

MIMO 通信路における Wrapped 時空間符号の復号法の改良について

知識情報処理研究

3603R007-7 大澤雅之

指 導 松嶋敏泰教授

On the Improved Decoding Methods of Wrapped Space-time Codes in MIMO Channels

by Masayuki Osawa

1 はじめに

無線通信においては、電力・周波数資源の厳しい制約から、少ない電力・周波数で伝送レートが高く、かつ誤りの少ない伝送システムが必要不可欠である。従来、信頼性の高い無線通信を目指すうえで、電波のマルチパスにより生じる、送受信波間の振幅・位相の大幅なずれをもたらすフェージング現象が常に障害となってきた。しかし、近年の情報理論的考察により、無線通信において複数の送受信アンテナを用いることでこのフェージング現象を利用することが可能であることが分かってきた。特に、直接波が届かないレイリーフェージング環境においては、送受信アンテナ数が同数のとき、通信路容量が漸近的に送受信アンテナ数に比例して増加すること [1], BLAST(Bell Labs lAyered Space-Time) と呼ばれる空間フィルタリング方式を用いたときも同様の通信路容量の増加があること [2] などが示された。以下、この送受信アンテナを複数用いた場合の通信路を MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) 通信路と呼ぶ。

この通信路容量の大幅な増大の発見以後、MIMO 通信路における符号化変調技術の研究が盛んになった。複数のアンテナにまたがるトレリス符号化変調技術である時空間トレリス符号はその有力な手法の一つである。しかし、空間ダイバーシティ(2.2 節参照) と呼ばれる符号の性能を示す重要な指標を最大にすると、復号の計算量が送信アンテナ数の指数オーダーになってしまうという問題点が指摘されている [3]。

この問題の解決のための方法として Caire らは Wrapped 時空間符号を提案した [4]。Wrapped 時空間符号とは、送信側では一次元のトレリス符号化変調器出力を空間ダイバーシティが最大となるように階層化し、受信側では空間フィルタリングとトレリス符号のビタビ復号を組み合わせることによって、復号の計算量を送信アンテナ数の多項式オーダーに抑える方法で

ある。Wrapped 時空間符号は復号の計算量を抑えながらもレートロスをも十分に大きく取れるときにはフレーム誤り率が正しく干渉除去が行われた場合にほぼ一致する優れた時空間符号である。しかし、ビット誤り率については、レートロスを十分に大きくとっても、空間フィルタリングの際に誤り伝播を引き起こし、正しく干渉除去が行われた場合に比べて大きく性能が劣化する。

そこで、本研究においては、Wrapped 時空間符号のビット誤り率の劣化に着目し、復号の計算量のオーダーを従来法と同じに保ったまま、ビット誤り率の劣化を低減する 3 つのアルゴリズムを提案する。そして、シミュレーションによってその有効性の検証を行う。

2 準備

2.1 通信路モデル

本研究で扱う通信路は図 1 で表されるような MIMO(レイリーフェージング) 通信路である。なお、送信アンテナ数を n_T 、受信アンテナ数を n_R 、変調信号点集合を χ ($\chi \subseteq \mathbb{C}$, 平均エネルギーは 1) とする。

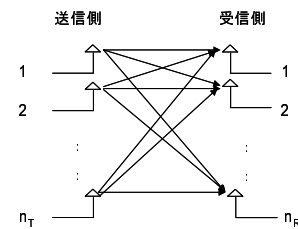


図 1: MIMO 通信路

通信路モデルを以下の式 (1) で定義する。

$$y_t = \sqrt{\gamma} H x_t + z_t. \quad (1)$$

ここで、 γ は実数スカラー、 H は複素数を要素に持つベクトルあるいは行列であり、 x_t は時刻 t における各

送信アンテナからの送信信号のベクトル ($x_t \in \mathbb{C}^{n_T}$), y_t は時刻 t における各受信アンテナの受信信号のベクトル ($y_t \in \mathbb{C}^{n_R}$), z_t は時刻 t における各受信アンテナの雑音のベクトル ($z_t \in \mathbb{C}^{n_R}$), H は通信路行列 ($H \in \mathbb{C}^{n_R \times n_T}$), γ は送信アンテナ側の平均 SNR である. ここで, H, z_t ともに各成分各次元 (つまり実部と虚部) が独立に $\mathcal{N}(0, 1/2)$ に従いランダムに生成される. また, H はフレーム長を κ としたフレーム内で一定かつフレーム毎に独立に生成されるとする (この仮定は無線 LAN などの固定無線通信を想定した場合に適している). また, H は送信側には未知, 受信側には既知であるとする. これは, 既知信号送信により H を推定することを前提としたモデルであり, MIMO 通信路研究における重要なモデルの 1 つである.

2.2 時空間トレリス符号 [3]

時空間トレリス符号とは, 送信信号ベクトルを集めた行列 (以下, 送信信号行列と呼ぶ) $\mathbf{X} = \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & \dots & x_{\kappa} \end{pmatrix}$ を符号化率 $R = k/n_T$ のトレリス符号化変調によって構成する方法である. つまり, 各 x_t がトレリス符号化変調器の状態の 1 遷移による出力で構成される. 復号側では, $\|y_t - \sqrt{\gamma}H\hat{x}_t\|^2$ をブランチメトリックとするビタビ復号を行うことで最尤復号が可能である. ここで, $\hat{x}_t$ は時刻 t における各トレリスパスの符号化変調器出力である.

また, MIMO 通信路における最尤復号においては, 取り得る送信信号行列の集合を $\mathcal{M}$ としたとき, すべての送信信号行列の組み合わせ $\mathbf{X}_a, \mathbf{X}_b$ ($\mathbf{X}_a, \mathbf{X}_b \in \mathcal{M}, \mathbf{X}_a \neq \mathbf{X}_b$) についての $D_{a,b} = \mathbf{X}_a - \mathbf{X}_b$ の階数の最小値 ζ が漸近的な SNR における誤り率カーブの傾きを決定する重要な指標であることが知られている (以下, この指標を空間ダイバーシティと呼ぶ).

時空間トレリス符号のトレリスの状態数は $2^{R(\zeta-1)}$ 以上となることが知られており, $\zeta = n_T$ の符号を構成しようとする, ビタビ復号の複雑さは送信アンテナ数 n_T について指数的に増加するという問題がある.

2.3 空間フィルタリング

MIMO 通信路における符号化を想定しない送信信号推定法として広く知られているものの一つに, 受信側で, 空間フィルタリングを施す方法がある. 以下, 概要を簡単に述べる.

まず, x_t の各要素が干渉し, 更にノイズが加わってできた y_t から x_t の第 j 要素 $x_{j,t}$ を分離するために線

形フィルタ $w_j (w_j \in \mathbb{C}^{n_R})$ を用いて $v_{j,t} = w_j^\dagger y_t$ を計算する ($\dagger$ は複素共役転置). その後, この $v_{j,t}$ を硬判定することで推定値 $\hat{x}_{j,t}$ を得る. 結局, この操作は式 (1) の通信路を SNR が異なる n_T 個の平行な 1 次元の通信路に変換する操作となっている. ここで, 代表的なフィルタバンク $W = \begin{pmatrix} w_1 & w_2 & \dots & w_{n_T} \end{pmatrix}$ には他の信号の干渉成分を完全に消し去り, $y_t - Hx_t$ のノルムを最小にする zero-forcing 基準のフィルタバンク (W を H のムーア・ペンローゼ一般逆行列とする), 他の信号の干渉成分を完全に消し去るのではなく, SINR = 復号信号電力 / (他の信号の干渉成分電力 + 雑音成分電力) を最大にする MMSE 基準のフィルタバンクがある.

また, 推定特性向上の為に干渉除去を組み合わせる BLAST と呼ばれるタイプのものも広く知られている [2] [5]. この場合, x_t の要素すべてを一度に推定するのではなく, $x_{n_T,t}, x_{n_T-1,t}, \dots, x_{1,t}$ の順に 1 つずつ推定する (推定順序の最適化によるパフォーマンスの向上も知られている [5] が, 本研究では扱わない). そして, $x_{j,t}$ の推定の際には, それ以前に推定された $\hat{x}_{n_T,t}, \hat{x}_{n_T-1,t}, \dots, \hat{x}_{j+1,t}$ を用いて $y_t - \sum_{k=j+1}^{n_T} h_k \hat{x}_{k,t}$ で干渉除去を行い通信路行列を $H \rightarrow H^{(j)} = \begin{pmatrix} h_1 & h_2 & \dots & h_j \end{pmatrix}$ と置き換えてフィルタを設計する. ここで, h_k は H の第 k 列である. この判定帰還式推定法の良さは通信路容量の増大として情報理論的に示すことが可能である (相互情報量のチェーンルール) [2] [6] が, 実用上は $\hat{x}_{n_T,t}, \hat{x}_{n_T-1,t}, \dots, \hat{x}_{j+1,t}$ が誤っていた場合に次段に雑音増幅をもたらす誤り伝播が問題となる.

3 Wrapped 時空間符号 [4]

Wrapped 時空間符号は 1 次元のトレリス符号化変調器出力を図 2 のような順で斜めに階層化して送信信号行列 $\mathbf{X}$ を構成するものである. また, d はアンテナ間の信号送信開始時刻をどれだけずらすかを表すパラメータである. このように信号送信開始時刻をずらして階層化すると, 空間ダイバーシティ $\zeta = n_T$ とすることが容易であるというメリットがある [7].

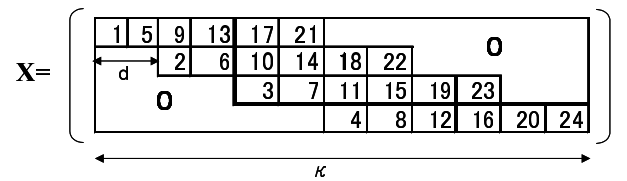


図 2: Wrapped 時空間符号の送信信号行列の例

しかし、このように斜めに階層化されていることから、直接ビタビ復号を適用して最尤復号することはできず、次のアルゴリズムで復号する。

1. フィルタバンク $W (W \in \mathbb{C}^{n_R \times n_T})$ より $v_t = W^\dagger y_t$ を得る。ここで、 W は BLAST タイプの空間フィルタリングにおけるフィルタバンクである。
2. ビタビ復号の生き残りパスごとに、その系列を実現値とみなして以下で干渉除去する。

$$r_l = v_{j,t} - \sqrt{\gamma} \sum_{k=j+1}^{n_T} b_{j,k} \hat{x}_{k,t}. \quad (2)$$

ここで、 $b_{j,k}$ は $B = W^\dagger H$ の (j, k) 要素である。また、 l は、 $x_{j,t}$ に対応するトレリス符号化変調器出力シンボルの番号である。

3. r_l を用いてビタビ復号のパスを更新していく。

結局、Wrapped 時空間符号の復号アルゴリズムは、BLAST タイプの空間フィルタリングの中に誤り訂正符号の復号を組み込んだものと解釈される。空間フィルタリングと誤り訂正符号の復号を組み合わせただものとしては他に、Threaded アーキテクチャ [8]、符号化 V-BLAST [4] などが知られているが、それらと比べて Wrapped 時空間符号は計算量とフレーム誤り率の良いトレードオフを実現していることが知られている。

また、このアルゴリズムのステップ 2 が Wrapped 時空間符号の特徴的な部分であり、Per-Survivor Processing と呼ばれている。この方法を用いることにより、トレースバック型のビタビ復号を用いる方法 [6] に比べて図 2 の d を小さい値に抑えることが可能、すなわち、レートロス小さく抑えられるという利点がある。

また、この復号アルゴリズムは、図 2 の d を十分大きくすれば、正しく干渉除去が行われた場合とほぼ同じフレーム誤り率を、 ζ の値によらない、送信アンテナ数の多項式オーダーの計算量で達成できる。しかし、ビット誤り率については誤り伝播の影響を受けるために、レートロスを十分大きくとっても正しく干渉除去が行われた場合に比べて大きな劣化がある。

4 復号法の改良案

上述のように、Wrapped 時空間符号は様々な利点を持つ優れた時空間符号であるが、ビット誤り率については誤り伝播の影響を受け、正しく干渉除去が行われた場合に比べて大きく特性が劣化する。そこで、このビット誤り率を向上させる 3 つのアルゴリズムを提案

する。

4.1 提案アルゴリズム 1

提案アルゴリズム 1 として、誤り伝播を低減することを目標に、その時点までに得られたトレリスのメトリック情報を基にした Max-Log-Map アルゴリズム [9] による各シンボルの事後確率情報を利用し、事後確率がある閾値を超えるシンボルのみ干渉除去を行う方法を提案する (閾値は SNR ごとに最適な値をあらかじめ求めておく)。Max-Log-Map アルゴリズムを用いるのは、ビタビ復号のメトリック計算を生かし、計算量を大幅に増やすことがないようにするためである。

4.2 提案アルゴリズム 2

提案アルゴリズム 2 として、符号トレリスの双方向から従来の復号法同様に、生き残りパスごとに干渉除去をしながらビタビ復号のパスを更新していく方法を提案する。このとき、各時点において、前からのパスと後ろからのパスで異なったブランチメトリックが得られてしまう。その場合、各トレリスブランチにおいて両方のブランチメトリックに対するパスメトリックを求め、信頼度が最も高いブランチを選択することとする。このアルゴリズムは干渉除去・空間フィルタリングの部分を除けば、Max-Log-Map アルゴリズム [9] を符号全体に対して適用していると解釈できる。

4.3 提案アルゴリズム 3

提案アルゴリズム 3 として、ビタビ復号の生き残りパスを各時点各状態について 2 本ずつ残しておく方法を提案する。ビタビアルゴリズムは各時点各状態において、1 本の生き残りパスを残しておくアルゴリズムである。一次元の符号の場合はこれによって最尤復号が達成される。しかしながら、Wrapped 時空間符号においては最尤性は保証されない。これは、干渉除去・空間フィルタリングの過程において、パスメトリックの逆転が起こり得るからである。そこで、最尤復号を達成するには各時点で全てのパスを残しておかなければならない。そうすると、計算量は送信信号数の指数オーダーとなってしまう。そこで、従来の復号アルゴリズムの計算量のオーダーを保ったままで最尤復号に近づけるために、生き残りパスを各時点各状態について 2 本ずつ残しておく方法を提案アルゴリズム 3 とする。このアルゴリズムは一次元のビタビ復号に置いて知られているリスト復号 [10] の考え方を応用しているもの

であるとも考えられる。

5 シミュレーション

3, 4 章で述べた復号法を以下の条件でシミュレーションにより評価した。

- $n_T = n_R = 4$
- $(5, 7)_8$ 畳込み符号を用いる ($d = 1$)
- MMSE 基準の空間フィルタリングを用いる
- QPSK 変調 (gray ラベリング)
- 1 フレームは 128 ビット

このとき、シミュレーション結果は以下の図 3 のようになった。ここで、Genie はコンピュータの操作により干渉除去を常に正しく行わせた場合 (理想的な場合) である。

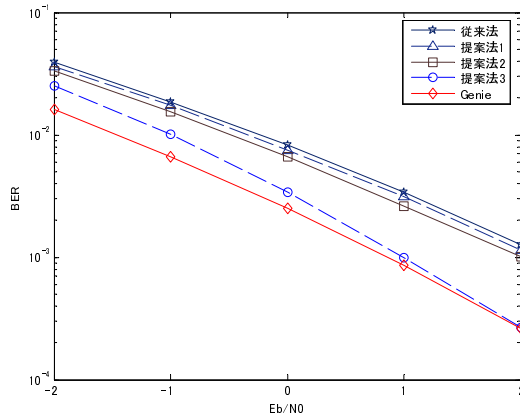


図 3: シミュレーション結果

6 考察

シミュレーション結果より、3つのアルゴリズムは従来法よりビット誤り率を改善することが分かった。特に提案アルゴリズム3は、ビット誤り率の改善効果が非常に大きいことが分かる。提案アルゴリズム3は、各状態・各時点に2本の生き残りパスを保持することによって、より X の各列内の相関を有効利用できていることが分かる。また、提案アルゴリズム1, 2は提案アルゴリズム3よりかなり性能が悪い。提案アルゴリズム1は事後確率計算が近似であることが影響していると考えられる。また、提案アルゴリズム2は後ろの時点の符号構造による相関を利用している、つまり、より多くの相関を用いているのであるが、誤り伝播を

防ぐ構造にはなっていない。言い換えると、双方向のビタビ復号のそれぞれの誤り伝播を受ける可能性があるということである。

また、提案アルゴリズム1は、計算量・メモリの増加はわずかであるのに対して、提案アルゴリズム2・3は、計算量・メモリとも従来法の約2倍となることに注意が必要である。

7 まとめ

Wrapped 時空間符号のビット誤り率を改善する3つの復号アルゴリズムを提案し、シミュレーションによる評価を行った。その結果、提案アルゴリズム3についてはビット誤り率改善効果が非常に大きい、つまり、非常に有用であることが確認できた。

今後の課題としては、非常に優れた性能を示した提案アルゴリズム3の追加実験 (具体的にはリストサイズと誤り率の関係の調査、その理論解析など) が挙げられる (本論には $E_b/N_0 = -2, -1, 0, 1, 2$ のそれぞれについて、 $d = 1, 2, \dots, 10$ の場合のシミュレーション結果を示してある)。

参考文献

- [1] I. E. Telatar, "Capacity of multi antenna Gaussian channels," *AT&T-Bell Labs Internal Tech. Memo.*, 1995.
- [2] G. J. Foschini, "Layered space-time architecture for wireless communication in a fading environment when using multiple antennas," *Bell Labs Tech. J.*, vol. 1, pp. 41-59, Autumn 1996.
- [3] V. Tarokh, N. Seshadri and A. R. Calderbank, "Space-time codes for high data rate wireless communication: performance criterion and code construction," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 44, pp. 744-765, Mar. 1998.
- [4] G. Caire and G. Colavolpe, "On low-complexity space-time coding for quasi-static channels," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 49, pp. 1400-1416, Jun. 2003.
- [5] G. J. Foschini, G. D. Golden, R. A. Valenzuela and P. W. Wolniansky, "Simplified processing for high spectral efficiency wireless communication employing multi element arrays," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 17, pp. 1841-1852, Nov. 1999.
- [6] A. Matache and R. D. Wesel, "Universal trellis codes for diagonally layered space-time systems," *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 51, pp. 2773-2783, Nov. 2003.
- [7] A. R. Hammons, Jr. and H. El Gamal, "On the theory of space-time codes for PSK modulation," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 46, pp. 524-542, Mar. 2000.
- [8] H. El Gamal and A. R. Hammons, Jr., "A new approach to layered space-time coding and signal processing," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 47, pp. 2321-2334, Sep. 2001.
- [9] J. Hagenauer, E. Offer and L. Papke, "Iterative decoding of binary block and convolutional codes," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 42, pp. 429-445, Mar. 1996.
- [10] T. Hashimoto, "A list-type reduced-constraint generalization of the Viterbi algorithm," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 33, no. 6, pp. 866-876, Nov. 1987.