

# ミリ波通信モジュールのOver-the-Air試験技術

電子応用技術R&Dセンター 余 俊<sup>1</sup>・和田 英之<sup>2</sup>・小林 聖<sup>3</sup>

## Over-the-Air Testing on Millimeter-Wave Communication Modules

J. Yu, H. Wada, and K. Kobayashi

本稿では、ミリ波通信モジュールの特性評価に用いられるOver-The-Air (OTA) 試験技術について述べている。まず、ミリ波通信モジュールの特性評価において、OTA試験が必要不可欠となっている理由について示す。OTA試験系の基本構成と、この試験で得られる重要な2つの性能指標である、等価等方放射電力 (EIRP) と、等価等方感度 (EIS) について解説している。次に、60 GHzミリ波帯における試験系、EIRPおよびEISの実測結果を示す。本試験で得られる結果は、実フィールドでの無線通信回線の品質に直結する重要なパラメータである。

This paper describes over-the-air (OTA) testing methodology used for the performance evaluation of millimeter-wave (mmWave) communication modules. First, the reason why OTA testing is indispensable for characterizing mmWave communication modules is explained. Next, a basic configuration for OTA testing is illustrated. And two important performance metrics obtained in OTA testing are described. They include equivalent isotropic radiated power (EIRP) and equivalent isotropic sensitivity (EIS). Furthermore, the actual EIRP and EIS results measured in an OTA testing system for 60 GHz band mmWave modules are provided. These results are important parameters that are directly related to the quality of wireless communication links in the field application.

### 1. ま え が き

OTA試験とは、その名称が示すように、無線デバイスの特性を評価するためにケーブルを使用せず、空間を用いて行う測定方法である。そのため、従来のケーブルを接続する測定とは異なる方法を探る。従来の方法では、アンテナとトランシーバの間には、それぞれ測定器に接続可能なコネクタが設けられており、それぞれの特性を個別に測定し合算することで、装置全体の性能を精度よく試験することができた。一方、OTA試験では、アンテナとトランシーバが一体化された無線装置の状態における総合的な特性を評価する点の特徴となる。ミリ波通信モジュールは後述のとおり、アンテナとトランシーバが1つのパッケージに収納されるため、設計の検証、特性評価、さらに認証試験など、設計開発や製造検査等のあらゆる工程を、OTA試験で実施する必要がある。

### 2. ミリ波でOTA試験が必要不可欠な理由

ミリ波の周波数は、概ね30～300 GHzであり、自由空間中を伝搬する場合の波長は1～10 mmである。ミリ波はその周波数が高いため、GHz以上の広い通信帯域幅を利用することが可能である。しかし、ミリ波の自由空間伝搬損失 ( $FSPL$ ) は非常に大きく、伝搬時に減衰してしまう。Friis伝達公式<sup>1)</sup>によれば、 $FSPL$ は式 (1) として導出できる。

$$FSPL (dB) = 20 \log_{10} (4 \pi d / \lambda) \quad (1)$$

式 (1) より、 $FSPL$ は距離 $d$ の2乗に比例し、波長 $\lambda$ の2乗に反比例する。図1には、2.4 GHz、5 GHz、およびミリ波の代表例として60 GHzの電波に対して計算した $FSPL$ を示す。Wi-Fiネットワークで一般的に使用される2.4 GHzと5 GHzの低周波数波と比較し、60 GHzは、20 dB以上大きい $FSPL$ となる。例として、60 GHzの $FSPL$ は、100 m以下の短距離においても100 dBを超えてしまうことから、ミリ波は比較的近距离の通信にしか利用できないと言われている。同様の理由から、ミリ波通信モジュールの設計では、伝送線路損失を最小化するため、アンテナは、Antenna-in-Package<sup>2)</sup>と呼ばれる形態にパッケージ化されることが

1 広帯域無線システム開発部 主査, 博士 (工学)

2 広帯域無線システム開発部 グループ長

3 広帯域無線システム開発部 部長, 博士 (工学)

略語・専門用語リスト

略語・専門用語	正式表記	説明
OTA testing	Over The Air testing	空間で行う無線の特性試験
EIRP	Equivalent Isotropic Radiated Power	等価等方輻射電力。指向性アンテナから、特定の方向に放射される電波の送信電力の強さを表す。全方向に放射される電波のうち、最大電力を示す場合もある
EIS	Equivalent Isotropic Sensitivity	等価等方受信感度。指向性アンテナに対し、特定の方向から到来する電波の受信電力のうち、受信信号品質の基準を満たす最小の受信電力
RF	Radio Frequency	無線周波数のことで、空間に放射される電波の周波数を指す
FSPL	Free-Space Path Loss	自由空間伝搬損失。電波が自由空間を伝搬するときの減衰量
Wi-Fi		無線でLAN (Local Area Network) に接続する無線LANの規格の一つ
Antenna-in-Package		高周波集積回路とアンテナや回路が一体化された構造
RFIC	Radio-Frequency Integrated Circuits	高周波用アナログ集積回路
DUT	Device Under Test	被試験デバイス
SA	Signal Analyzer	信号分析器のことで、スペクトラムアナライザやオシロスコープなどの測定器を示す
PER	Packet Error Rate	パケット誤り率。通信において、指定時間間隔の間に送られるパケットの総数に対し、誤って受信したパケット数の比率
BER	Bit Error Rate	符号誤り率。通信において、指定時間間隔の間に送られる符号（ビット）の総数に対し、誤って受信した符号数の比率
SG	Signal Generator	信号発生器
Arbitrary Waveform Generator		任意波形発生器。種々の変調信号を生成可能な信号発生器

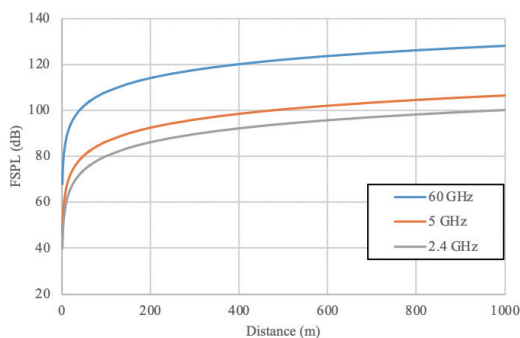


図 1 FSPL vs 伝搬距離

Fig. 1. FSPL vs distance.

一般的である。すなわち、トランシーバ部をつかさどる高周波集積回路 (RFIC) とアンテナや回路が一体化された構造となる。その結果、RFICからアンテナに接続するコネクタが存在せず、従来の測定方法では実現困難となる。よって、ミリ波通信モジュールの無線性能は、RFICとアンテナが接続された状態で評価をする必要がでてくるため、このOTA試験が不可欠となる。

また、ミリ波通信では、高いアンテナ利得を得るために、フェーズドアレイアンテナが用いられる。このアンテナの大きな利点は、装置が機械的に固定されていても、電子制御によって電波の指向性を変えられる「ビームフォーミング」が実現できることである<sup>3)</sup>。ビームフォーミングの性能試験では、精密に位置決めされた座標系で、3次元的に多方向の測定を処理できる試験系が有効となる。OTA試験系では、このような多方向の指向性測定を行うことができる。

### 3. OTA試験系の基本構成

OTA試験系は、被試験デバイス (DUT)、測定アンテナおよび送受信測定のための測定機器類から構成される。図2に基本的なOTA試験系を示す。電波の放射は電波法によって制限されており、RF装置の試験は、外部に漏洩しないようにシールドされた電波暗室内で行う必要がある。また、電波暗室内の反射や干渉の影響を防止するために、電波暗室内のすべての壁を電磁波吸収体で覆う必要がある。

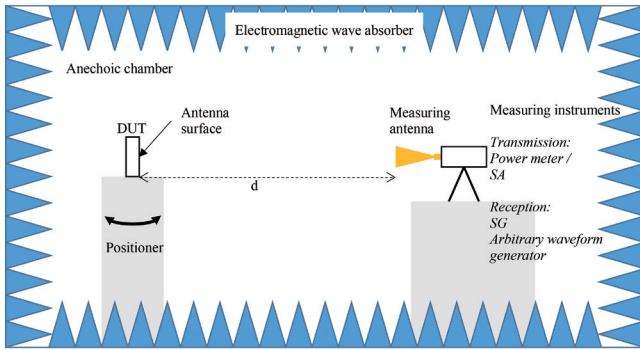


図2 OTA試験系の基本構成

Fig. 2. Basic setup for OTA testing.

2章において述べたように、ミリ波におけるFSPLは非常に大きいため、設定した試験距離において、測定する信号強度が測定器のダイナミックレンジ内にあるかどうかを確認する必要がある。一方、このレンジから外れた場合は、信号増幅用の増幅器（アンプ）または信号減衰用の減衰器（アッテネータ）が必要となる。

さらに、ビームフォーミングの評価には、多軸ポジショナが必要となる。ビーム方向ごとに、多軸ポジショナを用いてDUTを標準ホーンアンテナに対して回転させ、信号強度等を測定する。この測定方法は、種々な指向性ビームを測定する際に利用することができる。

OTA試験を高精度に行うためには、DUTと測定アンテナ間の距離を一定以上離す必要がある。DUTと測定アンテナ間が近い、すなわち近傍界の領域では、アンテナ利得が距離に依存し、定数として扱えなくなるため、精度を維持して放射電力を測定することが困難となる。したがって、通常のOTA試験では、遠方界となるように距離を確保する必要がある<sup>4)</sup>。遠方界距離 $F_D$ となる距離は式(2)から導出される。

$$F_D \geq 2D^2/\lambda \quad (2)$$

式(2)は、波長 $\lambda$ およびアンテナ開口面の大きさ $D$ からなる式となっている。アンテナ開口面の大きさは、ミリ波アレイアンテナの全長と考えることができる。例として、アンテナ全長が50 mmのデバイスでは、遠方界距離は1 mとなる。当社製の60 GHz通信モジュール<sup>5)</sup>のアンテナ径は50 mmよりも短いため、OTA試験を遠方界で実行するためのアンテナとモジュール間の試験距離は1 mで十分である。このように、60 GHz通信モジュールでは、短い試験距離で測定ができるため、DUTと標準ホーンアンテナの位置合わせが容易となる。さらに、試験距離が短いため大気中の酸素吸収の影響が無視できるため、より精度の高い電力計測が可能となる。

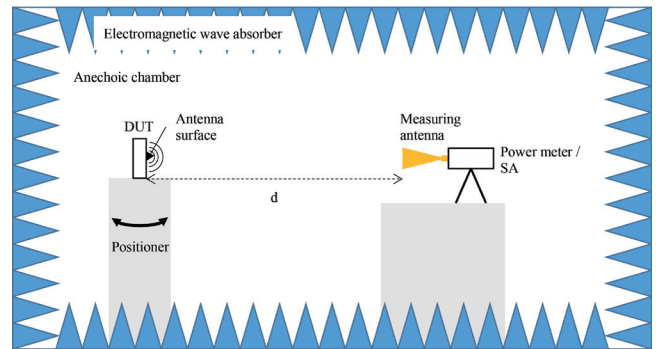


図3 OTA送信試験系

Fig. 3. OTA transmission test system.

## 4. OTA試験で用いられる性能指標

### 4.1. EIRPおよび測定方法

EIRPは、指向性を有するアンテナの、ある方向における放射と等価な放射電力を与える、理想的な等方性アンテナからの放射電力である。等方性アンテナは、電力をすべての方向に均等に分配するものである。一般にEIRPと表記した場合は、アンテナゲインが最も高い方向にアンテナから放射される最大電力を表す場合もある。EIRPは、無線デバイスの放射電力の上限を設定するための法令や規制上の指標としても使用されており、RFデバイスの送信特性を現すための重要な指標でもある。

EIRPは、 $P_T$ を送信機の出力電力、 $G_A$ をアンテナ利得、 $L_C$ をケーブル損失とすると、式(3)により算出される。

$$\text{EIRP (dBm)} = P_T \text{ (dBm)} + G_A \text{ (dBi)} - L_C \text{ (dB)} \quad (3)$$

しかし、2章で述べたように、ミリ波通信モジュールを測定するためにアンテナと送信機を分割することは、不可能であることから、OTA試験により、ミリ波通信モジュールのEIRPを直接的に測定する必要がある。

図3にOTA送信試験における測定系を示す。OTA送信試験の検出器側には、標準ホーンアンテナ、高周波パワーセンサ/電力計、またはシグナルアナライザ(SA)を用いる。DUTの放射電力は、標準ホーンアンテナをかいて、電力計またはSAに接続して測定される。DUTと標準ホーンアンテナを対向させ、ポジショナを回転させながら指向性ビームの測定を行う。OTA試験においてEIRPは、式(4)で求められる。ここで、 $P_{read}$ は電力計またはSAの測定電力であり、 $G_M$ は標準ホーンアンテナの利得、FSPLは距離 $d$ を用いて式(1)から計算される自由空間経路損失である。

$$\text{EIRP (dBm)} = P_{read} \text{ (dBm)} - G_M \text{ (dBi)} + \text{FSPL (dB)} \quad (4)$$

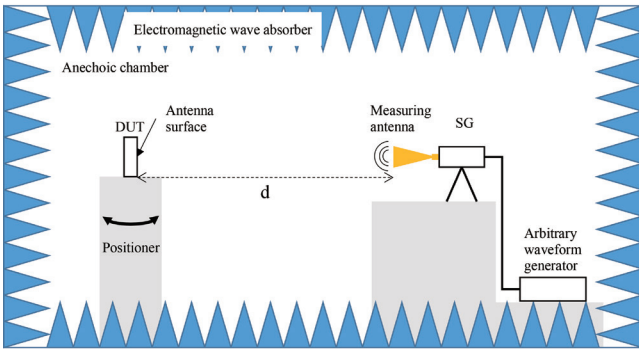


図4 OTA受信試験系

Fig. 4. OTA reception test system.

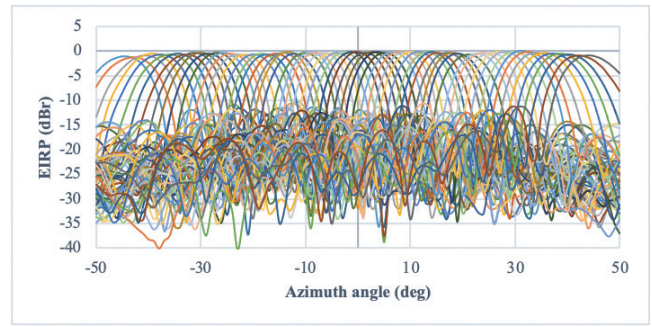


図6 放射パターン (0 dBr = 40 dBm)

Fig. 6. Radiation pattern (0 dBr = 40 dBm).

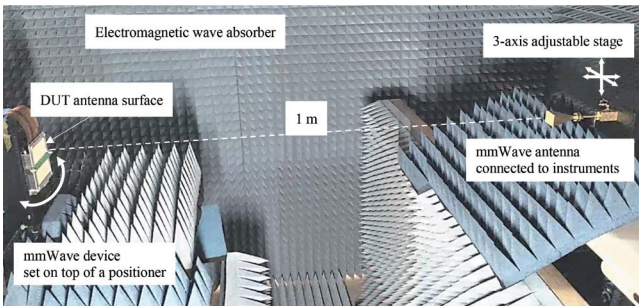


図5 実際のOTA試験系

Fig. 5. OTA testing system.

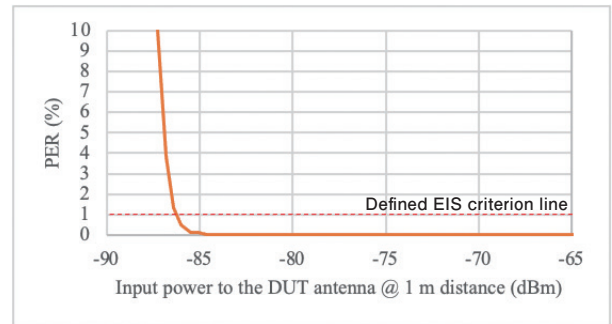


図7 EIS測定結果

Fig. 7. EIS measurement result.

#### 4.2. EISおよび測定方法

受信感度は、規定された受信信号品質を満たすために必要な最小受信電力(アンテナから受信機へ入力される電力)として定義される。一方、EISは、等方性アンテナが上記アンテナと同じ位置にあると仮定した場合に、等方性アンテナによって得られる等価等方受信電力と定義される。したがって、実際の受信機にはEISにアンテナ利得が加味された電力が入力される。受信感度を規定する受信信号品質の基準としては、パケット誤り率 (PER) またはビット誤り率 (BER) が一般的である。EISは、RFデバイスの受信性能を示しており、EIRPと同様に、指向性を有した性能指標である。

EISは、次の式 (5) を用いて求められる。ここで、 $P_R$  を所定の基準を満たす受信機への最小入力電力、 $G_A$  をアンテナ利得、 $L_C$  はケーブル損失とする。EISの測定においてもEIRPと同様に、 $P_R$ 、 $G_A$ 、 $L_C$ を別々に測定することは困難であり、OTA試験で測定することになる。

$$EIS \text{ (dBm)} = P_R \text{ (dBm)} - [G_A \text{ (dBi)} - L_C \text{ (dB)}] \quad (5)$$

図4にOTA受信試験系を示す。OTA受信試験では、RF信号生成に信号発生器 (SG) を使用し、さらに、任意の

変調波形を発生できるSGなどで出力された変調信号を使用する。RF信号は標準ホーンアンテナをかいして放射され、その信号は、DUTによって受信される。EISを得るためには、PERまたはBERをモニタしながら、それらの値が基準に達するまで、SGからのRF信号を徐々に減衰させていく操作を行う。PERまたはBERが基準に達したとき、次の式 (6) からEISが導出できる。 $P_{sg}$ は基準のPER値に達したときのSGの出力電力、 $G_M$ は標準アンテナの利得であり、 $FSPL$ は距離 $d$ を用いた式 (1) から計算される自由空間経路損失に相当する。

$$EIS \text{ (dBm)} = P_{sg} \text{ (dBm)} + G_M \text{ (dBi)} - FSPL \text{ (dB)} \quad (6)$$

#### 5. OTA試験系とその実測結果

本章では、ミリ波通信モジュールの無線性能を測定するために構築したOTA試験系とその実測結果を示す。図5は、電波暗室内に構築したOTA試験系を示す。ポジションのステージ上にミリ波デバイスであるDUTをセットし、そのDUTのアンテナ面は、標準ホーンアンテナとの間に1 mの距離を設け、対向して設置する。高精度な位置合わせを

するために、レーザーマーカークや3軸調整ステージ等を用いている（図5では図示せず）。標準ホーンアンテナは、測定器（検出器または信号発生器）と接続している。

図6は、63本の指向性ビームの放射パターンであり、縦軸をEIRP測定値（単位はdBr）としてプロットした図である。このデータは、指向性ビームに対して、ポジションを回転させながら、（信号強度を）検出器で受信することで得られたものであり、これにより最大EIRP（頂点）を精度良く把握することができる。

EISの測定結果を図7に示す。DUTの受信アンテナへの入力電力を徐々に減少させていくと、入力電力が-85 dBmを下回ったところからPERが、急激に上昇する。判定基準をPER=1%とすると、EISは、約-86 dBmと求められる。

## 6. む す び

本論文において、ミリ波通信モジュールの特性評価にOTA試験が不可欠な理由と、OTA試験系の構成、および得られた性能指標であるEIRP、EISについて解説した。さらに、60 GHzミリ波帯通信モジュールにおける測定系の解説と、実測したEIRPとEISの結果を示した。EIRPは、言い換えれば「どれだけ電波を遠くに飛ばせるか」を、EISは、「どれだけ微弱な電波を受信し、有効なデータとして復調できるか」を示しており、無線通信の回線設計<sup>6)</sup>に用いられる重要なパラメータである。当社製の60 GHz通信モジュールは、フィールドでの通信試験において、500 mの装置間距離における通信において2 Gbpsのスループットを達成しているが<sup>5)</sup>、本通信モジュールで送信される64.8 GHz、EIRP = +40 dBmの信号は500 mの距離において、-83 dBmまで減衰される。一方、本モジュールの受信性能はEIS = -86 dBmを有しているため、十分な強度の電力で受信できることがわかる。これらのOTA試験で得られたデータは、フィールドにおける通信回線の品質にも直結している。

以上から、OTA試験技術は、製品や回線の設計開発で基礎評価に用いられるだけでなく、実際にフィールドに持ち込まれる個々の無線モジュール製品の性能検査にも応用されうる技術である。

## 参 考 文 献

- 1) Recommendation ITU-R P.341-7, "The concept of transmission loss for radio links", Aug. 2019
- 2) Y. P. Zhang and D. Liu, "Antenna-on-chip and antenna-in-package solutions to highly integrated millimeter-wave devices for wireless communications." IEEE Trans on Antenna Propagat., vol.57, no.10, pp.2830-2841, Oct. 2009
- 3) フジクラ白書：5Gミリ波フェーズドアレイアンテナ, Feb. 2021
- 4) Recommendation ITU-T K.61, "Guidance on measurement and numerical prediction of electromagnetic fields for compliance with human exposure limits for telecommunication installations", Jan. 2018
- 5) 細野ほか：「5G 向け新周波数帯にも対応した60 GHz帯広帯域通信モジュール」, フジクラ技報, 第134号, pp.32-35, 2021
- 6) フジクラ白書：ミリ波通信の回線設計, Jul. 2020