

ミリ波帯における非回折波生成用アンテナシステムの開発

Antenna system for diffraction free beam in millimeter wave



藤本 孝文 (Takafumi FUJIMOTO, Dr. Eng.)

長崎大学 大学院工学研究科 准教授

(Associate Professor, Nagasaki University, Graduate school of Engineering)

電子情報通信学会 映像情報メディア学会 IEEE 学会 アメリカ光学学会 (OSA)

受賞：電子情報通信学会アンテナ伝播研究会フレッシュマンセッション優秀賞(1998年), IEEE Antennas & Propagation Society Japan Chapter Young Engineer Award(1999年)

研究専門分野：アンテナ工学 電波工学

あらまし

ミリ波帯^{*1}の電波は伝搬距離が短いことが無線通信利用の実用化を困難なものとしている。本研究ではその解決策として、光工学分野における非回折波^{*2}に着目し、100GHz帯で非回折波を生成するアンテナシステムの開発を行う。本報告では、研究の第1段階としてシミュレーションによりミリ波帯の非回折波生成の可能性について評価を行っている。提案するシステムは一次放射器用アンテナ、円環状の電界分布を生成するための円環スリット付き電波吸収体、および薄肉誘電体レンズからなる。シミュレーションにより各素子を設計し、レンズ透過後の電界強度分布と伝搬距離の関係性を調査した。使用する計算機のRAM^{*3}により、計算可能な電波吸収体およびレンズの大きさに制限があったが、提案するアンテナシステムにより、光工学での非回折波と同様な伝搬特性が得られ、ミリ波帯での非回折波が生成可能であることを明らかにした。

1. 研究の目的

本研究では、光工学の領域で研究が進められてきた

非回折波に着目し、第6世代(6G)無線通信で使用が検討されている100GHz帯で、遠距離通信が可能となる非回折波生成用アンテナシステムの開発を行う。設計したアンテナから放射される電波の伝搬特性(電界強度分布と伝搬距離)をシミュレーションにより調査し、ミリ波帯における非回折波の特性評価を行うことを目的とする。

2. 研究の背景

2020年に第5世代(5G)無線通信の利用が開始されたばかりではあるが、10年後を見据えた6G無線通信の検討はすでに始まっている。28GHz帯を使用する5Gの通信速度は数GHz帯を使用する4Gの約100倍、100GHz帯を想定した6Gは5Gの少なくとも10倍以上になると見込まれている。しかし電波は周波数が高くなると伝搬距離が短くなる問題がある。100GHz帯の電波は大容量通信に向いているものの遠距離通信には適さず、目的を達成するためには多くの基地局・中継器が必要となる。この問題はすでに5G通信網にも起きており、新たな基地局設置が5G通信の普及を遅らせている大きな原因の一つである。無線通信の重要なデバイスとしてアンテナがあるが、現在提案されている100GHz帯のアンテナは、ホーンアンテナを100GHz帯にチューニングしただけのものである。6G向けの遠距離通信を目的としたアンテナの研究開発は行われていないようである。

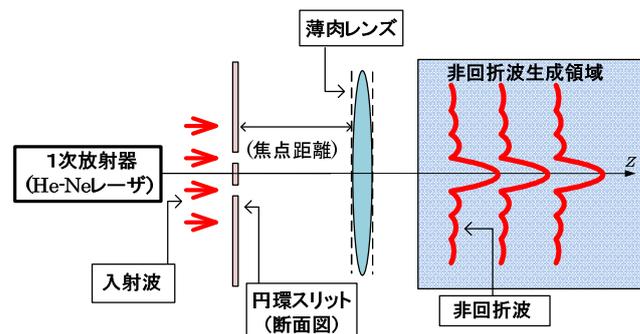


図1 光領域での非回折波生成システム

著者はこれまでに、光工学分野での非回折波の研究を行ってきた[1][2]。非回折波とは、J.Durnin[3]によって波動方程式^{*4}の1つの解として発見された波動であり、図1に示すように1次放射器、円環スリット、

ミリ波帯における非回折波生成用アンテナシステムの開発

Antenna system for diffraction free beam in millimeter wave

薄肉レンズを組み合わせた装置によって生成される。通常の電磁波が距離の2乗に比例して強度が減衰するのに対し、非回折波は円環スリットの幅が無限小（円環スリットの遮蔽率が無限大）の場合、距離による減衰は生じない。つまり、非回折波は理論上無限遠方まで伝搬可能な波動である。Tanakaら[4]は円環スリット幅が有限の場合について調査し、ある一定距離まで非回折波が伝搬可能であることを明らかにしている。

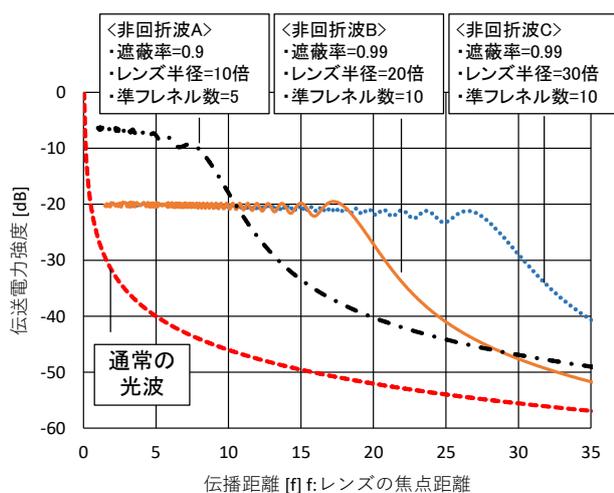


図2 光領域での非回折波のシミュレーション結果
(電力強度分布)

図2に著者が行った光領域での非回折波の数値シミュレーション結果を示す。非回折波生成装置は図1に示すものである。非回折波が生じる伝搬領域は、円環スリットの径・幅、薄肉レンズの大きさ・焦点距離によって決まる。先にも述べたように、通常的光波が距離と共に単調減少するのに対し、非回折波はある距離まで電力強度を一定に保ち伝搬していることがわかる。非回折波は円環スリットを通すため、レンズ透過直後の電力強度は通常的光波より弱い。しかし、ある距離を通過するとその強度が逆転する。図2に示す非回折波Cの場合、伝搬距離が $2f \sim 30f$ (f はレンズの焦点距離)の遠方領域で通常的光波より電力強度が強くなっていることがわかる。この非回折波を100GHzのミリ波帯で生成できれば、6Gでの遠距離無線通信が可能となる。

非回折波に関する研究事例は光工学領域には数多くあるものの、電波工学領域ではその数は非常に少ない。電波工学領域での文献[5]-[7]ではレンズのみを用いた非回折波生成法が提案されている。文献[5]では27GHz-29GHz (5G帯)で近傍領域での非回折波について、文献[6][7]では100GHz帯 (6G帯)で遠方領域での非回折波について検討されている。いずれもレンズ形状が複雑である。6Gの普及拡大を考えると、簡単な形状・構造で非回折波を生成できるアンテナが必要となる。

3. 提案アンテナの構造および研究の方法

光工学での非回折波生成は実験的にも証明されており、「1次放射器としてHe-Neレーザー」、「白黒のフィルムで作成された円環スリット」、「薄肉ガラスレンズ」の3つの素子で構成される。この光工学での生成装置を参考にした場合、電波領域では1次放射器には「ホーンアンテナ」、ガラスレンズには「誘電体レンズ」を利用すれば良い。しかし、白黒フィルムの円環スリットに代替するものはない。これは円環スリットの役割が、「円環状に強度が一樣かつ向きが一方向の電界を作り、円環部以外は電界を遮蔽すること」であり、このような円環状電界分布を生成する素子は電波領域には存在しないためである。通常、電波の遮蔽には金属板が使用されるが、金属板に円環状のスリットを設けて電波を照射しても、電界の金属板に対する境界条件により理論上目的とする電界分布を作ることはできない。著者は、電波領域での円環状電界分布生成素子として、直方体の電波吸収体に円環状のスリットを設けた素子を提案する。

ミリ波帯における非回折波生成用アンテナシステムの開発

Antenna system for diffraction free beam in millimeter wave

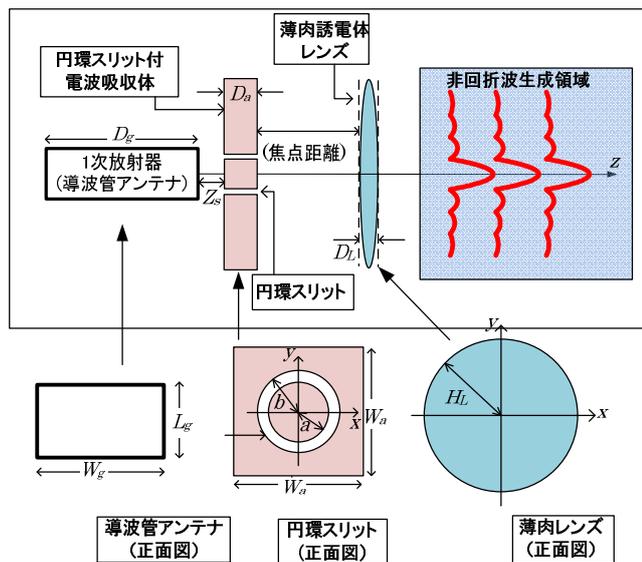


図3 提案アンテナシステム
(電波領域での非回折波生成システム)

図3に提案する非回折波生成用アンテナシステムの構成図を示す。今後の実験を想定すると1次放射器としてはホーンアンテナを使用すべきであるが、計算用ワークステーションのRAM使用量をおさえるために導波管のみを利用したアンテナを設計した(本稿では導波管アンテナと呼ぶ)。導波管アンテナの放射開口部の大きさは $W_g \times L_g$ 、導波管の長さは D_g である。導波管アンテナの開口から Z_s の位置に円環スリット付き電波吸収体を設置する。電波吸収体全体の大きさは表面が $W_a \times W_a$ 、厚さは D_a である。またスリットを構成する円環の外径を b 、内径を a としている。この円環は図中に示している表面と同様に裏面にも同じ寸法のスリットを設け、それぞれのスリットを繋ぐように電波吸収体内部にも空隙を設けている。また電波吸収体の比誘電率は ϵ_r 、導電率は σ [S/m] である。円環スリット付き電波吸収体の放射面からレンズの焦点距離 f の位置に薄肉誘電体レンズを設置する。レンズの大きさは半径 H_L 、厚み D_L である。

本研究でのシミュレーションは、高速多重極モーメント法に基づく電磁界シミュレーションソフトウェア FEKO およびワークステーション (Windows 10, Intel Xeon Silver 2.4GHz, RAM748GB) により行っている。

4. 結果および考察

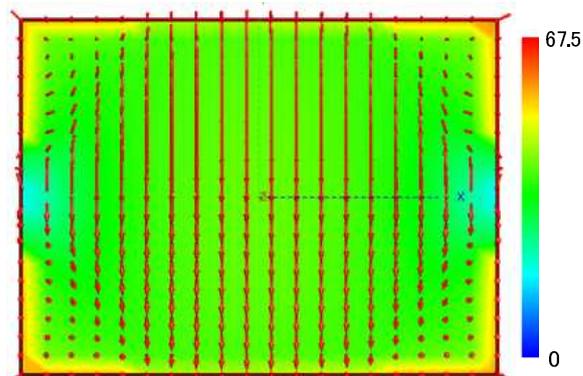


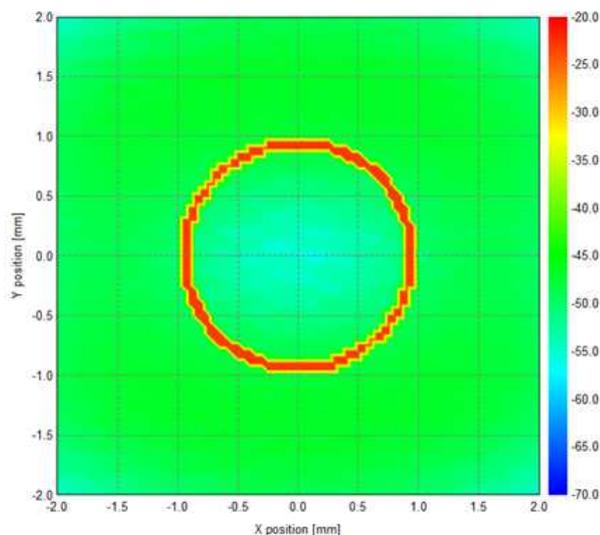
図4 導波管アンテナ放射後の電界分布のシミュレーション結果 ($Z_s=3\text{mm}$)

図4に導波管アンテナ開口部から $Z_s=3\text{mm}$ での電界分布のシミュレーション結果を示す。導波管アンテナのサイズは $W_g=1.67\text{mm}$ 、 $L_g=1.27\text{mm}$ 、 $D_g=3.0\text{mm}$ である。電界強度は一定であり、また電界ベクトルの向きも上向き (y 軸方向) に一様である。

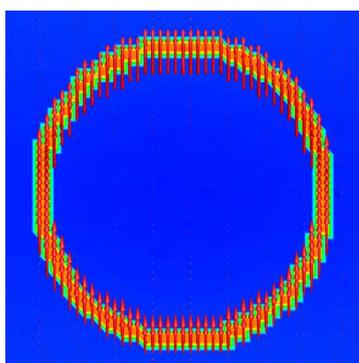
図5(a), (b)に円環スリット透過後の電界強度分布および電界ベクトル分布を示す。電波吸収体は $Z_s=3\text{mm}$ の位置に設置されている。電波吸収体のサイズは $W_a=20.0\text{mm}$ 、 $D_a=10.0\text{mm}$ であり、比誘電率は $\epsilon_r=1$ 、導電率は $\sigma=5$ である。また円環スリットの外径 $b=1.0\text{mm}$ 、内径 $a=0.9\text{mm}$ である。図(a)より円環状に強度が一定であり、またスリット部と電波吸収体部で約 25dB の強度差ができていことがわかる。同図(b)よりベクトルの向きも円環スリット状で一様であることが確認できる。

ミリ波帯における非回折波生成用アンテナシステムの開発

Antenna system for diffraction free beam in millimeter wave



(a) 電界強度分布

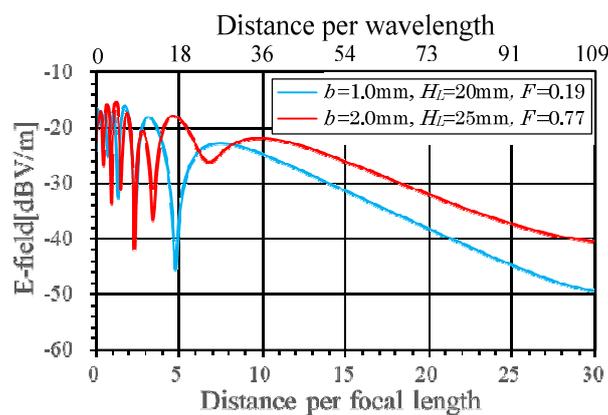


(b) 電界ベクトル分布

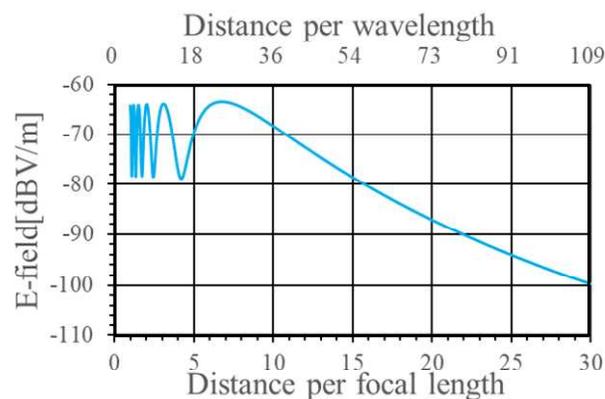
図5 円環スリット開口表面の電界分布のシミュレーション結果

円環スリット付き電波吸収体の出射面から焦点距離の位置に薄肉誘電体レンズを装荷し、レンズ透過後の電界強度分布について調査した。光学分野において回折の程度を示すパラメータとしてフレネルナンバー N が使用される。文献[1][2][4]では、フレネルナンバー N より準フレネルナンバー $F(=2\pi N)$ を定義し、円環スリットの準フレネルナンバー F と光領域での非回折波の関係を検討している。 F は波長 λ 、レンズの焦点距離 f 、円環スリットの外径 b を用いて $F=2\pi N=2\pi b^2/\lambda f$ と表すことができる。光工学でのスカラー波動理論により得られた非回折波の計算結果によると、準フレネルナンバー F は5以上、レンズの半径 H_L が円環スリットの外径 b の約20倍以上で遠距離伝搬が可能な非回折波の性質が確認されている[1][2][4]。しかし今回

の検討では使用したワークステーションのRAMの性能に限界があり、径の大きな円環スリットおよび誘電体レンズのシミュレーションができなかった。そのため、誘電体レンズをシミュレーションが可能となる $(H_L, D_L)=(20.0\text{mm}, 3.082\text{mm})$ 、 $(25.0\text{mm}, 4.832\text{mm})$ の2つのレンズを設計した。共に比誘電率 $\epsilon_r=49$ 、誘電正接 $\tan \delta=0.0041$ であり、焦点距離は10.88mmである。



(a) 提案アンテナシステムにより生成された非回折波



(b) 光領域での非回折波

図6 レンズ透過後の電界強度分布のシミュレーション結果

図6(a)に提案アンテナシステムの薄肉レンズ透過後の電界強度分布を示す。 $b=1.0\text{mm}$ 、 $(H_L, D_L)=(20.0\text{mm}, 3.082\text{mm})$ と $b=2.0\text{mm}$ 、 $(H_L, D_L)=(25.0\text{mm}, 4.832\text{mm})$ の2つの場合の計算結果である。共に波長 $\lambda=3\text{mm}$ (周波数=100GHz)であり、円環リングの遮蔽率は $a/b=0.9$ である。また、 $b=1.0\text{mm}$ では $F=0.19$ であり、 $b=2.0\text{mm}$ の場合は $F=0.77$ となる。同図(b)には比較のため光領域でのスカラー波動理論を用いた

ミリ波帯における非回折波生成用アンテナシステムの開発

Antenna system for diffraction free beam in millimeter wave

場合の非回折波分布も示している。準フレネルナンバーは図(a)と同様に $F=0.19$ 、遮蔽率 0.9 である。図 6 の横軸の下側メモリは焦点距離 f で規格化した値であり、上側は波長 λ で規格化した値である。図 6(b)の光領域でのシミュレーションより、焦点距離 $f=5$ までは $-64\text{dBV/m}\sim-78\text{dBV/m}$ の約 15dB 内で大きさがほぼ一定で伝搬し、この区間では減衰しておらず非回折波であることが確認できる。同図(a)の $F=0.19$ の場合では振幅は約 20dB となり光非回折波に比べ振幅は大きいが、 $f=4$ までの減衰は小さく非回折波の特性を示していることが確認できる。

図 2 に示したように光領域での非回折波のシミュレーションより F を大きく、またレンズの径 H_L を大きくすると非回折波としての伝搬距離が長くなることが明らかになっている。図 6(a)の $F=0.77$ でのシミュレーション結果は $f=6$ あたりまで振幅が一定で伝搬しており、 $F=0.19$ に比べ伝搬距離が長くなっていることが確認できる。 $f=6$ は約 66mm であり、約 22 波長に相当する。このようにアンテナから十分遠方まで非回折波が伝搬していることがわかる。

4. 将来展望

本研究では 100GHz 帯の非回折波生成用アンテナシステムの設計をシミュレーションを中心に行ったが、今後は測定実験により非回折波生成の可能性を検証する。測定実験の場合、シミュレーション時に生じたスリット付き電波吸収体およびレンズの大きさの制約がないため、目標とする準フレネルナンバー $F=5$ 以上の非回折波生成の検証が可能となる。測定実験では、各素子の取り扱いの容易さから 28GHz 帯 (5G) 用非回折波生成用アンテナを先行して行う予定である。

非回折波は図 1 に示すように円環スリットの遮蔽率、レンズの径によりその伝搬距離を制御できる。これは、必要な距離だけ強い電波を送信できることを意味し、無線信号の傍受を防ぐことを可能とする。つまり、非回折波の利点は 5G、6G の遠距離通信だけでなく情報セキュリティにも大きく貢献できる波動である。また、電力伝送効率が高いので、無線電力伝送用としての検討も進める予定である。

おわりに

本研究では提案する非回折波生成用のアンテナシステムを 100GHz のミリ波帯で設計し、その伝搬特性をシミュレーションにより検証した。その結果、提案するアンテナシステムで、ミリ波帯非回折波が生成可能であることを明らかにした。

用語解説

- *1 周波数が 30GHz~300GHz の電波
- *2 理論上減衰せずに無限遠方まで伝搬する電磁波
- *3 計算機 (ワークステーションやパーソナルコンピュータ) の短期的にデータを保管する場所。RAM の大きさにより、シミュレーションできるモデルの大きさが決まる。
- *4 電磁波の波動現象を記述する方程式

参考文献

- [1] 馬渡, 荒巻, 藤本, 電子情報通信学会総合大会総合大会, C-3-99, 2012
- [2] T. Fujimoto, Y. Maemura, "Design of Optical Lens for Quasi-diffraction-free beam using Particle Swarm Optimization", Computer and Computing Science, Vol. 111, pp.246-250, Oct. 2015.
- [3] J. Durnin, "Exact solutions for nondiffracting beams. I. The scalar theory", Optical Society of America, Vol. 4, No. 4, pp. 651-654, April 1987.
- [4] K. Tanaka et al., "Quasi-diffraction-free beams", J. Opt. Soc. Am. A/ Vol. 18, No. 7, pp. 1644-1649, July 2001.
- [5] Y. C. Zhong et al., "Generating and Steering Quasi-Nondiffractive Beam by Near-Field Planar Risley Prisms", IEEE Trans. Antennas and Propagation Vol. 68, No. 12, pp. 7767-7776, Dec. 2020.
- [6] Y. Z. Yu et al., "Properties of Approximate Bessel Beams at Millimeter Wavelengths Generated by Fractal Conical Lens" Progress In Electromagnetics Research, PIER 87, pp. 105-115, 2008.
- [7] W. Dou et al., "Diffraction-Free Bessel

ミリ波帯における非回折波生成用アンテナシステムの開発

Antenna system for diffraction free beam in millimeter wave

Beams at mm- and Submm-Wavebands”,
IEICE Trans. Electron., Vol. E92-C, No. 9,
pp.1130-1136, Sep. 2009.

この研究は、平成30年度SCAT研究助成の対象として採用され、令和元年～3年度に実施されたものです。