

# 多数の近接する無線 LAN におけるスループット向上 を目指す伝送レート制御とトラフィック量制御

磯村 美友<sup>1</sup> 熊谷 菜津美<sup>1</sup> 森内 彩加<sup>1</sup> 村瀬 勉<sup>2</sup> 小口 正人<sup>1</sup>

概要: 近年, モバイルルータやテザリングなどの普及により個人が持ち歩く移動無線 LAN(WLAN) が普及し, 会議の場やカフェなど人が集まる場所では, 多くの WLAN が密集する可能性が高まっている. また, 無線 LAN 自体の構成も変化している. 従来では, アクセスポイント (AP) を固定した状態で多くの端末が利用することが想定されていたが, 移動 WLAN では, AP と端末がより近距離で使用され, 端末数も少ない構成が想定出来る. その場合, 従来よりもキャプチャエフェクトの働きは大きくなる. また, 多数の WLAN で 1 つの CSMA/CA ドメインを共有することになるため, 1 つの WLAN でエラーに起因する端末の伝送レート低下が起こると, Performance Anomaly が全 WLAN のスループットを低下させてしまう. 場合によっては, Performance Anomaly の影響が大きくなり大幅な通信劣化が避けられなくなる. そこで, この通信性能の劣化を引き起こす要因である, 伝送レート制御に着目し, 2 つのレート制御方法 (1) 伝送レート固定型と (2) トラフィック量制限型を提案する. これらの提案方法を実機にて評価し, 通信性能向上を確認している.

## Data Rate Control and Amount of Traffic Control for Improving Total Throughput in Densely Deployed Wireless LANs

MITOMO ISOMURA<sup>1</sup> NATSUMI KUMATANI<sup>1</sup> AYAKA MORIUCHI<sup>1</sup> TUTOMU MURASE<sup>2</sup> MASATO OGUCHI<sup>1</sup>

### 1. はじめに

近年, モバイルルータやテザリングなどの普及により個人が移動 WLAN を持ち歩く機会が増えている. その結果, 会議の場やカフェなど人が多く集まる場所で, 一カ所に多くの WLAN が集中する場合がある. また, 個人が持つような移動 WLAN においては, 1 つの WLAN の構成にも変化がある. 移動 WLAN の AP と端末の距離は天井や壁に固定された AP を使用する従来の WLAN の AP と端末の距離より大幅に近い.

すると, WLAN 同士の電波が非常に多く重なってしまうことで, 互いに干渉を及ぼし合い, 全ての WLAN のスループットなど通信品質を大きく低下させてしまう恐れがある. 多数の WLAN が近接して存在する場合には, 干渉を避けたチャンネルのみを使用する事は難しく, 近隣チャネ

ルもしくは同一チャンネルの使用が避けられない. 近接する WLAN が同一チャンネル, すなわち, 同一の CSMA/CA ドメインを多数の WLAN で共有する場合には, コリジョンが増加する. ただし, AP と端末が近距離の場合には信号とノイズ比で効果の度合いが異なるキャプチャエフェクトにより, コリジョンが発生してもフレームの受信に成功する場合がある. それにより, 並列転送が可能となりスループットが向上する. しかし, 他の WLAN からのノイズが積み重なる事で (S/N が悪化し) キャプチャエフェクトが低減しコリジョンによりフレームエラーが起こる場合もある. WLAN はコリジョンエラーに対して, ARF (レート自動調整) により自動的に不要な伝送レート低下を起こしてしまう. このような多数の WLAN で同一の CSMA/CA ドメインを共有している場合には, 低伝送レートの WLAN が存在すると, CSMA/CA における送信機会均等性から, 全 WLAN の性能劣化が引き起こされる現象 (Performance Anomaly) が起こり, 全ての WLAN に影響が及ぶ恐れがある.

<sup>1</sup> お茶の水女子大学  
Ochanomizu University

<sup>2</sup> NEC Corporation

そのため、まず第一に、並列転送によるスループット向上要因と伝送レート低下によるスループット低下要因という、それぞれの要因が性能に及ぼす影響を調査する必要がある。

これまでに、1組の WLAN 内での Performance Anomaly の影響や固定の WLAN を想定した環境での性能評価や制御方法は多く研究されている。しかし、AP と端末が直近に存在するような移動 WLAN の性能を考えるときには、これまでの固定の WLAN とは異なり、キャプチャエフェクトの影響により、性能が大きく異なることに注意すべきである。これは、他の WLAN からのノイズよりも自 WLAN 内の受信電波強度が強いからである。さらに、多くの WLAN が近接する場合には、Performance Anomaly の影響も同様に注意すべきである。低伝送レートの WLAN が一組でも存在する場合にはその一組が、そこに近接する全ての WLAN の性能を劣化させてしまうからである。しかし、逆に、高伝送レートの WLAN があまりに多い場合には、Performance Anomaly の影響が軽減する可能性もある。

そこで、第二に、WLAN 数の増加による送信機の影響と Performance Anomaly の影響が互いにどの程度作用しあうのかについて検討すべきである。

第三に、キャプチャエフェクトの度合やレート自動調整の振舞いを考慮して評価を行うべきである。これらの振舞いはデバイスによって異なるので、シミュレーションは必ずしも現実の通信特性を再現できるとは限らない。そこで、キャプチャエフェクトの度合やレート自動調整の振舞いを評価するために、本研究では実機を用いた評価を行う。

以上のことから、本研究では、多数の WLAN が近接する場合の、キャプチャエフェクトの働きと Performance Anomaly の影響度を実機にて評価し、レート自動調整機能が性能劣化の主要因であることを示す。また、その性能劣化に対する対策として、伝送レートを固定する制御とトラヒック量を制限する制御を提案し、その効果を実機により確認する。

## 2. 既存研究

伝送レート制御に関しては多くの研究 [1][2][4] が既になされている。先に述べた Performance Anomaly もそのうちのひとつとして調査されているが、WLAN 数が増加した場合の波及の影響についてはまだおこなわれていない。また、AP と端末が近接している WLAN が増加した場合 [11] においては、自動レート制御の影響がこれまで以上に大きい事が考えられる。というのも、各 WLAN 内の端末数が増加した場合において、WLAN 内のコリジョンエラーに起因する伝送レート低下の影響が評価されている [4] が、端末数が少数で、WLAN 内でのコリジョンエラーが少ない状況でも、WLAN 数が増加するとコリジョンエラーが多くなるため、やはり伝送レート低下の影響を評価する必要がある

あるためである。なぜなら、WLAN 数の増加と共に SINR が悪化し、キャプチャエフェクトが低減し、その結果、エラーとなる確率が高くなり、伝送レートが低下する確率も高くなるからである。つまり、SINR で効果が決定するキャプチャエフェクトと、フレームの同時送信に起因するエラーに起因する自動レート制御の影響では、どちらの影響がどのくらい効いてくるのか明らかにする必要がある。

また、低伝送レートの WLAN がある固定数存在し、高伝送レートの WLAN がごく少数組から増加していく場合には、CSMA/CA の送信機会均等により、WLAN 数が増加すればするほど自 WLAN に回ってくる送信機会の割合は指数関数的に減少していく。すると、WLAN がごく少数な場合の組数の増減は、送信機会が性能に与える影響は大きい、あまりにも WLAN 数が増加してしまうと、性能に与える影響はわずかである（つまり、1組あたりの送信機会が少ないことで Performance Anomaly の影響も小さくなる）可能性がある。これらのことより、WLAN 数の増加による送信機会の影響と Performance Anomaly の影響が互いにどの程度作用しあうのかについて検討すべきである。

## 3. 多数の WLAN が存在する場合のスループット特性と低下要因

ここでは、多数の同一チャネルを使用する WLAN が近接する場合の通信特性について明らかにし、その特性が現れるメカニズムについて議論する。まず、3.1 節で多数の WLAN が近接した場合におけるキャプチャエフェクトの影響の強さ（総スループット向上の働き）について議論し、3.2 節で総スループットの低下要因について述べる。3.3 節では、3.1 節、3.2 節を踏まえた総スループット評価を行う。

### 3.1 キャプチャエフェクトの影響

多数の WLAN が近接して集まった場合においては、キャプチャエフェクトの影響がこれまで以上に強くなる。というのも、従来は AP が天井や壁などに固定された状態で使用するのが一般的であったが、モバイルルータやテザリングの普及により、AP と端末が近接した状態のまま、持ち運ばれ使用されるようになったからである。AP と端末が近接した状態で使用されるようになると、従来の WLAN の使用方法の場合よりも、WLAN 内の信号とノイズの差が大きくなる。つまり、キャプチャエフェクトの働きが大きくなる。

例えば、フレームが衝突した場合（コリジョンが発生した場合）におけるキャプチャエフェクトの結果について 3通りの場合を考えてみる。（1）1つの AP に 2つの端末から同じ位の受信電力でフレームが送られ、コリジョンを起こした場合、両方のフレームがエラーになる可能性が高

い。(2) 1つのAPに2つの端末から受信電力の異なるフレームが送られコリジョンを起こした場合、片方のフレームは受信に成功するが、もう片方のフレームはエラーになる可能性が高い。するとこれらの場合、エラーが原因でバックオフや再送、伝送レートの低下がなされる。(3) APと端末が近接している構成のWLANの場合においては、自WLANにおける受信信号と他WLANからの受信信号(=ノイズ)の比が大きくなることから、コリジョンが起こったとしても、双方のWLAN共に受信に成功する確率が高くなる。フレームの受信に成功すれば、伝送レートを低下させて通信する必要もなくなり、高伝送レートを維持したまま通信が可能となる。この場合においては、コリジョンが増えれば増える程、すなわちWLAN組数が増加する程スループットは向上する。

以上の事より、多数のWLANが近接して存在する場合の通信性能を評価する場合においては、キャプチャエフェクトの影響が見逃せないほど大きい。

### 3.2 通信性能低下要因

ここでは、3.1節とは逆の効果、つまり、同一チャンネルを使用するWLANが一定の距離間隔で増加する場合のスループット低下要因について述べる。

WLAN組数が増加した場合には、コリジョン確率が増加する。3.1節で述べた様に、キャプチャエフェクトが働いていれば、コリジョンが発生しても送信に成功することから、コリジョンが起これば起こる程、すなわち、WLAN数の増加に伴いスループットが増加すると考えることが出来る。しかし、WLAN数が増加することは、自WLANに届く他WLANからのコリジョンを積み重ねて増大させていくことでもある。すると、自WLAN内の受信電波強度と他WLANからのノイズ比が低下してしまうことで、キャプチャエフェクトの低減が発生し、コリジョンした場合には、エラーとなってしまふ。すると、バックオフや再送、伝送レートの低下を招き、低伝送レートのWLANが長時間リソースを占有して通信してしまい、その影響が他のWLANにまで波及し、スループットの減少が避けられなくなる。

### 3.3 総スループット評価

ここでは、3.1節で述べたキャプチャエフェクトのスループット向上効果と、3.2節で述べた他WLANからのノイズの積み重なりによる(SINR悪化による)フレームエラーの影響がどのように働くのかを、総スループットを用いて評価した。

この計測は次のような状況で行った。WLANを1~16組用意し、通信を行い合計スループット及びフレーム再送率を計測した。APと端末はそれぞれ1つで1組のWLANとし、APには、ポケットルータ(PLANEX MZK-MF300N)[7]

を使用し、送信端末にはAndroid携帯端末(Nexus S)[8]を使用した。スループット測定にはiperf[9]を用い、通信方式はUDP通信でuplink方向に通信し、WLANにはIEEE802.11gを用いた。今回は、基本性能を把握するという点で上位プロトコルの影響の含まれない利用可能スループットを評価するためにUDP通信を用いた。TCP通信の場合は、輻輳制御のため、輻輳制御アルゴリズムやAPのパッファ量などに依存してスループットが変わってきてしまうからである。downlink方向への通信は、送信端末数が増えたときにも性能が変化しないが、uplink方向の通信は、送信端末数に依存してスループット特性が変化する。今後のことも考慮してuplink方向のトラフィックを用いた。計測場所は、お茶の水女子大学(東京都文京区)の一般的な会議室であり、会議室の電波環境は、Android携帯端末においてWifiAnalyzerアプリケーションで確認したところ、他のチャンネルに実験系以外のWLANが検出された。しかしながら、実験系においてiperfで計測したスループットが、約23Mbpsであったこと、及びAirPcAP[10]を用いてフレームキャプチャした結果から、実験系以外の実際のトラフィックは、無視できるほど小さいことを確認している。

図1のように各WLANを格子状の端点に設置し、隣のAPとの間隔を100cmに固定した。1組のWLAN内でのAPと端末は直近(数cm)に設置した。

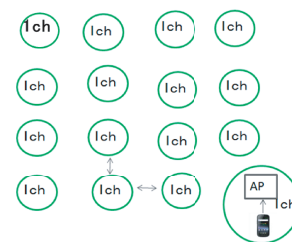


図1 WLANの配置

上記のモデルにおいて、WLAN数を増加させた場合の総スループットを図2に示す。また、WLAN数が13組のときの各WLANの伝送レートの振舞を図3に示す。その結果、コリジョンが起こった際のキャプチャエフェクトの効果とSINR悪化によるフレームのエラーの影響の結果、最大のスループットが得られるのはWLAN7組の時であり、トータルスループットが33.6Mbpsとなった。また、WLAN組数が13組の場合の伝送レートの振舞について着目すると、全てのWLANが伝送レートを低下させているわけではないが、たった5組(全WLANに対する割合が約38%)のWLANの伝送レートが低下したことで、スループットが大きく低下した。最大スループットを得たWLAN7組以降WLAN組数が増加すると、コリジョンの増加とS/N悪化によるエラーの影響(フレームエラーになった場合、バックオフや再送、伝送レートの低下を招き、

結果的に Performance Anomaly を引き起こしてしまう影響)の方が強く出てスループットが低下する事が明らかになった。

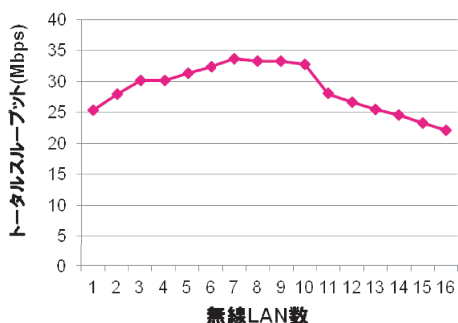


図 2 WLAN 数とトータルスループット (全ての WLAN は自動伝送レート)

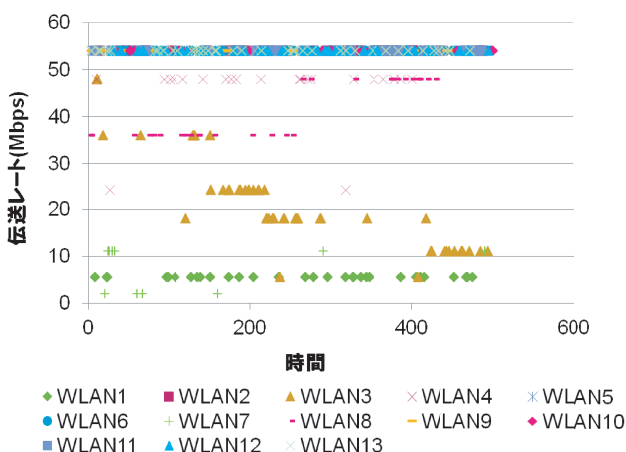


図 3 WLAN13 組の場合の伝送レート振舞

#### 4. 伝送レート制御方法の提案

3章で述べた通り、多数の WLAN が近接して存在する場合においては、伝送レートの低下が通信性能に大きく関わってくる。これらの事より、ここからは、提案する2つの伝送レート制御方法について述べる。1つ目は、5章で議論する伝送レート固定型制御、2つ目は、6章で議論するトラフィック量制限型制御である。

伝送レート固定型制御においては、全ての WLAN で協力して固定レート制御を行うことで、非常に高い改善効果が得られる。一方、全ての WLAN が固定レートで協力できないときには、トラフィック量制限型制御を用いる。トラフィック量制限型制御においては、協力できない、すなわち、レートを固定に設定できない WLAN は、トラフィック量を絞ることで、全スループットを向上させることができる。

#### 5. 伝送レート固定型制御

ここでは、通信性能の劣化の主要因である低伝送レートを避けるため、全ての WLAN の伝送レートを高い固定伝送レートにする制御方法を提案する。[4] 全ての WLAN の伝送レートを高い値で固定する事で、低レートの WLAN が無くなり、長時間のリソース占有がなされない。またキャプチャエフェクトの影響も大きいことから、ある WLAN 組数まではスループットは上昇すると考えられる。しかし、WLAN 数が増加することで S/N 比の悪化が想定されることから、コリジョンの結果がエラーとなり、WLAN 組数がある数を超えるとバックオフタイマーと再送のオーバーヘッドでスループットが低下すると考えられる。

伝送レートを固定する事で、キャプチャエフェクトを効かせた通信がどの程度効率の良くなされるのかを評価した。実験系の構成は 3.3 節と同様で、1~16 組の WLAN を使用し、全ての WLAN の伝送レートを 54Mbps に固定し、隣の AP との間隔を 100cm とした。1 組の WLAN 内での AP と端末は、直近に設置した。

上記のようなモデルで、WLAN 数を増加させた場合のトータルスループットを図 4 に示す。

その結果、WLAN 数が 16 組の時点では、全ての WLAN の伝送レートを 54Mbps にすることで、全ての WLAN が自動伝送レートの場合と比較すると、73%性能が向上する事を明らかにした。つまり、伝送レートを高いレートで固定させた事により、低伝送レートでリソースを占有し通信する WLAN が無くなり、その分高伝送レートの WLAN が通信できるようになった効果により、通信性能が向上した。

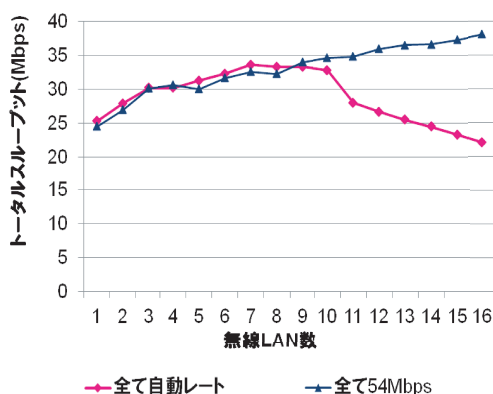


図 4 全ての WLAN が自動伝送レートの場合と全ての WLAN が固定伝送レートの場合の比較

#### 6. トラフィック量制限型制御

自動伝送レートの WLAN が存在する場合のスループット特性について調査する為に、まず 6.1 節で自動伝送レートの WLAN が 1 組だけ存在する場合の通信特性について

評価する．その後、6.2 節で、自動伝送レートの WLAN が存在した事による性能劣化を、トラフィック量をシェイピングする制御について議論する．

### 6.1 自動伝送レートの WLAN 存在時の性能劣化

ここでは、多数の固定伝送レートの WLAN の中に自動伝送レートの WLAN が存在する場合に、どの程度、通信性能が劣化するのかを明らかにした．

そこで、自動伝送レートの WLAN が 1 組だけ高伝送レート (伝送レート 54Mbps 固定) の WLAN 内に存在した場合に、どの程度性能が劣化するのかを検証した．

実験系の構成は 3.3 節と同様で、1~16 組の WLAN を使用し、1 組だけ自動伝送レートの WLAN を使用した．その他の WLAN の伝送レートは 54Mbps で固定にした．

上記のモデルで、WLAN 数を増加させた場合のトータルスループットを図 5 に示す．その結果、全ての WLAN の伝送レートを 54Mbps に固定した場合を理想状態とするとき、WLAN 数が 16 組のポイントでは、1 組だけ自動伝送レートの WLAN を入れた場合のスループットの低下割合は、全ての WLAN が自動伝送レートの場合の理想状態からの劣化割合の 30 %にもなった．

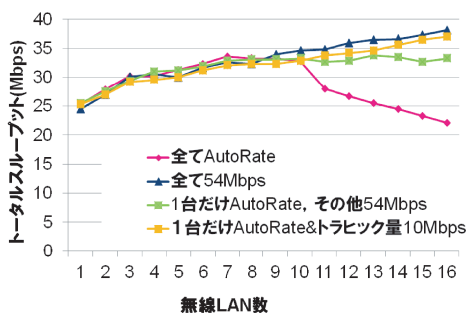


図 5 自動伝送レート混在時のトータルスループットとトラフィックシェイピングの効果

### 6.2 トラフィック量のシェイピングによる通信性能向上

ここでは、6.1 節で述べた、自動伝送レートの WLAN が固定伝送レートの WLAN 内に存在する場合の通信性能劣化を、自動伝送レートの WLAN のトラフィック量をシェイピングする事により、全 WLAN の性能を向上させる．自動伝送レートの WLAN のトラフィック量を 10Mbps にシェイピングした場合の、トータルスループット特性を図 5 に示す．また、13 組の高伝送レートの WLAN 内に自動伝送レートの WLAN が 1 組混在した場合において (図 5 の WLAN 数が 14 組の場合において)、自動伝送レートのトラフィック量をシェイピングした場合と、しない場合の伝送レートの振舞の差を図 6 に示す．

トラフィック量を 10Mbps にシェイピングした場合におい

ても、WLAN 数が 7 組前後では、キャプチャエフェクトと S/N 比が適切なバランスで保たれ、スループットが飽和状態となった．しかし、その後 WLAN 数が増加する場合には、WLAN 数の増加と共に S/N 比が悪化したとしても、トラフィック量をシェイピングした事により高伝送レートを維持する事が可能となり、シェイピングしない時と比べて全て 13 % 全体の性能が向上し、固定伝送レートの WLAN (理想状態) のスループットに近づいた．

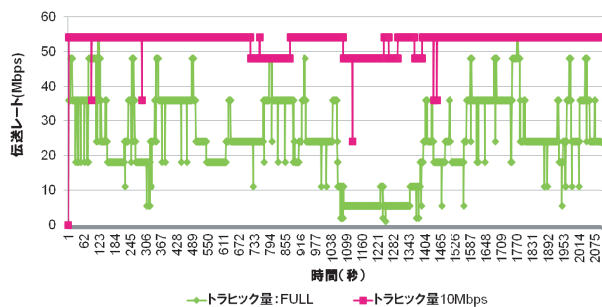


図 6 トラフィック量をシェイピングした事による伝送レートへの影響

## 7. おわりに

多数の WLAN が近接する場合の、キャプチャエフェクトの働きと Performance Anomaly の影響度を 1~16 組の WLAN の実機を用いて評価し、レート自動調整機能が性能劣化の主要因であることを示した．また、その性能劣化に対する対策として、(1) 伝送レート固定制御と (2) トラフィック量制限制御を提案し、評価した．

(1) 伝送レート固定制御では、全ての WLAN において固定伝送レートを採用する．これにより、全て自動伝送レートの場合と比べると約 73 % 性能が向上した．また、1 組でも自動レートの WLAN が存在する場合においては、全てが自動伝送レートの WLAN の場合と比較すると全体の性能劣化の割合が 30 %にもなる事を明らかにした．(2) トラフィック量制限制御については、複数の WLAN 内に、自動伝送レートの WLAN が存在する場合には、その WLAN のトラフィック量をシェイピングする．自動伝送レートのトラフィック量を 10Mbps にシェイピングすることにより、シェイピングしない時と比べて 13 %も全体の性能が向上した．

### 参考文献

- [1] Lacage M, Manshaei M.H, Turletti T, " IEEE 802.11 Rate AdAPtation: APractical APproach, " the 7th ACM international Symposium on Modeling Analysis and Simulation of wireless and mobile systems, pp126-134, 2004.
- [2] Saad Biaz, Shaoen Wu " Rate adAPtation algorithms for IEEE 802.11networks: A survey and comparison, " IEEE Symposium on Computersand Communications, Marrakech, pp.130-136, July 2008
- [3] Saeko Iwaki, Tutomu Murase, and Masato Oguchi:"Throughput Analysis and Measurement

on Real Terminal in Multi-rate Wireless LAN” In Proc. The 6th ACM International Conference on Ubiquitous Information Management and Communication(ICUIMC 2012), P3-12,Kuala Lumpur, Malaysia, Feb 2012.

- [4] 熊谷 菜津美, 磯村 美友, 村瀬 勉, 小口 正人 '多数の近接した無線 LAN におけるコンテキストウェアなマルチレート制御による通信品質向上' 第 6 回データ工学と情報マネジメントに関するフォーラム (DEIM2014), E8-6, 淡路夢舞台&ウェスティン淡路, 2014 年 3 月
- [5] 磯村 美友, 熊谷 菜津美, 村瀬 勉, 小口 正人 '移動無線 LAN の集中度合における干渉と競合の影響' 第 5 回データ工学と情報マネジメントに関するフォーラム (DEIM2013), F1-6, 磐梯熱海ホテル華の湯, 2013 年 3 月.
- [6] Jens Nachtigal, LANatolij Zubow, Jens-Peter Redlich: "The Impact of Adjacent channel Interference in Multi-Radio Systems using IEEE 802.11," IEEE IWCMC, 2008
- [7] PLANEX MZK-MF300N:  
<http://www.PLANEX.co.jp/product/router/mzk-mf300n/>
- [8] Nexus S:  
<http://www.android.com/devices/detail/nexus-s>
- [9] iperf:  
<http://sourceforge.net/projects/iperf/les/iperf/2.0.4source/iperf-2.0.4.tar.gz/download>
- [10] AirPcAP:  
<http://www.riverbed.com/jp/products/cascade/>
- [11] wireshark enhancements/airpcAP.php