

機関番号：32621

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2009～2010

課題番号：21700071

研究課題名 (和文) エラーレジリエンシーに優れる無線マルチホップネットワークに関する研究

研究課題名 (英文) Research on Wireless Multi-hop Networks with High Error Resiliency

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

研究成果の概要 (和文)：

低いエラー率を実現する高信頼無線マルチホップネットワーク基盤技術を構築するために、第三者端末のオーバーヒアリングを活用したオポチュニスティック型通信の適用、複数周波数帯域の適応的な利用、スマートアンテナ技術とネットワークコーディングの適用を検討した。特に、物理層、メディアアクセス制御(MAC)層、ネットワーク層等の各層が協調して動作するクロスレイヤ型無線マルチホップネットワークを開発した。

研究成果の概要 (英文)：

This research proposes some cross-layer protocols for wireless multi-hop networks to realize high error resiliency. The proposal includes a proxy-based opportunistic retransmission, the adaptive use of multiple bandwidth, multi-lobe transmission for wireless network coding. Implementing the proposed protocols on network simulators and partly on a test bed, we confirm the effectiveness of the proposed protocols.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2010 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野： 計算機システム・ネットワーク

科研費の分科・細目： 情報学・計算機システム・ネットワーク

キーワード： アドホックネットワーク，マルチホップネットワーク，メディアアクセス制御 (MAC)，ルーティング

## 1. 研究開始当初の背景

無線マルチホップネットワークは、無線端末(ノード)が自律分散的に情報をバケツリレー転送(マルチホップ通信)する無線ネットワークである。無線マルチホップネットワークは、人が携帯するモバイル端末と都市や生活環境に埋め込まれたコンピュータとの接続、スマートグリッドや工場における無線機器

制御用途の機器間通信 (M2M) 等の広範な応用が期待される。その研究開発に当たっては、無線通信に起因するデータ受信エラーが問題となる。無線ネットワークのデータ受信エラーは、1)フェージング等による受信信号レベルの変動、2)パケット同士の衝突、3)ノードの移動によるリンク切断の三つが主因である。1)は物理層での誤り訂正等の諸技術、

2)はメディアアクセス制御(MAC)層での再送制御やスケジューリング, 3)はネットワーク層でのルーティングにより対処するのが一般的である. 一般に, 無線ネットワークの受信エラーへの対処は, 携帯電話やアクセスポイントのある無線 LAN 等のシングルホップ環境を想定しており, 無線マルチホップ環境に関しては十分な知見が得られていない. したがって, 多数ノードから発生する大量の情報が発生する環境での高信頼な無線マルチホップネットワーク基盤技術の要求に応えることは困難であると考えられる.

## 2. 研究の目的

本研究では, データ受信エラー率の低い高信頼な無線マルチホップネットワークを実現することを目的とし, 無線物理層, メディアアクセス制御層およびネットワーク層 (ルーティング) が協調動作するクロスレイヤ型の通信プロトコルを開発した.

具体的には, 下記の四課題に取り組んだ.

- (1) オポチュニスティック通信を適用したクロスレイヤプロトコル
- (2) 複数周波数帯の特質を活用するマルチレート対応クロスレイヤプロトコル
- (3) 指向性 MAC プロトコルにおけるネットワークコーディング利用の検討
- (4) メインローブとヌルを組み合わせたビームパターンを利用する MAC 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, 市販のネットワークシミュレータである Qualnet もしくは, C++ や C 言語で自作したイベントドリブンの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) 等を確率的に与えている. 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, 受信電力により, データエラー率を算出している等である.

これに加え, 一部課題では, ソフトウェア無線実験端末 USRP (Universal Software Radio Peripheral) およびスマートアンテナ ESPAR アンテナを使った実験を行っている.

## 4. 研究成果

- (1) オポチュニスティック型通信を適用したクロスレイヤプロトコル

本課題では, オポチュニスティック型通信を無線マルチホップネットワークに適用することで送信端末以外の第三者の周辺端末が代理で再送処理を行い, データ受信エラーの連続失敗を回避するクロスレイヤプロトコルを提案した.

一般のマルチホップネットワークでは, MAC 層で, データ受信に失敗した場合, デー

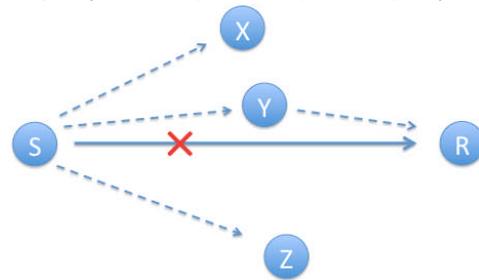


図 1 : オポチュニスティック型通信の概念図

タ送信者が同じデータを再送する. しかし, 屋内環境における一時的な遮蔽や, 電波の直進性の強い高い無線周波数帯域を利用する場合では, 送信者が再送を繰り返しても, 送受信端末間の無線の電波環境は変化せず, データ受信が繰り返し失敗する可能性が高い. オポチュニスティック通信は特定の端末との通信に固執せず, その時に通信可能な端末を利用するという考えを基にした手法である. 提案手法は, データ受信エラー発生時に, そのデータを正しく受信できた第三者端末が代理でデータの再送を行う手法である.

図 1 に提案手法の概念図を示す. 五つの端末 S, R, X, Y, Z が存在し, 送信端末 S から R にデータ送信したが, 失敗した場合を考える. 今, 事前に何らかのルーティングプロトコルにより, S から直接 R に送信するルートが作られているとする. 一般的な無線マルチホップネットワークの MAC プロトコルの場合, 端末 S がデータの再送する. この場合, この通信に関係のない周辺の第三者の端末 (図中の X, Y, Z) がデータを受信 (オーバーヒア) できていたとしても, データの MAC アドレスを参照し, 自身宛ではないとわかると, そのデータを破棄する. 提案手法では, オーバーヒアに成功した第三者端末による再送を適用する (図の例だと Y が代理で再送). これにより, 遮蔽等により端末 S-R 間の電波環境が変化しなくても再送成功確率の向上が見込まれることや, 再送端末が端末 R に近くに位置することで通信環境が向上することも期待できる. 提案手法はこれらにより, 端末 S からの再送よりも高確率で再送を成功させ, 高信頼なデータ送信を可能にすることを狙っている. 提案手法は, 複数の代理再送端末候補間の調停や, 本来の通信相手への送信エラー発生時に, 代理送信する周辺ノード候補のうち, 実際にパケット転送できるノードのみを候補とすることで, 転送失敗確率を低下させる機構を有する.

性能評価として, まず一般的なオポチュニスティック通信を無線マルチホップネットワークに適用するモデルの計算機シミュレ

ーションプログラムを作成し、スループットや遅延等の基本通信特性を明らかにした。ここでは、送信者が宛先を決める送信者主導のオポチュニスティックルーティングを採用した。

次に、提案手法の計算機シミュレーションプログラムを作成し、提案手法の性能を明らかにした。その結果、5ノード程度の基本的なトポロジーにおいてはデータエラー率を最大で約1/500にまで低下させることができるが、ノード数が多く、ノード密度が高い環境下ではほとんど性能向上が得られないことがわかった。また、ソフトウェア無線実験装置を用いた基礎的な実装実験を行い、1対1の単純な通信におけるパケットエラー率を測定した。

次に、端末の移動性を考慮したトポロジーでの提案手法のスループット、エラー率、遅延性能等を計算機シミュレーションにより評価した。評価に際しては、無線通信のエラー率等をより現実的にモデル化するためにESPARアンテナを用いた実機実験を行い、実験結果をシミュレーションパラメータに反映させた。評価結果より、提案手法において、送信エラー発生時に周辺ノードによる代理データ送信が有効にエラー回復できる条件を明らかにした。具体的には、交差点のように複数のトラフィックフローが1ノードで交差するようなトポロジーにおいて、比較的高負荷時に最大で60パーセント程度スループット性能を改善でき、高いエラーレジリエンシー性能を実現できることを明らかにした。

本課題は、信頼性の高い自律分散型無線マルチホップネットワークの実現において、オポチュニスティック型通信の適用方法や適用領域を明らかにしたという点で意義深いものと考えられる。

## (2) 複数周波数帯の特質を活用するマルチレート対応クロスレイヤプロトコル

本課題では、複数の無線周波数帯のそれぞれの特質を活用するマルチレート対応型クロスレイヤプロトコルを提案した。提案手法では、端末がデータを送信する際に、各周波数帯の特性と現在の利用状況を考慮し、複数の周波数帯から適切な周波数帯域を選択する。選択には、帯域によって構成される宛先への経路の違いや、送信レートの違いを利用する。

本課題は無線LANに用途を限定するものではないが、利用しやすい周波数帯域として無線LANを例にとり、研究を行った。一般に無線LAN等は2.4GHz帯と5GHz帯の二つの無線周波数帯域を利用する。それぞれの周波数帯域は、電波の減衰の程度や利用状況が異なる。具体的には、2.4GHz帯と比較して、5GHz帯は電波の減衰が大きく、通信距離が短い、も

しくは受信電力の低下に起因して、通信レートが低くなる。一方で、2.4GHz帯は5GHz帯よりも混雑しており、他通信等からの干渉を受けやすいことも知られている。

提案手法は、各端末が2.4GHz帯と5GHz帯の二組の無線送受信機を持つと仮定する。データ送信者は、まずそれぞれの周波数帯域において、ルート構築要求/ルート構築応答(RREQ/RREP)をやり取りし、それぞれの帯域で構築された経路でのデータ送信にかかる遅延時間を推定する。次に、宛先端末までの遅延時間が小さい経路の周波数帯をキャリアセンスし、チャンネルが空いている場合は、その帯域で通信を開始する。チャンネルが使用中の場合は、もう一つの帯域のチャンネルをキャリアセンスする。このように、各帯域での予測遅延時間とチャンネルの空き状況を勘案して、適応的に利用する周波数帯域を決めることで、無線マルチホップネットワークのスループット性能を改善する。

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、単一の周波数帯を用いる場合に比べて、高負荷状態で最大約26パーセントスループットが改善されることを示した。

## (3) 指向性MACプロトコルにおけるネットワークコーディング利用の検討

本課題では、アンテナ指向性をソフトウェア的に制御可能なスマートアンテナを用いたマルチレート対応MACプロトコルへのネットワークコーディングの適用可能性について検討した。

アンテナ技術の進展により、携帯端末においても小型なスマートアンテナの利用が現実的になりつつある。本課題では、複数方向にメインローブを持つようなアンテナパターンを活用し、XOR型ネットワークコーディングにおいて、ネイティブパケットの送信には送信レートを高める目的でシングルローブの指向性送信を適用し、XORパケット送信には高送信レートでのブロードキャスト通信を実現する目的でマルチローブ送信を適用する送信方式を提案した。

計算機シミュレーションとESPARアンテナを用いた実験により性能評価し、5ノードをX型に配置し、クロスするように2フローが存在するトポロジーにおいて、約2倍のスループットが得られることがわかった。一般に、XOR型のネットワークコーディングの性能は、XORパケット送信にボトルネックがあると考えられており、ボトルネック解消にマルチローブ送信の適用が有効であるという知見を得た。

## (4) メインローブとヌルを組み合わせたビームパターンを利用するMACプロトコル

本課題では、メインローブとヌルの両方のビームパターンを組み合わせた指向性 MAC プロトコルを提案した。提案手法では、あらかじめメインローブの方向とヌルの方向を計算した複数のビームパターンを用意する。そして、RTS 受信時の状況に応じて、通信相手と干渉端末の方向を考慮して最適なビームパターンを選択して用いる。具体的には、所望方向（通信相手の方向）へ高いアンテナ利得を得つつ（メインローブを向ける）干渉端末方向へのアンテナ利得を低く（ヌル点を向ける）することで高いスループット性能を実現する MAC プロトコルである。

提案手法を計算機シミュレーション上に実装し、性能評価を行った。まず基礎評価として干渉端末が一つの場合での評価をし、ネットワークの高負荷時に性能を向上することを示した。さらに、周辺端末が多数あるランダム配置のトポロジーでの評価を行った。ランダムトポロジーにおいては、性能改善は得られないことがわかった。これは、ESPAR アンテナのビームパターンではサイドローブやバックローブにより干渉を受けやすいためである。しかし、サイド・バックローブの影響を無視できる理想的なビームパターンを仮定する場合、約 35 パーセントのスループット性能改善が得られることがわかった。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

- [1] 吉田将也, 木谷友哉, 萬代雅希, 渡辺尚, “環境発電によって電力供給を行うセンサネットワークでのデータ収集方式,” 情報処理学会論文誌, Vol. 52, No. 3, pp. 997-1009, 2011 年 3 月. (査読あり)
- [2] 坂本浩, 萬代雅希, 渡辺尚, “スマートアンテナを利用した M2M データ収集無線アクセス系制御方式,” 電気学会論文誌, Vol. 130-C, No. 7, pp. 1262-1270, 2010 年 7 月. (査読あり)
- [3] Y. Takada, M. Bandai, T. Kitani, T. Watanabe, “Cooperative data buffering with mobile sinks for wireless multimedia sensor network,” Journal of Information Processing, Vol. 18, No. 3, pp. 96-109, March 2010. (査読あり)

[学会発表] (計 9 件)

- [1] 加藤泰大, 萬代雅希, 渡辺尚, “指向性アンテナを利用したオポチュニスティックフォワーディングについて,” 電子情報通信学会ネットワーク研究会, 沖縄, 2011. 3. 4.
- [2] 加藤泰大, 萬代雅希, 渡辺尚, “オポチュニスティック型通信を適用した指向性 MAC プロトコルについて,” 情報処理学会

マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICO) シンポジウム, 岐阜, 2010. 7. 9.

- [3] T. Furukawa, M. Bandai, H. Yomo, S. Obana, T. Watanabe, “Multi-lobe directional transmission for network coding in multi-rate ad hoc networks,” Asia-Pacific Symposium on Information and Telecommunication Technologies (APSITT2010), Kuching, 2010. 6. 17.
- [4] T. Xu, M. Watanabe, M. Bandai, T. Watanabe, “An RSSI-based cross layer protocol for directional ad hoc networks and its implementation,” International Conference on Mobile Computing and Ubiquitous Networking (ICMU2010), Seattle, 2010. 4. 27.
- [5] W. Li, M. Bandai, T. Watanabe, “Tradeoffs among delay, energy and consumption of partial data aggregation in wireless sensor networks,” IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA2010), Perth, 2010. 4. 23.
- [6] 加藤泰大, 萬代雅希, 渡辺尚, “オポチュニスティック型指向性 MAC プロトコルについて,” 電子情報通信学会総合大会, 仙台, 2010. 3. 16.
- [7] 加藤泰大, 萬代雅希, 渡辺尚, “指向性アンテナを用いたオポチュニスティック型通信方式について,” 電子情報通信学会アドホックネットワーク研究会, 浜松, 2010. 1. 22.
- [8] K. Takahashi, M. Bandai, T. Watanabe, “A routing protocol towards sustainable sensor networks for nature monitoring,” R'09 Twin World Congress, Nagoya, 2009. 9. 15.
- [9] D. Okamura, W. Li, M. Bandai, T. Watanabe, “Fundamental analysis towards partial data aggregation in wireless sensor networks,” International Symposium on Wireless Personal Communications (WPMC2009), Sendai, 2009. 9. 8.

[その他]

なし

## 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
- (2) 研究分担者  
なし
- (3) 連携研究者  
なし