

非干渉送受信ペアの積極的通知により スループットを向上する全二重無線通信システム

橋本 ひかり¹ 重安 哲也¹

概要：

IoT (Internet of Things) の急速な普及によって社会のあらゆるモノがネットワークに接続されるようになった。ネットワーク容量の増加が求められる中で、膨大な数のデバイスをネットワークに新たに接続するための、通信帯域の逼迫はネットワーク高度化の大きな妨げとなる。これに対し、信号処理技術の高度化により自己干渉の大きな低減が可能となり、自端末の受信中に同時送信が可能となる全二重無線通信の実現が視野に入っている。本稿では、任意の新たなプライマリ送信に対し、影響を及ぼさない範囲の端末同士が同時に複数のセカンダリ送信を開始することで、全二重無線通信の特性を最大限活用し、スループットを向上する手法について提案し、性能評価により、提案手法が衝突回避並びにスループットの向上を実現できることを示す。

1. はじめに

IoT (Internet of Things) [1] の急速な普及によって社会のあらゆるモノがネットワークに接続され、サイバー空間から実社会の状態をモニタリングしたり、様々なものをアクチュエータによって駆動できるようになった。ネットワークに新たに接続されるデバイス量は膨大であるため、IoT の普及に伴ってネットワーク容量もまた大きく増加する必要がある。ネットワーク容量に直接的かつ大きな影響を与える要素の一つに通信帯域がある。配線の工夫によって容易にそれぞれの通信チャンネルを分離できる有線に比べ、干渉除去の難しい無線では通信帯域の逼迫はネットワーク容量増加の大きな妨げとなる。

これに対し、信号処理技術の高度化により自己干渉の大きな低減が可能となり、無線通信においても、自端末の受信中に同時送信が可能となる全二重無線通信 [2][3] の実現が視野に入っている。

全二重無線通信が可能になれば、送受信の機会が大きく増加するため、ネットワーク容量もまた大きく増加する。しかしながら無秩序に送受信数を増やすと、複数のパケットが同一端末に到着し、干渉することによる受信失敗をいたずらに増やすことになり、全二重無線通信の導入による期待した効果は得られない。そこで、全二重無線通信の導入効果を十分に活用するための同時送受信実施を促進する新しい制御が必要となる。

本稿では、任意の新たなプライマリ送信に対し、影響を及ぼさない範囲の端末同士を適切に選択し、これを周辺端末に積極的に通知することで、同時に複数のセカンダリ送信の開始を促進並びに、全二重無線通信の特性を最大限活用し、スループットを向上する手法について検討する。

2. 全二重無線通信

単一チャンネルで同時にデータの送受信を行うことができる通信技術である全二重無線通信は、既存の無線通信に用いられる通信技術である半二重無線通信と比較して、所定の時間内に送信できるパケット数を増やすことができ、スループットが向上する。以下では、全二重無線通信の種類や全二重無線通信を用いた宛先端末決定手法を取り扱う関連研究についてそれぞれ述べる。

2.1 全二重無線通信の種類

全二重無線通信には2つの種類が存在する。図1(a)に双方向全二重通信を、図1(b)に中継全二重通信をそれぞれ示す。

双方向全二重通信は、パケットを受信した際に宛先端末が送信元端末に対し同時送信を行う通信である。図1(a)では、Sender を送信元、Receiver を宛先端末とした例を示している。Sender からのプライマリ送信を受信すると同時に、Receiver は Sender に対してセカンダリ送信を開始する。一方、中継全二重通信は、パケットを受信した端末が中継端末となり、送信元端末とは別の端末に対し送信を行

¹ 県立広島大学 経営情報学部

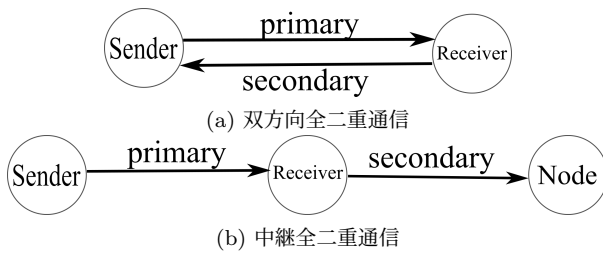


図 1 全二重通信の種類

う通信である。図1(b)は、SenderがReceiverに対してプライマリ送信を、Receiverはその受信と同時にSender以外の端末に対してセカンダリ送信を行う。どちらの種類の全二重通信であっても、無秩序に送信を開始してしまえば、送信パケット数の増加とともに衝突も増加するため、全二重通信による通信容量増加を最大限に活かすことは困難である。

2.2 関連研究

2.2.1 Relay Full-Duplex MAC

全二重通信を行う端末を優先順位をつけることにより決定する手法として Relay Full-Duplex MAC (RFD-MAC) が提案されている [2]。同手法で、全ての端末は自身の送信バッファにまだパケットが残っているかどうかの情報を送信パケット全てに対し付与する。各端末は送信されたパケットを傍受することで周辺端末の未送信パケットの所持状況をテーブルに保存する。

同テーブルの情報を用いたセカンダリ送信端末の決定は、以下の優先順位をもとに行われる。

セカンダリ送信端末選択の優先順位

- (1) 送信パケットを持つ宛先端末
- (2) 送信パケットを持つ上流端末
- (3) 送信パケットを持たない上流端末
- (4) 送信パケットを持たない宛先端末

テーブル内で、送信パケットを持つ端末同士の場合、下流端末が送信できないとフロー内にパケットが滞留してしまう。そのため、下流となる宛先端末が優先される。送信パケットを持つ端末が存在しない場合、さらに上流となる端末からパケットを受信する可能性がある上流端末を優先する。

2.2.2 端末同士の位置関係を考慮した影響度の計算

周囲の端末の通信を傍受し、隠れ端末による衝突危険度と、RTS/CTS交換を成功させた場合の送信抑制効果を端末間の位置関係をもとに見積もるために、危険度減少値を用いる手法が提案されている [5]。これは、ブロードキャスト前に RTS/CTS 交換を行う手法において実装されている。同手法において、送信端末は、隠れ端末リストを元に全ての隣接端末に対して、RTS/CTS によって送信を抑制できる隠れ端末数を算出する。図2のネットワーク例を用

いて説明する。

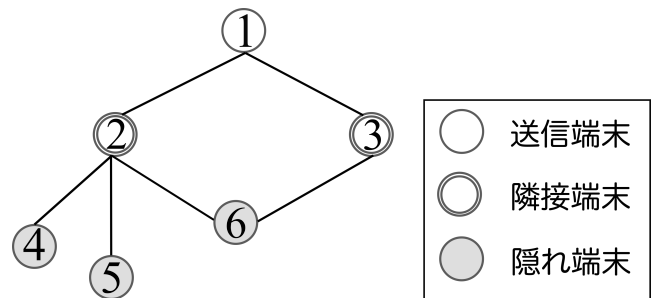


図 2 ネットワーク例

端末1は、端末2, 3と隣接しており、隠れ端末が端末4, 5, 6であることを算出している。ここで、各隠れ端末の危険度は、その隠れ端末と端末1の隣接端末の接続個数を指す。例えば、端末4, 5はいずれも端末2とのみ接続しているので1、端末6は端末2, 3と接続しているので2と計算できる。例えば端末2にRTSを送信した場合、端末4, 5, 6からの送信を抑制できるため端末2の危険度減少値は、これらの端末の危険度を合計した4となる。同様にして、端末4の危険度減少値は1が入る。結果として、危険度減少値が最大となる端末2をRTS/CTS交換の宛先に選択する。

これらの手法を取り入れ、本稿では、2hop先まで考慮に入れた、送信時に衝突を起こさない端末集合をセカンダリ送信許可端末リストとして周辺端末に周知することで、スループットを向上させる積極的な全二重通信開始を促す手法について検討し、次節で検討する。

3. 提案方式

本章で提案する手法では、プライマリ送信時のパケットヘッダに、セカンダリ送信を許可する端末のリストを記載して周囲に通知する。通知を傍受した端末は、リスト内に自身のIDが含まれていること、並びに自身が送信パケットを保持する場合、全二重通信を用いたセカンダリ送信を開始する。セカンダリ送信許可端末リストの作成手順を以下に示す。ここで、セカンダリ送信許可端末リストを G 、セカンダリ候補集合を K 、送信端末の2hop先端末集合を U 、隣接端末を V として、端末番号をつけてそれぞれプライマリ送信端末の隣接端末を V_s 、プライマリ送信宛先端末の隣接端末を V_r とする。

セカンダリ送信許可リスト

- (1) K に送信端末の隣接端末、 U に送信端末の2hop先の端末をそれぞれ加える。
- (2) G に宛先端末を加えるとともに、 K から宛先端末を削除する。また、 V_s かつ V_r である端末も K から削除する。
- (3) K の全ての端末に対して影響度を計算する。ここで、

影響度は V_s かつ K の要素の隣接端末の数と、 U かつ K の要素の隣接端末の数の和を指す。

- (4) 影響度が最小である K の要素を選択し、 G に加える。選択された K の要素と、 K の要素の隣接端末かつ V_s である端末を K から削除する。以下、 K が空集合になるまで 3, 4 を繰り返す。

さて、影響度とは、着目した端末が全二重無線通信を新たに開始した場合に、その他の新たな送信や受信ができなくなる端末の数とする。このことについて図 3 のネットワーク例を用いて、具体的に説明する。

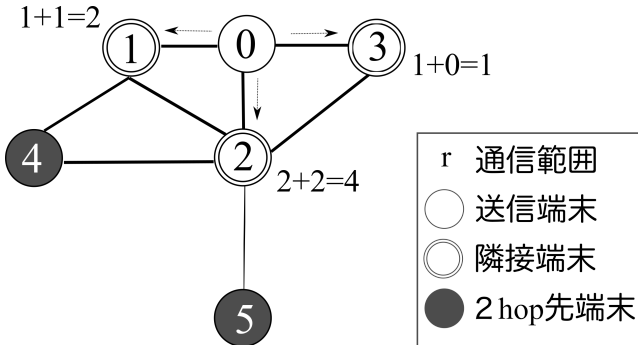


図 3 ネットワーク例と影響度

同図において端末 0 のプライマリ送信、隣接端末である端末 1~3 が傍受する場合を考える。まず、端末 1 に着目する。端末 1 が全二重無線通信による送信を開始すると、同時に送信できなくなるのは端末 2 である。また、端末 1 の送信パケットにより他のパケットの受信ができなくなるのは端末 4 である。結果として、 $1+1=2$ が端末 1 の影響度となる。同様に、端末 2 に着目した場合は $2+2=4$ 、端末 3 に着目した場合は $1+0=1$ がそれぞれの影響度となる。

セカンダリ送信許可リストを作成するアルゴリズムを図 4 に示す。ここで、任意の集合 S に対し $|S|$ は、集合 S の要素数を表している。

図 5 に示すネットワークポロジを用いて、具体的にリスト作成を説明する。端末 0 は端末 2 に対しプライマリ送信を行うとする。ここで、 $K = \{1, 2, 3, 4\}$ 、 $U = \{5, 6, 7, 8\}$ である。宛先端末に指定された端末 2 を G に追加し、 K から端末 2 を削除する。送信端末である端末 0 の隣接端末かつ宛先端末である端末 2 の隣接端末である端末 4 も K から削除する。ここでは、 $K = \{1, 3\}$ 、 $G = \{2\}$ である。続いて、影響度を計算する。 K に保存されているもののうち、端末 1 の影響度は、(隣接端末かつ V_s の個数) + (隣接端末かつ U の個数) $= 0+2=2$ であること、並びに、端末 3 の影響度が 1 であることがわかる。影響度が少ない端末 3 を G に加え、その隣接端末かつ V_s である端末がないため、 $K = \{1\}$ 、 $G = \{2, 3\}$ となる。同様に影響度を計算し $G = \{2, 3, 1\}$ を得る。

リスト作成手順 2 において V_s かつ V_r の端末を K から

Algorithm 1 セカンダリ送信許可リストの作成

```

1:  $K \leftarrow \emptyset, K \leftarrow V_s$ 
2:  $K \leftarrow K - V_s \cap V_r$ 
3:  $G \leftarrow G \cup \{r\}$ 
4: repeat
5:    $A_{min} \leftarrow RAND\_MAX, c = nil$ 
6:   for all  $\omega \in K$  do
7:      $tmp = |(V_s \cap V_\omega) \cup (U \cap V_\omega)|$ 
8:     if  $tmp < A_{min}$  then
9:        $A_{min} \leftarrow tmp$ 
10:       $c \leftarrow \omega$ 
11:   end if
12:    $G \leftarrow G \cup \{c\}$ 
13:    $K \leftarrow K - \{c\} - V_c \cap V_s$ 
14:   for all  $m \in K$  do
15:     if  $|V_c \cap V_m| \neq 0$  then
16:        $K \leftarrow K \cup \{m\}$ 
17:     end if
18:   end for
19: end for
20: until  $K \neq \emptyset$ 

```

図 4 セカンダリ送信許可リストの作成アルゴリズム

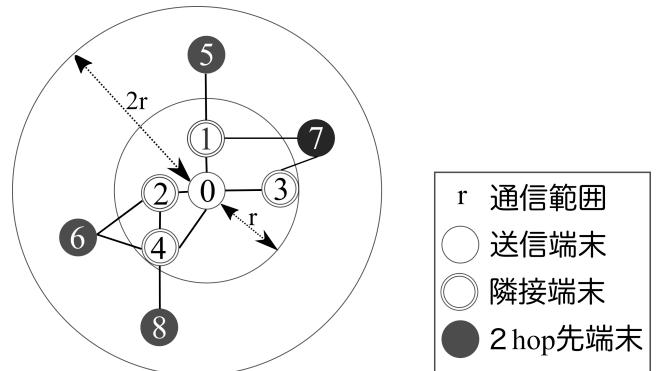


図 5 ネットワークトポロジ

削除すれば、宛先端末に全二重通信を用いたセカンダリ送信を許可する際に発生する衝突を防止できる。手順 3 についても、2hop 先まで考慮した影響度が最小のものを優先するため、2hop 先での衝突を防止しつつより多くの端末にセカンダリ送信許可をできる。

4. 性能評価

半二重通信を用いた CSMA 方式 (half-duplex), いずれかの送信を傍受した際全ての端末が全二重通信を開始する方式 (all), 自分宛のパケットを受信した場合のみ全二重通信を行う方式 (self), 提案方式 (proposal) を比較評価する。図 6 にスループット特性を、図 7 に衝突パケット数の結果をそれぞれ示す。表 1 に性能評価に用いた諸元を示す。

half-duplex に比べ、all はスループットが明らかに低下していることがわかる。これは、図 7 の結果からわかる

表 1 シミュレーション諸元

Parameter	Value
Transmission Speed	1Mbps
Communication Range	100m
Simulation Period	10.0sec
Simulation Field	500m × 500m
Number of Terminals	100
Packet Arrival Process	Poisson distribution

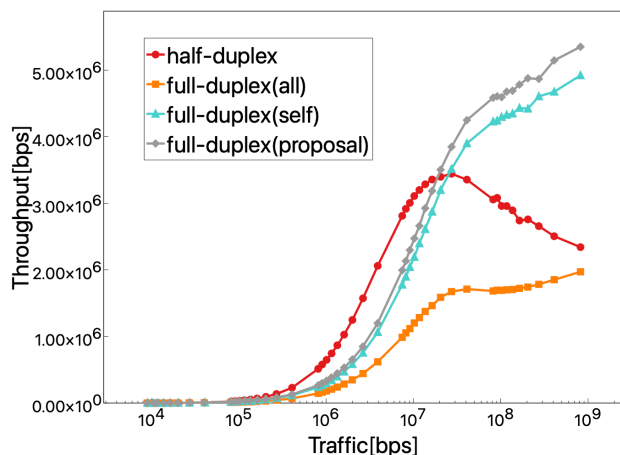


図 6 スループット

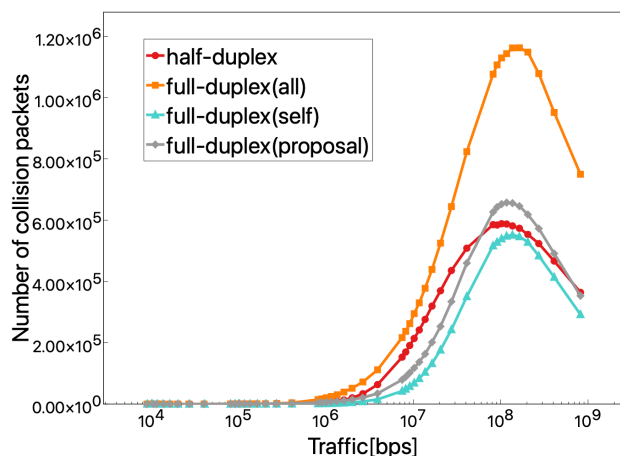


図 7 衝突パケット数

ように、衝突数の増大による。セカンダリ送信を自身宛パケットの傍受時のみとした self は衝突数も少なく all よりスループットは高い。また、セカンダリ送信が互いに衝突しないようにリストを選んだ proposal は最も高いスループットとなっていることがわかる。

5. 今後の改善方針

図 8 に示すネットワークトポロジを用いて再度考える。提案手法を用いる場合、端末 0 のプライマリ送信に対するセカンダリ送信として同時送信許可される端末は、端末 2, 3, 1 である。しかしこの時、端末 1 と端末 3 がセカンダリ送信の宛先に端末 7 を選択した場合は、衝突が発生してし

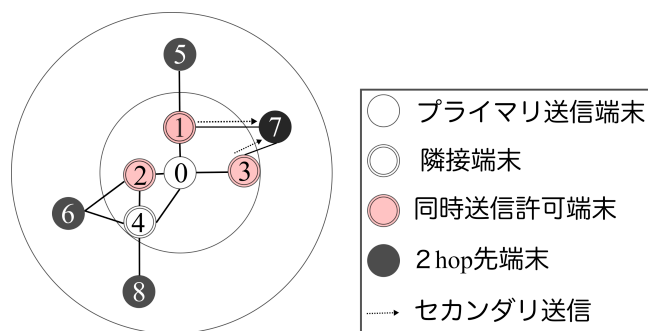


図 8 セカンダリ送信宛先と衝突

まう。そこで、セカンダリ送信の宛先に指定する端末についての制御も取り入れることで、今後さらにスループットが改善できると考えられる。

6. まとめ

本稿では、2hop 先を考慮に入れたセカンダリ送信許可端末リストを用いたスループット向上方式を提案した。提案手法は、半二重通信や、その他の手法に比べて大きくスループットを向上できることがわかった。しかし、トポロジによっては、セカンダリ送信の宛先が同一になり衝突が発生する可能性がある。今後は、さらなるスループット向上に向けて、先に述べた制御を含めて検討を行いたい。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 山垣 則夫, 小倉 一峰, 植田 啓文, 藤田 範人, “多端末が接続された Wi-Fi 環境におけるパケット衝突回避手法の提案,” 信学技報, Vol. 113, No. 472, pp. 597–602, 2014.
- [3] 猿渡 俊介, 渡辺 尚, “二重無線通信の実用化に向けた課題と可能性,” 電子情報通信学会誌, Vol.101, No.4, pp.387–393, 2018.
- [4] 玉木 健太, Ari Raptino H., 杉山 佑介, 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,” 信学技報, Vol. 112, No. 405, AN2012-50, pp. 37–42, 2013.
- [5] 重安 哲也, 松野 浩嗣, 森永 規彦, “隠れ端末の危険度に基づいた衝突回避制御を行うブロードキャストプロトコル,” 情報処理学会論文誌, Vol. 51, No. 2, pp.453–465, 2010.