

地下街における無線 LAN アドホックネットワークシステムの性能評価実験

沖野 正宗[†] 加藤 聰彦[†] 伊藤 秀一[†]

近年の無線通信技術の発展により、アドホックネットワークに関する研究が注目されている。アドホックネットワークの技術を実際のネットワーク上で用いるために多くの研究が行われている。しかし、それらの研究の多くは、シミュレーションによる評価実験や、数学的な解析を用いた評価を行っている。また、実際のアドホックネットワークを用いた性能評価を行っている研究では、固定ビットレート通信を用いたものが多く、物理レベル、MAC レベル、TCP レベルのように複数のレイヤ間の動作を考慮するものではない。そこで筆者らは、信頼性のあるデータ転送を対象として、複数のレイヤ間の動作を考慮した無線 LAN アドホックシステムの性能評価実験を行った。具体的には地下街においてアドホック通信実験を行い、物理レベルの性能としては受信電波強度を、MAC レベルの性能としては 802.11 における再送を、TCP レベルの性能としては TCP の再送と輻輳制御を用いて、結果の解析を行った。本稿ではこれらの実験の詳細について述べる。

Performance Evaluation Experiments of Wireless LAN Based Ad hoc Network in Underground Shopping Center

Masamune Okino[†] Toshihiko Kato[†] Shuichi Itoh[†]

Resulting from the recent development of wireless communication technologies, ad hoc networks are being studied actively. There are a lot of researches to use ad hoc networks on an actual network. However, most researchers focus on analysis that uses simulation software or a mathematical approach. Accordingly, it is necessary to investigate how the communicating nodes behave in actual ad hoc networks by analyzing the details of the communication. In this paper, we show the results performance evaluation experiments of wireless LAN based ad hoc network. We performed this experiment under the underground city environment, the underground shopping center at Tokyo station, specifically. This paper describes the results of these experiments.

1. はじめに

近年の無線通信技術の発展により、アドホックネットワークに関する研究が注目されている。アドホックネットワークでは、その場に集まった端末間が無線インターフェースを用いて簡易にネットワークを構築することが可能となる[1]。また、アドホックルーティングプロトコル[2,3]を用いることによって、直接無線通

信できない端末間の通信も、他の端末がルータとして動作し、パケットを中継するマルチホップ通信が行われる。このため、アドホックネットワークの適用例として、センサーネットワークや、災害時ネットワーク等通信インフラが存在しない場合のネットワーク構築が考えられている。

一方、アドホックネットワークの性能評価においては、多くの研究が、ソフトウェアシミュレータや数学的な解析による評価を行ってい

[†] 電気通信大学 大学院 情報システム学研究所

[†] University of Electro-Communications

る[4,5]。[4]では高密度なアドホックネットワークに適した AODV ルーティングプロトコルを提案し、ネットワークシミュレータ ns2 によりその性能評価を行っている。[5]は、アドホックネットワーク上での TCP 通信の理論的解析を行っており、その解析結果を ns2 による結果と比較することで有効性を示している。また、無線 LAN アドホックネットワークにおける実際の通信の性能評価を行った結果についても報告されている[6,7]。[6]は IEEE 802.11b 無線 LAN のアドホックモード通信によるリアルタイムアプリケーション実験を行い、RTT と端末間の距離の関係について調査し、また受信電波強度(RSS)が RTT にどのような影響を与えるかについても解析している。[7]では、大規模な無線アドホックテストベッドネットワークを構築し、通信実験を行うことで信号対雑音比(SNR)、パケット到達率、経路変更数、スループットなどを測定している。

アドホックネットワーク上でも、信頼性のあるデータ転送を保証する TCP が広く使用される。無線 LAN アドホックネットワークでは無線リンク上でのフレームロスにより MAC レベルの再送が発生し、さらに MAC レベルのリトライアウトにより TCP レベルの再送が発生し、これにより TCP のスループットを低下させる。また、無線リンク上でのフレームロスは物理レベルの RSS や SNR といった性能に大きく関係すると考えられる。しかし、上で示した研究は TCP の性能や、物理レベル、MAC レベル、TCP レベルの各動作を詳細に解析していない。

このような背景から、筆者らは IEEE 802.11 無線 LAN ベースのアドホックネットワーク上で信頼性のあるデータ転送を保証する TCP を用いて通信実験を行い、物理レベル、MAC レベル、TCP レベルの性能を測定した。物理レベルの性能パラメータとして、無線 LAN インターフェースにより各受信フレームで測定可能な RSS を用いることとした。また、MAC レベルの性能を測定するために、データフレームと ACK フレームの送受信をモニタリングする

ことにより、802.11 の再送処理について解析することとした。そして、TCP レベルの性能パラメータとしては、TCP のデータセグメントと ACK セグメントの送受信をモニタリングすることにより、TCP レベルの再送処理と輻輳制御の処理を解析することとした。

ネットワーク環境としては、既存の携帯電話ネットワークが使用できない場合が考えられる地下街を想定することとした。具体的には、東京駅の丸の内地下街を中心とした地域を用いて実験を行った。ここでは、直線的な通路、曲がり角のある通路、広場など様々な状況が存在する。実験の内容としては、無線 LAN による直接通信実験とマルチホップ通信実験を行った。本稿では性能評価実験の詳細な結果について報告する。本稿の構成は以下の通りである。まず、第 2 章で実験の概要について示し、第 3 章で実験の詳細な解析結果について述べる。最後に第 4 章で結論を述べる。

2. 実験概要

本実験の目的は以下の通りである。

- 2つの端末が直接無線 LAN 通信を行った際の、端末間の距離と通信性能の関係について解析すること
- 送信端末と受信端末の間に中継端末を設置しマルチホップ通信をした際の、距離またはホップ数と通信性能の関係について解析すること

我々は図 1 に示されるような無線通信システムを用いた。このシステムは Linux と無線 LAN カードが搭載されたノート PC によって構成されている。各端末は物理レイヤとデータリンクレイヤとして無線 LAN を用い、無線 LAN 上で TCP/IP が実装される。また、我々は無線 LAN プロトコルとして IEEE 802.11b を用い、転送速度を 11Mbps に固定するように設定した。アドホックルーティングプロトコルとしては、IETF で最も研究が盛んに行われている AODV ルーティングプロトコルを用いた。AODV の実装にはスウェーデンの Uppsala 大学で開発された AODV-UU [8]と呼ばれるソフトウェア

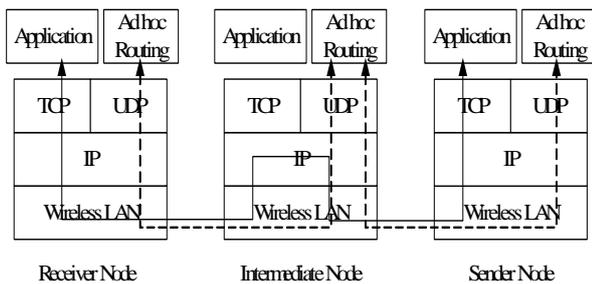


図 1. 無線 LAN システムのプロトコル構造

無線 LAN 通信の解析のために、筆者らはモニタリングシステム `ethereal` [9]を使用した。`ethereal` を用いることによって、無線 LAN フレームをキャプチャすることができ、その受信フレームの RSS 値を得ることが可能となる。さらに、そのキャプチャしたファイルをもとに、筆者らが開発した解析システム[10]によって MAC レベルと TCP レベルの解析を行った。これらのシステムを用いることによって、物理レ

ベル、MAC レベル、TCP レベルで以下の特性を得ることができる。

- 各フレームの RSS
- ファイル転送において、どの程度 MAC レベルの再送が発生したかというヒストグラム
- 各フレームに対する MAC レベルの再送回数の 1 秒間の平均値 (以下、MAC 再送率とよぶ)
- 時間に対する TCP シーケンス番号の変化
- セグメント毎の TCP の再送回数とその合計数

以下のような状況で実験を行った。

- RTS/CTS による仮想キャリアセンスは用いないこととする。
- 使用した無線 LAN カードにより各フレームに対する最大再送回数は 4 回である。
- 地下街の人の流れによる電波の遮蔽を防ぐために、ノート PC の高さは約 2 メートルの高さに設置することとする。
- RSS 測定とフレームのキャプチャリングを行うモニタリングシステムは受信端末のすぐ隣に設置する。このためモニタリングシステムでは、RSS の測定に関しては、データセグメントを含む MAC データフレームに対する測定のみが可能となる。

3. 実験結果

3.1 直接通信による実験結果

図 2 は直接通信実験における端末の配置を示す。直接通信を行う一方の端末を位置 A に設置し、もう一方の端末を位置 B から J に配置した。このような状況で、位置 A にある端末から、位置 B から J のそれぞれの場所へ通信可能であるかを調べ、もし通信可能であればその通信性能を測定した。位置 B にある端末は位置 A のある広場に設置した。位置 C と D にある端末はその広場から右の通路に沿って設置した。位置 E、F、G、H にある端末は、その通路に繋がっているもう一つの広場内に設置した。また、位置 I と J は位置 A からは直接見えない場所に設置した。さらに、位置 J の端末は位置 I のすぐ隣にある階段を登った場所に設置した。

まず、位置 A と B にある端末間のデータ転送実験を行った。位置 A と B の間の距離は約 60 メートルである。これらの端末間ではお互いに見通すことが可能であった。実験の結果、FTP によるスループットは 5.0Mbps であった。この通信はとても安定していると考えられる。

次に、位置 A と C にある端末間によるデータ転送の実験を行った。位置 A と C の距離は約 110 メートルである。これらの端末間の見通しはよく、お互いが見える位置にある。FTP に

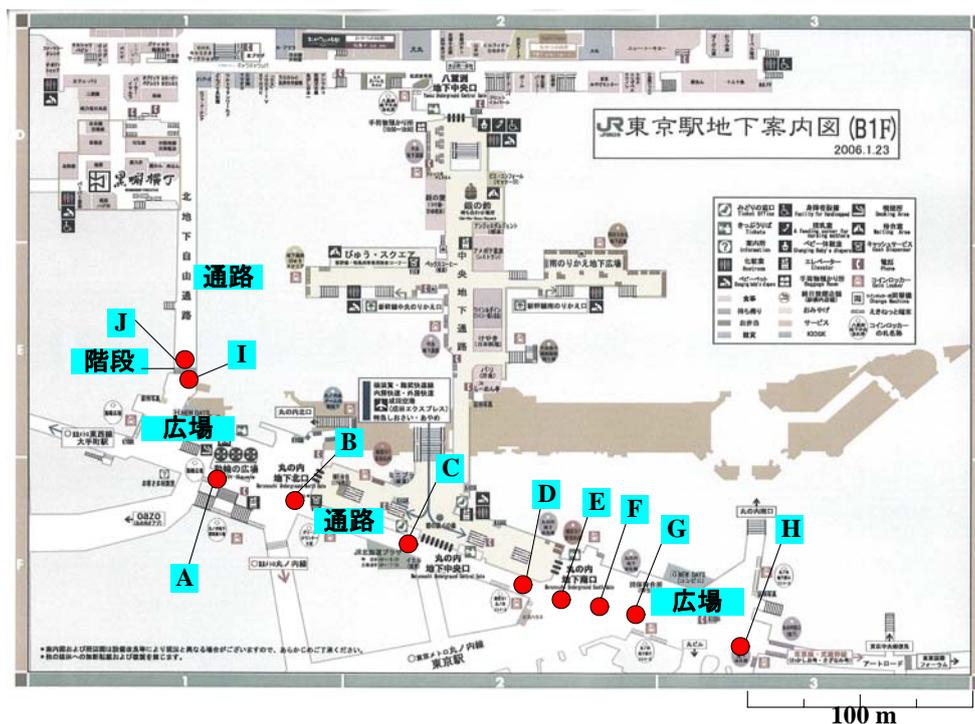


図 2. 直接通信の場合の端末配置

よるスループットは 4.6Mbps であった。詳細な解析結果を図 3 と 4 に示す。これらの結果は、上記の MAC レベルと TCP レベルの処理を解析するシステムによって得られている。図 3 は時間に対する TCP シーケンス番号と MAC 再送率を示している。図の折れ線グラフは送信側の TCP シーケンス番号を示しており（左の目盛）、TCP の再送箇所を「x」で示している。

また図の棒グラフは、MAC 再送率を示している（右の目盛）。上述のように MAC 再送率とは、1つのデータフレームが受信端末から ACK されるまでに送信端末によって再送されるフレーム数の 1 秒間の平均値である。図 3 から、TCP の再送がわずかに発生しているだけで、TCP のシーケンス番号も順調に増加していることがわかる。また、図 3 の 5 秒付近に存在す

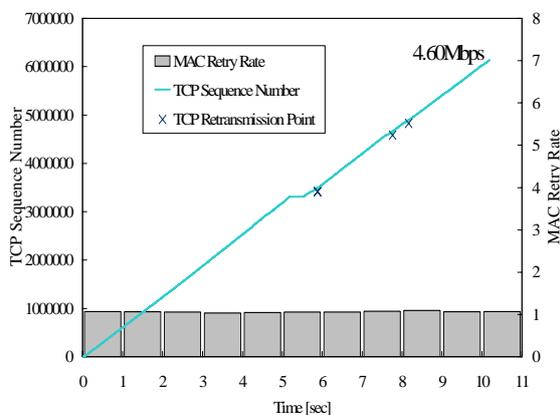


図 3. A と C の間の時間に対する TCP シーケンス番号と MAC 再送率

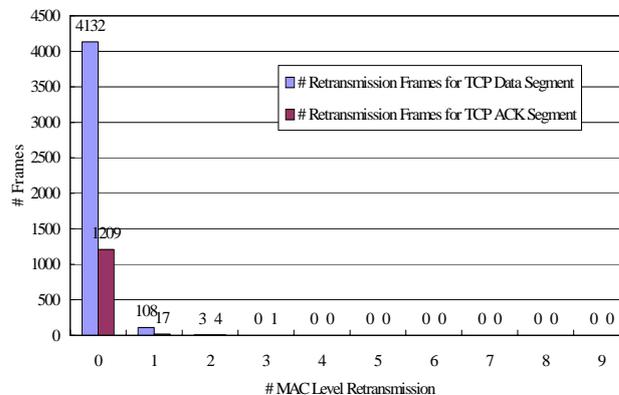


図 4. A と C の間の MAC レベルの再送回数

る約 300msec の無通信区間では、TCP の再送は発生していなかった。この区間では、受信端末が何らかの原因で受信ソケットバッファを読み込めなかったために、受信端末の送信する ACK セグメントの広告ウィンドウサイズが小さくなり、それを受信した送信端末ではデータセグメントを送信できなくなっていた。それから 300msec 後に受信端末から広告ウィンドウサイズをオープンする ACK セグメントが送信され、データセグメントの送信が再開されたことがわかった。また図より、MAC 再送率はほぼ 1 であり、これは FTP 転送によってほぼ全てのフレームが MAC レベルの再送なしに転送できたことを意味する。図 4 は、MAC レベルの再送回数に対するオリジナルフレームの数のヒストグラムを示している。この図から、データセグメントに対して、一度だけ再送されたフレームは 108 個存在し、2 度再送されたフレームは 3 個存在する、また 3 度以上再送されたフレームは一つも存在しないことがわかる。これは、わずかながら MAC レベルの再送は存在している、ということも示している。また、図 4 より MAC リトライアウトが一度も発生していないにもかかわらず、図 3 では 3 度の TCP 再転送が発生していることに注意する必要がある。我々の実験では、キャプチャの際のフレームの取りこぼしによって、測定エラーが発生することが確認されている。

その後通信端末間の距離を延ばした。つまり、位置 A にある端末を固定し、もう一つの端末の位置を D、E、F、G、H と変えた。位置 A にある端末からの距離はそれぞれ、150、160、180、200、240 メートルである。図 5 と 6 は位置 A と G にある端末間によるデータ転送実験の詳細な結果である。端末間の距離は 200 メートルである。2 つの端末はお互いに直接見ることが可能な位置に設置してある。FTP によるスループットは 1.17Mbps である。図 5 の結果から、最初の 15 秒間は TCP の再転送が多く発生し、データ転送が開始していないことがわかる。その後の 15 秒から 40 秒の間で、いくつか TCP

の再転送が発生するものの、6MByte のデータが送られていることがわかる。また、図 5 の棒グラフと図 6 の結果から、先程の A と C の結果に比べて、MAC レベルの再送回数が増加していることがわかる。この場合、3570 フレームが MAC レベルの再送なしで送られている。435 フレームが一度だけ再送をしている。また、190 フレームが 2 度、104 フレームが 3 度再送されており、78 フレームが 4 度再送されており、そのうちのいくつかはリトライアウトしている。これらより、全フレームの 80 パーセント以上が MAC レベルと TCP レベルの再送なしで転送可能だったことがわかる。しかし、それ以外のフレームが、特に MAC リトライアウト

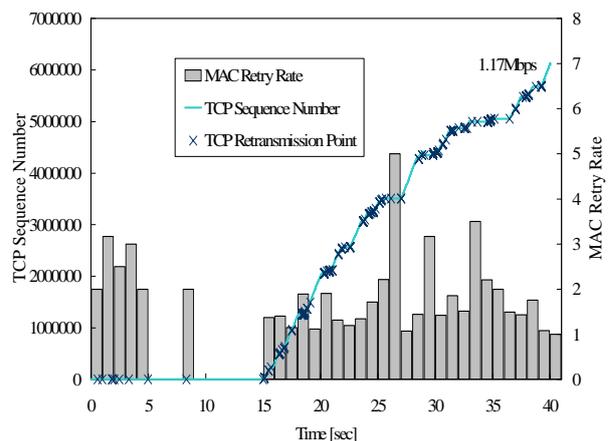


図 5. A と G の間の時間に対する TCP シーケンス番号と MAC 再送率

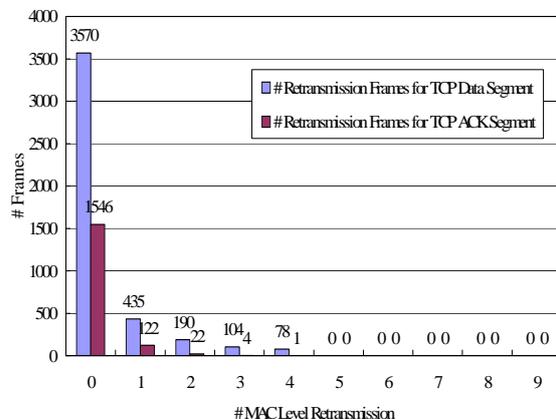


図 6. A と G の間の MAC レベルの再送回数

トしたフレームが TCP スループットに大きな影響を与えていると考えられる。さらに、上述のように、最初の 15 秒間にバースト的なエラー期間が継続して発生しており、そのため TCP のタイムアウト再送が多く発生し、しかも再送間隔が指数関数的に発生するため、これが全体的なスループットの低下に影響を与えている。

図 7 と 8 は通信端末を位置 A と位置 B から G に設置した場合の実験結果をまとめて示したものである。今回の実験により、TCP スループット、MAC レベルの再送、TCP レベルの再送、RSS 値を測定することができた。このうち、図 7 は距離に対する TCP スループットと MAC 再送率を示している。折れ線グラフは TCP スループットを表しており（左の目盛）、棒グラフはデータセグメントを転送する MAC フレームに対する MAC 再送率（右の目盛）を示している。図 8 はファイル転送の間に転送されるデータセグメントの総数に対する、再転送されたデータセグメントの割合を示している（この値を以下 TCP 再送率とよぶ）。また、図 8 はファイル転送の間に送信されたデータセグメントを転送する MAC フレームの RSS 値の平均と標準偏差も示している。図 8 は、端末間の距離に対するそれらの値をプロットしている。折れ線グラフが RSS に対応しており（左の目盛）、棒グラフが TCP 再送率に対応している（右の目盛）。

図より端末間の距離が 160 メートルのとき（A と E）と、180 メートルのとき（A と F）で大きな性能の違いが見られる。端末間の距離が 180 メートルになると、スループットは突然減少している。端末間の距離が 160 メートルまでは MAC 再送率はほぼ 1 である、つまりそれまでは MAC レベルの再転送がほとんどなかったということがわかる。しかし、距離が 180 メートルを超えると、MAC 再送率は約 2 になる。これは、平均するとほぼ全てのフレームで一回再送が行われたと同じことである。この結果として、無線リンクの帯域は実際の半分減少することになる。これによりスループットは半分

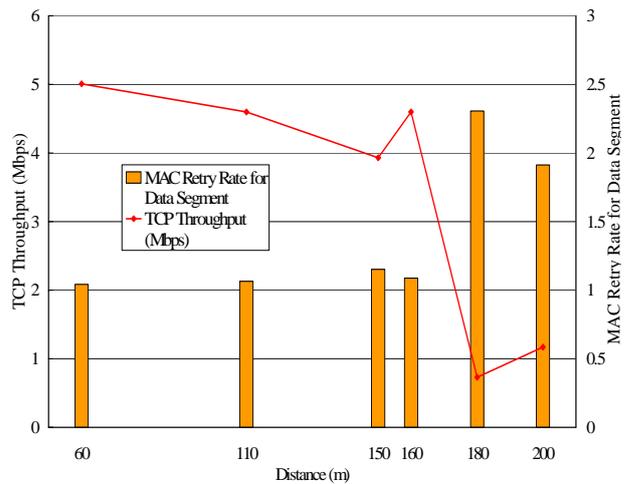


図 7. 端末間の距離に対する TCP スループットと MAC 再送率

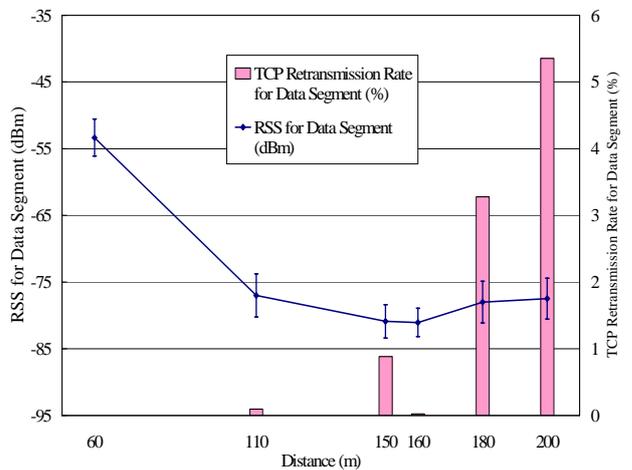


図 8. 端末間の距離に対する 受信データの RSS と TCP 再送率

になる。さらに端末間の距離を 180 メートル以上にしたときには、MAC レベルの再送数の増加により、TCP レベルの再送が増加している。160 メートル以内のときは、TCP 再送率は 1 パーセント以下であるが、180 メートル以上ではその値は 3 パーセント以上に大きくなっていることがわかる。さらに、TCP レベルの再送の増加によって TCP スループットが減少している。一方で、RSS 値は端末間の距離が大きくなっても、それらのパラメータ値はあまり変化しない。RSS の平均値は、端末間の距離が 60 メートルより大きくなったときに減少しているものの、それ以降はほぼ同じ値を示している。

これは、RSS 値は直接的には MAC レベルのデータ転送の性能には影響を与えていないということがわかる。

位置 H は位置 A の広場とは別の広場の端に位置しその間は通路で連結されている。A と H の距離は 240 メートルで、H から A は見ることができない距離にあった。このとき、FTP によるファイルデータの転送は不可能であった。

次に、端末を位置 A と位置 I、J に置いた場合の実験を行った。A と I の間の距離は約 40 メートルであったが、その間には店舗が幾つか並んでおり、直接お互いを見ることができなかった。A と I の間の FTP スループットは 3.5Mbps であった。図 9 は時間に対する TCP シーケンス番号と MAC レベルの再送率を示す。幾つかの TCP の高速再転送とタイムアウト再送が発生していることがわかる。それらの再送によって TCP スループットが減少している。

一方で、位置 J の端末は位置 I から階段を登ったところに設置してある。位置 J にある端末は位置 A にある端末と通信することができなかった。これは、曲がり角や階段により通信状

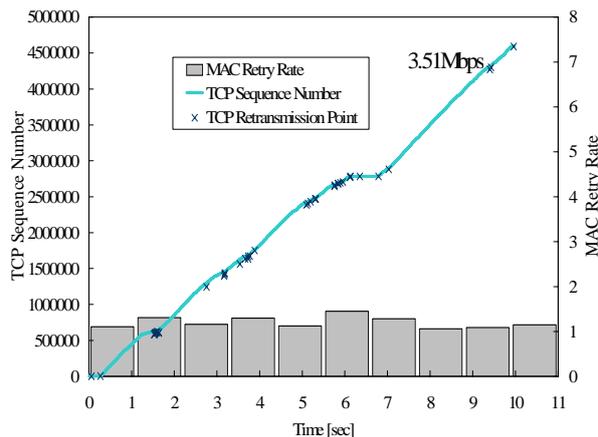


図 9. A と I の間の時間に対する TCP シーケンス番号と MAC 再送率

況が悪くなったと考えられる。

3. 2 マルチホップ通信による実験結果

マルチホップ通信の評価をするために、図 10 に示した箇所に設置した複数の端末を使って実験を行った。一つの端末を図 10 中の右側の広場内の位置 A に設置する。図 10 の位置 B は図 2 の位置 A と同じ場所である。また、左側の広場と通路の間の位置 C に別の端末を設置する。位置 D と E の端末は左側の通路の上に

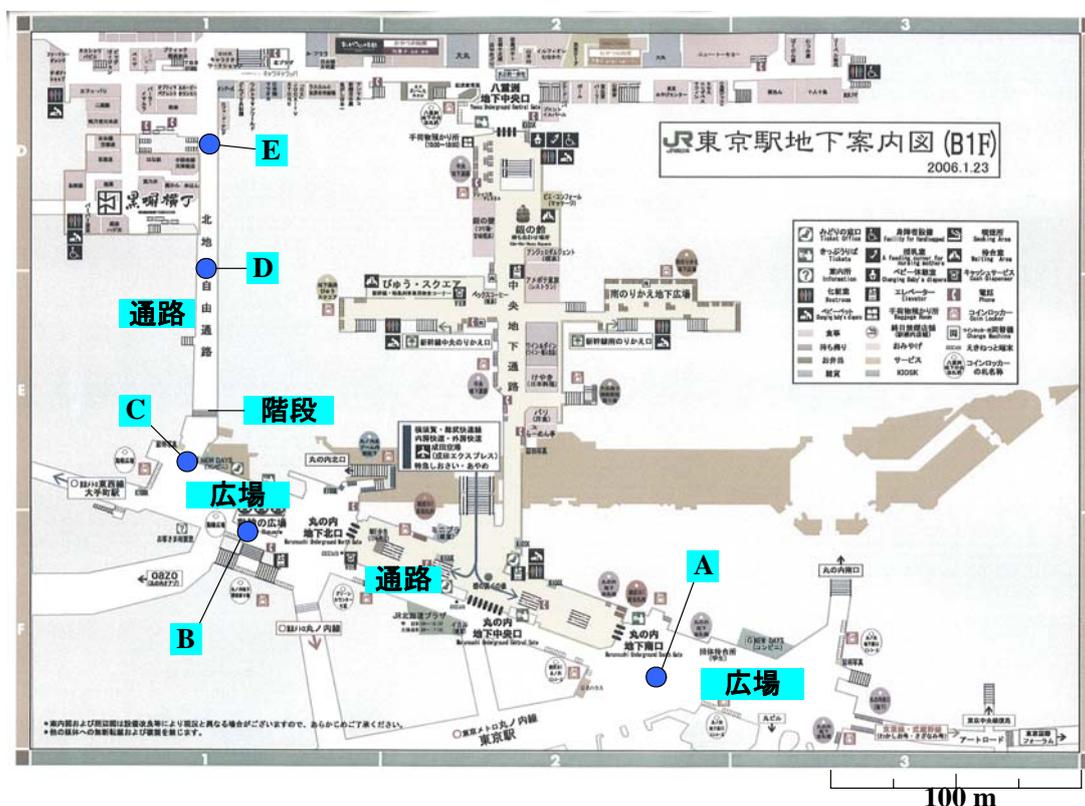


図 10. マルチホップ通信の場合の端末配置

並べて設置した。

まず、位置 A にある端末から B の端末を経由し C の端末へ、300KByte のファイルデータを 4 回 FTP により転送する。A と C の距離は 200 メートルである。スループットはそれぞれ、1.8Mbps、80Kbps、1.7Mbps、540Kbps であった。これらは安定した通信であった。

次に、3 ホップ通信の性能を測定するために、位置 A にある端末から B と C の端末を経由し D の端末へ、ファイルデータを FTP により 2 回転送する。A から D の距離は 290 メートルである。スループットは 88Kbps と 140Kbps であった。

最後に、4 ホップ通信の性能を測定した。位置 A にある端末から B、C、D を経由して位置 E にある端末へ FTP によりデータ転送を行った。A から E までの距離は 340 メートルである。しかし、FTP によるデータ転送は不可能であった。

4. おわりに

本稿では、東京駅地下街におけるデータ転送実験の結果について報告した。解析により、端末間の距離が 200 メートル程度の場合でも、見通しがよくお互いが見えるなら、直接通信が可能であることが示された。それに対して、端末間で見通しが悪い場合には、端末間の距離が 50 メートル程度でもファイル転送が不可能になることがあることがわかった。特に、地下空間の構造が複雑になっているような場合には通信できなくなった。我々の実験によると、物理レベル、MAC レベル、TCP レベルの性能パラメータを測定した。その結果、MAC レベルの再送の処理と、TCP レベルのスループットと再送がそれぞれ影響していることがわかった。一方で、物理レベルのパラメータである RSS 値はそれらのパラメータとはあまり関係のないという結果を得た。マルチホップ通信においては、端末間の距離を延ばすにつれて、FTP のスループットは減少していった。我々の実験によると、端末間の距離が 290 メートルのときの 3 ホップの FTP 通信が可能であった。

参考文献

- [1] Mobile Ad Hoc Networking (MANet): http://protean.itd.nrl.navy.mil/manet/manet_home.html.
- [2] C. E. Perkins, E. B. Royer and S. Das: Ad-hoc On-demand Distance Vector (AODV) Routing, *RFC 3561*, Jul. 2003.
- [3] T. Clausen and P. Jacquet Ed.: Optimized Link State Routing Protocol (OLSR), *RFC 3626*, Oct. 2003.
- [4] 沖野他, “高密度アドホックネットワークのための AODV ルーチングプロトコルの提案”, 情処論, Vol.45, No.12, pp.2557-2565, Dec. 2004.
- [5] H. Xiao, K. C. Chua, J. A. Malcolm and Y. Zhang: Theoretical Analysis of TCP Throughput in Adhoc Wireless Networks, *Proc. IEEE Conf on Globecom*, St. Louis, 2005, 2714-2719.
- [6] T. Karapantelakis and G. Iacovidis: Experimenting with Real Time Applications in an IEEE 802.11b Ad Hoc Network, *Proc. IEEE conf on LCN*, Sydney, 2005, 554-559.
- [7] 高橋他, “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, Vol.J89-B, No.6, pp.836-848, 2006.
- [8] AODV-UU, AODV-UU@Uppsala University, <http://core.it.uu.se/AdHoc/AodvUUImpl>.
- [9] Ethereal: The world's most popular network protocol analyzer, <http://www.ethereal.com/>.
- [10] 姫野他, “無線 LAN 通信の解析を補助するモニタリングシステムの設計”, 信学技法, CQ2004-105, pp.7-12, Nov. 2004.