

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 6 日現在

機関番号：32621
研究種目：若手研究(B)
研究期間：2012～2014
課題番号：24700074
研究課題名(和文)全二重無線通信のためのネットワークアーキテクチャ

研究課題名(英文)Network Architecture for Full-duplex Wireless

研究代表者
萬代 雅希 (Bandai, Masaki)

上智大学・理工学部・准教授

研究者番号：90377713
交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、無線ネットワークの高度化(大容量化、高信頼化)を図るために、全二重無線通信のためのネットワークアーキテクチャを提案することが目的である。全二重無線通信は、無線端末で同一周波数帯で送受信を同時に行うことを可能にする。本研究では、シングルホップ、マルチホップネットワークにおいて全二重無線通信のポテンシャルを引き出すメディアアクセス制御(MAC)および経路制御手法を提案し、その有効性を確認した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is proposing network architectures for full-duplex wireless to realize broadband and reliable wireless networks. Full-duplex wireless enables for a node to transmit and receive a data simultaneously. This research proposes medium access control (MAC) protocols and a route construction scheme to get the potential of full-duplex wireless in single-hop and multi-hop wireless networks.

研究分野：情報ネットワーク

キーワード：モバイルネットワーク メディアアクセス制御 経路制御 全二重無線通信

1. 研究開始当初の背景

近年、無線周波数資源のひっ迫は深刻な問題となり、無線ネットワークの高度化(大容量化, 高信頼化)が急務である。一般的な無線通信では、電波を全方向放射する無指向性アンテナを用いるため、同一周波数帯で送受信を同時に行えないことが、ネットワーク性能の大きなボトルネックになる。特に、受信状況を送信端末にフィードバックし送信データレートを適応的に制御するレートアダプテーション(RA)等では、半二重通信による性能劣化が顕著である。これに対し、複数チャネルを使った全二重通信や送受信を高速に切り替える擬似的な全二重通信等が考案されているが、本質的な解決になっていない。この問題に対し米国スタンフォード大により、同一周波数帯での同時送受信を可能にする全二重無線通信手法が考案された。この技術は、バラン素子の使い方を工夫し送信 RF 信号を位相反転させ、遅延・減衰させて受信信号に加えることで、受信信号から自身の送信信号成分をキャンセルするものである。さらにこの方式のアンテナ本数を削減するサーキュレータを用いた拡張手法も考案されている。このように、無線ネットワークの性能的ブレイクスルーをもたらす全二重無線の物理層技術の確立に技術的なめどが立ち、半二重無線を前提とした既存のネットワークプロトコルとは根本的に前提が異なる全二重無線のための新たなネットワーク技術の確立が必要との認識に至った。

2. 研究の目的

本研究は、無線ネットワークの高度化(大容量化, 高信頼化)を図るために、全二重無線通信のためのネットワークアーキテクチャを提案することが目的である。全二重無線通信は、無線端末で同一周波数帯で送受信を同時に行うことを可能にする。本研究は、シングルホップ、マルチホップネットワークにおいて全二重無線通信のポテンシャルを引き出すメディアアクセス制御(MAC)および経路制御手法を提案した。具体的には、下記の4課題に取り組んだ。

- (1) シングルホップ全二重無線ネットワークのための MAC プロトコル
- (2) マルチホップ全二重無線ネットワークのための端末構成法および MAC プロトコル
- (3) マルチホップ全二重無線ネットワークのため経路制御法
- (4) 全二重 MIMO (Multiple Input Multiple Output) 通信を実現する端末構成法およびクロスレイヤプロトコル

3. 研究の方法

本研究で提案する各種プロトコルを、オープンソースのネットワークシミュレータである ns-3 もしくは、C++やC言語で自作したイベントドリブンなネットワークシミュレータ上に実装し、定量的に評価した。これら

計算機シミュレーションでは、無線通信に起因するデータエラーや達成可能な通信速度(送信レート)を確率的に与える。例えば、送信電力、送受信アンテナゲイン、パスロス等からフリスの伝達公式を用いて受信電力を算出している等である。これに加えて、ソフトウェア無線実験端末を使った基礎実験を行った。

4. 研究成果

(1) シングルホップ全二重無線ネットワークのための MAC プロトコル

本課題では、無線 LAN 等のシングルホップネットワークにおいて、スループットの向上を目的とした全二重無線通信のための MAC プロトコルを提案した。

全二重無線通信のための MAC プロトコルとしては、一般的な半二重無線通信のための CSMA/CA をベースとした手法が考案されている。これら手法では、クライアントのみが CSMA/CA で送信権を得て送信を開始し、アクセスポイント(AP)はクライアントからのフレームを受信中に自身の(そのクライアントに対する)フレーム送信を開始することで全二重通信を適用する。しかし、クライアントに送信フレームが無い場合、APは送信を開始できずスループットが低下する問題がある。

本課題では、まずクライアントに送信フレームが無い場合での、スループット改善を目的とするシングルホップ全二重無線ネットワークのための MAC プロトコルを提案した(提案 1)。提案手法では、AP およびクライアントが CSMA/CA を用いて送信権を競合する。AP が送信権を得て送信を開始することで、クライアントに送信フレームが無い場合でのスループットを改善できる。一方、AP に送信権を与えることでクライアントの送信機会が減少する。そのため、クライアントの送信フレーム数が AP の送信フレーム数より多い場合、スループットの低下が予想される。そこで、AP のキューのフレーム数に応じて AP の最小コンテンツンウインドウサイズ(CW_{min})二つを使い分ける拡張手法を提案した(提案 1')。具体的には、AP のフレーム送信後、AP のキューのフレーム数がしきい値よりも多い場合、AP に小さな CW_{min} を適用することで、AP の送信権が獲得されやすくする。一方、AP のキューのフレーム数がしきい値未満の場合、AP に大きな CW_{min} を適用することで、クライアントに送信権を与えやすくする。

これら提案手法のスループット性能を計算機シミュレーションで評価した。1台の AP に対してクライアント 4台が接続する隠れ端末が存在しない状況において、提案 1 および提案 1' は既存手法と比較して、下りトラフィック量が少ない領域において下りスループットを改善し、さらに下りトラフィック量が多い領域において既存手法とほぼ同等の下りスループットを達成できることを確認した。

(2) マルチホップ全二重無線ネットワークのための端末構成法およびMACプロトコル

本課題では、まず、全二重無線通信をマルチホップネットワークに適用する場合のネットワークプロトコルについて検討した。課題(1)のシングルホップネットワークにおいては、ある一組の送受信端末間で双方向に同時に送受信を行うことを全二重無線通信と定義した。ここで、図1のように3ホップのマルチホップネットワークを考える。それぞれ隣接する端末同士までは電波が届くものとする。

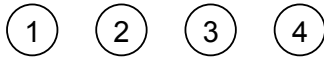


図1 3ホップの無線マルチホップネットワークの例

図1において、端末1から4までマルチホップで（バケツリレー式に端末2と3を経由して）トラフィックフローが流れる場合を考えると、各端末に全二重無線を適用した場合、端末2のように、端末1からの信号を受信しながら端末3に信号を送信するようなマルチホップネットワーク特有の全二重無線通信の拡張した定義が可能になる。このような通信形態について考えると、端末2と端末3は同時に送信することができないことがわかる。これは、端末3の送信電波が端末2に届くため、端末2において端末1からの送信電波と干渉するためである。これを防ぐためには、端末2と3の送信タイミングをずらす必要があり、結果として、マルチホップ全二重無線通信ネットワークにおいては、全二重無線通信の適用機会に限界があるという知見を得た。

そこで次の段階として、指向性全二重無線通信を実現する端末の構成法を提案した。指向性通信とは、特定の方向のみに大きなアンテナゲインを持つ指向性アンテナを用いることで通信相手以外への干渉を低減した通信である。図2に提案した端末構成法を示す。提案構成法のポイントは、 N_{ant} 本の（図2では2本）の送信用固定指向性アンテナをソフトウェアスイッチで切り替えることで、指向性全二重送信を実現する点である。なお、受信は中央の無指向性アンテナで行う。この構成を用いることで、図1のようなマルチホップネットワークで、端末1、2および3が同時に送受信することが可能になる。これは、端末3が端末4に向かって指向性送信するため、その送信電波は端末2に届かず、端末2において端末1からの送信電波と干渉しないためである。したがって、端末2と3の送信タイミングをずらす必要がない。さらに、このような点を勘案して、全端末の時間的な同期を仮定する同期型MACプロトコルを提案した。

この提案構成法およびMACプロトコルを用いてマルチホップネットワークにおけるス

ループット性能をシミュレーション評価した。その結果、指向性アンテナ数 $N_{ant}=12$ 本の場合、7ホップのマルチホップネットワークで従来の無指向性かつ半二重無線通信の端末構成法と比較して、約80%高いエンド間スループット（端末1から8までのスループット）を得られることを確認した。本提案手法の最大の利点は、半二重無線通信では、ホップ数が増大するとスループットは指数関数的に減少する問題が発生するのに対し、本端末構成法を用いることで、ホップ数の増大に対してスループットがほとんど低下しないという点である。

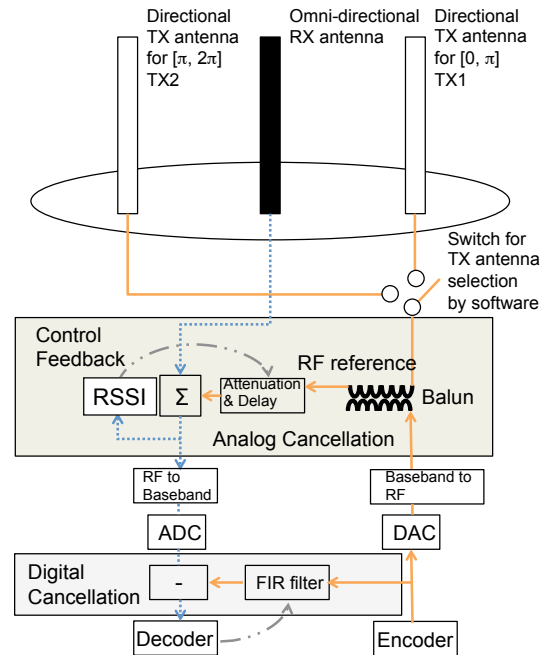


図2 指向性全二重無線通信のための端末構成法

本成果について発表した文献⑤はすでに国内外で数件の論文にて引用されており、当該分野において学術的に一定の貢献・インパクトを与えつつある。なお、本端末構成法に関してソフトウェア無線実験装置上で実装を試みたが、屋内環境におけるマルチパスの影響から自身が送信した電波を受信波から分離することが困難であり、実現には至らなかった。今後、無線物理層技術の進展により新しい干渉技術が適用可能になれば、本端末構成法の実現は大きく進展するものと考えられる。

(3) マルチホップ全二重無線ネットワークのための経路制御法

本課題では、図1のような一次元のマルチホップネットワークを二次元に拡張したマルチホップネットワークにおいて、各端末に全二重無線通信を適用した場合の経路制御手法を提案した。

現実のネットワークにおいては、複数のトラフィックフローが存在するのが一般的である。二次元の格子トポロジやランダムトポ

ロジといったマルチホップネットワークにおいては、隠れ端末問題の発生により課題(2)で考案した端末構成法および MAC プロトコルのスループット改善効果が小さくなる可能性が高い。

本課題では、課題(2)で提案した端末構成法がホップ数増大に対してスループット性能の低下が小さい利点に着目し、隠れ端末問題を引き起こすトラフィックフローの交わりを回避するために、トラフィックフローを迂回させて経路構築する手法を提案した。提案する経路制御（もしくは経路構築）の実現方法はいくつか考えられる。例えば、無線メッシュネットワークのような端末の移動がないマルチホップネットワークの場合、静的に経路構築することができる。また、車両間ネットワークのように端末が移動することでネットワークトポロジが動的に変化する場合やネットワーク内のトラフィックフローの分布が時間変動する場合等では、各種オンデマンドルーティングやテーブル駆動型のルーティングプロトコルのコスト値に各端末が送受信しているトラフィックフロー数を用いて、トラフィックフロー数が小さな端末を通る経路を優先するような制御が効果的だと考えられる。

提案した経路制御法をオンデマンドルーティングに適用した場合のエンド端末間のスループット性能を計算機シミュレーションで評価した。中規模な 5×7 格子トポロジ（合計 35 端末）において、トラフィックフローが 2 本あるマルチホップネットワークを想定した評価を行い、既存の最短経路選択法を指向性全二重無線通信に適用する場合と比較して、提案方式は最大で 80% 以上のスループット性能の改善効果が得られることを示した。

(4) 全二重 MIMO 通信を実現する端末構成法およびクロスレイヤプロトコル

本課題では、全二重無線通信に MIMO 通信を組み合わせた端末構成法を提案した。提案した全二重 MIMO 通信のための端末構成法では、サーキュレータを使った従来の全二重無線機構を N 個並列に並べることで、 N 本の送受信アンテナで $N \times N$ 全二重 MIMO 通信を実現するものである。

さらに、無線環境に応じて送信レートを適応的に制御する RA 手法を検討した。この手法は、特に間欠的なパケットロスに対応する RA 手法である。また、無線環境に加えて接続端末数といったネットワーク状況の変化を勘案して適切な無線ネットワークを選択する手法について検討した。これらのプロトコルは、半二重環境もしくは複数周波数帯での全二重無線通信環境での基礎検討であり、今後、同一周波数での全二重無線通信環境下で性能改善するよう展開することが期待される。

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 6 件)

① 福本 めぐみ, 萬代 雅希, “ネットワーク状況を用いた端末主導型無線 LAN 接続制御,” 電子情報通信学会総合大会, no. B-6-20, p. 20, 2015 年 3 月 11 日, 立命館大学 (滋賀県草津市).

② Taiga Aoki and Masaki Bandai, “A rate adaptation mechanism coping with temporary packet losses in wireless LANs,” Proc. RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP' 15), pp. 266-269, 2015 年 2 月 28 日, クアラルンプール (マレーシア).

③ Katsuhiko Kato and Masaki Bandai, “Routing Protocol for Directional Full-Duplex Wireless,” Proc. IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC' 13), pp. 3254-3258, 2013 年 9 月 11 日, ロンドン (イギリス).

④ 加藤 克洋, 萬代 雅希, “指向性アンテナを用いた全二重無線通信のためのルーティングプロトコル,” 情報処理学会マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOM02013) シンポジウム, pp. 1558-1562, 2013 年 7 月 11 日, 十勝川温泉ホテル大平原 (北海道河東郡音更町).

⑤ Ken Miura and Masaki Bandai, “Node Architecture and MAC Protocol for Full Duplex Wireless and Directional Antennas,” Proc. IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC2012), pp. 385-390, 2012 年 9 月 11 日, シドニー (オーストラリア).

⑥ 三浦 健, 萬代 雅希, “指向性アンテナを用いた全二重無線 MAC プロトコル,” 情報処理学会マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOM02012) シンポジウム, pp. 1787-1794, 2012 年 7 月 6 日, 山代温泉ホテル百万石 (石川県加賀市).

[その他]

上智大学理工学部情報理工学科萬代雅希研究室ホームページ

<http://bandailab.org>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

萬代 雅希 (BANDAI, Masaki)

上智大学・理工学部・准教授

研究者番号: 90377713