

多様な移動体通信環境における 無線 LAN システム同士の競合

森 内 彩 加^{†1} 安 藤 玲 未^{†1}
村 瀬 勉^{†2} 小 口 正 人^{†1}

無線 LAN の普及，マルチメディア通信の需要の増加といった背景から，無線 LAN 環境における QoS 制御が大変重要になっている．さらに，近年のモバイルルータ等の普及から，今後はアクセスポイント (AP) と個人の PC や携帯端末等が併せて移動する環境が想定される．

そこで，本研究では，モバイルルータを AP として使用した環境 (モバイルルータ環境) を想定する．既に，複数のモバイル無線 LAN (m-WLAN) が接近したときのフロー毎の品質特性評価が行われている．このとき，m-WLAN 同士が近づくにつれて，リソースを合計端末数で公平にシェアするため，トータルスループットは，台数の多い m-WLAN の方が不利になるということが示されている．しかし，その理由について，さらに定量的に示すことが必要である．そこで本稿では，その理由を詳細に調査した．さらに公平性の解決策を提案し，その効果を確認した．

Comptetion of multiple mobile environment in wireless LANs

MORIUCHI AYAKA,^{†1} REMI ANDO,^{†1} TUTOMU MURASE^{†2}
and MASATO OGUCHI^{†1}

In late years, the demand for multimedia communication has been raised extensively. Recently, a mobile router based on WiMAX and/or LTE is coming to be widely used. Thus, we should assume the environment where an access point, individual PC, and portable terminals move.

In our research work, we assume a mobile router environment. Characterization of quality per flow has been evaluated thus far in the case of two or more m-WLAN systems coming closer. In such an environment, as m-WLAN systems come closer, resources are shared by all terminals. Therefore, a m-WLAN system that includes more sending terminals is at a disadvantage. However, this is not evaluated quantitatively.

In this paper, the reason for the unfairness is investigated by experiments using real machines. Furthermore, we propose a solution for fairness, and evaluate its effect.

1. はじめに

無線 LAN の普及，マルチメディア通信の需要の増加といった背景から，無線 LAN 環境における QoS 制御が大変重要となっている．また，スマートフォン端末やタブレット端末，モバイル WiMAX ルータ等の普及から，外出先でもデータの送受信をする機会が増加しており，今後はアクセスポイント (AP) と個人の PC や携帯端末等が併せて移動する環境が想定される．

無線 LAN の干渉や TCP 同士の干渉は，今までにも様々な環境において検証がなされてきたが⁽¹⁾²⁾，本研究では，モバイルルータを AP として使用し，通信を行う環境 (モバイルルータ環境) を想定する．モバイルルータ環境の研究では，既に，ハンドオーバー時の性能向上の提案や³⁾，複数のモバイル無線 LAN システム (m-WLAN) が接近したときのフロー毎の品質特性評価が行われている⁴⁾．文献⁴⁾では，無線 LAN の干渉や TCP 同士の干渉について，2 つの WLAN システム同士が近づくにつれて，リソースを合計端末数で公平にシェアするため，全ての UDP は，同一スループットになること，TCP スループットは，台数の多い m-WLAN が不利になるということが示されているが，その理由について，さらに定量的に示すことが必要である．

そこで，本稿では，m-WLAN の TCP/UDP グッドプット及び，MAC スループット，及び ACK ロス率について詳細に調査した．さらに，不公平性の解決策の提案とその効果の確認を行った．既に，不公平性の解決策として端末プロトコルを TCP-AV⁵⁾ に変更する方法が示されているが，端末を変更したくない場合もある．そこで，ROC (Receive Opportunity Control in MAC Frame)⁶⁾ を使用し，通信端末以外からの制御方法を検討する．また，ROC を使用することによってどの程度スループットが改善されるかを確認した．次章で従来研究について述べ，3 章で不公平とその理由について検証する．さらに 4 章で不公平性の解決策の提案とその効果の確認を行い，最後にまとめを述べる．

^{†1} お茶の水女子大学
Ochanomizu University

^{†2} NEC
NEC Corporation

2. 従来研究

干渉による性能劣化の解決策に関する研究は、ハンドオーバを伴う無線 LAN 環境やアドホックネットワークにおいて、既に行われている³⁾⁷⁾⁸⁾。これらは、各 AP の干渉を考慮し、最適なスループットが得られるモデルや手法を提案している。このような電波を感知して制御をする手法は、固定の AP に対して効果的である。しかし、本研究ではモバイルルータを用い、AP 自体が頻繁に移動することを前提としているため、このような制御は有効であるとはいえない。

無線 LAN システム自体が動く環境での評価については、文献⁹⁾で既に行われている。文献⁹⁾は無線 LAN システム間の距離が小さくなると MAC レベルでのシステムのキャパシティが減少することをシミュレーションにて示している。しかし、この研究では、MAC フレームエラー及びキャパシティの変動が上位レイヤプロトコルに与える影響については述べていない。システムの特性に加え、フローレベルの特性は、QoS 対応のアプリケーション設計や、QoS 制御の検討に必要であるため、検証する必要がある。

さらに、モバイルルータ環境において、m-WLAN 自体が移動するときの帯域確保具合の実機評価は行われている。2 つの m-WLAN を近接させるとき、他の m-WLAN からの干渉のため、リンク容量が減少し、帯域確保具合もそれに応じて減少すること、干渉の度合いは 3 つのフェーズに分けられることが示されている。これにより、2 つの m-WLAN は、十分に離れていると干渉は無く、近づくにつれて互いをキャリアとして認識するようになり、十分近接すると、一つの CSMA/CA ドメインになることが明らかにされている。また、不公平が生じることも示されているが、どのような理由でトータルスループットに差が出てしまうのかの理由を定量的に示す必要がある。そこで、本稿では、スループットの低下要因について詳細な検証を行った。

2.1 システム近接時の相互作用

既存研究での実験環境を図 1 に示す。図 1 において、WLAN-1 と WLAN-2 は独立した WLAN システムで、それぞれの WLAN システムは 1 台のモバイルルータ AP_i (i は WLAN システム番号)、 AP_i と接続する送信端末群 N_i 、 AP_i と有線接続する 1 台の受信端末で構成されている。点線は、キャリアセンスドメインのイメージを示す。各無線端末は uplink 方向 (端末から AP の方向) に TCP 通信を行う。無線 LAN は IEEE 802.11g を用いている。

WLAN システム間の距離がルータ間距離 d に応じて、お互い干渉を与えない程度に十分離れている状態を状態 1、他の無線 LAN システムと干渉し、お互いのスループットに影響

を及ぼす距離にある状態を状態 2、各無線 LAN システムが完全に 1 つの CSMA/CA ドメインとなる程度に近距離にある状態を状態 3 とする。

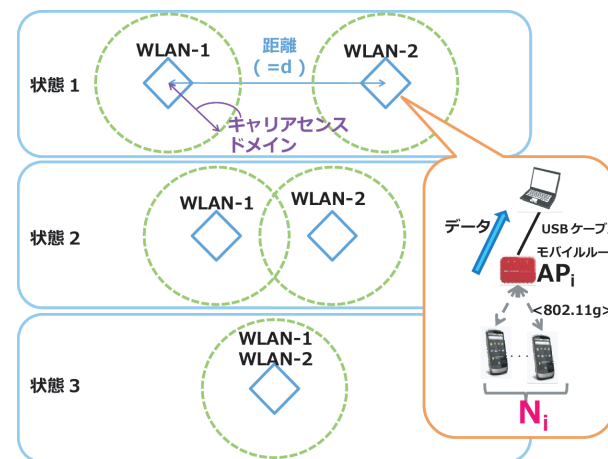


図 1 実験環境

お互いに干渉しない 2 つの無線 LAN システムが近づく時、近づくにつれて、近づく前の干渉無し状況 (状態 1) と比較し、各端末のスループットは減少する。AP1 及び AP2 で通信を行っている端末数をそれぞれ N_1 , N_2 , $N_1+N_2=N$ とすると、最接近状態では、スループットは 1 つの AP を、 N (台) で共有している状態とほぼ同じになる。

AP 同士が近接するようになると、まず最初にそれぞれの通信が相手にとってノイズ源となるために、お互いの通信がビットエラーにより劣化し、その結果スループットが低下する (状態 2)。

次に、お互いのキャリアセンスに関わるレベルまで近接すると、今度は 2 つのシステムは 1 つの CSMA/CA ドメインとして通信を行っている (状態 3)。

また、複数の m-WLAN が近接するとき、異なる端末数の m-WLAN では、台数の多い m-WLAN の方がトータルスループットが小さくなり、不公平が生じることが明らかにされている。不公平であるとは、同じ環境で通信しているにも関わらず、公平な通信が行われていないことを指す。不公平は、有線環境や AP が固定の無線環境においても議論されているが¹⁰⁾¹¹⁾、文献⁴⁾では、WLAN システムごとにトータルスループットが大きく異なること

であると定義している．ところが，不公平の理由について定量的には示されていないため，詳細に調べる必要がある．

また，先に述べた状態 1 において，TCP-ACK ロス率と TCP-goodput の関係も調査している．結果は図 2 のようになっており，TCP-ACK ロス率が高いほどグッドプットが低くなることが明らかにされている．

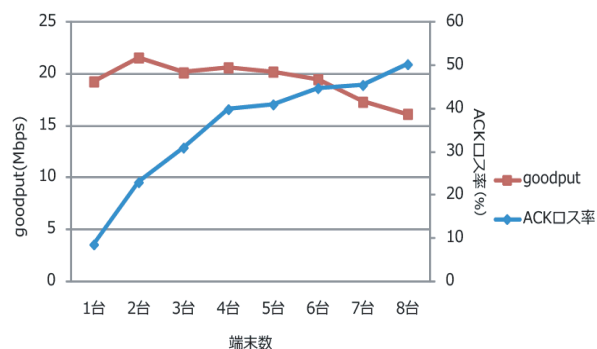


図 2 端末数と TCP-goodput の関係

2.2 ROC 優先制御方法

本稿で，不公平改善に使用した ROC について述べる．ROC とは，既存の 802.11 端末に変更を加えずに，ある割合の MAC フレームの送達を妨害することで優先制御を行う．すなわち，実際に MAC アドレスフレームがエラーで廃棄される状況を人工的に作るメカニズムの制御である．これは，実際には，802.11 の MAC 方式である CSMA/CA において ACK を破壊することで実現される．この 拒否により，802.11 がもともと持っている再送制御とバックオフ制御機能を利用して，受信端末側から送信端末の送信を制限することができる．また，その効果を文献¹²⁾ では，実機評価とシミュレーション評価により確認し，実環境においても有効であることを確認している．

3. 端末と不公平

3.1 ウィンドウ切れとピンポン状態

2 つの m-WLAN が近接するとき無線 LAN における，uplink 方向の TCP の送信端末

数が多い場合，CSMA/CA の送信機会均等という性質により，AP も送信端末と同様に送信権を得なければならない．例えば，AP1 台に対し，送信端末数が 8 台の場合は，送信端末全体としては，8/9 の送信機会を得て，AP に向けてデータを送出する．一方で，AP は，これら 8 台に対する TCP-ACK を 1/9 の送信機会です返していかなければならない．そのため，TCP-data に比べて，TCP-ACK の送信機会は少ない．更に，端末の packets 送出速度 (性能) がある程度速いことも合わさり，TCP-ACK が AP のバッファにどんどんたまっていく．送信端末は，TCP ウィンドウで許容されている大きさの packets を送信すると，AP から TCP-ACK が返ってこない次の TCP-data を送ることができない状態になる．この，TCP 送信端末が TCP-ACK 待ちにより，すなわち，ウィンドウを使い切った状態のため，データ送信が出来ない状況を「ウィンドウ切れ」とよぶ．

状態 3 において，ウィンドウ切れにより，端末は TCP-data を送れる状態にないことから，AP が送信権を得る．送信権を得た AP は，TCP-ACK を 1 台の端末に返すので，TCP-ACK が返ってきたこの端末は，TCP-data を送る．送ったところで，この端末はまたウィンドウ切れ状態になる．全端末がウィンドウ切れとなった時，AP しか送信権を得ることができない．状態 3 において，MAC レベルでは，WLAN-1 と WLAN-2 の全端末が順番に送信権を得ることになるので，2 台の AP が交互に送信権を得ることになる．送信権を得た 1 台の AP は，TCP-ACK を 1 台の端末に返すので，TCP-ACK が返ってきたこの端末は，TCP-data を送る．送ったところで，この端末はまたウィンドウ切れ状態になる．すると，もう一方の AP が送信権を得て，1 台の端末に対し，TCP-ACK を返す．この TCP-ACK が返ってきた端末はデータを送信するが，またウィンドウ切れとなる．このような送受信を繰り返すため，WLAN-1 と WLAN-2 の，単位時間あたりに送出する TCP-data の，MAC フレームは同数となる．つまり，MAC フレームでのスループット (MAC スループット) は等しくなる．また，MAC スループットは以下の式により，算出される．

$$\text{MAC スループット} = \text{グッドプット} + \text{再送時パケットの単位時間当たりの転送量}$$

グッドプットとは，再送を除いた MAC スループットである．端末数が多いほど，AP のバッファで TCP-ACK があふれやすくなるため，送信機会 (=MAC スループット) が同じであれば，再送が多いほど，グッドプットは小さくなる．つまり，TCP-ACK のロスが多い m-WLAN の方が，グッドプットが小さい．これは，システム間でグッドプットは送信端末数には依存するが，通信速度 (11b や 11g など) には依存しないことを意味する．

3.2 評価モデル

本実験は、ルータも端末も移動する環境での干渉の影響を調査するため、AP には WiMAX ルータ (Aterm WM3500R¹³⁾)、受信端末にはノート PC (EeePC¹⁴⁾)、送信端末には Android 携帯 (Nexus S¹⁵⁾) を使用した。今回使用した Nexus S は、Google 社が開発者向けに販売しているスマートフォンである。

本実験環境において、送信端末が何台ずつのときにピンポン状態が起こるのかを明らかにするため、図 3 のような状態 3 の実験環境において、 $N1/N2 = 2/8, 3/7, 4/6, 5/5$ として検証を行った。WLAN-1 の送信端末数/WLAN-2 の送信端末数が 5/5 と 4/6 のときに、m-WLAN ごとに各端末のフローが同程度であることを確認し、ピンポン状態でやりとりされていることが、WLAN-1 と WLAN-2 で統計的に同じ確率で発生していることから確認された。一例として $N1/N2=4/6$ の場合の各端末のグッドプットを図 4 に示す。

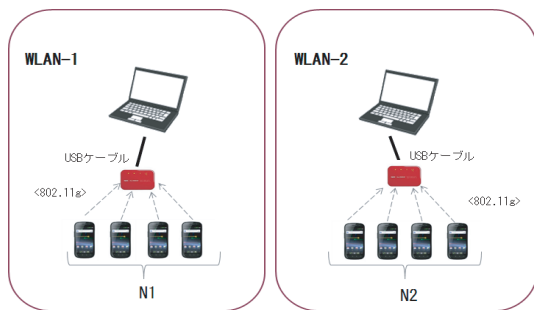


図 3 実験環境

MAC スループットは、ある一定時間内に送受信されたフレーム数からスループットを計算している。解析ツールには AirPCap¹⁶⁾ と Wireshark¹⁷⁾ を使用した。

3.3 不公平の要因

図 3 の実験環境において、MAC のスループットとグッドプットの関係を図 5 に示した。網掛けしたグラフが $N2$ 台のときを表している。矢印が示しているように、端末の台数が増えるほど、グッドプットは低下する。一方、MAC のスループットは $N1/N2=3/7$ のときは、グッドプットと同様に端末数が多い方が低くなっているが、 $N1/N2=4/6, 5/5$ のときは、先に述べたピンポン状態によって、WLAN-1 と WLAN-2 の MAC のスループットは同じになる。しかし、端末数が 6 台のときは、他の端末数の場合に比べて TCP-ACK ロス

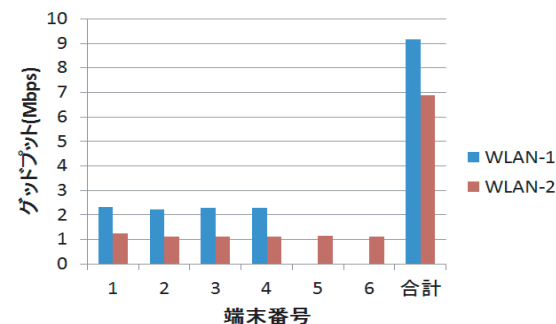


図 4 $N1=4, N2=6$ 時の各フローのグッドプット

率が 2 倍以上になっていた。これにより、m-WLAN 間でグッドプットに差が出てしまうのは、MAC のスループット低下とともに ACK ロスが原因であることが分かった。

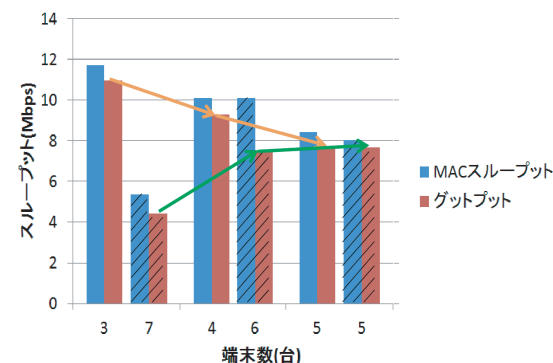


図 5 不公平の要因

3 章で述べた不公平性の解決策として文献⁴⁾ では、QoS-TCP である TCP-AV を使用することによって不公平性の緩和を提案しているが、TCP-AV は端末の変更が必要となってしまうため、本稿では、外部からの制御を検討する。次章では、制御方法とその効果について述べる。

3.4 制御方法

ROC とは、CSMA/CA 制御とバックオフを利用して非優先フローの送信機会を低下させることで、相対的に優先フローの送信機会を向上させる制御方法である。これを、図 3 において、 $N1 < N2$ のとき、WLAN-1、つまり送信端末数が少なく、トータルグッドプットがより高い m-WLAN に対してのみ使用した。この際、どの程度で効果を発揮するのかを明らかにするため、MAC エラー率を変化させながら実験を行った。

図 3 において、 $N1/N2=4/6$ のときの MAC エラー率とグッドプットの関係を図 6 に示す。この実験環境では、端末台数 4 台の方に ROC をかけている。これにより、今回の実験設定パラメータにおいては MAC エラー率約 40 %が 2 つの m-WLAN のトータルグッドプットの値の差異が小さい。つまり最適な MAC エラー率であるといえる。

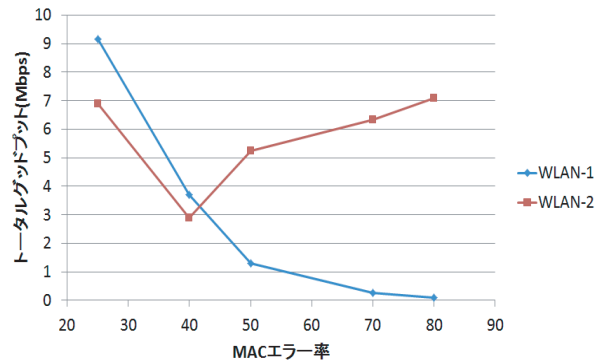


図 6 MAC エラー率とトータルグッドプット

3.5 制御効果

提案手法を適用し、有効性の検証を行う。公平性を測る指標として、Jain の Fairness Index を用いる¹⁸⁾。FI の値 (f_i) は、以下のように定義される。

$$f_i = \frac{(\sum_{i=1}^k x_i)^2}{k \sum_{i=1}^k x_i^2} \quad (1 \leq i \leq k) \quad (1)$$

ここで、 k は考慮している無線 LAN システムの個数、 x_i は各無線 LAN システムのトータルスループットを表す。 f_i の値は 0.0 から 1.0 の間で、 $f_i=1.0$ の時、全ての無線 LAN

システムは同じトータルスループットである状態、つまり公平であることを示す。

先に述べたように MAC エラー率が 40 %が最適値であると考えられるため、MAC エラー率 40 %の場合と手を加えていない場合の Fairness Index の比較結果を図 7 に示す。これにより、手を加えていない場合に比べて、MAC エラーを与えてやった場合の方が Fairness Index の値が増加していることが分かる。

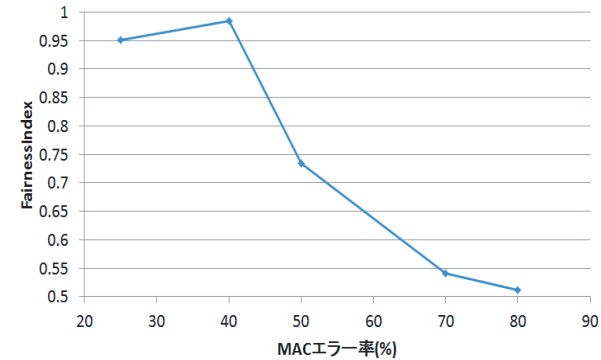


図 7 解決策の効果の検証

4. おわりに

モバイル環境において、端末数が異なる場合に不公平が起こる理由について検証し、これに対して解決策を提案した。不公平は、ウィンドウ切れが起きている場合は、ACK ロスによって、グッドプットが低下してしまうことによる。一方で、ウィンドウ切れが起らない場合は、MAC のスループットの低下と ACK ロス率が原因であることを明らかにした。さらに、端末に手を加えることなく不公平性を解決する方法として外から制御可能な ROC を用いることによって、不公平性が緩和することを示した。

今後の課題としては、MAC エラーが存在する環境において、どの程度パケット廃棄に影響するのかを調べ、エラーが存在する環境においても安定した通信が行えるような手法の提案を目指す。

謝 辞

本研究は一部、独立行政法人情報通信研究機構の委託研究「新世代ネットワークを支えるネットワーク仮想化基盤技術の研究開発・課題ウ 新世代ネットワークアプリケーションの研究開発」によるものである。

参 考 文 献

- 1) 岸田 朗, 平栗 健史, 小川 将克, 永田 健吾, 梅内 誠: 無線 LAN と WiMAX の近接環境下における干渉回避スケジューリング方式, 信学技法, Vol.109, no.22, pp.167-172, 2009 年 4 月.
- 2) 今泉 充啓, 木村 充位, 安井 一民: 重複 ACK による再送信制御方式をもつネットワークシステムのスループット, 電子情報通信学会論文誌, pp.669-675, 2008 年 6 月.
- 3) 李 蕾, 阿部俊二: IPv6 モバイルネットワークの検討, 信学技法, pp.37-42, 2005 年 4 月.
- 4) 安藤玲未, 村瀬勉, 小口正人: 無線 LAN 環境におけるモバイルルータユーザ間の公平性制御法の提案 DEIM Forum 2012 C2-1, 2012 年 3 月.
- 5) H.Shimonishi, T.Hama, T.Murase, "TCP Congestion Control Enhancements for Streaming Media," Consumer Communications and Networking Conference 2007, pp.303-307, Jan. 2007.
- 6) 村瀬勉, 平野由美, 塩田茂雄, 坂田史郎: フロー QoS のための無線 LAN MAC フレームの受信機会制御方法の提案, 信学技法, pp.43-48, 2007 年 12 月.
- 7) 中原裕成, 白石陽, 高橋修: アドホックネットワークにおける迂回経路を用いたマルチパス通信方式の検討, 情報処理第 73 回全国大会, pp.149-150, 2011 年 3 月.
- 8) 村上友規, 工藤理一, 市川武男, 溝口匡人: オーバーラップ通信セルにおける空間リソース割り当ての有効領域検討, 信学技法, A.P2010-166, 2011 年 2 月.
- 9) Micah Z.Brodsky, Robert T.Morris, "In Defense of Wireless Carrier Sense", ACM SIGCOMM 2009 conference on Data communication, pp.147-158, Aug. 2009.
- 10) 新井絵美, 平野由美, 村瀬勉, 小口正人: 無線 LAN 環境における実機特有の帯域公平性についての検討と QoS 保証 TCP の性能評価, DBSJ Journal, Vol8, No.1, 2009 年 6 月.
- 11) 森内彩加, 安藤玲未, 村瀬勉, 小口正人: 無線 LAN 環境におけるハンドオーバを伴う移動端末のノード間競合に関する一検討, DEIM Forum 2012, C2-4, 2012 年 3 月.
- 12) 村瀬勉, 平野由美, 松本晃, 伊藤哲也, 小松真弓, 塩田茂雄, 坂田史郎: ACK 制御を用いた無線 LAN の QoS 優先制御方法とその実機評価, 信学技法, pp.13-18, 2009 年 3 月.
- 13) Aterm WM3500R: <http://121ware.com/product/atermstation/product/wimax/wm3500r/>
- 14) EeePC: <http://www.asus.co.jp/Eee/>
- 15) Nexus S: <http://www.android.com/devices/detail/nexus-s>
- 16) AirPCap: <http://e-net.shop-pro.jp/?pid=17624985>
- 17) Wireshark: <http://www.wireshark.org/>
- 18) D.-M. Chiu and R. Jain, " Analysis of the increase and decrease algorithms for congestion avoidance in computer networks, " Computer Networks and ISDN Systems, vol. 17, pp. 1-14, 1989.