

令和 3 年 6 月 10 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2020

課題番号：19K15049

研究課題名(和文) Beyond 5Gに向けたテラヘルツ帯域ピンポイント無線の研究

研究課題名(英文) Research on Pin-Point Terahertz Wireless Communication for Beyond 5G

研究代表者

LEE SANGYEOP (Lee, Sangyeop)

東京工業大学・科学技術創成研究院・助教

研究者番号：50811733

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：現状の有線LANケーブルを用いたデータ伝送から変わり、将来使われるだろうBeyond 5G(5G: 第5世代移動通信)技術を用いたピンポイントの無線通信において、2017年11月にIEEE(Institute of Electrical and Electronics Engineers)が定めた252GHz～322GHz帯域(IEEE standard 802.15.3d)を用い、実現可能性を検討した。周波数帯が上がると、同じアンテナ面積でも高いアンテナ利得が得られること、そして更にレンズと組みあわせることによってピンポイントの通信が実現可能であることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現状の有線LANケーブルを用いたデータ伝送から変わり、将来使われるだろうBeyond 5G技術を用いたピンポイントの無線通信において、2017年11月にIEEEが定めた252GHz～322GHz帯域(IEEE standard 802.15.3d)を用い、実現可能性を検討した。リンクバジェットを計算した結果、アンテナ利得を改善することができれば、今後数百メートルまでは、ピンポイント通信が可能になる。また、周波数帯が上がると、同じアンテナ面積でも高いアンテナ利得が得られること、そして更にレンズと組みあわせることによってピンポイント通信、そしてセキュアな通信が実現可能であることを確認した。

研究成果の概要(英文)：IEEE Standard 802.15.3d was published in 2017, which is the standard for future wireless communication faster than 100 Gb/s. It has a much higher speed than that of 5G communications. In this work, I have confirmed that pinpoint wireless communication using that band can be achieved. In this case, the directivity of the antenna is a significant factor and should be increased using an array and dielectric lenses, and so on.

研究分野：RFシステム

キーワード：通信 Beyond 5G アンテナ

1. 研究開始当初の背景

2020年に始まった第5世代無線通信網(5G)では、数百個の端末がワイヤレス通信でギガビットとなる大容量のデータを利用することが想定されている。更に5Gにおいては、大容量・低遅延のデータを多数の端末に同時に届けるために、指向性を持つ電波伝搬が利用される。そのため、28GHz周波数帯において10Gbps以上のデータ伝送ができるようにビームフォーミング(Beamforming)の研究が広く行われてきた。電子的なビームフォーミングには、位相配列されたアンテナアレイが用いられている。アンテナアレイを用いると、実効的な面積が大きくアンテナ利得が上がり、ビームを狭くして指向性を向上することができる。更に各アンテナ素子の位相や振幅を制御することによってビームの方向を調整することができることからレーダなどにも昔から使われてきた。このような構成で指向性を上げることによって空間的に他の人とデータ干渉が起きる可能性が低くなり、それは即ちセキュリティの向上にもつながる。

Beyond 5G、もしくは6Gと呼ばれる次世代通信では100Gbpsを超える大容量の高速データ伝送が期待されており、そのため、現在使用されている周波数帯を遥かに超え、広い周波数幅が使用可能な高い周波数帯を用いることが必然とされる(図1)。いわゆるテラヘルツ(THz)と呼ばれる周波数帯まで研究が世界各地で行われている。この帯域だと波長が短くなることからアンテナの指向性が更に上がることで更なるピンポイント伝送が可能になるし、またその分力口側の送信出力電力も低くすることができる。しかし、事実上高い周波数帯になっていくと大気などの損失で、端末からの送信電力を増やさないと長距離通信が混乱であることや製造単価が高くなるなどの問題点も出てくる。

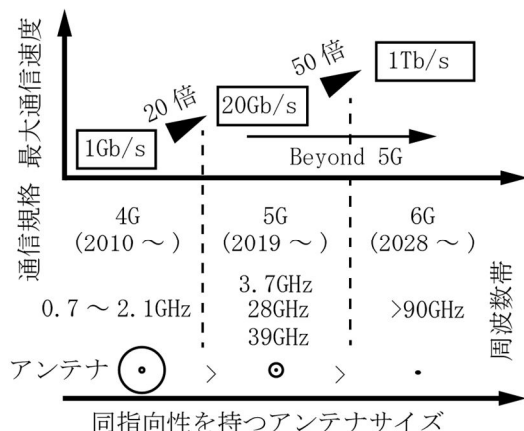


図1 無線通信の発展とアンテナサイズの変化。

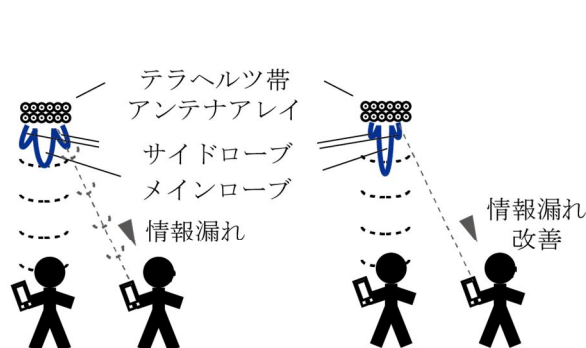


図2 ポイントツーポイント無線。

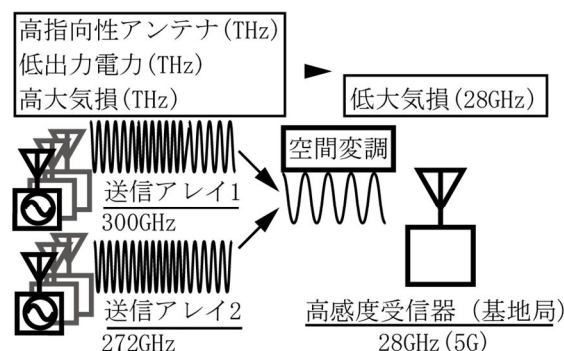


図3 多重変調による空間変調 (送信モード)。

$$\begin{aligned} & \sin(\omega_1 t + \Phi_1) + \sin(\omega_2 t + \Phi_2) \longrightarrow \text{空間結合} \\ & = 2\sin\left\{\frac{(\omega_1 + \omega_2)t}{2} + \frac{(\Phi_1 + \Phi_2)}{2}\right\} \\ & \quad \times \sin\left\{\frac{(\omega_1 - \omega_2)t}{2} + \frac{(\Phi_1 - \Phi_2)}{2}\right\} \end{aligned}$$

多重変調による時間依存性キャンセル
周波数ダウンコンバージョン

図4 空間結合による変調効果。

2. 研究の目的

高い周波数帯になっていくと大気成分による損失で長距離通信が困難な問題点を解決しつつ、本来のテラヘルツ帯の超高速データ伝送のメリットを生かすことを目指す。そのため、端末の送信側は二つのキャリア周波数のテラヘルツ帯アンテナアレイを用い、それぞれのアレイから、データ変調用の変調方式以外にキャリアの周波数変調など多重変調・放射される電磁波が、空間で結合及び空間変調(周波数変換)されることにより、低い周波数の信号を作り上げる手法を考えた。このような構成により、アレイ化による高指向性、そして周波数変換後の周波数帯での低い大気損失特性を得ることができ、より長距離ピンポイントデータ伝送が期待できる。更に、通信規格が変わるたびに基地局の装置の交換などに莫大な費用が掛かることに対して、ある程度5Gの装置を再活用することができるので費用をセーブすることも期待できる。このような技術を用いることによって大容量のデータをピンポイント(pin-point)に伝送でき、アンテナビームによる

空間での情報の拡がりを抑えられるため、よりセキュアな通信が実現できるようになる(図 2)。

3. 研究の方法

端末の送信側は二つのキャリア周波数のテラヘルツ帯アンテナアレイを用い、2) それぞれのアレイから、データ変調用の変調方式以外にキャリアの周波数変調など多重変調される放射される電磁波が、空間で結合及び空間変調(周波数変換)されることにより、図 3、図 4 のように低い周波数の信号を作り上げる手法を考えた。このような構成により、テラヘルツ帯アンテナ素子による高指向性、そして周波数変換後の周波数帯での低い大気損失特性を得ることができ、より長距離ピンポイントデータ伝送が期待できる。

また、配列アンテナに有利なオンチップアンテナ、そしてその配列化についても研究を行う。

機能シミュレーション

シミュレーション MATLAB(MathWorks)ソフトを用いて行う。データ変調方式として一般的な QPSK(Quadrature Phase Shift Keying)や QAM(Quadrature Amplitude Modulation)を想定した時に、空間変調効果を得るための追加変調方法について検討する。

アレイシミュレーション

二つの周波数帯のアンテナアレイが存在する際に指向性及び空間変調効率を最大にするための二つのアレイの配置を工夫し、MATLAB により機能シミュレーションを行う。そして、実際のものとして CMOS のシリコン上のオンチップアンテナを Ansys HFSS などの 3 次元電磁界シミュレータを用いて設計を行い、性能を見積る。

モジュール実験

機能シミュレーション及びアンテナアレイシミュレーション結果を用いて実際の変調モジュールを設計・試作し、空間変調実験を行う。

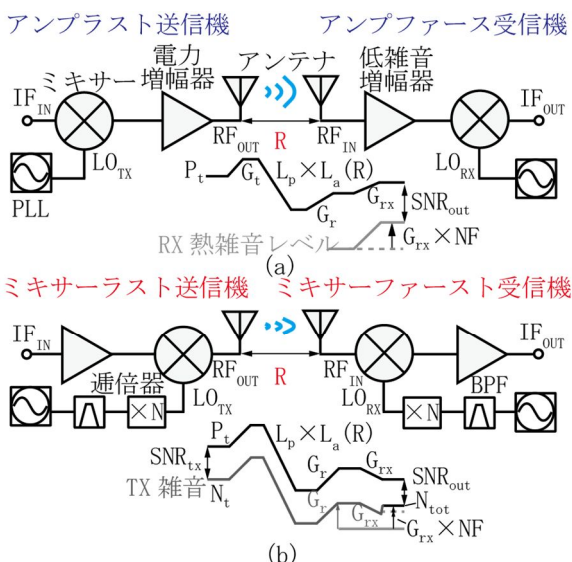


図 5 RF フロントエンドリンクバジェット：
(a) 従来、(b) テラヘルツ帯 [1].

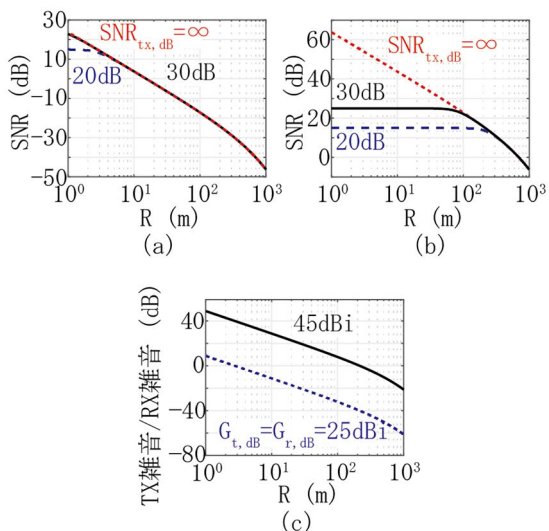


図 6 送信機 SNR による受信段での SNR への影響：
アンテナ利得 ($G_{t,db}=G_{r,db}$): (a) 25dBi, (b) 45dBi,
(c) RX 雑音に対し TX 雑音割合 ($SNR_{tx}=20dB$) [1].

4. 研究成果

現状の有線 LAN ケーブルを用いたデータ伝送から変わり、将来使われるだろう Beyond 5G(5G: 第 5 世代移動通信) 技術を用いたピンポイントの無線通信において、2017 年 11 月に IEEE(Institute of Electrical and Electronics Engineers)が定めた 252GHz~322GHz 帯域 (IEEE standard 802.15.3d)を用い、実現可能性を検討した。テラヘルツ帯通信では、増幅器の実現が難しいことより、ミキサーラスト送信機、ミキサーファースト受信機が主に用いられるようになると予測される。それをもとに、パラメータを決めてリンクバジェットを計算した結果、アンテナ利得を改善することができれば、今後数百メートルまでは、ピンポイント通信が可能になる(図 5、図 6) [1]。また、周波数帯が上がると、同じアンテナ面積でも高いアンテナ利得が得られること、そして更にレンズと組みあわせることによってピンポイントの通信が実現可能であることを確認した。

また、5G から Beyond 5G、もしくは 6G(第 6 世代移動通信)技術と変化する過渡期において、

異なる周波数帯での通信規格を繋ぐためのトライとして、空間周波数変換技術の検討を行った。図3、図4の数式より、多重の変調方式を用いることによって数式上実現可能だが、そのためには、非現実的な性能を持つADC(Analog-to-Digital Converter)やDAC(Digital-to-Analog Converter)、プロセッサなどが必要になるなど、現状の技術では困難であることを確認した。それは、さらにアンテナな回路の周波数帯域を超える帯域特性を求められるようになる。今後、上記のものを現実的に実現のためには、空間上で実現できるサブテラヘルツ(Sub-Terahertz)帯の非線形素子について検討する必要がある。上述のことより、モジュール実験は行うことができなかった。

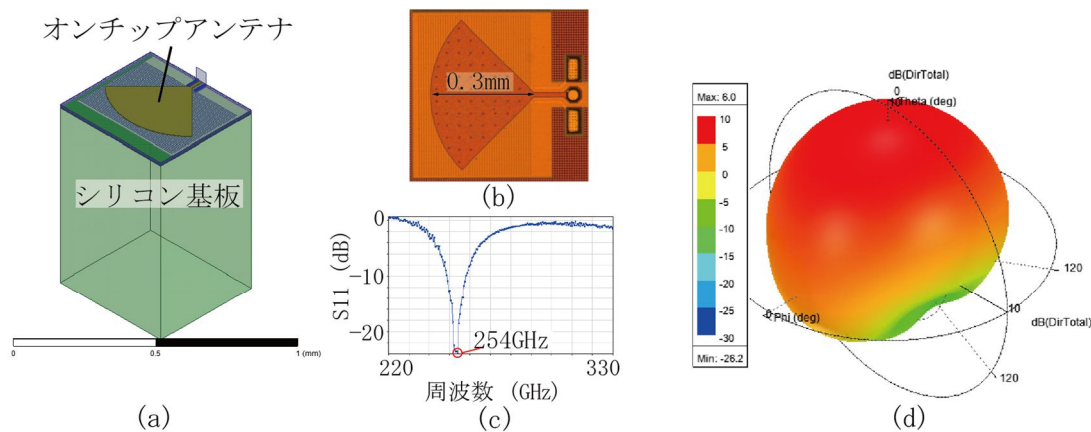


図7 (a) 設計オンチップアンテナ (HFSS), (b) チップ写真, (c) 測定結果 (S11), (d) 放射パターン (シミュレーション)

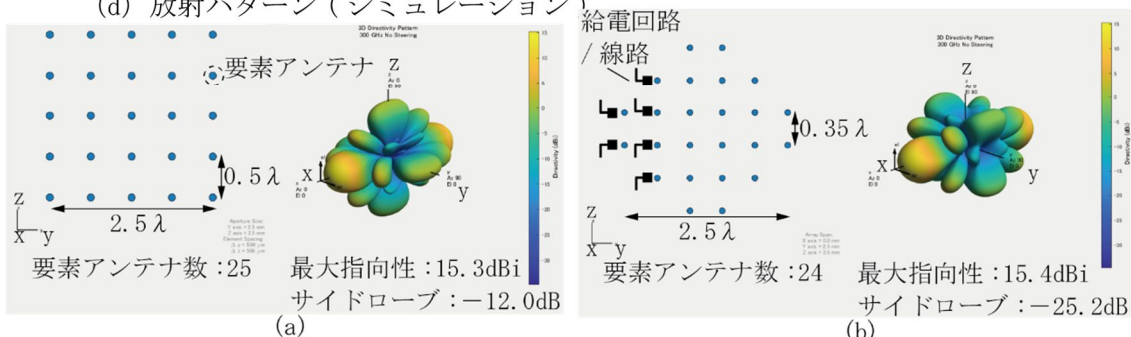


図8 アレイ配置によるアレイファクタ変化.

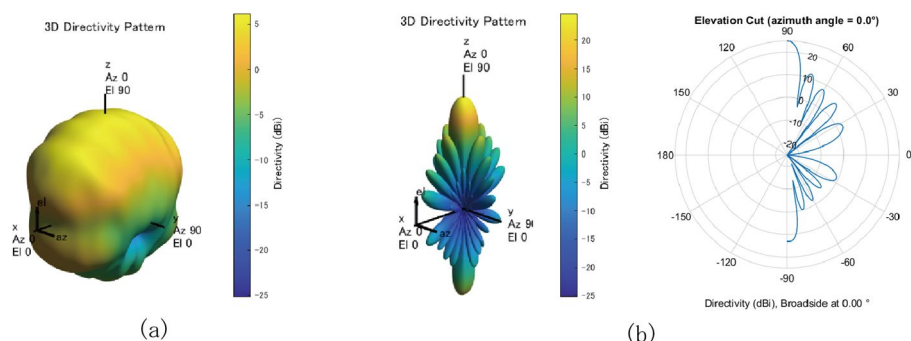


図9 (a) オンチップパッチアンテナの指向性, (b) アレイ化による指向性改善 (10×10アレイ).

CMOSシリコン上のオンチップアンテナを設計(図7(a))・試作(図7(b))・評価(図7(c))をおこなった。扇形の構造のパッチアンテナであり、アンテナの面積を小さくするために、線路の位相定数を向上することが可能なスローウェーブ(slow-wave)構造を用いてパッチ部とグラウンドシルドの間に、信号伝搬方向と直交する、一定間隔の細いメタルがダミーとして入っている。パッド特性を取り除くディエンベッド作業後、測定結果では254GHzで反射係数が最小になった。図7(d)には電磁界シミュレーションで255GHz(シミュレーション基準)での指向性を確認した。要素アンテナの場合、指向性は6dBiであった。アレイ化した時の結果もEMシミュレータ(HFSS)のポストプロセッシング機能で確認し、4×4アレイの場合最大の指向性が17dBiとなった。一方、図8のように要素アンテナ間の間隔など配置を変えることによってグレーティングローブレベルが変化することも確認した。図9には、要素アンテナの指向性のシミュレーション結果とアレイファクタを同時に考慮したときの実際の指向性を示す。アレイの数を増やすと、グレーティングローブの数も増加してしまうが、メインローブの指向性を大きく改善できる。このように、

最適配置および、アレイアンテナにしたとき、位相や振幅調整を適用することが必要不可欠となる。

参考文献

[1] 李尚曄, 藤島実, “次世代無線通信に向けたアンテナ開発: 第13章 Beyond 5G に向けたテラヘルツ帯域ピンポイント無線の研究,” シーエムシー出版, 2020年10月。(研究実績)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 李 尚擘・董 鋭冰（広島大）・原 紳介（NICT）・高野恭弥・天川修平・吉田 毅・藤島 実（広島大）
2. 発表標題 300-GHz Wireless Data Transmission System with Low-SNR CMOS RF Front End
3. 学会等名 電子情報通信学会マイクロ波研究会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 スミス 力紀, 李尚擘, 吉田毅, 藤島実
2. 発表標題 ショートスタブを用いたミリ波帯低損失CMOSパッド
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 新井宏之	4. 発行年 2020年
2. 出版社 シーエムシー出版	5. 総ページ数 370
3. 書名 次世代無線通信に向けたアンテナ開発（担当：第13章）	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 （ローマ字氏名） （研究者番号）	所属研究機関・部局・職 （機関番号）	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------