

100 GHz 超プリセレクタ搭載ミリ波スペクトラムアナライザ

Over 100 GHz Preselected millimeter-wave Spectrum Analyzer

木村 幸泰 Yukiyasu Kimura, 布施 匡章 Masaaki Fuse, 大谷 昭仁 Akihito Otani

[要 旨]

第5世代移動通信方式(5G)は、世界中でR&Dが進められており、その中で、100 GHzを超える周波数帯の測定装置が求められている。しかし100 GHzを超える周波数帯でスペクトラム解析を行う場合、プリセレクタとして使用するチューナブルフィルタがまだ供給されていない。そこで、導波管内に構成したファブリペロー共振器を機械的にチューニングする方式のフィルタを開発し、プリセレクタとして採用した。また、ブロックダウンコンバータ用のローカル信号の生成にコヒーレント干渉を用いた光2-tone信号によるミリ波発生方式を採用し、従来に比べ低調波歪が少なく高純度のローカル信号を生成し、より高精度な測定を可能としている。これらを用いて100 GHzを超えるミリ波スペクトラムアナライザを開発した。本装置を用い120 GHz, 20 Gbps帯のQPSK変調波のスペクトラム測定を実施し、プリセレクタにより、スプリアスレスポンスを抑制した測定が可能となることを実証し、プリセレクタを搭載した本装置の有効性を確認した。

1 まえがき

近年、LTEの1000倍の大容量化を目指す第5世代移動通信方式(5G)は、世界中でR&Dが進められている。その中で、10 Gbps以上のデータレートと1 m秒以下の遅延時間を実現できる周波数帯域として、ミリ波帯の開発が急ピッチで進められており、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いる。しかし、67 GHzを超える無線信号のスペクトラム解析を行う場合、プリセレクタを搭載したスペクトラムアナライザは存在しない。従って測定の際には、外部ミキサもしくはブロックダウンコンバータを接続し測定を行うことが一般的となる^{1), 2)}。この場合、本来の入力信号成分にはない信号が観測される。そのため、未知の信号を観測することが要求されるスペクトラムアナライザとして、機能が不十分であった。そこで、新構造のプリセレクタを搭載した100 GHzを超えるミリ波スペクトラムアナライザを開発した。本装置を用い120 GHz, 20 Gbps帯のQPSK変調波のスペクトラム測定を実施し、プリセレクタにより、スプリアスレスポンスを抑制した測定が可能となることを実証した。

2 ミリ波スペクトラムアナライザ

本装置は、110 GHz~140 GHzの信号を対象としたスペクトラムアナライザである。

図1に本装置の外観を、図2に本装置のブロック図を示す。図1に示すように、本装置はWR-08の導波管入力を持つヘッド(Head)と、市販スペクトラムアナライザ(Spectrum Analyzer), 光ローカル信号源(Optical LO Signal Generator)の2筐体で構成される。図2に示すように、ヘッドは同調可能なプリセレクタ

(Pre-selector), 方向性結合器(Isolator), 基本波ミキサ(Mixer), レベル調整用の増幅器(Amplifier), 光ローカル信号を電気信号に変換するUTC-PD(Uni-Traveling-Carrier Photodiode)³⁾から構成される。ダウンコンバータを用いた方式の場合、ミキサのローカル周波数 f_{LO} とミキサに入力されるRF周波数 f_{RF} の差の周波数成分が、IF信号としてミキサから出力されるので、ローカル周波数にIF周波数を加えた周波数と差し引いた周波数の両方がRF周波数になり得る⁴⁾。そのため、通常スペクトラムアナライザでは、プリセレクタにより望まない周波数成分の感度を抑える構成となっている。しかし100 GHzを超える周波数帯では、マイクロ波帯でプリセレクタとして使用されるYTF(YIG Tuned Filter)のようなチューナブルフィルタがまだ供給されていない。そこで本装置では、導波管内に構成したファブリペロー共振器を機械的にチューニングする方式のフィルタ⁵⁾を開発し、プリセレクタとして採用した。



図1 ミリ波スペクトラムアナライザ

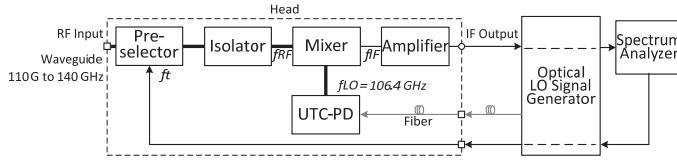


図 2 ミリ波スペクトラムアナライザ ブロック図

2.1 プリセレクタ

今回採用したプリセレクタは、共振器長 L を制御することで、同調周波数 f_{TUNE} を可変する方式のミリ波チューナブルフィルタである。

図 3 に使用したプリセレクタの外観と原理図を示す。図 3 に示すように、主に導波管からなるフィルタとフィルタを駆動するためのアクチュエータから構成されている。アクチュエータは、導波管内に構成されたファブリペロー共振器を構成するハーフミラー一方を駆動し、共振器長 L を制御することで、同調周波数 f_{TUNE} を制御する。

図 4 に本プリセレクタの周波数特性を示す。図 4(a)は共振器長 L を 1.3 mm に調整した際の伝送特性 S21 を示している。図 4(b) は中心周波数付近の拡大図である。約 124.9 GHzにおいて周波数選択性を持つ特性を示し 3 dB 帯域幅は約 400 MHz、中心周波数より 5 GHz 離れた周波数での減衰量は約 30 dB である。図 4(c) は、同調周波数における伝送特性(S21)の最大値をプロットした結果を示している。プリセレクタによるノイズ性能の劣化は、110 GHz~140 GHz の帯域で 6 dB 以下である。図 4(d) は、同調周波数に対する周波数設定偏差を示している。周波数設定時の周波数設定偏差は、110 GHz~140 GHz の帯域で 0.1 GHz 以下である。

2.2 同期動作原理

本装置では、110 GHz~140 GHz の RF 信号を解析するにあたり、ブロックダウンコンバータに、イメージ信号の発生を抑えるプリセレクタを組み合わせた方式を採用した。通常、プリセレクタを搭載した掃引式のスペクトラムアナライザは、ミキサのローカル周波数とプリセレクタを同調制御する方式が使われている⁴⁾。しかし 100 GHz を超える周波数においてローカル周波数を掃引する方式の場合、生成方法やフィルタの構成などが複雑になることが予想される。そこで本装置では、プリセレクタの同調周波数をステップ動作させ、スペクトラムアナライザを分割掃引することで 110 GHz~140 GHz の範囲を分割掃引する方式を選択した。プリセレクタの同調周波数 f_{TUNE} と、スペクトラムアナライザの解析中心周波数を同調させながら、110 GHz~140 GHz の範囲を分割して掃引することにより、最終的に測定帯域のスペクトラムを生成表示している。このような分割掃引方式の場合、プリセレクタの同調周波数 f_{TUNE} のステップ間隔によりレベル再現性や掃引速度が影響を受けることが予想される。

本装置では、今回使用したプリセレクタの設定再現性(図 4(d))や、通過帯域幅から同調周波数のステップ間隔を 0.1 GHz に決定した。このときの掃引速度は、周波数範囲(SPAN): 30 GHz、分解能帯域幅(RBW): 1 MHz における測定においておよそ 15 秒である。

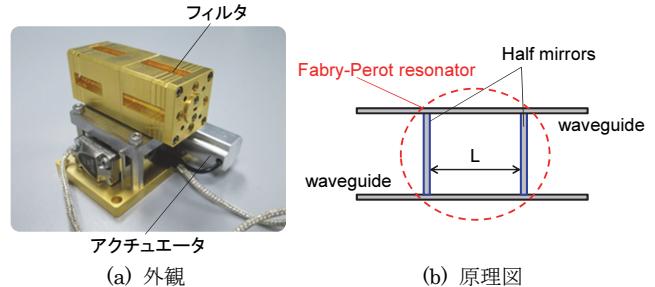


図 3 プリセレクタ

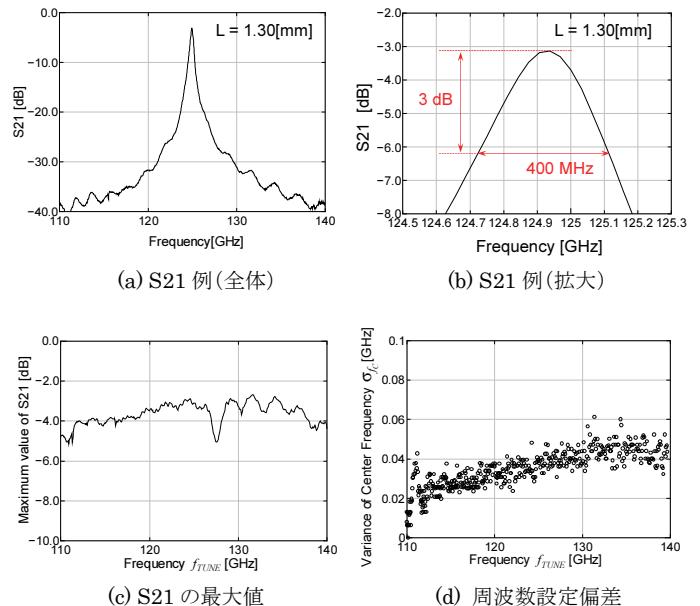


図 4 プリセレクタ周波数特性

2.3 光ローカル信号源

本装置では、ローカル信号の生成にコヒーレント干渉を用いたミリ波発生方式^{7), 8)}を採用している。

図 5 に光ローカル信号源のブロック図を示す。光ローカル信号源は、信号発生器(Signal Generator)が発生した信号周波数 f_m の 4 倍の差周波を持つ光 2 トーン信号(Optical LO Signal)を生成する。生成した光 2 トーン信号は、ヘッド内の UTC-PD で差周波($4 \cdot f_m$)に対応した電気ローカル信号に変換され、基本波ミキサのローカル信号として使用される。本方式により、容易に高い周波数のミリ波信号を生成することが可能となり、ヘッドの小型化も可能となった。

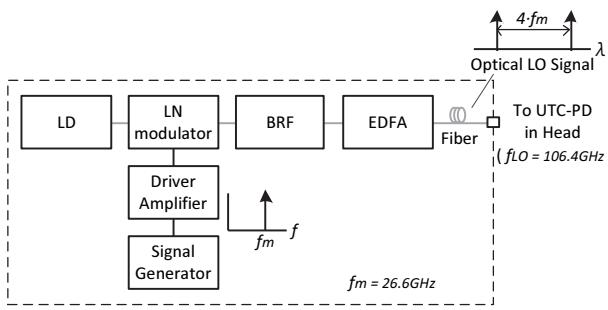


図 5 光ローカル信号源ブロック図

図 6 にコヒーレント干渉ミリ波信号発生、Passive 型電気式 4 遍倍器、Active 型電気式 4 遍倍器による低調波歪($1 \times fm$, $2 \times fm$, ..., $n \times fm$)の最大値の比較結果を示す。電気式遍倍器を用いた方式では、最大で -3 dBc 程度の低調波を発生するが、コヒーレント干渉によるミリ波発生方式では、 -60 dBc 程度の低調波しか発生しない。一般的なフィルタの減衰量を 40 dB 程度と仮定すると、本スペクトラムアナライザで使用している周波数($f_{LO} = 106.4$ GHz)においてコヒーレント干渉ミリ波発生方式は、電気式遍倍方式と比較しスピアス除去のためのフィルタ 1 段分以上、純度の高い信号を得ることができる。フィルタの損失等も考慮すると、プリセレクタを内蔵した検出部の小型化・低消費電力化に大きく貢献している。

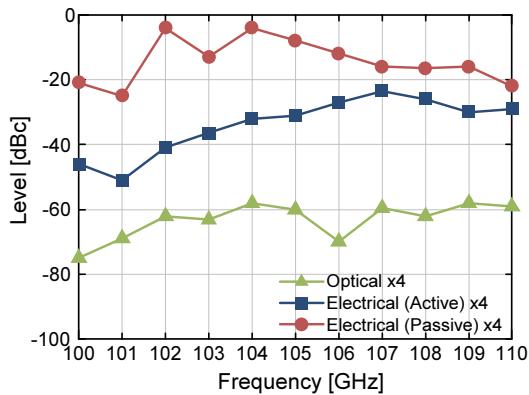


図 6 光ローカル信号源の低調波歪みレベル比較結果

3 測定結果

本装置に搭載したプリセレクタの効果を確認するため、CW 信号によるスピアス測定と、広帯域変調信号によるスペクトラム測定を実施し、本装置の有効性を確認した。

3.1 CW 信号によるスピアス測定

本装置に測定帯域(110 GHz~140 GHz)内の CW 信号を入力し、その際に観測されたスピアスレスポンスのレベルを測定することで、本装置の有効性を確認した。

図 7 に CW 信号によるスピアス測定系ブロック図を示す。信号発生器(SG)からの信号周波数を、倍増器(Multiplier)により 8 通り倍し、周波数倍した信号をバンドパスフィルタ(BPF)、可変減衰器(VATT)を介して本装置に入力する。実験におけるヘッド入力端の入力レベル P_{in} を、可変減衰器で -10 dBm になるよう調整し、そのときのスペクトラムを測定、そのスペクトラム解析結果から、入力レベルに対するスピアスレベルを測定する。なお、被測定信号源のスピアスレベルを抑圧するため、測定周波数に応じてバンドパスフィルタを取り替ながら測定を実施した。

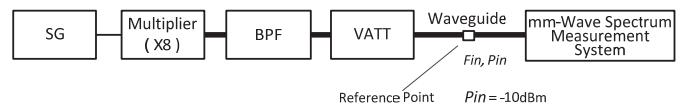


図 7 CW 信号によるスピアス測定系ブロック図

図 8 に入力周波数 f_{in} におけるスピアスレベルの測定結果を示す。図 8(a)内の実線はプリセレクタがある場合、破線はプリセレクタがない場合のスピアスレベルを示している。図 8(b), (c)は、入力周波数 f_{in} が 115 GHz 時のスペクトラム解析結果を示している。図 8(b)に示すようにプリセレクタがない場合には、ローカル信号と入力信号による相互変調歪の周波数成分が観測されている。しかし図 8(c)に示すプリセレクタがある場合には、それら歪成分は観測されない。このように、プリセレクタを用いることで、入力信号には本来存在しない信号成分が観測されず、正しい観測を行うことが可能となる。

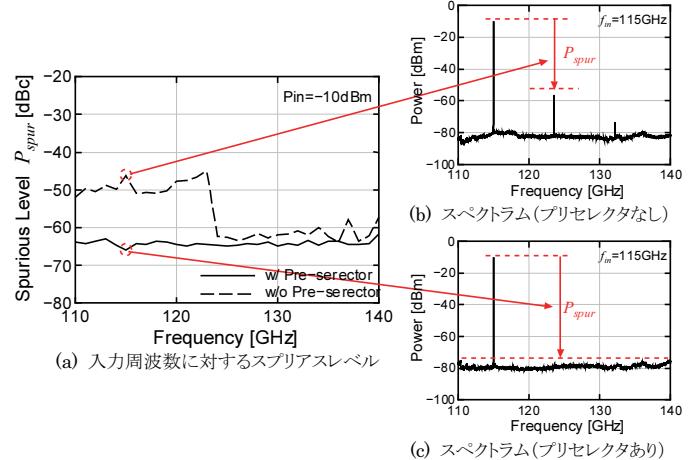


図 8 スピアスレベル測定結果

3.2 広帯域変調信号によるスペクトラム測定

テスト用の広帯域ミリ波変調信号を生成し、測定することで、本装置の有効性を確認した。広帯域ミリ波変調信号の生成には光ローカル信号の生成と同様、コヒーレント干渉を用いたミリ波発生方式を用いた。

図 9 に広帯域変調信号によるスペクトラム測定系ブロック図を示す。光ローカル信号源(Optical LO Signal Generator)が生成した差周波 $4 \cdot f_m$ の光 2トーン信号を、LN 変調器(LN modulator)を用いて変調し、UTC-PD でミリ波信号に変換し出力する^{9), 10)}。LN 変調器で使用する変調信号源は、任意波形発生器(AWG)を使用した。このように構成することで広帯域変調信号を容易に生成でき、UTC-PD から周波数 $4 \cdot f_m$ の搬送波(Carrier)と、周波数 $4 \cdot f_m \pm f_{IF}$ に両側波帶(DSB)を持つ信号を出力させることが可能である。

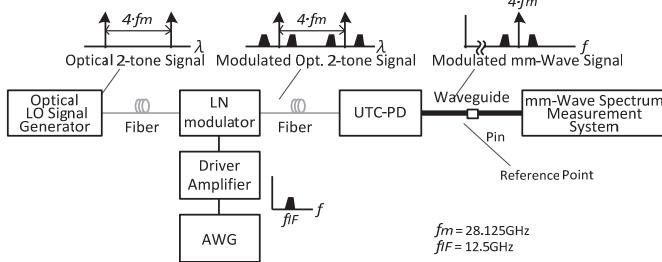


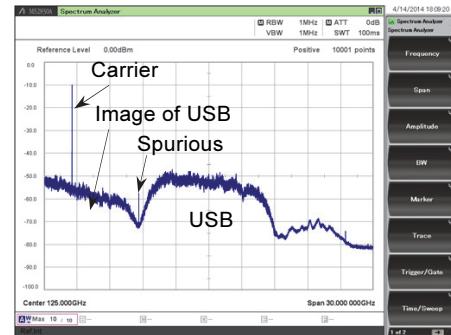
図 9 広帯域変調信号によるスペクトラム測定系ブロック図

図 10 に、テスト用広帯域ミリ波変調信号のスペクトラム測定結果を示す。図 10 は、AWG から中心周波数 12.5 GHz、シンボルレート 10 Gsym/s、ロールオフ率 0.3 の QPSK 変調波を発生させ測定した際の結果である。図 10(a) はプリセレクタを取り外し測定した際の測定結果である。プリセレクタを使用しない場合、下側波帶 LSB が 112.5 GHz 付近にイメージとして、さらに搬送波による歪成分が 118.5 GHz 付近にスパurious として観測されている。図 10(b) はプリセレクタを搭載した本装置による測定結果である。測定周波数範囲にある搬送波と、上側波帶 USB が正しく観測されているのが確認できる。

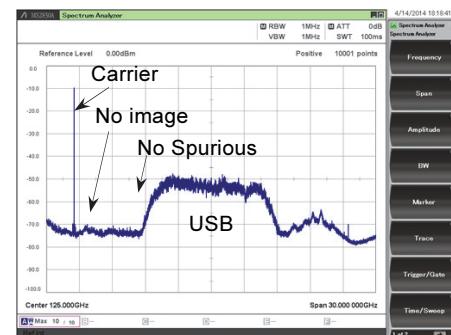
このように、プリセレクタを使用した本装置によりイメージ信号成分や、スパuriousレスポンスのない測定が可能となる。

4 むすび

新構造のプリセレクタを搭載した 100 GHz を超えるミリ波スペクトラムアナライザを開発した、本装置を用いた評価により、CW 波、広帯域変調波において、スパuriousレスポンスを抑制した測定が可能となることを実証し、プリセレクタを搭載した本装置の有効性を確認した。



(a) プリセレクタなし



(b) プリセレクタあり

図 10 広帯域変調信号測定結果(RBW: 1 MHz, ピーク検波)

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。

参考文献

- 1) "External Waveguide Mixing and Millimeter Wave Measurements with Agilent PSA Spectrum Analyzers," Agilent Technologies, Inc. Application Note 1485, 2007.
- 2) "Millimeter-wave Measurement," Anritsu corp. Application Note, 2011.
- 3) H.Ito, S.Kodama, Y.Muramoto, T.Furuta, T.Nagatsuma, and T.Ishibashi, "High-Speed and High-Output InP-InGaAs Uni-traveling-Carrier Photodiodes," IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN QUANTUM ELECTRONICS, VOL. 10, NO.4, JULY/AUGUST 2004.
- 4) "Spectrum Analysis Basics," Agilent Technologies, Inc. Application Note 150, 2006.
- 5) T. Kawamura, H. Shimotahira, and A. Otani, "Novel Tunable Filter for Millimeter-Wave Spectrum Analyzer over 100 GHz," IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 63,no. 5, pp. 1320-1327, May 2014.
- 6) Y.Kimura, A.Otani, and S.Arai, "Superiority evaluation of the coherent interference millimeter-wave generation method," The Papers of Technical Meeting on "Instrumentation and Measurement," IEEJ, IM-12-50, pp.23-28, 2012 (in japanese)
- 7) H.Kiuchi, T.Kawanishi, M.Yamada, T.Sakamoto, M.Tsuchiya, J. Amagai, and M.Izutsu, "High Extinction Ratio Mach-Zehnder Modulator Applied to a Highly Stable Optical Signal Generator," IEEE Trans. Microwave Theory & Tech., vol. 55, no. 9, pp.1964-1972, 2007.
- 8) T.Kawanishi, et al. "160GHz two-tone lightwave generation using high extinction-ratio optical modulation," Lasers and Electro-Optics Society 19th Annual Meeting of the IEEE, pp.195-196, 2006.
- 9) T.Kawanishi, T.Sakamoto, and A.Chiba, "High-Speed and Presice Lightwave Modulation Technologies," OptoElectronics and Communications Conference, ThQ1, 2009.
- 10) T.Sakamoto, A.Chiba, and T.Kawanishi, "Electro-optic synthesis of multi-level coherent signals," OptoElectronics and Communications Conference, Thp5, 2009.
- 11) T. Kawamura and A. Otani, "Proposal to Expand Frequency Tuning Range in Millimeter-Wave Band Tunable Filter," Proceedings of 2014 Asia-Pacific Microwave Conference, FR1G-38, pp.1270-1272, Nov. 2014.
- 12) M. Fuse, Y. Kimura, and A. Otani, "Over 100GHz Millimeter-wave Spectrum Measurement System with Pre-selector," 2014 IEEE International Microwave Symposium (IMS 2014), TH2D-1 1010, Tampa Bay, 5 June 2014.

執筆者



木村 幸泰
R&D 統轄本部
R&D センター
第1技術開発部



布施 匡章
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