

# 5G無線基地局向け28GHz帯 超多素子アンテナシステム

鈴木邦之\* 中溝英之\*\*  
濱田倫一\* 内田 繁\*\*  
渡辺 光\*\*

Massive Active Array Antenna System at 28GHz Band for 5th Generation Radio Base Station

Kuniyuki Suzuki, Tomokazu Hamada, Hikaru Watanabe, Hideyuki Nakamizo, Shigeru Uchida

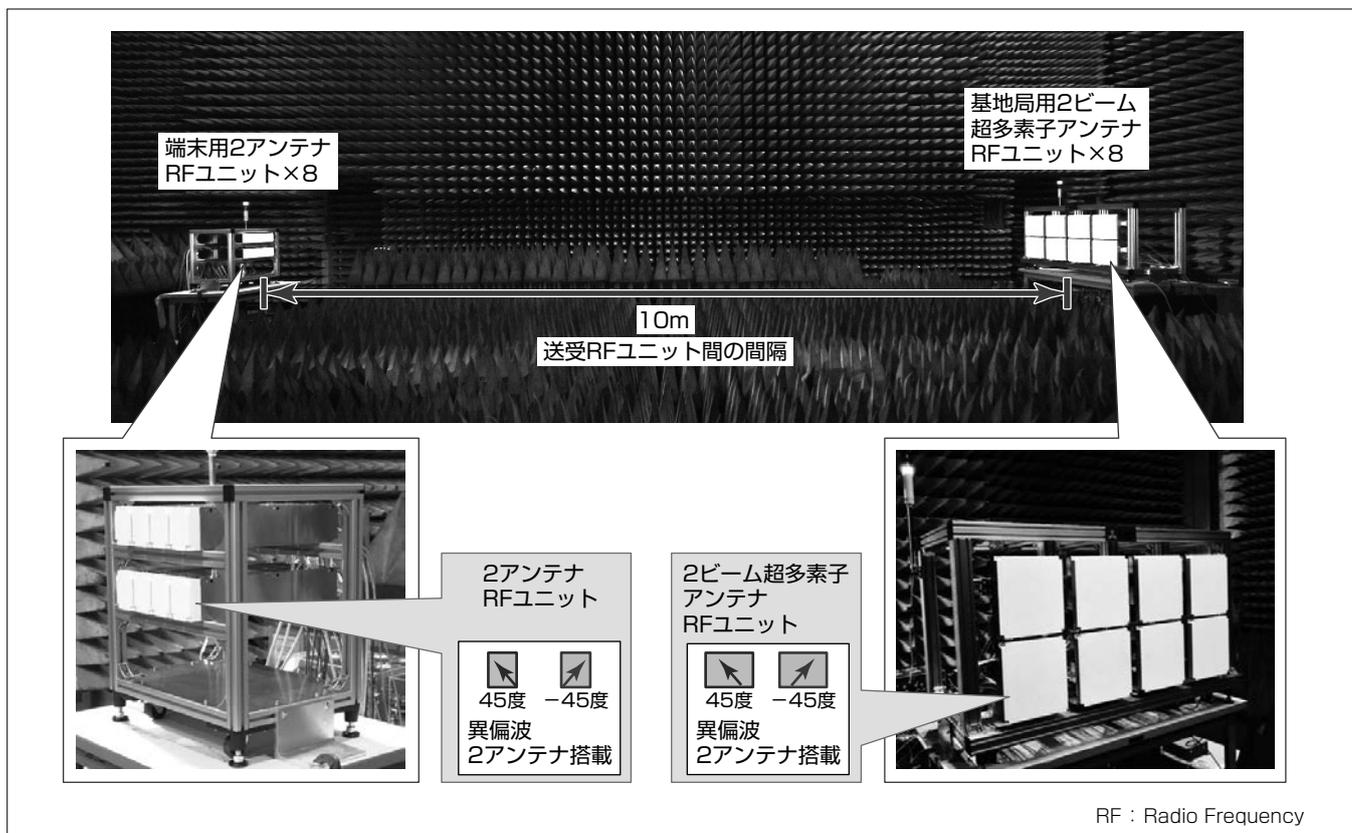
## 要 旨

急増する移動通信のトラフィック対策、多種多様なサービス、アプリケーションの実現に向け、2020年以降本格導入される第5世代移動通信システム(5G)の研究開発が急務となっている。

業界各社で、多素子アンテナとMIMO(Multiple Input Multiple Output)を組み合わせて空間多重数を上げることで飛躍的に周波数利用効率を向上させ、超高速伝送を

現することが期待されるMassive MIMOの実用化を目指した研究開発を行っている。

このような背景の中、三菱電機では、5G無線基地局向けに28GHz帯ハイブリッドビームフォーミング型超多素子アンテナシステムを開発し、電波暗室での16ビーム空間多重伝送実験によって500MHz帯域を用いて通信速度25.5Gbps超を実現した。



## 28GHz帯超多素子アンテナシステムによる16ビーム空間多重伝送実験環境

2020年以降本格導入される5Gに向けて、Massive MIMO基地局に適用する28GHz帯ハイブリッドビームフォーミング型超多素子アンテナシステムを開発した。電波暗室での伝送実験によって500MHz帯域を用いて通信速度25.5Gbps超を実現した。

### 1. ま え が き

第5世代移动通信システム(5G)では、第4世代移动通信システム(4G)の規格上の最大伝送速度3Gbpsを大きく超える、20Gbpsの超高速伝送が要求されている<sup>(1)</sup>。

この実現には、多素子アンテナとMIMOを組み合わせて空間多重数を上げることで飛躍的に周波数利用効率を向上できるMassive MIMOが有効となる<sup>(2)</sup>。

Massive MIMOを実現する回路方式として、当社では、アナログビームフォーミングとデジタル信号処理とを融合することで空間多重数増と演算量削減を実現できるハイブリッドビームフォーミング方式を提案し、開発を進めている<sup>(3)(4)</sup>。

本稿では、このハイブリッドビームフォーミング方式を実装した5G無線基地局向け28GHz帯超多素子アンテナシステムを用いて、電波暗室で16ビーム空間多重伝送実験を行ったので、そのシステム概要、装置構成及び実験結果について述べる。

### 2. システム概要

伝送実験のシステム構成を図1に、主要諸元を表1に示す。送受信周波数は28GHz帯、変調信号帯域幅を500MHz、基地局装置16アンテナ×端末装置16アンテナのSU(Single User)-MIMO構成で実験を行った。この実験での無線フォーマットは図2のようになっており、3GPP(Third Generation Partnership Project)のLTE(Long Term

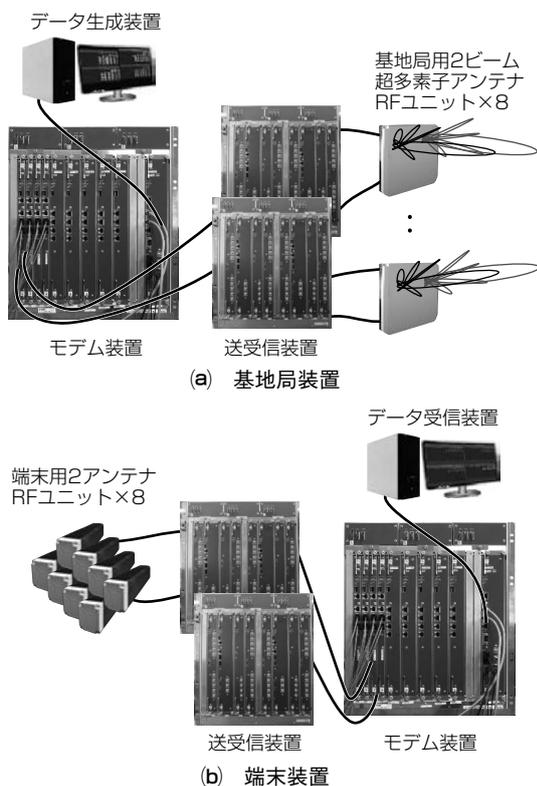


図1. 伝送実験のシステム構成

Evolution)/LTE-Aで1msの無線フレームを0.25msとすることで低遅延伝送を実現している。TDD多重方式は、下りリンクの時間占有率0.8(下り：上りの時間比率を4：1)としている。

### 3. 装置構成

#### 3.1 2ビーム超多素子アンテナRFユニット

基地局装置用の2ビーム超多素子アンテナRFユニットの構成を図3に、主要諸元を表2に示す。2ビーム超多素子アンテナRFユニットは、2台のアンテナRFモジュールで構成し、主に、多素子アンテナ部、RF回路部、周波数変換部で構成している。

表1. 伝送実験の主要諸元

項目	諸元
送受信周波数	28GHz帯
変調信号帯域幅	500MHz
多重方式	TDD 下りリンク時間占有率0.8
伝送方式	OFDM
サブキャリア間隔	75kHz
空間多重ストリーム数	16ストリーム

TDD : Time Division Duplex  
OFDM : Orthogonal Frequency Division Multiplexing

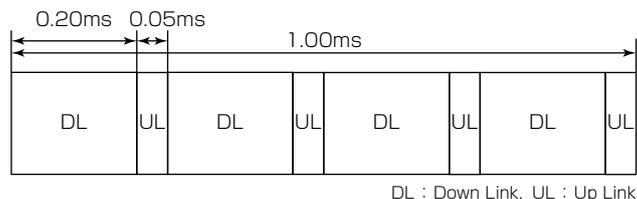


図2. 伝送実験の無線フレーム構成

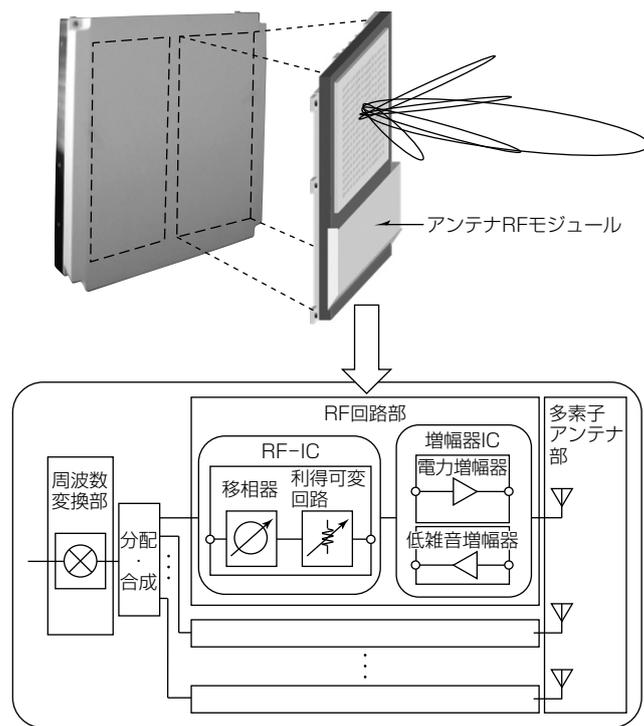


図3. 2ビーム超多素子アンテナRFユニットの構成

表2. 2ビーム超多素子アンテナRFユニットの主要諸元

項目	諸元
送受信周波数	28GHz帯
変調信号帯域幅	800MHz
アンテナ方式	プリントパッチアレー
アンテナ素子数	256素子
アレー配列	垂直：16 水平：16
アンテナ利得	28dBi
搭載アンテナRFモジュール数	2台
偏波方向	45度1台、-45度1台
ビーム走査角度	垂直：±12度 水平：±45度
アンテナRFモジュールサイズ	120×240×28(mm) (放熱フィン除く)
増幅器IC	GaAs(当社製)
RF-IC	CMOS(当社製)

多素子アンテナ部は256の素子アンテナから構成されたアレーアンテナであり、各素子アンテナからの放射電力を末端方向に向けて空間合成することによって、指向性の鋭い高利得なビームを形成する。

RF回路部では、アンテナの多素子化に伴い、低消費電力化、小型化が課題となる。特に増幅器ICはGaAs(ガリウムヒ素)プロセスを用いることで高効率化を図り、RF-ICは高集積化による小型化に適したCMOS(Complementary Metal Oxide Semiconductor)プロセスを用いた<sup>(5)</sup>。また、RF-ICの移相器は、アクティブ方式を採用して制御精度を向上させることで高精度なビーム形成を実現した<sup>(6)</sup>。

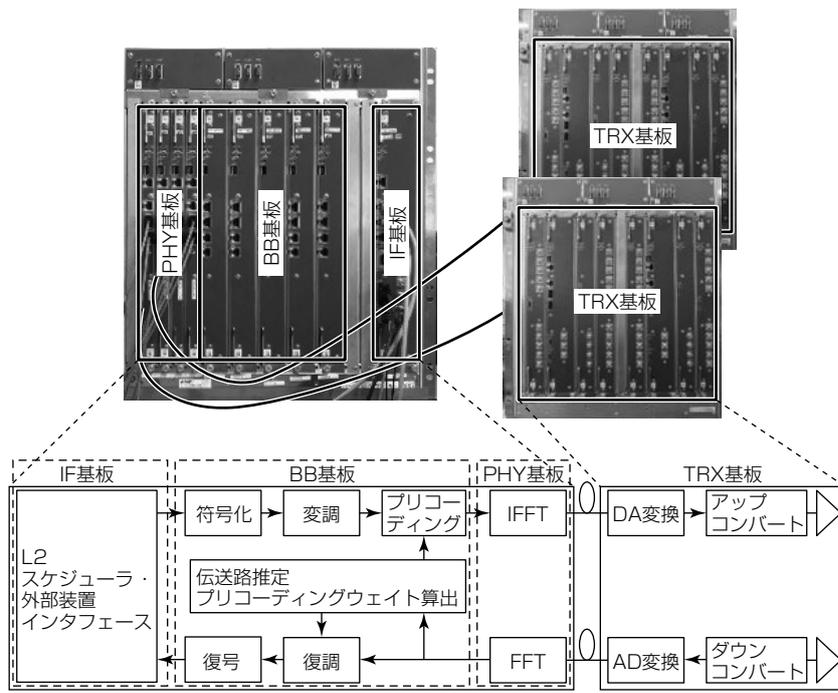
3.2 送受信装置・モデム装置

送受信装置・モデム装置の構成を図4に、主要諸元を表3に示す。IF基板でデータ生成装置から受け取ったデータをL2スケジューラ処理し、BB基板で誤り訂正符号化・256QAM(Quadrature Amplitude Modulation)等の多値変調・プリコーディングを行った後、PHY基板でIFFTをする。TRX基板ではDA変換、直交変調、中間周波数へのアップコンバートを行いアンテナRFユニットに出力する<sup>(7)</sup>。

装置間、基板間、FPGA(Field Programmable Gate Array)間、FPGA-CPU・DSP(Digital Signal Processor)間を高速シリアルインタフェースで接続し、接続端子数の不足による機能分割をなくして小型化を図った。

IF基板は、高速CPUを採用し、16アナログビームの方位制御、ハイブリッドビームに対応したユーザーの割当てや、割り当てたユーザーへのデータ量制御を行うスケジューラ部で構成している。

BB基板は、大容量FPGA・高速DSPを採用し、基板1枚で従来の大型基地局2台分以上となる最大伝送速度6.7Gbpsの、誤り訂正符号化・復号化部、256QAM等の変



IF: InterFace, BB: Base Band, PHY: PHYSical, FFT: Fast Fourier Transform, IFFT: Inverse FFT  
TRX: Transmitter and Receiver, DA: Digital to Analog, AD: Analog to Digital

図4. 送受信装置・モデム装置の構成

表3. 送受信装置・モデム装置の主要諸元

項目	諸元
送受信周波数(中間周波数)	6 GHz
変調信号帯域幅	500MHz (100MHz(コンポーネントキャリア帯域幅)×5(コンポーネントキャリア数))
伝送方式	OFDM
サブキャリア間隔	75kHz
変調方式	QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM
誤り訂正方式	LDPC符号
符号化率	3/4, 5/6, 11/12

QPSK: Quadrature Phase Shift Keying  
LDPC: Low Density Parity Check

復調部、デジタルビーム形成を行うプリコーディング部で構成している。

PHY基板は、OFDM変復調、コンポーネントキャリアのデジタル合波/分波を行うIFFT/FFT部で構成している。

TRX基板は、AD・DA部、中間周波数6GHzに周波数変換を行うアップコンバート・ダウンコンバート部で構成している。

3.3 2アンテナRFユニット

伝搬実験で基地局装置と対向する端末装置の、高周波回路部となる2アンテナRFユニットを開発した。2アンテナRFユニットは、偏波の異なる二つのアンテナと、各アンテナに接続して信号電力の増幅とレベル調整を行うRF回路部、及び28GHz帯と6GHz帯の間での周波数変換を行う周波数変換回路で構成される。2アンテナRFユニットの1アンテナ分の装置構成を図5に、主要諸元を表4に示す。

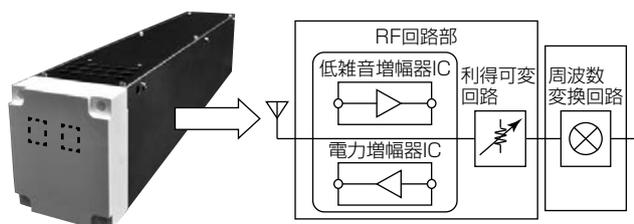


図5. 2アンテナRFユニットの1アンテナ分の装置構成

表4. 2アンテナRFユニットの主要諸元

項目	諸元
アンテナ方式	平面パッチアンテナ
アンテナ利得	6 dBi
送信電力	13dBm以上
受信雑音指数	10dB以下
可変利得幅	20dB以上
搭載アンテナ数	2台
偏波方向	45度1台, -45度1台

#### 4. 実験結果

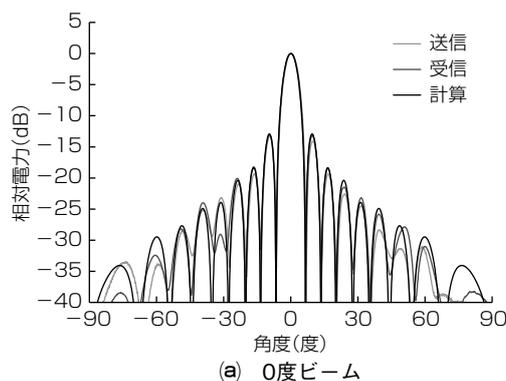
3章に述べた装置による実験結果を示す。

まず、2ビーム超多素子アンテナRFユニットの放射特性を電波暗室内で評価した結果を示す。なお、アンテナRFモジュール2台で1ユニットを構成しているが、この2台は偏波の違いだけで同一性能のものであるため、-45度偏波の結果を示す。

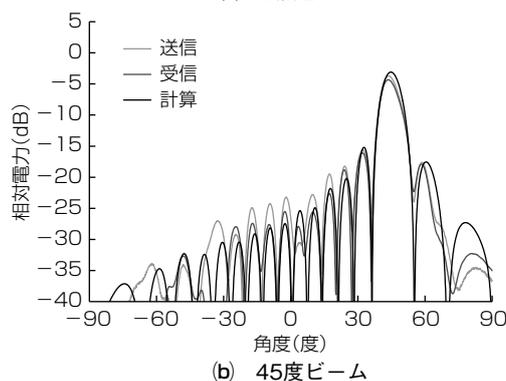
図6に水平面で送信、受信それぞれの主ビーム方向を0度、45度とした場合での放射パターンを示す。グラフの縦軸は0度ビームの値で規格化している。このモジュールの校正には素子電界ベクトル回転法<sup>(8)</sup>を用いた。図から、放射パターン形状は計算値及び送信、受信の実測値でおおむね一致しており、設計結果の妥当性が確認できる。送受間のピークサイドローレベルの差異は1 dBrms以内の精度で一致していることを確認した。

図7に送信、受信それぞれで、主ビームの方向を水平面に-45度~45度まで5度刻みで走査した場合のビーム走査指令角との差を示す。送信、受信それぞれのビーム指向誤差はビーム走査指令角に対して1度より十分小さく、送受間のビーム指向誤差は0.2度rms以下を達成した。以上から±45度の広角方向まで高精度なビーム形成ができる2ビーム超多素子アンテナRFユニット装置を実現した。

次に、電波暗室内でアンテナRFユニットに加えて送受信装置とモデム装置も動作させたときの変復調部の実験結果を示す。図8は、基地局で送信した信号を端末と同じ位置に置いたホーンアンテナで受信したときのスペクトラムアナライザ画面例である。500MHz帯域内で送信電力が±1 dB以内と平坦(へいたん)で、隣接チャネル漏洩(ろうえい)電力が-30dBc以下を達成できていることを確認できた。



(a) 0度ビーム



(b) 45度ビーム

図6. 2ビーム超多素子アンテナRFユニットの放射パターンの計算及び測定結果

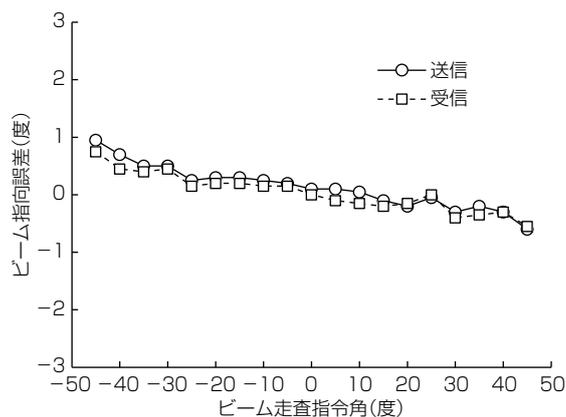


図7. 2ビーム超多素子アンテナRFユニット装置のビーム走査指令角に対する送信、受信のビーム指向誤差

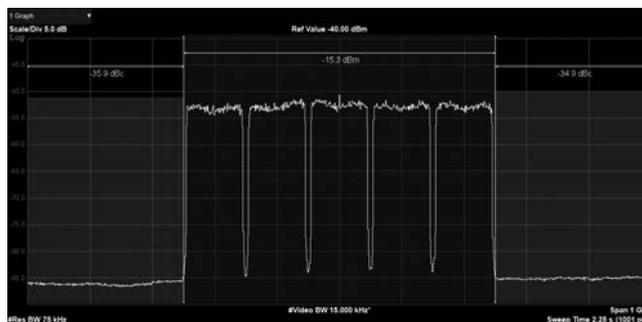


図8. 基地局送信の信号波形

図9は、基地局から1アンテナで送信し、端末の1アンテナで受信した変調信号を、解析ツールで変調精度解析した結果の例である。図9(a)は64QAM信号、図9(b)は

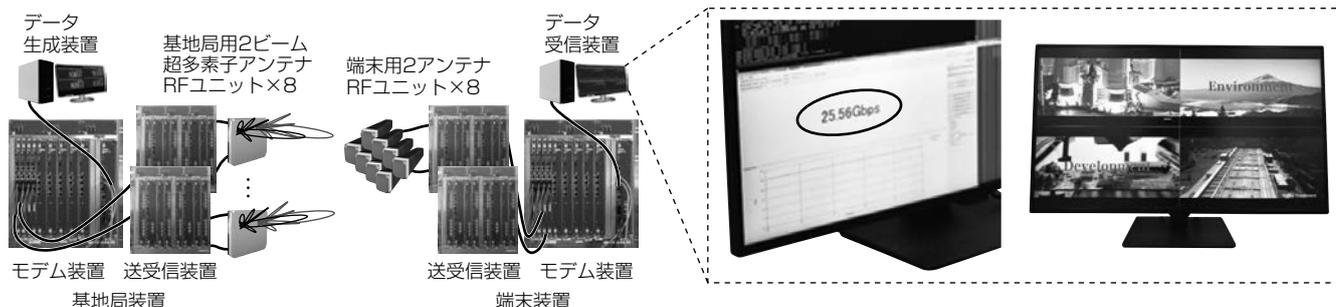


図10. スループット25.5Gbps達成時の実験システムの構成と画面表示例

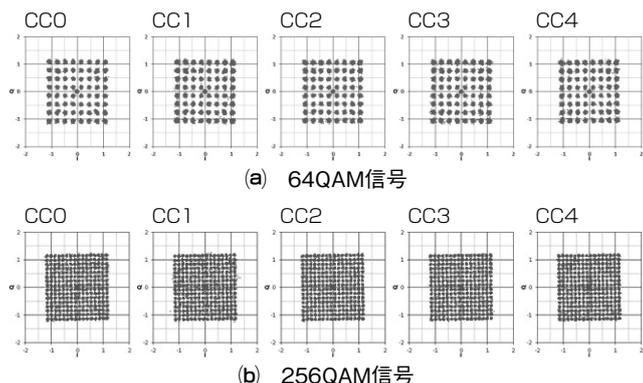


図9. 端末受信信号の歪み解析

256QAM信号での五つのコンポーネントキャリアのコンスタレーションを示す。解析結果は5%以下となり送受信機通しで歪(ひず)みが十分小さいことを確認できた。

最後に、システム全体で電波暗室で、データ生成装置で生成したUDP(User Datagram Protocol)パケットデータ、及び、動画ファイルの伝送の評価を行った実験結果を示す。UDPパケットデータについては、基地局から16ビームで放射し、端末16アンテナで受信後、データ受信装置で計測して25.5Gbpsの安定した伝送が確認できた<sup>9)</sup>。図10が実験システムの構成と画面表示例である。

これによって、28GHz帯での移动通信システムで世界最高の周波数利用効率である1Hz当たり63.7bpsを実現でき、500MHz帯域を用いて1台の端末に向けて世界で初めて<sup>(注1)</sup>下りリンク通信速度25.5Gbpsを検証できた。

(注1) 2018年3月現在、当社調べ

### 5. む す び

超高速伝送の実現に向けて開発したハイブリッドビームフォーミング型超多素子アンテナシステムの電波暗室での16ビーム空間多重伝送実験によって、500MHz帯域を用いて通信速度25.5Gbps超を実現した。今後は、フィールド試験で周波数利用効率の高いMassive MIMO技術を確立し、大容量高速通信で、多種多様なサービスとアプリケーションによるコネクテッド社会の実現に貢献する。

今回の成果には、総務省からの委託を受けて実施した“第5世代移动通信システム実現に向けた研究開発”の成果の一部が含まれている。

### 参 考 文 献

- (1) Recommendation ITU-R M.2083(IMT Vision) "Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond" (2015)
- (2) 奥村幸彦, ほか: 将来無線アクセス・モバイル光ネットワークの構想, 電子情報通信学会技術研究報告, RCS2013-231/232 (2013)
- (3) 岡崎彰浩, ほか: 次世代無線アクセスに向けた高周波数帯活用の一検討, 電子情報通信学会技術研究報告, RCS2014-81 (2014)
- (4) 友江直仁, ほか: 5G無線基地局向け28GHz帯アンテナ・RFモジュール, 三菱電機技報, 91, No.6, 321~324 (2017)
- (5) 中溝英之, ほか: 5Gにおける高SHF帯・広帯域Massive MIMO向け超多素子アンテナシステムの要素技術, 2016年電子情報通信学会 通信ソサイエティ大会, BCS-1-8 (2016)
- (6) 山本 航, ほか: 5Gにおける高SHF帯・広帯域Massive MIMO向け28GHz帯高精度6ビットベクトル合成型移相器, 電子情報通信学会技術研究報告, MW2017-117 (2017)
- (7) 内田 繁, ほか: 5G向け28GHz帯広帯域Massive MIMOシステム実現に向けた取り組み, 電子情報通信学会技術研究報告, RCS2017-196 (2017)
- (8) 真野清司, ほか: フェイズドアレーアンテナの素子振幅位相測定法-素子電界ベクトル回転法-, 電子情報通信学会和文論文誌B, J65-B, No.5, 555~560 (1982)
- (9) 西本 浩, ほか: [技術展示]5Gにおける高SHF帯・広帯域Massive MIMOマルチビーム空間多重の屋内実験検証, 電子情報通信学会技術研究報告, RCS2017-354 (2018)