

研究速報

無線メッシュネットワークにおける高スループット 経路選択に関する実験的検証

高橋 義彦[†] (正員) 兼子陽市郎[†] (学生員)
間瀬 憲一[†] (正員: フェロー)

Experiments on Route Selection for Achieving High Throughput
in Wireless Mesh Networks

Yoshihiko TAKAHASHI[†], *Member*,
Youichiro KANEKO[†], *Student Member*, and
Kenichi MASE[†], *Fellow*

[†] 新潟大学大学院自然科学研究科, 新潟市
Graduate School of Science and Technology, Niigata University,
8050 2nocho, Ikarashi, Niigata-shi, 950-2181 Japan

あらまし 無線メッシュネットワークにアドホックルーチングプロトコルを適用し, 高スループットを達成する方法を検討した. 具体的にはリンク性能/品質の測定に基づき不要なリンクを削除するリンクフィルタリングを提案し, テストベッド上で実証実験を行い, 高いスループットが得られることを示した.

キーワード 無線メッシュネットワーク, モバイルアドホック, ルーチングプロトコル, マルチレート, スループット, テストベッド

1. まえがき

アドホックネットワークの用途はセンサネットワーク, 家電製品ネットワーク, 公衆無線 LAN などこれまでの軍事利用目的から商用目的へ移行してきている. ノードが移動せずに固定的に配置される利用形態として地域コミュニティネットワークの構築やワイヤレスブロードバンドインターネットアクセスサービスの提供などがメッシュネットワークとして実際にサービスを開始してきている [1]. この場合, アドホックネットワークに比べより高性能化が期待できるが, 従来のルーチングプロトコルは経路選択指標として最短ホップ数を用いるのが基本であるため, リンクの性能/品質を考慮しないとスループットの向上が見込めない. このため, ETX [2], EDR [3] 等のリンクメトリックが提案されている. しかし, ETX は無線リンクのレートを考慮せず IEEE802.11a/b/g のような可変レートの特性を反映できない. レートを考慮したリンクメトリックとしては MTM [4], PARMA [5] などが提案されている. しかし, これらのメトリックの測定方法の詳細は明確ではない. 各レートでのプローブパケットの周期的 (数秒間隔) なブロードキャストが必要と考えられるが, 貴重な無線帯域を消費する. また, MAC

層でのオートレート制御を前提とし, その情報をネットワーク層で利用する方法も考えられるが, オートレート制御アルゴリズムは実装依存のため, その最適性は保証されず, MAC 層の情報をネットワーク層で利用する標準インタフェースも確立されていない.

本論文では, ノードが固定の場合はネットワーク層での測定に基づき, あらかじめ, リンクの最適レートを求め, レートを固定することで, スループット向上の可能性のあることに着目する. 具体的にはレート/品質の低いリンクをソフト的に切り, 残りのリンクの中からルーチングプロトコルが最短経路を選択する方法 (リンクフィルタリング) を検討する. そして, その効果を大規模テストベッド [6], [7] で評価する.

提案方法はルーチングプロトコル, MAC の実装方法にかかわらず利用可能である. 従来方法のように数秒オーダーでのリンクメトリックの変化をとらえようとするのではなく, より長い時間でのリンク状態の大きな変化をとらえ, それに対応しようとするものであり, 例えば数十分~数時間に 1 回程度でリンクの最適レートの測定を行うことも考えられる. また, 提案方法は従来方法の対案ではなく, 従来方法と組み合わせで利用することも可能である.

2. リンクフィルタリング

2.1 リンクフィルタリング

リンク性能/品質指標としてリンクごとのユニキャスト配信率 (以下 UDR: Unicast Delivery Ratio, ネットワーク層における送信パケット数 (a), 受信パケット数 (b) の比 (b/a) で求める. MAC 層での再送あり.) を用い, しきい値に基づきリンクの良否を判断することにより各レートで利用可能なリンクを絞り込むことが可能になる. そこで, 本実験では各レートにおいて UDR を 90% と 99% に設定し, 各しきい値以上の配信率となるリンクのみを用いたネットワークでスループットがどのように変化するかを検討することとした. また, 2 Mbit/s ブロードキャストについては, ブロードキャスト配信率 (以下 BDR: Broadcast Delivery Ratio, ネットワーク層における送信パケット数 (a) と受信パケット数 (b) の比 (b/a) で求める. MAC 層での再送なし) を指標として 80% と 90% に設定し, 同様にスループットに与える影響を検討した. 設定したしきい値未満のリンクを不良リンクとする. 設定したしきい値以上の配信率である良リンクのみで構成されるネットワークの特定の 1 フローに対するスループットを計測し評価する.

表1 フィルタリング条件とリンク総数

Table 1 Filtering conditions and number of links.

ラベル	フィルタリング条件	リンク数
a	フィルタリングなし	1,118
b	2 Mbit/s, UDR 90%以上	851
c	2 Mbit/s, UDR 99%以上	802
d	5.5 Mbit/s, UDR 90%以上	666
e	5.5 Mbit/s, UDR 99%以上	522
f	11 Mbit/s, UDR 90%以上	477
g	11 Mbit/s, UDR 99%以上	359
h	2 Mbit/s, BDR 80%以上	653
i	2 Mbit/s, BDR 90%以上	528
j	固定経路	—

UDR:ユニキャスト配信率(再送あり)
BDR:ブロードキャスト配信率(再送なし)

2.2 フィルタリング手法と結果

各ノードではLinuxの標準機能であるiptablesコマンドを用いてソフト的に不良リンクを削除することで、良リンクのみで経路が構成されるリンクフィルタリングを行う。フィルタリングの条件と、その条件における対象リンク数を表1に示す。

3. スループット実験

3.1 実験方法

本実験ではnetperfを用いてスループットを測定した。また、各ノードではsnifferを起動し、パケットの通過経路を解析できるようにした。送信元ノードとあて先ノードの組としては、過去の実験データと比較ができ、また、距離が約980mと比較的離れているノード18とノード46間を対象とした。設定パラメータは、トランポート層をUDP、パケットサイズを1,472Byte、性能種別をデータ転送性能(STREAM)とし、10秒間送信する。10回測定において得られた測定値の平均値を結果とした。ルーチングプロトコルはUnik-OLSRを使用した。

netperfでは送信ノード側から受信ノードへTCPセッションを確立し、そのTCPセッション上で情報の授受を行うことでスループットを計測する。このため、netperfのtcpセッションが確立できないときはスループットの結果が取得できなくなり計測不能となる場合があった。計測不可が1,2回以下の場合●でプロット、それ以上計測不可が多い場合○でプロットした。

3.2 実験結果

図1, 図2及び表2に測定結果を示す。図1において、フィルタリング条件jは、最もスループットの高かったフィルタリング条件fで最も利用された経路

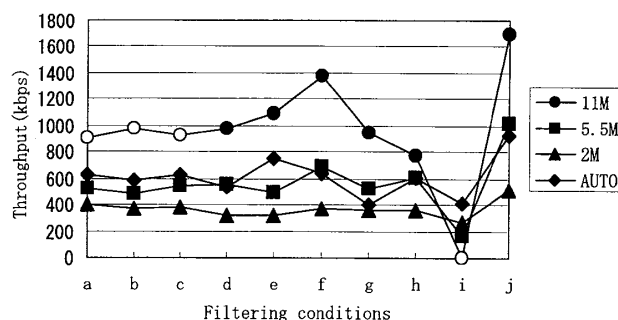


図1 スループット測定結果

Fig. 1 Results of throughput measurement.

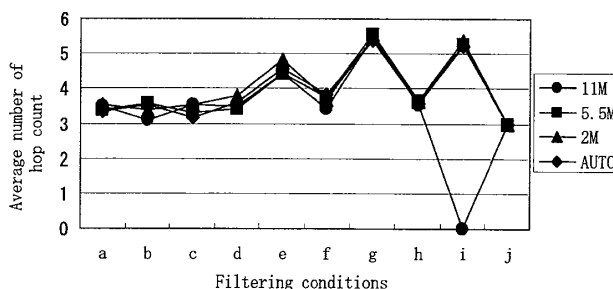


図2 平均ホップ数

Fig. 2 Average number of hop count.

(18 → 2 → 34 → 46)を固定経路として設定し測定したスループット値である。本スループット値が本フローで達成される最高性能であると考えられる。フィルタリング条件iを除き、すべてのケースで11 Mbit/sレートに設定した方が高いスループット値を示すことが分かる。オートレートは5.5 Mbit/sレートとほぼ同様の値と傾向を示す。2 Mbit/sレートはフィルタリング条件iを除き最低の性能しか示せないことが分かる。最もスループットが高いケースは11 Mbit/sレートでフィルタリング条件fであり、最も単体リンクの性能が高いと思われるフィルタリング条件gの11 Mbit/sスループットはレートが5.5 Mbit/sのフィルタリング条件eよりも低くなっている。単純にUDRを高くした厳しいリンク絞込み条件で設定し、より単体性能が高いリンクを選択しても、リンク間距離が短くなりホップ数が増加する(図2参照)ため、必ずしもスループット性能が高くないことが分かる。

また、図2より、フィルタリング条件gとフィルタリング条件hではフィルタリング条件gの方が平均ホップ数がhより高いが、スループットはフィルタリング条件gがフィルタリング条件hより高い。これはフィルタリング条件hでは高レートを考慮していないため、高レート時に低品質のリンクが含まれることによる。

表2 各フィルタリング条件における最多使用経路
Table 2 The highest usage route each filtering condition.

ラベル	最多使用経路	使用率
a	18 → 2 → 34 → 46	59.66%
b	18 → 2 → 34 → 46	89.16%
c	18 → 2 → 34 → 46	57.46%
d	18 → 2 → 34 → 46	63.62%
e	18 → 2 → 34 → 46	63.62%
f	18 → 2 → 34 → 46	64.45%
g	18 → 2 → 24 → 38 → 43 → 46	27.33%
h	18 → 2 → 34 → 46	66.07%
i	観測不能	—

3.1 に述べたように、フィルタリング条件 a, b, c, i では 10 回の計測すべてにおいて有効な 11 Mbit/s レートスループット測定ができたわけではなく、順に 5 回, 2 回, 2 回, 0 回であった。OLSR では制御パケットを 2 Mbit/s で送信するため、データパケットの転送速度が 11 Mbit/s レートである場合無線到達距離に差が生じグレイゾーン問題が発生するため経路が不安定となり、データ計測可能回数が激減したと考えられる。

フィルタリング条件 i の総リンク数は 528 であったが、この中で 11 Mbit/s レート UDR のしきい値 90% 以上のリンク数は 388 リンクであった。フィルタリング条件 f のリンク数が 477 であったことから UDR90% 以上のリンクが 89 リンク削られ、逆に UDR90% 以下のリンクが 140 リンク含まれたことになる。このことから OLSR で経路を構築する際に不良リンクを含んだ経路が選定される確率が高くなり、また、グレイゾーンの影響と併せて 11 Mbit/s レートでの測定結果が得られる回数が 0 となったと考えられる。同様に、フィルタリング条件 h で該当する総リンク数は 653 あるが、このうち 11 Mbit/s レート UDR のしきい値 90% 以上のリンク数は 434 リンクであった。フィルタリング条件 f でのリンク数が 477 であることから UDR90% 以上のリンクが 43 リンク削られ、逆に UDR90% 以下のリンクが 219 リンク含まれたことになり、スループットが低下していると考えられる。

表 2 に 11 Mbit/s レートユニキャストの各フィルタリング条件における最多使用経路を示す。固定経路 18 → 2 → 34 → 46 で最大スループットを示していることから、本経路を各フィルタリング条件で多く使えるほどスループットが高い傾向を示すと考えられる。フィルタリング条件 a, b, c は経路が安定していないため比較対象から除外すると、フィルタリング条件 d,

表3 フィルタリング条件 f の経路変遷
Table 3 The most using route on filtering f.

経路	使用率
18 → 2 → 34 → 46	64.45%
18 → 2 → 14 → 42 → 34 → 46	0.58%
18 → 2 → 14 → 34 → 46	23.07%
18 → 2 → 19 → 15 → 34 → 46	1.83%
18 → 2 → 19 → 15 → 34 → 43 → 46	0.10%
18 → 2 → 34 → 43 → 46	1.35%
18 → 2 → 14 → 34 → 43 → 46	1.72%
18 → 20 → 14 → 34 → 43 → 46	1.48%
18 → 20 → 14 → 34 → 46	0.37%
18 → 20 → 2 → 34 → 46	2.91%
18 → 20 → 2 → 14 → 34 → 46	0.17%
18 → 20 → 16 → 15 → 34 → 46	0.56%
18 → 2 → 34 → 47 → 46	1.23%
18 → 2 → 14 → 34 → 47 → 46	0.19%
18 → 2 → 16 → 15 → 11 → 45 → 46	0.02%
合計	100.00%

表4 フィルタリング条件 h の経路変遷
Table 4 The most using route on filtering h.

経路	使用率
18 → 2 → 24 → 34 → 46	16.06%
18 → 2 → 21 → 34 → 47 → 46	0.73%
18 → 2 → 19 → 42 → 34 → 46	9.62%
18 → 2 → 19 → 36 → 34 → 46	0.14%
18 → 2 → 19 → 36 → 34 → 47 → 46	0.09%
18 → 2 → 16 → 39 → 34 → 47 → 46	3.71%
18 → 2 → 24 → 34 → 47 → 46	0.18%
18 → 2 → 34 → 46	66.07%
18 → 2 → 21 → 34 → 46	2.89%
18 → 2 → 34 → 47 → 46	0.48%
18 → 2 → 21 → 41 → 47 → 46	0.02%
合計	100.00%

e, f, h ではほぼ同じ経路使用率を示しているが、フィルタリング条件 d, e, f の中では経路 18 → 2 → 34 → 46 の使用頻度が最も高いフィルタリング条件 f が最も高いスループットを示している。

フィルタリング条件 f と h では経路使用頻度とスループットが反転している。フィルタリング条件 f と h におけるあて先ノード 46 でのパケット受信数を比べると、netperf は同一条件で作動させたにもかかわらず、f が 8,978 であるのに対し h では 4,365 であり、h の品質はかなり悪いことが分かった。このときの各フィルタリング条件での経路の変遷を表 3 と表 4 に示す。表は当該経路が最初に現れる順に表示した。本データよりフィルタリング条件 f は最初に 18 → 2 → 34 → 46 の経路を構成することを示す。一方フィルタ

リング条件 h は何度か経路 $18 \rightarrow 2 \rightarrow 34 \rightarrow 46$ とは違う経路でパケット送信を行い、8番目の経路選択で経路 $18 \rightarrow 2 \rightarrow 34 \rightarrow 46$ にたどりつく。この間、3番目に出現する経路選定で UDR が 92% のリンク $19 \rightarrow 42$ が含まれていた。また、9番目に出現する経路選択では UDR が 73% のリンク $2 \rightarrow 21$ を含んでいた。このように、3.2 でも述べたように、 h では高レートを考慮していないため 11 Mbit/s レートの場合に低品質のリンクが含まれるためである。

フィルタリング条件 a (フィルタリングなし) では 11 Mbit/s レートの場合 10 回の測定中 5 回しか測定できないことから安定した通信経路とはいえず、オートレートの場合のスループット値 632.25 kbit/s が最大性能となる。一方、フィルタリング条件 f のスループット値は 11 Mbit/s レートで 1375.62 kbit/s であることから 2 倍以上のスループットを達成しており、高速レート設定とリンク絞込みによる効果が実証できたと考える。

3.3 リンクフィルタリングパラメータの設定指針

実験結果に基づき、リンクフィルタリングパラメータの設定指針を以下に示す。

(1) 高速レートを有効に利用しスループット向上効果を得るため、高速レート (5.5 Mbit/s, 11 Mbit/s) を使用したフィルタリングを行う必要がある。

(2) しきい値をどの程度に選ぶかはネットワークの構成 (ノードの分布状態、密度など) によるので、一概にはいえないが、ユニキャストの場合は MAC 層に再送機能があることを考慮すると、しきい値を比較的高い水準 (90%以上) にとることが望ましい。

(3) ただし極端に高め (99%など) に設定すると、ホップ数が増えてスループットが減少する可能性があることに注意する必要がある。

(4) 更に、しきい値に関していくつかの値を試行し、スループットを検証することにより大きなスループット改善効果が得られる。

(5) このような評価をメッシュネットワークの遠距離のノードペアのいくつかについて実施し、適切なフィルタリング条件を設定する必要がある。

4. むすび

本実験では、各リンクごとの UDR を用い、一定のしきい値を指標としてリンクをフィルタリングし、適切レートを設定することで高いスループットが得られることを示した。今後の課題を以下に示す。

(1) ネットワーク条件を変更した場合の指針の妥

当性の検証

- (2) リンクフィルタリング条件の最適化手法
- (3) netperf に代わる安定なスループット測定法
- (4) 複数フローを加えた場合のスループット特性評価

謝辞 本実験で用いたテストベッドは総務省戦略的情報通信研究開発推進制度 (SCOPE) の国際技術獲得型研究プログラム「次世代アドホックネットワーク基盤技術に関する研究開発」により構築されたものである。また、本論文の作成にあたり実験データの採取、分析に御協力を頂いた新潟大学大学院自然科学研究科の大和田泰伯君、鈴木裕和君、白銀友晴君に感謝の意を表す。

文 献

- [1] <http://global.locustworld.com/>
- [2] D.S.J. De Couto, D. Aguayo, J. Bicket, and R. Morris, "A high-throughput path metric for multi-hop wireless routing," Proc. 9th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, SESSION: Routing Optimizations, pp.134-146, San Diego, CA, USA, Sept. 2003.
- [3] J.C. Park and S.K. Kasper, "Expected data rate: An accurate high-throughput path metric for multi-hop wireless routing," Second Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks 2005, IEEE SECON 2005., pp.218-228, Sept. 2005.
- [4] B. Awerbuch, D. Holmer, and H. Rubens, "The medium time metric: High throughput route selection in multirate ad hoc wireless networks," Lecture Notes in Computer Science Publisher, Springer Berlin/Heidelberg, ISSN: 0302-9743, Subject: Computer Science Volume 2928/2003, Title: Wireless On-Demand Network Systems, ISBN: 3-540-20790-2, DOI: 10.1007/b94064, Chapter: pp.253-270.
- [5] S. Zhao, Z. Wu, A. Acharya, and D. Raychaudhuri, "PARMA: A PHY/MAC aware routing metric for ad-hoc wireless networks with multi-rate radios," IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM 2005), pp.286-292, June 2005.
- [6] Y. Owada, T. Suda, Y. Takahashi, H. Terui, F. Taki, T. Yagi, and K. Mase, "A large scale wireless mobile ad hoc network testbed," Vehicular Technology Conference (VTC), 1-I-6, Sept. 2005.
- [7] 高橋義彦, 大和田泰伯, 須田利章, 間瀬憲一, "大規模無線アドホックネットワークテストベッドの開発," 信学論 (B), vol.J89-B, no.6, pp.836-848, June 2006.

(平成 18 年 6 月 19 日受付, 9 月 30 日再受付)