

# 基本波ミキシングによる 140 GHz 帯ミリ波アンプの高ダイナミックレンジ測定

High-Dynamic-Range Measurement of 140 GHz band Millimeter-wave Amplifier using Fundamental Mixing

布施 匡章 Masaaki Fuse, 大谷 昭仁 Akihito Otani

## [要 旨]

我々は、従来の高調波ミキサを使用した測定に比べ、マルチプレスポンスの発生が少なく、かつダイナミックレンジを広くとれる 140 GHz 基本波ミキシング実験装置の検討および試作を行った。その結果、基本波ミキシングを用いることで、高調波ミキサを使用した従来方式の測定に比べ、20 dB 以上ダイナミックレンジが広くかつ、マルチプレスポンスを大幅に抑制した測定が可能となることを実証した。

## [Summary]

We studied and prototyped the 140 GHz fundamental mixing experimental systems which actualize less multiple responses and higher dynamic range than the conventional measurement method using harmonic mixer. As a result, This paper demonstrated that the measurement, a 20-dB or higher dynamic range as well as excellent wideband suppression of multiple response, can be realized.

## 1 まえがき

近年、WPAN(Wireless Personal Area Network)にミリ波帯無線システムが利用され始めており、100 GHz を超える無線システム実現への取り組みも積極的に行われてきている。しかし、IEEE802.11ad などの 60 GHz~70 GHz 帯無線システムの 2 次高調波評価や 100 GHz 超の周波数帯における無線信号の評価については、高感度、高精度測定技術が確立されておらず、この周波数帯で無線信号のスペクトラム解析を行う場合、スペクトラムアナライザの外部に高調波ミキサを接続し測定を行うことが一般的である[1, 2, 3]。この場合以下の問題が発生する。

- 1) 高調波ミキサ内部で LO 信号の高調波と入力信号をミキシングするため、出力には本来必要とする周波数成分以外に、不要な周波数成分(マルチプレスポンス[3])が出力され、本来の信号成分を観測することが難しくなる。
- 2) 高調波ミキサ内部で発生するLO 信号のパワーは高調波次数の上昇と共に低下するため、ミキサの変換効率が悪化する。従って、大きな高調波次数を必要とする 100 GHz を超える周波数を観測する場合、ダイナミックレンジが大幅に悪化する。

我々は、従来の高調波ミキサを使用した測定に比べ、マルチプレスポンスが少なく、かつダイナミックレンジが大きい測定を実現できる 140 GHz 基本波ミキシング実験装置の開発を行った。さらに、本装置の性能を確認するため、140 GHz 帯ミリ波パワーアンプの 3 次相互変調歪み(IM3)[4]の評価を実施し、従来の高調波ミキサを使用した測定に比べ、20 dB 以上ダイナミックレンジの広い測定が実現できることを確認したので報告する。

## 2 140 GHz 基本波ミキシング実験装置

開発した 140 GHz 基本波ミキシング実験装置は、RF 周波数 110 GHz~140 GHz の周波数帯域を 108 GHz~128 GHz と 122 GHz~140 GHz の 2 つの周波数バンドに分割して観測する装置構成となっている。本装置は、これらの周波数帯域を 2 つの基本波ミキサにより 4 GHz~24 GHz と 6 GHz~24 GHz の IF 周波数にそれぞれ変換し、変換後の IF 信号を合成して観測することで、110 GHz~140 GHz のスペクトラム解析を実現している。

図 1 に 140 GHz 基本波ミキシング実験装置のブロック図を示す。RF 信号源(RF Signal Source)は、相互変調歪測定を行えるよう 2 系統の信号生成部より構成されており、生成された 2 つの信号を magic-T により合成し出力する。LO 信号源(LO Signal Source)は、104 GHz または 116 GHz の LO 信号を生成する。また、RF 信号源および LO 信号源から生成される信号は、それぞれ信号源内部の可変減衰器(VATT)にて、最適な信号レベルに調整された後出力される。ミキサ部(Mixer)は、解析する周波数バンドに対応したミキサから構成されている。それぞれのミキサは、LO 入力と RF 入力にアイソレータ(図中 ⇒ で示す)が接続されている。ミキサにより周波数変換され出力された IF 信号は、スペクトラムアナライザ(Spectrum Analyzer)に入力されスペクトラム解析される。ミキサ入力部の向性結合器(Directional Coupler)と、方向性結合器のカプラ出力に接続されたリ波帶パワーメータ(Millimeter-wave Power Meter)，およびマイクロ波帶パワーメータ(Micro-wave Power Meter)は以降説明する実験装置のレベル補正に使用した。

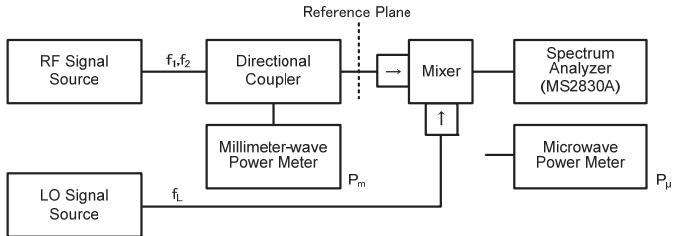


図 1 140 GHz 基本波ミキシング実験装置のブロック図  
Block Diagram of 140-GHz Fundamental Mixing Test System

## 2.1 実験装置のレベル補正

本装置のミキサにより周波数変換されたRF信号をスペクトラムアナライザで観測するためには、基本波ミキサ入力部のアイソレータからスペクトラムアナライザまでの周波数変換損失を算出し、レベル補正データを得ることが必要である。そこで、一般的にパワーメータの校正時に用いられる取替え同時比較校正法[5, 6]の考え方を基礎に、周波数変換損失の算出を試みた。本手法において周波数変換損失は、方向性結合器に接続されたミリ波帯パワーメータの測定値  $P_m$  と、ミキサ出力に接続されるマイクロ波帯パワーメータの測定値  $P_\mu$  より算出することが可能である。

図 2 は、周波数変換損失算出時の測定ブロックをシグナルフローグラフで表したものである。尚、本図では、方向性結合器の S パラメータを  $S_C$ 、アイソレータを含むミキサ部の S パラメータを  $S_M$ 、マイクロ波帯パワーメータの入力反射係数を  $\Gamma_\mu$ 、ミリ波帯パワーメータの入力反射係数を  $\Gamma_m$  と表記した。同図から、ミキサ部に入力される信号レベル  $b_2$  と、マイクロ波パワーメータ入力端の信号レベル  $b_3$  の関係は式(1)のように表すことができる。

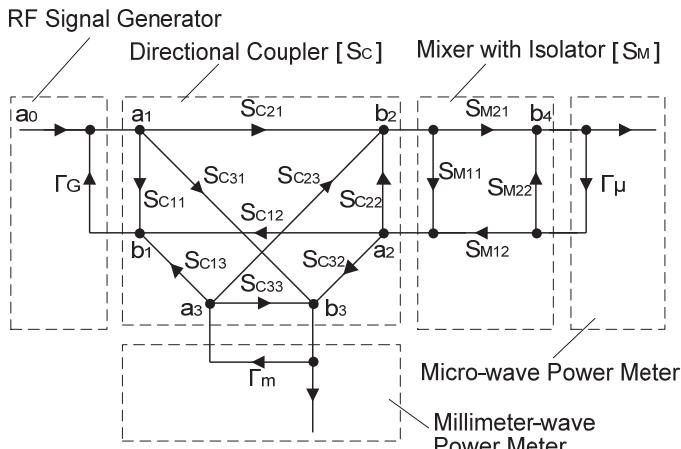


図 2 シグナルフローグラフ  
Signal Flow Graph

$$\frac{b_2}{b_3} = \frac{S_{C21}}{S_{C31}} \cdot \frac{1 - \Gamma_m \cdot \Gamma_{ge3}}{1 - \Gamma_A \cdot \Gamma_{ge2}} \quad (1)$$

$$\text{ただし, } \Gamma_A = \left\{ \Gamma_\mu \cdot \left( \frac{S_{M21} \cdot S_{M12}}{1 - S_{M22} \cdot \Gamma_\mu} \right) + S_{M11} \right\}$$

$$\Gamma_{ge2} = \left( S_{C22} - \frac{S_{C21} \cdot S_{C32}}{S_{C31}} \right), \Gamma_{ge3} = \left( S_{C33} - \frac{S_{C31} \cdot S_{C23}}{S_{C21}} \right)$$

同様に、ミキサ部に入力される信号レベル  $b_2$  と、マイクロ波パワーメータ入力端の信号レベル  $b_4$  の関係は式(2)のように表すことができる。

$$\frac{b_4}{b_2} = \frac{S_{M21}}{1 - S_{M22} \cdot \Gamma_\mu} \quad (2)$$

したがって、周波数変換損失(C.L.)は以下式から算出することができる。

$$C.L. = \left| \frac{S_{C21}}{S_{C31}} \right|^2 \cdot \left| \frac{b_3}{b_4} \right|^2 \cdot \frac{\left| 1 - \Gamma_m \cdot \Gamma_{ge3} \right|^2}{\left| 1 - \Gamma_A \cdot \Gamma_{ge2} \right|^2} \cdot \frac{1}{\left| 1 - S_{M22} \cdot \Gamma_\mu \right|^2} \quad (3)$$

式(3)中の右辺 3 項、4 項は、パワーメータを含む測定系の不整合による誤差を示している。ミキサ入力部に設けたアイソレータの特性より、ミキサ部の伝送特性を  $S_{M12} \approx 0$ ,  $S_{M11} \approx 0$  と考えると式(3)中の  $\Gamma_A$  は  $\Gamma_A \approx 0$  と近似できる。表 1 に式(3)中の各反射係数および S パラメータ値を示す。これら表 1 に示す値は、それぞれ測定帯域内での最悪値を示している。これらの値から算出すると、周波数変換損失測定時の測定系の不整合による影響は、±0.5 dB 以内と推定できる。したがって、今回の実験では、測定系の不整合による誤差を無視できるものとし、C.L.を算出することとした。

表 1 測定系の反射係数および S パラメータ  
S-parameter and Reflection Coefficient of Measurement System

$\Gamma_\mu$	0.11	$\Gamma_{ge2}$	0.03	$SM22$	0.50
$\Gamma_m$	0.14	$\Gamma_{ge3}$	0.04	-	-

図 3 に、140 GHz 基本波ミキシング実験装置に使用した 2 つの基本波ミキサの周波数変換損失の測定結果を示す。同図は、LO 周波数の異なる 2 つの基本波ミキサの周波数変換損失の測定結果を示している。それぞれ LO 周波数は、104 GHz, 116 GHz である。周波数変換損失特性は、測定系の不整合による影響を考慮しても、ミキサの周波数変換損失が 10 dB 以下であることが確認できる。また、LO 周波数の異なるミキサを使用しているため、121 GHz ~127 GHz において、約 1 dB 程度の差も確認できた。

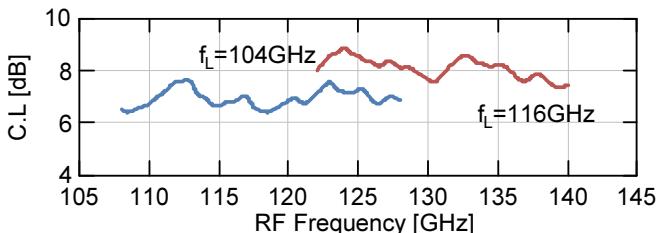


図3 周波数変換損失の測定結果

Conversion Loss Measurement Result

### 3 ミリ波アンプの測定

本装置によるスペクトラム解析の有用性を確認するために、140 GHz 基本波ミキシング実験装置を用いて、市販のミリ波増幅器(HPA)の3次相互変調歪み(IM3)測定を実施した。

#### 3.1 測定系

測定は、図1に示した測定基準面(Reference Plane)に、評価対象の HPA を接続し行った。なお測定系において発生する歪みを抑えるため、HPA の出力には、VATT を接続し、HPA と VATT のトータルゲインが、0 dB 程度となるように設定した。スペクトラムアナライザは、ミキサの入力レベルがスペクトラムアナライザの表示値となるように、ミキサの変換損失を含めレベルを補正している。図4に140 GHz 基本波ミキシング実験装置を示す。

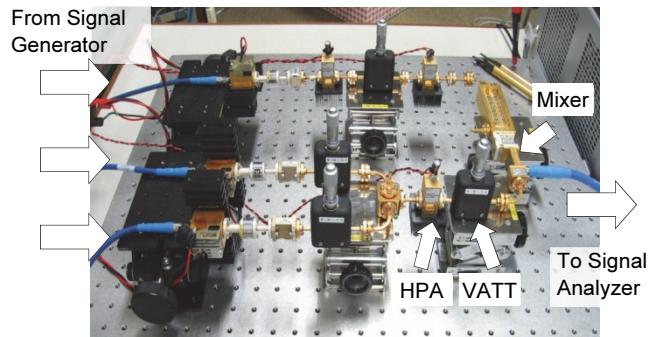


図4 140 GHz 基本波ミキシング実験装置

140-GHz Fundamental Mixing Test System

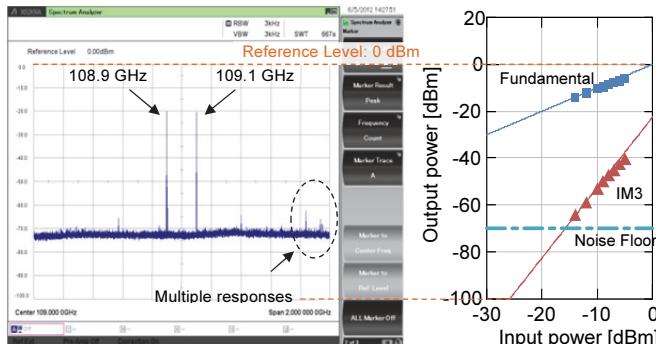


図5 IM3測定結果  $f_1=108.9\text{ GHz}$ ,  $f_2=109.1\text{ GHz}$ , RBW 3 kHz, Span 2 GHz

IM3 measurement result  $f_1=108.9\text{ GHz}$ ,  $f_2=109.1\text{ GHz}$ , RBW 3 kHz, Span 2 GHz

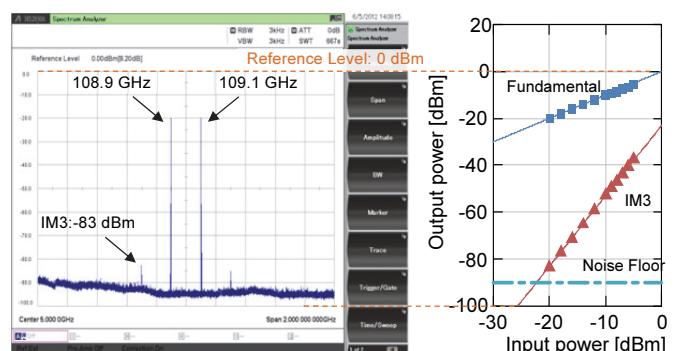
### 3.2 測定結果

本装置のダイナミックレンジ性能を確認するため、高調波ミキサを使用した場合と、本装置を使用した場合の比較実験を実施した。使用した高調波ミキサは W-Band (75 GHz~110 GHz)に対応したミキサのため、周波数をそれぞれ導波管帯域上限付近の、 $f_1=108.9\text{ GHz}$ ,  $f_2=109.1\text{ GHz}$  の 2-tone 信号を使用し HPA の IM3 特性を測定することにした。

図5に比較測定結果を示す。同図(a)は、高調波ミキサを使用した場合、同図(b)は、本装置を使用した場合の測定結果である。IM3 評価においては、測定系のノイズプロアを極力下げる必要となることから、分解能帯域幅(RBW)を 3 kHz に設定した、測定を行っている。この測定では、周波数解析帯域 2 GHz の測定1回に、およそ 10 分を要した。

高調波ミキサを使用した測定では、ミキサ単体の変換損失が 40 dB 以上と大きいため、スペクトラムアナライザ上で観測されるノイズプロアは、約 -70 dBm となっている。したがって、入力信号電力が -15 dBm 以下になると、発生している相互変調歪みがノイズプロア以下に埋もれてしまい観測することができないことがわかる。また、図中破線で示すように、109.9 GHz 付近には、高調波ミキサ特有のマルチプレレスポンスも観測されている。マルチプレレスポンスは基本波ミキサでは発生せず、またその周波数は、入力信号の周波数と LO 周波数の関係により変化する[7]ため、それらの周波数が近接する場合には、測定をさらに難しくすることも予想される。

一方、本装置を使用した測定では、スペクトラムアナライザ上で観測されるノイズプロアは、約 -90 dBm であり、マルチプレレスポンスも観測されていない。また、入力信号電力 -20 dBm 時に発生している -83 dBm の相互変調歪みも確認が可能であることがわかる。



以上のことから、本装置は、高調波ミキサを使用した場合と比較し、20 dB 以上ダイナミックレンジの広い測定が可能であるといえる。このことは、 $RBW$ と掃引時間  $T_{sweep}$  の関係式[8] (4)から、高調波ミキサ使用時と同程度の測定結果を得るのであれば、 $VBW$ を  $RBW$  と等しく設定した場合、 $RBW$ を 2 衡大きくできる。つまり、測定時間を約 10 分から 1/10000 の 60 ミリ秒に短縮できることを示しており、本装置により 100 GHz を超える信号について、より高いダイナミックレンジでのスペクトラム解析や、より高速なスプリアス信号の解析が本装置では実現可能となる。

$$T_{sweep} = K \cdot \frac{SPAN}{RBW \cdot VBW} \quad (4)$$

$RBW \geq VBW, \quad K = 1, 2 \text{ or } 3$

図 6 は、 $f_1=122.9$  GHz,  $f_2=123.1$  GHz における HPA の IM3 測定結果、図 7 は、本装置のほぼ測定上限である、 $f_1=138.9$  GHz,  $f_2=139.1$  GHz における HPA の IM3 測定結果を示している。図 7 の結果では、HPA の周波数特性による基本波のレベルの低下が見られるが、140 GHz 近傍周波数での IM3 特性の測定結果も確認が可能であることがわかる。以上より本装置が 110 GHz~140 GHz の信号解析に利用可能であることが分かる。

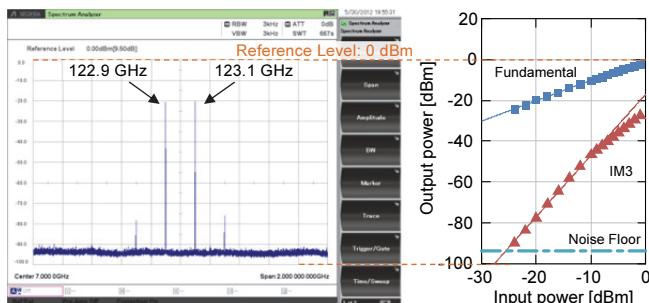


図 6 IM3 測定結果  
 $f_1=122.9$  GHz,  $f_2=123.1$  GHz, RBW 3 kHz, Span 2 GHz

IM3 Measurement Result

$f_1=122.9$  GHz,  $f_2=123.1$  GHz, RBW 3 kHz, Span 2 GHz

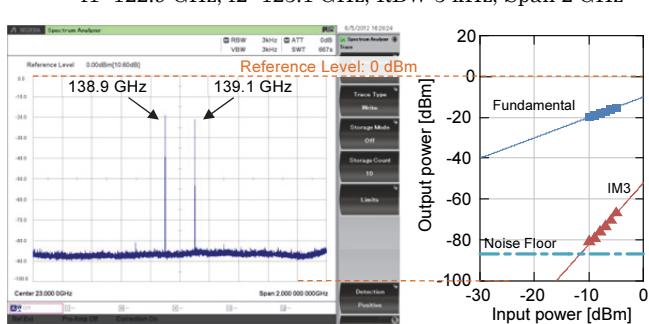


図 7 IM3 測定結果  
 $f_1=138.9$  GHz,  $f_2=139.1$  GHz, RBW 3 kHz, Span 2 GHz

IM3 Measurement Result

$f_1=138.9$  GHz,  $f_2=139.1$  GHz, RBW 3 kHz, Span 2 GHz

## 4 むすび

従来の高調波ミキサを使用した測定に比べ、マルチプルレスポンスが少なく、かつダイナミックレンジが大きい測定を実現できる 140 GHz 基本波ミキシング実験装置の開発を行った。本装置による 140 GHz 帯ミリ波パワーアンプの IM3 評価を実施し、従来の高調波ミキサを使用した測定に比べ、20 dB 以上ダイナミックレンジの広い測定が実施できることを実証した。本装置による観測結果は、基本波ミキシングを用いることで、高調波ミキサ使用時に発生するマルチプルレスポンスが少なく、高ダイナミックレンジの測定が行えることを示しており、100 GHz を超える信号のスプリアス信号の解析への利用の可能性を確認できた。

## 謝辞

本研究開発の一部は総務省「電波資源拡大のための研究開発」の支援の下に実施したものである。貴重なご意見・ご議論を頂いた本研究開発の運営委員各位に謝意を表する。

## 参考文献

- 1) Wendler, W, "Harmonic mixers for spectrum and signal analysis in the microwave range," Millimeter Waves and THz Technology Workshop, Sept. 2011.
- 2) "Millimeter-wave Measurement," Anritsu corp. Application Note, 2011.
- 3) "External Waveguide Mixing and Millimeter Wave Measurements with Agilent PSA Spectrum Analyzers," Agilent Technologies. Application Note, 2007.
- 4) "Spectrum Analysis Basics," Agilent Technologies, Inc. Application Note 150, 2006.
- 5) Stephen A. Maas, "Nonlinear Microwave and RF Circuits - Second Edition," Artech House, 2003.
- 6) "Direct Comparison Transfer of Microwave Power Sensor Calibrations," National Institute of Standards and Technology Technical Note 1379, 1996.
- 7) Moto KINOSHITA, Kazuhiro SHIMAOKA, Koji KOMIYAMA, "Comparison method for the calibration of microwave power meters and its uncertainty analysis," AIST Bulletin of Metrology Vol. 6, No.3, 2007.
- 8) Stephen A. Maas, "Microwave Mixers - Second Edition," Artech House, 1993.
- 9) "The Basis of Spectrum Analyzers", Anritsu corp. Technical Note, 2007.

---

## 執筆者



布施 匠章  
R&D 統轄本部  
R&D センター  
第1技術開発部



大谷 昭仁  
R&D 統轄本部  
R&D センター  
第1技術開発部  
兼 技術企画室

公知