

Spinal符号を用いた重畳符号化伝送による無線通信の効率化について

西田 昇平[†] 山崎 景太[†] 石橋 功至[‡] 猿渡 俊介[†] 渡辺 尚^{†‡}
[†] 静岡大学 [‡] 電気通信大学 ^{†‡} 大阪大学

1 はじめに

無線通信を使用する携帯端末が年々増加している現在、電波資源の利用効率を高めることが求められている。これに向けて、本稿では重畳符号化と Spinal 符号とを組み合わせることで、ブロードキャスト通信路においてシャノン限界に漸近する優れた伝送レートを達成する伝送方式について述べる。

2 関連研究

筆者らは、重畳符号化とレートレス符号化の2つの技術に着目している。重畳符号化は、ブロードキャスト通信路において通信路容量を達成することが知られている。以降では、2つの端末に向けてデータを送信する場合の重畳符号化通信における一方の端末に対するデータをファーストレイヤ、もう一方の端末に対するデータをセカンドレイヤと呼ぶ。レートレス符号化とは、変動する SNR に対して暗黙的にレートを適応する符号化である。

重畳符号化とレートレス符号化とを組み合わせ例として、文献 [1] が挙げられる。文献 [1] では、レートレス符号化である Strider [2] と重畳符号化とを組み合わせることで、通信効率を改善できることが示されている。本稿では、レートレス符号化の観点で Strider よりも高い性能を発揮している Spinal 符号 [3] を用いて重畳符号化を実現することを考える。

図 1 に本研究の位置付けを示す。本研究は、上位の MAC 層として重畳符号化時の電力割当やフレームサイズを調整する TSPC-MAC [4] と組み合わせることを前提としている。将来的には、上位の MAC 層である TSPC-MAC と本研究を組み合わせたものを文献 [5] の OFDM の実験システム上に実装する予定である。

3 符号化

3.1 全体像

符号化では、Spine の作成、パンクチュアリング、変調の3つの動作を実行する。

3.2 Spine 作成

Spine 作成部では、MAC 層で作成されたフレームを k [bits] ずつのメッセージに分割し、各メッセージと前時点のハッシュ関数の出力を新たにハッシュ関数に入力して、出力を得る。この操作を繰り返すことで入力と前状態に拘束された状態遷移列を作成する。このハッシュ関数からの出力を状態、操作を繰り返して得られる状態遷移列を Spine と呼ぶ。ファーストレイヤとセカンドレイヤはそれぞれ独立に Spine を作成する。

図 2 に Spine の作成方法の概要を示す。 $m_1, m_2, m_3, \dots, m_n$ はフレームを k [bits] 毎に区切った n 個のメッセージ、 h はハッシュ関数、 s_i は i 番目の状態を示す。まず、パケットを k [bits] ずつ分割して、 n 個のメッセージ $m_1, m_2, m_3, \dots, m_n$ を作成する。次に、作成したメッセージに対応する状態を作成する。前の状態 s_{i-1} とメッセージ m_i をハッシュ関数に入力することで、 i 番目のメッセージに対する状態 s_i を作成する。初期状態 s_0 には、既知の値を使用する。

3.3 パンクチュアリング

パンクチュアリングでは、受信側で少ない信号数から元のフレームを復元できるように送信信号を間引いて分割する。送信信号を分割して1度に送信する信号数を減らすことで、冗長な信号の送信を減らして伝送レートを上げる。

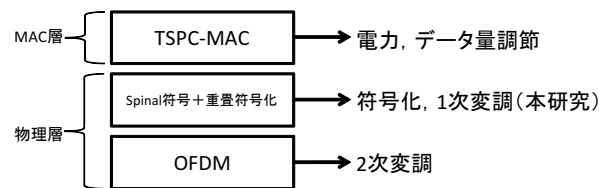


図 1: 本研究の位置付け

3.4 変調

変調では、1) ファーストレイヤとセカンドレイヤの符号語の作成、2) 電力割り当て、3) 重畳の3つの動作を実行する。

1) ファーストレイヤの符号語の作成では、ファーストレイヤの Spine を用いて符号語を作成する。セカンドレイヤでも以下の操作を同様に実行する。図 3 に符号語を表すビット列の抽出方法について示す。符号語を表すビット列の抽出では、状態 s_i の下位 c [bits] を変調用に切り出す。切り出した c [bits] のビット列からファーストレイヤの符号語を作成する。作成した符号語をそれぞれ多値 QAM としてマッピングする。最後の状態 s_n の場合のみ、複数回切り出して複数の符号語を作成して1フレームの中で複数の符号語を送信する。最後の状態 s_n における符号語が重複すると、受信側で s_{n-1} までの復号に成功していたとしても、間違った符号語を選択する可能性があるからである。

フレーム全体を一度送信しても復号できなかった場合、フレームを再送する。再送する符号語は状態 s_i から再び下位 c [bits] 切り出す。状態 s_i に含まれるビット数が c [bits] 以下となった場合、Spine を作成する際に用いたハッシュ関数に現在の状態 s_i と任意の固定値を入力して新たな状態 s'_i を作成する。

2) 電力割り当てでは、ファーストレイヤの信号とセカンドレイヤの信号に対して電力を割り当てる。割り当てる電力は上位の MAC 層から与えられる。

3) 重畳では、電力割り当てを行ったファーストレイヤの信号とセカンドレイヤの信号を加算することで重畳した信号を作成する。

4 復号

4.1 全体像

復号は、ファーストレイヤの復号とセカンドレイヤの復号の2つから構成される。以降では、ファーストレイヤの電力の割合は常にセカンドレイヤの電力の割合よりも高いものと仮定する。

4.2 ファーストレイヤの復号

ファーストレイヤの復号では Spinal 符号と同様にパブル復号を使用する。パブル復号はビタビ復号の計算量を削減する M アルゴリズムの一種である。この復号方法では最尤復号を近似的に実現する。重畳符号化伝送におけるパブル復号では電力割当及びセカンドレイヤの信号による干渉の影響を考慮する必要がある。

パブル復号は、1) 候補信号点系列の作成、2) 作成した候補信号系列と受信信号列との比較、3) ビーム幅による候補系列の削減の3つの動作を実行する。

1) 候補信号点系列の作成では、まず、デコーダで取りうる全てのメッセージと、エンコーダと同様のハッシュ関数を用いて、候補信号点系列を作成する。具体的には、各時点 t において d 時点先まで

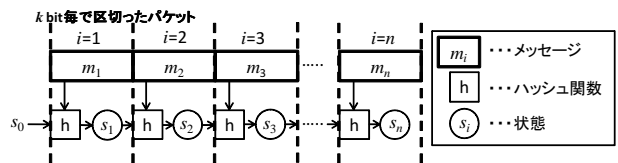


図 2: Spine 作成の概要

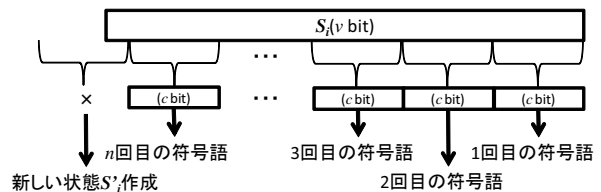


図 3: 符号語作成の概要

の候補信号点系列を作成する。ここで d を深さと呼ぶ。次に、送信側での電力配分に基づいて、候補信号点の電力を調整する。本稿では各レイヤに対する電力配分は受信側においても理想的に既知であるとする。2) 作成した候補信号点系列と受信信号列との比較では、作成した候補信号点系列と受信信号列から 2 乗ユークリッド距離を算出する。3) ビーム幅による候補の削減では、先頭メッセージから $(t + d)$ 時点先までの 2 乗ユークリッド距離の総和が小さい系列を $(t + 1)$ 時点におけるメトリックとし、 $(2^k \times B)$ 個の候補状態から B 個だけを残してバッファに格納する。ここで B をビーム幅と呼ぶ。ビーム幅 B を超えた候補系列に対しては以降の探索をしないことで計算量を削減する。

以上の 3 つの操作を最後のメッセージがバッファに格納されるまで繰り返す。距離の総和が最も短いメッセージの列を復号結果とする。

4.3 セカンドレイヤの復号

セカンドレイヤの復号では、1) 逐次干渉除去を用いたファーストレイヤの信号の除去、2) セカンドレイヤの復号の 2 つの操作を実行する。

1) 逐次干渉除去を用いたファーストレイヤの信号点の除去では、まず、4.2 節と同様にファーストレイヤの情報を復号する。復号の結果、ファーストレイヤのフレームに誤りが確認されなかった場合、デコーダでは、復号して得たファーストレイヤのフレームを再び符号化して信号点を作成する。符号化した信号点に対して、ファーストレイヤに割り当てられている電力を乗算することでファーストレイヤの信号点を作成する。次に、バッファに格納された受信信号点から復元したファーストレイヤの信号点を用いてファーストレイヤの信号を除去する。最後に、干渉除去後の信号をバッファに格納する。

2) セカンドレイヤの復号ではファーストレイヤと同様にバブル復号を用いる。ファーストレイヤの復号と異なる点は、セカンドレイヤではバブル復号で作成する候補信号点にセカンドレイヤの電力を乗算している点である。

5 シミュレーション評価

5.1 評価環境

Spinal 符号を用いた重畳符号化の基本性能を評価するために計算機シミュレーションを行った。ファーストレイヤ、セカンドレイヤともにフレームサイズを 400 [bits]、変調方式を 4096QAM、メッセージのサイズ k を 4 [bits]、ビーム幅 B を 256、深さ d を 1 とした。メッセージのサイズ k 、ビーム幅 B 、深さ d は文献 [3] で示されているものを使用した。

5.2 ファーストレイヤの評価

図 4 に Spinal 符号を用いた重畳符号化のファーストレイヤにおけるシミュレーションとシャノン限界との比較を示す。横軸が SNR (signal to noise ratio) [dB]、縦軸が伝送レート [bps: bits per symbol] を表している。ファーストレイヤとセカンドレイヤの電力比は 9 : 1 とした。重畳符号化のファーストレイヤのシャノン限界 C_{1st} を式 1 に示す。 P_{1st} はファーストレイヤの電力、 P_{2nd} はセカンドレイヤの電力である。

$$C_{1st} = \log_2 \left(1 + \frac{P_{1st} \cdot 10^{\frac{SNR}{10}}}{1 + (P_{2nd} \cdot 10^{\frac{SNR}{10}})} \right) \quad (1)$$

式 1 では、ファーストレイヤの信号に対してセカンドレイヤの電力がノイズとなることを表している。図 4 より、Spinal 符号を用いた重畳符号化のファーストレイヤは重畳符号化のファーストレイヤのシャノン限界に漸近する伝送レートを達成していることが分かる。

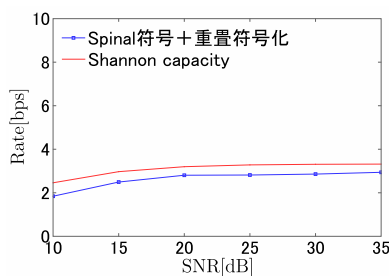


図 4: ファーストレイヤ

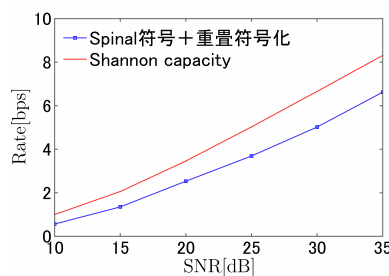


図 5: セカンドレイヤ

5.3 セカンドレイヤの評価

図 5 に Spinal 符号を用いた重畳符号化のセカンドレイヤにおけるシミュレーション結果とシャノン限界との比較を示す。ファーストレイヤと同様に横軸は SNR [dB]、縦軸が伝送レート [bps: bits per symbol] を表している。ファーストレイヤとセカンドレイヤの電力比は 9 : 1 とした。重畳符号化のセカンドレイヤのシャノン限界 C_{2nd} を式 2 に示す。

$$C_{2nd} = \log_2 \left(1 + P_{2nd} \cdot 10^{\frac{SNR}{10}} \right) \quad (2)$$

図 5 より、Spinal 符号を用いた重畳符号化のセカンドレイヤにおいてもシャノン限界に漸近する伝送レートを達成していることが分かる。

5.4 重畳しない場合の通信との比較

図 6 に、重畳符号化を用いた場合と用いない場合の伝送レートの比較を示す。横軸は全体の電力に対するファーストレイヤの電力の割合、縦軸は伝送レート [bps: bits per symbol] である。総送信電力を P_{all} とすると、 P_{all} は $P_{all} = P_{1st} + P_{2nd}$ を満たす。また、ファーストレイヤの電力の割合は常にセカンドレイヤの電力の割合よりも高いと仮定しているため、ファーストレイヤの電力の割合は 0.5 を最小値とする。送信機からファーストレイヤを受信する端末までの通信路の SNR を 10 [dB]、セカンドレイヤを受信する端末までの通信路の SNR を 30 [dB] とした。

重畳符号化を用いた場合では、Spinal 符号と重畳符号化を組み合わせた手法を用いて 2 つの端末に同時に送信する。1 度の通信で 2 つの端末に送信するため、 P_{1st} と P_{2nd} を用いた場合の各端末への伝送レートの和を、重畳符号化を用いた場合の伝送レートとした。重畳符号化を用いない場合では、Spinal 符号を用いて 2 つの端末に個別に送信する。1 度の通信で 1 つの端末に送信するため、ファーストレイヤを受信する端末とセカンドレイヤを受信する端末の通信を時間的に交互に伝送する状況を想定した。この場合、2 つの端末への伝送に 2 回の通信を必要とするため、送信電力に P_{all} を用いた場合の各端末への伝送レートの和を 2 で除算した値を、重畳符号化を用いない場合の伝送レートとした。

図 6 より、各電力比に対して、重畳符号化を用いた方が高い伝送レートを達成していることが分かる。Spinal 符号と重畳符号化を組み合わせることで、ファーストレイヤとセカンドレイヤの各通信において伝送レートの向上を達成できているからだと考えられる。

6 おわりに

本稿では、重畳符号化に Spinal 符号を組み合わせた手法を評価した。現在、本符号化をソフトウェア無線機上に実装して MAC 層まで含めた評価を進めている。

謝辞

本研究は総務省・2013 年度戦略的情報通信研究開発推進事業 (SCOPE) の助成を受けて行った。

参考文献

- [1] Gudipati, A. and et al: "AutoMAC: Rateless Wireless Concurrent Medium Access," *ACM MobiCom'12*.
- [2] Gudipati, A. and et al: "Strider: Automatic Rate Adaptation and Collision Handling," *ACM SIGCOMM'11*.
- [3] Perry, J. and et al: "Spinal Codes," *ACM SIGCOMM'12*.
- [4] 青木勇太ほか: "重畳符号化を用いた無線通信における転送量に基づく電力割当方式," 情報処理学会研究報告, MBL-64-22 (2012).
- [5] 山崎景太ほか: "UHD を用いたソフトウェア無線 OFDM の実装について," 情報処理学会全国大会, 1W-9 (2014).

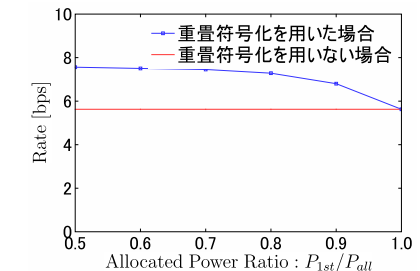


図 6: 重畳符号化を用いた場合と用いない場合の伝送レートの比較