

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の設計と評価

青木 勇太^{1,a)} 猿渡 俊介^{1,b)} 渡辺 尚^{1,c)}

概要: 本研究では、無線資源を効率的に利用する技術の1つとして、1回の送信で2端末に異なるデータを送信できる重畳符号化に着目し、重畳符号化を想定した無線通信メディアアクセス制御プロトコル TSPC-MAC (Traffic-aware Superposition Coding Media Access Control) を提案する。本稿では、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。重畳符号化を用いた TSPC-MAC では、L2 バッファのデータ量に基づいてファーストレイヤとセカンドレイヤに電力を割り当てる。さらに、トラフィックに応じて L2 バッファの待機時間を変更して、ユニキャスト通信と重畳符号化通信を切り替える。シミュレーション評価を行い、TSPC-MAC が、動的に電力を割り当てない既存方式と比較して 1.87 倍のスループットを実現することを示す。

キーワード: 重畳符号化, 無線 LAN, 電力割り当て, MAC プロトコル

Evaluation of Traffic-based Power Allocation for Superposition Coding on Wireless Networks

Abstract: In this paper, we focus on superposition coding which is one of technologies to use wireless resource efficiently and we propose wireless MAC protocol using superposition coding, TSPC-MAC (Traffic-aware Superposition Coding Media Access Control). Superposition coding transmits different data for two destinations simultaneously. We call data for one node as first layer and another one as second layer. TSPC-MAC allocates power to first layer and second layer based on the amount of data in L2 buffer. Furthermore, TSPC-MAC changes buffering time at L2 buffer and switches non-superposition coding and superposition coding. Simulation evaluation shows TSPC-MAC achieves high throughput.

Keywords: Superposition Coding, Wireless LAN, Power Allocation, MAC Protocol

1. はじめに

スマートフォンやデジタルカメラ、テレビなど身の回りのありとあらゆるものが急激にワイヤレス化されている。そのワイヤレス化を牽引しているのが IEEE 802.11 を中心とした無線 LAN 技術である。今後も増加し続ける新しいデバイスやサービスに対応するためには、有限の電波資源を高効率に利用する無線 LAN 技術が求められている。この流れに、GNU Radio/USRP [1, 2] や WARP [3] といっ

た簡単に最先端技術を実装可能なソフトウェア無線機が加わった。無線全二重方式 [4-7]、MIMO [8-11]、レートレス符号 [12-14]、逐次干渉除去 [15, 16]、重畳符号化 [17-22] などを組み込んだ新しい無線 LAN 方式が物理層と MAC 層の統合的な観点から実証主体で模索されている。

本稿では、重畳符号化を用いて無線 LAN の効率化を目指す。重畳符号化は、1つのアクセスポイントから2つの端末にデータを送る際に、2つの宛先への信号を重ね合わせて同時に送信する技術である。逐次干渉除去 [15, 16] を用いることで信号が分離できるため、1度の通信で2つの宛先に同時にデータを届けることができる。これまで、重畳符号化を用いてスループット性能を改善する研究がなされてきた [19-22]。しかしながら、重畳符号化はトラフィッ

¹ 静岡大学大学院情報学研究科
Faculty of Informatics, Shizuoka University, Johoku, Hamamatsu, Shizuoka 3-5-1, Japan

a) aoki@aurum.cs.inf.shizuoka.ac.jp

b) saru@inf.shizuoka.ac.jp

c) watanabe@inf.shizuoka.ac.jp

クによっては効率が悪くなる場合が存在するものの、既存の研究 [13, 20–22] では、バッファ内に常に最大量のフレームが存在することを前提にしている。

このような観点から、本稿では、バッファ内のデータ量に応じて重畳符号化を制御する無線通信メディアアクセス制御プロトコル TSPC-MAC (Traffic-aware Superposition Coding Media Access Control) を提案する。TSPC-MAC では、重畳符号化の効果を高めるために、次の 3 つの仕組みを提供する。1 つ目は、L2 バッファに滞留しているデータ量を基に非重畳符号化通信 (ユニキャスト通信) と重畳符号化通信を切り替えることである。2 つ目は、アクセスポイントと端末間の伝搬ロスと L2 バッファに滞留しているデータ量に応じて重畳符号化で割り当てる電力を決定することである。3 つ目は、トラフィックに応じて L2 バッファでの各フレームの待ち時間を動的に変更することである。TSPC-MAC をシミュレーションによって評価した結果、提案方式のスループットがユニキャスト通信と比べて最大 1.33 倍、既存の重畳符号化通信を用いた方式と比べて最大 1.87 倍向上することを明らかにする。

本稿の構成は以下の通りである。2 節では、関連研究に合わせて、既存の重畳符号化を用いた通信方式の問題点を議論する。3 節では、2 節での議論を基に、重畳符号化を想定した無線通信メディアアクセス制御プロトコル TSPC-MAC について述べる。4 節では、TSPC-MAC をシミュレーションによって評価する。最後に、5 節でまとめとする。

2. 関連研究

2.1 重畳符号化

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、各端末とアクセスポイントの伝搬損失の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 [16]。

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時に配送している。アクセスポイント A は、端末 B 宛てのフレームを変調した信号に高い電力を、端末 C 宛てのフレームを変調した信号に低い電力を割り当て、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。高い電力が割り当てられた信号をファーストレイヤ、低い電力が割り当てられた信号をセカンドレイヤと呼ぶ。端末 B が重畳フレームを受け取ると、セカンドレイヤはノイズとして扱われるため、ファーストレイヤの端末 B 宛てのフレームのみが復調される。端末 C が重畳フレームを受け取

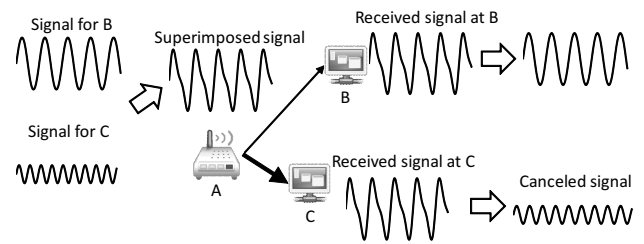


図 1 重畳符号化の動作例

ると、まず、ファーストレイヤである端末 B 宛てのフレームのみが復調される。端末 C は、受信した重畳フレームの信号から復調した端末 B のフレームの信号を取り除き、セカンドレイヤである端末 C 宛てのフレームを復調する。

N をノイズ、 p_B を端末 B 宛てフレームに割り当てる送信電力、 p_C を端末 C 宛てのフレームに割り当てる送信電力、 h_{AB} をアクセスポイント A と端末 B 間のチャネル、 h_{AC} をアクセスポイント A と端末 C 間のチャネルとする。シャノン = ハートレーの定理 [24] により、アクセスポイントから端末 B への通信容量 C_{AB} は、セカンドレイヤの信号がチャネル h_{AB} を通ってノイズとなるため、次の式で表わされる。

$$C_{AB} = \log \left(1 + \frac{p_B |h_{AB}|^2}{p_C |h_{AB}|^2 + N} \right) \quad [\text{bit/s/Hz}] \quad (1)$$

また、アクセスポイントから端末 C への通信容量 C_{AC} は、ファーストレイヤの信号を完全に除去できたと仮定すると、次の式で表わされる。

$$C_{AC} = \log \left(1 + \frac{p_C |h_{AC}|^2}{N} \right) \quad [\text{bit/s/Hz}] \quad (2)$$

文献 [13] では、端末 B と端末 C に対する電力割り当ての割合を 0.5:0.5 と固定している。ここで、 $|h_{AB}|^2 < |h_{AC}|^2$ 、アクセスポイント A の送信電力を P とおく。ユニキャスト通信では、アクセスポイント A が端末 B と端末 C に対して順々にデータを送信するため、ユニキャスト通信の通信容量 $C_{unicast}$ は、

$$C_{unicast} = \frac{1}{2} \left(\log \left(1 + \frac{P |h_{AB}|^2}{N} \right) + \log \left(1 + \frac{P |h_{AC}|^2}{N} \right) \right)$$

となる。重畳符号化通信では、アクセスポイント A が端末 B と端末 C に対して同時にデータを送信するため、文献 [13] における重畳符号化通信の通信容量 C_{spc} は、

$$C_{spc} = \log \left(1 + \frac{0.5 \cdot P |h_{AB}|^2}{0.5 \cdot P |h_{AB}|^2 + N} \right) + \log \left(1 + \frac{0.5 \cdot P |h_{AC}|^2}{N} \right)$$

となる。 $|h_{AB}|^2 < |h_{AC}|^2$ の環境下では $C_{unicast} < C_{spc}$ となり、重畳符号化通信の通信容量はユニキャスト通信の通信容量より大きいことが分かる。

このような重畳符号化の同時通信の特性を用いて、無線通信品質を改善するための研究がなされている [12, 13, 19–22]。

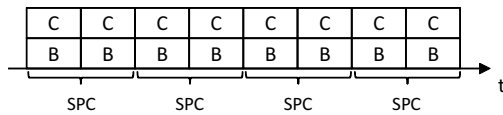


図 2 フルバッファ状態の L2 バッファ

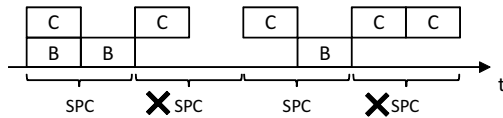


図 3 非フルバッファ状態の L2 バッファ

文献 [19–22] では、従来のコンテンションベース MAC プロトコルに対して重畳符号を適用することで、無線通信品質を改善している。例えば、重畳符号化を用いて RTS フレーム [23] に 2 つの宛先を付与して、同時に 2 つの宛先の通信チャネルを確保して 2 つの宛先に対するフレームも重畳符号化を用いて送信したり [19–21]、2 つの受信端末から送信元への CTS と ACK フレーム送信に逐次干渉除去を用いて同時受信したりすることで [21]、スループット性能を改善している。文献 [12, 13] では、送信端末は各フレームをレートレス符号と重畳符号化によって変調して、多重化して送信することで、時間あたりに送るビット数を増加している。

2.2 既存の重畳符号化を用いた通信方式の問題点

このように、重畳符号化を用いて無線通信品質を改善する研究 [13, 20–22] では、L2 バッファに常にフレームが存在しているフルバッファ状態で評価している。フルバッファ状態では、常に重畳符号で送信する機会があるため、重畳符号化を用いた通信の性能は必ずユニキャスト通信の性能を上回る。

しかしながら、実際のトラフィックは非フルバッファであり、重畳符号化を用いた場合でも、トラフィックや伝搬ロスによっては効率が悪くなる電力割り当てが行われる場合が存在し、ユニキャスト通信よりスループット性能が低下することがありうる。図 2 と図 3 に、アクセスポイント A の L2 バッファ状態を示す。長方形 B と長方形 C はそれぞれ、端末 B 宛と端末 C 宛のフレームである。図 2 は、L2 バッファに常に端末 B と端末 C のフレームのペアが存在するフルバッファ状態であるため、アクセスポイント A は常に重畳符号化を施すことができる。しかしながら、図 3 では、非フルバッファであるため、アクセスポイント A は端末 B と端末 C のフレームのペアが存在しない瞬間では重畳符号化を施すことができない。

具体的な例として、文献 [13] における動作を考える。図 1 の環境において、帯域幅が 20MHz、アクセスポイント A の送信電力が 10mW、 $|h_{AB}|^2 = -100\text{dB}$ 、 $|h_{AC}|^2 = -80\text{dB}$ 、 $N = -109\text{dBm}$ 、アクセスポイント A から端末 B に送る

データ量を 2,000bytes、アクセスポイント A から端末 C に送るデータ量を 1,000bytes とする。

まず、アクセスポイント A から端末 B と端末 C に対してユニキャスト通信で個別にデータを送った場合を考える。シャノン＝ハートレーの定理より、アクセスポイント A からアクセスポイント B への限界送信レートは約 127Mbps、アクセスポイント A からアクセスポイント C への限界送信レートは約 259Mbps となる。すなわち、全データを送り終わるのにかかる時間 $T_{unicast}$ は

$$T_{unicast} = \frac{2000 \times 8}{127 \times 10^6} + \frac{1000 \times 8}{259 \times 10^6} \approx 157 \times 10^{-6}$$

となり、約 157 μ 秒となる。

次に、アクセスポイント A から端末 B と端末 C に対して重畳符号化通信で同時にデータを送った場合を考える。文献 [13] では、2 つのデータに対して同じ電力を割り当てるため、端末 B 宛てのフレームに割り当てる電力 p_B と端末 C 宛てのフレームに割り当てる電力 p_C をそれぞれ 5mW とする。式 (1) と式 (2) より、アクセスポイント A から端末 B への限界送信レートは約 19.6Mbps、アクセスポイント A から端末 C への限界送信レートは約 239Mbps となる。すなわち、端末 B 宛てのフレームを送り終わるのにかかる時間 T_{AB} は

$$T_{AB} = \frac{2000 \times 8}{19.6 \times 10^6} \approx 814 \times 10^{-6}$$

となり、約 814 μ 秒となる。また、端末 C 宛てのフレームを送り終わるのにかかる時間 T_{AC} は

$$T_{AC} = \frac{1000 \times 8}{239 \times 10^6} \approx 33.5 \times 10^{-6}$$

となり、約 33.5 μ 秒となる。重畳符号化通信で、全データを送り終わるのにかかる時間 T_{SPC} は、2 つのフレームを同時に送信するため、

$$T_{SPC} = \max(T_{AB}, T_{AC}) \approx 814 \times 10^{-6}$$

となり、約 814 μ 秒となる。これは明らかにユニキャスト通信の 157 μ 秒よりも大きい。

3. TSPC-MAC(Traffic-based Superposition Coding MAC)

2 節での議論を基に、重畳符号を用いた無線通信における MAC プロトコル TSPC-MAC(Traffic-aware Superposition Coding MediaAccess Control) を設計した。

3.1 TSPC-MAC 概要

2.2 節で述べたように、重畳符号化を用いたとしても、ファーストレイヤとセカンドレイヤに適切に電力を割り当てなければ無線通信性能が改善できるとは限らない。さらに、フルバッファを前提としたアルゴリズムでは、L2 バッ

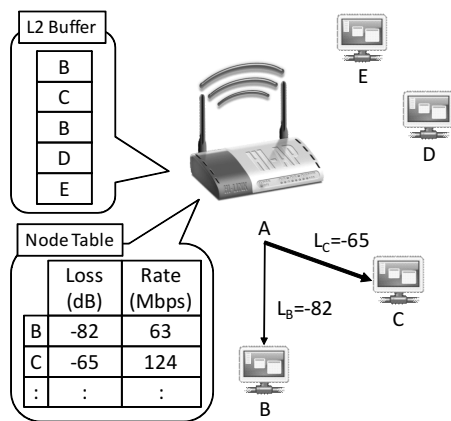


図 4 TSPC-MAC の全体像

ファにフレームが少ない場合に無線通信性能が低下する。TSPC-MAC では、トラフィック量と伝搬損失に基づいたアクセスポイントによる電力割り当てと、L2 バッファ待機時間の変更、ユニキャスト通信と重畳符号化通信との切り替えによって無線通信効率を向上する。

図 4 に TSPC-MAC の全体像を示す。TSPC-MAC では、インターネットと有線接続されたアクセスポイントと、重畳符号化に対応した端末を想定している。アクセスポイントは L2 バッファと端末テーブルを具備する。L2 バッファは、アクセスポイントが各端末に配送すべきフレームを一時的に保存しているバッファである。端末テーブルは、アクセスポイントから各端末に対するトラフィック量と、アクセスポイントから各端末にフレームを送信する際に生じる伝搬損失を各宛先毎に管理したテーブルである。端末テーブルの詳細は 3.2 節で述べる。

アクセスポイント A は端末テーブルによって、アクセスポイント A と端末 B、アクセスポイント A と端末 C の各通信路の伝搬損失と、アクセスポイント A の端末 B と端末 C に対するトラフィック量を記録する。端末テーブルに記録されている各宛先毎の伝搬損失とトラフィック量から、アクセスポイントがフレームをバッファする時間を算出する。算出したバッファ時間と L2 バッファ内のデータ量に基づいて重畳符号化を用いるかどうかの判定や、重畳符号化を用いる場合のファーストレイヤとセカンドレイヤに割り当てる電力を決定する。3.3 節にて L2 バッファを利用した電力割り当て手法について、3.4 節にてバッファ待機時間を調節する手法について述べる。

アクセスポイントの宛先端末が複数台ある場合、L2 バッファ内のフレームの宛先に基づいて重畳符号化データを選択する。例えば、図 4 では、L2 バッファ内に “B, C, B, D, E” のデータが存在する。TSPC-MAC はデータを受信した順に 2 つの宛先に対するデータの重畳符号化を試みる。まず、“B, C, B” を重畳符号化して、次に “D, E” とさらに受信したデータとを重畳符号化する。

3.2 端末テーブル

端末テーブルは、アクセスポイントと各端末間の伝搬損失と、アクセスポイントの端末に対するトラフィック量を保持しているテーブルである。伝搬損失は、3.3 節の L2 バッファを利用した電力割り当て手法で重畳符号化を行うかどうかの判定や、重畳符号化を行う場合のファーストレイヤとセカンドレイヤに割り当てる電力を決定するのに利用する。トラフィック量は、3.4 節のアクセスポイント A が L2 バッファにバッファする時間を決定するのに利用する。

端末テーブルに記録する伝搬損失は以下の手順で算出する。アクセスポイント A は、通常時にノイズ電力 N (mW) を取得する。アクセスポイント A から端末 B に対してフレームを送信した場合、フレームを受け取った端末は、受信確認のためにアクセスポイントに対して ACK フレームを返信する。この時、端末 B は ACK フレームに対して ACK フレームを送信する際の送信電力 $P_{send,BA}$ (mW) を含める。ACK フレームを受信したアクセスポイント A は、ACK フレームを受信した際の受信電力 $P_{receive,BA}$ (mW) を取得する。 $P_{send,BA}$ と $P_{receive,BA}$ を用いて、アクセスポイント A と端末 B 間の伝搬損失 L_B を次の式で算出する。

$$L_B = \frac{P_{send,BA}}{P_{receive,BA}}$$

例えば、端末 B が 10dBm で ACK フレームを返信して、アクセスポイント A が受信した ACK フレームの受信電力が -70dBm だった場合、アクセスポイント A と端末 B 間の伝搬損失は $\frac{1}{10^8}$ (-80dB) となる。端末テーブルの伝搬損失は各端末から ACK フレームを受信する度に更新する。データを送った後に ACK フレームを受信できなかった場合には端末テーブルからその端末の伝搬損失を削除する。

端末テーブルに記録するトラフィック量は以下の手順で算出する。アクセスポイント A は、外部からフレームを受信する度に、端末テーブル上の各端末に対する単位時間当たりのトラフィック量を更新して記録する。計測期間 T_m (s) と端末 B に対するデータ量 D_B (bits) を用いて、単位時間当たりの端末 B へのトラフィック量 r_B (bps) を次の式で算出する。

$$r_B = \frac{D_B}{T_m}$$

アクセスポイント A は、算出したトラフィック量 r_B を端末テーブルに対して記録する。例えば、0.02s の間に端末 B に対するデータ量が 100,000bit であった場合にはトラフィック量 r_B は $\frac{100000}{0.02} = 5.0Mbps$ となる。

3.3 L2 バッファを利用した電力割り当て手法

L2 バッファを利用した電力割り当て手法は、アクセスポイントから各端末への通信に重畳符号化を用いるかどうかの判定と、重畳符号化を用いる場合にファーストレイヤ

とセカンドレイヤに割り当てる電力を決めるための仕組みである。TSPC-MAC では、3.2 節の端末テーブル、シャノン=ハートレーの定理に基づいた通信容量、L2 バッファ内に滞留している各端末宛でのデータ量から判定を行う。なお、本稿では、シャノン限界に基づいて計算しているが、実際には文献 [14] でも議論されている通り、符号化による損失を考慮すべきことに注意されたい。

アクセスポイント A の送信電力 P_{send} (mW), 送信帯域幅 W (Hz) の時に、アクセスポイント A から端末 B に D_B (bytes), アクセスポイント A から端末 C に D_C (bytes) のフレームを送信する場合を考える。アクセスポイント A から端末 B への伝搬損失を L_B , アクセスポイント A から端末 C への伝搬損失を L_C とする。

アクセスポイント A から端末 B と端末 C にそれぞれユニキャスト通信でデータを送信した場合の通信容量をそれぞれ $S_{unicast,AB}$ (bps), $S_{unicast,AC}$ (bps) とすると、 D_B (bytes) と D_C (bytes) のデータを送るのに必要な時間 $T_{unicast}$ (秒) は次の式で表わされる。

$$T_{unicast} = \frac{D_B}{S_{unicast,AB}} + \frac{D_C}{S_{unicast,AC}} \quad (3)$$

また、アクセスポイント A から端末 B への通信容量 $S_{unicast,AB}$ (bps) と、アクセスポイント A から端末 C への通信容量 $S_{unicast,AC}$ (bps) は、それぞれ以下の式で表わされる。

$$\begin{aligned} S_{unicast,AB} &= W \log_2 \left(1 + \frac{P_{send} L_B}{N} \right) \\ S_{unicast,AC} &= W \log_2 \left(1 + \frac{P_{send} L_C}{N} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

アクセスポイント A から端末 B と端末 C にそれぞれ重畳符号化を用いてデータ送信をした場合の通信容量をそれぞれ $S_{spc,AB}$, $S_{spc,AC}$ とすると、 D_B (bytes) と D_C (bytes) のデータを送るのに必要な時間 T_{spc} (秒) は次の式で表わされる。

$$T_{spc} = \max \left(\frac{D_B}{S_{spc,AB}}, \frac{D_C}{S_{spc,AC}} \right) \quad (5)$$

また、アクセスポイント A から端末 B への通信容量 $S_{spc,AB}$ (bps) と、アクセスポイント A から端末 C への通信容量 $S_{spc,AC}$ (bps) は、ファーストレイヤに割り当てる電力を P_{1st} (mW), セカンドレイヤに割り当てる電力を P_{2nd} (mW) とすると、それぞれ以下の式で表わされる。

$$\begin{aligned} S_{spc,AB} &= W \log_2 \left(1 + \frac{P_{1st} L_{AB}}{P_{2nd} L_{AB} + N} \right) \\ S_{spc,AC} &= W \log_2 \left(1 + \frac{P_{2nd} L_{AC}}{N} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

この時、 $\max \left(\frac{D_B}{S_{spc,AB}}, \frac{D_C}{S_{spc,AC}} \right)$ を最小化することで、ファーストレイヤとセカンドレイヤの送信時間を最小化して単位時間当たりの送信データ量を最大化することができる。アクセスポイント A の送信電力は P_{send} であるため、ファース

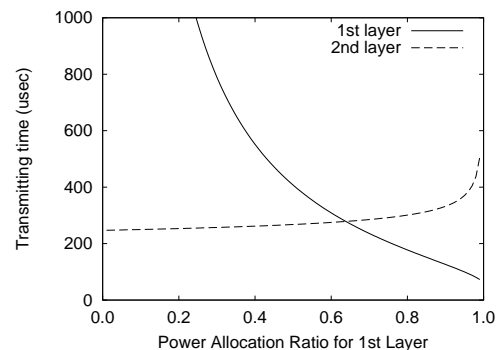


図 5 ファーストレイヤへの電力割り当てに対する送信時間

ストレイヤに割り当てる電力 P_{1st} とセカンドレイヤに割り当てる電力 P_{2nd} を足した電力が P_{send} になる必要がある。すなわち、 P_{1st} は、

$$P_{1st} = P_{send} - P_{2nd} \quad (7)$$

となる。式 (5), 式 (6), 式 (7) より、 $S_{spc,AB}$ と $S_{spc,AC}$ は、割り当てる電力の割合によってトレードオフの関係にあることが分かる。例として、アクセスポイント A の送信電力 P_{send} が 10mW, 送信帯域幅 W が 20MHz, アクセスポイント A から端末 B に送るデータサイズ D_B が 1,000bytes, アクセスポイント A から端末 C に送るデータサイズ D_C が 8,000bytes, アクセスポイント A から端末 B への伝搬損失 L_B が $\frac{1}{10^{10}}$ (-100dB), アクセスポイント A から端末 C への伝搬損失 L_C が $\frac{1}{10^8}$ (-80dB) の場合を考える。図 5 にファーストレイヤとセカンドレイヤに割り当てる電力の割合を変えた場合の各々のデータ送信時間 $\frac{D_B}{S_{spc,AB}}$ にあたる 1st layer と $\frac{D_C}{S_{spc,AC}}$ にあたる 2nd layer を示す。横軸は、アクセスポイント A から端末 B への送信に割り当てた電力を表しており、残りの電力がアクセスポイント A から端末 C への送信に割り当てられている。図 5 における 1st layer と 2nd layer の交点が $\max \left(\frac{D_B}{S_{spc,AB}}, \frac{D_C}{S_{spc,AC}} \right)$ を最小化する電力の割合となる。

この電力の割合を、式 (5) と式 (6) に代入して重畳符号化を用いてデータを送った場合のデータ送信時間 T_{spc} を算出する。 T_{spc} がユニキャスト通信で送った場合のデータ送信時間 $T_{unicast}$ よりも大きい場合は、ユニキャスト通信でデータを送信する。 T_{spc} が $T_{unicast}$ よりも小さかった場合には、重畳符号化を用いてデータを送信する。重畳符号化を用いてデータを送信する場合、式 (5) と式 (6) を用いて、 T_{spc} を最小化する P_{1st} と P_{2nd} を以下の式によって求める。

$$(P_{1st}, P_{2nd}) = \operatorname{argmin}(T_{spc})$$

3.4 バッファ時間調節手法

バッファ時間調節手法は、L2 バッファでフレームを保持する時間を調節することで、重畳符号化の効率を高めるた

めの仕組みである．まず，端末テーブルに各端末に送信する場合の伝搬ロスが記録されているため，ファーストレイヤとセカンドレイヤの通信容量 $S_{spc,AB}$, $S_{spc,AC}$ を式 (6) を用いて算出する．算出した $S_{spc,AB}$, $S_{spc,AC}$ を用いて，重畳符号化を用いて送信した場合に送信時間を最小化できる重畳データ量 D_{1st} (bits) と D_{2nd} (bits) を次の式で求める．

$$(D_{1st}, D_{2nd}) = \operatorname{argmin} \left(\max \left(\frac{D_{1st}}{S_{spc,AB}}, \frac{D_{2nd}}{S_{spc,AC}} \right) \right) \quad (8)$$

次に，得られた D_{1st} と D_{2nd} を用いて，ファーストレイヤとセカンドレイヤ用にそれぞれ D_{1st} (bits) , D_{2nd} (bits) 分だけのデータが L2 バッファに溜まる時間 T_{buffer} を算出する．まず，3.2 節の端末テーブルから，ファーストレイヤとセカンドレイヤにあたる端末のトラフィック量 r_{1st} , r_{2nd} を取得する．バッファ時間 T_{buffer} は，式 (8) で得られた D_{1st} と D_{2nd} がバッファに溜まる時間であるため，

$$T_{buffer} = \max \left(\frac{D_{1st}}{r_{1st}}, \frac{D_{2nd}}{r_{2nd}} \right)$$

となる．

4. 性能評価

3 節で示した TSPC-MAC について，スループットをシミュレーションによって評価した．

4.1 評価環境

評価トポロジとして，エリアの中心にアクセスポイント，アクセスポイントの周囲に端末を配置した．アクセスポイントはトラフィックに基づいて，ランダムに端末を選択して送信する．トラフィックはポアソン分布にしたがって発生して，通信環境は AWGN (Additive White Gaussian Noise) 環境を想定した．通信チャネルのノイズは -109dB，バッファサイズは 30KBytes，1 回のシミュレーションあたりのパケット発生数を 5000 パケットとした．

TSPC-MAC の性能を相対的に評価するために，以下の 3 つの方式について性能を比較した．

(1) Unicast

本方式は全ての通信をユニキャスト通信する手法である．重畳符号化を用いない方式の基準である．

(2) SPC_{0.5}

本方式は，文献 [13] のようにファーストレイヤとセカンドレイヤへの電力を 0.5:0.5 で割り当て，バッファ時間を 200us に固定した方式である．重畳符号化通信とユニキャスト通信の切り替え，動的な電力割り当て，L2 バッファ時間調整を行わない場合の基準である．

(3) TSPC-MAC

本方式は，3 節で示した提案方式である．重畳符号化通信とユニキャスト通信を切り替えると同時に，ファーストレイヤとセカンドレイヤへの電力割り当て手法と

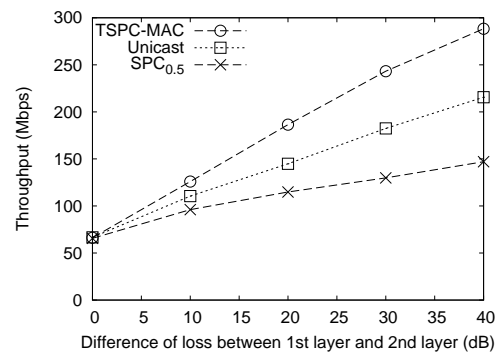


図 6 伝搬ロス差に対するスループット (2 端末固定配置，トラフィック比 0.2，総トラフィック量 300Mbps)

バッファ時間調節手法を適用した方式である．

4.2 伝搬ロス差に対するスループット

重畳符号化はファーストレイヤとセカンドレイヤの伝搬ロス差を利用して同時に 2 つのフレームを重ね合わせて 1 つのフレームとして送信する技術である．TSPC-MAC の基本性能を確認するために，ファーストレイヤとセカンドレイヤの伝搬ロス差に対する TSPC-MAC のスループットを評価した．本稿におけるスループットとは，一定期間内に受信端末が受信したトラフィック量である．ファーストレイヤ側の伝搬ロスを -100dB に固定して，セカンドレイヤ側の伝搬ロスを変化させた場合のスループットを算出した．トラフィック比は 0.2，トラフィック量は 300Mbps，伝搬ロスに基づいて 2 端末を配置した．

図 6 に，伝搬ロス差を変化させた場合のスループットを示す．図 6 より，次の 2 つのことが分かる．

- (1) TSPC-MAC のスループットが 3 方式の中で最も高く，伝搬ロス差が大きくなるほどスループット向上が顕著である．伝搬ロス差が 30dB のとき，TSPC-MAC のスループットは SPC_{0.5} のスループットの約 1.87 倍，Unicast のスループットの約 1.33 倍である．重畳符号化とユニキャスト通信の切り替えや，L2 バッファを利用した電力割り当て手法，バッファ時間調節手法が有効に働いているからだと考えられる．
- (2) SPC_{0.5} のスループットは 3 方式の中で最も低い．伝搬ロス差が大きくなることで，重畳符号化によるスループット向上が大きくなるものの，適切な電力割り当てが行われていないからだと考えられる．

4.3 トラフィック比に対するスループット

4.2 節では，端末を固定して各端末間の伝搬ロスに差がある場合を評価した．しかしながら，実際の環境では各端末間の伝搬ロスに差があるとは限らない．このような観点から，端末をアクセスポイントの周囲にランダムに配置して，ファーストレイヤとセカンドレイヤに割り当てるトラフィック比を変化させた場合のスループットを算出した．

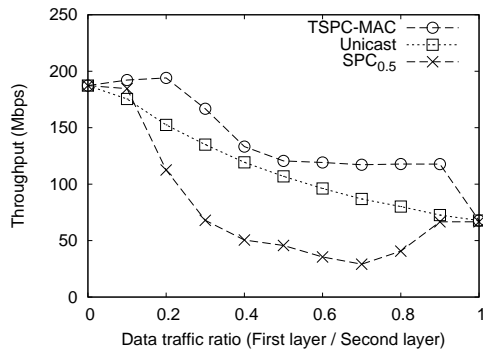


図 7 トラフィック比に対するスループット (2 端末ランダム配置, 総トラフィック量 300Mbps)

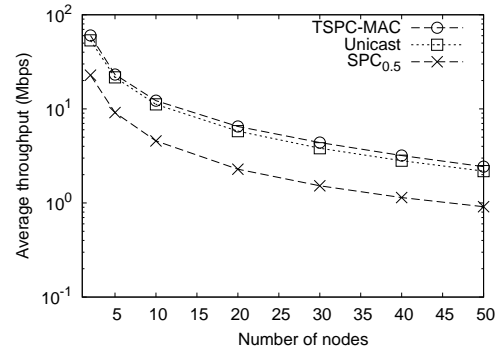


図 8 端末数に対する平均スループット

総トラフィック量は 300Mbps, シミュレーションの試行回数は 10 回である。

図 7 に, トラフィック比に対するスループットを示す。図 7 より, 次の 5 つのことがわかる。

- (1) TSPC-MAC は 3 方式の中で最もスループットが高い。トラフィック比が 0.2 のとき, TSPC-MAC のスループットは SPC_{0.5} のスループットの 1.72 倍, Unicast のスループットの 1.27 倍である。TSPC-MAC では, 重畳符号化通信とユニキャスト通信の切り替え, L2 バッファを利用した電力割り当て手法, バッファ時間調節手法が有効に働いているからだと考えられる。
- (2) トラフィック比が 0.2 ~ 0.8 において SPC_{0.5} のスループットが 3 方式の中で最も低い。SPC_{0.5} では重畳符号化を行うものの, 適切な電力をファーストレイヤとセカンドレイヤに対して割り当てていないためであると考えられる。
- (3) トラフィック比が 0.1 における 3 方式のスループットには TSPC-MAC (192 Mbps) > SPC_{0.5} (184 Mbps) > Unicast (175 Mbps) の関係である。セカンドレイヤへのトラフィック量が大きいので, SPC_{0.5} であっても重畳符号化によってユニキャスト通信よりスループットが高くなっているのだと考えられる。
- (4) トラフィック比が 0.5 において TSPC-MAC のスループットは Unicast のスループットに近づく。トラフィック比が 0.5 の場合は, ファーストレイヤとセカンドレイヤに同程度のデータ量が存在する機会が多い。2.2 節から分かるように, 伝搬ロス差に合致したトラフィック量でない場合には重畳符号化効果が減少するため, ユニキャスト通信での送信が多く発生しているからだと考えられる。
- (5) ファーストレイヤにトラフィックが集中するに伴って Unicast のスループットが低下する。ファーストレイヤでは, 伝搬ロスが大きい事に起因して送信レートが低く, セカンドレイヤでは伝搬ロスが小さいために送信レートが高い。ファーストレイヤにトラフィックが集中することで, 低い送信レートで送られるフレーム

が増加するため, スループットが低下していると考えられる。

4.4 端末数に対するスループット

これまでの評価では, 端末数は 2 台での評価であった。しかしながら, 実際の環境では, 端末は複数台存在しうる。このような観点から, 端末が複数存在した場合のスループットを評価した。各端末をアクセスポイントの周囲にランダムに配置した。試行回数は 10 回とした。トラフィックはポアソン分布に従って合計 300Mbps 発生して, 宛先は各フレーム毎にランダムに切り替える。

図 8 に, アクセスポイント A が複数の端末に対してデータを送信する場合の, 端末数に対する平均スループットを示す。図 8 より, 次の 2 つのことが分かる。

- (1) TSPC-MAC の平均スループットは 3 方式の中で最も高い。宛先端末の数が増加する場合でも, TSPC-MAC の重畳符号化とユニキャスト通信の切り替え, L2 バッファを利用した電力割り当て手法, バッファ時間調節手法が有効に働いているからだと考えられる。
- (2) 端末数が増加するにつれ, TSPC-MAC の平均スループットの向上が小さくなる。現在の TSPC-MAC では, 3.1 節で述べたように, L2 バッファの先頭の 2 つ宛先のみを選択して重畳しているため, 端末数が増えた場合には選択された 2 つの宛先で重畳できるデータがバッファに十分に存在しないからだと考えられる。

5. おわりに

本稿では, 無線通信へ重畳符号化通信を適用させるために, 重畳符号化 MAC プロトコル TSPC-MAC を提案した。性能評価では, 複数のシナリオを基に TSPC-MAC のスループット評価と遅延評価を行った。評価結果より, データ要求が大きい環境と非対称な伝搬損失における環境で, 電力割り当てを行わない既存方式と比較して最大 1.87 倍のスループット向上を示した。現在, GNU Radio/USRP (Universal Software Radio Peripheral) を用いた実機実験を進めている [25]。

謝辞

本研究は科研費基盤研究 A (24240009) の助成を受けて行った。本研究に際して、様々なお指導を頂きました上智大学理工学部 萬代雅希 准教授に深謝いたします。

参考文献

- [1] GNU Radio Official website, <http://www.gnu.org/>
- [2] Ettus Research. Ettus Research A National Instruments Company. USRP, <http://ettus.com/>
- [3] Rice University. Rice University Open-Access Research Platform. WARP, <http://warp.rice.edu/trac/>
- [4] E. Everett, M. Duarte, C. Dick, and A. Sabharwal, "Empowering full-duplex wireless communication by exploiting directional diversity," in *Conference Record of the Forty Fifth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers (ASILOMAR)*, November 2011, pp. 2002–2006.
- [5] A. Sahai, G. Patel, and A. Sabharwal, "Pushing the Limits of Full-duplex: Design and Real-time Implementation," Rice University Technical Report TREE1104, January 2011, pp. 1–12.
- [6] M. Jain, J. I. Choi, T. Kim, D. Bharadia, S. Seth, K. Srinivasan, P. Levis, S. Katti, and P. Sinha, "Practical, real-time, full duplex wireless," in *Proceedings of the ACM International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom)*, September 2011, pp. 301–312.
- [7] M. Duarte and A. Sabharwal, "Full-duplex wireless communications using off-the-shelf radios: Feasibility and first results," in *Conference Record of the Forty Fourth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers (ASILOMAR)*, November 2010, pp. 1558–1562.
- [8] D. J. Love, R. W. Heath Jr., and T. Strohmer, "Grassmannian beamforming for multiple-input multiple-output wireless systems," *IEEE Transactions on Information Theory*, October 2003., vol. 49, no. 10, pp. 2735–2747
- [9] H. V. Balan, R. Rogalin, A. Michaloliakos, K. Psounis, and G. Caire, "Achieving High Data Rates in Distributed MIMO Systems," in *Proceedings of the ACM International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom)*, August 2012, pp. 41–52.
- [10] C. Shepard, H. Yu, N. Anand, L. E. Li, T. Marzetta, Y. R. Yang, and L. Zhong, "Argos: Practical Base Stations with Large-scale Multi-user Beamforming," in *Proceedings of the ACM International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom)*, August 2012, pp. 53–64.
- [11] E. Aryafar, M. A. Khojastepour, K. Sundaresan, S. Rangarajan, and M. Chiang, "MIDU: Enabling MIMO Full Duplex," in *Proceedings of the ACM International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom)*, August 2012, pp. 257–268.
- [12] A. Gudipati and S. Katti, "Strider: automatic rate adaptation and collision handling," in *Proceedings of the ACM Special Interest Group on Data Communication (SIGCOMM)*, August 2011, pp. 158–169.
- [13] A. Gudipati, S. Pereira, and S. Katti, "AutoMAC: rateless wireless concurrent medium access," in *Proceedings of the ACM International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom)*, August 2012, pp. 5–16.
- [14] J. Perry, P. A. Iannucci, K. Fleming, H. Balakrishnan, and D. Shah, "Spinal Codes," in *Proceedings of the ACM Special Interest Group on Data Communication (SIGCOMM)*, October 2012, pp. 49–60.
- [15] D. Halperin, T. Anderson, and D. Wetherall, "Taking the sting out of carrier sense: interference cancellation for wireless LANs," in *Proceedings of the ACM International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom)*, September 2008, pp. 339–350.
- [16] D. Tse and P. Viswanath, "Fundamentals of wireless communication," Cambridge University Press, May 2005, pp. 228–278.
- [17] R. K. Ganti, Z. Gong, M. Haenggi, C. Lee, S. Srinivasa, D. Tisza, S. Vanka, and P. Vizi, "Implementation and Experimental Results of Superposition Coding on Software Radio," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC)*, May 2010, pp. 1–5.
- [18] S. Vanka, S. Srinivasa, Z. Gong, P. Vizi, K. Stamatiou, and M. Haenggi, "Superposition Coding Strategies: Design and Experimental Evaluation," *IEEE Transactions on Wireless Communication*, July 2012, vol. 11, no. 7, pp. 2628–2639.
- [19] L. E. Li, R. Alimi, R. Ramjee, J. Shi, Y. Sun, H. Viswanathan, and Y. R. Yang, "Superposition coding for wireless mesh networks," in *Proceedings of the ACM International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom)*, September 2007, pp. 330–333.
- [20] S. Xueyuan and S. Chan, "High-Throughput Routing with Superposition Coding and Successive Interference Cancellation," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC)*, June 2011, pp. 1–6.
- [21] L. Li, R. Alimi, R. Ramjee, H. Viswanathan, Y. R. Yang, "muNet: Harnessing Multiuser Capacity in Wireless Mesh Networks," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM)*, April 2009, pp. 2876–2880.
- [22] J. Feng, R. Zhang, and L. Hanzo, "Auction-Style Cooperative Medium Access Control," in *Proceedings of the IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall)*, September 2011, pp. 1–5.
- [23] G. Bianchi, L. Fratta, and M. Oliveri, "Performance evaluation and enhancement of the CSMA/CA MAC protocol for 802.11 wireless LANs," in *Proceedings of the IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, October 1996, pp. 392–396.
- [24] C. E. Shannon, "A mathematical theory of communication," *The Bell System Technical Journal*, July/October 1948, vol.27, no. 3, pp. 379–423.
- [25] 山崎景太, 青木勇太, 猿渡俊介, 渡辺尚, "GNU Radio を用いた重畳符号化の初期的実装," 電子情報通信学会 ソサイエティ大会, September 2012, B-17-5.