

# 構造体による電磁波制御

製品・機能評価課 宮田直幸

## 1. 緒言

電波通信における通信規格 5G/6G では、概ね 30GHz 以上の周波数帯域を利用することで広帯域を確保し、それによる高い通信効率を可能にしている。

一方、それらの高い周波数では回折(波の回り込み)が小さいため、建物の陰になるような場所に電波が届きにくく、今後の普及のための課題となっている。

そこでメタマテリアル(meta material)の一種であるメタサーフェス(meta surface)と呼ばれる平板状の構造体により電波を曲げることで、電波をすみずみまで行き届くようにするということが考えられている。透過型メタサーフェスにはいくつかの種類があるが、電波を曲げる原理として、透過波の位相角を場所ごとに変化させることは共通している。しかしながら、反射の小ささを広帯域に実現することは難しい。例えば Pancharatnam-Berry メタサーフェスでは、円偏光の電波に対して無反射になる条件を満たすような設計が可能<sup>1)</sup>であるが、反射の小さい周波数帯域幅が狭いことに加え、周波数によって曲げられる角度が異なるため、広帯域を目指す用途には適さない。

本研究では望ましい性質として、特性インピーダンスを真空と等しく保ったまま、位相速度(屈折率)を周波数に依存しないように変化させる、いわば有効誘電率と有効透磁率を等倍するような変化を与えることができる構造を検討した。

## 2. 理論的検討

テラヘルツ帯以下の周波数では、金属は完全導体と見なせ、ジュール損があまり問題にならないため、金属を使うことを考える。金属構造体によって誘電率を変化させるものとしては、狭いスリットを有する金属格子が知られており、スリットの寸法と周期によって自由に 1 より大きな比誘電率を与えられる<sup>2)</sup>。しかしながら、ここでは垂直入射に対して波長の短縮、言い換えれば屈折率の変化が起きていない。これは実際、TEM 波との対応を考えれば、比誘電率の逆数が比透磁率になっているものと見なせることから理解でき、そのままでは上記のような目的には利用できない。一方、面内方向に対しては実際に屈折率の変化が起きていることから、金属格子を厚み方向に並べた構造もそうであると予想した。実際、文献<sup>3)</sup>では Fig. 1 のような多層金属格子において TM 波の

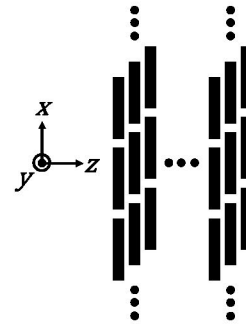


Fig. 1 Schematic of the multilayer metallic structure.

垂直入射かつ低周波数の時、分散が線形になることが数値計算により示されている。そこで、ここでは多層金属格子を理論計算により検討することとした。

ここで  $a_x$ 、 $s$ 、 $m$ 、 $d$ 、 $l$  ( $0 \leq l \leq a_x$ ) はそれぞれ  $x$  方向の周期、スリットの幅、金属層の厚み、真空層の厚み、 $z$  方向の 1 周期  $a_z$  ( $\equiv m + d$ ) あたりの  $x$  方向へのずれとする。いずれも波長よりも十分に小さいとする。偏波としては TM 波のみを考える。

まず、Maxwell 方程式の周波数領域の解は、一枚のスライスにおける場がわかれば、それと平行な任意のスライスにおける場も原理的に求まり、それらをつなぐ行列は転送行列(transfer matrix)と呼ばれる。 $z$  方向に 1 周期分進んだ場の間にも一つの転送行列が存在し、そこから分散関係を求めることができる。一般には行列の次元が大きく、解析的な表式を得ることは難しいが、 $r_s \equiv s/a_x \ll 1$  の場合には  $2 \times 2$  行列の問題に近似され、可能になる(単一モード近似<sup>3)</sup>が正当化される)。

低周波数における有効屈折率  $n_{\text{eff}}$  は  $r_m \equiv m/a_x$ 、 $r_d \equiv d/a_x$  とした時、

$$n_{\text{eff}} = \frac{1}{r_m + r_d} \sqrt{\frac{r_m r_d}{r_s} + 2\alpha + r_m^2 + \frac{2\alpha r_s r_m}{r_d}}$$

と表されることがわかる。ここで  $\alpha$  は  $r_l \equiv l/a_x$  として、

$$\alpha = r_d \sum_{n=1}^{\infty} \frac{|1 + e^{-2\pi n(r_d + i r_l)}|^2}{1 - e^{-4\pi n r_d}} \frac{\text{sinc}(\pi n r_s)}{\pi n}$$

とする。

一方、低周波数の近似で無反射となる条件は、

$$r_m(r_d^2 - 2\alpha r_s) = \frac{r_s}{r_d} \frac{r_d^4 - \alpha(1+r_s^2)r_d^2 + 4\alpha^2 r_s^2}{1-r_s^2}$$

と求められる。ここで $r_s$ を小さくしていった時に“ $r_d = \beta r_s$ かつ $r_m > 0$ ”を常に満たすような定数 $\beta$ が存在することがわかる。その時 $n_{\text{eff}}$ は

$$n_{\text{eff}} \rightarrow 2 \sqrt{\frac{\alpha}{3\beta^2 - 4\alpha} \frac{1}{r_s}}$$

のように漸近し、 $r_s$ を小さくしていくことで $n_{\text{eff}}$ をいくらでも大きくできることがわかる。 $r_l = 0$ の場合、 $\alpha$ は $r_s$ のオーダーのため、 $n_{\text{eff}}$ は $1/\sqrt{r_s}$ でしか大きくできない。一方  $0 < r_l \leq 1/2$ の場合、 $\alpha$ は定数に漸近するため $n_{\text{eff}}$ は $1/r_s$ で大きくすることが可能である。

### 3. 数値計算

理論計算の正しさを示すため、FDTD法で分散関係を求めた。結果を Fig. 2 に示す。無反射の条件を満たす寸法の組み合わせは一般に整数比とはならないため、近似的に整数比になり、計算量があまり多くないもののみを計算した。(a)、(b)どちらも $a_z = 2.52[\mu\text{m}]$ 、 $r_l = 1/2$ とし、(a)では $r_s = 10/200$ 、 $r_m = 9/200$ 、 $r_d = 15/200$ 、(b)では $r_s = 12/400$ 、 $r_m = 6/400$ 、 $r_d = 15/400$ とした。

その結果、理論的な有効屈折率の予測値と数値計算結果は概ね一致し、上記の理論の正しさを実証できた。一方、無反射であることの数値計算的実証は、実際に多数枚積層した状況で行う必要があり、行えなかった。

### 4. 結言

垂直入射の TM 波に限定するとはいえ、無反射を保ち

キーワード：電磁波、メタマテリアル、メタサーフェス

## Control of Electromagnetic Waves Using Multilayer Metallic Structures

Product and Function Evaluation Section; Naoyuki MIYATA

The multilayer metallic gratings with narrow slits are known to exhibit the linear dispersion relation for electromagnetic waves at sufficiently low frequencies. In this study, we found that by adjusting the ratio of the dimensions of the structure, we can obtain an arbitrarily high refractive index while achieving complete transmission.

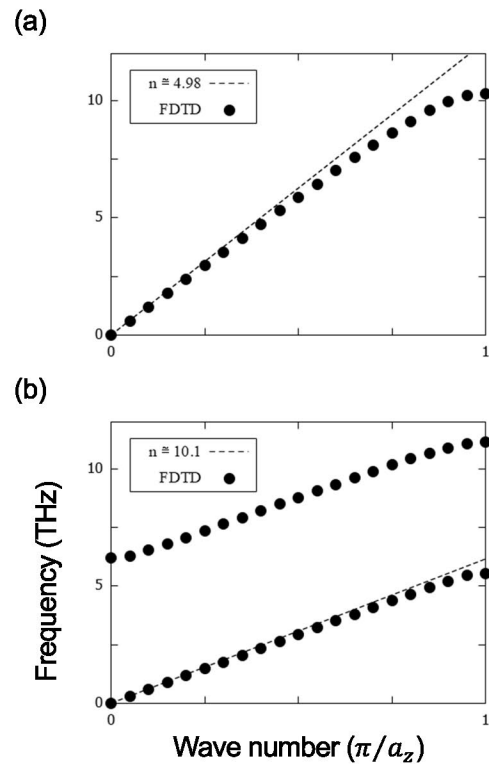


Fig. 2 Dispersion curves of the multilayer metallic structures. (a)  $n_{\text{eff}} \cong 4.98$ , (b)  $n_{\text{eff}} \cong 10.1$ .

ながら位相速度をいくらでも遅く(有効屈折率を大きく)できる構造が存在することがわかった。

今後の課題としては、厚み方向の周期がどのくらいあれば実際に目的に合うのかの検討、およびその時のコストが性能に見合うような製造方法の検討が必要である。

### 参考文献

- 1) W. Luo *et al.*, Phys. Rev. Applied Vol. 7, 044033 (2017)
- 2) J. T. Shen, Peter B. Catrysse, and Shanfui Fan, Phys. Rev. Lett., Vol. 94, 197401 (2005)
- 3) J. T. Shen and P. M. Platzman, Phys. Rev. B, Vol. 70, 035101 (2004)