

MANET Testbedの構築とその性能評価

池田 誠[†], デ マルコ ジュゼッペ^{††}, 楊 涛[†], バロリ レオナルド^{††}

[†] 福岡工業大学大学院工学研究科情報通信工学専攻 ^{††} 福岡工業大学情報工学部情報通信工学科

あらまし 本稿では、小規模な Mobile Ad-hoc Networks (MANET) を構築し、その性能評価を行った。本テストベッドでは、プロアクティブ型ルーティングプロトコルの Open Link State Routing Protocol (OLSR) を用いている。目的として、実環境からの OLSR プロトコルの影響を統計的に分析し、ネットワーク・トポロジーと OLSR のパラメータによる影響を考察する。評価パラメータとして Goodput、end-to-end の遅延時間、パケットロス、ジッタを測定した。本データからルーティングパラメータの相互作用を調査し報告する。

Performance Evaluation of a Testbed for MANET

Makoto IKEDA[†], Giuseppe DE MARCO^{††}, Tao YANG[†], and Leonard BAROLLI^{††}

[†] Graduate School of Engineering, Fukuoka Institute of Technology (FIT)

E-mail: {mgm05001, mgm05015}@ws.ipc.fit.ac.jp

^{††} Department of Information and Communication Engineering, FIT

E-mail: {demarco, barolli}@fit.ac.jp

Abstract In this work, we constructed and analyzed the performances of a small-scale Mobile Ad-hoc Networks (MANET) in indoor and outdoor scenarios. The MANET is equipped with a proactive routing protocol, namely the Open Link State Routing Protocol (OLSR). We are interested in finding strong dependences of performance metrics on system and spatial parameters, such as the topology and OLSR parameters. To this aim, the statistical analysis toolkit is unavoidable, because of the large number of factors which interact with our testbed. By means of statistical hypothesis tests, we assess the performances in terms of goodput, RTT, packet loss and jitter, which present a sort of degradation threshold as the number of hops of the connection increases.

1 はじめに

現在、様々な移動端末（ノート PC、PDA、携帯電話など）がネットワークに接続することが可能になっている。そして、人々の要求として、いつでもどこでも移動端末を利用してネットワークに接続し Web 情報などのマルチメディアサービスにアクセスするようになった。また、ネットワーク形態も多様化し既存のインフラを必要としない無線アドホックネットワークに注目が集まっている。特徴としてノード同士が直接通信できない場合でも、近隣ノードを経由（マルチホップ）することによりデータの送受信が可能である。

本稿では、我々が構築した小規模な無線アドホックネットワークの性能分析について述べる。我々の実験では olsrd¹⁾ (ver.0.4.10) を用いて実験を行う。olsrd デーモンは RFC3626²⁾ に基づいて実装されており、いくつかのプラグインを追加・実装できる。実験環境として、平坦で壁に遮られている屋内環境と、高低差のある屋外で端末を静止させて実験する。利用した端末はノート PC4 台とデスクトップ PC を

1 台用意した。本実験パラメータ設定は困難でミスを防ぐために設定ツールの作成も行った。

1.1 関連研究

これまでにいくつかのテストベッドでは特定の無線技術に焦点をあわせた開発がされている³⁾。文献⁴⁾では、4km²の領域に散らばった 37 台のノードでメッシュネットワークを構築し、その性能を評価する。ノード密度が接続性とスループットに与える影響などから、シングルホップよりもマルチホップネットワークを構築したほうが、接続性とスループットの観点から優位と述べている。文献⁵⁾では、屋外でのアドホックネットワークの性能評価を行っている。しかし、彼らの研究はリアクティブ型プロトコルの AODV と DSR に限られている。文献⁶⁾では、最も我々のテストベッド環境と近く、屋内での TCP の評価のみである。しかし、我々のテストベッドでは、屋内と屋外での環境で Real-time Video を想定したトラフィックを用いて OLSR の性能評価を行う。

2 MANET

MANET 経路制御プロトコルはプロアクティブ方式とリアクティブ方式に大別できる。プロアクティブ方式の特徴として、経路テーブルを常に管理することで、送信者からの要求に即座に答えることが可能である。しかし、常にルーティングテーブルを管理するためにトポロジー情報を知らせるための情報のやり取りが必要で、各端末の電力消費が大きい問題である。代表的プロトコルとして OLSR, Topology Broadcast Based on Reverse-Path Forwarding(TBRPF) などが考案されている。リアクティブ方式の特徴は、ネットワークに転送要求が来た時点で経路作成を開始する。非通信時には経路制御メッセージのやり取りを行わないことでパケットの削減を可能にしているが、経路を常に管理していないので通信開始時に遅延が発生する。代表的プロトコルとして、Ad-hoc On-Demand Distance Vector(AODV)、Dynamic Source Routing(DSR) が考案されている。

3 OLSR

OLSR は、Mult Point Relay(MPR) に基づいたフラッディングに特徴がある。一般的なフラッディングでは、全ての隣接ノードがフラッディングを繰り返すことでブロードキャストストームが発生する。そこで、OLSR ではあるノードがブロードキャストまたは再ブロードキャストしたパケットをそのノードが選択した MPR と呼ばれるノードのみが再ブロードキャストすることで、パケットの削減を図る。この OLSR におけるフラッディングメカニズムを MPR フラッディングと呼ぶ。MPR ノードの選定として OLSR では Willingness パラメータを用いる。Willingness は 0 ~ 7 までの値を用いる。0 の場合は MPR として選ばれることはなく、7 の場合は積極的に MPR ノードとして選ばれる。この Willingness パラメータは端末のバッテリーの残り容量により動的に変化することで、MPR から外れることによりバッテリーの消費を抑制する働きがある。また、静的に Willingness パラメータを割り当てることも可能で電源供給がある端末ではパラメータを高く設定し、バッテリーが長持ちしない場合は低く設定することでネットワーク全体の生存期間を伸ばすように考案されている。通常の Willingness パラメータは 3 である。また、OLSR では Hello メッセージとは別に Topology Control(TC) メッセージを利用してネットワーク全体のトポロジーを各ノードに伝えている。トポロジーとは、実際に存在するすべてのリ

ンクから構成するネットワークとは異なり、各ノードの MPR セレクタ集合から構築されるトポロジーであるため、管理するリンク数は実際のリンク数よりも非常に少ない。我々が用いた OLSR は、RFC に対応したヒューリスティックな MPR ノード選定を行う。全てのノードは最短経路を単純な Dijkstra アルゴリズムで決定する。この手法で最短経路を求めるのはパケット誤り率の観点から見て得策とは考えにくい。そこで、OLSRd では Link Quality(LQ) の拡張を行っている。これは、パケット誤り率の平均をメトリックとした最短経路アルゴリズムである。これを一般的に Expected Transmission Rate(ETX) と呼び、 $ETX(i) = 1/(NI(i) \times LQI(i))$ と定義する。NI(i) は自ノードのパケット誤り率、LQI(i) は隣接ノードのパケット誤り率を表す。低いパケット誤り率ほど ETX は高い値となり良い経路となる。文献⁸⁾ では、LQ の拡張によりパケット配送率が非常に高まったと報告している。

4 テストベッドの仕様

我々の Testbed では 4 台のノート PC と 1 台の Gateway(GW) PC で構成した。Operation System(OS) は Fedora Core 4(FC4) で kernel 2.6 上でシステムを構築している。各 PC には LinkSys 社の USB 接続で小型アンテナを搭載している無線アダプタ (IEEE802.11b/g 対応) を利用する⁹⁾。各端末の詳細を表 1 に示す。GW にはインターネットと接続するための DNS サーバとルータ機能を稼働させる。GW ではすべての測定をするためのスクリプトを実行を行う。また、グラフィカルツールを利用し、ネットワークの接続性について検証することを可能にした。我々のテストベッド環境にはバックグラウンドで 1 つ同じ周波数チャネルを利用する無線アクセスポイントがキャンパス内にある¹⁾。

4.1 定義

一般的に測定データは制御可能なパラメータの正しいサブセットを選択することが重要となる。統計的用語で、固定されたパラメータの部分集合を、因子と呼び処理群 (Treatment) を 3 つの因子によって定義する。

(Prot.[UDP|TCP], Topo.[LT|MT], Scenario[O, I])

Protocol は UDP, TCP のどちらかを選択する。データリンク層と TCP の両パラメータは変更しない、kernel のデフォルト値である²⁾。Topology は Linear

¹⁾ Linux Driver が Ad-hoc モードの場合、チャネル変更できないバグがあった。

²⁾ RTS/CTS はデフォルト (kernel 2.6)、TCP-Reno ベース

表 1 テストベッド環境

PC Address	OS (kernel)/RAM	NIC(802.11g)	Chipset	Linux Driver
.1 (GW)	FC4 (2.6.17-1.2139)/1024G	WUSB54Gv4 (ext. antenna)	Ralink RT2500	rt2570
.2	FC4 (2.6.16.2115)/768M	WUSB54Gv4 (ext. antenna)	Ralink RT2500	rt2570
.3 .4 .5	FC4 (2.6.16.2142)/768M	WUSB54Gv4 (ext. antenna)	Ralink RT2500	rt2570

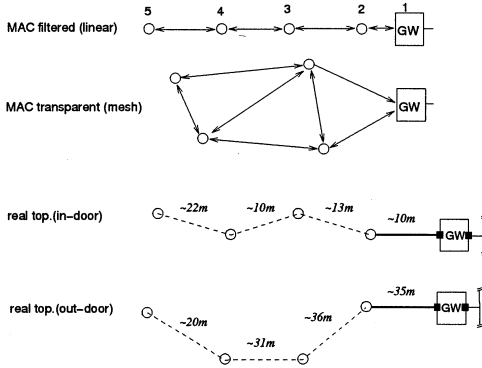


図 1 テストベッドの物理的モデル

Topology(LT)とMesh Topology(MT)で構成する。OLSRのメカニズムから見て、LTは最も安定しないトポロジーである。ノードが数珠つなぎに繋がりが構成するので片方のリンクが非対称になるとOLSRはそのリンクを利用しないので、繋がるノードは孤立することになる。特にLTではMPRの選択にも影響し、 $n-2$ のMPRを選択する。このLTでのMPR選択とその振舞いにおいて、伝搬リンクの変動を測定する。LTはMACフィルタリングを利用する。MTはMACフィルタリングを利用せず電波の届く範囲でのリンクを形成する。このリンク形態を図1に示す。Scenarioの“O”, “I”は“Outdoor”と“Indoor”の略と表現する。表2にUDPとTCPの2つに基づいたグループ分けを行う。両シナリオとも4つ(受信側のGoodput(G)、Round Trip Time(RTT)、end-to-end Packet Loss(P_L)、そしてJitter(J))のデータを収集する。今回収集したデータのRTTは受信側で測定したため正しい値が得られなかった。そこで、RTTの値は受信側でデータを収集したときのデータを載せている。これらのデータ収集にD-ITG¹⁰⁾を利用する。測定データはすべてGWから192.x.x.{2-5}までパケットを送信する。統計的検定を行うため各データとも50のサンプルを収集する。測定時のその他のパラメータを表3に示す。

表 2 Treatmentsと各グループの検定結果

T	factors	intra-T. α -values
A	UDP, I, LT	(0.00, 0.00, 0.00, 0.00)
B	UDP, I, MT	(0.00, 0.00, 0.00, 0.12)
C	UDP, O, LT	(0.00, 0.00, 0.00, 0.00)
D	UDP, O, MT	(0.01, 0.00, 0.00, 0.01)
E	TCP, I, LT	(0.00, 0.00, 0.00)
F	TCP, I, MT	(0.06, 0.00, 0.00)
G	TCP, O, LT	(0.00, 0.00, 0.00)
H	TCP, O, MT	(0.00, 0.00, 0.00)

5 分析

データ分析手法としてANOVA(ANalysis Of Variances)¹¹⁾が考案されている。ANOVAは複数の母集団を比較し、その平均値が等しいという仮定を検定する。この方法の前提条件として、それぞれの母集団の平均値が正規分布に従うことである。しかし、我々のテストベッドではサンプル数は一定ではない。これは、接続途中で予想外なエラーが起きたのが起因している。そこで、我々が用いた分析はノンパラメトリック法の、サンプルの正規分布性を気にせず一変数、または一変数の3つ以上のグループ差を検定するKruskal-Wallis(KW)検定を行った。KW検定は他のノンパラメトリック法がそうであるように平均値は使わず、中央値(median)を用いる。KW検定は信頼区間を、 α を用いてサンプルの中央値を得る。一般的に外れ値 $\alpha=0.05$ である。収集したTreatmentの中央値は、 $(\hat{G}, \hat{RTT}, \hat{J}, \hat{P}_L)$ と表現し、2種類のグループに分類する。TCPの場合は P_L はいつも0なので省略する。分析結果としてグループ内のKW検定を“intra Treatment test”とし表2に結果を示す。また、ホップ距離に関する分析も行う。

6 実験結果と考察

分布の違いを箱髭図(box plot)を用いて比較し、UDPの結果は図2~5に、TCPの結果は図6~8に示す。箱髭図はデータを昇順に並び替え四分割にし、下辺が第1四分位点(Q_1)、箱の中の線が第2四分位点(中央値)、上辺が第3四分位点(Q_3)を表し、箱から上下に伸びている髭は箱の高さ(四分位範囲)

表3 その他の設定値

Send Rate (pps)	122
Paket Size (bytes)	512
Inter-departure Time (ms)	10000
Number of Trials	50
Sampling Window (ms)	500
Link Quality Window Size	10

の1.5倍以内にあるデータの最大値、最小値を表している。実験結果を表4に示す。有意水準 α からTreatment(T)の信頼度を測る。UDPの結果を見ると屋外の場合、4(1→5)との接続は性能の低下が見られる。屋内の場合は距離がさほど離れていなかったのが起因し、さほど性能低下はみられないが、図2と4のグループCとDから、LTとMTでのトポロジーの違いによる特性が分かる。LTの場合はホップ数が4以上になると、 G は約39%も低下している。しかし、MTの場合はLTと比較して G の値は距離が遠い場合でも性能劣化は見られない。屋内の場合では距離(ホップ数が大きい)が遠いほど各値とも損失が大きい。これは、経路上の隣接端末間が離れている場合、パケット損失率が高くなるリンクを経路として選択し、その経路のスループット低下の問題となっている。一般的にこの原因として通信グレイゾーン問題の一種で特定プロトコルがデータリンク層を仮定していないため、通信グレイゾーン問題に対応していないことを示している。今後、この問題を解決するために802.11gの基本伝送速度を高くする必要がある。また、図6~8のグループGでは各メトリックとも非常に分散した結果になっている。ホップ数が増えた場合、途中のリンクが非対称になりパケット破棄が起こったと推測する。これは、屋外でのLTとトポロジーの短所でもあるが、UDPの場合と比べるとTCPのメカニズム¹²⁾が起因していると考えられる。この結果から、全体的にみて屋外での192.x.x.4までの分布はばらつきがある。これはMTの場合、GWから直接通信できる距離ではないのでマルチホップを行うが経路が複数(1-2-3-4, 1-2-4)あり、LQは常に変化するのでOLSRの性能が低下していると考えられる。KW検定の結果、 α 値から、1、2、4の母代表値に差があることを示している。

7 むすび

本稿では、小規模な無線アドホックネットワークの実験データの分析をした。今回このテストベッド

の調査によりホップカウント値によるネットワークの性能劣化が起因していると考えられる。また、我々は今後、MAC層のパラメータとTCPのWindow Sizeによる評価を続ける予定である。そして、各リンク形態に適応的なOLSRのパラメータを調査していく。また、利用した端末もノートPCとデスクトップPCと多様性がなかったためPDAやアクセスポイントを用意した規模を拡大するテストベッド環境で移動端末も考慮した調査が必要である。

参考文献

- 1) A. Tønnesen, olsrd: Implementation Code of The OLSR, <http://www.olsr.org/>.
- 2) T. Clausen and P. Jacquet, Optimized Link State Routing Protocol, IETF RFC3626, Oct. 2003.
- 3) W. Kiess and M. Mauve, A Survey on Real-World Implementations of Mobile Ad-Hoc Networks, *Elsevier's Ad Hoc Networks*, 5(3), pp. 324-339, Apr. 2007.
- 4) J. Bicket, D. Aguayo, S. Biswas, and R. Morris, Architecture and Evaluation of an Unplanned 802.11b Mesh Network, *In Proc. of ACM MobiCom'05*, pp. 31-42, Aug. 2005.
- 5) D. A. Maltz, J. Broach, and D. J. Johnson, Lessons from a Full-scale Multihop Wireless Ad-hoc Network Testbed, *IEEE Personal Communications*, 8(1), pp. 8-15, Feb. 2001.
- 6) V. Kawadia and P. R. Kumar, Experimental Investigations into TCP Performance Over Wireless Multihop Networks, *In Proc. of ACM SIGCOMM Workshop (E-WIND-2005)*, pp. 29-34, NY USA, 2005.
- 7) L. Christensen, T. H. Clausen, G. Hansen and G. Behrmann, The Optimized Link State Routing Protocol, Evaluation Through Experiments and Simulation, *In Proc. of IEEE Symposium on Wireless Personal Mobile Communications*, pp. 841-846, Sep. 2001.
- 8) D. S. J. De Couto, D. Aguayo, J. Bicket, and R. Morris, A High-throughput Path Metric for Multi-hop Wireless Routing, *In Proc. of ACM MobiCom'03*, pp. 134-146, Sep. 2003.
- 9) The Rt2x00Wiki Open Source Project, <http://rt2x00.serialmonkey.com/>.
- 10) D-ITG: Distributed Internet Traffic Generator, <http://www.grid.unina.it/software/ITG/>.
- 11) A. M. Mood, F. A. Graybill and D. C. Boes, *Introduction to the Theory of Statistics*, McGraw-Hill Companies, Apr. 1974.
- 12) N. Cardwell, S. Savage, and T. Anderson, Modeling TCP Latency, *In Proc. of IEEE INFOCOM'05*, pp. 1742-1751, Mar. 2000.

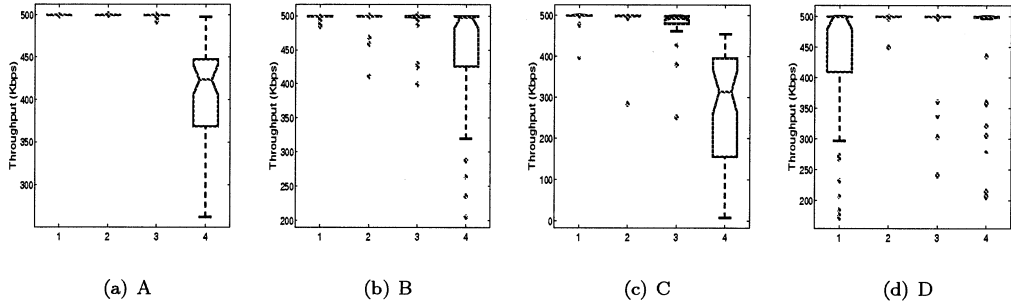


图 2 Goodput for UDP

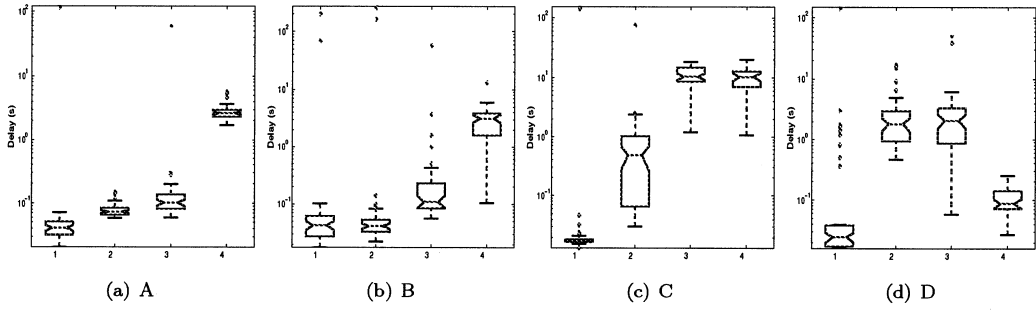


图 3 Round-trip time for UDP

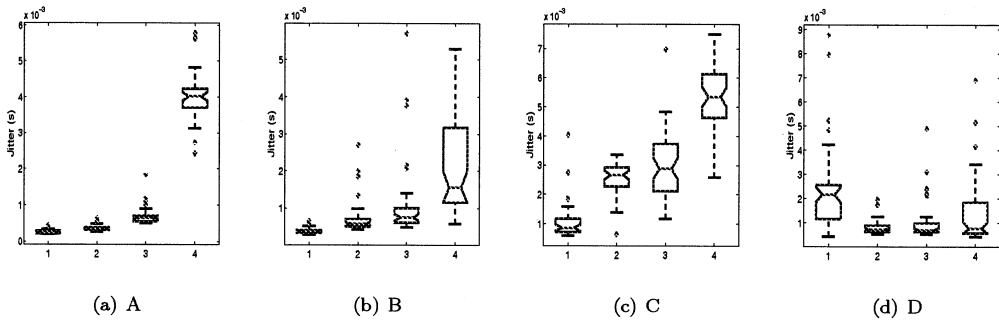


图 4 Jitter for UDP

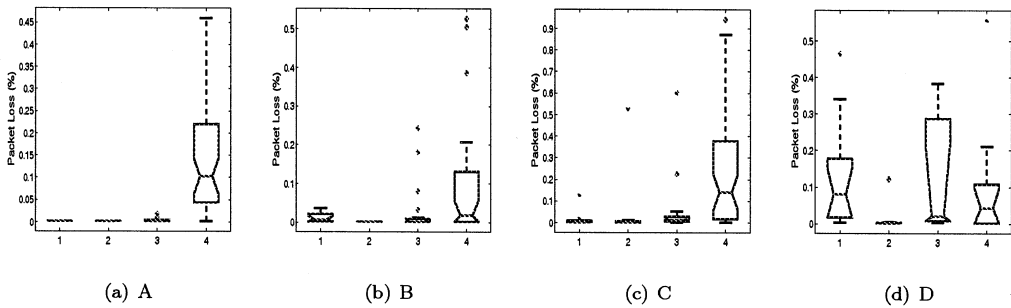


图 5 Packet loss for UDP

表 4 KW 検定の結果 - UDP (\widehat{G} , \widehat{RTT} , $\widehat{J} \times 10^{-3}$, \widehat{P}_L) - TCP (\widehat{G} , \widehat{RTT} , $\widehat{J} \times 10^{-3}$)

T	1 (1 → 2)	2 (1 → 3)	3 (1 → 4)	4 (1 → 5)
A	(499.712, 0.041, 0.238, 0.002)	(499.712, 0.07, 0.338, 0.002)	(499.712, 0.101, 0.638, 0.003)	(442.174, 2.647, 4.017, 0.102)
B	(499.712, 0.042, 0.381, 0.006)	(499.712, 0.041, 0.58, 0.002)	(499.213, 0.108, 0.753, 0.002)	(497.824, 3.152, 1.577, 0.017)
C	(499.712, 0.017, 0.862, 0.002)	(499.452, 0.477, 2.658, 0.002)	(493.275, 10.34, 2.883, 0.012)	(314.237, 10.29, 5.346, 0.140)
D	(498.712, 0.024, 2.158, 0.081)	(499.712, 1.839, 0.721, 0.002)	(499.712, 2.086, 0.697, 0.020)	(499.712, 0.087, 0.767, 0.043)
α	(0.00, 0.00, 0.00, 0.00)	(0.00, 0.00, 0.00, 0.49)	(0.00, 0.00, 0.00, 0.00)	(0.00, 0.00, 0.00, 0.02)
E	(499.712, 0.046, 0.226)	(499.712, 0.057, 0.405)	(499.712, 0.080, 0.948)	(499.712, 0.105, 3.661)
F	(499.712, 0.046, 0.306)	(499.712, 0.057, 0.370)	(499.712, 0.115, 0.489)	(499.712, 0.105, 1.279)
G	(499.712, 0.025, 0.678)	(336.914, 0.060, 2.183)	(179.076, 0.084, 3.088)	(241.934, 0.638, 3.251)
H	(499.712, 0.044, 0.46)	(482.859, 0.073, 1.737)	(499.712, 1.60, 0.795)	(499.712, 0.110, 1.342)
α	(0.04, 0.00, 0.00)	(0.00, 0.00, 0.00)	(0.00, 0.00, 0.00)	(0.00, 0.00, 0.00)

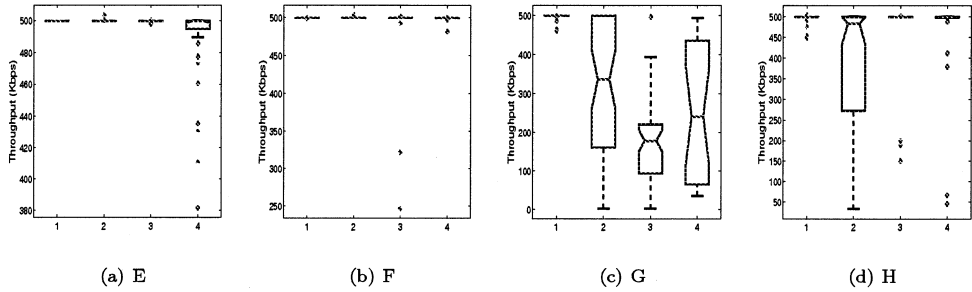


図 6 Goodput for TCP

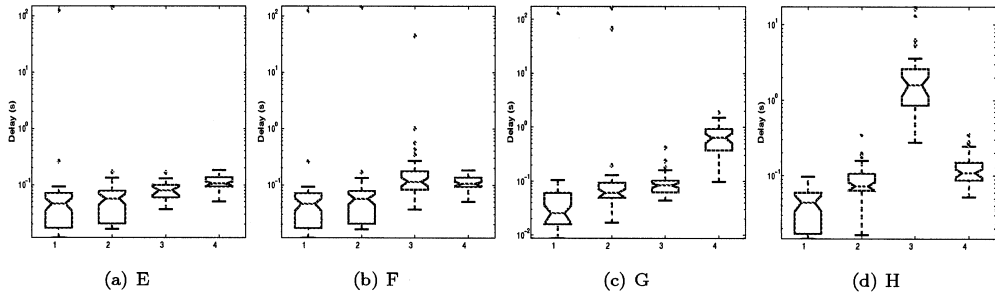


図 7 Round-trip time for TCP

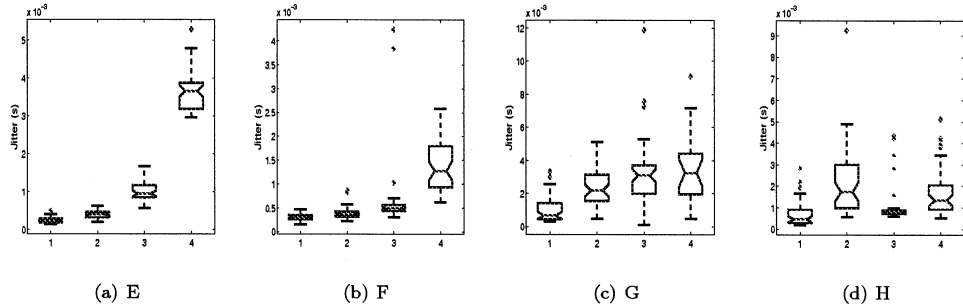


図 8 Jitter for TCP