

# スプリットリング型共振器を用いた周波数選択表面の設計

Design of Frequency Selective Surfaces using Split Ring Resonators

電気電子情報通信工学専攻 米澤 孝昌

Takamasa YONEZAWA

## 1. はじめに

近年の無線通信技術は急速に発展しており，これまでの 1G から 4G として通信速度の向上や通信方式の改善が進められ，2020 年には 5G が実用化された．5G の主な特長は超高速，超低遅延，多接続であり，これまでの通信規格と異なりあらゆるモノ・人などが繋がる IoT (Internet of Things) 時代の新たなコミュニケーションツールとしての役割を果たす．ここで IoT を導入する上で大きな課題となるのがセキュリティの確保である．このセキュリティの確保をするために周波数選択表面 (Frequency Selective Surface: FSS) を導入して無線 LAN や携帯電話などの情報漏洩を防ぐことが提案されている．FSS は金属箔パターンを壁や窓ガラスなどに周期的に配置することで特定の周波数の電波を反射・透過させるフィルタのような特性をもつ．

本研究では FSS をスプリットリング型共振器 (Split Ring Resonator: SRR) を用いて設計する．設計する FSS は 5G のマイクロ波帯 (3.6~4.1 GHz, 4.5~4.6 GHz) の 2 帯域を阻止帯域として動作させることを目的とした．ここで問題になるのが日本における 5G 通信規格の 2 帯域が近いため，同一平面上に共振器を配置することが難しくなるため単層構造によるデュアルバンド化が難しい．しかし，多層構造にすると設計コストや製造コストが高くなってしまふ．そこで本研究では，デュアルバンド化を実現するために誘電体の両面にそれぞれ共振周波数の異なるスプリットリング共振器を配置することで誘電体の層が 1 枚で済むようにできないか検討する．また，実装した FSS を測定し性能評価も行ふ．

## 2. 従来技術

### 2.1 多層構造によるデュアルバンドパス FSS

図 1 にデュアルバンドパス FSS の多層構造を示す [1]．図 1 に示した多層構造によるデュアルバンド FSS では，狭帯域と広帯域の周波数特性を持つ多層バンドパス FSS の設計を行っている．提案されている FSS は，スプリットリングとパッチを組み合わせた層と十字グリッド層を縦続接続して設計され，3.1~3.5 GHz 帯と 6.0~7.7 GHz

帯の 2 帯域を通過させる特性をもつ．

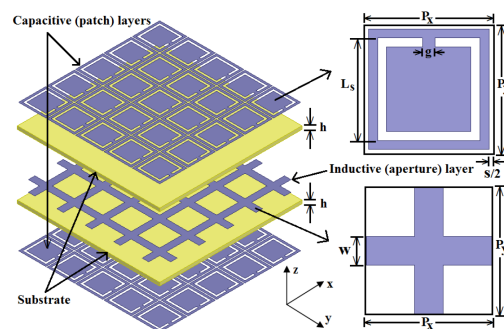
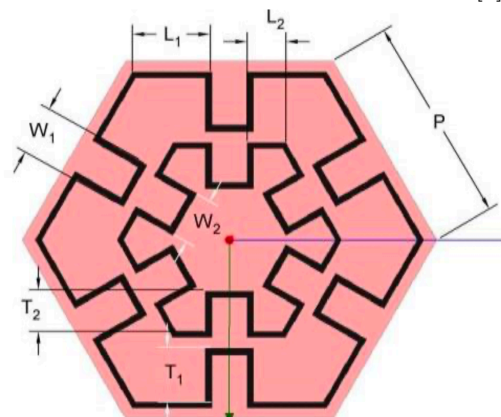
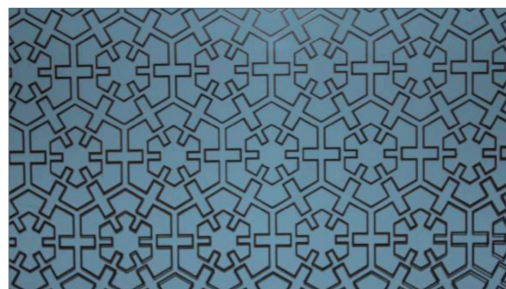


図 1: 多層構造によるデュアルバンド FSS[1]



(a) ユニットセル



(b) 周期構造

図 2: 2 重ヘキサゴナルループ構造によるデュアルバンド FSS[2]

## 2.2 平面構造によるデュアルバンド FSS

図 2 に平面構造によるデュアルバンド FSS を示す [2]. 図 2 に示した FSS は Wi-Fi (2.4 GHz 帯と 5.3 GHz 帯) で阻止帯域をもつ FSS をヘキサゴナルループと呼ばれる細い導体の 2 重ループ構造から構成している. ループ素子は良好な角度安定性と広帯域特性を得やすく, FSS に適した特長を持つ. また, 2 重ループ構造によって結合共振モードと自己共振モードの 2 モードの共振周波数によってデュアルバンドプロジェクト FSS を実現している.

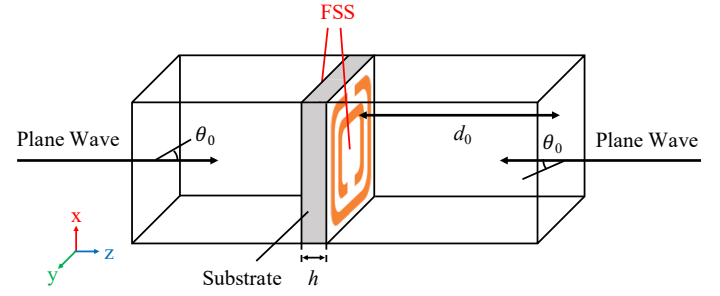


図 3: FSS のシミュレーションモデル

## 3. FSS の特性シミュレーション

最初に SRR を用いて設計した FSS のシミュレーションおよび測定結果について述べる. なお, 本研究では電磁界シミュレータ HFSS (ANSYS 社) 2020R1 を使用して形状を設計した. また, 測定結果における周波数特性は FSS を設置した後の測定データ (空間損失 + コネクタ損失 + 放射損失 + FSS による減衰) から設置前に測定した損失のみのデータを減算し, なるべく FSS による減衰のみを抽出できるようにした. 図 3 に FSS のシミュレーションモデルを示す. 製作した FSS は利昌工業社製の基板 CS-3376G [3] (基板厚さ  $h = 0.8$  mm, 導体厚さ  $= 0.035$  mm, 比誘電率  $\epsilon_r = 3.1$ , 誘電正接  $\tan \delta = 0.003 @ 1$  GHz) を使用した. また, 両入力ポートから基板表面までの距離は  $d_0 = 0.4$  m としてシミュレーションを行った. 基板の両面に共振周波数の異なる SRR がそれぞれ配置されており, このモデルに対して両側から平面波を入射させて周波数特性を解析する. このときの入射角  $\theta_0$  を変化させた場合の特性も解析する.

図 4 にシミュレーションより得られた FSS のユニットセル構造を, 表 1 に各寸法をそれぞれ示す. また, 図 5 に周波数特性を示す. 今回提案する FSS は基板の両面に共振周波数の異なる SRR をそれぞれ配置しているが, 共振周波数は外側のリングの一边の長さ  $l$  によって変化させることができる.

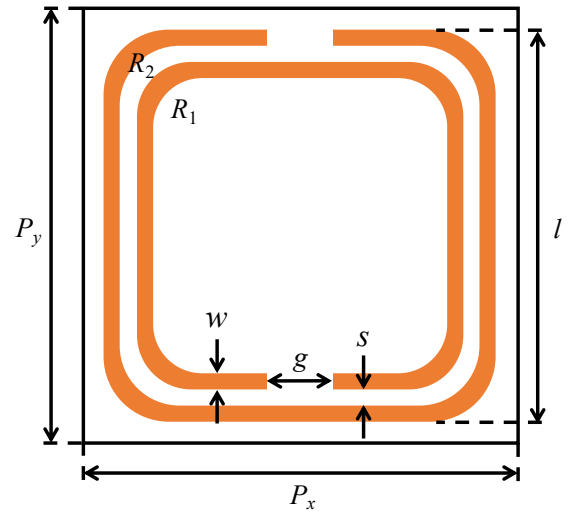


図 4: ユニットセル FSS の構造

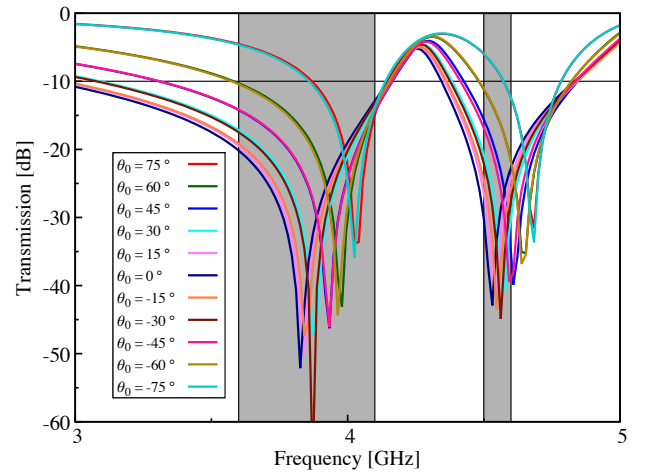


図 5: シミュレーションによって得た FSS の周波数特性

表 1: FSS の各パラメータ

パラメータ	数値
ユニットセルの横幅 $P_x$	12.2 mm
ユニットセルの縦幅 $P_y$	12.2 mm
リング幅 $w$	0.4 mm
スリット間距離 $g$	0.4 mm
リング間距離 $s$	0.2 mm
リングの内輪の曲率半径 $R_1$	0.2 mm
リングの外輪の曲率半径 $R_2$	0.2 mm
低域を減衰させる面の外側のリングの一边の長さ $l$	11.8 mm
高域を減衰させる面の外側のリングの一边の長さ $l$	11.2 mm

#### 4. アンテナの入射角度と距離を変化させた場合の特性測定

電波暗室内にて2本のホーンアンテナを相対させ、その間に製作したFSSを配置して測定を行った。製作したFSSの寸法値は1039mm×490mmであり、SRRは縦に85パターン、横に40パターンあり計3400パターンの周期構造から構成されている。また、ホーンアンテナはETS-LINDGREN社の“3115 Double-Ridged Guide Antenna”を使用した。さらに、ベクトルネットワークアナライザはAgilent社の“E8361A”を使用した。

図6に実験環境の概形を示す。相対するアンテナ間の距離 $d$ 、送信側のアンテナとFSS間の距離 $d_0$ 、FSSに対するアンテナの傾き $\theta_0$ をそれぞれ変化させ測定を行った。なお、 $\theta_0$ はFSSに対して直交するときを $\theta_0=0^\circ$ とし、 $\pm 60^\circ$ の範囲で $15^\circ$ 刻みで測定した。また、距離 $d$ は1～3mまで0.5m刻みで測定し、そのとき $d_0 = d/2$ となるように設定した。ただし、ここではスペースの都合上 $d=1\text{m}$ のときの結果のみ示す。

図7に $d=1\text{m}$ 、 $\theta_0=0, \pm 15, \pm 30^\circ$ のときの測定結果を、図8に $d=1\text{m}$ 、 $\theta_0=\pm 45, \pm 60^\circ$ のときの測定結果をそれぞれ示す。図7より $d=1\text{m}$ のとき $\theta_0=0, \pm 15, \pm 30^\circ$ で $-10\text{dB}$ 以上の減衰量を得ており、両帯域内で最大 $-50\text{dB}$ の減衰極をもつ。また、図8より $d=1\text{m}$ のとき $\theta_0=\pm 45, \pm 60^\circ$ で $-10\text{dB}$ 以上の減衰量を得ており、低域内で最大 $-50\text{dB}$ 、高域内で最大 $-60\text{dB}$ の減衰をもつことがわかる。

#### 5. 送信アンテナの角度と受信アンテナの距離を変化させた場合の特性測定

次に送信アンテナをFSSの近くに設置し、受信アンテナを前後に動かした場合と入射角度を変化させた場合の周波数特性について述べる。

図9に実験環境の概形を示す。相対するアンテナ間の距離 $d$ 、送信側のアンテナとFSS間の距離 $d_0$ 、FSSに対するアンテナの傾き $\theta_0$ をそれぞれ変化させ測定を行った。ただし、 $d=0.5\text{m}$ のときのみ $d_0=0.25\text{m}$ とし、 $d=\{1, 1.5, 2, 2.5, 3\}\text{m}$ のときは $d_0=0.5\text{m}$ として測定した。なお、 $\theta_0$ はFSSに対して直交するときを $\theta_0=0^\circ$ とし、 $\pm 60^\circ$ の範囲で $15^\circ$ 刻みで測定した。また、距離 $d$ は0.5～3mまで0.5m刻みで測定した。ただし、ここではスペースの都合上 $d=1\text{m}$ のときの結果のみ示す。

図10に $d=1\text{m}$ 、 $\theta_0=0, \pm 15, \pm 30^\circ$ のときの測定結

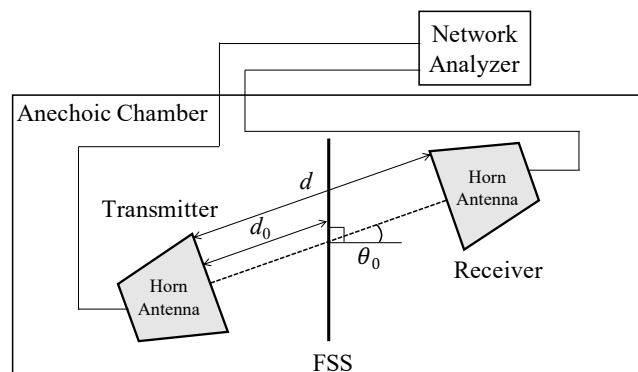


図6: アンテナの入射角度と距離を変化させた場合の測定環境の概形

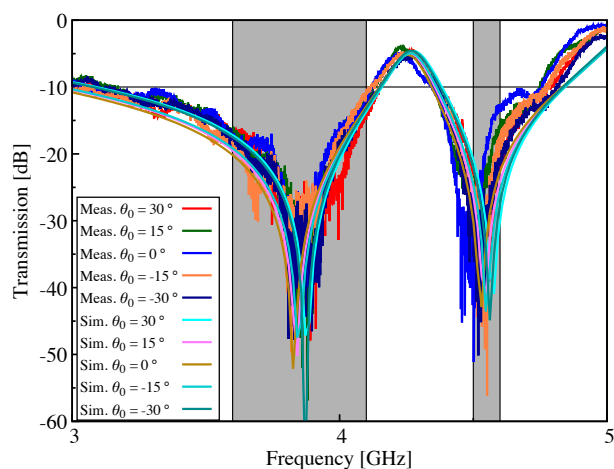


図7:  $d=1\text{m}$ におけるアンテナの入射角度を変化させた場合の周波数特性 ( $\theta_0=0, \pm 15, \pm 30^\circ$ )

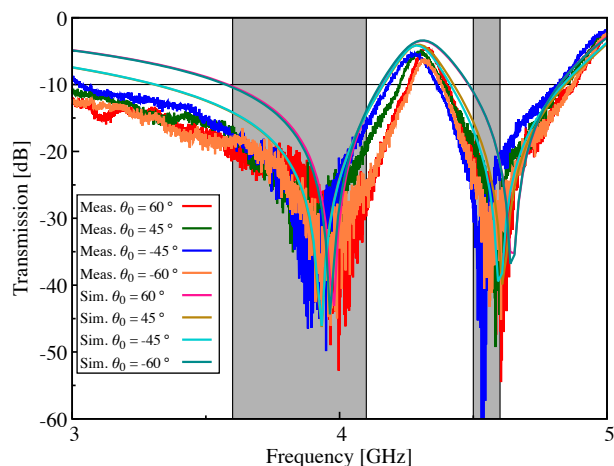


図8:  $d=1\text{m}$ におけるアンテナの入射角度を変化させた場合の周波数特性 ( $\theta_0=\pm 45, \pm 60^\circ$ )

果を、図11に $d=1\text{m}$ 、 $\theta_0=\pm 45, \pm 60^\circ$ のときの測定結果をそれぞれ示す。図10より $d=1\text{m}$ のとき

$\theta_0 = 0, \pm 15, \pm 30^\circ$  で  $-10$  dB 以上の減衰量を得ており、低域では最大  $-40$  dB、高域では最大  $-50$  dB の減衰をもつことがわかる。また、図 11 より  $d = 1$  m のときいずれの角度においても減衰しているとは言い難い。この原因はホーンアンテナの指向性によるもので、11966E のデータシートによれば  $3 \sim 5$  GHz では  $30^\circ$  程度までしか送信できないからだと考えられる。

## 6. おわりに

本論文では SRR を用いることにより日本における第 5 世代無線通信規格のマイクロ波帯である  $3.6 \sim 4.1$  GHz,  $4.5 \sim 4.6$  GHz の 2 帯域を阻止帯域とする FSS を提案した。シミュレーションによって設計した寸法値を基に両面銅箔基板上にパターンをエッチング加工により製作し、その周波数特性を測定した。アンテナの入射角度と距離を変化させた場合の測定においてはアンテナ間距離  $d = 1$  m, 送信アンテナと FSS 間距離  $d_0 = 0.5$  m のとき  $\theta_0 = 0, \pm 15, \pm 30^\circ$  で  $-10$  dB 以上の減衰量を得ており、両帯域内で最大  $-50$  dB の減衰を示した。また、 $\theta_0 = \pm 45, \pm 60^\circ$  でも  $-10$  dB 以上の減衰量を得ており、低域内で最大  $-50$  dB、高域内で最大  $-60$  dB の減衰を示した。これはシミュレーションで得られた結果と非常に近く、本研究の優位性を示した。

今後の課題として、等価回路に置換することで代数的に設計を行えるようにすることや動作原理を理解できるようになることが必要になる。

## 謝辞

FSS の製作には利昌工業株式会社様、共栄電資株式会社様にご協力いただきました。この場を借りてお礼申し上げます。

## 参考文献

- [1] Ayan Chatterjee, Goffar Ali Sarkar and Susanta Kumar Parui, "A Multi-layered Frequency Selective Surface-Based Wireless Filter with Dual Bandpass Response," Proc. of IEEE MTT-S International Microwave and RF Conference, pp.173-176, November 2018.
- [2] M. R. Chaharmir, J. Ethier, D. Lee and J. Shaker, "Design of dual-band frequency selective surfaces to block Wi-Fi using printable electronics technology," Proc. of IEEE International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics (ANTEM), pp.317-319, July 2016.

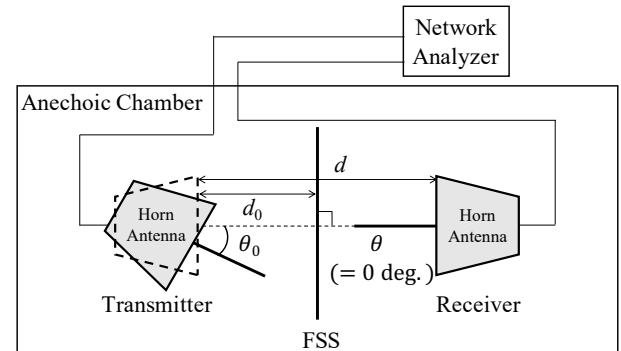


図 9: 送信アンテナの角度と受信アンテナの距離を変化させた場合の測定環境の概形

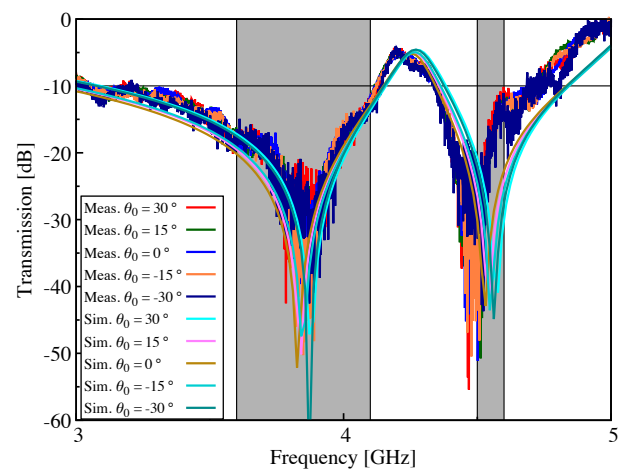


図 10:  $d = 1$  m における送信アンテナの角度を変化させた場合の周波数特性 ( $\theta_0 = 0, \pm 15, \pm 30^\circ$ )

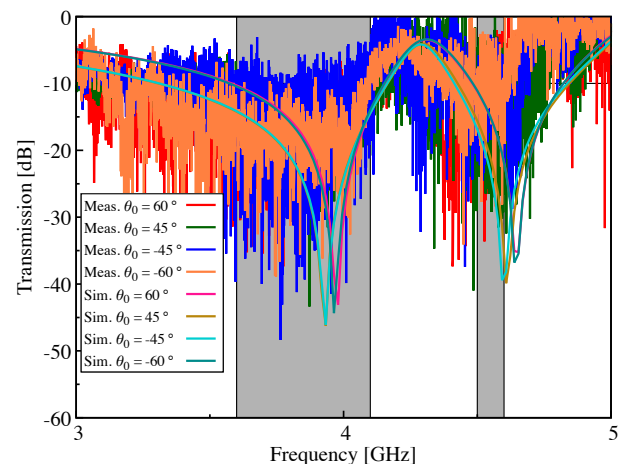


図 11:  $d = 1$  m における送信アンテナの角度を変化させた場合の周波数特性 ( $\theta_0 = \pm 45, \pm 60^\circ$ )

- [3] CS-3376G 特性表, "<https://www.risho.co.jp/product/products1/cs/3376G.htm>"