

平成 27 年度 TSUBAME 産業利用トライアルユース 成果報告書

利用課題名 周波数選択性電磁メタマテリアルの最適設計手法に関する検討
英文: Research on Optimization Techniques of Frequency Selective Electromagnetic Metamaterials

田所真人
Masato Tadokoro

横浜ゴム株式会社 航空部品事業部
Aerospace Division, The Yokohama Rubber Co., Ltd.
<http://www.y-yokohama.com/>

FSS の設計においては 1 つの計算は小さいが多数のパラメータ或いは進化プロセスでの最適化を行うため一般に PC での計算は非常に時間が掛かる。TSUBAME を利用することにより OpenMP や OpenACC を用いてもこのような小さな計算の高速化は困難であったが、一方で多数の CPU で同時平行的に実行させることで十分に並列化と同等の性能が得られる。多数の CPU を利用することで網羅的なパラメータ探索も可能であり、小さなモデルで総当り法により最良解を抽出しこれをベースにより大きなモデルとして初期解を与え多目的遺伝アルゴリズムにより最適化を行う手法が有効であることが解った。

Though a single calculation is small, the design of FSS structures is very time-consuming because many parameters should be considered and/or evolutionary optimization techniques are needed to obtain superior solutions. Utilizing TSUBAME, exhaustive parameter search by utilizing a large number of CPU is possible for smaller FSS model, and with multi-objective genetic algorithm using seeds extracted with brute-forced solutions can lead to obtaining effective solutions for a larger model.

Keywords: Frequency selective surfaces (FSS), optimization, multi-objective genetic algorithm

背景と目的

近年の IT 技術開発の進歩により電波の利用は増大する一方で、近接して混在する周波数の利用は通信障害を引き起こす原因になっている。このような状況を解決するパッシブデバイスとして周波数選択板 (frequency selective surfaces, FSS) があるが、同一のジオメトリでも積層構成、周期配列寸法等により大きく電波透過・反射特性が変動し、パラメータが多いため設計に多大な時間が必要である。

本プロジェクトでは並列計算を行うことにより従来よりも短時間で効果的な設計解が得られる手法の検討を行い、検討の結果、小さなモデルでの総当り法による優良解の抽出とそれを大きなモデルでの初期解として最適化計算を行う手法を考案した。

本手法により従来 PC 上で数日掛かって行っていた設計が約 1 日の工程に短縮できた。

概要

近年 IT 技術は、電波を利用するアプリケーションが

多い為、近接している周波数を利用せざるおえなくなってきた。その為、近接している周波数からの影響をさけるのに対策をする必要があり、主な対策としてフィルターを用いて分離させる方法がある。

当社では、写真 1 のような周波数選択板 (frequency selective surfaces) として知られる電磁メタマテリアルをアンテナカバーに適用することによりパッシブデバイスとしてフィルター機能を提供するアプリケーションを研究している。周波数の近接の度合いによっては十分なフィルター機能を達成する設計解が得られないことも多く、計算はモーメント法を用いて周波数選択板の電波透過性能を解析するプログラムを作成し、設計で使用しているが、本課題ではこの解析プログラムを用いて効果的な電磁メタマテリアル構造の最適化計算を実現することに取り組んだ。

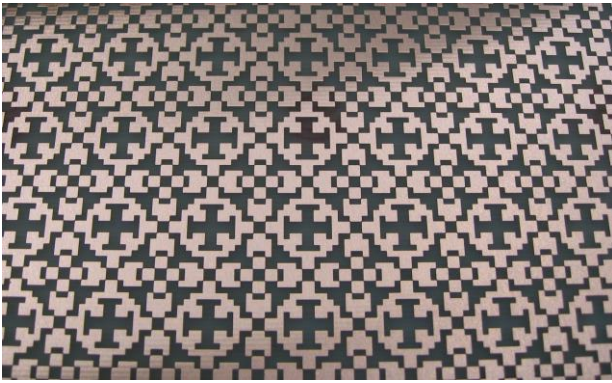


写真 1 周波数選択板

結果および考察

先ず図 1 のような単純な十字型のパターンが 1mm 厚さの GFRP (ガラス繊維強化プラスチック) 上に 12.8mm の配列周期で設置されたケースを例として FSS 性能計算プログラムの並列化での効果を測定した。この構造では図 2 のような周波数特性を有しており、約 9GHz で遮蔽性能を発揮する。

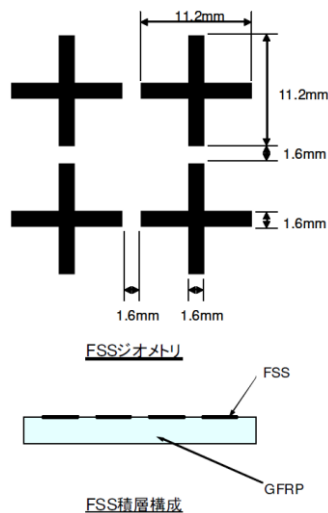


図 1 FSS の構成

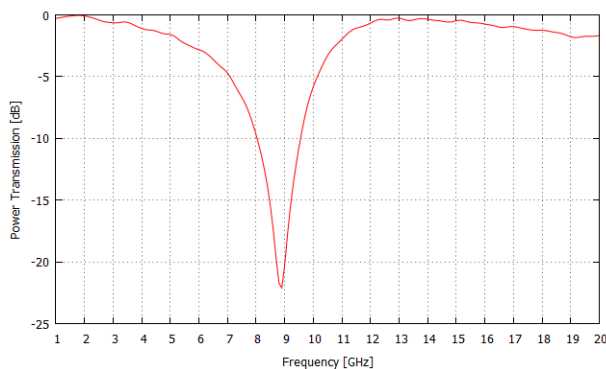


図 2 FSS の周波数特性

CPU の数と加速率の関係は表 1 に示す通りであり、

計算量としては元々大きくはないために各 CPU への割り付けに掛かるオーバーヘッドの方が高く、並列化の効果が得られ難いものと考えられる。OpenACC による GPGPU 利用についてもむしろ加速率が低下する結果であった。

表 1 並列化での CPU 数と加速率の関係

CPU 数	1	2	4	6	8	10	12
加速率	1	1.05	1.07	1.08	1.07	1.08	1.07

このような結果から計算プログラムの並列化を進めるよりも各 CPU 毎にそれぞれの計算パラメータを与えて並列に計算実行させる方が総体的に高い効率が得られると言える。

計算コードは Fortran であるが、CPU に割り付けて計算を行うに当って Python の multiprocessing モジュールを使用した。現状ではファイル IO であるために出カファイルが完全に生成されるまで待ち時間を要し、且つ最も遅い計算で同期することになるため理想的な加速率には届かないが表 2 に示す通り十分に高い効率を示した。

表 2 Python による並列実行による CPU 数と加速率の関係

CPU 数	1	2	4	6	8	9	12
加速率	1	1.77	3.07	3.85	4.11	4.52	4.80

本手法を利用すれば静的なパラメータに対してはバッチを分けてノード毎に実行する手法で行えば十分なスケーラビリティが得られる。

FSS の最適設計については Chakravarty 等の手法が有効である。スペクトル領域モーメント法で FSS 構造の特性を解く場合には $2^N \times 2^N$ のセルで単位周期構造を表現し、各セルでの導体・非導体を 1,0 で表現する。偏波特性を考慮して図 3 のように対称性を持たせることでパターンを表現する変数を縮約することが出来、その上で各セルの導体・非導体を多目的最適化手法を適用して決定する。[1]

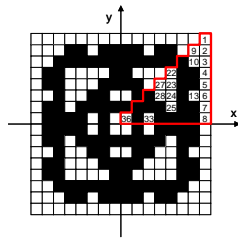


図 3 対称性を考慮した FSS パターン決定

通常計算コストと製作仕様への反映しやすさから 16 × 16 がモデルサイズとして利用しやすい。この場合パターンに関しての未知数のみで 2^{36} 通りとなる。これに対してより粗いモデルとなるが 8 × 8 モデルとするとパターンに関する未知数は 2^{10} 通りで済むことに着目し、8 × 8 モデルを用いて総当り法で優良解を求め、この優良解を 16 × 16 モデルに変換して初期解として与え、多目的遺伝アルゴリズムにより最適化を図ることで効率良く最適化が行えた。

単層 GFRP 基板上一層の FSS を配置する制約において 9GHz 帯での透過性能、8GHz 以下及び 11GHz 以上での遮蔽性能を目的関数として多目的遺伝アルゴリズムにより最適解を求めた例を示す。8 × 8 モデルでの総当り法での計算結果から求めた優良な解のグループを表 3 に示す。これらの解を 16 × 16 モデルに拡張し初期解として与え多目的遺伝アルゴリズムにより最適化した結果表 4 に示す FSS パターン及び寸法を得た。これらの解の電力透過率は図 4 に示す通りであり、目標性能に近い解が得られている。

表 3 8 × 8 モデル優良解のパラメータ

符号	A	B	C	D
パターン				
寸法 [cm]	2.2	1.5	2.0	2.0

多目的遺伝アルゴリズムによる最適化では動的にパラメータを生成し計算する必要があるが、MPI 実装までは未了であり、今後の課題となった。

表 4 16 × 16 モデル最良解のパラメータ

符号	A	B	C	D
パターン				
寸法 [cm]	1.89	2.03	2.06	2.00
符号	E	F	G	H
パターン				
寸法 [cm]	2.00	1.38	1.74	2.05

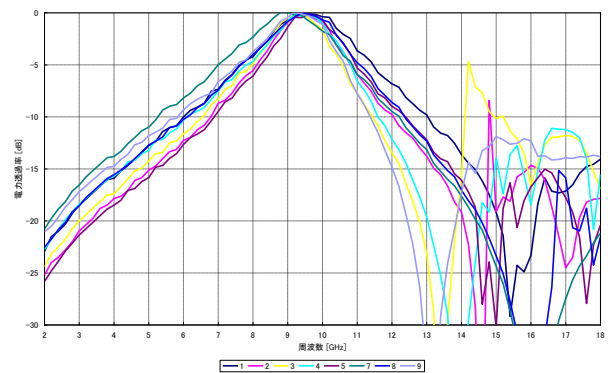


図 4 16 × 16 モデル最良解の周波数特性

まとめ、今後の課題

本プロジェクトでは多目的遺伝アルゴリズム最適化部分の MPI 実装までは実施できなかったが、小さなモデルでの総当り法による優良解の抽出とそれを大きなモデルでの初期解として最適化計算を行う手法を考案し、設計効率化が可能となった。

また、FSS 解析は以上のように一つの周期で区切った単一セルを対象として行うのが通常であるが、計算能力を活用するとより大きなスケールでの計算も可能となる。例えば 100 × 100 個の FSS スクリーンでの製造欠陥の影響度等の解析が可能であり、今後の課題となる。

参考文献

- [1] S. Chakravarty, R. Mittra, N. R. Williams, "Application of a Microgenetic Algorithm (MGA) to the Design of Broad-Band Microwave Absorbers Using Multiple Frequency Selective Surface Screens Buried in Dielectrics," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. AP-50, no. 3, pp. 284-296, Mar, 2002