

MIMO 伝送を用いた 基地局アンテナ構成法に関する研究

宍戸 洸太*

Research on Base Station Antenna Configuration Method Using MIMO Transmission

Kota Shishido

筆者は、2016年10月に新潟大学大学院 自然科学研究科 博士後期課程 電気情報工学専攻に入学し、西森健太郎研究教授のご指導のもと、2019年9月に博士(工学)の学位を授与された。博士論文のテーマは、「MIMO 伝送を用いた基地局アンテナ構成法に関する研究」である。その論文の概要について紹介する。

The author entered the Graduate School of Science and Technology, Niigata University in October 2016, and majored in Electrical and Information Engineering under the supervision of Professor Kentaro Nishimori. In September 2019, he was awarded a doctorate degree. The theme of the doctoral dissertation is “Research on base station antenna configuration method using MIMO transmission”. The outline of the paper is introduced.

1. はじめに

近年、移動通信における技術変革のスピードはめざましく、携帯電話やスマートフォンだけでなく、ゲーム端末、ノート PC 等様々な小型端末内に移動通信用アンテナが実装されている。当初無線通信のアプリケーションは電話のみであったが、メールに始まり様々なアプリケーションが開発され、年々求められる通信速度・容量は急速に増加している。これに伴い、移動通信の世代交代も行われ、2020年には第5世代移動通信(5G)が実現されようとしている。5Gは高速大容量化(eMBB^{*1})・低遅延(URLLC^{*2})・多数同時接続化(mMTC^{*3})が定義され、様々な技術検討が行われている。

* 機器統括部 移動通信技術開発部

2. 近年の移動通信技術の動向と基地局アンテナの課題

近年、特に注目されている技術として、第3.9世代移動通信にあたるLTE^{*4}からMIMO^{*5}技術が導入されている⁽¹⁾。MIMO技術は送受信に複数のアンテナを用い、直接波・反射波・回折波が混在するマルチパス環境を利用することができる。これにより、同時・同一周波数にて複数の情報を送受信することが可能となり、通信容量を劇的に向上させた。

通信容量を簡単に増加させる方法として、利用周

*1 eMBB: Enhanced Mobile Broadband

*2 URLLC: Ultra Reliable Low Latency Communications

*3 mMTC: Massive Machine Type Communication

*4 LTE: Long Term Evolution

*5 MIMO: Multi Input Multi Output

波数帯域を広げる方法がある。移動通信システムにおいてはスモールセル基地局が導入され、現行利用されている UHF 帯・ミリ波帯の中で、様々な周波数帯域を用い、ユーザごとへ振り分ける HetNET^{*6} や複数の帯域を1つの端末相手に集約させることで、通信容量・速度を飛躍的に向上させる CA^{*7} などの技術を効果的に利用できる⁽²⁾⁽³⁾。スモールセル基地局はマクロセルの人口密集地に重なるようにアンテナを配置し、通信可能な周波数の増加、不感地帯のカバー、リピータのように周波数変換を行うなどの利用コンセプトが考えられ、必要なトラフィック量をエリアごとに最適化させることができる。

移動体通信の利用周波数は様々な周波数にわたって用いられており、エリア内では複数の周波数帯域が利用されている。また、sub6 や 28GHz 帯のような高い周波数が追加されるようになったが、それらの周波数はこれまで利用されてきた周波数に比べ、伝搬損失が距離に対して大きく、スモールセルとしての利用が考えられる。マクロセルのエリアはエリア内の建物、地形、周波数、利得などの様々な要因を受けて形状が変わる。スモールセルはそのエリア内をオーバーレイ、カバーするように配置され、伝送容量を向上させる。このスモールセル基地局用のアンテナに求められる機械・電気的性能として、

- ・ 景観等に配慮・調和した形状。
- ・ 高周波数の伝搬損失の増加に配慮した、アンテナの高利得化。
- ・ 垂直面指向性を高チルト化することで、隣接基地局への干渉抑制。

などの条件が挙げられる。これらを解決する手段として、アンテナ・反射板等にメタマテリアル技術を用いて、アンテナの構造を環境に最適化させながら、電気的特性に自由度を与えることが可能となる⁽⁴⁾⁽⁵⁾。メタマテリアル技術を用いたアンテナとしては右手左手系複合線路を用いた細径オムニアンテナが報告されている⁽⁶⁾。この細径オムニアンテナは2つの給電ポート間で偏波が直交するため、アイソレーションを確保しつつ、水平方向の角度によって偏波方向が変わる構造となる偏波合成方式となっている。しかし、偏波合成方式の実伝搬特性は測定されておらず、従来の偏波共用方式などと比較はされていない。

5G においては、MIMO 技術で用いられる送受信のアンテナ数を劇的に増やすことで大容量化を図る Massive MIMO が期待されている。非常に多くの素子が実装されたアダプティブアレーのように鋭く、高利得、多くのヌルをもつ指向性を形成し、通信を所望しているユーザには高利得のビームを向け、その他のユーザにヌルを向けることで、簡単な信号処理によって、所望ユーザのみとの通信を行うことができる。また、高利得化により、今後増加してくる sub6, 28GHz 帯などのこれまで移動通信に用いられてきた周波数よりも高い周波数の伝搬距離、基地局通信可能なセルサイズなどを大きくすることができる。

Massive MIMO はユーザの移動や人数などの変動によってビーム追従・選択をする必要があるため、構造は複雑化し様々な課題がある。Massive MIMO の課題は大きく4つに分けられ、

- ・ 課題 A：効果的なアンテナ配置（アンテナ素子の観点）
- ・ 課題 B：伝搬環境の特性評価（伝搬損・構造物による特性・セル設計など）
- ・ 課題 C：信号処理による指向性制御法（RF 回路・信号処理）
- ・ 課題 D：CSI^{*8} 取得方法と制御信号量の削減（通信効率への影響）

がある。課題 B～D に関しては(7)、(8)のように実験の積み重ねによる考察や様々な技術検討が行われているものの、課題 A のアンテナ配列では、ほとんどの検討が正分配列のアレーアンテナでの検討であり、特殊な素子構成での Massive MIMO の検討はほとんどない。

3. メタマテリアル細径オムニアンテナの伝搬特性評価⁽⁹⁾

3.1 アンテナ概要

メタマテリアル細径オムニアンテナ（メタロッドアンテナ）の構造に関しては、文献(6)で報告されている。本検討では、アンテナの構造を 5GHz 帯で動作させるようにユニットセルのパラメータを設計した。アンテナのユニットセル外観を図1に示す。アンテナはユニットセルを周期的に接続し、これに電流が通過することで漏れ波が発生する。本アンテナ

*6 HetNET：Heterogeneous Network

*7 CA：Carrier Aggregation

*8 CSI：Channel State Information

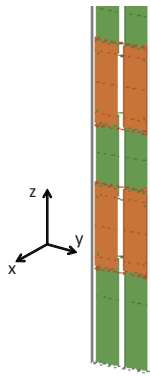


図1 ユニットセル構成

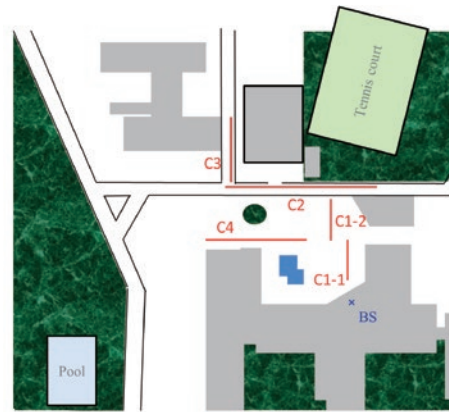


図3 測定環境

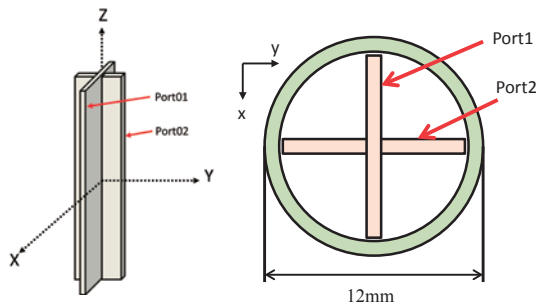


図2 メタロッドアンテナ構成

表1 アンテナ諸元

	細径オムニアンテナ	従来アンテナ
アンテナ形式	漏れ波アンテナ	ダイポールアレー
偏波	偏波合成	垂直・水平偏波
アンテナ径	12mm	50mm
ブランチ数	2	
中心周波数	5.12GHz	
周波数帯域	40MHz	
利得	約 5dBi	
V.S.W.R.	2.0 以下	
ポート間結合	約 -20dB	
水平面内指向性	無指向性(偏差 6dB 以内)	
垂直面主ビーム方向	下向き約 40度	

表2 測定諸元

基地局(受信)アンテナ	メタロッドアンテナ(偏波合成アンテナ) 従来アンテナ(垂直水平偏波共用アンテナ)
端末(送信)アンテナ	垂直偏波スリーブアンテナ 4本
中心周波数	5.12GHz
信号帯域	20MHz
送信電力	0.5 W / 1Port
平均 SNR (全受信電力の平均値)	20dB
信号変調方式	QPSK-OFDM 信号
サブキャリア数	56
基地局アンテナ高さ	6m
端末アンテナ高さ	1m

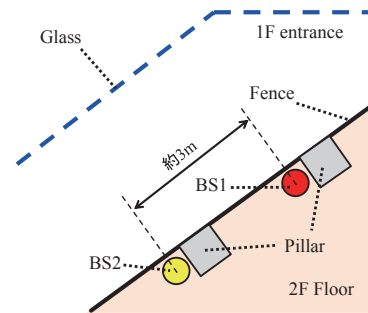


図4 基地局周辺環境

は 10 個のユニットセルを連続的に接続し、アンテナ先端に到達するまでにエネルギーを電波として放射し、反射を抑える構造となっている。図 2 にアンテナの上面図を示す。アンテナを十字に交差させることで 2 ブランチ化するとともに、細径化を実現した。結果、アンテナの内径は 10mm となり、外形 12mm のカバーに収まる構造となった。

3.2 伝搬試験諸元

表 1 に伝搬試験に用いたアンテナの電気特性の諸

元を示す。比較として従来の垂直・水平偏波共用のオムニアンテナ(従来アンテナ)の仕様についても示す。アンテナ径の差は顕著に出ており、メタロッドアンテナの径は従来アンテナの径と比較して約 1/4 と非常に細くなっている。

図 3 に測定環境を示す。測定は C1-1~C4 の各コースで行われ、基地局側 (BS^{*9}) に近い端点を 0m とし、1m 間隔で測定を行った。表 2 に実験諸元を示

*9 BS : Base Station

す。信号は各コース上の端末(UT^{*10})側から送信されて、BSで受信する上り回線での測定を行った。UTには4本の垂直偏波のスリーブアンテナを設置し、BSはメタロッドアンテナおよび従来アンテナを図4に示すBS1およびBS2に設置する。設置するアンテナはBS1に1種、BS2に残りの1種をそれぞれ2波長離れた状態で2本設置する。一度全コースで測定した後、BS1、BS2のアンテナを入れ替え再度測定する。これによりデータ量を増やし平均化することでフェージングの影響を少なくし、かつ2アンテナの測定箇所によるデータ数は同一となるため、公平に評価することができる。

3.3 伝搬特性の解析

前節で述べたように、BS側は2ブランチのアンテナ2本、UT側はスリーブアンテナ4本となるため、測定にて取得した伝搬行列は 4×4 の行列となる。本

検討では固有モード伝送での評価を行うため、取得したチャンネル行列に対して固有値分解を施す。得られた固有値を用いてSNR^{*11}およびチャンネル容量を

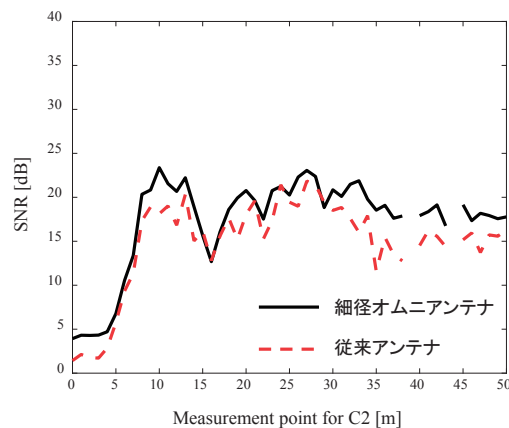


図7 C2におけるSNRの変化

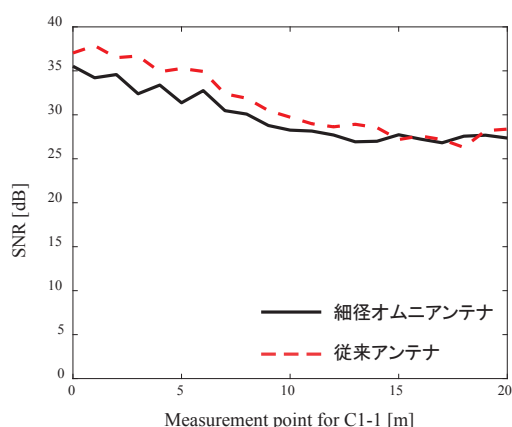


図5 C1-1におけるSNRの変化

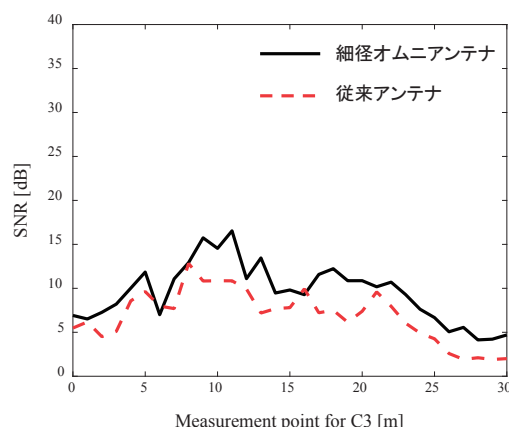


図8 C3におけるSNRの変化

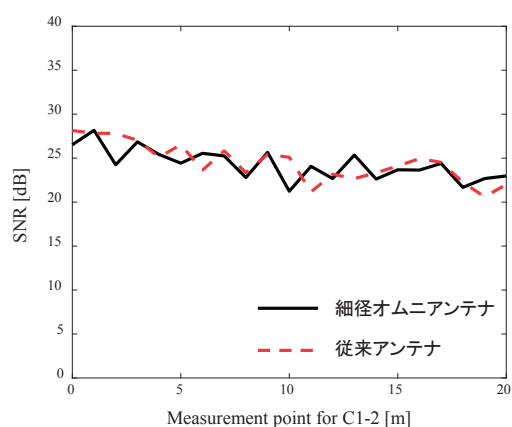


図6 C1-2におけるSNRの変化

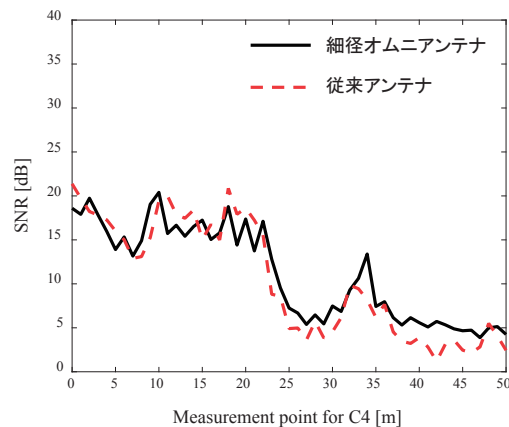


図9 C4におけるSNRの変化

*10 UT : User Terminal

*11 SNR : Signal to Noise Ratio

導出し、従来アンテナとの比較評価を行った。

図5～9に図3に示した各コースにおける信号対雑音比(SNR)を示す。結果は測定回数とサブキャリアで平均をとった。図7において、39mおよび43mの位置は駐車場の出入り口になっており、歩道の傾斜が大きく測定を行わなかった。図5, 6より、コースC1-1およびC1-2は基地局から離れていく方向へ動いており、基地局からの距離が長くなるほどSNRが下がっていくことがわかる。フェージングの影響はわずかにあるが、SNRの値は2種の基地局アンテナでほぼ同じになっている。図7に示すように、C2ではNLoS(Non Line of Sight)である建物の影からLoS(Line of Sight)環境となり、5m付近からSNRが上昇することがわかる。また、C2においてもSNRの変化は2つの基地局アンテナでほぼない。図8のC3のコースと基地局の間には、0m付近に樹木があり、0～3mにおいてSNRが低い。3m付近から距離が長くなるとSNRは上昇するが、基地局からの距離が長く建物の影に入るため、SNRは低くなる。C4はLoS環境からNLoS環境になるコースであり、図9に示すように、22m付近まではSNRが高い。その

後、建物の影になりSNRが下がる。コース全てにおいて、細径オムニアンテナと従来アンテナのSNRの大きさとコース位置変動による傾向はほぼ同じであることがわかる。図10～14に各コースにおけるチャンネル容量を示す。これらの結果も測定回数とサブキャリアで平均をとった。チャンネル容量は2種の基地局の間でほぼ同じとなり、各コースでのチャンネル容量の変動はSNRの変動とほぼ同じとなることがわかる。チャンネル容量はSNRに大きく依存している

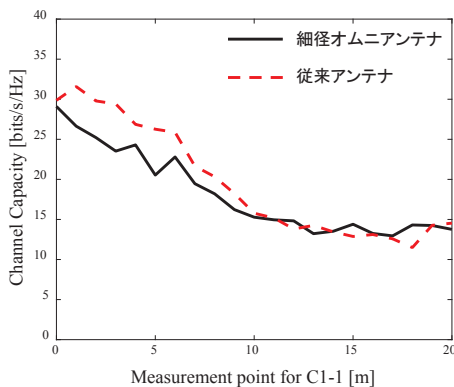


図10 C1-1におけるチャンネル容量の変化

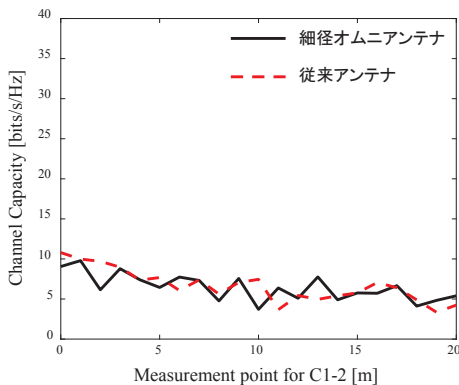


図11 C1-2におけるチャンネル容量の変化

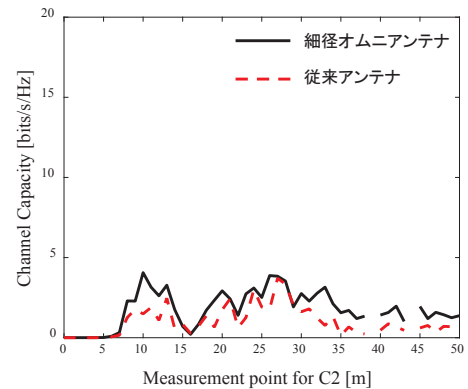


図12 C2におけるチャンネル容量の変化

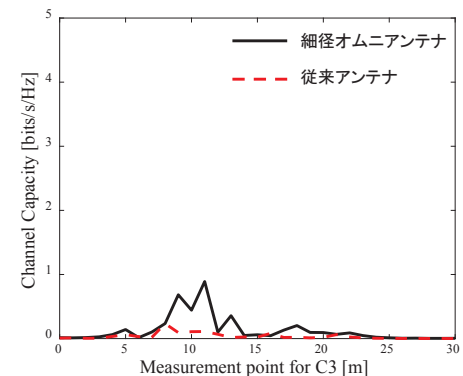


図13 C3におけるチャンネル容量の変化

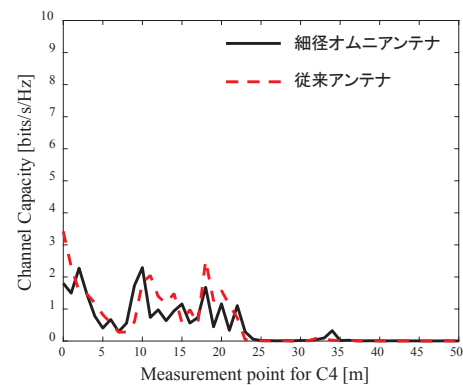


図14 C4におけるチャンネル容量の変化

ことがわかる。

メタロッドアンテナは従来アンテナよりも細径であり、スモールセル基地局が設置される低高度の場所では目立ちにくい構造になっているが、伝搬特性を比較しても、従来アンテナとほぼ同等の特性を有していることがわかった。

4. Massive MIMO 基地局におけるアンテナ素子配置の検討⁽¹⁰⁾

4.1 Massive MIMO コンセプト

2章で述べたように、Massive MIMO は MIMO 伝送をさらに拡張し、非常に多くの素子を基地局に搭載することで通信容量を大きく向上させることができる。また、アンテナ素子をアレー化することで利得を増加させ、基地局側もしくは端末側の電力を低減することができる。さらには、指向性の狭ビーム化およびヌル形成が容易になり、所望ユーザ以外への干渉抑圧効果が大きく、膨大な素子による指向性を複数ユーザに割り当てることによって、同時送受信を可能にする。Massive MIMO は非常に多くの素子を搭載するため高い周波数での利用が検討されている。図 15 に Massive MIMO の利用シーンについて示す。スモールセルのような人の密集する地域において Massive MIMO を活用することで、高い周波数による大きな伝搬損失、人口密集による干渉と逼迫するトラフィックを解消することができる。

4.2 ブロック対角化法による通信容量評価

複数ユーザと現実的な演算量で MU-MIMO^{*12} の指向性制御を実現する技術として BD^{*13} 法が知られている。本検討においては、下り回線における実現可能なビットレートを評価するために BD 法を用いた。BD 法はユーザごとに所望の信号を送るため

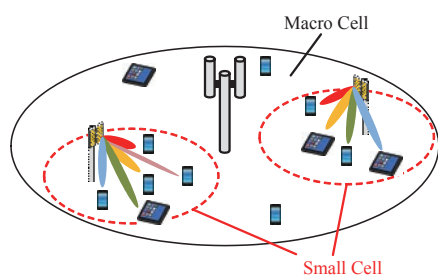


図 15 Massive MIMO 利用シーン

*12 MU-MIMO : Multi User MIMO

*13 BD : Block Diagonalization

に、所望ユーザ以外へは信号を送らないようウェイトを与える。MU-MIMO のみならず通信システムを評価するためには、誤り訂正まで含めた BER^{*14}、もしくは PER^{*15} で評価する必要がある。しかし、本検討はアンテナ配列の違いによって発生する特性の優劣を比較するため、SNR と空間相関のみで Massive MIMO の性能を評価し、通信方式によらない特性評価を行う。また、ここで達成可能な伝送レート (Achievable bit rate) と記載している理由として、BD 法ではシャノン限界は達成できないため、シャノン限界であるチャンネル容量という表現と区別するためにこのような表現をしている。以下、簡単化のため、達成可能な伝送レートのことを伝送レートと呼ぶこととする。

4.3 測定諸元

図 16 に屋外における伝搬チャネル測定実験の環境を示す。新潟大学五十嵐キャンパスの工学部近辺にて測定を行った。ユーザ装置 (UT) を図 16 の UT1 ~ 12 の場所に設置した。スモールセル環境を想定し、全ての UT は基地局 (BS) から直線距離で 150m 以内の場所に設置した。本検討では UT 側から BS への上り回線で評価を行った。図 17 に測定に使用した UT を示す。(a) には外観を、(b) に送信装置のブロック図を示す。図に示すように、IEEE802.11ac 標準規格の 20MHz の OFDM 信号を 4 系統生成している。本測定ではこのデータの中でロングプリアンプルを使用して CSI を推定している。ベースバンド信号は周波数変換器で 5.12GHz に変換される。図 18 に測定に使用した受信装置を示す。(a) には外観を、(b)

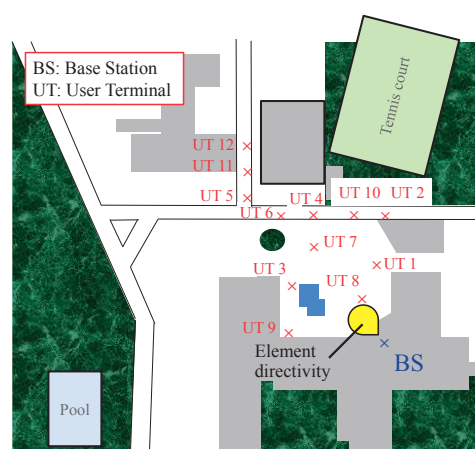


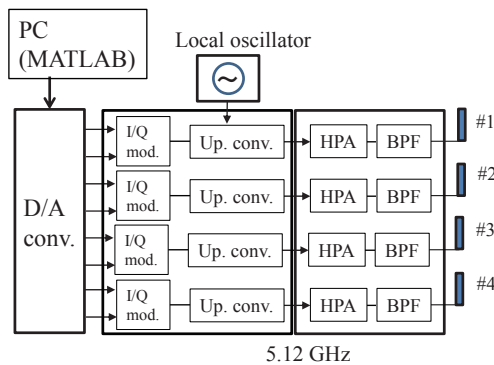
図 16 測定環境

*14 BER : Bit Error Rate

*15 PER : Packet Error Rate



(a) 外観

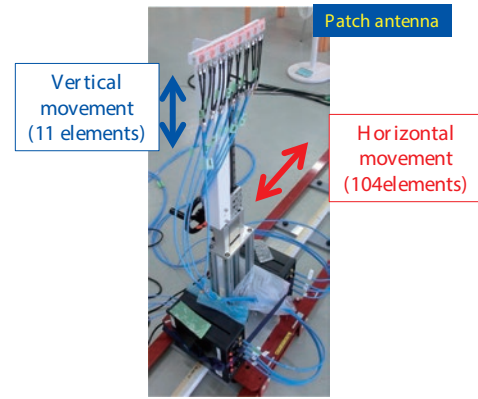


HPA: High power amplifier, BPF: Bandpass filter

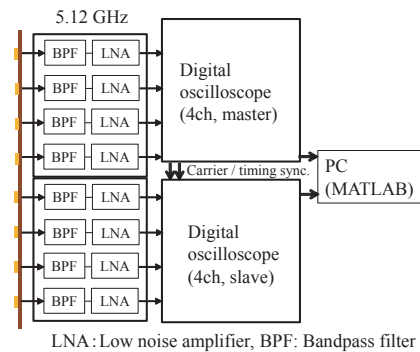
(b) ブロック図

図 17 送信装置

に受信装置のブロック図を示す。BS側では水平方向に8素子の垂直偏波パッチアンテナを0.5波長間隔で並べ、地上高6mの高さに設置し、ポジションで測定間隔が0.5波長間隔となるよう水平方向へ動かす。また、アンテナを取り付ける治具により上下方向へも動かす構造とした。こちらもパッチアンテナ1素子のサイズは1辺が0.5波長となっており、上下左右それぞれ0.5波長間隔で移動させながら測定することで、水平方向104素子、垂直方向11素子の最大1144素子の平面擬似アレーを構成することができる。測定は人通りのない静的な環境で行われているため、測定のチャンネル行列は変動しないことを確認している。受信側では、8素子のパッチアンテナで受信された信号に対し、低雑音電力増幅器を介して2台のデジタルオシロスコープで受信する。2台のデジタルオシロスコープは1台をマスターとし、1台をスレーブとして、ローカルとデータの受信タイミングが完全に同期している。UT側はスレーブアンテナを垂直偏波の状態を設置し、アンテナ



(a) 外観



LNA: Low noise amplifier, BPF: Bandpass filter

(b) ブロック図

図 18 受信装置

表 3 測定諸元

中心周波数	5.12GHz
帯域幅	20MHz
送信電力	0.5 W / 1Port
変調方式	QPSK-OFDM 変調
サブキャリア数	56
基地局アンテナ素子数	最大: 1144 最大垂直素子数: 11 最大水平素子数: 104
端末アンテナ数	4 / 1 User
基地局アンテナ高さ	6m
端末アンテナ高さ	1m

素子間隔を0.5波長とし、水平方向に4本並べて配置した。表3に測定諸元を示す。解析は平均受信SNRを20dBとなるように熱雑音を付加した後に、サブキャリアごとにBD法を用いてビットレートを評価した。

4.4 アレー構成による Massive MIMO 特性の解析

解析ではBSの測定データから疑似的にアレーを作成する。測定した伝搬チャンネルのうち、BS側のア

アンテナを長方形ないし正方形の形状で抽出する。垂直・水平共に素子間隔は 0.5 波長となっているため、同じ素子数であれば、全てのアレー構成例における開口面積は等しくなる。抽出する素子は測定した平面擬似アレーの素子から、隣り合った素子で配列可能な例を全て用いた。UT 側は最大 12 ユーザとし、1 ユーザあたり 4 アンテナを使用した MU-MIMO として評価する。図 19 に、BS アンテナとして 64 素子を抽出した場合における素子配列例を示す。配列は正方配列 (8×8: Square Array) から水平方向の直線配列 (1×64: Linear Array) に近づくよう水平方向の素子を増加させていく。表 4 に 64 素子構成の場合における、各 UT の SNR を示す。表より、BS から

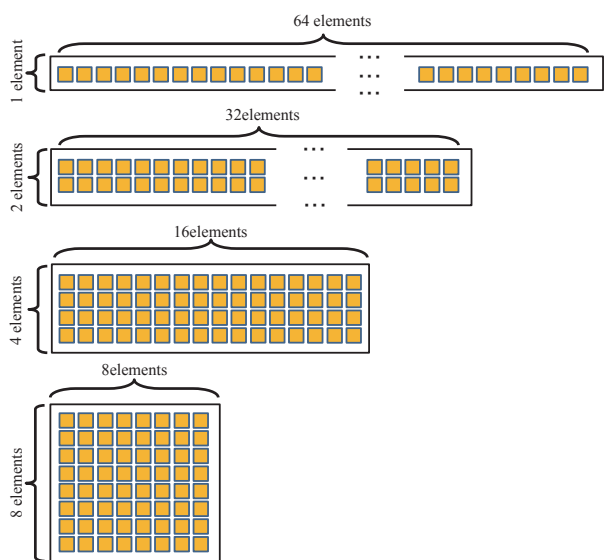


図 19 64 素子における基地局アンテナ素子配列例

表 4 64 素子 BS での各素子配列における受信 SNR

UT No.	垂直×水平素子数			
	8x8	4x12	2x32	1x64
UT1	19.30	19.42	19.33	19.22
UT2	0.76	0.74	0.80	0.83
UT3	16.80	16.48	15.96	15.76
UT4	17.23	17.29	17.47	17.52
UT5	2.82	2.85	2.97	3.05
UT6	11.70	11.47	11.24	11.24
UT7	20.80	20.97	21.02	21.08
UT8	22.42	22.60	12.35	23.62
UT9	1.67	1.67	1.57	1.51
UT10	19.48	19.75	19.84	19.72
UT11	7.25	7.22	7.46	7.69
UT12	1.95	1.91	1.81	1.75

単位: dB

の距離が短く見通し内環境であれば SNR は高く、見通し外環境や BS からの距離が遠くなれば SNR は低くなるのがわかる。また、素子数が同じであれば、素子配列によらず各 UT での値はほぼ同じとなるのがわかる。

図 20 に UT7 における 64 素子における正方配列と水平方向の直線配列における固有値の累積確率分布 (CDF *¹⁶) を示す。CDF が低いところでは、水平方向に直線配列の BS における固有値が正方配列のそれより大きくなるのがわかる。また、この傾向は特に低ランクの固有値においてよくあらわれる。図 16 の環境を模擬し、レイトレーシングにて各 UT から到来するパスを確認した。反射回数を 6、回折回数を 2 とした。表 5 に BS ポアサイトから UT の

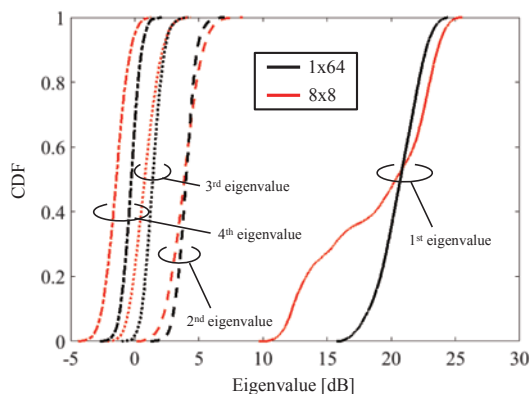


図 20 UT7 における固有値の CDF

表 5 各 UT における BS ポアサイトからの角度と角度広がり

UT No.	BS ポアサイトからの角度		垂直方向 角度広がり	水平方向 角度広がり
	垂直面	水平面		
UT1	7.90	-31.65	2.08	15.51
UT2	4.19	-35.20	1.44	29.69
UT3	4.93	26.26	1.84	19.94
UT4	3.76	-3.39	2.14	7.58
UT5	3.02	9.47	4.23	17.83
UT6	3.33	7.82	3.63	39.61
UT7	5.50	7.27	2.54	63.37
UT8	12.19	-15.31	6.07	12.86
UT9	5.86	53.04	1.57	6.64
UT10	4.13	-19.13	2.14	13.78
UT11	2.65	6.36	2.28	11.64
UT12	2.34	1.73	3.34	23.31

単位: dB

*¹⁶ CDF: Cumulative Density Function

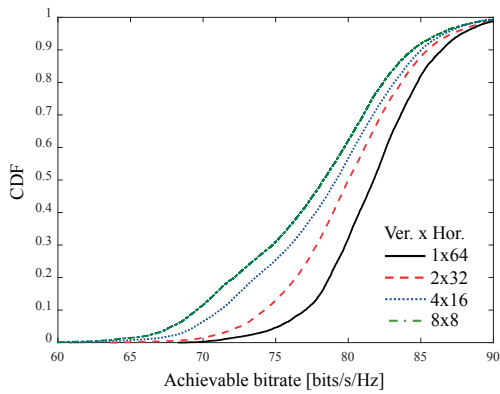


図 21 各素子配列におけるビットレート

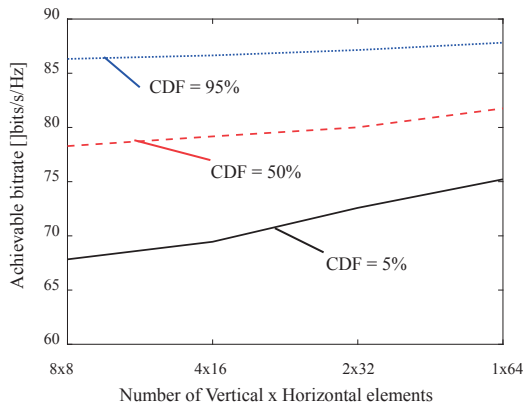


図 22 各 CDF における素子配列によるビットレート特性

方向を示す角度と各 UT における垂直・水平角度広がりを示す。全ての UT において垂直角度広がりよりも水平角度広がりの方が広いことがわかる。

図 21 に各素子構成におけるビットレート値の CDF を示す。素子構成によるビットレートは CDF が低いほど差が大きくなり、直線的に素子を配置する構成が有利になることがわかる。また、図 22 に素子構成による、各 CDF におけるビットレートを示す。CDF が低くなるほど素子構成によるビットレートが大きく変化する。正方配列の素子構成と比較すると水平方向に直線的に伸ばした素子構成の方がビットレートで優位な値となっていることがわかる。

図 23 に基地局素子数におけるビットレート特性を示す。素子配列は正方配列の場合と直線配列の 2 種のビットレートを示す。BS の素子数によらず、図 22 と同様に CDF が低いほど直線配列のビットレートが正方配列のビットレートと比較して常に高くなることがわかる。この結果は表 5 の角度広がりが、垂直面のそれよりも水平面のそれが広いことに

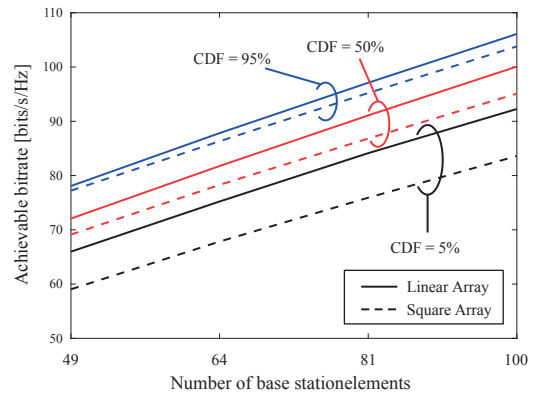


図 23 基地局素子数によるビットレート特性

起因していると考えられる。水平面の指向性自由度を高めることで各 UT の分離や固有値の偏差を少なくし、ビットレートに影響していると考えられる。以上により、アンテナ配列以外のハードウェアの変更なしでビットレートが改善可能なことがわかる。

5. む す び

本検討では以下の 2 つを課題として挙げた。

- ・ 偏波合成型スモールセル用メタマテリアルアンテナの実伝搬特性が不明
- ・ Massive MIMO において、素子配列が検討されていない

まず 5GHz 帯の偏波合成型左手系漏れ波オムニアンテナを設計し、屋外実環境における伝搬測定を行うことで、得られたチャネル行列から偏波合成型左手系漏れ波オムニアンテナと従来アンテナである偏波共用型のオムニアンテナとの特性比較を行った。取得したチャネル行列より、2 種のアンテナを 4×4 MIMO で評価し、2 つのアンテナの SNR およびビットレートを計算した。各コースにおける 2 種のアンテナにおける SNR の値から、細径オムニアンテナが従来アンテナとほぼ同等の特性が得られることがわかった。また、チャネル容量においてもほぼ同等の特性が得られており、MIMO としての効果もほぼ同等に得られていることがわかった。以上により、アンテナ径が従来アンテナよりも $1/4$ 以下であるメタロッドアンテナのチャネル容量が従来アンテナとほぼ同等であることがわかった。

次に、スモールセル環境を想定し、5GHz 帯の Massive MIMO 伝搬試験を行い、取得したチャネル行列から、素子数・素子配列を複数考慮しチャネル

行列を抽出した。抽出したチャンネル行列に BD 法を用いることでビットレートを評価した。まず、基本的な検討として、基地局アンテナの素子数を 64 素子とし、素子配列によるビットレートを評価した。その結果、12 ユーザの MU-MIMO において、BS の配列は同素子数において水平方向の素子を増加させるほど CDF の傾きが急峻で、特に CDF の値が低いときに基地局アンテナの水平方向の素子数が多いほどビットレートが高いことがわかった。次に、BS 素子数を 49~100 に変化させたときのビットレートの変化を各 CDF で評価した。素子数を変化させたときにおいても、水平方向の直線アレーの優位性が確認できた。本検討は孤立セルでの検討であり、複数セルにおける素子配列の性能評価や隣接セルからの干渉は評価していない。水平方向の直線配列でのアレー指向性は、垂直面内において広いビーム幅となるため、隣接セルの干渉を受けやすいと考えられる。よって、今回の特性はセルエッジが干渉しないような場合での特性となる。複数セルでの特性評価については今後の課題である。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、指導教官として丁寧かつ熱心なご指導を賜りました新潟大学大学院自然科学研究科電気情報工学専攻 西森健太郎研究教授に謹んで感謝いたします。また、多くのご助力、助言をいただきました、弊社社員の皆様に心より感謝いたします。

◆ 参 考 文 献 ◆

- (1) 3GPP Release 8, <https://www.3gpp.org/specifications/releases/72-release-8/>
- (2) 丹野元博, 森本彰人, 阿部哲士, 岸山祥久, 中村武宏, “LTE-Advanced におけるヘテロジニアスネットワーク,” 信学技報, RCS2009-317, Mar. 2010.
- (3) 西森健太郎, 小松原祥, 北尾光司郎, 今井哲朗, “ヘテロジニアスネットワークにおける干渉量評価のための屋外, 屋内および屋外-屋内伝搬特性測定,” 信学論 B, Vol. J95-B, No. 09, pp. 1159-1170, Sep. 2012.
- (4) F. Yang, and Y. Rahmat-Samii, “Microstrip Antenna Integrated with Electromagnetic Band-Gap (EBG) Structures: A Low Mutual Coupling Design for Array Applications,” IEEE Transactions, Antenna and Propagation, vol. 51, no. 10, pp. 2936-2946, Oct. 2003.
- (5) A. Lai, T. Itoh, and C. Caloz, “Composite Right/Left-Handed Transmission Line Metamaterials”, IEEE Microwave Magazine, pp.34-50. Sept. 2004.
- (6) 関卓也, 大島一郎, 道下尚文, 長敬三, “コプレーナストリップ線路で構成した偏波合成型左手系漏れ波オムニアンテナの 2 ブランチ化,” 信学技報, AP2015-184, Jan. 2016.
- (7) E. G. Larsson, O. Edfors, F. Tufvesson, and T. L. Marzetta, “Massive MIMO for Next Generation Wireless Systems,” IEEE Communications Magazine, Vol. 52, No. 2, pp. 186-195, Feb. 2014.
- (8) X. Wang, et al., “Large Scale Experimental Trial of 5G Mobile Communication Systems – TDD Massive MIMO with Linear and Non-Linear Precoding Schemes,” PIMRC2016 Workshop (IRACON2016), pp. 123-127, Sept. 2016.
- (9) 宍戸洸太, 大島一郎, 佐々木隆吉, 佐藤啓介, 西森健太郎, “5GHz 帯屋外実環境における偏波合成型左手系漏れ波オムニアンテナの性能評価,” 信学技報, AP-2017-176, pp. 1-5, Feb. 2018.
- (10) 宍戸洸太, 西森健太郎, 佐々木克守, 大島一郎, 谷口諒太郎, “5GHz 帯屋外実環境における Massive MIMO 基地局素子配列の検討,” 信学論 B, Vol. J102-B No. 2, pp. 62-71, Feb. 2019.



宍戸 洸太

平成 25 年入社

機器統括部 移動通信技術開発部

移動通信用アンテナおよび電波伝播の研究・開発に従事

電子情報通信学会会員

博士(工学)