

大規模な散布型センサネットワークにおけるルーティング方式の検討

磯崎 直樹[†] 高野 祐輝[†] 篠田 陽一[§]

北陸先端科学技術大学院大学 情報科学研究科[†] / 情報科学センター[§]

概要

さまざまなセンサをネットワークに接続して環境や人の情報をモニタリングする、センサネットワーク技術に関する研究がさかに行われている。また、数万のセンサを散布して広域の情報を収集するアプリケーションも検討されている。このような大規模な散布型センサネットワークでは、膨大な数のセンサが必要とされるため、個々のセンサを識別してセンシングするよりも、センサの集合に対してセンシングする方式が一般的になると考えられる。このため大規模センサネットワークのためのルーティング方式においても、センサの集合への経路を確保する方式が効率的であると考えられる。本論文では、このような大規模センサネットワークに適応するルーティング方式を提案する。提案方式は、多数のセンサをクラスタ化し、クラスタ単位でルーティングを行うという特徴を有している。

Study on routing method for large-scale sensor network

Naoki Isozaki[†] Yuuki Takano[†] Yoichi Shinoda[§]

SCHOOL OF INFORMATION SCIENCE[†] / CENTER FOR INFORMATION SCIENCE[§],
JAPAN ADVANCED INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

Abstract

Study about the sensor network technology that is used for monitoring environment and information of a person is done in recent year. In addition, an application to collect information of wide area by spreading several tens of thousands of sensors is also examined. In a large-scale sensor network, since the number of sensors is enormous, the method of collecting information from set of sensors will be used more commonly than collect information by identifying the individual sensor. Therefore, to inform route for a set of sensors is applied efficiently to a routing method for large-scale sensor network. In this paper, we propose routing method for large-scale sensor network. Characteristics of this proposal are building a cluster comprising a lot of sensors, and to do routing by a cluster unit.

1 はじめに

センサノードと呼ばれるネットワーク機能を備えたセンサデバイスをネットワークに接続し、環境情報をモニタリングするセンサネットワーク技術が注目されている。センサネットワーク技術の利用により、人の動作や自然環境の変化など、あらゆるものの情報をリアルタイムで取得することが可能になる。これらは、自然災害のモニタリングや、ビルオートメーションなど、様々な分野での応用が期待されている。

現在、センサノードは小型化、高性能化される傾向にあり、数万の微小なセンサノードを散布して、広域の情報をセンシングするという応用方法も検討されている。このような大規模なセンサネットワークでは、センサノードの故障や移動が多く発生するため、ネッ

トワークの構成が頻繁に変更される。IETFのMANETワーキンググループ [3] では、様々なアドホックルーティングプロトコル [4] [5] [6] [7] が提案されている。

しかしながら、これらのアドホックルーティングプロトコルでは、数十から数百規模のネットワークでの利用を想定しているため、規模と変化に追従できなくなることが予想される。

一方、大規模なセンサネットワークによるセンシングでは、個々のセンサノードを識別して詳細な情報を取得するよりも、多数のセンサノードの集合からの情報を取得するような、面的なセンシングが一般的になると考えられる。例えば、森林に大量のセンサノードを散布して温度を測定する場合、一つ一つのセンサ

ノードの温度を区別するのではなく、ある区域ごとにクラスタ化したセンサの集合から温度の平均値を取得した方が効率が良い。このためルーティング方式においても、個々のセンサノードへの経路を保持するのではなく、センサノードの集合を一意に識別して、その集合への経路を保持することで、ルーティングオーバーヘッドを大幅に削減できると考えられる。さらに、ネットワーク全体で個々のセンサノードを識別しないことにより、センサノードの故障や移動による影響が小さい、耐障害性のあるネットワークを構築することができる。

本研究では、大規模なセンサネットワークにおいて、ノード（以下クエリノード）が、センサノードの集合（以下クラスタ）を一意に識別し、クラスタに対してクエリを効率的に行うためのルーティング方式の検討を行った。本研究で想定する大規模なセンサネットワークアプリケーションは、災害時などに上空から大量のセンサノードを散布してアドホックにマルチホップネットワークを構成し、短期間の被災状況を把握するようなアプリケーションである。

2 提案方式の概要

本提案方式では、クエリノードからセンサノードの集合への面的なセンシングを可能にするため、センサノード散布時にネットワークをクラスタ化し、各クラスタに一意にクラスタアドレスを割り当てる。クラスタ形成後に、クラスタ単位でルーティングを行うことにより、各クエリノードが全クラスタへの経路を確保することができる。具体的には各クラスタの境界に位置する複数のセンサノード（以下 Area Border Node: ABN）がクラスタの代表にすることにより、クラスタ間で経路情報の交換を行う。ABN は隣接する各クラスタに対して複数選出されるため経路が冗長化し、各クラスタで代表ノードが一つだけの構成と比較して障害に対する頑健性が高くなる。また、図1に示すように、ネットワークをクラスタ内部（図1の下部）と、クラスタ間（図1の上部）の二つのレイヤをもつような構造にし、各レイヤで異なるルーティング方式を採用する、そのため、クラスタ内部のセンサノードの脱落や移動が、クラスタ間のルーティングに及ぼす影響は小さくなる。

本研究で想定するセンサネットワークで行われる通信は、クエリノードからクラスタへのクエリの送信

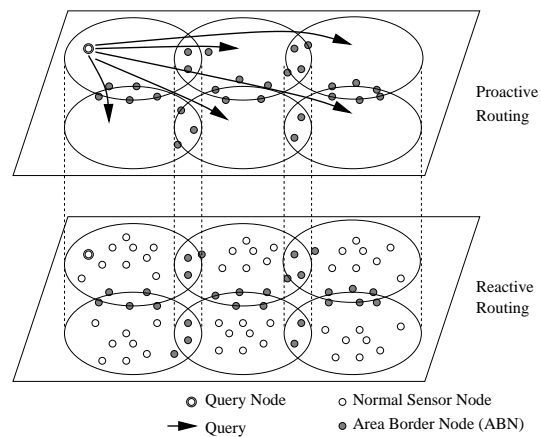


図 1: 全体像

と、クエリを受信したクラスタに所属する全センサノードからクエリノードへの応答が主体となる。このため、クラスタ内部のセンサノード間の通信よりも、クラスタ間での通信が頻繁に発生する。従って経路の検索においても、クラスタ内部への経路の検索よりも、クラスタ間の経路の検索が多くなる。また、クラスタ外部へリアクティブに経路の問い合わせを行った場合、距離との関係から、クラスタ内部への問い合わせと比較して遅延が大きくなると考えられる。このような理由から、クラスタ間のルーティングは、プロアクティブ型のルーティング方式を採用し、常時各クラスタへの経路を保持した方が効率が良いと考えられる。一方、クラスタ内部のルーティングにおいては、同様の理由から、各センサノード/クエリノードがクラスタ内の他のセンサノードへの経路を常時保持する必要はなく、ABN への経路のみ保持していれば、クエリ送信時にクラスタ外部への経路を取得することができる。このため、クラスタ内部のルーティングは、ABN への経路のみプロアクティブに保持する、リアクティブ型のルーティングプロトコルを採用する。

提案方式を実現するための、具体的なプロトコル、クラスタリング方式、ルーティング方式については、次章以降で述べる。

3 クラスタリング

本章では、センサのクラスタリング方法を説明する。

3.1 クラスタリング

センサノードが散布されてネットワークを構成する際に、全センサノードは Cluster Request (CRQ) を近隣ノードに対してブロードキャストする。CRQ にはセ

ンサノードの起動時間 (Init Time), 最大転送ホップ数 (TTL), センサノードを一意に識別するネットワークアドレスが設定されている. CRQ を受信したセンサノードは, 各自の Init Time と, 受信した CRQ の Init Time を比較して, Init Time が小さい方を選択する. 受信した CRQ の Init Time が選択された場合, センサノードは CRQ に設定されたネットワークアドレスをクラスタアドレスとして設定し, 他のノードに CRQ を転送する. またこのとき CRQ に設定された TTL を 1 つ減算する. 自ノードの Init Time が選択された場合は, CRQ を破棄する. 選択された CRQ は TTL がゼロになるまで転送されるため, 図 2 のように最も Init Time が小さいノード (Core Node) を中心に半径 TTL のクラスタが構成され, 各クラスタごとに一意のアドレスが設定される. Core Node はクラスタ構成時以外は通常のセンサノードとしてのみ利用されるため, Core Node の脱落や移動がクラスタ構成やルーティングに影響をあたえることはない. 各ノードは後述の ABN HELLO や ABN UPDATE などの定期的なメッセージを確認しながら移動や構成の変更を検知する.

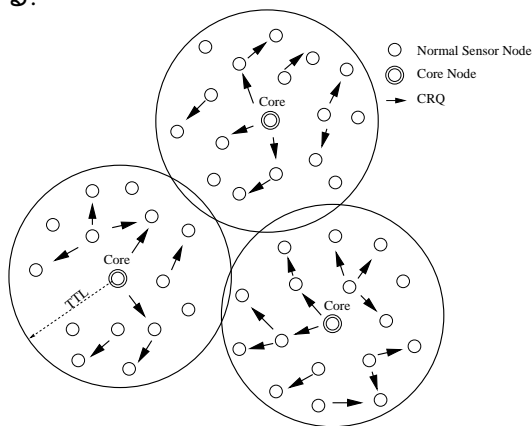


図 2: クラスタリング

3.2 ABN の選出

クラスタ形成後, 各センサノードは隣接するノードに対して定期的に ABN HELLO を送信し, ABN を選出する. ABN HELLO には各センサノードが所属するクラスタアドレスが設定されており, ABN HELLO を受信したセンサノードは, 他のクラスタと隣接しているかどうか判別することができる. ABN HELLO により他のクラスタと隣接していることが判明したセンサノードは, ABN として選出される. クラスタと

隣接しているセンサノードが全て ABN として選出されるため, クラスタ間で冗長な経路を構築することができる.

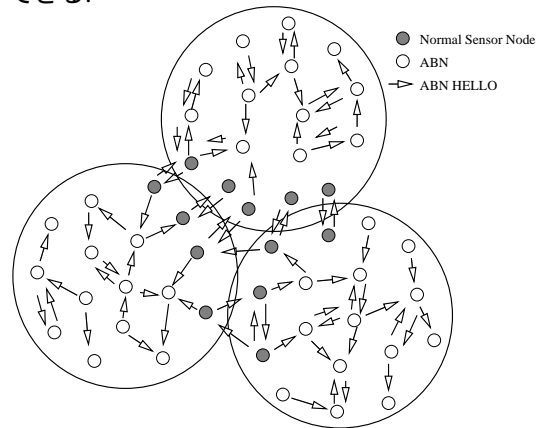


図 3: ABN の選出

4 ルーティング

ABN HELLO により選出された ABN は, 定期的に ABN UPDATE を送信し, クラスタ間の経路情報の交換, クラスタ内部の ABN, センサノードへの経路情報の通知を行う. 以下にそれぞれの機能に関する説明を示す.

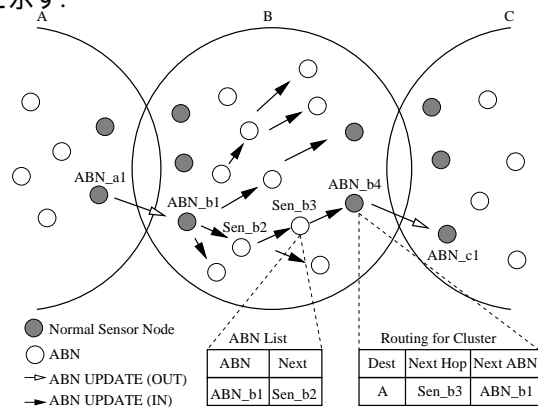


図 4: ルーティング

4.1 クラスタ間の経路情報の交換

ABN はクラスタ外部の ABN に向けて ABN UPDATE を定期的に送信し, クラスタ間の経路情報を交換する. ABN UPDATE の経路情報には宛先クラスタと宛先クラスタへのホップカウントが含まれており, ABN はこの経路情報をもとにディスタンスベクタ型のルーティングを行う. 具体例を図 4 で示す. 図 4 では, ABN_a1 から ABN_b1 と, ABN_b4 から ABN_c1 への ABN UPDATE がクラスタ間の ABN UPDATE になる.

4.2 クラスタ内部の ABN への経路情報通知

クラスタ外部から経路情報を取得した ABN は、経路情報をネットワーク全体へ伝搬させるため、クラスタ内の ABN へ経路情報を転送しなければならない。例えば図 4 の ABN_b1 が ABN_b4 へ経路を通知しなければ、ABN_b4 と ABN_c1 はクラスタ A への経路情報を得ることができない。このため、各 ABN はクラスタ内部に向けて ABN UPDATE をフラディングする。内部向け ABN UPDATE を受け取った ABN は、宛先クラスタと次ホップの ABN に加えて、次ホップのセンサノードをルーティングテーブルに追加する。

図 4 の例では、ABN_b1 からクラスタ A への経路情報を受け取った ABN_b4 は、ルーティングテーブルの Next ABN に ABN_b1 を、Next Hop に Sen_b3 を登録している。このように ABN がクラスタ内の物理的な次ホップと、クラスタ間のルーティングの次ホップを持つことにより、ネットワークを二つのレイヤ構造に分割している。さらに、図 4 の Sen_b3 に示すように、クラスタ内部向け ABN UPDATE を受信（転送）したセンサノードは ABN と ABN への次ホップをリストに登録する。これにより、クラスタ内の ABN 間での経路が常時確立された状態になり、クラスタ間でのプロアクティブ型のルーティングが可能になる。

4.3 クエリノードの経路取得

クエリノードはクラスタにクエリを開始する際に、クラスタ内部向けの ABN UPDATE により取得した ABN のリストを参照しながら全 ABN に対して Routing Request(以下 RT REQ) を送信し、クエリ対象のクラスタへの経路の取得を試みる。RT REQ を中継するセンサノードも同様に、ABN UPDATE により取得した全 ABN のリストを参照して転送する。また、センサノードは RT REQ の送信元ノードを記録して、クエリノードへの経路を確保する。RT REQ にはクエリ周期と回数が含まれており、センサノードは、この情報をもとにクエリノードへの経路の有効期間を決定する。経路の有効期間を設定することで、使用頻度に応じた経路の確保ができ、センサノードの無駄なりソース消費を削減することができる。ABN が RT REQ を受信した場合、指定されたクラスタへの経路を保持していれば、Routing Reply (以下 RT REP) をクエリノードに送信する。

図 5 の例では、クエリノード (Qry_b4) が、全 ABN

に対して RT REQ を送信している。RT REQ を受信したセンサノード Sen_b2 は、RT REQ を中継し、クエリノード Qry_b4 への経路と有効期間を登録している。

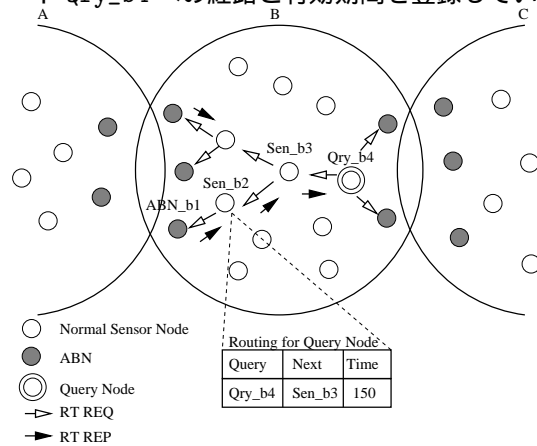


図 5: クエリノードの経路取得

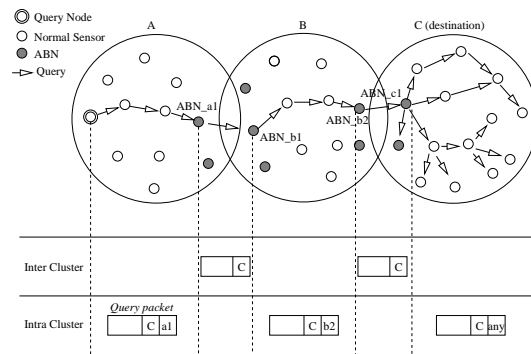


図 6: クエリの送信

5 クエリの転送

本章では、クエリノードがクラスタに対してクエリを送信する方法について説明する。

5.1 クエリの送信

RT REP を受信し、クエリ対象のクラスタへの経路を取得したクエリノードは、対象のクラスタに対してクエリを送信する。クエリパケットのヘッダの宛先フィールドには、クラスタ内とクラスタ間の転送用に二つのフィールドが用意されている。クラスタ内転送用のフィールドには、RT REP を送信した ABN のアドレスが設定されており、クエリを中継するセンサノードはこのアドレスをもとに ABN にクエリを転送する。クラスタ間転送用のフィールドにはクエリ対象のクラスタのアドレスが設定され、各 ABN はこのフィールドを参照し、クラスタ間の転送を行う。クエリ対象のクラスタに所属する ABN にクエリパケッ

トが到着すると,ABN はクラスタ内の全ノードに対してクエリパケットをフラディングする.

図 6 の例では, クラスタ A に所属するクエリノードがクラスタ C に向けてクエリを送信している. クエリノードは宛先フィールドに, ABN_a1 のアドレスとクラスタ C のアドレスを設定し, クエリを送信する. クエリを受信したクラスタ A 内のセンサノードは, 宛先フィールドの ABN_a1 のアドレスを参照し, クエリを中継する. ABN_a1 に到着したクエリは, 宛先フィールドのクラスタ C のアドレスをもとに次ホップの ABN_b1 へ転送される. ABN_b1 もクラスタ C のアドレスをもとに, 宛先フィールドのクラスタ内転送用フィールドに ABN_b2 のアドレスを設定し, クラスタ B 内のセンサノードにクエリを転送する. 同様にして ABN_b2 も ABN_c1 にクエリを転送し, 対象のクラスタにクエリが到着する.

5.2 クエリへの返答

クエリを受信した対象クラスタ内の各センサノードは, クエリパケットにより要求されたセンシング情報をクエリノードに向けて返信する. この際, 各センサノードはクエリノードが所属するクラスタへの経路を RT REQ により ABN から取得する. 各センサノードは始めに受信した ABN からの RT REP をもとにして ABN に返答パケットを送信する. このため, 対象のクラスタへの経路を持つ ABN が複数存在する場合は経路が冗長化されるため, 返答パケットが衝突する可能性が低くなる. 図 7 にクエリへの返答の例を示す.

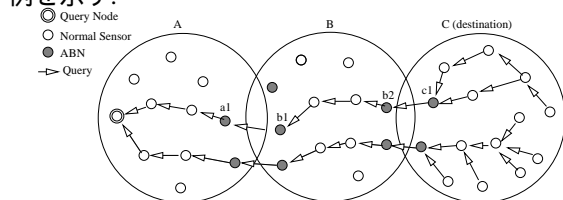


図 7: クエリへの返答

6 評価

本提案方式の動作を検証するため, 提案方式とシミュレータの実装を行った. 本章ではシミュレーション結果について述べる.

6.1 シミュレーション概要

本項では, シミュレーション環境と方法について説明する.

シミュレーション環境は, 本提案方式用に実装した離散イベント型シミュレータを用いた. 実装したシミュレータは, センサノードを指定した範囲内にランダムに配置し, 指定したプロトコルとルーティング方式を実行した後, パケット転送量とパケット到達率を出力する. シミュレーションは全センサノードの送受信を 1 ステップとして実行する. シミュレータは各センサノードの位置情報と無線到達距離から, ノード間のリンクフレームの送受信可否を判定する. また, 大規模なルーティングの検証を主目的としているため, MAC 層, トランスポート層での輻輳制御や再送方式は実装していない.

各センサの無線到達距離は微弱無線を想定し, 10m に設定した. センサノードを配置する範囲は, センサノードを格子状に配置したと仮定して, 各センサノードの無線到達エリアが隣接する. 距離を概算した. 例えば, センサノード数が 2500 個, 無線到達距離が 10m の場合は, 1000m × 1000m になる.

センサノード数は 200 ノード, 1000 ノード, 2500 ノードに設定する. クエリノードからのクエリは, シミュレータの 20 ステップ毎にクラスタに向けてクエリを実行し, 1000 ステップまで実行する. クエリノードとクラスタは, 各クエリごとにランダムに選択される.

提案方式との比較のために, フラディング方式でのシミュレーションも行う. フラディング方式を選択する理由として, Directed Diffusion [2] などのセンサネットワークに特化したルーティングで, クエリ対象のセンサノードを探索するために利用されている点あげられる.

シミュレーションは各センサノード数でのシミュレーションごとに 10 回繰り返し, 平均を算出する. 各ルーティング方式でのルーティングオーバーヘッドを調べるために, 1 ノードあたりの送出パケット数 (シミュレーション時間内での合計) を測定する. また, クエリが目的のクラスタに到達し, クラスタ内のセンサノードから応答が得られるか調べるため, クエリパケット到着率を測定する. クエリパケット到着率は, クエリノードがクエリを送信し, 宛先クラスタ内の全センサノードから返信パケットが到着する確率とする. フラディング方式においても, クラスタと同数のセンサに対してクエリを送信し到着率を測定する.

6.2 シミュレーション結果

クエリ到着率を図9に示す。図9から、フラッディング方式では、規模に関係なく高いクエリ到着率を示している。提案方式もほぼ横ばいであるが、ノード数が2500ノードでのフラッディング方式との差が大きい。本提案方式で規模によりクエリ到着率が低くなる原因は、(1) 経路情報が全クラスタに伝達されていない、(2) クラスタが分裂して孤立している、などが考えられる。このため、今後さらに規模を大きくした場合の影響や、クラスタ間での経路保持率を測定し、検証する必要があると考えられる。1ノードあたりの送出パケット数を図8に示す。図8から、フラッディング方式では、センサノード数の増加による送出パケット数の増加が大きいことが読み取れる。一方、提案方式では、フラッディング方式と比較してセンサノード数の増加がルーティングオーバーヘッドに与える影響が小さいといえる。

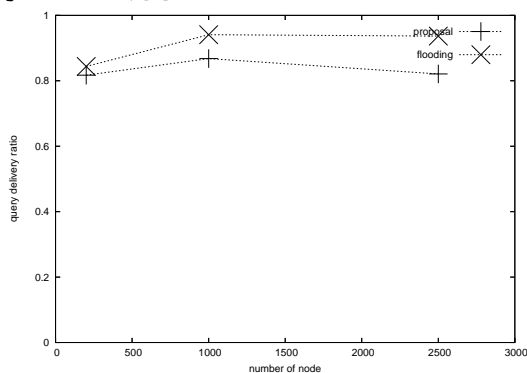


図8: query delivery ratio

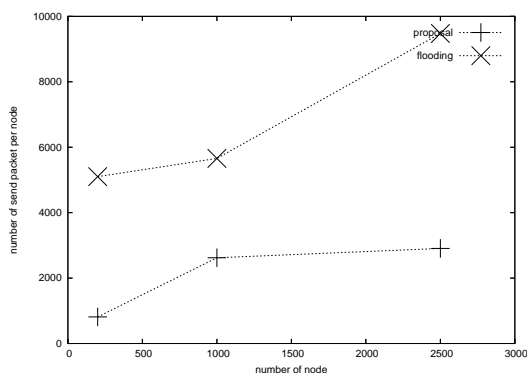


図9: number of send packet per node

7 まとめと今後の課題

本論文では、大規模なセンサネットワークにおいて、クエリノードがクラスタにたいしてクエリを効率

的に行うためのルーティング方式の提案を行った。シミュレーション結果より、提案方式での2500ノードでの動作の確認を行ったが、今後はさらに大規模な環境でのシミュレーションを行い、有効性を検証していく。また、ノードの脱落や移動が提案方式に与える影響も検証していく予定である。

参考文献

- [1] Ahmed Helmy. Capture: location-free contact-assisted power-efficient query resolution for sensor networks. In *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*.
- [2] Chalermek Intanagonwiwat, Ramesh Govindan, and Deborah Estrin. Directed diffusion: a scalable and robust communication paradigm for sensor networks. In *Mobile Computing and Networking*, pages 56–67, 2000.
- [3] Internet Engineering Task Force(IETF) Mobile Adhoc Networks(MANET) Working Grop Charter. *MANET*. <http://www.ietf.org/html.charters/manet-charter.html>.
- [4] P. Jacquet, P. Mühlethaler, T. Clausen, A. Laouiti, A. Qayyum, and L. Viennot. Optimized link state routing protocol for ad hoc networks. In *Proceedings of the 5th IEEE Multi Topic Conference (INMIC 2001)*, 2001.
- [5] David B Johnson and David A Maltz. Dynamic source routing in ad hoc wireless networks. In Imielinski and Korth, editors, *Mobile Computing*, volume 353. Kluwer Academic Publishers, 1996.
- [6] C. Perkins. Ad-hoc on-demand distance vector routing, 1997.
- [7] R. Ogier F. Templin and M. Lewis. Topology dissemination based on reverse-path forwarding (tbrpf), 2004.