

## マルチチャネル無線 LAN 環境におけるチャネル切替法の検討

## A Study on Channel Selection Method in Multi-Channel Wireless LAN

松田 慎太郎† 谷川 陽祐† 戸出 英樹†  
Shintaro Matsuda Yosuke Tanigawa Hideki Tode

## 概要

無線通信技術の進歩に伴い、様々な環境において無線ネットワークが利用されている。しかし、通信容量の制約やフレーム衝突、干渉などの問題を解決しつつ、さらなるネットワーク帯域の拡大およびチャネル利用効率の改善を行う必要がある。本研究では、インフラストラクチャモードの無線 LAN において、基地局のみ複数の送受信機を装備し、各送受信機が異なるチャネルを1つずつ利用するマルチチャネル環境によりネットワーク帯域を拡大する。さらに、隠れ端末問題を最小化するように無線端末のチャネル選択を制御することで衝突、干渉を減少させる。これにより、基地局ー無線端末間の通信スループットおよびその公平性を向上させる方式を提案する。最後に、計算機シミュレーションにより提案方式の評価を行う。

## 1. はじめに

近年、無線通信技術の進歩に伴い、様々な環境において無線ネットワークが利用されている。しかし、無線の特性上、通信容量の制約やフレーム衝突、干渉などの問題を解決しつつ、ネットワーク帯域の拡大およびチャネル利用効率の改善を行う必要がある。

無線ネットワークで広く用いられるチャネルアクセス制御方式IEEE 802.11 DCF (Distributed Coordination Function)[1][2]では、1つの無線チャネルが基地局と全無線端末間で共有される。そのため、端末数の増加に伴って異なる伝送フレーム間での衝突や干渉が増加し、ネットワークの通信スループットが低下する。また、RTS/CTS フレームによる制御は隠れ端末問題に対し有効な対処法であるが、フェージングなどによりRTS/CTSが傍受できない可能性があるため、完全に隠れ端末問題を解決できるとは限らない。

通信帯域を向上させる手段の1つとして、ネットワークのマルチチャネル化が挙げられる。ネットワーク内で複数チャネルを用いることにより、異なるチャネルで通信される複数のフレームは衝突することなく同時伝送が可能となる。この性質は、隠れ端末問題に代表されるチャネル干渉を防止できる点でも効果があり、1チャネルの通信容量を拡大するより高いスループットを達成することができる[3]。

マルチチャネル環境において端末が同時利用できるチャネル数は、装備する送受信機数に限られる。消費電力やハードウェアの複雑性の観点から、装備する送受信機は小さく抑えられることが一般的である。それゆえ、共通のチャネルを利用していない2端末は通信を行うことができないという制約がある。本制約下で利用可能なマルチチャネルプロトコルが多く提案されており、動作原理の

違いによる分類(Dedicated Control Channel, Common Hopping, Split Phase, Parallel Rendezvous)[4]や、IEEE802.11対応のハードウェアを用いた実装実験が行われている5)。これらのプロトコルは主にマルチホップ網を想定している。上記の同時利用可能なチャネル数に関する制約のため、送受信端末間で利用チャネルを合わせる機能や各チャネルの通信負荷を管理して低負荷チャネルを利用する機能が実現されている。

具体的には、Dedicated Control Channel[6][7][8][9][10]、Common Hopping[11][12]、Split Phase[13][14]に分類される方式では、全端末が共通のチャネルを利用する機会を設ける。送受信端末はこの共通チャネル上でのRTS/CTS交換により、データ送信に用いるチャネルを決める。近隣端末も共通チャネルを利用しているためこれらのRTS/CTSを傍受することができ、傍受したRTS/CTSの情報に基づき各チャネルの通信負荷を管理する。一方、Parallel Rendezvous[15][16]に分類される方式では、各端末が決められたhome hopping sequenceというスケジュールに従い、利用チャネルを切り替える。シードの異なる端末は遷移スケジュールが異なるため、送信端末は受信端末が現在利用しているチャネルに遷移することで、データ送信を行うことができる。

このように、既存のマルチチャネルプロトコルでは、無線マルチホップ網を想定しているため、上記のような機能が必要となる。さらに、隠れ端末への対処が不十分であり、個々のチャネルが非効率に利用される場合がある。本稿では、インフラストラクチャモードの無線LAN環境を想定する。本環境では、2章で述べる実装により、基地局は常に全無線端末と通信可能であり、制御に有益な情報を容易に取得することができる。本研究では、このような無線LAN環境において、各無線端末が検知した隠れ端末情報や基地局が測定した各チャネルの通信負荷に基づき、より高度なチャネル切替制御について検討する。このような制御により、隠れ端末によるフレーム衝突や干渉が抑制され、その結果、各チャネルの利用効率の向上が期待される。

## 2. 提案方式

## 2.1 想定環境

無線LAN環境では図1のように、基地局のみが複数の送受信機を装備し、各送受信機に専用で使えるチャネルを1つずつ割り当てることで、マルチチャネル環境が実現される。基地局はチャネル切替えを行わずに全チャネルを同時利用できる。端末は1つの送受信機を装備し、2.3節で述べるチャネル選択制御に従い適切なチャネルを利用する。

† (社) 情報処理学会, IPSJ

‡ 大阪府立大学, Osaka Prefecture University Department of Computer Science and Intelligent Systems

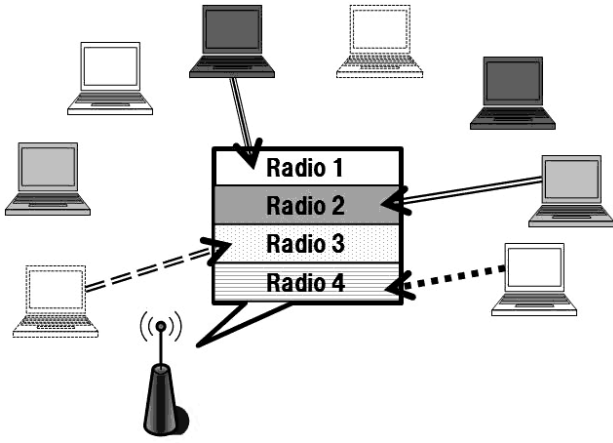


図1 提案する基地局と端末モデル

## 2.2 隠れ端末の探知および通知手法

各無線端末は、隠れ端末リストと非隠れ端末リストを用いて自端末に対する隠れ端末と非隠れ端末を管理する。図2(a)に示すように、ある端末がRTSを傍受することなく対応するCTSを傍受した場合、そのCTSの受信端末が自端末と隠れ端末関係であると判定する。逆に、RTSを傍受できていた場合、RTS送信端末を非隠れ端末と判定する。また、隠れ端末と判定済みの端末からのRTSを傍受した場合、当該端末を非隠れ端末とすることで隠れ端末の誤探知を修正する。隠れ端末情報および非隠れ端末情報は、それぞれTSTAHT, TSTANotHTの期間更新されなければ消去される。

なお、互いにチャンネル伝送距離の限界付近に位置する2端末は、電波状況により他端末からのフレームが傍受できる場合とできない場合がある。このような状況では、非隠れ端末と判定済みの端末からの干渉を受ける可能性があるため、TSTAHTおよびTSTANotHTをTSTAHT > TSTANotHTを満たすようにそれぞれ設定する。これにより、非隠れ端末であると信頼する期間を短く限定し、非隠れ端末の誤探知による干渉を抑制する。図2(b)に示すように、各端末は、基地局へのRTS送信タイミングで、基地局に対して未通知の隠れ端末情報があれば、隠れ端末情報を付加したRTSを基地局に送信する。

## 2.3 チャンネル切替制御法

基地局は、各端末からの受信スループットに関する指数移動平均値および端末から伝えられる隠れ端末情報を随時更新する。基地局はこの隠れ端末情報に基づき、隠れ端末による干渉の最小化とチャンネルごとの通信データ量の均等化を目的関数として、端末を各チャンネルに分配する。

受信スループットの指数移動平均値EWMA<sub>now</sub>は以下の式によって端末ごとに求める。

$$EWMA_{now} = \alpha \times \text{Throughput}_{now} + (1 - \alpha) \times EWMA_{prev} \quad (1)$$

$$\text{Throughput}_{now} = \frac{\text{recvdBytes}}{EWMA_{duration}} \quad (2)$$

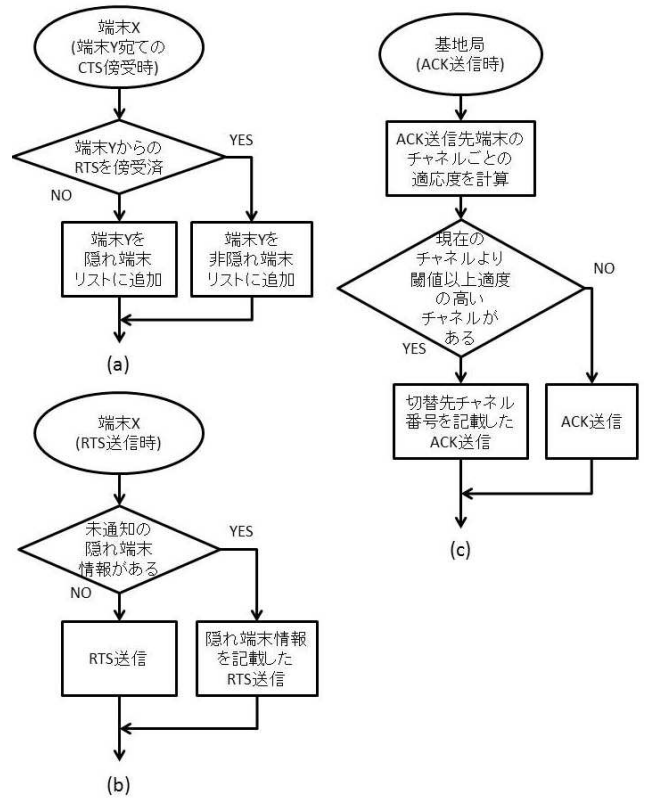


図2 提案方式の処理手順

ここで、 $\alpha$ は平滑化係数、EWMA<sub>duration</sub>は指数移動平均の区間の長さ、recvdBytesはEWMA<sub>duration</sub>区間内に受信したデータのバイト数である。

チャンネル切替制御の動作を図2(c)に示す。基地局は、端末へのACK送信時に、以下の式(3)によりチャンネル $i$ の適応度 $F_{ch,i}$ を計算し、必要に応じて当該端末へチャンネル切替を指示する。ACK送信時にチャンネル選択を行う理由は、頻繁なタイミングのチェックを通してチャンネルの帯域を多く利用している端末を迅速に発見し、チャンネル切替を行うためである。

$$F_{ch,i} = \frac{\text{ch}_i \text{に所属する隠れ端末からのEWMA}_{now} \text{の総和(EWMA}_{ch,i})}{\text{各チャンネルでのEWMA}_{ch,i} \text{の平均値}} \quad (3)$$

現在のチャンネルより適応度の高いチャンネルがある場合は、切替先のチャンネル番号を付加したACKを送信する。このACKを受信した端末は、即座に指定されたチャンネルへ切替える。ただし、適応度値の非常に小さな差によるチャンネル切替頻度の増加を抑制するために閾値SWITCH\_THRESHOLDを設定し、現チャンネルの適応度との差が閾値より小さければ切替は行わない。

## 3. 性能評価

前述の提案方式の性能を、QualNet 4.5.1[17]を用いた計算機シミュレーションにより評価した。

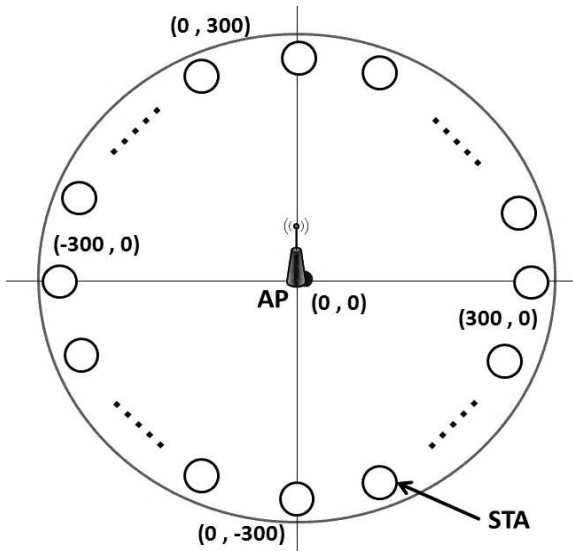


図3 シミュレーションモデル

シミュレーションモデルを図3に示す。基地局(AP)の周りに端末(STA)が一様に固定配置されている。各端末から基地局までの距離は全て300mである。無線チャンネルの伝送レートは2Mbps, チャンネル数は4, 伝搬距離は約340mとする。また, K factor を0.0, 最大移動速度を1.0m/sとしたRician フェージングを発生させる。

本稿では, 初期のチャンネルの割り当て状態について以下のように表す。

- **SingleCH:** 全端末に同一チャンネルを割り当てる
- **RandCH:** 各端末にランダムにチャンネルを割り当てる
- **BestCH:** 図4のように位置的に隠れ端末問題が最小となるよう計画的にチャンネルを割り当てる

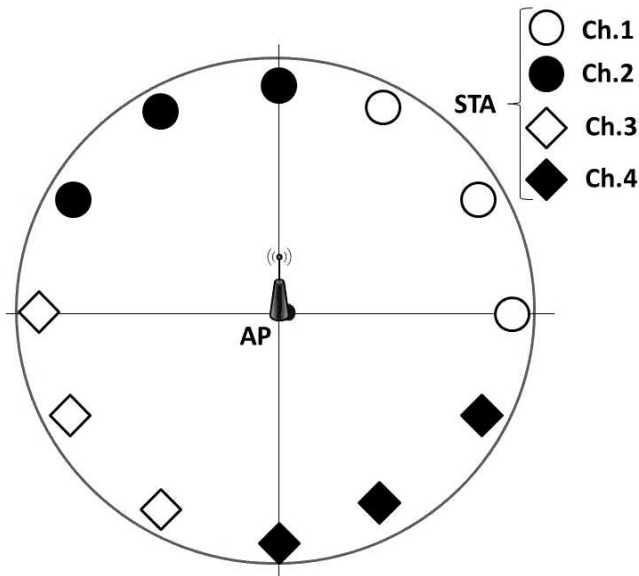


図4 端末数12のBestMC

本評価で用いたパラメータの値を表1に示す。また, 公平性の指標として, 次式で定義されるfairness index[18]を用

いた。

$$FI = \frac{(\sum_{i=1}^n x_i)^2}{n \sum_{i=1}^n x_i^2} \quad (4)$$

ここで,  $x_i$  は基地局における端末*i*からの受信スループット,  $n$  は端末数を表す。

表1 パラメータの設定値

$\alpha$	0.1
EWMAduration	1.0sec
EWMA <sub>0</sub>	1000
TSTAHT	5.0sec
TSTAnotHT	1.0sec
TAPHT	10.0sec
SWITCH_THRESHOLD	0.1

### 3.1 全端末が常にフローを送信する環境での評価(シナリオ1)

まず, 全端末が一定の送信レート (パケットサイズ 512Byte, 送信間隔20msec) でフローを基地局へ送信する環境において評価を行った。

図5, 6は, それぞれ基地局における合計受信スループット, 受信スループットに関する送信端末間のfairness indexを表している。各グラフについて, 横軸は送信端末の合計数を表す。凡例については, Proposalは提案方式, Staticは初期のチャンネル割り当て状態からチャンネル切替を一切行わない方式であり, (SingleCH), (RandCH), (BestCH)は3章冒頭で述べた初期のチャンネル割り当て状態を示す。よって, Static(SingleCH)は, DCFと等価である。

図5より, Static(SingleCH)では, 端末数が8を超えると受信スループットが低下する。これは, 全端末の合計送信レートが単一チャンネルで利用できる実効帯域を超えたためである。一方, チャンネルごとの端末数が均一で, かつ隠れ端末問題が最小となるようチャンネルが割り当てられているStatic(BestCH) (本評価ではidealなケースと言える)では, 端末数が40となっても安定したスループット性能を達成し得ることがわかる。

これに対し, 提案方式のProposal(SingleCH), Proposal(RandCH)は, 初期のチャンネル割り当て状態にかかわらず, 理想的なチャンネル割り当て状態であるStatic(BestCH)に近いスループット性能を達成している。これは, 隠れ端末探知に基づき各端末を適切なチャンネルへ切替える制御により, チャンネル割り当て状況をBestCHの状態に近づけることができたためである。なお, 提案方式では, 一度隠れ端末を通知すると有効期間切れにより当該情報が消去され, かつ再探知されるまで, 隠れ端末情報を付加したRTSを送信することはない。そのため, 追加制御によるオーバーヘッドの影響は無視できる程度の小さいものである。

また, 図6より, 提案方式は, 公平性においてStatic(BestCH)と同等, もしくはそれ以上の性能を示している。これは, 提案方式では, 特定のチャンネルが一時的に過密となる状況が回避されることで特定のフローのスループット低下を防ぐことができたためである。図7の例のように, 隠れ端末問題を軽減させるようにチャンネル切替が行われる。

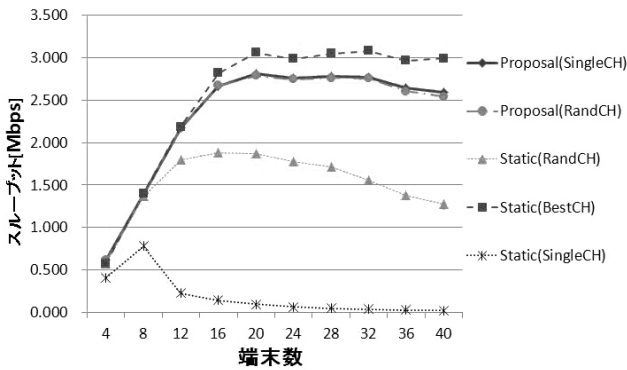


図5 基地局における合計受信スループット (シナリオ 1)

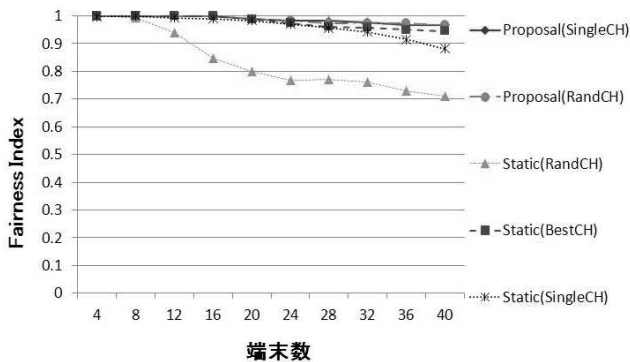


図6 受信スループットに関する送信端末間のfairness index (シナリオ1)

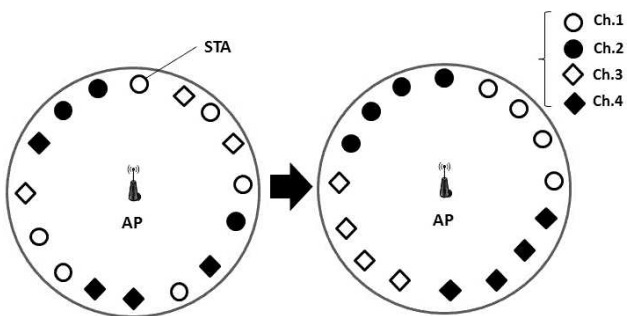


図7 提案方式におけるシミュレーション開始時と終了時のチャンネル変化例 (シナリオ1)

### 3.2 全端末が常にフローを送信する環境での評価(シナリオ 2)

次に、各端末のフロー送信について、送信継続期間と非送信期間を交互に繰り返す環境で評価を行った。送信継続期間と非送信期間は、ともに指数分布に従うものとする。送信継続期間内では、各端末が一定の送信レート(パケットサイズ512Byte, 送信間隔20msec)でフローを基地局へ送信する。なお、送信継続期間の平均値は全端末において1.0secであり、非送信期間は各端末がランダムに以下の3つの内1つを選択する。

- Dense Flow : 非送信期間の平均値が1.0secのフロー
- Middle Flow : 非送信期間の平均値が3.0secのフロー
- Sparse Flow : 非送信期間の平均値が5.0secのフロー

図8, 9は、本評価環境における基地局での合計受信スループット、受信スループットに関する送信端末間のfairness indexを表している。横軸および凡例の定義は3.1節と同じである。

これらの結果より、3.1節と比較して、端末数が少ないときは、提案方式ProposalとStatic(BestCH)のスループット性能差が小さいことがわかる。さらに、端末数が増えるとProposalが位置的に隠れ端末最小の理想状態であるStatic(BestCH)のスループット性能を上回る。これは、時間的に各端末の送信レートが変化することで、常にStatic(BestCH)のチャンネル割り当て状態が理想的な状態とは限らず、一方で提案方式はレートの変化に応じてチャンネル割り当て状態を変更できるためである。また、シナリオ1の場合と同様に図9より、提案方式は、公平性においてStatic(BestCH)と同等の性能を示している。図10の例のように、隠れ端末問題への対応に加え、過密フローを発生させる端末を重点的に考慮し、負荷分散されるようにチャンネル切替が行われる。

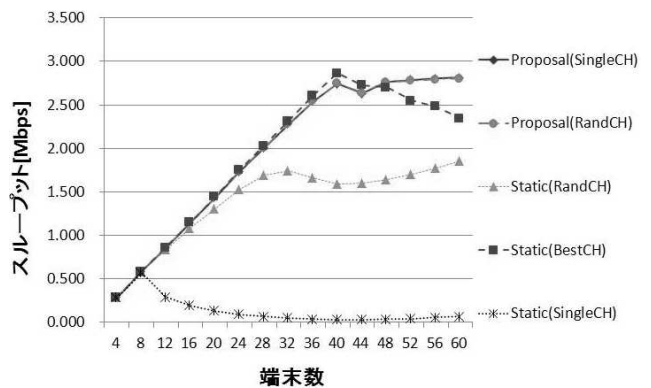


図8 基地局における合計受信スループット (シナリオ 2)

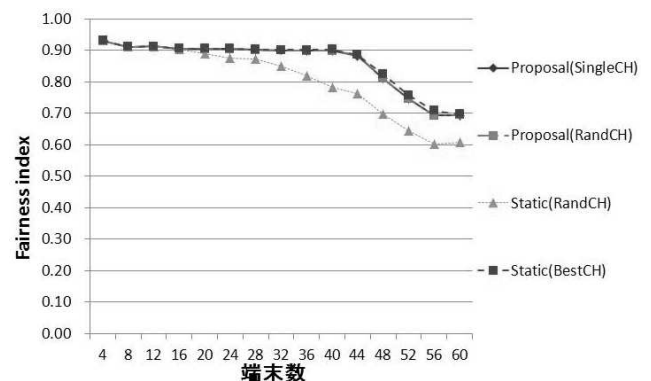


図9 受信スループットに関する送信端末間のfairness index (シナリオ2)

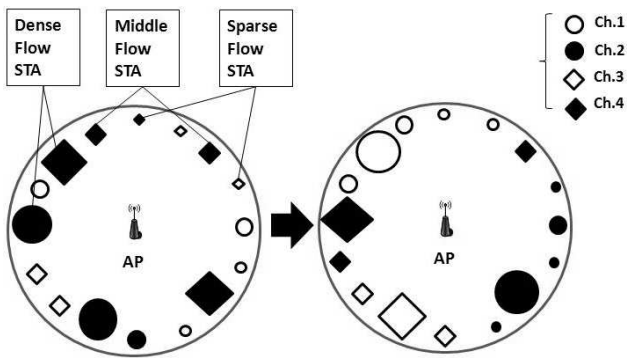


図10 提案方式におけるシミュレーション開始時と終了時のチャンネル変化例 (シナリオ2)

#### 4. まとめ

本稿では、マルチチャンネル無線LAN環境を想定し、基地局のみが複数の送受信機を装備した環境の下で、無線端末の利用するチャンネルを動的に切替える方式を提案した。基地局が端末から通知された隠れ端末情報および自身が計測した端末ごとの受信スループットの指数移動平均値に基づき、端末を最適なチャンネルに分配する制御を行うことで、ネットワーク全体のスループット性能および端末間のスループット公平性の向上を図った。計算機シミュレーションによる性能評価を通じ、動的なチャンネル切替を行わない方式と比較してスループット性能および端末間のスループット公平性の向上を確認した。また、時間ごとにデータ送信レートが変化する環境では、提案方式がさらに有効であることを示した。

今後の課題としては、適切な切替が行われていることを示す定量的な情報の取得や提案方式への対応端末と非対応端末が混在する状況下での性能評価などが挙げられる。また、端末主導のチャンネル切替などによって、より積極的に空きチャンネル帯域を有効利用できる方式等の検討も行う予定である。

#### 5. 参考文献

- [1] IEEE Std 802.11-1999 (Reaff 2003), Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical layer (PHY) specifications, 2003.
- [2] B. P. Crow, I. Widjaja, J. G. Kim, and P. T. Sakai, "IEEE 802.11 Wireless Local Area Networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 35, no. 9, pp. 116{126, Sept. 1999.
- [3] H. Lee, K. Han, Y. Hwang, and S. Choi, "On the Multi-Channel Access Schemes of the Evolving WLANs," in *Proc. the 4th International Conference on Future Internet Technologies (CFI 2009)*, pp. 43{44, New York, NY, USA, June 2009.
- [4] J. Mo, H.-S. W. So, and J. Walrand, "Comparison of Multichannel MAC Protocols," in *Proc. IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 7, no. 1, pp. 50.65, Jan. 2008.
- [5] L. Le and I. Rhee, "Implementation and experimental evaluation of multi-channel MAC protocols for 802.11 networks," *Ad Hoc Networks*, vol. 8, no. 6, pp. 626{639, Aug. 2010.
- [6] S.-L. Wu, C.-Y. Lin, Y.-C. Tseng, and J.-P. Sheu, "A New

- Multi-Channel MAC Protocol with On-Demand Channel Assignment for Mobile Ad-hoc Networks," in *Proc. ISPAN*, pp. 232{237, Dec. 2000.
- [7] S.-L. Wu, Y.-C. Tseng, C.-Y. Lin, and J.-P. Sheu, "A Multi-Channel MAC Protocol with Power Control for Multi-hop Mobile Ad-hoc Networks," *The Computer Journal*, vol. 45, no. 1, pp. 101{110, 2002.
- [8] W.-C. Hung, K. L. E. Law, and A. Leon-Garcia, "A Dynamic Multi-Channel MAC for Ad-hoc LAN," in *Proc. 21st Biennial Symposium on Communications*, pp. 31{35, Kingston, Canada, June 2002.
- [9] N. Choi, Y. Seok, and Y. Choi, "Multi-Channel MAC Protocol for Mobile Ad Hoc Networks," in *Proc. IEEE VTC*, vol. 2, pp. 1379.1382, Oct. 2003.
- [10] J. Shi, T. Salonidis, and E. W. Knightly, "Starvation Mitigation Through Multi-Channel Coordination in CSMA Multi-hop Wireless Networks," in *Proc. ACM MobiHoc*, pp. 214{225, Florence, Italy, May 2006.
- [11] A. Tzamaloukas and J. J. Garcia-Luna-Aceves, "Channel-Hopping Multiple Access," in *Proc. IEEE ICC*, vol. 1, pp. 415.419, New Orleans, LA, USA, June 2000.
- [12] A. Tzamaloukas and J. J. Garcia-Luna-Aceves, "Channel-Hopping Multiple Access with Packet Trains for Ad Hoc Networks," in *Proc. IEEE MoMuC*, Tokyo, Japan, Oct. 2000.
- [13] J. So and N. Vaidya, "Multi-Channel MAC for Ad Hoc Networks: Handling Multi-Channel Hidden Terminals Using A Single Transceiver," in *Proc. ACM MobiHoc*, pp. 222{233, Tokyo, Japan, May 2004.
- [14] J. Chen, S.-T. Sheu, and C.-A. Yang, "A new multichannel access protocol for IEEE 802.11 ad hoc wireless LANs," in *Proc. IEEE PIMRC*, vol. 3, pp. 2291.2296, Sept. 2003.
- [15] P. Bahl, R. Chandra, and J. Dunagan, "SSCH: Slotted Seeded Channel Hopping for Capacity Improvement in IEEE 802.11 Ad-Hoc Wireless Networks," in *Proc. ACM MobiCom*, pp. 216{230, Philadelphia, PA, USA, Sept./Oct. 2004.
- [16] H.-S. W. So, J. Walrand, and J. Mo, "McMAC: A Parallel Rendezvous Multi-Channel MAC Protocol," in *Proc. IEEE WCNC*, pp. 334.339, Hongkong, China, Mar. 2007.
- [17] QualNet Simulator Version 4.5.1, Scalable Network Technologies, <http://www.scalable-networks.com/>
- [18] R. Jain, A. Durresti, and G. Babic, "Throughput Fairness Index: An Explanation," *ATM Forum/99-0045*, Feb. 1999.