

送信電力制御による無線マルチホップ通信の広帯域化

東京電機大学 理工学部 情報システム工学科

畠田 早苗 梶垣 博章

アドホックネットワークや無線マルチホップアクセスネットワークのように、送信元移動コンピュータから送信先移動コンピュータまで無線マルチホップ配送を用いるネットワークでは、無線信号送信の競合による送信待ち時間や無線信号の衝突を回避するための RTS/CTS 制御によって、最大エンド-エンド帯域幅が各無線通信リンクの帯域幅の $1/3$ に制限される。本論文では、各移動コンピュータが無線信号送信電力を制御することで最大エンド-エンド帯域幅を各無線リンクの帯域幅の最大 $1/2$ まで拡大できることを示し、これを実現する経路探索プロトコルとデータ配送プロトコルを設計する。

High Throughput Wireless Multihop Message Transmission with Power Control

Sanae Shimada Hiroaki Higaki
{sanae, hig}@higlab.k.dendai.ac.jp

Department of Computers and Systems Engineering
Tokyo Denki University

In a wireless mobile network with wireless multihop transmissions such as a mobile adhoc network and a wireless multihop access network, end-to-end throughput from a source mobile computer to a destination one is less than $1/3$ of throughput of a wireless communication link due to random waiting time for contention avoidance and RTS/CTS control for solving a hidden terminal problem. In this paper, the authors propose an adhoc routing protocol and a message transmission protocol with transmission power control for achieving higher end-to-end throughput. The maximum end-to-end throughput in the proposed protocols is $1/2$ of throughput of a wireless communication links. Simulation result shows that the proposed protocol has almost the same connectivity with conventional no power control protocols if density of mobile computers is sufficiently high.

1 背景と目的

コンピュータ技術とネットワーク技術の発達により、移動コンピュータを構成要素に含むモバイルネットワークの普及が進んでいる。ここで、携帯性の高いノート型PCやPDA、あるいは小型軽量化を特に必要とするセンサノード等では、搭載可能なバッテリー容量が大きくないことから、無線送信電力を無制限に大きくすることはできない。限られた無線送信電力を用いる移動コンピュータ群によって構成されるモバイルネットワークにおいて、高いコネクティビティを得るためには、送信元移動コンピュータから送信先移動コンピュータまで配送される各パケットを中継移動コンピュータが順次転送する無線マルチホップ配送が用いられる。これまでに、パケットの配送経路を決定する様々なルーティングプロトコルが提案されている [2] [3]。IEEE802.11 [1] をはじめとするCSMA/CAに基づく無線LANプロトコルでは、異なる移動コンピュータが送信した無線信号が衝突することを回避するために、RTS/CTS制御が導入されている。このため、無線マルチホップ配送では、配送経路に含まれる移動コンピュータの一部のみが同時に信号を送信することが可能となり、エンド-エンド帯域幅が縮小するという問題がある。本論文では、移動コンピュータが送信電力制御を行なうことにより、エンド-エンド帯域幅を拡大する手法を提案する。また、この手法を実現するための経路探索プロトコルおよび検出した経路を用いたパケット配送プロトコルを設計する。

2 無線マルチホップ通信の帯域幅

無線マルチホップネットワーク $\mathcal{N} = \langle \mathcal{M}, \mathcal{L} \rangle$ は、移動コンピュータ M_i の集合 \mathcal{M} と M_i から隣接移動コンピュータ M_j への無線通信リンク $|M_i, M_j\rangle$ の集合 $\mathcal{L} \subset \mathcal{M} \times \mathcal{M}$ によって定められる。ただし、 M_i が最大送信電力 P_{tmax} を用いた場合の無線信号到達範囲内に M_j が存在するとき、 $|M_i, M_j\rangle \in \mathcal{L}$ とする。また、すべての無線リンクは双方向であると仮定する。すなわち、 $|M_i, M_j\rangle \in \mathcal{L}$ ならば $|M_j, M_i\rangle \in \mathcal{L}$ である。ここで、送信元移動コンピュータ $M_s (= M_0)$ から送信先移動コンピュータ $M_d (= M_l)$ へのメッセージ配送について $|M_s, M_d\rangle \notin \mathcal{L}$ であるならば、 $|M_i, M_{i+1}\rangle \in \mathcal{L}$ ($0 \leq i < l$) なる無線通信リンク群を用いて、中継移動コンピュータ M_1, \dots, M_{l-1} がメッセージを順次転送することによって無線マルチホップ配送を行なう。このマルチホップ配送経路を $R = \langle M_s (= M_0), M_1, \dots, M_{l-1}, M_d (= M_l) \rangle$ で表す。

まず、移動コンピュータ M_i は、隣接移動コンピュータ M_{i-1} からの無線信号を受信することと隣接移動コンピュータ M_{i+1} への無線信号を送信することを同時に行なえないことから、 R に沿った無線マルチホップ配送は、以下の性質を持つ。

[性質 1] 無線通信リンク $|M_{i-1}, M_i\rangle$ と $|M_i, M_{i+1}\rangle$ を同時に用いてパケット群を配送することはできない。つ

まり、 M_{i-1} と M_i が同時に経路 R 上でパケット群をそれぞれ M_i と M_{i+1} へ転送することはできない (図 1)。なお、 R 上の各移動コンピュータが送信電力を制御するか否かに関わらず、無線マルチホップ配送はこの性質を持つ。□

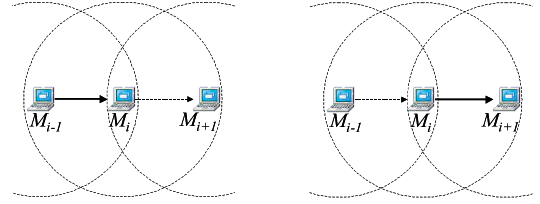


図 1: 無線マルチホップ配送における転送の制約 (1)

DSR [2] や AODV [3] といった経路探索要求メッセージ $Rreq$ のフラッディングを用いたアドホックルーティングプロトコルは、各移動コンピュータが最大送信電力 P_{tmax} を用いて無線信号を送信することで $Rreq$ のフラッディングを行なう場合、原理的に最短経路 (最小ホップ数経路) を検出することができる。そのため、 M_i の無線信号到達範囲内に含まれる R 上の移動コンピュータは M_{i-1} と M_{i+1} のみである (図 2)。

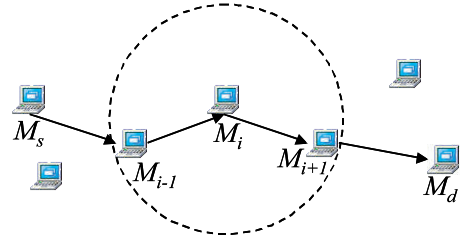


図 2: アドホックルーティングプロトコルの検出経路

したがって、 M_{i-1} と M_i が送信した無線信号が M_{i+1} で衝突を発生することはない。以上により、すべての無線通信リンクの帯域幅が等しい (この帯域幅を B_L とする) と仮定すると、以下が導かれる。

[定理 1] 経路 R に沿った無線マルチホップ配送 ($l \geq 2$) におけるエンド-エンド帯域幅は $B_L/2$ を超えることはできない。□

[証明] 経路 R に沿った無線マルチホップ配送のエンド-エンド帯域幅 B が $B_L/2$ を超えると仮定する。時間 T だけ R に沿った無線マルチホップ配送を行なうとすると、 R に含まれる各無線通信リンク $|M_i, M_{i+1}\rangle$ を通して配送されるパケットサイズの総和は $B \cdot T > B_L \cdot T/2$ である。ここで、 $|M_i, M_{i+1}\rangle$ の帯域幅は B_L であることから、移動コンピュータ M_i が無線信号を送信していた時間 T_i は、 $T_i = B \cdot T / B_L > T/2$ となる。 M_i が無線信号を受信していた時間は、 M_{i-1} が無線信号を送信していた時間 $T_{i-1} = T_i > T/2$ である。 M_i は性質 1 から無線信号の送信と受信を同時に行なうことができないことから、送信時間と受信時間の和は T 以下でなければ

ならない。ところが、 $T_{i-1} + T_i > T/2 + T/2 = T$ となり矛盾である。□

また、各移動コンピュータが最大送信電力 P_{tmax} を用いて無線信号を送信することでデータの配送を行なう場合、無線通信リンク $|M_{i-2}, M_{i-1}\rangle$ 、 $|M_{i-1}, M_i\rangle$ 、 $|M_i, M_{i+1}\rangle$ について、無線通信リンクの双方向性の仮定から、 M_{i-1} が M_i の無線信号到達範囲内にあるため、 M_{i-2} と M_i が同時に送信すると M_{i-1} で衝突が発生する。

[性質 2] M_{i-1} が M_i の無線信号到達範囲内にある場合、無線通信リンク $|M_{i-2}, M_{i-1}\rangle$ と $|M_i, M_{i+1}\rangle$ を同時に用いてパケット群を転送することはできない。つまり、 M_{i-2} と M_i は同時に経路 R 上でパケット群を転送することはできない (図 3)。□

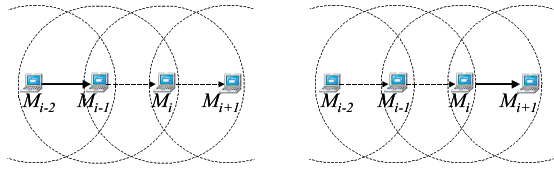


図 3: 無線マルチホップ配送における転送の制約 (2)

これはいわゆる隠れ端末問題であり、RTS/CTS 制御を用いることによって衝突の発生を回避することが可能である。性質 1 と性質 2 から、すべての移動コンピュータが同一の送信電力を用いる場合、以下の性質が成り立つ。

[定理 2] 経路 R を用いたマルチホップ配送 ($l \geq 2$) におけるエンド-エンド帯域幅は $B_L/3$ を超えることはできない。□

[証明] 経路 R に沿った無線マルチホップ配送のエンド-エンド帯域幅 B が $B_L/3$ を超えると仮定する。時間 T だけ R に沿った無線マルチホップ配送を行なうとすると、 R に含まれる各無線通信リンク $|M_i, M_{i+1}\rangle$ を通して配送されるパケットサイズの総和は、 $B \cdot T > B_L \cdot T/3$ である。 $|M_i, M_{i+1}\rangle$ の帯域幅が B_L であることから、各移動コンピュータ M_i が無線信号を送信する時間 T_i は $B \cdot T/B_L > T/3$ である。ここで、性質 1 から M_{i-1} が無線信号を送信している時間は M_i が無線信号を送信することができず、性質 2 から M_{i-2} が無線信号を送信している時間も M_i が無線信号を送信することができない。さらに性質 1 から M_{i-2} が無線信号を送信している時間は M_{i-1} が無線信号を送信することができないことから、 M_{i-2} 、 M_{i-1} 、 M_i はそれぞれ同時に無線信号を送信することができない。したがって、 $T_{i-2} + T_{i-1} + T_i \leq T$ である。ところが、 $T_{i-2} = T_{i-1} = T_i > 3T/3$ であることから、 $T_{i-2} + T_{i-1} + T_i > T/3 + T/3 + T/3 = T$ となり矛盾である。□

3 提案手法

無線信号の送信電力 P_t と受信電力 P_r との間には以下の関係がある。

$$P_r = P_t \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 g_t g_r \quad (1)$$

ただし、 λ は波長、 d は移動コンピュータ間の距離、 g_t と g_r はそれぞれ送信ゲインと受信ゲイン (定数) である。したがって、最大送信電力 P_{tmax} で送信された無線信号の受信電力 P_{rec} を測定することによって距離 d が得られる。

$$d = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{P_{tmax}}{P_{rec}} g_t g_r} \quad (2)$$

これによって、移動コンピュータ間の通信を可能とする最小送信電力 P_{tmin} は、最小受信電力 P_{rmin} に対して次式で与えられる。

$$P_{tmin} = P_{tmax} \cdot \frac{P_{rmin}}{P_{rec}} \quad (3)$$

配送経路 R 上のマルチホップ配送において、すべての無線リンク $|M_i, M_{i+1}\rangle$ を最小送信電力によって配送する場合、以下の性質が成り立つ。

[性質 3a] M_i の送信電力が M_{i+1} の送信電力よりも大きいならば、 M_i の受信中に M_{i+1} が送信できる。すなわち、 M_{i-1} と M_{i+1} は、同時に送信できる (図 4)。□

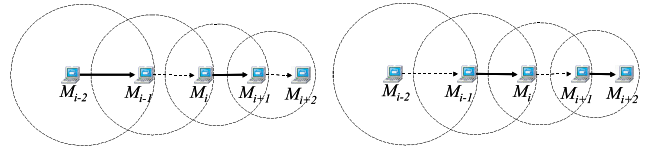


図 4: 送信電力制御による無線マルチホップ配送の広帯域化

[性質 3b] M_i の送信電力が M_{i+1} の送信電力よりも小さいならば、 M_i の受信中に M_{i+1} が送信できない。すなわち、 M_{i-1} と M_{i+1} は、同時に送信できない。□
以上から、次の定理が成り立つ。

[定理 3] $0 \leq \forall i \leq l-2$ について、 M_i の送信電力が M_{i+1} の送信電力よりも大きいならば、経路 R を用いたマルチホップ配送のエンド-エンド最大帯域幅は $B_L/2$ である。また、 $0 \leq \exists i \leq l-2$ について、 M_i の送信電力が M_{i+1} の送信電力よりも小さいならば、エンド-エンド最大帯域幅は $B_L/3$ である。□

以上により、経路 R において、 M_{i+1} が受信可能な最小送信電力で各 M_i がメッセージを送信するという前提のもとでは、 M_i が M_{i-1} より小さな送信電力を用いるように経路 R を定めることによって、実現可能なエンド-エンド帯域幅を $B_L/3$ から $B_L/2$ に拡大することができる。このような経路 R を実現するためには、 M_{i-1}

から最大送信電力 P_{tmax} で送信された経路探索要求メッセージ $Rreq$ を受信した M_i がその受信電力を測定し、(3) 式から M_{i-1} の用いる送信電力を計算する。これを M_i が送信する $Rreq$ に含める。 M_{i+1} が M_i と同様の手順で計算した M_i の用いる送信電力が M_{i-1} の用いる送信電力より大きい場合には、 M_{i+1} は $Rreq$ のブロードキャストを行わず、逆に小さい場合のみブロードキャストを行なう。(図 5)

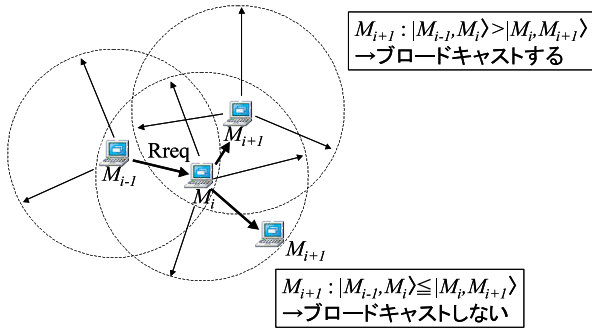


図 5: 経路探索プロトコル

また、 M_i の得た M_{i-1} の用いる送信電力を経路探索応答メッセージ $Rrep$ を用いて M_i から M_{i-1} へ伝えることとする。以下にこの手法を AODV に対して適用した経路探索プロトコルを示す。

[経路探索プロトコル]

- 1) 送信元移動コンピュータ M_s は、送信先移動コンピュータ M_d のアドレス、経路探索識別子 ID を含む経路探索要求メッセージ $Rreq(M_s, M_d, ID, P_{tmax})$ を最大送信電力 P_{tmax} で自身の無線信号到達範囲内のすべての移動コンピュータにブロードキャスト送信する。
- 2) 移動コンピュータ M_i から $Rreq(M_s, M_d, ID, P_i)$ を受信した移動コンピュータ $M_j \neq M_d$ は、3 項組 $\langle M_s, M_d, ID \rangle$ が経路探索キャッシュ RC_j に含まれるかを確認する。 $\langle M_s, M_d, ID \rangle \in RC_j$ である場合には、受信した $Rreq$ を破棄する。 $\langle M_s, M_d, ID \rangle \notin RC_j$ である場合には、以下の処理を行なう。なお、 RC_j に含まれる各 3 項組は、その有効期限が経過したならば、ただちに RC_j から削除される。
 - 2.1) M_i から受信した $Rreq$ の受信電力 P_{rec} について $P_{rec} \leq P_i$ であるならば、 M_j はこの $Rreq$ を破棄する。
 - 2.2) $P_{rec} > P_i$ であるならば、 $RC_j \leftarrow RC_j \cup \langle M_s, M_d, ID \rangle$ 、自身の上流移動コンピュータ $UP_j(\langle M_s, M_d, ID \rangle) \leftarrow P_i$ 、受信電力 $P_j(\langle M_s, M_d, ID \rangle) \leftarrow P_{rec}$ とし、 $Rreq(M_s, M_d, ID, P_{rec})$ を最大送信電力 P_{tmax} で自身の無線信号到達範囲内のすべての移動コンピュータにブロードキャスト送信する。
- 3) 移動コンピュータ M_i から $Rreq(M_s, M_d, ID, P_i)$ を

受信した送信先移動コンピュータ M_d は、3 項組 $\langle M_s, M_d, ID \rangle$ が経路探索キャッシュ PC_d に含まれるかを確認する。 $\langle M_s, M_d, ID \rangle \in RC_d$ である場合には、受信した $Rreq$ を破棄する。 $\langle M_s, M_d, ID \rangle \notin RC_d$ である場合には、以下の処理を行なう。

- 3.1) M_i から受信した $Rreq$ の受信電力 P_{rec} について $P_{rec} \leq P_i$ であるならば、 M_d はこの $Rreq$ を破棄する。
- 3.2) $P_{rec} > P_i$ であるならば、 $RC_d \leftarrow RC_d \cup \langle M_s, M_d, ID \rangle$ 、 $UP_d \leftarrow M_i$ 、 $P_j^{up} \leftarrow P_{rec}$ とし、 M_d は経路探索応答メッセージ $Rrep(M_s, M_d, ID, P_{rec})$ を M_i へユニキャスト送信する。
- 4) 移動コンピュータ M_i から $Rrep(M_s, M_d, ID, P_{rec})$ を受信した移動コンピュータ M_j は、 M_i を無線信号到達範囲内に含むために必要となる最小送信電力 P_{tmin} を P_{rec} を用いて計算し、自身のルーティングテーブル RT_j に 3 項組 $\langle M_d, M_i, P_{tmin} \rangle$ を加える。また、 $Rrep(M_s, M_d, ID, P_{rec})$ を $UP_j(\langle M_s, M_d, ID \rangle)$ へユニキャスト送信する。ただし、 $P_{rec} \leftarrow P_j(\langle M_s, M_d, ID \rangle)$ とする。
- 5) 移動コンピュータ M_i から $Rrep(M_s, M_d, ID, P_{rec})$ を受信した送信元移動コンピュータ M_s は、 M_i を無線信号到達範囲内に含むために必要となる最小送信電力 P_{tmin} を P_{rec} を用いて計算し、自身のルーティングテーブル RT_s に 3 項組 $\langle M_d, M_i, P_{tmin} \rangle$ を加える。□

このプロトコルによって検出された経路において、衝突と隠れ端末問題の発生を回避したデータ配送を行なうためには、RTS/CTS の交換に電力制御を含める必要がある。以下では、(3) 式を活用することにより、RTS/CTS のメッセージフォーマットを変更することなく、この問題を解決できる配送プロトコルを示す。

[配送プロトコル]

- 1) 送信元移動コンピュータまたは中継移動コンピュータ M_i が M_d を送信先移動コンピュータとするデータ D を自身のアプリケーションまたは隣接する移動コンピュータから得たならば、ルーティングテーブル RT_i を参照し、 M_d を送信先移動コンピュータとするエントリ $\langle M_d, M_j, P_{tmin} \rangle$ が RT_i に含まれているかを確認する。
 - 1.1) $\langle M_d, M_j, P_{tmin} \rangle \notin RT_i$ であるならば、データ D を破棄する。以降の処理は行なわない。
 - 1.2) $\langle M_d, M_j, P_{tmin} \rangle \in RT_i$ であるならば、送信要求メッセージ $RTS(M_i, M_j, NAV)$ を最大送信電力 P_{tmax} で自身の無線信号到達範囲内にあるすべての移動コンピュータへブロードキャスト送信する。
- 2) $RTS(M_i, M_j, NAV)$ を受信した移動コンピュータ $M_k \neq M_j$ は、自身の無線信号到達範囲内に M_i を含むための最小送信電力 P_{tmax} を RTS の受信電力

を用いて計算する。 M_k は、以降 NAV の間は P_{tmax} 以上の送信電力を用いない。

- 3) $RTS(M_i, M_j, NAV)$ を受信した移動コンピュータ M_j は、自身が受信可能であるならば、送信応答メッセージ $CTS(M_i, M_j, NAV)$ を最大送信電力 P_{tmax} で自身の無線信号到達範囲内にあるすべての移動コンピュータへブロードキャスト送信する。
- 4) $CTS(M_i, M_j, NAV)$ を受信した移動コンピュータ $M_k \neq M_i$ は、自身の無線信号到達範囲内に M_j を含むための最小送信電力 P_{tmin} を CTS の受信電力を用いて計算する。 M_k は、以降 NAV の間は P_{tmax} 以上の送信電力を用いない。
- 5) $CTS(M_i, M_j, NAV)$ を受信した移動コンピュータ M_i は、送信電力 P_{tmin} を用いてデータ D を M_j へユニキャスト送信する。
- 6) データ D を受信した M_j は、受信確認 ACK を M_i に送信する。□

4 評価

提案プロトコルは、経路上の各移動コンピュータの無線信号送信電力が送信元移動コンピュータから順に1ホップごとに小さくなるようにすることによって、経路上で隣接しない移動コンピュータが同時にデータパケットを転送することを可能としている。これによって、エンド-エンド帯域幅の上限値を $B_L/3$ から $B_L/2$ に拡大している。しかし、経路探索に対してはより厳しい条件を課していることから、経路検出の成功率が低下する、すなわち、接続性が低下することが考えられる。本章では、すべての移動コンピュータが最大送信電力 P_{tmax} で無線信号を送信する場合と提案プロトコルを用いる場合とで接続性がどの程度低下するかをシミュレーションによって評価する。シミュレーション領域は $500\text{m} \times 500\text{m}$ の正方形領域とし、移動コンピュータの配置は一樣分布にしたがう乱数によって決定する。送信元移動コンピュータと送信先移動コンピュータのすべての組み合わせ(送信元と送信先は異なるとする)数に対する経路が検出できる組み合わせ数の比によって接続性を評価する。最大無線信号到達範囲と移動コンピュータ数を変化させ、それぞれ100回ずつシミュレーション実験を行った結果を図6に示す。

いずれの場合も提案手法は従来手法に対して経路検出成功率が低下しているが、最大無線信号到達範囲が60m、100m、300mに対して移動コンピュータ数がそれぞれ800台、300台、100台を超えると成功率はほぼ等しくなる。これを移動コンピュータ密度で表現すると、それぞれ 0.32 台/ 100m^2 、 0.12 台/ 100m^2 、 0.04 台/ 100m^2 となる。これは、想定されるネットワーク環境に対して十分低い移動コンピュータ密度であることから、従来手法に対する提案手法の経路検出成功率の低下がネットワークアプリケーションの実行に与える影響は十分に小さいと考えることができる。

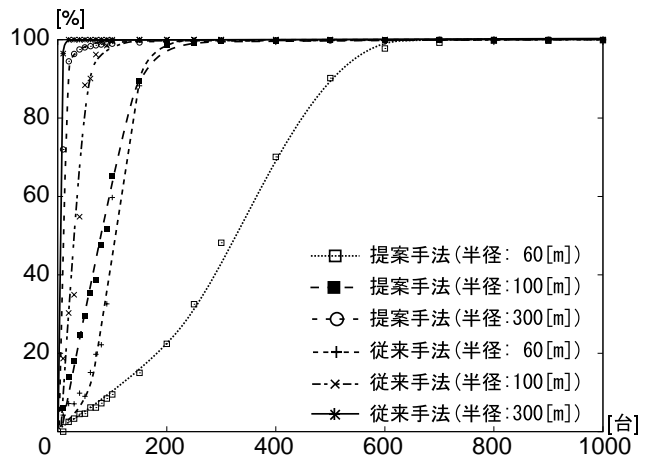


図 6: 経路検出成功率

5 まとめと今後の課題

本論文では、無線マルチホップ配送におけるエンド-エンド最大帯域幅が無線リンク帯域幅の $1/2$ であること、送信電力制御を行わない場合のエンド-エンド最大帯域幅が無線リンク帯域幅の $1/3$ であることを示し、送信電力をホップごとに減少させることでエンド-エンド帯域幅を拡大する手法を提案し、AODVをベースとするプロトコルを設計した。今後は、エンド-エンド帯域幅が拡大されていることをシミュレーション実験によって明らかにする。また、DSR等の他のアドホックルーティングへの適用を行なう。

参考文献

- [1] "Wireless LAN Medium Access control(MAC) and Physical Layer(PHY) Specifications," Standard IEEE 802.11 (1997).
- [2] David, B., David, A. and Hu, Y.C., "The Dynamic Source Routing Protocol," Internet Draft, draft-ietf-manet-dsr-09.txt (2003).
- [3] Perkins, C.E. and Royer, E.M., "Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing," RFC 3561 (2003).