



Wireless LANにおけるアクセスポイント選択方式の提案とその評価

福田 豊¹

1 はじめに

無線 LAN を利用したインターネット接続が増加しています。1997 年に登場した無線 LAN の最初の規格である 802.11 では最大通信速度が 2 Mb/s と十分ではありませんでしたが、その後 1999 年に登場した 802.11b では最大通信速度が 11 Mb/s に、また 2003 年に登場した 802.11g では最大通信速度が 54 Mb/s まで向上し、高速でケーブルに縛られない柔軟なインターネット接続が可能となっています。そのため、これまで有線 LAN を利用していた家やオフィス等の無線 LAN 化だけでなく、ホテルや空港のラウンジ、駅やカフェ等での無線 LAN を通したインターネット接続サービスも始まっています。このように広く普及が進む無線 LAN は、次世代通信ネットワークを構成するための重要な基盤となると考えられています。

本学飯塚キャンパスにおいても、昨年度情報コンセントサービスが開始され、ケーブルや情報端末数の制約に関係なく、無線 LAN の AP (Access Point) の電波が到達する範囲内でインターネット接続が可能となっています。ただし電波が届く範囲は屋外で 150m、障害物が少ない屋内で 50m 程度といわれ、大学のキャンパスのような広い範囲をカバーするためには複数の AP を設置する必要があります。また AP が提供する無線通信資源は、その AP に接続する STA (Station, 端末) によって共有されるため、接続する STA 数が増加するにつれ、STA1 台当たりのスループットは低下していきます。一般には 1 台の AP につき STA20 台程度が限度といわれています。講義室や国際会議等での無線 LAN 利用を考えると、100 人かそれ以上の方が無線 LAN を利用することになり、1 台の AP では十分な通信速度を提供することが困難です。よって必要に応じて複数台の AP を設置した無線 LAN 網を構築し、通信容量を拡充していく必要があります。

このように通信範囲を広げ収容 STA 数を増やすために複数の AP によって構築された無線 LAN 網では、STA の AP 選択が非常に重要な問題となります。現在市販されている無線 LAN カードでは、受信電波強度のみを指標として接続先の AP を選択するため、AP 間の接続 STA 数が偏り、無線帯域を有効かつ公平に利用できなくなります [3][4]。また現在の無線 LAN 製品には負荷分散機能を有するものがありますが、これらの製品はベンダー独自の負荷分散ポリシーにより AP 側で STA を再分配するもので、異なるベンダーの機器間に互換性が無いほか、導入コストが非常に高くなってしまいます [5]。そこで本稿では、無線 LAN 網から得られる様々な情報をもとに、STA 自身が自律的に AP を選択するアルゴリズムを提案し、その効果をシミュレーションによって明らかにします。そのシミュレーションについ

¹情報科学センター, fukuda@isc.kyutech.ac.jp

て述べる前に、まず無線 LAN の技術的な概要を 2 章で示します。3 章では提案するアルゴリズムについて詳細を説明します。4 章ではシミュレーションモデルについて説明し、5 章でその結果を示します。最後に 6 章でまとめます。

2 IEEE 802.11 無線 LAN

IEEE 802.11 無線 LAN 規格は 1997 年 IEEE によって標準化され、その後 1999 年 11 月に最大通信速度が 2 Mb/s から 11 Mb/s まで高速化された IEEE802.11b、および、最大 54Mb/s の通信速度を実現する IEEE802.11a が標準化されました。さらには IEEE802.11b との互換性を保ちながら高速化を実現する IEEE802.11g が 2003 年 6 月に標準化されました。本章ではこのように広く普及している IEEE 802.11 ファミリーについて技術的な概要を述べ、その現状と問題点について説明します。また提案手法で利用する、各 STA が期待できるスループットについての簡単な解析を示します。

2.1 IEEE 802.11 無線 LAN の規格

現在利用されている無線 LAN の規格を表 1 に示します。

表 1: 無線 LAN 規格

無線 LAN 規格	周波数帯	伝送速度	チャンネル数
IEEE 802.11b	2.4GHz	1 ~ 11Mb/s	14(干渉有)
IEEE 802.11a	5GHz	6 ~ 54Mb/s	4
IEEE 802.11g	2.4GHz	1 ~ 54Mb/s	14(干渉有)

IEEE 802.11b/g が利用する 2.4GHz 帯は、国内では 2.400 ~ 2.497GHz を使用することができます。規格では、2.400 ~ 2.4835GHz を 5MHz 間隔で区切った 13 個のチャンネルと、2.484GHz 帯の計 14 個のチャンネルを規定しています。実際の通信には、チャンネル同士で重ならない 4 チャンネル分を使用するので、1 ~ 13 の間に最大 3 個のチャンネルと第 14 チャンネルの計 4 チャンネルが、互いに干渉しない完全に独立した通信チャンネルとなります。2.4GHz 帯は ISM (ISM band, Industrial Science and Medical band) 帯であり、コードレス電話、無線を使う液晶テレビ、アマチュア無線等多くの機器がこの周波数帯を利用しているため、電波干渉が問題となります。特に電子レンジにより大きな干渉を受けてしまうことが知られています。一方の IEEE 802.11a では、5GHz を利用します。日本国内では、気象レーダーなどに使われている帯域と重複するため、無免許の特定小電力無線で利用できるのは 5.15 ~ 5.25GHz の 100MHz のみとなっています。また空中線電力は 10mW 以下と規定されており、屋内での使用に限定されています。

IEEE 802.11b では、フレーム送信前に共通情報を 1Mb/s の DBPSK (Differential Binary Phase Shift Keying) 変調で送信します。転送速度や変調方式などの情報もここに含まれます。転送速度としては、1, 2, 5.5, 11Mb/s が、変調方式としては、従来からの DSSS (Direct Sequence Spectrum Spread) 方

式に加えて 802.11b で拡張された 5.5, 11Mb/s 用の CCK(Complementary Code Keying) が規定されています。そして共通情報の後に続くデータフレーム本体を指定された方式に切り換えて復調します。

IEEE 802.11a では、狭帯域の搬送波を複数使って伝送する OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplex ~ 直交周波数分割多重) という変調方式を用いています。1 チャンネルあたりの占有周波数帯幅は 16.6MHz で、国内で使用できる 5.2GHz 帯には、ガードバンド含む 20MHz の帯域が 4 チャンネル用意されています。この帯域はデータ用の 48 本と、パイロット信号用 4 本の計 52 本の狭い帯域に分割され (1 本辺り 0.3125MHz)、それぞれの帯域で搬送波 (サブキャリア) が立てられます。そして個々のサブキャリアを 0.25MHz の変調速度で個別に変調し、全体を使ってデータを伝送します。

IEEE 802.11g は、IEEE 802.11b をベースに、20Mbps を越える高速伝送モードをサポートする拡張規格です。基本仕様は従来の 802.11b に 5GHz 帯を使う 802.11a の技術を合体させた規格になっています。IEEE 802.11g では新しい変調方式である 802.11a の OFDM モードを追加しています。そしてデータパケットの先頭に OFDM モード用の情報などを入れ、6 ~ 54Mbps の OFDM モードに移行しています。IEEE 802.11b の方式がそのまま継承されているので、既存の無線 LAN カードや AP とはこれまで通りの 802.11b モードで通信できます。また 802.11g をサポートする無線 LAN カードや AP とは IEEE 802.11a と同じ OFDM モードで高速な通信を行うことができます。ただし、6Mbps で送信が始まる 802.11a に比べると、低速な手順が余分に加わるために、オーバーヘッドが若干増えてしまいます。

このような無線 LAN の標準化を行う代表的な国際機関は、IEEE の 802 委員会配下にあるワーキンググループ 11 です。そのワーキンググループ下のタスクグループとその活動内容を表 2 に示します。

表 2: 無線 LAN 規格

グループ名	検討内容	現状
TGa	5GHz 無線 LAN 検討 (OFDM 変調)	標準化済み
TGb	2.4GHz 無線 LAN 検討 (CCK 変調)	標準化済み
TGc	MAC レイヤ補足検討	活動終了
TGd	電波規則更新	標準化済み
TGe	QoS のための MAC 層プロトコル強化	審議中
TGf	AP 間プロトコル仕様の策定	審議中
TGg	802.11b の高速化拡張仕様	標準化済み
TGh	欧州対応 802.11a	審議中
TGi	セキュリティのための MAC 層プロトコル強化	審議中
TGj	日本向け 4.9 ~ 5GHz 利用 (屋外の仕様策定)	審議中
TGk	無線資源の有効活用	審議中
TGm	802.11a/g などの仕様修正	審議中
TGn	次世代無線 LAN	審議中
WNG SC	次世代無線 LAN 検討委員会	審議中
HT SG	高速スループット研究	審議中

すでに標準化を終え活動を終了させているタスクグループもありますが、さらなる高速化等を目指した新たなタスクグループが承認されるなど、活発な標準化活動が現在でも続いています。

2.2 IEEE 802.11 ネットワーク形態

IEEE 802.11 無線 LAN を構成する最も基本的な構成要素は、複数の STA によって構成される BSS (Basic Service Set) です。BSS にはアドホックネットワークとインフラストラクチャネットワークの 2 つの種類があります。アドホックネットワークでは、図 1 に示すように STA は互いに直接通信します。一方インフラストラクチャネットワークでは、図 2 に示すように STA は他の STA や無線 LAN 外のネットワークと AP を経由して通信します。この点で AP は携帯電話網の基地局と類似しています。現在の無線 LAN 網は殆どインフラストラクチャネットワークによって構築されており、本稿ではこのインフラストラクチャネットワークを対象としています。

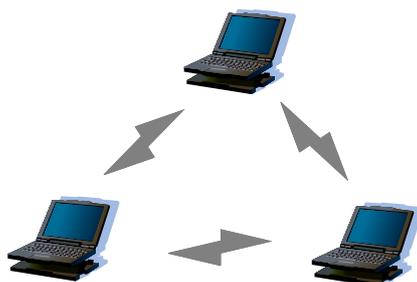


図 1: アドホックネットワーク

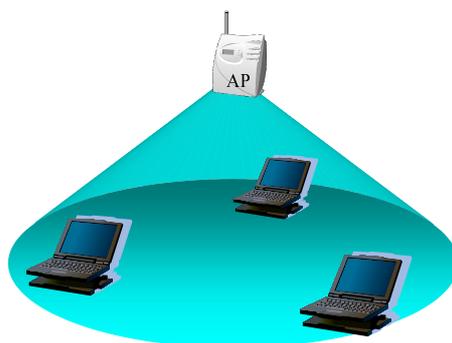


図 2: インフラストラクチャネットワーク

冒頭でも述べたように、1 つの AP によってカバーできる通信距離や通信速度は限られています。よって通信距離と通信容量を拡充するためには、複数の BSS を組み合わせた無線 LAN 網を構築する必要があります。この複数の BSS によって構成される無線 LAN 網のことを ESS (Extended Service Set) と呼びます。ESS を図 3 に示します。同じ ESS 内の STA は互いに通信することができ、1 つの BSS から他の BSS に透過的に移動することが出来ます。ESS は複数の BSS によって構成されますが、この BSS 間は DS (Distribution System) によって接続されます。DS は 1 つの AP が他の AP に所属している STA や無線 LAN 外部のネットワークまでフレームを送信できる機構を有しています。そのため DS は異なる BSS 間をつなぐバックボーンだと考えることも出来ます。この DS には大抵の場合イーサネットが利用されています。

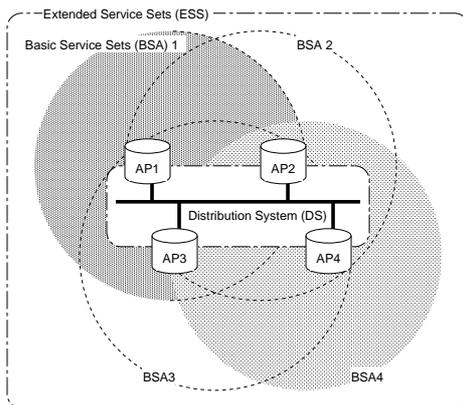


図 3: Extended Service Set

2.3 無線 LAN における Medium Access Control

無線 LAN においては、STA や AP がどのようなタイミングで相手にデータを送信するかや、通信媒体である無線をどのように利用するかなどを規定する MAC (Medium Access Control) は非常に重要な基本機能です。IEEE 802.11 無線 LAN における MAC としては、PCF(Point Coordination Function) と DCF(Distributed Coordination Function) という 2 つのモードがあります。前者の PCF は、AP が STA に対して送信を許可するポーリングを行う集中制御型です。そのためフレームの衝突や STA 間の競合が発生しません。一方後者の DCF は、各 STA が衝突を前提として CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) により自律分散的に通信し合う分散制御型です。同じような通信方式としてイーサネットが利用している CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection) がありますが、無線 LAN では自 STA がフレームを送信中の場合、そのフレームと他のフレーム間の衝突を検知することが不可能であるため、CSMA/CD ではなく、CSMA/CA を用いています。また衝突無く正しく相手に到達しているかを判断するために、誤りのないフレームを受け取った受信側は MAC 層の ACK(Acknowledgement) を返します。IEEE 802.11 無線 LAN ではこの DCF を必須の機能とし、PCF をオプションとして定義しています [1]。よって本稿では DCF を対象とします。

無線 LAN ではパケットの種別毎に異なる優先度が与えられています。例えば、MAC 層の ACK フレームにはデータフレームよりも高い優先度が与えられています。この優先度を与えるために、3 つの異なった IFS(Inter Frame Space) が定義されています。図 4 に示すとおり最も優先度が高いのは SIFS(Short IFS)、次が PIFS (PCF IFS)、最後に DIFS (DCF IFS) となっています。SIFS は MAC 層の ACK フレームなどに用いられます。PIFS は PCF モードで用いられ、AP が STA に送信権を与える時に使用します。DCF はデータフレームを送信するときに用いられます。

次にデータの送信に用いられる CSMA/CA の動作について説明します。図 5 に CSMA/CA を用いた基本的なデータ送信を示します。最初に STA は無線チャンネルがビジーかどうかをチェックします。もし無線チャンネルがビジーであれば、STA はチャンネルがアイドル状態に戻るまで待ち、その後さらに DIFS 期間待った後、ランダムなバックオフ時間を計算します。この DIFS 後に STA が計算するランダムな時間を CW (Contention Windows) と呼びます。CW の初期値の範囲は 0 - 31 です。そしてこのランダムに決めたバックオフタイマーを、無線チャンネルが再びビジーになるか、バックオフタイマーが 0 にな

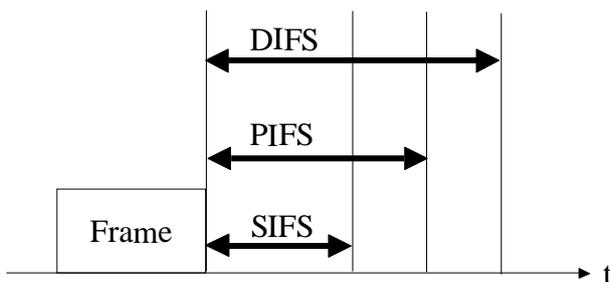


図 4: Some IFS relationships

るまで減らしていきます。もしバックオフタイマーが 0 になる前に無線チャネルが再びビジーになった場合は、STA は現在のバックタイマー時間を保持し、無線チャネルがアイドル状態になった後に保存しておいたバックオフタイマーを減らしていきます。バックオフタイマーが 0 になると、STA はフレームを送信します。2 台以上の STA が同時にフレームを送信すると衝突が発生してしまいます。この衝突を MAC 層の ACK が帰ってこなかったことによって検出した各 STA は、下記の式に従って新しいバックオフタイマーを計算します。

$$Backoff_time = \lfloor 2^{4+i} \times rand() - 1 \rfloor \times Slot_Time$$

ランダムバックオフタイムは整数値をとります。rand は [0, 1] の範囲の一樣ランダム変数で、Slot_Time は物理層のパラメータです。STA は衝突が発生するたびに i を 1 つずつ増加させ、そのフレームの送信に成功すると i を 1 にリセットします。この CSMA/CA により、すべての STA は平等に無線チャネルにアクセスする権限を得ることが出来、その無線資源も平等に共有することになります。

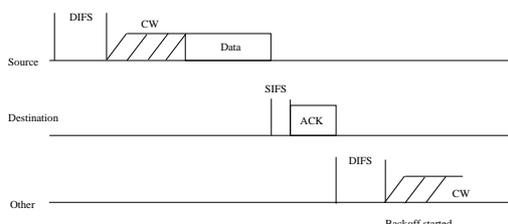


図 5: Transmission of DATA Packet

2.4 隠れ端末問題

ここまでで CSMA/CA を用いたデータ送信について説明しました。しかし無線 LAN では、距離や壁などの障害物により、ある STA が他の STA の通信を検出できない場合、隠れ端末問題 [10] が発生します。図 6 を用いて隠れ端末問題を説明します。図 6 に示すように、STA1 と STA2 の 2 台の STA と 1 台の AP があり、STA1 と STA2 の間に障害物がある (または、距離が離れている) とします。このとき AP と STA1、AP と STA2 は通信することができますが、STA1 と STA2 の間では電波が到達できず、互いの通信を検知することが出来ません。もし STA1 から AP へデータを送信中に、STA1 の存在を検

知出来ない STA2 がデータの送信を始めると，AP においてフレームの衝突が発生してしまいます．隠れ端末が存在すると，キャリアセンス機能が有効に機能しないため，CSMA/CA 方式ではフレームの衝突の頻度が増し，スループット特性が悪化してしまいます．

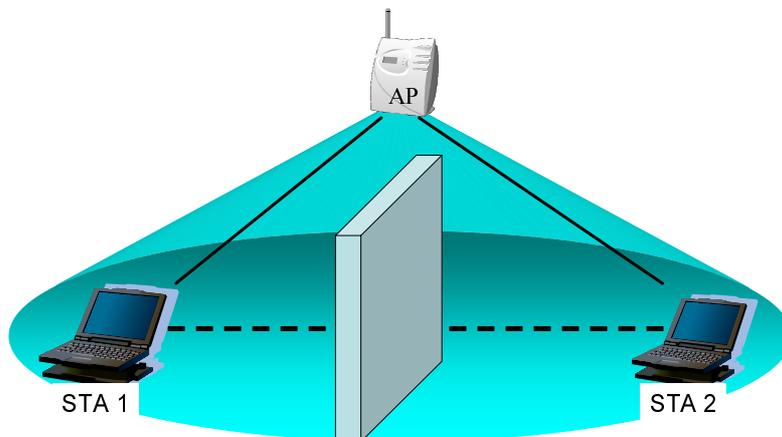


図 6: 隠れ端末問題

この隠れ端末問題を解決するために，RTS/CTS (Request to Send/Clear To Send) が用いられます．送信側の STA はバックオフタイマーが 0 になった後，RTS フレームを投げることで無線チャンネルを予約します．受信側の STA は RTS フレームを受け取ると CTS フレームを送信側に返します．この CTS フレームを送信側の STA が受け取ると，STA はデータフレームの送信を始めます．インフラストラクチャネットワークの場合，すべての STA は AP と接続しているため，AP が送信する RTS または CTS フレームを検出することが出来ます．RTS または CTS フレームの中にはどのくらいの時間無線チャンネルを占有するかが書かれており，各 STA はそれに応じて NAV (Network Allocation Vector) と呼ばれる無線チャンネル用のタイマーを設定します．これにより他の STA はいつ無線チャンネルがビジー状態からアイドル状態に戻るかを知ることが出来ます．図 7 にこの RTS/CTS を用いたデータ送信を示します．

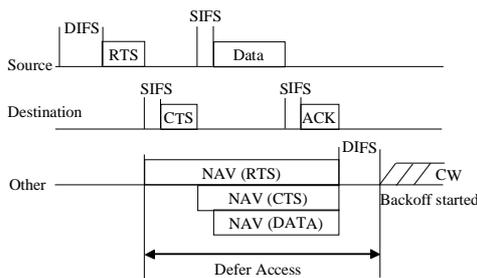


図 7: Transmission of DATA Packet using RTS/CTS

2.5 無線 LAN の現状とその問題点

IEEE 802.11a の製品がリリースされ始めた 2001 年当時は，11b と 11a の普及が進むと考えられていました．しかし現在では 2003 年に最終的な標準化を待たずに続々と登場した 11g の普及が急速に進みつつあります．ある調査では各規格毎のシェアについて，2002 年度は 11b が 80%，11a が 18%，11a/g

が各1%，2003年度は11bが15%，11aが5%，11gが34%，11a/gが46%としており，今後の主役は11bから11g，または11aと11gのコンボタイプになると報告しています。

最近ではノートPCに無線LANが標準で装備されるようになり，無線LANを利用できる端末は急速に増えています。またPCだけでなく，携帯端末に無線LANを搭載し，VoIP(Voice over IP)のような音声通信が可能な製品も登場しています。オフィスにおいてはPBXからVoIPへの移行が進みつつあり，その携帯用端末として無線LANによるVoIP通信が可能な携帯端末が注目を浴びています。さらには携帯電話に無線LANを搭載する製品も参考ながら展示会等で出展されるようになってきました。このように無線LANはその高速なデータ通信を生かして，様々な場所で様々な用途で広く利用され始めています。

このような多様なサービスを無線LANで行っていくためには，品質保証を無線LANにおいても行う必要があります。しかし無線LANのDCFモードでは，STA間で優先制御を行うことはできず，異なる品質要求を満たすことは出来ません。そこで，IEEE 802.11のタスクグループTGe(表2)がIEEE 802.11e [9]と呼ばれる無線LANにおける通信品質制御に関する標準化を進めています。802.11eではPCFに似たポーリング機構と，各要求に応じて異なるアクセスクラスを設けることで品質保証を行います。

無線LANにおける品質保証とともに大きな問題となるのは，複数のAPにより構築された無線LAN網において，STAがどのようにAPを選択すればよいかという点です。この点については次節で説明します。

2.6 AP 選択問題

IEEE802.11bでは，CSMA/CAによるMAC制御や，最下層の無線フレームによるオーバーヘッドの影響により，実効スループットは4~5Mb/s程度となります。また無線リソースを全STAで共有するため，STAの増加とともにSTAごとのスループットはさらに劣化してしまいます。そのため，1AP当たりの最大STA収容数は10~20台程度であり，収容可能なSTA数を増加させるためにはAPを複数設置する必要があります。IEEE802.11bの場合，混信せずに近傍に設置できるAP数は最大で4つとなります。現在多くの場所で複数のAPを用いた無線LAN網構築が進んでいます。

このようにAPが複数存在する無線LAN網においては，STAが接続するAPを適切に選択することが非常に重要です。図8を用いてこのAP選択問題を説明します。図8に示すように，APが2台，STAが7台あるとします。AP-1の近くには5台のSTAがあり，既存の手法では受信電波強度を指標とするため，それらのSTAはAP-1に接続し通信を行います。AP-2の近くにあるSTAも同様にAP-2に接続します。結果としてAP-1には5台のSTAが，AP-2には2台のSTAが接続することになります。本章で説明したように，STAはAPが提供する無線資源を平等に共有します。そのためAP-1に接続する各STAはAP-1の無線資源の1/5，AP-2に接続する各STAはAP-2の無線資源の1/2を利用することになり，接続先が異なるSTA間で利用できる無線資源が不均衡になってしまいます。このように，STAがAP間との無線状況のみを指標として接続するAPを選択すると，AP間の接続STA数が偏り，無線リソースを有効かつ公平に利用できなくなってしまいます。

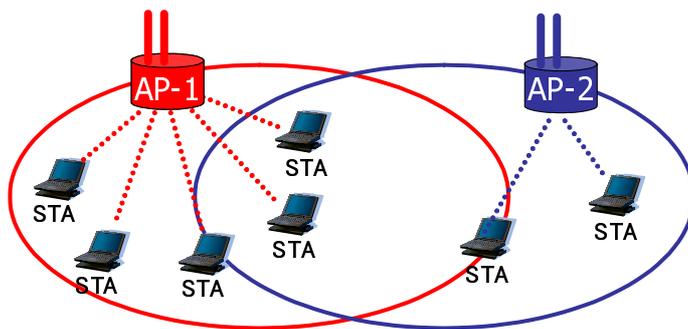


図 8: AP 選択問題

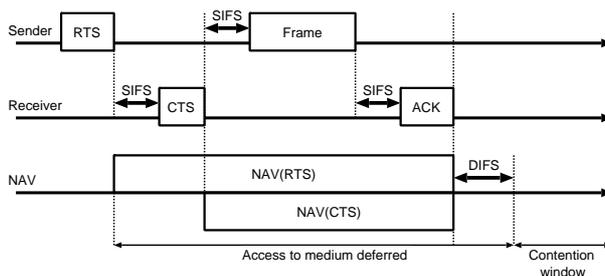


図 9: IEEE802.11b におけるパケット送信シーケンス .

この問題を解決するために AP ごとに異なる ESSID(Extended Service Set-Identifier) を設定し、静的に接続 STA 数を分配する方法がありますが、これでは STA が AP 間をローミングできなくなり、無線状況が悪くても同じ AP と接続し続けることになってしまいます。そこで本稿では複数の AP が存在する無線 LAN 網において、無線 LAN 資源を公平かつ有効に利用できるように、STA が接続先 AP を自律的に選択する機構を提案します。次の節ではその提案方式で利用した簡単な無線 LAN のスループット解析を示します。

2.7 スループット解析

AP が複数存在する無線 LAN 網において、無線リソースを有効かつ公平に利用するためには、STA は AP ごとに期待できるスループット Φ を事前に予測する必要があります。簡単なスループット Φ は、IEEE802.11b のメディアアクセス方法から以下のように求めることができます。

IEEE802.11b におけるパケット送信シーケンスは図 9 のようになっています [6]。よってデータサイズが $Data[bits]$ のパケットが送受信されるのに要する時間 t_T は、式 (1) で表すことができます。

$$t_T = RTS + CTS + \frac{Data(bits)}{Rate(b/s)} + ACK + DIFS + 3SIFS + overhead \quad (1)$$

ここで STA と AP 間の電波状況として、PER(Packet Error Rate) が P であった場合を考えます。この時、一つのパケットが正しく送受信されるのに要する平均時間 T_w は、式 (2) で求めることができます。

$$T_w = t_T + \sum_{i=1}^{\infty} P^i \cdot (1 - P) \cdot i \cdot t_T$$

$$= \frac{t_T}{1-P} \quad (2)$$

よって、スループット Φ は式 (3) となります。

$$\Phi = \frac{Data}{T_w} = \frac{Data \cdot (1-P)}{t_T} \quad (3)$$

また、AP に N 台の STA が接続が接続し、パケットの衝突が発生しないと仮定した場合、スループットは式 (4) となります。

$$\Phi = \frac{Data \cdot (1-P)}{t_T \cdot N} \quad (4)$$

3 AP 選択アルゴリズム機構

本章では、前章で述べた問題点を解決するために、複数の AP が存在する無線 LAN 網において、STA が接続する AP を自律的に選択する機構を提案します。

提案機構は、1) 自 STA が最も高いスループットを期待できる AP を最適と判断する throughput-oriented 機構と、2) 他 STA に与える影響を考慮しながら AP を選択する fairness-oriented 機構の 2 種類です。両提案機構は STA が無線 LAN 網に参加する際と、AP と接続中において定期的に行われます。

3.1 throughput-oriented 機構

throughput-oriented 機構では、自 STA が最も高いスループットを期待できる AP を最適とします。そのため事前に全 AP に対してスループットを予測しなければなりません。前章の式 (4) で AP の接続 STA 数が N 、AP との PER が P である場合、期待できるスループット Φ を求めました。このうち STA がどの AP を選択したとしても t_T および $Data$ は同じとすると、式 (5) で表される重み関数の値が最も高くなる AP が STA にとって最適となります。

$$W_{th} = \frac{1-P}{N} \quad (5)$$

IEEE802.11b の場合、フレーム中に 1bit でもエラーがあると再送処理が行われるので、BER (Bit Error Rate) を P_e とした時、 $P = 1 - (1 - P_e)^{PacketSize}$ で表わすことができます。この BER は受信電力によって求めることができるので、AP から送信される Probe Response および Beacon フレームに接続 STA 数情報を追加することで、STA は PER と接続 STA 数を得ることができます。

3.2 fairness-oriented 機構

fairness-oriented 機構では、STA は他の STA の通信状況を考慮して最適な AP を選択します。ここでは、無線 LAN 網内において通信状況が最も悪い STA (最悪 STA) に着目し、この特性が更に劣化することを防ぐようにします。すなわち STA は最悪 STA が接続している AP をなるべく選択しないようにします。この機構の重み関数を式 (6)、(7) で定義します。ただし、 P_{max} は計算対象の AP に接続している STA のうちの最大 P 値です。

$0 \leq 1 - P_{max} \leq 0.5$ の場合,

$$W_{fair} = \left(\frac{1}{2} \sqrt{2(1 - P_{max})} + 0.5 \right) \times W_{th} \quad (6)$$

$0.5 < 1 - P_{max} \leq 1$ の場合,

$$W_{fair} = W_{th} \quad (7)$$

式 (6) は, P_{max} が 1 に近いほど W_{fair} は小さくなり, STA がその AP と接続しにくくなることを意味します. また式 (7) は最悪 STA を過度に保護するあまり, 自 STA にとって条件の悪い AP を選択することのないように, P_{max} が 0.5 より小さいときは, fairness-oriented 機構を適用しないことを意図しています.

この機構を実装するためには, PER, 接続 STA 数に加えて, P_{max} (最悪 STA の PER) が必要となるので, AP から送信される Probe Response および Beacon フレームにはこの情報も付加する必要があります.

4 評価方法

本章では, 提案 AP 選択機構の評価方法として, まずシミュレーションモデルについて説明します. 次に有効性を示すための評価指標について説明します.

4.1 シミュレーションモデル

本稿では, シミュレータとして NS-2.1b9a[8] を用いました. また, 無線区間のエラーモデルには shadowing モデルを採用しました. シミュレーションは図 10 に示すネットワーク構成, および表 3 に示すパラメータを用いて行いました. AP 間で干渉することが無いようにチャンネルを設定し, 合計 4 台の AP を図 11 に示すように配置しました. はじめに 40 台の STA を 10 秒間で任意に配置しました. このとき各 STA は AP 選択アルゴリズムに従って接続する AP を選択します. 最後の STA が配置されてから 3 分後, さらに 10 台の STA を追加しました. STA は常に TCP 通信を行い, 配置後は位置を移動しないものとします.

また STA が配置されるエリアを 3 種類用意しました. 図 11 で示すように, Area-1 は $50\text{m} \times 50\text{m}$ 内を表し, STA はこのエリア内に均等に配置されることとなります. Area-2, Area-3 においても同様に STA は均等に配置されますが, エリアの広さがそれぞれ, $40\text{m} \times 40\text{m}$, $30\text{m} \times 30\text{m}$ となります. Area-1 では各 AP の周りに均等に STA が配置されますが, Area-2 では AP-3, 4 の周りに配置される STA が少なくなります. Area-3 になるとその効果はより顕著になります. 以上を理由に, 本稿では Area-1 に STA が配置される環境を偏りレベル 1 とし, Area-2 ではレベル 2, Area-3 ではレベル 3 と設定しました. 偏りレベルが高いほど, AP 周りの STA 数の偏りが大きくなります.

AP 選択機構には, 1) throughput-oriented 機構, 2) fairness-oriented 機構に加え, 既存の手法である単に無線状況の最も良好な AP を選択する 3) radio-condition-oriented (radio-oriented) 機構を用いました.

表 3: シミュレーションパラメータ

パラメータ	値
トラヒックタイプ	TCP/Sack
パケットサイズ	1500Byte
フローの向き	AP STA
通信速度	11Mb/s fixed

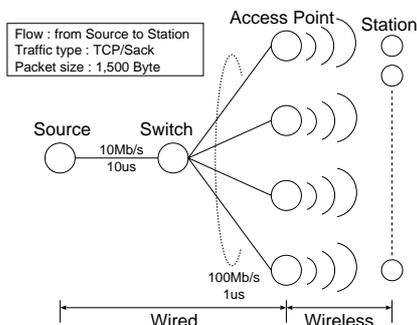


図 10: シミュレーションモデル .

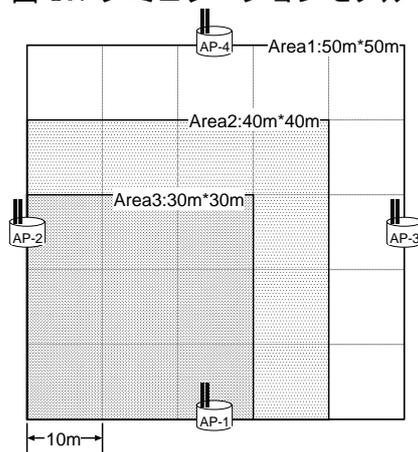


図 11: AP の配置図 .

4.2 評価指標

提案方式の有効性は、無線 LAN 網内の総スループット、全 STA 中の最小および最大スループット、全 STA の平均スループット分布に加え、STA 間の公平性を示す指標として、balance index[7] を用いて評価を行いました。balance index とは式 (8) で表される β の値で、1 に近いほど均衡を表し、不均衡になればなるほど $1/N$ に近づきます。ただし B_i は STA_i の平均スループット、 N は STA 数を表します。

$$\beta = (\sum B_i)^2 / (N \times \sum B_i^2) \quad (8)$$

5 結果および考察

本章では前章で述べたシミュレーションモデルより得られた結果及びその考察を示します。結果については、STAのスループット特性、平均スループット確率分布特性、公平性について評価を行います。

5.1 スループット特性

表4~6は10台のSTAを追加する前における、計40台のSTAによる3分間のスループット特性です。まず全STA中の最低スループットについて考察します。

どの機構においても偏りレベルが高くなるほど、最低スループットが小さくなっています。radio-oriented機構は無線状況が最も良好なAPを選択するという性質上、偏りレベルが高くなるとAP間の接続STA数の偏りが大きくなります。よって、radio-oriented機構は偏りレベル3で約0.15Mb/sまで劣化しています。一方、throughput-orientedおよびfairness-oriented機構はAPを選択する際に接続STA数を考慮しています。このため、偏りレベル3でも大きな劣化はみられません。また、fairness-oriented機構はどの偏りレベルでも他の機構より最小スループットが高くなります。この機構の目的は「最悪STAを保護し、最小スループットを下げない」ことですので、十分に目的を達成しているといえます。

次に全STA中の最大スループットについて考察します。radio-oriented機構は偏りレベルが高くなるにつれ、最大スループットが増大しています。特に偏りレベル3でのスループットは約2.75Mb/sとなり、他の機構と比較して非常に高くなります。この原因は、接続STA数に偏りが生じた時に、接続STA数の少ないAPと接続できたSTAが無線リソースを独占したためです。しかし、スループットが高いSTAはごく僅かで、大半のSTAは接続STA数の大きいAPに属すると予測できます。この予測については平均スループット別STA数確率分布を5.2章で考察する際に確認します。

次に無線LAN網の総スループット特性について考察します。どの機構も偏りレベルが高くなると、総スループットは減少しています。特に偏りレベル3においてradio-oriented機構を使用した場合には、著しく性能が劣化しています。このようにAP間の接続STA数が偏ると、ネットワーク全体に対して悪影響を与えることがわかります。また偏りレベルが2および3の場合、fairness-oriented機構はthroughput-oriented機構より総スループットが高くなっています。よって偏りレベルが高いときは、総スループットの面でfairness-oriented機構が有効であるといえます。

以上の結果および考察から、throughput-orientedおよびfairness-oriented機構は、偏りレベルが高くなってもAP間の接続STA数が偏る影響を最小限に抑えることが可能であり、有効な機構であることがわかりました。特にfairness-oriented機構は最小スループットの劣化を抑制し、偏りレベルが高くなると総スループットを改善することができました。

5.2 平均スループット確率分布特性

図12~14は10台のSTAを追加する前における、計40台のSTAによる3分間の平均スループット別STA数確率分布です。

まず図12の偏りレベルが1の場合について考察します。radio-oriented機構は右裾が長く、他の機構

表 4: 偏りレベル 1 のスループット特性 .

AP 選択機構	スループット		
	最小 (Kb/s)	最大 (Kb/s)	合計 (Mb/s)
radio	271.47	828.87	17.59
throughput	265.71	599.72	17.08
fairness	278.80	595.26	17.03

表 5: 偏りレベル 2 のスループット特性 .

AP 選択機構	スループット		
	最小 (Kb/s)	最大 (Kb/s)	合計 (Mb/s)
radio	206.52	1505.56	17.38
throughput	258.74	636.05	16.56
fairness	275.79	618.36	16.65

表 6: 偏りレベル 3 のスループット特性 .

AP 選択機構	スループット		
	最小 (Kb/s)	最大 (Kb/s)	合計 (Mb/s)
radio	154.73	2757.99	13.07
throughput	230.16	639.13	14.48
fairness	245.02	626.58	14.80

と比較して最頻値の小さい確率分布になっています．よって各 AP の接続 STA 数が偏らない環境においても，radio-oriented 機構は他の機構よりも劣っていることがわかります．

同様に図 13, 14 から，偏りレベルが 2, 3 の場合においても，radio-oriented 機構は最頻値が他の機構と比べて非常に低くなっています．つまり radio-oriented 機構を用いるとスループットが高い STA はごく僅かになり，大半の STA は接続 STA 数の大きい AP に属し，スループットが低く抑えられていることがわかります．

また図 14 より，fairness-oriented 機構は最頻値が最も高い確率分布になっています．その効果を図 15 で平均スループットに対する生存関数として示します．図 15 より，平均スループットが 350Kb/s の場合 throughput-oriented 機構の生存確率は約 40% であるのに対し，fairness-oriented 機構では約 50% となっており，約 10% 改善されています．

以上の結果から，偏りレベルが 1 の場合であっても throughput-oriented および fairness-oriented 機構が有効であることがわかりました．また偏りレベルが高くなるにつれ，fairness-oriented 機構は throughput-oriented 機構よりも高いスループットを得られる STA の割合が多く，有効であることがわかりました．

5.3 公平性特性

次に，STA 間の公平性について評価します．図 16~18 に平均スループットに対する balance index を時系列で示します．どの機構も時刻 180 秒で値が急激に減少しているのは，新たに 10 台の STA が追加されたためであり，その後回復が緩やかであるのは，追加された STA が定常状態に入るまでにある程

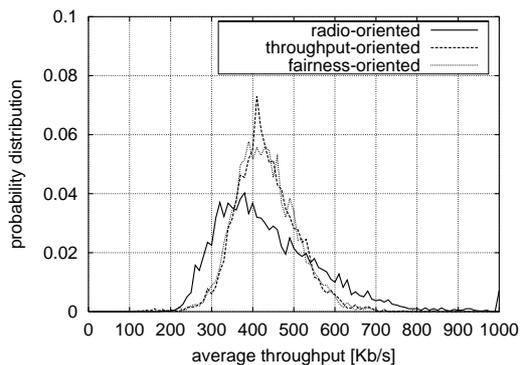


図 12: 偏りレベル 1 における平均スループット別 STA 数確率分布 .

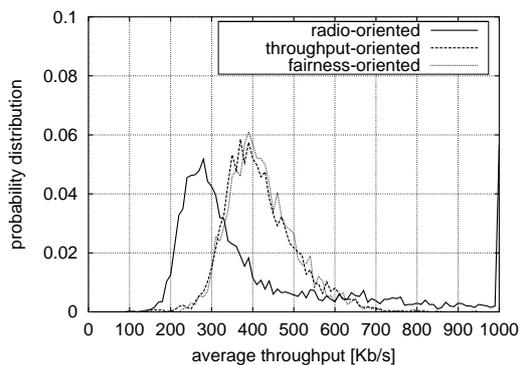


図 13: 偏りレベル 2 における平均スループット別 STA 数確率分布 .

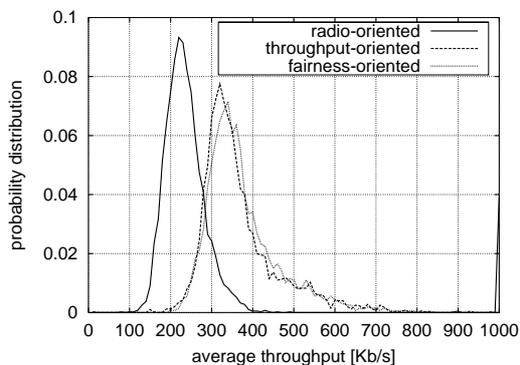


図 14: 偏りレベル 3 における平均スループット別 STA 数確率分布 .

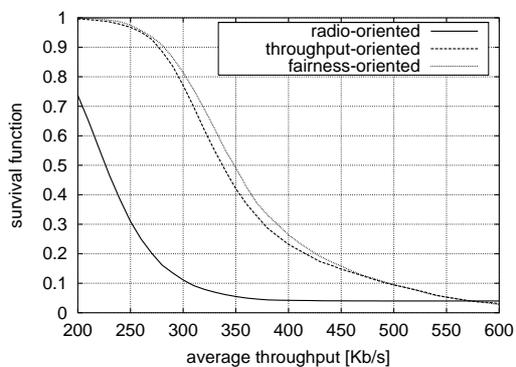


図 15: 偏りレベル 3 での平均スループットに対する生存関数 .

度の時間を要するためです．radio-oriented 機構は偏りレベルが高くなるにつれ公平性は劣化していますが，その他の機構は高い balance index を維持しています．また 10 台の STA を追加することで無線環境が急変した場合でも，両提案手法の公平性は高い水準を維持しています．よって公平性の面からも throughput-oriented および fairness-oriented 機構が有効であり，偏りレベルが高くなるほどその有効性が増すことがわかりました．

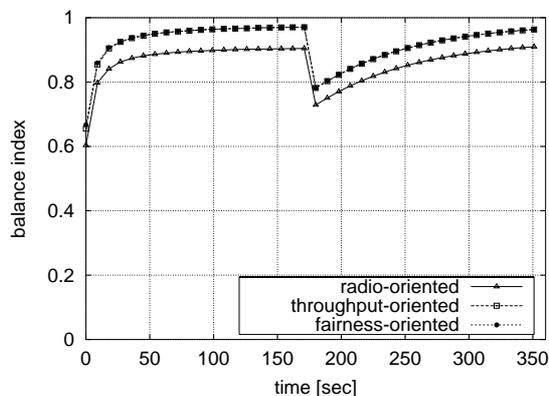


図 16: 偏りレベル 1 での STA 間平均スループットの balance index .

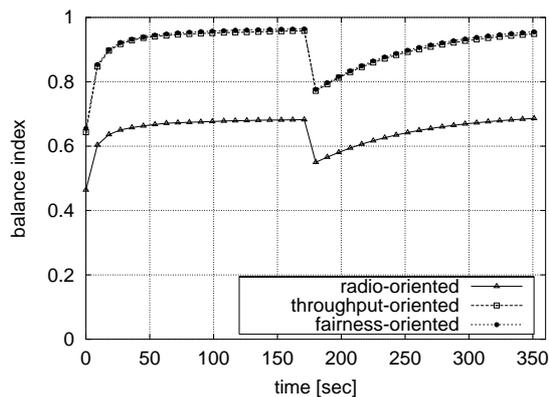


図 17: 偏りレベル 2 での STA 間平均スループットの balance index .

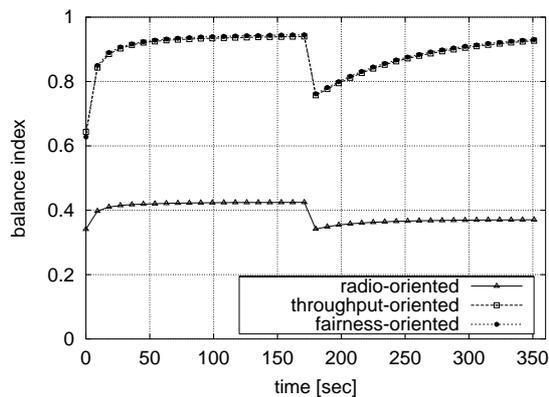


図 18: 偏りレベル 3 での STA 間平均スループットの balance index .

6 まとめ

本稿では、IEEE 802.11 無線 LAN の現状と課題を中心に述べてきました。最初は 2 Mb/s という通信速度からスタートした無線 LAN は、現在では 54Mb/s まで通信速度が向上し、実用的になったことで普及が急速に進んでいます。これまでの有線 LAN を置き換えるだけでなく、無線通信の利点を生かして、ホテルや空港のラウンジ、駅やカフェ等でも無線 LAN の構築が進んでおり、新たに公衆無線 LAN サービスの提供が始まっています。

この無線 LAN について、現在までに標準化されている各規格や、その基本的な通信方式である CSMA/CA について 2 章で説明しました。さらには無線 LAN で問題となる隠れ端末問題について説明し、どのように解決しているかについても説明しました。また無線 LAN の現状と課題についても触れ、品質保証と AP 選択が今後の大きな課題であることを示しました。

本稿では触れませんでした。上記の 2 つだけでなくセキュリティの確保も重要な課題となっています。現在の無線 LAN で利用されている WEP は固定鍵が短いためその脆弱性が指摘されています。無線は誰でも傍受が可能であるため、通信の暗号化は今後の無線 LAN の発展のために必須の技術であると言えます。さらに暗号化だけでなく、認証も大きな課題です。この点については IEEE 802.1X による RADIUS サーバを利用した認証が考えられています。

無線 LAN のセキュリティについては、無線 LAN を検出できるソフトウェアを用いて山手線を 1 週し、無線 LAN の利用形態を調査した興味深い報告があります。その報告によれば、山手線を 1 週し終えた時点で全部で 106 カ所の無線 LAN が検出され、このうち、WEP 暗号化が行われていたものはわずかに 37 カ所しかなく、残りの 69 カ所は暗号化を行わない状態で運用されていたとのことです。しかも SSID がメーカー出荷時設定のままになっているケースや、会社名、部署名、設置されている階数といった情報が SSID として使われているケースが多く、情報の漏洩を招きやすい運用を行っている所が多いようです。無線 LAN は誰でも傍受可能な無線を利用して通信を行うため、運用する側も利用する側もセキュリティ対策をとり、通信の安全性を高めていく必要があります。

3 章では複数の AP が設置されている無線 LAN 網において、無線リソースを有効かつ公平に利用するために、STA が自律的に AP を選択する機構を提案しました。ここでは、1) 自 STA のスループットが最大となる AP を選択する throughput-oriented 機構と、2) スループットが最小である STA が接続している AP をできるだけ選択しないようにする fairness-oriented 機構の 2 つを提案しました。続く 4 章でそのシミュレーションモデルを示し、5 章でシミュレーション結果より提案方式の評価を行いました。

その結果、STA が無線 LAN 網参加時に提案 AP 選択機構を実行した場合、偏りレベルが高い環境において、両機構とも TCP 総スループットと STA 間の公平性を大きく改善できることを示しました。また fairness-oriented 機構は throughput-oriented 機構と比較して最小スループット特性、公平性のどちらも優れていることがわかりました。

次の課題としては、実機に実装しその効果を確認する必要があります。特に本学は情報コンセンツの整備により無線 LAN 網が構築されており、本稿で提案した AP 選択手法の実験環境として適しています。可能であれば実機への実装を進め、本学において提案方式の有効性の確認および評価を進めたいと考えています。

参考文献

- [1] IEEE, “Information technology - Telecommunications and information exchange between systems - Local and metropolitan area networks-Specific requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications,” *IEEE Standard 802.11*, September 1999.
- [2] B. O’Hara and A. Petrick, “802.11 Handbook -A Designer’s Companion,” *IEEE Press*, 1999.
- [3] I. Papanikos and M. Logothetis, “A Study on Dynamic Load Balance for IEEE 802.11b Wireless LAN,” *Proc. 8th International Conference on Advances in Communication & Control, COMCON 8, Rethymna, Crete/Greece*, June, 2001.
- [4] A. Balachandran, G. M. Voelker, and P. Bahl, “Hot-Spot Congestion Relief in Public-area Wireless Networks,” *Proceedings of WMCSA ’02*, Callicoon, NY, pp. 70–82, June 2002.
- [5] Cisco Systems Web Site, “Cisco Aironet Series 製品機能紹介,”
http://www.cisco.com/japanese/warp/public/3/jp/solution_smbiz/aironet/solutions/solution1.html
- [6] Gast and Matthew , “802.11 Wireless Networks:The Definitive Guide,” *O’REILLY*, 2002.
- [7] Dah-Ming Chiu and Raj 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.
- [8] The VINT Project, Network Simulator NS,
<http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.
- [9] IEEE, “Draft Supplement to STANDARD for information technology - Telecommunications and information exchange between systems - Local and metropolitan area networks - Specific requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Medium Access Control (MAC) Enhancement for Quality of Service (QoS),” *IEEE Standard 802.11e/D3.3*, October 2002.
- [10] A. S. Tanenbaum Ed., “Computer Networks - Third Edition,” Prentice-Hall International 1999.