

令和 2 年 5 月 22 日現在

機関番号：14101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14681

研究課題名（和文）無線全二重通信ネットワークにおける理論解析手法の開発とプロトコル設計

研究課題名（英文）Development of analytical models and protocols for wireless full-duplex multi-hop networks

研究代表者

眞田 耕輔（Sanada, Kosuke）

三重大学・工学研究科・助教

研究者番号：30777545

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）：無線全二重通信ネットワークにおける解析手法を構築し、その解析手法に基づく最適なプロトコル設計をすることを目的に研究を進めた。その結果、研究成果として、無線全二重通信を適用したWLANやマルチホップネットワークにおける理論解析モデルを提案し、その妥当性を確認した。また、理論解析モデルに基づく無線全二重通信ネットワークにおけるプロトコルを提案し、その有効性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、当該分野において初めて明確な解析戦略を与え、一般性と汎用性を有した理論解析モデルの構築が可能になり、理論解析モデルの構築は無線全二重通信ネットワークの実用化の加速に寄与できるものである。そのため、当該技術分野および社会への波及効果は十分に大きいと言える。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this research is to establish analytical models for wireless full-duplex networks. Based on the analytical models, in addition, this research aims to design optimal protocols for wireless full-duplex networks. The validities of proposed analytical models are confirmed through the comparison with the analytical results and computer-simulation results. Additionally, we proposed MAC protocols for wireless full-duplex networks, and the efficiency of the protocols is confirmed.

研究分野：無線通信工学

キーワード：無線全二重通信 理論解析 MACプロトコル ネットワーク 数理モデル

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

1. 研究開始当初の背景

現在の無線通信ネットワークは、半二重通信であり同じチャネル上でデータ送信と受信を同時に行うことができないのが一般的であった。しかし、近年の干渉除去技術の発展により、同じチャネル上でのデータ送信と受信を同時に行う「無線全二重通信」が可能となっている。無線全二重通信では、送信と受信を同時に行うことができることから、1対1の通信では単純に通信容量をこれまでの2倍にすることができる。そのため、無線全二重通信の研究は、これまでの無線通信の常識を覆すブレークスルーを創出するとして、多くの研究者に注目されている。

しかし、複数の端末が混在するネットワークに無線全二重通信を適用させたとき、周囲の通信状況を配慮したうえで、端末間の送受信のタイミングを自律分散的に合わせる必要がある。また、端末間でどのような干渉が生じるのかは十分に明らかになっておらず、これが無線全二重通信のポテンシャルを最大限に引き出すことの妨げとなっている。複数の端末が結合するネットワークにおいて、その性能を引き出すには、適切なMACプロトコルを設計する必要がある。これまでの無線通信プロトコルは半二重を前提として、研究開発が進められてきており、同じチャネル上で端末が送受信を同時に行う「無線全二重通信における本質的な動作」をする端末がネットワークとして結合したときの「ネットワーク全体」に及ぼす影響に関する知見はこれまで全く得られていない。最適なプロトコルを設計するにおいて、まずこの知見を得ることが先決である。

ネットワークの挙動を把握する有効な手段の一つとして、数理モデルに基づく理論解析手法がある。シミュレーションはあくまで特定のパラメータについてのネットワークの挙動を模擬するツールであり、また、システムパラメータとネットワークの特性を陽に把握することは極めて困難であり、統計データを得るまでに膨大な時間を要するという本質的な欠点がある。一方、「解析」は一旦解が求まれば短時間に結果を把握できる。さらに数式からネットワークの挙動に関する多くの情報を入手でき、評価に数学的な保証が加わるなど多くの利点を得られる。さらに、最適化アルゴリズム等を適用させることでのシステムの最適化およびプロトコル設計へのフィードバックが可能となり、理論解析手法導出がシステムの実用や開発へ与える影響は大きい。

2. 研究の目的

本研究では、無線全二重通信ネットワークにおける理論解析手法の導出と、その理論解析を基に最適なMACプロトコル設計を目指す。ネットワークを構成する「個」の動作がネットワーク「全体」の振舞いに及ぼす影響をボトムアップ的にモデル化することにより、自律分散型ネットワークの両方に通用する無線全二重通信ネットワークにおける統一的理論解析技術の基礎理論を導出する。さらに構築した理論に基づき、アプリケーションを意識した実際の通信ネットワークを想定した解析への応用、理論解析に基づいたMACプロトコル設計を行う。

本研究ではこれらの研究開発を通じ、(1) 全二重通信ネットワークと半二重通信ネットワークにおけるスループットの差異、(2) 無線全二重通信ネットワーク技術が具体的なアプリケーションに与えるインパクト、を理論的側面から明らかにし、(3) プロトコル設計にフィードバックする。

3. 研究の方法

本研究を効率よく遂行するために、研究フェーズを2つに分割し、図1に示す解析戦略に基づいて研究を進めた。第1フェーズでは、無線全二重通信ネットワークにおける理論解析の基礎理論の確立、第2フェーズでは、第1フェーズで得られた基礎理論を、アプリケーションを意識した解析およびプロトコル設計へと発展させる。各フェーズでは常に、無線全二重通信を用いた「個」の動作からネットワーク「全体」を表現することを強く意識し、下位層のモデルから上位層のモデルを構築するボトムアップ的な解析アプローチを取るという方針で研究を進めていった。

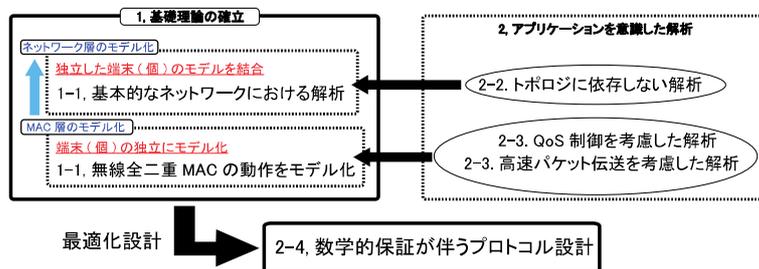


図 1 本研究課題における各フェーズの研究項目

4. 研究成果

平成 29 年度は、無線全二重通信ネットワークの解析における基礎理論を確立する。無線全二重通信の基本的な動作をする端末がネットワークとして結合したときの、ネットワークのスループットおよび遅延特性への影響を明らかにするために、理論解析手法を導出する研究を進めた。

まず、解析対象は任意のホップ数の直線状のマルチホップネットワーク(図 2)を対象として解析モデルの構築を行なった。無線全二重通信を用いた「個」の動作をモデル化するためにまず、無線全二重通信のための MAC プロトコル(FD MAC)の動作を表現したマルコフモデルの構築を行なった。次に、その「個」の動作が相互に関連して構成されるネットワークを表すために、マルチホップネットワークにおける有効な解析手法であるエアタイムを用いた解析手法と、無線全二重通信のための MAC プロトコルの動作を表現したマルコフモデルの統合を行なった。これにより、それぞれの端末の FD MAC の動作と個々の端末間の干渉を同時に考慮することができるようになり、全二重通信マルチホップネットワークにおける解析手法を構築することに成功した。図 3 に 3 ホップネットワークにおける最大スループットを示す。図 3 より、解析結果とシミュレーション結果が一致していることから、解析モデルの妥当性が確認できる。

本研究成果は国際会議で発表し、論文誌へ採録済みである。この研究成果は図 1 における 1-1、2-2 の MAC 層のモデル化とネットワーク層のモデル化の項目に対応する。

FD MAC の設計方針は、端末間における全二重通信のタイミング調整の方法という点で、非同期型および同期型の 2 種類に大きく分類される。この 2 つの方式の優位性は特にネットワークにおける端末台数やデータ送信時間に依存するため、この関係を詳細に明らかにするうえで、理論解析モデルの構築が望ましい。

平成 30 年度は、平成 29 年度に得られた FD MAC の数理モデルをさらに改良した解析手法を提案した。図 4 に FD MAC の数理モデルの改良型を示す。このモデルにより、精度を落とさずシンプルに数式を解くことを可能にした。図 5 に、WLAN における非同期型および同期型 FD MAC の性能比較を示す。解析結果とシミュレーション結果が一致していることから、解析モデルの妥当性が確認できる。また、本解析より、同期型 FD MAC と非同期型 FD MAC の優位性が変化するデータ送信時間を導出することが可能である。このデータ送信時間を、同期型 FD MAC と非同期型 FD MAC の切替閾値として制御することにより、システムの性能が向上することを示した。これらの研究成果は図 1 における 1-1 および 2-3 の項目に該当する。

本研究成果は国際会議で発表し、論文誌へ採録済みである。令和元年度には、これらのモデルを発展させ、同期型 FD MAC を適用したマルチホップネットワークの解析手法を提案し、国際会議で発表済みで、現在論文投稿準備中である。これにより、スター型ネットワークに限らずマルチホップネットワークにおいても同期型および非同期型 FD MAC の振舞いを評価できるようになった。

FD MAC を適用した WLAN の振舞いを詳細に調べていく過程で、FD MAC の動作が起因して端末間のデータ送信の衝突を誘発し、それがシステムの性能の低下につながっていることを発見した。そこで、この誘発された衝突を回避するためのバックオフ手法を新たに提案した。図 6 にその改良型のバックオフ手法を用いたアクセス手順を示す。従来型 FD MAC におけるバックオフでは、通信が失敗すると従前のアルゴリズムに従って、制御パラメータを変更していた。この通信の失敗後の制御パラメータの変更がさらなる衝突を誘発するため、改良型バックオフ手法では、制御パラメータの変更を限定的にした。これにより、データ送信の衝突の誘発を抑制し、システム性能の向上が得られることを確認した。図 7 に従来型と改良型バックオフ手法における性能比較を示す。図 7 より、改良型バックオフ手法が従来型バックオフ手法により優れたシステム性能

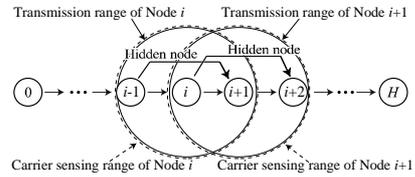


図 2. 無線全二重通信マルチホップネットワーク

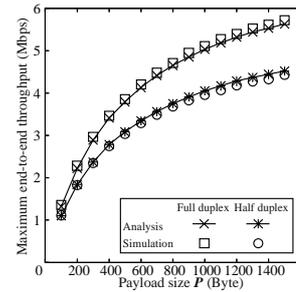


図 3 解析モデルのシミュレーションの結果の比較

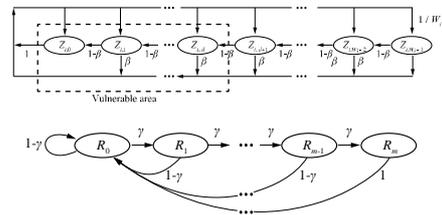


図 4. FD MAC の数理モデルの改良型

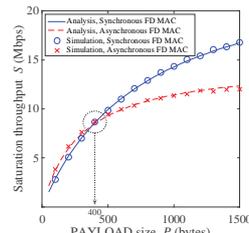


図 5 非同期型および同期型 FD MAC の性能比較

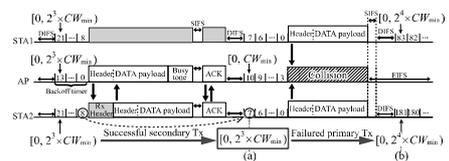


図 6 改良型バックオフ手法

が得られていることが確認できる。また、図4の数理モデルを用いた性能比較も行い、理論的な側面からも改良型バックオフ手法の有効性を示した。さらに、解析モデルから適切な制御パラメータの値を導出し、その値を適用して動作させることで、システム性能の向上が得られることを確認した。

本研究成果は国際会議で発表し、論文誌へ採録済みである。この研究成果は、解析モデルの構築から得られる知見を進展させて、プロトコルの提案と理論的な側面からも、提案手法の有効性の検証を行なった点から、図1の2-4「数学的保証が伴うプロトコル設計」の項目に対応する。

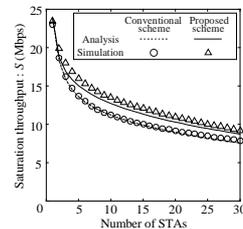


図7 従来型および改良型バックオフ手法における性能比較

令和元年度は、無線全二重通信ネットワークにおいて、高速パケット伝送技術であるフレームアグリゲーションを考慮した解析モデルの構築を行なった。全二重通信を行う際に、その対となるデータ送信の送信時間は対称である方が効率よく情報の伝送が可能になる。その対称性を確保するために、本研究ではフレームアグリゲーション技術を用いる方法を採用した。フレームアグリゲーション技術は、複数のデータフレームを一つにまとめて効率よく伝送する技術である。ま

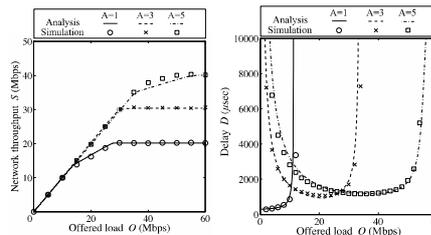


図8 トラフィック負荷に対するネットワークスループット

とめるためのデータフレームが、送信キューに常に存在(飽和状態)すれば、常に最大のアグリゲーションサイズでのデータ送信が可能となる。しかし、実際のネットワークは非飽和で動作することがほとんどである。本研究では、非飽和状態の全二重通信WLANを対称として、フレームアグリゲーションとFD MACの動作を考慮した解析モデルの構築を行なった。図8にネットワークにおけるトラフィック負荷に対するスループットおよび遅延を、アグリゲーションサイズ毎に示した。解析モデルから得られる結果とシミュレーションの結果が一致することから解析モデルの妥当性が確認できる。アグリゲーションサイズをあげることで、高いスループットが得られるが、アグリゲーションサイズ分のデータフレームを確保する必要があり、遅延が増大してしまう。そのため、負荷に応じてアグリゲーションサイズを制御することにより、スループットおよび遅延の両面から安定したシステム性能が得られると示唆される。解析モデルを用いることにより、適切なアグリゲーションサイズを導出することが可能である。

本研究成果は国際会議で発表し、論文誌への投稿準備中である。これらの研究成果は、図1の2-3「高速パケット伝送を考慮した解析」の項目に対応する。

本研究は、当該分野において初めて明確な解析戦略を与え、一般性と汎用性を有した理論解析モデルの構築が可能になり、理論解析モデルの構築は無線全二重通信ネットワークの実用化の加速に寄与できるものである。そのため、当該技術分野および社会への波及効果は十分に大きいと言える。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Chikara Fujimura, Kosuke Sanada, Kazuo Mori	4. 巻 E102-B
2. 論文標題 Analytical Expressions for End-to-End throughput of String-Topology Wireless Full-Duplex Multi-hop Networks	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Communications	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/transcom.2018EBP3236	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Shota Sakakura, Chikara Fujimura, Kosuke Sanada, Kazuo Mori
2. 発表標題 A Simple Backoff Scheme for Full Duplex MAC protocols in Wireless LANs
3. 学会等名 WPMC 2018（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kosuke Sanada, Kazuo Mori
2. 発表標題 Throughput Analysis for Full Duplex Wireless Local Area Networks with Hidden Nodes
3. 学会等名 CCNC 2019（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤村力, 眞田 耕輔, 森 香津夫
2. 発表標題 指数バックオフを考慮した無線全二重通信マルチホップネットワークにおけるスループット解析
3. 学会等名 電子情報通信学会 ソサエティ大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 坂倉 翔太, 眞田 耕輔, 森 香津夫
2. 発表標題 全二重無線LANにおける端末間のフレーム衝突を抑制するバックオフ手法の特性評価
3. 学会等名 電子情報通信学会 ソサエティ大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 坂倉 翔太, 藤村 力, 眞田 耕輔, 森 香津夫
2. 発表標題 全二重無線LANにおける端末間のフレーム衝突を抑制するバックオフ手法の提案
3. 学会等名 電子情報通信学会 ネットワークシステム研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 眞田 耕輔, 森 香津夫
2. 発表標題 隠れ端末の影響を考慮した全二重WLANにおけるスループット解析
3. 学会等名 電子情報通信学会 ネットワークシステム研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Chikara Fujimura, Kosuke Sanada, Kazuo Mori
2. 発表標題 Throughput Analysis for String-Topology Full-Duplex Multi-hop Network
3. 学会等名 WPMC 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 藤村 力, 眞田耕輔, 森 香津夫
2. 発表標題 直線状無線全二重通信マルチホップネットワークにおけるスループット解析
3. 学会等名 電子情報通信学会 ネットワークシステム研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 眞田 耕輔, 森 香津夫
2. 発表標題 全二重WLANにおけるバイナリバックオフを考慮したスループット解析
3. 学会等名 電子情報通信学会 ネットワークシステム研究会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----