

(5) MIMO・OFDM 方式における キーテクノロジーの研究

欧州研究所では、第4世代移動通信システムでの高速・大容量無線アクセスの実現に向け、主にOFDMとMIMOに関する研究を行っている。MIMO・OFDM方式の移動通信システムへの適用を考慮した場合、屋外でも十分なカバレッジを達成するための所要信号対雑音比の改善や、将来のデバイスの処理性能を考慮した信号処理量の低減など、数々の課題が存在する。本研究ではこのような課題を明確化し、これを解決するOFDMチャンネル推定、マルチユーザ検出、ピーク電力低減、チャンネル符号化、MIMO送信ダイバーシチ、送信適応ビームフォーミングなどに関する新方式の研究を行っている。

ま と ば な お と グ ン タ ー ア ウ ー ゲ ル ハ ル ト バ ウ フ
的 場 直 人 Gunther Auer Gerhard Bauch
ア ン ド レ ア ス ザ ウ ル く す め か つ と し で ん の さ と し
Andreas Saul 楠 目 勝 利 田 野 哲

1. まえがき

デバイスの日進月歩の進化は音声、音楽、画像、映像などのマルチメディアコンテンツのデジタル化を可能にした。これらの情報を手軽に、より高品質・高速にコミュニケーションを行う手段として、移動通信への期待がますます高まるものと想定される。第4世代(4G: 4th Generation)移動通信では第3世代移動通信(IMT-2000: International Mobile Telecommunications-2000)を大幅に上回るネットワーク能力が求められており、それを達成するためには現在、第2世代(2G)、第3世代(3G)のシステムで提供されているサービスエリア、移動端末サイズ、ユーザの利便性、コストを犠牲にせず、より高速、大容量の無線アクセス技術を実現することが必要である。

4Gの要求条件として100Mbit/s程度を目標として設定した場合、現在より広い50MHz~100MHz程度の周波数帯域幅を用いることが必須となる[1]。広帯域信号伝送の場合、無線伝搬路は非常に多数のパスに分解される。このようなマルチパスの厳しい伝送路では、3Gで用いられたスペクトラム拡散よりも直交周波数分割多重(OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing)の方が優れた特性を発揮する。ただし、OFDM復調系は高速信号処理が要求されるため、処理量軽減は重要な課題である。一方、与えられた周波数帯域において伝送路の容量(速度)を増大させる方法にマルチアンテナ信号伝送法(MIMO: Multiple Input Multiple Output)技術がある。MIMO技術は複数のアンテ

ナを送受信機に用いることで伝送容量を増大させるものである。そこで、欧州研究所では将来の4Gシステム実現に向け、伝送速度の向上と周波数利用効率の増大のため、OFDMのようなマルチキャリアアクセス方式に関する技術、MIMOに関する技術に焦点を絞り、さまざまな検討を行っている。

具体的には、マルチキャリアアクセス方式の実現に向けチャンネル推定精度の向上を図る方式、MIMOを適用した場合の高効率なチャンネル推定法について提案している。また、受信側では、マルチキャリア符号分割多元接続(MC-CDMA: Multi Carrier-Code Division Multiple Access)のように拡散を行う場合のビット誤り率(BER: Bit Error Rate)特性の向上のため、検波方式について新しい提案を行っている。さらに、マルチキャリア伝送方式では、特にピーク電力の増大が問題となるため、ベースバンド信号処理でこのピーク電力を削減する方式、OFDMに適したチャンネル符号化についても提案している。

MIMOに関しては、アクセス方式をOFDMと想定し、送信アンテナから、時間、空間、周波数方向で相関関係にありながら異なる情報系列を送信する送信ダイバーシチの提案を行っている。また、MIMOを用いたときの同期検波では、チャンネル推定のためのパイロット信号が多数必要となり、効率が悪くなるという問題が生じる。そこで、このようなパイロット信号が不要となる差動符号化について、周波数利用効率の高い新しい方式の提案を行っている。また、指向性送信の分野では、空間方向の統計情報を利用したビームフォーミング、さらに送信信号に対して時間・空間方向に信号処理を行い、特性を改善する、送信側時空間信号処理法などについて提案を行っている。

2. 高速無線アクセスにおける マルチキャリアアクセス方式

2.1 MC-CDMA 受信法の改善

現在、高速な情報伝送への要求が高まってきており、また、デジタル信号処理技術の進展により、従来不可能であった広帯域信号を用いることが可能となり、マルチキャリア方式の実用化への機運が高まっている。高速フーリエ変換(FFT: Fast Fourier Transform)によりマルチキャリア化が簡単に実現できることや、Cyclic Prefixの挿入により受信側での等化処理を行う必要がないことからOFDMが最も実現性の高い方式といえる。ここで、このような特長を持つマルチキャリア方式を移動通信にどのように適用していくか、という点が現在の研究の主題となっている。

MC-CDMAは、OFDMと符号分割多元接続方式

(CDMA : Code Division Multiple Access) を組み合わせた方式といえる。MC-CDMA では、データ系列は拡散処理後、複数のサブキャリアに分配され送信される。この拡散されたサブキャリアが独立なフェージングを受けた場合には、ダイバーシチ効果により特性が改善される。すなわち、拡散された複数のサブキャリアのうち、1つのサブキャリアが深いフェージングの落ち込みを受けた場合には、そのサブキャリアに含まれる情報が欠落してしまうが、他のサブキャリアがより良い状態で受信されれば、逆拡散により、1つのサブキャリアの欠落を補償することになる。しかし、複数のユーザが同一の周波数帯を用いるため、拡散符号の直交性が崩れた場合、ユーザごとに割り当てられた符号が相互干渉するマルチアクセス干渉となる。こういった場合に、受信キャリアを基にして、それぞれのユーザに対応するレプリカを推定し、そのレプリカを引き算することにより所望のキャリアを得る、マルチユーザ検出 (MUD : Multi User Detection) 法を用いることにより、このようなマルチアクセス干渉による特性劣化を軽減することが可能となる。

複数ユーザの MC-CDMA の特性の理論的な上限は1ユーザの場合の特性で表すことができ、この上限にできるだけ近づけるため、“ターボ原理”に基づく繰返し復号処理の適用を前提とする、ソフト干渉キャンセラについて検討している[2]。これは、1つ前の繰返し処理のチャネル復号器から生成された信頼度情報に基づき、マルチアクセス干渉をキャンセルする方式である。

本研究では、MC-CDMA の MUD に関して、WH (Walsh-Hadamard) 系列を用い、この拡散符号を信号平面上で回転させることにより、特性改善を図る方式について提案を行

っている。

図1に提案方式の原理を示す。例として、2値位相変調 (BPSK : Binary Phase Shift Keying)、WH 系列の拡散率 (SF : Spreading Factor) が8、ユーザ数が8の場合、回転を行わないWH系列を用いると信号点の分布は図1(a)のように、9点しかない。ここで、点の大きさは信号点の重なり程度を表しており、点が大きいほど多くの信号が同一点上に重なっていることを示している。さらに、約20%のサブキャリアが0となるため、これらのサブキャリアには何の信号電力も送信されないことになってしまう。ところが図1(b)のように信号平面上で回転させた場合、信号点は複素平面上の256点に分布することになり、それぞれの信号点が増えることがない。すなわち、信号電力はより公平にすべてのサブキャリアに分布することになり、ダイバーシチの効果を活かすことができる。チャネル符号化を行わない場合と比較すると、所要1ビット当り信号エネルギー対雑音電力密度比 (E_b/N_0 : Signal energy per bit to background noise power spectrum density ratio) で3dBの利得向上となる。また、符号化率2/3の畳み込み符号を用いた場合は同様に1dBの向上が見られるが、1/2の場合ではほとんど特性の変化は見られない[3]。つまり、本提案方式は符号化率の高いチャネル符号を用いる場合に有効であることが分かる。また、チャネル推定誤差を考慮に入れても同様な効果が得られる[4]。

2.2 MIMO-OFDM でのチャネル推定

複数のOFDMシンボルからなる受信OFDMフレームは、サブキャリア番号 i とOFDMシンボル1で構成される2次元の平面で記述できる。この平面上の各点の受信信号は複素

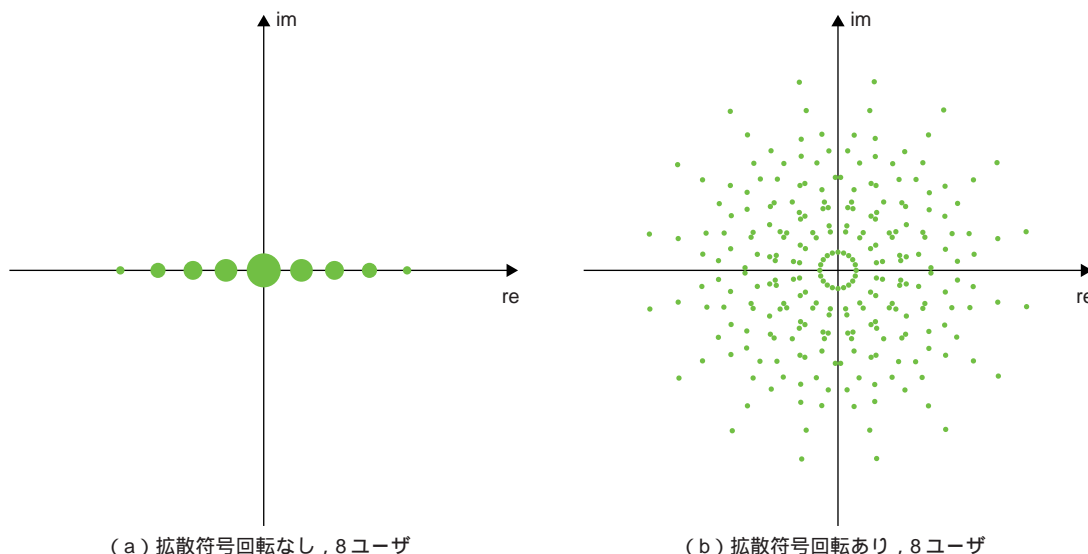


図1 提案方式の原理 (例: BPSKでの拡散されたシンボル)

値 $Y_{i,i} = H_{i,i} X_{i,i} + N_{i,i}$ となる．ここで送信信号 $X_{i,i}$ を検出するために，伝送路伝達関数（CTF：Channel Transfer Function） $H_{i,i}$ はフレーム内のすべての点で推定される必要がある．マルチキャリア方式では，チャンネル応答に関する時間，周波数方向からなる2次元平面上で相関を持つ．よく知られている標本化定理より，このような2次元のすべての点における周波数応答は2次元平面上において選択されたいくつかのCTFによって再構成することができる．このような処理は，この2次元平面の時間，周波数方向に周期的にパイロット信号を配置することにより実現され，パイロット信号を用いたチャンネル推定（PACE：Pilot symbol Aided Channel Estimation）と呼ばれている．

標本化定理より，チャンネルとOFDMのパラメータから，受信側に必要なCTFの再現に必要な2次元のパイロット信号の間隔が決定される．このようなPACEを実現するために，2次元（2D：2 Dimensional）Wienerフィルタに基づいたPACE（2D PACE）がすでに提案されている．ところが，このような2次元の推定フィルタは非常に複雑であり，実現性に乏しい．この複雑さを軽減するために時間軸と周波数軸それぞれの1次元推定フィルタを2段接続した，2x1D PACEとよばれる方式が提案されている[5]．これを図2に示す．この図では，まず，周波数方向の推定を最初に行い，すべてのサブキャリアについて仮の推定値を得る．次に，この仮推定値を用いて時間方向へのチャンネル推定を行い，すべてのサブキャリアの最終的なチャンネル推定値を得ることができる．

このPACEのMIMOへの適用を考えると，送信アンテナが N_t 本の場合，これに対応した N_t 本のチャンネルを推定する必要がある．したがって，送信アンテナが1本のとときと比

較してパイロット信号が N_t 倍必要となるため，効率的な利用がより要求されることになる．一方，MIMO・OFDMにおいて，2Dと2x1D PACEを比較し，推定誤差，計算量，標本化定理で示されるパイロット信号量を検討した結果，2x1D PACEがより有効であるとの結果を得た[6]，[7]．さらに， N_t 本の送信アンテナに対応した N_t 個の多重化されたパイロット信号を離散フーリエ変換（DFT：Discrete Fourier Transform）の特徴を活かして効率的に分離するアルゴリズムを提案した[8]．

2.3 OFDMでのピーク電力軽減

OFDMでは，多数のサブキャリアが多重されることによりピーク信号電力が大きくなり，高出力増幅器の非線形性により，非線形領域動作点近傍の信号を歪ませてしまう．このような歪みの生じた信号により，OFDMでは，キャリア間干渉（ICI：Inter Carrier Interference）と帯域外放射が増大するという問題が生じる．具体的には，ICIは送信信号間の干渉であるためBER特性が劣化することとなり，帯域外放射は隣接帯域を利用している通信への干渉となる．

このようなピーク電力の増大は送信機でのデジタル信号処理により削減することが可能である．

代表的なピーク削減法としてクリッピングと呼ばれる手法がある．これはまずリミッタによるピーク振幅の制限を行い，次に，帯域外放射を抑えるためにフィルタリング処理を行うものである．

図3に，4相位相変調（QPSK：Quadrature Phase Shift Keying）に，このクリッピングを行った方式のうち，非再帰的クリッピング，再帰的クリッピング[9]，[10]，ACE（Active Constellation Extension）[11]の3つの方式を用いた場

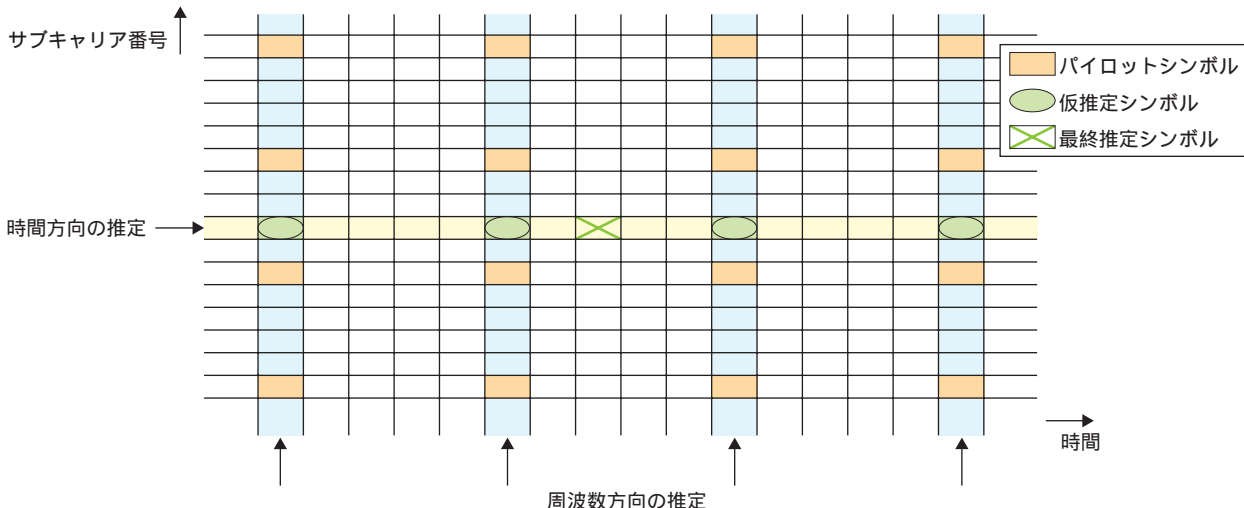


図2 2x1D PACEの原理

合の性能評価の一例を示す．縦軸は帯域外放射，横軸にクリッピングを行わない場合と行った場合の所要 E_b/N_0 の差をとっている．ここでクリッピングを行うと，ピーク電力が削減されるが，ICIが生じるためBER特性が劣化し，所要 E_b/N_0 が増大する．この結果から，帯域外放射は数dB程度なら簡単に削減できるが，より低い帯域外放射が必要な場合は，このクリッピングにより所要 E_b/N_0 が著しく増大してしまうことが分かる．この傾向は変調多値数が高いほど顕著である[12]．

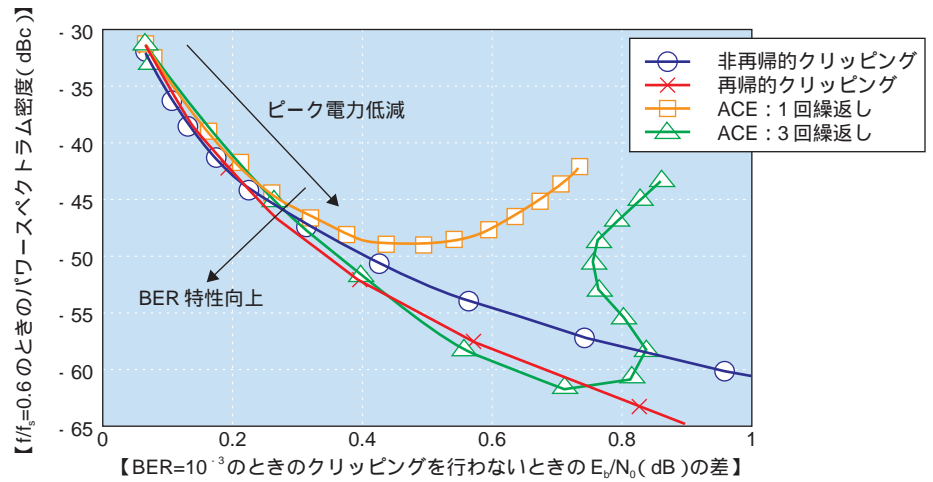


図3 クリッピング方式の特性比較（符号化なし，QPSK変調，AWGN通信路）

3. “ターボ原理”のチャネル符号化への応用

3.1 ターボ原理を用いた繰返し復号

約10年前に発明されたターボ符号は誤り訂正符号化の研究に革命をもたらした[13]．これに用いられているターボ原理というアイデアはさまざまな受信，復調過程で用いることが可能である．このターボ原理を用いた復号が可能で，符号化率を任意に変更可能であり，かつターボ符号と比較して構造が単純である繰返し復号を適用したビットインタリーブ符号化変調方式について研究を行っている[14]．図4に本研究で対象としている符号器，復号器のブロック図を示す．特に本研究では，直交振幅変調（QAM：Quadrature Amplitude Modulation）復調器の信号点配置をターボ原理における内部要素符号とみなす方式を提案している．一般にグレイマッピングが最適信号配置点配置として知られているが特性改善効果（ターボ利得）を得ることができない．本研究所では，グレイマッピングと異なる特別なマッピング法を用いることによりターボ利得を得られることを見出し，さらにこの最適マッピング法を探索する効率的アルゴリズムを提案した[14]．この方式を用いると，従来のターボ符号と比較し，復号側の計算量を大幅に削減しつつ同等の特性を達成できる．さらに，符号器の前段に符号化率1の再帰的符号器を挿入することにより，符号化率を下げることなく，特性の向上を図ることが可能である．図5に計算機シミュレーション結果を示す．新しいマッピング法では，従来提案されているグレイマッピングやセットパーティショニング法より特性が優れていることが分かる．図5に示されるように，提案方式のBER特性は，UMTS（Universal Mobile Telecommunications System）で用いられ

【符号器】



【復号器】

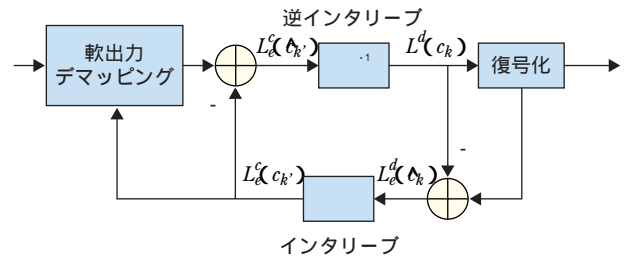


図4 提案するビットインタリーブ符号化変調の符号器と繰返し復号を用いたターボ受信復号器の構成

ているターボ符号と比較して低い E_b/N_0 では若干の特性劣化を示すものの，フロア誤り率を低減できる．

4. 複数アンテナシステム

4.1 MIMO・OFDMに適した送信ダイバーシチ

送信側と受信側に複数のアンテナを用いる方式（MIMO）により，無線システムの容量が増大することが理論的に証明されている[15]．それゆえ，将来の無線通信システムでは，少なくとも基地局側に複数のアンテナを配置して容量増大を図る方向で検討が進んでいる．このMIMOがもたらす容量の増大を利用した数々の方式が提案されている．

ここで，送受信アンテナ間を独立なフェージング伝送路として扱うため，各アンテナは十分離れているとする．このようなMIMO伝搬路を用いる高速伝送通信において，伝搬路状態が送信側で未知の場合，独立なデータ伝送系列を複数のアンテナから同時に送信する，空間多重法が理論的

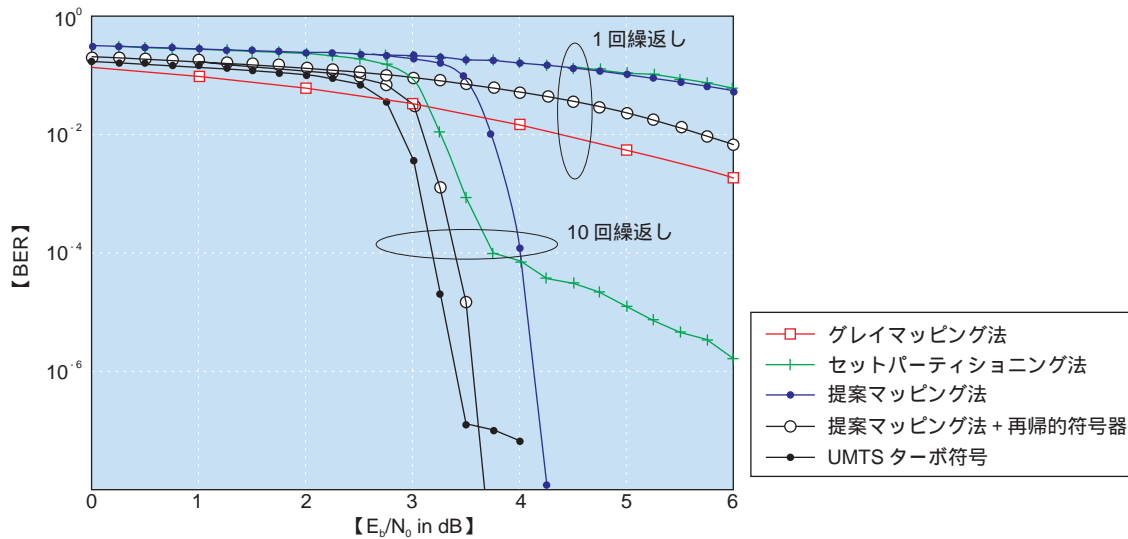


図5 ビットインタリーブ符号化変調の特性比較

に最適な送信方法である。この空間多重法では、受信アンテナ数は送信アンテナの数と同じか、それより多くなければならない。また、受信側の処理は比較的複雑である。さらにこの場合、アンテナの空間相関や、キーホール効果が発生する伝搬路では受信特性が低下する。これに対し、より耐性の高い方式は、空間時間符号化や空間周波数符号化といった送信ダイバーシチ法である。これは、1つの情報系列から符号化される N 種類の符号化系列を送信側の N 本のアンテナから送信し、受信側でそれを合成する方式である。これにより伝送特性が向上し、より多値数の高い変調方式や高い符号化率の誤り訂正符号を用いることができ、結果的に伝送速度を上げることが可能となる。直交系列を送信符号化行列に用いると、受信機側での合成処理が非常に簡単になる。この場合、フェージングのある MIMO 伝搬路は受信レベル変動の小さい SISO (Single Input Single Output) 伝搬路と等価となる。

一般にマルチキャリア方式ではシンボル間干渉が生じると受信側での処理が複雑になる。加えて伝搬路の時間、周波数方向の相関特性も考慮に入れなければならない。この伝搬路の特性を考慮に入れると直交系列を OFDM のシンボル方向とサブキャリア方向に適用することが有利であるため、OFDM や MC-CDMA のようなマルチキャリアアクセス方式にこの直交系列の適用を提案している [16] ~ [19]。この強力な空間時間周波数符号化システムは優れた伝送特性を有するだけでなく、簡易な受信機で構成できるという利点もある。

さらに、この直交送信ダイバーシチにおける受信側でのターボ復号法についても提案を行っている [18]。従来の提案では直交系列ではその直交性のため、シンボルレベルで

は外部情報を得ることができず、それゆえターボ繰返しを効果的に用いることができなかった。そこで、先に述べた繰返しマッピング法と同様、送信シンボルへのビットマッピングを最適化することで利得が得られることを見出すとともに、最適ビットマッピング法を提案した。この提案方式により比較的簡単な処理で、大きなターボ利得が得られることを計算機シミュレーションにより確認した。

上述した複数アンテナ送受信法は受信側でのチャネル推定を前提としており、アンテナ数に比例した多くのチャネル推定をパイロット信号を用いて行う必要がある。これに対し、チャネル推定を必要としない方式として、差動符号化ユニタリ空間時間変調方式が提案されている [20]。この方式では、送信ビットはユニタリ行列 C_k にマッピングされる。送信行列は、一時刻前の送信行列 C_{k-1} と C_k を用いて差動符号化することにより得られる。ユニタリ行列は通常、 M 相 PSK (位相変調 (PSK: Phase Shift Keying)) の信号点配置に基づいて構成される。信号点間距離を考慮すると、このような M 相 PSK は M が 8 以下の時しか有利にならない。より変調多値数の高い場合は、位相と振幅の両方に情報を持たせたほうがよい。本研究所では、このユニタリ空間時間変調方式と差動振幅変調を融合した差動符号化多値空間変調方式を提案した [21]。その構成を図 6 に示す。また、受信側ではほとんどの差動符号化方式で用いられている軟出力検波器は用いず、伝搬路の状態や統計的性質を一切必要としない復調方式を提案した。この提案方式は周波数利用率が高く、特に時間変動の大きいチャネルまたはサブキャリア間で周波数選択性の高いチャネルの場合、従来のユニタリ空間時間変調方式よりも著しく特性が向上することを確認した。また、受信側の計算量も従来方式より少ない。

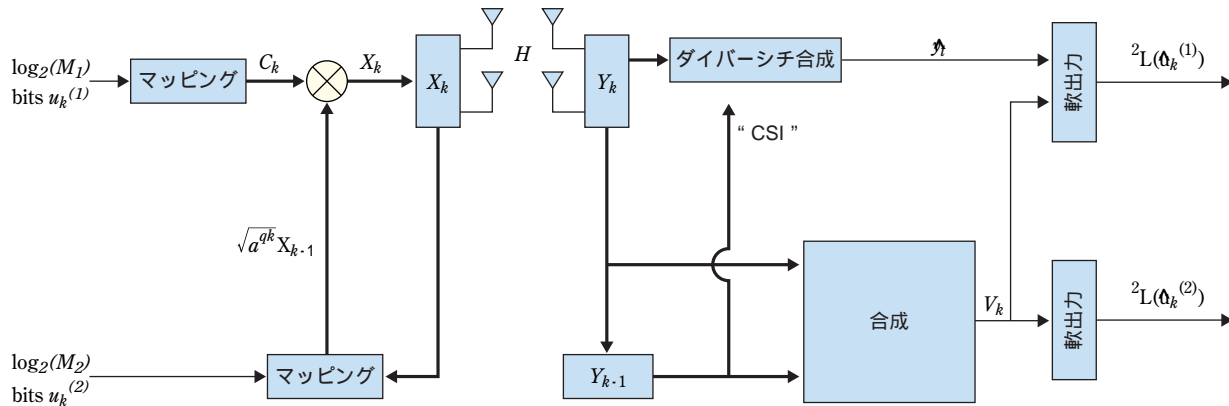


図6 周波数利用効率の高い差動時間空間変調方式

4.2 適応ビームフォーミング

送信側で伝搬路の長期間変動しない情報が分かっていると仮定した場合、情報伝送速度を上げるためには信号が最も効果的に送信される方向に送信エネルギーを絞ることが望ましい。この有力な方法として固有ビームフォーミングがある。これは空間共分散行列の固有ベクトルからアンテナウエイトを形成する方法である。この固有ビームフォーミングと、空間多重や送信ダイバーシチなどのMIMOのコンセプトとを組み合わせた送信側での新しい信号処理アルゴリズムを提案した[22]。このアルゴリズムは最適な固有ビームの数と、それぞれの固有ビームへの最適な送信パワーと伝送レートの割当てを適応的に行うものである。

また、送信側で短区間平均チャネル情報を用いた時空間信号処理により、長い遅延による劣化を軽減する方式を提案した[23]。この方式を下り回線に適用した場合、受信側、つまり移動端末側で複雑な等化処理などを行う必要がない。

5. あとがき

欧州研究所での無線分野の研究状況、研究成果について概説した。今後もヨーロッパの強みを活かして研究計画の立案、研究パートナーの選定を行い、着実に研究を進めて世界にインパクトを与える成果を創出し、4Gシステムの実現に寄与したいと考える。

文献

- [1] 佐和橋, ほか: “ブロードバンド無線アクセス方式の概要,” 本誌, Vol. 11, No. 2, pp. 12 - 23, Jul. 2003.
- [2] S. Kaiser: “OFDM Code-Division Multiplexing in Fading Channels,” in IEEE Transactions on Communications, Vol. 50, pp. 1266 - 1273, Aug. 2002.
- [3] R. Raulefs, A. Dammann, S. Kaiser and G. Auer: “Rotated spreading sequences for broadband Multicarrier-CDMA,” in Proc. IEEE Vehicular Technology Conference 2003 - fall (VTC 'F03), Orlando, FL,

USA, Oct. 2003.

- [4] R. Raulefs, A. Dammann, S. Kaiser, S. Sand and G. Auer: “Multi User Detection and Channel Estimation with Rotated Transforms for MC-CDMA,” in Proc. World Wireless Research Forum No. 9 (WWRF #9), Zurich, Switzerland, Jul. 2003.
- [5] P. Hoeher, S. Kaiser and P. Robertson: “Pilot-Symbol-Aided Channel Estimation in Time and Frequency,” in Proc. Communication Theory Mini-Conference (CTMC) within IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM '97), Phoenix, USA, pp. 90 - 96, 1997.
- [6] G. Auer: “Channel Estimation for OFDM Systems with Multiple Transmit Antennas by Filtering in Time and Frequency,” in Proc. IEEE Vehicular Technology Conference 2003 - fall (VTC 'F03), Orlando, FL, USA, Oct. 2003.
- [7] G. Auer: “Channel Estimation in Two Dimensions for OFDM Systems with Multiple Transmit Antennas,” in Proc. IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2003), San Francisco, CA, USA, Dec. 2003.
- [8] G. Auer, A. Dammann and S. Sand: “Channel Estimation for OFDM Systems with Multiple Transmit Antennas by Exploiting the Properties of the Discrete Fourier Transform,” in Proc. IEEE Int. Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC 2003), Beijing, China, Sep. 2003.
- [9] J. Armstrong: “Peak-to-average power reduction for OFDM by repeated clipping and frequency domain filtering,” in Electronics Letters, Vol. 38, No. 5, pp. 246 - 247, Feb. 2003.
- [10] A. Saul: “Analysis of Peak Reduction in OFDM Systems Based on Recursive Clipping,” in Proc. Int. OFDM-Workshop, Vol. 1, pp. 103 - 107, Sep. 2003.
- [11] B. S. Krongold and D. L. Jones: “PAR Reduction in OFDM via Active Constellation Extension,” in Int. Conf. on Acoustics, Speech and Signal Processing, Vol. 4, pp. 525 - 528, Apr. 2003.
- [12] A. Saul: “Comparison between Recursive Clipping and Active Constellation Extension for Peak Reduction in OFDM Systems,” in Proc. Int. Symp. on Wireless Personal Multimedia Communications, Vol. 1, pp. 37 - 41, Oct. 2003.
- [13] C. Berrou, A. Glavieux and P. Thitimajshima: “Near Shannon limit error-correcting and decoding: Turbo-codes (1),” in International Conference on Communications (ICC), Genf. pp. 1064 - 1070, May 1993.
- [14] F. Schreckenbach, N. Görtz, J. Hagenauer and G. Bauch: “Optimized

- symbol mappings for bit - interleaved coded modulation with iterative decoding. " IEEE Globecom Conference, San Francisco, USA, Dec. 1 - 5, 2003.
- [15] G. J. Foschini and M. J. Gans: " On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas. " Wireless Personal Communications, 1998, Vol. 6, pp. 311 - 335.
- [16] G. Bauch: " Space - time block codes versus space - frequency block codes. " IEEE Vehicular Technology Conference (VTC), Jeju, Korea, Apr. 22 - 25, 2003.
- [17] G. Bauch: " Space - time - frequency transmit diversity in broadband wireless OFDM systems. " 8th International OFDM Workshop, Hamburg, Germany, Oct. 23 - 25, 2003.
- [18] G. Bauch and F. Schreckenbach: " How to obtain turbo gains in coherent and non - coherent orthogonal transmit diversity. " IEEE International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), Beijing, China, Sep. 7 - 10, 2003.
- [19] A. Dammann, R. Raulefs, G. Auer and G. Bauch: " Comparison of space - time block coding and cyclic delay diversity for a broadband mobile radio air interface. " International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC), Yokosuka, Japan, Oct. 19 - 22, 2003.
- [20] B. Hochwald and W. Sweldens: " Differential unitary space - time modulation. " IEEE Transactions on Communications, Vol. 48, No. 12, pp. 2041 - 2052, Dec. 2000.
- [21] G. Bauch: " A bandwidth - efficient scheme for non - coherent transmit diversity. " IEEE Globecom Conference, San Francisco, USA, Dec. 1 - 5, 2003.
- [22] P. Tejera, W. Utschick and G. Bauch: " Pairwise error probability for MIMO OFDM with transmit partial CSI. " ITG Workshop on Applied Information Theory, Dresden, Germany, Jun. 20, 2003.
- [23] K. Kusume: " Linear Space - Time Precoding for OFDM Systems based on Channel State Information. " IEEE International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), Beijing, China, Sep. 7 - 10, 2003.

用語一覧

2D : 2 Dimensional (2次元)	MC - CDMA : Multi Carrier - Code Division Multiple Access (マルチキャリア符号分割多元接続)
ACE : Active Constellation Extension	MIMO : Multiple Input Multiple Output (マルチアンテナ信号伝送法)
AWGN : Additive White Gaussian Noise (加法的ガウス雑音)	MUD : Multi User Detection (マルチユーザ検出)
BER : Bit Error Rate (ビット誤り率)	OFDM : Orthogonal Frequency Division Multiplexing (直交周波数分割多重)
BPSK : Binary Phase Shift Keying (2値位相変調)	PACE : Pilot symbol Aided Channel Estimation (パイロット信号を用いたチャネル推定)
CDMA : Code Division Multiple Access (符号分割多元接続方式)	PSK : Phase Shift Keying (位相変調)
CTF : Channel Transfer Function (伝送路伝達関数)	QAM : Quadrature Amplitude Modulation (直交振幅変調)
DFT : Discrete Fourier Transform (離散フーリエ変換)	QPSK : Quadrature Phase Shift Keying (4相位相変調)
E_b/N_0 : Signal energy per bit to background noise power spectrum density ratio (1ビット当り信号エネルギー対雑音電力密度比)	SF : Spreading Factor (拡散率)
FFT : Fast Fourier Transform (高速フーリエ変換)	SISO : Single Input Single Output
ICI : Inter Carrier Interference (キャリア間干渉)	UMTS : Universal Mobile Telecommunications System
IMT - 2000 : International Mobile Telecommunications - 2000 (第3世代移動通信)	WH : Walsh - Hadamard