

環境適応型時空信号処理による大容量動的無線ネットワークの実現に向けた多端末分散協調通信の研究

小池 俊昭 日本学術振興会海外特別研究員 (ハーバード大学ポスドク研究員)

1 はじめに

環境に応じた無線資源の動的割り当てにより周波数利用効率の向上を図る研究が活発である。各々の無線機が賢く環境を認識し適切な通信方式を利用することで様々な効果が期待できる。獲得した環境情報を最大限有効活用するためにはあらゆる信号処理を駆使しなければならないと考える。本研究では複数の分散配置された無線機が協力的動作を行うマルチホップ無線通信ネットワークを想定し、低演算量で高品質な通信を実現する適応信号処理について検討する。高度な信号処理を開発するにあたって三つの異なる課題に注力した。第一の課題は高品質な通信に欠かせない伝搬路推定の高精度化である。次に、協力遅延ダイバーシチの利用を想定した最適受信機の特性に迫る低演算量等化方式の検討である。最後の課題はマルチキャストや双方向マルチホップ通信に有効な物理ネットワーク符号の適応最適化である。本報告では各課題に対する解決策として我々が提案する方式を概説するとともにその意義を明らかにする。

2 最適重みを有する最小二乗伝搬路推定アルゴリズム

独立して移動する無線機から到来する電波はそれぞれ異なった伝搬路応答を有し、固有のドップラ変動を受けるため変動の速度も一様ではない。この場合における最適な伝搬路推定方式はこれまで自明ではなかった。そこで最小二乗法に基づく最適重みを理論的に導出するとともに、低演算量化をねらった逐次アルゴリズムの提案を行う。

実用的な最小二乗伝搬路推定法として、指数重みを持つ RLS (Recursive Least-Squares) アルゴリズムが知られている [1]。指数重みを決定する忘却係数の調整により伝搬路変動に伴う推定誤差をある程度緩和することができる。さらに逆行列演算が不要であるため比較的演算量で実装可能である。しかし忘却係数を適応的に最適化したとしても伝搬路変動が激しい場合には大きな推定誤差を生じる。変動が激しい場合には、伝搬路変動の勾配など高次の情報を同時に推定する方法が有効である [2, 3]。この高次推定法は推定するパラメータの数が倍増するため、変動が緩やかなときには逆に推定精度を劣化させる恐れがある。そのため変動速度などの環境情報を知っていたとしても適切な次数・忘却係数の決定方法が分からなければ通信品質の向上は見込めない。筆者は指数重みに限定しない任意の重み係数を有する最小二乗推定法を取り上げ、伝搬環境に応じて重み係数と次数を最適化する方式を開発する。ここで重要なのは複数の無線機からの伝搬路応答がそれぞれ独自の変動速度・周波数スペクトラムを有するという事実である。任意の伝搬環境に最適化された重み係数・推定次数を導出する必要がある。本研究の意義は次の三点に集約される。

- 複数の分散無線機を想定し、任意の周波数スペクトラムに対する最適な重み係数を導出した。
- 重み係数を最適化できるならば、高次の推定法は推定精度の劣化を招くことを証明した。
- 演算量を低減するために最適重みを逐次的に算出する RLS アルゴリズムを開発した。

周波数スペクトラムが与えられたとき、真の伝搬路応答値と推定値の平均二乗誤差を最小化するために筆者は重み係数に替わる重み行列なるものを定義した。この行列を用いることで、直接重み係数を最適化する場合に煩雑化する理論式を、ラグランジュ法により簡易に導出できることを明らかにした。次に、理論的な最適重み係数を用いた場合、高次推定が不要となる興味深い事実を理論的に証明した。この事実は演算量の面でも実用性を秘めている。図 1 は伝搬路変動速度に対する伝搬路推定の平均二乗誤差を示している。送信機数 4、受信アンテナ数 4 の MIMO システム構成における周波数フラットフェージングを想定している。平均受信電力 0, 20, 40dB のいずれにおいても推定次数の増加が推定誤差の劣化を招くことがわかる。これは重み係数を最適化した場合の結果であり、指数重みを用いる場合は図 2 の通り変動が激しい時に高次推定法が有利である。(OW-RLS は最適重み、EW-RLS は指数重みを持つ RLS アルゴリズムを表す。忘却係数 λ は 0.95 とした。) 当然ながら導出した 0 次の最適重みを持つ推定法があらゆる環境において指数重みの RLS よりも高

精度の推定値を示す．この伝搬路推定の高精度化は通信品質の向上に大きく貢献する．**図 3**に最適受信機を用いた場合の、平均受信電力に対するビット誤り率特性を示す．正規化最大ドップラ周波数が 0.005 である高速な変動環境を想定し、4つの無線機がそれぞれ 16QAM の変調信号を送出していると仮定した．0 次の指数重み推定法は誤り率が極度に高いことが分かる．これに対して 0 次の最適重み推定法は、高次の指数重み推定法に比べて誤り率特性が優れていることが確認できる．

最適重みを直接計算するには逆行列演算が必要であるため、伝搬路推定値をトラッキングする際には演算量が膨大となる．そこで修正コレスキー分解や逆行列定理などを駆使することで、指数重み推定法のような逐次計算を可能にするアルゴリズムを導出した．これにより、直接指数重みを計算する手法よりも演算量を大幅に低減することができる．**図 4**は伝搬路トラッキングに要する乗算回数の例を示している．依然として指数重み高次推定法よりも演算量は高いものの、高精度の推定結果が得られる最適重みを逐次的に導出できることを示した貢献度は大きいと考えられる．本研究に関する詳細は[4, 5]を参照されたい．

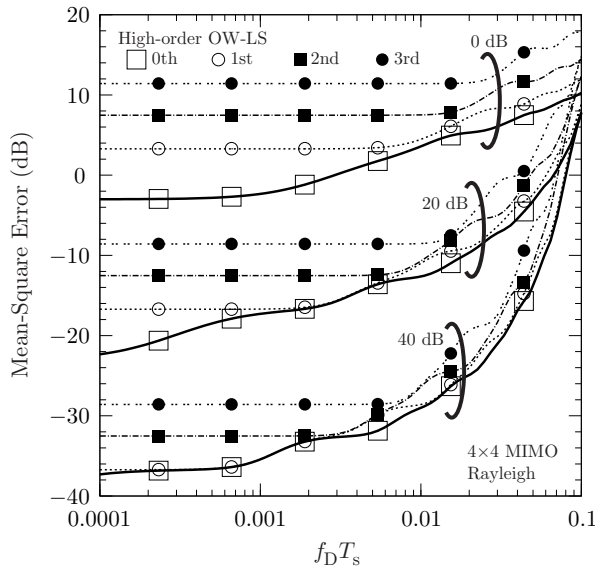


図 1 最適重みを持つ最小二乗伝搬路推定法を用いた場合の最大ドップラ周波数に対する平均二乗誤差特性

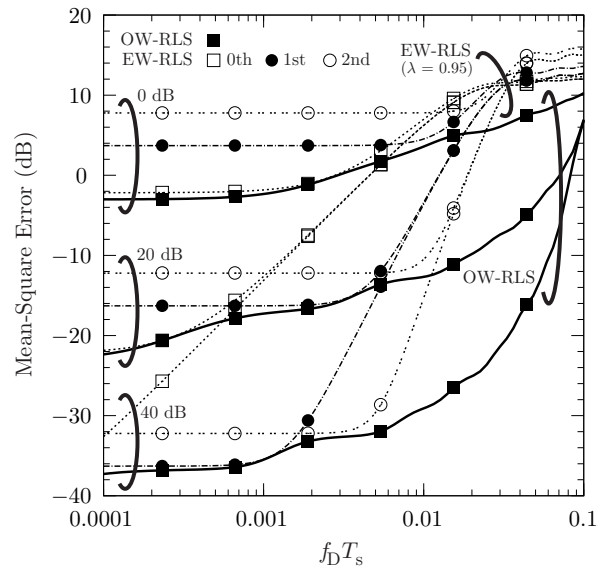


図 2 指数重みと最適重みを持つ最小二乗伝搬路推定法を用いた場合の最大ドップラ周波数に対する平均二乗誤差特性

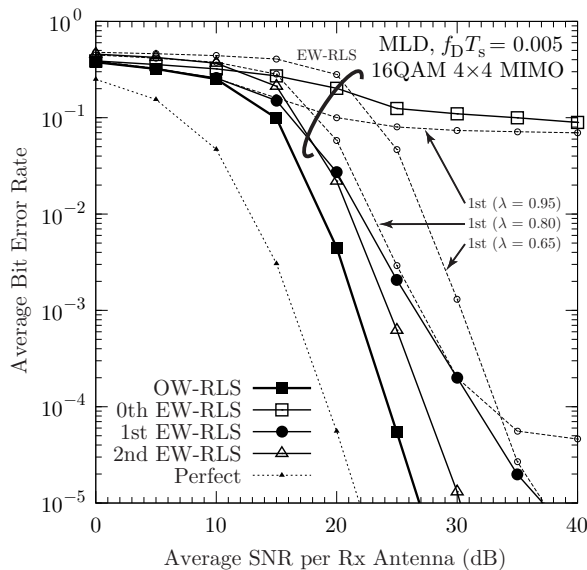


図 3 最適受信機を用いた場合の受信電力に対するビット誤り率特性

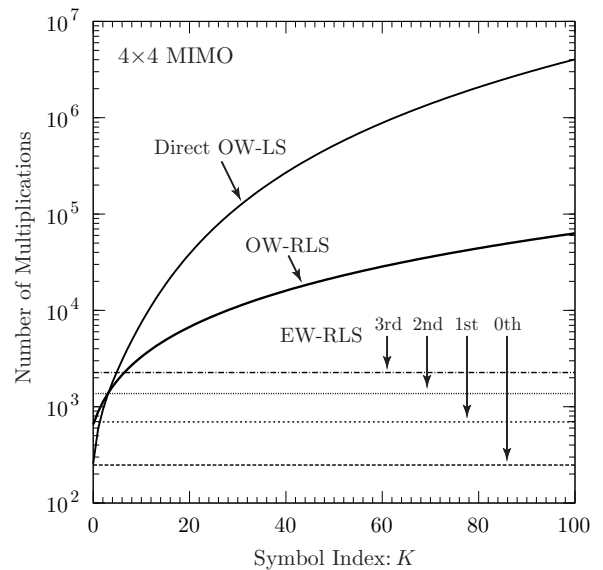


図 4 伝搬路推定トラッキングに要するシンボル位置に対する乗算回数

3 ビット反転処理を行う低演算量周波数領域等化アルゴリズム

伝搬路推定精度がたとえ無視できないほど理想的であったとしても受信アルゴリズムが貧弱であれば高品質な通信は望めない。しかし最適受信機である最尤法は演算に要する探索規模が膨大となるため、しばしば実用化が難しいと考えられてきた。伝搬路推定の結果、数十シンボルから数百シンボルに渡る遅延分散が認められる場合、Viterbi アルゴリズムによる最尤系列推定 (MLSE: Maximum-Likelihood Sequence Estimation) は現実的ではないため、シングルキャリア伝送における広帯域信号の伝送は断念せざるを得ない。そこで筆者は、GHz を超えるような超広帯域信号の伝送を可能にするべく、数百シンボルを超えて到来する遅延波を低演算量で高品質に等化する技術の開発に着手した。MLSE の最適特性に迫る低演算量等化器の実現は、遅延ダイバーシチ送信を行う協力通信ネットワーク [6] においても大きな威力を発揮する。協力遅延ダイバーシチは近傍の無線機が協力して同一の中継情報を独自の送信タイミングにてダイバーシチ送信する方式であるが、協力無線機数の増加は等価的な遅延分散の倍増を招くため優れた等化技術が必須である。これには遅延分散に依らず低演算量で等化を行う周波数領域等化の技術が有力視される。しかし低演算量で知られる MMSE (Minimum Mean-Square Error) に基づく周波数領域線形等化は MLSE に比べると大きな特性劣化が見られる。本研究では周波数領域線形等化と同程度の演算量でありながら MLSE に迫る優れた特性が得られる等化方式を提案する。本研究の主な業績は次の三つである。

- 最尤法における探索空間の解析を行い、局所的最適解の存在確率がダイバーシチ次数の増大に伴って指数関数的に減少することを理論的に示した。
- 周波数領域等化の解を局所最適解に導く山登り法を導入し、FFT (Fast Fourier Transform) を除いて乗算回路を必要としないビット反転処理による低演算量等化アルゴリズムを提案した。
- 提案アルゴリズムが MLSE に迫る優れた等化特性を有し、多値変調においても有効であることを示した。

最尤受信機は QR 分解などに基づく SD (Sphere Decoding) アルゴリズム [7, 8] の登場により実現性が飛躍的に高まった。しかし数百シンボルにおよぶ MLSE の系列等化を行うにはまだ多くの課題が残っている。さらに SD 方式は複雑な演算回路を要する行列分解を用いるため必ずしも実用向きではない。そもそも最尤法の演算量の大きさは探索空間の大きさにある。そこで筆者はこれまでに最尤法の探索空間を解析し、ダイバーシチ次数の大きさに伴って、探索空間内の局所的最適解が減少することを明らかにした [9, 10]。図 5 に示すように、探索空間には大域的最適解の他に局所的な最適解が存在しうる。もしも局所解の存在頻度が低ければ局所解探索を行う低演算量アルゴリズムを用いることで実質上特性劣化の見られない等化方式を開発することが可能である。本研究では文献 [9, 10] のシミュレーションに基づく解析結果を裏付ける理論式を導出した。伝搬路応答が統計的に相関を持たない場合、瞬時応答の自己相関行列が Wishart 分布に従うことを利用して、図 6 に示すように局所最適解の存在率がダイバーシチ次数の増大とともに指数関数的に減少することを立証した。

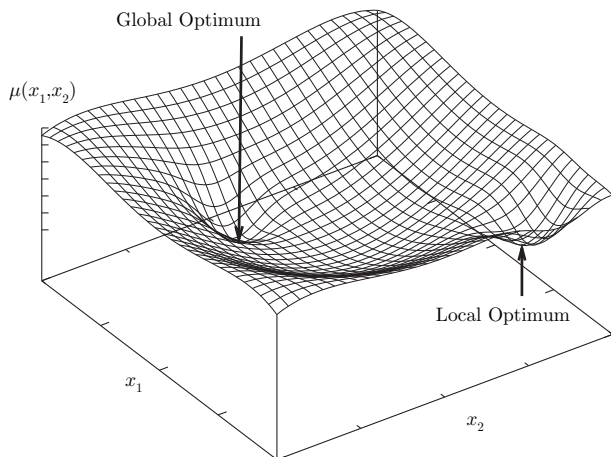


図 5 最尤法の探索空間内におけるユークリッド距離メトリックの様子

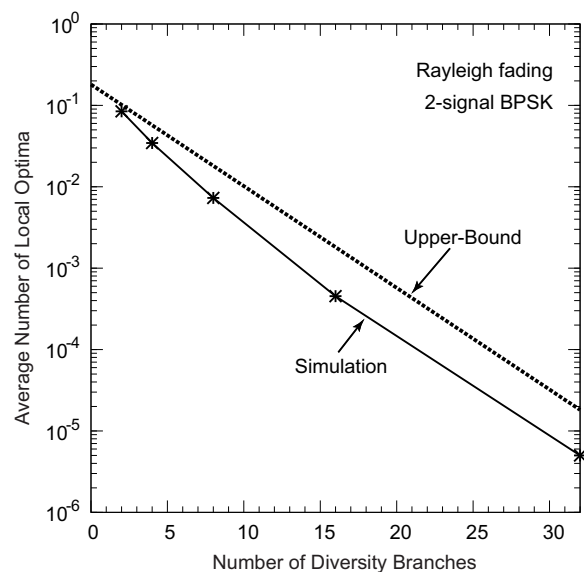


図 6 ダイバーシチ次数に対する局所最適解の平均存在率

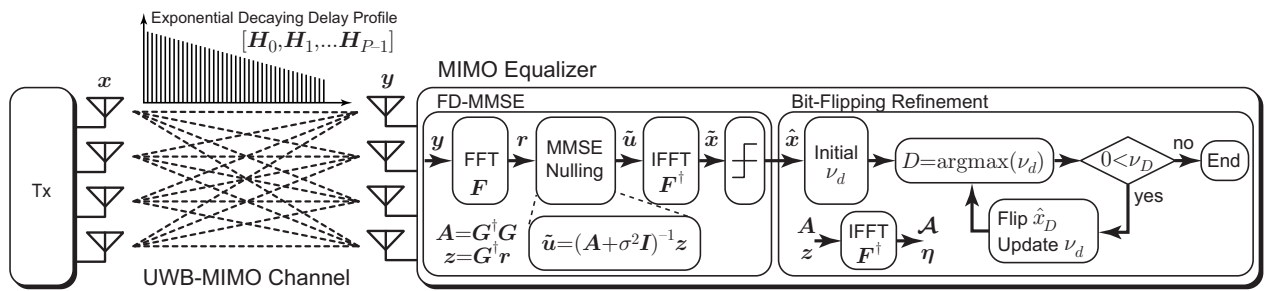


図 7 MIMO システム構成における提案ビット反転周波数領域等化器のブロック図

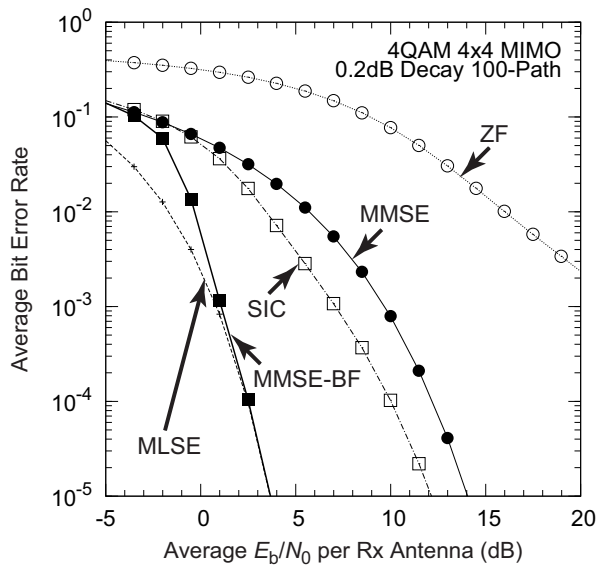


図 8 QPSK 変調における平均受信電力対ビット誤り率特性

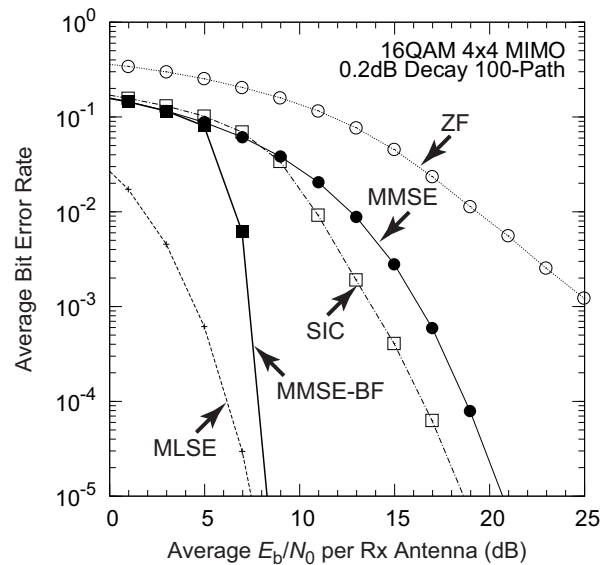


図 9 16QAM 変調における平均受信電力対ビット誤り率特性

遅延分散が大きければ、自然と大きいダイバーシチ次数を期待することができる。筆者は探索空間の解析結果に基づいて低演算量で MLSE に近づく等化アルゴリズムをいくつか提案してきた [9, 10]。本研究はこれらをさらに発展させたビット反転操作を繰り返す山登り法に基づく等化手法を新たに開発した [11]。本方式は周波数領域等化における一時解の中で尤度を最大化するビットを随時反転させることで局所解へと導くアルゴリズムである。ビット反転に伴う演算は全て加算回路により実行でき、平均ビット反転回数は極めて少ないため周波数領域線形等化と同等の演算量で実現可能である。送信ブロック毎に一度だけ FFT 処理が必要になるのみであり、実装も極めて容易である。

図 7 には分散無線機を一つの送信端末と見立てた場合の MIMO システム構成における提案受信アルゴリズムのブロック図を表している。送信アンテナ数 4、受信アンテナ数 4 において 100 パスに及ぶ指数減衰遅延分散を有する場合の誤り率特性を図 8 および図 9 に示す。それぞれ送信信号を QPSK, 16QAM とした際のシミュレーション結果である。ここで、伝搬路推定は理想的であると仮定し、遅延波は 1 シンボル遅延毎に 0.2dB 減衰するレイリーフェージングに従う。送信ブロック長を 1024 シンボル、サイクリックプレフィックス長を 128 シンボルとした。図中 ZF, MMSE, SIC, MMSE-BF はそれぞれ周波数領域 ZF 線形等化、周波数領域 MMSE 線形等化、順序付きシリアル干渉キャンセラ、提案ビット反転アルゴリズムを示す。これらの図より、提案方式が他の等化アルゴリズムに比べて圧倒的に優れ、MLSE に迫る特性が得られていることが確認できる。提案方式が周波数領域線形等化と同等の低演算量を有する一方で、このときの MLSE におけるトレリス状態数は天文学的数字となるため最適受信機の導入は実用的ではない。通常の等化器、中でも MLSE などの時間領域系列等化では遅延分散に伴う演算量の増大が大きな課題であるが、本方式では遅延分散を逆に演算量削減の方策に利用している点において高い独自性が認められる。本研究に関する詳細は [11] を参照されたい。

4 伝搬路に応じて中継データ圧縮混合を行う物理ネットワーク符号

マルチホップ無線ネットワークにおいて発呼要求をする多くの端末が存在すれば、ネットワークには同時に多数のルートが構築される。ある特定の無線リンクに容量以上の使用ルートが集中すれば、周波数利用効率の大幅な劣化を招く可能性がある。通常の packets 中継ではそれぞれの packets は独立に処理され、それぞれ異なる無線資源を割り当てられて順次中継される。一方、バッファに蓄えられた複数の packets や過去に送信した packets などを何らかの方法で一括して中継処理する場合にはどのような利得が得られるだろうか。文献[12]では各中継点において理想的な符号化処理を施せば最大のネットワーク情報流量を達成できることが理論的に証明されている。このような中継処理はネットワーク符号と称され、無線ネットワークに適用されるなど活発な議論が続いている [13-16]。特に図 10 のような双方向中継において、ネットワーク符号は周波数資源の大幅な改善を実現できる。

双方向中継においては、中継器 R を通じて無線機 A と B がそれぞれ固有の packets を交換する。通常のプロトコルでは、無線機 A の packets を A から R, R から B へ送り、無線機 B の packets を B から R, R から A へ送るという 4 つの無線資源を要する。ネットワーク符号を用いる最も簡素なプロトコルでは、まず無線機 A の packets を A から R へ、次に無線機 B の packets を B から R へ送り、最後に中継器 R において両 packets の XOR (排他的論理和) を施した圧縮混合 packets を A と B へブロードキャストする。無線機 A, B は自分の packets の内容を予め知っているため混合した packets から XOR 操作により相手の内容を獲得することができる。これにより必要な無線資源を 3 つに減らすことができる。

本研究では、無線機 A と無線機 B が各々の packets を同時に中継器 R に多重送信することで無線資源をさらに 2 つに減らしたプロトコルを考える。このプロトコルでは図 10 に示すように無線機 A と B が同時送信する多重送信ステップと、中継器がネットワーク符号化 packets を伝送するブロードキャストステップの 2 ステップがある。このとき、伝搬路状況に応じて中継器 R におけるネットワーク符号をどのように最適化すべきかを明らかにする。本研究の成果は次の三つにまとめられる。

- 誤り率を低減する目的で、ユークリッド距離の分布に基づく適応ネットワーク符号の設計アルゴリズムを開発した。
- QSPK 変調を交換する場合、伝搬路状況によっては XOR に基づく符号化が不適切であり、5 値の圧縮符号が最適となる場合があることを明らかにした。
- 非正規の 5 値データをブロードキャストするために Sphere Packing 法[17]を用いて最適な 5QAM 変調方式を導出した。

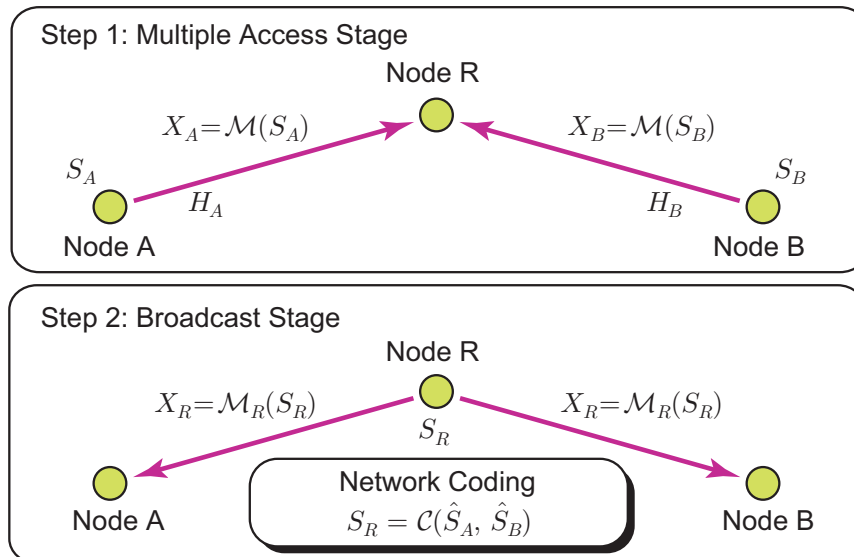


図 10 物理ネットワーク符号を適用した 2 ステップ双方向中継

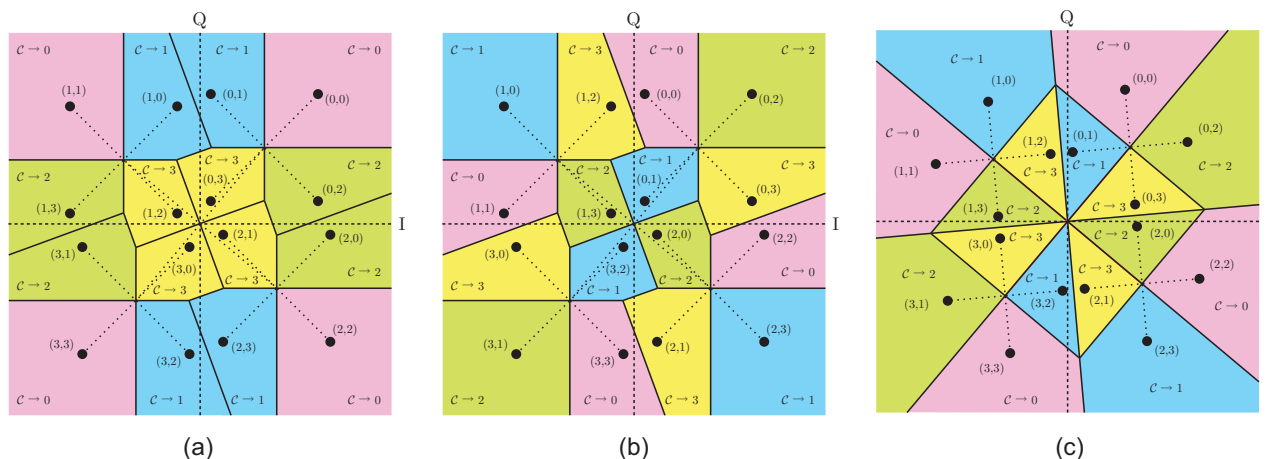


図 11 瞬時伝搬路応答による受信点の変化とネットワーク符号の関係

はじめにネットワーク符号を伝搬路状況に応じて適切に切り替える必要があることを示す. 図 11に QPSK 変調を用いた場合の多重送信ステップにおける中継器 R での受信信号を三つ例示する. (a)は無線機 AR 間の伝搬路応答と BR 間の伝搬路応答が同程度の場合, (b)は各伝搬路応答に約 90 度の位相差がある場合, (c)はおおよそ 45 度の位相差と 2 倍の電力差がある場合である. 図中, 色分けした領域は最尤推定後に XOR によるネットワーク符号を施した場合の同一符号領域を表している (ボロノイ領域により簡略化). 図(a)の伝搬路状況においては近接する最尤領域がいずれも適切に同一符号語に分類されている. 特に (0, 3), (1, 2), (2, 1), (3, 0) の 4 つの領域は密集しており, それぞれ誤る可能性が高いものの, 全て同じ符号語 3 に分類されているため符号化後の誤り率は極めて低くなる. しかし, 伝搬路に位相差が含まれると, 図(b)のように隣接する最尤判定領域がいずれも同一の符号語に分類されなくなる. 特に信号点が密集する (0, 1), (1, 3), (2, 0), (2, 2) では高い確率で誤りが生じることになる. 同様に図(c)でも (0, 1), (1, 2) などの隣接信号点において高い誤り率が生じる.

上述の通り, 中継器 R におけるネットワーク符号は伝搬路状況 (位相差, 振幅比) に応じて適切に設計しなければならない. ここで扱うネットワーク符号はシンボル毎に二つの送信データを圧縮混合して一つのデータを出力するものであるが, その設計はクラスタ生成と同様である. 可能である限り隣接する信号点同士をまとめ, 同一の符号語とすることで誤り率の少ない設計が可能である. 筆者はこのクラスタ原理に基づくネットワーク符号設計アルゴリズムを構築した. その結果, あらゆる伝搬路状況を想定して QPSK 変調を用いた場合, 表 1 に挙げられる合計 10 通りのネットワーク符号を得た. 符号番号 0 は通常の XOR 符号であり, 番号 1 は 90 度位相差に特化した XOR 符号の変形版である. それぞれ符号語は 4 つであるため, QPSK などの 4 値変調を用いてブロードキャストすればよい. しかしながら, 注目すべき事に, 他の 8 つの符号の語数は 5 つであるため, ブロードキャスト時には 5PSK や 5QAM などの非正規な変調方式が必要になる. 5 値のネットワーク符号が必要となるのは図 11(c)のような伝搬環境にある場合である. このような場合, 最隣接信号点である (0, 1), (1, 2) などの組み合わせを全てまとめるような 4 つのクラスタ数を持つネットワーク符号は存在しないことを示している. 4 値の符号よりも圧縮性能の低い 5 値の符号の方が, 信頼性の高い中継が達成できるというこの事実は大変興味深いものである.

設計した 10 通りのネットワーク符号は, 図 12 のような伝搬路状況でそれぞれ適応的に利用される. ここで γ は伝搬路の振幅比, θ は伝搬路の位相差を表す. 45 度などの位相差では 5 値のネットワーク符号が最適であることが分かる.

表 1 最適化設計したネットワーク符号表

	(0, 0)	(0, 1)	(0, 2)	(0, 3)	(1, 0)	(1, 1)	(1, 2)	(1, 3)	(2, 0)	(2, 1)	(2, 2)	(2, 3)	(3, 0)	(3, 1)	(3, 2)	(3, 3)
0	0	1	2	3	1	0	3	2	2	3	0	1	3	2	1	0
1	1	3	0	2	0	2	1	3	3	1	2	0	2	0	3	1
2	0	2	4	1	3	0	2	4	1	3	0	2	4	1	3	0
3	3	2	0	1	0	1	2	4	1	3	4	0	4	0	3	2
4	2	1	0	4	0	4	3	2	3	2	1	0	1	0	4	3
5	2	1	3	0	1	4	0	2	3	0	1	4	0	2	4	3
6	1	4	2	0	4	2	0	3	2	0	3	1	0	3	1	4
7	1	0	2	3	4	2	1	0	0	4	3	1	2	3	0	4
8	4	0	1	2	2	3	4	0	0	1	2	3	3	4	0	1
9	0	3	1	2	2	0	4	1	4	1	0	3	3	4	2	0

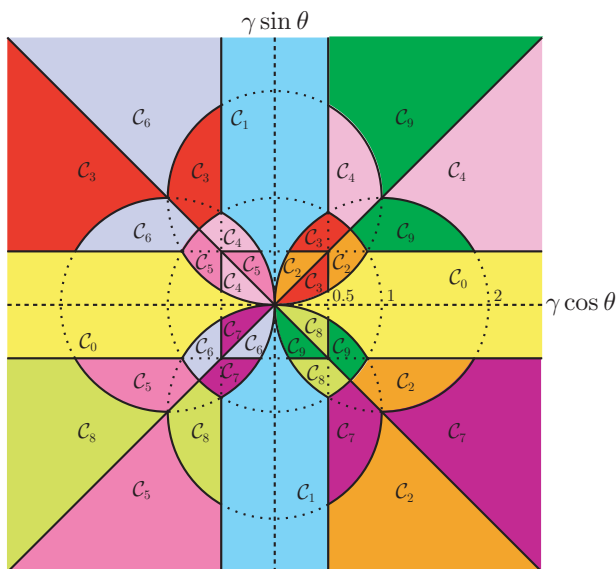


図 12 伝搬路環境に応じて用いるネットワーク符号の最適割り当て

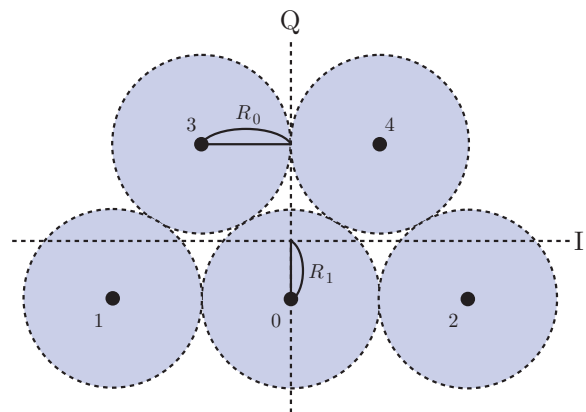


図 13 Sphere Packing 法により最適化した 5QAM 変調

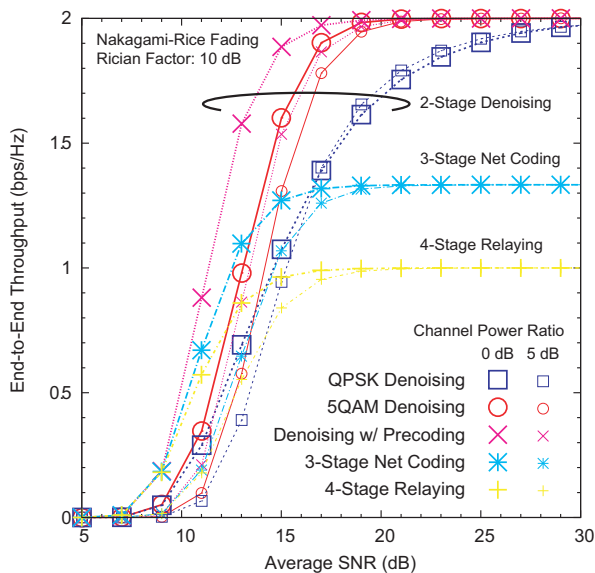


図 14 ライスファクタ 10dB における双方向中継の平均スループット特性

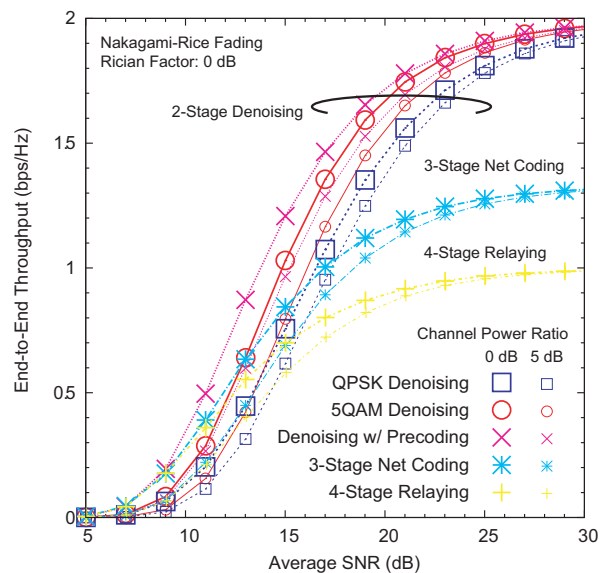


図 15 ライスファクタ 0dB における双方向中継の平均スループット特性

5 値のネットワーク符号を用いる場合、どのような変調方式を用いるべきだろうか。同心円状に信号点を均等配置する 5PSK が最も簡易である。しかし、表 1 にある 5 値の最適符号はいずれも符号語 0 の頻度が他の符号語よりも高い不均一なデータである。筆者はこれを考慮に入れた上で Sphere Packing 法[17]に基づき信号点配置を理論的に最適化した。最適化した信号点配置の結果を図 13 に示す。実際の最適な信号点は宛先端末における受信電力に依存するが、無雑音時の最適配置である図 13 を用いても特性劣化は無視できるほど小さい。

ここで、瞬時伝搬路状況に応じて中継器が適応的に最適なネットワーク符号を選択利用する提案方式の効果を示す。図 14 および図 15 に伸上・ライスフェージング伝搬路における双方向中継の平均スループット特性を示す。各図はそれぞれライスファクタ 10dB における比較的強い見通しがある環境とライスファクタ 0dB における比較的弱い見通し環境を想定している。図中ではネットワーク符号を用いない通常の 4 ステッププロトコル、XOR ネットワーク符号を用いる 3 ステッププロトコル、XOR ネットワーク符号を用いる 2 ステッププロトコル、5QAM を含む適応ネットワーク符号を用いた 2 ステッププロトコルと伝搬路の位相差を 0 にする位相同期を行った場合の 2 ステッププロトコルの比較を行っている。時間利用効率が最も高い 2 ステップ

ロトコルは最大スループットが高い。しかし4値のXORネットワーク符号を固定的に用いる場合の特性は総じて芳しくない。これに比べて5値の符号などを適応的に用いる場合の特性は著しい改善が見られる。最小ユークリッド距離は位相差が0の場合に最大となるため、多重送信ステップにおいて無線機AとBが位相制御を高精度に行えるならばさらに良い特性を得ることができ、5値の符号は不要となる。しかし、分散端末間の位相を精度良く長時間同期させることは技術的に困難であるため、提案方式による適応ネットワーク符号の実用的な有効性が失われることはないと考えられる。また、プロトコルにかかわらず見通し外通信環境に近づくほど特性は劣化するが、固定符号の場合と適応符号の場合の利得差が小さくなる。これは信号点距離よりもフェージングによる受信信号の落ち込みの方が特性に大きく影響を与えるためである。本研究に関する詳細な内容は[18]を参照されたい。多値変調を用いる場合や、複数のアンテナを有する場合、周波数選択性フェージング伝搬路の場合、トレリス符号化変調を利用する場合などへの拡張も済み間もなく論文化される予定である。

5 まとめ

本研究は協力動作を行う無線マルチホップ伝送ネットワークにおいて、周囲の環境に応じた適切な時空信号処理を駆使することで低演算量・高品質・大容量のデータ伝送を実現することを目的とした。無数の課題の中から、著者は最適伝搬路推定法・低演算量等化技術・適応ネットワーク符号の三つに注目し、それぞれ興味深い結果と新規性の高い提案アルゴリズムを導き出すことができた。いずれも実用的でありながら詳細な理論的考察・検証を行っている点が特徴である。本報告では獲得済みの環境情報をいかに有効活用するかに関心を当てた。今後はいかにして環境を賢く認識・学習するかに関心を向けたい。

謝辞

本研究は、日本学術振興会 (JSPS)・テレコム先端技術研究支援センター (SCAT)・電気通信普及財団 (TAF) の一部支援によるものであり、あらためて関係者各位に心より感謝いたします。

【参考文献】

- [1] S. Haykin, *Adaptive Filter Theory, Third Edition*, Prentice-Hall, 1996.
- [2] K. Fukawa and H. Suzuki, "Recursive least-squares adaptive algorithm maximum-likelihood sequence estimation with higher-order state variable model of radio channels—Adaptive performance improvement of RLS-MLSE—," *IEICE Trans. Commun.*, vol. J75-B-II, no. 7, pp. 415–423, July 1992.
- [3] D. K. Borah and B. D. Hart, "Frequency selective fading channel estimation with a polynomial time-varying channel model," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 47, no. 6, pp. 862–873, June 1999.
- [4] T. Koike Akino, "Optimum-weighted RLS channel estimation for time-varying fast fading MIMO channels," *IEEE ICC 2007*, Glasgow, Scotland, June 2007.
- [5] T. Koike Akino, "Optimum-weighted RLS channel estimation for rapid fading MIMO channels," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, 2008.
- [6] T. Koike, H. Murata, and S. Yoshida, "Iterative FDE for DD-based cooperative relaying with FD-STBC in quasi-synchronous networks," *IEEE PIMRC 2006*, Helsinki, Finland, Sept. 2006.
- [7] E. Viterbo and J. Boutros, "A universal lattice code decoder for fading channels," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 45, no. 5, pp. 1639–1642, July 1999.
- [8] O. Damen, A. Chkeif, and J.-C. Belfiore, "Lattice code decoder for space-time codes," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 4, no. 5, pp. 161–163, May 2000.
- [9] Y. Nouda, T. Koike, and S. Yoshida, "Iterative MLD equalizer preceded by MIMO-FDE for wideband spatial multiplexing systems," *IEEE VTC-Spring*, vol. 1, pp. 533–537, May–June 2005.
- [10] T. Koike and S. Yoshida, "Approximated ML detector using Hopfield neural network in MIMO spatial multiplexing systems," *WPMC*, Aalborg, Denmark, pp. 858–862, Sept. 2005.
- [11] T. Koike-Akino, "ML search space analysis and bit-flipping equalizer for ultra-wideband MIMO channels," *IEEE GLOBECOM*, Nov.–Dec. 2008.

- [12] R. Ahlswede, N. Cai, S.-Y. R. Li, and R. W. Yeung, "Network information flow," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. IT-46, pp. 1204–1216, 2000.
- [13] Y. Wu, P. A. Chou, and S.-Y. Kung, "Information exchange in wireless networks with network coding and physical-layer broadcast," Microsoft, Tech. Rep. MSR-TR-2004-78, Aug. 2004.
- [14] P. Larsson, N. Johansson, and K.-E. Sunell, "Coded bi-directional relaying," *Scandinavian Workshop on ADHOC'05*, Stockholm, May 2005.
- [15] P. Popovski and H. Yomo, "Bi-directional amplification of throughput in a wireless multi-hop network," *IEEE VTC2006*, Melbourne, May 2006.
- [16] P. Popovski and H. Yomo, "Physical network coding in two-way wireless relay channels," *IEEE ICC*, Glasgow, Scotland, June 2007.
- [17] J. H. Conway and N. J. A. Sloane, *Sphere Packings, Lattices and Groups, Thrid Edition*, Springer, Dec. 1998.
- [18] T. Koike-Akino, P. Popovski and V. Tarokh, "Denoising maps and constellations for wireless network coding in two-way relaying systems," *IEEE GLOBECOM*, Nov.–Dec. 2008.

〈発表資料〉

題名	掲載誌・学会名等	発表年月
Optimum-Weighted RLS Channel Estimation for Time-Varying Fast Fading MIMO Channels	IEEE ICC 2007	2007年6月
Two-Way Relaying with Network Coding for Multiple Orthogonal Channels	Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers 2008	2008年10月 (採録決定済み, 招待講演)
Bit-Flipping Equalizer and ML Search-Space Analysis for Ultra-Wideband MIMO Channels	IEEE GLOBECOM 2008	2008年11月 (採録決定済み)
Denoising Maps and Constellations for Wireless Network Coding in Two-Way Relaying Systems	IEEE GLOBECOM 2008	2008年11月 (採録決定済み)
Optimum-Weighted RLS Channel Estimation for Rapid Fading MIMO Channels	IEEE Transactions on Wireless Communications	採録決定済み 印刷中