

帯域通過フィルタのスプリアス抑圧法

—マルチストリップ共振器 BPF による提示—

Spurious Suppression in Band Pass Filters

—Proposal of Concept through Multi-Strip Resonator BPF—

石谷 豪浩[†] 張 陽軍[‡] 花谷 大輔[†] 藤本 正弘[†] 粟井 郁雄[‡]
Takehiro Ishitani Yangjun Zhang Daisuke Hanatani Masahiro Fujimoto Ikuo Awai

[†] 平井精密工業株式会社
Hirai Seimitsu Kogyo Corporation

[‡] 龍谷大学理工学部
Ryukoku University

2009年3月25日

於 大阪府立産業技術総合研究所

あらまし

片側接地のストリップ線路をインターディジタル状に構成したマルチストリップ共振器を組み合わせることで BPF を設計することができる。この方法によって設計した BPF は高次モードでほとんど共振せず、優れた帯域外特性を有していることが分かっている。しかしながら、高次モードがほとんど共振しない理由が分からないまま設計されていた。そこで、マルチストリップ共振器における共振モードを電磁界分布から物理的に解明することを本研究の目的とした。電磁界的な解釈はスプリアスモードをより一層抑圧する上でも非常に重要であると考えられる。この考えを他の BPF にも展開させることで、フィルタの性能を飛躍的に向上させられると期待できる。

キーワード マルチストリップ共振器、スプリアスモード、結合係数、磁気結合、電気結合

1. はじめに

マルチストリップ共振器とは片側接地のストリップ線路をインターディジタル状にブロードサイド結合させた共振器である。このブロードサイド結合したマルチストリップ共振器の利点は共振周波数の低下により小型化が可能になるだけでなく、導体 Q も向上する。これの欠点はフィルタの性能であるスプリアス指数が低下することである [1]。

このマルチストリップ共振器そのものを一つの共振器と考えて、多段に設計することで BPF を実現できる[2]。実際に中心周波数 3.2GHz、帯域幅 10%で設計した 3 段の BPF のモデルと試作した BPF の特性を図 1 に載せる。サイズは 1.8x2.2x0.67mm である。BPF の試作には LTCC (低温同時焼成セラミックス) 技術を用いた。図 1(b)の実証結果から、このマルチストリップ共振器を用いて設計された BPF の特性は既存のものとは異なり、2 次モードや 3 次モードなどの高次のスプリアスモードにおける共振が非常に弱いことが分かり、優れた帯域外特性を呈している。とりわけ、マルチストリップ共振器はスプリアス指数を低下させるにも関わらず、スプリアスモードにおける共振が弱く、スプリアスバンドをほとんど形成しない。

しかしながら、この BPF のスプリアスモードにおける共振が弱い理由については分かっていない。そこで、帯域外特性をより一層改善するためにもその

理由を解明することは重要であり、本研究の目的とする。

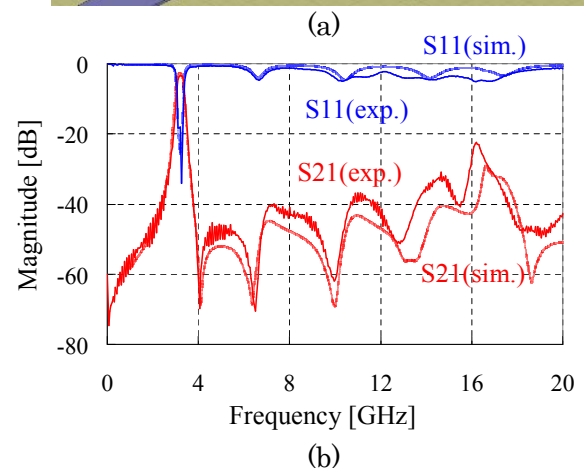
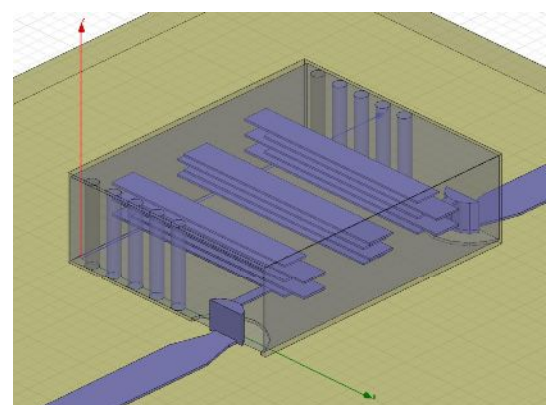


図 1. 4 層 3 段の共振器 BPF とその特性
(a) モデル図 (b) 試作した BPF の周波数特性

それでは、どのようにしてこのスプリアスモードを抑圧しているのかについて考えることにする。その理由に対して3つの考えを示す。

- i) 最低次モードにおける共振器間の結合に比べて、スプリアスモードの方が弱くなる。
- ii) 外部線路がつくる電磁界とスプリアスモードの電磁界が異なるため、外部線路との結合が弱くなる。
- iii) スプリアスの周波数帯に減衰極が現れ、スプリアスモードを相殺する。

しかし、ii)とiii)に関しては効果が薄いと判断される。ii)に関しては、2ストリップ及び4ストリップで構成した共振器に対して同じ外部線路で励振しても、2ストリップで構成した共振器にはスプリアスモードが現れたためである。また、iii)の減衰極による相殺も、共振周波数がストリップ間隔によってシフトするため、その効果が小さいと考えられるからである。それゆえ、3つの理由のうち最初に考えた共振器間の結合に焦点をおくことにした。

共振器間の結合を考えるにあたりE/Mシミュレータを用いるだけでなく、物理的な解釈も導入した。

2. マルチストリップ共振器

2.1. 共振ピークのスプリット

マルチストリップ共振器を構成する個々のエレメントは片側接地と片側開放となっており、構造的には1/4波長共振器と考えられる。ただし、この1/4波長共振器の共振周波数は設計に用いるものとは異なる。1/4波長共振器の共振周波数は、 f_0 を最低次共振周波数として、 $f_0, 3f_0, \dots, (2n-1)f_0$ である。ここで、それぞれの共振周波数を f_1, f_2, \dots, f_n と名付ける。そして、この1/4波長共振器を2つ、インターディジタル状にブロードサイド結合させると、オリジナルの共振周波数が2つにスプリットする。つまり、2層のブロードサイド結合共振器の共振周波数は、 f_1 に関しては f_{11} と f_{12} に、 f_2 に関しては f_{21} と f_{22} にスプリットする。これを $(f_{11}, f_{12}), (f_{21}, f_{22}),$

$\dots (f_{n1}, f_{n2})\dots$ とする。最終的に m 枚の1/4波長共振器によってマルチストリップ共振器を構成すると、その共振周波数は $(f_{11}, f_{12}, \dots, f_{1m}), (f_{21}, f_{22}, \dots, f_{2m}), \dots (f_{n1}, f_{n2}, \dots, f_{nm})\dots$ となる。これらの各々のグループを“モード n ”と呼ぶ。

1/4波長共振器とそれを4層組み合わせたマルチストリップ共振器の共振周波数を図2に示す。スプリットした周波数のうちオリジナルの周波数が同じグループを M_1, M_2, \dots, M_n と名付ける。さらに、共振モードを $M_{11}, M_{12}, \dots, M_{mm}$ と2つの添字を用いて表記する。

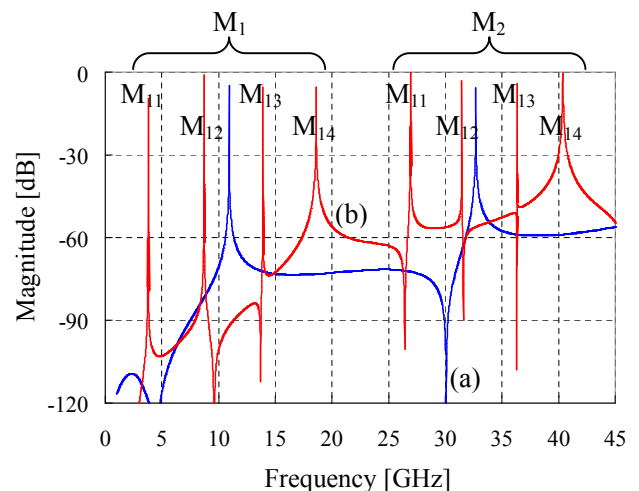
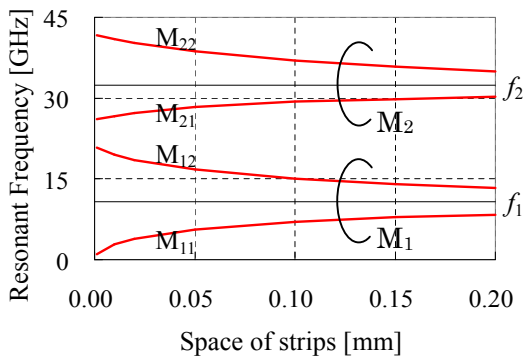


図2. 4層共振器のスプリットしたピークとその群 (a) 1/4波長共振器 (b) 4層組み合わせた共振器

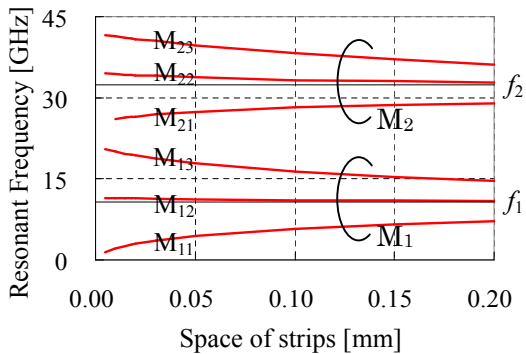
2.2. スプリットした共振モードのシフト

2層から4層で構成されたマルチストリップ共振器において、ストリップ間隔を変化させたときの各共振モードを図3に示す。これはブロードサイド結合している全てのストリップ間隔を同じ値に保って変化させた。この結果からは次のことが分かる。

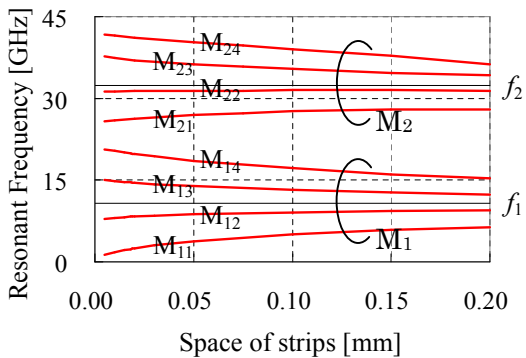
- i) 異なる群の周波数は互いに交わらない。
- ii) ストリップ間隔に関わらず、ある群の近接モード間の周波数差はほとんど同じである。
- iii) ストリップ数に関わらず、1つの群における最大スプリット間隔はほとんど同じである。



(a)



(b)



(c)

図3. ストリップ間隔に対する共振周波数
 (a) 2ストリップ共振器 (b) 3ストリップ共振器
 (c) 4ストリップ共振器

3. 共振モードの電磁界分布

3.1. 1/4 波長共振器のポテンシャル

まず、ブロードサイド結合しているマルチストリップ共振器の1つのエレメントはある共振周波数をもった1/4波長共振器である。線路に沿った電界分布は図4のように符号は線路上で正か負のいずれかである。電界が正の場合を+、負の場合を-で表すことにする。そこで、最初に2ストリップで結合した場合を考える。結合モードは元の1/4波長共振器

の組み合わせで与えられるので、2ストリップの場合は図5(a)のように奇モードと偶モードになる。図5はマルチストリップ共振器を断面から見たものである。

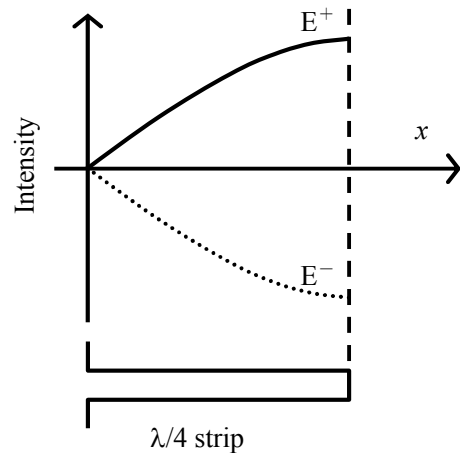


図4. 1/4 波長共振器の電界の強度分布

奇モードと偶モードを考えた場合、奇モードの方が低いポテンシャルであることは明白である。ポテンシャルが低いということは共振周波数も低いということから、スプリットしたピークのうち低周波で共振している状態が奇モードであり、反対に高周波に共振している状態は偶モードであると判断できる。これらのモードをそれぞれ M_{11} と M_{12} とする。

この考えをふまえて、3ストリップ及び4ストリップで構成した共振器の場合も同様に考える。それらの考えられる状態を図5(b), (c)に示す。

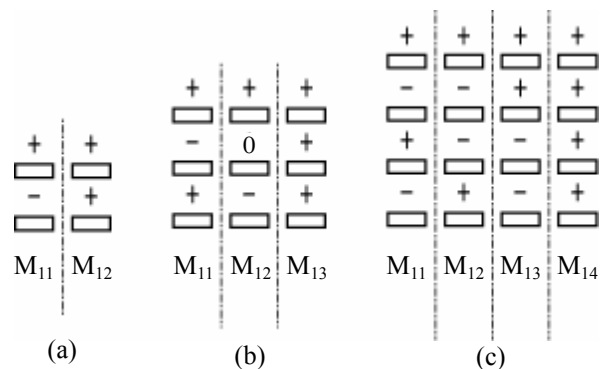


図5. 各共振器のモードごとのポテンシャル
 (a) 2ストリップ共振器 (b) 3ストリップ共振器
 (c) 4ストリップ共振器

3.2. 4ストリップ共振器の断面内電界分布

4ストリップで構成した共振器の電界を前節で考えた図5(c)の状態から考える。それに相当する電界を図6に示す。 M_{11} における状態では、電界は共振器の内部で収まっており、共振器の外部には電界がリークしにくいと考えられる。同様に M_{12} 、 M_{13} においても考える。そして、最もポテンシャルの高い M_{14} では、共振器の内部に電界が収まらず、共振器の外部に電界がリークしていると考えられる。その考えから、リークする電界は $M_{14} > M_{13} > M_{12} > M_{11}$ の順に強いことが予想できる。電界がリークしやすいということは、共振器を並べたとき共振器同士は電界による結合が強いと考えられる。

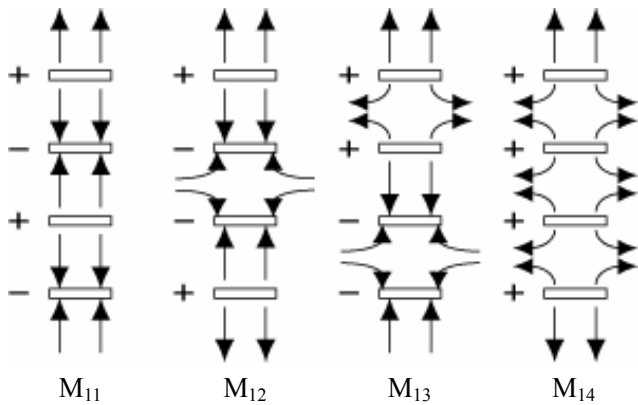


図6. 4ストリップ共振器の各モードにおける電界分布

3.3. 4ストリップ共振器の断面内磁界分布

4ストリップで構成した共振器の磁界分布を図5(c)から考える。GNDである共振器の接地面を零電位として考え、各ストリップ線路に対する長手方向への電流の向きを図7に示す。例として、 M_{11} の電流状態を考える。この M_{11} における電流の向きを4ストリップ線路の上から順に見ていくと、+から0、0から-、+から0、0から-となっていることが分かる。つまり、共振器を構成しているストリップ線路を流れる電流は同一方向であると考えられる。同様に M_{12} 、 M_{13} においても考える。そして、 M_{14} では M_{11} とは対照的に、各ストリップ線路を流れる電流

の方向は互いに逆方向となることが分かる。

この電流の流れる方向を考えて、各ストリップ線路に発生する磁力線の断面分布を図8に示す。最低次共振の M_{11} においては流れる電流の方向が同じであるため、全てのストリップ線路は同じ磁界分布を形成することが分かる。

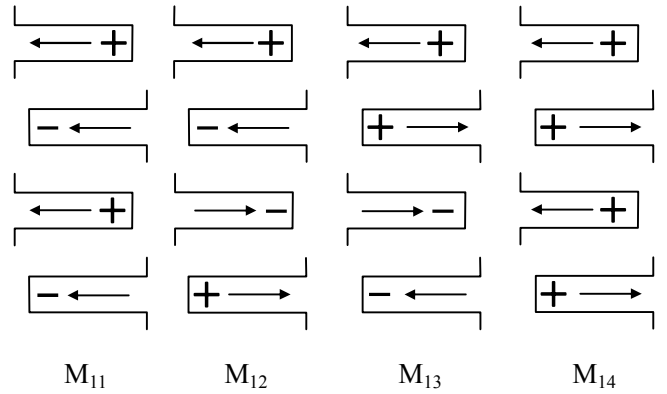


図7. 4ストリップ共振器の各モードにおける電流方向

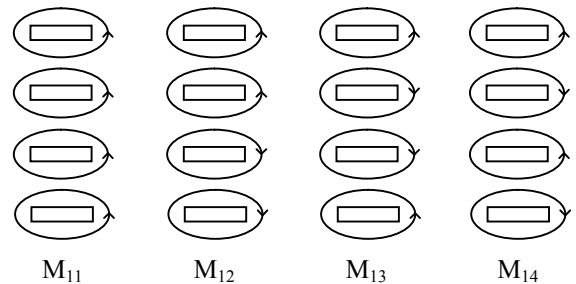


図8. 4ストリップ共振器における各ストリップ線路に発生する磁界分布

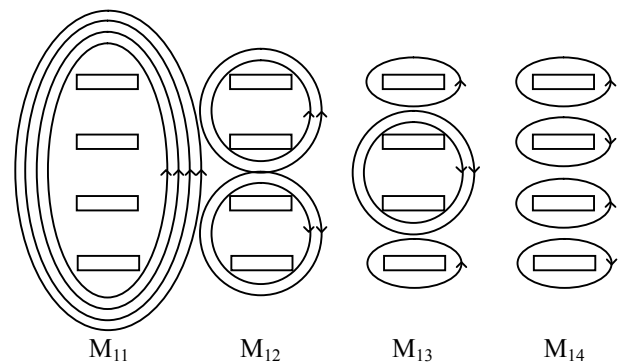


図9. 4ストリップ共振器の各モードにおける全体の磁界分布

図 8 から、それぞれのストリップ線路に発生する磁力線をベクトル的に加えて、共振器に発生する全体の磁界分布を図 9 に示す。予想される外部磁界は、全ての磁力線が一つとなる M_{11} が最も大きくなるのが分かる。同様に他のモードについても考えると、共振器の外部に存在する全体の磁界は $M_{11} > M_{12} > M_{13} > M_{14}$ の順に大きいと考えられる。これはちょうど電界のときとは逆の順であることが分かり、この順序で磁気結合が強いと予想される。

そこで 4 ストリップ共振器に形成される電界と磁界を HFSS によって解析し、その結果を図 10 に載せる。この結果と図 6 および図 9 を照らし合わせて考えると、全ての共振モードにおいて、予想していた結果が得られたことが分かる。

しかしながら、この結果だけでは定性的な解釈が多く、より詳細に検討するためにも共振器間の結合を定量的に解析する必要がある。

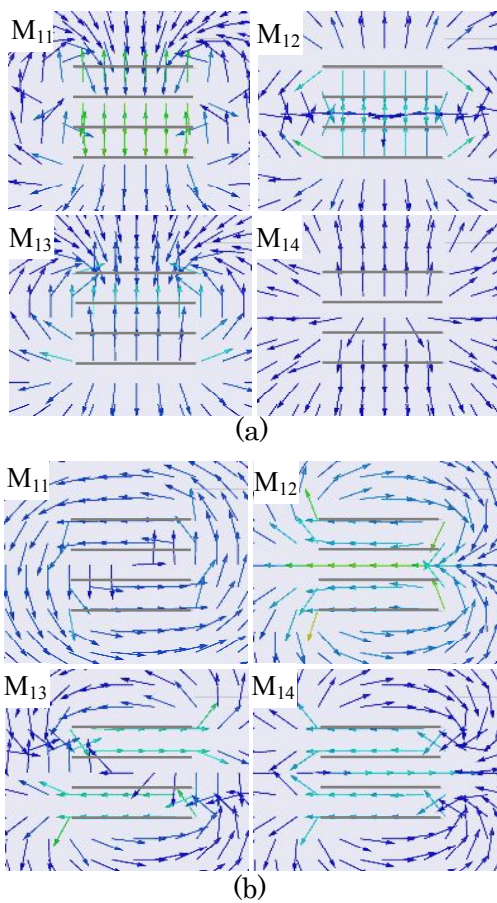


図 10. HFSS による電界と磁界分布
(a) 各モードの電界分布 (b) 各モードの磁界分布

4. 結合係数の磁気成分と電気成分

共振器の結合係数は磁気成分と電気成分で成り立っており、以下に示す関係式により表される[3]。

$$k = k_m - k_e \quad (1)$$

k_m と k_e は結合係数 k のそれぞれ磁気成分と電気成分である。この関係式を考慮して、4 ストリップで構成されたマルチストリップ共振器の各モードに対応させた磁気成分と電気成分の大小関係を図 11 に示す。両者の減算の結果、全体の結合係数はグレーの部分で表される。

この関係から、 M_{12} と M_{13} の結合係数は M_{11} と M_{14} に比べて弱いことが分かり、スプリアバンドを形成しないだろうと考えられる。

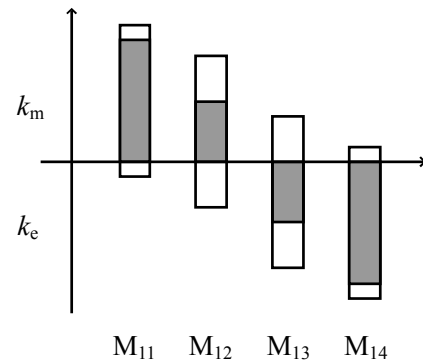


図 11. 結合係数の磁気成分と電気成分の関係

そこで、この共振器の結合係数を定量的に見積もるために、共振器の各モードの結合係数を摂動法によって計算した[4]。結果を図 12 に示す。この計算結果からも、共振器間の結合係数に関しては M_{11} では磁気結合成分が強く、逆に M_{14} では電気結合成分が強いことが分かる。これは電磁界分布から判断した結果とよく一致する。

また、 M_1 より高次モードである M_2 における共振器間の結合係数の結果を図 13 に示す。結果から、 M_2 のどの結合モードも最低次共振で結合している M_{11} より弱く、高次モードの共振は弱いだろうと考えられる。

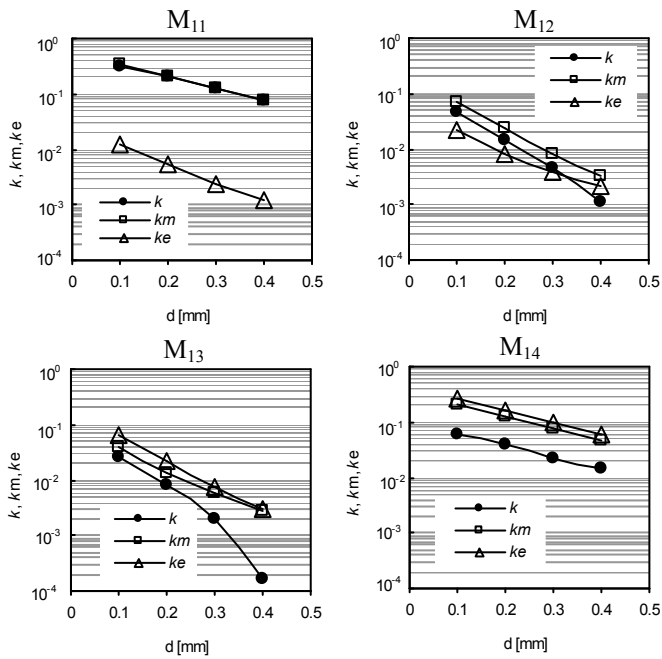


図 12. 各モードの結合係数における磁気成分と電気成分

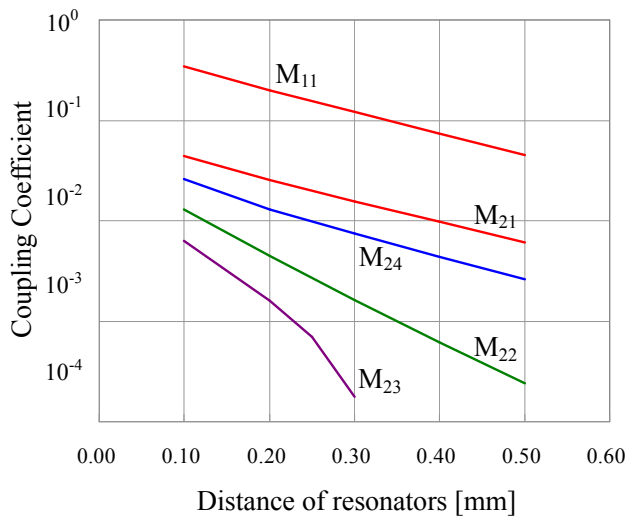


図 13. 4 ストリップ共振器の M_2 における結合係数

5. マルチストリップ共振器 BPF

4 層 3 段で設計した共振器 BPF の反射特性と伝送特性のシミュレーション結果を図 14(a)に示す。2nd モードである M_{12} と 3rd モードである M_{13} は上記で述べたように抑圧されているのが分かる。さらに、図 11 の結合係数の関係から 3 層共振器で構成すると 2nd モードは抑圧されることが予想でき、図 14(b) がそれを示している。そして、2 層共振器で構成し

たとすれば、2nd モードは抑圧されないと考えられ、図 14(c)の結果はそのことを実証している。

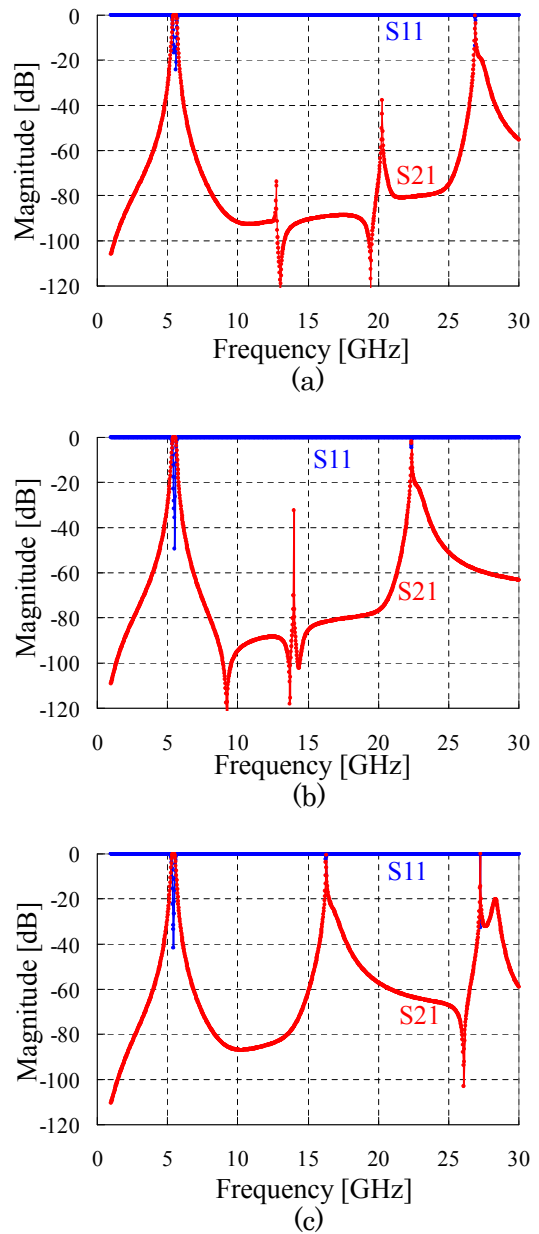


図 14. 3 段共振器 BPF の周波数特性
(a) 4 層 3 段共振器 BPF (b) 3 層 3 段共振器 BPF
(c) 2 層 3 段共振器 BPF

6. まとめ

マルチストリップ共振器 BPF が優れたスプリアス特性を示す理由を共振器間の結合係数を基に解明した。優れたスプリアス特性を示すのは共振モードごとに異なる結合係数を有するためである。マルチ

ストリップ共振器を用いてスプリアスモードを抑圧するためには、共振器を構成するストリップ線路が3層以上必要である。この手法は他の共振器を用いたBPFにも適用することができる。

参考文献

- [1] Ikuo Awai, Mina Inoue, Yusuke Maeda, Tatsuya Fukunaga, Yorikazu Murabayashi and Masahiro Fujimoto, “Novel Multi-strip Resonator and Filter”, *Proc. 38th EuMC*, pp. 1406-1409, Amsterdam, Oct. 2008.
- [2] Ikuo Awai, Yusuke Maeda, Daisuke Hanatani and Masahiro Fujimoto, “Multi-strip LTCC Resonator BPF”, *IEICE Electronics Express*, vol.5, no. 22, pp.978-982, Nov.2008.
- [3] Ikuo Awai, “New expressions for coupling coefficient between resonators”, *IEICE Trans. Electron.*, E88-C, No.12, pp.2295-2301, Dec. 2005.
- [4] Ikuo Awai and Tetsuya Ishida, “Ultra-fast calculation of resonator coupling based on evanescent field integral in time domain”, *2006 China-Japan Joint Microwave Conference Proceedings*, pp.74-77, Chengdu, Aug. 2006.