

MANETにおける動的メトリックを用いた 通信安定化に関する一検討

富士克也† 吉廣卓哉‡

近年, 無線通信を用いて周囲のノードを接続し自律的にネットワークを構成する技術として MANET が注目されている. MANET ではノードの移動等により無線リンクが切断されることがあるが, リンクが切れる前に通信を他のリンクに誘導し, リンク切断により通信も切断されることのない高信頼通信を実現できることが望ましい. このために, OLSR のようなリンク状態型経路制御プロトコルを対象として, リンクが不安定になるとリンクコストを上げることで通信経路を絶えず安定リンクに誘導する動的メトリックが提案されている. しかし, 動的メトリックを用いると, メトリックの伝播遅延により経路ループが生じ, ループにより輻輳が生じることで通信が切れ信頼性を損なうことが問題となる. 本研究では, ノードの移動による通信切断を防ぎつつ, 同時にメトリックの変動により発生するループを削減することを目的とした動的メトリックを設計し, シミュレーションによる評価結果を報告する.

A Study on Dynamic Metrics towards Reliable Communication in MANET

KATSUYA FUJI† TAKUYA YOSHIHIRO‡

As a future network, MANET (Mobile Ad-hoc Network) is developed as a network constructed autonomously via wireless communication. In MANET, links are frequently

disrupted due to node mobility. In such case, it is desirable to move in advance communication path into reliable links not to cut communication by link disruptions. To this end, several dynamic metrics are proposed for link-state routing protocols such as OLSR, which increase link metrics when the link become unstable to make unused as a path of any two nodes. Those dynamic metrics, however, involves routing loops which comes from inconsistency of network information due to propagation delay of metric information. This is problematic since the routing loops cause severe congestion. In this paper, we propose a new routing metric that intends to prevent link disruption coming from node mobility, and simultaneously prevent routing loops coming from inconsistency of route computation. We evaluate the performance of our routing metrics through simulation, and report the results.

1. はじめに

近年, ノート PC やスマートフォン等の無線 LAN による通信が可能な端末が増加している. これらの無線端末が周囲のノードと自動的に接続し, 自律的にネットワークを構築する技術として MANET (Mobile Ad-hoc Network)が盛んに研究されている. MANET では, 無線電波状況が不安定になりやすく, さらにはノードの移動等で無線リンクの切断が発生するため, MANET 上でいかに信頼性の高い通信を実現するかが, 一つの技術課題となっている.

MANET 上でできるだけ安定リンクを用いた経路を用いるために, リンク品質をリアルタイムに数値化する動的メトリックが多数提案されている[3-8]. 品質の高いリンクが低いメトリックを持つようにすると, 通信路として最短路を選ぶことで, 常に品質の高いリンクを用いて通信できるため, 通信の信頼性及びスループットが向上することが確認されている. しかし, ノードの移動によるリンク切断は依然として発生し, また, 変動するメトリックの伝播遅延によりノード間で計算された経路の不整合が発生し, 経路がループする現象が発生する. これらは通信の切断の原因となるため, MANET 上で高信頼通信を実現するにあたっての障害となっている.

ノードの移動によるリンク切断は, ノードの移動に対してメトリック値の上昇が十分に追従でき, リンクが切断する前にそのリンクを使わない通信経路に誘導することで, 避けられると考えられる. 一方で, メトリック変動による経路ループは, メトリックの変動が急激であるほど発生しやすいことが知られており, 一定の条件に従って緩やかなメトリック変動をすることでループを削減できる手法 LMR(Loop-free Metric Range)が提案されている[2]. 本研究では, ノード間の距離に敏感に反応できる受信電波強度 (RSSI: Received Signal Strength Indication) を用いて動的メトリックを設計し, これにループ削減手法 LMR を適用することで, リンク切断及び経路ループによる通

† 和歌山大学システム工学研究科
Graduate School of Systems Engineering, Wakayama University

‡ 和歌山大学システム工学部
Faculty of Systems Engineering, Wakayama University

信切断が発生しにくい動的メトリックを設計したので、その結果を報告する。

なお、現在の無線 LAN を用いた MANET 技術では、通信負荷が高くなると干渉によりリンクが切れる特徴があるが、本研究ではこれについては扱わない。通信負荷が高くてもリンクが切れない技術については課題として留保し、まずは、レイヤ 3 の範囲で通信が切れない高信頼通信を実現する技術を追求した試みである。

本論文の構成は以下の通りである。2 章では本研究に関連する既存研究について述べる。3 章では、提案する動的メトリックの設計について述べる。4 章では、提案メトリックをシミュレーションにより評価し、5 章でまとめとする。

2. 関連研究

2.1. MANET における動的メトリック

主に固定ノードにより構成されるネットワーク（無線メッシュ網）向けに開発されたメトリックとして、ETX (Expected Transmission Count) [3] が挙げられる。ETX は主にリンク状態型経路制御プロトコルにおいて用いられる手法であり、隣接ノードへのパケット到達率の逆数をリンクメトリックとする。また、ETX を発展させた方法として ETT (Expected Transmission Time) [4] が提案されており、これは隣接ノードへの推定パケット到達時間をリンクメトリックとする。これらの手法は、過去一定時間内の Hello メッセージの到達を測定することで動的メトリックを計算するが、このためリンクの電波状況の変化に対してメトリックの変動が鈍く、リンク切断までに十分にメトリックを上昇できない欠点がある。無線メッシュ網においては、MIC (Metrics of Interference and Channel Switching) [5] のように以後も干渉の度合いを考慮する等の改良により多数の提案がなされているが、いずれも同様の欠点を抱えている。

ノードが移動する場合を対象としたメトリックも様々なものが提案されている。移動ノードと非移動ノードが混在する場合には、移動しないノードが最も信頼できるノードであるという考え方ができる。そこで Yawut らは、ノードの移動量を推定して、これを基にメトリックを計算する手法を提案した[6]。しかし、多くのノードが移動している場合には、ノード間の相対速度が重要になる。Tickoo らは受信電波強度を用いて 2 ノード間の相対速度を計算し（つまりどの程度近づいているか、遠ざかっているかがわかる）、これに基づいたメトリックを提案している[7]。また、電波強度が最小のリンクが経路の信頼性を決めるという考え方から、電波強度の最小値が最大になる経路を 2 ノード間の経路として計算する手法も提案されている[8]。しかし、これらを含め数多くの動的メトリックの中に、経路ループを考慮した手法は存在しない。

2.2. 経路ループ削減手法 LMR

動的メトリック下で経路ループを削減する手法として、LMR(Loop-free Metric Range) が提案された[2]。LMR は、既存の動的メトリックに適用することで、経路ループを削減する。経路ループは、リンクメトリックの変動が急激である場合に発生しやすいことから、LMR では時間当たりのリンク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（伸長係数と呼ぶ）により制限する。通常、リンクメトリックは、一定時間毎に送出されるリンク情報の広告時に更新されるが、LMR ではこの更新毎に、以前のメトリックから一定割合以上の変更を許さないことで、ループを削減する。即ち、新たなメトリックを m_{new} 、古いメトリックを m_{old} 、変更が許されるメトリックの割合を伸長係数 r (>1) とすると、 $m_{old} \cdot r^{-1} < m_{new} < m_{old} \cdot r$ が成り立つようにメトリックを変動させる。つまり、もし、新たなメトリック値がこの範囲外であれば、範囲内で最も近い値に修正することになる。

ループの削減効果は r が小さい程大きいことが確認されている[2]が、それ以外にも、ネットワークの（ホップ数による）直径とリンクメトリックの最大値、最小値にも依存する。ネットワークの直径とリンクメトリックの最大値、最小値が与えられると、経路制御プロトコルの制御パケットが損失しないという条件の下で、経路ループが発生しないことを保証するメトリック変動割合 r を求めることができる。残念ながら、ループが発生しないことを保証できる r の値は、現実的なネットワークで実用するには小さすぎることがわかっている。しかし、ループが発生しないことを保証できるほど r が小さくなくても、 r を小さくするほどループ削減効果が高くなることが確認されている。リンク変動によるネットワークの状態変化への追従性能とループ削減効果とのバランスをとる必要がある。

3. 通信を安定化する動的メトリックの設計

3.1. 設計方針

本研究では、ノード移動によるリンク切断、及びメトリック変動による経路ループの影響で通信が切れないような動的メトリックの構築を目指す。本研究では、OLSR[1] のようなリンク状態型経路制御プロトコルが動作するネットワークを想定する。

ノード移動によるリンク切断に対応するためには、ノードの移動によりノード間の距離が一定以上離れるまでにそのメトリックを十分大きくし、リンクが通信経路として使われないようにする必要がある。このためのメトリックとして、ノード間距離に応じてメトリックが定まることとし、ノード間距離を推定するために Hello メッセー

ジの受信電波強度を用いる。

ノード間距離とリンクメトリックの関係を表す関数は、慎重に決定する必要がある。図1の例を参照していただきたい。図1(a)は、ノードAとCの距離が切断間際まで離れている状態である。この場合には、AからCへの経路は、中継ノードBを介して、A→B→Cになることが望ましい。つまり、リンク(A, B)のメトリックを $m(A, B)$ で表すと、 $m(A, C) > m(A, B) + m(B, C)$ が成り立つ必要がある。一方で図1(b)は、ノードAとCの距離が比較的近い場合である。この場合には、パケットはBを介さずにAからCに直接送信されることが望ましい。つまり、 $m(A, C) < m(A, B) + m(B, C)$ が成り立つべきである。距離に対するメトリックの関数は連続関数であるべきであることを考慮すると、この関数は凸関数であることが望ましい。そこで本研究では、凸関数の一例として、ノード間距離に対して、メトリックが指数関数になるようなメトリックを用いることとした。

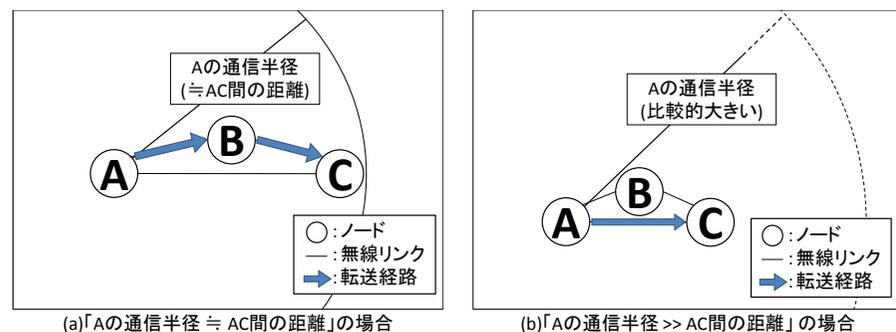


図1. ノード間の距離による、望ましい通信経路の差異

3.2. 電波強度を用いた動的メトリックの計算

提案する動的メトリックは、相手ノードから受信した Hello メッセージの受信電波強度(RSSI)から計算される。Hello メッセージを受信する度にそのノードから送信ノードへの(有向)リンクのメトリックが再計算され、Hello メッセージやトポロジ広告メッセージ(OLSRではTCメッセージ)を通じてネットワークに広告され、最短路計算に用いられる。

Hello メッセージの受信電波強度は、まずノード間距離を求めるために用いられる。遮蔽物のない空間では、RSSIは距離の二乗に反比例して減衰するので、RSSIを R 、ノード間距離を L 、減衰係数を a とすると、RSSIの減衰は以下の式で表わされる。

$$R = \frac{a}{L^2}$$

これを L について関して整理することで、推定ノード間距離を算出する式が導出される。

$$L = \sqrt{\frac{a}{R}}$$

推定されたノード間距離から、指数関数により、リンクメトリック M を求める。最大通信可能距離を L_{max} 、最小リンクメトリックを M_{min} 、最大リンクメトリックを M_{max} とし、次数 n を用いてリンクメトリック M を以下のように求める。ここで、 n は1以上の任意の正数であり、適切に定められるべきパラメータである。

$$M = (M_{max} - M_{min}) * \left(\frac{L}{L_{max}}\right)^n + M_{min}$$

なお、電波強度を用いたノード位置推定方法として、本研究では簡易的な方法を用いているが、より精度の高い既存手法[9]を用いることも可能である。

3.3. LMRの適用

受信電波強度を用いて計算されたメトリックに対して、経路ループ削減手法 LMR を適用することで、通信に使用しているリンクを切らないようにしつつ、同時に経路ループが発生しないような経路制御を目指す。

LMRの適用により時間あたりの(メトリック広告あたりの)メトリックの上昇(或いは下降)割合が r により制限される。一方で、3.2節で述べた電波強度メトリックの時間あたりの変化量はノードの移動速度及びノード間距離に依存する。ノードの移動速度に対して LMR の抑制が厳しすぎると、十分にメトリックが上昇する前にリンクが切れるため、通信切断が発生する。逆に LMR の抑制が緩い場合には、経路ループが発生することで輻輳が誘発される。これらのバランスをとることが重要であるが、どの程度のノードの移動速度に対して本手法が有効に働くかを見極めることも重要である。

4. 評価実験

4.1. シミュレーションシナリオ

ネットワークシミュレータ Qualnet[11]を用いて性能評価を行った。Qualnetバージョン5.0に含まれるOLSRモジュールであるOLSRv2-NIIGATAを改造して提案する電波強度メトリックと LMR を実装し、(1)電波強度メトリックのみの場合と(2)電波強度メ

リックに LMR を適用した場合の通信性能を比較した。

シミュレーションシナリオについて述べる。1000m×1000m の正方形フィールド内に 30 個のノードをランダムで配置し、Random Way Point モデル[10]に基づいてノードを移動させた。ノードの移動速度は 5km/h と 10km/h の 2 種類で行い、ノードの停止時間は 10 秒とした。20kbps の CBR(Constant Bit Rate)通信を 5 本、シミュレーション開始 1 分から 6 分までの 5 分間発生させた。ノード間距離からメトリック計算する際に用いる次数 n は 4 と設定した。OLSR は MPR と呼ばれる仕組みを利用して広告リンクを制限する機能を持つが、今回はその効果を除くため、TC_REDUNDANCY=2 とし、全てのリンクがネットワーク上に広告されるようにした。シミュレーション開始 1 分後には、全てのリンク情報が全てのノードによって共有される状態になった。OLSR の他の設定パラメータはデフォルト値を用いた。

4.2. シミュレーション結果

ノード移動速度 5km/h, 10km/h の 2 通りについて、伸長係数 r を変えながら実験を行った結果について述べる。図 2 には様々な伸長係数 r の値に対するパケット到達率が示されている。図 2 を見ると、ノード速度 5km/h, 10km/h の場合のいずれの場合にも、LMR の制限が強いほど(r の値が小さいほど)パケット到達率が低くなった。特に 5km/h では r が 1.01 から 1.03 になる間、10km/h では r が 1.10 から 1.20 になる間で大きな差異が見られる。

図 3 には、同一ノードに 2 度以上到達したパケットをループパケットと定義し、各伸長係数の値に対するループパケット数を示した。ノードの移動速度が早い 10km/h の場合には、5km/h の場合よりも大幅にループパケット数が増加したことがわかる。これは、ノードの移動速度が早い方がネットワークの状態が変化しやすく、リンクの切断や経路ループが発生しやすいことが原因である。

伸長係数 r による影響をみると、ノードの移動速度にかかわらず、 $r=1.01$ のときは $r=1.03$ に比べて、ループパケット数が大幅に増加したことがわかる。これは、 $r=1.01$ では LMR の制限が強過ぎたためにメトリックが十分に变化できず、通信が他リンクに誘導される前にリンクが切断されたためである。リンクが切断されると、その直前のノードが経路を再計算し、その結果パケットが一つ手前のノードに転送されることがあり、その結果ループが発生する。通信中のリンクが切断されると、パケットループが数多く発生することがわかる。

また、5km/h の場合に注目すると、 $r=1.05$ でループ数が最も少なくなり、伸長係数 r が 1.05 より大きくなるにつれてループパケット数が増加している。これは、LMR の制限が弱くなり、メトリックが大きく変動するようになったため、ループが発生しやすくなった結果である。

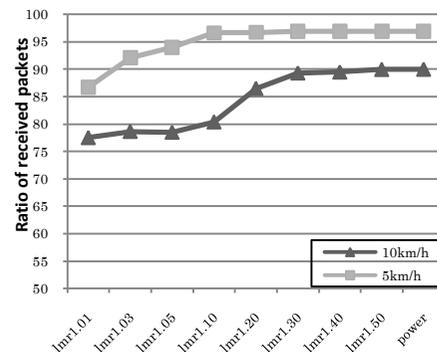


図2 伸長係数 r に対するパケット到達率の変化

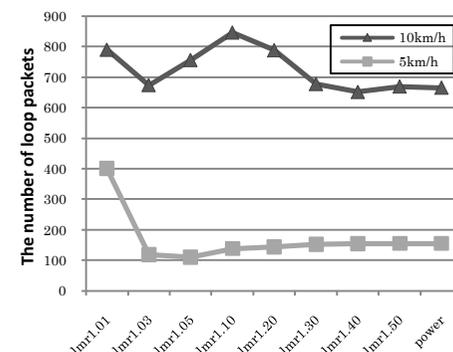


図3 伸長係数 r に対するループパケット数の変化

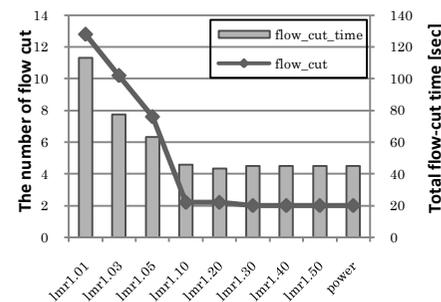


図4 速度5km/hにおけるフロー切断

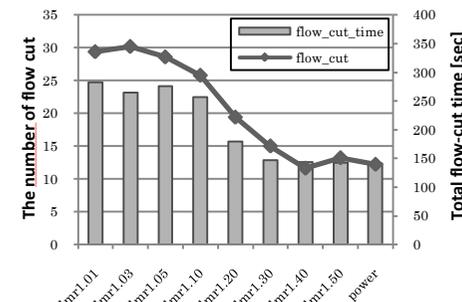


図5 速度10km/hにおけるフロー切断

10km/h のときには、 $r=1.10$ 付近で最もループパケットが多くみられるが、これは、伸長係数 r が小さい場合に多く見られるリンク切断の影響と、伸長係数 r が大きい場合に多く見られるループの影響とが合わさったためであると推測される。実際に、イベントログを確認すると、リンク切断に伴いループが発生する例、及びループが原因で輻輳が発生し、これによりリンク切断が起こる例、ともに多く見られた。このようにリンク切断とループの連鎖により、ループ数が多くなったのではないかと考えられる。

図 4 と図 5 には、ノード速度 5km/h と 10km/h のそれぞれにおけるフロー切断回数 (flow_cut) と切断時間の合計 (flow_cut_time) を示した。フロー切断は CBR 通信の宛先ノードで CBR パケットが 2 秒以上連続で受信されなかった場合に 1 回と数えた。切断時間は、5 本の CBR 通信において、フロー切断が持続した時間の合計とした。ノード

の移動速度によらず、LMRの制限が強い（即ち伸張係数 r が小さい）ほど、フロー切断回数、切断時間ともに増加する結果となった。伸張係数 r が小さい時ほどリンク切断が多く発生することは述べた通りだが、フロー切断に関しては、通常のループよりもリンク切断の方が大きく影響していることが推測される。ノードの移動速度が10km/hの方が、フロー切断数が多く、また、 r が大きくなっても減少しにくい結果となっているが、移動速度が大きいほどリンク切断しやすいことを考えると説明がつく。

4.3. 考察

図2によると、ノードの移動速度が5km/hの場合には、 $r=1.01$ と $r=1.03$ 間のパケット到達率には5%強、つまり約400パケットの差がみられた。一方で図3によると、この時のループパケット数の差は300パケット程度である。伸張係数 r が小さい場合には、ネットワークの変化にメトリックが追従できず、通信中のリンクの切断が多く発生したと考えられるが、 r が1.01と1.03の場合の損失パケットの約3/4がループしたことから、リンク切断はかなりの割合でループを伴うことがわかる。

図3から、ノードの移動速度10km/hの $r=1.10$ 付近にループ発生数の山が見られるが、この山の右側、つまり $r=1.10$ から1.30の間を図2で見ると、ループが増加するに従ってパケット到達率が下がっている。これに対して、山の左側、つまり $r=1.03$ から1.10の間では、ループ数は減少しているにもかかわらず、パケットの到達率は横這いである。これは、 r の値が小さい場合には、ループせずに損失したパケットが増加したことを示しており、リンク切断の影響が大きくなったことが推測される。

さらに、図3では、ノードの移動速度が5km/hの場合には、 $r=1.05$ の場合が最もループパケット数が少なくなっている。伸張係数 r がこれよりも大きい場合には、 r が1.20以上ではループ数は一定であるが、1.20を下回ると、少しずつループ数が減少している。これは、伝播強度メトリックの変動が1.20程度で制限され始め、ループ削減効果が現れてきたことを表している。一方で、 r が小さい値をとると、リンク切断に伴うループが多く発生することは既に述べた。 $r=1.03$ から1.05の間あたりで、この2つの影響がちょうどバランスしているのではないかと推測される。

ノードの移動速度が時速5km/hにおいて、このバランスポイントがようやく認識できる程度に見えてきたが、まだリンク切断とメトリック変動によるループの両方が混在していることが見て取れる。ノードの移動速度をより遅くする、或いは、OLSRのメッセージ送信間隔をより短くすることで、このバランスポイントがより明確になるのではないかと期待される。

5. おわりに

本研究では、ノードの移動によるリンク切断、及びメトリックの変動による経路ループの影響で通信が切断されることのない高信頼な動的メトリックを目指して、新たな動的メトリック計算法を設計した。提案したメトリックは、Helloメッセージの受信電波強度からノード間距離を推定し、ノード間距離に応じたメトリック値をとることで、リンク切断可能性に敏感に反応できる設計となっている。一方で、メトリック変動による経路ループを削減するために、経路ループ削減手法LMRを適用した。

シミュレーション実験の結果、LMRの伸張係数 r が小さい場合にはメトリック値が十分に変動できず、リンク切断による通信の切断が多く発生していることがわかった。一方で r が大きい場合には、メトリック値の変動が大きくループが発生していることがわかった。ノードの移動速度が5km/hと歩行速度程度であれば、 $r=1.05$ 程度がそのバランスポイントとなり、最もループの発生が少ないことがわかった。

今後は、ノードの移動速度をより遅くするか、或いはOLSRの制御メッセージの送信間隔をより短くした場合についてシミュレーション実験を行い、ループの発生が少なく、フローの切断が発生しないような動的メトリックを実現できるかどうかを追求していきたい。

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] T. Clausen and P. Jacquet, "Optimized Link State Routing Protocol (OLSR)," RFC3626, 2003.
- [2] 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.
- [3] DeCouto, D., Aguayo, D., Bicket, J. Morris, R. A High-Throughput Path Metric for Multi-Hop Wireless Routing, Proceeding of ACM Annual International Conference on Mobile Computing and Networks (MOBICOM2003), pp.134-146, 2003.
- [4] Draves, R., Padhye, J. and Zill, B. Routing in Multi-Radio, Multi-Hop Wireless Mesh Networks, Proceedings of ACM Annual International Conference on Mobile Computing and Networks (MOBICOM2004), pp.114-128, 2004.

- [5] Yang, Y., Wang, J. and Kravets, R., Interference-aware Load Balancing for Multihop Wireless Networks, In Technical Report UIUCDCS-R-2005-2526, Department of Computer Science, University of Illinois, 2005.
- [6] Yawut, C., Paillassa, B. & Dhaou, R. (2007). On Metrics for Mobility Oriented Self Adaptive Protocols, Proceedings of in Wireless and Mobile Communications 2007 (ICWMC2007), 2007.
- [7] Tickoo, O., Raghunath, S. Kalyanaraman, S. Route Fragility: A Novel Metric for Route Selection in Mobile Ad Hoc Networks, Proceedings of IEEE ICON03, pp.537–542, 2003.
- [8] Trivino-Cabrera, A., Nieves-Perez, I., Casilari, E. and Gonzalez-Canete, F.J. Ad Hoc Routing Based on the Stability of Routes, Proceedings of the 4th ACM International Workshop on Mobility Management and Wireless Access, pp.100–103, 2006.
- [9] Y. Shang, W. Ruml, Y. Zhang, and M.P.J. Fromherz. Localization from mere connectivity. In Proc. ACM MobiHoc, pages 201–212, Annapolis, Maryland, USA, Jun. 2003.
- [10] Broch, J; Maltz DA, Johnson DB, Hu Y-C, and Jetcheva J (1998). "A performance comparison of multi-hop wireless ad hoc network routing protocols". roceedings of the Fourth Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking(Mobicom98), ACM, October 1998.
- [11] Qualnet, <http://www.scalable-networks.com/products/qualnet/>.