

第5世代移動通信システム適用を想定したミリ波帯伝搬検証

森重秀樹* 石岡和明**
 平木啓愛* 紀平一成***
 井浦裕貴**

Field Experiment of Millimeter Wave Transmission toward 5th Generation Mobile Communication System

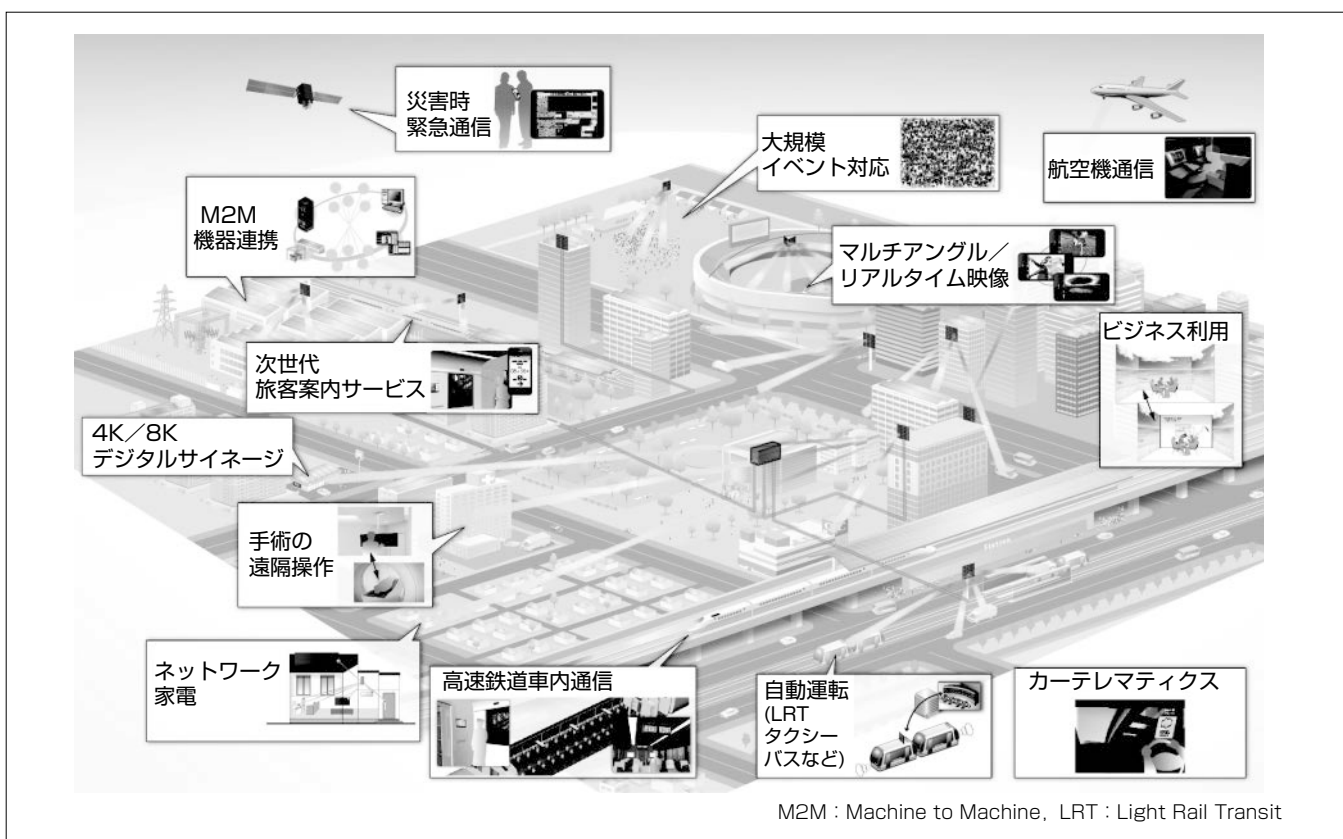
Hideki Morishige, Hirochika Hiraki, Hiroki Iura, Kazuaki Ishioka, Kazunari Kihira

要旨

近年、2020年以降の第5世代移動通信システム(以下“5Gシステム”という。)として高周波数帯(SHF(Super High Frequency)~EHF(Extremely High Frequency)帯)の適用を前提としたシステム検討が進められている。日本でも、第5世代モバイル推進フォーラム(5GMF)で5Gシステムの検討が開始されている。5G移動通信システムでは、要旨の図に示すとおり、大規模イベント対応、マルチアングル/リアルタイム映像、自動運転、4K/8Kデジタルサイネージなどの新しいサービスを提供するために、大容量伝送、低レイテンシなどの実現が求められる。大容量伝送を実現するためには、信号の広帯域化に加え、飛躍

的な周波数利用効率を向上させる技術としてMassive MIMO(Multi Input Multi Output)技術の適用が検討されている。

本稿では、5Gシステムで今後適用が見込まれる高周波数帯(SHF~EHF帯)通信について、当社通信機製作所製ミリ波帯アクティブフェーズドアレーアンテナ(APAA)を用いた屋外環境での伝搬実験の内容を述べる。また、実験で取得したデータに基づく電波伝搬特性及び、複数ビームによるMIMO伝送方式を適用した場合のチャンネル容量推定等について実施した検証結果について述べる。



5Gシステムのサービスイメージ

5Gシステムでは、大容量伝送、低レイテンシなどの実現によって、大規模イベント対応、マルチアングル/リアルタイム映像、4K/8Kデジタルサイネージなどの新たなサービスを提供することが可能になると考えられている。

1. ま え が き

近年、2020年以降の移動通信システムとして、5Gシステムが検討されている⁽¹⁾⁽²⁾。日本でも、第5世代モバイル推進フォーラムで5Gシステムの検討が開始されている⁽³⁾⁽⁴⁾。

5Gシステムでは、要旨の図に示すとおり、大規模イベント対応、マルチアングル／リアルタイム映像、自動運転、4K／8Kデジタルサイネージなどの新しいサービスを提供するために、大容量伝送、低レイテンシなどの実現が求められる。これを実現する5Gシステムのネットワークは、図1に示すとおり、既存のLTE(Long Term Evolution)、LTE-Advancedによるマクロセル、スモールセルに対して、5Gの高速・大容量の高密度スモールセルをアドオンする構成となり⁽⁵⁾、無線アクセスからコアネットワークの各レイヤで大容量化、高密度化が求められる。例えば、5G高密度スモールセルで、10Gbpsを超えるシステムスループットが求められている。

5Gシステムに要求されるシステムスループットを達成するためには高周波数帯(SHF～EHF帯)を利用した信号の広帯域化に加え、アンテナシステムとしてMassive MIMO技術の適用が検討されている。Massive MIMOは、一般に100素子以上を持ったアンテナを用いて10程度以上のマルチビームを形成し、同時に複数のストリーム伝送を実現する。Massive MIMOの代表的な回路構成として、全てのアンテナ素子にDAC(Digital to Analog Converter)やその他のアナログ部品、デジタル回路が接続されるDigital Massive MIMO構成が検討されている。この構成はアンテナ素子数分の自由度が得られるため、非常に高い伝送性能を持つが、製造コストや計算量に課題がある。一方、

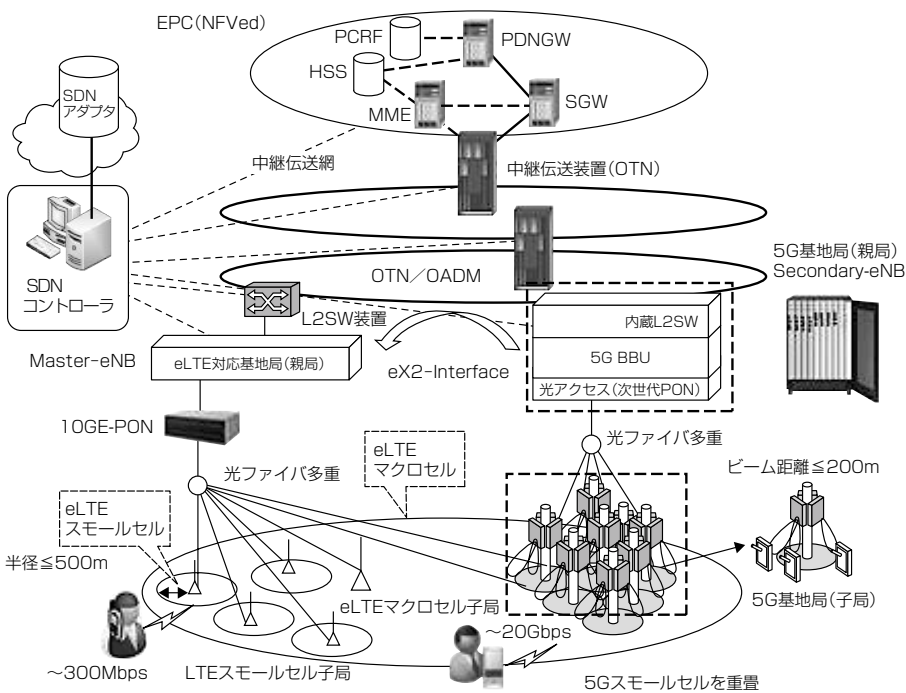


図1. 5Gシステムのネットワーク

フェーズドアレーアンテナによるストリームごとに形成するアナログビームフォーミングとデジタルMIMO処理を組み合わせたハイブリッド型アンテナ構成が提案されている⁽⁶⁾。この構成は、DACやデジタル回路の数を大幅に削減可能であるが、アナログビームから発生するビーム間干渉の低減が課題となる。また、高周波数帯伝搬特性については様々な検討や測定が実施されているが、クラスタモデルを用いたマルチビーム伝送評価は少ない。

本稿では、高周波数帯(SHF～EHF帯)でのアナログビームフォーミングとデジタルMIMO処理を組み合わせたハイブリッド型アンテナ構成の実現性を検証する目的で行った、44GHz帯APAA(Active Phased Array Antenna)装置による屋外実験の実施内容を述べる⁽⁷⁾。また、実験で取得したデータに基づいた伝搬特性、及びスループット評価等について検証結果を述べる。

2. 屋外実験

2.1 試験構成と測定環境

今回の屋外実験では44GHz帯APAA装置を用いた伝搬実験によってマルチビーム時のビーム間干渉を考慮したMassive MIMO基地局の通信路容量を評価するとともに、伝送実験を行うことで実環境でのスループット特性を確認した。測定は主に屋外LOS(Line Of Sight)環境で実施した。送信局設置環境と試験機器構成を図2に示す。また、送信局の主要諸元を表1に示す。

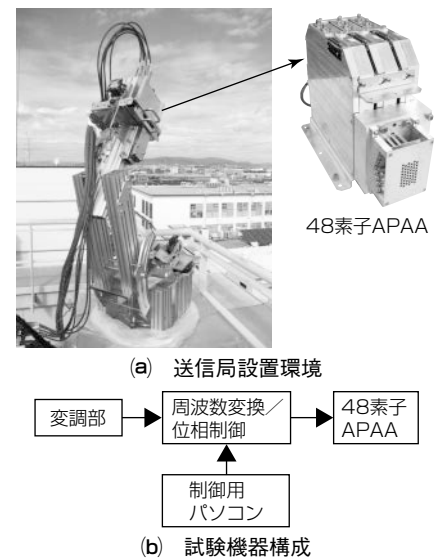


図2. 送信局設置環境と試験機器構成

表1. 送信局の主要諸元

項目	仕様
送信アンテナ	APAA
アンテナ素子数	48素子(8×6)
送信周波数	44GHz帯
空中線利得	17.2dBi
送信アンテナ偏波	左旋円偏波
励振分布	等振幅共相

送信局は地上約26mの位置に設置し、地上又は建物の屋上に設置した受信局に向けてビームを照射する。

図3は伝搬特性確認時の受信局機器構成である。ホーンアンテナをローテータに設置し、方位角、及び仰角方向にアンテナを回転させながら受信電力を測定することで、受信局周辺から到来する電波の強度と到来角AoA (Angle of Arrival)を測定した。また、伝送特性を確認する場合は図4に示す受信局機器構成で測定を行った。伝送試験では4素子無指向性アンテナを用い、100MHz帯域幅の多値変調信号を4つの受信回路で同時受信した後、高速デジタイザから受信IQ(In-phase Quadrature)信号を取得する構成とした。

図5は送信局から見た受信局配置とビーム放射方向である。図中の丸印がAPAAから放射されるビームの放射方向を

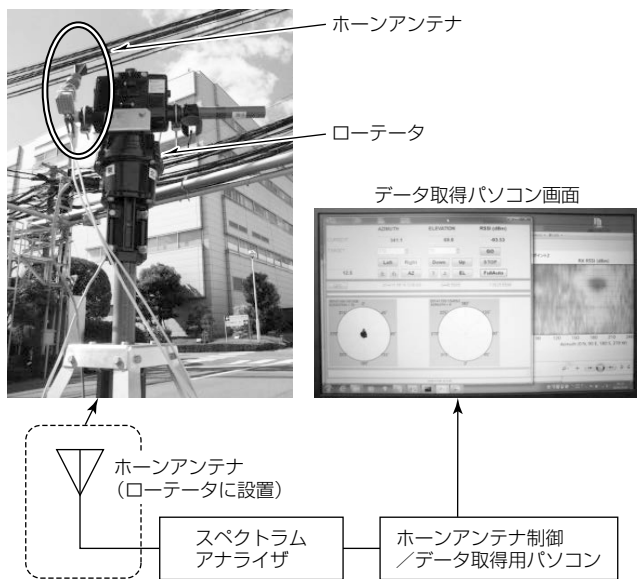


図3. 電波伝搬特性確認時の受信局試験構成

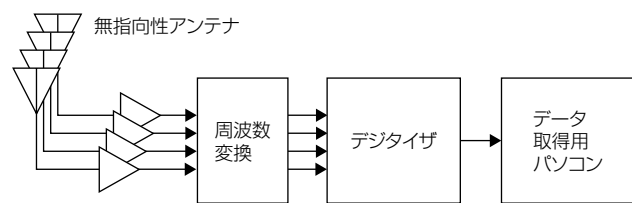


図4. 伝送特性確認時の受信局構成



図5. 送信局から見た受信局配置

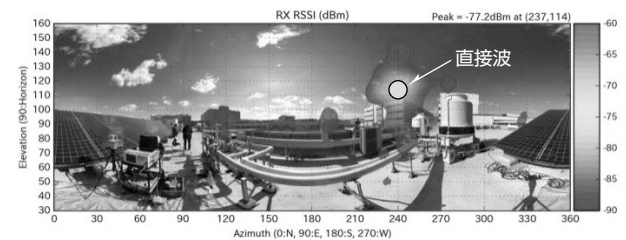
示している。従来の移動帯通信基地局で用いられるアンテナの放射パターンとは異なり、電波の照射領域を限定することができる。受信局は各ビームの照射領域の中心付近に設置して測定を行った。受信局エリア#1は地上であり、受信局エリア#2~4は建物の屋上であって地上約11mの高さである。

2.2 伝搬測定結果

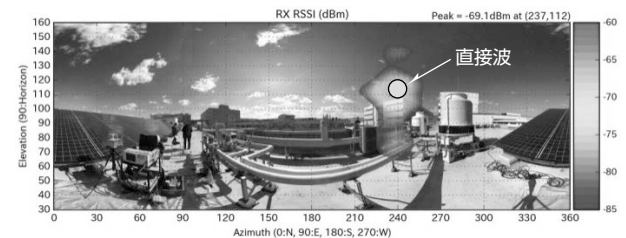
先に述べた図3に示した受信局試験構成で取得した測定結果の代表例について述べる。受信局をエリア#4に設置した際の到来電力分布を図6に示す。図は受信局周辺の写真の上にRSSI(Received Signal Strength Indicator)がしきい値以上のレベルとなる到来電力を重ねてプロットしている。図中の丸印は到来波のAoAを示している。横軸は方位角、縦軸は仰角である。方位角は北を0度としており仰角は90度の時にホーンアンテナが水平な状態となっている。

表2に図6で示した到来電力分布のうちエリア#4方向にビームを向けた時の直接波、及び反射波の受信電力とAoAを示す。

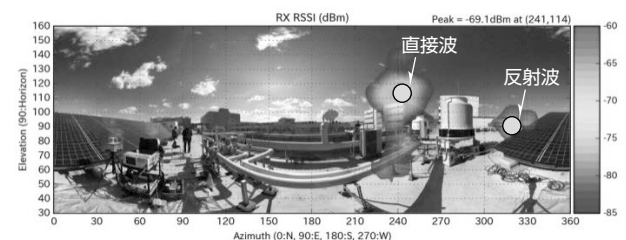
図6から分かるように、APAAを用いた44GHz帯の伝



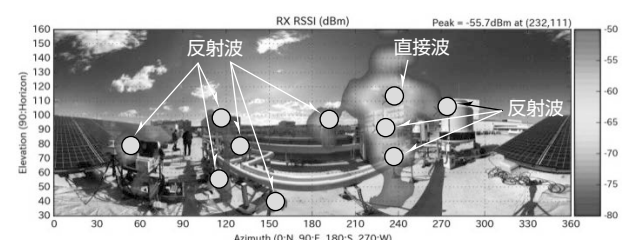
(a) エリア#1方向にビームを向けた時の到来波



(b) エリア#2方向にビームを向けた時の到来波



(c) エリア#3方向にビームを向けた時の到来波



(d) エリア#4方向にビームを向けた時の到来波

図6. 受信局をエリア#4に設置した時の到来電力分布

搬環境として直接波以外にも受信局周辺の建造物やパイプ、地面からの反射があるが、受信局周辺1～3m以内の建造物がクラスタとして支配的であり、遠方にある建造物からは反射波が到来していないことが確認できる。また、ほかのエリアにAPAAのビームの向きを変えた時にも直接波を受信している。これはビーム形成したAPAAのサイドローブであり、ビーム方向を変更した場合でも見通し環境であるために一定レベルの干渉波として受信してしまうことが分かる。

2.3 スループット評価

伝搬測定結果から求めたクラスタごとのAoA, AoD (Angle of Departure), 受信電力, 遅延時間を適用したクラスタモデルを用いてミリ波帯屋外市街地環境のMassive

表2. エリア#4伝搬測定結果(エリア#4方向にビーム放射時)

AoA		受信電力 (dBm)	直接波 / 反射波の区別
方位角 (°)	仰角 (°)		
232	111	-55.7	直接波
232	71	-69.4	反射波
52	76	-70.1	反射波
225	91	-70.4	反射波
188	95	-72.6	反射波
124	79	-75.9	反射波
149	39	-76.3	反射波
114	97	-77.1	反射波
268	103	-77.5	反射波
113	55	-78.2	反射波

表3. シミュレーションの諸元

項目	仕様
変調方式	最大64QAM
基地局アンテナ構成 (1アンテナ当たり)	二次元平面アレー 48素子 (8 × 6)
基地局アンテナ数 N_T	16 (10λ 間隔)
基地局アンテナ配置 (サブアレー配置)	二次元平面アレー
ユーザー数 N_U	16 / 4 / 1
端末アンテナ数 N_R	1/4 (1λ 間隔), 16 (2.5λ 間隔)
端末アンテナ	無指向性アンテナ
プレコーディング	ブロック対角化 / 固有モード伝送
符号化率	3/4
オーバーヘッドロス	20%
ダウンリンク占有率	80%

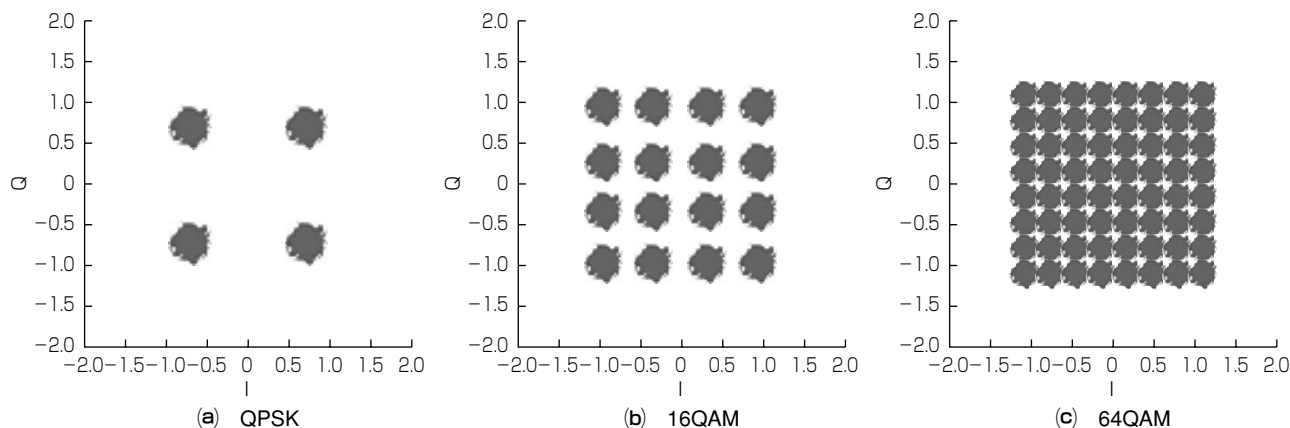


図8. SIMO復調特性(エリア#1)

MIMOスループット評価を計算機上で行った。シミュレーション諸元を表3に示す。

シミュレーションでは基地局のアンテナ数 N_T は16とし、 $N_T = N_R \times N_U$ となるようにユーザー数と端末数を選択した。ユーザー数 $N_U = 16$ の場合は各エリアに4ユーザーずつ配置、 $N_U = 4$ の場合は各エリアに1ユーザーずつ配置した。また、 $N_U = 1$ の場合では1端末当たり16ストリームを収容するため、アンテナ設置面積が比較的広く確保可能な高機能端末を想定し、アンテナ間距離を 2.5λ に設定した。周波数利用効率の評価では、システム上必要なパイロット信号等のオーバーヘッドロス20%, TDD (Time Division Duplex) システムを想定し、DL (Down Link) / UL (Up Link) 比を8 : 2とした。表3の諸元を基に測定環境の周波数利用効率を求めた。シミュレーション結果を図7に示す。横軸は端末アンテナ1本の平均CNR (Carrier to Noise Ratio)で縦軸は周波数利用効率である。

図7に示すとおり、低CNRのときにはユーザー数を4とした場合が最も高い周波数利用効率を得られている。また、CNRが30dB以上となる場合には16ユーザーの周波数利用効率が最も高くなり、64QAM (Quadrature Amplitude Modulation) の最大周波数利用効率を達成することを確認した。

2.4 実データ伝送特性

伝送測定では、送信局から100MHz帯域幅の多値変調波 (QPSK (Quadrature Phase Shift Keying), 16QAM,

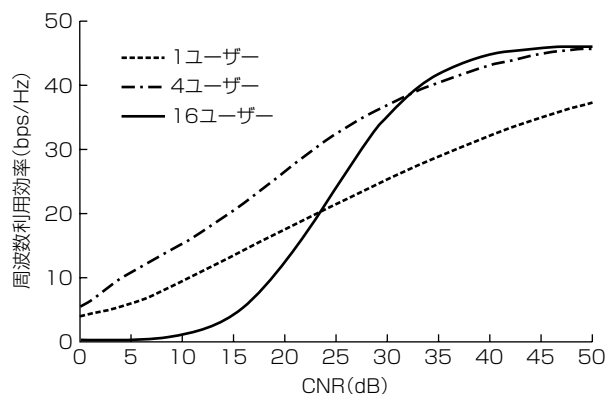


図7. スループットの評価結果(64QAM)

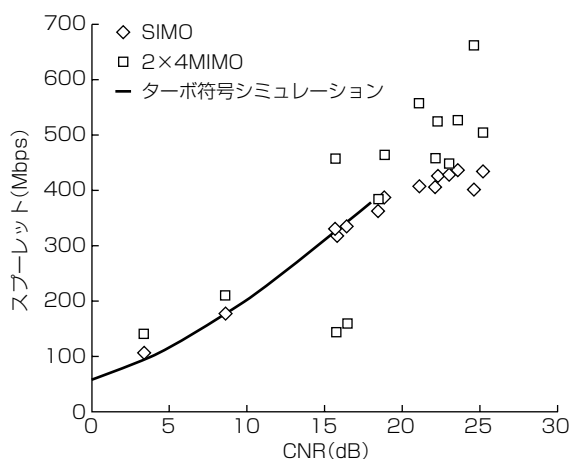


図9. CNR対スループット特性

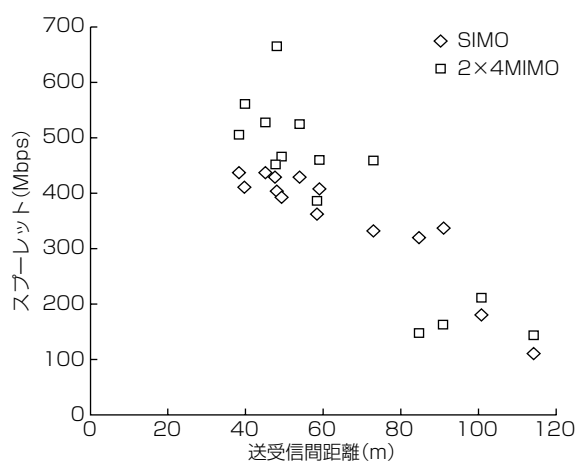


図10. 送受信間距離対スループット特性

64QAM)を送信し、図4に示した複数のアンテナで構成される受信局で取得した受信信号を基にオフライン復調することでスループット評価を実施した。MIMO伝送特性の評価については、送信局APAAの位置を変更して取得した複数の受信信号をオフラインで加算することで、複数APAAによる同時送信を模擬した。エリア#1で取得したデータに対するオフライン復調結果を図8に示す。

図8に示すSIMO(Single Input Multi Output)復調特性ではLOS環境で64QAMの適用が可能であることを確認した。各受信局の取得データから求めたスループット評価結果を図9、図10に示す。

図9に示すスループット特性の横軸に記すCNRは受信局の4受信アンテナ合成後のCNRである。SIMOにおけるスループットはターボ符号単独でのシミュレーション結果とほぼ一致することを確認した。MIMOの場合は伝搬路の依存が大きいためばらつきがあるが、一般的にSIMOよりスループットが改善する傾向にある。図10に示す送受信間距離とスループットの関係では送受信間距離70m以下の環境においてSIMOで400Mbps程度、2×4 MIMOで400～700Mbps程度のスループット特性が得られることが分かる。

3. 検証結果

44GHz帯APAAを適用した屋外実験によって各受信局設置エリアでの伝搬特性を確認し、クラスタモデルを構築することでミリ波帯屋外市街地環境のMassive MIMOスループット評価を計算機上で実施した。その結果、CNRが30dB以上となる条件下で16ユーザーの周波数利用効率が最も高くなり、64QAMの最大周波数利用効率を達成することを確認した。また、実データ伝送実験で取得したデータは、スループットやCNRの観点から整合性が取れており、LOS環境での評価、検討の基礎データとして信頼性のあるデータであることを確認した。引き続き、MIMO伝送におけるプリコーディング技術検証等を行い、高周波数帯(SHF～EHF帯)での大容量通信システムの開発に向けた検証を進めていく。

4. むすび

移動体通信で今後、適用が見込まれる高周波数帯(SHF～EHF帯)でのアナログビームフォーミングとデジタルMIMO処理を組み合わせたハイブリッド型アンテナ構成の実現性を検証する目的でミリ波帯を使用した屋外実験を実施し、取得データに基づくMassive MIMO基地局の通信路容量を評価した結果、5Gシステムで求められる大容量伝送の可能性を確認した。

なお、この内容は、(株)NTTドコモとの5G実験協力で実施したものである。

参考文献

- (1) ITU-R WP5D Workshop : Research Views on IMT Beyond 2020 (2014)
- (2) Boccardi, F., et al. : Five Disruptive Technology Directions for 5G, IEEE Commun. Mag., **52**, No. 2, 74～80 (2014)
- (3) ARIB 2020 and Beyond Ad Hoc Group : Mobile Communications Systems for 2020 and beyond (2014)
- (4) 佐藤孝平 : 第5世代移動通信システムに関する我が国の最新の検討状況について, 総務省電波政策ビジョン懇談会(第12回)資料(2014)
- (5) 2020年以降の5G無線アクセスにおける要求条件と技術コンセプト, ドコモ5G ホワイトペーパー(2014)
- (6) 井浦裕貴, ほか : アナログビームフォーミングMIMO方式におけるアンテナ構成の検討, 電子情報通信学会技術研究報, **114**, No.372, 43～48 (2014)
- (7) 岡崎彰浩 : 5G超大容量Massive MIMO伝送におけるマルチビーム多重化技術と44GHz帯を用いた屋外基礎実験に基づいた評価, 電子情報通信学会技術研究報, **115**, No. 2, 119～124 (2015)