

超高屈折率無反射メタサーフェスによるテラヘルツ波アンテナの設計方法

Design of terahertz antenna consisting of metasurface with extremely high refractive index and low reflection



鈴木健仁 (Takehito Suzuki, Dr. Eng.)

東京農工大学 大学院工学研究院
先端電気電子部門 准教授

(Associate Professor, Division of Advanced Electrical and Electronics Engineering, Institute of Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology)

応用物理学会, 電子情報通信学会, IEEE

受賞: 電子情報通信学会 末松安晴賞(2020年), 第18回船井学術賞(2019年), 平成29年度科学技術分野の文部科学大臣表彰若手科学者賞(2017年), 電子情報通信学会 エレクトロニクスサイエティ活動功労表彰(2017年), 矢崎科学技術振興記念財団 矢崎学術賞(奨励賞)(2017年) 他
研究専門分野: 光工学・光量子科学, 通信・ネットワーク工学

あらまし

2020年に5G(Generation:世代)通信が商用化され、次の世代の6G通信が期待されている。6G通信で利用される予定のテラヘルツ波帯は、電波法で最上限として規定される0.3~3THz帯(波長100 μ m~1mm)に位置する。現在、テラヘルツ波帯の光源は充実しつつあるが、高効率なテラヘルツ波の制御がいまだに実現できていない。他の周波帯と比べて材料が圧倒的に不足するテラヘルツ波帯に適した材料を実現できれば、高効率なテラヘルツ波の制御に貢献できる。そこで、メタサーフェス技術を用いて、テラヘルツ波帯で高屈折率・無反射な材料を生み出した。本研究では、この独自の高屈折率・無反射な材料により、連続発振テラヘルツ波帯源から放射されるテラヘルツ波を、指向性の高い平面波に変換するためのアンテナ技術の研究に取り組んだ。特に本報告書では、産業界で再現しやすいように、論文などでは省略されがちな電磁界シミュレータによる設計方法のノウハウをまとめている。本報告書が産業界の目に留まり、各社の独自の材料や試作方法により本アンテナの産業化が加速することを願っている。

1. まえがき

両面構造ペアカットアレーアンテナ[1]は、連続発振テラヘルツ波光源に実装し、波面変換により光源の指向性利得を向上するために発明[特許 6596748号, US 10,686,255 B2]された。5G通信の次の世代の6G通信を意図して、産業化に向けた取り組みが進んでいる[2]。世界中で広く普及させるためには、産業界の協力が不可欠である。そこで本報告書では、産業界で再現しやすいように、論文などでは省略されがちな電磁界シミュレータによる設計方法のノウハウをまとめている。さらにテラヘルツ波光源への実装を意識した場合、実装時に設計値とのずれが生じた場合にも、アンテナとしての動作が保たれることが望まれる。そこでアンテナのロバスト性の検証についてもまとめている。なお、本報告書は本研究室の遠藤孝太君の卒業研究[3]により実施されたものである。

2. 両面構造ペアカットワイヤーアレーアンテナ

図1(a)に両面構造ペアカットワイヤーアレーアンテナの解析モデルを示す。アンテナは理想的な球面波を平面波に変換するように、メタアトム*1によって構成したメタサーフェス*2を配置して設計している。図1(b)にメタアトムの周期モデルを示す。誘電体基板と基板の表裏に对称に配置したカット金属ワイヤーで構成している。誘電体基板にはシクロオレフィンポリマー(屈折率 $n = 1.53 + j0.0012$)、カット金属ワイヤーには銅(導電率 $\sigma = 5.8 \times 10^7$)を使用している。表1にカット金属ワイヤーのパラメータを示す。

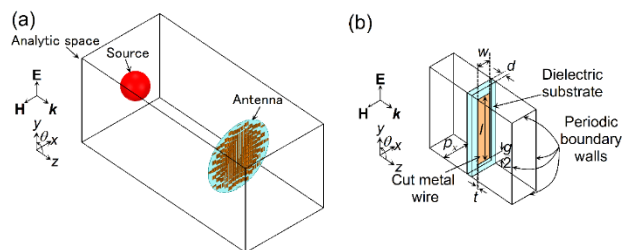


図1(a) 両面構造ペアカットワイヤーアレーアンテナの解析モデル (b) メタアトムの単位周期モデル

表1 カット金属ワイヤーのパラメータ

w	p_x	d	t	l	g
6 μ m	12 μ m	2 μ m	0.5 μ m	1 - 50 μ m	1 - 100 μ m

超高屈折率無反射メタサーフェスによるテラヘルツ波アンテナの設計方法

Design of terahertz antenna consisting of metasurface with extremely high refractive index and low reflection

3. HFSS によるアンテナの評価方法

有限要素法電磁界シミュレータ Ansys 社 HFSS を用いて、両面構造ペアカットアレーアンテナを評価する。光源は、微小磁気ダイポールを用いて球面波を模擬する。微小磁気ダイポールは、HFSS の Incident wave で設定する。

両面構造ペアカットアレーアンテナの性能は、アンテナと光源を一体として見た場合の指向性利得と、アンテナを取り外した場合の指向性利得を比較して、指向性利得の向上分で評価する。ある角度での指向性利得(Directivity)は、光源の総放射電力 P と、その角度の放射強度 U を用いて式(1)で求められる。

$$\text{Directivity} = 10\log_{10}\left(4\pi\frac{U}{P}\right) \text{ (dB)} \quad (1)$$

HFSS では、指向性利得を評価する場合、光源から放射される全電力 P を、解析空間の境界壁が吸収する電力の総和 P_{rad} で模擬している。よって HFSS における指向性利得(Directivity_{HFSS})は式(2)となる。

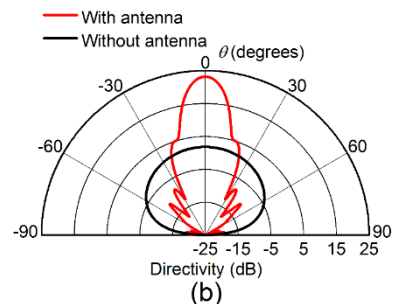
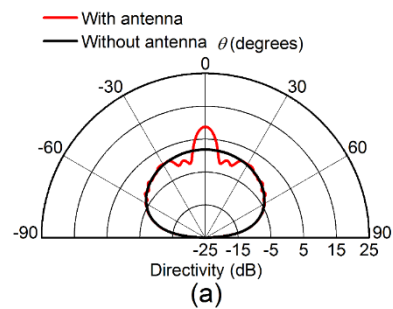
$$\text{Directivity}_{\text{HFSS}} = 10\log_{10}\left(4\pi\frac{U}{P_{\text{rad}}}\right) \text{ (dB)} \quad (2)$$

次に、HFSS で微小磁気ダイポールを光源として設定した場合、解析空間内の電磁波の情報は、Incident fields、Scattered fields、Total fields の3つの設定の中から選択できる。Incident fields は解析空間内の入射波の情報のみを取り出す設定である。Scattered fields は解析空間内の散乱波の情報のみを取り出す設定である。Total fields は Incident fields と Scattered fields の情報を加算した情報を取り出す設定である。アンテナによる電磁波の影響を取り出す場合は、Scattered fields もしくは Total fields に設定する。アンテナと光源を一体として見た場合の指向性利得を評価するためには、Scattered fields ではなく、Total fields に設定した方が適切なので注意が必要である[3]。

さらに、Total fields の設定で指向性利得を評価するためには、光源を解析空間の内側に配置する必要がある。また、光源を微小磁気ダイポールに設定する場合、光源の位置に波源オブジェクトとなる球体を完全導体で作成する。微小磁気ダイポールの設定項目である Radius of Surrounding Sphere は、波源オブジェクトの球

の半径よりも小さい値に設定する。

図 2(a)、(b)に、Total fields に設定した場合と電磁波の情報を Scatter fields に設定した場合について、アンテナを配置した場合と取り除いた場合の微小磁気ダイポールの yz 面の指向性利得を示す。また、図 2(c)にアンテナを配置した場合と取り除いた場合の半波長ダイポールの yz 面の指向性利得を示す。図 2(a)、(b)より、アンテナを配置したことによる微小磁気ダイポールの指向性利得の向上分は Total fields と Scatter fields の設定でそれぞれ 6.9 dB、21 dB である。図 2(c)より、アンテナを配置したことによる半波長ダイポールの指向性利得の向上分は 6.7 dB である。半波長ダイポールを用いた解析では、ダイポールを完全導体で作成し、電圧を印加して励振させている。微小磁気ダイポールの設定のように HFSS 内の Incident wave は使用していないため、解析空間内の電磁波の情報を Incident fields、Scattered fields、Total fields のように特定の情報のみを取り出すことはできない。半波長ダイポールでの解析結果は光源とアンテナを一体として見た場合の電磁波の情報に限られる。光源に微小磁気ダイポールを用いた場合の解析結果と、半波長ダイポールを用いた場合の解析結果を比較すると、微小磁気ダイポールを用いて光源とアンテナを一体として見た場合の指向性利得を評価するためには、Scattered fields よりも Total fields に設定した方が適切だと判断できる。



超高屈折率無反射メタサーフェスによるテラヘルツ波アンテナの設計方法

Design of terahertz antenna consisting of metasurface with extremely high refractive index and low reflection

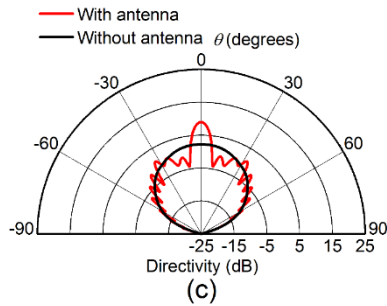


図 2 (a) Total fields に設定した場合と (b) Scattered fields に設定した場合の微小磁気ダイポールの yz 面の指向性利得 (c)半波長ダイポールの yz 面の指向性利得

4. アンテナによる平面波の生成

3 で述べた設定で、両面構造ペアカットアレーアンテナの性能を評価した。例として、周波数は 3.0 THz で、アンテナと光源の距離は 1.0 mm とした。図 3 に xy 平面の微小磁気ダイポールの波面の位相の 2 次元分布を示す。図 3(a)、(b)、(c)はそれぞれ、アンテナを配置していない場合、アンテナから入射面の反対側のカ

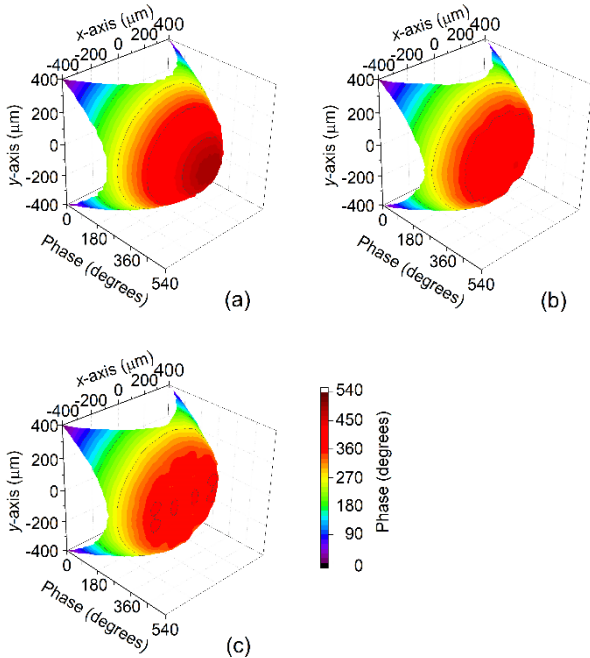


図 3 アンテナから z 軸方向に 100 μm 離れた位置での (a)アンテナを配置していない場合、(b)アンテナから入射面の反対側のカット金属ワイヤーを取り除いた不完全なアンテナを配置した場合、(c)アンテナを配置した場合、の波面の 2 次元分布

ット金属ワイヤーを取り除いた不完全なアンテナを配置した場合、アンテナを配置した場合である。アンテナから z 軸方向に 100 μm 離れた位置で見ている。アンテナを配置していない場合と比較した、xy 平面内の位相の変化幅の減少分は、不完全なアンテナの配置した場合には 48 度にとどまっているが、アンテナを配置した場合は 126 度である。アンテナを配置することで、微小磁気ダイポールの放射波の波面は平面波に近付いている。

5. ロバスト性の検証

両面構造ペアカットアレーアンテナを搭載した微小磁気ダイポールのロバスト性を検証した。5.1 では周波数の変化に対するロバスト性、5.2 ではアンテナの配置の変化に対するロバスト性、5.3 では偏波の変化に対するロバスト性について検証した。

5.1 周波数の変化に対するロバスト性

2.0~4.0 THz まで周波数を変化させて全構造解析した。図 4 に指向性利得の周波数特性を示す。アンテナを配置したことによる指向性利得の向上分は、3.0 THz で 7.0 dB と最大となる。設計周波数の 3.0 THz よりも低い周波数帯でも、微小磁気ダイポールの指向性利得は 3.0 dB 以上向上している。図 5 にアンテナの中央に配置した材料の周波数特性を示す。カット金属ワイヤーの長辺方向の長さ $l=31 \mu\text{m}$ 、間隔 $g=2 \mu\text{m}$ である。アンテナの指向性利得の周波数特性と、材料の透過電力の周波数特性には近い傾向が見られる。

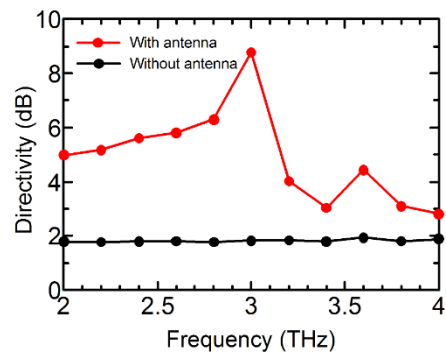


図 4 指向性利得の周波数特性

超高屈折率無反射メタサーフェスによるテラヘルツ波アンテナの設計方法

Design of terahertz antenna consisting of metasurface with extremely high refractive index and low reflection

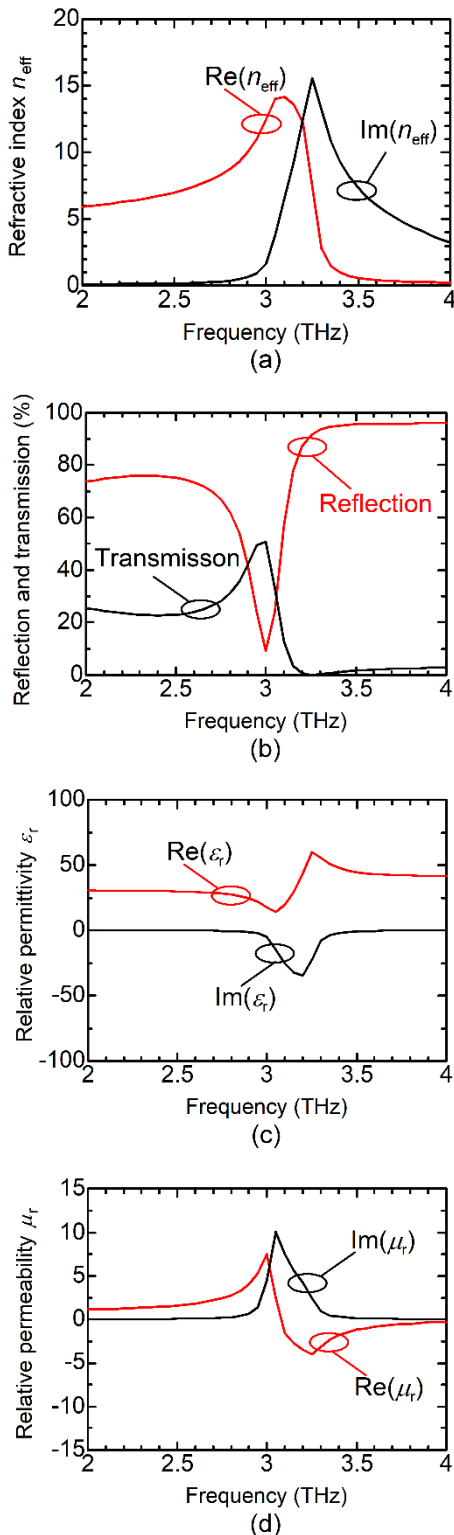


図5 アンテナの中央に配置したメタアトムの周波数特性
(カット金属ワイヤーの長辺方向の長さ $l = 31 \mu\text{m}$ 、間隔 $g = 2 \mu\text{m}$)

5.2 アンテナの配置の変化に対するロバスト性

図6に微小磁気ダイポールの位置を z 軸方向に移動した場合の指向性利得を示す。アンテナに近づく方向の変位を正としている。微小磁気ダイポールの変位を $-400 \mu\text{m} \sim 400 \mu\text{m}$ まで変化させたが、指向性利得の変化幅は 1.2 dB に留まっている。

図7に微小磁気ダイポールの位置を x 軸方向に移動させた場合の xz 平面の指向性利得を示す。 x 軸の正方向の変位を正としている。図8に微小磁気ダイポールの位置を y 軸方向に移動させた場合の yz 平面の指向性利得を示す。 y 軸の正方向の変位を正としている。

図7の結果から光源に対するアンテナの配置を x 軸方向に $-400 \sim 400 \mu\text{m}$ 変化させることで、ビームの方向を xz 平面で $-21 \sim 21$ 度まで制御できることが分かる。同様に図8の結果から光源に対するアンテナの配置を y 軸方向に $-400 \sim 400 \mu\text{m}$ 変化させることで、ビーム方向を yz 平面で $-21 \sim 21$ 度まで制御できることが分かる。

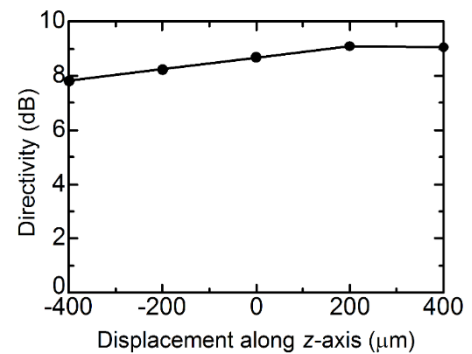


図6 微小磁気ダイポールの位置を z 軸方向へ移動させた場合の指向性利得

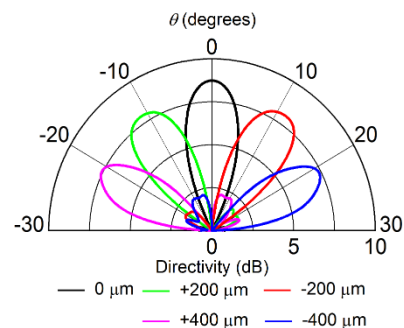


図7 微小磁気ダイポールの位置を x 軸方向へ移動させた場合の指向性利得

超高屈折率無反射メタサーフェスによるテラヘルツ波アンテナの設計方法

Design of terahertz antenna consisting of metasurface with extremely high refractive index and low reflection

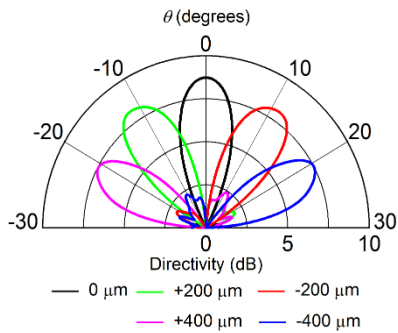


図 8 微小磁気ダイポールの位置を y 軸方向へ移動させた場合の指向性利得

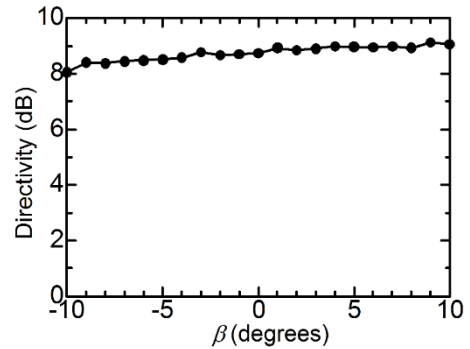


図 11 微小磁気ダイポールを xz 面に角度 β 傾けた場合の指向性利得

5.3 偏波の変化に対するロバスト性

図 9 のように、微小磁気ダイポールを yz 面に角度 α 、xz 面に角度 β 傾けて解析した。図 10 に微小磁気ダイポールを yz 面に傾けた場合の指向性利得を示す。微小磁気ダイポールの傾き α を -10~10 度変化させたが、指向性利得の変化幅は 1.0 dB に留まっている。また、図 11 に微小磁気ダイポールを xz 面に傾けた場合の指向性利得を示す。微小磁気ダイポールの傾き β を -10~10 度変化させたが、指向性利得の変化幅は 1.1 dB に留まっている。

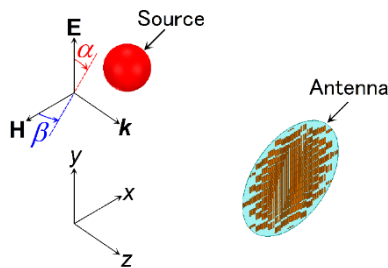


図 9 微小磁気ダイポールを傾けた解析

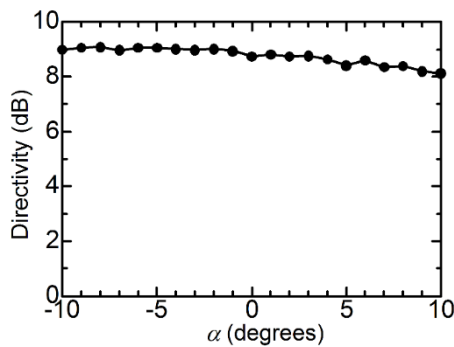


図 10 微小磁気ダイポールを yz 面に角度 α 傾けた場合の指向性利得

6 まとめ

両面構造ペアカットワイヤーの電磁界シミュレータによる設計方法のノウハウをまとめた。例として、周波数は 3.0 THz で、アンテナと光源の距離は 1.0 mm とした。また、テラヘルツ波光源へ実装を意識して、両面構造ペアカットワイヤーのロバスト性についても整理した。金属の導電率をより正確に取り込む際には、ドルーデモデルを用いるとよい。

用語解説

*1 メタアトム

メタサーフェスを構成する 1 要素の構造のこと。

*2 メタサーフェス

自然界に存在する材料では実現できない材料定数を周期構造や共鳴構造で実現する技術。特に平面構造の場合を指す。

参考文献

- [1] 大内 隆嗣, 石原 功基, 佐藤 竜也, 富樫 隆久, 鈴木 健仁, “高屈折率低反射メタマテリアルを活用した薄フィルム分布屈折率コリメートレンズの設計,” 電子情報通信学会論文誌 B, vol.J100-B, no.3, pp.235-244, Mar. 2017.
- [2] <https://www.rd.tuat.ac.jp/NEWS/event/20181011.html>
- [3] 遠藤 孝太, “両面構造ペアカットワイヤーアレーアンテナの連続発振テラヘルツ波光源の位相を考慮した設計と実験評価” 東京農工大学卒業論文, Mar. 2019.

この研究は、平成 27 年度 S C A T 研究助成の対象として採用され、平成 28~30 年度に実施されたものです。