

無線メッシュネットワークにおける ループ削減手法 LMR の実機評価

家舗 憲志^{†1} 吉廣 卓哉^{†1}

近年、固定ノード間で無線通信を用いてマルチホップ通信を実現する無線メッシュネットワークの研究が盛んである。無線メッシュネットワーク上で OLSR のようなリンク状態型ルーティングプロトコルが動作する場合に、動的にリンクメトリックを変更することで、ネットワーク上のトラフィックを適応的に通信帯域の余裕があるリンクに誘導しネットワークのスループットや安定性を向上する動的メトリック法が提案されている。しかし、動的メトリック環境では、一時的な経路表の不整合によりパケットループが発生する問題があり、これを解決することが安定した無線マルチホップインフラを実現するための重要課題の一つとなっている。本研究では、我々が提案した動的メトリック下でのループ削減手法 LMR を実機実装し、これを用いて性能評価を行った結果を報告する。

Practical Evaluation of the Packet Loop Reduction Method LMR in Wireless Mesh Networks

KENJI KAHO^{†1} and TAKUYA YOSHIHIRO^{†1}

Recently, wireless mesh networks become one of the major topics to study in the world. We assume that a link-state routing protocol such as OLSR is deployed in stationary nodes of wireless mesh networks. For this situation, many dynamic metrics have been proposed, which dynamically and automatically change link metrics to have flows use stable and high-quality paths to improve network performance. In dynamic metrics, however, packet looping problem, which occurs due to temporal inconsistency, arises and so network performance degrades significantly. We have proposed a method called LMR to reduce such loops. In this paper, we report our implementation of LMR with note PCs and our performance evaluation results.

1. はじめに

将来の無線インフラストラクチャとして期待されている無線メッシュ網 (Wireless Mesh Network)¹⁾ は、固定された基地局同士が無線通信により相互接続されるネットワークであり、実用化のために活発な研究がなされている。WMN では無線アドホックネットワークに用いられる経路制御方式が適用されるのが一般的であるが、現在アドホックネットワークにおいて標準化がなされている AODV (Ad hoc On-demand Distance Vector)²⁾ や OLSR (Optimized Link State Routing) などの経路制御プロトコルでは、いずれもホップ数が最小となる最短経路を計算し、これを通信経路として用いる。しかし、無線通信では通信品質が時間や周囲の電波状況に応じて変動することが知られており、ホップ数のみから静的に経路を決定する方式ではこの変動に追従できないため、通信効率を十分に確保することができない。そこで、より柔軟に通信性能を向上する方法として、各リンクの動的に変動する通信品質を表すリンクメトリックをリアルタイムに計算し、これを用いて動的に最短経路を変動される動的メトリック手法が提案されている。これら動的メトリック手法の代表例として、そのリンクを用いてパケットを隣接ノードに届けるための平均転送回数をメトリックとする ETX (Estimated Transmission Count)⁴⁾ や、隣接ノードに届けるための平均転送時間をメトリックとする ETT (Estimated Transmission Time)⁵⁾ などが提案されている。この他にも、WCETT⁵⁾、MIC⁶⁾ など、複数の動的メトリックが提案されている。

しかし一方で、メトリックをそのときのリンク品質に応じて動的に変動させることで、メトリックの伝播遅延による一時的な経路情報の矛盾から、一時的な経路ループが発生することが知られている。経路ループが発生すると、ループ内をパケットが際限なく転送される。そのパケットが宛先に届かないばかりか通信帯域の大幅な浪費にもつながるため、大きな問題である。特に無線ネットワークでは、経路ループにより周囲に不要な電波が発生し、電波干渉により他のノードやリンクの転送能力をも制限してしまうため、有線ネットワークと比べてその影響が格段に大きくなる。この問題に対して、経路ループを検出して早期に破棄することでループの悪影響を最小限にとどめる手法が提案され⁷⁾、ノードが移動するシナリオでの評価の結果、ループパケットを早期に破棄することで最大 20%ものスループットの向上がみられることがわかり、無線ネットワークにおけるループの影響の大きさと、ループ回

^{†1} 和歌山大学システム工学部
Faculty of Systems Engineering, Wakayama University

避の重要性が確認された。しかし、このようにループパケットを破棄することでネットワークへの影響を抑えたとしても、ループが発生するとパケットが一時的に宛先に届かなくなるため、ユーザの通信が切れるなどの影響があり、ネットワークインフラとして利用するには十分な安定性があるとは言い難い。無線ネットワークを安定利用するためには、ループの生成を防止、或いは削減する方法が必要不可欠である。

これに対して我々の研究グループでは、リンクメトリックの時間あたりの変動量を一定範囲内に制限することにより、動的メトリック環境下でループを防止/削減するループフリー化手法 LMR (Loop-free Metric Range)⁹⁾ を提案した。また、この文献⁹⁾ では、ETX が稼働するネットワークに LMR を適用するシミュレーション実験を通じて、LMR は大きなループ削減効果があり、それによりネットワークのスループットも向上することが確認された。本研究では、LMR をノート PC に実装し実機上で評価実験を行ったので、これを報告する。

本論文の構成は以下の通りである。まず 2 章でループ削減手法 LMR について説明する。3 章では LMR の実機実装について述べた後に評価実験シナリオと評価結果について述べる。最後に 4 章でまとめとする。

2. ループ削減手法 LMR⁹⁾

LMR は、OLSR のようなリンク状態型ルーティングプロトコルが動作しており、同時に動的メトリックが用いられているネットワークに適用されるループ削減手法である。LMR では時間あたりのメトリックの変動量を、その時のリンクメトリックの値に対する割合により制限する。これは、ループ生成の可能性が、メトリックを変化させた時の変化前後のメトリックの比に依存することの発見から導かれた方法である。LMR はこの発見に従って設計されており、時間あたりのメトリック変動割合が一定以上にならないように制限する。つまり LMR では、 $m_{l,t}$ をリンク l の時刻 t におけるメトリックとすると、常に次の条件を満たすようにメトリックを変動させる。

$$m_{l,t-t'}r^{-t'} \leq m_{l,t} \leq m_{l,t-t'}r^{t'} \quad (1)$$

ここで、 $r > 1$ をメトリックの伸張係数と呼ぶ。ネットワークが与えられたときに、 r を適切に設定することで、隣接ノード間の Hello パケットがロスしない限りにおいて、ネットワーク中でこの範囲内でメトリックが変動してもループが発生しないことが保証できる。ループ防止を保証できる r の求め方とループフリー性の証明については文献⁹⁾ に詳細が記

されているが、ここでは、ループフリー性を保証できる r の値は、ネットワークの直径（ここでは、最短路になり得る経路の最大ホップ数とする）と、リンクメトリックが取り得る最大値 m_{max} と最小値 m_{min} （LMR では、これらを設定する必要がある）に依存することを断っておく。

LMR は OLSR のようなリンク状態型ルーティングプロトコルにおいて動作する。この種のルーティングプロトコルでは一般的に、各ノードは定期的にリンク情報をメッセージとして広告し、この情報が少しずつネットワーク上に伝播される。つまり、各ノードは常に最新のメトリックを広告するが、そのノードからより遠いノードでは、より古いメトリック値を用いて経路計算がなされることになる。LMR では、メトリックの変化量を制限することにより、ネットワーク上で経路計算に用いられるメトリック値のばらつきを一定の範囲内に収めることを狙いとしている。

ここで、式 (1) は時刻を連続値として扱っているが、実際のルーティングプロトコルではこれをどのように実装すれば良いのかを述べておく。既に述べたように、リンク状態型ルーティングプロトコルでは、各ノードは定期的にリンク情報を広告する。ETX 等の動的メトリックを用いる場合には、このリンク情報の中に、そのリンクの最新のメトリック値を含めることになる。ここで、リンク情報は一定時間毎に広告されるため、この時間間隔を単位時間として“1”とおくと、式 (1) で t は整数値をとると考えることができる。これを実際のプロトコルに当てはめると、リンク情報を広告する毎に新たなメトリックを計算し、その値が直近のメトリックの r^{-1} 倍から r^1 倍の範囲内であればそのまま最新メトリックとして用い、範囲外であれば r^{-1} 倍或いは r^1 倍の値に丸めて最新のメトリックとすれば良い。複雑な処理をすることなく、既存プロトコルに組み込むことが可能である。

なお、LMR は、 r の値が十分小さい場合には理論的にループフリー性を保証できるが、その値は非常に小さく実用的ではないため、実際にはそれよりも大きな r の値を用いることになる。その場合にはループを完全に防ぐことはできないが、 r が小さくなるに従ってループの発生数が少なくなる。文献⁹⁾ では、LMR をネットワークシミュレータ Qualnet⁸⁾ に実装し、 5×5 のグリッドネットワークを用いて性能評価を行っている。その結果、LMR によりメトリックの変動範囲が制限されることでループの発生数が減少し、 r の値が小さくなるほどその効果が大きいことが示された。しかし一方で、 r の値が小さくなりすぎると、リンク品質の変化にメトリックが十分に追従できなくなり、経路変動の柔軟性が失われるため、逆に通信性能が低下することも示された。つまり、 r の値は、ループ削減効果と経路変動の柔軟性のトレードオフを考慮して設定する必要がある。



図 1 実験用ノード

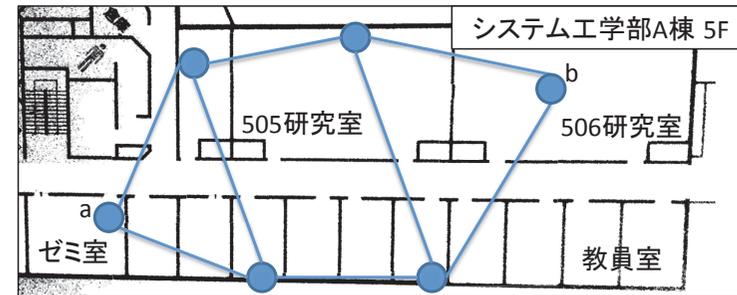


図 2 実験のネットワークボロジ

3. 評価

3.1 実装

本研究では、LMR を実機環境で動作させた場合の性能と挙動を調べるために、実機実験を行った。まず、実機実装について述べる。実験機の写真を図 1 に示す。東芝社製のノートパソコン Dynabook SS RX2 SG120E/2W に USB 接続の NIC (Network Interface Card) である NEC 社製 WL300NU-AG を接続した。OS は USB メモリから起動することとし、Ubuntu Linux version 11.04 を用いた。ルーティングプロトコルは olsrd version 0.6.1 を用いた。実験では動的メトリックとして ETX を用いたが、これは olsrd に実装されているモジュールを用いた。また、olsrd を改造して LMR を実装した。

3.2 実験シナリオ

LMR を実装したノート PC を和歌山大学システム工学部 A 棟 5 階に 6 台設置して、ネットワークを構築した。ネットワークボロジを図 2 に示す。無線 LAN の通信プロトコルとして IEEE 802.11n を用いた。無線チャンネルは 5GHz 帯のチャンネル 48 を用いた。周囲にはこのチャンネルと干渉する無線 LAN の基地局が動作していないことを確認した。各 NIC の通信速度はドライバからの設定により 1Mbps に設定した。このネットワークにおいて、ノード a から b、b から a の双方向に、500Kbps の CBR (Constant Bit Rate) 通信を同時に 20 分間発生させた。CBR 通信はパケットジェネレータ iperf version 2.0.5¹⁰⁾ を用いて発生させ、パケットサイズは IP ヘッダ及び UDP ヘッダを含めて 78 バイトに設定した。

上記の通信シナリオで、ETX のみの場合と、ETX に LMR を適用し、伸張係数 r を 1.05 及び 1.2 に設定した場合の結果を比較した。実験はそれぞれ 6 回実施して、比較にはその平均値を用いた。評価指標として、平均スループット、ループパケット数、損失 Hello パケット数、及びリンク切断回数を計測した。これらの値の測定は、各ノードで Wireshark version 1.4.6¹¹⁾ によりパケットをキャプチャし、そのログファイルを解析することで行った。平均スループットは、宛先ノードに到達したパケット数により測定した。ループパケット数は、各パケットのペイロードにシーケンス番号を埋め込むように iperf を改造したうえで、同一シーケンス番号のパケットが同じノードに 2 度以上到達した場合に、そのパケットがループしたと判定し、そのパケット数を測定した。損失 Hello パケット数は、ログファイル中の OLSR の Hello パケットの到達イベントを調べることで測定した。全ての隣接ノードペアについて、受信した Hello パケットのシーケンス番号に抜けがあるときに、その Hello パケットが損失したと判断した。リンク切断回数は Hello パケットの損失に基づいて計算した。OLSR では Hello パケットが 3 回連続で損失した場合にリンクが切断されたと判定することから、Hello パケットが 3 回以上連続で損失した区間の数をリンク切断数とした。

3.3 結果

図 3 にループパケット数、図 4 にスループットを示す。ETX ではループパケット数が最大であり、LMR を適用し、伸張係数 r が小さくなるほどループパケット数が減少している。これに伴ってスループットが向上し、ループパケット数とスループットの相関が表れている。この結果は、LMR のループ削減性能と、ループ削減に起因したスループットの向上性能を示しており、LMR の有効性を示している。

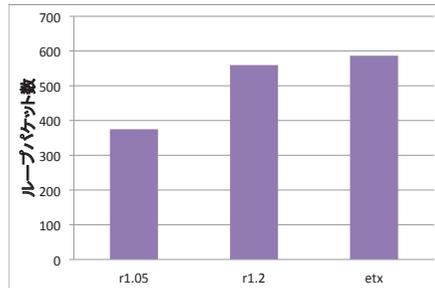


図 3 Number of Loop Packets

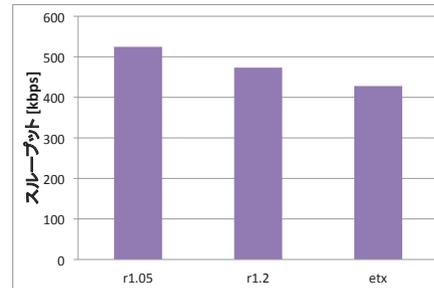


図 4 Throughput

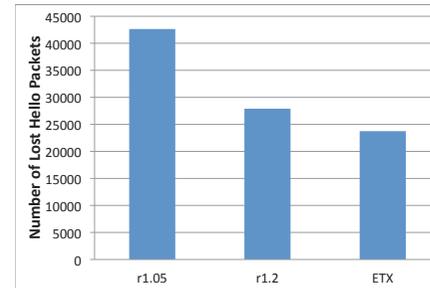


図 5 Number of Lost Hellos

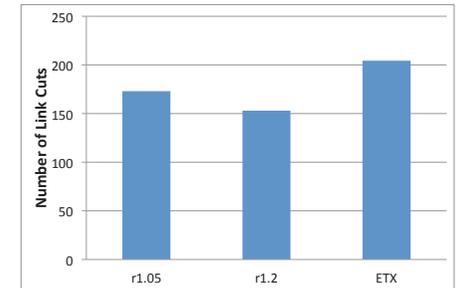


図 6 Number of Link Cuts

さらに詳しく観察するために、Hello パケットの損失数を調べた結果を図 5 に示す。意外なことに、LMR の伸張係数 r を小さく設定した方が、Hello パケットの損失数が増加していることがわかる。これは、ETX ではリンク輻輳時にすぐにリンクメトリックが増加するため、より輻輳の小さいリンクに柔軟に経路を変更することで、輻輳によるパケットロスができるだけ防いでいる結果であると考えられる。逆に、LMR ではリンク輻輳時にリンクメトリックが増加する速度が抑制されているため、輻輳を解消するまでの時間が長くなり、パケットロスがより多く発生しているということである。

ところが、 $r = 1.05$ のときにはパケットロスが多いにもかかわらず、最もスループットが良い。これには、リンク切断が影響していると考えられる。図 6 は、連続して 3 回以上 Hello パケットが損失することで、OLSR のリンクが切断した回数を示している。ETX ではメトリックが急激に変化することで、パケットが特定の経路に一度に流入し、Hello パケットが連続して損失することでリンクが切断したと考えられる。これに対して LMR では、高負荷のため Hello パケットの損失は多いものの、連続して損失することは比較的少ないことがわかる。

実は、パケットループは、急激なメトリックの変化とリンク切断の両方に起因して発生する。リンク切断時には、新しい最短経路が古い最短経路の逆方向であるために一時的にループが発生する現象が頻繁にみられる。このループも図 3 の結果に含まれる。ETX は、リンク切断を原因とするループも同時に発生させることで、スループット性能を低下させたと考えられる。

なお、リンク切断に起因するループは、LMR では防ぐことはできない。本評価結果では、LMR はこの種のループも ETX より少ない結果となったが、 $r = 1.05$ のとき、Hello パケットの損失数はかなり上昇していることから、さらに r を低い値にすれば、さらに Hello の損失数は増加し、リンク切断を多く発生させると考えられる。その時には、ループも数多く発生し、スループットも大幅に低下する恐れが示唆される。

4. おわりに

本稿では、無線メッシュネットワークにおけるパケットループ削減手法 LMR の実機評価を行い、その結果を報告した。LMR は急激なメトリック変動に起因するループを減少させる手法であり、本稿の実験結果から、スループット及び発生ループ数の両面から、LMR の有効性を示すことができた。一方で、LMR により経路変動を抑制することにより、Hello パケットの損失が大きくなることが判明した。Hello パケットの損失はリンク切断を招き、リンク切断はパケットループの原因となるため、伸張係数 r を小さくしすぎること、リンク切断に起因したループの危険性が増す恐れがあることが示唆された。結論として、 r の値を設定するにあたっては、これらのバランスをとることが重要であると考えられる。

ところで、本稿で実施した実機実験はまだ十分ではない。より広い r の値の範囲を試すことで、LMR により発生する現象を明らかにすることが今後の課題である。

謝辞 本研究の一部は総務省戦略的情報通信研究開発推進制度 (SCOPE) の支援により実施されたものである。ここに記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) I.F.Akyildiz and X.Wang, "Wireless Mesh Networks," John Wiley & Sons Ltd Publication, 2009.
- 2) C. Perkins, E. Belding-Royer, and S. Das, "Ad Hoc On-demand Distance Vector (AODV) Routing," RFC3561, 2003.
- 3) T. Clausen and P. Jacquet, "Optimized Link State Routing Protocol (OLSR)," RFC3626, 2003.
- 4) D.De Couto, D.Aguayo, J.Bicket and R.Morris, "A High-Throughput Path Metric for Multi-Hop Wireless Routing, In Proc. of MOBICOM2003, pp.134-146, 2003.
- 5) R. Draves, J. Padhye and B. Zill, "Routing in Multi-Radio, Multi-Hop Wireless Mesh Networks," In MOBICOM2004, pp.114-128, 2004.
- 6) Y. Yang, J. Wang and R. Kravets, "Interference-aware Load Balancing for Multihop Wireless Networks," In Tech. Rep. UIUCDCS-R-2005-2526, Department of Computer Science, University of Illinois, 2005.
- 7) L. Speakman, Y. Owada, and K. Mase, "Looping in OLSRv2 in Mobile Ad-Hoc Networks, Loop Suppression and Loop Correction," IEICE Transactions on Communications, Vol.E92-B, No.4, 2009.
- 8) Qualnet, <http://www.scalable-networks.com/products/qualnet/> .
- 9) T. Yoshihiro, "Reducing Routing Loops under Dynamic Metrics in Wireless Mesh Networks," IEEE Global Communication Conference, Exhibition, and Industry Forum (Globecom2010), pp.1-6, 2010.
- 10) iperf project, <http://sourceforge.net/projects/iperf/> .
- 11) Wireshark, <http://www.wireshark.org/> .