

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点目は、高周波数の電波は波長が短いため、より精密なエンジニアリングが必要となり、高周波数帯用機器の開発コストが高いためである。例えば 28GHz 帯のミリ波の電波伝搬環境を構築する場合には、高価なアンテナと無線システムが必要となり、最も簡単な連続波（Continuous Wave: CW）信号を送受信するだけでも高額な費用がかかる [2]。さらに高指向性を得るために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の適用には、さらなる膨大な費用がかかる。

2点目は、ホーンアンテナなどの機器は精密なエンジニアリングが必要となるため納品までに時間がかかるためである。

最後に 3 点目は、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ためである。

そのような課題に対する関連研究に、例えば、誘電体導波路（以下、導波路）の応用研究 [3][4] がある。導波路はそれ自体が高周波数帯用の低損失線路であり、NLOS の原因となる高周波数帯電波の遮蔽物となるものを回避し、LOS 環境を構築できれば、アンテナ利得を高めるためのアレイ化などは必要なくなり低コスト化が計れる。また、誘電体の加工のみでよいため、リードタイムの点でも有利である。さらに、[3][4][5] で示される電波放射場所を任意に選べる特長により柔軟なインフラが構築可能となる。[3] では導波路を屈曲することで漏洩した電波による、エリアの拡張を実証した。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ことを実証した。電波伝搬の可逆性により、屈曲箇所は送受信がともに可能なアンテナとなり、さらに曲げる箇所を変えることで柔軟な電波エリア化が可能となる。[4][5] では導波路に別の誘電体を接触させることで、漏洩した電波によるエリア拡張を実証した。このような導波路は、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）と同類と考えることができる。

本研究では、高周波数帯で低損失な特性を持つ導波路と導波路の先端部を加工した高指向性アンテナで構成される導波路アンテナにより、高い空間分解能を達成し、その性能をセキュリ

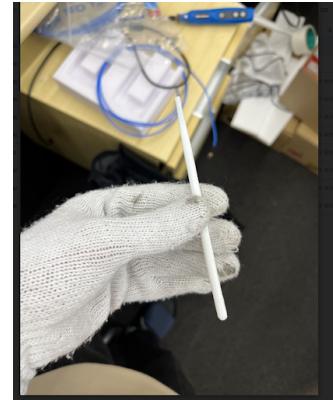


図 1 誘電体導波路

ティ対策に活用することを検討している。そこで、導波路アンテナの設計、製作、測定を通してアンテナとしての指向特性を明らかにし、セキュリティ対策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 章では提案手法、第 4 章では行った導波路のシミュレーション、第 5 章では導波路アンテナの試作について述べ、そして最終章にて本論文をまとめることとする。

2. 関連技術

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

図 2 に示す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、ミリ波を含む高周波数帯の伝送線路として利用される。一般的に導体金属を用いるので、容易に曲げることができず、重い。図 3 に示す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の伝送線路として利用される。高周波数帯での損失は導波管よりも大きいという特徴がある。

図 1 に示す導波路は棒状の誘電体（コア）の周囲を異なる誘電率を有する誘電体（クラッド）で囲んだ構造を持ち、また、レーダーシステム [6] などの利用実績もある。高周波数帯での損失は同軸ケーブルよりは低く導波管と比較し軽くて曲げができる特徴がある。なお、本研究で用いる導波路は、コアを比誘電率 2.1 としたポリテトラフルオロエチレン（PTFE）、クラッドを比誘電率ほぼ 1.00 の空気としたものを用いる。

2.1 導波路アンテナ

本研究では、導波路の先端を加工しアンテナとして機能する導波路アンテナを用いる。予備実験にて先端を裁断した導波路から電波が放射していることを確認している。予備実験では 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 2.1 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ニットで構成される。送信機では、入力された HDMI 信号を 60GHz 帯の広帯域幅 (1.76GHz) の電波に変換して出力し、受信機は受信波から HDMI 信号を生成する。



図 2 金属導波管

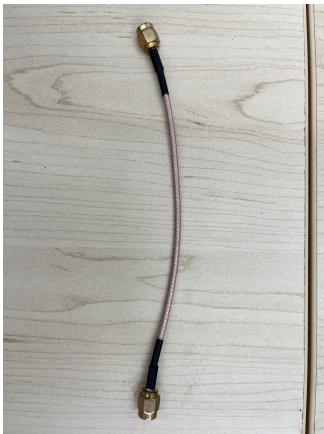


図 3 同軸ケーブル

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

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。図 4 のように導波路アンテナの先端を受信機に向いているときには動画は再生されるが、導波路先端が向いている方向を少しでも動かすと動画が再生されないことから、高い指向特性の放射パターンとなっていることを確認した。

3. 提案手法

本研究では導波路アンテナの高い指向特性を利用したセキュリティ対策を提案する。インターネット社会では個人情報などの秘匿性の高い情報がやり取りされるが、無線を介する場合は電力解析攻撃によって電波を介した情報漏洩のリスクがある。例えば、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くなっており、そのリスクは上がっている。高指向性アンテナを用いることで電波の高空間分解能を上げることができるため、

特定の端末のみに電波を放射することが可能となり、他の端末への情報漏洩を防ぐことができる。ミリ波の特長である大容量通信を可能にしつつ電波のレイヤーにおいて秘匿情報を守ることで、セキュリティ対策を行う。また、導波路アンテナの適用により先に示した問題を解決する。により端末近傍まで電波を届けることができるため、アレイアンテナを用いることなく基本的に端末との間に LOS 環境を構築できる。その結果、ハードウェアの開発コストを抑えることができる。さらに誘電体導波路自体は単純な構造体であり一旦製造工程が確立されれば、複雑な信号処理を必要とする無線システムを導入するのに比べてリードタイムも縮小できる。また、導波路は屈曲時の電波漏洩には注意をする必要があるものの、例えば導波路を室内で引きまわすこともでき、また軽量であることから、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構築できる。最後に、高い指向特性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

例えば図 5 のように天井に導波路アンテナを吊るし、天井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する。隣のブースへ電波放射しない導波路アンテナの指向特性に対する要求条件は導波路アンテナまでの高さとブース同士の距離から逆算すればよい。要求条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 $2 * \arctan 0.5 / 2 = 28^\circ$ の方向にのみ電波を放射する導波路アンテナを設計する。導波路アンテナの設置場所は、例えば天井裏に導波路を引き廻すことで変更できる。

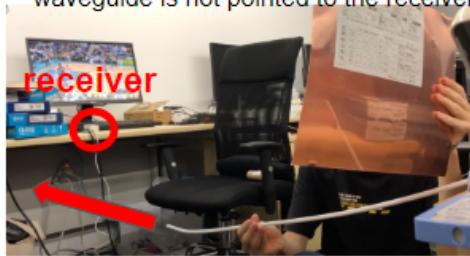
4. シミュレーション

導波路アンテナの指向特性を把握するために電磁界シミュレータ HFSS を用いて導波路アンテナの 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計算した。モデルは導波路先端形状の加工の容易さから図 6 に示す先端裁断型、図 7 に示すコーン型、そして図 8 に示すドーム型の 3 パターンとした。導波路の断面は円形とし、先端形状を取り除いた場合の長さは 50mm、直径は 10mm である。

4.1 シミュレーションの結果と評価

シミュレーション結果を図 9 に示す。50mm で長さを固定した場合について以下に図 9 のようにドーム型が最も高い指向性を示し、ゲインが最大となった。ドーム型の指向性が図 9 のように最も高くなった理由として導波路先端部がその形状からは電波レンズのような効果をもつたためと想定される。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、他の

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

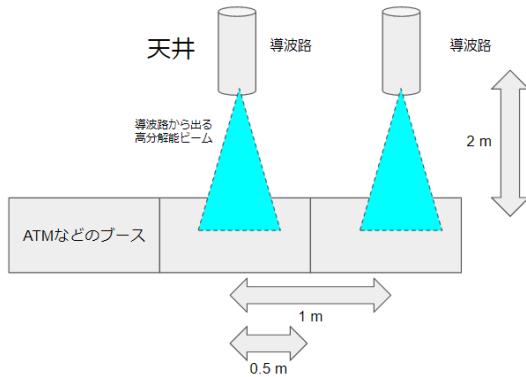


図5 天井から各ブースへ高分解能ミリ波を提供

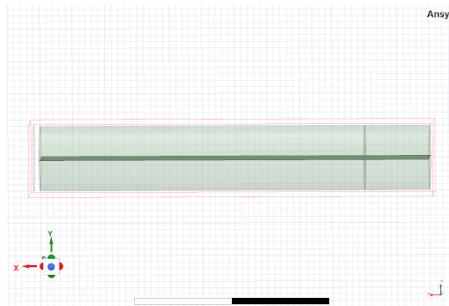


図6 普通の誘電体導波路アンテナ

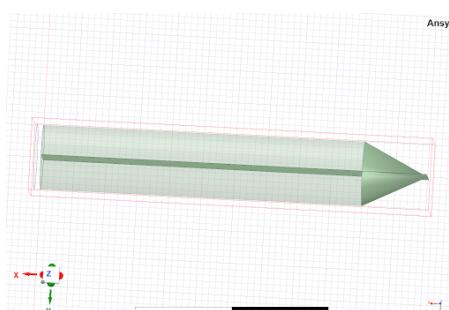


図7 コーン型の誘電体導波路アンテナ

形状と比較して低い指向特性となったと想定される。

5. 導波路アンテナの試作

最も加工が簡単な先端裁断型の導波路アンテナの試作を行つ

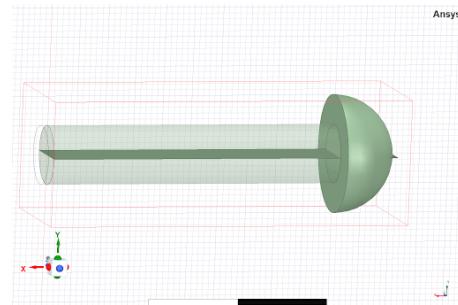


図8 ドーム型の誘電体導波路アンテナ

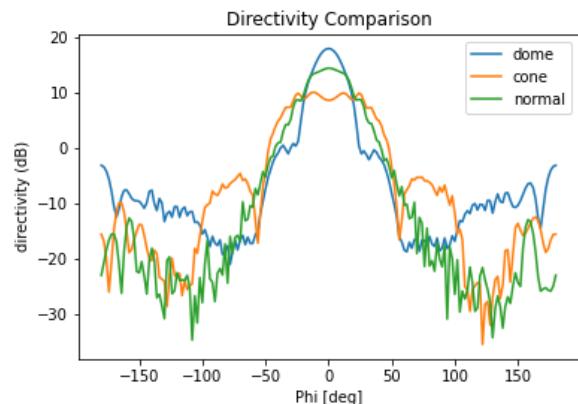


図9 指向性の結果

た。図11に製作した導波路アンテナの写真を示す。また、測定器側のインターフェースとなる同軸ケーブルへ低損失で接続するためのモード変換器も試作した。まず、試作アンテナへの電波の給電状態を示す反射特性を測定した。測定結果を図10に示す。アンテナへの給電を考えた場合、反射特性として-10 dB以下を目標としており、該当周波数にて目標を達成していることを確認した。

次に導波路アンテナの指向性を測定した。測定は電波暗室内で導波路をその先端を中心として回転させ、対向側のアンテナで受信した電力を測定した。図 todo, todo に周波数 27GHz から 29GHz で 0.5GHz 刻みの指向特性であり、図 todo は導波路長が 20cm、図 todo は 40cm の結果である。導波路長を変えてても、指向特性に大きな変化は見られなかった。放射利得が最大利得の半分となる角度範囲を示す半値角はともに 36° であった。したがって、導波路を引き回しても同一先端形状であれば

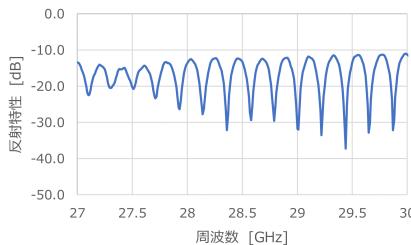


図 10 反射特性

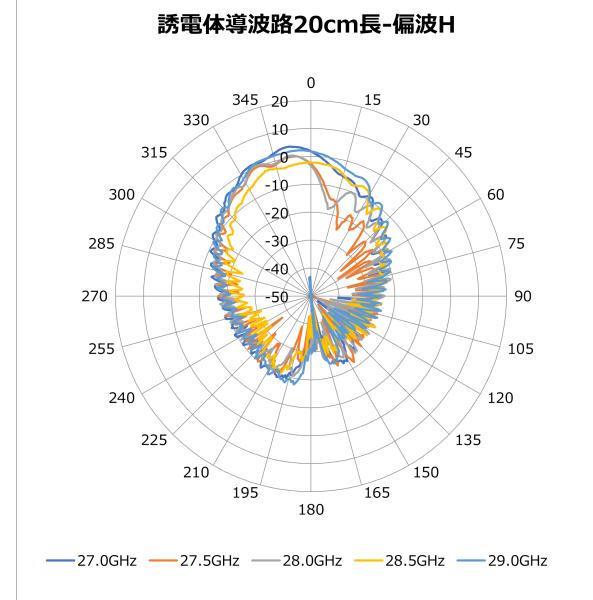


図 12 20cm 長の H 偏波

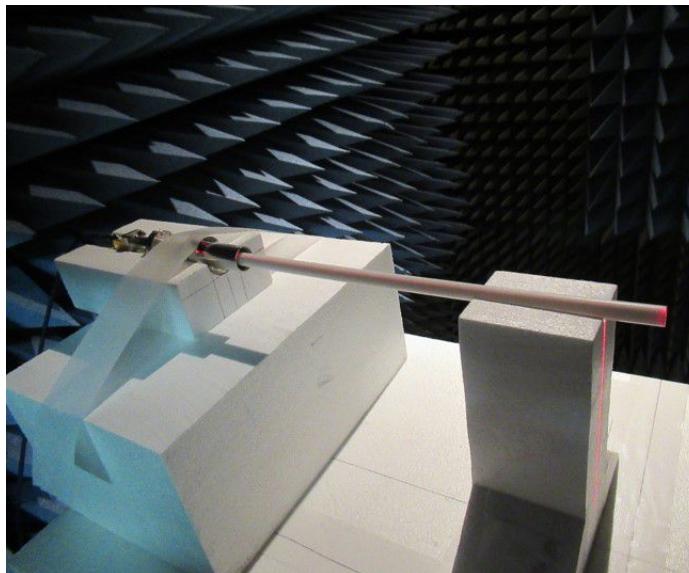


図 11 試作アンテナ

同一指向性が得られ、実際のユースケースにおいても使用可能と考えられる。また、先に述べたユースケースで必要とされる半值角の計算値は 28° であることから、目的の指向性に近い値が得られていることが分かった。図 9 より先端をドーム型とすることにより高い指向性が得られる可能性がある。

6. 今後の展望

6.1 異なる形状での利用の検討

今回は PTFE の導波路に注目して先端を加工した導波路アンテナの設計および製作を行い、指向性を確認したが、PTFE のシートからの電波放射特性の検討を行う予定である。PTFE シートを用いることで、一次元のときに比べてユースケースが広がることが期待できる。

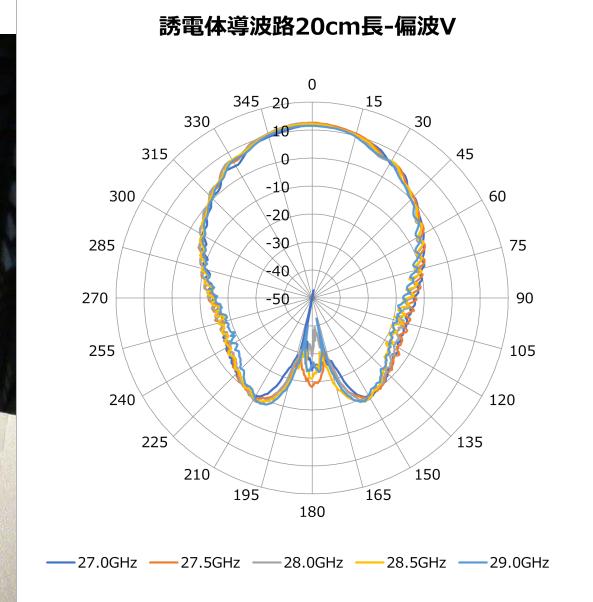


図 13 20cm 長の V 偏波

6.2 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していく。

7. 結論

本研究では導波路アンテナの高い指向特性を利用したセキュリティ対策を提案した。高指向性アンテナを有する導波路を設計、製作し、指向特性を測定した。測定結果から、想定されるユースケースで必要とされる条件に近いものが得られることを確認した。このように、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可能になれば、セキュリティの向上につながる。そしてセキュリティ対策においての課題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
- 誘電体導波路は短納期が期待でき、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となる。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。

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.