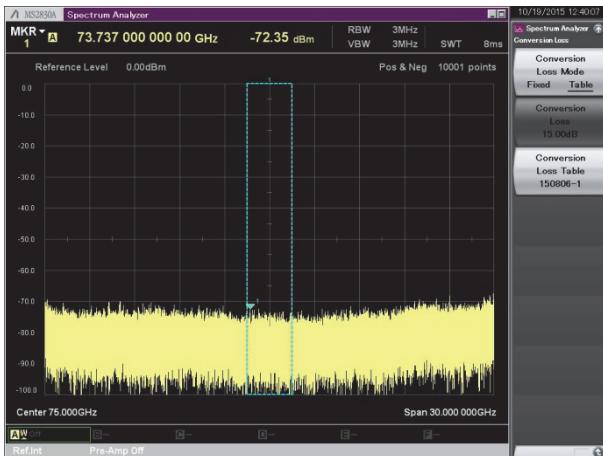


図 7 Conversion Loss Table 設定

(2) Cable Loss 補正

MS2830A と高性能導波管ミキサを組み合わせて使用した場合に、Conversion Loss のパラメータは、前述の機能で調整が可能となるが、MS2830A と高性能導波管ミキサを接続するケーブルの損失値は補正されない。Cable Loss 補正機能では、あらかじめ接続するケーブル損失値を確認し、その値を入力することで、測定結果にケーブルの損失値を反映する。

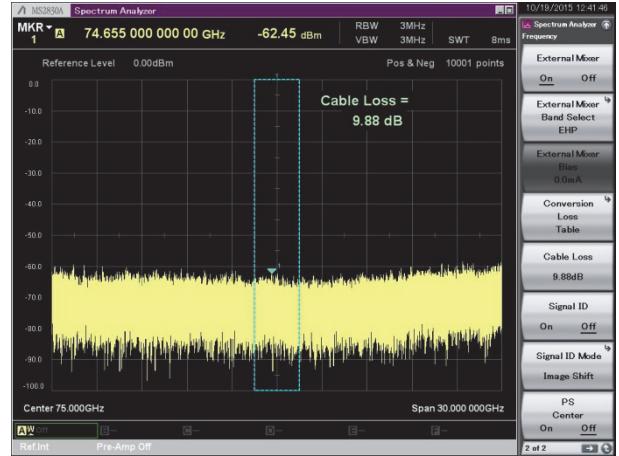


図 8 Cable Loss 設定

(3) User Correction

MS2830A は、基本機能として User Correction 機能を備えている。この機能は、ほかの機能でカバーできない外付けモジュール(減衰器やアンテナなど)の周波数特性を補正する機能であり、外部ミキサ機能使用時にも有効である。

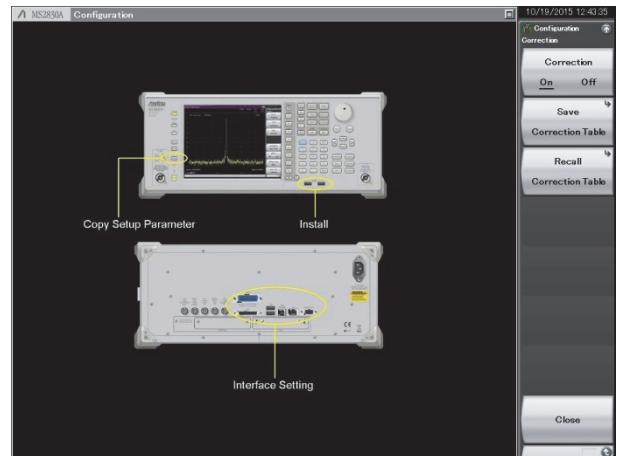


図 10 User Correction 設定

4.2 信号識別機能の拡張

(1) PS 機能

既存の Signal ID (Image Shift モード) 機能を使用した場合、各掃引ごとにミキサ応答条件が変更され、測定系に起因したスプリアスは表示位置がずれる。Image Shift 機能使用時のミキサ応答ごとの結果を図 11 および図 12 に示す(両条件をトレースした結果を図 13 に示す)。

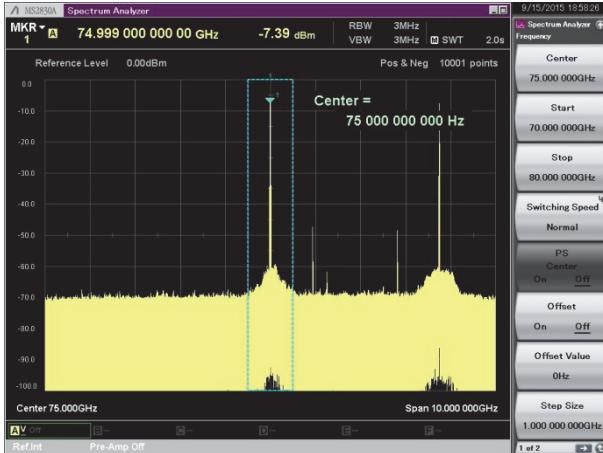


図 11 Image Shift 機能の 1 回目の掃引

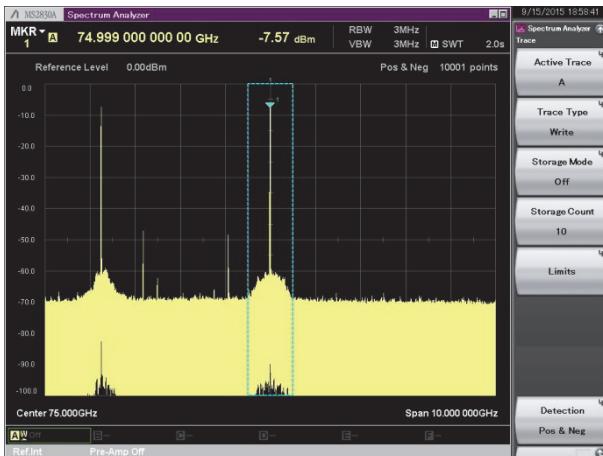


図 12 Image Shift 機能の 2 回目の掃引

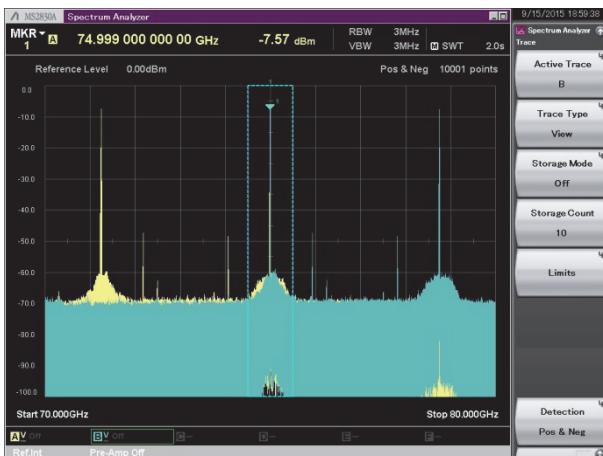


図 13 Image Shift 機能のトレース

従来機能である Signal ID (Image Suppress モード) 機能は、これらの結果を Min. Hold することで、測定系に起因するスプリアスを表示上、消すことができる機能である。ただし、Min. Hold 处理により、RMS 検波時などに正しい測定結果が表示されない。PS 機能は、管面表示の中心周波数でミキサ応答を変更することで、測

定系に起因したスプリアスを回避して測定するための機能である。このため、従来機能では実現できなかった各種 Measure 機能との併用が可能となる。

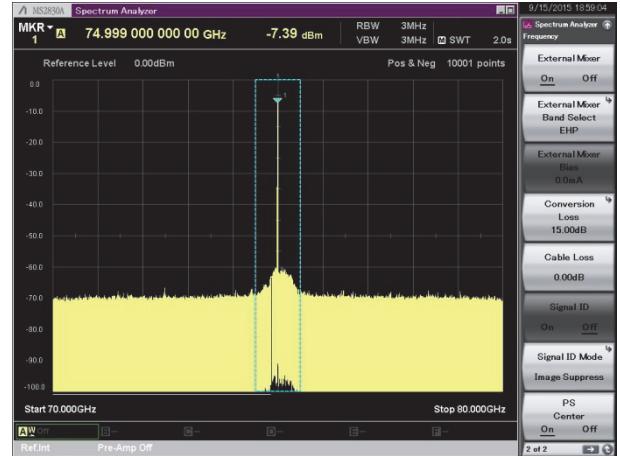


図 14 PS 機能の掃引

(6) 外部ミキサ接続ポートの補正機能追加

従来の外部ミキサ機能では、外部ミキサ接続用ポートのレベル補正が行われていないため、表示レベルは不正確である。

そのため、外部ミキサ接続用ポート端でレベル校正を行う機能を備えることで、表示レベルの確度向上を可能とする。

本機能は、パワーメータで -20 dBm レベルに校正された CW 信号(1875 MHz)を MS2830A 外部ミキサ接続用ポートに入力することで外部ミキサ接続用ポート端でのレベル補正を可能とする。外部ミキサ校正機能実行後の測定結果を図 15 に示す。

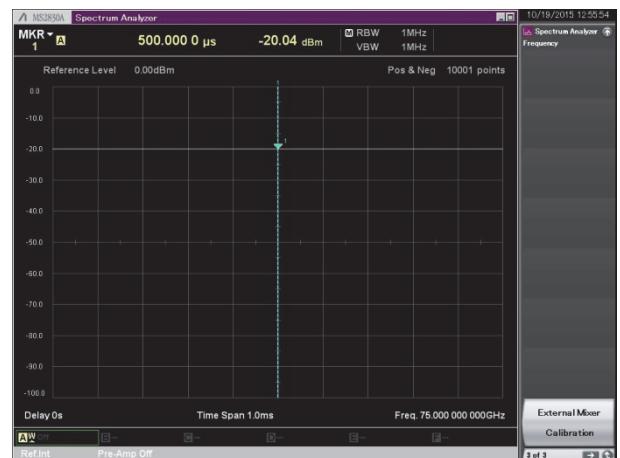


図 15 External Mixer Calibration 機能

高性能導波管ミキサ使用時に、より正確なレベル測定が必要な場合、外部ミキサ校正機能が有効である。

4.3 信号解析機能

高性能導波管ミキサ使用時に、Spectrum Analyzer の Measure 機能や Signal Analyzer 機能を使用可能とした。Spectrum Analyzer の Measure 機能では、SEM 測定や OBW 測定、TOI 測定等をサポートする機能を備えている。また、Signal Analyzer 機能を使用した場合は、Chirp 信号などの解析が可能となる。多くの Measure 機能は RMS 検波での測定が必要であるため、従来の Signal ID 機能では使用することができなかったが、PS 機能の実装により、高性能導波管ミキサ使用時に Measure 機能を実行することが可能となり、ミリ波帯測定の利便性向上を実現した。

図 16 に Measure 機能を使用した測定の一例として、外部ミキサ機能使用時の SEM 測定結果を示す。



図 16 SEM 測定(IEEE802.11ad)

4.4 位相雑音測定機能

MS2830A では、位相雑音測定機能オプション(Opt-010)を実装することで位相雑音測定が可能となる。この位相雑音測定機能は、高性能導波管ミキサ使用時にも使用可能とすることで、V-band(50~75 GHz), E-band(60~90 GHz)での位相雑音性能を簡易に実現できる。

MS2830A の位相雑音性能は、CF:1 GHzにおいて、-95 dBc/Hz at 10 kHz offset, -113 dBc/Hz at 100 kHz offsetとなるが、高性能導波管ミキサ使用時の位相雑音測定では、各モデルの内部通倍回路構造に依存し、 $20 \times \log(\text{通倍数})$ [dB]の性能悪化が生じる。MA2806A は 8 通倍、MA2808A は 12 通倍分の内部通倍回路構造を有しているため、それぞれ約 18 dB、約 22 dB、位相雑音性能が悪化する。高性能導波管ミキサを使用した場合の位相雑音測定結果の一例を図 17 に示す。



図 17 CW:75 GHz 入力時の位相雑音測定結果例

5 主要規格

表 1 に MA2806A/08A の主要規格を示す。

6 むすび

1 Gbps を超える高速無線伝送システムのためにミリ波帯の利用は不可欠であり、さらなる高速化が望まれる無線伝送システムではミリ波帯アプリケーションの開発が活性化している。そこで、ミリ波帯アプリケーションの測定要求を満足する高性能導波管ミキサの開発、および外部ミキサ機能の拡張を実現した。高性能導波管ミキサおよび外部ミキサ機能は、今後実用化が活性化するミリ波帯の開発・製造に貢献していく。

参考文献

- 1) Fixed Radio Systems; Point-to-Point equipment; Radio equipment and antennas for use in Point-to-Point Millimeter wave applications in the Fixed Services (mmwFS) frequency bands 71 GHz to 76 GHz and 81 GHz to 86 GHz, ETSI TS 102 524, V1.1.1 (2006-07)
- 2) Fixed Radio Systems; Point-to-Point equipment; Radio equipment and antennas for use in Point-to-Point High Density applications in the Fixed Services (HDFS) frequency band 64 GHz to 66 GHz, ETSI TS 102 329, V1.2.1 (2007-06)
- 3) Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, Amendment 3: Enhancements for Very High Throughput in the 60 GHz Band, IEEE Standard 802.11ad-2012, 2012
- 4) 木村幸秦, 布施匡章, 大谷昭仁, アンリツテクニカル No.90「100 GHz 超ブリセレクタ搭載ミリ波スペクトラムアナライザ」
- 5) CQ 出版社, RF ワールド No.19「わかるマイクロ波通信システム」

執筆者



大嶋 真一郎
R&D 統轄本部
商品開発本部
第3商品開発部



吳 志輝
R&D 統轄本部
商品開発本部
第3商品開発部



富崎 巧一郎
R&D 統轄本部
商品開発本部
第3商品開発部



マカバスク ジェシ パウロ
R&D 統轄本部
商品開発本部
第3商品開発部

表 1 MA2806A/08A 高性能導波管ミキサ主要規格

電気特性

	MA2806A	MA2808A
適用機種	MS2830A-044, MS2830A-045	
周波数範囲	50 GHz~75 GHz	60 GHz~90 GHz
LO 振幅範囲	>+10 dBm	
倍倍係数	8	12
Conversion Loss (性能保証温度範囲にて)	<15 dB	
P1dB(1 dB コンプレッション ポイント)利得圧縮 (性能保証温度範囲にて)	>0 dBm	
LO リーケージ	<-30 dBm(公称値)	
RF 入力 VSWR	<1.5(公称値)	
LO/IF 出力 VSWR	<2.0(公称値) 1.875 GHz for IF <2.0(公称値) 5 to 10 GHz for LO	<2.0(公称値) 1.875 GHz for IF <2.4(公称値) 5 to 10 GHz for LO
最大入力レベル(CW)	+10 dBm	

インターフェース

RF	Wave Guide(WR15)	Wave Guide(WR12)
IF/LO	SMA	

環境性能

性能保証温度範囲	18~28°C
動作温度範囲	5~45°C (結露なきこと)
保管温度範囲	-20~60°C (結露なきこと)
EMC	EN61326-1, EN61000-3-2:+A1:+A2 適合

筐体

外形寸法	51mm(H)×134mm(W)×229mm(D)
質量	<2 kg

電源

AC 供給電源	AC 100 V~AC 240 V, 50 Hz/60 Hz, 40 VA
---------	---------------------------------------

公知