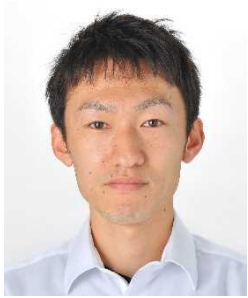


超高速低干渉ミリ波帯無線通信に向けたビーム制御板の研究

Research on beam-control panels for high-speed low-interference millimeter-wave-band wireless communication



戸村 崇 (Takashi TOMURA, Dr. Eng.)

東京工業大学 工学院 電気電子系 助教

(Assistant Professor, Tokyo Institute of Technology, School of Engineering, Department of Electrical and Electronic Engineering)

電子情報通信学会 IEEE

受賞: IEEE MTT-S Japan Young Engineer Award, (2022 年). 電子情報通信学会アンテナ・伝播研究会若手奨励賞 (2018 年) IEEE MTT-S Japan Young Engineer Award (2015 年) 他

著書: Antenna Engineering Handbook, Chapter 26 Millimeter-wave antennas, McGraw-Hill Education (2018 年)

研究専門分野: アンテナ工学 電磁波工学

あらまし

本研究ではアンテナから放射された電波を制御し電波干渉や電波不感地帯を解消するビーム制御板を提案する。アンテナ直上にビーム制御板を装荷することで、通信可能エリアの制御を可能にする。高速無線通信が可能な 60GHz 帯と 120GHz 帯を対象とし、プリント基板加工技術で製作可能なビーム制御板を検討した。誘電体型、ビアレスプリント基板型、長孔ビア型の 3 種を検討した。電磁界解析シミュレータでビーム制御に必要となる特性を実現する形状を設計し、ビーム制御を試作評価した。アンテナと組み合わせ特性評価した結果、いずれもビーム制御板として有用な特性が得られることを確認した。今後は 150GHz 超のさらなる高周波化や空間多重無線通信への適用が課題である。

1. 研究の目的

現在の無線通信では通勤電車や駅構内などの混雑した状況では、干渉や遅延が多く動画やデータのダウンロードに長い待ち時間が必要である。この混雑環境下でのダウンロード待ち時間を極限まで減らすことが本研究の目的である。

現在の無線通信では懐中電灯のように電波が広がるアンテナを使用している。電波が広がるため少ないアンテナ個数で広いエリアをカバーすることができる。駅構内などの混雑地では多くのユーザー数をカバーするためにアンテナを高密度に複数個配置している。隣り合うアンテナから異なる情報が乗った電波が到来するために、干渉が発生し速度が低下してしまう。

この課題に対し我々はレーザービーム形アンテナを用いるミリ波 (60GHz) 帯無線通信を提案した。ミリ波帯は帯域を広く使用できるため高速無線通信が実現できるが、波長が短いため伝搬損失が大きい。しかし大型のアレーアンテナを使用すると、電波を拡散せずにレーザービームのごとく放射することが可能である。ミリ波帯と大型アンテナを組み合わせることで高速かつ低干渉な通信が可能であることを確認した。一方でレーザービーム形アンテナは電波が広がらないため、アンテナの真下以外では電波不感地帯が生じてしまう。広い領域をカバーするにはアンテナの面積を大きくする、もしくは多数のアンテナを隙間なく配置する必要がある。アンテナの大型化は製作上困難であり、またアンテナの個数を増やすことは基地局の数を増やすことになり、大掛かりなシステムとなってしまう。

そこで提案するのがレーザービーム形アンテナに装荷するビーム制御板である。ビーム制御板を通過する電波の速度を巧みに制御することで、アンテナから放射された電波の形状を成形することを可能にする。電波を広げることで限られたアンテナ個数で電波不感地帯をなくし、また広げる幅を調整することで干渉による通信速度低下も防ぐ。

本研究では以下のことを明らかにする。

- ・ビーム制御板の設計論
- ・理論及び実験によるビーム制御可能範囲
- ・製作誤差にロバストな制御板構造
- ・高精度な製作方法
- ・ビーム制御板の高精度特性評価方法

2. 研究の背景

ミリ波帯大型アンテナとしてはパラボラアンテナやレンズアンテナなどの開口面アンテナが広く研究されている。パラボラアンテナは高効率・高利得・広帯域

超高速低干渉ミリ波帯無線通信に向けたビーム制御板の研究

Research on beam-control panels for high-speed low-interference millimeter-wave-band wireless communication

な特性を実現できるため、広く用いられている。しかしながら、パラボラアンテナは3次元の構造であるため、コンパクトな無線機を実現できない。コンパクトな無線機を実現するには平面構造の高利得アンテナが必要となる。パッチアレーアンテナは基板上に構成するため、薄型の平面アンテナを実現でき広く研究されている。しかし、ミリ波帯では給電回路の損失が大きくなるため、高利得かつ高効率な特性を実現できない。

アンテナの外部に構造体を配置して、ビームを制御する研究も行われている。近年盛んに研究されているのがリフレクタアレーアンテナである。懐中電灯形のアンテナと平板を組み合わせ、パラボラアンテナと同様な特性を得るというものである。しかしながら、本研究課題で目指すレーザービーム形通信に適合しない点が2つある。1つ目はアンテナの動作可能帯域が狭いため高速無線通信を実現できない、2つ目は懐中電灯形のアンテナと平板の距離を離して配置する必要があり、アンテナ全体として大掛かりな構成となってしまうという点である。薄型平面アンテナとビーム制御板の組み合わせが本研究の特徴的な点である。

3. 研究の方法・結果

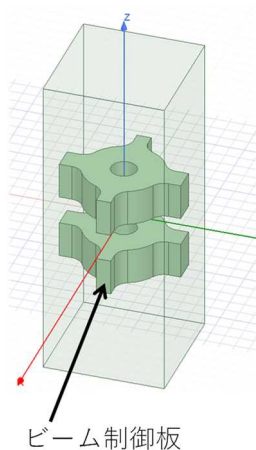


図1 ダブルブリッジ全誘電体型ビーム制御板の素子単位

本研究ではプリント基板^{*1}を用いたビーム制御板として以下3種を研究した。1：全誘電体、2：ビアレスプリント基板、3：長孔ビア。

全誘電体型としてドーナツ型の誘電体を一列に接続

した構造を用いる。この構造の寸法を調整することで、アンテナから放射される電波の方向や形態を制御する。機械的強度を向上するために、図1に示すダブルブリッジ構造のビーム制御板を設計及び試作し、アンテナと組み合わせた系の放射特性の測定実験を行った[1]。従来のシングルブリッジ構造では機械的強度が弱く、製作精度が悪化した。このため機械的強度が強い構造の検討を行った。その構造としてダブルブリッジ構造を有限要素法^{*2}により電磁界解析シミュレーションをした。シミュレーションにより反射特性および透過特性の評価をし、構造を設計した。設計した構造を機械加工で試作し、アンテナとビーム制御板を組み合わせた系を実験により測定評価した(図2)。

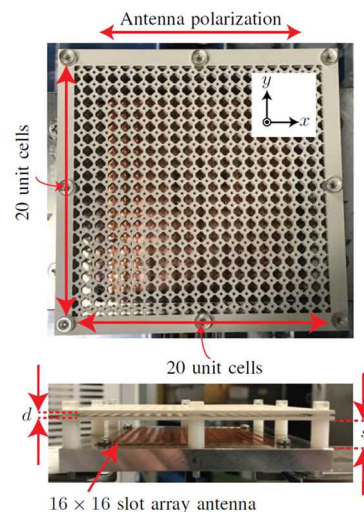


図2 全誘電体型ビーム制御板

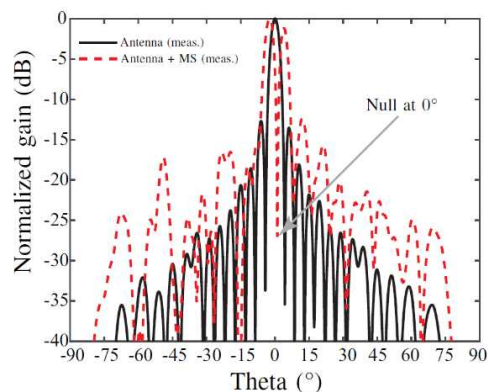


図3 モノパルスビーム制御板の放射パターン
ダブルブリッジ構造を2層にすることでシングルブ

超高速低干渉ミリ波帯無線通信に向けたビーム制御板の研究

Research on beam-control panels for high-speed low-interference millimeter-wave-band wireless communication

リッジ構造と同等の特性が得られることを電磁界シミュレータで確認した。またビーム制御板を試作し、シミュレーション同等の特性が実現できることを確認した。一例としてビーム制御板によりモノパルス放射パターンを実現した例を図3に示す。正面方向でレベルが低く落ちており、2つのビームが構成されていることが確認できる。さらに電界の方向が旋回する円偏波に対しても本ビーム制御板構造が有効であることを示した[2]。

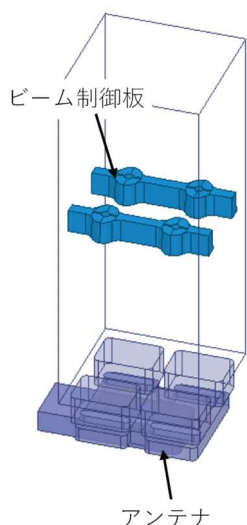


図4 シングルブリッジ全誘電体型ビーム制御板の素子単位

さらなる高周波化として現在の60GHz帯の2倍の周波数帯である120GHz帯を検討する。機械加工では製造公差の影響が大きくなることが予想されるため、レーザー加工による試作を検討する。120GHz帯のビーム制御板としてシングルブリッジ構造(図4)を設計し、レーザー加工で試作した[3]。その結果、素子寸法の誤差は20 μ m以下と良好な製作精度が得られていることを確認した。次に導波管スロットアレーアンテナとビーム制御板を組合せ、反射特性と放射特性を評価した。その結果、反射特性はアンテナ単体時と大きな変化がなく、ビーム制御板の反射を良好に抑圧できていることが確認できた。放射特性は所望のビーム制御を実現していることが分かった。レーザー加工であればシングルブリッジ構造でも高い寸法精度で試作可能であり、120GHz帯でも実現可能であることが判明した。

プリント基板加工技術によるビーム制御板としてビアや銅箔のエッチングを使用した、新たなビーム制御素子構造を検討する。まずは最も簡易な構造として銅箔パターンのみを構成を検討する。銅箔を誘電体基板の両面に構成し共振器として動作させる。電気ダイポール^{*3}と磁気ダイポール^{*4}の共振を適切な周波数になるように設計し反射波を無くす。有限要素法で共振器構造を解析し、所望の周波数帯で反射波が少なくかつ等価位相の調整量が多い構造を模索した。また、アンテナ構造を等価回路で表し、アンテナ動作を説明した。プリント基板加工技術により製作可能な構造を設計した結果、楕円リング構造で低反射かつ透過位相の調整が可能であることが明らかになった[4]。反射を-10dBに抑えつつ、透過位相を270度の範囲で変化できる。この素子を使用し、4種(一様、モノパルス、ビーム走査、ビーム拡大)のビーム制御板を試作した(図5)。

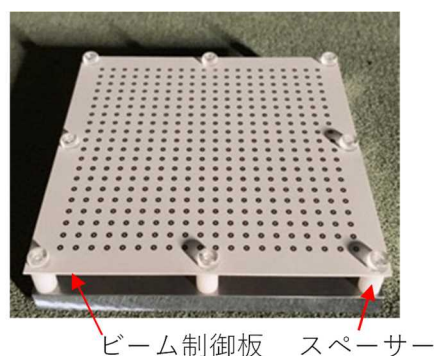


図5 ビアレスプリント基板型ビーム制御板

アンテナ直上にビーム制御板を配置し、アンテナ特性をベクトルネットワークアナライザ及び近傍電磁界平面走査装置により評価した。その結果、所望のビーム制御が可能であることを実験からも確認できた。一例としてメインビーム方向を4度ずらすビーム制御板の放射パターンを図6に示す。ビーム制御板を装荷す

超高速低干渉ミリ波帯無線通信に向けたビーム制御板の研究

Research on beam-control panels for high-speed low-interference millimeter-wave-band wireless communication

ることメインビーム方向が4度ずれていることが分かる。

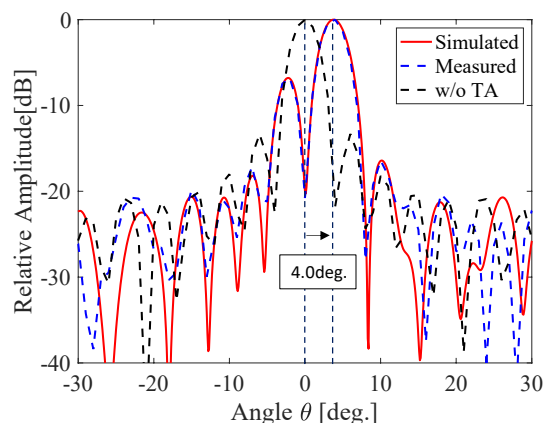


図 6 放射パターン

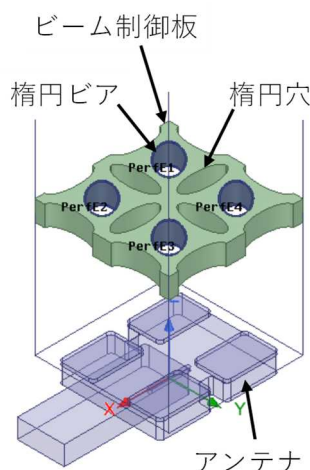


図 7 楕円ビア型放射パターン

次に誘電体基板に切削加工と楕円柱状ビア構造の検討をした。図7に示すように、楕円柱状のビアと楕円穴により構成される。その結果、広帯域に通過特性および反射特性の周波数特性を実現できることを確認した。また、直線偏波を円偏波に変換する性能指標である軸比も広帯域にわたって抑圧できており、本構造の優位性を示した[5]。本ビーム制御板をプリント基板加工技術を用いて試作し、実験により測定評価を行う予定である。製作上、楕円柱のビア構造より長孔構造のほうが生産性に優れるため、長孔構造に変更し試作評価をする。

4. 将来展望

本研究では60GHz帯と120GHz帯を対象にビーム制御板を設計した。今後さらなる通信速度の向上には150GHzを超える準テラヘルツ波の使用が期待されている。300GHz帯では252GHz-322GHzがIEEE 802.15.3dで規格化されており、70GHzという超広帯域な帯域を使用可能である。これは60GHz帯の10倍の帯域であり原理的には通信速度を10倍に向上できる。このような準テラヘルツ波帯で動作するビーム制御板の実現が今後の研究課題である。

300GHz帯でビーム制御板を実現するための課題としては以下2点があげられる。1.高精度な製作方法、2.低損失な材料。1については300GHz帯では波長が1mm程度となるため1 μ m以下の寸法精度が必要になる。現状のプリント基板加工技術では数十 μ mが寸法精度であり、寸法誤差によりビームを十分に制御できない。従って10倍以上の加工精度を持つ製作方法が必要になる。2つ目の低損失な材料については誘電体と導体の2つの損失に起因する。誘電体損失は周波数が高くなるほど大きくなるため従来のPTFEやPPE基板では損失が大きく、電波強度が弱くなってしまう。導体損失は金属表面の粗さに起因しており、こちらも周波数が高くなるにつれて増加してしまう。よって誘電体損失も低く、導体表面粗度が低い材料が必要になる。

通信速度の向上の他のアプローチは空間多重無線通信[6]である。これは同一空間上に直交するビームを放射することで、同一時間・同一周波数でも互いに交わりあうことなく、複数の情報を送受信できる技術である。 n 多重すると通信速度は n 倍に増加することが可能である。この空間多重無線通信に対応するビーム制御板の設計が今後の課題である。空間多重無線通信では電磁界分布の異なる電波を同時に使用するため、異なる電磁界分布の同時入射に対応できるビーム制御板が必要になる。

おわりに

本研究ではビーム型無線通信の通信可能エリア制御のためのビーム制御板を検討した。全誘電体型、ビアレスプリント基板型、長孔ビア型の3種を提案し、

超高速低干渉ミリ波帯無線通信に向けたビーム制御板の研究

Research on beam-control panels for high-speed low-interference millimeter-wave-band wireless communication

60GHz 帯・120GHz 帯の直線偏波・円偏波に対してその有効性を確認した。今後は 150GHz 超の準テラヘルツ波帯や空間多重無線通信へ適用し、さらなる通信速度の向上を目指す。

用語解説

- *1 電子回路を構成するための誘電体基板
- *2 解析領域を四面体で分割しそれらの点での電磁界分布を変分原理に基づき求める手法
- *3 電流により放射される波源
- *4 磁流(電界の時間変化)により放射される波源

参考文献

- [1] M. K. Emara, T. Tomura, J. Hirokawa, and S. Gupta, "All-dielectric Fabry-Perot based compound Huygens' structure for millimeter-wave beam-forming," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 69, no. 1, pp. 237-285, Jan. 2020.
- [2] M. K. Emara, T. Tomura, J. Hirokawa, and S. Gupta, "Fabry-Perot based compound all-dielectric Huygens' structure for circularly-polarized millimeter-wave beamforming," IEEE Antennas Wireless Propag. Lett., vol. 19, no. 10, pp. 1784-1788, Oct. 2020.
- [3] M. K. Emara, S. K. Stuhec-Leonard, T. Tomura, J. Hirokawa, and S. Gupta, "Laser-drilled all-dielectric Huygens' transmit-arrays as 120 GHz band beamformers," IEEE Access, vol. 8, pp. 153815-153825, Sep. 2020.
- [4] S. Sakurai, J. G. N. Rahmeier, T. Tomura, J. Hirokawa, and S. Gupta, "Millimeter-wave Huygens' transmit-arrays based on coupled metallic resonators," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 69, no. 5, pp. 2686-2696, May 2021.
- [5] M. Emara, S. Gupta, T. Tomura, and J. Hirokawa, "Millimeter-wave quarter-wave

plate for diffusion bonded slot array antennas," IEEE Int. Symp. Antennas Propag. (AP-S), MO-A2.2A.5, Dec. 2021.

- [6] T. Tomura, J. Hirokawa, M. Ali, and G. Carpintero, "Millimeter-wave multiplexed wideband wireless link using rectangular-coordinate orthogonal multiplexing (ROM) antennas," J. Lightw. Technol., vol. 39, no. 24, pp. 7821-7830, Dec. 2021.

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～令和3年度に実施されたものです。