

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 12 日現在

機関番号：12101

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560434

研究課題名(和文)パイロット信号が不要なスパース通信路推定法の開発とその応用

研究課題名(英文)Development of Sparse Channel Estimation Methods Without Pilot Symbols and Its Applications

研究代表者

宮嶋 照行(Miyajima, Teruyuki)

茨城大学・工学部・准教授

研究者番号：00261743

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円、(間接経費) 630,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、パイロット信号を用いずにスパース通信路を推定する手法について、以下の内容を検討した。(1)OFDM伝送におけるスパース通信路の推定、(2)シングルキャリア伝送のためのスパース通信路推定、(3)時変スパースOFDM通信路推定、(4)少数のパイロットが利用可能な場合への拡張。(1)と(2)では、パイロット信号を用いずに非ゼロタップを検出する方法を提案し、その検出結果を利用して通信路を推定する方法の有効性を示した。(3)では、時変通信路をグループスパース通信路としてモデル化することで効率的に推定できる可能性を示した。(4)では、セミブラインド手法を検討し、今後の課題を明確にした。

研究成果の概要(英文)：In this work, we considered the following issues concerning sparse channel estimation methods without pilot symbols: (1) sparse channel estimation in OFDM transmissions, (2) sparse channel estimation in single-carrier transmissions, (3) time-variant sparse OFDM channel estimation, and (4) extension to the case with a few pilot symbols. For (1) and (2), we proposed non-zero tap detection methods without pilot symbols, and showed the effectiveness of the channel estimation methods using the detection results. For (3), we showed that time-variant channels can be efficiently estimated by modeling as group-sparse channels. For (4), we considered a semi-blind method, and examined our future directions.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・通信・ネットワーク工学

キーワード：通信路推定 スパース通信路 圧縮センシング 移動通信 高速無線伝送 ブラインド推定

1. 研究開始当初の背景

無線通信技術の究極の目標は、有線通信並みの超高速ビットレート(伝送速度)を移動環境において実現することである。その実現に必要な信号処理について申請者は研究を続けている。特にパイロット信号を用いない信号処理(ブラインド信号処理)を検討している。

通常は、こういった信号処理のためにパイロット信号が用いられる。パイロット信号は既知のトレーニング用の信号であり、これの伝送中はデータの伝送ができない。そのためパイロット信号の送信により、周波数利用効率が大幅に低下する(つまり実効的な伝送速度が落ちる)。パイロット信号の送信を不要とすることができれば、伝送速度を大幅に向上できるが、そのような研究はあまり多くない。研究代表者はこれまでに、「符号分割多元接続(CDMA)における通信路推定とユーザ間干渉抑圧」「等化器による符号間干渉抑圧」「適応アレーアンテナによるビーム形成」「直交周波数分割多重(OFDM)におけるブロック間干渉抑圧」について、パイロット信号を用いずにこれらの問題を解決する手法の開発に取り組み、一定の成果を挙げてきた。

一方、超高速ビットレート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になることが最近報告されている。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、スパース通信路を正確に推定する手法の確立が重要である。

従来の通信路推定法によりスパース通信路を推定した場合、推定精度が低く実用的でない。これを改善するために、圧縮センシングの手法をスパース通信路推定に用いる試みが欧米の研究者により行われているが、依然として多数のパイロット信号を必要とするため実用的でない。これら従来の研究では、パイロット信号送信による周波数利用効率低下の観点から欠けているのである。

そこで、研究代表者のブラインド信号処理のアプローチを発展させ、さらに圧縮センシングの考え方を取り入れることで、パイロット信号を用いずに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

本研究は、パイロット信号を用いずにスパース通信路を推定する新しい手法を提案し、その基礎特性を明らかにした後、移動無線通信への応用を検討することで、将来の超高速ビットレート無線通信のための通信路推定法の基盤を確立することを目的とする。研究期間内に以下を明らかにする。

(1) 新しい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、スパース通信路が推定可能であるための必要十分条件の導出、推定誤差の下界の導出等を行い、パイロット信号を用いずに推

定可能であることを示す。

(2) 高速無線伝送に適した OFDM-MIMO 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へのサブキャリア数やアンテナ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) 移動通信では通信路が時変となる。時変通信路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、通信路の変化の早さの推定誤差への影響や計算量を明らかにし、簡易な方法で時変環境に追従できることを示す。

(4) 移動通信システムでは少数のパイロット信号が与えられることがある。パイロットが利用できるような提案手法を拡張し、その性能評価を行う。具体的には、パイロット数が推定可能性と推定誤差へ与える影響を明らかにし、少数のパイロットで性能が大きく向上することを示す。

3. 研究の方法

(1) OFDM システムにおけるスパース通信路のブラインド推定法の提案と評価：

① OFDM-SIMO システムについて、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考案する。具体的には、通信路インパルス応答の非ゼロタップをパイロット信号を用いずに検出する方法を提案する。

② 提案した方法について、ある条件のもとで、非ゼロタップの検出が可能となることを理論的に明らかにする。

③ 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。従来の手法との比較を通して提案法の有効性を示す。

(2) シングルキャリアシステムにおけるスパース通信路のブラインド推定法の提案と評価：

① シングルキャリア SIMO システムについて、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する。非ゼロタップを検出した後、通信路推定を行う方法を提案する。

② 理論解析により、ある条件のもとで、非ゼロタップ検出が可能となることを示す。

③ シミュレータを作成し、シミュレーションにより、動作確認および性能評価を行う。

(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：

① 移動通信環境を想定し、時間的に変化するスパース通信路をモデル化し、これを効率よく推定する方法を提案する。

② シミュレータを構築し、提案法の動作確認及び基礎的性能を取得する。

(4) 少数のパイロットが利用可能な場合への拡張：

① データと少数のパイロットの両方を利用

するセミブラインド通信路推定法を検討する. 具体的なアルゴリズムを導出する.

②シミュレーションにより提案手法の動作確認および基礎的特性の取得を行う. パイロット数の影響などを検討する.

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 におけるスパース通信路のブラインド推定法の提案と評価:

OFDM システムにおけるスパース通信路の新しいブラインド推定法を提案した. 提案する通信路推定法は, パイロット信号を用いない非ゼロタップ検出と, その検出結果を用いたタップ係数推定の二段階で行われる (図 1).

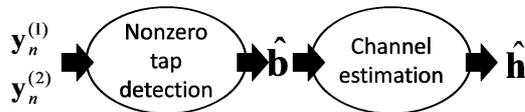


図 1 タップ検出と通信路推定.

提案するブラインド非ゼロタップ位置検出法はサイクリック・プリフィックス (CP) の性質を利用する. 受信信号の CP 相当部分とそのコピー元に相当する部分の差ベクトルの自己相関行列を次式のように求める.

$$R = E \left[\left(\tilde{\mathbf{r}}_n^{(k)} - \hat{\mathbf{r}}_n^{(k)} \right) \left(\tilde{\mathbf{r}}_n^{(k)} - \hat{\mathbf{r}}_n^{(k)} \right)^H \right].$$

送信信号の無相関性によって, この行列は対角行列になり, その対角要素を用いて通信路インパルス応答 (タップ係数) の大きさを次のように推定することができる.

$$\left| \hat{h}_i^{(k)} \right|^2 = R_{ii}^{(k)} - R_{(i+1)(i+1)}^{(k)}.$$

この検出した結果をしきい値と比較して非ゼロタップを検出する.

ブラインド通信路推定法として, 2003 年に Wang らによって提案された手法 (WLC 法と呼ぶ) がある. 非ゼロタップ検出した結果と WLC 法を組み合わせることを検討した. 基本的なアイデアは, 非ゼロと判定されたタップ係数についてのみ WLC 法により推定を行うというものである.

$$\hat{\mathbf{h}} = \min_{\|\mathbf{h}\|=1} \mathbf{h}^H \text{diag}(\hat{\mathbf{b}}) \mathbf{Q} \text{diag}(\hat{\mathbf{b}}) \mathbf{h}.$$

推定すべきタップ数が減少するため, 通信路推定性能が大幅に向上することが期待できる.

計算機シミュレーションにより提案法の性能評価を行った. サブキャリア数は 64, 変調方式は QPSK, CP 長は 16, チャネル次数は 15, 非ゼロタップ数は特に断らなければ 4 とした. 受信アンテナ数が 2 の SIMO システムを考える.

図 2 は非ゼロタップ数のビット誤り率 (BER) への影響を表している. 非ゼロタッ

プが少ない (つまりスパースである) ほど提案法の効果が現れて, BER が低くなっていることが確認できる. 図 3 は SN 比に対する自乗平均推定誤差を表している. 非ゼロタップ検出を行わない WLC 法と違い, 提案法は十分に低く推定誤差を抑えることができることが確認できる. さらに図 4 は SN 比に対する BER 特性を示している. 興味深いことに提案法は完全に通信路が既知の場合の BER 特性と一致していることが確認できる.

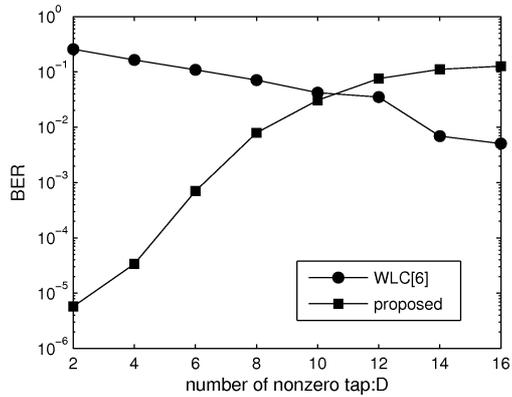


図 2 非ゼロタップ数の影響.

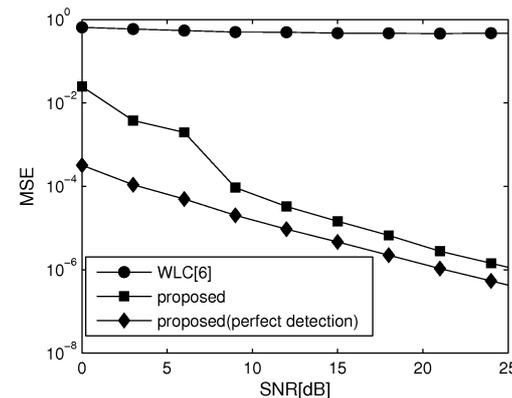


図 3 SNR に対する自乗平均推定誤差特性.

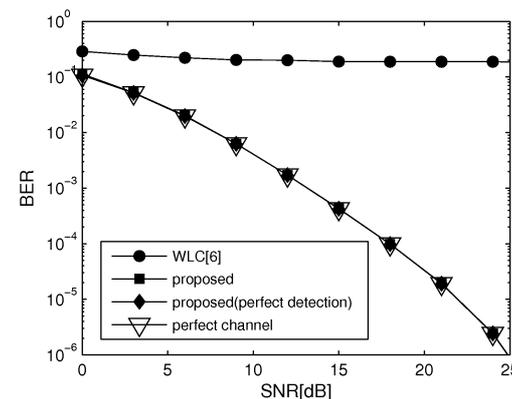


図 4 SNR に対するビット誤り率特性.

(2) シングルキャリアシステムにおけるスパース通信路のブラインド推定法の提案と評価:

シングルキャリアシステムにおけるスパース通信路の新しいブラインド推定法を提案した. 提案する通信路推定法は, 図 1 に示したように, 非ゼロタップの位置を検出した

後, その結果を利用して非ゼロタップ係数のみをブラインド推定により求めるものである.

提案する非ゼロタップの検出は, 線形予測の原理に基づいてタップ係数の大きさを推定する. 予測誤差は

$$e_k^{(d)} = \mathbf{b}^H \mathbf{r}_k - \mathbf{g}^{(d)H} \tilde{\mathbf{r}}_{k-d}$$

と表され, これの自乗平均,

$$J^{(d)}(\mathbf{g}) = E \left[|e_k^{(d)}|^2 \right]$$

の最小値より, 次の式に従ってタップ係数の大きさを推定できる.

$$|h_{d-1}[p]|^2 = \frac{J_{p,\min}^{(d)} - J_{p,\min}^{(d-1)}}{\sigma_u^2}$$

この検出した結果をしきい値と比較して非ゼロタップを決定する.

決定論的なブラインド通信路推定法として Cross Relation (CR) 法が知られている. 非ゼロタップ検出結果と CR 法を組み合わせることを検討した. 基本的なアイデアは, 非ゼロタップ係数についてのみ CR 法により推定を行うものである.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{R}_0(M') & -\mathbf{R}_1(M') \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{h}'[1] \\ \mathbf{h}'[0] \end{bmatrix} = \mathbf{0}.$$

提案法は推定すべきタップ数を大幅に削減できるため, 少ないデータ数で推定精度の向上が期待できる.

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. チャネルの最大次数は 20, 通信路推定の結果を用いた MMSE 等化器により受信等化を行う. 受信アンテナが 2 の SIMO システムを考えた.

図 5 は非ゼロタップ数のビット誤り率 (BER) への影響を表している. スパース性が強い場合に, 従来の CR 法に比べて BER が大幅に低くできることがわかる. 図 6 は SN 比に対する自乗平均推定誤差を表している. 非ゼロタップ検出を行わない CR 法に比べて, 提案法は推定誤差を小さくすることができる. 図 7 は SN 比に対する BER 特性を示している. 特に高 SN 比において, 従来の CR 法を用いた場合に比べて, 提案法の BER 特性が優れていることが確認できる.

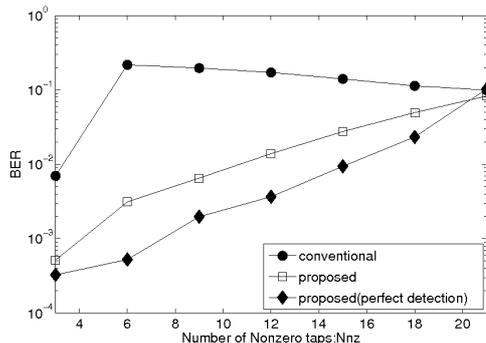


図 5 非ゼロタップ数の影響.

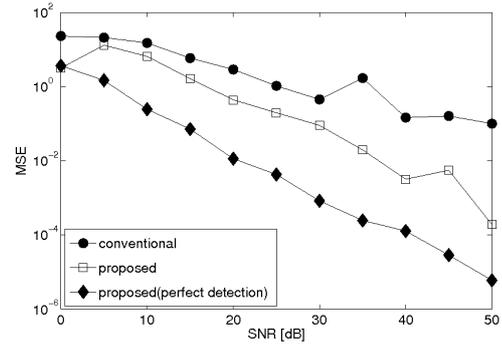


図 6 平均自乗推定誤差と SNR の関係.

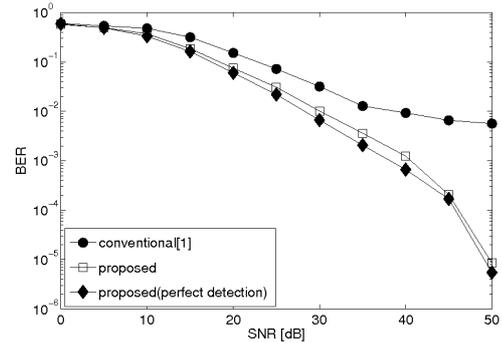


図 7 SNR に対するビット誤り率特性.

(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:

高速な移動を伴う移動通信システムでは, OFDM シンボル内で通信路が変動するため, 正確な通信路推定が困難となる. 本研究では, チャネルのスパース性を考慮した基底展開によるモデル化に基づくチャネル推定法を提案した.

時変通信路を Discrete Prolate Spheroidal-Basis Expansion Model (BEM) によって表現する. このとき, 受信信号は次式のように表すことができる.

$$\mathbf{y}_m = \sum_{q=0}^{Q-1} \mathbf{A}_{m,q} \mathbf{c}_q + \mathbf{z}_m$$

ここで \mathbf{c}_q は q 番目の BEM 係数であり, 通信路推定の目的は \mathbf{c}_q の推定問題となる.

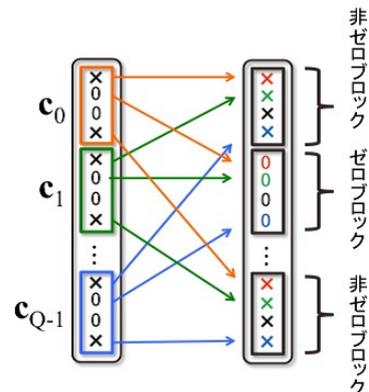


図 8 ブロックスパースチャネル化.

ここで \mathbf{c}_q を図 8 のように並び替え、これを改めて \mathbf{d} と置くと、受信信号は次式のように書けて、 \mathbf{d} を推定する問題となる。

$$\mathbf{y}_m = \mathbf{B}_m \mathbf{d} + \mathbf{z}_m.$$

ここで \mathbf{d} はブロックスパースの形となっていることに注意されたい。これによって、既存のブロックスパース推定アルゴリズムを利用することで通信路の推定が可能となる。

計算機シミュレーションにより提案法の性能評価を行った。サブキャリア数 256、通信路のパス数 60、非ゼロタップ数 6、ユーザの移動速度 300km/h、基底関数数 3 とした。ある一つのパイロット信号を含む OFDM シンボルを用いて前後 2 シンボルに渡って通信路を推定した。ブロック OMP アルゴリズムを用いた。

図 9 に平均自乗誤差特性を示す。提案法では極端にひどい推定結果をもたらす現象が起こるので、この種のアウトライアは誤り検出符号の利用等によって容易に推定できると考えて取り除いた。従来の最小自乗推定よりも約 20dB の改善が得られ、ブロック化を考慮しない OMP アルゴリズムよりも 10dB の改善が確認できる。

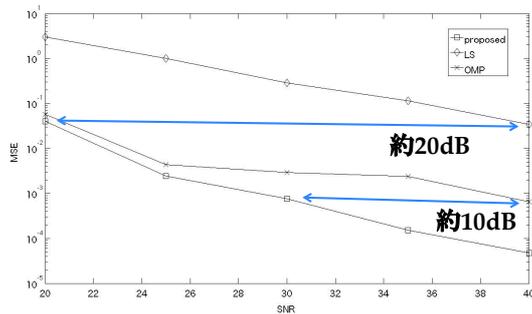


図 9 平均自乗誤差特性.

(4) 少数のパイロットが利用可能な場合への拡張:

実際の通信システムではパイロット信号が利用できることが多い。しかし多くのパイロット信号は周波数利用効率低下の観点から望ましくない。そこで、少数のパイロット信号とブラインド処理を組み合わせたセミブラインド通信路推定法を提案した。

OFDM におけるブラインド通信路推定法として Wang らの方法が知られている。

$$\mathbf{V}_n \mathbf{h} = \mathbf{0}.$$

ここで \mathbf{V}_n は受信信号から作られる行列である。一方、パイロット信号が利用できる場合、次のような推定方法を考えることができる。

$$\mathbf{S}_n \mathbf{h} = \mathbf{y}_n.$$

ここで \mathbf{S}_n はパイロット信号から作られる行列である。これらを組み合わせて次のような

セミブラインド通信路推定問題を構成する。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{S}_n \\ \mathbf{V}_n \end{bmatrix} \mathbf{h} = \begin{bmatrix} \mathbf{y}_n \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}.$$

さらに通信路がスパースであることを考慮してこれを OMP アルゴリズムで解くことを提案する。

計算機シミュレーションにより提案手法の動作を確認した。サブキャリア数 64、通信路のインパルス応答長 14、非ゼロタップ数 3、パイロット信号数 3、ブラインド推定に用いる信号数 16 とした。

推定誤差の自乗平均が 10^{-5} 以下になった場合を推定成功と定義し、試行回数 1000 回のうち推定成功した回数をカウントした。その結果、従来の最小自乗法の場合は 0 回、従来のブラインド推定法の場合は 0 回、提案法は 400 回以上となり、提案法の有効性が確認できた。

(5) 国内外における位置づけとインパクトおよび今後の展望:

上述の (1) の成果は雑誌論文の①と学会発表の⑤、(2) は学会発表の②、③、④、(3) は学会発表の①にまとめられている。(4) の成果は学会では今後発表予定である。

これまでに発表されているスパース通信路推定法の多くは、パイロット信号を利用したものである。本研究で提案した手法は (3) を除いて、パイロット信号を必要としないものであり、独自性のあるアプローチである。また、(4) のセミブラインドアプローチは我々の知る限り類似の研究は無い。

また従来のパラメータ推定法は、L1 ノルムの最小化により直接通信路を推定するアプローチがほとんどである。本研究で提案した (1) と (2) は非ゼロタップ検出によるアプローチはほとんど見かけない。特にブラインド手法によるものはこれまでに無い。

今後は、時変通信路の推定が挑戦しがいのある問題であると考えている。少数のパイロットを利用するセミブラインド手法によって、効率良く推定できるのではないかと考えており、これについて今後も研究を進めて行く予定である。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 7 件)

①上野貴弘, 宮嶋照行, “OFDM におけるスパース通信路推定のためのブラインド非ゼロタップ検出法,” 電子情報通信学会論文誌 B, vol. J95-B, no. 7, pp. 898-906, Jul. 2012, 査読有。

[学会発表] (計 15 件)

①石川大地, 宮嶋照行, “OFDM システムにおける両選択性スパースチャネル推定の検討,” 電子情報通信学会総合大会, A-5-20,

Mar. 2014, 新潟大学.

②西澤祐貴, 宮嶋照行, “シングルキャリア通信におけるスパース通信路推定の検討,” 電子情報通信学会技術研究報告, WBS2012-71, Mar. 2013, 関西学院大学.

③西澤祐貴, 宮嶋照行, “シングルキャリアスパースチャネルにおける非ゼロタップ検出法の提案,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会, A-5-10, Sep. 2012, 富山大学.

④西澤祐貴, 宮嶋照行, “非ゼロタップ検出に基づくブラインド通信路推定,” 電子情報通信学会東京支部学生会研究発表会, Mar. 2012, 東海大学.

⑤Takahiro Ueno and Teruyuki Miyajima, “Blind Sparse Channel Estimation with Nonzero Tap Detection for OFDM Systems,” Proc. Int Workshop on Smart Info-Media Systems in Asia (SISA2011), pp. 182-187, Oct. 31-Nov. 2, 2011, 長崎ブリックホール.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

宮嶋 照行 (MIYAJIMA TERUYUKI)

茨城大学・工学部・准教授

研究者番号 : 00261743