

小セル通信ネットワークに向けた多素子MIMO無線伝送および電力線伝送技術に関する調査研究

研究代表者 牟田 修 九州大学 日本エジプト科学技術連携センター 准教授
研究分担者 マハ エルサブルティ エジプト日本科学技術大学 准教授

1 はじめに

急増する無線トラフィックを効率的に収容するには、小型基地局を面的に多数設置する小セル化、および小セルと大セルを共存させるネットワーク構成（ヘテロジニアスネットワーク）の適用が重要となる。しかしながら、大セルと小セルが同一周波数帯域を共用する場合、システム間の干渉を引き起こすため、システム毎の要求条件を満たしながら双方の通信性能を改善するための干渉対策が不可欠となる。無線通信では基地局のアンテナ素子数を増やし、その指向性を適切に制御することで、情報伝送速度を向上させるとともに他システムへの予干渉を軽減できる[1]-[3]。特にアンテナ素子数を数十～数百規模に増大したものは多素子 Multi-Input Multi-Output (MIMO) と呼ばれる[1]。本研究では、小セル通信網に向けた伝送技術として、多素子 MIMO 技術を用いる無線伝送および電力線伝送に関する要素技術について調査研究を行った。多素子 MIMO 伝送のためのチャンネル推定・干渉制御技術について検討するとともに、屋内小セル通信網の基地局間回線として電力線伝送に着目し、その要素技術となる適応信号処理の開発を行った。

主要な成果として、

- (1) 多素子 MIMO を用いる小セル無線通信網におけるチャンネル推定技術・干渉制御技術
 - (2) マルチキャリア電力線通信におけるインパルス雑音環境下における適応信号処理技術
- について以下にまとめる。

2 小セル多素子 MIMO 無線通信網におけるチャンネル推定技術・干渉制御技術

無線通信における周波数利用効率(bit/second/Hz)を向上させる手法として、無線基地局において数十～数百規模のアンテナ素子を用いる多素子 MIMO 技術が注目されている。多素子 MIMO を用いる場合、基地局においてプリコーディングと呼ばれる多素子アンテナの送信指向性制御技術を用いることが必須となる。そのためには基地局・ユーザー端末間のチャンネル情報を基地局側で把握する必要がある。上り回線と下り回線で同一の周波数を用いる時分割複信(TDD: Time division duplex)方式をでは、上下回線のチャンネル特性の相関が比較的高いため、上り回線におけるチャンネル推定結果を下り回線に適用できる。そのため、上り回線のチャンネル推定値に基づいて下り回線の送信指向性制御(プリコーディング重み係数の演算)を行うことができる。一般的に、上り回線のチャンネル推定は、各ユーザーがパイロットと呼ばれる既知信号を送信し、基地局においてそれらを分離検出することで実施する。このとき、各ユーザーのパイロット信号を分離検出するために互いに直交したパイロット信号群を用いる。しかしながら、直交パイロット数は限られているため、マルチセル環境では隣接するセルで同一のパイロットを再利用する必要がある。そのため、パイロット汚染(Pilot Contamination)と呼ばれるセル間のパイロット干渉が発生し、チャンネル推定精度が劣化する(結果として上下回線の伝送品質が劣化する)[4]。直交パイロット数を増やすことでパイロット干渉を軽減できるものの、直交パイロット区間長(オーバーヘッド)の増加を招くため情報伝送効率が低下する。この問題はヘテロジニアスネットワークにおいて大セルと小セル(あるいは異なる小セル)が同一のパイロットを利用する場合にも発生する。大セルと小セルが同一周波数帯域を利用する場合は、小セルと大セル間の下り回線のデータ伝送時に大セルから小セルへの強い干渉が発生し、それが通信品質に大きな影響を及ぼす。本節では、小セル多素子 MIMO 無線通信のためのチャンネル推定・干渉制御技術について検討する。

2-1 マルチセル多素子 MIMO 無線通信システムにおける直交パイロット割当てと特性評価

マルチセルシステムにおけるパイロット干渉問題に対処するために、上り回線における各ユーザーへの直交パイロット割当てを最適化する手法を提案した。提案方式を用いることで、パイロット汚染の影響を軽減し上り回線の伝送特性を向上する効果が得られる。図1に検討対象のマルチセルシステムの構成を示す。各セ

ルは多素子アンテナを有する基地局を有し、端末はセル内に一様に分布するものとする。上り回線の伝送レート(sum rate)を最大化させるパイロット割当問題として検討課題を定式化し、それを低演算量で解くアルゴリズムを提案した。提案方式は複数セルの上り回線伝送速度の和を最大化する最適化問題をセル単位の最適化問題(sub-problem)に分解し、それらを個別に解くものである。図2に提案パイロット割当アルゴリズムの流れを示す。クラスタサイズ(セル数)を $L = 7$ とする。基地局と当該セルのユーザー間の伝搬減衰係数は既知と仮定する。図2に示す通り、セル毎のパイロット割当の最適化を第1セルから第Lセルまで順番に繰り返すことで互いに干渉の少ないパイロット割当を求める。それにより、計算量の増加を抑えながら、マルチセル全体の上り回線レートを最大化させる最適化パイロット割当を近似的に導出することができる。

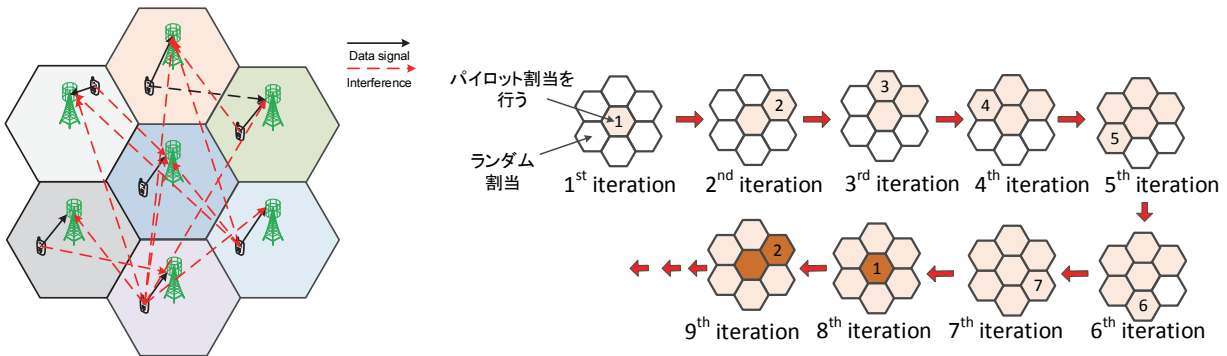


図1 多素子 MIMO マルチセルシステムの構成 図2 提案パイロット割当のための反復演算の様子

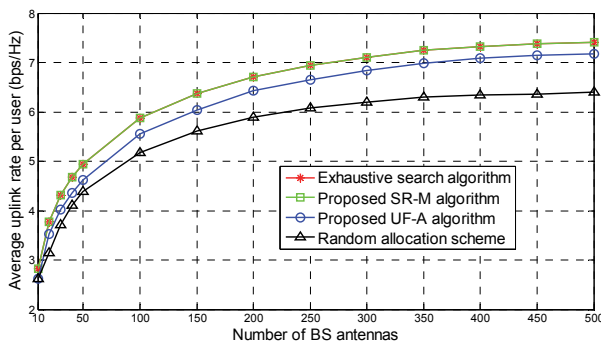


図3 上り回線のユーザー毎の伝送レート特性

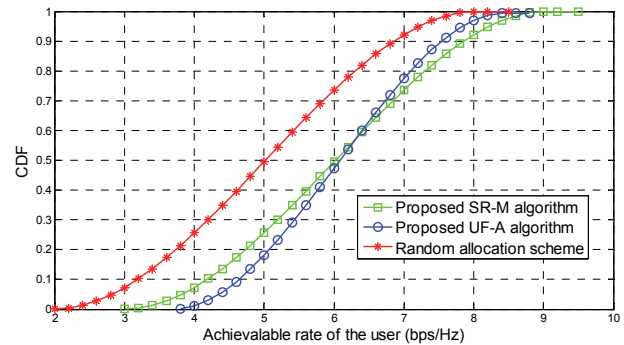


図4 ユーザー毎の平均伝送レートの CDF

提案方式の特性を計算機シミュレーションにより評価する。マルチセルシステムの上り回線平均伝送レートと基地局アンテナ素子数の関係を図3に示す。緑色は提案方式(上り回線レートを最大化するようにパイロット割当を行う手法(Proposed SM-R (sum-rate maximization) algorithm)の特性を示す。ユーザー間の通信品質の公平性を考慮してパイロット割り当てを行うように提案方式を修正した手法(Proposed UF-A (user-fairness aware) algorithm)を青色で示す。比較として、各ユーザーにランダムにパイロットを割り当てた場合と全探索を用いる場合(Exhaustive search)の特性もあわせて示す。提案方式は他セルからのパイロット干渉を軽減できるので、ランダム割り当てと比べて伝送レートを改善できる。また、提案方式は全探索を用いる場合と同等の伝送レートを達成できる。ユーザー毎の平均伝送レートの累積分布関数(CDF)を図4に示す。UF-A algorithmを用いる場合、SM-R algorithmを用いる場合と比べて、伝送レートの低いユーザーの割合が低減されることを確認できる。

この他、多素子 MIMO 上り回線チャネル推定のためのパイロット信号の構成方法として周波数領域と遅延領域を利用する2次元チャネル割当方式を提案し、その有効性をシミュレーションにより確認した。また、周波数分割復信(FDD: Frequency division duplex)を用いる多素子 MIMO システムのためのチャネル推定技術を提案し、計算機シミュレーションより従来方式と比べてチャネル推定精度を向上できることを確認した。

2-2 多素子 MIMO ヘテロジニアスネットワークにおける干渉制御技術

本節では、マクロセル(MC)基地局とスモールセル(SC)基地局が同一周波数を共用する2層ヘテロジニアス

ネットワーク (Two-tier heterogeneous network: Two-tier HetNet) におけるパイロット割当および干渉制御について検討する。提案方式では、大セル (MC: Macro-cell) 基地局が有する直交パイロットの一部を小セル (SC: Small-Cell) 基地局に割り当てる。したがって、MC と SC のパイロットは互いに直交するので、MC と SC 間でパイロット干渉は発生しない。もし割り当てられた直交パイロット数が SC ユーザー数を超える場合、残りの SC ユーザーには同一パイロットを割り当てる。提案方式を用いて上り回線の希望波と干渉波のチャネル情報を取得し、それに基づいて下り回線における大セル基地局の送信指向性を制御する。これにより、希望局に対してアンテナの送信指向性を向けるだけでなく、指向性のヌルを向けることで大セルから小セルへの予干渉を低減できる。このとき、小セルに割り当てる直交パイロット数の最適値を求める手法を提案し、下り回線の伝送レートを評価指標として詳細な特性解析を行った。

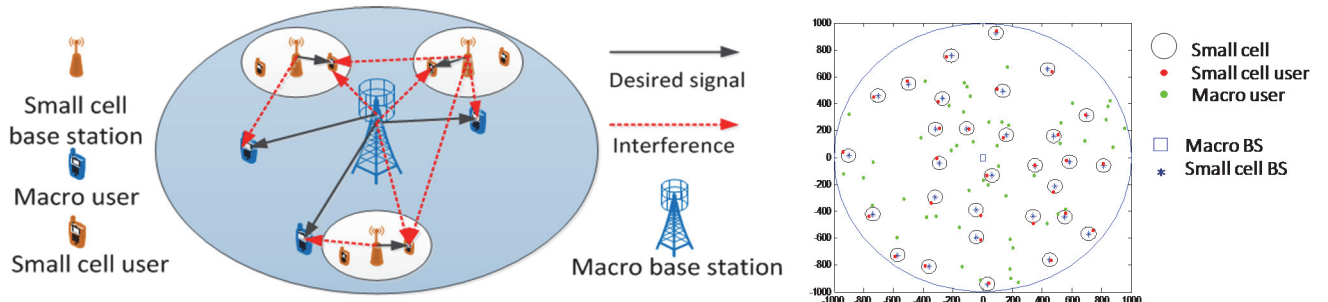


図5 ヘテロジニアス (大セルと小セルの混在) セル構成 図6 小セル基地局の分布例

シミュレーションで用いたヘテロジニアスネットワークの構成を図5に示す。大セル・小セル基地局および大セル・小セルユーザーの分布の例を図6に示す。提案方式を用いる場合の下り回線伝送速度と SC に割り当てた直交パイロット数 (K_0) の関係を図7に示す。下り回線レートを最大化するようにパイロット割当を最適化した場合 (Algorithm1) とその演算量簡易化版 (準最適化手法: Algorithm2)、およびユーザー間の通信品質の公平性 (fairness) を考慮してパイロット割当を最適化した場合 (Algorithm3) の3つの特性を示した。図7に示すとおり、直交パイロット数が比較的小さい場合は直交パイロット数の増加とともに伝送レートが向上する。これは直交パイロットを用いて推定したチャネル情報を利用して、大セル基地局から小セルユーザーへの予干渉を効果的に低減できるためである。一方、直交パイロット数がある値を超えると伝送レートが低下する。これは直交パイロット数の増加に伴いパイロット区間長 (オーバーヘッド) が増大するためである。以上から直交パイロット数の最適値を求めた。ユーザー毎の伝送レートの累積分布 (CDF) を図8に示す。通信品質の公平性を考慮した手法 (Algorithm3) を用いる場合、伝送レートの低いユーザーの割合を低減できる (セル端等のユーザーの特性を改善できる) ことを示した。

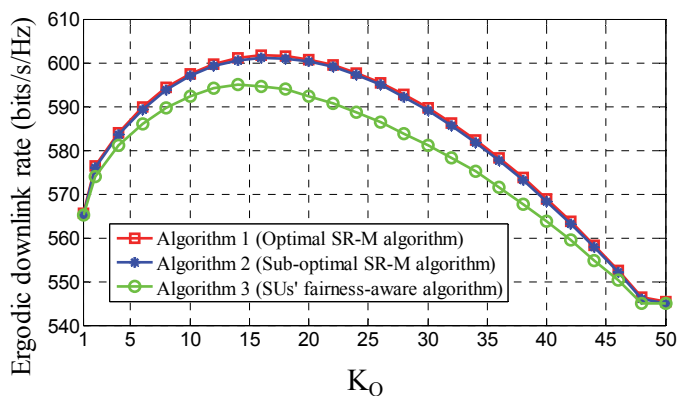


図7 下り回線伝送レートと直交パイロット数の関係

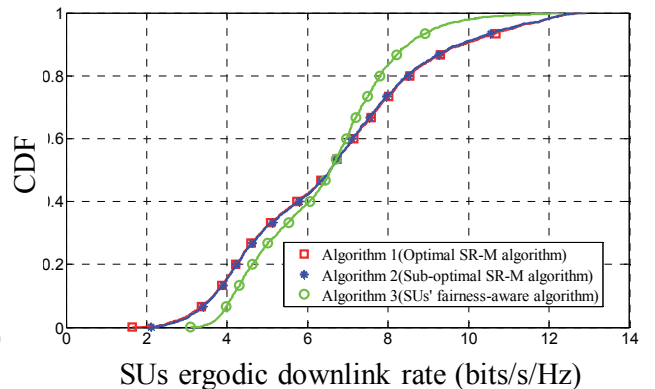


図8 下り回線ユーザーレートの分布

2-3 小セル基地局クラスタ化による連携信号処理・干渉制御技術

ヘテロジニアスネットワークにおいて多数の小セル基地局が存在する場合、小セル間の干渉対策が重要であり、有効な方策の一つは複数のセルが協調して干渉制御を行うことである[5]。本検討では、互いに強い干渉を与え合う複数の小セル基地局群を一つのクラスタとして扱い、同一クラスタ内の基地局同士が互いに連携して支配的な干渉を抑圧する方式を提案した。検討対象とするヘテロジニアスネットワークの構成を図9に示す。図10に示す2つの小セル基地局における相互干渉を考える。ここで、小セル基地局*i*から小セル*j*におけるユーザー*k*への干渉チャネルの応答を \mathbf{h}_{ijk} 、セルあたりのユーザー数を K_s 、小セルユーザー数を K_T 、小セル基地局のアンテナ数を N とすると、小セル*j*と小セル*i*の間の干渉強度を下式で定義する。

$$\gamma_{i,j} = \frac{1}{NK_T} \sum_{k=1}^{K_s} (\|\mathbf{h}_{ijk}\| + \|\mathbf{h}_{jik}\|)$$

提案方式では強度 $\gamma_{i,j}$ が干渉閾値 γ_{th} を超える場合 ($\gamma_{i,j} > \gamma_{th}$ の場合) に小セル基地局 *i*, *j* を同一クラスタに含める (クラスタ化を行う)。同一クラスタに所属する基地局群がクラスタ内の端末に対して協調プリコーディングを行う。互いに強い干渉を与え合う小セル基地局を同一クラスタに含めて協調動作させるので、協調のための情報共有のオーバーヘッドを抑えながらシステム全体の干渉量を効果的に低減できる。

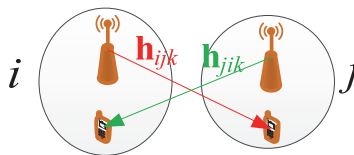
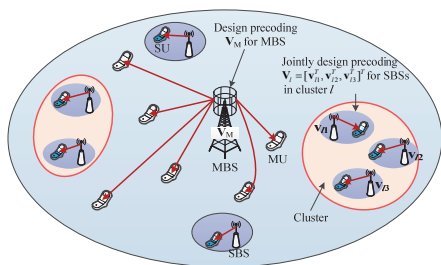


図9 小セル基地局のクラスタ化の例 図10 平均チャネル強度に基づく小セル基地局クラスタ化の例

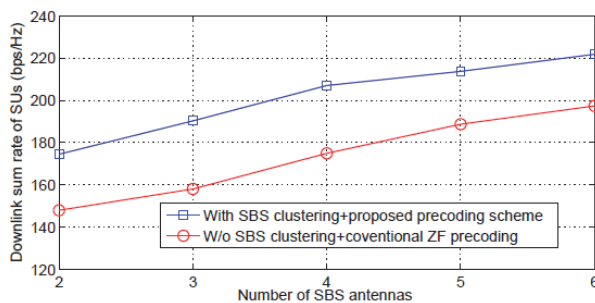


図11 小セル基地局アンテナ数に対する下り回線伝送速度

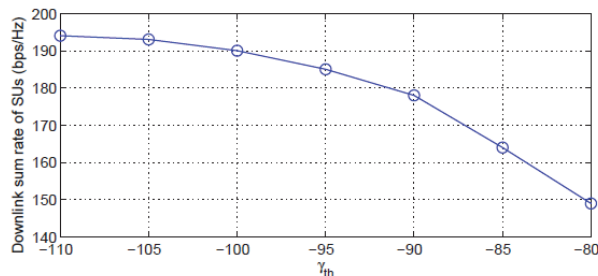


図12 干渉閾値と下り回線伝送速度の関係

提案方式を用いる場合のヘテロジニアスネットワークの伝送特性を計算機シミュレーションにより評価した。図11に基地局アンテナ数に対する提案方式を用いる場合の下り回線伝送速度を示す。比較として、クラスタ化を行わない場合の特性を合わせて示す。この結果から、小セル基地局のクラスタ化と協調信号処理を

行うことによりユーザー伝送速度を向上できることがわかる。また、クラスタ化を行う閾値 γ_{th} と伝送速度の関係を図 12 に示す。閾値を下げることで同一クラスタに含まれる基地局数が増加するため、協調信号処理の効果により伝送速度を改善できる。しかしながら、クラスタあたりの基地局数が増加する場合、基地局間協調に要する共有情報（オーバーヘッド）も増加するため、伝送レート向上とオーバーヘッドのトレードオフを考慮する必要がある。

2-4 その他の検討

既存の無線システム（1 次システム）と 2 次的な無線システムがそれぞれ多素子 MIMO を有し同一周波数を共用する場合に、1 次システムの通信品質を維持しながら 2 次システムが達成可能な伝送速度を最大化する手法を提案した。ここで、2 次システムから 1 次システムへの干渉は厳しく制限されているものとする。パイロット信号間の干渉問題を解決するために、1 次システムにおいて未使用のパイロット信号の一部を 2 次システムに一時的に貸し与える手法を提案した。また、1 次システムへの干渉量の総和を許容値以下とする制約の下で 2 次システムのユーザー間の電力分配の準最適値を求める手法を提案した。提案技術を用いることで従来技術と比較して伝送速度を向上できることを示した。

2 マルチキャリア電力線通信におけるインパルス雑音環境下における適応信号処理技術

屋内における高速通信網を実現する手法として、電力線通信（PLC: Power Line Communication）が知られている。電力線は通信を目的として設置されたものではないため（伝送路特性が劣悪であるため）、伝送路歪みに対して耐性のある通信技術が求められる。そのような背景から電力線での伝送方式として、OFDM（Orthogonal Frequency Division Multiplexing）に代表されるマルチキャリア変調方式が用いられている。しかしながら、マルチキャリア信号はそのピーク電力対平均電力比（PAPR: Peak-to-Average Power Ratio）が高いため、送信電力増幅器において非線形歪みを生じる[6]。そのため、マルチキャリア変調を用いる場合は、PAPR 抑圧技術と併用することが電力増幅器の非線形歪み軽減の観点から効果的である。従来の PAPR 抑圧技術の一つとして、選択マッピング（SLM: Selected Mapping）が知られている[7]。SLM は PAPR を最小とるように変調シンボルに対するデータマッピングを変更する方式であり、元のデータを復元するためのサイド情報を受信機に通知する必要があるものの、信号を歪ませることなく PAPR を低減できる。

ところで、電力線伝送路には様々な電子機器が接続されているため、それらが発生させるインパルス性雑音が受信特性に影響を与える[8]。従来、受信機側においてインパルス性雑音の影響を軽減する手法として、閾値を超える受信値をインパルス性雑音とみなして除去するブランキング（blanking）と呼ばれる方式が検討されている[9]。しかしながら、ブランキングを用いる場合、インパルス性雑音の抑圧時に受信信号に歪みが生じるため BER 特性が劣化する。インパルス性雑音の抑圧に伴う信号歪みを抑えるには、受信機においてインパルス性雑音と受信信号成分を精度良く識別し、信号に生じる歪みを最小限に抑えることが重要である。それを実現するには受信信号のピーク電力をできるだけ低いことが望まれる。しかしながら、上述の通り、OFDM 信号はそのピーク電力が高いため、送信電力増幅器において非線形歪みを生じる。

本検討では、マルチキャリア PLC 伝送において、送信信号だけでなく受信信号のピーク電力を低減可能な改良 SLM 方式（e-SLM: enhanced-SLM）を提案した。改良 SLM 方式では、送信信号の PAPR と受信信号の PAPR の推定値の重み付き和を最小化するようにデータマッピングを変更する。それにより、送信信号と受信信号 PAPR を共に低減することができるので、送信電力増幅器の非線形歪みの影響を軽減することに加えて、受信機におけるインパルス性雑音の検出精度を改善できる。改良 SLM 方式の詳細および計算機シミュレーションによる特性評価結果を以下に示す。

2-1 提案改良 SLM 方式（送信側の信号処理技術）

システム構成を図 13 に示す。送信側では改良 SLM 方式を用いる。提案方式は、伝搬路情報が送信機側で既知であることを前提として、送信信号のピーク電力値と受信信号のピーク電力推定値の重み付き和を最小化するように動作する。それにより、送信信号と受信信号のピーク電力を共に低減させるものである。

改良 SLM 方式の構成を図 14 に示す。変調信号に異なる位相回転を与えることで同じ情報を持つ複数の候補系列を生成し、ピーク電力が最小となる系列を選択して送信する。送信信号系列を \mathbf{X} とする。 $U = 2^{N_b}$ 個の異なる位相系列 \mathbf{B}_n を用いて、 \mathbf{X} を異なるビット列 \mathbf{X}_n に変換する。ここで、 n 番目の候補系列は、 $\mathbf{X}_n = \mathbf{X} \oplus \mathbf{B}_n$

で与えられる。 \oplus はビット毎の mod2 加算を表す。 \mathbf{X}_n の離散逆フーリエ変換後の系列を \mathbf{x}_n 、そのピーク電力値を $P(\mathbf{x}_n)$ とする。また、伝搬路周波数応答行列を $\hat{\mathbf{H}}$ とすると、 n 番目の候補信号が送信された際の受信信号推定値は $\hat{\mathbf{Y}}_n = \hat{\mathbf{H}}\mathbf{X}_n$ と与えられる。 $\hat{\mathbf{Y}}_n$ の時間領域表現を $\hat{\mathbf{y}}_n$ 、そのピーク電力値を $P(\hat{\mathbf{y}}_n)$ とする。ここで、受信機側で推定したチャンネル情報は送信機へ理想的に通知されると仮定する。改良 SLM では、下式の通り、送信信号のピーク電力値 $P(\mathbf{x}_n)$ と受信信号のピーク電力推定値 $P(\hat{\mathbf{y}}_n)$ の重み付き和 $\sigma^{(n)}$ を求める。

$$\sigma^{(n)} = \alpha P(\mathbf{x}_n) + (1 - \alpha)P(\hat{\mathbf{y}}_n)$$

ここで、 α は $0 \leq \alpha \leq 1$ の値をとる重み係数である。改良 SLM では上式を最小とする送信候補 \mathbf{x}_u を送信信号として選択する。 $\alpha = 1$ のとき送信信号のピーク電力のみを最小化する従来の SLM と等価となる。また、 $\alpha = 0$ であれば受信信号のピーク電力のみを最小化する。ここで、送信側で選択された候補系列の情報が受信機に誤りなく通知されているものと仮定する。

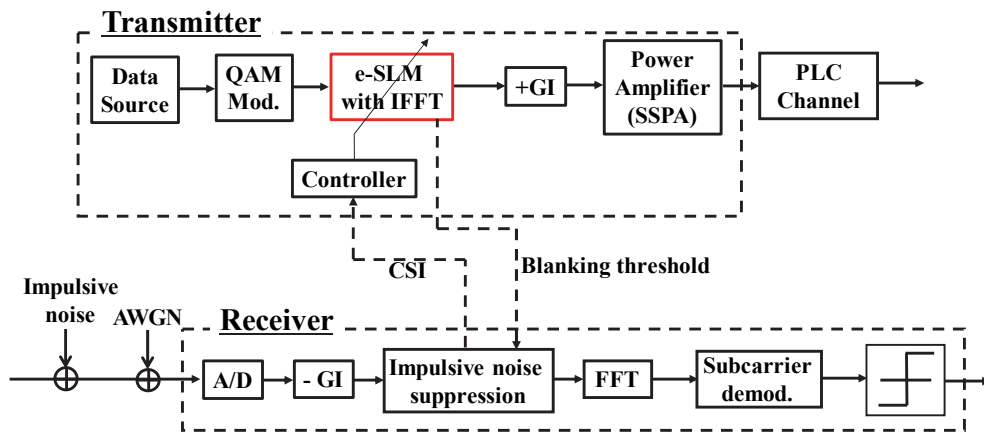


図 13 システム全体の構成

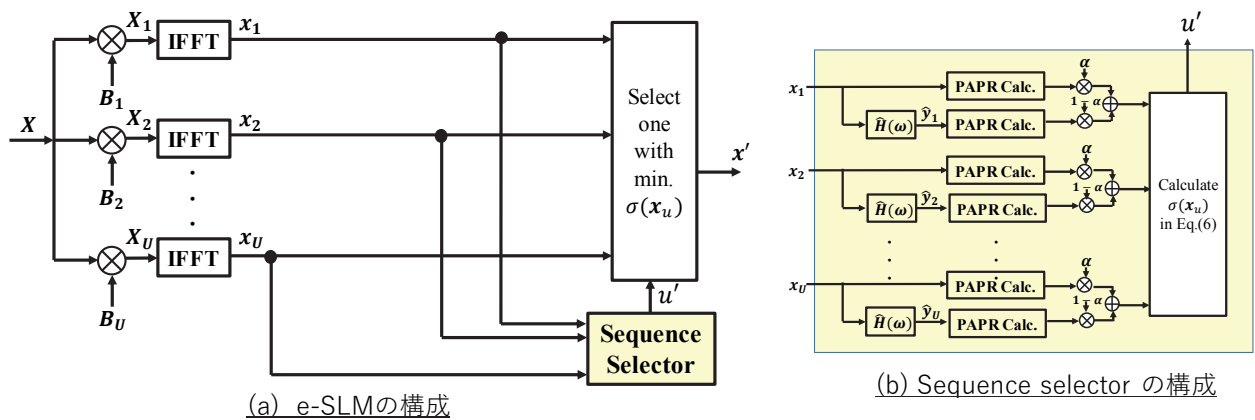


図 14 改良選択マッピング(e-SLM)の構成

2-2 インパルス性雑音のブランキング（受信側の信号処理）

インパルス性雑音の軽減技術として受信機において blanking を用いる。受信信号を $r(t)$ とする場合、閾値 N_{th} を超える受信振幅値をインパルス性雑音とみなして下式のとおり除去 (blanking) する。

$$\hat{r}(t) = \begin{cases} 0 & (|r(t)| > N_{th}) \\ r(t) & (|r(t)| \leq N_{th}) \end{cases}$$

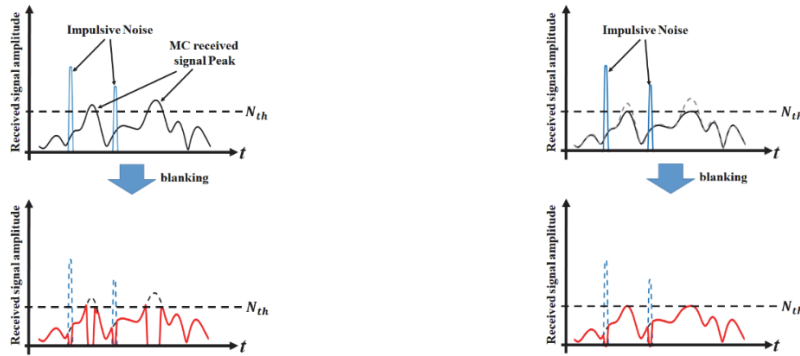
受信信号のピーク振幅が抑圧されていない場合（提案方式を適用していない場合）、インパルス雑音の誤検出を生じる(図 15(a))。一方、提案方式により受信信号のピーク振幅を閾値以下に制限した場合、インパルス性雑音のみを正しく検出し、ブランキングを適用できる(図 15(b))。

2-3 シミュレーション結果

計算機シミュレーションにより提案方式の特性を評価する。システム構成は図 13、図 14 と同一である。

キャリア数 256、各キャリアの変調方式を QPSK、改良 SLM の候補系列数を 64 とする。受信機側でのチャンネル推定結果は送信側で既知であると仮定する。図 16 に改良 SLM における重み係数 α とピーク電力値 (PAPR) の関係を示す。黒線、赤線はそれぞれ送信および受信信号のピーク電力値を表す。この図から、 α が小さい場合は受信信号のピーク電力が、 α が大きい場合は送信信号のピーク電力が主に抑圧されることがわかる。図 17 にチャンネル推定精度と受信信号の PAPR の関係を示す。 E_b/N_0 が高い領域ほど受信信号の PAPR 値を低減できる。これは、高 E_b/N_0 の領域ではチャンネル推定精度が向上するため、改良 SLM 部における受信信号の PAPR 値を精度良く与えることができるためである。図 18(a) (b) に QPSK-OFDM と 16QAM-OFDM の場合のインパルス性雑音の検出閾値 T_b と BER 特性の関係をそれぞれ示す。赤の破線はブランキング非適用時、緑がブランキング適用時の特性、黒はインパルス性雑音のみが理想的に除去された場合の特性をそれぞれ表す。また、実線は改良 SLM 適用時を、破線は非適用時を表す。図 18 では BER を最小化する閾値は $T_b=7\text{dB}$ であることがわかる。図 19 に OFDM-PLC 伝送時のビット誤り率特性 (BER) 特性を示す。改良 SLM を用いない場合、blanking 時の信号歪みによりエラーフロアが生じるのに対して、改良 SLM を用いる場合はエラーフロアがなくなり BER 特性が改善されることを示した。

この他、マルチキャリア PLC システムにおいて、ブランキング適用時の検出閾値がインパルス性雑音の検出確率 (PoD)、誤警報確率 (PoF) に与える影響を解析的に示した。また、ブランキングに伴う信号歪みをガウス分布に従う確率変数で近似することで、達成可能なビット誤り率 (BER) 特性を近似的に解析する手法を示した。解析結果を計算機シミュレーション結果と比較することで検討結果の妥当性を示した。



(a) 送信機側で PAPR 抑圧を行っていない場合 (b) 送信機側で PAPR 抑圧を行った場合
図 15 ブランキングによるインパルス性雑音抑圧の様子

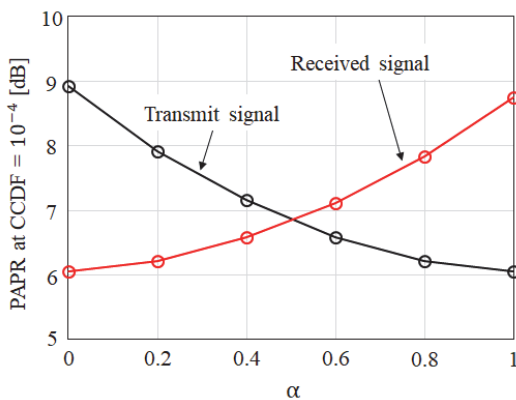


図 16 α と PAPR 特性の関係

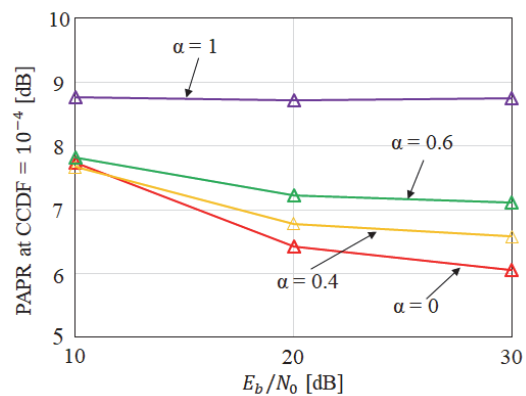
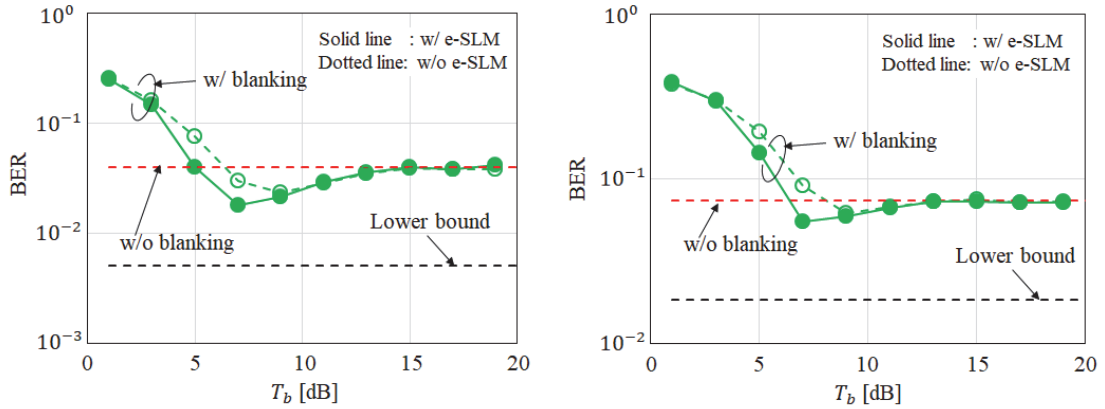
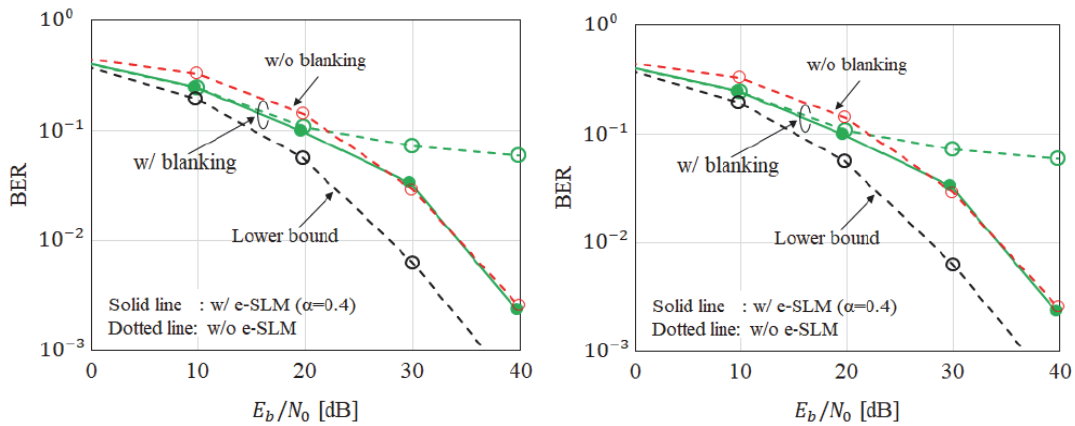


図 17 チャンネル推定精度と受信信号の PAPR の関係



(a) QPSK-OFDM (b) 16QAM-OFDM
 図 18 ブランキング閾値とビット誤り率の関係 ($E_b/N_0=25\text{dB}$)



(a) QPSK-OFDM (b) 16QAM-OFDM

図 19 ビット誤り率(BER)特性

4 まとめ

本研究では、小セル通信網に向けた伝送技術として、多素子 MIMO 技術を用いる無線伝送および電力線伝送技術に関する調査研究を行った。多素子 MIMO 伝送のためのチャネル推定・干渉制御技術を開発するとともに、屋内小セル通信網の基地局間回線として電力線伝送に着目し、その要素技術となる適応信号処理を開発した。マルチセルシステムにおけるパイロット干渉問題に対処するために、上り回線における各ユーザーへの直交パイロット割当を最適化する手法を提案した。ヘテロジニアスネットワークにおいて、大セルが有する直交パイロットの一部を小セルに割り当てることでパイロット干渉の影響を軽減するとともに、大セルから小セルへの予干渉を低減する技術を開発した。また、互いに強い干渉を与え合う複数の小セル基地局群を一つのクラスタとして扱い、同一クラスタ内の基地局同士が連携して支配的な干渉を抑圧する方式を示した。さらに、屋内電力線伝送時に問題となるインパルス性雑音の影響を軽減する技術を開発し、提案技術を用いる場合の特性の評価解析を行った。シミュレーション評価等により上記の提案技術の有効性を示した。今後の課題として、多素子 MIMO ヘテロジニアスネットワークにおける基地局電力利用効率の改善や受信装置の小型・低消費電力化等があげられる。

【参考文献】

- [1] T. L. Marzetta, "Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 9, no. 11, pp. 3590-3600, Sept. 2010.

- [2] L. Lu, G. Y. Li, A. L. Swindlehurst, A. Ashikhmin, and R. Zhang, "An overview of massive MIMO: benefits and challenges," *IEEE J. Sel. Topics Signal Process.*, vol. 8, no. 5, pp. 742-758, Oct. 2014.
- [3] H. Ngo, E. Larsson, and T. Marzetta, "Energy and spectral efficiency of very large multiuser MIMO systems," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 61, no. 4, pp. 1436-1449, Apr. 2013.
- [4] J. Jose, A. Ashikhmin, T. Marzetta, S. Vishwanath, "Pilot contamination and precoding in multi-cell TDD systems," *IEEE Trans. Commun.*, vol.10, no.8, pp.2640-2651, Aug. 2011.
- [5] S. He, Y. Huang, S. Jin and L. Yang, "Coordinated beamforming for energy efficient transmission in multicell multiuser systems," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 61, no. 12, pp. 4961-4971, Dec. 2013.
- [6] 赤岩, "デジタル移動通信技術のすべて," コロナ社, 2013.
- [7] S. H. Han and J. H. Lee, "An overview of peak-to-average power ratio reduction techniques for multicarrier transmission," *IEEE Wireless communications*, pp.57-65, Apr. 2005.
- [8] Y. H. Ma, et. al, "Performance analysis of OFDM system for broadband power line communications under impulsive noise and multipath effects," *IEEE Transaction on power delivery*, vol. 20, no. 2, April 2005.
- [9] K. M. Rabie and E. Alsus, "Effective noise cancellation using single-carrier FDMA transmission in power-line channels," *IEEE Transaction on power delivery*, vol. 29, no. 5, Oct. 2004.

〈発表資料〉

題名	掲載誌・学会名等	発表年月
Pilot Allocation for Multi-Cell TDD Massive MIMO Systems	IEEE Vehicular Technology Conference 2017-Fall	2017年9月
Performance Analysis on Uplink Pilot Allocation in TDD Massive MIMO Heterogeneous Networks	IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences	2017年11月
Two Dimensional Pilot Allocation for Uplink Channel Estimation in Massive MIMO/TDD Systems	Two Dimensional Pilot Allocation for Uplink Channel Estimation in Massive MIMO/TDD Systems	2018年2月
Dynamic Small Cell Clustering and Non-Cooperative Game-Based Precoding Design for Two-Tier Heterogeneous Networks with Massive MIMO	IEEE Transactions on Communications	2018年2月
Power Allocation for Massive MIMO Cognitive Radio Networks With Pilot Sharing Under SINR Requirements of Primary Users	IEEE Transactions on Vehicular Technology	2018年2月
Alternative Direction for 3D-OFDM Massive MIMO FDD Channel Estimation and Feedback	IET Communications	2018年3月
An Enhanced Selected Mapping Technique for Joint PAPR Reduction and Impulsive Noise Suppression in Multi-Carrier Powerline Communications Systems	IEEE International Symposium on Power Line Communications and its Applications	2018年4月
Pilot Allocation for Interference Coordination in Two-tier Massive MIMO Heterogeneous Network	IEEE Vehicular Technology Conference Spring 2018	2018年6月
Performance Analysis of Impulsive Noise Blanking for Multi-Carrier PLC Systems	IEICE Communications Express	2018年(採録決定済み)