

# IoT 電波伝搬環境改善用ダイオード装荷メタサーフェスの 解析設計と試作測定

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

函館工業高等専門学校 〒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: (17704,14187, 17703, maruyama)@hakodate.kosen-ac.jp,

**あらまし** IoT(Internet of Things)の伝搬環境改善を目的として、IoT 端末にメタサーフェスを近接し、メタサーフェスを構成するパッチに装荷したダイオードの ON/OFF を切り替えることにより IoT 端末からの電波を、複数の所望方向にスイッチして反射させる手法が提案されている。しかし、ダイオードにバイアス電圧をかけるためのバイアス回路の設計、およびダイオードやバイアス回路が、メタサーフェスの放射特性へ与える影響の低減についての検討は不十分であり、ダイオードを実装したメタサーフェスの測定による評価は実施されていなかった。

本研究では、IoT に電波を届きやすくするため、ダイオードを実装したメタサーフェスによる電波の放射方向の切り替えを実現することを目的とし、放射特性に影響を与えないダイオードの給電回路構成について解析設計と試作測定により検討し、その結果を報告する。

**キーワード** メタサーフェス、リフレクトアレー、ダイオード、ビーム走査、IoT

## Analysis and measurement of Metamaterial Reflect Array using Diode for environment improvement of IoT radio wave

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 proposed a novel reflectarray to achieve switching of the direction of radio waves that composed of meta-surface loaded with diodes. The bias circuit for diodes that switch of the radiation pattern was designed using HFSS analysis for metasurface. The measurement results show that the radiation pattern changes by switching of the diode.

**Keywords** Metasurface, Reflectarray, Diode, Beam control, IoT.

### 1. まえがき

IoT(Internet of Things)伝搬環境を改善する手法として LC 共振を用いたメタサーフェスの応用が報告されている[1][2]。更にメタサーフェスを構成するパッチにダイオードを装荷し、この ON/OFF によりメタサーフェスの近傍に設置した IoT 端末からの電波を、複数の所望方向にスイッチして反射させ、電波伝搬環境を改善するリフレクトアレーが提案されている[3]..[6]。しかし、ダイオードにバイアス電圧をかける方法、バ

イアス回路によるメタサーフェスへの影響については、検討されておらず、ダイオードは銅箔で近似して解析されていた。そこで本研究では、メタサーフェスにおけるダイオードの給電方法およびメタサーフェスの放射特性に影響を与えない給電回路構成について検討を行いその構造を明らかにすることを目的とした。

### 2. バイアス回路の設計

はじめに文献[3], [4]で提案されたダイオードによりビー

ム方向を切り替えるメタサーフェスの構造を図1に示す。

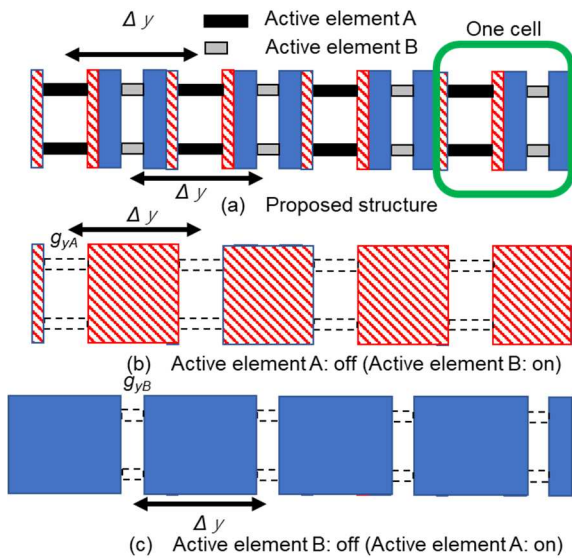


図1 ダイオード装荷メタサーフェス

メタサーフェスを構成する1つのセルは、図1に示すように、4つのアクティブ素子（ダイオード）で構成されており、アクティブ素子AをOFF、BをOnにしたときは等価的に図1(b)に示すアレー構成と同等となり、アクティブ素子BをOFF、AをOnにしたときは等価的に図1(c)に示すアレー構成と同等となる。



図2 ダイオードの銅箔近似

従来の検討では、図2のようにダイオードは銅箔で近似されていた。本物のダイオードを実装する場合は、ダイオードの両端をそれぞれ給電線で接続し直流電源によるバイアス電圧をかける必要がある。図1のようなダイオードのON/Offを実現するためのバイアス回路の構造を図3に示す。このバイアス回路は、パッチが隣のパッチと等電位にならないよう、プラスとGNDが交互にパッチに与えられるようバイアスラインを設計した。そのため、プラスとGNDの向きを変えるだけでダイオードのON/OFFを切り替えることが可能となり、リフレクタレーの放射パターンのスイッチングが可能となる。図3の回路を実現する構造として、図4に示す二つの給電モデルを考案した。図4(a)はパッチ面にバイアス回路を設計した構造であり、回路設計が容易であると考えられる。図4(b)はトリプレート構造であり、パッチ表面に回路を設置しないため、リフレクタレーへの影響が少ないと考えられる。

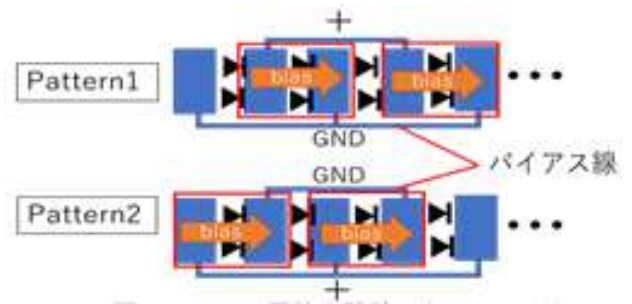
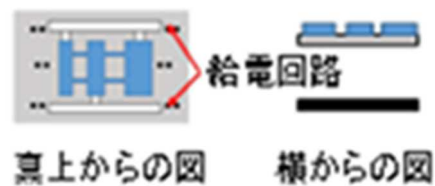


図3 バイアス回路の構造



(a) パッチ面に給電回路がある場合



(b) トリプレート構造  
地板面に給電回路がある場合

図4 ダイオードの給電回路のモデル

図4の二つの回路モデルが、それぞれメタサーフェスの特性に与える影響について検討した。はじめに、図4(a)のパッチ面にバイアス回路を設計した場合について考える。ここでバイアス回路のバイアス線がリフレクタレーのパッチに比べて High インピーダンスとなるように線幅を細く設計した。線幅は0.5mmであり、バイアス線路の特性インピーダンスは113Ωである。バイアス線路があるリフレクタレーの試作、解析したリフレクタレーの構造を図5に、解析と測定の結果を図6に示す。

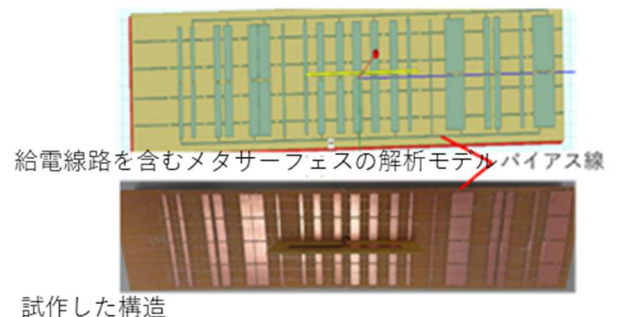


図5 パッチ面に給電回路がある場合のメタサーフェス

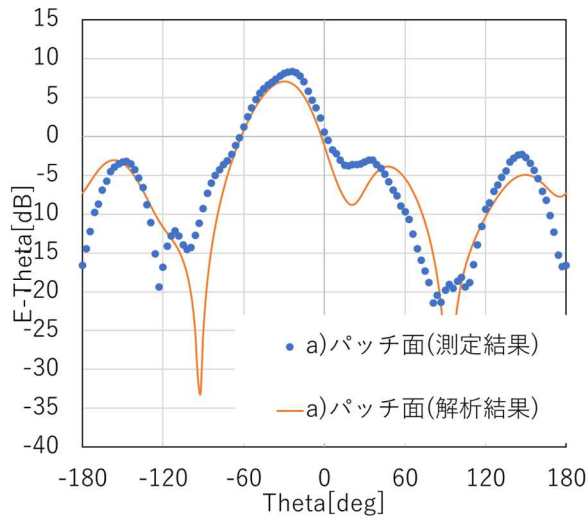


図6 パッチ面に給電回路がある場合のメタサーフェスの放射特性

図6より解析と測定結果が一致していることが分かる。また、最大放射方向はどちらも設計値の $-30$ 度方向を示している。よって、パッチ面にあるバイアス線路のリフレクタレーへの影響は少ないことがわかる。

次にトリプレート構造を用いたリフレクタレーの給電回路の影響を調べた。トリプレート構造のリフレクタレーの解析モデルを図7に示す。その解析結果を図8に示す。図8の結果より、トリプレート構造の給電回路の影響によって、最大放射方向のレベルが下がっていることが確認で

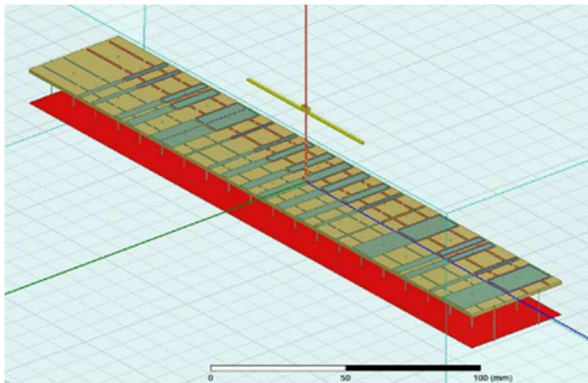


図7 給電線路をグランド面にした場合の解析モデル

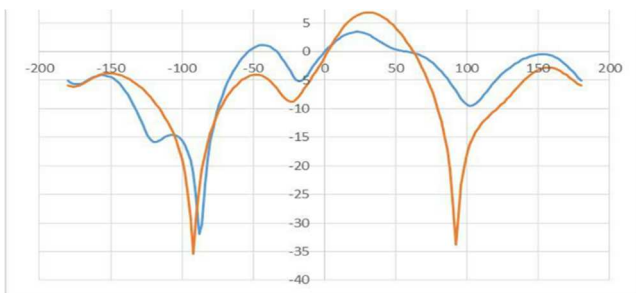


図8 トリプレート構造の給電線路があるときの解析結果 (赤い線：給電回路なし、青い線：給電回路在り)

きる。すなわち、放射パターンに与える影響は、トリプレート構造の方が大きい。これは、パッチ背面から地板までの給電線が分布定数回路理論のインダクタンス  $L$  となって影響するためと考えられる。以上より、本研究ではパッチ面にバイアス回路を設計するモデルを採用して試作、測定を行う。

### 3. ダイオードに含まれる $L$ と $C$ の影響

ダイオードには、インダクタンス成分  $L$  とキャパシタンス成分  $C$  が含まれる。の特性を含むため銅箔近似だけでは不十分である。そこで、本研究ではダイオードを  $L$  と  $C$  の集中定数で近似し HFSS の解析モデルに組み込む。PIN ダイオードとして (SMP1340-079LF) を選定した。HFSS に組み込む  $L$  と  $C$  の値を正確に求めるため、ダイオードの特性をインピーダンスアナライザ (Agilent の E4991A) を用いて測定した。ダイオードに  $1.5V$  の電圧を順バイアス方向と逆バイアス方向に与えた時のインピーダンスの周波数特性をスミスチャートを用いて図9に示す。図9の結果より、順バイアス時の抵抗値は  $1\Omega$ 、逆バイアス時は抵抗値  $834\Omega$  とダイオードの特性が得られたことを確認した。更に、スミスチャートからどちらの場合も  $L$  成分を考慮する必要があることが分かる。そこで  $L$  の周波数特性をスミスチャートより求めた。これを図10に示す。図10(a)は順バイアス時、図10(b)は逆バイアス時の結果を示している。2 GHz の時のダイオードの  $L$  の値は、順バイアス時  $0.65nH$ 、逆バイアス時  $66nH$  であることがわかる。

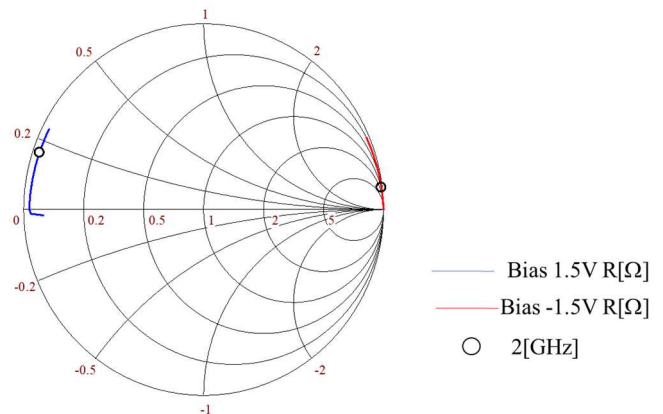


図9 pin ダイオードのインピーダンス周波数特性

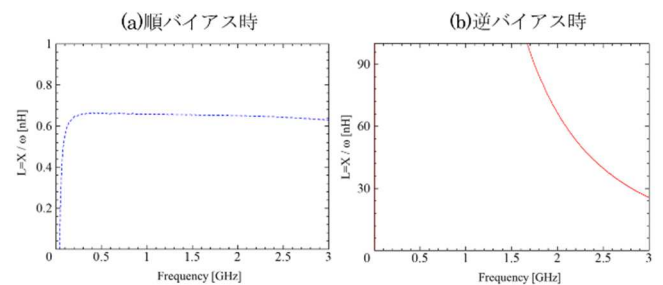


図10 ダイオードに含まれるインダクタンス  $L$  の周波数特性

上記の結果を用いて HFSS により解析モデルを構築し、リフレクタレーの解析結果と測定結果の比較を行った。図 11 はダイオード A を On, B を Off としたときの解析モデルでありここでダイオードが On のときにはインダクタンス  $L$  を  $0.65\text{nH}$  とした。図 12 は放射指向性である。図 13 は、ダイオード B を On, A を Off としたときの解析モデルであり図 14 はこのときの放射指向性である。図 13 と 14 より、ダイオードの On と Off を切り替えることにより、ビームがスイッチしていることが確認できる。しかし、どちらも解析結果とは一致していない。また、放射すべきではない  $0$  度方向にも放射していることがわかる。

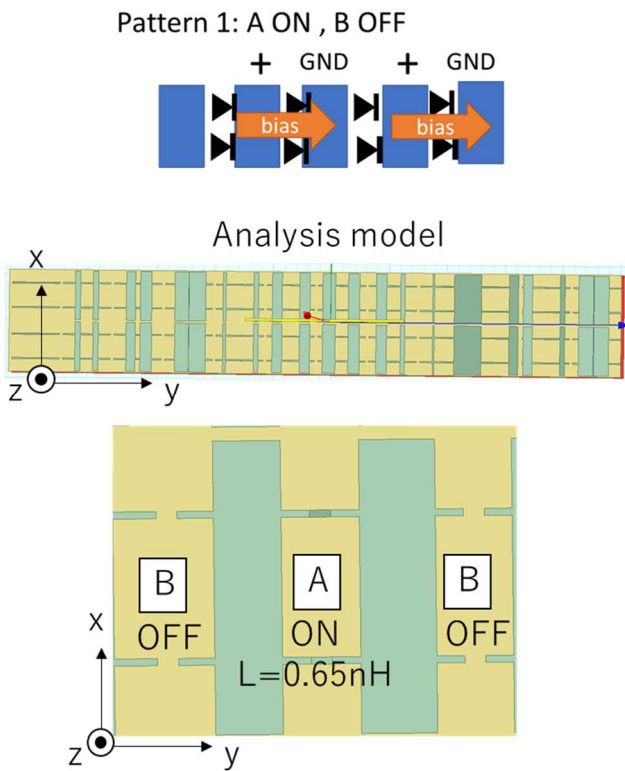


図 11 ダイオード A を On, B を Off としたときの解析モデル

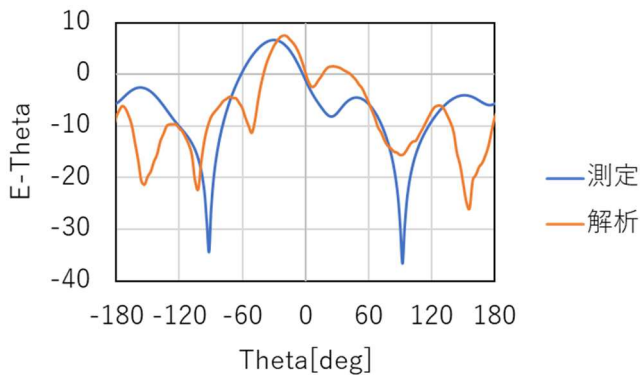


図 12 ダイオード A を On, B を Off としたときの放射指向性

これはダイオードが Off のときの解析モデルの精度がまだ十分でないことが考察できる。この改善は今後の課題である。

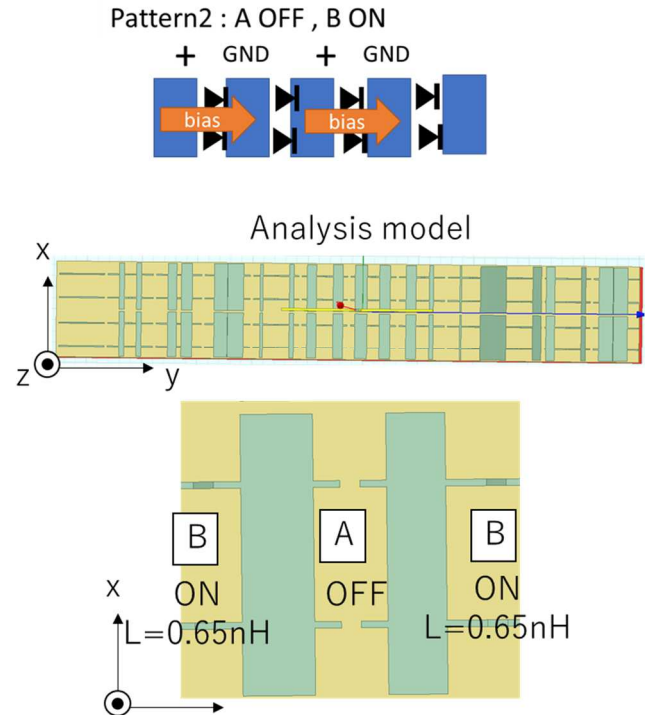


図 13 ダイオード B を On, A を Off としたときの解析モデル

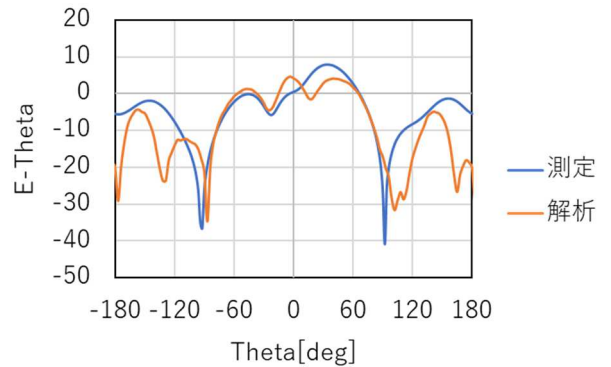


図 14 ダイオード B を On, A を Off としたときの放射指向性

#### 4. まとめ

本研究では IoT の電波環境改善を目的とし、ダイオードを装荷したメタサーフェスにより、電波の放射方向を切り替える検討を実施した。はじめに、ダイオードを給電するバイアス回路が放射に影響を与えない構成を解析と実験により明らかにした。次に、ダイオードに含まれるインダクタンス成分をインピーダンスアナライザを用いて測定し、その値を HFSS に集中定数として組み込んでメタサーフェスを設計した。試作したメタサーフェスは、ダイオードを

スイッチすることにより、ビームを切り替えることに成功した。しかし、測定値と解析値は一致せず、設計どおりの特性が得られなかった。これは、ダイオードが Off のときの解析モデルが課題であると考察でき、今後の課題である。

**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く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] 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
- [2] Tamami Maruyama, Shun. Endo, Qiang Chen, Suguru Kameda and Noriharu Suematsu, "Reflectarray design for small antenna using meta-surface," Proceedings of the IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications, (IEEE APWC 2016) No. 16449655, 2016.
- [3] 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.
- [4] Tamami Maruyama, K. Ozeki, N. Ito, S. Kameda, Q. Chen, N. Suematsu : "Beam Direction Control Using Meta-surface Loaded with Diodes for IoT," Progress In Electromagnetics Research Symposium, PIERS 2018., p. 1557. Session 4A7, SC2 2018.8
- [5] 尾関剛成・伊藤直樹・丸山珠美 :電子情報通信学会総合大会 B-1-94、2018 年 3 月
- [6] 尾関剛成・大澤拓門・丸山珠美 :信学技報,vol.118,no.17,WPT2018-9,pp.41-44,2018 年 4 月.
- [7] <https://www.marutsu.co.jp/contents/shop/marutsu/datasheet/MLF1608-J.pdf>