

ブロードキャスト通信路容量を達成するための 無線通信方式の実装について

山崎 景太^{1,a)} 西田 昇平^{2,b)} 石橋 功至^{3,c)} 猿渡 俊介^{1,d)} 渡辺 尚^{4,e)}

1. はじめに

無線通信ではシャドウイングやフェージングといった物理現象によって通信路の状態が時間的に変動する。現在の無線システムでは通信路状態を受信端末において推定し、この情報を送信端末にフィードバックすることで、各時点において通信路の持つ通信路容量に即した通信方式を選択する適応変調符号化が主流である [1]。しかしながら、適応変調符号化は送受信機において常に通信路の変動を追従する必要があるため、特に変動が激しい場合にはオーバーヘッドの増加や、通信方式の選択誤りなどによって、著しく伝送特性が劣化してしまうことがある。

現在の無線通信では、複数のユーザが基地局と通信を行う場合には、周波数分割多重 (FDMA: Frequency Division Multiple Access)、時分割多重 (TDMA: Frequency Division Multiple Access)、符号分割多重 (CDMA: Code Division Multiple Access) といった技術によって、それぞれのユーザが独立な直交通信路を形成し、その直交通信路に対して適応変調符号化を用いて通信を行っている。しかしながら、複数のユーザが 1 つの基地局と通信をするようなブロードキャスト通信路では、ユーザ間の干渉を許容し、送信側では重畳符号化 [2]、受信側では逐次干渉除去 [3] を行うことで、システム全体が達成するレートを最大化できることが理論的に知られている。

本稿では、ブロードキャスト通信路容量を達成可能な重畳 Spinal 符号を提案する。重畳 Spinal 符号は Spinal 符

号 [4] と同様にレートレス構造を持ち、通信路状態情報を送受信端末で共有することなしに、通信路の状態にあわせて適切な伝送レートが通信が行うことが可能である。また重畳符号化とレートレス構造を組み合わせることによって、現実的な複雑度でブロードキャスト通信路容量を達成することが可能となる。本稿では、重畳 Spinal 符号をソフトウェア無線実験装置 Radio Ensembler 上に実装し、その特性について評価を行う。実験評価の結果として、提案した重畳 Spinal 符号がブロードキャスト通信路容量に漸近する特性を達成可能であることを示す。

本稿の構成は以下の通りである。2 節では、関連研究としてレートレス符号化と重畳符号化について述べる。3 節では、本研究で想定している通信プロトコルの全体像を示す。重畳 Spinal 符号の符号化について 4 節で、復号について 5 節で述べる。6 節では、重畳 Spinal 符号の実装に用いるソフトウェア無線実験装置 Radio Ensembler について述べる。7 節において重畳 Spinal 符号のシミュレーション評価について、8 節において実装評価についてそれぞれ述べる。最後に、9 節でまとめとする。

2. 関連研究

前節で述べた通り、本研究はレートレス符号化及び重畳符号化の研究に関係している。レートレス符号化としては、Spinal 符号、Strider、Raptor 符号が挙げられる。Spinal 符号 [4] は、送信側がハッシュ関数を用いて生成した符号語を生成し、受信側で M アルゴリズムの一種であるバブル復号を行うことでシャノン限界に漸近する性能を実現している。Iannucci らは Spinal 符号において受信側でデコードに成功したシンボル数を元に、送信するシンボル数を推定する MAC プロトコルである RateMore も提案している [5]。Strider [6] は、送信側が Minimum Distance Transformer (MDT) を用いて変調後の信号を重ね合わせ送信、受信側で受信した信号を逐次干渉除去によって分離することで、チャネル状況に応じて常に最適な変調方式を選択した場合と同等の性能を実現している。Raptor 符号 [7] は、LDPC (Low-Density Parity-Check) 符号 [8] とレートレス符号で

¹ 静岡大学大学院情報学研究科
Graduate School of Informatics, Shizuoka University
² 静岡大学情報学部
Shizuoka University Faculty of Informatics
³ 電気通信大学先端ワイヤレスコミュニケーション研究センター
Advanced Wireless Communication Research Center, the University of Electro-Communications
⁴ 大阪大学情報科学研究科
Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University
a) yamazaki@aurum.cs.inf.shizuoka.ac.jp
b) nishida@aurum.cs.inf.shizuoka.ac.jp
c) koji@ieee.org
d) saru@inf.shizuoka.ac.jp
e) watanabe@inf.shizuoka.ac.jp

ある LT 符号 [9] を組み合わせることで、LDPC 符号の持つ誤り訂正能力を向上させている。現段階では Spinal 符号が最も高い性能を発揮していることから、本研究では、Spinal 符号を拡張して重畳符号化を実現する。

レートレス符号化で重畳符号化を実現した例として、AutoMAC [10] が挙げられる。AutoMAC は、物理層において Strider を用いた重畳符号化を前提とした MAC プロトコルであり、重畳符号化を用いない場合と比較して 35% のスループット向上を達成している。

AutoMAC の成功を受けて、本研究では Spinal 符号を用いて重畳符号化を実現することを目指している。具体的には、AutoMAC では Strider が用いられているのに対して、本研究では重畳 Spinal 符号を用いた MAC プロトコルを実現する。また、AutoMAC では MAC 層が常にフルバッファの状態であることを想定しているのに対して、本研究ではトラヒックの状況に応じて重畳 Spinal 符号と Spinal 符号を切り替える。さらに、AutoMAC では重畳時の各ストリームへの割り当て電力が等しいのに対して、本研究ではトラヒックの状況や通信路の状況に応じて重畳時の割り当て電力制御を行う。

重畳符号化という観点で見ると、重畳符号化の同時通信の特性を用いて通信品質を改善するための多くの研究がなされている。重畳符号化の MAC プロトコルに関する研究 [11–13] では、様々な制御フレームにより重畳符号化の達成するブロードキャスト通信容量を活かし、通信品質を改善している。他にも、重畳符号化をネットワークコーディングと組み合わせることで通信品質を改善する研究 [14]、重畳符号化の電力割り当てに焦点を置いて理論ベースでスループット性能を向上する研究 [15] がなされている。これらの研究では、物理層では理想的な重畳符号化が行われると仮定しており、具体的にどのように符号化や復号を行うかについては考えられていない。それに対して、本稿では、重畳符号化の具体的な符号化や復号として、実際に重畳 Spinal 符号を提案して実装している。

Vanka らは、既存の変調方式を用いて重畳符号化を実装している [16, 17]。GNU Radio/USRP [18, 19] 上に BPSK (Binary Phase-Shift Keying), QPSK (Quadrature Phase-Shift Keying), 16 値直交振幅変調 (QAM: Quadrature Amplitude Modulation) を用いて重畳符号化を実装した結果、TDMA などの既存の通信方式に比べて性能が向上することが示されている。しかしながら、重畳する 2 つの信号の干渉が強い場合には性能が劣化することも示されている [17]。それに対して、本稿では、重畳に Spinal 符号を利用することで、重畳する 2 つの信号の干渉が強い場合でも、ブロードキャスト通信路容量に漸近する優れた性能を発揮できることを示す。

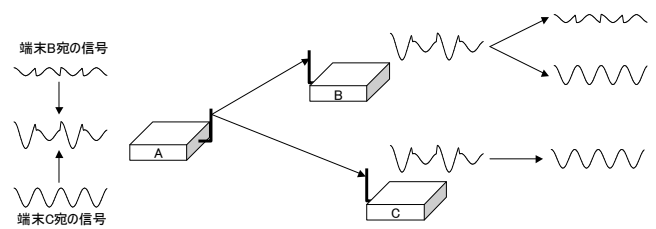


図 1 重畳符号化の動作例

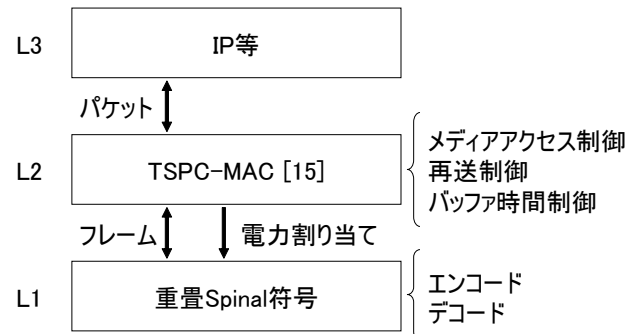


図 2 重畳符号化通信の全体像

3. 重畳符号化通信全体像

重畳符号化は、アクセスポイントからフレームを送信する際に、2 つの異なる宛先を持つフレームを変調した信号に対して異なる電力を割り当てて重ね合わせて送信する技術である。各受信側では逐次干渉除去を用いてフレームを復調する。逐次干渉除去とは、アクセスポイントが 2 つの端末から同時にフレームを受信した場合に、各端末宛のフレームの受信電力差を利用することで各フレームを同時に復調可能とする技術である [2]。

図 1 に重畳符号化の動作例を示す。図 1 では、アクセスポイント A が端末 B と端末 C に対して異なるフレームを同じ周波数帯域で同時に配送している。アクセスポイント A は、端末 B 宛のフレームを変調した信号に低い電力を、端末 C 宛のフレームを変調した信号に高い電力を割り当て、2 つの信号を重畳して 1 つの重畳フレームを作成して送信する。本稿では、高い電力が割り当てられた信号を遠方端末宛の信号、低い電力が割り当てられた信号を近辺端末宛の信号と呼ぶ。遠方にある端末 C が重畳フレームを受け取って復調すると、近辺端末宛の信号は十分に受信電力が低いことからノイズとして扱われるため、遠方端末宛のフレームのみが復調される。近辺にある端末 B が重畳フレームを受け取って復調すると、まず、遠方端末宛のフレームが復調される。端末 B は復調した端末 C 宛のフレームを再度変調して、端末 C 宛の信号を生成する。端末 B は、受信した重畳フレームの信号から生成した端末 C 宛の信号を取り除き、再度復調することで端末 B 宛である近辺端末宛のフレームを復調する。

図 2 に本研究における重畳符号化の各レイヤにおける役

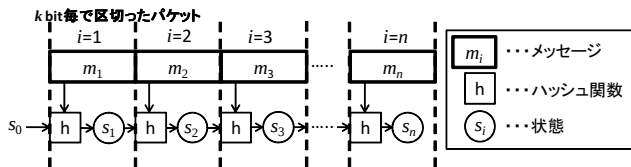


図 3 Spine 作成の概要

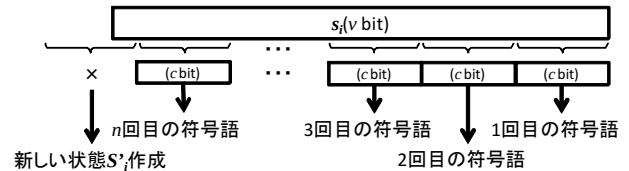


図 4 符号語作成の概要

割と動作を示す。本稿では、上位のデータリンク層として TSPC-MAC [15] を用いることを前提としている。TSPC-MAC は、L3 (ネットワーク層) から L2 (データリンク層) に渡されたパケットに対して、メディアアクセス制御、再送制御、バッファ時間制御を行って、L1 (物理層) に電力割り当て情報を渡す。L1 では、L2 から渡されるフレームと、TSPC-MAC によって決定された電力割り当て情報に従って重畳 Spinal 符号化を行う。

詳細は文献 [15] を参照されたい。重畳 Spinal 符号については 4 節において符号化を、5 節において復号についてそれぞれ述べる。

4. 重畳 Spinal 符号: 符号化

重畳 Spinal 符号では、符号化において Spine の作成、パングチュアリング、変調の 3 つを実行する。

4.1 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。遠方端末と近辺端末用に、それぞれ独立に Spine を作成する。

図 3 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。

4.2 パングチュアリング

パングチュアリングでは、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。

4.3 変調

変調では、1) 遠方端末と近辺端末宛の符号語の作成、2) 電力割り当て、3) 重畳の 3 つの動作を実行する。

1) 遠方端末の符号語の作成では、遠方端末宛の Spine を用いて符号語を作成する。近辺端末宛でも以下の操作を同様に実行する。図 4 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] のビット列から遠方端末用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、遠方端末宛の信号と近辺端末宛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遠方端末用の信号と近辺端末宛の信号を加算することで重畳した信号を作成する。

5. 重畳 Spinal 符号: 復号

重畳 Spinal 符号は、遠方端末宛の信号の復号と近辺端末宛の信号の復号の 2 つから構成される。

5.1 遠方端末宛の信号の復号

遠方端末宛の信号の復号では Spinal 符号と同様にバブル復号を使用する。バ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バブル復号では電力割当及び近辺端末宛の信号による干渉の影響を考慮する必要がある。

バブル復号は、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

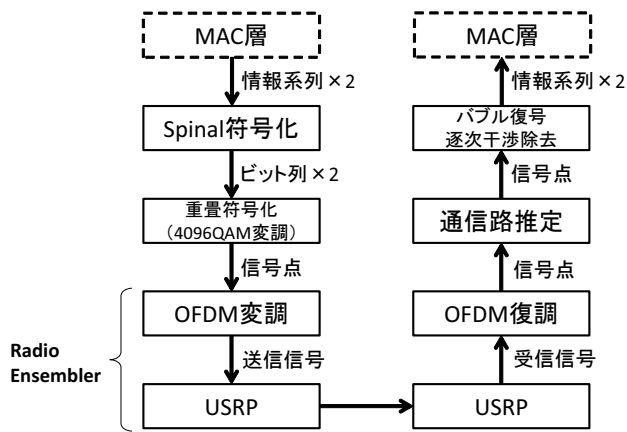


図 5 実装の全体像

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。本稿では各端末宛の信号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。

5.2 近辺端末宛の信号の復号

近辺端末宛の信号の復号では、1) 逐次干渉除去を用いた遠方端末宛の信号の除去、2) 近辺端末宛の信号の復号の 2 つの操作を実行する。

1) 逐次干渉除去を用いた遠方端末宛の信号の除去では、まず、5.1 節と同様に遠方端末宛の信号を復号する。復号の結果、遠方端末宛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、復号して得た遠方端末宛のフレームを再び符号化して信号を作成する。符号化した信号に対して、遠方端末宛に割り当てられている電力を乗算することで遠方端末宛の信号を作成する。次に、バッファに格納された受信信号から復元した遠方端末宛の信号を用いて遠方端末宛の信号を除去する。最後に、干渉除去後の信号をバッファに格納する。

2) 近辺端末宛の信号の復号では遠方端末宛と同様にバブル復号を用いる。遠方端末宛の信号の復号と異なる点は、

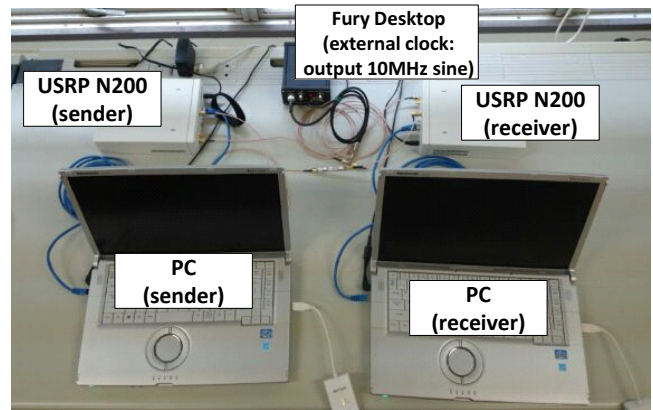


図 6 Radio Ensembler の外観

近辺端末宛ではバブル復号で作成する候補信号点に近辺端末宛の電力を乗算している点である。

6. 実装

図 5 に本実装の全体像を示す。MAC 層より渡された 2 つの情報系列に対して Spinal 符号化を施すことで、2 つの符号化ビット系列を作成する。系列は 4096QAM の重畳符号化によって信号点へと変換され、直交周波数分割多重 (OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 信号へと二次変調された後に USRP を介して送信される。送信された信号は、別の USRP によって受信され、OFDM 復調器および通信路推定によって受信信号点が抽出される。最後に受信信号点に対して最尤復号の近似アルゴリズムであるバブル復号 [4] と逐次干渉除去が行われ、2 つの情報系列を MAC 層に渡す。

6.1 Radio Ensembler

図 6 に Radio Ensembler の外観を示す。Radio Ensembler では、ハードウェアとして USRP N200 と Fury Desktop を、ソフトウェアとして Ettus Research が提供している UHD (USRP Hardware Driver) と C++ を用いた。USRP N200 は、本体基盤に周波数ごとに対応した daughter board を接続することで、周波数の変更が可能である。本稿の実験では daughter board として 2.4GHz 帯と 5.11GHz 帯に対応している XCVR2450 を用いた。

Radio Ensembler の構成について説明する。送信側 USRP N200 と受信側 USRP N200 は、減衰器を介して有線で接続した。送信側 PC と送信側 USRP N200 では、入力された 1 次変調点を OFDM 変調して、電波として信号を送信する。受信側 PC と受信側 USRP N200 では、送信した電波を受信したものを OFDM 復調して、受信した信号点を出力する。Fury Desktop は送信側の USRP N200 と受信側の USRP N200 に接続した。Fury Desktop から出力される 10 [MHz] の信号を送信側と受信側の USRP の両方に入力することで、USRP N200 間の周波数偏差が小

さくなるようにしている．OFDM 変調/復調のプログラムは RawOFDM [20] を元に作成した．以下では送信機，受信機の実装についてそれぞれ詳しく述べる．

6.2 送信機

送信機では，1) プリアンブル作成，2) データシンボル作成，3) OFDM 変調，4) スケール調整，5) 送信の 5 つの動作を実行する．サブキャリア数は IEEE 802.11a に倣い 52 個のサブキャリアを用いる．FFT 長はガードバンドを考慮して 64 とした．

1) プリアンブル作成部では，フレーム検出およびチャネル補正のために 3 つの既知の OFDM シンボルを作成し，送信する．まず受信側における自己相関処理によってフレーム位置の検出ができるように，サブキャリアの奇数番のみにサンプルを代入することで，IFFT 後の波形の前半と後半が一致するようにしている．2, 3 個目のシンボルは，それぞれチャネル補正のためのシンボルであり，52 個のサブキャリア全てに既知の値を代入する．2) データシンボル作成では，4 節で示した手順に従って Spinal 符号化された 4096QAM の重畳信号を 48 サブキャリアにそれぞれ代入する．52 サブキャリアのうち残り 4 サブキャリアには BPSK のパイロットシンボルを代入する．パイロットシンボルには先頭からビット 0 とビット 1 の値が交互に代入されている．3) OFDM 変調では，作成したプリアンブルとデータシンボルにそれぞれ IFFT 処理を行うことで変調する．シンボル間干渉を防ぐために，IFFT 後の信号に Cyclic Prefix としてシンボル後半の 16 サンプルを先頭に付加する．4) スケール調整では，USRP の DA 変換器が許容するダイナミックレンジである 1 から -1 の値に信号全体が収まるように OFDM シンボルの振幅包絡線を調整する．5) 送信では，スケール調整済みの OFDM 変調信号を UHD を介して USRP に送信すると，USRP から電波として送信される．

6.3 受信機

受信機では 1) 受信信号の取得，2) シンボル同期，3) 周波数オフセット補正，4) OFDM 復調，5) チャネル補正，6) シンボルからの信号の取出しの 6 つの動作を実行する．

1) 受信信号の取得では，UHD を用いて USRP で受信した電波を受信信号として受け取る．2) シンボル同期では，半波長のウィンドウ幅で受信信号の自己相関を取る．波形の前半と後半が一致するプリアンブルの 1 シンボル目の位置でピークが立つ．ピークの検出では，実測により得た値を閾値として用いた．3) 周波数オフセット補正では，プリアンブルの 1 シンボル目の自己相関の値を用いる．プリアンブルの 1 シンボル目の自己相関から，半波長間での信号点の回転が算出できる．算出された回転角を用いて，全ての信号点を逆回転させて補正を行う．4) OFDM 復調は，

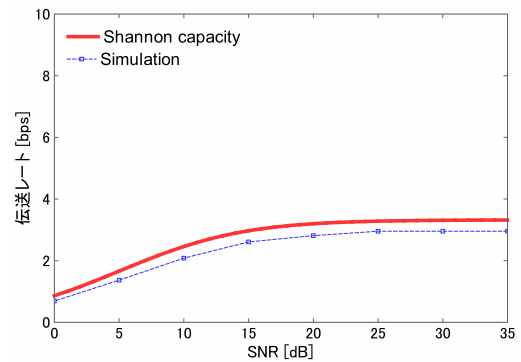


図 7 遠方端末の SNR に対する伝送レート

受信信号から Cyclic Prefix を削除した後，FFT をかける．5) チャネル補正では，既知であるプリアンブルの 2, 3 シンボル目が歪んだ値だけ，周波数ごとに補正する．6) シンボルからの信号の取り出しでは，52 個のサブキャリアからそれぞれ受信信号点を取り出す．取り出された受信信号点は通信路による位相回転等の擾乱を受けているため，これをパイロットシンボルから推定した情報を用いて補正し，5 節で示した復号器に渡される．5 節で示した手順に従って復号された 2 つの情報系列は MAC 層に渡された後，誤り検出が行われる．復号器からの出力系列に誤りがなくなった時点で伝送完了を送信機にフィードバックする．

7. シミュレーション評価

7.1 評価環境

重畳 Spinal 符号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．遠方端末宛，近辺端末宛のフレームサイズをともに 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 [4] で示されているものをそれぞれ使用した．

7.2 遠方端末の評価

図 7 に重畳 Spinal 符号の遠方端末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．特性を調べるために，遠方端末宛と近辺端末宛の電力比は 9 : 1 に固定した．重畳符号化の遠方端末におけるシャノン限界 C_{far} を式 1 に示す． P_{far} は遠方端末宛の電力， P_{near} は近辺端末宛の電力である．

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

式 1 では，遠方端末宛の信号に対して近辺端末宛の電力がノイズとなることを表している．図 7 より，重畳 Spinal 符号は遠方端末において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．

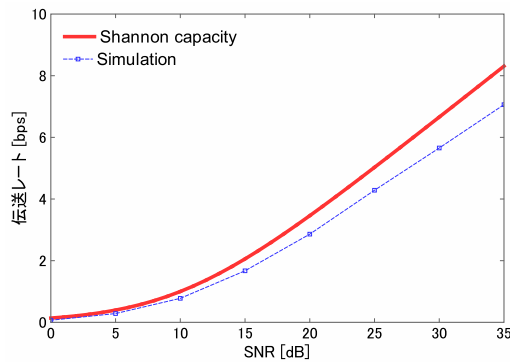


図 8 近辺端末の SNR に対する伝送レート

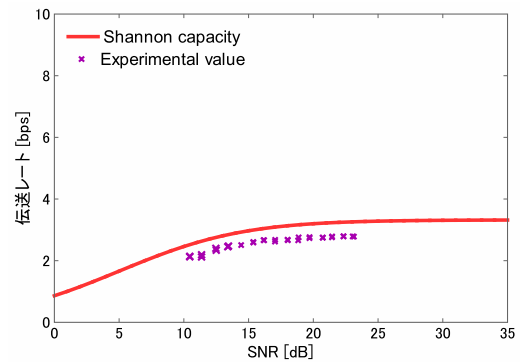


図 10 遠方端末の SNR に対する伝送レート

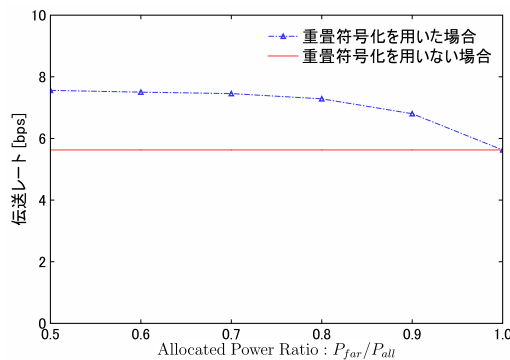


図 9 重畳符号化を用いた場合と用いない場合の伝送レートの比較

7.3 近辺端末の評価

図 8 に重畳 Spinal 符号の近辺端末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。遠方端末の評価と同様に横軸は SNR [dB]、縦軸が伝送レート [bps: bits per symbol] を表している。特性を調べるために、遠方端末宛と近辺端末宛の電力比は 9 : 1 に固定した。重畳符号化の近辺端末におけるシャノン限界 C_{near} を式 2 に示す。

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

図 8 より、重畳 Spinal 符号は近辺端末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。

7.4 重畳しない場合の通信との比較

図 9 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遠方端末宛の電力の割合、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 $P_{\text{all}} = P_{\text{far}} + P_{\text{near}}$ を満たす。また、遠方端末宛の電力の割合は常に近辺端末宛の電力の割合よりも高いと仮定しているため、遠方端末宛の電力の割合は 0.5 を最小値とする。送信機から遠方端末までの通信路の SNR を 10 [dB]、近辺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、重畳 Spinal 符号を用いて 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_{far} と P_{near} 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、遠方端末宛と近辺端末宛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 9 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、遠方端末宛と近辺端末宛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。

8. 実測評価

8.1 評価環境

Radio Ensemble を用いた重畳 Spinal 符号の性能評価として、シミュレーションと同様に遠方端末、近辺端末の SNR に対する伝送レートの評価と、重畳符号化を用いる場合と重畳符号化を用いない場合の電力割り当てに対する伝送レートの評価を行った。フレームサイズ、変調方式、メッセージのサイズ、ビーム幅、深さはシミュレーションと同様の値とした。Radio Ensemble における OFDM のパラメータは、1 シンボルあたり全体のサブキャリア数を 64、ガードバンド数を 12 サブキャリア、パイロットシンボル数を 4 サンプル、データシンボル数を 48 サブキャリアで構築し、帯域幅を 2 [MHz]、中心周波数を 5.11 [GHz] に設定した。また、受信 SNR の推定は RawOFDM [20] において用いられている推定法を用いた。

8.2 遠方端末の評価

図 10 に実装した重畳 Spinal 符号の遠方端末における SNR [dB] に対する伝送レート [bps: bits per symbol] を示す。比較のため、AWGN 通信路におけるシャノン限界の伝送レートを示す。特性を調べるために、遠方端末宛と近辺端末宛の電力比は 9 : 1 に固定した。SNR が 10 [dB] から 25 [dB] の間の結果に限られている理由として、2 つの

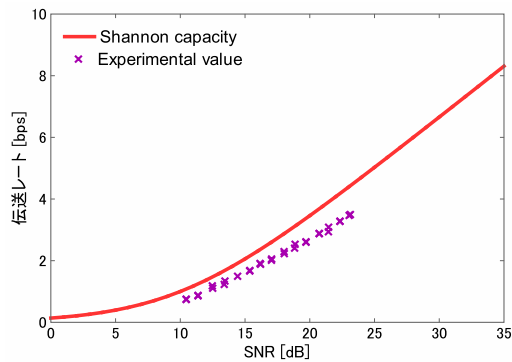


図 11 近辺端末の SNR に対する伝送レート

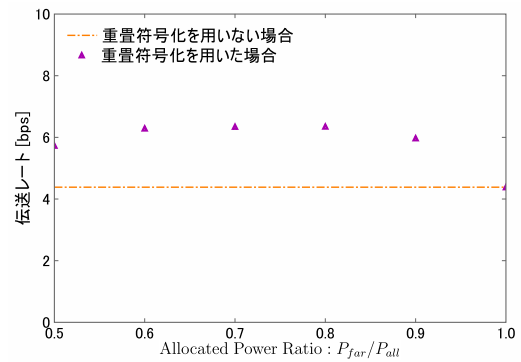


図 12 重畳符号化を用いた場合と用いない場合の伝送レートの比較

ことが挙げられる．1 つ目として，チャネルの変動による影響が挙げられる．SNR が 10 [dB] 以下の場合，急なチャネルの変動によりプリアンプが検出されず Spine の抜け落ちが発生してしまうからである．この場合 Spine の抜け落ちは受信側では判断できず，バブル復号が不可能になってしまうからである．2 つ目として，USRP の性能上の問題が挙げられる．USRP のゲインを上昇し続けていくと，SNR は USRP の性能上，およそ 25 [dB] 程度で止まってしまう．更に USRP のゲインを上昇させると，送信信号が増幅器による非線形歪みを強く受けるために，信号成分が歪み，結果として受信 SNR が低下してしまうためである．

図 7 と図 10 の結果から次の 2 つのことが分かる．1 つ目は，実測による値がシミュレーションに漸近する特性を示していることである．重畳 Spinal 符号が Radio Ensembler 上で正しく動作していると考えられる．2 つ目は，実測による値の方がシミュレーションによる値よりも低い結果が出ていることである．シミュレーションでは AWGN による擾乱のみを考えているのに対し，Radio Ensembler による実装では，増幅器における非線形歪みや通信路推定誤差といった擾乱成分もあるためだと考えられる．

8.3 近辺端末の評価

図 11 に実装した重畳 Spinal 符号の近辺端末における SNR [dB] に対する伝送レート [bps: bits per symbol] を示す．遠方端末と同様に比較のため，AWGN 通信路におけるシャノン限界および計算機シミュレーションによって求めた AWGN 通信路の伝送レートを示す．特性を調べるために，遠方端末宛と近辺端末宛の電力比は 9 : 1 に固定した．

図 8 と図 11 の結果から遠方端末と同様に，実測による値がシミュレーションに漸近する特性を示していること，実測による値の方がシミュレーションによる値よりも低い結果が出ていることが分かる．これらの結果は遠方端末と同様の理由によるものだと考えられる．

8.4 重畳しない場合の通信との比較

図 12 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遠方端末宛の電力の割合，縦軸は伝送レート [bps: bits per symbol] である．遠方端末宛の電力の割合は常に近辺端末宛の電力の割合よりも高いと仮定しているため，遠方端末宛の電力の割合は 0.5 を最小値とする．送信機から 10dB 減衰器を 3 つ有線で接続した USRP を遠方端末，10dB 減衰器を 2 つ有線で接続した USRP を近辺端末とにおいて計測した．計測の際には USRP のゲインパラメータである *tx_gain* を 10.0 に設定した．

シミュレーションと同様，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_{far} と P_{near} 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，TDMA と Spinal 符号化を用いて 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，遠方端末と近辺端末の通信を時間的に交互に伝送する状況を想定して，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 12 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，遠方端末と近辺端末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．

9. おわりに

本稿では，無線資源の効率的な利用に向けて Spinal 符号と重畳符号化に着目して，重畳 Spinal 符号をソフトウェア無線実験装置 Radio Ensembler 上に実装した．評価では，Radio Ensembler を用いて実装した重畳 Spinal 符号と AWGN 通信路におけるシャノン限界および計算機シミュレーションによって求めた伝送レートを比較した．評価結果より，様々な擾乱を受ける実環境においても，重畳 Spinal 符号はシャノン限界に漸近する優れた伝送レートを達成して，重畳符号化を用いない場合より高い伝送レートを

示した。現在、MAC プロトコルなどの上位層までをも含めた通信方式の検討を進めている。

参考文献

- [1] Goldsmith, A. J. and Chua, S.-G.: Adaptive coded modulation for fading channels, *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol. 46, No. 5, pp. 595–602 (1998).
- [2] Tse, D. and Viswanath, P.: *Fundamentals of Wireless Communication*, Cambridge University Press (2005).
- [3] Halperin, D., Anderson, T. and Wetherall, D.: Taking the Sting out of Carrier Sense: Interference Cancellation for Wireless LANs, *Proceedings of the 14th ACM Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'08)*, San Francisco, California, pp. 339–350 (2008).
- [4] Perry, J., Iannucci, P. A., Fleming, K., Balakrishnan, H. and Shah, D.: Spinal Codes, *Proceedings of the Annual Conference of the ACM Special Interest Group on Data Communication (SIGCOMM'12)*, Helsinki, Finland, pp. 49–60 (2012).
- [5] Iannucci, P., Perry, J., Balakrishnan, H. and Shah, D.: No Symbol Left Behind: A Link-layer Protocol for Rateless Codes, *Proceedings of the 18th ACM Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'12)*, pp. 17–28 (2012).
- [6] Gudipati, A. and Katti, S.: Strider: Automatic Rate Adaptation and Collision Handling, *Proceedings of the Annual Conference of the ACM Special Interest Group on Data Communication (SIGCOMM'11)*, Tronto, Canada, pp. 158–169 (2011).
- [7] Shokrollahi, A.: Raptor codes, *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol. 52, No. 6, IEEE, pp. 2551–2567 (2006).
- [8] Gallager, R. G.: Low-density parity-check codes, *IRE Transactions on Information Theory*, Vol. 8, No. 1, pp. 21–28 (1962).
- [9] Luby, M.: LT codes, *The 43rd Annual IEEE Symposium on Foundations of Computer Science (FOCS'02)*, pp. 271–282 (2002).
- [10] Gudipati, A. and Katti, S.: AutoMAC: Rateless Wireless Concurrent Medium Access, *Proceedings of the 18th ACM Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'12)*, Istanbul, Turkey, pp. 257–268 (2012).
- [11] Li, L. E., Alimi, R., Ramjee, R., Shi, J., Sun, Y., Viswanathan, H. and Yang, Y. R.: Superposition Coding for Wireless Mesh Networks, *Proceedings of the 13rd ACM Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'07)*, Montreal, Canada, pp. 330–333 (2007).
- [12] Li, L. E., Alimi, R., Ramjee, R., Viswanathan, H. and Yang, Y. R.: muNet: Harnessing Multiuser Capacity in Wireless Mesh Networks, *Proceedings of the 28th IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM'09)*, Rio de Janeiro, Brazil, pp. 2876–2880 (2009).
- [13] Feng, J., Zhang, R. and Hanzo, L.: Auction-Style Cooperative Medium Access Control, *Proceedings of the IEEE Vehicular Technology Conference (VTC'11-Fall)*, San Francisco, CA, pp. 1–5 (2011).
- [14] Su, X. and Chan, S.: High-Throughput Routing with Superposition Coding and Successive Interference Cancellation, *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC'11)*, Kyoto, Japan, pp. 1–6 (2011).
- [15] 青木勇太, 猿渡俊介, 渡辺 尚: 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, モバイルコンピューティングとユビキタス通信研究会, 2012-MBL-64, pp. 1–8 (2012).
- [16] Vanka, S., Srinivasa, S., Gong, Z., Vizi, P., Stamatiou, K. and Haenggi, M.: Superposition Coding Strategies: Design and Experimental Evaluation, *IEEE Transactions on Wireless Communication*, Vol. 11, No. 7, pp. 2628–2639 (2012).
- [17] Ganti, R. K., Gong, Z., Haenggi, M., han Lee, C., Srinivasa, S., Tisza, D., Vanka, S. and Vizi, P.: Implementation and Experimental Results of Superposition Coding on Software Radio, *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC'10)*, Cape Town, South Africa, pp. 1–5 (2010).
- [18] GNU Radio: <http://gnuradio.org/>.
- [19] Ettus Research: USRP (Universal Software Radio Peripheral), <http://www.ettus.com/>.
- [20] Szymon Jakubczak: How to build and run RawOFDM. <http://people.csail.mit.edu/szym/rawofdm/README.html/>.