

# 車載5Gミリ波アレーアンテナの ビームフォーミングと通信性能の動的評価

Dynamic Evaluation of Beamforming and Communication Performance of Automotive 5G Millimeter-wave Array Antennas

三木 祐太郎\*  
Yutaro Miki

山岸 傑  
Suguru Yamagishi

桑山 一郎  
Ichiro Kuwayama

村田 博司  
Hiroshi Murata

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。ミリ波帯の5Gアンテナは、電波を遠くまで飛ばすためにビームフォーミング技術を用いている。筆者らは、5Gミリ波アンテナを搭載した車両が走行中にビームフォーミング制御をしながら基地局と通信するシナリオを策定し、5G信号を用いて動的なシステム評価を行った。本稿では、シナリオに基づいた評価手法及びその評価結果について報告する。

For the realization of autonomous driving, 5G is expected to be used due to its superior features such as high speed, large capacity, and low latency capabilities. To enable large-scale data communication, such as sensing information transmission, it is desirable to use the millimeter-wave band, which has a bandwidth of several hundred megahertz in 5G. 5G millimeter-wave antennas use beamforming technology to transmit radio waves over long distances. We set up a scenario where a vehicle equipped with a 5G millimeter-wave antenna communicates with a base station and performs beamforming control while driving, and dynamically evaluated it using 5G signals. This paper reports the evaluation method and results based on the proposed scenario.

キーワード：5G、車載アンテナ、ミリ波、ビームフォーミング

## 1. 緒言

モビリティ業界では自動運転の社会実装に向け、官民の協力により種々の技術開発が進められている。自動運転では、車両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し、それらを統合・処理することにより適切に制御される<sup>(1)</sup>。車両と相手方とのデータ通信には、携帯電話網を介した通信や、機器間の直接通信が検討されている。

携帯電話網について、現在普及が進む第5世代移動通信(5G)は、超高速/多数同時接続・低遅延・高信頼の3つの特徴を有しており<sup>(2)</sup>、自動運転に必要な各種データ通信の中でも、高精細な3次元マップなどの大容量データの伝送などで特に活用が期待されている。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帯は、各通信事業者に400MHzもの広い周波数帯域幅が割り当てられており、先述した5Gの3つの特徴を最大限活用できる周波数帯である。

当社グループでは、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<sup>(3)-(5)</sup>。その中で、アンテナ単独での性能とシステムとしての5G通信性能との関連を評価するために、車両に搭載された5Gミリ波アンテナが基地局と通信するシナリオを策定し、そのシナリオに沿った動

動的なシステム評価実験を行った。その結果、ビームフォーミングを適切に行うことで良好に5G通信が行えることを確認したため、本稿ではその評価手法及び評価結果について報告する。

## 2. 車載5Gミリ波アンテナ

ミリ波帯は、先述の通り広い周波数帯域が使用できるため高速データ通信が可能となる利点がある一方、第4世代移動通信(4G、LTE)で用いられている周波数帯である0.7GHz~3.5GHz帯と比べて距離減衰が大きいいため、電波が遠くまで届かないという欠点がある。この欠点を補うため、5Gミリ波帯のアンテナにはビームフォーミング技術が適用される。この技術は、複数のアンテナ素子で構成されるアレーアンテナの各素子に給電される電波の振幅と位相を変更することでアンテナが放射する電波を任意の方向に制御・集中させることで、より遠くまで電波を飛ばすことができるものである。

本検討で用いるアレーアンテナの正面図及び上面図を図1に示す。変性PPE樹脂製プリント基板を用いたパッチアンテナ4素子を半波長間隔で配置し、ビームフォーミングにより水平方向の放射ピーク方向を制御する構成とした。

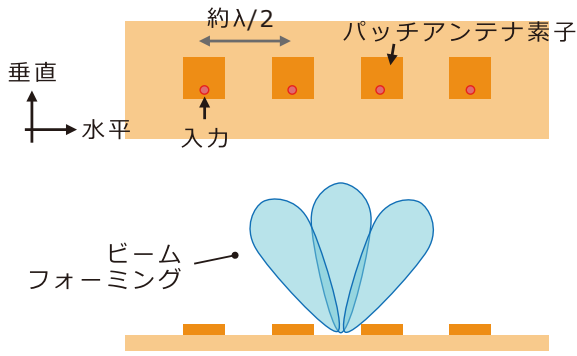


図1 5Gミリ波向け4素子アレーアンテナ

ビームフォーミングの効果の説明として、本アレーアンテナの28GHzにおける水平面指向性のシミュレーション結果を図2に示す。図2(a)はアンテナの正面(0°)方向、図2(b)はアンテナ正面から+30°方向に放射ピーク方向とした条件で、図示するように基地局と対向し、アレーアンテナを時計周りに回転させたときの基地局方向の電波放射強度 (Amplitude) を実線で描図している。図2(b)では、アンテナが矢印の方向に30°回転したときに放射ピーク方向が基地局を向き、強度が最大となる。図2(a)(b)各図の破線は、通信相手である基地局の方向に応じて放射ピーク方向を10°間隔で切り替えた場合の指向性を示している。

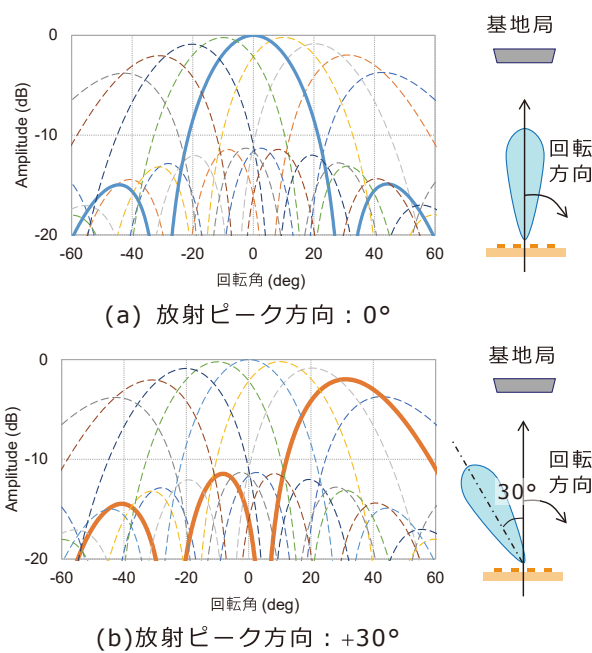


図2 水平面指向性のビームフォーミング特性 @28GHz

図2(a)で放射ピーク方向である0°に対し、アンテナが+30°方向に回転すると基地局は放射ピーク方向から大きく離れ、電波放射強度は-20dB (1/100) 以下のレベルに低下し、通信が不能となってしまふ。一方、図2(b)では+30°方向に回転したときに高い電波放射強度が得られ、通信が可能となる。このようにビームフォーミングを用いたピーク方向の制御により、アンテナの正面方向から離れた位置関係にある基地局とも良好に通信が行うことができる。

本アンテナを自動車へ搭載したイメージを図3に示す<sup>(3)</sup>。ミリ波帯の電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3(a))。また、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、ルーフ上のアンテナは斜め上方向き配置とする。本検討では、水平方向からの打ち上げ角を30°とした。

水平方向においては、ビームフォーミングにより電波放射範囲を±45°とする4素子アレーアンテナを90°間隔でA~Dまで4方向に配置することで、水平360°方向全てをカバー可能としている(図3(b))。

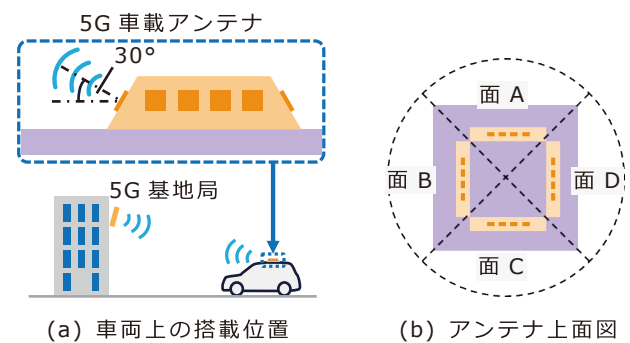


図3 自動車上のアレーアンテナ搭載・配置イメージ

### 3. ビームフォーミング特性の評価

#### 3-1 評価シナリオ

上記のようなアンテナを車両に配置した場合において、ビームフォーミングを行いながら基地局との5G通信を行う条件として、車両が基地局の設置された交差点に接近、右折し、交差点から離れるシナリオを設定した(図4)<sup>(6)</sup>。

本シナリオでは、車両の位置によって刻々と図示するように基地局の方向が変化し、放射ピーク方向もそれに対応し切り替わることとなる。本検討では、実際の5G通信と同じ変調信号を用いて、アンテナに対し基地局の方向が動的に変化する条件において、放射ピーク方向を変えながら測定を行うことができる実験評価系を構築し評価を行った。

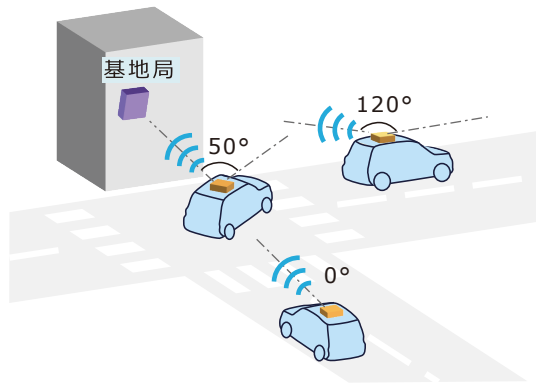


図4 実験シナリオ

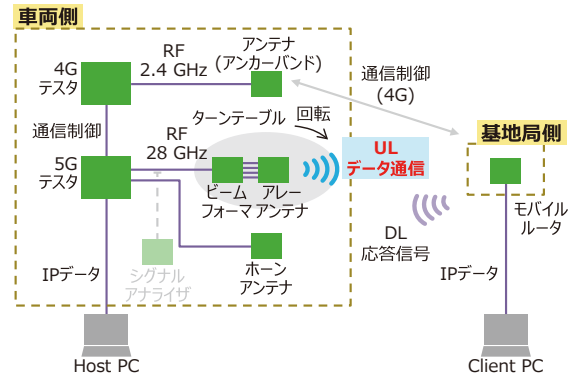
### 3-2 評価系

本検討で使用した実験評価システムを図5に示す。評価対象であるアレーアンテナは、5G テスタに接続される。アレーアンテナと対向する通信相手（基地局）にはモバイルルータを用いて5Gの信号を送受信するシステムとした。5G テスタとアレーアンテナの間に、各素子に給電する振幅と位相を制御するビームフォーマを接続し、放射ピーク方向を制御している。

加えて、以下の点が本評価系統の特徴である。

- ・NSA方式<sup>\*1</sup>で通信を行うため、アンカーバンド<sup>\*2</sup>接続向けに、4G テスタ及び4G用アンテナを配置する。
- ・通信負荷として、5G テスタとモバイルルータにそれぞれPCを接続し、PC間でIPデータ通信を行う。
- ・Uplink回線（UL、通信方向は車両側（アレーアンテナ）から基地局（モバイルルータ））では、スループット<sup>\*3</sup>を測定する。
- ・Downlink回線（DL、通信方向は基地局から車両側）では、EVM<sup>\*4</sup>および使用周波数帯域内の受信電力（Ch. Power）を測定する。
- ・車両側の送受信の系統は分離されている。評価をしない回線（UL実験では受信側、DL実験では送信側）は、応答信号を伝送するが、安定して送受信ができるアンテナとしてホーンアンテナを用いる。

Uplink(UL)実験系統：アレーアンテナは送信で使用



DownLink(DL)実験系統：アレーアンテナは受信で使用

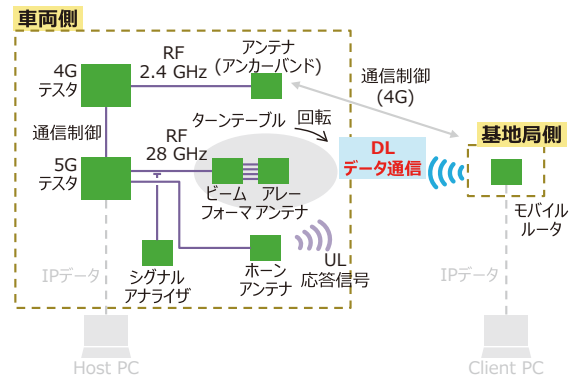


図5 実験評価系統

図5に示した実験評価系統を、図6に示すように実際に電波暗室内に構築した。車載5Gアンテナであるアレーアンテナをターンテーブル上に置き、ターンテーブルを回転させることにより図4の基地局の役割に相当するモバイルルータに対するアレーアンテナの方向角φを変化させる。また、アレーアンテナは図3(a)で示したように水平方向からの打ち上げ角30°となっているため、ターンテーブルの回転軸を30°傾け、基地局方向に電波が放射されるように配置している。

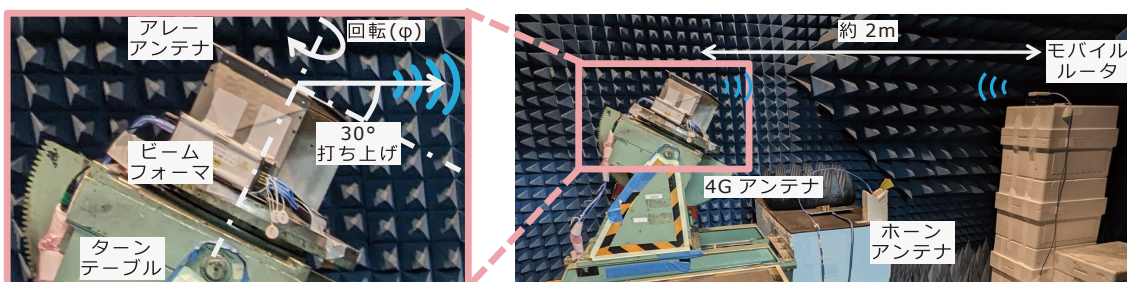


図6 実験風景

## 4. ビームフォーミング特性

### 4-1 静的評価

まず静的特性評価として、**図7**に示すように、**図3 (b)**のアレーアンテナ4面のうち1面 (A面) のみを取り出して評価を行った。ビームフォーミングの放射ピーク方向は $0^\circ / \pm 20^\circ / \pm 40^\circ$ の5条件とした。各放射ピーク方向において、基地局に対するアレーアンテナの方向角 $\phi$ を変化させ、受信電力・EVM・スループットを測定し、各放射ピーク方向で通信ができることの確認を行った。

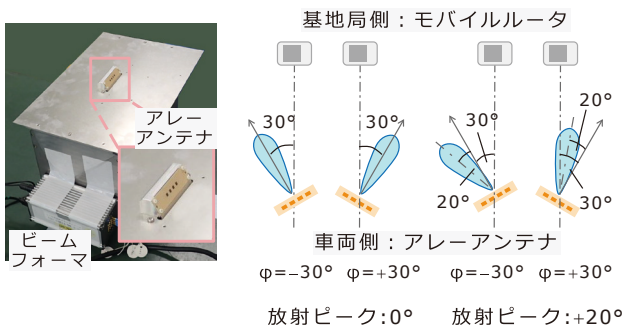
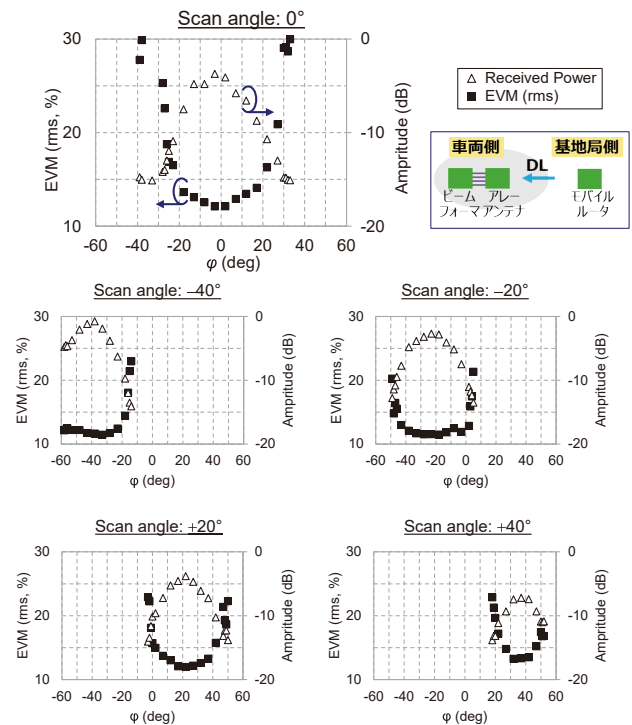


図7 静的評価に用いたアレーアンテナ

以下に測定結果と各結果の説明を記す。

**図8**は各放射ピーク方向 (Scan Angle) における5G信号の受信電力強度 (Received Power、単位: dB。最大値を0dBにて規格化) と指向性 (Directivity) のシミュレーション結果との比較である。指向性は、**図2**から各放射ピーク方向の値を抜き出して描図している。左右非対称性がみ



(a) EVM と受信電力強度の比較

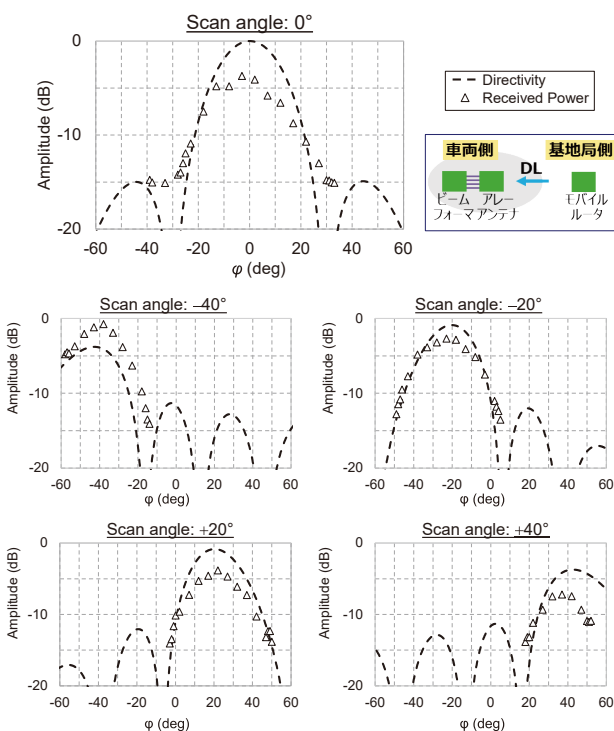
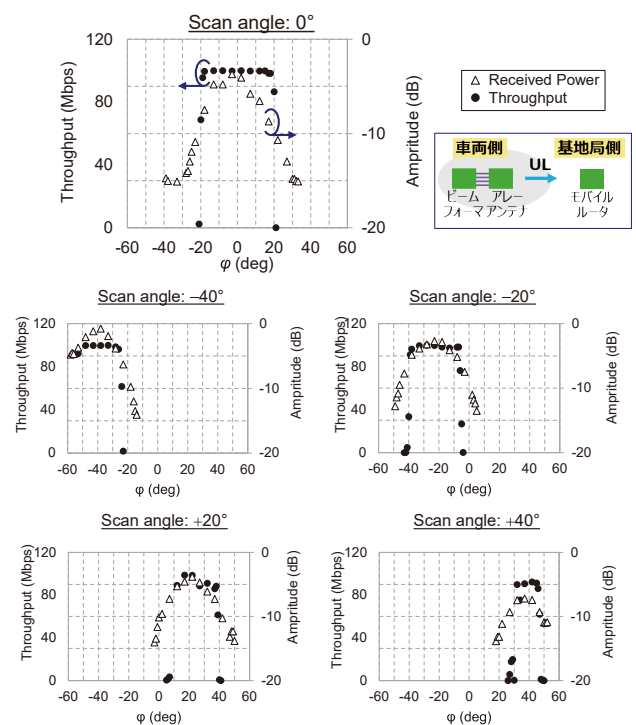


図8 受信電力強度とシミュレーション結果の比較



(b) スループットと受信電力強度の比較

図9 EVM、スループットと受信電力強度の比較

られるものの、最大値を取る角度は一致しており、受信電力と指向性のシミュレーション結果は概ね近い値となっている。

図9 (a) はEVMの実効値 (rms、単位：%) と受信電力強度とを比較しており、受信電力強度が高い点ほどEVMは低い、つまり信号品質がよいことがわかる。(b) はスループット (Throughput、単位：Mbps) と受信電力強度との比較であり、変調条件等で決まる理論値で頭打ちになっているものの、受信電力強度が大きい角度ほど高いスループットが得られている。各測定結果において、受信電力強度とEVMには負の相関、受信電力強度とスループットには正の相関がみられており、概ね想定通りの結果が得られた。

#### 4-2 動的評価

次に、図4に示したシナリオを再現する動的特性評価として、図10に示すようにアレーアンテナを90°間隔に4面配置し、アレーアンテナ面の切替えを含むシステム評価を行った。回転対称の配置であることから、4面のうちA面とB面の切替え部を抜粋し、測定する基地局の方向角 $\phi$ の範囲を0°～140°とした。放射ピーク方向は、基地局の方向角 $\phi$ が5°、15°、…と10°回転するごとに10°ずつ切り替える制御とした。これにより、放射ピーク方向の切り替え、及びアンテナ面切り替えの際のEVM・スループットを確認した。

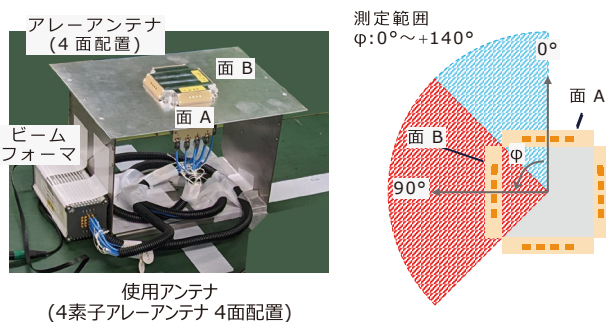


図10 動的評価で用いたアレーアンテナ

図11に、UL側系統でのスループット測定風景を示す。方向角 $\phi$ が+56.4°、放射ピーク方向が+60°であることを示す。測定中、放射ピーク方向の切り替え時の通信状態をモニタした結果、 $\phi=45^\circ$ 付近、A面とB面とのアンテナ切替え時にスループットが若干低下するが、データ通信の途絶は起こらず、良好な通信が継続することを確認した。

また図12に、上記実験で得られたEVMとスループットの各値を5°間隔でプロットした結果を示す。45°付近でEVMの一部の劣化が見られるが、スループットは測定したほぼ全範囲で理論値が得られており、本シナリオにおいて良好に通信できていることが確認できた。

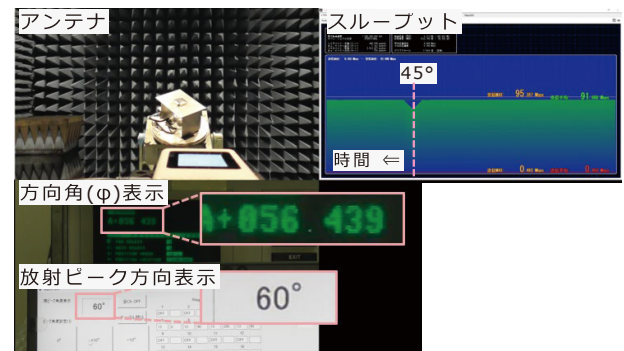


図11 動的評価 (スループット) の測定風景

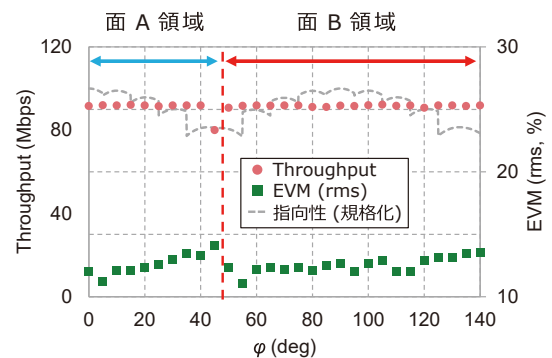


図12 動的評価の測定結果

## 5. 結 言

本稿では、5Gミリ波アレーアンテナを自動車に搭載し、基地局と通信するシナリオを想定したアンテナ評価系を構築し、諸特性を測定する評価を行った。その結果、ビームフォーミングを適切に行うことで途切れることなく5G通信が可能であることを確認した。本取り組みで行った、通信システム全体で評価を行うことにより、アンテナの持つ指向性やビームフォーミング特性と、信号電力・スループット・EVMといった各通信性能指標との関連付けを実現できた。このことにより、新しいアンテナ性能評価指標の提案に繋がると考える。

今後は、アンテナ性能面の向上による通信性能向上への貢献も確認していきたい。具体的には、筆者らの検討であるメタマテリアル<sup>※5</sup>技術を用いたアンテナ指向性の改善効果<sup>(3)~(5)</sup>や、当社グループが開発するフッ素樹脂製フレキシブルプリント基板FLUOROCUIT<sup>(7)</sup>をアンテナ基板に用いた場合の低損失効果の検証を進めたいと考える。

## 用語集

## ※1 NSA

Non-Standalone 方式の略語。既存の4G ネットワークにて通信制御を行い、データの送受信に5G 接続を用いることで、4G で確立されている通信エリアの広さと5G による高速通信が両立可能となる技術。これに対し、5G ネットワークのみで接続する方式を Standalone (SA) 方式と呼ぶ。

## ※2 アンカーバンド

NSA 方式において、通信制御に用いられる4G での無線接続のこと。

## ※3 スループット

ネットワークや通信回線の通信速度を示す指標で、単位時間あたりのデータ送受信量を表す。

## ※4 EVM

Error Vector Magnitude の略語。信号の理想的な位置から実際の位置までの差の大きさで、無線通信における信号の品質を示す指標。EVM が小さいほど、正確に信号が伝送できていることを示す。

## ※5 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。

・FLUOROCUIT は住友電気工業㈱の登録商標です。

## 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、「5GMMF 白書「ミリ波普及による5Gの高度化 第2.0版」」(March 2023)
- (3) 三木祐太郎、山岸傑、桑山一郎、榊原久二男、「EBCG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)
- (4) 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)
- (5) 三木祐太郎、山岸傑、桑山一郎、榊原久二男、「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」、住友電工テクニカルレビュー 第204号 (January 2024)
- (6) 三木祐太郎、山岸傑、桑山一郎、村田博司、「5G 変調波を用いた28GHz アレーアンテナのビームフォーミング特性の測定」、無線端末・アンテナシステム測定技術研究会 (AMT)、AMT2023-17 (December 2023)
- (7) 住友電工 フッ素樹脂基板 高周波FPC  
<https://sei.co.jp/fluorocuit/> (2024/5/17確認)

## 執筆者

三木祐太郎\* : (株)オートネットワーク技術研究所  
グループ長



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



村田 博司 : 三重大学 教授  
博士 (工学)



\* 主執筆者