修士論文 2001 年度 (平成 13 年度)

マルチチャネル CSMA 無線網における負荷分散型チャネル選択方式に関する研究

慶應義塾大学大学院 政策・メディア研究科
古坂　大地

修士論文 2001 年度 (平成 13 年度)

マルチチャネル CSMA 無線網における負荷分散型チャネル選択方式に関する研究

概　要

近年，計算機の小型化と無線網の爆発的な普及により移動型計算機環境も急速に進化している．そのような環境で無線技術が注目されているがその媒体特性によりその制御技術はまだ改善されなければならない状況にある．現在は無線基地局などへのシングルホップの無線通信が主流であるが，将来はマルチホップ無線網の利用が普及していくと考える．しかし，従来のシングルチャネル無線網には帯域の利用効率を低下させる問題があり，それらの問題はシングルチャネル無線網においては回避できない．さらにマルチホップ無線網においては，それらの問題は顕著に発生する．

本論文では，帯域の利用効率の向上を目的としマルチチャネル CSMA 無線網における負荷分散型チャネル選択方式 LSCS (Load Sensitive Channel Selection) を提案する．本方式は各無線局において機能する自律分散型アルゴリズムを用いる．各局はチャネル毎のチャネル利用率を計算し，最もチャネル利用率の低いチャネルを受信チャネルとして選択する．各チャネル利用率は，トラフィックの一定期間の監視により得られた情報からグラフ理論と確率論的手法を用いて計算される．本方式を ns-2 (Network Simulator version 2) 上のシミュレーションモジュールとして実装し，マルチホップ無線網における評価を行った．評価項目は，システムスループットおよび衝突パケット数とし，シミュレーション結果より，従来のシングルチャネル CSMA 無線網と比較し本方式を利用することにより 108 % の性能の改善が得られた．

本研究により，これまでシングルチャネル無線網の抱えていた問題点を解決し CSMA 無線網の性能を向上することができた．また，将来のマルチホップ無線網の発展に大きく貢献することができると考える．

キーワード :
マルチホップ無線網, マルチチャネル CSMA，チャネル選択，負荷分散

慶應義塾大学大学院 政策・メディア研究科

古坂　大地

Master's Thesis Academic Year 2001

Load Sensitive Channel Selection Scheme for Multi-channel CSMA Wireless Networks

Abstract

In recent years, the environment of mobile computing is fastly growing due to the minituarization of mobile computers and the proliferation of the wireless networks. Under these circumstances, the wireless technology is one of the most crucial topics. Currently, the majority of wireless networks are the single hop network. But in the near future, multi-hop wireless networks will become popular. The traditional access method is the contention-based access using single channel. The single channel wireless networks have several problems causing the wastage of the bandwidth such as co-channel interference or channel blocking. These problems are inavoidable in the single channel networks. In addition, the multi-hop wireless networks are highly affected by them.

In this thesis, we propose a channel access method for the multi-channel Carrier Sense Multiple Access (CSMA) to achieve the load balancing. We enhance the traditional single-channel CSMA to the multi-channel CSMA by adding the function of channel selection. For its selection scheme, we design the Load Sensitive Channel Selection (LSCS). This scheme works at each wireless station in an autonomous distributed fashion. Each station calculates the utilization of each channel then selects a channel which is the most underutilized. For the calculation of channel utilization, LSCS monitors the traffic for a fixed period. Then it creates the traffic graph and estimates the utilization. We implement this scheme as a module of ns-2 (Network Simulator version 2) and evaluate its performance. We simulate the multi-hop wireless networks and analyse the system throughput and the number of packet collision. From simulation results, we show that the LSCS can improve the performance of the system by 108 % from traditional single channel CSMA.

This research can solve the problem of single channel MACs and improve the performance of wireless networks. And also we think that this is the fundamental work and contributes the deployment of the multi-hop wireless networks.

Keywords :
Multihop Wireless Networks, Multi-channel CSMA, Channel Selection, Load Balancing

Keio University Graduate School of Media and Governance

Daichi Furusaka

目 次

第1章　序論 1
1.1 はじめに . . . 2
1.2 本論文の目的 . . . 3
1.3 本論文の構成 . . . 3

第2章　研究背景 5
2.1 無線網の利用形態の変化 . . . 6
2.2 無線 MAC プロトコルの概要 . . . 7
2.2.1 予約割当方式 (Fixed Channel Access) . . . 7
2.2.2 コンテンション方式 (Random Channel Access) . . . 7
2.3 関連研究 . . . 8
2.3.1 マルチチャネル無線網におけるチャネル割当方式 . . . 8
2.3.2 マルチチャネル無線網におけるチャネル選択方式 . . . 8
2.3.3 シングルチャネル無線網における負荷分散方式 . . . 9
2.3.4 まとめ . . . 9

第3章　シングルチャネル CSMA の問題点 11
3.1 搬送波検知メカニズムの弊害 . . . 12
3.2 RTS/CTS メカニズムの弊害 . . . 14
3.3 問題の回避策 . . . 16

第4章　LSCS の設計 18
4.1 LSCS の概要 . . . 19
4.1.1 「トラフィックの場」の概念 . . . 20
4.2 トラフィック量の測定 . . . 21
4.3 トラフィック・グラフの生成 . . . 22
4.4 トラフィックの場の抽出 . . . 24
4.5 チャネル利用率の計算 . . . 27

第5章　LSCS の性能評価 30
5.1 予備評価 . . . 31
5.2 シミュレーションモジュールの実装 . . . 33
5.3 シミュレーションモデル . . . 35

5.3.1 無線モデル . . . 36
5.3.2 トポロジモデル . . . 37
5.3.3 トラフィックモデル . . . 38
5.3.4 チャネル選択アルゴリズム . . . 38
5.4 シミュレーション評価 . . . 40
5.4.1 評価 1：測定結果とその考察 . . . 40
5.4.2 評価 2：測定結果とその考察 . . . 41

第 6 章 結論 **46**
6.1 まとめ . . . 47
6.2 今後の課題と展望 . . . 47
6.3 おわりに . . . 48

図目次

2.1 無線接続形態の変化 6

3.1 (a) 隠れ端末問題 (b) 見え過ぎる端末問題 12
3.2 マルチホップ無線網における搬送波検知メカニズムの問題 13
3.3 RTS / CTS / DATA / ACK と NAV の設定 14
3.4 NAV ブロッキング問題 15
3.5 マルチホップデータのホップシーケンス (a) NAV ブロッキング問題 (b) 隠れ端末問題 17

4.1 「トラフィックの場」の概念 21
4.2 完全な隣接関係 23
4.3 求められるトラフィック・グラフ 24
4.4 トラフィックの場の抽出結果 27

5.1 シミュレーション平面 31
5.2 予備測定結果: (1) 平均スループット 32
5.3 予備測定結果: (2) 衝突パケット数 33
5.4 モジュール構成 34
5.5 トポロジの概観 (移動モデル (左), 静止モデル (右)) 38
5.6 測定結果 1-1 システムスループット 41
5.7 測定結果 1-2 衝突パケット数 42
5.8 測定結果 1-3 バッファオーバフロー数 42
5.9 測定結果 1-4 帯域利用効率 43
5.10 測定結果 2-1 システムスループット (静止) 43
5.11 測定結果 2-2 衝突パケット数 (静止) 44
5.12 測定結果 2-3 バッファオーバフロー数 (静止) 44
5.13 測定結果 2-4 システムスループット (静止) 45
5.14 測定結果 2-5 衝突パケット数 (静止) 45

表 目 次

1.1 有線網と無線網の比較 2

2.1 関連研究との特性比較 10

4.1 RTS/CTS 制御情報 21
4.2 測定計算より得られた総トラフィック量 29

5.1 パラメータ設定 32
5.2 `hdr_cmn` 構造体 35
5.3 `rts_frame` 構造体 35
5.4 `TGNode`, `TGLink` クラス 36
5.5 パラメータ設定 (1) 37
5.6 パラメータ設定 (2) 37
5.7 パラメータ設定 (3) 37
5.8 パラメータ設定 (4) 38

第1章

序論

本章では，本研究の意義および本論文の内容構成について述べる．

1.1 はじめに

近年，PDA (Personal Digital Assistant) やラップトップ型計算機など移動型計算機が普及し，また同時に携帯電話や無線 LAN ，Bluetooth と言った無線通信網の爆発的な普及により移動型計算機環境が急速に進化している．そのような環境で，無線通信技術が非常に注目を集めている．しかし，無線という媒体特性のため狭帯域，高遅延など帯域資源は乏しく，また電波干渉による衝突発生など様々な問題が生じる．従って，無線制御技術はまだ改善されなければならない状況にある．

これまでネットワークを構築する場合，有線を利用することが主流であった．しかし，有線はケーブリング作業を伴うため設置コストや再配置の自由度がなく，長期的な維持コストが高いなどの問題がある．1980 年代までは無線ネットワークはその技術的な進歩の遅れから転送速度も遅く，価格も非常に高かったためあまり普及していなかった．しかし，携帯電話網の普及と低価格な無線 LAN の登場により現在爆発的にその利用者数を増やしている．

表 1.1: 有線網と無線網の比較

項目	有線網	無線網
移動性	△	○
帯域	○	△
信頼性	○	△
経済性	場合による	場合による

表 1.1 は有線網と無線網の比較をまとめたものである．この表の項目は一般的に述べた場合についてまとめたもので，必ずしも表の通りというわけではない．特に経済性については，「場合による」としてある．この項目の中で特に注目して欲しい項目が，「移動性」である．無線で最も付加価値が高く特徴的なものが「移動性」であろう．この特徴により，携帯電話や無線 LAN などが爆発的に普及したことは言うまでもない．現状では，我々が通信するためには有線網の存在が重要であるが，今後の通信網の接続形態の発展に多くを期待できる．その 1 つとして，最近では有線基盤網の存在を前提としない，無線接続だけで構成された通信網が登場しはじめている．これはアドホックネットワーク (一時的なネットワーク) などと呼ばれ，その場，その時かぎりに構成される無線ネットワークである．例えば，有線網の配備されていない会議室などで会議に参加した人達の計算機だけで通信をし，プレゼンテーション資料を電子媒体で配布もしくは共有するようなことが実現されている．

我々は，現在社会の中で起こり始めている，「人や機器の情報化と移動化」に対応していく必要がある．本論文においても，そのような来るべき社会の基盤技術として新しい通信形態の無線網を実現する仕組みを提供していく．

1.2 本論文の目的

既存の無線網の多くは，無線基地局と無線端末局とのシングルホップ無線網を構成している．シングルホップ無線網を構築した場合，その通信範囲は無線基地局との電波到達範囲に制限されてしまう．そこで，広域なサービスエリアを提供する無線網の構築をする上で，マルチホップ無線網が重要や役割を果たしてくると考える．マルチホップ無線網では，シングルホップでは到達不可能な無線端末局への送信データは中間の無線中継局が転送する．これにより，移動通信の可能性も発展しより新しい通信形態も登場してくる．

本論文では，移動局を含むマルチホップ無線網を想定しその環境に適した通信制御方式についてを提案する．まず，提案方式の MAC プロトコルにはコンテンション型の CSMA (Carrier Sense Multiple Access) 方式を用いる．CSMA 無線網でマルチホップ通信を行った場合，コンテンション型の無線 MAC プロトコルでは同一チャネル干渉に関連する問題により性能が低下する．この問題を解決するためには，マルチチャネル CSMA 無線網にする必要がある．しかし，マルチチャネル CSMA 無線網を実現したとしてもその無線網の系全体で効率的にチャネルを利用しなければシングルチャネル CSMA 無線網同様に性能低下が発生する．そこで，本論文ではマルチチャネル CSMA 無線網におけるチャネル選択方式として LSCS (Load Sensitive Channel Selection) を提案する．本方式は，全ての無線局が各チャネルの利用率を検知することによって，最も利用率の少ないチャネルを通信チャネルとして選択する方式である．本方式により，マルチチャネル CSMA 無線網における負荷分散が実現され，同一チャネル干渉に起因するネットワークの性能劣化を低減できる．

さらには，通信性能のボトルネックを解決することによって今後のマルチホップ無線通信の分野の普及とその応用に深く貢献できると考える．

1.3 本論文の構成

本論文の構成は，以下の通りである．

第 1 章 序論

本章である．本章では，本論文の意義と目的について述べた．

第 2 章 研究背景

第 2 章では，研究背景として無線網の接続方式について述べる．また，無線 MAC プロトコルの概要について方式の分類等を含めて説明する．最後に，「マルチチャネル」「マルチホップ」「負荷分散」の 3 点に関連する研究について述べる．

第 3 章 シングルチャネル CSMA の問題点

第 3 章では，本論文において対象とする 無線 CSMA 方式における問題点について述べる．2 つの大きな問題点について説明し，マルチホップ無線網に体する影響を考察する．

第4章 LSCS の設計

第4章では，負荷分散型チャネル選択方式 LSCS の設計について述べる．LSCS は各無線局において自律分散的に機能し，各チャネルのチャネル利用率の概算から最適なチャネルを通信チャネルとして選択する方式である．そのチャネル利用率の計算手法について説明する．

第5章 LSCS の性能評価

第5章では，LSCS の性能評価を行う．評価項目としてシステムスループットと衝突パケット数を利用し，シングルチャネル無線網とマルチチャネル無線網の性能比較および LSCS によりチャネル選択する場合と，ランダムにチャネル選択する場合の性能比較を行う．

第6章 結論

第6章では，まとめと今後の課題について述べ，本論文を締めくくる．

第2章

研究背景

本章では，研究背景について述べる．まず，無線ネットワークの利用形態の変遷と今後の利用形態の需要について考察する．次に，本研究の要素技術である無線 MAC プロトコルの分類とその概要について述べ，各技術の長所および短所について解説する．最後に本論文に関連する緒研究を紹介し，特徴比較を行う．

2.1 無線網の利用形態の変化

現在，無線通信の需要は爆発的に増加し，それを利用する新しいサービスが絶えず登場している．従来の無線通信範囲は，シングルホップで接続可能な範囲に制限されていた．つまり，有線基盤網に接続された無線基地局との通信，もしくは無線端末局間の Peer-to-Peer (1 対 1) の通信が主流であった．しかし，近年ではマルチホップ無線網が登場し，IETF (Internet Engineering Task Force) では MANET (Mobile Ad-hoc Networks) 分科会 [15] においてその動的経路制御方式の標準化が進められている．MANET における無線通信の特徴は基盤網の存在を全く仮定していない点と，移動可能無線局の通信を実現する点である．

図 2.1 は，2 種類の無線接続形態を示している．図中の四角 (□) は有線局，三角 (△) は無線基地局，丸 (○) は無線端末局をそれぞれ示している．また，従来の無線基地局を介すような無線通信を基盤網型通信 (図 2.1 左) と呼び，MANET のような基盤網との接続を仮定しない無線通信を独立網型通信 (図 2.1 右) と呼ぶ．図に示すように，マルチホップ無線網が普及すれば場所や時間に制約されずにより柔軟に有線網とのシームレスな通信が実現可能となる．

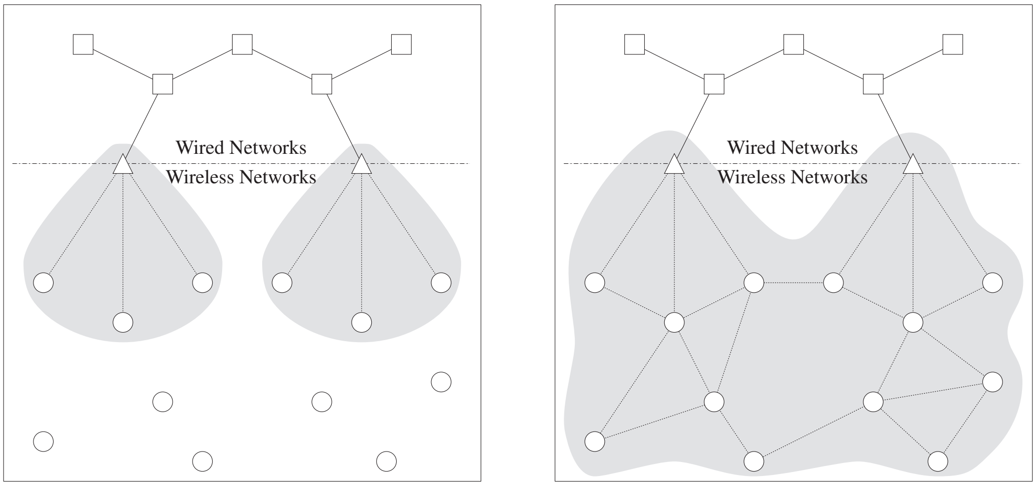


図 2.1: 無線接続形態の変化

これまで基盤網型通信が発展してきた理由は有線によって構築された基盤網に接続することが目的だったからである．それは，有線基盤網に存在する情報へアクセスするため，もしくは遠距離に位置する無線端末局との通信経路に利用するためであった．しかし，情報化社会における情報の個人化が進み，個人それぞれが情報の発信，公開，閲覧，取得ができるようになった．このような環境が進むと，基盤網が存在しない場所においても人々が網を形成し，情報を交換することができるようになる．そのような環境では，独立網型の通信に体する要求が出てくると予測できる．

しかし，基盤網，つまりは有線網の存在は今後も重要であり，決してなくならないものである．従って，今後は有線基盤網と無線独立網との統合が重要な課題になってくる．

本論文において，有線基盤網へのマルチホップ無線通信環境を実現する制御技術を提案することによって，その統合環境への技術的な課題の1つに取り組む．

2.2 無線 MAC プロトコルの概要

1局のみが無線媒体が利用できる環境において，多くの無線端末局が存在している時，局がその無線媒体を利用できる権利を得る仕組みを媒体アクセス制御 (Medium Access Control, MAC) と呼ぶ．無線媒体アクセス制御は，1968年頃に始まったハワイ大学のALOHAシステムに負うところが大である．今日の無線を利用するシステムの多くの送信権取得アルゴリズムは，ALOHAシステムの制御方式を源流としたものである．無線通信においても様々なMACプロトコルが存在する．シングルチャネルMACの方式には大別して次の2種類が存在する．

- 予約割当方式
- コンテンションン方式

2.2.1 予約割当方式 (Fixed Channel Access)

予約割当方式は，チャネル接続に先立ってそのチャネルを予約する方式である．予約要求の送信時には，次に説明するコンテンション方式で媒体にアクセスするが，チャネル確立後は基本的には衝突が発生しない．予約用の制御チャネルとデータ用チャネルの2種類のチャネルが必要とされるため，割当てられた帯域は周波数分割もしくは時分割で使用される [3] ．予約割当方式は低トラフィック時には適しているが，トラフィックがバースト的な場合には，帯域利用率の低下に繋がる．予約割当方式のアルゴリズムの利点は，時間同期の必要なトラフィックに対して遅延保証 (Delay Bound) を提供できる点である．予約割当方式は伝送スペクトルの帯域幅と分割するチャネル数によって性能が左右される．また，予約割当方式のシステムでは，有限個のチャネルを効率的に割当てるためにチャネルの再利用が重要である．予約割当方式は，通常中央制御型のシングルホップ無線網で利用される．そのため，分散制御型のマルチホップ無線網には適していない．

2.2.2 コンテンション方式 (Random Channel Access)

全ての局が自律的にチャネルへ接続する方式である．チャネル接続は，局が送信要求をした時に行われる．予約割当方式と異なり接続許可を待つ必要がなく，即時的に送信を試みることができる．しかし，同時に複数の局が送信を試みると互いの搬送波が干渉し合い送信データが破壊される可能性がある．そのため，同時送信による衝突を回避する，もしくは検知するための機構を必要とする．コンテンション方式のMACプロトコルとしては，ALOHA [1] ，CSMA [19] ，MACA [18] ，MACAW [4] ，CSMA/CA [7] ，

などがある．本論文では，動的にトポロジーが変化する移動局を含むマルチホップ無線網を想定している．そのため，固定的にチャネルへ接続する予約割当方式よりも任意にチャネルへ接続するコンテンション方式が適している．

2.3 関連研究

本論文の関連研究としては，以下の関連事項に代表される研究を3件参照する．

- マルチチャネル無線網におけるチャネル割当方式
- マルチチャネル無線網におけるチャネル選択方式
- シングルチャネル無線網における負荷分散方式

2.3.1 マルチチャネル無線網におけるチャネル割当方式

Haasは予約割当方式において全ての隣接局のチャネル割当を把握し，送信タイミングを決定するパケットスケジューリングを提案している[13]．彼はRWN (Reconfigurable Wireless Networks) と呼ばれる自律分散型マルチホップ無線網を提案し，その経路制御方式としてZRP (Zone Routing Protocol) [14] を，そしてその媒体アクセス制御方式としてこの方式を提案している．この方式では，多元接続方式としてTDMAを主目的とし，N個にスロット分割されたチャネルに対して，自律分散制御型のチャネル接続を行う．従来の予約割当型は中央制御型の無線網と併用されることが多いが，それを自律分散型の無線網に適応させた点が優れていると言える．しかし，制御用チャネルを必要とし，そのチャネルはデータ通信チャネルとして利用できないためチャネル利用率の観点から効率的とは言えない．また，全ての局はチャネル割当状況をポーリングするため，制御パケットのオーバヘッドが非常に大きくなる．それに対し，本研究は予約割当方式のアクセス制御は行わずコンテンション方式のアクセス制御を行うことにより，この方式よりも自律分散性の向上が期待できる．さらに制御パケットはRTS/CTSパケットのみで行うことによって通信時のオーバヘッドを軽減するだけでなく，隠れ端末問題も回避できる点で優れている．

2.3.2 マルチチャネル無線網におけるチャネル選択方式

Nasipuriはマルチチャネル CSMA 方式における分散型チャネル選択方式として搬送波検出と受信信号品質値を用いる方式を提案している[21]．彼の方式の長所として，制御パケットは一切送信せずに搬送波検知のみで通信を行う点がある．従って制御パケットによるオーバヘッドは全くないと言える．まず，彼はシングルチャネルの問題として同一チャネル干渉 (Co-channel Interference) 問題の解決は不可能であることを指摘し，そのためにはマルチチャネルの重要性を主張している．この方式の場合，受信信号のSINR (Signal to Interference and Noise Ratio) 値に依存してチャネル選択をする．チャネル

分割方式には，FDMA や CDMA が適し，TDMA は不適切だとしている．その理由には，この想定環境であるアドホックネットワークにおいて，時間分割する場合チャネル (時間スロット) の同期が非常に困難である点を挙げている．各局は，自身が送信していない (IDLE) 時に各チャネルを同時に搬送波検知する．搬送波検知した総受信信号強度 (TRSS : Total Received Signal Strength) を求め，ある閾値 (ST : Sensing Threshold) によってそのチャネルが IDLE であるか BUSY であるかを判定する．その結果 IDLE と認識されたチャネルに対して送信を試みる．しかし，搬送波検知し総受信信号強度が得られるが，隠れ端末局の搬送波から得られる受信強度は基本的に極小である．そのため Nasipuri の方式の欠点としては，隠れ端末局による衝突の発生する確率が高いと言える．本研究は前述した通り RTS/CTS を用いることにより回避している．また，Nasipuri の方式は チャネル状態の判断のみで，負荷分散を考慮していない．信号強度の総和はトラフィック量の指標として用いるには不十分であり，その総和が小さい場合でも，送信局の周辺でそのチャネルを利用している他局が多数存在する場合もある．この場合，IDLE と認識しても，送信波の衝突は避けられない．

2.3.3 シングルチャネル無線網における負荷分散方式

Ozugur は，AIR (Advanced Infra-Red) と呼ばれる拡散型赤外線 MAC を用いてシングルチャネル/マルチホップ無線網における負荷分散方式を提案している [23]．既存の RTS/CTS/Data/ACK を交換する 4-way handshake 型の MAC プロトコルには，Backoff Window が開きすぎてしまう現象が発生する．その Backoff メカニズムを改善するために，この方式では隣接局の通信状況から適切に Backoff Window のサイズを設定する．この研究では，Backoff の終了した直後に送信する確率 (Link Access Probability) を p とする p-persistent 型 CSMA プロトコルを用いることにより負荷分散を実現する．その確率 p を決定するために 2 種類の負荷分散型媒体アクセス手法を提案している．最初の手法は，周辺にいる無線局との関係 (接続リンクの本数) から負荷分散を行うコネクションベース分散アクセス方式 (Connection-based Balanced Media Access) である．もう一つの手法は，周辺にいる無線局の送信履歴 (トラフィック発生時間の記録) から負荷分散を行う時間ベース分散アクセス方式 (Time-based Balanced Media Access) である．しかし，確率 p を計算するために網全体のリンク接続状態を把握しようとするため，各局のリンク接続状況の変化を隣接局にブロードキャストしなければならない．これは，移動局により構成されるマルチホップ無線網において致命的である．なぜならば，移動局のリンク接続状況は頻繁に変化し，その都度ブロードキャストで制御情報を送信していれば，制御パケットにより帯域が浪費されてしまうからである．

2.3.4 まとめ

上記の関連研究との比較をまとめると表 2.1 のようになる．比較項目には，チャネル数，アクセス方式，負荷分散の考慮，制御パケットによるオーバヘッド，装置の導入コ

ストを用いる．装置の導入コストとは，装置の開発費用や重量などを含めたものである．それぞれの方式が現実的な装置により実現可能かどうかの評価軸に用いる．本論文の提案方式は，隠れ端末対策として有効な RTS および CTS の制御パケットを利用し，隣接局および隠れ端末に関するグラフを導き出す．このグラフを用いて，各チャネルのトラフィック分布を概算しチャネル利用率を求め，その最小値を取るチャネルを受信チャネルとして選択する．関連研究の通信方式との比較についてその優位性を挙げると，(1) 制御パケットのポーリングを行わない，(2) 制御用チャネルを必要としない，(2) 隠れ端末を考慮している，(3) 負荷分散のメカニズムを用いているという点で関連研究の方式よりも優れていると言える．

表 2.1: 関連研究との特性比較

	チャネル数	アクセス方式	負荷分散	制御コスト	装置コスト
Haas	N	Slotted-TDMA	△	×	△
Nasipuri	N	CSMA	△	○	×
Ozugur	1	CSMA with RTS/CTS	○	×	○
提案方式	N	CSMA with RTS/CTS	○	△	△

第3章

シングルチャネル CSMA の問題点

無線通信において，最大の問題は同一チャネル干渉問題である．本章では，コンテンション方式の無線 MAC プロトコルの代表であるCSMA 方式の2つの問題点について述べる．第1の問題は，搬送波検知メカニズムによる弊害である．第2の問題は，RTS/CTS メカニズムによる弊害である．これらの問題が発生する原因について説明し，マルチホップ無線網を構築した際に，どのように影響するかについて考察する．

3.1 搬送波検知メカニズムの弊害

有線媒体と異なり物理的な保護がなく，全ての局で共有される無線媒体において，局の位置関係によっては搬送波の検出が正常に機能しないことがある．特にシングルチャネル CSMA 方式においては，同一チャネル干渉から引き起こされる問題が 2 つある．1 つは，隠れ端末問題と呼ばれ，もう 1 つは見えすぎる端末問題と呼ばれる．

隠れ端末問題 隠れ端末問題とは異なる 2 局が搬送波を検知できずに，本来衝突を回避しなければならない状況において同時に送信をすることにより発生する問題である．

見え過ぎる端末問題 異なる 2 局がそれぞれ別々の通信相手に対して送信を試みる際に発生する．それぞれの通信相手において本来衝突は発生しないにも関わらず，搬送波を検知することにより一方が送信を抑制される問題である．

それぞれの問題について，その現象を図 3.1 を用いて説明する．

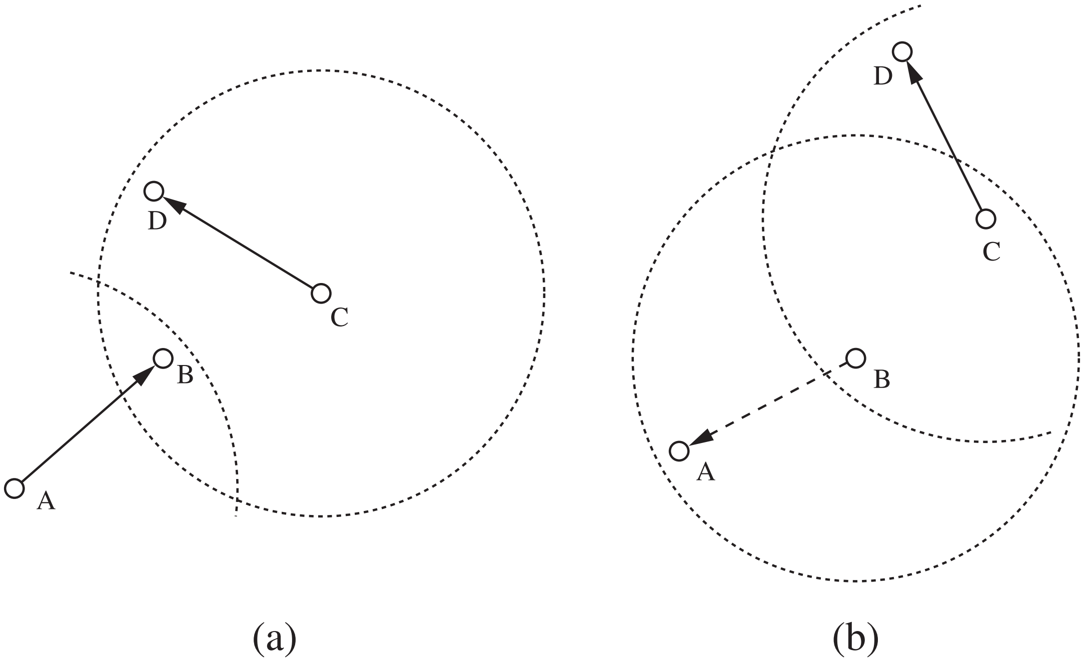


図 3.1: (a) 隠れ端末問題 (b) 見え過ぎる端末問題

図 3.1-a では，局 C から局 D へデータ送信中に局 A から局 B へデータ送信を試みる．局 A は搬送波検出を行いチャネルが使用中でないと認識し局 B へデータ送信する．しかし，局 B は局 A からの送信データを受信できない．なぜなら，局 C の搬送波と局 A の搬送波が局 B において衝突し，送信データが破壊されるからである．一方，図 3.1-b では，局 C から局 D へデータ送信中に局 B が 局 A へデータ送信を試みるとする．局 B は搬送波検出を行いチャネルが使用中であると認識し，局 A へのデータ送信を遅らせ

る．しかし，この遅延は不必要である．なぜなら，局 B と局 C の搬送波は各々の受信局 A，D において互いに衝突せずに受信可能だからである．

このようにシングルチャネル CSMA 方式では，搬送波検出による結果が必ずしも適切にもしくは効率的に機能するとは限らないため，結果として帯域の利用効率が低下する．これらの現象は，マルチホップ無線網において発生する確率が高い．それを図 3.2 のようなマルチホップ無線網を用いて考察する．図 3.2 において，各点は無線局，各線は経路を，各円は局の電波到達範囲 (チャネル干渉範囲) を表し，局 A から局 E へ，局 F から局 J へ，それぞれ 2 つのマルチホップによる通信が行われているとする．この時，「C → D と H → I」の送信では，見えすぎる端末問題が発生し，「A → B と C → D」，「B → C と D → E」，「B → C と H → I」，「C → D と G → H」，「F → G と H → I」，「G → H と I → J」の送信では，隠れ端末問題が発生する．

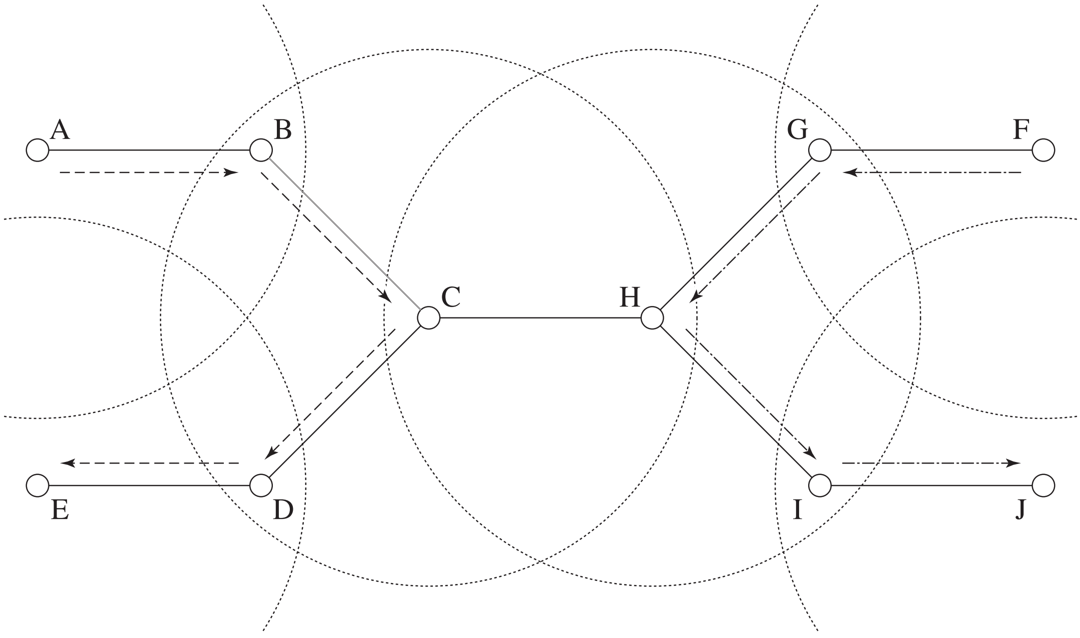


図 3.2: マルチホップ無線網における搬送波検知メカニズムの問題

特に隠れ端末問題は CSMA 方式では深刻な問題である．見え過ぎる端末問題では衝突が発生しないのに対して，隠れ端末問題では隠れ端末が数%存在するだけで衝突確率が高くなり，スループットが著しく低下することが知られている [28]．従って，本論文ではマルチホップ無線網では隠れ端末対策をする必要があると考える．そのため隠れ問題を解決するための MAC プロトコルが数多く提案されている．

それらを大別すると中央制御方式と分散制御方式の 2 方式に分類される．中央制御方式の特徴は，通信の行われる領域の中心にチャネル接続を制御する中央局が存在することである．中央局が制御パケットを定期的に送信し，無線端末局にチャネルの利用状況を通知することによって相互排他的にチャネルへの接続を制御する．代表的な方式として，BTMA (Busy Tone Multiple Access) [28]，DBTMA (Dual Busy Tone Multiple Access) [8]，ISMA (Idle Signal Multiple Access) [30] などが提案されている．分散制御方式では，

中央局が存在しない．そのため，任意の送信局と受信局がデータ送信前に RTS (Request To Send) と CTS (Clear To Send) を交換することによりチャネルを予約する．RTS / CTS を受信した他局は予約されたチャネルへの接続を抑制される．また代表的な方式として，MACA (Multiple Access with Collision Avoidance) [18]，MACAW (MACA for Wireless) [4]，FAMA (Floor Acquisition Multiple Access) [10] などが提案されている．コンテンション方式の MAC プロトコルは後者の方式と併用することが一般的である．本論文で提案する方式においても，RTS/CTS 交換方式を採用する．

3.2 RTS/CTS メカニズムの弊害

RTS/CTS メカニズムの弊害とは，RTS もしくは CTS を受信局が送信抑制されるために発生するブロッキング問題である．本論文では，この問題を NAV (Network Allocation Vector) ブロッキング問題と呼び，マルチホップ無線網における大きなボトルネックになっていることを指摘する．まず，NAV ブロッキング問題について説明する前に，RTS/CTS メカニズムについて説明する．説明には，無線 LAN の標準規格である IEEE (Institute of Electrical Electronics Engineers) 802.11 [20] の VCA (Virtual Carrier Sense) のメカニズムを例に用いる．

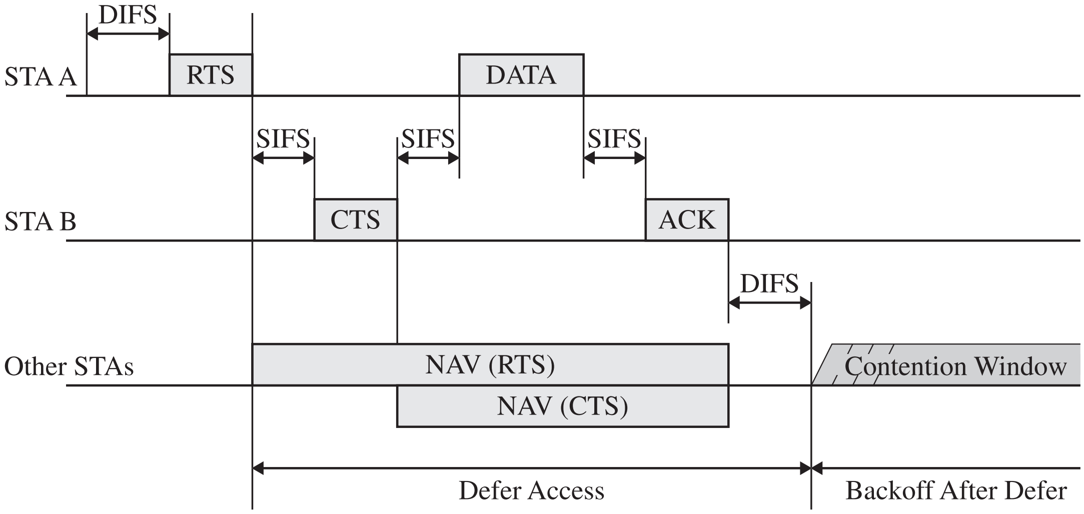


図 3.3: RTS / CTS / DATA / ACK と NAV の設定

図 3.3 は，局 A が局 B へデータを送信する時の手順を示している．まず，局 A は 局 B への送信要求を含む RTS をチャネルへ送信する．RTS には，局 B の識別子とチャネルを占有する時間が情報として含まれている．局 B 以外の RTS を受信した局は局 A の搬送波と干渉しないために NAV (RTS) を RTS の時間情報に基づいて設定し，送信を抑制する．RTS を受信した局 B は自分自身が通信可能であれば局 A への送信許可を含む CTS を返信する．RTS と同様に CTS には，局 A の識別子とチャネルを占有する時間が情報として含まれている．局 A 以外の CTS を受信した局は局 A の搬送波と干渉し

ないために NAV (CTS) を CTS の時間情報に基づいて設定し，送信を抑制する．最後に局 B が正常に送信データを受信すると局 A に対して ACK (Acknowledgment) を返信する．このようにして，受信局と送信局の各電波到達範囲内にいる他局の搬送波による衝突を回避する．

シングルホップ無線網であれば送信データは無線媒体上で一度しか搬送されないが，マルチホップ無線網では送信データは中継局によって送信元から最終宛先までその間のホップ数だけ無線媒体上で搬送される．この時にシングルチャネル CSMA 方式の場合，NAV ブロッキング問題が発生する．

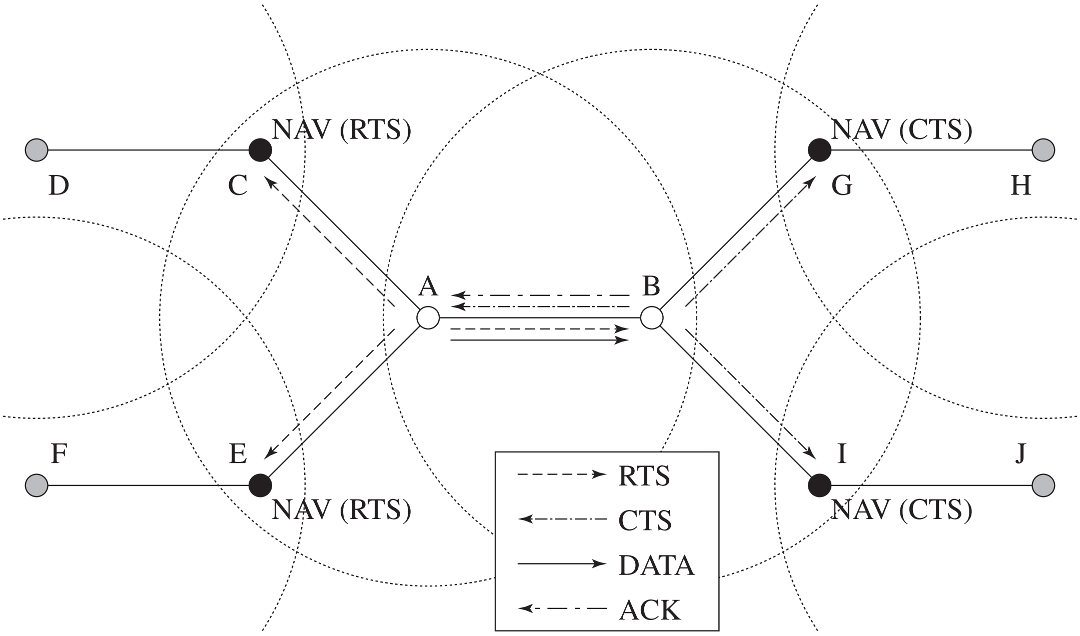


図 3.4: NAV ブロッキング問題

NAV ブロッキングとは，NAV が設定された局が送信不可能になるために起こる 2 次的な現象である．図 3.4 において，局 A と 局 B が RTS / CTS によってチャネルを予約し通信を開始すると，各々の隣接する局 C，E，G，I において NAV が設定される．シングルホップ無線網であれば，NAV が設定された局だけが送信を抑制される．しかし，マルチホップ無線網になると，それらの局に隣接する局 D，F，H，J も，局 A もしくは局 B の方向に送信できなくなる．正確にはそれらの局は送信可能であるが，たとえそれらの局が RTS を送信しても，NAV が設定された局が CTS を返信しないため，それらの局はデータを送信できない．また，RTS / CTS を交換せずにマルチホップでデータ送信を行うと，隠れ端末の出現率が高くなり帯域の浪費に繋がる．

図 3.5 は，局 A から 局 D まで連続した3個のデータパケットをマルチホップで送信させた時のホップシーケンスを図示したものである．全ての局が RTS / CTS を交換する場合には NAV ブロッキングが発生し，2 ホップ先の局が送信を完了するまで次のデータを送信できない (図 3.5-a)．また，全ての局が RTS / CTS を交換しない場合には隠れ端末が出現し，衝突が発生しデータが破壊される (図 3.5-b)．図 3.5-b では，データ送信に対し ACK が返信され，一定時間を経過して ACK が返信されなければ再送を行う MAC プロトコルである．もし， データ送信に対して ACK を返信しない MAC プロトコルであれば，送信データは再送されずに損失してしまうだろう．

3.3 問題の回避策

これらの問題は，シングルチャネル CSMA 方式では回避することができない．本論文において想定する自律分散型マルチホップ無線網を実現するためにはこれらの問題を解決するためには，次の案が考えられる．

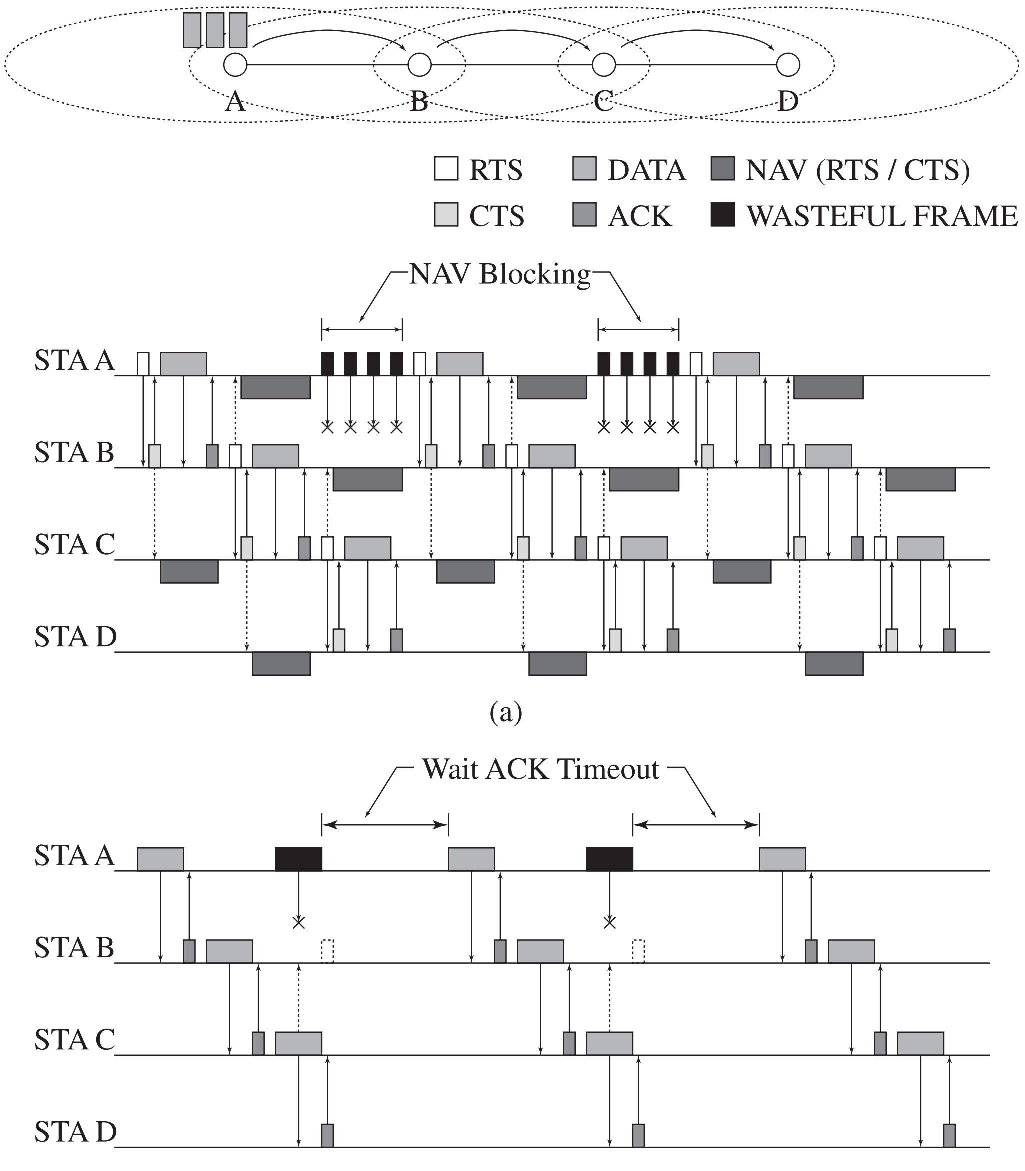
第 1 案 予約割当方式の MAC プロトコルを採用し，分散制御型 DCA 方式を提案する．

第 2 案 マルチチャネル CSMA を採用し，効率的なチャネル選択方式を提案する．

第 1 案については，予約割当方式を用いることによって衝突の発生は抑えられると考える．すでに分散チャネル割当問題 [24] として研究されている．また，Nesargi が [22] において VCN (Virtual Cellular Networks) というセルラー型のマルチホップ無線網に適応したチャネル割当方式を提案している．しかし，チャネル割当を管理する機構をどのように自律分散型の網システム内に配備すれば良いのかを考える必要がある．

第 2 案については，コンテンション方式である CSMA を用いることによって，自律分散型の網システムを容易に構築できる．しかし，各チャネルにおける衝突は回避することはできないので，各局がチャネルをどのように利用するかを考える必要がある．

本論文では，予約割当方式は自律分散型のシステムには適していない点と，マルチホップ無線網の利用特性を考慮し，第 2 案により問題の解決をする．



(a)

(b)

図 3.5: マルチホップデータのホップシーケンス (a) NAV ブロッキング問題 (b) 隠れ端末問題

第4章

LSCS の設計

本章では，負荷分散型チャネル選択方式 **LSCS (Load Sensitive Channel Selection)** の概要とそのアルゴリズムの設計について述べる．本方式は，各無線局において自律分散的に機能するアルゴリズムである．アルゴリズムは，大きく分けて **3** つの手順に分けることができる．それは，**(1)** 各チャネルのトラフィック監視，**(2)** 各チャネル利用率の計算，**(3)** 通信チャネルの選択である．まずはじめに **LSCS** の概要と大まかな動作手順について述べ，次にアルゴリズムの説明をしていく．

4.1 LSCSの概要

本論文は，マルチチャネル CSMA 無線網において効率的なチャネル利用を実現することを目的とする．そのために，負荷分散型チャネル選択方式 LSCS (Load Sensitive Channel Selection) を提案する．本方式では，媒体アクセス制御方式として CSMA による搬送波検知と，RTS/CTS/Data/ACK の交換によるチャネルアクセスを行う．本方式の想定するマルチチャネル CMSA 無線網は，利用する伝送スペクトルの帯域を N 個のチャネルに分割し利用する．無線局は，N 個のチャネルを同時に受信することができ，送信時には 1 個のチャネルを選択し送信する．本章では，その選択方式の設計について述べる．

本方式は，各局において機能する自律分散型チャネル選択方式である．各局が自身の周辺トラフィックを監視することにより各チャネルの利用率を計算する．その局は求められたチャネル利用率を比較することにより，利用率の最も低いチャネルを新しい通信チャネルとして選択する．具体的なチャネル利用率の計算は，RTS および CTS に含まれるトラフィック情報を利用することにより実現される．提案方式のアルゴリズムは大きく分けて，次の 3 段階の手順により実行される．

(1) 各チャネルのトラフィック監視
    トラフィック量の測定
    トラフィック・グラフの生成
    トラフィックの場の抽出

(2) 各チャネル利用率の計算
    総トラフィック量の計算
    チャネル利用率の計算

(3) 新しい通信チャネルの選択
    各チャネル利用率の比較

まず，本方式のアルゴリズムの説明に用いる用語の定義をする．

トラフィック量　トラフィック量とは，データ送信に際しチャネルを占有していた時間とする．無線局 sta のトラフィック量は $\sigma[sta]$ で表す．

トラフィック・グラフ　トラフィック・グラフとはトラフィックの監視により検知された無線局を頂点とする集合とその隣接関係を辺とする集合からなるグラフである．本論文ではこのグラフを $G = (V, E)$ で表し，トラフィック・グラフの頂点集合を $V[G]$，辺集合を $E[G]$ で表す．

トラフィックの場　トラフィックの場については，次節で説明する．

チャネル利用率　チャネル利用率とは，任意の無線局において決定される．その無線局の電波干渉範囲内においてチャネルが占有されていた割合を表す．その値は 0 ~ 1 の範囲で決定される．

測定局 測定局とは，チャネルのトラフィックを監視し，トラフィック量を測定する局とする．

隣接局 隣接局とは，測定局とシングルホップで通信可能な局とする．言い換えると測定局が搬送波検知可能な距離に存在する局である．隣接局集合を $U[G] \subseteq V[G]$ で表す．

隠れ端末局 隠れ端末局とは，測定局からシングルホップでは通信できないが隣接局と隣接関係にある局とする．言い換えると測定局とは搬送波検知できない距離に存在するが隣接局とは搬送波検知可能な距離に存在する局である．隠れ端末局集合を $\overline{U}[G] \subseteq V[G]$ で表す．

4.1.1 「トラフィックの場」の概念

本方式において，チャネル利用率は，隣接局と隠れ端末局のトラフィック量および「トラフィックの場 (Traffic Spot)」の概念を用いることにより計算される．無線はある空間において共有される媒体であるため，各局の物理的位置によって媒体を共有する隣接局の集合が異なる．トラフィックの場とは以下のように定義する．

「互いの局の搬送波を検出可能な局の集合により空間的に形成される場」

またトラフィックの場は同時に複数存在する．図 4.1 のように局が分布する時，測定局の周辺には最大 3 個のトラフィックの場が同時に存在可能である．トラフィックの場という概念を利用する理由は次の通りである．あるチャネルの利用率を測定する時，単純に測定したトラフィック量の加算を行うことができない．なぜなら，互いに干渉し合わないトラフィックは同時に発生する可能性もあるからである．総トラフィック量の算出のために，このような同時発生するトラフィックの考慮をせずに全隣接局のトラフィック量を単純に加算した場合，その見積もりを誤ることになる．

例として，図 4.1 の太線の 3 本の矢印のようなトラフィックについて考える．これらのトラフィックは互いに干渉関係にないものとする．この時，これらのトラフィックは互いに独立して発生する．1 秒間のトラフィックの測定結果からそれぞれのトラフィック量が 1 秒であった場合もし単純な総和を用いて総トラフィック量を計算した場合，$1+1+1=3$ となり総トラフィック量 を 3 秒と計算してしまう．これは，測定時間 (1 秒) よりもトラフィックが多く発生したことになってしまい，見積もりを誤ることになる．

従って，トラフィック量からチャネル利用率を求めるためには隣接局および隠れ端末局の干渉関係を考慮する必要がある．しかし，すべてのトラフィック間の干渉関係を考慮しチャネル利用率を計算することは，計算量が膨大になり現実的ではない．そこで本方式では，トラフィックの場により単純にトラフィック量を加算できる単位を作る．そしてトラフィックの場毎に総トラフィック量を計算し，最後にチャネル利用率を求める．

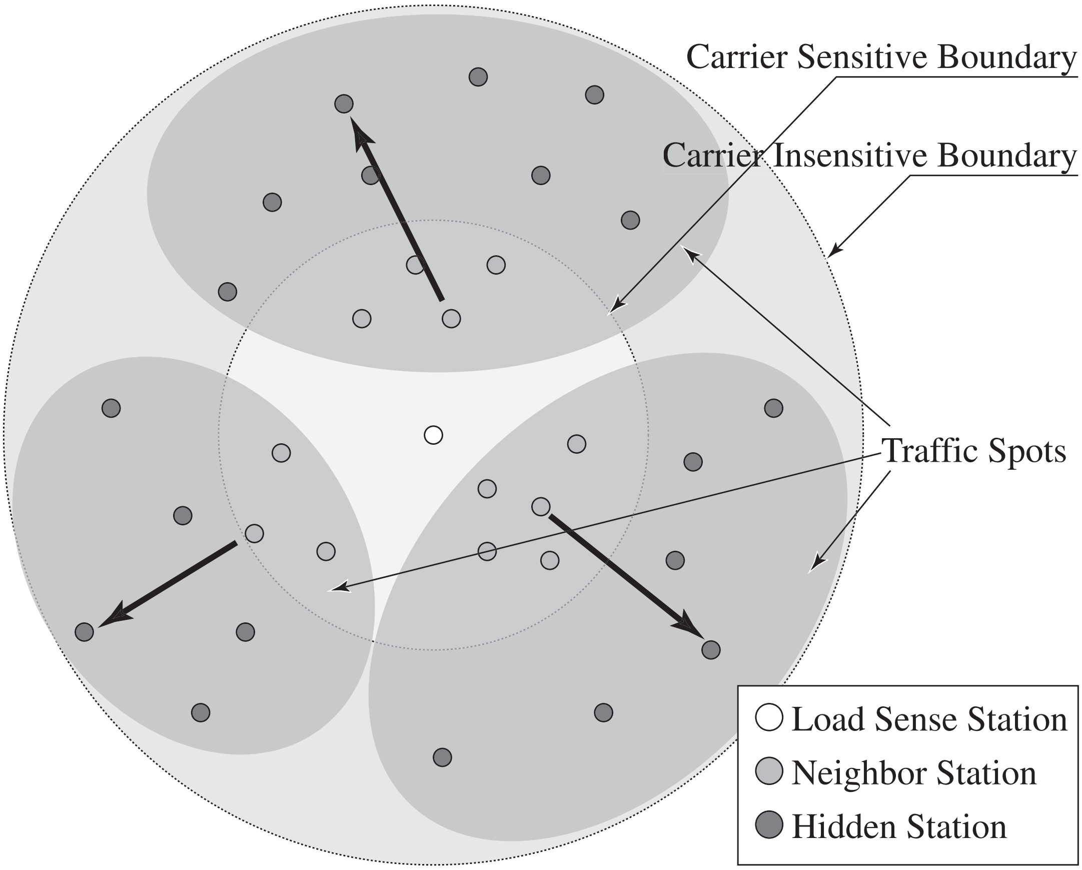


図 4.1: 「トラフィックの場」の概念

4.2 トラフィック量の測定

本方式は，通信チャネルの利用開始の前に先立ち RTS/CTS 制御フレームの交換を行う．その情報に送信局のトラフィック量を含めることにより，RTS/CTS の受信で隣接局のトラフィック量を測定する．本方式における，RTS/CTS フレームの制御情報を表 4.1 に示す．

表 4.1: RTS/CTS 制御情報

src	フレームの送信元アドレス
dst	フレームの宛先アドレス
nbr	フレームの送信元における隣接局アドレス
duration	トラフィック量

トラフィック監視期間，測定局はRTS/CTSのduration情報を処理し，その制御フレームの送信局の測定量を加算していく．トラフィック量の加算処理をする手続きAddTraffic()は次の通りである．

```
AddTraffic($frame$)
    $src$ ←source station of $frame$
    $dst$ ←destination station of $frame$
    if ($frame$ = CTS) and $dst \in U[G]$ then
        $\sigma[src] \leftarrow \sigma[src] + \frac{duration}{2}$
        $\sigma[dst] \leftarrow \sigma[dst] - \frac{duration}{2}$
    else
        $\sigma[src] \leftarrow \sigma[src] + duration$
```

制御フレームの送信局は，測定局の隣接局になることは隣接局の定義「測定局の搬送波検知可能な距離に存在する局」より明らかである．従って，トラフィック量の加算は隣接局に対してのみ行われることになる．また本方式では，トラフィック量の加算はトラフィックに関連する2局間(データ送信局，データ受信局)に対して等分に加算する手法を取る．これにより，後述するトラフィックの場の抽出により局集合が分割された時，トラフィックの分布が均等化される．このような手法を取らなければ，偏りのあるトラフィック分布となりチャネル利用率の計算に影響を与える．

4.3 トラフィック・グラフの生成

トラフィックの場の抽出には，まず局の隣接関係を表すトラフィック・グラフを求める必要がある．トラフィック・グラフは一定期間のトラフィックの監視により生成される．トラフィック・グラフの生成には，表4.1に示すRTS/CTS制御フレームに含まれる情報を用いる．利用される情報は，表4.1中のsrc，dst，nbrの3種類のアドレス情報である．

第3のアドレスとして利用するnbrは，srcとdstからは得られない隣接局間の関係を補完するための補助情報である．ただし，制御フレームのsrcもしくはdstが測定局自身であった場合，トラフィック・グラフに含めない．これは，次節のトラフィックの場の抽出においてグラフ処理の計算量を減らすためである．トラフィック・グラフを求める手続きCreateTrafficGraph()は次の通りである．

```
CreateTrafficGraph($src, dst, nbr$)
    $G \leftarrow \emptyset$
    repeat until monitoring period ends
        if $src \notin V[G]$ then $U[G] \leftarrow U[G] \cup \{src\}$
        if $dst \notin V[G]$ then $\overline{U}[G] \leftarrow \overline{U}[G] \cup \{dst\}$
        if $(src, dst) \notin E[G]$ then
```

```
            $E[G] \leftarrow E[G] \cup \{(src, dst)\}$
        if $nbr \in V[G]$ and $(src, nbr) \notin E[G]$ then
            $E[G] \leftarrow E[G] \cup \{(src, nbr)\}$
return $G$
```

まず，求めるトラフィック・グラフを G としトラフィック監視の開始時に空グラフに初期化する．トラフィック監視期間が終了するまで，受信した全ての RTS/CTS の情報を処理する．$V[G]$,$U[G]$ $\overline{U}[G]$ は局の集合を表す．$V[G]$ は隣接局と隠れ端末局の集合，$U[G] \subseteq V[G]$ は隣接局の集合，$\overline{U} \subseteq V[G]$ は隠れ端末局の集合である．まず，src はフレームの送信局であるから，そのフレームを測定局が受信したということは，src が隣接局であると認識される．dst はフレームの宛先局であり，もしトラフィック監視の開始時点からこれまで測定局においてその存在が認識されていなければ，dst は隠れ端末局と認識される．次に，src と dst の隣接関係を $E[G]$ に追加し，また nbr がすでに測定局によって認識されていればその隣接関係も $E[G]$ に追加する．この処理をトラフィック監視期間が終了するまで繰り返す．

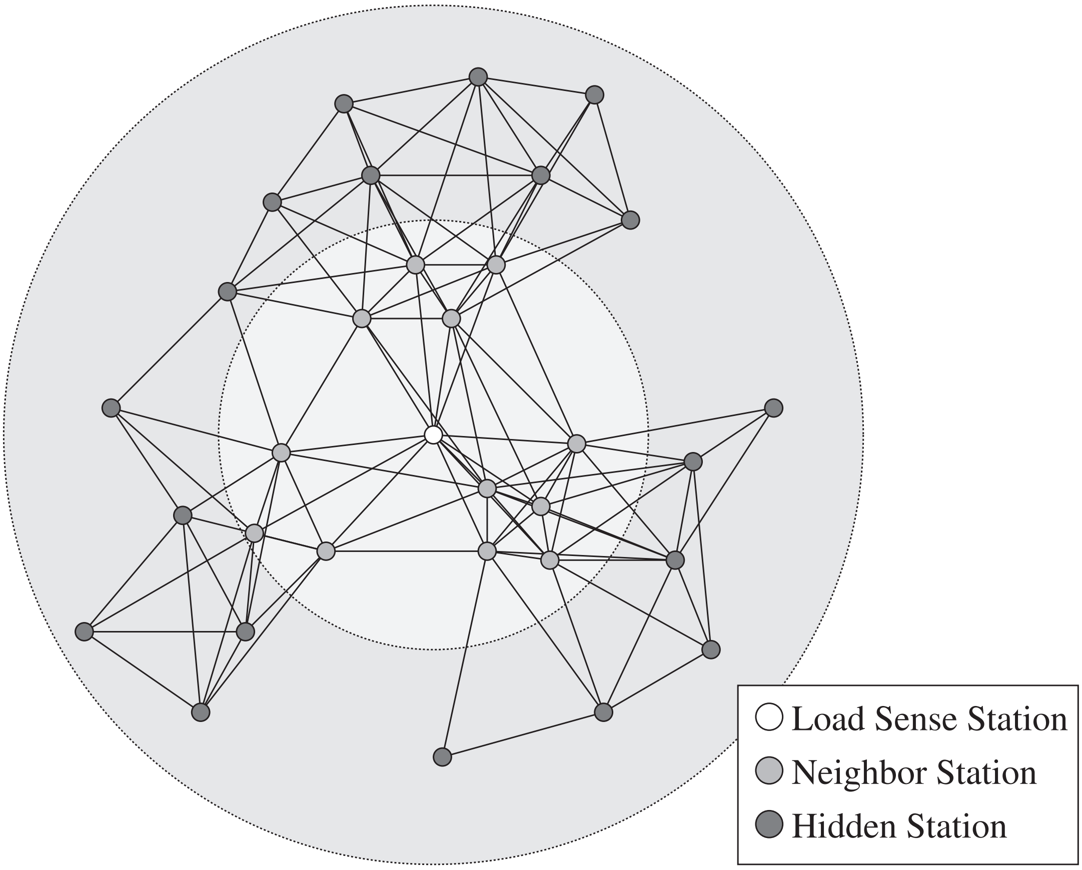


図 4.2: 完全な隣接関係

図 4.1 の局分布の完全な隣接関係を示したものが図 4.2 である．しかし，実際には測定局

において隠れ端末局間で発生するトラフィックについては検知できない．また，測定局自身はトラフィック・グラフに含まれずに処理される．従って，手続き CreateTrafficGraph() より得られるトラフィック・グラフは，隠れ端末局間を結ぶ辺と，測定局に接続している辺を除去した図 4.3 のようになる．

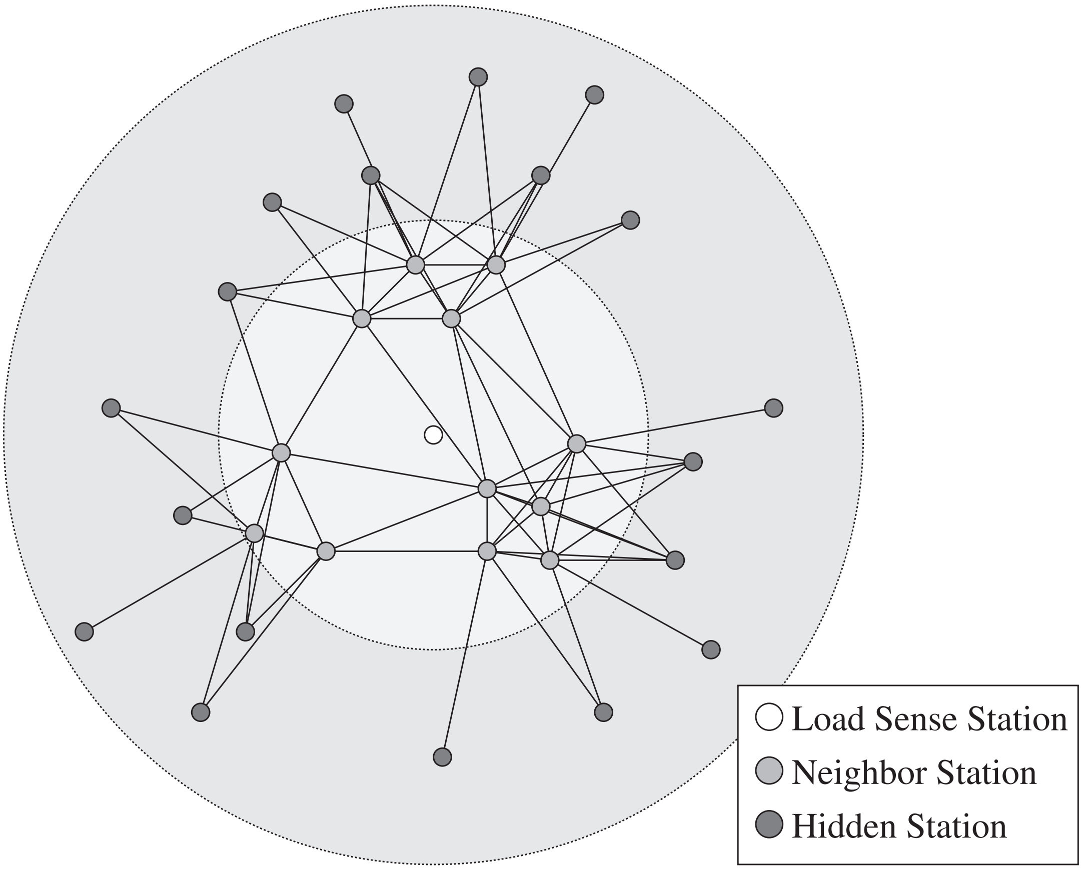


図 4.3: 求められるトラフィック・グラフ

4.4 トラフィックの場の抽出

求められたトラフィック・グラフよりトラフィックの場を抽出する．まず，トラフィックの場の定義「互いの搬送波を検知可能な局の集合」より「トラフィックの場」の局集合はクリーク (完全部分グラフ) を形成することが分かる．従って，トラフィックの場の抽出とはトラフィック・グラフからクリークを抽出することになる．また前述したようにトラフィックの場を求める理由は，チャネル利用率の計算量を軽減するためである．そのために，単純にトラフィック量を加算できる単位を求める．しかし，グラフからクリークは一意に抽出することができないため，次の 3 つの条件により実現する．まず，アルゴリズムの計算量を軽減するために，できるだけ多くの局を含むクリークを発見する．また，4.1 節で述べたように，本方式ではトラフィック量は全て隣接局の情報として加算さ

れる．従って，隣接局の集合の中からクリークを発見すればよく，求めるトラフィックの場の第1条件は次のようになる．

第1条件 トラフィックの場とは極大クリークを形成する隣接局集合である

一般的に極大クリーク発見問題[5]はNP問題として知られている．しかし，本方式では次の第2条件によりNP問題を回避する．

第2条件 トラフィックの場は測定局からできるだけ離れている

第2条件は，測定局と各隣接局を結ぶ辺に距離を持たせることにより実現されるべきであるが，得られたトラフィック・グラフは前節で述べたように，測定局に関する頂点・辺の要素は含まれていない．そのため，本方式では隣接局に重みを持たせることにより実現する．測定局と隣接局の距離の重み付けとして，測定局における受信信号強度を利用する．測定局はRTS / CTSを送信局から受信すると，その受信信号強度を求めることができる．理論的には，受信信号強度は発信局と受信局との距離が大きくなるに従い減衰していく．これは単調減少なので，距離の重み付けとして利用することができる．また，第2条件は極大クリーク発見問題を回避するだけではなく，チャネル利用率の概算に利用可能である．

さらにチャネル利用率を概算するために，トラフィックの場が同時に存在する条件を定義する．トラフィックの場は空間において任意の場として形成され，互いに重複して存在する場合もある．そのような空間内に散在する複数のトラフィックの場から同時に存在可能なトラフィックの場の集合を求めるために，第3条件を定義する．

第3条件 各クリークは互いの頂点を共有しない

これらの条件から，トラフィックの場を求めるアルゴリズムは次の4つの手続きから実現される．

1. CreateTrafficSpots
2. ExtractTrafficSpot
3. FindStaWithMinimalWeightFrom
4. IsCique

まずはじめに手続きCreateTrafficSpots()によって同時存在可能なトラフィックの場の集合を求める．求める集合を$SPOTS$とし，隣接局集合$G[U]$を集合Hに代入する．手続きExtractTrafficSpot()によってトラフィックの場を抽出し，集合$SPOTS$の要素とする．抽出されたトラフィックの場の要素として含まれる隣接局を集合Hより取り除く．この処理を集合Hが空集合になるまで繰り返す．

```
CreateTrafficSpots()
    $SPOTS \leftarrow \emptyset, H \leftarrow G[U]$
    while $H \neq \emptyset$
        $S \leftarrow$ExtractTrafficSpot($H$)
        $SPOTS \leftarrow SPOTS \cup \{S\}$
        $U[H] \leftarrow U[H] - U[S]$
    return $SPOTS$
```

次に，各トラフィックの場を求める手続き ExtractTrafficSpot() では，求める集合を K とし，集合 H の全要素に対してクリーク探索を行う．このクリーク探索は第 1 条件および第 2 条件を満たすように行う．

```
ExtractTrafficSpot($H$)
    $K \leftarrow \emptyset$, UnmarkAll($H$)
    repeat until all stations are marked
        $sta \leftarrow$FindStaWithMinimalWeightFrom($H$)
        if IsClique($sta, K$) then $K \leftarrow K \cup \{sta\}$
        Mark($sta$)
    return $K$
```

まず，手続き FindStaWithMinimalWeightFrom() により，集合 H の要素中で最も重みの軽い要素 (局) を選択し，sta に代入する．もし，局 sta がそれまで発見されたクリーク K とさらにクリークを形成するならば，クリーク K の要素とする．この処理を集合 H のすべての要素に対して行い，得られたクリーク K を返す．

最も重みの軽い局を検索する手続き FindStaWithMinimalWeightFrom() は次のようになる．局集合 H のすべての要素 v に対して重みの最小値 min とその要素の重み $w[v]$ を比較し，求める局を x に代入し，返す．

```
FindStaWithMinimalWeightFrom($H$)
    station $x, min \leftarrow \infty$
    for each station $v \in H$
        $min \leftarrow$ Min($min, w[v]$)
        if $min = w[v]$ then $x \leftarrow v$
    return $x$
```

ある局 sta がクリーク K とさらにクリークを形成するかどうかを判定する手続きが IsClique() である．この手続きは，クリーク K の全要素 v に対して，クリーク K 中に辺 (sta, v) が存在するかを調べる．局 sta が クリーク K とさらにクリークを形成すれば True を返し，形成しなければ False を返す．

```
IsClique($sta, K$)
    $ret \leftarrow$ True
    for each station $v \in K$
        if $(sta, v) \notin E[K]$ then $ret \leftarrow$ False
    return $ret$
```

以上の手続きを繰り返すことにより，図 4.1 の局分布からは，トラフィックの場は図 4.4 のように 3 個得られる結果になる．なお，図中の添字は本アルゴリズムの中でトラフィックの場の要素として発見された局の順番を示している．1 番目のトラフィックの場から，1-1 → 1-2 → として，3 番目のトラフィックの場まで，→ 3-4 → 3-5 と番号が付けられている．

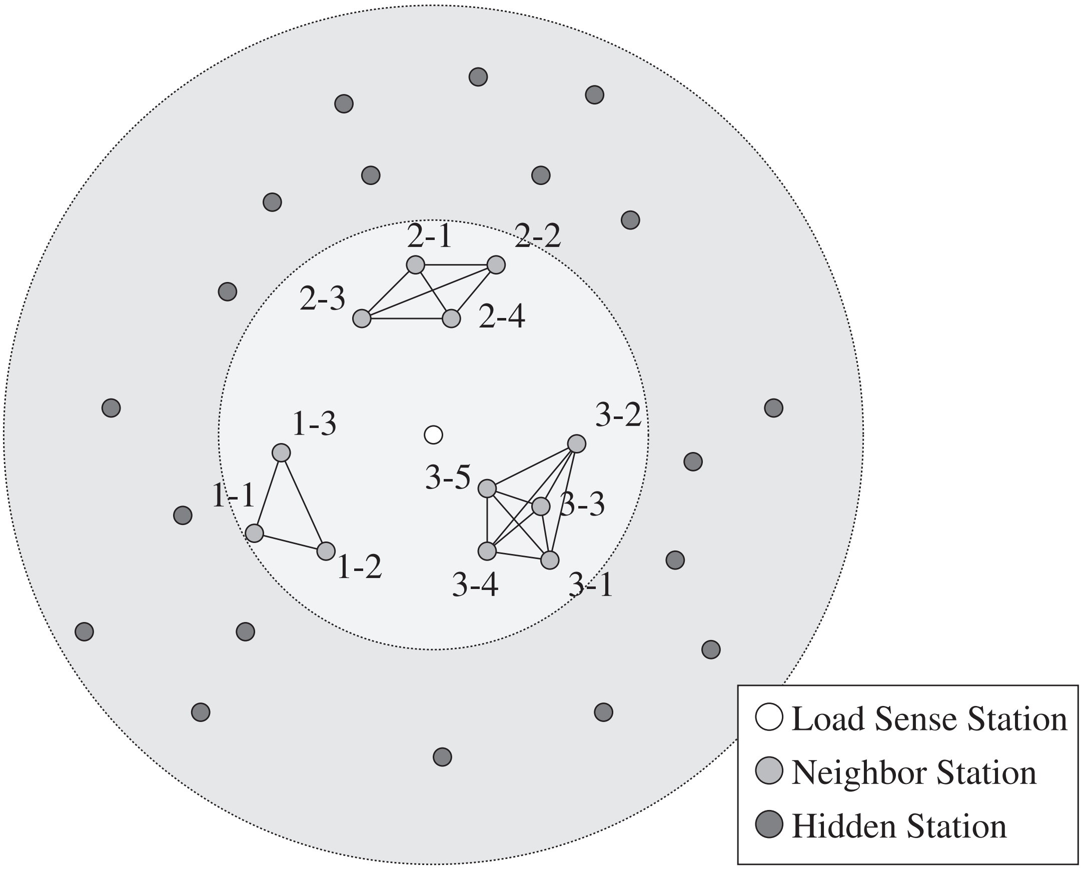


図 4.4: トラフィックの場の抽出結果

4.5 チャネル利用率の計算

チャネル利用率の計算には，トラフィックの場毎の総トラフィック量を計算する．トラフィックの場では，トラフィックは同時に発生することはないので総トラフィック量は

単純に各局のトラフィック量の総和を求めるだけでよい．各トラフィックの場の総トラフィック量を計算する手続き CalcTotalTraffic(K) を示す．

```
CalcTotalTraffic($K$)
    $total \leftarrow 0$
    for each $sta \in K$
        $total \leftarrow total + \sigma[sta]$
    return $total$
```

次にチャネル利用率を求める．チャネル利用率は 0 ~ 1 の値を取り，その値は求められたトラフィックの場毎の総トラフィック量から計算される．4.1 節において述べたように相互干渉関係にないトラフィックは互いに独立して発生する．従って，チャネル利用率は単純にトラフィックの場毎の総トラフィック量の総和から求めると誤った利用率を導き出す可能性がある．そこで，独立して発生するトラフィックを独立事象として考え，チャネル利用率の確率的な期待値を求める．各トラフィックの場毎にトラフィックの発生した割合を $\frac{\text{総トラフィック量}}{\text{トラフィック監視時間}}$ より求める．この割合をトラフィックの場 i のトラフィック発生率 ρ_i とする．そして，各トラフィックの場のトラフィック発生を独立事象として取り扱うことにより，チャネル c のチャネル利用率 λ_c は次式のようになる．

$$\lambda_c = 1 - \prod_{i=1}^{|SPOTS|} (1 - \rho_i)$$

上式を計算するために各局は次の手続き CalcChannelUtilization() を用いる．Period はトラフィックの監視をした時間，$utilization$ はチャネル利用率である．

```
CalcChannelUtilization()
    $utilization \leftarrow 1$
    for each $K \in SPOTS$
        $ratio[K] \leftarrow$ CalcTraffic(K) / Period
        $utilization \leftarrow utlization \times (1 - ratio[K])$
    $utlization \leftarrow 1 - utilization$
    return $utilization$
```

そして，各チャネルのチャネル利用率 λ_c を比較し，最も利用率の低いチャネルを通信チャネルとして選択する．選択されたチャネルは次の選択時まで，測定局の通信チャネルとして固定的に利用される．

例として，表 4.2 に示す値を用いてチャネル利用率の計算および通信チャネルの選択の動作を見る．表 4.2 は，4 チャネルのトラフィックを 5 秒間監視し，各チャネルのトラフィックの場の総トラフィック量を計算したものである．チャネル 1 から チャネル 4 はそれぞれ 4 個，4 個，3 個，2 個のトラフィックの場を抽出したものとする．これらの値から各チャネル利用率は，以下のように計算される．

表 4.2: 測定計算より得られた総トラフィック量

	チャネル 1	チャネル 2	チャネル 3	チャネル 4
トラフィックの場 1	3.282	1.412	3.312	4.312
トラフィックの場 2	2.914	1.032	0.331	1.211
トラフィックの場 3	2.124	0.921	0.221	—
トラフィックの場 4	1.321	0.321	—	—

（チャネル数 $= 4$ 個，監視時間 $= 5$ 秒）

$$
\begin{aligned}
\lambda_1 &= 1-(1-\frac{3.282}{5})\times(1-\frac{2.914}{5})\times(1-\frac{2.124}{5})\times(1-\frac{1.321}{5}) \\
&= 0.932 \\
\lambda_2 &= 1-(1-\frac{1.412}{5})\times(1-\frac{1.032}{5})\times(1-\frac{0.921}{5})\times(1-\frac{0.321}{5}) \\
&= 0.565 \\
\lambda_3 &= 1-(1-\frac{3.312}{5})\times(1-\frac{0.331}{5})\times(1-\frac{0.221}{5}) \\
&= 0.699 \\
\lambda_4 &= 1-(1-\frac{4.312}{5})\times(1-\frac{1.211}{5}) \\
&= 0.896
\end{aligned}
$$

計算結果より，$\lambda_1 = 0.932, \lambda_2 = 0.565, \lambda_3 = 0.699, \lambda_4 = 0.896$ の大小を比較すると，

$$\lambda_1 > \lambda_4 > \lambda_3 > \lambda_2$$

となり，チャネル 2 が最も利用率が低いことが分かる．従って，この結果から測定局は次のチャネル利用率の再計算までチャネル 2 を通信チャネルとして選択する．ここまでが LSCS のチャネル選択アルゴリズムである．

第5章

LSCS の性能評価

本章では，本論文において提案する **LSCS** 方式の性能評価を行う．シミュレータには，**ns-2 (Network Simulator version 2)** を利用し，その **MAC** モジュールとして提案するチャネル選択方式 **LSCS** を実装した．数種類のシナリオ上で，システムスループットおよび衝突パケット数を測定し，測定結果の考察と，**LSCS** 方式の性能評価を行う．

5.1 予備評価

まずはじめにシミュレーションによるシングルチャネルおよびマルチチャネル CSMA 方式の予備的な基本性能評価を行う．

広さ $D \times D$ の平面上を N 台の移動局によって構成される無線網 (図 5.1) で CSMA 方式の網全体の平均スループットおよび衝突パケット数を測定する．また，移動局は人間が携帯している無線デバイスを想定している．

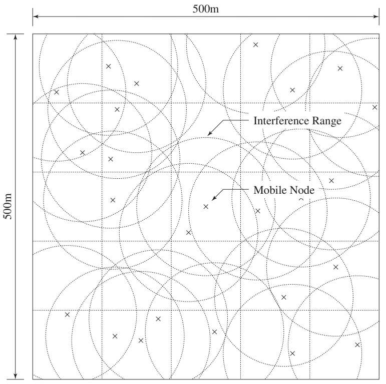


図 5.1: シミュレーション平面

システムで利用可能なチャネル数 C とネットワークのトラフィック量 (平均生成パケット数 G) を変更し，チャネル数とトラフィック量 G が CSMA 方式に与える影響を考察する．シミュレーションには，C 言語で実装した $1\ \mu$s の粒度でシミュレートするイベント駆動型シミュレータを用いる．また，シミュレーションの計算量が非常に多いため，短時間 (シミュレーション時間 200 秒，その実行時間約 14 分) のシミュレーションを 30 回実行し，サンプルによる平均を求める．

シミュレーションモデル

シミュレーションモデルは以下のように設定する．またシミュレーションの各パラメータに設定した値を表 5.1 に示す．

移動モデル 各移動局は一定時間 T_v だけ速度 v で方向 θ に直線移動する．時間 T_v を経過すると各移動局は速度 v $[0, v_{max}]$ と方向 θ $[0, 2\pi]$ を一様分布に従い任意に決定する．また単位面積における移動局の平均密度を一定にするため, 移動局が平面境界まで達すると速度 v のまま反射し再び直線移動を続ける．

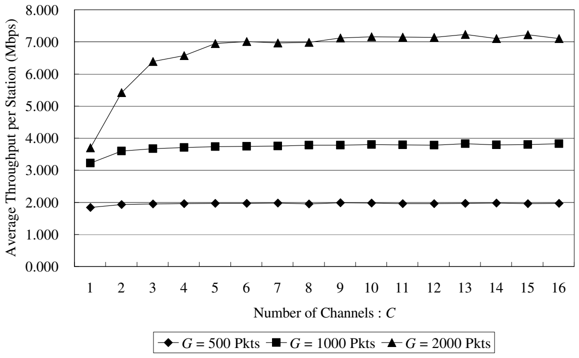
トラフィックモデル 各移動局は固定長 L のパケットを平均時間 T_p の指数分布に従い生成する．1 度の生成イベントで平均 G 個のパケット群を生成し，CSMA 方式で送信を行う．生成されるパケット数 G は，$[1, G_{max}]$ の一様分布に従い任意に決定する．今回は予備的なシミュレーションのため，固定長コンテンションウィンドウの

表 5.1: パラメータ設定

パラメータ		設定値
シミュレーション時間		200 秒
MAC プロトコル		CSMA /w Fixed Backoff
電波到達距離		100 m
チャネル数	C	1 ~ 16 個
平均生成パケット数	G	500, 1000, 2000 個
測定回数		各 $C \times G$ につき 30 回
帯域幅	B	11 Mbps
シミュレーション空間	$D \times D$	500 m × 500 m
移動局数	N	25 台
移動パターン変更間隔	T_v	60 秒
平均移動速度	v	4.5 m/s
平均パケット生成間隔	T_p	3 秒
パケット長	L	1500 バイト

CSMA 方式を用いることにする．また，シングルホップ送信を行う．パケットの衝突の検知は送信局で行い，隣接局が同時に送信を試みた場合に衝突が発生すると設定する．

シミュレーション結果とその考察

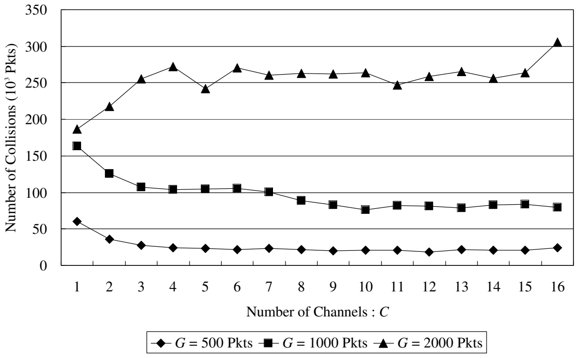


(a)

図 5.2: 予備測定結果: (1) 平均スループット

トラフィック量 G (平均生成パケット数) およびチャネル数 C を各々$G = 500, 1000, 2000$，$C = 1, 2, ..., 16$ と変化させ，各条件における平均スループット (システムスループット ÷ 移動局数) と衝突パケット数の関係を考察する．

まず平均スループットの変化 (図 5.2) を考察すると，すべての G の条件において C が増加するにつれ平均スループットは増加する．また $C \leq 4$ の時，その増加の傾きは G の増加に従って大きくなる．G の各条件において $C = 1$ における平均スループットと最もスループットが出た時の性能改善を見ると，各々108% ($G = 500$)，119% ($G = 1000$)，



(b)

図 5.3: 予備測定結果: (2) 衝突パケット数

196% ($G = 2000$) となった．しかし，$C > 4$ の時ではスループットの改善はあまり見られない．これは移動局の平均密度 (N/D^2) が固定条件だからだと考える．次に衝突パケット数 (図 5.3) に関して，$G = 500$，$G = 1000$ において，チャネル数が増加するにつれ衝突パケット数は増加するのに対して，$G = 2000$ では，衝突パケット数は減少しない．特に $C < 4$ の時では，衝突パケット数は著しく少ない．これは CSMA 方式のスループットトラフィック特性が原因で，あるトラフィック量を頂点にそれ以上のトラフィック量ではスループットが減少するためである．つまりチャネル数が少ない場合，移動局が搬送波検出した結果，チャネル使用中となる確率が著しく高くなり，送信を遅らせる確率も高くなる．基本的に衝突は同時に送信を試みる際にしか起らないため，送信を遅らせれば衝突も起らないことになる．これらのことから，シングルチャネルよりもマルチチャネル CSMA 方式の方が帯域を効率的に利用できると言える．

5.2 シミュレーションモジュールの実装

本論文の提案方式 LSCS の評価をシミュレーション上で行う．シミュレーションには，ns-2 (Network Simulator version 2) [9] と カーネギーメロン大学 Monarch プロジェクトの開発した無線アドホックネットワーク拡張モジュール [27] を用いる．

図 5.4 に，モジュール構成を示す．LSCS は，MAC 層シミュレーションモジュールとして実装され，上位層のインタフェースキュー (IFQ) からパケットを受取り，下位層のネットワークインタフェース (NetIF) にパケットを渡す．媒体アクセス制御方式は基本となるIEEE 802.11 方式 [20] を拡張することにより実装する．このモジュールがパケット送受信に行うことは以下の通りである．

搬送波検知 パケット送信前に媒体が IDLE であるか BUSY であるかを調べる．IDLE の場合は競争 (コンテンション) に入る．

任意バックオフ と 延期 競争には，任意に設定されるバックオフ (Random Backoff) を行う．また他の局が送信権を得た場合，延期 (Defer) を行う．

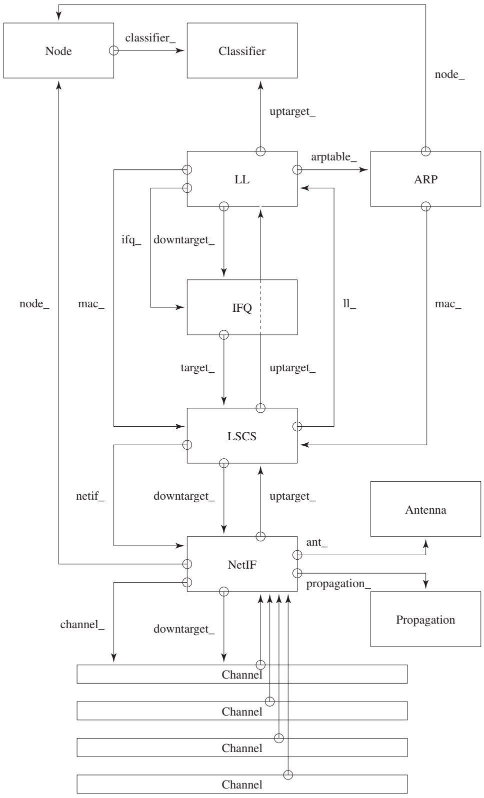


図 5.4: モジュール構成

4-way Handshake RTS / CTS / Data / ACK の交換により，データパケットを送信する．

パケット再送 CTS もしくは ACK による返答がない場合，MAC 層においてパケット再送を行う．

受信時の衝突発生 パケット受信時に他のパケットが同時に到着した場合，衝突が発生する．

また，マルチチャネルを実装するためにネットワークインタフェースは全チャネルのパケットを受信可能にする．また，ネットワークインタフェースから上がってきたパケットがどのチャネルを利用したかを識別するために，パケット送信側の LSCS モジュールがパケットを下位層に渡す時に，パケットにチャネル識別子を付加する．表 5.2 にパケット情報の一部を示す．

表 5.2: `hdr_cmn` 構造体

```
struct hdr_cmn {
    enum      dir_t { DOWN= -1, NONE= 0, UP= 1 };
    packet_t  ptype_;       // packet type (see above)
    int       size_;        // simulated packet size
    snipped...

    int       channel_;     // channel ID
    dir_t     direction_;   // direction: 0=none, 1=up, -1=down
    snipped...

    inline int& channel() { return (channel_); }
    snipped...
};
```

また，RTS/CTS 制御パケットには，3 つのアドレス (src, dst, nbr) を含む．表 5.3 に RTS 制御パケットの構造体を示す．

表 5.3: `rts_frame` 構造体

```
struct rts_frame {
    struct frame_control   rf_fc;
    u_int16_t              rf_duration;
    u_char                 rf_sa[ETHER_ADDR_LEN];
    u_char                 rf_da[ETHER_ADDR_LEN];
    u_char                 rf_na[ETHER_ADDR_LEN];
    u_char                 rf_fcs[ETHER_FCS_LEN];
};
```

トラフィック・グラフは，隣接リストを用いてグラフの頂点と辺を表現する．表 5.4 にトラフィック・グラフに関するクラス宣言を示す．

5.3 シミュレーションモデル

シミュレーション評価における環境のモデルを行う．シミュレーションには (1) 無線モデル，(2) トポロジモデル および (3) トラフィックモデルを以下のように設定する．また，LSCS の性能評価のために複数のチャネル選択アルゴリズムを利用し比較を行う．

表 5.4: TGNode, TGLink クラス

```
class TGNode {
    TGNode(double traffic, double Pr) {}
    snipped...
    LIST_ENTRY(TGNode)   tnnode_link_;     // next node
    int                  index_;           // node index
    tglink_list          tglink_list_;     // adjacency list
    double               traffic_;         // traffic
    double               Pr_;              // rcvd signal pwr
};
LIST_HEAD(tgnode_list, TGNode);
class TGLink {
    TGLink() {}
    snipped...
    LIST_ENTRY(TGLink)   tglink_link_;     // next link
    int                  index_;           // node index
};
LIST_HEAD(tge_list, TGLink);
```

5.3.1 無線モデル

無線環境のモデルでは，無線信号がどのように伝搬するかを定義する．無線伝搬 (Radio Propagation) モデルは，各パケットの受信信号の出力値の予測に用いる．各無線局の物理層では，パケットを受信可能な閾値が存在する．その閾値よりも受信出力が低い場合には，MAC 層において破棄される．無線伝搬モデルには，Two-Ray Ground Reflection モデル [26] を用いる．このモデルは，地面からの反射波と直接波のパスを考慮する．伝搬距離 d における受信出力 P_r は次式により予測される．

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r {h_t}^2 {h_r}^2}{d^4 L}$$

P_t は送信出力，G_t，G_r は送信局および受信局におけるアンテナの利得である．h_t，h_r は，それぞれ送信局側と受信局側のアンテナの地面からの高さである．L はシステムのロスファクターである．これらの設定値を表 5.5 に示す．なお，0.2818 W の送信出力の電波到達可能範囲の半径は 約 250 m になる．

その他に，MAC 層における受信判定用の閾値パラメータの設定値を表 5.6 に示す．パラメータ γ_1，γ_2，γ_3 は，各々搬送波検知可能な出力最小値，受信可能な出力最小値，受信可能な信号対干渉雑音比の最小値である．

表 5.5: パラメータ設定 (1)

パラメータ		設定値
送信出力	P_t	$0.2818W$
アンテナの利得	G_t, G_r	1.0
アンテナの高さ	h_t, h_r	$1.5m$
ロスファクター	L	1.0

表 5.6: パラメータ設定 (2)

パラメータ		設定値
搬送波検知出力	γ_1	$1.559 \times 10^{-11}W$
受信出力	γ_2	$3.652 \times 10^{-10}W$
信号対干渉雑音比	γ_3	$10.0dB$

5.3.2 トポロジモデル

移動環境のモデルでは各無線局の配置方法および移動方法を定義する．シミュレーションでは無線局が移動するモデルと無線局が静止したままのモデルを用意した．また，無線局は正方形のフィールドに配置される．移動モデルでは Random Way Point モデル [6] を用いる．このモデルでは，各無線局はフィールドをランダムに移動する．無線局は，任意に移動先の位置と速度を決定し等速直線移動を続け，その地点で一定時間停止する．速度の決定は，$[0...v_{max}]$ の間を一様分布に従い任意に決定される．その後，再び新しい移動先と速度を決定し同様の移動を繰り返す．フィールドの境界では，無線局は反射し速度一定のまま方向を変更する．静止モデルでは，格子上に無線局を配置する．また，無線モデルにおいて設定したように各無線局の伝送距離は約 $250m$ である．両モデルにおける，パラメータの設定値を表 5.7 に示す．また，図 5.5 に各トポロジーの概観を載せる．

表 5.7: パラメータ設定 (3)

移動モデル		
パラメータ		設定値
無線局数	N	100 台
フィールド	$D \times D$	$1000m \times 1000m$
最大移動速度	v_{max}	$5m/s$
静止時間	p	1 秒
静止モデル		
パラメータ		設定値
配置間隔		$100m$

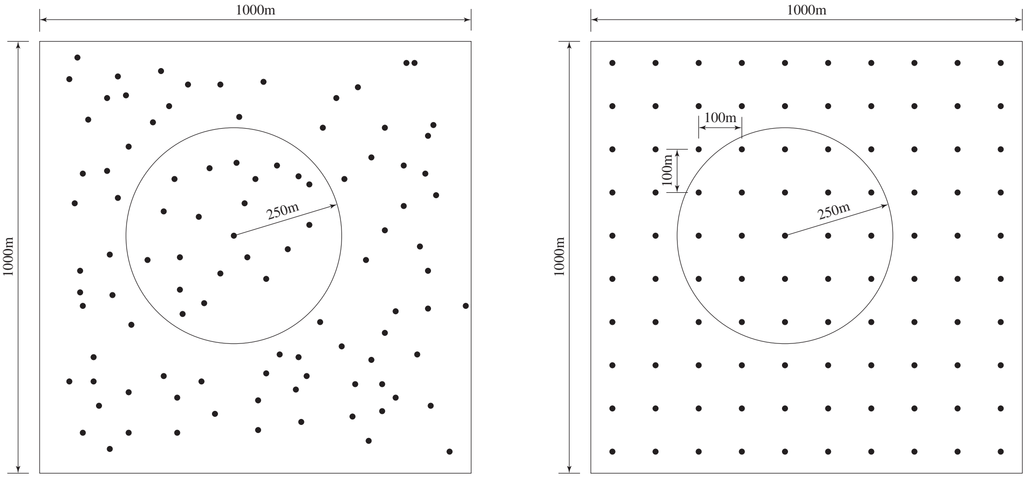


図 5.5: トポロジの概観 (移動モデル (左)，静止モデル (右))

5.3.3 トラフィックモデル

シミュレーションにおいて，無線局は，CBR (固定ビットレート) のフローを一定時間送信する．送信局は，シミュレーション全体でランダムに決定される．また，その宛先もランダムに決定され，動的に経路制御を行い，フローを発生させる．シナリオ毎にビットレートを変更した CBR を用いる．ビットレートの変更は，CBR のパケット長を一定にし，パケットの送信間隔を変更する．また，経路制御方式には，DSR (Dynamic Source Routing) [16] を用いる．表 5.8 にトラフィックに関するパラメータの設定値を載せる．

表 5.8: パラメータ設定 (4)

パラメータ		設定値
パケット長	λ	512 Bytes
送信間隔	μ	0.2，0.1，0.05，0.02，0.01 秒
帯域幅 (チャネル毎)	B	$2Mbps$

5.3.4 チャネル選択アルゴリズム

提案方式の性能比較を行うために複数のチャネル選択アルゴリズムを各シナリオにおいて評価する．チャネル選択アルゴリズムには，提案方式の他に 2 種類の方式を適応させる．それらは以下の通りである．

ランダム方式 ランダム方式は一回のパケット送信毎にランダムに送信チャネルを決定する方式である．

固定方式 シミュレーション開始時に，各無線局毎にランダムに送信チャネルを決定しシミュレーションが終了するまでそのチャネルを固定的に利用する．

5.4 シミュレーション評価

シミュレーションでは，以下の2項目に関する評価を行う．

評価 1 シングルチャネルとマルチチャネルによる性能比較

評価 2 チャネル選択アルゴリズムの評価

それぞれの評価シナリオについては，次の通りである．

評価 1： シングルチャネルとマルチチャネルの性能比較

評価1では，シングルチャネル CSMA 方式と マルチチャネル CSMA 方式の性能比較を行う．チャネル数 C を 1, 2, 3, 4 と増加させた時のシステムスループット，衝突パケット数の測定および帯域利用効率の評価を行う．トラフィックとして，同時に2本の CBR フローを発生させる．前述のトラフィックモデルで設定した通り，CBR は 5 種類のビットレートを用いる．トポロジには移動モデルを用いる．また，各チャネルの帯域幅は 2 Mbps に固定し，チャネル数を増やした場合，システムの総帯域幅は $(2 \times C)$ Mbps とする．帯域利用効率はシステムスループット ÷ 総帯域幅により計算することとする．

評価 2： チャネル選択アルゴリズムの評価

評価2では，提案したチャネル選択方式 LSCS の性能評価を行う．チャネル数 $C = 4$ に固定し，5種類のCBRフローをトラフィックとして発生させる．比較対象となるアルゴリズムには，前述のランダム方式および固定方式のチャネル選択アルゴリズムを用いる．またトポロジモデルには移動モデルと静止モデルを用いる．

5.4.1 評価 1： 測定結果とその考察

測定結果を図5.6から図5.9に示す．チャネル数増加に伴い，システムスループットは増加し，衝突パケット数およびバッファオーバフロー数は減少していることが分かる．これは，チャネルに割当てられる帯域が固定であるため，チャネル数が増加することによって総帯域が増加したことにより説明することができる．また，シングルチャネル時は帯域に対して許容量に達するレートが非常に低く，そのレート以上の性能劣化が著しい．従って，シングルチャネルとの比較をするために，総帯域に対して使用された帯域の割合を調べてみた．その結果，帯域利用率はシングルチャネル時と比較して，チャネル数が2，フローレートが50パケット/秒 (約220kbps) 時に105 %，またチャネル数が3，フローレートが100パケット/秒 (約440kbps) 時106 %の帯域使用率を示すことができた．逆にフローレートが低い時には，帯域利用率はシングルチャネルと比較しチャネル数が増加するにつれ減少する. つまり，トラフィック量が低い時にはシングルチャネルの方が帯域利用率は効率的であると言える．これらの結果から，トラフィック量が低い

場合には必ずしもマルチチャネル化することによる性能向上が実現されるとは言えないが，トラフィック量が多い場合にはマルチチャネル化することによりシングルチャネルよりも性能が向上すると言える．

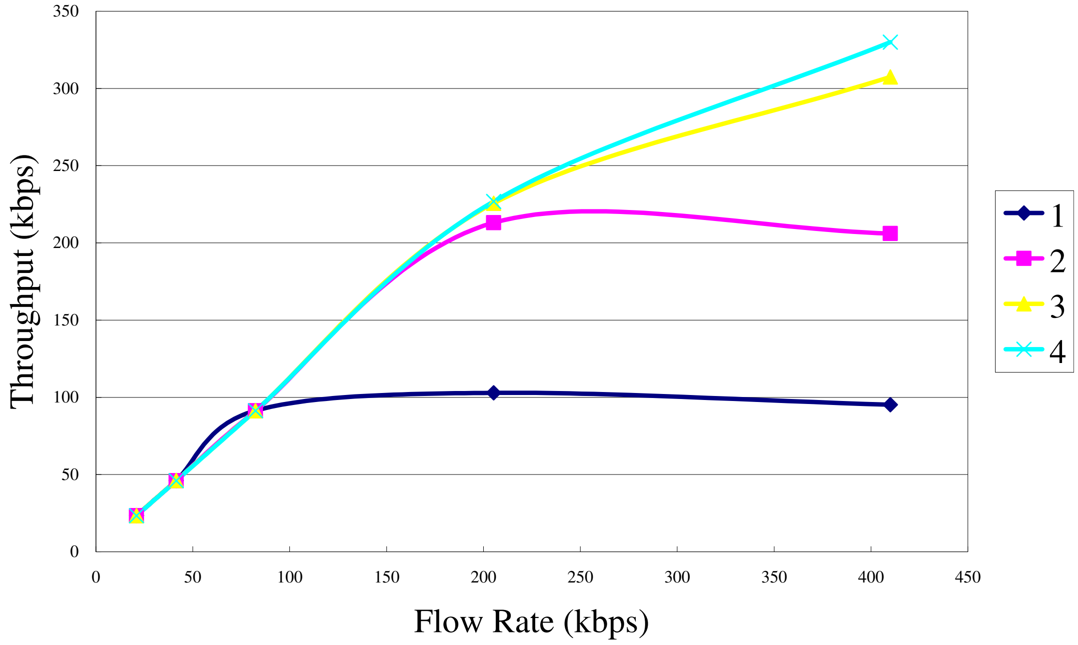


図 5.6: 測定結果 1-1 システムスループット

5.4.2　評価 2：測定結果とその考察

測定結果を図 5.10 から図 5.14 に示す．各グラフは，フローのレートを増加させた時にチャネル選択方式がどのように性能に影響を及ぼすかを示したものである．特徴的なものとしては，図 5.11 における衝突パケット数がランダム方式の場合，他の 2 方式と異なりフローレートを増加させると増加し続ける点である．これは，パケット送信時に各無線局がランダムに選択するために固定方式や LSCS 方式と比較して衝突を回避する確率が低くなっているためである．また，固定方式と比較すると LSCS 方式はどのグラフにおいてもそれほど性能差は見いだすことはできなかった．しかし，このグラフは統計的に平均を出したものであり，その分散は 固定方式の方が大きい．固定方式では，チャネル配置が最適化された状態で割当てると非常に性能結果が良い場合があるが，逆にチャネル配置が不適切に行われた場合，ランダム方式以上に性能が悪くなる．逆に，LSCS 方式は，その分散は小さい．つまり，LSCS 方式は固定方式よりも安定した性能を実現していることが分かる．これらのことから，負荷分散を考慮することによりチャネル選択をすることはネットワーク帯域の利用に対して効率性を提供できると言える．

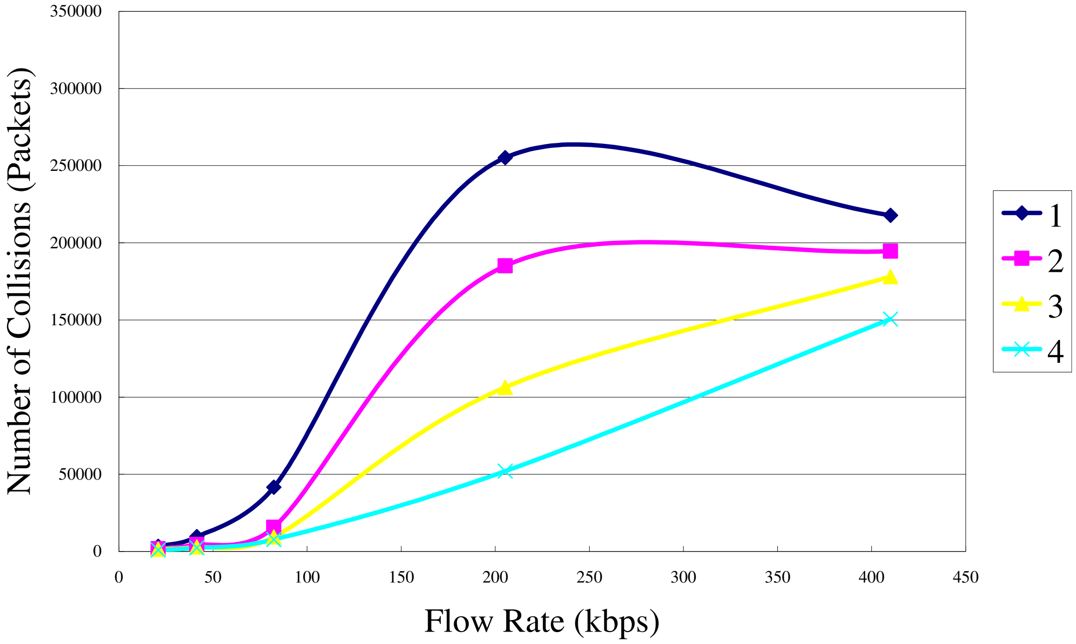


図 5.7: 測定結果 1-2 衝突パケット数

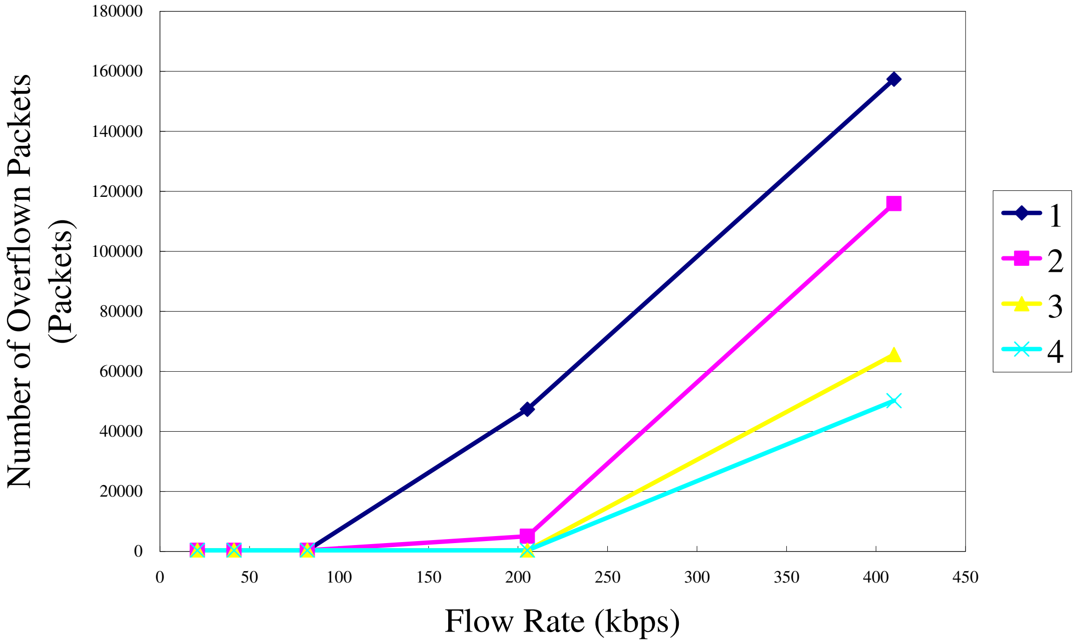


図 5.8: 測定結果 1-3 バッファオーバフロー数

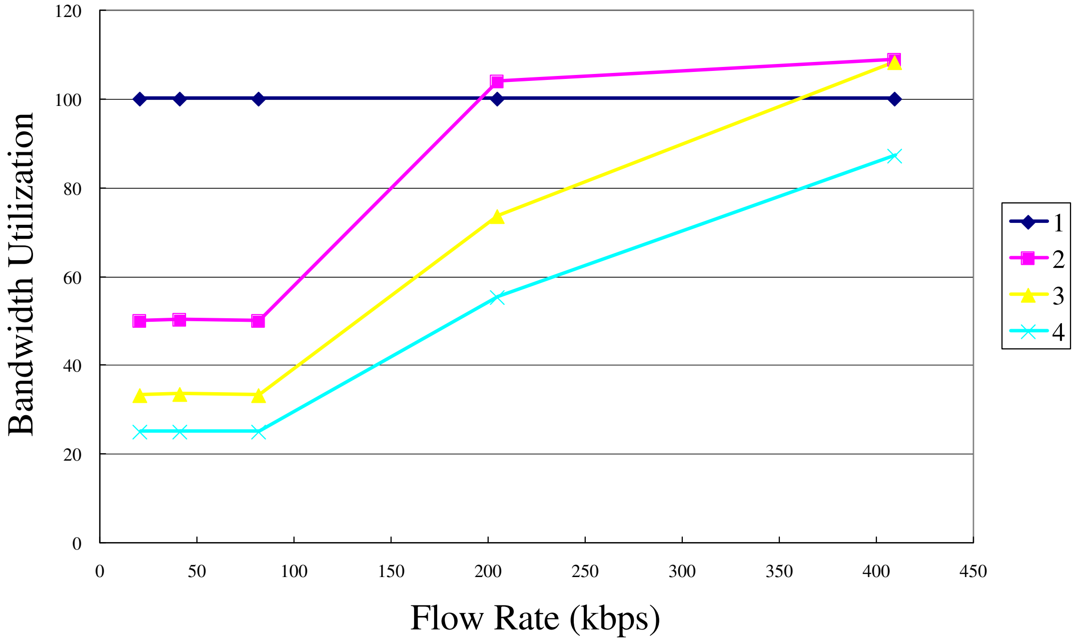


図 5.9: 測定結果 1-4 帯域利用効率

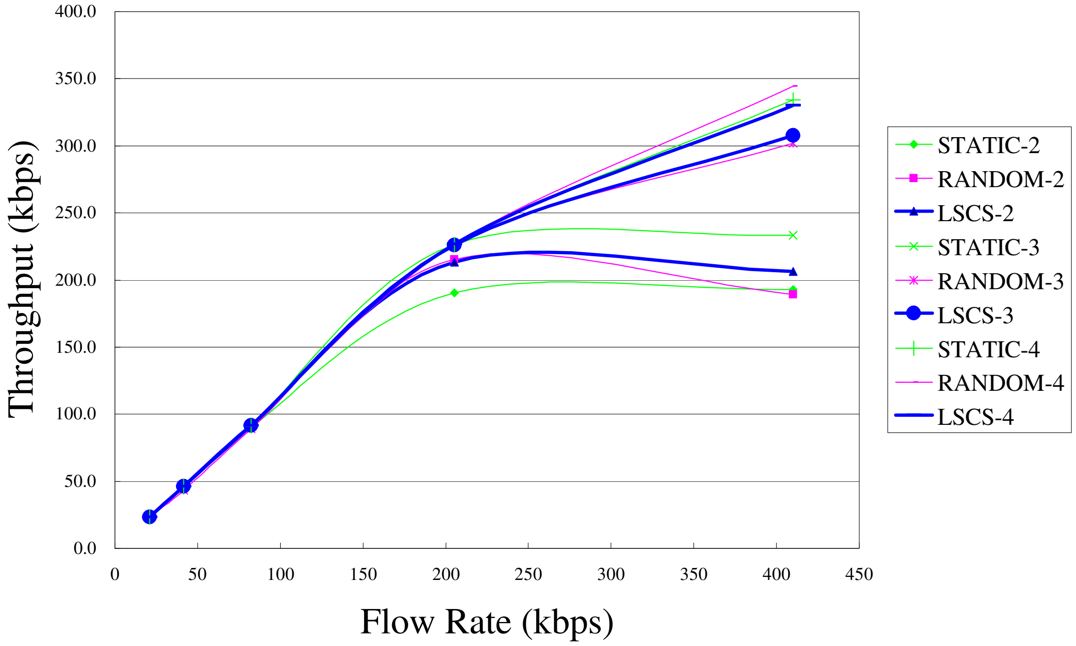


図 5.10: 測定結果 2-1 システムスループット (静止)

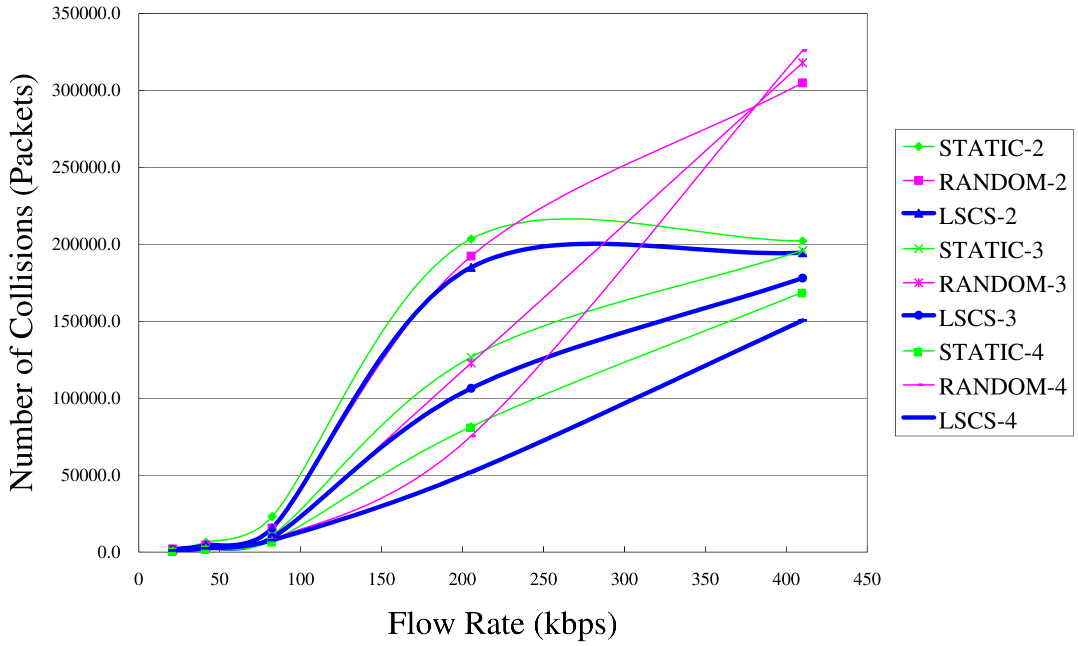


図 5.11: 測定結果 2-2 衝突パケット数 (静止)

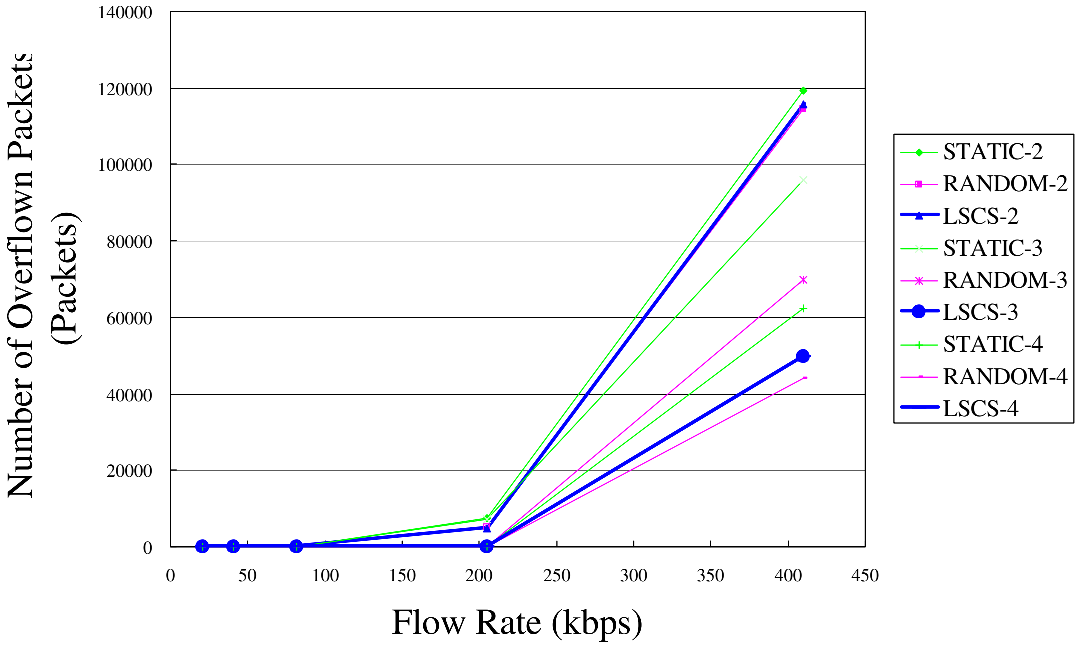


図 5.12: 測定結果 2-3 バッファオーバフロー数 (静止)

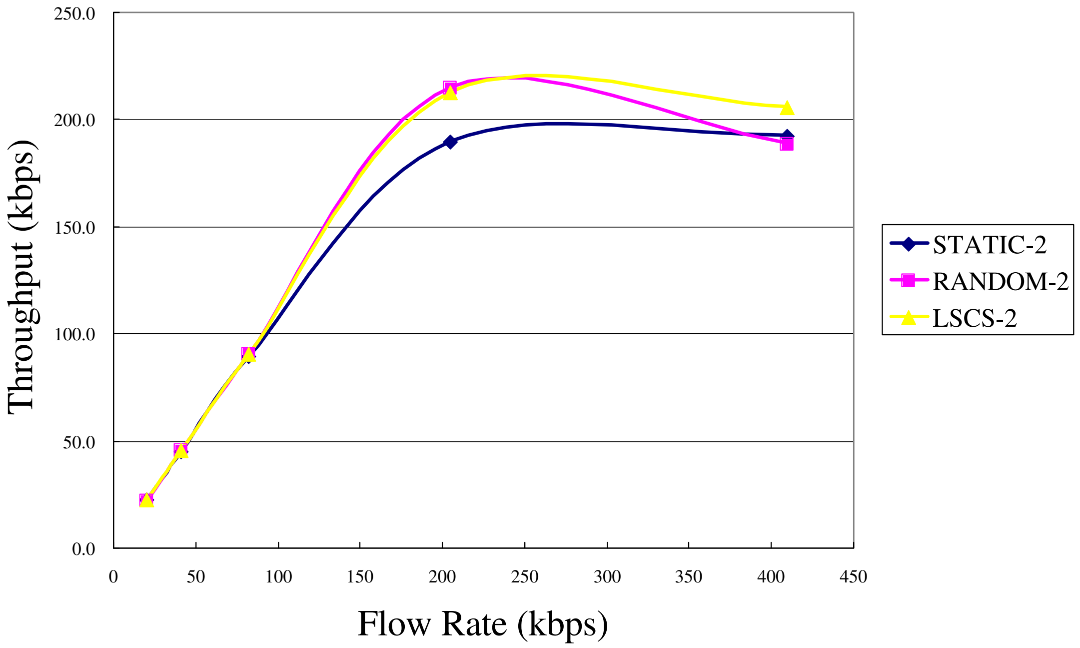


図 5.13: 測定結果 2-4 システムスループット (静止)

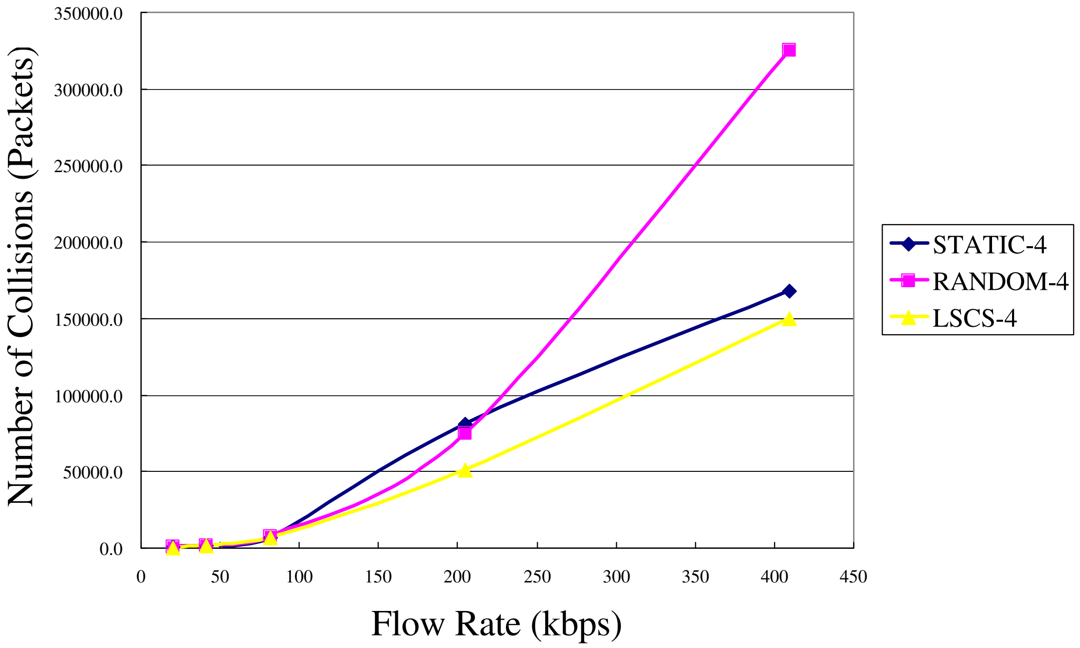


図 5.14: 測定結果 2-5 衝突パケット数 (静止)

第6章

結論

本章では，本論文のまとめと今後の課題について述べる．

6.1 まとめ

本論文では，マルチチャネル CSMA 無線網における負荷分散型チャネル選択方式 LSCS を提案した．これは，マルチホップ無線網における効率的な帯域利用を目的とし，シングルチャネル CSMA 無線網において回避できなかった問題を解決した．また，シミュレーションによりその性能特性を調べた．その結果，従来のシングルチャネル CSMA 網よりも効率的に帯域を利用できることが示された．

従来のシングルチャネル無線網における問題点として，

- 搬送波検知メカニズムの問題
- RTS/CTS メカニズムの問題

があり，これらの問題はシングルチャネル CSMA 無線網では回避できなかった．これは，マルチホップ無線網において大きなボトルネックとなり大きな性能劣化を引き起こしていた．

本論文で提案した方式では，伝送スペクトルの帯域を N 個に分割し，送信時に衝突やブロッキングが発生しないようチャネルを選択することにより，これらの問題を解決した．

また，シミュレーションによる評価結果よりシングルチャネル CSMA 方式よりもその性能が優れていることを示すことができた．

6.2 今後の課題と展望

今後の課題としては，主に 2 つが考えられる．

アルゴリズムの信頼性 本論文におけるシミュレーション評価では，制御パケットの損失を仮定していない．提案方式は，制御パケットに含まれる情報に強く依存するため，制御パケットが損失すると負荷分散機能が失われる恐れがある．高トラフィック時には制御パケットの損失率は高くなると考えられる．従って，提案方式をより信頼性の高い方式として実現するためには，制御パケットの送信に対する保護機構が必要となってくる．解決案の 1 つとしては，制御用チャネルの割当てにより回避する手法が考えられるが，通信チャネルへの割当てが減少することになるため，そのトレードオフを考える必要がある．

マルチチャネル CSMA 網の実現性 本論文では，無線局は N 個のチャネルを同時に搬送波検知できると仮定し，提案方式の性能評価を行ったが，しかし現在我々の身の回りで普及している無線網には，マルチチャネル CSMA 方式を採用しているものはあまりない．これは，一般の人々が利用可能な装置を作り出すことが難しいためである．我々の社会の通信技術として普及するためには，装置のサイズ，消費電力，またその価格などの多くの問題を解決しなければならないだろう．

6.3　おわりに

マルチホップ無線通信は，今後の社会の中において必ず実現される環境であることは間違いないと考えられる．例えば，居住区への無線基盤網としての役割もしくは交通網における通信技術として応用されていくだろう．しかしその実現のためには，数多くの技術的な課題が積み残されており，我々はその1つ1つの課題に対して取り組んでいかなければならない．本論文の2.1章でも述べているが，最終的には有線網と無線網の統合的な環境が実現されることを目標として，本論文の成果がその実現に貢献されることを期待して，この論文を終える．

謝辞

本論文の執筆にあたり，徳田 英幸教授を始め多くの方々に感謝の意を表します．特に，常に研究の議論の時間をさいて頂いた徳田研究室ECNプロジェクトの田村 陽介氏には深謝致します．また，同研究室の村瀬 正名氏，若山 史郎氏，守分 茂氏には研究のアイデアと様々な局面での大きな助けをして頂き，同様に感謝致します．

参考文献

[1] Abramson, N. The ALOHA system - another alternative for computer communication. In *Proceedings of the Full Joint Computer Conference* (1970), pp. 281–285.

[2] Ajmone-Marsan, M., and Roffinella, D. Multichannel local area network protocols. *IEEE Journal on Selected Areas of Communication SAC-1*, 5 (1983), 885–897.

[3] Bertsekas, D., and Gallager, R. *Data Networks*, 2nd ed. Prentice-Hall Inc., September 1994.

[4] Bharghavan, V., Demers, A., Shenker, S., and Zhang, L. MACAW: A media access protocol for wireless LANs. In *Proceedings of ACM SIGCOMM '94* (1994), pp. 212–225.

[5] Bomze, I. M., Budinich, M., Pardalos, P. M., and Pelillo, M. The maximum clique problem. In *Handbook of Combinatorial Optimization (Supplement Volume A)* (1999), D. Z. Du and P. M. Pardalos, Eds., Kluwer Academic Publishers, pp. 1–74.

[6] Broch, J., Maltz, D. A., Johnson, D. B., Hu, Y., and Jetcheva, J. A performance comparison of multi-hop wireless ad hoc network routing. In *Proceedings of ACM/IEEE MOBICOM "98* (Dallas Texas, October 1998), pp. 25–30.

[7] Colvin, A. CSMA with collision avoidance. *Computer Communication 6*, 5 (1983), 227–235.

[8] Deng, J., and Haas, Z. J. Dual busy tone multiple access (DBTMA): A new medium access control for packet radio networks. In *Proceedings of IEEE ICUPS '98* (October 1998).

[9] Fall, K., and Varadhan, K. *ns Manual*. The VINT project, UC Berkeley, LBL, USC/IDI, URL: http://www.isi.edu/nsnam/ns/, May 2001. Work in progress.

[10] Fuller, C. L., and Garcia-Luna-Aceves, J. J. Floor acquisition multiple access (FAMA) for packet-radio networks. In *Proceedings of ACM SIGCOMM '95* (1995), pp. 262–273.

[11] Furusaka, D., Iwamoto, T., Nagata, T., and Tokuda, H. Load-sensitive handover scheme over wireless local area networks. In *Proceedings of The 2000 ICDCS Workshops* (2000), pp. D12–D19.

[12] Garces, R., and Garcia-Luna-Aceves, J. J. Collision avoidance and resolution multiple access with transmission groups. *IEEE INFOCOM '97* (April 1997), 134–142.

[13] Haas, Z. J. On the performance of a medium access control scheme for the reconfigurable wireless networks. In *Proceedings of IEEE MILCOM '97* (November 1997), pp. 1558–1564.

[14] Haas, Z. J., and Pearlman, M. R. The zone routing protocol (ZRP) for ad hoc networks. IETF Internet Draft. http://www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-manet-zone-zrp00.txt, 1997.

[15] Internet Engineering Task Force (IETF). Mobile ad-hoc networks (MANET) working group charter. http://www.ietf.org/html.charters/manet-charter.html, 1999.

[16] Johnson, D. B., and Maltz, D. A. *Dynamic Source Routing in Ad Hoc Wireless Networks*. Kluwer Academic Publishers, 1996, ch. 5, pp. 153–181.

[17] Kahol, A., Khurana, S., Gupta, S. K., and Srimani, P. K. Adaptive distributed dynamic channel allocation for wireless networks. Tech. Rep. CS-98-105, Computer Science Department, Colorado State University, 1998.

[18] Karn, P. MACA - a new channel access method for packet radio. In *ARRL/CRRL Amateur Radio 9th Computer Networking Conferece* (1990), pp. 134–140.

[19] Kleinrock, L., and Tobagi, F. A. Packet switching in radio channels: Part I - carrier sense multiple access modes and their throughput-delay characteristics. *IEEE Transactions on Communication COM-23*, 12 (1975), 1400–1416.

[20] LAN MAN Standards Committee of IEEE Computer Society. *Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications*, 1999 ed. Institute of Electorical and Electronics Engineers, Inc., 1999.

[21] Nasipuri, A., and Das, S. R. Multichannel CSMA with signal power-based channel selection for multihop wireless networks. In *Proceedings of IEEE Fall Vehicular Technology Conference* (September 2000).

[22] Nesargi, S., and Prakash, R. Distributed wireless channel allocation in networks with mobile base stations. In *Proceedings of IEEE INFOCOM '99* (March 1999).

[23] Ozugur, T., Naghshineh, M., Kermani, P., and Olsen, C. M. Balanced media access methods for wireless networks. In *Proceedings of ACM/IEEE MOBICOM '98* (1998), pp. 21–32.

[24] Prakash, R., Shivaratri, N., and Sighal, M. Distributed dynamic channel allocation for mobile computing. In *Proceedings of 14th ACM Symposium on Priciples of Distributed Computing* (August 1995), pp. 47–56.

[25] Raju, J., and Garcia-Luna-Aceves, J. J. Distributed assignment of codes for multihop packet radio networks. In *Proceedings of IEEE MILCOM '97* (November 1997).

[26] Rappaport, T. S. *Wireless Communications, Principles and Practice.* Printice Hall, 1996.

[27] The CMU Monarch Project. The CMU Monarch Projects wireless and mobility extensions to *ns*. URL: http://www.monarch.cs.cmu.edu/, November 1999.

[28] Tobagi, F. A., and Kleinrock, L. Packet switching in radio channels: Part II - the hidden terminal problem in carrier-sense multiple-access modes and the busy-tone solution. *IEEE Transactions on Communication COM-23*, 12 (1975), 1417–1433.

[29] Tobagi, F. A., and Kleinrock, L. Packet switching in radio channels: Part III - polling and (dynamic) split-channel reservation multiple access. *IEEE Transactions on Computers 24*, 7 (August 1976), 832–845.

[30] Wu, G., Mukumoto, K., and Fukuda, A. Performance evaluation of reserved idle signal multiple access scheme for local wireless communications. *IEEE Transactions on Vehicular Technology VT-43* (August 1994), 653–658.