

全二重通信による送信機会増加を活用したユニキャストスルーブットを低下させないネットワークコーディング型ブロードキャスト再送方式

西本 美優^{1,a)} 重安 哲也¹

概要: 近年, 様々な小型デバイスに無線通信機能が実装されるようになった. また, 技術の発展により自己干渉低減が可能となり, 受信と送信を同時に行うことのできる全二重通信が実現されつつある. 全二重通信が利用できれば限りある通信資源を有効活用できるようになる. ところで, ワイヤレスでブロードキャストを行う場合, 欠損パケットの再送は行われなことが多いため, 信頼性の向上が望まれている. 本稿では, 周辺端末のユニキャストスルーブットを低下させないために, 全二重通信によって増加した送信機会を活用したブロードキャスト再送方式について検討した結果を報告する.

1. はじめに

近年, 様々な小型デバイスに無線通信機能が実装されるようになった. また, 信号処理技術の高度化による自己干渉低減が可能となることで, 送受信を同時に行うことのできる全二重無線通信 [1] が実現されるに至った. 全二重通信を採用する無線システムを活用すれば, 限りある通信資源を有効活用できるため IoT (Internet of Things) [2] のさらなる普及につながる.

さて, 1 度の送信で全ての周辺端末を宛先とした送信が可能なブロードキャストは限りある無線通信資源の有効活用に有益である. しかし, ブロードキャストは, 通信時に他の送信との衝突を軽減する RTS (Request To Send) や CTS (Clear To Send) を用いた制御や衝突などによるパケット受信失敗の確認をする ACK (ACKnowledgement) 処理などを行わないため, ユニキャストと比較して信頼性は低い.

本稿では, 全二重通信を採用する無線システムにおけるブロードキャストプロトコルの信頼性向上について議論する. 具体的には, ブロードキャスト端末が全二重通信によって増加する送信機会とネットワークコーディング [3] を利用して, 周辺端末のユニキャストスルーブットに影響を与えずに, 周辺端末が受信に失敗したパケットを再送によって回復する手法について検討し, 提案手法の有効性をシミュレーションによって明らかにする.

2. 全二重通信によるブロードキャスト

本章では, 一般的な MAC プロトコルである CSMA (Carrier Sense Multiple Access) をベースに全二重通信を実装するブロードキャストプロトコルを提案する. 提案方式では全二重通信による欠損パケットの再送により性能向上を実現する.

2.1 全二重無線通信

図 1 に示すように全二重通信では, 自端末が受信中でも自己干渉低減技術によって同時に送信を行うことができる. 全二重通信は大きく, (a) プライマリ送信元端末にセカンダリ送信を行う双方向全二重通信と, (b) プライマリ送信元端末とは別の端末にセカンダリ送信を行う片方向全二重通信の 2 つの種類に分類できる.

双方向全二重通信は送受信に関わる全ての端末が全二重通信機能を有している必要があるが, 片方向全二重通信は中継端末 (図 1 では端末 B) だけが全二重通信機能を実装していれば良いため, 全二重通信機能を持たない端末が混在するネットワークでも全二重通信の恩恵を受けることが可能である. しかし, 図 1(b) の端末 A と端末 C が通信範囲内にある場合, 端末 A のプライマリ送信がセカンダリ送信先である端末 C のデータ受信に干渉することで端末 C はどちらのパケットの受信も失敗する.

また, 全二重通信ではプライマリ送信とセカンダリ送信の衝突も発生する. 文献 [4] では既存の全二重通信の衝突について述べられている. 図 2 において端末 PS, PR, SS,

¹ 県立広島大学 経営情報学部

^{a)} q804026vp@ed.pu-hiroshima.ac.jp

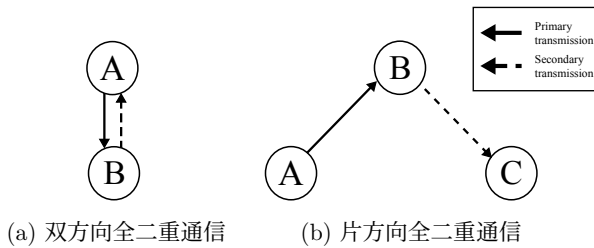


図 1: 全二重通信

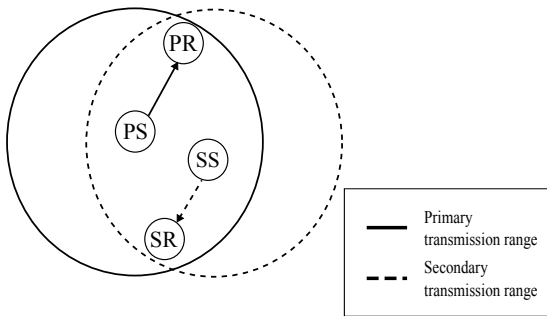


図 2: 全二重通信の衝突

SR をそれぞれプライマリ送信端末、プライマリ受信端末、セカンダリ送信端末、セカンダリ受信端末とする。これらの4端末が全てPSの送信範囲内であり、かつSSの送信範囲内に存在するとき、端末PR、SRには両方の送信が同時になるため衝突が発生する。

2.2 全二重再送制御

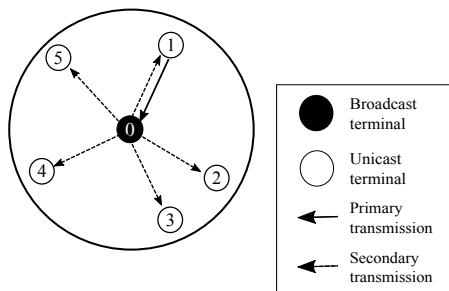


図 3: ネットワーク構成例

図3に示すように、ブロードキャストを行う端末0の通信範囲内に受信端末1~5の存在を仮定する。提案手法は、以降に述べる3つのphaseによりブロードキャストを実施する(図4参照)。

(1) Broadcast phase

通常のCSMAに基づいてブロードキャストを行う。図4では、端末0は自身のバックオフタイムが0になると周辺端末(端末1~5)にブロードキャストを行う。この時、ブロードキャストするDataにはシーケンス番号を付与する。周辺端末は受信に成功したDataのシーケンス番号を記録しておく。

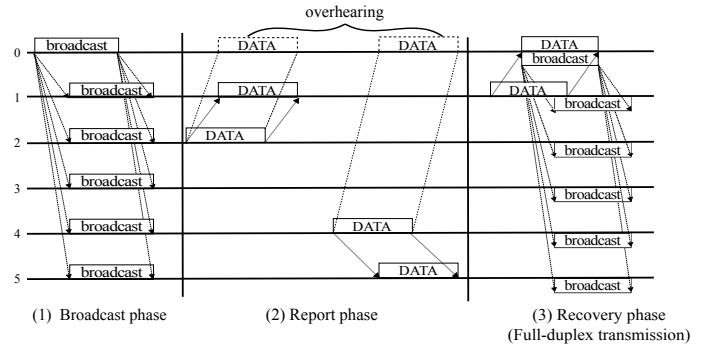


図 4: 提案方式の動作

(2) Report phase

通常のユニキャストだが、送信先とは無関係に1~5の端末は自身のブロードキャスト受信状況をDataのヘッダに記載して送信する。ここで、ヘッダに記載されるのは、その端末が受信できたブロードキャストパケットのシーケンス番号とする。また、過去にヘッダに記載したものは、次回からは報告済みとして再度の記載は行わないこととする。ブロードキャスト端末は、そのユニキャストを傍受することで、周辺端末のブロードキャスト受信状況を把握する。図4の例では、端末2から1に対する送信と端末4から5に対する送信のヘッダ部分にBroadcast phaseで受信したDataのシーケンス番号をそれぞれ記載する。端末0はこれらのDataを傍受することで端末2、4の受信状況を把握できる。

(3) Recovery phase

Report phaseの結果をふまえて、再送すべきシーケンス番号のブロードキャストパケットを選択し再送する。ここで、再送のために貴重な送信機会を消費しないように、Recovery phaseでは自端末宛の送信に同期してブロードキャストの再送を行う全二重通信とする。図4の例では、端末1から0宛のDataを受信するタイミングで全二重通信による再送を開始する。再送するパケットを決定方法は次節で説明する。

2.3 ネットワークコーディングによる高効率再送手法

複数のパケットを1つに合成することで、送信量を増加させずに送信する情報量を増加できるネットワークコーディングが提案されている。

XとYのパケットが存在するとき、ネットワークコーディングは両者をXOR演算で合成することで $Z (=X \oplus Y)$ を得る。その後、送信された合成パケットであるZを受信した端末は自身が既にXかYのいずれかの情報を受信済みであれば、それをZに再度XOR演算することで他方を得る。

$$Z \oplus X = Y \text{ あるいは、 } Z \oplus Y = X$$

提案手法では、Recovery phaseで再送するパケットにネッ

トワークコーディングを適用することで、1度に複数種類の情報を再送する。具体的には、Report phaseで把握した周辺端末の受信状況から最も多くの端末が受信に失敗しているシーケンス番号の packets から順に再送 packets に選定する。ここで、合成対象に選ぶ packets は、(a) 全ての受信端末が受信済み、あるいは、(b) 再送によって必ず復号できる、のどちらかの条件を満たす packets のみとする。

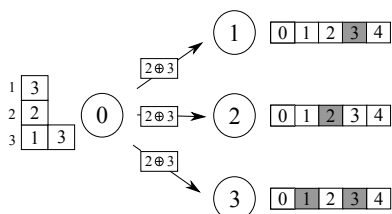


図 5: ネットワークコーディングによる再送

図 5 を用いて再送対象とする packets の選択例を説明する。同図では、0 をブロードキャスト端末、1~3 を受信端末とする。受信端末の右側の四角囲みの数字は、その端末の受信状況を、白抜きは受信、黒塗りは未受信をそれぞれ示す。端末 0 の左側の数字は、Report phase で把握した各端末の欠損（未受信） packets のシーケンス番号である。同図からわかるように、まず、シーケンス番号 3 を選ぶことで、端末 1, 3 の受信状況を改善できること、ならびにシーケンス番号 3 との組み合わせ条件を満たすものとして、シーケンス番号 2 を選択することで端末 2 の受信状況も併せて改善できる。

再送手順の詳細なアルゴリズムを図 6 に示す。同アルゴリズムにおいて、 N は端末 0 (ブロードキャスト端末) の隣接端末集合、 L はロス packets の集合であり、 $L(i)$ は端末 i のロス packets 集合である。また、 K はネットワークコーディングの候補 packets 集合で、 C は最終的にネットワークコーディングに選択された要素である。 Cnt_tmp , Cnt , $tmpID$ は、最も多くの端末が受信に失敗している packets を調べるために用いる変数であり、 Cnt_tmp は任意の packets の受信に失敗した端末数を示す。 Cnt は Cnt_tmp の最大値である。最後に $tmpID$ は Cnt_tmp が最大になる時の packets のシーケンス番号が格納される (最終的に $tmpID$ は C に格納される)。アルゴリズムの 1~3 行目は傍受した周辺端末の受信状況からロス packets を調べ、4~7 行目はロス packets の集合からネットワークコーディング対象候補を調べ、8~32 行目は実際に再送する packets を決定する手順がそれぞれ記載されている。

3. 性能評価

提案方式をシミュレーションで評価する。評価に用いたパラメータを表 1 に示す。評価では、端末 0 をフィールド

Algorithm 1 再送 packets の選択

```

1: for all  $i \in N$  do
2:    $L(i)$ 
3: end for
4:  $K \leftarrow \emptyset, C \leftarrow 0$ 
5: for all  $i \in N$  do
6:    $K \leftarrow K \cup L(i)$ 
7: end for
8: while  $K \neq 0$  do
9:    $Cnt\_tmp \leftarrow 0$ 
10:   $Cnt \leftarrow 0$ 
11:   $tmpID \leftarrow RAND\_MAX$ 
12:  for all  $i \in K$  do
13:    for all  $j \in N$  do
14:      if  $\{i\} \cap L(j) \neq 0$  then
15:         $Cnt\_tmp \leftarrow Cnt\_tmp + 1$ 
16:      end if
17:    end for
18:    if  $Cnt\_tmp > Cnt$  then
19:       $Cnt = Cnt\_tmp$ 
20:       $tmpID = i$ 
21:    end if
22:  end for
23:   $C \leftarrow C \cup \{tmpID\}$ 
24:   $K \leftarrow K - \{tmpID\}$ 
25:  for all  $l \in N$  do
26:    for all  $m \in L(l)$  do
27:      if  $L(l) \cap \{tmpID\} \neq 0$  then
28:         $K \leftarrow K - L(l)$ 
29:      end if
30:    end for
31:  end for
32: end while
    
```

図 6: 再送アルゴリズム

中央に配置し、この端末だけがブロードキャストを行う。比較評価には、(1) 再送なしブロードキャスト (Conventional), (2) 貪欲再送方式 (Greedy Method), (3) 提案方式 (Proposed Method) の 3 つの方式を用いる。なお、貪欲再送方式では、ブロードキャスト端末は他局宛のユニキャストを傍受した場合にも Recovery phase を開始することで、再送回数を増加する方式とした。

表 1: シミュレーション諸元

Parameter	Value
Transmission Speed	1Mbps
Radio Propagation Speed	300Mbps
Communication Range	100m
Simulation Period	10.0sec
Number of Terminals	50
Field size	200m × 200m
Packet Arrival Process	Poisson distribution

図 7 にトラフィックを変化させた場合のブロードキャスト

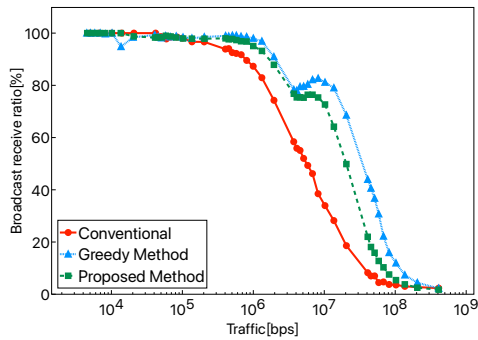


図 7: ブロードキャスト受信率

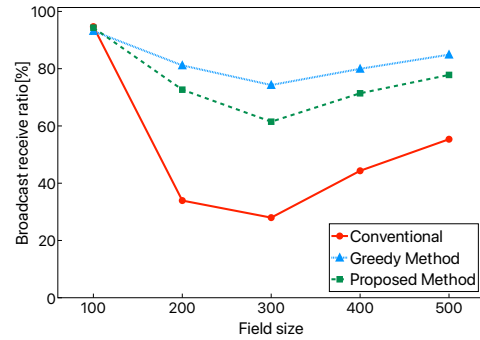


図 9: ブロードキャスト受信率

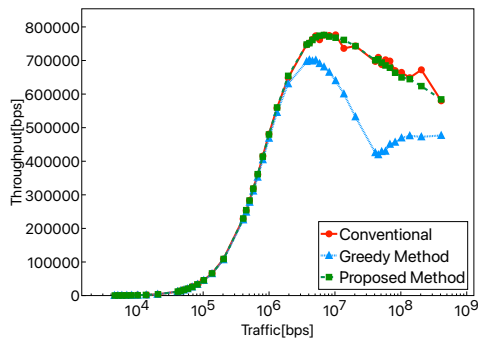


図 8: ユニキャストのスループット

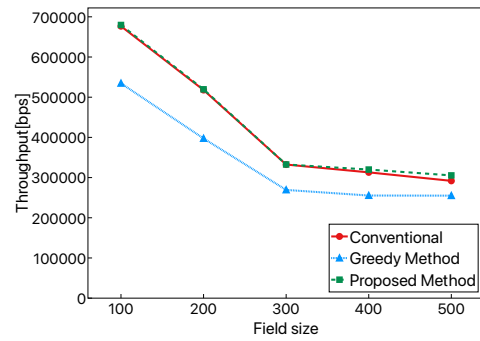


図 10: ユニキャストのスループット

ト受信率を示す。同図に示すように、いずれの方式も、低トラフィック時にはほぼ 100% の受信率となることがわかる。トラフィックが増加すると 3 方式とも徐々に受信率が低下すること、ならびに、再送なしに比べて、再送機能を有する 2 方式は比較的高い受信率を保持していることがわかる。また、常に最も高い受信率となるのは、他局宛ユニキャストを傍受した際にも再送を行う貪欲方式であるが、通信レートと同程度の数 Mbps のトラフィックであるネットワークの実用領域での受信率は、提案方式と大きな差がないことも確認できる。

図 8 にトラフィックを変化させた場合のユニキャストスループットを示す。同図から、再送なしの方式と提案方式はほぼ同じ特性となることがわかる。これは、提案方式も、自局宛のユニキャストを受信した場合にのみ再送を全二重で開始するため、ユニキャスト受信に干渉を与えないプロトコルであるためである。これに対し、貪欲方式は、トラフィック実用領域においても、他の 2 方式に比べて大きくスループットが低下することがわかる。

以上から、全二重通信とネットワークコーディングの導入によって、既存のユニキャストに影響を与えずにブロードキャスト受信率を大きく改善できる提案方式の有効性を確認できる。

また、Field size を 100 刻みで 100m~500m まで変化させた評価も行なった。ネットワークの実用領域のブロードキャスト受信率とユニキャストのスループットを示したものが図 9、図 10 である。ここで、各手法のユニキャストス

ループットへ与える影響をわかりやすくするため、図 10 の結果はトラフィックが 10^7 [bps] においてブロードキャストが行われる端末 0 の範囲内の端末のユニキャストスループットの合計を示した。どの Field size でも受信率は貪欲方式が若干提案方式を上回るが、スループットは再送なし方式や提案方式に比べて低下させてしまっていることがわかる。

4. まとめ

全二重通信とネットワークコーディングを用いてブロードキャスト通信において周辺端末のスループットに影響を与えずに受信率を向上させる方式を提案した。今後は再送時の衝突を考慮することでさらに受信率を向上させる手法について検討する予定である。

参考文献

- [1] 猿渡 俊介, 渡辺 尚, “全二重無線通信の実用化に向けた課題と可能,” 電子情報通信学会誌, Vol. 101, No.4, pp.387-393, 2008.
- [2] 堺野 哲, “IoT への期待と課題~IoT システム開発者・利用者の心得,” 情報の科学と技術, Vol. 67, No 11, pp.560-565, 2017.
- [3] 山本 幹, “ネットワークコーディング,” 電子情報通信学会誌, Vol. 90, No.2, pp.111-116, 2007.
- [4] 玉置 健太, RAPTINO H.Ari, 杉山 佑介, 猿渡 俊介, 渡辺 尚, “無線全二重通信を利用した中継 MAC プロトコルの評価,” 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 112, No.405, pp.37-42, 2013.