

順次短縮リンク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†  
 沼田 祐哉 梶垣 博章‡ §

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、高い接続性を得るためには、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 [1]。IEEE802.11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。

2 従来手法

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  $M_i$  の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。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、 $|M_i, M_{i+1}\rangle \in \mathcal{L} (0 \leq i < l)$  となる無線通信リンク群を用いて、中継移動コンピュータ  $M_1, \dots, M_{l-1}$  がパケット群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  $R = \langle |M_0 (= M_s), M_1, \dots, M_{l-1}, M_l (= M_d)\rangle$  で表す。 $M_i$  は、 $M_{i-1}$  からの無線信号の受信と  $M_{i+1}$  への無線信号の送信を同時に行なえない。このため、 $R$  を用いた無線マルチホップ配送では、 $|M_{i-1}, M_i\rangle$  と  $|M_i, M_{i+1}\rangle$  が同時にパケットを配送できない(図1)。この性質より、 $R$  上の各  $|M_i, M_{i+1}\rangle (0 \leq i < l)$  の帯域幅を  $B_L$  とするとき、 $R$  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。

DSR や AODV といっ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。このため、パケット群の配送を行なう場合、 $|M_{i-1}, M_i\rangle$ 、 $|M_i, M_{i+1}\rangle$ 、

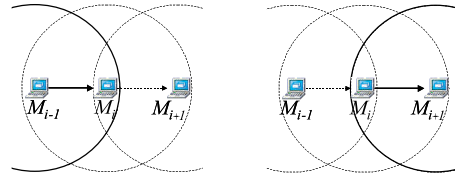


図 1: 無線マルチホップ配送における転送の制約 (1)

$|M_{i+1}, M_{i+2}\rangle$  について、 $M_{i-1}$  と  $M_{i+1}$  の無線信号到達範囲内に  $M_i$  が存在するため、 $M_{i-1}$  と  $M_{i+1}$  が同時に無線信号を送信すると  $M_i$  で衝突が発生する。このような衝突の発生は、RTS/CTS制御を用いることによって回避することが可能である。しかし、これによって競合が発生し、 $M_{i-1}, M_i, M_{i+1}$  が同時に  $R$  上でパケット群を転送することは不可能となる(図2)。 $R$  上の各  $|M_i, M_{i+1}\rangle (0 \leq i < l)$  の帯域幅を  $B_L$  とするとき、 $R$  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  $B_L/3$  を超えることはできない。

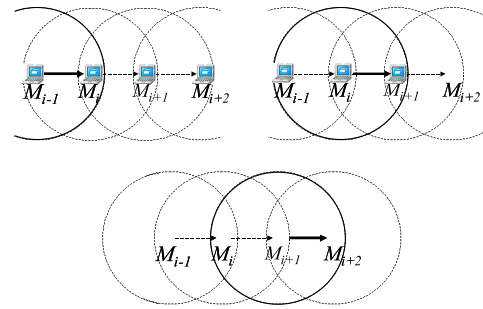


図 2: 無線マルチホップ配送における転送の制約 (2)

3 提案手法

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、最大送信電力  $P_{tmax}$  で送信された無線信号の受信電力  $P_{rec}$ 、および最小受信電力  $P_{rmin}$  により次式で与えられる。

$$P_{tmin} = P_{tmax} \cdot \frac{P_{rmin}}{P_{rec}} \quad (1)$$

$R$  上のマルチホップ配送において、すべての  $|M_i, M_{i+1}\rangle$  を最小送信電力によって配送する場合、 $M_i$  の送信電力は  $M_i$  と  $M_{i+1}$  との間の距離に対して単調増加する。このため、最小送信電力によってパケット群の配送を行なう場合、 $|M_{i-1}, M_i\rangle$ 、 $|M_i, M_{i+1}\rangle$ 、 $|M_{i+1}, M_{i+2}\rangle$  について、 $M_i$  と  $M_{i+1}$  の間の距離が、 $M_{i+1}$  と  $M_{i+2}$  の間の距離よりも長ければ、 $M_{i+1}$  の無線信号到達範囲内に  $M_i$  が存在しないため、 $M_{i-1}$  と  $M_{i+1}$  が同時に無線信号を送信できる。

\*High Throughput Wireless Multihop Communication by Consecutively Shortening Links

†Tokyo Denki University

‡Yuya Numata and Hiroaki Higaki

§{numata, hig}@higlab.net

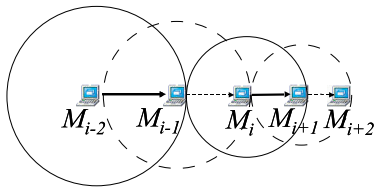


図 3: 無線マルチホップ配送の広帯域化

$R$  上のすべての  $|M_i, M_{i+1}|$  において、 $M_i$  と  $M_{i+1}$  との間の距離が、 $M_{i+1}$  と  $M_{i+2}$  との間の距離よりも長い場合、 $M_i$  の 2 ホップ先の  $M_{i+2}$ 、および  $M_i$  の 2 ホップ前の  $M_{i-2}$  は、 $M_i$  と同時に無線信号を送信することができる。さらに、 $M_{i+2}$  の 2 ホップ先の  $M_{i+4}$  や  $M_{i-2}$  の 2 ホップ前の  $M_{i-4}$  も、同時に無線信号を送信することができる。このように、 $R$  上のすべての  $|M_i, M_{i+1}|$  は、 $|M_{i+2}, M_{i+3}|$  と、同時に無線信号を送信することができる。以上により、 $R$  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  $R$  を定めることによって、エンド-エンド最大帯域幅を  $B_L/3$  から  $B_L/2$  に拡大できる。

このような  $R$  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、(1) 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、逆に小さい場合にのみブロードキャストを行なう (図 4)。

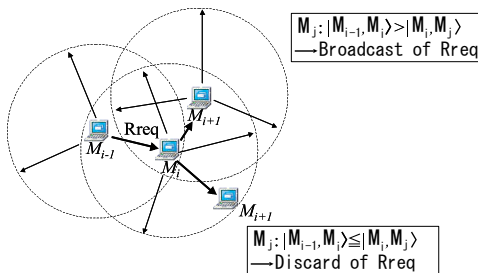


図 4: 経路探索プロトコル

#### 4 評価

本章では、シミュレーション実験によって、エンド-エンド帯域幅の拡大を従来のルーティングプロトコルを用いて検出された経路に沿って電力制御を行わずに配送した場合と比較評価する。シミュレータには、GloMoSim を用いた。各移動コンピュータ間の通信は、RTS/CTS 制御と送信電力制御の機能を導入した IEEE802.11b を用いて行なわれる。また、RTS/CTS 制御のための制御メッセージと DATA/ACK メッセージとの衝突によるエンド-エンド帯域幅の低下を避けるために、RTS/CTS 制御メッセージと DATA/ACK メッセージとは異なるチャネルを用いて交換する [2]。移動コンピュータの無線信号到達距離を最大  $100m$  とし、直線状に配置された移動コンピュータの位置は、次ホップ移動コンピュータとの距離が前ホップ移動コンピュータとの距離よりも少なくとも  $1m$  小さくなるという条件のもとにランダムに決定した。経路のホップ数を変

化させた場合のエンド-エンド帯域幅の変化を、各 150 通りの配置の平均値として求めたものを図 5 に示す。実線 (提案手法) と破線 (従来手法) のいずれにおいても、ホップ数を 5 まで増加させる部分では急激にエンド-エンド帯域幅が低下するが、6 ホップ以上についてはホップ数の増加に対して、エンド-エンド帯域幅はほとんど変化しないことが分かる。このときのエンド-エンド帯域幅の平均値は、提案手法で  $1.40Mbps$ 、従来手法で  $0.865Mbps$  であり、61.8% 拡大している。この結果から、提案プロトコルはエンド-エンド帯域幅の上限値を拡大するとともに、CSMA/CA のランダム待ち時間などの確率的な変動を含む実環境で得られるエンド-エンド帯域幅も拡大していることが確認された。

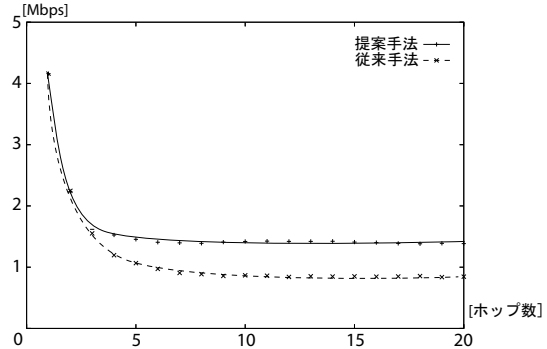


図 5: エンド-エンド帯域幅

一方、提案手法では、使用する経路により厳しい条件を課していることから、経路検出の成功率の低下、すなわち、接続性の低下が考えられる。論文 [3] のシミュレーション実験の結果、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たが、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の密度がそれぞれ  $0.200$  台/ $100m^2$ 、 $0.080$  台/ $100m^2$ 、 $0.008$  台/ $100m^2$  ならば、提案手法の経路検出成功率は従来手法の 90% 以上になる。したがって、通常想定されるネットワーク環境では、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いえる。

#### 5 まとめ

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。また、シミュレーション実験により、提案プロトコルによってエンド-エンド帯域幅を約 60% 拡大できること、ネットワークの接続性が低下しないことを示した。

#### 参考文献

- [1] Perkins, C.E., "Ad hoc Networking," Addison-Wesley (2001).
- [2] Tseng, Y. C., Wu, S. L., Lin, C. Y. and Sheu, J. P., "A Multi-Channel MAC Protocol with Power Control for Multi-Hop Mobile Ad Hoc Networks," Proceedings of the International Workshop on Wireless Networks and Mobile Computing, pp. 419-424 (2001).
- [3] 鷹田, 松垣, "送信電力制御による無線マルチホップ通信の広帯域化," 情処研報, Vol. 2005, No. 33, pp. 13-17 (2005).