

# 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

河村尚志 Takashi Kawamura, 下田平寛 Hiroshi Shimotahira, 大谷昭仁 Akihito Otani

**[要 旨]** 120 GHz 帯無線による 10 Gbit/s の TV 放送用画像伝送が北京五輪で使われるなど、100 GHz を超える無線機器の開発が盛んになっており、100 GHz 超の周波数帯における高精度なスペクトラムアナライザの開発が求められている。その実現にはプリセクタが必須である。そこで本稿では、110~140 GHz 帯でスペクトラムアナライザのプリセクタとして用いる新しいチューナブルフィルタを提案する。さらに設計・試作を行い、試作器の性能評価から本フィルタがプリセクタとして実用性が高いことを報告する。

**[Summary]** Rapid progress in millimeter-wave wireless communication technologies requires accurate spectrum analysis in the frequency domain over 100 GHz. A tunable preselection filter is a key device in building such a spectrum analyzer. This paper proposes a new tunable filter as a preselector in the frequency range from 110 to 140 GHz. The filter is designed using a commercial electromagnetic simulator and a prototype is evaluated. As the results of prototypes measured, this filter is suitable for the preselector.

## 1 まえがき

近年、WPAN (Wireless Personal Area Network) などミリ波帯を利用するアプリケーション[1][2]の開発が盛んに行われている。同周波帯で安定した無線システムを開発するには 60~70 GHz 帯で 2 次高調波、100 GHz を超える帯域での無線信号の評価が必要であるが、評価技術が確立されていない。その理由は、同周波数帯において高感度、かつ高精度の測定が可能なスペクトラムアナライザが存在していないためである。このため、同周波帯の高精度なスペクトラムアナライザの開発が切望されている。

高精度な、スペクトラムアナライザを実現するためには、イメージ応答を抑制するプリセクタが必須である。従来のミリ波帯のプリセクタとしては、YIG (Yttrium Iron Garnet) を利用した YTF (YIG Tuned Filter) が知られている[3]。しかし、現状 100 GHz 超の周波数帯では YTF の市販品はない。また、YTF の使用には極めて強力な磁場が必要であり、その発生に多大な電力を消費する。YIG は温度係数が大きく、特性の経年変化も顕著なためフィルタの中心周波数が不安定である。さらにミリ波帯では、挿入損失が大きいという問題がある。

そこで、我々は 110~140 GHz の帯域のプリセクタとして新しいミリ波帯チューナブルフィルタを提案する。本フィルタは導波管内に構成したファブリペロー共振器[4][5]を機械的にチューニングするものである[6][7]。本稿では最初に現在検討中である高精度ミリ波スペクトラムアナライザの概要を示した後、ミリ波フィルタの動作原理について述べ、次に電磁界シミュレーションによる設計結果を示し、最後に試作したフィルタの評価結果を示す。

## 2 ミリ波スペクトルアナライザの概要

図 1 に、現在検討中のミリ波スペクトラムアナライザのブロック図を示す。110 GHz~140 GHz の無線信号を高ダイナミックレンジかつ高感度に測定するため、本スペクトラムアナライザは基本波ミキシング方式の周波数変換装置(低変換損失小型フロントヘッド部及びローカル信号発生部)と、既存の汎用スペクトラムアナライザで構成している。本稿で提案するミリ波フィルタは、低変換損失小型フロントヘッド部のプリセクタとして用いる。

なお、従来技術として、高調波ミキシング方式の周波数変換装置と既存の汎用スペアナを組み合わせることで 110 GHz 以上の RF 信号を測定することは可能だが、この方式では、周波数変換効率が非常に低く微弱なスプリアス信号が雑音に埋もれ、ダイナミックレンジが狭くなる。その上、測定 RF 信号が広帯域に拡散されている場合には、拡散された信号のイメージが発生してしまい、正しいスペクトル測定は困難である。

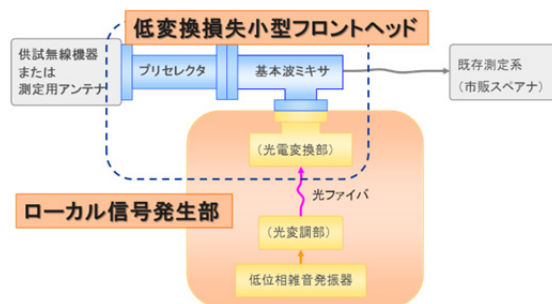


図 1 ミリ波スペクトラムアナライザのブロック図  
Block diagram of millimeter-wave spectrum analyzer

### 3 ミリ波フィルタ動作原理

ファブリペロー共振器は、向い合せた2つの部分透過鏡により構成され、図2のように鏡面間の線路長  $L$  (共振器長) が波長の半整数倍のとき、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となる。

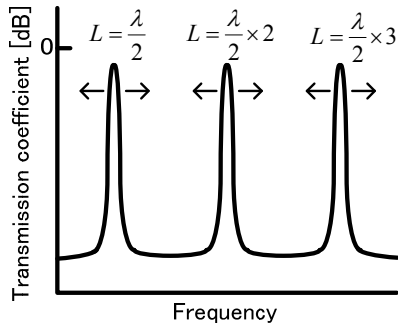


図2 ファブリペロー共振器透過特性

Transmission characteristics of Fabry-Perot resonator

ファブリペロー共振器に用いられる部分透過鏡は、球面鏡、平面鏡があり、それぞれの組み合わせにより共焦点型、共中心型、平行平面型共振器が構成される。図3の共焦点型は、調整の容易さから多く用いられるが、通過帯域を掃引するために鏡面間の距離を伸縮すると焦点がずれ、フィネス、即ち共振の  $Q$  値が低下する問題がある。そのため、チューナブルフィルタには焦点を利用しない図4の平行平面型が適する。しかし、それを利用したチューナブルフィルタを実現するには、次の2つの課題がある。

- ・ 部分透過鏡に平面波を平行に入射する必要がある。この条件を満たさない(平面波の斜入射または球面波等の)場合、入射波の鏡面での位相が揃わず、フィネスが低下する。
- ・ 開放型であるため、空間への放射による損失が大きい。

フィルタへの入力が導波管の場合、平面波入射を実現する方法としては、導波管の径をホーンアンテナのように大きくし平面波を生成する手段があるが、占有面積の増大を招くため完全な平面波の実現は困難である。

これらの問題点を解決する方法として、我々はファブリペロー共振器を導波管内に設けた図5のフィルタ構成を提案する。基本モード( $TE_{10}$ モード)のみが伝送する方形導波管内に2つの部分透過鏡を配置する。希望する透過帯域の中心周波数  $f_c$  における管内波長を  $\lambda_g$  とするとき、2つの部分透過鏡の距離  $L = \lambda_g/2$  となるよ

うに定める。このような構成にすることで、導波管内部では  $TE_{10}$  モードのみが伝送するため、伝送波の線路長が一意に定まり、部分透過鏡に平面波を入射するための特別な工夫なしでも、共振器内に入力された電界の位相が揃う。線路長を十分に变化させることができれば、広帯域なチューナブルフィルタが実現できる。また、密閉型であるため放射による損失は存在しなくなる。さらに、金属導波管の温度による変形は波長に対して小さく、YTF に比べ温度変化による影響を受けにくい利点がある。

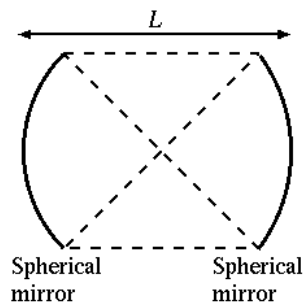


図3 共焦点型ファブリペロー共振器

Confocal type Fabry-Perot resonator

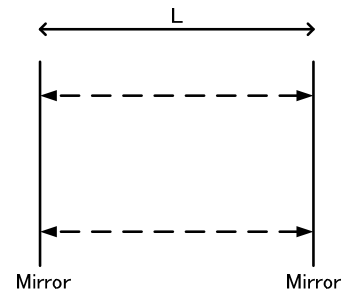


図4 平行平面型ファブリペロー共振器

Parallel-plate type Fabry-Perot resonator

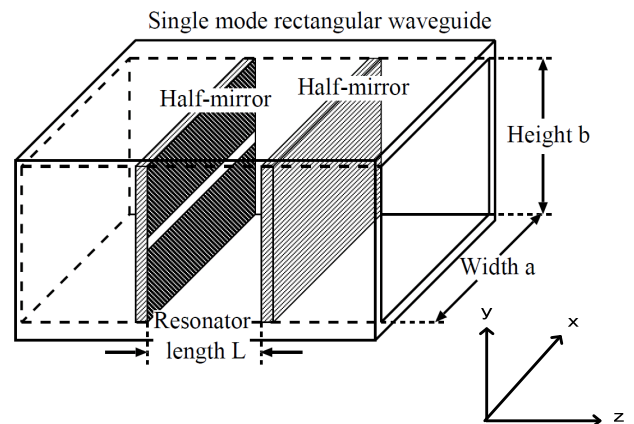


図5 提案フィルタ構成

Schematic of proposed filter

提案するフィルタが原理通り動作するかを、図 5 に基づくシミュレーションにより確認した。主要なシミュレーション条件を表 1 にまとめる。ただし、簡単のため導波管、部分透過鏡を無損失とした。また次節でその設計について詳述する部分透過鏡は、誘電体基板上に金属製のスリットを設けたものとした(図 7、および図 12)。Lは、 $f_c=125$  GHz で TE<sub>10</sub> モードの管内波長の 1/2 となるように定めた。また、導波管内であることを考慮し Q を

$$Q = \left( 1 + \left( \frac{L}{a} \right)^2 \right) F, \quad F = \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R}, \quad (1)$$

より求めた。ここで F は自由空間でのファブリペロー共振器のフィネス、R は部分透過鏡の反射係数である。シミュレーション結果を図 6 に示す。表 1 の設計値と比較すると、中心周波数  $f_c$  は設計値の 125 GHz に対してシミュレーション結果は 127.1 GHz であり 2% 以内で一致している。また Q は、設計値の 503 に対して図 6 よりフィルタ透過域の FWHM (full-width half-maximum) から算出すると 514 であり、同様に 2% 以内で一致している。この結果は、設計通りの性能が実現できており、本フィルタがファブリペロー共振器として動作していることを証明している。

表 1 シミュレーション条件  
Simulation conditions

中心周波数	$f_c=125$ GHz
導波管寸法	WR-08 $a = 2.032$ mm, $b = 1.016$ mm)
部分透過鏡反射係数	$R = 0.9905$ @ 125 GHz
共振器長	$L = 1.478$ mm
Q ((1)より算出)	503

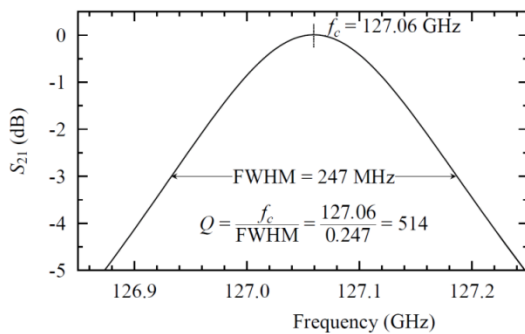


図 6  $S_{21}$  周波数特性のシミュレーション結果  
Simulated  $S_{21}$  frequency characteristics

なお、シミュレーションは、Transmission Line Matrix (TLM) 法に基づく CST MICROSTRIPES™ を用いた。以降のシミュレーションについても同様である。

## 4 試作器設計

チューナブルフィルタの性能としては、周波数チューニングする範囲での Q が一定であることが望ましい。(1)より Q は部分透過鏡の反射係数 R によって決定されるため、R が一定となるよう設計を行った。周波数チューニング幅を 110~140 GHz とし、中心周波数  $f_c = 120$  GHz、FWHM を 300 MHz と仮定すると、Q は 400 程度であり反射係数  $R=0.99$  (-0.04 dB) が必要である。0 dB 付近の反射係数を正確にシミュレーションするのは困難なため、透過係数で特性を判断し、その値として 110~140 GHz において -20 dB 程度を目標とした。この特性を実現するため、 $S_{21}$  の周波数特性が逆符号の傾きを持つ金属平板による容量性窓と、誘電体共振器の特性を組み合わせた部分透過鏡を検討した。誘電体材料にはシリコンを用い、容量性窓はシリコン基板上に金を蒸着しスリットを設けて構成することとし、シミュレーションによる設計を行い、最適な部分透過鏡として図 7 を得た。部分透過鏡の周波数特性を図 8 に示す。図 8 より 110~140 GHz で  $S_{21}$  が -20.16~-20.26 dB の間に入っており、図 7 の構成を用いることで目標通りの部分透過鏡が設計できた。

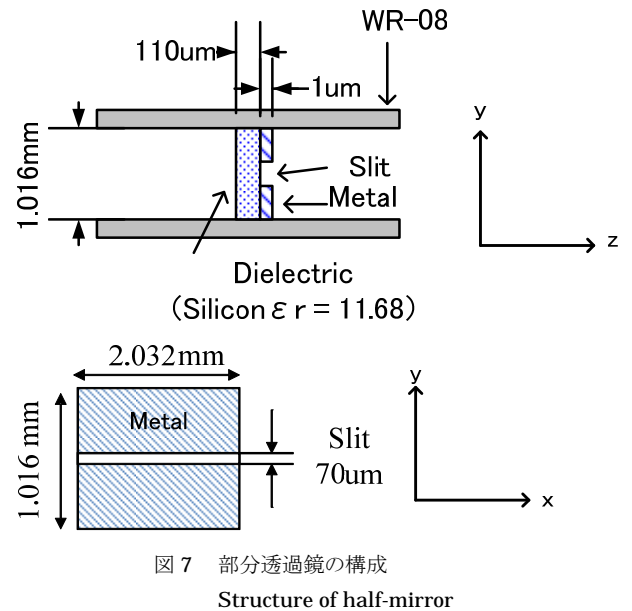


図 7 部分透過鏡の構成  
Structure of half-mirror

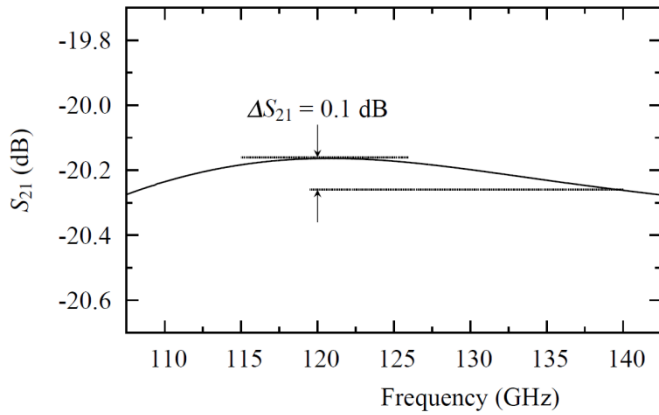


図8 最適な部分透過鏡の周波数特性  
Frequency characteristics of optimum half-mirror

この部分透過鏡を用いてミリ波帯チューナブルフィルタのシミュレーションを行った。図9に試作器の断面図を、表2に試作器の主な仕様とシミュレーション条件を示す。 $L$ を変化させるため、部分透過鏡を取り付けた内部導波管を外部導波管に入れ、内部導波管を可動とする構造とした。また、内部導波管を可動させるために必要となる外部導波管の隙間からの伝送波のもれを防ぐため、チョーク機構を設けた。設計した試作器のシミュレーション結果を図10に示す。図10より140 GHz付近で挿入損失の増加が見られるが、110~140 GHz帯において、チューナブルフィルタとして動作していることが確認できる。以上より本設計に基づきミリ波帯チューナブルフィルタ一次試作器を作製した。

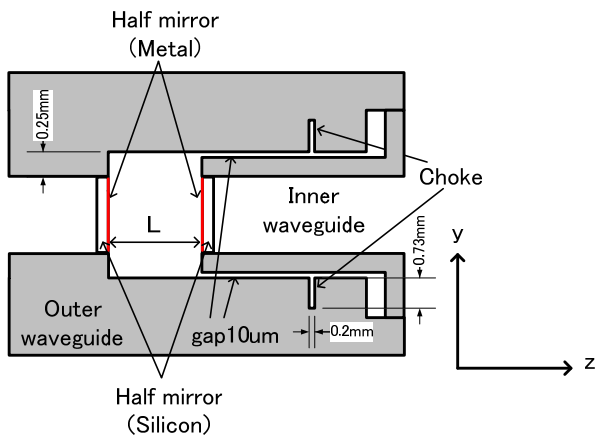


図9 試作器 E 面断面図  
E-plane cross sectional view of prototype

表2 試作器の仕様とシミュレーション条件

Specification of prototype and simulation conditions

チューニング周波数	110 GHz~140 GHz (帯域幅 30 GHz)
内部導波管規格	EIL Standard WR-08
導波管全長	5.0 mm + 共振器長 $L$
部分透過鏡	図3の構成
材質	外部導波管: Brass( $\sigma = 2.74 \times 10^7$ S/m) 内部導波管: SUS( $\sigma = 1.60 \times 10^6$ S/m) 部分透過鏡: Au( $\sigma = 4.5 \times 10^7$ S/m) Silicon( $\epsilon_r=11.68, \tan\delta=0.002$ )
共振器長 $L$	1.65 mm, 1.45 mm, 1.20 mm

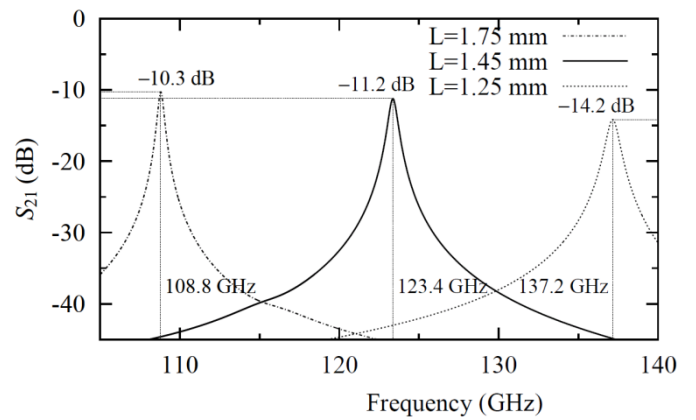


図10  $L$ を変化させた場合の  $S_{21}$  周波数特性  
Simulated  $S_{21}$  frequency characteristics

## 5 ミリ波帯チューナブルフィルタ一次試作器

試作したミリ波帯チューナブルフィルタの外観を図11に、部分透過鏡を図12に示す。部分透過鏡は、金製のスリットを設けたシリコン基板を用い、内部導波管に取り付けた。内部導波管は外部のアクチュエータで操作され、共振器長  $L$  を変化させ周波数チューニングを行う。インターフェースは WR-08 導波管とし、UG-387/UM のフランジと嵌合するように設計した。アクチュエータを含まない全長は 40 mm × 60 mm である。

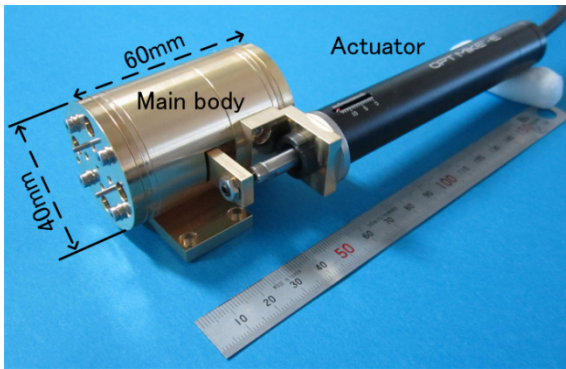


図 11 一次試作器外観  
Overview of first prototype

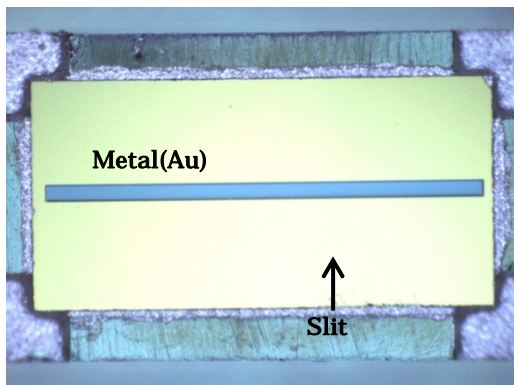


図 12 内部導波管に接着した部分透過鏡  
Half-mirror attached to inner waveguide

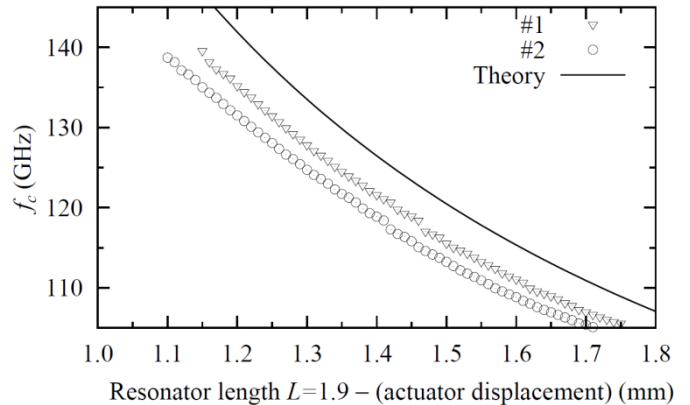


図 13 L の変化に対する  $f_c$  の測定結果  
Measurement of  $f_c$  as function of L

次に、試作器#1 について、共振器長  $L$  を最大値 1.9 mm としてから、 $L$  が 1.1 mm まで 10  $\mu\text{m}$  ステップで移動させ、中心周波数  $f_c$  を測定する動作を反復して 10 回行い、共振周波数の再現性を確認した。測定対象は試作器#1 とし  $L = 1.4$  mm のときの中心周波数で評価した結果を図 14 に示す。図 14 より測定結果に 70 MHz 程度のばらつきがみられる。今回使用したアクチュエータの再現性は 2  $\mu\text{m}$  であり、理論的には  $L$  が 1  $\mu\text{m}$  変化すると 120 GHz 付近では  $f_c$  が 70 MHz 程度変化するため測定結果のばらつきはアクチュエータの再現性の範囲内である。

最後に挿入損失の評価を行うため、最初に行った測定の結果を図 15 に挿入損失についてまとめ直した。図 15 に共振器長  $L$  を変更したとき  $S_{21}$  が最大になる周波数とそのときのレベルを試作器 2 台のそれぞれについて示した。さらに、50  $\mu\text{m}$  ステップで  $L$  を変化させシミュレーションした結果を実線で追記した。シミュレーションと測定を比較すると、2 つの特徴が明かである。1 点目は、全帯域において損失測定値がシミュレーションより 5 dB 程度増加している。2 点目はシミュレーション、測定両方で周波数特性の傾向が一致し 116 GHz 付近で損失の増加が見られることである。周波数特性の傾向が一致していることより、実施したシミュレーションは試作器を正しくモデル化していると推定される。このため 1 点目の原因としては、材料の電気定数(導電率等)がシミュレーションと試作器の間で異なることが想定される。今後、電気定数推定用の実験部品を製作評価することにより、その差異を明らかにする必要がある。2 点目に関しては、部分透過鏡の周波数特性を平坦になるよう設計しているため、部分透過鏡以外の構成が影響していると推定される。この点に関しては今後シミュレーションにより構造を解析する予定である。

## 6 試作器の測定及び評価

ベクトルネットワークアナライザ(アンリツ 37169A)及び周波数エクステンダ(OML V08VNA2-T/R-A)を用いて、ミリ波帯チューナブルフィルタ一次試作器の測定を行った。測定は共振器長  $L$  の変化に対する中心周波数  $f_c$  の特性を評価するため、 $L$  を 10  $\mu\text{m}$  ステップで移動させ各ステップでの  $S$  パラメータの周波数特性を測定し透過域の中心周波数を求めた。なお本稿では、測定結果における中心周波数  $f_c$  を  $(f_R + f_L)/2$  より求めた。ここで  $f_R$  及び  $f_L$  は、挿入損失の最小値( $S_{21}$  の最大値)から  $S_{21}$  が 3 dB 低下する高域と低域それぞれの周波数である。

試作した 2 台のミリ波帯チューナブルフィルタ#1、#2 の測定結果および  $L$  に対する共振周波数の理論値を図 13 に示す。 $L$  に対して周波数が単調に変化しており、その範囲も理論値と近い結果となっている。ここで  $L$  は、機構設計上の最大値 1.9 mm よりアクチュエータ移動量を引いて求めたものである。そのため実際の共振器長ではなく組立てによる誤差を含んでいる。#1、#2 の測定結果と理論値との差異は、この組立て誤差によるものと思われる。

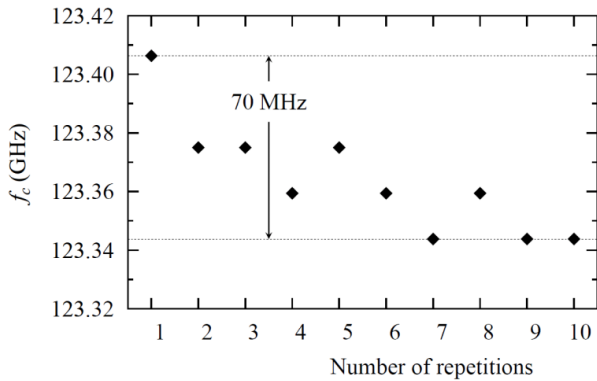


図 14  $f_c$  再現性試験結果 ( $L = 1.4$  mm)  
Repeatability test.  $f_c$  at same  $L = 1.4$  mm

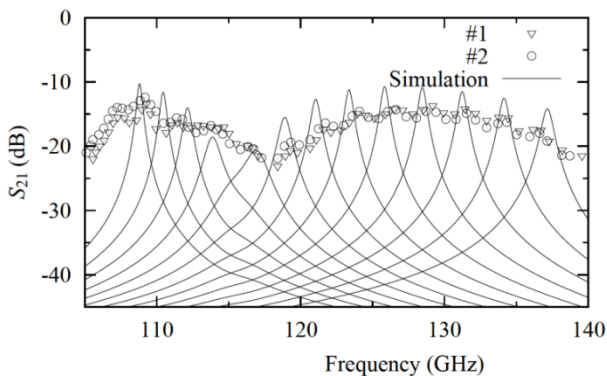


図 15 挿入損失測定結果とシミュレーション結果  
Measured insertion losses and simulated frequency characteristics

## 7 まとめ

ミリ波帯スペクトラムアナライザのプリセレクタとして、導波管内にファブリペロー共振器を構成するミリ波帯チューナブルフィルタを提案した。最初に、シミュレーションによる動作原理の確認を行い、周波数特性が平坦な部分透過鏡の設計法を示し、110～140 GHz の帯域で中心周波数の掃引を実現できることを示した。さらに、本フィルタの一次試作を行い、その性能を評価して、設計通りの周波数掃引を実現できていることを確認した。また性能評価の結果、挿入損失が設計値より増加していることが判明したため、材質の選定、および製作法の再検討を行い、それらを踏まえて二次試作器の開発を進めている。

## 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・ご議論を頂いた本研究開発の運営委員各位に謝意を表す。

## 参考文献

- 1) Akihiko Hirata, Toshihiko Kosugi, Hiroyuki Takahashi, Ryouchi Yamaguchi, Fumito Nakajima, Tomofumi Furuta, Hiroshi Ito, Hirohiko Sugahara, Yasuhiro Sato, Tadao Nagatsuma : "120-GHz-Band Millimeter-Wave Photonic Wireless Link for 10-Gb/s Data Transmission", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 54, No. 5, pp.1937-1944, May. 2006
- 2) Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for High Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs) Amendment 2: Millimeter-wave-based Alternative Physical Layer Extension, IEEE Standard 802.15.3c-2009, 2009
- 3) J. Helszajn, *YIG Resonators and Filters*, New York, John Wiley & Sons, 1985
- 4) 桑原 五郎: "光学技術", 共立出版株式会社, (昭和 59 年)
- 5) B.Komiyama, M.Kiyokawa, and T.Matsui : "Open Resonator for Precision Dielectric Measurements in the 100 GHz Band", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 39, No. 10, pp.1792-1796, Oct. 1991
- 6) 河村尚志, 大谷昭仁: "ミリ波帯チューナブルフィルタの提案", 電気学会計測研究会資料, IM-12-004, pp.17-21, Jan. 2012
- 7) 河村尚志, 大谷昭仁: "ミリ波帯チューナブルフィルタの試作評価", 電気学会計測研究会資料, IM-12-028, pp.33-38, Jun 2012

## 商標

CST MICROSTRIPES™は CST - COMPUTER SIMULATION TECHNOLOGY AG の商標である。

## 執筆者



河村尚志  
R&D 統轄本部  
R&D センター  
第 1 技術開発部



下田平寛  
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