

## PSO を用いた 2 周波共用メタサーフェスの解析設計

大澤 拓門 山本 愛理 丸山 珠美 大宮 学<sup>†</sup> 末松 憲治<sup>‡</sup> 佐藤 弘康<sup>‡</sup>

函館工業高等専門学校高専 〒042-8501 北海道函館市戸倉町 14-1

<sup>†</sup>北海道大学 <sup>‡</sup>東北大学

E-mail: (17703, 14187, maruyama)@hakodate.kosen-ac.jp,

**あらまし** 移動体 IoT が災害現場に近づくにつれて瓦礫などが障害となり電波が通じなくなる問題を解消するためメタサーフェスを用いて電波の放射方向を制御する手法が提案されている。移動体 IoT は制御用とデータ通信用など複数の周波数での動作が想定されるが、一つのメタサーフェスで複数の周波数の電波を同時に制御するのは、極めて困難である。そこで、本研究では PSO (Particle Swarm Optimization) を用いて 2 周波共用メタサーフェスの最適設計を行った。さらに、本研究ではサイドローブ低減のため、反射位相だけでなく振幅も最適化パラメータに含み設計を行った。その結果 1 GHz と 1.5 GHz の二つの周波数において -30° 方向にビームを向けるとともに、サイドローブレベル -15dB 以下を実現できることを明らかにした。

**キーワード** メタサーフェス、リフレクトアレー、マルチバンド、多周波共用、PSO、メタヒューリスティック、最適設計

## Design of Dual-frequency Metasurface Using Particle Swarm Optimization

Takuto OSAWA Airi YAMAMOTO Tamami MARUYAMA Manabu OMIYA <sup>†</sup>

Noriharu SUEMATSU <sup>‡</sup> and Hiroyasu SATO <sup>‡</sup>

National Institute of Technology, Hakodate College, 14-1, Tokura, Hakodate, Hokkaido, 042-8501 Japan

<sup>†</sup> Information Initiative Center, Hokkaido University, Kita 8, Nishi 5, Kita-ku, Sapporo, Hokkaido, 060-0811 Japan

<sup>‡</sup> Tohoku University, 2-1-1, Katahira, Aoba-ku, Sendai, Miyagi, 980-8577 Japan

E-mail: (17703, maruyama)@hakodate.kosen-ac.jp

**Abstract** This paper proposes a novel dual frequency reflectarray whose elements have not only the desired reflection phases but also the same amplitude among them. In design of a reflectarray, we employ the particle swarm optimization (PSO) which simultaneously achieves desired amplitude and phase shift at both frequencies of 1.0 GHz and 1.5 GHz. Two-layer structure is adopted to increase design freedom. In the two layers, the presence or not of a 4 by 4 metallic patch on mesh is determined by PSO, and moved in axial symmetry about x- and y-axes. As a result, we develop a dual frequency reflectarray with which the plane wave is radiated in direction of -30 degrees when the angle of incidence from illuminator is 0 degree.

**Keywords** Reflectarray, Dual frequency, Multi-band, Particle swarm optimization, PSO.

### 1. まえがき

近年、すべての“物”がインターネットにつながる、Internet of Things (以下、IoT) の開発実用化が進んでいる [1]. 特に、スマートフォンを搭載したドローンなどのような移動体 IoT は、人が進入できないよう場所の探索に使用することが期待されている [2]. しかし、障害物がある場合、受信電力は距離の約 4 乗に比例して減少する [3]. そのため、移動体 IoT の最大のメリッ

トが、瓦礫、雪、火山等の人が足を踏み入れることが出来ないような場所を探索できることであるのに対して、このような場所においては、電波が届きにくくなるためドローンの操作やデータの送受信が困難という問題が生じる. そのような最もデータが必要となる場所において、電波が届かなくなり通信できないという問題を解消するためにメタサーフェスの適応が提案されている [4], [5]. また、多くの IoT 機器は LTE や WiFi などの複数の周波数を使用することが想定されている

ため、メタサーフェスも複数の周波数で動作する必要がある。しかし、メタサーフェスを設計する際、一方の周波数で動作するように素子の設計を行えば、もう一方の周波数にも影響を与える。このためとから 2 つの周波数で独立にメタサーフェスを設計することは困難となる。これを解決する手段として、2 周波共用メタサーフェスの設計に遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm 以下, GA) 及び Particle Swarm Optimization (以下, PSO) の適応が提案されている [6], [13]。しかし、これらは反射位相のみの設計であり、メタサーフェスを構成する各素子の反射電界の振幅については検討されていなかった。アレーアンテナの理論より素子の反射振幅を同一とすることでメタサーフェスの散乱断面積のサイドローブを低減することが可能であると考えられる [7]。そこで、本研究ではメタサーフェスを構成する各素子が同一振幅を持つ場合とチェビシェフ分布を持つ場合の 2 種類について、2 つの周波数で同一の方向にビームを操作できる、2 周波共用メタサーフェスを構築することを目的とした。アンテナの設計及び解析にはメタヒューリスティクスの PSO [8], [9] と北海道大学情報基盤センターで開発されている Jet FDTD [10] を用いた。

## 2. 解析モデル

### 2.1. メタサーフェスを構成する素子の構造

メタサーフェスを構成する各素子について、x-z 平面からみた図を図 1 に、x-y 平面からみた図を図 2 に示す。

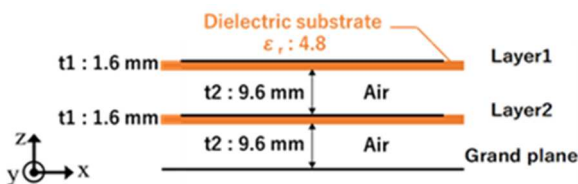


図 1 2 レイヤ構造を持つリフレクトアレー素子 (x-z 平面)

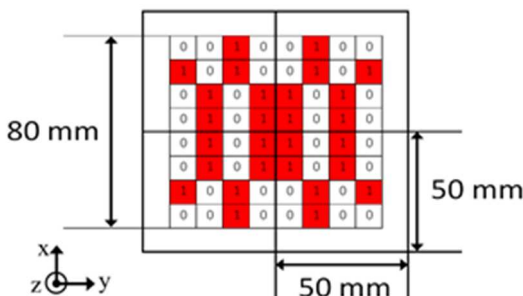


図 2 リフレクトアレー素子 (x-y 平面)

各素子は、それぞれ厚さ 1.6 [mm] の片面紙フェノー

ル ( $\epsilon_r = 4.8$ ) の 2 つのレイヤ及び地板で構成されている。レイヤ 1, レイヤ 2 とも、素子を  $4 \times 4$  の格子を対称となるように配置しており、各格子に対する銅箔の有無について PSO を用いて決定している。レイヤ間、およびレイヤと金属地板の間は 9.6 [mm] の厚さの空気とした。

### 2.2. PSO を用いた素子設計方法

本稿では、素子の設計に PSO を用いた PSO のフローチャートを図 3 に示す。PSO は 1995 年に Kennedy と Eberhard によって提案された鳥や魚の群れの行動をモデルとした最適化手法である [8]。PSO では粒子と呼ばれる自らの位置と速度の情報を持った探索点が、全体の最良値の位置 (gBest) と自らの最良値の位置 (pBest) を用いて解空間を探索する。このとき、i 番目の粒子の k ステップでの速度及び位置は以下のように計算される。

$$v_i^k = w v_i^{k-1} + r_1 c_1 (pBest_i - x_i^{k-1}) + r_2 c_2 (gBest - x_i^{k-1}) \quad (1)$$

$$x_i^k = x_i^{k-1} + v_i^k \quad (2)$$

ここで  $r_1, r_2$  はそれぞれ [0,1] の一様乱数、 $w$  は粒子の慣性、 $c_1, c_2$  は pBest 及び gBest のどちらにより影響を受けるかの係数である。

上記に示すように、PSO は連続変数を取り扱うが、本稿ではレイヤのパッチを 0 または 1 の離散変数で取り扱う。そのため、PSO で離散変数を取り扱う必要がある。本稿では、Kennedy と Eberhard によって提案されている Binary PSO (以下, BPSO) を用いる [11]。式 (2) では、粒子の位置を更新する際、速度をそのまま加算しているが、BPSO では式 (2) の代わりとして次式を用いる。

$$x_i^k = \begin{cases} 1 & (\rho < sig(v_i^k)) \\ 0 & (\rho \geq sig(v_i^k)) \end{cases}$$

(3)

ここで、 $\rho$  は [0,1] の一様乱数、 $sig()$  は標準シグモイド関数である。式 (3) によって連続値が離散値となり、本稿の問題に適応できる。

PSO をメタサーフェスの設計に適応する際、各粒子に位置を素子のパッチ構造と、速度はパッチ構造の変化とした。すなわち、パッチ構造を長さ 32 の 01 変数とし、その 01 変数の変化について速度を算出することで計算を行った。

### 2.3. 設計条件

本論文で用いる 2 周波共用メタサーフェスの設計条件を表 1 に示す。表 1 に示すように動作周波数を 1.0 [GHz] と 1.5 [GHz]、放射方向を  $-30.0$  [deg] とし、素子数は 8 素子とした。周波数及び放射方向、素子数から素

子間隔  $\Delta d$  について以下の式(4)を用いて求めることが出来る[12].

$$\sin(\alpha) = \lambda \Delta \psi / 2\pi \Delta d \quad (4)$$

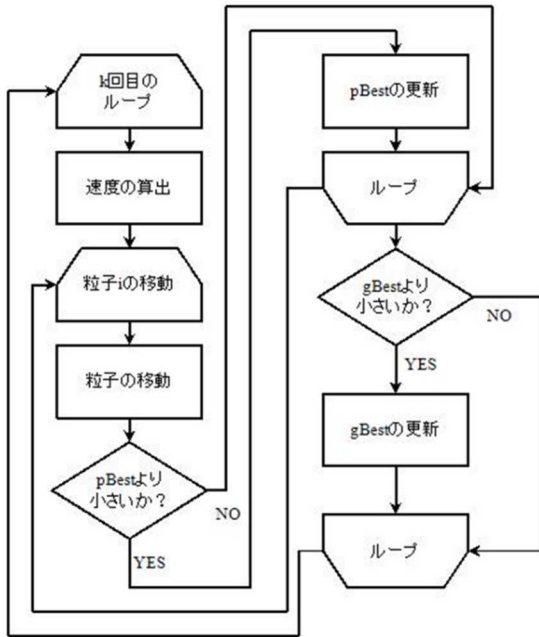


図 3 PSO のフローチャート

表 1 設計条件

Name	Symbol	Unit	$f_1$	$f_2$
Operating frequency	$f_i$	GHz	1.0	1.5
Element spacing	$\Delta d$	$\lambda$	0.33	0.50
Phase difference	$\Delta \psi$	deg.	60	90
Radial direction	$\alpha$	deg.		-30
Mesh size x	$M_x$	$\lambda$	0.03	0.05
Mesh size y	$M_y$	$\lambda$	0.03	0.05

各素子は所望反射位相及び所望反射振幅を満たすように個別に設計を行った。各素子において、所望位相、所望振幅を実現するための評価関数を(5)に示す。

$$\min \begin{cases} \Delta \psi = |\psi^{1.0} - \psi_o^{1.0}| + |\psi^{1.5} - \psi_o^{1.5}| & \text{for } \Delta \psi \geq 5 \\ \Delta A = |A^{1.0} - A_o^{1.0}| + |A^{1.5} - A_o^{1.5}| & \text{for } \Delta \psi < 5 \end{cases} \dots(5)$$

ここで、 $\psi^f$ は波数  $f$ [GHz]での反射位相[deg],  $\psi_o^f$ は所望反射位相[deg],  $A^f$ は反射振幅,  $A_o^f$ は所望反射振幅である。

### 3. 解析結果 (同一分布の場合)

#### 3.1. 設計結果

同一振幅を条件とし PSO で得られたメタサーフェスの構造を図 4 に示す。図 4 に示す構造は表 1 に示し

た位相差及び同一振幅を満たしていなければならない。そこで、図 4 に示した各素子の反射位相及び反射振幅を図 5, 図 6 に示す。

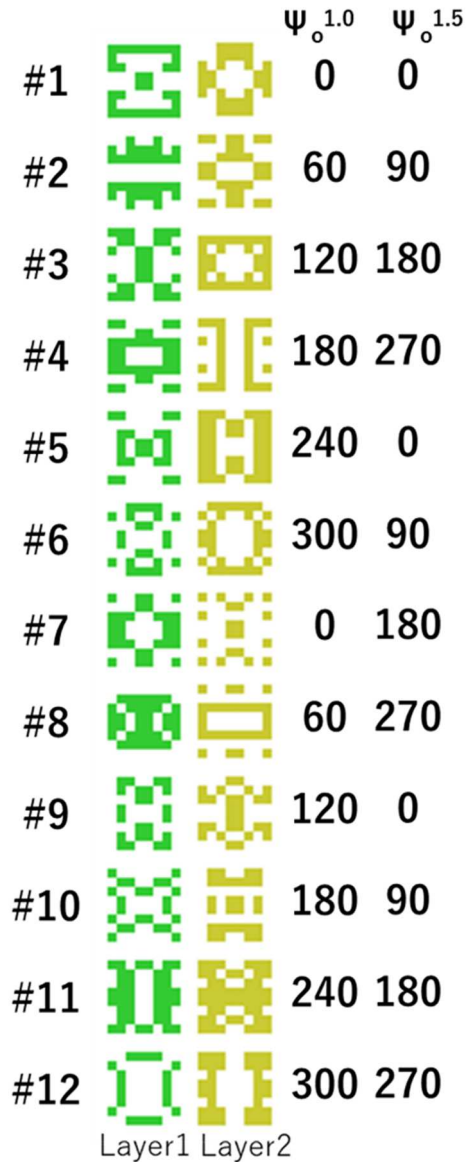


図 4 設計により得られた各素子の構造

図 5 より、各素子は所望の反射位相を両方の周波数で満たしていることがわかる。また、図 6 より、反射振幅の誤差は最大で 0.02 となった。これは設計値に対して 2.0 [%]程度であり、誤差が十分に少ないことから同一振幅を実現できたといえる。

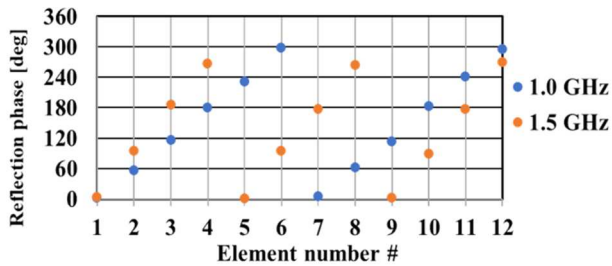


図 5 設計した各素子の反射位相

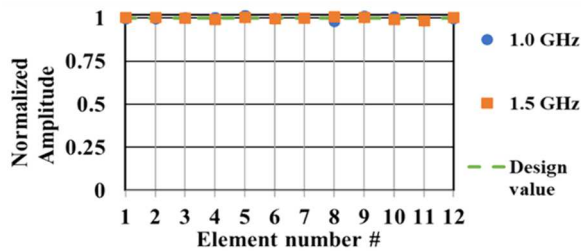


図 6 設計した各素子の反射振幅

素子の中において#1 の電流分布を図 7 に、#7 の電流分布を図 8 に示す. 図 4 より素子#1, #7 は 1.0 [GHz]の所望位相が 0 [deg]とすべて同じであるのに対して 1.5 [GHz]での所望位相は, 0 [deg], 180 [deg]と異なる. 素子の中央部の構造が同じであること, 1.0GHz で二つの素子の電流の乗り方が同じであることが興味深い.

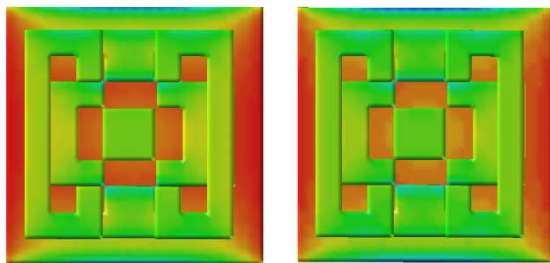


図 7 #1 素子の 1.0 [GHz](左)と 1.5 [GHz](右)における電流分布

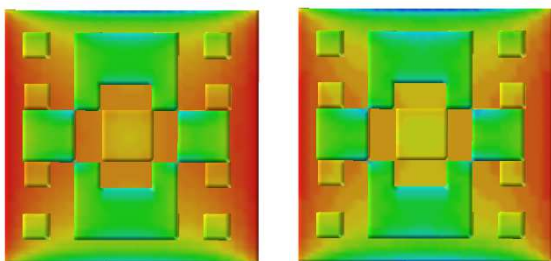


図 8 #7 素子の 1.0 [GHz](左)と 1.5 [GHz](右)における電流分布

### 3.2. メタサーフェス特性評価

図 4 に示した 12 個の素子を並べ, メタサーフェスを構成しその散乱断面積の計算を行った. 図 9 にメタサーフェスの構造を, 図 10 に散乱断面積の計算結果を示す. 図 9 において, 1 層目のパッチを赤, 2 層目のパッチを紺で示した. 図 10 より, 1.0 [GHz]と 1.5 [GHz]両方の周波数においてビームが-30.0 [deg]方向を向いていることがわかる. これは, 設計値  $\alpha$  に対してずれがない. このことから 2 つの周波数において所望のメタサーフェスを構成することができたといえる. また, サイドローブについてはすべて -10 [dB]以下となっている. 同一振幅の効果を確認するため同一振幅でない場合について計算を行った. 図 11 に同一振幅と非同振幅の比較を示す.

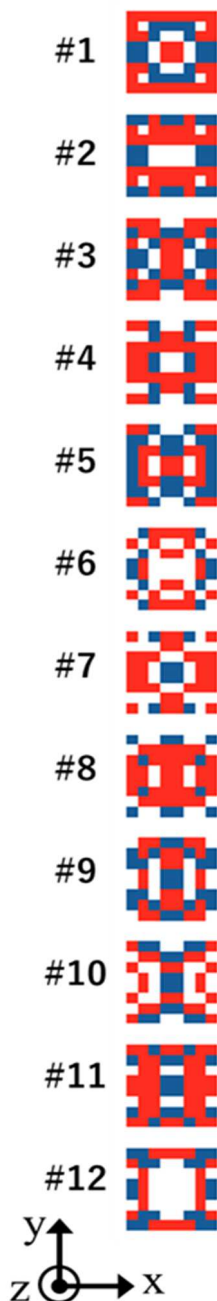


図 9 リフレクタレー構造

図 11 より、同一振幅ではサイドローブの最大値が -10 [dB]以下であったことに対して非同一振幅ではサイドローブレベルが -10 [dB]を超えていることがわかる。その差はおよそ 5 [dB]であった。従って、各素子が同一振幅を持つメタサーフェスを構成することでサイドローブをおよそ 5 [dB]低減することが出来ることがわかった。

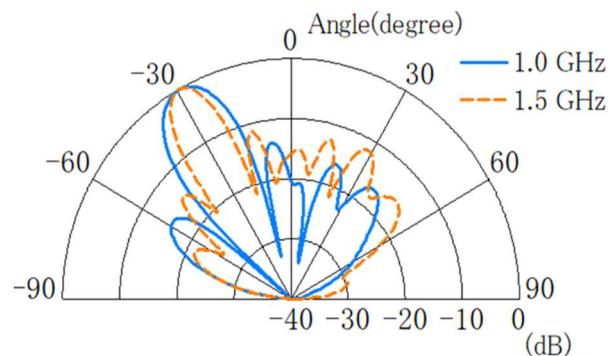


図 10 リフレクタレーの散乱断面積

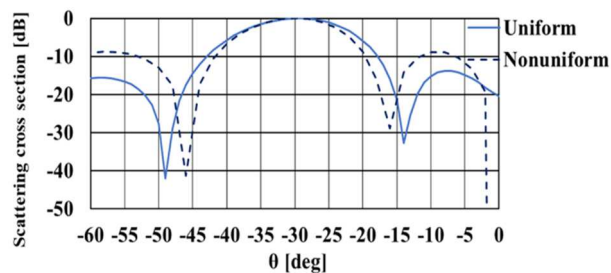


図 11 同一振幅と非同一振幅の比較

#### 4. 同一分布とチェビシェフ分布の結果の比較

次に、振幅の条件をチェビシェフ分布とした場合について PSO を用いて設計し、同一振幅の場合と比較した。それぞれ設計した。設計条件を揃えるため、どちらの場合も 8 素子構成とし、反射散乱方向を  $-35$  度とおいた。PSO によって得られた各素子の結果を、同一振幅の場合を図 12 に、チェビシェフ分布の場合を図 13 に示す。

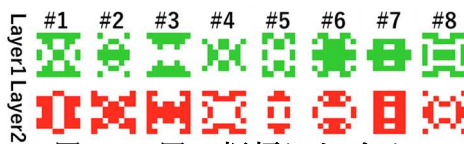


図 12 同一振幅におけるメタサーフェスの各素子構造

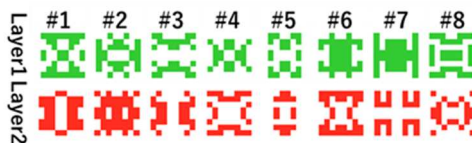


図 13 チェビシェフ分布でのメタサーフェスの各素子構造

ここで、振幅条件より、#1,#4,#5,#8 は同一振幅の場合とチェビシェフ分布の場合は同じ構造となる。前章では、散乱断面積を求めるときの境界条件は、計算リソース削減のため周期構造としていた。しかしチェビシェフ分布の場合は、周期構造にすることができない。そこで、本章ではメタサーフェスの散乱断面積についてアレーファクタを用いて計算した。結果を図 14 及び図 15 に示す。

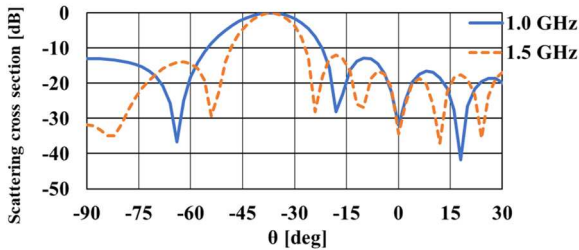


図 14 同一振幅での散乱断面積

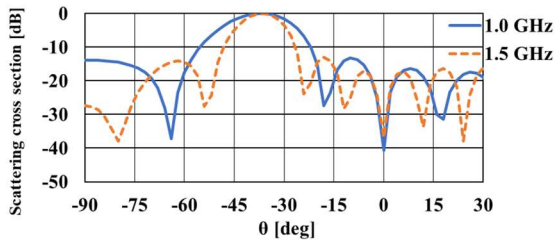


図 15 チェビシェフ分布での散乱断面積

同一振幅とチェビシェフどちらの場合も二つの周波数で同時に、サイドローブレベル-10[dB]以下を満たすと同時に、所望方向にビームを向けることができた。また、チェビシェフ分布の場合は、同一振幅と比べて1dB程度サイドローブレベルが改善されているが、二つの分布による差はほとんどないと考えられる。これは、8素子のうち4素子が同じ素子であったためと考えられる。今後はチェビシェフ分布の有効性をさらに引き出す設計に変更することを検討している。

## 5. まとめ

本研究ではサイドローブを低減するために各素子が同一振幅を持つような2周波共用メタサーフェスの設計及び解析を行った。素子の設計にはPSOを用いた。結果として所望の位相及び振幅を満足するような素子を設計することができ、またその素子を用いメタサーフェスを構成した。構成したメタサーフェスの解析結果からビームが所望方向である-30.0 [deg]方向に向いていることを確認し、また、同一振幅を持つメタサーフェスは同一振幅を持たないものに対してサイドローブが5 [dB]低減することを明らかにした。またチェビシェフ分布と同一振幅の場合の結果の比較を行った。

**謝辞** 本研究は、東北大学電気通信研究所共同研究プロジェクト「移動体IoT探索範囲拡大のためのエネルギーハーベスト応用アクティブリフレクトアレーの研究」および北海道大学情報基盤センター平成30年度萌芽型共同研究「大規模計算資源を活用したアンテナ最適化技術と電波伝搬シミュレーション技術の高度化」として行われた。さらに、本研究の一部は科研費基盤研究C17K06452の助成によ

り行われた。本研究を行うにあたり、日頃アンテナおよびメタサーフェスを測定させていただき京都大学生存圏研究所METLAB共同利用に深謝致します。

## 文献

- [1] 総務省, “情報通信白書,” <http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h30/pdf/30honpen.pdf>  
平成30年1月24日閲覧
- [2] NTT Docomo press release, “Succeeded to Spread Area of Cellular Phone Service by “Drone Relay Station” Assuming Disaster etc.”
- [3] 歌野孝法, 村瀬淳 (著), 田中良一 (監修): やさしいデジタル移動通信, (電気通信協会, 2008)
- [4] T. Maruyama, T. Furuno, Y. Oda, J. Shen, and T. Ohya, “Capacitance Value Control for Metamaterial Reflectarray Using Multi-layer Mushroom Structure with Parasitic Patches,” *ACES Journal*, vol. 27, no. 1, pp. 28-41. Jan. 2012
- [5] T. Maruyama, T. Shimano, Q. Chen, S. Kameda and N. Suematsu, “Novel Reflected Beam Switching Method Using Meta-surface Loaded with Active Elements,” *IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications (APWC)*, 2017, Verona, Italy, pp.300-301.
- [6] T. Maruyama, Q. Chen, S. Kameda, and N. Suematsu, “Design of Dual-band Reflectarray Using Genetic Algorithm,” in *Proc. International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)*, 2016, Okinawa, Japan, pp. 650-651.
- [7] Constantine A. Balanis (著), : *Antenna Theory: Analysis and Design Second Edition*, (Wiley, 1997)
- [8] J. Kennedy, and R. Eberhart, *Particle Swarm Optimization*, *Proc. of IEEE International Conference on Neural Networks (ICNN'95)*, vol. IV, pp. 1942-1948, Perth, Australia, 1995.
- [9] J. Robinson and Y. Rahmat-Samii, “Particle Swarm Optimization in Electromagnetics,” *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 52, no. 2, pp. 397-407, Feb. 2004.
- [10] H. Otani, S. Yamaguchi, S. Yonezawa, and M. Omiya, “A Large-scale Numerical Simulation of Indoor Radio Wave Propagation for a Wireless LAN System,” *IEEE International Conference on Computational Electromagnetics (ICCEM)*, 2015, Hong Kong, China, pp. 312-314.
- [11] J. Kennedy, and R. Eberhart, “A discrete binary version of the particle swarm optimization algorithm,” *Proc. of the 1997 Conference on System, Man, and Cybernetics (SMC'97)*, pp. 4104-4109, 1997.
- [12] D. M. Pozar, S. D. Targonski and H. D. Syrigos, “Design of Millimeter Wave Microstrip Reflectarrays,” *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol.45, No.2, pp. 1000-1003, Feb. 1997.