

IEEE802.11 MAC 拡張による高信頼 1 対 2 通信方式の 無線ネットワークコーディングへの適用

佐藤 卓哉^{1,a)} 明田 修平^{1,b)} 斎藤 彰一^{2,c)} 毛利 公一^{1,d)} 瀧本 栄二^{1,e)}

概要: 近年、無線マルチホップネットワーク対し、ネットワークコーディングを適用する研究が行われている。既存研究である PiggyCode では、TCP 通信に対し、同一フロー内の Data パケットと ACK パケットを符号化し、同時に送信することで、パケットの送信回数削減し、スループットの向上を可能とする。前述した PiggyCode を使用する場合、符号化したパケットを送信する方法として、ブロードキャストまたはユニキャストとプロミスキャスモードを使用したスニフingの方式が考えられる。しかし、これらの方法では、MAC 層における ARQ 制御が不十分であるという課題がある。そこで、これまで先行研究として提案してきた、高信頼な 1 対 2 通信であるデュアルキャストを使用し、上記の課題の解決を図る。本論文では、シミュレータにデュアルキャストと PiggyCode を実装し、その性能を評価することで手法の有効性を検証する。

キーワード: 無線マルチホップネットワーク, IEEE802.11 MAC, DCF, ネットワークコーディング

Apply of Reliable 1 to 2 Communication Scheme to Wireless Network Coding by IEEE 802.11 MAC Extension

SATO TAKUYA^{1,a)} AKETA SHUHEI^{1,b)} SAITO SHOICHI^{2,c)} MOURI KOICHI^{1,d)} TAKIMOTO EIJI^{1,e)}

Abstract: In recent years, there is research on applying network coding to wireless multi hop network. The existing study PiggyCode can reduce the number of packet transmissions and improve throughput by encoding Data packet and ACK packet in the same TCP flow and transmitting them at the same time. When wireless devices use the PiggyCode, they need to use a method of Broadcast or Unicast and promiscuous mode as a method of transmitting the encoded packet. However, there is a problem that the ARQ mechanism is insufficient in these method. Thus, we use Dualcast that highly reliable 1 to 2 communication, that proposed as a previous research and solve these problem. In this paper, we confirm the effectiveness of Dualcast by implementing Dualcast and PiggyCode in the simulator and evaluating its performance.

Keywords: Wireless multi hop network, IEEE802.11 MAC, DCF, Network coding

1. はじめに

近年、災害時などの通信インフラを一時的に構築する手段として、無線マルチホップネットワークが注目されている。無線マルチホップネットワークは、無線端末を相互に接続し構成されるネットワークである。無線マルチホップネットワーク内の端末は通信を中継する役割を担っており、直接通信することのできない端末に対しても、通信を

¹ 立命館大学
滋賀県草津市野路東

² 名古屋工業大学
愛知県名古屋市昭和区御器所町

a) tsato@asl.cs.ritsumei.ac.jp

b) saketa@asl.cs.ritsumei.ac.jp

c) shoichi@nitech.ac.jp

d) mouri@asl.cs.ritsumei.ac.jp

e) takimoto@asl.cs.ritsumei.ac.jp

他の端末に中継させることで通信可能である。一般的な通信サービスの多くがトランスポート層のプロトコルとして TCP (Transmission Control Protocol) を使用している。TCP は、End-End 間で ACK パケットによる確認応答を行い、信頼性の高い通信を実現する。しかし、無線マルチホップネットワークにおいて TCP 通信を行う場合、半二重リンクである無線チャネルの特性上、ACK パケットの返信によるパケットの通信回数の増加は、スループット低下の要因となる。既存研究である PiggyCode[1] では、無線マルチホップネットワークにおける TCP 通信に対し、同一フロー内の Data パケットと ACK パケットへネットワークコーディングを適用することで、上記の問題を解決している。PiggyCode では、符号化を施したパケット (以下、符号化パケット) を同時に 2 台の端末へ送信する必要がある。IEEE802.11 では、複数の端末にパケットを送信する場合、ブロードキャストを用いる方法と、送信フレームを無差別に受信するプロミスキャストモードとユニキャストとを併用する方法 (以下、スニッフィング方式) が考えられる。しかし、これらの通信方式は、ARQ が有効でない、もしくは ARQ が有効となる通信相手が 1 台に限られるため信頼性が低い。

そこで、著者らはこれまで、既存研究に対し、符号化されたパケットを送信するために、高信頼な 1 対 2 通信を実現するデュアルキャスト [2] を提案してきた。デュアルキャストは、IEEE802.11 MAC ヘッダの未使用フィールドを利用することで、2 つの宛先端末を指定して Data フレームを送信することができる。さらに、IEEE802.11 MAC の DCF を拡張し、2 台の宛先端末との間で ARQ 制御を可能とすることで、ユニキャストと同等の信頼性を持つ 1 対 2 通信を実現している。本論文では、PiggyCode の符号化パケットの送信方式としてデュアルキャストを適用し、その適性について検証する。

以下、2 章でデュアルキャストの設計について述べ、3 章で PiggyCode の概要について述べる。4 章で無線ネットワークコーディングへデュアルキャストを適用した場合のシミュレーション評価について述べ、5 章で関連研究について述べる。

2. デュアルキャスト

デュアルキャストは、送信端末が 2 台の受信端末を指定して Data フレームを送信し、2 台の受信端末からそれぞれ ACK フレームを受信することで到達確認を行う。さらに、フレームロスなどの影響で 2 台の受信端末から ACK フレームを受信できなければ当該フレームを再送する ARQ 機能を備えており、1 対 2 通信においてもユニキャストと同等の信頼性を実現する。デュアルキャストでは、IEEE802.11 MAC に対して以下の 3 点の拡張を行う。

- 2 つの宛先を同時に指定したフレームの送受信

- ACK フレームの送信タイミングの調整
- Data フレームの再送制御

以下、本章では、これらの拡張について概説する。なお、本論文では、デュアルキャストにおいて、送信端末を R、2 台の受信端末をそれぞれ A、B と表記する。

2.1 2 つの宛先を同時に指定したフレームの送受信

デュアルキャストでは、2 台の受信端末へ Data フレームを送信するため、4 つの Address フィールドを持つ IEEE802.11 MAC ヘッダを使用する。R は、送信する Data フレームの IEEE802.11 MAC ヘッダ内の Type/SubType フィールドの予約ビット列を 1 つ使用し、デュアルキャストで送信された Data フレームであることを明示する。そして、Address1 フィールドに 1 台目の MAC アドレスを指定し、Address4 フィールドを 2 台目の MAC アドレスを指定する。また、ヘッダ内の duration フィールドには、当該フレーム受信から当該 DCF 終了までの時間をマイクロ秒で格納する。これにより、当該フレームを受信した周辺端末は当該 DCF の終了時間を知ることができ、それまでを NAV (Network Allocation Vector) として待機する。duration フィールドへ格納する値は、後述する WFA (Wait For Ack) 期間を 2 倍した値である。

デュアルキャストを受信するとき、A と B は Data フレームの IEEE802.11 MAC ヘッダの Type/SubType フィールドからフレームの種類と通信方式を識別する。デュアルキャストによる Data フレームの場合、Address1 と Address4 フィールドに対して、自身の MAC アドレスと比較する。このとき、どちらか一方の Address フィールドと自身の MAC アドレスが一致した場合、当該フレームを受信する。

2.2 ACK フレームの送信タイミングの調整

Data フレームを受信した 2 台の受信端末は、互いの ACK フレームを衝突させないため、図 1 のように 2 台の端末のうち片方の端末が適切な時間差を設けて送信する。なお、図 1 では、Address1 フィールドと Address4 フィールドにそれぞれ A と B を指定して R がデュアルキャストを行ったものとする。ACK フレームの送信順序は、Address1 フィールドと Address4 フィールドのどちらに自身の MAC アドレスが格納されているかにより決定する。また、ACK フレームには duration フィールドが定義されており、当該 ACK フレーム受信後から当該 DCF 終了までの時間をマイクロ秒で格納する。デュアルキャストでは、ACK フレームの duration フィールドも Address フィールドの位置関係に基づき、格納する値を適宜決定する。本論文では、ACK フレームの送信順序と duration フィールドへの格納値を以下のように決定する。

- Address1 フィールドに MAC アドレスが格納されて

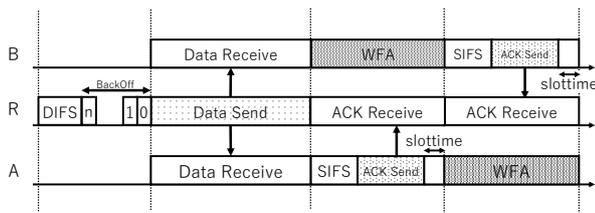


図 1: デュアルキャストの通信過程

いる受信端末は、ACK フレームの送信を先行する。ACK フレームの duration フィールドに slottime と WFA 期間の合計をマイクロ秒で格納し、SIFS 期間待機後、ACK フレームを送信する。

- Address4 フィールドに MAC アドレスが格納されている受信端末は、ACK フレームの duration フィールドへ slottime を格納し、WFA 期間と、SIFS 期間待機した後に自身の ACK フレームを送信する。

ユニキャストでは、Data フレームの送信端末が ACK フレームの受信を待機する期間が設定されており、この期間を SIFS と ACK フレーム送信のエアタイムと 1 slottime の合計期間として定義している。Data フレームの送信端末は、この規定時間以内に ACK フレームを受信できなければ、送信 Data フレームをロスと判定する。デュアルキャストでは、2 台の受信端末の送信する ACK フレームをそれぞれ受信するため、上述した再送までの規定時間を 2 回分待機する。

2 台の受信端末は、他方の ACK フレーム送受信を待機するため、WFA 期間を使用する。WFA 期間は、前述した規定時間と同様の長さであり、IEEE802.11b の送信レート 11Mbps では 237 マイクロ秒である。また、デュアルキャストでは、ACK フレーム送信後の処理も Address フィールドの位置関係により異なる。Address1 フィールドに該当する端末は、ACK フレームの送信区画を WFA 期間単位で揃えるため、slottime 待機する。また、Address4 フィールドに該当する端末 B の ACK フレーム送信を妨げないようにするため、slottime 待機後、WFA 期間待機する。Address4 フィールドに該当する端末は、ACK フレームの送信区画を WFA 期間単位で揃えるため、slottime 待機する。

2.3 Data フレームの再送制御

R は、A と B からそれぞれ到達確認を行うため、ACK フレームの受信を待つ規定時間を 2 回待機したあと、再送判定を行う。デュアルキャストでは、2 台の受信端末から送信される ACK フレームの受信状況を Address フィールドごとにそれぞれ 1 ビットのフラグとして記憶する。R は、Address フィールドに該当する端末から規定時間以内に ACK フレームを受信した場合、Address フィールドに対応したフラグを 1 つ立てることができる。当該パケット

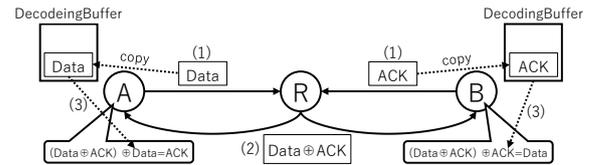


図 2: PiggyCode の基本動作

の送信終了後、2 つのフラグを確認し、2 つともフラグが立っていないならば、当該 Data フレームの再送を再送上限回数までデュアルキャストで繰り返す。なお、フラグは当該パケットの送信でのみ有効とし、当該 Data フレームの送信完了や当該 Data フレームの再送上限により破棄した場合にリセットされる。その他の制御はユニキャストの再送制御と同様である。

3. PiggyCode

PiggyCode[1] は、Alice and Bob モデルにおける TCP 通信に無線ネットワークコーディングを適用した研究である。PiggyCode は IP 層と MAC 層の間に NC 層を追加し、中継端末において同一フロー内の Data パケットと ACK パケットを符号化して一つのパケットを生成する。符号化方式は排他的論理和であり、IP ヘッダからペイロードまで符号化する。この符号化パケットを両端末に同時に送信することで、フロー全体のパケットの送信回数を削減する。PiggyCode を適用することで、パケットの送信回数を削減し、スループットや RTT の改善が期待できる。図 2 に PiggyCode の動作を示す。なお、図 2 では端末 A が端末 B へ Data パケットを送信することを想定している。

- (1) 端末 A は Data パケットを送信し、端末 B は ACK パケットを送信する。このとき、端末 A と端末 B は当該パケットの複製を保持し、中継端末 R へ当該パケットを送信する。
- (2) 中継端末 R は、端末 A と端末 B から受信したパケットを排他的論理和で符号化し、符号化したパケットをブロードキャスト、またはスニッピング方式を利用することで、端末 A と端末 B へ送信する。
- (3) 符号化パケットを受信した端末 A と端末 B は、符号化パケットと保持しているパケットを排他的論理和で復号することで、必要なパケットを取得する。この場合、端末 A では、符号化パケットと Data パケットを用いて復号し、ACK パケットを取得する。端末 B では、符号化パケットと ACK パケットを用いて復号し、Data パケットを取得する。

4. 無線ネットワークコーディングへの適用

4.1 無線ネットワークコーディングの課題と解決

文献 [1] などの無線ネットワークコーディングは、符号化したパケットを、同時に 2 台の端末へ送信することで送

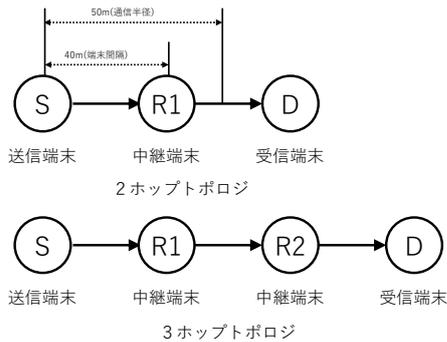


図 3: ネットワークトポロジ

信回数を削減することが可能である。符号化パケットを 2 台の端末へ同時に送信する方法として、IEEE802.11 では、ブロードキャストもしくはスニフing方式が考えられる。しかし、これらの送信方式では、2 台の宛先端末との間で十分な ARQ 制御が行われず、符号化パケットのロスが発生しやすい。無線マルチホップネットワークでは隠れ端末問題による影響が大きく、符号化パケットを低信頼な通信方式で送信することは通信性能の低下となる。なお、文献 [1] では符号化パケットの送信方式としてブロードキャストを利用している。

そこで、隠れ端末が存在する環境下でも PiggyCode の符号化パケットのロスを抑制するため、PiggyCode ヘデュアルキャストを適用し、符号化パケットのロスにより通信性能が低下する課題点を解決する。本論文では、ネットワークシミュレータである QualNet に PiggyCode とデュアルキャストを実装し、符号化パケットの送信方式としてブロードキャスト、符号化パケットの送信にデュアルキャストを使用した場合について性能評価をそれぞれ行った。これらの結果からデュアルキャスト適用による無線ネットワークコーディングの課題点の解決とデュアルキャストの有効性を示す。

4.2 シミュレーション概要

ネットワークトポロジは、図 3 のように端末が直線状に並び、かつ中継端末の台数が異なる 2 種類のネットワークトポロジを使用する。中継端末が 1 台の場合を 2 ホップトポロジとし、中継端末の数が 2 台の場合を 3 ホップトポロジとする。中継端末の台数を増加させることでパケットの衝突機会が増加し、パケットのロス率が増加する。

S は、中継端末を経由して Data パケットを D へ送信する。また、シミュレーションでは中継端末の数と使用する符号化方式と符号化パケットの送信方式の組合せが異なる以下 4 つのシナリオを用意した。

- 中継端末が符号化方式を使用せず、通常のユニキャストを用いるシナリオ (以下、Standard TCP)
- 中継端末が PiggyCode を使用し、符号化パケットの

表 1: シミュレーションパラメータ

| 項目 | 設定値 |
|-------------|--------------|
| アプリケーション | FTP GENERIC |
| 送信データサイズ | 14480000 バイト |
| トランスポート層 | TCP New Reno |
| MSS | 1460 バイト |
| 遅延 ACK | 無効 |
| RFC6928 | 有効 |
| RFC1393 | 有効 |
| ルーティングプロトコル | static |
| 通信規格 | IEEE802.11b |
| 送信レート | 11Mbps |

送信方式にブロードキャストを使用するシナリオ (以下、PC+Broadcast)

- 中継端末が PiggyCode を使用し、符号化パケットの送信方式にスニフing方式を使用するシナリオ (以下、PC+Unicast)
- 中継端末が PiggyCode を使用し、符号化パケットの送信方式にデュアルキャストを使用するシナリオ (以下、PC+Dualcast)

これらの 2 種類のトポロジと 4 つのシナリオをすべての組み合わせ (8 通り) でシミュレーションを行った。その他のシミュレーションパラメータは表 1 に示すとおりである。

評価項目は、リンクごとの Data パケットと ACK パケットのロス数および端末 D におけるグッドプットとする。各リンクごとのパケットのロス数を確認することで、デュアルキャストの信頼性の検証を行う。なお、リンクごとの Data パケットと ACK パケットのロス数には、復号後のパケットを計測したため、符号化パケットのロスは受信する端末によって Data パケットまたは ACK パケットのロス数が含まれる。

4.3 シミュレーション結果

4.3.1 2 ホップトポロジにおける評価結果

図 4(a) にリンクごとの Data パケットのロス数を示す。PC+Broadcast のロス数が最も多く、PC+Unicast, PC+Dualcast では Standard TCP より Data パケットのロス数が微増であった。いずれの通信方式においても S-R 間でロスが発生しており、PC+Broadcast では R-D 間でのロスも発生した。この S-R 間でのロスは隠れ端末である D とのユニキャスト同士の衝突であった。一方、PC+Broadcast における R-D 間でのロスは隣接端末間でバックオフ期間が一致したことによる衝突であった。

図 4(b) にリンクごとの ACK パケットのロス数を示す。図 4(b) におけるロスは R-S 間のロスが大半を占めており、PC+Unicast で約 800 回のロスが発生した。Standard TCP, PC+Broadcast, PC+Dualcast では約 400 回であっ

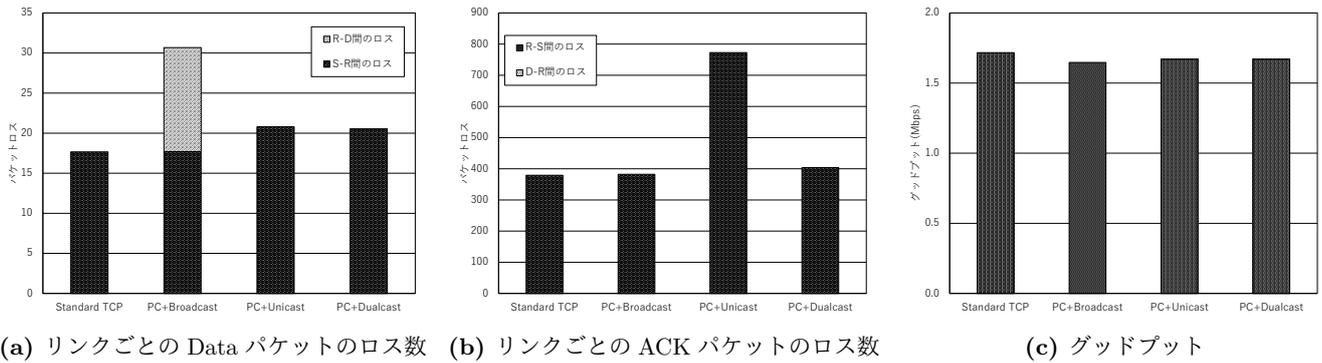


図 4: 2 ホップトポロジにおける評価結果

た。これらのロス、隣接端末間でバックオフ期間が一致したことによる衝突であった。特に、PC+Unicast では、R から送信される符号化パケットを S でプロミスキャスモードにより受信したためである。

図 4(c) に通信方式ごとのグッドプットを示す。グッドプットでは、PC+Broadcast が Standard TCP と比較して 4.1% 低下し、PC+Unicast と PC+Dualcast は Standard TCP と比較して共に 2.8% 低下した。これらの結果では、PC+Unicast と PC+Dualcast で共にグッドプットが微減であった。これは、Data パケットのロス数が Standard TCP よりわずかに多かったことが原因である。

4.3.2 3 ホップトポロジにおける評価結果

図 5(a) にリンクごとの Data パケットのロス数を示す。PC+Broadcast は Data パケットを合計 300 回ロスしており、その 80% は R1-R2 間でのロスであった。これは、隠れ端末である D のユニキャストと符号化パケットのブロードキャストが衝突したためである。PC+Unicast では Data パケットのロス回数が約 70 回であり、他の通信方式より少なかった。また、PC+Dualcast では約 110 回であり Standard TCP と比較すると微増であった。

図 5(b) にリンクごとの ACK パケットのロス数を示す。PC+Unicast では ACK パケットが合計 2200 回ロスしており、PC+Broadcast では合計 500 回のロスであった。PC+Broadcast と PC+Unicast では、R2-R1 間の向きに対し符号化パケットを再送しなかったためである。PC+Dualcast では、符号化パケットを両方の宛先に対して再送が可能であるため、このようなロスは少なかった。

図 5(c) に通信方式ごとのグッドプットを示す。PC+Broadcast は Standard TCP と比較して 7.1% 低下し、PC+Dualcast は 3.5% 減少した。一方、PC+Unicast は Standard TCP と比較して 0.7% 増加した。これらの結果は Data パケットのロスによるものであり、PC+Unicast では Data パケットのロス数が他の通信方式より低かったためである。

4.4 考察

4.4.1 通信方式ごとの差異

4 章の評価では符号化パケットの送信方式として、ブロードキャスト、スニフティング方式、デュアルキャストの 3 種類について評価した。デュアルキャストは、双方向に対して Standard TCP すなわちユニキャストと同等の信頼性で通信できる。ブロードキャストでは、符号化パケットの再送を行わないため、トポロジの種類、符号化方式の種類、シナリオの種類を問わず、Data パケットのロスにより通信性能が低下した。

デュアルキャストでは、グッドプットなどの向上は確認できなかったが、ACK パケットのロス数が改善されており、1 対 2 通信の信頼性の高さが確認できた。

スニフティング方式の場合では、Data パケットのロス はブロードキャストほど発生せず、ACK パケットのみのロスだった。とくに、2 ホップのように中継端末に対する隠れ端末が存在しないトポロジではスニフティング方式の 1 パケット当たりの通信時間がデュアルキャストのそれより短いため、グッドプットがデュアルキャストより高い傾向だった。

3 ホップトポロジでは、PC+Unicast で最大 0.7% のグッドプットの向上を確認した。これは、Data パケットのロス数が最も低かったことがグッドプットの向上に寄与したものである。一方で、Data パケットのロスより ACK パケットのロスが多かった。TCP では ACK パケットが累積的なものであるため、多少の ACK パケットのロスは許容される。このことから、3 ホップのトポロジにおけるフロー内干渉では、ACK パケットのロスが与える TCP への影響が小さく、TCP の特性がスニフティング方式の問題点を補ったことが考えられる。

一方、デュアルキャスト使用時の Data パケットのロスが Standard TCP と比較して微増した。これは、符号化により見かけ上の ACK パケットの長さが増加したためである。図 6 に符号化によるパケットサイズへの影響について示す。Standard TCP のように符号化を行わない通信では、S から D へ 1500 バイトの Data パケットを送信し、

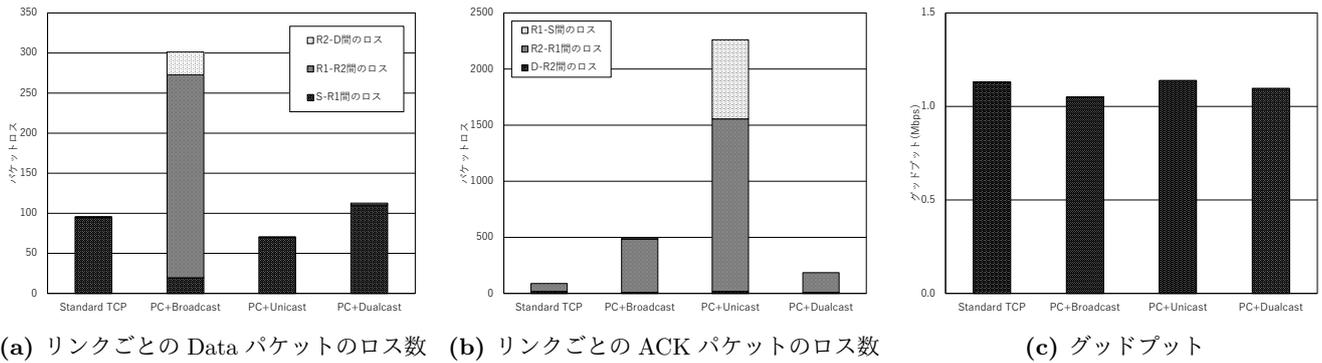


図 5: 3 ホップトポロジにおける評価結果

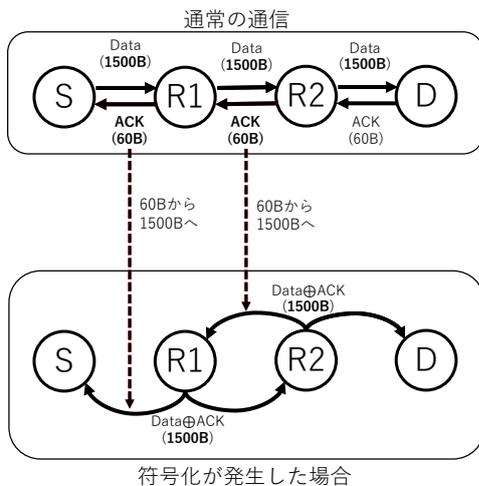


図 6: 符号化によるパケット長の増加

D から S へ 60 バイトの ACK パケットを送信する。この通信に対し、符号化を行った場合、ACK パケットと Data パケットが符号化されるため、R1-S、R2-R1 間で ACK パケットに代わり 1500 バイトの符号化パケットが送信される。1500 バイトと 60 バイトのパケットが衝突した場合は、次のバックオフ制御によって衝突を回避できる可能性が高い。しかし、1500 バイト同士の衝突は、伝送時間が長いいためバックオフ制御によって吸収しきれず、再度衝突する可能性が高い。特に、デュアルキャストは、ほかの通信方式と比べて、両宛先に対し ARQ を行ってしまうため影響が大きい。

図 7(a)、図 7(b)、図 7(c) に符号化による隠れ端末間でのパケットの衝突率の増加について示す。図 7(a) のように隠れ端末である S と R1 がパケットを送信する場合、パケットの送信タイミングが重なると、互いのパケットは衝突する。しかし、図 7(b) のように互いのバックオフ期間にパケットを送信できる十分な差がある場合、衝突せずに送信することが可能である。とくに送信するパケットのパケット長に極端な差がある場合、図 7(b) のように隠れ端末間で通信が成功しやすい。しかし、図 7(a) のように符号化

が行われると、互いの端末は 1500 バイトの Data パケットと 1500 バイトの符号化パケットを送信するため、Data パケットと ACK パケットとの送信より衝突率が高くなる。

4.4.2 デュアルキャストの有効性

4 章の評価結果から無線ネットワークコーディングにデュアルキャストを適用した場合について以下のことが明らかとなった。

- (1) デュアルキャスト適用により 2 台の受信端末へ高いパケット到達率を実現できる。
- (2) デュアルキャストは、CSMA/CA を利用し DCF を拡張しているため、隠れ端末問題が発生する。
- (3) デュアルキャストの適用例として、PiggyCode は適切でない。

(1) に関して、4 章の評価結果では、その再送機能により符号化パケットを 2 台の端末へ高い到達率で送信することができたため、ほかの通信方式と比較して ACK パケットのロス数が低かった。このことから、デュアルキャストは高信頼な 1 対 2 通信であるといえる。(2) に関して、デュアルキャストでは、CSMA/CA を基本とした DCF を拡張しているため、隠れ端末問題に対して対処することができない。4 章の評価結果のように、隣接端末以外がキャリアセンス範囲外となるようなトポロジでは、ユニキャストと同様に隠れ端末と送信パケットが衝突し、パケットロスとなる場合がある。(3) に関して、4 章の評価結果では、デュアルキャストが ACK パケットの向きに対して符号化パケットを再送し続けたことによりチャンネルを過度に占有してしまうことが明らかとなった。その結果、Data パケットとバースト的に衝突し、Data パケットのロスが発生した。一方、スニフing方式では、ACK パケットの向きに対し符号化パケットの再送を行わないため、Data パケットのロスはデュアルキャスト適用時と比較して少なかった。また、デュアルキャストより 1 パケット当たりの通信時間が短く、TCP の累積 ACK の特性がプロミスキャストモードによる符号化パケットのロスによるデメリットを補った結果である。

以上より、デュアルキャストを適用するには、Piggy-

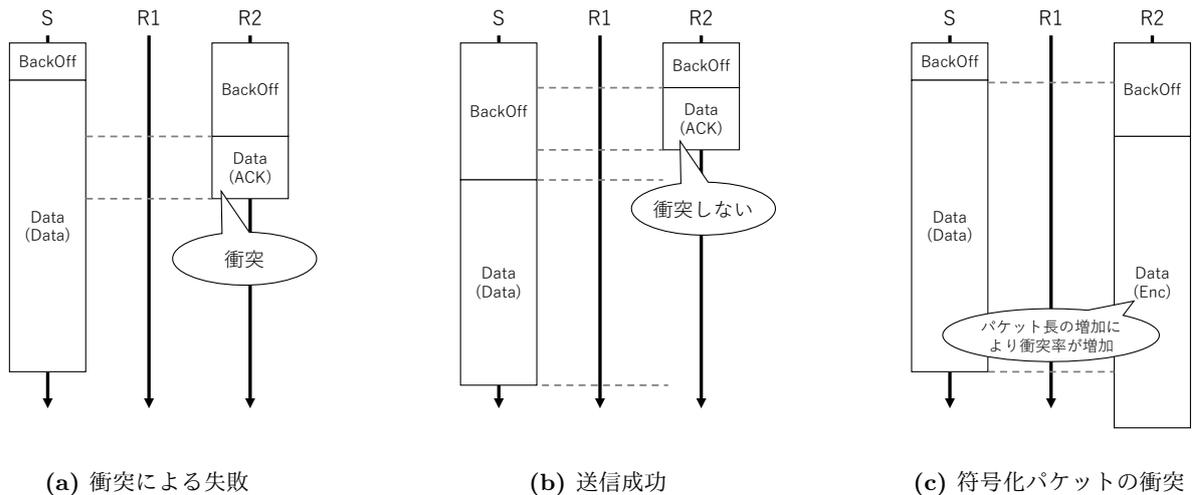


図 7: 符号化による隠れ端末間の衝突率の増加

Codeのように通信の効率化を主目的とするのではなく、信頼性の向上を目的として使用すべきであることが明らかとなった。また、デュアルキャストは信頼性向上の代償として通信時間が増加するが、適用する環境によっては通信時間の増加を上回る信頼性による効果が得られる。したがって、その適用する対象を適切に選択することが重要である。

5. 関連研究

文献 [3] では、フロー内干渉によるパケットのロスが TCP の性能を下げてしまう点を問題点として挙げている。この問題点に対し、文献 [3] ではトランスポート層で Data パケットの送信レートを制御する CLTSP を提案し、評価を行っている。CLTSP では、1 つ前の Data パケットが衝突可能範囲を脱出してから次の Data パケットの送信処理を行う。なお、衝突可能範囲は自身から 3 ホップ目の端末までを指す。脱出の判断基準として、衝突可能範囲を脱出する見込み時間を設定しており、見込み時間は ACK パケットに付加された通信遅延の情報に基づき算出する。

また、文献 [4] では、PiggyCode に対し CLTSP を適用し、その性能を評価している。なお、符号化パケットの送信方式としてスニフティング方式を使用しており、Data パケットの向きに対しユニキャストで送信を行う。文献 [4] では、CLTSP によりフロー内干渉を抑制したため、PiggyCode と比較して最大 60% のグッドプットの向上し、符号化を使用していない Standard TCP と比較して 10% 程度の性能向上を確認している。

これらの手法では、符号化パケットの送信方式として、スニフティング方式を利用しているため、プロミスキャストモードで受信する端末では、符号化パケットのロスが発生しても再送が行われない。この問題点に関しては文献 [4] においても言及されている。デュアルキャストでは、符号

化パケットを送信する 2 台の宛先端末に対し、再送が行われるため、符号化パケットの到達率に関して有効な手法である。

6. おわりに

本論文では、高信頼な 1 対 2 通信を可能とするデュアルキャストをネットワークコーディングに適用した場合の評価について述べた。ネットワークコーディングの適用例として、IP 層と MAC 層の間に TCP の Data パケットと ACK パケットを符号化する PiggyCode を実装し、符号化パケットの送信方式としてデュアルキャストまたは、スニフティング方式または、ブロードキャストを使用し、隣接端末以外がキャリアセンス範囲外の 2 ホップ、3 ホップのチェーントポロジにおいて、Standard TCP との性能の比較を行った。

その結果、デュアルキャストは、全てのリンク間で Data パケットと ACK のパケットのロス数を PC+Broadcast と PC+Unicast と比較して改善した。しかし、3 ホップトポロジではグッドプットが 3.5% の減少だった。一方、スニフティング方式では、符号化パケットの再送を ACK パケットの向きで行わなかったことから、Data パケットのロス数が減少した。そのため、3 ホップトポロジにおいてグッドプットが 0.7% 向上した。

これらの結果から、2 ホップや 3 ホップのトポロジでは、スニフティング方式が有効であることが明らかとなった。また、デュアルキャストの利用例として通信効率を目的として適用する PiggyCode は適切でなく、信頼性の向上を主目的として使用するべきである。そのため、デュアルキャストの利用例を検討することが課題である。現状のデュアルキャストでは、IP 層から利用することができないため、PiggyCode がデュアルキャストの利用を仲介する役

割を担っている。そこで、今後デュアルキャストの IP からの利用方法を検討することが課題である。

参考文献

- [1] Scalia, L., Soldo, F. and Gerla, M.: PiggyCode: A MAC Layer Network Coding Scheme to Improve TCP Performance Over Wireless Networks, *Global Telecommunications Conference, 2007. GLOBECOM '07. IEEE*, pp. 3672–3677 (2007).
- [2] 佐藤卓哉, 明田修平, 大月勇人, 齋藤彰一, 國枝義敏, 毛利公一, 瀧本栄二: IEEE802.11 MAC の拡張によるデュアルキャストの実装と評価 (モバイルネットワークとアプリケーション), 電子情報通信学会技術研究報告 = IEICE technical report : 信学技報, Vol. 115, No. 311, pp. 47–52 (2015).
- [3] Radha, R. and Kathiravan, K.: A cross layer rate based transport solution to control intra flow contention in multi hop MANET, pp. 511–516 (2013).
- [4] Natraj, R. and Kannan, K.: Mitigating Intra Flow Interference Over Multi Hop Ad Hoc Networks, *Information Science and Engineering*, Vol. 32.