

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 31 日現在

機関番号：12101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420337

研究課題名(和文) 少数のパイロット信号を用いる時変スパース通信路推定法の開発

研究課題名(英文) Development of Time-Variant Sparse Channel Estimation Using A Few Pilot Symbols

研究代表者

宮嶋 照行 (Miyajima, Teruyuki)

茨城大学・工学部・教授

研究者番号：00261743

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、移動環境における高速データ伝送のための通信路推定法について検討した。インパルス応答がスパース(素)となる時変通信路を少数のパイロット信号で高精度に推定することを目指した。まず、OFDMシステムにおける時不変スパース通信路を少数のパイロット信号を用いて推定する方法を検討した。これは決定論的ブラインド通信路推定法とL1正則化を組み合わせたものである。次に、この手法をOFDMAシステムへ拡張し、有効性を計算機シミュレーションにより示した。次に、OFDMシステムにおける時変スパース通信路をパイロット信号を用いずに推定する方法を検討し、シミュレーションによりその有効性を示した。

研究成果の概要(英文)：In this study, we consider channel estimation methods for high-speed data transmission in mobile environments. Our final goal is to develop the method to estimate time-variant channels using a few pilot symbols. First, we consider an estimation method for time-invariant sparse channels in OFDM systems with a few pilot symbols. This method combines a deterministic blind channel estimation method and L1 regularization. Next, we extend this method to OFDMA systems and show its effectiveness by computer simulations. Next, we consider an estimation method for time-variant sparse channels using no pilot symbols and show its effectiveness by simulations.

研究分野：情報通信工学

キーワード：通信路推定 高速無線伝送 ブラインド信号処理

1. 研究開始当初の背景

無線通信技術の究極の目標の一つは、有線通信並みの超高速伝送速度を移動環境において実現することである。その実現には種々の信号処理が必要であるが、通信路推定の結果は後段の処理全てに影響を与えるため、高精度な推定が望まれる。また移動通信では、通信路が時間的に変化するため、その推定は困難を極める。

一方、超高速伝送速度を実現するために広帯域化すると、通信路のインパルス応答がスパース(疎)になることが近年指摘されている。圧縮センシングの手法を用いることでスパース通信路を高精度に推定する研究が、海外の研究者を中心に盛んに行われている。

通信路推定法は、受信機で既知のパイロット信号を利用するトレーニング型と、パイロット信号を利用しないブラインド型に大別できる。従来のスパース通信路推定のほとんどは前者である。パイロット信号の伝送中はデータ伝送ができないため、パイロット信号数はできるだけ少ないことが望ましい。しかし時変通信路では、頻繁に多数のパイロット信号を送る必要があり、周波数利用効率の劣化(実効的な伝送速度の低下)が深刻となり実用性が低い。この問題を解決するのが後者のパイロット信号が不要なブラインド型である。

これまでに研究代表者は、時不変スパース通信路のブラインド推定法を検討している。この手法はパイロット信号を必要としないものの、多数の受信信号サンプルを必要とするため、時不変の通信路には適用可能だが、高速に変化する通信路には適していない。現時点では、時変スパース通信路の高精度な推定は困難な問題であり、新しいアイデアの登場が待たれている。

ところで、パイロット信号を用いればブラインド型の欠点である必要受信信号サンプル数を減らせる。またブラインド手法を用いれば、パイロット型の欠点であるパイロット数を減らせると考えられる。そこで、本応募者のブラインド信号処理のアプローチを発展させ、さらに少数のパイロット信号も同時に利用することで、周波数利用効率を低下させることなく、時変スパース通信路の正確な推定が可能になると考えるに至った。

2. 研究の目的

本研究では、少数のパイロット信号を利用する新しい時変スパース通信路推定法について検討を行い、超高速ビットレート移動無線通信における通信路推定の基盤確立を目指す。研究期間内に以下を明らかにする。

(1) 新しい時変スパース通信路推定法を提案し、その推定性能を理論解析により明らかにする。具体的には、通信路が推定可能であるための十分条件の導出、推定誤差の下界の導出等を行い、少数のパイロット信号を用いて

推定可能であることを示す。

(2) 高速無線伝送に適した MIMO-直交周波数分割多重(OFDM)システムへ提案手法を適用した場合について、基礎特性をシミュレーションにより評価する。具体的には、推定誤差やシンボル誤り率に対する、パイロット数や最大ドップラー周波数の影響等の観点から従来手法との性能比較を行い、提案手法の有効性を示す。

(3) マルチユーザ環境へ適用できるように提案手法を拡張し、その性能評価を行う。具体的には、直交周波数分割多元接続(OFDMA)アップリンクにおいて、複数の通信路が同時に推定可能であるための十分条件を導出した後、シミュレーションにより推定誤差や誤り率の観点から提案法の有用性を示す。

(4) 通信路のスパース性を利用した受信機の簡易化を検討する。高速化によって通信路インパルス応答長が長くなるため受信機が複雑になる。そこでスパース性を利用して受信機の簡易化を図る。具体的には、干渉抑圧のための線形フィルタの簡易化、空間および周波数ダイバーシチ合成の簡易化を検討する。

3. 研究の方法

(1) OFDM システムにおけるセミブラインドスパース通信路推定の提案と評価:

高速無線伝送に適した SIMO-OFDM システムについて、スパース通信路を推定するために、少数のパイロット信号を用いる方法を考案する。具体的には、決定論的ブラインド通信路推定法と L1 正則化を組み合わせることで、スパース通信路を効率よく推定する方法を提案する。

購入したコンピュータとソフトウェアを利用してシミュレータを作成する。シミュレータにより性能評価を行う。従来手法との比較を通して提案法の有効性を示す。特に、正則化パラメータの影響について検討する。

(2) OFDMA システムへのセミブラインドスパース通信路推定法の拡張と評価:

マルチユーザ環境へ適用可能な OFDMA アップリンクシステムについて、先に提案した手法を拡張する。具体的には、まず OFDMA のためのブラインド通信路推定法を導き、次に少数のパイロット信号を用いるセミブラインド推定法へ拡張し、次に L1 正則化を組み合わせることでスパース通信路へ適用可能とする。

理論解析により、ブラインド通信路推定法によってある条件のもとで、OFDMA 通信路推定が可能となることを明らかにする。

シミュレータを作成し、シミュレーションにより提案法の動作確認および性能評価を行う。特に、ユーザ当たりのサブキャリア数、通信路チャネル長、パスゲインの非0要素数、受信ブロック数の影響などを明らかにする。

(3) OFDM システムにおける時変スパース通信路の推定法の提案と評価:

時変通信路を基底展開モデルによって表現し、その時不変パラメータを推定するブラインド方法として知られる Leus 等の方法を OFDM へ適用することをまず検討する。さらにそれに L1 正則化を組み合わせることでスパース通信路を推定する方法を提案する。

シミュレータを作成し、提案手法の動作確認と基礎的特性の取得を行う。通信路変動の速さの影響などを調べ、提案法の有効性を確認する。

それぞれのテーマについて、成果をまとめて学会において積極的に発表する。

4. 研究成果

(1) OFDM システムにおけるセミブラインドスパース通信路推定の提案と評価:

OFDM システムのための新しいスパース通信路推定法を提案した。提案する推定法は、Wang 等によって提案された SIMO-OFDM システムのための決定論的ブラインド通信路推定法(WLC 法と呼ぶ)に、少数のパイロット信号を用いる最小自乗推定と、通信路のスパース性を考慮した L1 ノルム正則化を組み合わせるものである。

具体的に推定法を説明する。WLC 法は 2 系統の受信機から得られる受信信号を用いた同次連立方程式を解くブラインド手法である。この方法はサブキャリア数が通信路次数の 2 倍+1 以上であれば正しい推定値が得られるが、通信路長を受信機で正確に知る必要がある。一方、通信路次数+1 個以上のパイロット信号が利用できれば、非同次連立方程式を解くことで最小自乗解が得られる。この 2 方式を同時に満たす連立方程式を解くことでセミブラインド推定が可能となる。さらに提案法では、通信路のスパース性を考慮して、通信路を表すベクトルの L1 ノルムをできるだけ小さくするために、正則化の項を追加した問題を解くものである。シミュレーションにおいて提案法を実装するために、Kim 等の内点法によるアルゴリズムを用いた。

予備的なシミュレーションにより、正則化パラメータの自乗平均推定誤差(MSE)への影響を確認した(図1)。推定性能は λ に依存して大きく変動し、さらに最適な λ は受信 SN 比に依存することが分かった。正則化パラメータの選択が極めて重要であり、これを自動的に決定する方法が望まれる。そこで、推定誤差と推定ベクトルの非ゼロ要素の大きさ $S(\lambda)$ に相関があることに着目して、 $S(\lambda)$ と三分探索を用いた λ の自動的決定法を考案した。

計算機シミュレーションにより提案法の性能評価を行なった。サブキャリア数は 64、変調方式は QPSK、CP 長は 16、通信路次数は 13、非ゼロ要素数は 3、パイロットシンボル数は 7 とした。受信アンテナ数が 2 の SIMO システムを考えた。

まず λ の自動決定法について、 λ を最適に

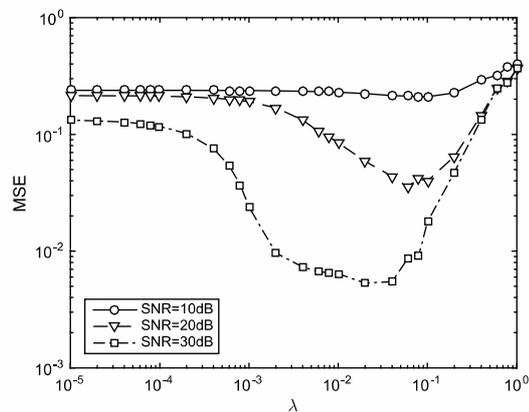


図 1. 正則化パラメータの影響。

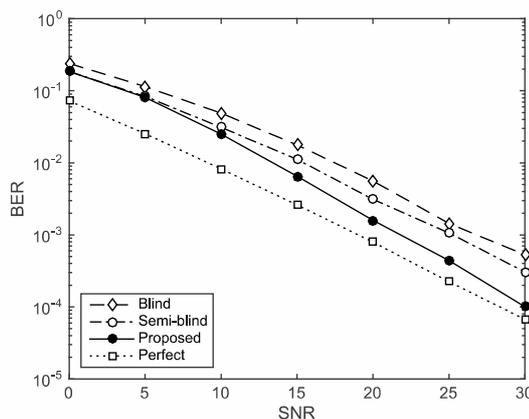


図 2. 通信路長が既知の場合の BER 特性。

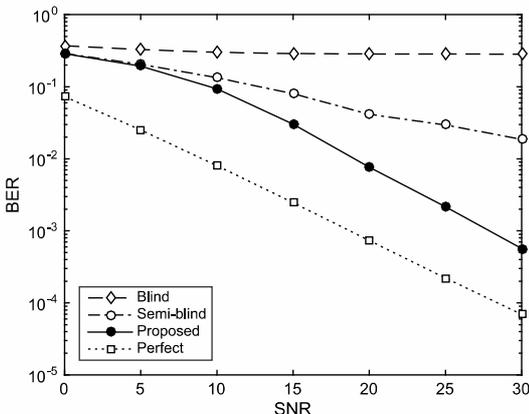


図 3. 通信路長が未知の場合の BER 特性。

決定した場合と比較して、提案法により同等の BER(Bit Error Rate)特性が得られることを示した。

次に通信路長が既知の場合について、ブラインド(WLC)法、セミブラインド法との BER 特性を比較した(図2)。その結果、提案法の性能はわずかに優れることがわかった。しかし、ブラインド法の性能も決して悪くはないことに注意する。

次に通信路長が未知の場合について、BER 特性を評価した(図3)。このとき、ブラインド法の性能は極端に悪くなる。セミブラインド法により改善が得られるが、SN 比 30dB でも BER が 0.01 以上であり十分ではない。一方、提案法によりさらなる改善が得られ、提案法の有効性を確認することができた。

(2) OFDMA システムへのセミブラインドスパース通信路推定法の拡張と評価:

(1)で提案した OFDM のための通信路推定法を、OFDM の原理に基づくマルチユーザシステムである OFDMA のアップリンクにおけるスパース通信路推定に拡張した。基本的なアイデアは(1)と同様であり、決定論的なブラインド通信路推定法と少数のパイロット信号を用いたセミブラインド推定法を考案し、さらに L1 ノルム正則化を組み合わせたスパース通信路推定法を考案した。

まず OFDMA のためのブラインド通信路推定法を提案した。これは先に説明した OFDM のための WLC 法を OFDMA に拡張したものである。理論解析により、各ユーザに割り当てられたサブキャリア数が通信路次数の2倍+1以上であれば、正しい推定が可能であることを示した。WLC 法と同様に、通信路次数をあらかじめ受信機において知る必要があることに注意する。この手法に L1 正則化を組み合わせることで、スパース通信路のブラインド推定が可能となる。

次にパイロット信号を用いる推定法を検討し、パイロットシンボルが通信路次数+1個以上利用できれば最小自乗解が得られることを確認し、これと先のブラインド推定法を組み合わせたセミブラインド推定法を提案した。これにより、パイロットシンボル数は通信路次数+1個よりも少なくとも推定できることが期待される。またブラインド手法に固有の問題である、推定値における複素定数倍の曖昧さが解消できる。さらに、これに L1 正則化を組み合わせることで、スパース通信路のセミブラインド推定が可能となる。

OFDM の場合と同様に、正則化パラメータの決定が重要であることを予備シミュレーションにより確認した。MSE の代わりに、推定値による連立方程式の誤差を評価した結果、 λ が大きいと σ は大きく、 λ が小さくなるにつれて σ は小さくなり、 λ の最適地付近から収束する傾向があることを発見した。また λ が小さすぎると推定ベクトルの要素が全て非ゼロの値をとる傾向があることもわかった。このことより、ベクトル要素の和により評価したスパース性と λ の積を評価基準 $J(\lambda) = \sum |y_i| \lambda$ とすることを考案した。 J と MSE は概ね λ に対して単峰性を示すことを確認し、三分探索により J を最小とする λ を求めるアルゴリズムを提案した。

計算機シミュレーションにより提案法の性能評価を行い、従来法と比較した。サブキャリア数は 256、変調方式は QPSK、CP 長は 64、通信路次数推定値は 10、非ゼロ要素数は 3、パイロットシンボル数は 2、ユーザ数は 4、受信アンテナ数は 2 とした。

図 4 に λ を自動決定するための三分探索法の繰り返し数と BER の関係例を示す。2 回程程度の反復回数で収束しており、計算量的に簡易であることがわかる。

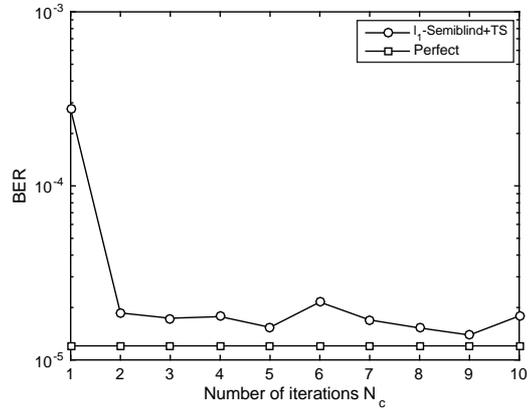


図 4. 三分探索による BER の変化。

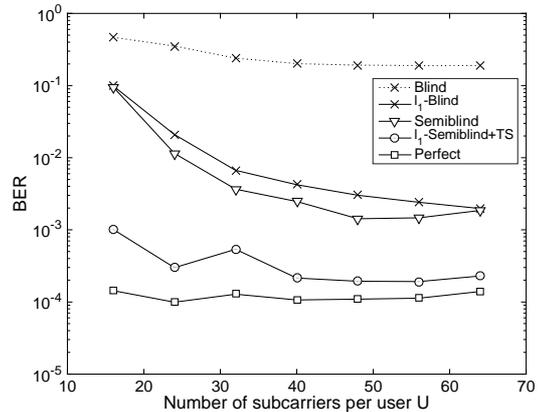


図 5. サブキャリア数の影響。

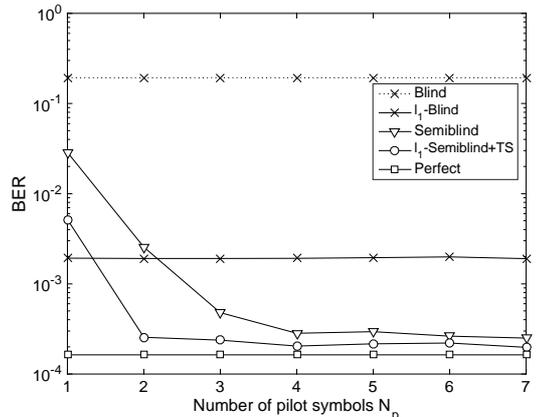


図 6. パイロット信号数の影響。

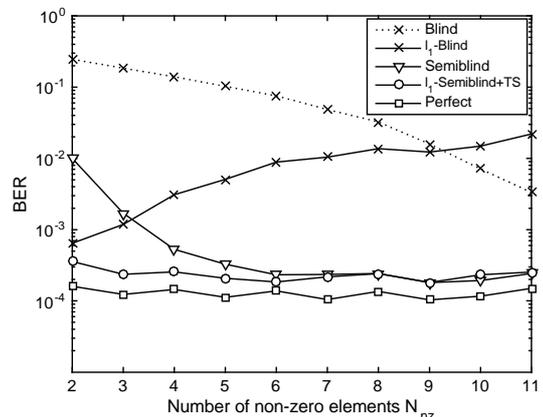


図 7. 非ゼロ要素数の影響。

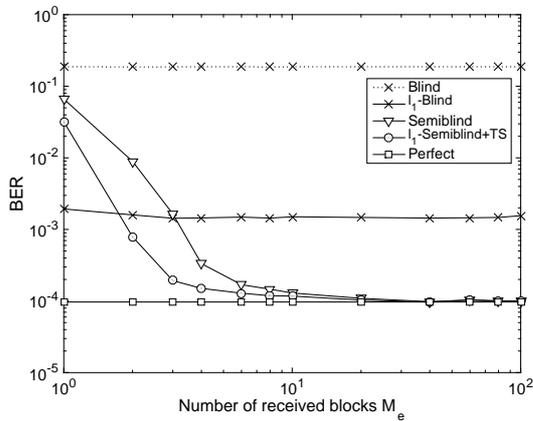


図 8. 受信ブロック数の影響.

図 5 にユーザ当たりのサブキャリア数の BER への影響を示す．サブキャリア数が減るにつれて利用できる方程式の数が減るため従来法は劣化するが，提案法(l₁-Semiblind+TS)は劣化が小さく，サブキャリア数の影響を受けにくいことがわかる．

図 6 にパイロット信号数の影響を示す．パイロット信号を用いることで対応するブラインド手法の性能を改善できることと，必要なパイロット数は非常に少ないことがわかる．

図 7 に非ゼロ要素数の影響を示す．非ゼロ要素数の減少とともに(スパースになるにつれて)ブラインド手法は劣化するが，l₁ 正則化を利用することで劇的に改善することがわかる．さらに提案法は非ゼロ要素数の影響をほとんど受けないことがわかる．

図 8 に受信ブロック数の影響を示す．必要なブロック数は 10 ブロック以下で十分であり，ある程度の速さで変化する時変通信路へも適用可能である．

(3) OFDM システムにおける時変スパース通信路推定法の提案と評価：

まず，OFDM における時変スパース通信路を基底展開モデルによりモデル化した場合の性能評価を行なった．問題の見通しをよくするために，通信路推定はパイロットを利用した最小自乗法に基づき，ブロックスパース問題を解くための BSBL 法により行う．ブロック性を考慮しない場合との比較を行い，図 9 に推定誤差を示す．図中で Q=3 がブロックスパースを考慮した場合に相当し，ブロックスパース通信路としてモデル化することで性能が向上することを示した．

次に Leus 等の部分空間法に基づく推定法を OFDM 時変通信路へ適用することを検討した．これは受信信号の周波数シフトと時間シフト処理に基づくもので，固有値分解により実装できる．計算機シミュレーションにより動作を確認した．図 10 に推定誤差を示す．サンプリング周波数は 12.8kHz，ドップラー周波数を 100Hz とした．SN 比が高くなるにつれて推定誤差が小さくなり，提案法が望ましく動作することがわかる．

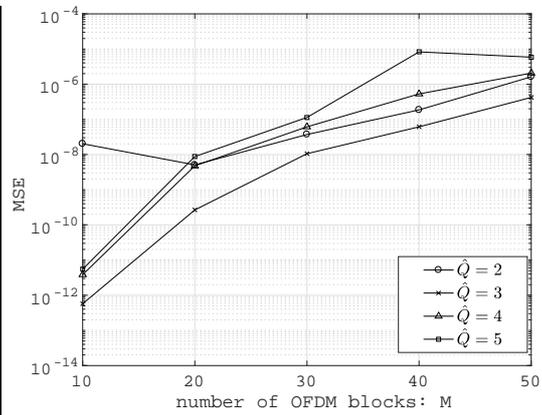


図 9. ブロックスパース考慮の効果.

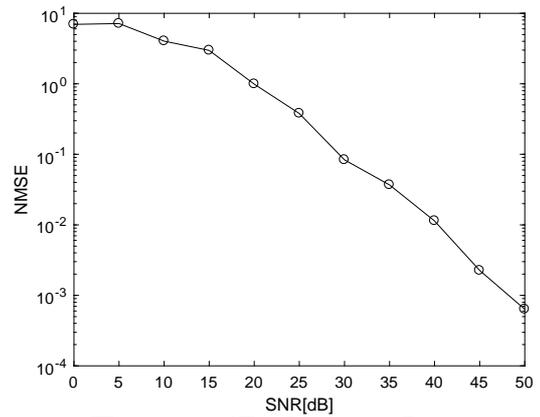


図 10. 時変通信路の推定誤差.

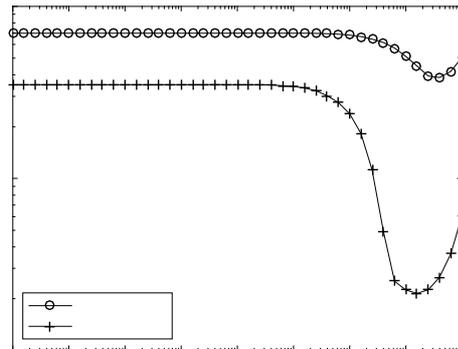


図 11. 正則化パラメータの影響.

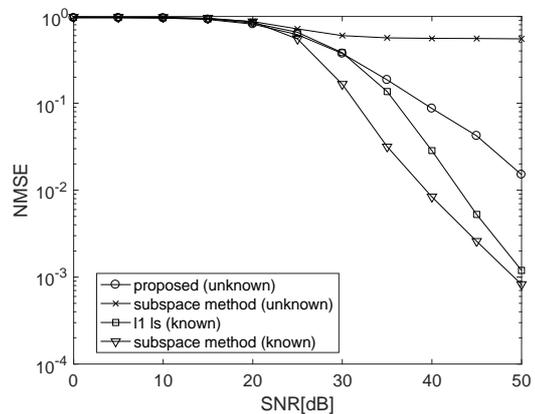


図 12. 推定性能比較.

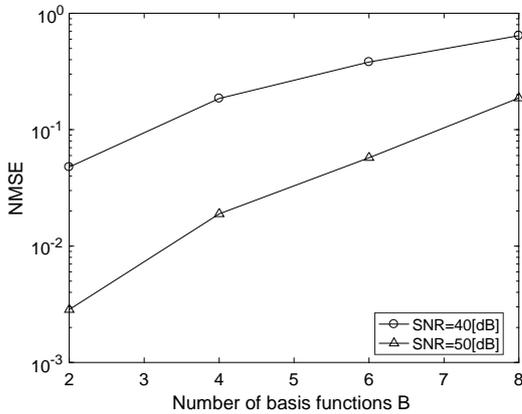


図 13. 通信路変動の速さの影響.

次に上述の手法に L1 正則化を組み合わせることでスパース通信路を推定する方法を提案した。基礎となるブラインド推定方は同次連立方程式で表せるが、これを非同次連立方程式に変形し、この自乗誤差と推定パラメータベクトルの L1 ノルムの和を最小にするものである。計算機シミュレーションにより性能評価を行った。

図 11 に正則化パラメータの影響を示す。OFDM の場合と同様に、は性能に大きく影響し、その最適値は SN 比に依存しており、を適切に選ぶことの重要性がわかる。

図 12 に SN 比に対する推定誤差特性を示す。ここで known は通信路次数が既知の場合であり、この時従来の部分空間法は非常に優れた性能を示す。一方 unknown は通信路次数が未知の場合であり、部分空間法の性能は大きく劣化する。提案法はこれを大幅に改善していることが確認できる。

図 13 に通信路変動の速さの影響を示す。基底関数数 B とドップラー周波数 f_d は $B=2[NTfd]$ の関係がある。ここで N はサブキャリア数、T はサンプリング間隔、 $[\cdot]$ はガウスの記号である。時変環境でも推定可能であることが確認できる。ただし変動が速くなるにつれて性能は劣化するので、改善の余地はあろう。またスペースの都合で結果は示していないが、時間シフト数と周波数シフト数は性能へ大きく影響しないことを確認した。

(4) 国内外における位置付けとインパクト及び今後の展望：

上述の(1)の成果は学会発表の③～⑥、(2)は雑誌論文の、(3)は学会発表の、にまとめられている。

これまでに発表されている多くのスパース通信路推定法は、時不変通信路をパイロット信号のみを利用して推定するものである。一方、本研究で主に検討した推定法はパイロット信号を全く必要しない、あるいは少数しか利用しないため、周波数利用効率の劣化を小さく抑えることができる点に特色がある。また OFDM 時変スパース通信路を(セミ)ブラインド処理と L1 正則化により推定する試みはこれ間に無く、高速無線伝送の通信路

推定の一つの方向性を示すことができた。さらにこの手法を発展させた等化器設計など、今後検討する価値のある話題を提供できた。

(1)(2)で述べた時不変スパース通信路推定の検討に時間がかかったために、(3)で検討した時変スパース通信路推定のセミブラインド手法への拡張について、まだ十分な成果が得られていない。また当初計画していた等化器の設計についても十分な成果が得られなかった。これらについては現在鋭意検討中であり、近日中に成果が出る見込みであり、今後も引き続き研究を進めていく予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 6 件)

齊藤友也, 宮嶋照行, “OFDMA システムにおけるスパース通信路のセミブラインド推定,” 電子情報通信学会論文誌 A, vol.J99-A, no.12, pp.480-488, Dec. 2016, 査読有。

〔学会発表〕(計 12 件)

村上直人, 宮嶋照行, “ブラインド時変通信路推定法の OFDM への適用,” 電子情報通信学会総合大会, A-9-3, Mar. 2017, 名城大学。

村上直人, 宮嶋照行, “OFDM における時変スパース通信路のブラインド推定法の一検討,” 電子情報通信学会東京支部学生研究発表会, 34, Mar. 2017, 東海大学。

齊藤友哉, 宮嶋照行, “OFDM システムにおけるスパース通信路のセミブラインド推定,” 電子情報通信学会ワイドバンドシステム研究会, WBS2015-28, Oct. 2015, 早稲田大学。

齊藤友哉, 宮嶋照行, “スパース OFDM 通信路のセミブラインド推定法の性能評価,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会, A-5-6, Sep. 2015, 東北大学。

齊藤友哉, 宮嶋照行, “スパース OFDM 通信路のセミブラインド推定法の提案,” 電子情報通信学会総合大会, A-5-14, Mar. 2015, 立命館大学。

齊藤友哉, 宮嶋照行, “OFDM システムのためのセミブラインド通信路推定法の検討,” 電子情報通信学会東京支部学生研究発表会, 31, Feb. 2015, 東海大学。

6. 研究組織

(1)研究代表者

宮嶋 照行(MIYAJIMA TERUYUKI)

茨城大学・工学部・教授

研究者番号：00261743