

ま え が き

現在、携帯電話や無線 LAN は、われわれの生活に欠かせないツールとなっている。携帯電話や無線 LAN の伝送速度は、この 15 年で約 100~1000 倍以上に伸びている。携帯電話や無線 LAN が使用できる周波数帯は非常に限られているため、この伝送速度の向上はまさに目覚ましい進歩といえる。もともと、「限られた周波数帯域においていかに伝送速度を向上させるか」という課題は、無線通信システムにおける永遠の課題であり、これまでもさまざまな技術によって改善がなされてきた。

これらのさまざまな技術の中で、この 15 年間主役を務めてきたのは、MIMO (multiple input multiple output) であろう。MIMO 技術は 1990 年代後半より検討が開始されたが、もともとはアダプティブアレーや適応等化器で用いられている技術を発展させたものであった。MIMO がこの 15 年の間でホットトピックになった理由は、この技術により送信アンテナと受信アンテナの増加に比例して通信容量が増大することが理論的に証明され、実験などを通じて実際の環境でそれが証明されたことが大きい。たちまち MIMO 技術は IEEE802.11n 標準化をベースとする製品に導入され、LTE (long term evolution) の主要技術の一つとしても採用された。さらに、通常の無線通信では「悪」とされていたフェージングという現象を積極的に利用する点についても非常に興味深いところであった。

本書は、MIMO 技術の基礎を扱うとともに、MIMO 技術を発展させたマルチユーザ MIMO (MU-MIMO) 技術の基礎について解説している。MIMO では、送信アンテナと受信アンテナの両方の数が増大しないと、通信容量は増大しない。通常、基地局のアンテナには多数のアンテナを配置できるが、われわれが通常使用するスマートフォンやタブレットなどの小型端末アンテナでは、多数の

アンテナを配置することは難しい。そこで、複数の端末が同時に基地局に接続するシナリオを考えれば、システム全体で通信容量が増大すると考える。これが MU-MIMO の基本的な考え方である。MU-MIMO 技術も、LTE-Advanced や IEEE802.11ac の標準化を経て製品化されようとしている。

本書の執筆では、基本的な通信方式、線形代数および確率論の知識があれば理解できるように心がけた。この分野は数式を利用して内容を理解することが求められ、本書ではできるだけ「やさしく」数式を説明しようと心がけたが、著者の力不足により十分に意図が伝わらない場合があることも考えられる。その際は、読者諸氏からご指摘をいただければ幸いである。一方、2章と3章の基本技術に関して、MATLAB のプログラムである m ファイルの例を添付した。これらのプログラム例を用いて、数式では理解できなかった内容を実際に動作させることで、理解を深めていただければ幸いである。

本書の範囲を越えるが、複数の基地局の連携など、空間信号処理とネットワーク技術を融合する技術の検討も行われている。このように、MU-MIMO を含めた MIMO に関する基盤技術はすでに成熟しつつある。また、近距離通信への応用やセンサへの適用など、MIMO および MU-MIMO 技術を応用した新たな適用領域が存在している。本書が読者の基礎知識の習得のみならず、今後の研究のきっかけになれば幸いである。

本書は電子情報通信学会アンテナ伝播研究専門委員会主催のワークショップのテキスト「やさしいマルチユーザ MIMO」に加筆・修正をしたものである。当時の実行委員の方々に感謝いたします。また、貴重なデータをご提供いただきました、NTT ドコモおよび NTT 未来ねっと研究所の関係各位に感謝いたします。

2014 年 7 月

西森健太郎

目 次

1. はじめに

1.1 技術背景 — MIMO 技術による伝送速度の高速化	1
1.2 MU-MIMO の概念とその課題	4
1.3 本書の構成	7

2. マルチユーザ MIMO 導入のための基礎

2.1 SISO における信号および伝搬モデル	9
2.2 MIMO における信号および伝搬モデル	15
2.3 伝搬チャネル行列の推定方法	19
2.4 MIMO のチャネル容量とその解釈	23
2.4.1 SISO, SIMO, MISO, MIMO におけるチャネル容量の 特性比較	23
2.4.2 2×2 MIMO におけるチャネル容量の解釈	30
2.5 MIMO における受信側信号分離技術	34
2.5.1 ZF	35
2.5.2 MMSE	40
2.5.3 SIC	46
2.5.4 MLD とその簡易化手法	53
2.6 MIMO における送信側指向性制御技術	61

2.7 各種 MIMO 制御技術の基本特性	68
2.7.1 チャネル容量特性	69
2.7.2 BER 特性	71

3. マルチユーザ MIMO 技術

3.1 多元接続	74
3.1.1 FDMA	74
3.1.2 TDMA	75
3.1.3 CDMA	76
3.1.4 SDMA	77
3.2 MU-MIMO における課題	79
3.3 MU-MIMO 用送信側指向性制御技術	83
3.3.1 システムモデル	83
3.3.2 線形制御法	89
3.3.3 非線形制御法	98
3.4 MU-MIMO 用信号分離技術	105
3.5 ユーザスケジューリング	105
3.6 MU-MIMO 制御技術の基本特性	108
3.6.1 チャネル容量特性	109
3.6.2 BER, ビットレート特性	121

4. マルチユーザ MIMO の測定結果例と今後の展望

4.1 屋内端末静止環境における伝送特性評価結果	130
4.2 屋内実環境におけるリアルタイム伝送特性評価結果	137
4.3 屋外実環境におけるリアルタイム伝送特性評価結果	139

4.4 屋外実環境におけるチャネル容量評価	143
4.4.1 3軸アンテナ配置による MU-MIMO の上り回線のチャネル 容量評価	144
4.4.2 中継局を考慮した MU-MIMO のチャネル容量評価	147
4.5 今後の展開	152
付 録	155
A.1 記号リスト	155
A.2 線形代数の基礎	156
A.2.1 基本的な性質	156
A.2.2 逆行列, 行列式, フロベニウスノルム	159
A.2.3 基本的な行列の演算	160
A.2.4 固有値と固有ベクトル, 特異値分解	160
A.2.5 空間相関	162
A.3 MIMO-OFDM の概要	164
A.4 各種 MIMO 制御技術の基本特性 (補足データ)	166
A.5 送信電力の定義	171
A.6 MATLAB ソースコードについて	172
引用・参考文献	184
索 引	192

1 | はじめに

1.1 技術背景—— MIMO 技術による伝送速度の高速化

「限られた周波数帯域において、いかに伝送速度を向上させるか」は、無線通信システムにおける永遠の課題であり^{1)~3)}†、これまでもさまざまな技術によって、その都度克服されてきた。図 1.1 に 2001~2010 年の携帯電話加入者数の推移を示す⁴⁾。図からわかるように、2007 年には 1 億台を突破している。さらに、スマートフォンや無線 LAN の普及に伴って高速なデータ通信を多くのユーザが使用する時代となっており、また、1 人が 1 台のみならず、2 台以上

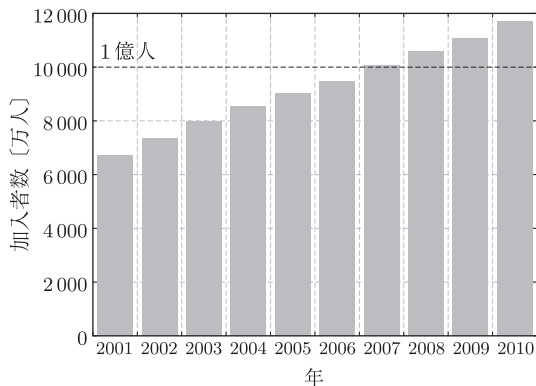


図 1.1 携帯電話加入者数の推移
〔「通信白書」2011⁴⁾より〕

† 肩つき番号は巻末の引用・参考文献を示す。

の携帯端末を所有する時代となっている。

技術的な発展と照らし合わせて考えると、21世紀に入り、CDMA (code division multiple access)^{5), 6)}を基本とする第3世代移動通信システムが導入され、LTE (long term evolution)を実現する商用サービスも2010年より開始された⁷⁾。また、無線LAN^{8), 9)}もさまざまな場所で使用でき、WiMAX¹⁰⁾では移動環境でも数十Mbpsの伝送が可能となっている。図1.2に、携帯電話と無線LANシステムの伝送速度の推移を示す。LTEやIEEE802.11n準拠の無線LANでは伝送速度が100Mbpsを超え^{11), 12)}、ユーザにとって非常に利便性の高いサービスが実現されている。「限られた周波数帯域における無線通信サービスの実現」という前提に立つと、これらのシステムでは、いずれも5bps/Hz (100Mbps/20MHz)を超える周波数利用効率を達成している。

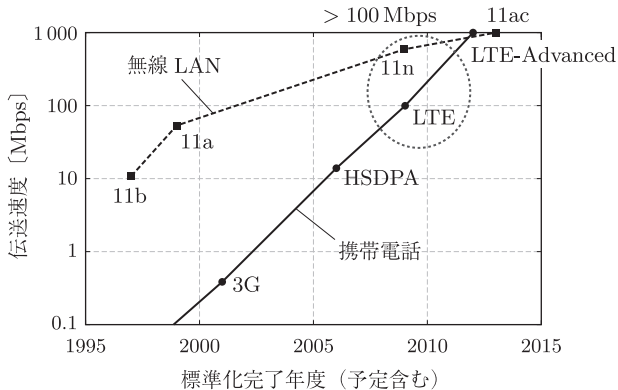


図 1.2 携帯電話と無線LANの伝送速度の推移

こういった性能向上の背景には、当然ながら目覚ましい技術の発展がある。半導体デバイスの進歩により、デジタル信号処理がより現実的な手段となった。OFDM (orthogonal frequency division multiplexing) 技術^{13)~15)}が導入されたことにより、各周波数チャネル (サブキャリア) でフラットフェージングチャネルを生成することができ、マルチパスフェージング下でも広帯域無線通信を活用できるようになったことも非常に大きな成果である。

さらに、OFDM におけるインターリーブ技術、Turbo 符号や LDPC (low-density parity-check code) などの誤り訂正技術、再送制御技術などの発展により、十数年前の移動通信では難しいと考えられていた 16QAM, 64QAM などの多値変調の適用が可能となった^{13), 15)}。ただし、これらの技術を用いたとしても、やはり限界がある。先に述べた非常に高い周波数利用効率を達成するためのブレークスルーは、MIMO (multiple input multiple output) 技術の導入であるといえる^{16), 17)}。じつは、図 1.2 の 100 Mbps を超える伝送速度は、MIMO 技術を適用することで達成されている。したがって、2000 年に入ってから無線通信システムの発展を最も支えた技術は、MIMO 技術であるといえる。

ここで、MIMO に関する定義について説明する。MIMO とは、送信局と受信局の両方に複数のアンテナ (アレーアンテナ) を用いることにより、i) 伝送速度の向上、ii) 信頼性の向上の、いずれかもしくは両方を実現可能とする技術である^{18)~20)}。i) は空間分割多重伝送 (spatial division multiplexing; SDM) と呼ばれ、ii) は空間ダイバーシティ (spatial diversity; SD) と呼ばれている。ii) に関する研究も多数行われているが、著者の見解では、MIMO の本質は i) である。なぜならば、送受信アンテナ数の増加にほぼ比例して伝送速度が向上する^{16), 17)} が MIMO 技術をここまで普及させた理由であると考えられるからである。したがって、本書では SDM に関しておもに解説する。SDM では、複数の異なる信号データを複数のアンテナから送信し、空間軸上で多重化を行う。受信局では、複数のアンテナで受信された信号から、空間軸上に多重化された複数の信号を、信号処理技術を用いて分離する。SDM では、送受信局の両方のアンテナ数を増やすと、周波数利用効率はアンテナ数にほぼ比例して向上することが証明されている^{16), 17)}。また、この結果は実験的にも明らかにされている (例えば 21)~25) など)。MIMO 技術は無線 LAN システムに導入されたことをきっかけに、WiMAX や LTE にも導入され、いまや無線通信システムにとって欠かせない技術となっている。

1.2 MU-MIMO の概念とその課題

前節で述べた MIMO 技術は、空間領域におけるアレーアンテナを用いた信号処理技術であると解釈できる。空間領域におけるアレーアンテナを用いた信号処理技術として MIMO とは異なる手法で、システム全体の周波数利用効率を向上させる技術が検討されてきた。これは、SDMA (space division multiple access) と呼ばれる技術であり^{26)~29)}、ちょうど MIMO 技術の提案より少し前にそのコンセプトが提案されている。

図 1.3 に SDMA の概念図を示す。SDMA は、アダプティブアレーアンテナ^{30), 31)} を基地局側に用いて複数の異なる指向性を形成することで、同一時間 (t_1)、同一周波数 (f_1) で複数のユーザと通信することを可能とする。無線通信システムにおいて複数のユーザと通信するためのアクセス方法 (多元接続) として、商用システムでは TDMA (time division multiple access) や FDMA (frequency division multiple access) がおもに用いられている²⁾。これらはそれぞれ、時間と周波数の違いで複数のユーザと通信することを可能とする。ただし、どちらの方法を用いても、周波数利用効率はユーザ数分だけ低下することになる。SDMA では、基地局のアンテナ本数分のユーザが同時に接続でき、

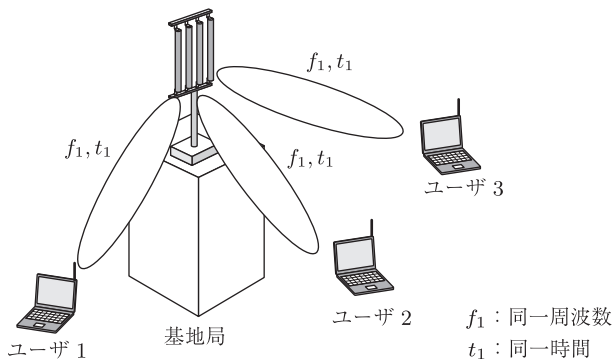


図 1.3 SDMA の概念図

形成される複数の指向性は直交する。ここで、直交とは、ユーザ 1 の方向に形成した指向性は、他のユーザ (2, 3) の方向には形成されない、すなわち、他ユーザの方向には指向性のヌルが形成されることをいう。このように、SDMA は TDMA や FDMA と比べて、複数のユーザが存在する環境下で高い周波数利用効率を得ることができる。

通常、SDMA では、図 1.3 に示すようにユーザ側のアンテナ数はそれぞれ一つであるが、SDMA に MIMO の考え方を導入することも可能である。つまり、ユーザ側のアンテナを複数にすることもできる。ただし、ユーザ側ではハードウェア規模の制約から、多くのアンテナを有することが困難である。そこで、基地局には多くのアンテナを設置し、複数のユーザと基地局の間で MIMO による通信を実現することを考える。これは、一般に MU-MIMO (マルチユーザ MIMO)^{32)~34)} と呼ばれている。MU-MIMO は、次世代無線 LAN の標準規格として検討が進められている IEEE802.11ac⁹⁾ や、次世代移動通信の規格として評価が進められている LTE-Advanced³⁵⁾ などにおいて検討されている。MU-MIMO と対比するために、1 人のユーザが基地局と MIMO による通信を行う場合をシングルユーザ MIMO (single user MIMO; SU-MIMO) と呼ぶ。さらに、MU-MIMO との対比がない場合は、断りなく SU-MIMO を単に MIMO と呼ぶことにする。

図 1.4 に SU-MIMO と MU-MIMO における主要な技術課題を示す。SU-MIMO と MU-MIMO の両方において、上り回線 (ユーザ→基地局) と下り回線 (基地局→ユーザ) でそれぞれ課題が異なることから、両者を分けて示している。図の例では、ユーザは 2 本のアンテナ、基地局はユーザよりも多い 4 本のアンテナを持ち、2 個のデータを同時に送信もしくは受信する状況を想定している。MU-MIMO の場合は、2 ユーザが同時に基地局と通信することを想定している。

最初に、SU-MIMO の場合の上り回線を考える。上り回線において、基地局 (ユーザ) が複数の異なる信号 (図 1.4 の場合 s_1, s_2) を同時に受信する必要がある。このとき、受信アンテナに入力される信号は s_1, s_2 がたがいに混ざった

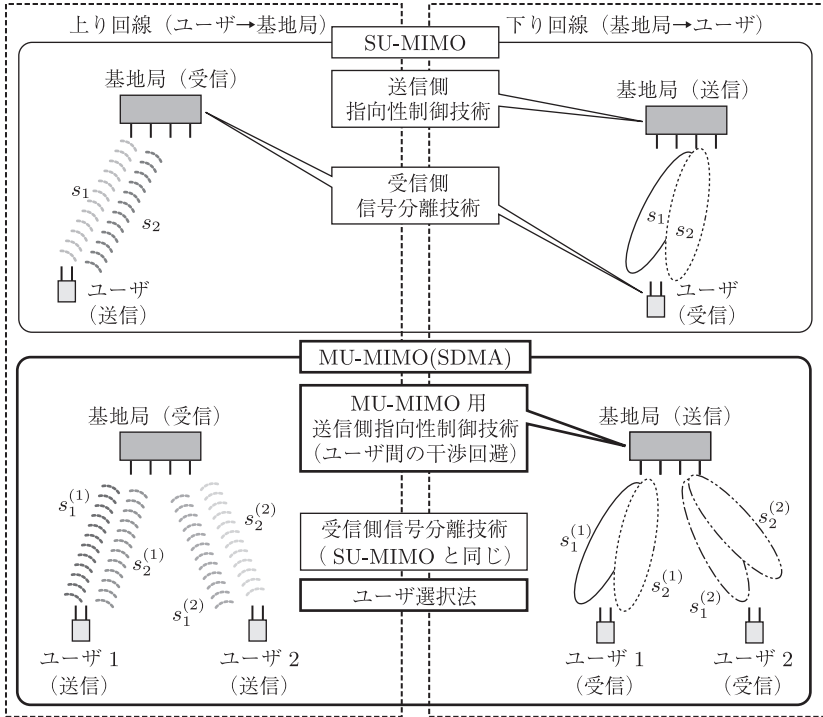


図 1.4 SU-MIMO と MU-MIMO における主要な技術課題

信号となる。上り回線だけでなく下り回線でも同じ問題が発生する。すなわち、上り回線/下り回線に関係なく、受信側では複数の信号を分離する技術（信号分離技術）が必須となる。

つぎに、SU-MIMO における下り回線の課題を考える。ここでは、基地局のアンテナ数よりユーザーのそれが少ない場合を考えており、図 1.4 では、同時に送信できる信号数は、基地局のアンテナ数によらず 2 となる。このとき、ユーザーのアンテナ数より多い基地局のアンテナを制御を実現することが課題となり、その解決手段として、送信側指向性制御技術を用いることが非常に有効となる²³⁾。送信側指向性制御の一つとして知られている固有モード伝送は、MIMO 制御方式の中で最も高いチャンネル容量を得る方法である^{36), 37)}。ただし、アンテナ単位で異なる信号を送信することも可能である²⁰⁾。例えば、基地局で測定した受

信電力をもとにして送信するアンテナを選択することも可能である。

ここまでは、SU-MIMO の課題を述べた。以下、図 1.4 を用いて MU-MIMO に関する課題を説明する。MU-MIMO の場合、SU-MIMO における技術そのまま適用できる場合と、そのままでは適用できない場合がそれぞれ存在する。まず、上り回線に着目すると、複数ユーザの総アンテナ数が基地局のアンテナ数以下であれば、SU-MIMO における受信側信号分離技術がそのまま適用できる。図 1.4 において、基地局はユーザ 1 の信号 $s_1^{(1)}$, $s_2^{(1)}$, ユーザ 2 の信号 $s_1^{(2)}$, $s_2^{(2)}$ を 4 個の異なる信号と見なし、これらの信号に対する信号分離技術を適用すればよい。

MU-MIMO における上り回線では SU-MIMO の技術が適用できるのに対し、MU-MIMO の下り回線では、MU-MIMO 独自の技術が必要となる³⁴⁾。先に述べたように、SDMA では対象とするユーザ以外のユーザの方向に指向性のヌルを形成する。SU-MIMO における送信側指向性制御では、当然ながら他ユーザに対する指向性のヌルの形成は考慮しない。所望のユーザへの信号が他ユーザに届くと、これは干渉となる。ユーザ間では一般にデータのやりとりはできないので、ユーザは他ユーザのために基地局から送信された信号（干渉信号）を取り除く術がない。したがって、MU-MIMO の下り回線では、他ユーザへの干渉を回避する送信側指向性制御技術が必須となる。

さらに、MU-MIMO では、基地局と通信するユーザの組合せが非常に重要であり、上り回線/下り回線の両方でユーザを選択する手法が課題となる。

1.3 本書の構成

本書では、MU-MIMO 技術に関して、その実現のためのキー技術の一つである送信側指向性制御技術と受信側信号分離技術を中心に解説を行うことを目的とする。本書は全体で 4 章構成となっている。以下、各章の内容について簡単に説明する。

索引

【あ】

アクセス制御	153
アダプティブアレー	35
誤り訂正	132
アンテナ利得	33

【い】

一般逆行列	39
インプリシットビーム フォーミング	154

【う】

ウイナー解	44
ウエイト	38
ウエイト回路	36

【え】

エルミート行列	43
---------	----

【お】

オフセット量	104
--------	-----

【か】

ガードバンド	75
拡散符号	76
角度広がり	17
簡易 MLD	53
干渉信号	40
干渉信号除去	35
干渉白色化	141

【き】

逆行列	38, 138
-----	---------

キャリアオフセット	81
行列式	23
近距離 MIMO	154

【く】

空間相関	31
空間多重数	16
下り回線	5
クロスレイヤ	154
クロック	81

【こ】

交差偏波識別度	33
硬判定	49
コードブック	140
固有値	28
固有ベクトル	63
固有モード伝送	61

【さ】

最大 SIR	107
最尤推定	35
雑音強調	39
雑音部分空間	94
サブキャリア	133
散乱リングモデル	17

【し】

指向性	77
周波数変換部	132
周波数ホッピング	76
受信信号の相関行列	42
ショートプリアンプル	133
所望信号	40

シリアル-パラレル変換	63
信号点配置	49
信号部分空間	94
信号分離技術	6

【す】

垂直偏波	144
推定誤差	23
水平偏波	144
スリープアンテナ	133

【せ】

線形制御法	89
センサネットワーク	153

【そ】

相関行列	28
相関ベクトル	42
相加・相乗平均の定理	31
送信側指向性制御	6
送信ダイバーシティ効果	61
素子間隔	17

【た】

対数尤度比	141
ダイバーシティ	26
タイムスロット	75
第 1 固有値	47
多元接続	74
多値変調	35
単位行列	28

【ち】

チャンネル容量	6
---------	---

<p>中継局 147</p> <p>直接拡散 76</p> <p>直線アレー 18</p> <p>直交性 77</p> <p>直交偏波 33</p> <p style="text-align: center;">【て】</p> <p>低雑音増幅器 132</p> <p>適応変調 65</p> <p>適応変調符号化制御 134</p> <p>伝搬チャネル応答 9, 10</p> <p>伝搬チャネル行列 16</p> <p>伝搬チャネルベクトル 45</p> <p>電力増幅器 27</p> <p style="text-align: center;">【と】</p> <p>等価回路 64</p> <p>特異値行列 63</p> <p>特異値分解 62</p> <p>トレーニング信号 42</p> <p style="text-align: center;">【な】</p> <p>伸上-ライスフェージング 14</p> <p style="text-align: center;">【ぬ】</p> <p>ヌル 7, 77</p> <p>ヌル空間 91</p>	<p style="text-align: center;">【ね】</p> <p>熱雑音 9</p> <p style="text-align: center;">【の】</p> <p>上り回線 5</p> <p style="text-align: center;">【は】</p> <p>ハイブリッド自動再送要求 141</p> <p style="text-align: center;">【ひ】</p> <p>非線形演算 8</p> <p>非線形制御法 89</p> <p>左特異行列 62</p> <p>非同期アクセス 77</p> <p style="text-align: center;">【ふ】</p> <p>フェージング相関 142</p> <p>復号信号 49</p> <p>符号化率 133</p> <p>プリアンプル 20</p> <p>フレーム効率 133</p> <p>フロベニウスノルム 23</p> <p>プロポーショナルフェアネス 107</p> <p style="text-align: center;">【へ】</p> <p>平均 2 乗誤差 42</p>	<p>ベクトルノルム 40</p> <p>変調多値数 55</p> <p style="text-align: center;">【ま】</p> <p>マルチパス 10</p> <p>マルチユーザダイバーシティ 106</p> <p style="text-align: center;">【み】</p> <p>右特異行列 62</p> <p style="text-align: center;">【ゆ】</p> <p>ユークリッド距離 49</p> <p>ユーザスケジューリング 106</p> <p>ユニタリ行列 23</p> <p style="text-align: center;">【ら】</p> <p>ラウンドロビン 107</p> <p style="text-align: center;">【る】</p> <p>累積確率関数 12</p> <p style="text-align: center;">【れ】</p> <p>レイリー分布 11</p> <p style="text-align: center;">【ろ】</p> <p>ロングプリアンプル 133</p>
--	--	---

<p style="text-align: center;">【A】</p> <p>AGC 131</p> <p>AMC 135</p> <p>A/D 変換器 132</p> <p style="text-align: center;">【B】</p> <p>BD 法 87</p> <p>BER 8</p> <p>BLAST 47</p>	<p style="text-align: center;">【C】</p> <p>CDF 12</p> <p>CDMA 2, 74</p> <p>CI 法 89</p> <p>CoMP 154</p> <p>CP 140</p> <p>CSI 137</p> <p>CSI-RS 140</p>	<p style="text-align: center;">【D】</p> <p>Decode and Forward 方式 148</p> <p>DPC 99</p> <p>D/A 変換器 132</p> <p style="text-align: center;">【E】</p> <p>EM-BF 61</p>
--	---	---

	[F]	Massive MIMO	154	SIC	34, 35
		Max-Log-MAP アルゴリズム		SIMO	23
FDMA	74		141	SINR	46
FFT	131	MIMO-OFDM	132	SISO	9
FPGA	137	MISO	23	SNR	9
	[G]	MLD	34, 35		
		MMSE	34, 35	[T]	
GI	164	Modulo 演算	102	TDD	63
	[H]			TDMA	74
		[O]		THP	102
HARQ	141	OFDM	2		
	[I]	OFDMA	75	[V]	
				VP	103
IFFT	131	[Q]		VP-BD 法	105
i.i.d. レイリーフェージング	19	QPSK	47		
	19	QR 分解	55	[Z]	
I, Q 信号	132	QRM-MLD	35	ZF 法	19
	[L]			ZF-DPC	100
		[R]		~~~~~	
LLR	141	RCI 法	90	[数字]	
LSI	153			3 軸アンテナ配置	143
	[M]	[S]			
		SDM	3		
M アルゴリズム	55	SDMA	4		

— 著者略歴 —

- 1994年 名古屋工業大学工学部電気情報工学科卒業
1996年 名古屋工業大学大学院工学研究科博士前期課程修了（電気情報工学専攻）
日本電信電話株式会社入社
2003年 博士(工学)(名古屋工業大学)
2006年 デンマーク オールボー大学客員研究員
2009年 新潟大学准教授
現在に至る

マルチユーザ MIMO の基礎

Basic Theory and Performance on Multi-user MIMO

© Kentaro Nishimori 2014

2014年9月8日 初版第1刷発行



検印省略

著者 にし もり けん た ろう
西 森 健 太 郎
発行者 株式会社 コロナ社
代表者 牛来真也
印刷所 三美印刷株式会社

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10

発行所 株式会社 コロナ社

CORONA PUBLISHING CO., LTD.

Tokyo Japan

振替 00140-8-14844・電話(03)3941-3131(代)

ホームページ <http://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-00867-8 (大井) (製本:愛千製本所) G

Printed in Japan



本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられております。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は、いかなる場合も認めておりません。

落丁・乱丁本はお取替えいたします