

Beyond 5G 高周波通信の空間分解能を向上するための誘電体導波路の研究

三谷怜司[†] 中尾彰宏[†] 福田敦史^{††} 山本大斗^{††} 岡崎浩司^{††}
鈴木恭宜^{††}

† 東京大学 〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1

†† 株式会社 NTT ドコモ 〒239-8536 神奈川県横須賀市光の丘 3-6

E-mail: †nakao@nakao-lab.org

あらまし 5G・Beyond5G で普及が期待されているミリ波などの高周波数帯の通信では帯域を広く利用することで大容量の通信が可能となる一方、電波伝播の直進性や急激な減衰性から活用の困難さが指摘されている。我々は、ミリ波などの高周波数帯の直進性や減衰性を逆に利用し、高空間分解能の通信に活用することを考えている。アレイアンテナを利用するビームフォーミングでは電波伝播の範囲を限定することが可能であるが、一般にコストが高くなるなどの課題がある。本研究では、低コストでビームを絞るための誘電体導波路を用いたミリ波アンテナを提案し、シミュレーション評価によりその有用性を示す。

キーワード Beyond5G, 誘電体導波路, ミリ波, アンテナ

Research on Dielectric Waveguides for Enhancing Spatial Resolution in Beyond 5G High Frequency Communications

Reishi MITANI[†], Akihiro NAKAO[†], Atsushi FUKUDA^{††}, Hiroto YAMAMOTO^{††}, Hiroshi OKAZAKI^{††}, and Yasunori SUZUKI^{††}

† The University of Tokyo, Graduate School of Interdisciplinary Information Studies 7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-0033 Japan

†† 〒239-8536 神奈川県横須賀市光の丘 3-6, 3-6, Hikarinooka, Yokosuka, Kanagawa, 239-8536, Japan
E-mail: †nakao@nakao-lab.org

Abstract High-frequency communications, which are used in 5G and expected to be Beyond5G, enable high-capacity communications by using a wide bandwidth. However, the high straightness of radio wave and rapid attenuation have made it difficult to utilize high-frequency communications. In this paper, we consider the use of millimeter waves and other high-frequency communications for high-spatial-resolution communications by taking advantage of their linearity and attenuation. Generally, it is possible to limit the range of radio propagation by beamforming using array antennas in millimeter-wave communications, but there is a problem of high cost. In this study, we propose to design and fabricate a millimeter-wave antenna using dielectric waveguides to narrow the beam at low cost, and demonstrate its usefulness through simulation evaluation.

Key words Beyond5G, Dielectric waveguide, mmWave, Antenna

1. はじめに

第 5 世代移動通信システム (5G) の商用サービスが 2020 年 3 月に開始され、移動通信システムとしては初めて、28GHz 帯を利用した広帯域高速通信が実用化された。超高速無線データ通信を実現できる 28GHz 以上のミリ波の利用は今後拡大される

ことが予想される。[1]。

5G・Beyond5G で普及が期待されている高周波数の通信では、帯域を広く利用することで大容量の通信が可能となる一方で電波伝播の LOS(Line-of-Sight) 環境下での伝搬損失や Non-LOS 環境下での急激な伝搬損失の増大への対策が必須となっている。これらの対策としてアンテナをアレイ化する高利得アンテナの

利用がある。高利得アンテナは高い指向特性を持っていることから高い空間分解能を得られる可能性があり、電波が届く範囲を限定することができる。この特性はセキュリティ対策に利用することができると考えられる。また、ミリ波は高分解能があるにもかかわらず、それを生かしたセキュリティを確立する方法が難しい。ここでいうセキュリティとは以下を示す。

- デバイスが多い環境において、それぞれのデバイスへの電波を割り当てること
- 渡すべきでない情報を送る電波を不特定のデバイスで受信させないこと

しかし、このようなセキュリティ対策を既存の方法では達成するには以下の課題が存在する。

- (1) コスト
- (2) リードタイム
- (3) インフラが柔軟でないこと

1つ目の高いコストはミリ波専用の機器はハード、ソフトともに開発コストがかかることに起因する。また、ミリ波は波長が短く、より精密なエンジニアリングが必要となることも高いコストに寄与する。例えば 28GHz 帯のミリ波の実験環境を構築するためだけでも、高価なアンテナと SDR システムを必要とし、CW 信号を送受信するだけでも数百万円の費用がかかる [2]。アレイアンテナシステムを用いたビームフォーミングやビームステアリング技術は、これらの問題を軽減する技術的ソリューションを提供し、実際にいくつかの 5G 基地局装置に実装されている。だが、これらの技術は開発と実装、そしてチューニングのコストという現状がある。

また機材のリードタイムは長く、ホーンアンテナなどの機器は納品までに時間がかかる問題も存在する。これもより精密なエンジニアリングが必要となることに起因する。

最後にインフラが柔軟でないことがあげられる。ホーンアンテナなどの機器は一度配置してしまうと場所を変えにくいため、最初からメンテナンスがしやすいエリア設計などに気を付けなければならない。

本論文の関連研究としてはまず、NTT Docomo による曲がるアンテナ [3][4] があげられる。誘電体導波路を曲げて漏れ出した電波を利用し、エリアの拡張ができるこれを実証した。送受信の可逆性により、曲げた箇所は送受信がともに可能なアンテナとなる上、曲げる箇所を柔軟に変えることで電波の出るエリアを移動することが可能となる。また、シミュレーションで曲げた箇所からの電波の漏れ出しを可視化しており、こちらの結果から入力電力の最大 50% 程度が曲げた箇所から放出されることがわかる。他には誘電体導波路をより誘電率の高い物質ではさんだ場合、はさんだ箇所から電波が漏れ出す現象を生じたエリア構築の例がある [5]。電波を漏洩する導波路を漏洩導波路と呼び、この漏洩導波路は、地下街やトンネルなどの通信エリア化のために利用されている漏洩同軸ケーブル（LCX: Leaky-Coaxial-Cable）と同類である。この現象を利用すれば誘電体導波路を曲げずともエリア構築が可能となる上、洗濯ばさみのような物質でエリア構築ができる手軽さがある。

本研究では、シミュレーションを用いて誘電体導波路の最適

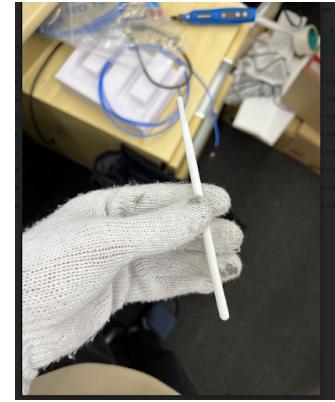


図 1 誘電体導波路

な形状を割り出し、それをもとに誘電体導波路アンテナの製作を行う。製作したアンテナの反射率と指向性を測定し、セキュリティへの有用性を確認する。

本論文の構成は次の通りである。次章では、本研究に関連する技術について述べる。第 3 章、第 4 章では、システム概要を示した提案手法と実際の実装についてまとめる。第 5 章にて、各ケースにおけるスループットや FPS の評価を行い、第 6 章で今後の展望について考察する。最終章にて本論文をまとめる。

2. 関連技術

2.1 既存の伝送媒体

ミリ波の伝送媒体には主に以下が利用される。

- 導波管
- 同軸ケーブル
- 誘電体導波路

導波管は誘電体または空気の周囲を導体で囲んだ断面形状をもち、衛星地球局で利用される。ただ容易に曲げることができず、重いという制約がある。同軸ケーブルは中心導体と外部導体が同心円状に配置された断面形状をもち、おもにマイクロ波以下の周波数帯で利用される。こちらは高周波数帯での損失が導波管よりも高いという制約がある。

誘電体導波路（図 1）は棒状の誘電体の周囲を異なる誘電率を有する誘電体で囲んだ構造を持ち、高周波数帯電波の伝送やレーダーシステム [6] のために使われることが多い導波管と同軸ケーブルを足して 2 で割ったような特徴を持ち、損失は発生するが、同軸ケーブルよりは低い上、軽くて柔軟に曲げることができる。

本研究で用いる導波路は、内側誘電体を比誘電率 2.1 としたポリテトラフルオロエチレン（PTFE）、外側誘電体を比誘電率ほぼ 1.00 の空気としたものとなる。

2.2 誘電体導波路の先端から出る高分解能ビーム

本研究では、予備実験にて誘電体導波路の先端から高分解能ビームが出ていることを確認している。予備実験では動画の送受信システムを 60 GHz 帯で構築し、市販の SHARP 社製無線 HDMI (High-Definition Multimedia Interface) 送受信ユニット (VR-WH1) を用いた。主な無線仕様を表 2.2 に示す。本ユニットは、60GHz 帯を使用する Wireless HD 規格の無線送受信ユ



図 2 金属導波管

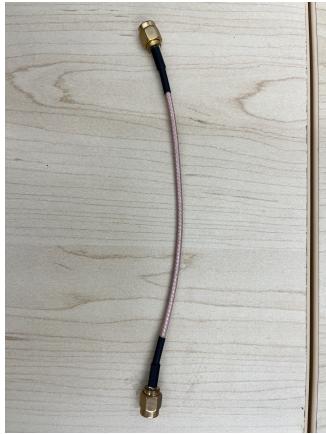


図 3 同軸ケーブル

表 1 無線 HDMI 送受信ユニットの主な無線仕様

準拠規格	Wireless HD 1.1
伝送方式	HTP?LRP
中心周波数	60.48GHz (Ch2)
バンド幅	1.76GHz

ニットで構成される。送信機は 60GHz 帯の広帯域幅 (1.76GHz) を使用し、入力された HDMI 信号を電波に変換して送信し、受信機は受信電波から HDMI 信号を生成する。

送信機を銅板で囲って電波を遮断した上で導波路をアンテナ代わりに使う調査実験を行った。実際に導波路を動かしたり、力を加えることで特徴を探したところ、導波路の先端から高指向性のビーム状の電波が放出されることがわかった。図 4 のように 60GHz の動画送受信システムにおいて、受信機に向いているときには動画は再生され、ちょっとでも下に向いているときには動画が再生されない現象を見つけることができた。

3. 提案手法

本研究では電波伝播の直進性や急激な減衰を利活用した誘電体導波路を用いたミリ波アンテナを設計し製作する。そしてシミュレーション評価だけでなく実際に作製したアンテナを用いた実験により、セキュリティに対しての有用性を実証する。

これによって先ほど述べた問題の解決が可能となる。まず、

誘電体導波路を使うことでハードウェアの開発コストや MIMO の開発コストを抑えることが可能で、誘電体導波路は EC サイトなどでも購入できるため、リードタイムも縮小できる。誘電体導波路はある程度曲げても電波の漏れを抑えることができるため、誘電体導波路を室内で引きまわしてミリ波の局所エリアを構築可能だ。また軽いため、ホーンアンテナなどの既存の機器に比べてエリアをより柔軟に変更できる。最後に、鋭いビームを生かして限定したデバイスに情報を渡すことができ、セキュリティの向上にもつながる。

ここで関連研究と提案手法の比較を行うと先ほどの誘電体導波路の関連研究は周波数帯利用効率、設置コスト、設置場所のコスト、そして給電経路の確保において秀でているが、空間分解能は高くない。空間分解能を高くしようとすれば、超多数素子アンテナを用いたアンテナ指向性の制御や分散配置された基地局アンテナで電波の指向性を制御することができるがこれは逆に設置コスト、設置場所と給電経路の確保が難しくなる。

3.1 提案手法によって実現できるユースケース

最近は大勢の人がいる ATM の前にて口座情報を確認する、シェアオフィスにて個人情報を扱う、など多数の人々・デバイスが存在する環境にて個人情報をやりとりする機会が多い。その場合普通のワイヤレス通信を使っている場合、電力解析攻撃によって電波から情報を抜き取られるリスクもある。高空間分解能のミリ波を利用することで、大容量通信を可能にしつつ電波のレイヤーにおいて個人情報を守り、セキュリティへの貢献が可能となる。

例えば図 5 のように天井に誘電体導波路を吊るし、上から高分解能ビームをユーザー・デバイスに提供することで物理層におけるセキュアな通信を確立できる。導波路の理想となる半值幅の仕様は天井からの高さとブース同士の距離から逆算すれば調整が可能となるため、場所によって変わる分解能の要件にも柔軟に対応可能である。要件は三角関数を使って容易に計算が可能で、例えば図のように 1m おきに狭いブースが並んでいる場合は $\arctan 0.5/2 = 14^\circ$ の狭いビームを出す導波路を製作する、などと調整も可能である。図の誘電体導波路は短くなっているが、もっと長い誘電体導波路を遠い位置から引きまわすことで、柔軟にきめ細やかなエリアが構築される。

4. シミュレーション

高分解能のビームを出せる誘電体導波路の形状を把握するために 3D モデルをシミュレータ上でモデリングし、電磁波の指向性を測定した。モデルは図 6 で見られる普通の棒型、図 7 で見られるコーン型、そして図 8 で見られるドーム型の 3 つとした。すべて円形とし、先端形状を取り除いた場合の長さは 50mm、半径は 10mm となるようにしている。対象周波数は 58 GHz から 60 GHz とする。電力を棒の左側についている完全導体から注入し、右側から放射される電波の指向性を見る。

5. シミュレーションの結果と評価

50mm で長さを固定した場合については以下の図 9 のようにドーム型のゲインが一番大きく、指向性が高くなった。その次

video does not play (data is not received) when the waveguide is not pointed to the receiver



video plays when the waveguide is pointed to the receiver



図4 誘電体導波路の予備実験

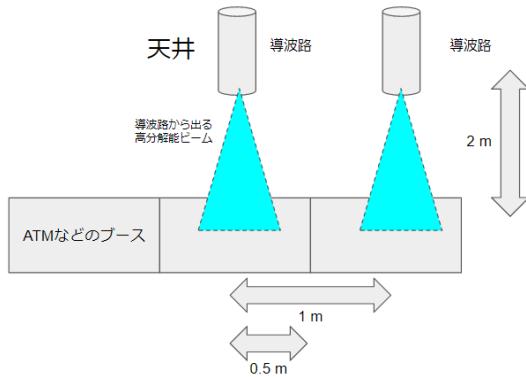


図5 天井から各ブースへ高分解能ミリ波を提供

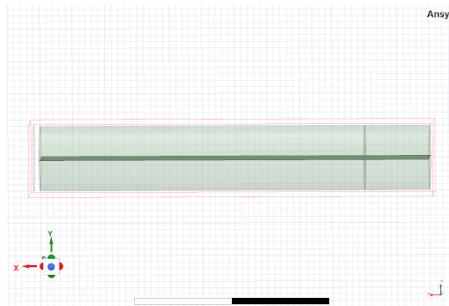


図6 普通の誘電体導波路アンテナ

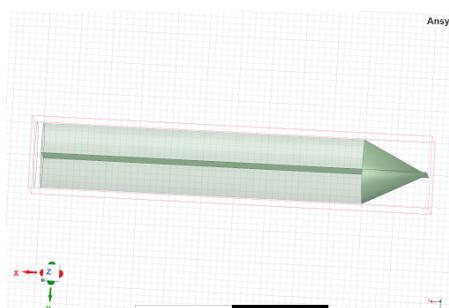


図7 コーン型の誘電体導波路アンテナ

に普通のアンテナ、コーン型のアンテナと続いた。ドーム型の指向性が図10のように一番狭くなった理由としてはレンズアンテナの効果があげられる。レンズアンテナは開口面アンテナの一種で、他の開口面アンテナと比較して電波の通路妨害がな

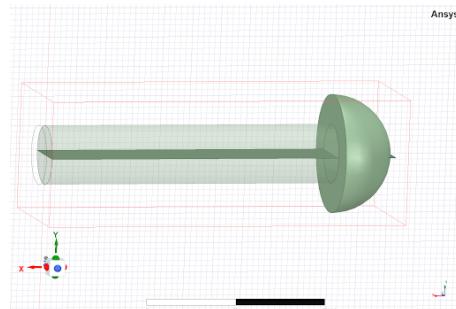


図8 ドーム型の誘電体導波路アンテナ

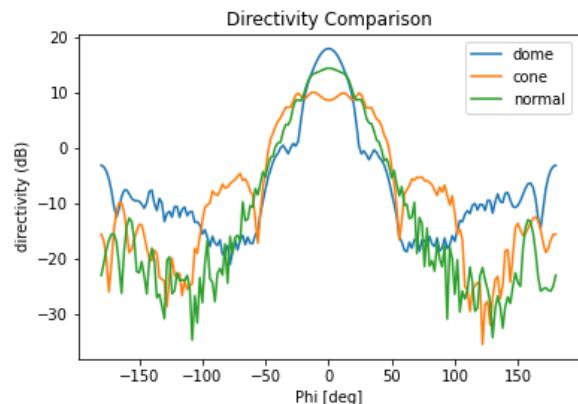


図9 指向性の結果

いので直交偏波を送受でき、また指向性も高くすることができる。コーン型については形状により外側に電波が広がりやすいため、指向性が広くなつたと解釈できる。

6. 誘電体導波路アンテナの製作

シミュレーション結果をもとに誘電体導波路アンテナの製作を行った。誘電体導波路を加工するとともに、導波管導波路変換器の製作も必要となった。誘電体導波路を同軸導波管変換器にそのまま入れた場合、開口面にて電磁波が散乱してしまい、電力が逃げてしまう。電磁波が散乱してしまわないよう、導波路周辺を反射させながら導波路にまとわりつかせる必要があるため、導波管から導波路にて変換させる仕組みが必要となる。

また、導波管への挿入する側の導波路の先端を細く削っておく必要がある。導波管への導波路の差し込み具合によっても誘電体導波路の反射率は変わるために、導波路の先端を細くしてお

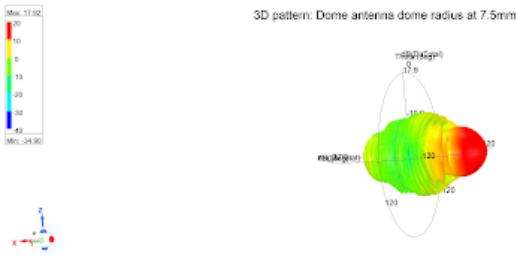


図 10 ドーム型の指向性の 3 D 結果

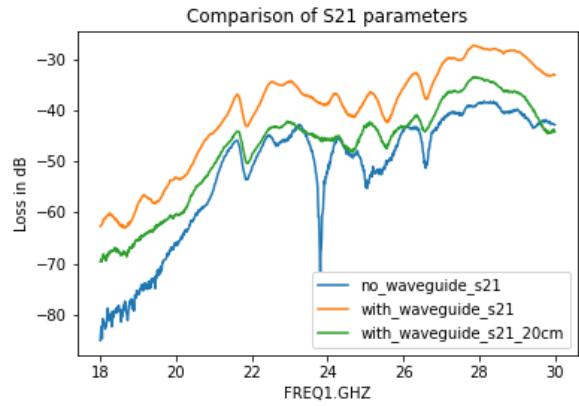


図 12 S21 の比較

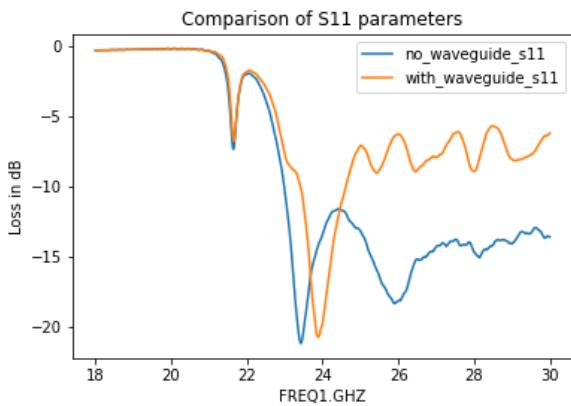


図 11 S11 の比較

くことで反射率が一番低いところで固定できるようにする。

製作したアンテナについては S パラメータと指向性を測定した。

6.1 半径 10mm、長さ 50mm の導波路アンテナ

まずは半径 10mm、長さ 50mm の誘電体導波路アンテナを WR28 の同軸導波管変換器に挿入し、反射率と透過率をネットワークアナライザにて測定した。図 11 にて、反射率は 24GHz の時に最小となっており、導波路がないときとほぼ変わらない損失となっている。

また、透過率においては受信側と導波路の先端を 100mm と 200mm 離した上で測定をした。受信側のアンテナは MZ-mmAnt1 を利用しており、結果が図 12 に表示されている。透過率は誘電体導波路を使うことで高くなっていることが見られ、改善がされていることがわかる。

6.2 異なる長さの誘電体導波路の指向性結果

20cm と 40cm の長さの誘電体導波路を使って指向性を測定した結果について説明する。誘電体導波路の先端を回転の中心とした上で、電波暗室の中で回転させて指向性を測定する。周波数は 27GHz から 29GHz で 0.5GHz 刻みとし、レーダーチャートにて結果を可視化する。

長さ 20cm の誘電体導波路の縦偏波、横偏波の結果はそれぞれ以下となる。

同じ長さでの比較を行うと、垂直偏波においては大きな差分

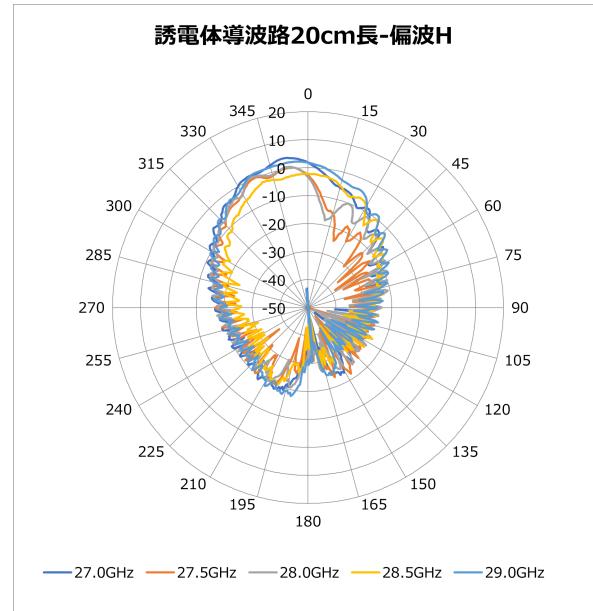


図 13 20cm 長の H 偏波

は見られないが水平偏波についてばらつきが見られる。垂直偏波は全体的に左右対称で丸い波形になっているが、水平偏波は左右にゆがんだ波形が見られる。このゆがみの差はフランジ内の導波路の芯と変換器の芯が一致していないことが理由と考えられる。

全体的には誘電体導波路を 40cm 長くしてもゲインは 0 度の方向においてほぼ 10dB で変わらなかったため、実際のユースケースにおいても使用可能と考えられる。

7. 今後の展望

7.1 異なる形状での利用の検討

今回は 1 次元の PTFE の誘電体導波路の棒に注目して設計と製作を行ったが、二次元形状である PTFE のシートを使うことも検討に入れたい。ドーム型の誘電体導波路アンテナは指向性を高くすることができるものの、製作の難易度が少しあがってしまう。二次元のシートの場合はすぐ用意できる上、加工も必要ない。シートに力を加えたりすることでエリアが構築することが考えられ、一次元のときに比べてユースケースが広がる。

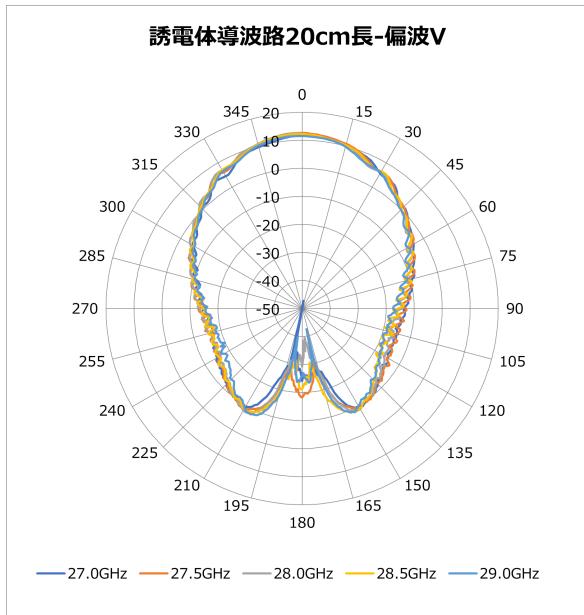


図 14 20cm 長の V 偏波

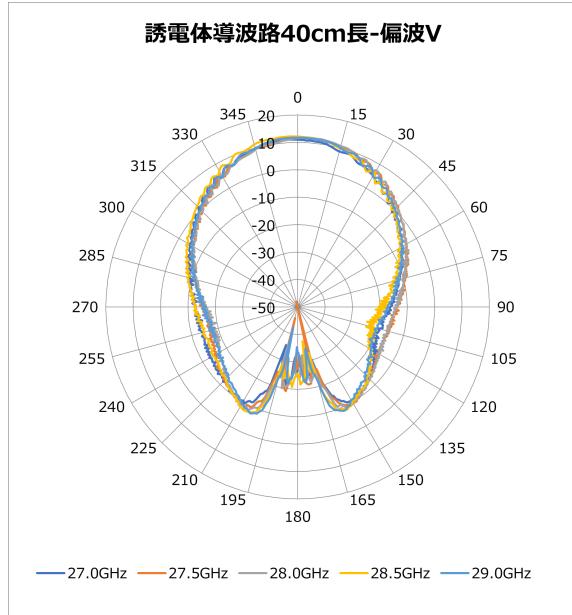


図 16 40cm 長の V 偏波

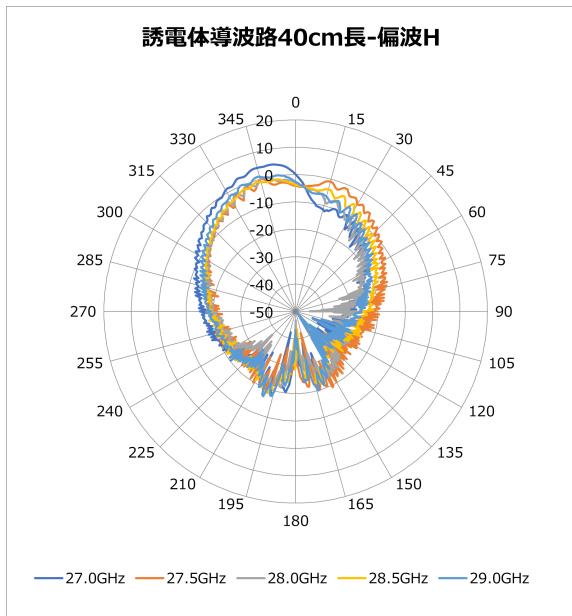


図 15 40cm 長の H 偏波

7.2 Local5G 環境での使用

今回の実験は室内または電波暗室の遮断された環境で測定を行ったため、まだ確認できていない外部要因が多い。実際に Local5G などの環境では外部要因が多いため、分解能と減衰率のパフォーマンスの変動があると予想される。こちらについての考察も今後行っていく。

8. 結 論

本研究では電波伝播の直進性や急激な減衰を利活用した誘電体導波路を用いたミリ波アンテナを設計し、製作する。そしてシミュレーション評価だけでなく実際に作製したアンテナを用いた実験により、有用性を実証する。

本論文の貢献は、まず鋭いビームを生かして限定したデバイ

スに情報を渡すことが可能になり、セキュリティの向上につながることである。そしてセキュリティの障害となる以下を取り扱うことができる。

- 誘電体導波路を使うことでハードウェアの開発コストや MIMO の開発コストを抑えることが可能となる
- 誘電体導波路は EC サイトなどでも購入できるため、リードタイムも縮小できる
- 誘電体導波路はある程度曲げても電波の漏れを抑えることができるため、誘電体導波路を室内で引きまわしてミリ波の局所エリアを構築することが可能。軽いため、ホーンアンテナなどの既存の機器に比べてエリアをより柔軟に変更できる。

謝 辞

本研究の一部は国立研究開発法人情報通信研究機構 (NICT) Beyond 5G 研究開発促進事業「Beyond 5G で実現する同期型 CPS コンピューティング基盤の研究開発」(採択番号: 01201) の助成を受けたものです。

文 献

- [1] I. NTT DOCOMO, “ホワイトペーパー：5g の高度化と 6g, 第 3 版,” 2021.
- [2] ZEP エンジニアリング, “[技術連載] 5g 時代の先進ミリ波ディジタル無線実験室 [vol.8 初めての 28ghz ミリ波伝搬実験],” 2021.
- [3] K. Kawai, T. Takada, A. Fukuda, H. Okazaki, and S. Narahashi, “A new area formation approach for millimeter wave communication systems employing a dielectric waveguide,” 2015 European Microwave Conference (EuMC), pp.1088–1091, 2015.
- [4] A. Fukuda, K. Kawai, H. Okazaki, and Y. Suzuki, “Experimental study of leaky-wave antenna employing bent dielectric waveguide for millimeter wave communication,” 2020 IEEE International Symposium on Radio-Frequency Integration Technology (RFIT), pp.199–201, 2020.
- [5] K. Kawai, H. Yamamoto, A. Fukuda, H. Okazaki, and Y. Suzuki, “つまむアンテナ -誘電体導波路のアンテナ応用-,” **, pp.**–**, 2021.
- [6] H. Shinoda, Y. Makino, N. Yamahira, and H. Itai, “Surface sensor

network using inductive signal transmission layer," 2007 Fourth International Conference on Networked Sensing Systems, pp.201–206, 2007.