

5Gミリ波通信向け メタマテリアル技術を用いた車載アンテナ

Automotive Antenna Using Metamaterial Technology Suitable for
5G mmWave Communication

三木 祐太郎*
Yutaro Miki

山岸 傑
Suguru Yamagishi

桑山 一郎
Ichiro Kuwayama

榊原 久二男
Kunio Sakakibara

自動運転の実現に向けて、高速・大容量や低遅延といった特徴を持つ5Gの活用が期待されている。センシング情報など大量のデータ通信を行うためには、5Gにおいて数百MHzの帯域幅を確保できるミリ波帯の利用が望ましい。ミリ波帯での5Gアンテナは、送受信する電波の方向を制御するビームフォーミングに対応するため、複数のパッチアンテナ素子からなるアレーアンテナを用いる。しかしながら、このアレーアンテナを自動車のルーフ上に搭載する場合、放射特性が乱れてしまうという課題がある。本稿では、Electromagnetic Band Gap (EBG: 電磁バンドギャップ)、Artificial Magnetic Conductor (AMC: 人工磁気導体) といったメタマテリアル技術の応用によりこれらの課題を解決した、5Gミリ波通信に適したアンテナについて報告する。

This paper reports on the development of an antenna suitable for 5G millimeter wave (mmWave) communication, incorporating metamaterial technologies such as Electromagnetic Band Gap (EBG) and Artificial Magnetic Conductor (AMC). The goal is to achieve automated driving by utilizing 5G, which offers high-speed, large-capacity, and low latency features. To enable efficient data communication, particularly for sensing information, the use of mmWave band with a bandwidth of several hundred MHz is required. However, the use of an array antenna consisting of multiple patch antenna elements on the roof of a vehicle poses challenges in terms of radiation characteristics. This study aims to address these challenges through the development of an antenna suitable for 5G mmWave communication.

キーワード: 5G、車載アンテナ、ミリ波、メタマテリアル

1. 緒言

自動運転の実現に向け、官民の協力により種々の技術開発が進められている。自動運転での適切な走行制御のためには、自車内でセンシングしたデータだけでなく、他車・路側機器・サーバ等から様々なデータを取得する必要がある⁽¹⁾。その通信には、相手方との直接通信や携帯電話網を用いることが考えられるが、通信方式の要件として、高速・大容量であることや低遅延であることが求められる。

第5世代移動通信(5G)は、日本国内において2020年3月に商用サービスが開始された⁽²⁾。5Gでは、超高速/多数同時接続・低遅延・高信頼の3つの特徴を持つ。5Gで使用する周波数帯は、6GHz以下の周波数帯と、ミリ波(準ミリ波も含む)の二つの周波数帯に大別される。国内での5Gミリ波に使用される28GHz帯では、各通信キャリアに400MHzもの周波数幅が割り当てられており⁽³⁾、高速・大容量通信に最適であることから、先述した自動運転での各種データ通信にも5Gミリ波の活用が期待される。

(株)オートネットワーク技術研究所では、5Gミリ波通信に適した車載アンテナ技術の開発を進めてきた。本稿では、5Gミリ波アンテナを自動車のルーフ上に搭載する際に発生する課題、及びメタマテリアル^(*)技術の応用により課題を解決したアンテナについて述べる。

2. 5Gミリ波での車載アンテナ

5Gミリ波では、基地局・端末のどちらのアンテナにもビームフォーミング技術が用いられる。これはアンテナが放射する電波を任意の方向に集中させる技術で、波長が短く距離減衰が大きいミリ波帯でも電波をより遠い距離まで飛ばすことが可能となる。また、放射する電波を特定の方向に集中するため、他の通信への干渉を防ぐことができる。

ビームフォーミングには、複数のアンテナ素子からなるアレーアンテナが用いられる。アレーアンテナの各素子を励振する振幅・位相を適切に制御して合成することにより、電波の放射方向を変化させる。

また、MIMO (Multi Input Multi Output) に対応することも必要である。MIMOとは送受信の双方で複数のアンテナシステムを用いて通信することで、時間あたりのデータ通信量を増やし、通信速度を向上させる技術である。5Gミリ波では、アンテナから放射される電波の電界の向き(偏波)に直交する2偏波を用いる偏波MIMO方式が使用される。

5Gミリ波に用いる28GHz帯でのアレーアンテナには、量産の容易さ、コスト等の観点から、プリント基板上に構成されるパッチアンテナが一般的に用いられる。本稿で検討したパッチアレーアンテナの構成を図1に示す。水平方向にビームフォーミングするため、水平方向に4素子・垂直方向に1素子を配列する構成としている。パッチアンテナ素子は

四角形状で、偏波MIMOに対応するために各素子に水平偏波（H偏波）と垂直偏波（V偏波）の各入力を備えている。

図2に自動車への5Gミリ波アンテナの搭載イメージを示す。ミリ波は遮蔽物による電波の減衰の影響が非常に大きい特徴があり、なるべくアンテナの周囲に遮蔽物がない設置環境が望ましいため、アンテナの搭載箇所はルーフ上を想定している（図2 (a)）。通信相手となる基地局は通常ビル上などの高所に設置されるため、ルーフ上のアレーアンテナは斜め上方向きに配置する。本検討ではルーフとアンテナのなす角を60°としている。±45°方向にビームフォーミングする4素子アレーアンテナを90°間隔で面A～面Dまで4方向に配置することで、水平360°方向全てをカバーすることができる（図2 (b)）。

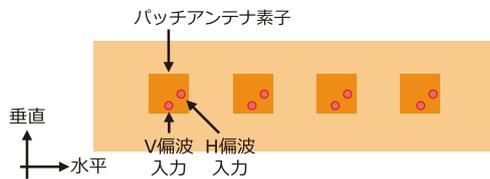


図1 4素子パッチアレーアンテナ検討モデル

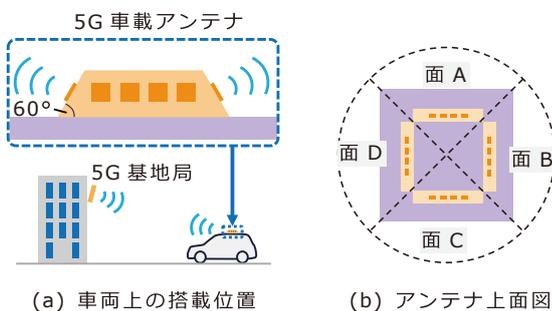


図2 自動車上のアレーアンテナ搭載・配置イメージ

自動車のルーフ上に5Gミリ波アンテナを設置する場合、以下に述べる2つの課題が発生する。それぞれの課題について、発生メカニズムと解決手法を示す。

3. EBGを用いた表面波モードによる指向性乱れの抑制 [課題1]

5Gミリ波において、日本国内の各通信キャリアあたりの割り当て周波数幅は400MHzだが、全体の帯域幅は27GHz～29.5GHzの2,500MHzとなる。アンテナの設計は全てのキャリアで共通化させることが望ましく、そのためアンテナを2,500MHz全帯域で動作させる必要がある。

図3にパッチアンテナ素子の構成の一例を示す。誘電体プリント基板上に放射素子とグラウンド（GND）を対向させた構造となる。パッチアンテナが動作する周波数帯域は誘電体が厚い方が広がるため、2,500MHz幅での動作に必要な誘電体の厚さを選んでいるが、パッチアンテナは誘電体が厚くなるにつれて表面波モードが大きくなる性質がある。表面波モードはGND表面を伝搬する成分で、GNDの端部に到達すると、空間に放射される不要放射となる。この表面波モード由来の不要放射が、放射素子から前方への放射成分と合成され、アンテナの指向性を乱れさせる要因となる。

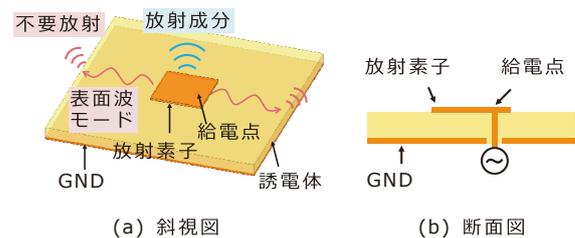


図3 パッチアンテナ構成の一例

表面波モードは放射素子の偏波方向へ強く伝搬する性質があるため、H偏波入力は水平方向、V偏波入力は垂直方向への指向性に対する影響が大きい。本検討での構成（図1）では水平方向にビームフォーミングするため、H偏波の水平面指向性乱れが特に問題となる。検討モデルによるシミュレーション結果として、H偏波入力のNo.3素子を単一励振させた場合のアレーアンテナ基板の表面波モードの分布を図4 (a)に、各素子を単一励振した場合の指向性を図4 (b)に示す。表面波が図の左右方向に伝搬しており（図4 (a)）、指向性でのリップル状の凹凸（乱れ）が発生している（図4 (b)）。アレーアンテナとしての指向性は各パッチ素子の指向性を合成したものとなるため、高い利得を得るためには各素子の指向性が均一であることが望ましいが、表面波モードの影響で素子ごとに指向性が異なっており、アレー合成による利得増加の効果が十分に得られない⁽⁴⁾。

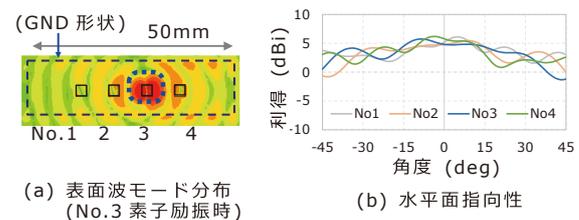


図4 4素子パッチアレーアンテナH偏波入力励振時シミュレーション結果（28GHz）

GND 上の表面波モードを抑制する手法には、EBGの応用がある。図5に EBG の模式図を示す。導体パッチと金属ビアからなるマッシュルーム型素子を一定間隔で周期的に配列することで、回路的には直列にキャパシタンス（導体間ギャップ）、並列にインダクタンス（金属ビア）を装荷することと等価になり、電波が伝搬しない帯域（バンドギャップ）を有する構造となる⁽⁵⁾。

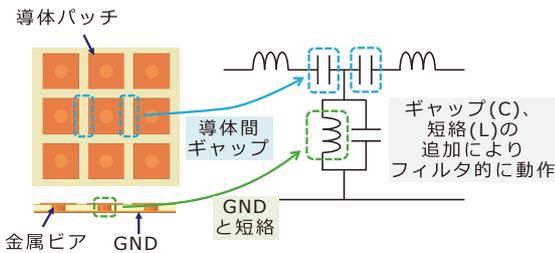


図5 マッシュルーム型EBGの模式図、等価回路図

図6に今回採用したマッシュルーム型EBGの構造図と寸法を示す。導体パッチは、パッチアンテナの放射素子周囲に高密度に配置ができる正六角形状を採用している。設計は導体パッチの大きさと導体間ギャップ、ビア径等のパラメータを適切に設定することにより行った。

設計したEBGのシミュレーション結果となる、バンドギャップ特性を表す分散ダイアグラムを図7に示す。Mode1とMode2で固有周波数が存在しない周波数範囲がバンドギャップとなる。本シミュレーション結果では、25.5GHz~35GHzがバンドギャップとなっており、5Gミ

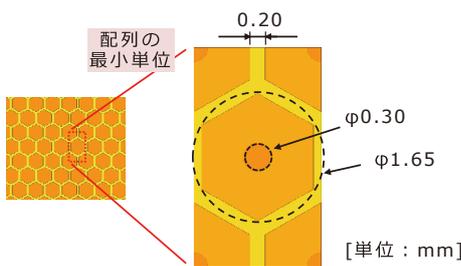


図6 正六角形マッシュルーム型EBG

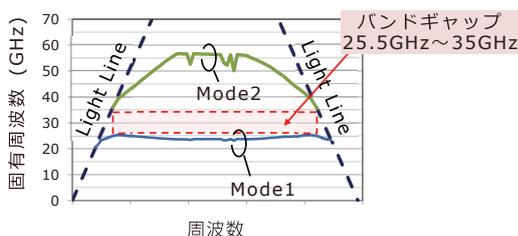


図7 設計したEBGのバンドギャップ特性（分散ダイアグラム）

リ波の周波数帯27GHz~29.5GHzをカバーしている。

このEBGを4素子パッチアレーアンテナに装荷し、シミュレーションを行った。H偏波入力のNo.3素子を単一励振させた際のアレーアンテナ基板上の表面波モードの分布を図8(a)に、各素子を単一励振した場合の指向性を図8(b)に示す。想定通り表面波モードが抑制されており、指向性も各素子において均一になっている。

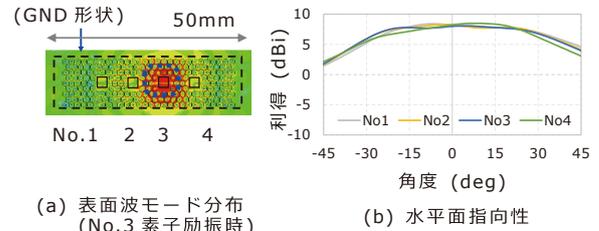
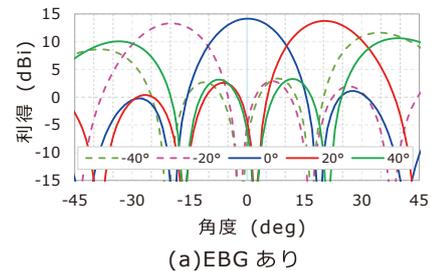


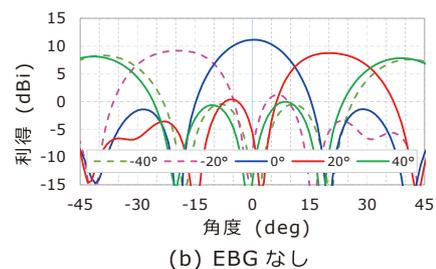
図8 EBG装荷時の4素子パッチアレーアンテナH偏波入力励振時シミュレーション結果（28GHz）

試作評価結果については第5節（図15(a)）にて後述するが、シミュレーションと同様に、表面波モード由来の指向性乱れの発生と、EBG装荷による指向性乱れの抑制が確認できている。

パッチアンテナ単一素子指向性の改善による、アレーアンテナの合成利得向上の効果について述べる⁽⁶⁾。図4および図8のシミュレーション結果を用いて、ビームフォーミング時のアレーアンテナ合成指向性を計算した。No.1-4各素子の励振位相を調整し、合成指向性のピーク角を-40°~+40°の範囲で20°ごとにシフトした水平面指向性を図9に示す。(a) EBGありの方が (b) EBGなしに対してピー



(a) EBGあり



(b) EBGなし

図9 4素子アレーアンテナ合成水平面指向性（H偏波入力、28GHz）

ク角0°の条件で利得が約3dB 高いのをはじめ、EBG 装荷により、いずれのピーク角条件でも利得が向上する効果を確認した。

4. AMCを用いたループの反射によるヌルの発生抑制 [課題2]

車両のループ上にアンテナを設置する場合のもう一つの課題に垂直偏波の垂直面指向性ヌル（落ち込み）の発生がある⁽⁷⁾。

第2節図2 (a) で述べたように、導体板であるループに対して60°の角度をなすようにパッチアンテナ単一素子を配置した場合のシミュレーションを行った。シミュレーションモデルを図10 (a) に、V偏波入力の垂直面（図のzx面）指向性を図10 (b) に示す。67°付近で鋭いヌルが発生しており、基地局がこのヌルの方向にある場合に通信ができなくなるという課題がある。

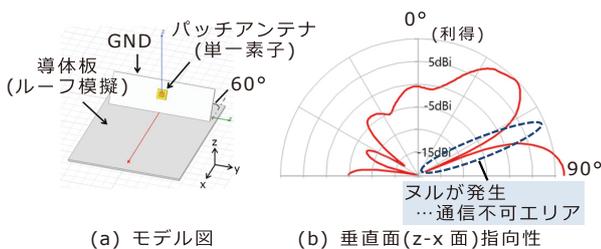


図10 導体板上にパッチアンテナを設置した場合の垂直面指向性 (V偏波入力、28GHz)

本条件における垂直面指向性ヌル発生原理について図11に示す。垂直面指向性は、パッチアンテナ放射素子からの直接波と導体板であるループからの反射波との合成となる。両者が同程度の振幅、かつ逆位相となる場合は電波の打ち消し合いにより、垂直面指向性にヌルができてしまう。

このヌル発生の対策として、反射面にAMCを配置する構成を採用した。導体板で反射する電波は、入射する電波に対し位相が180°変化するが、反射面にAMCを装荷すると、反射波の位相を変化させることができる。このAMCの特徴に着目し、ヌルの抑制を試みた。

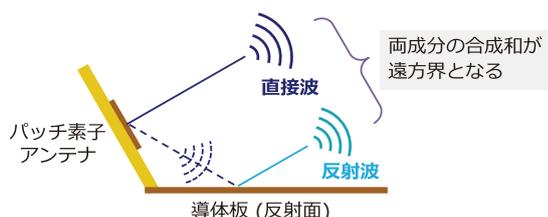


図11 指向性ヌル発生原理

AMCは、EBGと同様にマッシュルーム型素子を周期配列した構造となる。第3節、図6のEBGの設計条件と同じ寸法を用いた、AMCの特性を表す反射位相-入射角特性のシミュレーション結果を図12に示す。導体板では全ての入射角において反射位相が180°となるが、AMCを装荷することで反射位相が0°~+90°に変化している。

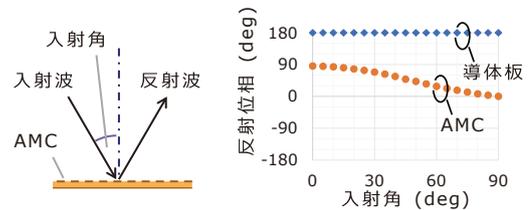


図12 設計したAMCの反射位相-入射角特性 (28GHz)

このAMCを、ループに対応する導体板に配置し、シミュレーションを行った。AMC装荷後の垂直面指向性を図13に示す。AMC装荷前と比較すると、67°付近に発生していたヌルが解消できており、この角度方向でも通信が可能となる。また、シミュレーションにおいてAMC有無での垂直面方向の電界強度分布を比較した結果を図14に示す。(a) AMCなしの条件では、パッチアンテナからの直接波と導体板からの反射波との干渉によるヌル領域が存在するが、(b) AMC装荷の条件では、AMCにより反射波の位相が変化することで干渉がなくなりヌルが解消され、この角度範囲でも通信が可能となる。

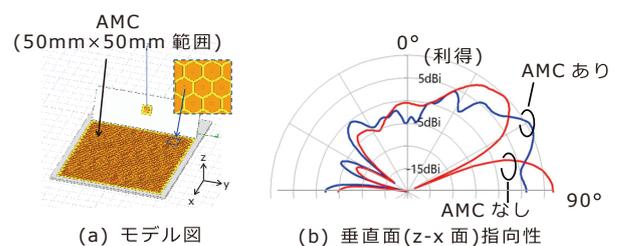


図13 AMC装荷後の導体板上にパッチアンテナを設置した場合の垂直面指向性 (V偏波入力、28GHz)

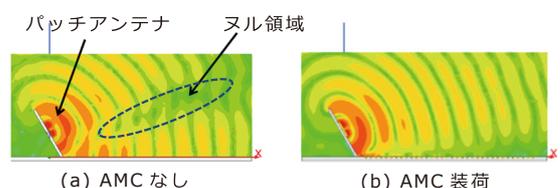


図14 AMC装荷有無の電界強度分布 (V偏波入力、28GHz)

5. アンテナ試作評価結果

シミュレーション結果を基に、パッチアレーアンテナの周囲にEBG、ルーフを模擬した導体板にAMCを装荷したアンテナの試作を行った。写真1に試作アンテナ、写真2に指向性測定風景を示す。また、図15に4素子のうちNo.3素子を単一励振した場合の指向性測定結果を示す。比較のため、EBGとAMCを装荷しないアンテナも試作し測定を行った。

水平面指向性（図15(a)）では、第3節で述べた水平面指向性乱れの抑制の効果、および垂直面指向性（図15(b)）では、第4節で述べたヌル発生抑制の効果が発現し、EBGおよびAMCのアンテナへの装荷の効果が試作実機でも確認でき、EBGおよびAMCのアンテナへの装荷の効果が試作実機でも実証できた。

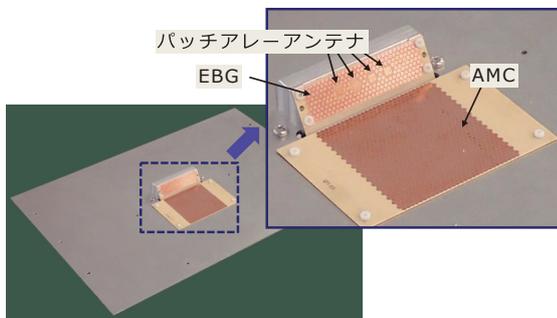


写真1 EBGおよびAMCを装荷した試作アンテナ

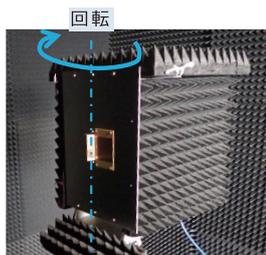


写真2 試作アンテナ指向性測定風景（垂直面）

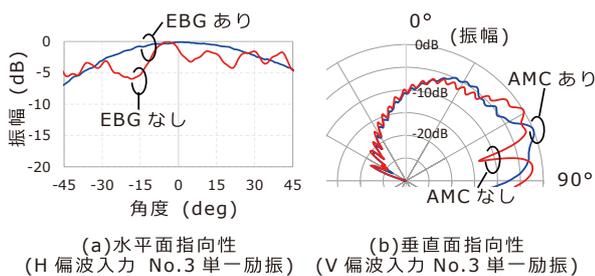


図15 試作アンテナ指向性測定結果（28GHz）

6. 結 言

5Gミリ波通信向けのアレーアンテナを自動車ルーフ上に搭載する際に発生する2つの課題について、その発生メカニズムの解説と、メタマテリアル技術の応用による課題の解決について述べた。表面波モードによる水平面指向性の乱れ、ルーフからの反射による垂直面指向性のヌル発生に対し、EBGやAMCといった技術の応用により解決し、車載条件に適する性能を持つアンテナを開発した。本技術の活用により、自動運転社会の早期実現に寄与することを期待する。

用語集

※1 メタマテリアル

波長よりも小さい構造を周期的に配列することで、自然界に存在し得ない機能（負の誘電率を持つ等）を生じるように設計された、人工的な機能材料。

参考文献

- (1) K. Sakaguchi, et al., "Towards mmWave V2X in 5G and Beyond to Support Automated Driving," IEICE Transactions on Communication, vol. E104-B, no.6 (June 2021)
- (2) 第5世代モバイル推進フォーラム ミリ波普及推進アドホック、「5GMF 白書「ミリ波普及による5Gの高度化 第2.0版」」(March 2023)
- (3) 総務省、「第5世代移動通信システム（5G）の導入のための特定基地局の開設計画の認定（概要）」(April 2019)
- (4) 山岸傑、「ミリ波帯プリント基板アンテナに関する検討」、信学技報、AP2022-20 (June 2022)
- (5) D. Sievenpiper, L Zhang, R. F. Jimenez Broas, N. G. Alexopolous, and E. Yablonovitch, "High-Impedance Electromagnetics Surface with a Forbidden Frequency Band," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 47, No. 11, pp.2059-2074 (November 1999)
- (6) 三木祐太郎、山岸傑、桑山一郎、榊原久二男、「EBGを用いたパッチアレーアンテナの指向性改善」、信学総大、BS-1-1 (March 2021)
- (7) 三木祐太郎、山岸傑、桑山一郎、榊原久二男、「AMCを用いたミリ波帯アンテナの垂直面指向性改善」、信学総大、B-1-133 (March 2022)

執 筆 者

三木祐太郎* : (株)オートネットワーク技術研究所
主査



山岸 傑 : (株)オートネットワーク技術研究所
部長



桑山 一郎 : (株)オートネットワーク技術研究所
主幹



神原久二男 : 名古屋工業大学 教授
博士 (工学)



*主執筆者