

4-1 アンテナ・電波伝搬技術

Technology on Antennas and Propagation

今井哲朗 西森健太郎

Abstract

無数のセンサのデータ送信から高機能モバイル端末の高速通信に至る多様なトラフィックの効率的収容には、無線資源を周波数・時間・空間軸を含めて究極的に有効利用する技術が必要である。本稿では、800 MHz～100 GHz に至る無線資源の伝搬特性を踏まえた電波伝搬モデリングや計算手法の在り方、MIMO をはじめとした実際のアンテナシステムの構築や Massive MIMO 技術等の今後の進化の方向性、主な技術課題を議論する。

キーワード：伝搬損、チャンネルモデル、伝搬シミュレーション、MIMO、Massive MIMO、通信効率

1. ま え が き

無数のセンサのデータ送信から高機能モバイル端末の高速通信に至る多様なトラフィックの効率的収容には、無線資源を周波数・時間・空間軸を含めて究極的に有効利用する技術が必要である。アンテナ・伝播研究専門委員会（以下、A・P 研と呼ぶ）では、無線システムに係るアンテナ・伝播（AP）に関する研究に関して検討及び議論を進めてきた。昨年、ちょうど A・P 研は 50 周年を迎え、様々なイベントや会誌に記事を執筆した^{(1),(2)}。この 50 周年の歴史の中で、本分野も様々な過程を経て発展を遂げた。紹介している文献内では、アンテナ・伝播の歴史や今後の可能性について紹介されている。その中では、従来のアンテナや電波伝搬に関するトピックのみならず、Multiple Input Multiple Output (MIMO) システムのような、従来の A・P 研のみではハンドリングすることが困難であり、かつ他研究分野と情報を共有することが必要な分野が登場している⁽²⁾。そこで、本稿では、最近の話題を中心としたアンテナ・伝播技術の現状と将

来展望について述べる。800 MHz～100 GHz に至る無線資源の伝搬特性を踏まえた伝搬モデリング・シミュレーション手法、MIMO をはじめとした実際のアンテナシステムの構築や Massive MIMO 等の将来技術の今後の進化の方向性、主な技術課題を議論する。

2. 伝搬研究のこれまでとこれから

2.1 伝搬研究の歩み

電波伝搬の研究はシステム設計に資するための特性を明確化し、そのモデルを構築することである。したがって、これまでの歩みを語る場合、移動通信システムの発展の過程を見るとよく理解できる。図 1 は 1970 年代後半に商用化された第 1 世代から現在サービスされている第 4 世代までを、周波数、要素技術（アクセス方式、変調方式等）、セル構成について概観したものである。これらはトラフィックの増大とサービスの品質向上・多様化に対応するために、“周波数帯の拡張”、“周波数利用率の向上”、“ネットワークの高度化”の方向から変遷してきた。更に、これらを伝搬研究の観点から見ると、“新周波数の開拓”、“伝搬特性の多次元化への対応”、“伝搬環境の多様化への対応”と置き換えることができる。

新周波数帯の開拓は、奥村らが 1962～1965 年に実施した 400 MHz 帯～1.9 GHz 帯の 6 周波数帯（453 MHz、

今井哲朗 正員 (株)NTT ドコモ先進技術研究所

E-mail imaite@nttdocomo.com

西森健太郎 正員：シニア会員 新潟大学工学部情報工学科

E-mail nishimori@ie.niigata-u.ac.jp

Tetsuro IMAI, Member (5G Laboratory, NTT DOCOMO, Inc., Yokosuka-shi, 239-0847 Japan) and Kentaro NISHIMORI, Senior Member (Faculty of Engineering, Niigata University, Niigata-shi, 950-2108 Japan).

電子情報通信学会誌 Vol.100 No.8 pp.801-806 2017 年 8 月

©電子情報通信学会 2017

項目	1980	1985	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2025
移動通信システムの内容	▲自動車電話		▲大容量方式							
	第1世代		第2世代(PDC)			第3世代(IMT-2000)		第4世代(LTE)(LTE-A)		第5世代
	アナログ方式		デジタル化			広帯域化				
	周波数	800MHz帯		1.5GHz帯		2GHz帯, 1.7GHz帯		3.5GHz帯		6~100GHz帯
	アクセス方式	FDMA		TDMA		CDMA(HSPA)		OFDMA(SC-FDMA)		NOMA
変調方式	FM		QPSK		QPSK, AMC		AMC		MU-MIMO	
その他	アンテナダイバーシチ, セクタ化				RAKE受信		MIMO伝送 CA		Massive-MIMO	
セル構成	半径5~10kmセルの縮小化		半径~3km		半径~1km(高トラフィックエリア:数百m)		(HetNet環境)		(HetNet環境)	

図1 移動通信システムの歩み

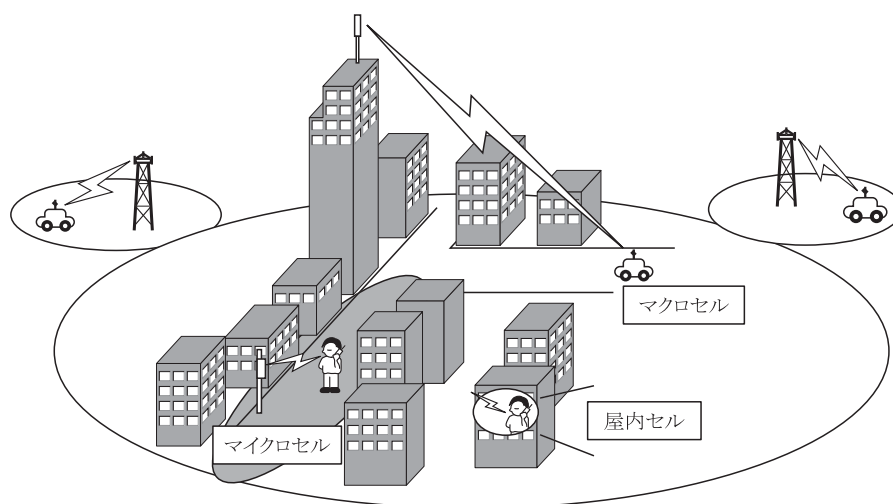


図2 伝搬環境の多様化

922 MHz, 1.310 GHz, 1.317 GHz, 1.430 GHz, 1.92 GHz) による大規模実験から始まったと言える⁽³⁾。その後、1990年代後半から2000年代前半に掛けて、第3~4世代に向けた2~6GHz帯の周波数が開拓された⁽⁴⁾。続いて、2012年から2015年に掛けては、第5世代のターゲットとされた6~100GHzの周波数帯が様々なプロジェクトで積極的に開拓された^{(5)・(6)}。なお、その成果は3GPPにおいて2016年度にほぼ標準化が終了している⁽⁷⁾。

次に、伝搬特性の多次元化について述べる。移動通信におけるシステム設計において基本となる伝搬特性は、マルチパス干渉とシャドーイングに伴う受信レベルの変動である。しかし、第2~3世代に向けたシステムのデジタル化・広帯域化に対応するために、伝搬遅延特性の解明とモデル化が必要となった。更に、第4~5世代では高速大容量データ伝送を実現するためのMIMO伝送の実用化が提案され、その性能評価のために、マル

チパスの空間分布特性(受信局に到来する電波の到来角度特性、及びそれらの波が送信局から出射された角度特性)が盛んに検討された⁽⁴⁾。なお、MIMO伝送では偏波もチャンネルの一つと考えることから、偏波特性の検討もこの時期から必須となった。また、第5世代では周辺移動物体による影響も重要なターゲットの一つとなった^{(5)・(7)}。現在、これらの全ての特性をまとめたものは“チャンネル特性”、そのモデルは“チャンネルモデル”と呼ばれる。

最後は、伝搬環境の多様化への対応である。奥村らはシステム設計をするために、伝搬環境を大きく、“市街地”、“中小都市”、“郊外地”に分類し、それぞれの環境における特性(主に伝搬損特性)を明らかにした⁽³⁾。その後、伝搬環境をこれらに分類することは一般的となった。なお、基地局アンテナの高さは周辺建物より高くすることが基本とされ、それらの基地局で形成されるセルはマクロセルと呼ばれる。第2世代以降からは、集中す

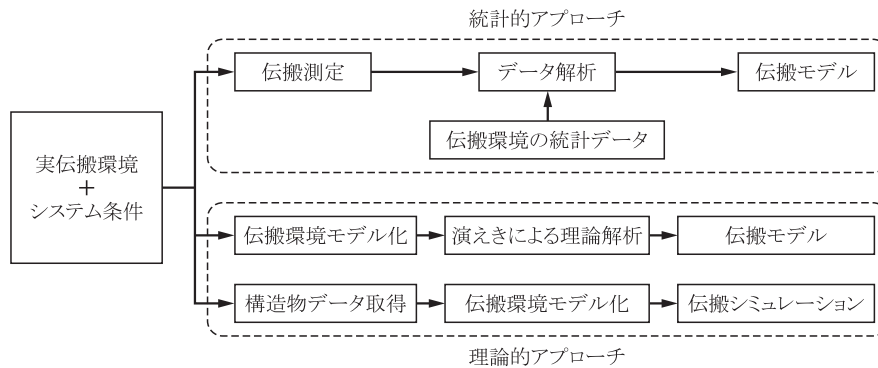


図3 伝搬研究のアプローチ

るトラフィックを収容するために、図2に示すようなマイクロセル（基地局アンテナ高が周辺建物高以下）や屋内セルがマクロセルにオーバーレイされるようになった。すなわち、現在では、マクロセル環境に加えて、マイクロセル環境、屋内環境における伝搬特性の解明・モデル化が必須となっている⁽⁷⁾。

2.2 研究アプローチと適用技術の変遷

伝搬研究のアプローチは大きく、①測定データに基づく統計的アプローチと②電磁界理論に基づく理論的アプローチに分類することができる（図3）。本節では、各アプローチにおいて適用される技術、特に伝搬推定のための技術の変遷について述べる。なお、測定技術等については、文献(5)、(6)を参照されたい。

奥村らがその方法論を示して以来、移動伝搬研究の主流となっているのが統計的アプローチである。現在、奥村一秦式と呼ばれる伝搬損の推定式は、奥村らが測定データをまとめたグラフ（奥村カーブと呼ばれる）を、秦が式として表現したものである⁽⁸⁾。ここで、1990年代初頭より推定式の作成において利用されるようになった技術に重回帰分析がある。坂上らによる文献(9)はその先駆である。坂上らは伝搬損特性を測定データから解析する際に、送受信間距離、周波数、基地局アンテナ高（移動局アンテナ高）に加えて、道路幅、道路角、建物高といったパラメータに着目し、これらのパラメータと伝搬損との関係を重回帰分析から求め、伝搬損推定式として定式化した。以降、重回帰分析による推定式の作成は極めて一般的となったが、同様のカテゴリーに分類されるものとして、1990年代後半から2010年代に掛けて提案されたニューラルネットワーク（NN）やファジーを用いた伝搬推定法がある。NNによる推定は重回帰分析で必要であった関数形のモデル化を自動化するために提案され^{(10),(11)}、一方のファジーによる推定は環境による分類の曖昧さを解消する目的で提案されたものである⁽¹²⁾。

理論的アプローチは電磁界理論を用いて伝搬特性を推

定するものである。1980年代後半、Walfischや池上らは送受信間の建物をマルチスクリーン等で簡易にモデル化し、伝搬損推定式を演えきのに導出した^{(13),(14)}。この“簡易な伝搬環境モデルを仮定して伝搬推定式を導出する”といった研究はその後進められたが、1990年代半ばからは、主流が“実際の伝搬環境モデルを用いた伝搬シミュレーションによる推定”へと移っていった。その代表が、レイトレーシング法による推定である⁽¹⁵⁾。レイトレーシング法は高周波近似の電磁界理論（幾何光学近似）を前提とし、電波を光線（Ray）とみなして電波伝搬をシミュレートする。ここで、屋外の推定の場合には、伝搬環境モデルを得るために市販の電子住宅地図等が用いられる。当初は計算速度が大きな問題であったが、計算機の進化によって、現在はシステム設計において一般的に利用されるようになってきている。伝搬シミュレーションの他の手法として、現在研究が進められているものに、FDTD法による推定がある。FDTD法はマクスウェルの方程式を構造物との境界条件を考慮しながら数値的に解く方法であり、メモリ容量・計算量の問題から、一般的にはアンテナ近傍の電磁界解析に用いられるものである⁽¹⁶⁾。しかし、スーパーコンピュータを利用しているものの、最近ではUHF帯の電波伝搬を広い三次元空間内でシミュレートできるようになった⁽¹⁷⁾。これは、2000年代では考えられないことであった。

2.3 今後の伝搬研究

これまでの伝搬研究は2.1で述べたとおり、“新周波数の開拓”、“伝搬特性の多次元化への対応”、“伝搬環境の多様化への対応”にて進められてきた。今後の伝搬研究についてこれらの方向から考えると、新周波数についてはより高い周波数であるテラヘルツ帯の開拓がポイントになるだろう。一方、伝搬特性の多次元化や伝搬環境の多様化については、将来システムの目指す方向や適用技術に大きく依存することから具体的に語るのは難しいが、例えば送受信局が共に移動するD2D（Device to Device）通信やセルが移動するムービングセルの発展

形などへの対応が考えられる。

次に、伝搬研究のアプローチから見た今後の方向性について考える。統計的アプローチは測定データを基に伝搬特性を推定することから、測定データの取得法とデータ解析法が推定精度向上のポイントとなる。従来、測定データは伝搬研究者が移動測定して取得していることから、データ量を増やすには極めて多くのコストと労力が必要となる。ここで、既にサービスを実施している周波数を対象とするならば、各々の携帯電話からの情報（受信電力、位置、通信基地局等の情報）を利用することにより、ビッグデータを取得することが可能である。今後はこのようなビッグデータから必要な情報をいかに抽出するかが重要になるだろう。その際に重要な技術となるのが機械学習（若しくは、人工知能）である。これまで提案されてきた NN による伝搬推定では、それまで必要であった関数形のモデル化を自動化したが、関数に渡すパラメータの種類や数については事前検討が必要であった。今後の機械学習による伝搬推定ではパラメータ検討も必要としない完全自動化を目指すことになるだろう。

一方、理論的アプローチでは、理論として原理的に近似レベルの低い FDTD 法による伝搬シミュレーションが主流になると考える。この場合、推定誤差の要因は主に構造物データの不備によるところが大きくなる。すなわち、今後は“どれだけ完全なデータを取得することができるか”が大きな課題となる。また、移動通信システムでは使用する周波数が高くなることから、従来の電子住宅地図では得られない建物表面の凹凸情報や樹木・標識等の情報も重要となる。現在、詳細な構造物データを取得するためにレーザスキャナによる点群データの利用が検討されている^{(5),(6)}。ここで、伝搬シミュレーションをするには、点群データを構造物の種類によりフィルタリングし、かつ各構造物をポリゴン化してシミュレーション用のモデルを作成しなければならない。また、各構造物モデルに対して電気的特性（誘電率、導電率）も

付与する必要がある。レーザスキャナによる点群データの利用を前提とするなら、“大規模な点群データの取得方法”、“点群データから構造物モデルへの効率的な変換方法”が今後の大きな課題になるだろう。

3. アンテナシステムの技術と課題について

3.1 最近の技術紹介

ここでは、MIMO 技術を中心に最近のアンテナシステムで主要となっている技術とその特性結果例について紹介する。

移動通信の発展に伴って 1990 年代にアダプティブアレーアンテナを使用する動きがあった。ただ、1990 年代のアダプティブアンテナは、信号処理アンテナを実システムに適用する機運を高めるきっかけを与えたものの、商用システムの導入までは至らなかった。しかし、この流れは MIMO システムの登場により大きく変化することとなる。MIMO 伝送とは、送受に複数のアンテナを用いて送受の信号処理技術により通信品質の向上と伝送速度の向上を実現する技術である⁽¹⁸⁾。

図 4 に、アダプティブアンテナと MIMO の違いについて述べる。MIMO とアダプティブアレーの大きな違いは、アダプティブアンテナが別ユーザからの干渉信号を除去することを目的として用いられているのに対し、MIMO では、自分自身が送信すべき複数の信号（図 4 の s_1, s_2 ）を多重して伝送することである。

MIMO システムのおかげで完全に信号処理アンテナの分野は一気に無線の花形分野となった。また、MIMO の技術を発展させた形として MU-MIMO が検討された。これは、Space-Division Multiple Access (SDMA) と呼ばれる技術であり、ちょうど MIMO 技術の提案から少し前にそのコンセプトが提案されている⁽¹⁹⁾。

ここで、MU-MIMO が導入されている IEEE802.11ac のスペックによる MU-MIMO の評価例を示す MU-

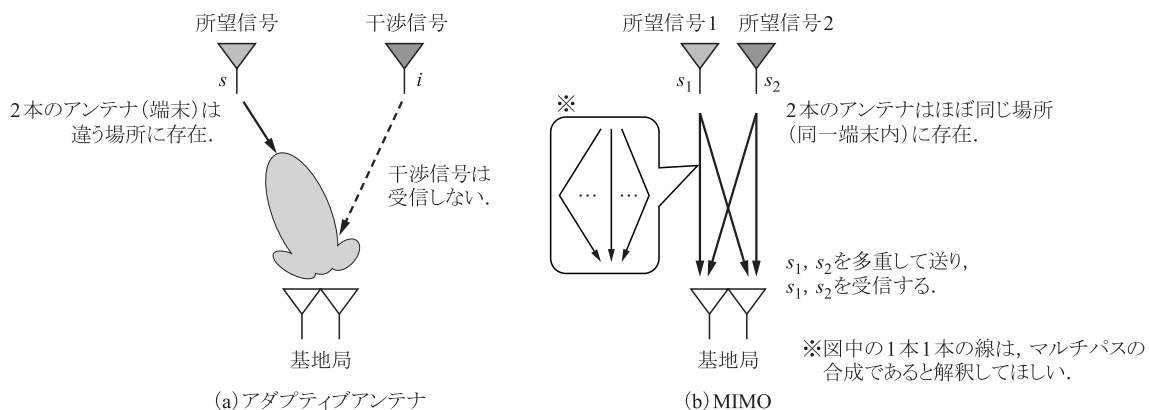


図 4 アダプティブアンテナと MIMO

MIMOでは、基地局とユーザ間の伝搬チャネル応答であるChannel State Information (CSI)を基地局側で取得する必要がある。ここでは、IEEE802.11acにおけるMU-MIMOのスループットの性能を評価した結果について述べる。詳細なパラメータについては誌面の都合上割愛するが、詳細は文献(20)に記載しているのでそちらを参照されたい。

MAC効率を考慮したスループット特性を図5に示す。データサイズは4万Byteとしている。送信アンテナ数、受信アンテナ数、ユーザ数(N_T, N_R, N_U)はそれぞれ16, 1, 4とした。図から、キャリブレーションを適用すれば、CSIフィードバックを行わないとスループットの改善効果が得られる。一方、キャリブレーションを適用しない場合は、 $d=15\text{m}$ 以上でCSIフィードバックを用いる方法よりもスループットが低下することが確認できる。すなわち、MU-MIMOでは、アンテナ・伝搬、ハードウェアの技術だけでなく、MAC制御まで考えてシステムを設計することが重要であり、総合的な技術提案と評価の双方を行った上でシステムを構築する必要がある。

3.2 現状と将来に向けた技術課題

最近では5Gシステムに向けた研究開発が積極的に進

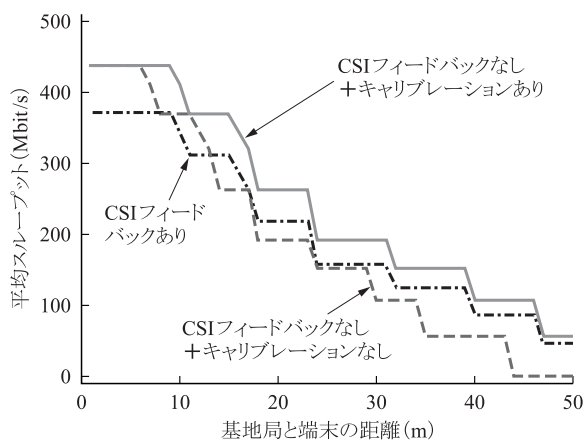


図5 IEEE802.11acにおけるスループット特性

われている。標準化等の動向の詳細については本特集の他の記事を参考にされたいが、ここでは、MIMO及びMU-MIMO技術の発展形であり、5Gシステムのキー技術となっているMassive MIMOを例として取り上げ、将来の技術展望について述べる。

図6にMassive MIMOの概念を示す⁽²¹⁾。Massive MIMOでは、ユーザ数に対し、非常に多数の基地局アンテナを用いることで、通信の信頼性や通信速度の向上を実現する。基地局アンテナ数を N 、ユーザ数を K とすると、 $N \gg K$ の関係を有する。Massive MIMOを下り回線に適用する場合は送信電力の低減を可能とし、上り回線に適用する場合は端末の消費電力を低減できる⁽²¹⁾。また、Massive MIMOは多くの素子を有するため、20GHz帯以上での検討が行われており、Massive MIMOと高周波数帯の親和性は良いと言える⁽²¹⁾。

実際、このような説明をすると、Massive MIMOは夢のようなシステムであるように見えるが実際には多くの課題が存在する。図7に筆者が考える、Massive MIMO伝送法の技術課題を示す。図に示すように、Massive MIMOではアンテナや伝搬に関しても最新の技術を導入する必要がある。先に述べたように、周波数が変われば考えないといけない伝搬モデルも大きく異なる。また、アンテナの配置の違いでMassive MIMOの性能に非常に大きな差が出るということが報告されている⁽²²⁾が、実際のところ、アンテナ配置を最適化した検討はほぼ皆無である。更に、アンテナ技術や伝搬解析だけでなく、回

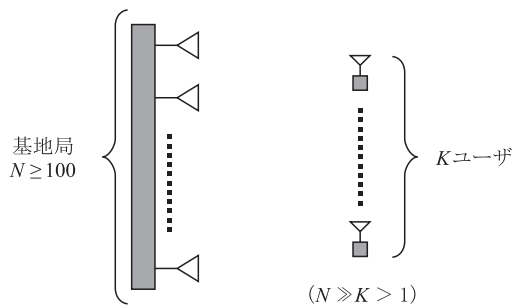


図6 Massive MIMOの概念図

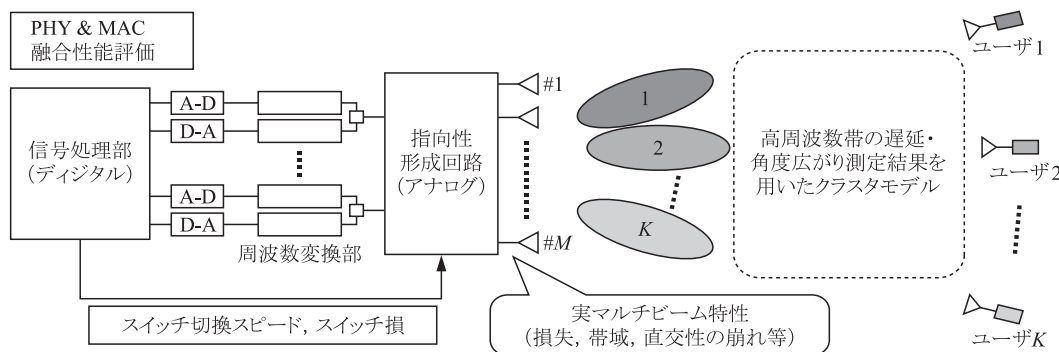


図7 Massive MIMOにおける技術課題

路や信号処理, MAC 層やその上のアプリケーションも含めてシステムを構築する必要があることが分かる. このためには, 従来の計算機シミュレーションのみの検討やテストベクトルによる部分的な検証のみだけでは不十分である.

なお, 現在は消費電力の観点から, Massive MIMO のハードウェアはアナログとデジタルでハイブリッド化を前提としている⁽²³⁾が, これも半導体デバイスの進化で反対にフルデジタルの信号処理が将来十分に実現できる可能性もある. 更に, 通信効率を考慮するために CSI を考慮しない構成を検討している⁽²⁴⁾が, これも将来の計算機の高速化が実現し大規模な FDTD がリアルタイム化されれば, CSI の推定遅延はなくなることもあり, 時代時代に応じた柔軟な発想で研究開発を行うことが必要となる.

最後に, これからは技術の各要素を定量的にかつ総合的に評価可能なシステムの構築が必要不可欠であり, これらの実現が将来のネットワーク構築に寄与すると考えることができる. その上で, 電波の出入り口であるアンテナ・伝搬関係の研究者が担う役割は非常に大きい.

4. ま と め

本稿では, 移動通信をターゲットとした場合に, 比較的最近の課題として取り上げるべき伝搬モデリングとアンテナシステムについて紹介した. また, 第5世代移動通信以降に想定される将来展望について述べた.

謝辞 本研究の一部は科研費基盤研究(B)(17H03262)の助成を受けて行われた.

文 献

- (1) A・P 研 50 周年記念講演, 信学技報, AP2015-159-166, Dec. 2015.
- (2) アンテナ・伝搬の研究開発のこれまでの 50 年とこれからの 50 年, 信学誌, vol. 99, no. 8, pp. 789-845, Aug. 2016.
- (3) 奥村幸彦, “移動電波伝搬「奥村カーブ」の確立と世界初商用セルラ電話の誕生に向けて,” 信学通誌, vol. 8, no. 1, pp. 66-73, June 2014.
- (4) Report ITU-R M. 2135-1, “Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-Advanced,” Dec. 2009.
- (5) 北尾光司郎, “電波伝搬のこれからの 50 年～移動伝搬研究の最新動向と今後の課題～,” 信学技報, AP 2015-163, pp. 47-52, Dec. 2015.
- (6) 北尾光司郎, “移動伝搬研究—進化する伝搬モデル及びシミュレーション—,” 信学誌, vol. 99, no. 8, pp. 820-825, Aug. 2016.
- (7) 3GPP TR 38.900 V14.1.0, “Study on channel model for frequency spectrum above 6 GHz,” Sept. 2016.
- (8) M. Hata, “Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services,” IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 29, no. 3, pp. 317-325, Aug. 1980.
- (9) 坂上修二, 久保井 潔, “市街地構造を考慮した伝搬損の推定,” 信学論(B-II), vol. J74-B-II, no. 1, pp. 17-25, Jan. 1991.
- (10) P. Chang and W. Yang, “Environment-adaptation mobile radio propagation prediction using radial basis function neural networks,” IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 46, no. 1, pp. 155-160, Feb. 1997.

- (11) E. Ostlin, H. Zepernick, and H. Suzuki, “Macrocell path-loss prediction using artificial neural networks,” IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 59, no. 6, pp. 2735-2747, July 2010.
- (12) S. Faruque, “Propagation prediction based on environmental classification and fuzzy logic approximation,” IEEE ICC '96, vol. 1, pp. 272-276, 1996.
- (13) J. Walfisch and H. Bertoni, “Theoretical model of UHF propagation in urban environments,” IEEE Trans. Antennas Propag., vol. AP-36, no. 12, pp. 1788-1796, Dec. 1988.
- (14) F. Ikegami, S. Yoshida, T. Takeuchi, and M. Umehira, “Propagation factors controlling mean field strength on urban streets,” IEEE Trans. Antennas Propag., vol. AP-32, no. 8, pp. 822-829, Aug. 1984.
- (15) 今井哲朗, 電波伝搬解析のためのレイトレーシング法, コロナ社, 2016.
- (16) 宇野 亨, 何 一偉, 有馬卓司, 数値電磁界解析のための FDTD 法, コロナ社, 2016.
- (17) M. Shirafune, T. Hikage, K. Shindo, S. Narahashi, T. Nojima, S. Tsuchiya, and T. Kawata, “Statistical analysis method of radio propagation path loss for gas-smart meters in a built-up area based on large-scale FDTD simulation,” IEEE ICCEM2017, pp. 254-256, Kumamoto, Japan, March 2017.
- (18) 大鐘武雄, 小川恭孝, わかりやすい MIMO システム技術, オーム社, 2009.
- (19) 西森健太郎, マルチユーザ MIMO の基礎, コロナ社, 2014.
- (20) T. Hiraguri and K. Nishimori, “Survey of transmission methods and efficiency using MIMO technologies for wireless LAN systems,” IEICE Trans. Commun., vol. E98-B, no. 7, pp. 1250-1267, July 2015.
- (21) F. Rusek, D. Persson, B.K. Lau, E.G. Larsson, T.L. Marzetta, O. Edfors, and F. Tufvesson, “Scaling up MIMO—Opportunities and challenges with very large MIMO—,” IEEE Signal Process. Mag., pp. 40-60, Jan. 2013.
- (22) R. Kataoka, K. Nishimori, N. Tran, T. Imai, and H. Makino, “Interference reduction characteristics by circular array based massive MIMO in a real microcell environment,” IEICE Trans. Commun., vol. E98-B, no. 8, pp. 1447-1455, Aug. 2015.
- (23) 須山 聡, 奥山達樹, 小原辰徳, 奥村幸彦, “5G 実現に向けた高周波数帯 Massive MIMO 技術,” 信学技報, AP2015-137, RCS2015-222, pp. 191-196, Nov. 2015.
- (24) R. Taniguchi, K. Nishimori, and H. Makino, “Multi-beam massive MIMO using constant modulus algorithm for QAM signals employing amplitude and phase offset compensation,” IEICE Trans. Commun., vol. E100-B, no. 2, pp. 262-268, Feb. 2017.

(平成 29 年 3 月 21 日受付 平成 29 年 4 月 18 日最終受付)



いまい てつろう
今井 哲朗 (正員)

平 3 東北大・工・電気卒. 同年日本電信電話株式会社入社. 以来, 陸上移動通信に関する電波伝搬, アンテナ及び回線設計法の研究開発に従事. 平 4 (株)NTT ドコモに転籍. 平 14 東北大大学院工学研究科電気・通信工学専攻博士課程了. 現在, NTT ドコモ先進技術研究所主任研究員. 平 10 年度本会学術奨励賞, 平 18, 25 年度本会論文賞, 平 26 年度本会通ソ Best Paper Award 各受賞. IEEE 会員.



にしもり けんたろう
西森 健太郎 (正員: シニア会員)

平 6 名工大・工・電気情報卒. 平 8 同大学院修士課程了. 同年日本電信電話株式会社入社. 以来, 主として移動通信基地局用アダプティブアンテナ, MIMO ハードウェア構成及び屋外・屋内測定評価技術, コグニティブ無線における干渉回避技術に関する研究に従事. 平 18 デンマーク国オールボー大客員研究員. 平 21 新潟大・工・准教授. 博士 (工学). 平 12 年度本会学術奨励賞, 平 14 IEEE AP-S Japan Chapter Young Engineer Award, 平 22 年度本会論文賞各受賞, IEEE 会員.