

第5世代移動通信システム向け無線アクセス基地局技術

友江直仁* 山口 聡**
平 明德**
谷口英司**

Radio Access Base Station Technologies for 5th Generation Mobile Communication System

Naohito Tomoe, Akinori Taira, Eiji Taniguchi, Satoshi Yamaguchi

要 旨

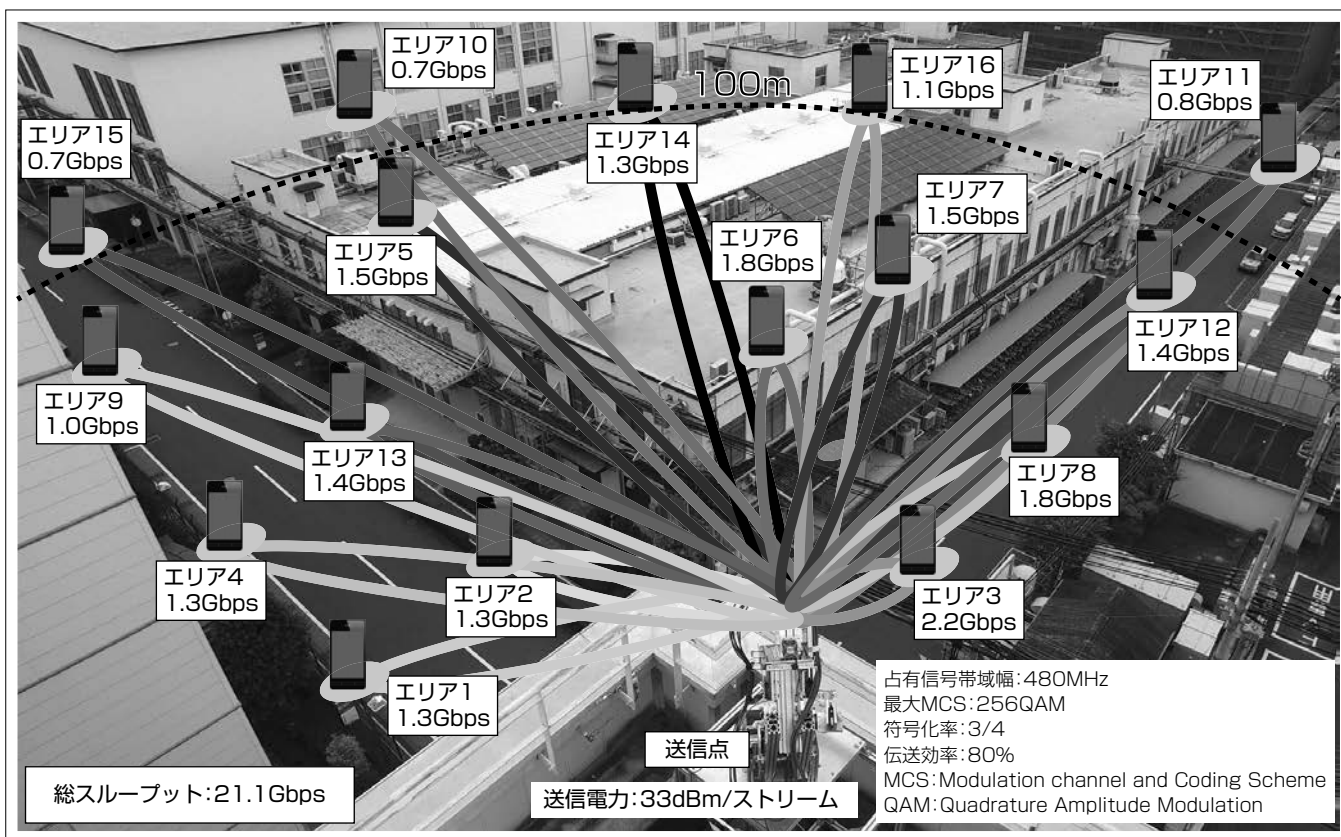
急増する移動通信のトラフィック対策、多種多様なサービス、アプリケーションの実現に向け、2020年以降の実用化が期待される第5世代(5G)移動通信システムの研究開発が急務となっている。

このような背景の中、三菱電機は、多素子アンテナとMIMO(Multiple Input Multiple Output)を組み合わせることで空間多重度を上げることで飛躍的に周波数利用効率を向上させ、大容量伝送を実現することが期待されるMassive MIMOの実用化を目指した無線アクセス基地局技術の研究開発を行っている。

(株)NTTドコモと当社は、高SHF帯(60GHz以上)Massive MIMOに空間多重度の増加と演算量削減を実現するハイブリッドビームフォーミング(Beamforming: BF)を用いるこ

とを提案し、総務省の採択を受けた。送信機は、複数のアレーアンテナで構成したサブアレー型とした。簡易に基地局を設置できるように、小型化を目指して各種構成要素の回路を全て一体化したRFフロントエンドモジュールの開発を進めている。また、上記とは独立して、Massive MIMOの技術確立に向けて、(株)NTTドコモと行った伝搬実験結果、及び伝送シミュレーション評価結果として、それぞれ次の(1)、(2)を明らかにした。

- (1) 高SHF帯(6~30GHz)に近いEHF(Extra High Frequency)帯(44GHz)の伝搬実験の結果、見通し環境では、直接波が支配的となる。
- (2) 伝送シミュレーション評価の結果、16ビーム空間多重で20Gbps伝送が実現可能である。



伝搬実験を行った実験場所全景と16ユーザー空間多重伝送シミュレーション評価結果

図は伝搬実験結果から作成したチャネルモデルを用いて行った伝送シミュレーション評価結果に基づくイメージである。伝送シミュレーション評価結果では、空間多重数16、ユーザー当たりの送信電力33dBmで、第4世代(4G)移動通信システムの規格上の最大伝送容量3Gbpsを超える20Gbpsの実現性があることを明らかにした。

1. ま え が き

第5世代(5G)移動通信システムは、2020年以降のIMT (International Mobile Telecommunications)の拡大を想定して、ITU-R勧告M.2083 (IMT Vision)⁽¹⁾にも述べられている、①Enhanced Mobile Broadband, ②Ultra-reliable and Low Latency Communications, ③Massive Machine Type Communicationsといった多様なユースシナリオへの対応が求められている。

本稿では、これらのユースシナリオの内、“Enhanced Mobile Broadband”に寄与する技術として、第4世代(4G)移動通信システムの規格上の最大伝送容量3Gbpsを超える20Gbpsの超大容量伝送の実現に向けて開発中のMassive MIMO技術に関して述べる。

2. 5G移動体通信システムの要求条件

図1に周波数帯域幅、空間、時間の3軸で表した、3.9G・4G・5G移動通信システムの物理リソースイメージを示す。

図1が示すように、3.9Gでは、周波数帯域幅20MHz、空間多重数2、無線フレームを構成するサブフレーム長1msの物理リソース構成によってデータレート150Mbpsとなっていた。4Gでは、サブフレーム長は変えずに、周波数帯域幅や空間多重数を上げることで、データレート300M~3Gbpsが可能な仕様となっている。これに対して5Gでは、周波数帯域幅100MHz以上、空間多重数8以上によって総通信帯域幅800MHz以上とすることで、ピークデータレート20Gbpsまでの高速・大容量化を図るとともに、サブフレーム長1ms以下とすることで、1ms以下の低遅延化を図ることが求められる。

この要求を実現するには、多素子アンテナとMIMOを組み合わせることで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ることができるMassive MIMOが有効となる⁽²⁾。

3. Massive MIMOの送信機

Massive MIMOは、BFを適用することで、高周波数帯で大きくなる伝搬損失を補償するとともにチャンネル情報(Channel State Information : CSI)に基づくプリコーディングによって、空間多重数を向上させる技術である。

Massive MIMOの送信機構成は、フルデジタルMassive MIMOと、ハイブリッドBFによる構成が考えられ、フルデジタルMassive MIMOよりもハイブリッドBFによる構成の方がCSI誤差に対する影響は小さいことが示されている⁽³⁾。これに対して、(株)NTTドコモと当社は、総務省が公募を行った“平成27年度における電波資源拡大のための研究開発”の研究開発課題の1つである“第5世代移動通信システム実現に向けた研究開発~高周波数帯・広帯域超多素子アンテナによる高速・低消費電力無線アクセス技術の研究開発~”に対して、数100MHzの周波数帯域幅が確保できる高SHF帯(6GHz以上)にハイブリッドBFを用いたMassive MIMOの研究開発提案を行い、採択された⁽⁴⁾。

この研究開発では、周波数帯を15GHz帯、周波数帯域幅を480MHzとし、Massive MIMOによって空間多重数を16まで上げることで、ピークデータレート20Gbps以上をねらい、周波数利用効率の高い“Enhanced Mobile Broadband”の技術確立を目指す。また、サブフレーム長を4Gの1/4となる0.25ms以下とし、“Ultra-reliable and Low Latency Communications”の技術確立も目指す。

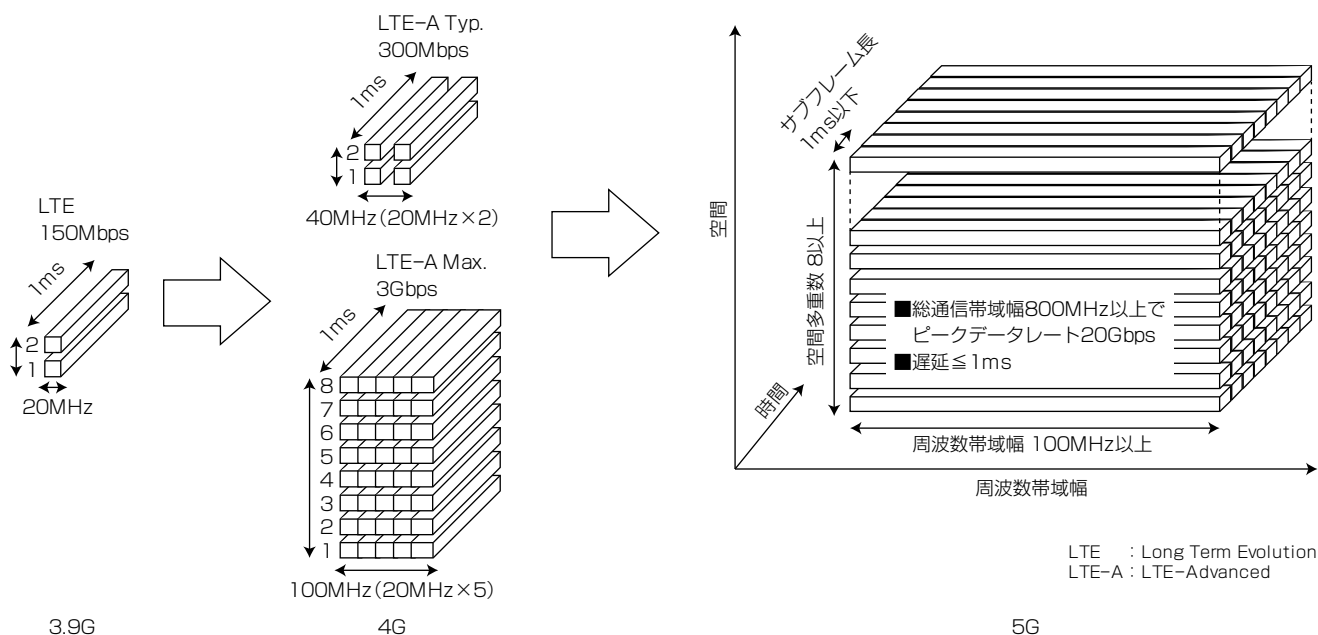


図1. 移動通信システムの世代別物理リソースイメージ

Massive MIMO送信機は、ハイブリッドBFによる構成としており、図2にこの構成を示す。アンテナ・RF(Radio Frequency)フロントエンドは、複数のアレーアンテナで構成されたサブアレー型となっている。サブアレーアンテナは、各素子の振幅と位相を調整することによってアナログビームを形成する。これによって通信を行う端末に対して高いアンテナ利得が得られ、1つの周波数リソースを利用して複数の端末との通信(空間多重通信)が可能となる。一方、アナログビーム特有のサイドローブは他端末に対して干渉要因となるため、デジタルプリコーディングによってビーム間の干渉を回避する。ハイブリッドBFでは、デジタルMIMO処理部で行うプリコーディングをアンテナ素子ごとではなくビームごとに行うため、飛躍的な演算量削減が可能となる⁽⁵⁾。

運用時に基地局装置を市街地のあらゆる場所に簡単に設置可能にするため、Massive MIMO送信機は小型かつ薄型であることが求められる。この開発では、アンテナやフィルタなどのRF受動回路と、増幅器や移相器などのRF能動回路、及び電源・制御回路を全て一体化したRFフロントエンドモジュールを実現し、基地局装置の小型薄型化を目指す。

開発するRFフロントエンドモジュールの構成を図3に示す。主に、多素子アンテナ基板、RF回路部、電源・制御ICチップ、外部装置との各種インタフェースから構成される。多素子アンテナ基板は、アンテナパネルと多層基板から成る。アンテナパネルは64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端末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ことができる。多層基板は、片方の面にRF回路部、電源・制御ICチップ、RF・電源・制御インタフェースを実装しつつ、多層基板内部にはアンテナ給電回路、フィルタ、及び分配・合成器などの受動回路を形成することで、アナログBFに必要なRFフロントエンドの各機能が高密度に集積される。

図4に、RFフロントエンドモジュールでのRF回路部の構成を示す。RF回路部は主にRF信号の位相や振幅を制御する移相器及び利得可変回路を内蔵するRF-IC、RF信号を増幅する電力増幅器IC及び低雑音増幅器ICで構成される。アンテナの多素子化に伴い、RF回路部では低消費電力化、小型化が課題となる。特に電力増幅器の消費電力は、アンテナシステム全体の消費電力への寄与が大きいことから、増幅器にはGaAs(ガリウム砒素)プロセスを用いるとともに、動的負荷変調方式を用いることで高効率化を図る。また、RF-ICはRF回路部全体のサイズに大きく影響するため、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、高精度にビーム形成を行う上でキーデバイスと

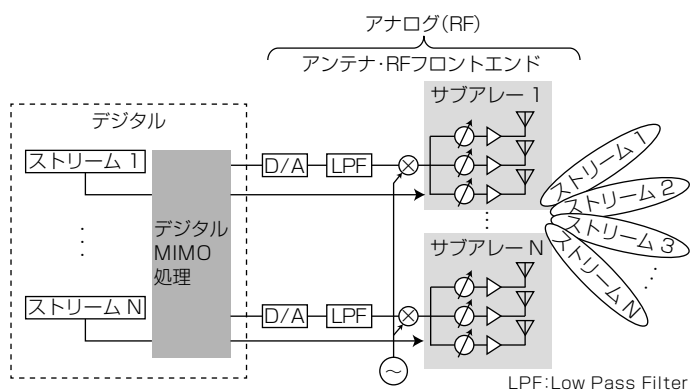


図2. ハイブリッドBFによるMassive MIMO送信機の構成

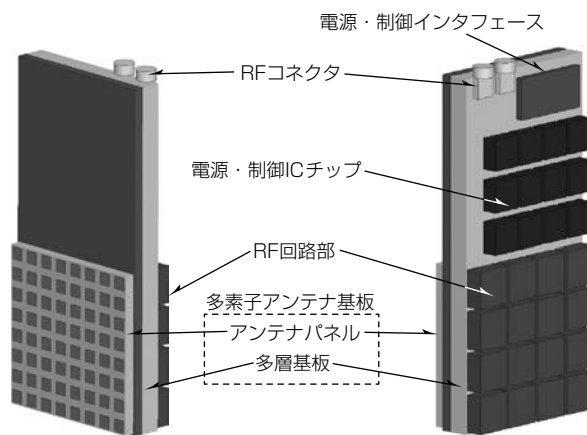


図3. RFフロントエンドモジュールの構成

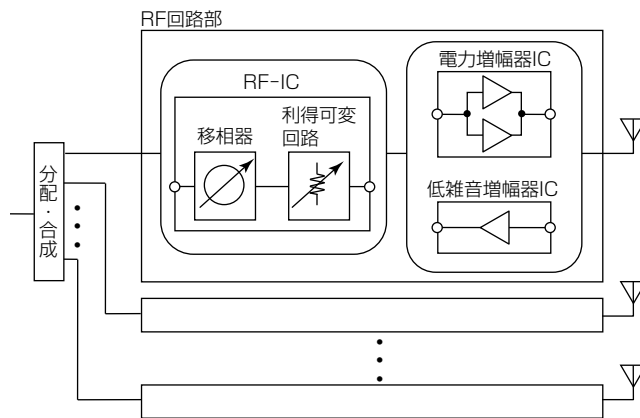


図4. RF回路部の構成

なる移相器はアクティブ方式による移相精度向上を図る。

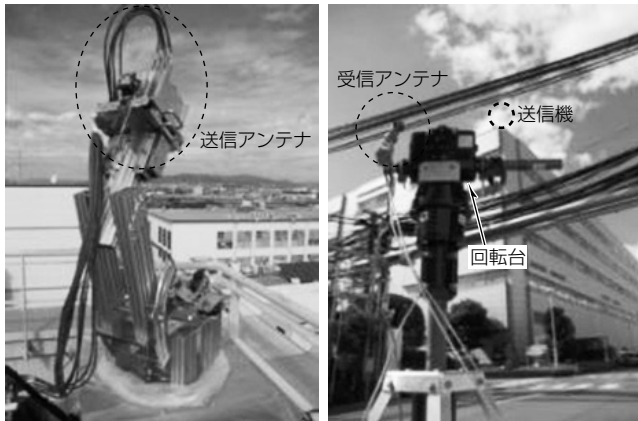
4. Massive MIMOの基礎実験

高SHF帯におけるMassive MIMO技術の確立に向け、(株)NTTドコモと当社はMassive MIMOの基礎実験を行った⁽⁶⁾⁽⁷⁾。この基礎実験では、高SHF帯(6~30GHz)に近いEHF帯(44GHz)で見通し環境での伝搬実験を行い、マルチビーム形成時のビーム間干渉を考慮したMassive MIMO基地局の周波数利用効率を評価し、大容量伝送の実現性を明らかにした。次に、伝搬実験結果、及び伝搬実

験結果から作成したチャンネルモデルを用いて行った計算機シミュレーション評価について述べる。

伝搬実験を行った実験場所の全景は要旨の図に示したとおりである。図5に送信機及び受信機、表1に主要な実験諸元を示す。送信アンテナは横6素子、縦8素子の48素子APAA (Active Phased Array Antenna)であり、高さ26mの建物屋上に設置した。送信周波数は44GHz、帯域幅100MHzの広帯域信号を、ビーム方向を切り替えながら25のエリアに向けて照射した。受信側ではホーンアンテナを用い、仰角(30~160°、真下が0°)と方位角(0~360°)を変えながら、各到来方向からの受信電力強度(Received Signal Strength Indicator : RSSI)を測定した。

図6に25エリアのうち、屋上と路上それぞれ1エリアの測定結果を示す。横軸が方位角、縦軸が仰角であり、このエリアに送信ビームを向けた場合の受信電力強度分布、言い換えれば所望信号の空間的分布を濃淡で示した。全てのエリアは見通し環境であるため、送信機方向に強い信号強度で直接波が観測されている。加えて、受信点周辺に反射した反射波がいくつか観測されているものの、近距離の金属面に反射している一部の例を除き、その電力は直接波と比較して小さいことが分かる。この実験では、サブアレー間干渉の影響を調査するため、別のエリアに送信ビームを向けた際の、干渉信号電力(サイドローブの電力)分布の測定も行った。ほとんどのエリアで、干渉信号電力は直接波が支配的となり、反射波成分は非常に小



(a) 送信機 (b) 受信機

図5. 伝搬実験における送信機と受信機

表1. 伝搬実験の主要諸元

項目	諸元
送信アンテナ	48素子APAA(横6素子×縦8素子) 利得17.2dBi(半値幅15°)
周波数、帯域幅	44GHz、100MHz
送信機設置位置	屋上(高さ26m)
受信アンテナ	ホーンアンテナ 利得20.4dBi(半値幅20°)
受信機設置位置	測定場所：25エリア 場所：地表、屋上(高さ11m) 送受信機間距離：40~126m

さいことが明らかとなった。

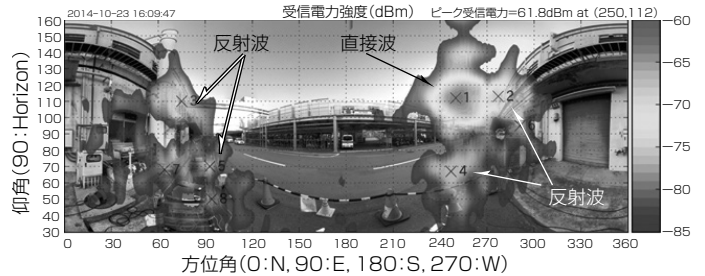
この実験環境におけるMassive MIMO基地局の伝送容量を評価するため、測定データを用いて図7に示すクラスタチャンネルモデルを構成し、計算機シミュレーションを行った。チャンネルモデル化に当たっては、各測定点での全ての有意なパスの受信電力と到来角度、及び実験場所のレイアウト図から送受信機間の伝搬路を推定し、放射角度と遅延時間を求めた。推定された反射点は、複数の散乱物体から成るクラスタとみなし、マルチパスによるフェージングを生成した。

表2に主要なシミュレーション諸元を示す。基地局側は16サブアレー構成を仮定し、無指向性の1アンテナを持つ端末が16エリアに分布するものとした。個々のクラスタの角度広がり θ は5°とし、480MHz幅のOFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) による情報伝送を行う。

16ユーザーの空間多重(Multi-User MIMO)にはブロック対角化法を用いた。送受信機間の距離の差は、信号電力対雑音電力比(SNR)の差として扱い、シミュレーションを行った。



(a) エリア6屋上



(b) エリア12路上

図6. 受信点での受信電力強度と到来角

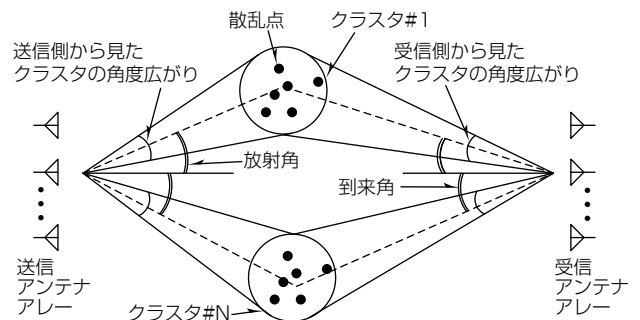


図7. クラスタチャンネルモデル

表2. 伝送シミュレーションの主要諸元

項目	諸元
伝送方式	OFDM
占有帯域幅	480MHz
変調方式	適応変調 QPSK/16QAM/64QAM/256QAM
誤り訂正	ターボ符号(1/2, 2/3, 3/4)
送信系サブアレー	2次元平面アレー(48素子)
送信系サブアレー数	16(10λ間隔)
ユーザー数	16ユーザー
受信系アンテナ	無指向性アンテナ×1
受信系NF	6 dB
クラスタ角度広がり	送信側・受信側とも5°
プリコーディング	ブロック対角化
オーバーヘッド	20%

QPSK : Quadrature Phase Shift Keying, NF : Noise Figure

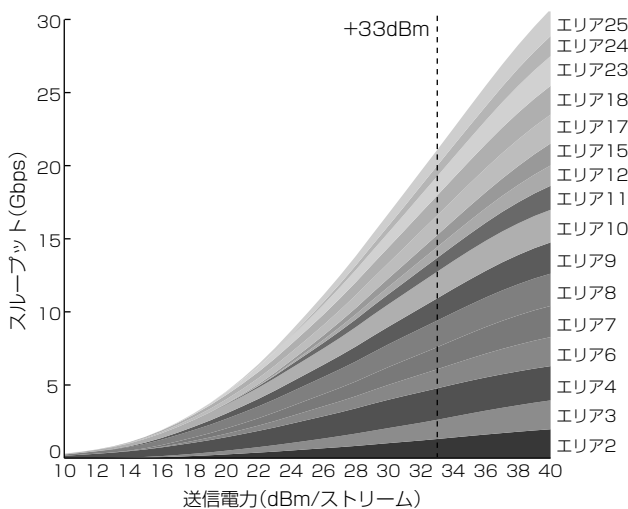


図8. 送信電力とシステムスループット

図8にユーザー(ストリーム)当たりの送信電力とシステムスループットの関係を示す。測定した25エリアのうち条件の良い16エリアにユーザー端末を配置した場合を想定した。測定エリアによって送信機からの距離が異なるため、平均受信電力に差異が生じる。図では各エリア別のスループット内訳についても示した。ストリーム当たりの送信電力を大きくするに従い、受信機における信号電力対干渉雑音電力比(SINR)が大きくなり、高次の変調方式・符号化率が選択されて高いスループットが得られる。同時通信する端末位置と端末ごとのスループットは要旨の図に示したとおりである。半径約100mの範囲に端末が分布した場合でも、ストリーム当たりの送信電力33dBmで、目標とする20Gbpsが達成できることが明らかとなった。今後

は、信号分離が困難なユーザーが近接するようなケースや、移動条件を考慮して検討を進め、実用的な環境で優れた伝送性能を確保可能な伝送方式の確立を目指す。

5. むすび

超大容量伝送の実現に向けて開発中のMassive MIMO技術について述べた。今後は、Massive MIMOの装置開発で、周波数利用効率の高い“Enhanced Mobile Broadband”の技術を確立し、2020年以降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貢献する。

本報告には、総務省からの委託を受けて実施した“第5世代移動通信に向けた研究開発”の成果の一部が含まれており、関係各位に深く感謝の意を表する。

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) 小原辰徳, ほか: ハイブリッドビームフォーミングを用いる超高速Massive MIMOにおけるCSI誤差の影響とチャネル推定に関する検討, 電子情報通信学会技術研究報告, RCS2014-338(2015)
- (4) 奥村幸彦, ほか: 5G実現に向けた高周波数帯・広帯域超多素子アンテナによる高速・低消費電力無線アクセス技術の研究開発の概要, 電子情報通信学会技術研究報告, RCS2015-249 (2015)
- (5) 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)
- (6) 岡崎彰浩, ほか: 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告, RCS2015-22 (2015)
- (7) A.Taira, et al. : Evaluation of Multi-Beam Multiplexing Technologies for Massive MIMO System Based on the EHF-band Channel Measurement, 2015 21st Asia-Pacific Conference on Communications(APCC), 228~233 (2015)