

ミリ波帯テラヘルツ波帯スペクトラムアナライザ実現のための可変フィルタ技術の紹介

河村 尚志 Takashi Kawamura, 待鳥 誠範 Shigenori Mattori

[要旨]

今後予想されるモバイルトラヒックの増加に対応するためには、現在使用されておらず広い周波数帯域を使用できるミリ波・テラヘルツ波帯の利用が必要である。しかしながら、これらの周波数では、無線装置の開発に必要であるスペクトラムアナライザが実現されていない。この要因の一つとして、プリセレクタと呼ばれる可変フィルタの開発が困難であることが挙げられる。この問題を解決するフィルタとして本稿では、70 GHz～140 GHzにおいて動作するチューナブルフィルタであるFPWフィルタと、140 GHz～315 GHzの帯域で使用可能なフィルタバンクである導波管スイッチ一体型フィルタバンクを紹介する。さらに、両フィルタ方式で製作した試作器の評価結果を報告する。

1 まえがき

今後さらなる増大が予想されるモバイルトラヒックに対応するためには、数十 Gbps 級の伝送速度を実現することが可能なミリ波・テラヘルツ波帯を無線通信に利用することが必要である¹⁾。また、そのような無線システムの開発に当たっては、基本的な測定器であるスペクトラムアナライザをミリ波・テラヘルツ波帯で実現することが課題の一つとなる。

このような、高い周波数帯でのスペクトラムアナライザの実現法の一つとして、ミキサを用いたダウンコンバータと汎用のスペクトラムアナライザによる構成がある²⁾。この構成を用いる場合、ミキサに入力される信号とローカル信号との関係から、本来は存在しない信号が観測される問題が生じる。このため、不要な信号の影響を抑制し被測定信号を精度良く測定するためには、図1のようにミキサの前段に観測信号以外の信号の入力を阻止するプリセレクタと呼ばれる可変フィルタを設置する必要がある。

プリセレクタの実現法は大きく2つに分けられる。一つは共振周波数を変化させることにより、フィルタの通過帯域を連続的に変化させるチューナブルフィルタであり、もう一つは使用帯域を複数の帯域に分け、その帯域ごとの固定周波数のフィルタをスイッチで切り替えて使用するフィルタバンクである。チューナブルフィルタとしては、YIG素子を用いて構成されたYTF(YIG Tunable Filter)³⁾がよく用いられる。しかしながら、70 GHzを超えるような高い周波数帯では、その実現が困難であり市販品は存在しない。一方、フィルタバンクに関しては、その構成のために必要な導波管スイッチ等の個別部品が100 GHz超の周波数帯でも存在している。しかしこれらの部品を用いてフィルタバンクを構成した場合、部品点数が多くなることから装置全体の寸法が大きくなり、また一般に挿入損失が大きくなるためプリセレクタとしては不適当である。

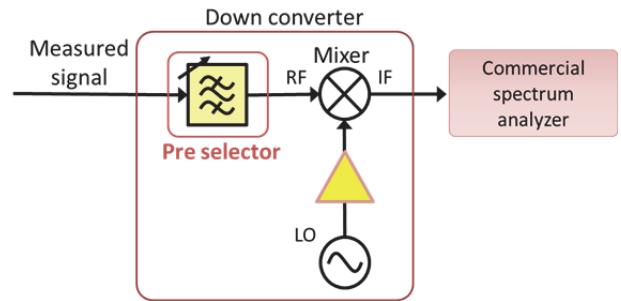


図1 スペクトラムアナライザブロック図

このような問題を解決するため、筆者らは70 GHzを超える周波数帯でプリセレクタとして使用することが可能な新たなフィルタを提案してきた。その一つであるFPW(Fabry-Perot resonator inside Waveguide)フィルタ^{4)～9)}は、共振器長をアクチュエータにより直接変化させることで、通過帯域の中心周波数をリニアに変化させるチューナブルフィルタである。小型な構造で、広い周波数帯で使用可能なフィルタであるが、アクチュエータの位置再現性がフィルタの周波数特性の再現性に影響を与えることや、比較的複雑な構造であるため機械公差の問題から140 GHz程度が実用上の限界になると想定している。

140 GHz以上の周波数帯域で使用できるプリセレクタとしては、導波管スイッチ一体型フィルタバンク^{10)～13)}を提案している。このフィルタバンクは、1対1の導波管スイッチに複数のBPF(Band Pass Filter)を内蔵する構造であり、従来の個別の部品から構成されるフィルタバンクに比べると、比較的小型で挿入損失も小さい。また、簡易な構造であるため、140 GHz以上の帯域でも実現可能である。本稿では、このフィルタバンクの300 GHz帯での試作結果を示すが、それ以上の周波数帯でも実現が可能であると推定される。しかしながら、FPWフィルタと比べると大きな装置となり、また固定周波数のBPFフィルタを使用するため、被測定信号の帯域をどのように分割すべきか等のスペクトラムアナライザ全体の設計を行った後に、BPFの設計を行う必要がある。

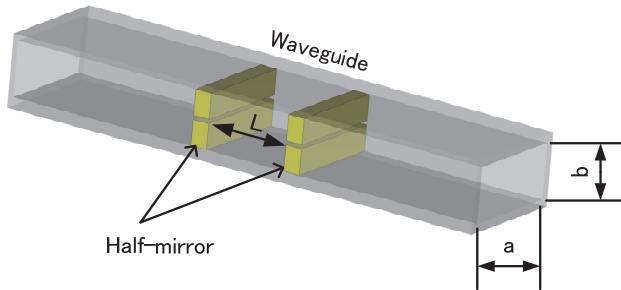


図 2 FPW フィルタ原理図

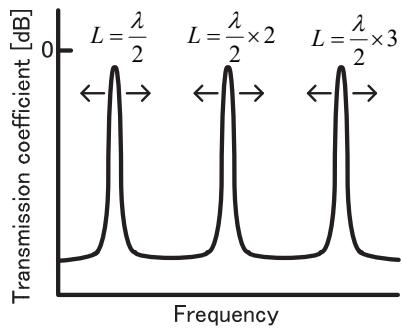


図 3 ファブリペロー共振器の透過特性

本稿では、70 GHz～140 GHz の帯域内で試作した FPW フィルタと、140 GHz～315 GHz の帯域内において試作した導波管スイッチ一体式のフィルタバンクについて、その動作原理と試作器の評価結果を紹介する。

2 チューナブルフィルタ (FPW フィルタ)

2.1 動作原理

FPW フィルタは、光学分野で用いられるファブリペロー共振器¹⁴⁾のように導波管内に設置したフィルタである。ファブリペロー共振器¹⁴⁾は、向い合せた 2 つの部分透過鏡(Half-mirror)により構成され、図 3 のように鏡面間の線路長 L(共振器長)が半波長の整数倍のとき、透過係数が最大となる特性を持つ。このため鏡面間の線路長を変化させることで通過帯域の中心周波数の掃引が可能である。

2.2 試作器の構造

実際にアクチュエータにより部分透過鏡を動作させ、L を変化させることのできる構造を図 4 に示す。図 4 は導波管開口面の長手方向の中心(a/2)で切断した E 断面図である。部分透過鏡の 1 つは port1 側の導波管に固定されており、2 つ目は可動導波管の先端に取り付けられている。可動導波管は、外部導波管の中に挿入されており、下部にあるアクチュエータが動作することで可動導波管が外部導波管の中で移動し、部分透過鏡間の距離である共振器長 L を変化させることができる。可動導波管と外部導波管の間には、

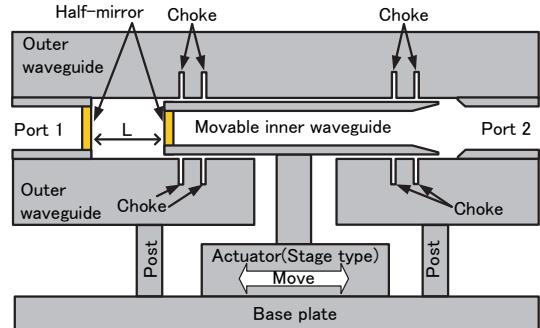


図 4 FPW フィルタ E 断面図

30 μm 程度の隙間を開けており、可動導波管と外部導波管の接触による摩耗を防ぎ、フィルタの耐久性を高める構造となっている。また、この隙間からの電磁波の漏れを防ぐため、チョークと呼ばれる管内波長の 1/4 程度の深さを持つ溝を設けている。チョークは必要に応じて複数本設置する。なお、図 4 ではチョークを外部導波管側に設けているが、可動導波管の肉厚が十分であれば、可動導波管側にチョークを設ける構造も可能である。Port2 側に面する可動導波管と外部導波管はテーパ構造とし、導波管口径の不連続による反射を抑制している。また、Port1 側と同様に、可動導波管と外部導波管の間の隙間からの漏れを防止するためチョークを設置している。

部分透過鏡は、使用する帯域において一定の反射係数を持つ構造であればどのような構造でもよい。このとき、反射係数が大きければ、フィルタの Q が高くなるため通過帯域を狭くできるが、挿入損失も増加する。このため、適当な反射係数の値を選択する必要がある。試作器の設計では、部分透過鏡として H 面(導波管開口の長手方向に平行)にスリットを切った金属板を採用した。また、全反射に近い反射係数の値は評価が困難であることから、透過係数での評価を行うこととした。具体的には、損失のない導波管内に部分透過鏡が 1 枚のみ存在する場合のシミュレーションを行い、S₂₁ が -20 dB 程度となるようにスリット幅の調整を行った。

2.3 試作した FPW フィルタと評価結果

入出力を WR-12 導波管とし、70 GHz～90 GHz を使用帯域とする WR-12 帶 FPW フィルタと、入出力を WR-8 導波管とし 110 GHz～140 GHz を使用帯域とする WR-8 帯 FPW フィルタの試作した結果を以下に示す。両周波数帯の FPW フィルタは、共通のアクチュエータを使用しており、その再現性は ±0.2 μm となっている。これは、WR-8 帯 FPW フィルタにおいて ±30 MHz 程度の中心周波数のずれを引き起こす要因となる。しかしながら、今回の試作器は通過帯域の 3 dB 幅が 300 MHz 以上であることから、実用上大きな問題にはならないことが想定される。

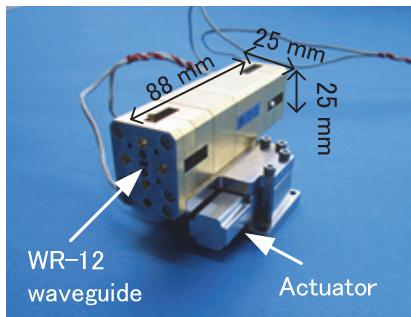


図 5 WR-12 帯 FPW フィルタ外観図

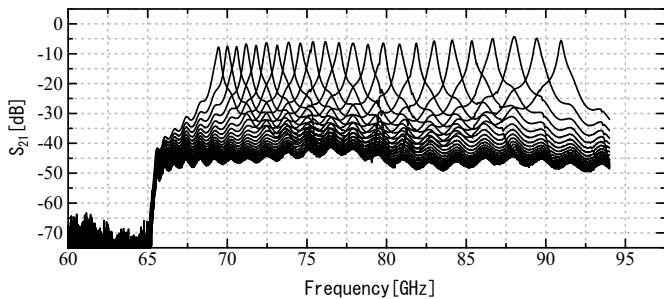


図 6 WR-12 帯 FPW フィルタ S_{21} 測定結果
(アクチュエータを $50 \mu\text{m}$ step で可動)

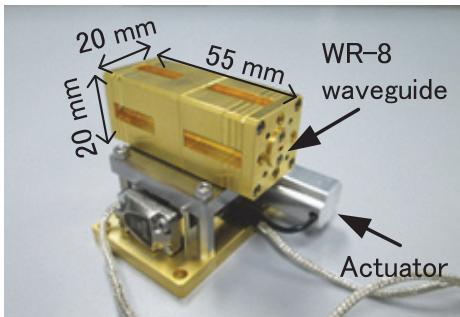


図 7 WR-8 帯 FPW フィルタ外観図

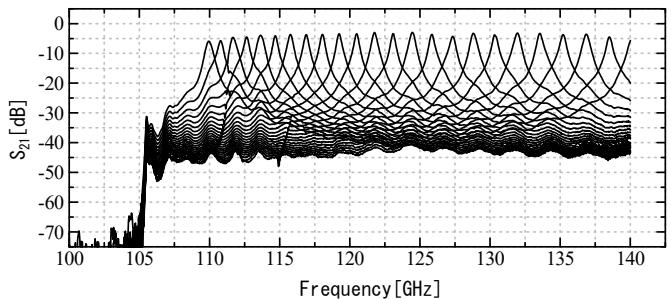


図 8 WR-8 帯 FPW フィルタ S_{21} 測定結果
(アクチュエータを $20 \mu\text{m}$ step で可動)

2.3.1 WR-12 帯 FPW フィルタ

図 5 に WR-12 帯 FPW フィルタの外観を示す。試作器のアクチュエータとその取り付け治具を含まない本体部分の寸法は、 $25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} \times 88 \text{ mm}$ となっている。また、試作器は、SUS (Steel Special Use Stainless)に金メッキを行った材質で製作した。

次に、アクチュエータを $50 \mu\text{m}$ ステップで変化させながら VNA (Vector Network Analyzer)で測定した S_{21} を重ね書きした結果を図 6 に示す。図 6 より、70 GHz～90 GHz において通過帯域の中心周波数を変化可能であることが確認できる。

通過帯域の 3 dB 幅は、周波数に応じて 240 MHz～400 MHz 程度となっている。通過帯域幅が変化するのは、部分透過鏡の透過係数を使用帯域内で一定として設計したことから、透過幅の比帯域が一定となるためである。通過帯域幅の絶対値をあまり変化させたくない場合は、部分透過鏡を周波数が高くなるにしたがって、透過係数が小さくなるように設計すればよい。

挿入損失は最大で 8.2 dB であり、一般にプリセレクタとして求められる挿入損失 10 dB 以下を満足している。

2.3.2 WR-8 帯 FPW フィルタ

図 7 に WR-8 帯 FPW フィルタの外観を、図 8 にアクチュエータを $20 \mu\text{m}$ ステップで変化させながら VNA で測定した S_{21} の重ね書きを示す。試作したフィルタのアクチュエータを含まない本体部分の寸法は、 $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 55 \text{ mm}$ である。

図 8 より 110 GHz～140 GHz において通過帯域の中心周波数を変化可能であることがわかる。通過帯の 3 dB 幅は 350 MHz～600 MHz であり、挿入損失は最大で 5.8 dB である。WR-12 帯の FPW フィルタと同様に挿入損失 10 dB 以下を満足しており、プリセレクタとして十分な性能を実現できていることが確認できた。

2.4 FPW フィルタまとめ

試作器の評価結果より、140 GHz 以下の周波数において FPW フィルタが有効であることが分かった。今回の試作では、使用帯域は比帯域 25% 程度であるが、さらに広帯域化を目指した検討⁷⁾も行っている。しかしながら、共振器を複数の部品で構成し、また可動させる構造であるため、組み立ての難易度が高く 140 GHz 以上での安定した製作は困難であると推定される。

3 フィルタバンク

3.1 フィルタバンクの原理と課題

ミリ波帯のフィルタバンクの原理図を図 9 に示す。フィルタバンクは複数の BPF を複数の導波管スイッチで切り替えることで図 10 に示されるように通過帯域を切り替える装置である。

市販のコンポーネントを組み合わせてフィルタバンクを構成する場合、導波管スイッチとしては、図 11 に示す 1 対 3 のスイッチ¹⁵⁾がよく知られている。このスイッチは、中央の部品が回転することにより導波管の接続を切り替えることができる。しかしながら、この形状

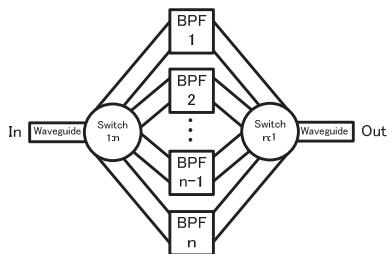


図 9 フィルタバンク原理図

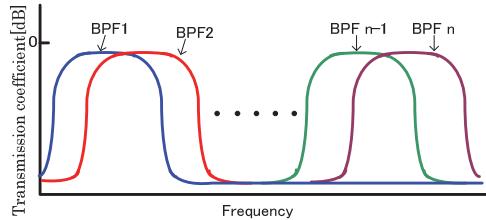


図 10 フィルタバンクの周波数特性

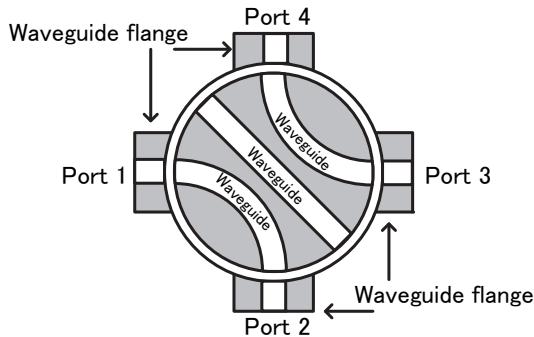


図 11 市販導波管スイッチ

のまま、1対3以上の切り替えに対応することは困難である。プリセレクタとしてフィルタバンクを用いる場合、使用する帯域幅を多くの帯域に分割し、それぞれの帯域で設計したBPFを切り替える必要がある。このため1対3のスイッチを用いるとスイッチが複数必要になる場合がある。さらに、それぞれのコンポーネントを導波管で接続する必要があることから、装置が大規模化し、挿入損失も増加することが推定される。また、導波管スイッチの切り替え時に、回転により物理的に接続を切り替えるため、導波管接続面の摩耗による性能劣化も想定される。

スペクトラムアナライザのプリセレクタとして用いる場合、通常の測定器に内蔵できる程度の小型化と挿入損失の低減が必要であり、さらに連続稼働が想定されるため高い耐久性が必要な点が課題となる。

3.2 導波管スイッチ一体型フィルタバンク動作原理

前述の課題を解決するため、我々は1対1の導波管スイッチにBPFを内蔵した導波管スイッチ一体型フィルタバンクを提案してい

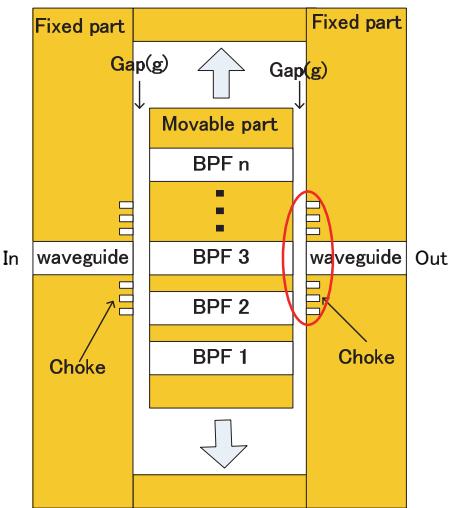


図 12 提案フィルタバンク H 断面図

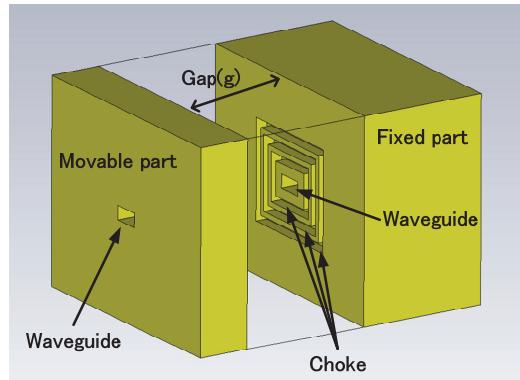


図 13 導波管接続面拡大図

る。図12に提案フィルタバンクのH面断面図を示す。提案フィルタバンクは、入力側固定部、可動部、出力側固定部の3つの部品に分割される。BPFは可動部に並べて設置されており、可動部がアクチュエータにより可動することで接続されるBPFを切り替えることができる。

また、入力側固定部と可動部、出力側固定部と可動部の間は、摩耗による性能劣化を防ぐことを目指し、隙間を空け非接触とした。隙間を空けたことから、電磁波の漏れによる挿入損失の増加が想定されるが、チョークを導波管開口を取り囲むように設置することで、その影響の低減を図った。図13に図12の赤線で囲んだ部分の拡大図を示す。図13より導波管開口の全周囲にわたってチョークが設置されていることが分かる。このチョークを適切に配置することで、チョークの外側に電磁波を漏らさず、高アイソレーションで低損失に固定部の導波管と可動部の導波管を接続できる。図13では3重のチョークにより導波管開口が囲まれているが、これは必要な特性に応じて増減する必要がある。

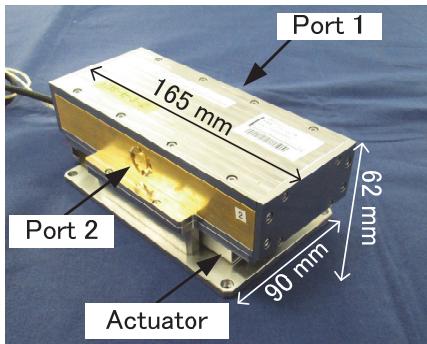


図 14 WR-5 帯フィルタバンク外観図

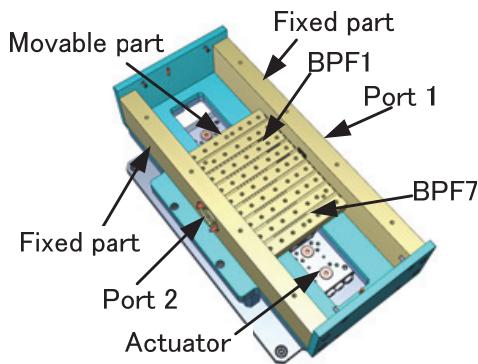


図 15 WR-5 帯フィルタバンク内部(蓋および可動部上半分を除去)

このような構成にすることにより、個々のコンポーネントを接続する必要がなく、複数の導波管スイッチを用いる必要もないため、小型で挿入損失の小さいフィルタバンクの実現が期待できる。また、導波管接続面を非接触としていることから、摩耗による性能劣化も抑制できる。

3.3 試作したフィルタバンクと評価結果

3.3.1 試作器の構造

WR-5 帯(140 GHz～190 GHz), WR-4 帯(185 GHz～260 GHz), WR-3 帯(255 GHz～315 GHz)の3つの帯域で導波管スイッチ一体型フィルタバンクの試作をした。試作器は、帯域の分割数によって BPF の数が異なることから可動方向の寸法は異なるが、それ以外の部分は共通となっている。

試作したフィルタバンクの例として、図 14 に WR-5 フィルタバンクの外観を示す。サイズは 165 mm × 70 mm × 62 mm である。なお WR-4 フィルタバンクと WR-3 フィルタバンクのサイズは 172 mm × 70 mm × 62 mm となっている。FPW フィルタよりは大型になってしまうが、測定器内に設置することを想定すると十分に小型である。

図 15 に、WR-5 帯フィルタバンクの上部の蓋と可動導波管の上半分を取り除いた内部構造を示す。図 12 に示したとおり 2 つの固定部の間に可動導波管が設置され、下部にあるアクチュエータによって可動し BPF の接続を切り替えることができる。可動導波管には、フィルタのない導波管と BPF1～BPF7 が内蔵されている。

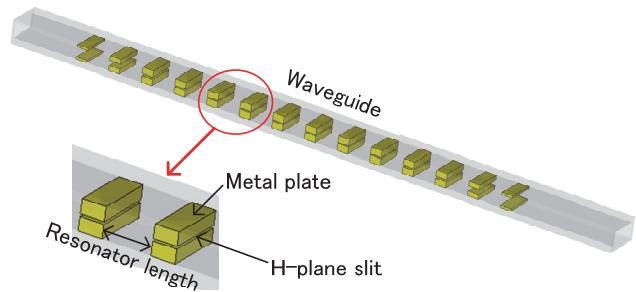


図 16 WR-5 帯フィルタバンク BPF7 の構成

各 BPF は、導波管内に H 面スリットを開けた金属板を並べることで構成した。その 1 例として図 16 に WR-5 フィルタバンクに内蔵された BPF7 のイメージ図を示す。導波管内に、黄色で示される H 面スリットの空いた金属板が並んでいることが分かる。金属板と金属板の間が共振器となり、その共振器長により透過周波数が決まる。さらにスリット幅を調整することで共振器間の結合度を変化させ、BPF の透過特性を決定できる。金属板の数や、各パラメータは仕様に応じて電磁界シミュレータを用い最適化している。

3.3.2 WR-5 帯フィルタバンク評価結果

WR-5 帯フィルタバンクは、140 GHz～190 GHz(比帶域 30%)を 7 つの帯域に分けて設計した。各 BPF の仕様に関しては、フィルタバンクを使用するスペクトラムアナライザの設計に合わせて決定している。

アクチュエータを可動させ BPF を切り替えながら VNA で測定した S_{21} の重ね書きを図 17 に示す。図 17 より設計通り 7 つの帯域に切り替えが可能であることが分かる。また、70 dB 以上の阻止量が実現できており、可動導波管と固定導波管の隙間からの回り込みを十分に抑制できていることが確認できる。なお通過帯域の最大の挿入損失は 4.3 dB である。

3.3.3 WR-4 帯フィルタバンク評価結果

WR-4 帯フィルタバンクは、今回試作したフィルタバンクの中で使用範囲の比帶域が最大であり、185 GHz～260 GHz(比帶域 34%)を 9 つの帯域に分けて設計した。試作器の S_{21} 測定結果を図 18 に示す。

図 18 より、使用帯域が WR-5 フィルタバンクより拡張されても、フィルタバンクが動作することが確認できる。なお、使用帯域内の最大の挿入損失は 4.0 dB である。

3.3.4 WR-3 帯フィルタバンク評価結果

WR-5 帯フィルタバンクは、255 GHz～315 GHz(比帶域 21%)を 8 つの帯域に分けて設計した。 S_{21} の測定結果を図 19 に示す。図 19 より、300 GHz 帯のような高周波数でも、フィルタバンクが動作することが確認できる。挿入損失は、周波数が高くなっていることから、他の帯域のフィルタバンクより大きく 5.6 dB となっている。

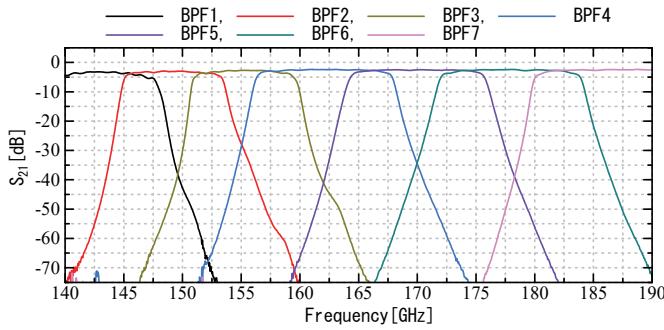


図 17 WR-5 帯フィルタバンク S_{21} 測定結果

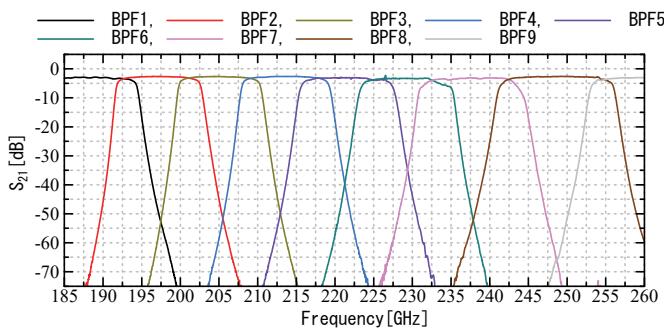


図 18 WR-4 帯フィルタバンク S_{21} 測定結果

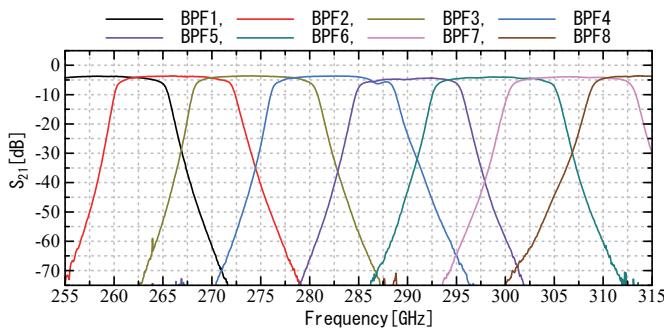


図 19 WR-3 帯フィルタバンク S_{21} 測定結果

3.4 導波管スイッチ一体型フィルタバンクまとめ

今回試作した各帯域のフィルタバンクは、アイソレーションが大きく、挿入損失も 10 dB 以下を満たす結果となっており、スペクトラムアナライザのプリセレクタとして十分な性能を確保できている。また、FPW フィルタとは異なり BPF が固定部品により製作されているため組み立ての影響による特性の劣化は小さい。さらにアクチュエータに求める再現性は低く、300 GHz 帯においても 5 μm 程度の再現性で十分であった。このような点から、300 GHz 以上の周波数でもフィルタバンクを制作することは可能だと推定される。

4 むすび

本稿では、70 GHz~315 GHz の周波数帯でのプリセレクタの実現法として、チューナブルフィルタである FPW フィルタと、新たな

フィルタバンクの実現法である導波管スイッチ一体型フィルタバンクを紹介した。両フィルタ方式とも、アクチュエータを用いる方式であるが、可動部を非接触にしても電気的特性を劣化させない技術を用いることで高耐久性と低挿入損失を実現している。315 GHz 以上の周波数についても導波管スイッチ一体型フィルタバンクで対応できると想定しており、その確認は今後の検討課題となっている。

今回紹介したプリセレクタを用いることで、これまで困難であった周波数帯での高精度なスペクトラム測定が可能となり、ミリ波・テラヘルツ波帯無線システム開発の一助になることを期待している。

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・ご議論をいただ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) 総務省、電波有効利用の促進に関する検討会、「電波有効利用の促進に関する検討会 報告書」、参考資料 3 (2012-12)
- 2) M. Fuse, Y. Kimura, and A. Otani : “Over 100 GHz Millimeter-wave Spectrum Measurement System with Pre-selector”, 2014 IEEE International Microwave Symposium (IMS 2014), TH2D-1 1010, Tampa Bay (2014-6)
- 3) J. Uher and W. J. R. Hoefer : “Tunable Microwave and Millimeter-Wave Band-Pass Filter”, IEEE Trans. Microw. Theory Tech., Vol.39, No.4, pp.643-653 (1991-4)
- 4) 河村尚志, 下田平寛, 大谷昭仁, “100 GHz 超ミリ波スペクトラムアナライザ用チューナブルフィルタ”, アンリツテクニカル, No.88, pp.35-40 (2013.3)
- 5) T. Kawamura, H. Shimotahira, and A. Otani, “Reduction of Insertion Loss in Millimeter-Wave Tunable Filter Over 100 GHz”, Proceedings of 2013 Asia-Pacific Microwave Conference, pp.194-196 (2013.12)
- 6) 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 (2014.5)
- 7) 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 (2014.11)
- 8) 河村尚志, 大谷昭仁, “ミリ波帯チューナブルフィルタの周波数可変範囲拡大法の提案”, 電学論 A, Vol.135, No.12, pp.736-742 (2015.12)

- 9) 河村尚志, 待鳥誠範, “300 GHz 帯チューナブルフィルタの設計”, 電学論 A, Vol.137, No.1, pp.28-33 (2017.1)
- 10) 河村尚志, 待鳥誠範, “300 GHz 帯フィルタバンクの試作評価”, 電気学会計測研究資料, IM-17-042, pp.9-13 (2017.11)
- 11) 河村尚志, 待鳥誠範, “100 GHz 超帯導波管スイッチの提案”, 電学論 A, Vol.138, No.5, pp.210-216 (2018-5)
- 12) T. Kawamura M. Fuse and S. Mattori, “Evaluation of >140-GHz Band Filter Bank Prototype”, Proceedings of 2018 Asia-Pacific Microwave Conference, WE1-B2-1 (2018.11)
- 13) 河村尚志, 布施匡章, 待鳥誠範, “WR-4 帯フィルタバンクのための導波管接続部の広帯域化”, 電気学会計測研究資料, IM-18-023, pp.1-6 (2018.11)
- 14) R. Sauleau, “Fabry Perot resonators”, in Encyclopedia of RF and Microwave Engineering, K. Chang, Ed., vol. 2, pp. 1381-1401, John Wiley & Sons, 2005
- 15) A. F. Harvey, “MICROWAVE ENGINEERING”, pp.130-132, Academic Press, New York (1963)

執筆者



河村 尚志
技術本部
先進技術開発センター



待鳥 誠範
技術本部
先進技術開発センター

公知