

アドホックネットワークにおける物理層の特性を用いた
マルチチャネルメディアアクセス制御法に関する研究

2013年1月

博士（工学）

宮路 祐一

豊橋技術科学大学

電子・情報 工学専攻	学籍番号	053441	指導 教員	上原秀幸 大平 孝
申請者 氏名	宮路 祐一			

論文要旨 (博士)

論文題目	アドホックネットワークにおける物理層の特性を用いたマルチチャネルメディアアクセス制御法に関する研究
------	---------------------------------------------------

(要旨 1,200字程度)

アドホックネットワークのメディアアクセス制御法として、複数の周波数や符号を利用した FDMA (Frequency Division Multiple Access) 型や CDMA (Code Division Multiple Access) 型の他に、可変指向性アンテナを用いて複数の空間を利用する SDMA (Spatial Division Multiple Access) 型が検討されている。これら複数のチャネルを利用するマルチチャネルメディアアクセス制御法は、シングルチャネルメディアアクセス制御法に対してスループットの向上が期待できる。しかしながら、マルチチャネル化に伴うパケット衝突や不要な再送遅延がスループットの劣化を引き起こす。

本論文は、コードセンス CDMA 型メディアアクセス制御法と指向性傍受メディアアクセス制御法を提案し、これらの問題解決を図るものである。さらに、メディアアクセス制御法を実環境で評価するための実証機を構築している。コードセンス CDMA 型メディアアクセス制御法は、近隣端末で使用されている拡散符号を検知するコードセンス機能を搭載し、拡散符号の選択と送信抑制制御によって、パケットの衝突を回避できる。また、端末ごとに個別の NAV (Network Allocation Vector) を設定する拡張 NAV 機構を備え、不要な再送遅延の問題を解決する。シミュレーション評価によって、他のメディアアクセス制御法に比べ、衝突や再送遅延を抑えスループットが 1.16 倍向上することを示している。指向性傍受メディアアクセス制御法は、指向性傍受方式と切換型バックオフ方式の二つの機構を備えている。指向性傍受方式は、ACK パケットを受信後、宛先端末に対して指向性ビームを向けて傍受することによりパケットの衝突を回避する方式である。切換型バックオフ方式は、バックオフ間隔を固定値にすることで、不要な再送遅延の影響を軽減する。シミュレーション評価によって、他のメディアアクセス制御法に比べ、衝突や再送遅延を抑えスループットが 1.1 倍向上することを示している。メディアアクセス制御の実証機は、可変指向性アンテナとして 5.1GHz 帯エスパアンテナ、無線端末装置にソフトウェア無線のプラットフォームである GNU Radio と USRP2 (Universal Software Radio Peripheral) で構成されている。動作検証として、指向性メディアアクセス制御法を実装し、シングルホップ通信やマルチホップ通信環境下のスループットを評価した。実験結果より、指向性通信を行うことで空間利用効率が向上することを確認している。

本論文で明らかにした内容によって、アドホックネットワークにおいて高スループットを実現できる。また、それぞれのメディアアクセス制御法は組み合わせることで更なる性能向上が期待できる。今後は、それぞれの通信機器の機能差を考慮したメディアアクセス制御法の検討が必要である。

January 16th, 2013

Department	Graduate School of Electronic and Information Engineering	ID	053441
Name	Yuichi Miyaji		

Supervisor	Hideyuki Uehara Takashi Ohira
------------	----------------------------------

A b s t r a c t

Title	Studies on Multi-Channel Medium Access Control Schemes Using Physical-Layer Properties in Ad Hoc Networks
-------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------

(800 words)

Multi-channel MAC (Medium Access Control) schemes in ad hoc networks are classified into three types: FDMA (Frequency Division Multiple Access) type, CDMA (Code Division Multiple Access) type and SDMA (Spatial Division Multiple Access) type. These MAC schemes utilize and enable simultaneous transmission of data packets which brings a higher throughput compared to single-channel MAC schemes. However, packet collision and unnecessary wait time due to retransmissions cause degradation of throughput in multi-channel MAC schemes.

In this thesis, I propose a code sense CDMA type MAC scheme and a directional monitoring MAC scheme to solve packet collision and unnecessary wait time due to retransmissions. I also build a verification system without constraints on conventional system specifications. The code sense CDMA type MAC scheme can solve packet collision by selecting the appropriate spreading code using the code sense mechanism which can detect codes used in neighborhood. Additionally, unnecessary wait time due to retransmissions is solved by employing the extension NAV (Network Allocation Vector) set individually in each terminal. Furthermore, the proposed scheme conducts the transmission control to mitigate the near-far problem. I compare the throughput performance of the code sense CDMA type MAC scheme with other MAC schemes through computer simulations. Simulation results show that the code sense CDMA type MAC scheme suppresses packet collision and unnecessary wait time due to retransmissions, thus it achieves 1.16 times higher throughput than other MAC schemes. The directional monitoring MAC scheme can solve packet collision by monitoring the direction toward the destination during a specified period after receiving an ACK (Acknowledgement) packet. Additionally, the unnecessary wait time due to retransmissions is decreased by the switched backoff procedure in which the binary exponential backoff procedure is switched to the fixed backoff procedure. After that, Contention Window (CW) size becomes a fixed minimum value (e.g., 31 slots in IEEE 802.11b). I compare the performance of the directional monitoring MAC scheme with other MAC schemes through computer simulations. Simulation results show that the directional monitoring MAC scheme suppresses the packet collision and unnecessary wait time due to retransmissions, thus it achieves 1.1 times higher throughput than other MAC schemes. The developed verification system for directional MAC schemes consists of the software radio platform called GNU Radio/USRP2 (Universal Software Radio Peripheral) and ESPAR antenna as a variable directional antenna. I have designed and built the 7-element ESPAR antenna for 5.11GHz and the beam controller so as to control the ESPAR antenna on the GNU Radio. I have implemented CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) scheme and a directional MAC scheme. By using the verification system, I have conducted experimental evaluation of throughput in single hop communication and multi-hop communication. As a result, I have validated that the spatial utilization efficiency is improved by using directional antennas.

It was found that ad hoc networks can achieve high throughput using proposed multi-channel MAC schemes. Moreover, these multi-channel MAC schemes can be combined for further improvement of throughput. In future works, researchers need to consider the functional difference of communication devices to design MAC schemes for ad hoc networks.

目次

第1章 序論	1
1.1 アドホックネットワークとメディアアクセス制御	1
1.2 メディアアクセス制御の問題点	2
1.2.1 隠れ端末問題	2
1.2.2 さらし端末問題	3
1.3 シングルチャネルメディアアクセス制御の関連研究	4
1.3.1 RTS/CTS を用いるメディアアクセス制御	4
1.3.2 ビジートーンを用いるメディアアクセス制御	6
1.4 メディアアクセス制御のマルチチャネル化	7
1.5 マルチチャネルメディアアクセス制御の問題点	9
1.5.1 新たな隠れ端末問題	10
1.5.2 難聴端末の問題	12
1.6 目的および論文の構成	14
第2章 マルチチャネルメディアアクセス制御の関連研究	16
2.1 FDMA/CDMA 型メディアアクセス制御	16
2.1.1 RTS/CTS や追加制御フレームを用いるメディアアクセス制御	17
2.1.2 複数送受信機やビジートーンを用いるメディアアクセス制御	17
2.1.3 協調端末を用いるメディアアクセス制御	19
2.2 SDMA 型メディアアクセス制御	20
2.2.1 RTS/CTS や追加制御フレームを用いるメディアアクセス制御	21
2.2.2 複数送受信機やビジートーンを用いるメディアアクセス制御	22
2.2.3 協調端末を用いるメディアアクセス制御	23
2.3 関連研究に関する議論と研究の位置づけ	23

第3章	コードセンス CDMA 型メディアアクセス制御法	26
3.1	まえがき	26
3.2	マルチチャネルメディアアクセス制御法	27
3.2.1	Simple Multi-Channel MAC (SMC-MAC)	27
3.2.2	Multi-Channel MAC (MC-MAC)	28
3.3	コードセンス CDMA 型メディアアクセス制御法	29
3.3.1	干渉除去受信機	30
3.3.2	コードセンス	31
3.3.3	RTS/CTS フレームの検討	31
3.3.4	拡散符号管理テーブル	32
3.3.5	拡張 NAV	33
3.3.6	送信抑制制御	34
3.3.7	マルチチャネルバックオフ	36
3.3.8	提案法の通信手順	37
3.4	性能評価	40
3.4.1	シミュレーション諸元	40
3.4.2	基礎評価シミュレーション	41
3.4.3	大規模ネットワークにおける応用評価	43
3.5	まとめ	45
第4章	指向性傍受 SDMA 型メディアアクセス制御法	47
4.1	まえがき	47
4.2	SDMA 型メディアアクセス制御法	48
4.2.1	Directional MAC (DMAC)	48
4.2.2	Circular Directional RTS MAC (CDR-MAC)	49
4.3	指向性傍受 SDMA 型メディアアクセス制御法	50
4.3.1	指向性傍受方式	50
4.3.2	切換型バックオフ方式	52
4.3.3	再送上限しきい値の検討	53
4.4	特性評価	55
4.4.1	オーバヘッド	55
4.4.2	計算機シミュレーション	56
4.5	まとめ	67

第5章	メディアアクセス制御法の評価システム	68
5.1	まえがき	68
5.2	SDMA型メディアアクセス制御法の評価システム	69
5.2.1	全体構成	70
5.2.2	エスパアンテナ	70
5.2.3	指向性制御回路	72
5.2.4	GNU Radio	73
5.2.5	USRP2	73
5.3	メディアアクセス制御法の実装	74
5.4	システムの動作検証	75
5.4.1	ビームパターンの測定	75
5.4.2	通信実験環境	76
5.4.3	シングルホップ通信特性	78
5.4.4	マルチホップ通信特性	79
5.5	まとめ	81
第6章	結論	83
	謝辞	86
	参考文献	87

目 次

1.1	アドホックネットワーク	1
1.2	隠れ端末問題の配置	3
1.3	さらし端末問題の配置	3
1.4	シングルチャネルメディアアクセス制御法	4
1.5	RTS/CTS 交換の手続き	5
1.6	DBTMA のタイムチャート例	7
1.7	FDMA/CDMA 型メディアアクセス制御と隠れ端末の関係	7
1.8	SDMA 型メディアアクセス制御と隠れ端末の関係	8
1.9	FDMA/CDMA 型メディアアクセス制御とさらし端末の関係	8
1.10	SDMA 型メディアアクセス制御とさらし端末の関係	9
1.11	マルチチャネル隠れ端末問題	10
1.12	指向性隠れ端末問題	11
1.13	短縮 NAV 端末問題	12
1.14	Deafness 問題	13
2.1	FDMA/CDMA 型メディアアクセス制御法	16
2.2	DCA のタイムチャート例	18
2.3	AR 方式のタイムチャート例	19
2.4	SDMA 型メディアアクセス制御法	20
2.5	ビームパターンと送信範囲の関係	21
2.6	横田らの方式のタイムチャート例	24
3.1	SMC-MAC のタイムチャート例	28
3.2	MC-MAC のタイムチャート例	29
3.3	干渉除去受信機に含まれる基本回路	30
3.4	干渉除去受信機	30

3.5	RTS/CTS フレーム構成	31
3.6	拡散符号選択を行うタイムチャート例	32
3.7	拡張 NAV を設定するタイムチャート例	33
3.8	送信抑制制御	34
3.9	マルチチャネルバックオフ	36
3.10	提案方式のタイムチャート例	37
3.11	シミュレーション	
	トポロジ1	41
3.12	合計スループット特性	41
3.13	シミュレーション	
	トポロジ2	42
3.14	ホップ数対スループット特性	42
3.15	合計スループット特性	43
3.16	MAC 層におけるパケット損失率	43
3.17	各モビリティにおける合計スループット特性	44
4.1	DMAC のタイムチャート例	48
4.2	CDR-MAC のタイムチャート例	49
4.3	指向性傍受方式	50
4.4	切換型バックオフ方式	52
4.5	再送上限しきい値を検討する際のトポロジー	53
4.6	DM-MAC の制御フロー	54
4.7	シミュレーショントポロジー	57
4.8	衝突確率 (直線トポロジ)	59
4.9	スループット特性 (直線トポロジ)	59
4.10	Deafness 率 (非直線トポロジ)	61
4.11	スループット特性 (非直線トポロジ)	61
4.12	スループット特性 (格子トポロジ)	62
4.13	衝突確率 (格子トポロジ)	62
4.14	Deafness 率 (格子トポロジ)	63
4.15	スループット特性 (ランダムトポロジ)	64
4.16	衝突確率 (ランダムトポロジ)	64
4.17	Deafness 率 (ランダムトポロジ)	65

4.18	スループットの時系列データ	66
4.19	スループットの時系列データ (適応選択型)	66
5.1	システムの構成	70
5.2	システムの外観図	71
5.3	エスパアンテナの構造	72
5.4	7素子エスパアンテナの寸法	72
5.5	MACフレーム構造	74
5.6	形成した指向性ビーム	76
5.7	実験トポロジ	77
5.8	実験環境	78
5.9	1ホップ通信でのスループット特性	79
5.10	2セッションのスループット特性	80
5.11	2ホップ通信でのスループット特性	82
5.12	3ホップ通信でのスループット特性	82

表 目 次

3.1	拡散符号管理テーブル	32
3.2	拡張 NAV テーブル	33
3.3	シミュレーション諸元	40
4.1	シミュレーション諸元	56
5.1	メディアアクセス制御法のパラメータ	74
5.2	7素子エスパアンテナの水平面内指向性測定の諸元	75
5.3	実験諸元	77

List of Abbreviations for MAC Protocols

AM-MAC	Asynchronous Multi-channel MAC , page 19
AR Scheme	Active Recovery Scheme , page 19
BTMA	Busy Tone Multiple Access , page 6
CA-CDMA	Controlled Access CDMA , page 18
CAM-MAC	Cooperative Asynchronous Multi-channel MAC , page 18
CAM-MAC ARCB	CAM-MAC Avoiding Redundant Channel Blocking problem , page 19
CCM-MAC	Cooperative CDMA-based Multi-channel MAC , page 20
CDR-MAC	Circular Directional RTS MAC , page 49
CRCM	Circular RTS and CTS MAC , page 21
CS-CDMA	Code Sense CDMA , page 30
CS-CDMA/TC	Code Sense CDMA with Transmission Control (Proposed scheme) , page 30
CSMA	Carrier Sense Multiple Access , page 2
DBSMA	Directional Busy Signal Multiple Access , page 22
DBTMA	Dual Busy Tone Multiple Access , page 6

DBTMA/DA	Dual Busy Tone Multiple Access with Directional Antenna , page 22
DCA	Dynamic Channel Assignment , page 17
DI-DMAC	Receiver Initiated DMAC , page 21
DM-MAC	Directional Monitoring MAC , page 50
DMAC	Directional MAC , page 48
DMAC/DA	Directional MAC with Deafness Avoidance , page 21
DRMC	Dual Reservation MAC Protocol based on CDMA , page 18
FAMA	Floor Acquisition Multiple Access , page 5
IEEE 802.11 DCF	IEEE 802.11 Distributed Coordination Function , page 5
MACA	Multiple Access with Collision Avoidance , page 4
MACA-BI	MACA By Invitation , page 5
MACAW	MACA for Wireless , page 5
MC-MAC	Multi-Channel MAC , page 28
MC-SP	Multichannel MAC with Signal Power based channel selection , page 17
MDA	MAC protocol for Directional Antennas , page 21
PAMAS	Power-Aware Multi-Access Protocol with Signaling , page 6
RBCS	Receiver-Based Channel Selection , page 17
RI-BTMA	Receiver-Initiated Busy Tone Multiple Access , page 6
SMC-MAC	Simple Multi-Channel MAC , page 27

第1章

序論

1.1 アドホックネットワークとメディアアクセス制御

近年，アドホックネットワークに関する研究が盛んに行われている．アドホックネットワーク（図1.1）は，無線基地局などのインフラストラクチャを構築せずにそれぞれの無線通信端末によって自律的に形成されるネットワークである．アドホックネットワークの主な長所は，無線通信機能の備わった端末（以後，端末と表記）が利用できさえすればネットワークを形成できる点である．そのため，インフラストラクチャを維持するコストを抑え，ネットワークの要求に即座に対応することができる．このような点から，災害時の臨時通信網 [1,2] やイベント会場での一時的なネットワーク [3]，車車間通信 [4-6] への応用が期待されている．

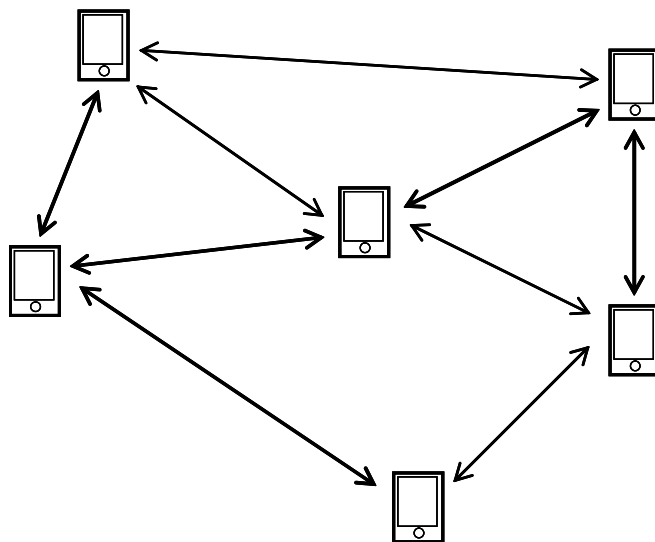


図 1.1 アドホックネットワーク

アドホックネットワークでは中継機能を有する端末によってネットワークが自律分散的に形成される。通信範囲内に位置する端末に対して通信する場合は、直接パケットを送信するシングルホップ通信を行う。一方、通信範囲内に位置しない端末に対して通信する場合は、通信範囲内に存在する他の端末にパケットを中継してもらってマルチホップ通信を行う。端末の送信電力は限られているため、アドホックネットワークでは、パケットは送信端末からあて先端末までに、いくつかの中継端末を経由して伝送される。

アドホックネットワークにおいて高いスループットを達成するためには、シングルホップ通信の通信速度を向上させることよりも、いかにして複数の端末が同じメディアを共有するかが重要になってくる。そこで、本論文ではアドホックネットワークにおいて、複数の端末がメディアを共有するためのメディアアクセス制御に関する研究を行う。メディアアクセス制御はチャンネルへのアクセス権を競い合うのと同時に、近隣ノードとのフレームの衝突を最小限に抑える必要がある。また、マルチホップ通信を考慮し、送受信端末だけでなく中継端末の両方に対処しなければならない。アドホックネットワークのメディアアクセス制御のベースには、ランダムアクセスの1種である搬送波検知 (CSMA : Carrier Sense Multiple Access) 方式が用いられている。この方式は、端末間で同期を取る必要がないため、インフラストラクチャのような中央制御装置が不在のネットワークと相性が良いと考えられている。CSMA では送信端末は、無線チャンネルが空いているかどうかを搬送波の検知により確認し、空いていればパケットを送信する。

1.2 メディアアクセス制御の問題点

アドホックネットワークのメディアアクセス制御を設計する際に必ず考慮すべき問題として、隠れ端末問題 [7] とさらし端末問題が挙げられる。ここでは、それぞれの問題点について述べる。

1.2.1 隠れ端末問題

無線通信システムでは距離の違いによって、実際には搬送波が存在するにもかかわらず検出できない場合が存在する。搬送波を検出できないことで、フレームの衝突が発生する。これを隠れ端末問題と呼ぶ。図 1.2 を用いて隠れ端末問題に

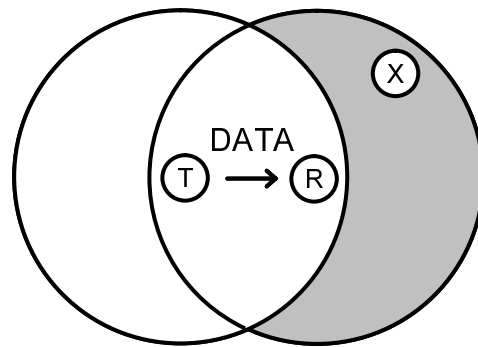


図 1.2 隠れ端末問題の配置

ついて説明する。

端末 T と端末 R の通信範囲をそれぞれ円で示している。色付けした範囲に位置する端末 X は、端末 T が DATA パケットを送信している間、搬送波を検出できない。この状態を、端末 X は端末 T の隠れ端末であると表現する。隠れ端末が存在する場合、端末 T と端末 X が同時にパケットを送信すると、端末 R において衝突が発生する。衝突はスループットを低下させる大きな一因となる。

1.2.2 さらに端末問題

ある端末が隣接する端末の搬送波を検出してしまい、衝突が起こらないにもかかわらず不要に通信が抑制される場合が存在する。これをさらに端末問題と呼ぶ。図 1.3 を用いてさらに端末問題について説明する。

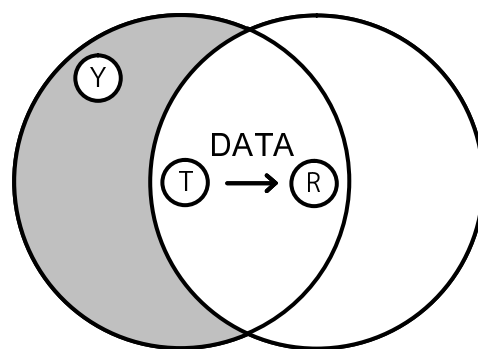


図 1.3 さらに端末問題の配置

端末 T と端末 R の通信範囲をそれぞれ円で示している。色付けした範囲に位置する端末 Y は、端末 T が DATA パケットを送信している間は搬送波を検出できる。しかし、端末 Y は端末 R の通信範囲内に位置しないため送信することもで

きる。この状態を、端末Yは端末Tのさらされ端末であると表現する。さらし端末が存在する場合、端末Tと端末Yが同時にパケットを送信することができず、チャンネルの無駄が生じる。チャンネルの無駄はスループットを低下させる大きな一因となる。

1.3 シングルチャンネルメディアアクセス制御の関連研究

隠れ端末問題を解決するために、さまざまな解決手法が提案されている。ここでは、代表的な RTS (Request To Send : 送信要求) /CTS (Clear To Send : 送信許可) とビジートーンによる解決法について説明する。また、各メディアアクセス制御法の分類図を図 1.4 に示す。

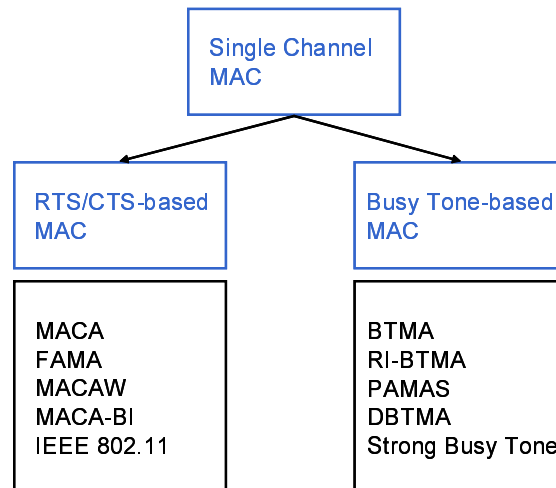


図 1.4 シングルチャンネルメディアアクセス制御法

1.3.1 RTS/CTS を用いるメディアアクセス制御

隠れ端末問題による衝突を避けるには、隠れ端末に対して事前に通信が開始されることを通知する必要がある。そこで、制御パケットである RTS と CTS が用いられる。初めて RTS/CTS による隠れ端末問題への解決法を示した Multiple Access with Collision Avoidance (MACA) [8] について説明する。MACA では、送信端末 (図 1.2 中の端末 T) がチャンネルを予約するために受信端末 (図 1.2 中の端末 R) に RTS を送信する。これにより、送信端末の隣接端末の送信を防ぐ。次に、受信端末は CTS を送信する。隠れ端末 (図 1.2 中の端末 X) は CTS を受信

することによって通信を延期しなければならない。よって、端末 T と端末 X の同時送信を回避することができる。

MACA のほかにも、Floor Acquisition Multiple Access (FAMA) [9] や ACK を MAC 層に導入した MACA for Wireless (MACAW) [10], MACA から派生した受信者始動の MACA By Invitation (MACA-BI) [11], 無線 LAN の IEEE 802.11 DCF [12] などが提案されている。RTS/CTS による解決法は、主に隠れ端末に対処する手法であり、さらし端末問題については解決できない。

IEEE 802.11 DCF の動作例を図 1.5 を用いて説明する。また、図 1.5 中の端末の配置は図 1.2 と同じものとする。

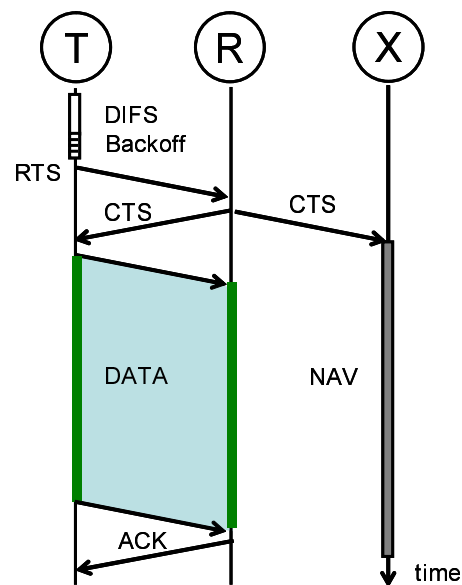


図 1.5 RTS/CTS 交換の手続き

IEEE 802.11 DCF でパケットが発生した場合は、搬送波検知によって DIFS (Distributed Interframe Space) の間アイドルであることを確認する。その後、Backoff によってランダムな待ち時間が経過した後に、送信端末 T が受信端末 R に対して通信したいことを通知する RTS を送信する。RTS を正しく受信した端末 R は、通信可能である場合に CTS を返信する。CTS には返信先である端末 T のアドレスが記述されており、CTS を受信した端末 X (隠れ端末) は、自身の通信を NAV (Network Allocation Vector) によって抑制する。これにより、隠れ端末 X は搬送波を検出できないときでも、NAV が設定されている間は通信を開始しないため、衝突を避けることができる。CTS を受信した端末 T は DATA を送信する。最後に、DATA を受信した端末 R は ACK を返信する。

1.3.2 ビジートーンを用いるメディアアクセス制御

初めてビジートーンによる隠れ端末問題への解決法を示した Busy Tone Multiple Access (BTMA) [7] について説明する。BTMA では、受信端末 (図 1.2 中の端末 R) がパケットを受信する際に、帯域外のビジートーンを断続的に送信する。パケットとビジートーンは帯域が異なるため衝突は起きない。隠れ端末 (図 1.2 中の端末 X) はビジートーンを検出している間の送信を抑制しなければならない。よって、端末 T と端末 X の同時送信を回避することができる。

BTMA のほかにも、Receiver-Initiated Busy Tone Multiple Access (RI-BTMA) [13] やパケットの量に応じて送受信機のオンオフを切り換える Power-Aware Multi-Access Protocol with Signaling (PAMAS) [14], アドホックネットワークの環境に応用したビジートーンを複数用いた Dual Busy Tone Multiple Access (DBTMA) [15] や DBTMA で使用されるビジートーンの出力を適切に制御するストロングビジートーン (Strong Busy Tone) [16] などが提案されており、メディアアクセス制御の一分野として盛んに研究されている。

ここでは、図 1.6 を用いて DBTMA の動作の詳細について述べる。DBTMA では、隣接端末に通信中であることを通知するために、帯域外の 2 つのビジートーン (図 1.6 中の BTt, BTr) を使用する。さらに、RTS/CTS を送信する制御チャネルとデータパケットを送信するデータチャネルを用いる。まず、送信端末 A が受信端末 B に対して通信したいことを通知する RTS を制御チャネルで送信する。ただし、端末 A は受信ビジートーン (BTr) を検出した場合は、自身の送信を延期する。RTS を受信した端末 B は端末 A に対して CTS を制御チャネルで送信し、近隣のノードに対して受信ビジートーン (BTr) を送出する。このとき、端末 B は送信ビジートーン (BTt) を検出した場合は、自身の送信を延期する。CTS を受信した端末 A は端末 B に題して DATA を送信し、近隣のノードに対して送信ビジートーン (BTt) を送出する。DBTMA は RTS/CTS 交換のみの方式に比べて優れた性能であることが示されている。ただし、ビジートーンを用いるためには専用の送受信機が必要となるため、ハードウェアが複雑となりコスト面が懸念材料となる。

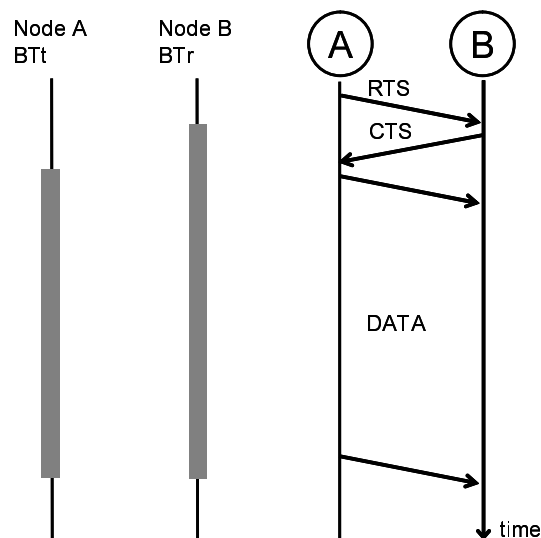


図 1.6 DBTMA のタイムチャート例

1.4 メディアアクセス制御のマルチチャネル化

近年では、隠れ端末/さらし端末問題の解決のために FDMA (Frequency Division Multiple Access) 型, CDMA (Code Division Multiple Access) 型および可変指向性アンテナを用いる SDMA (Spatial Division Multiple Access) 型のマルチチャネルメディアアクセス制御が検討されている。隠れ端末/さらし端末問題を同時に解決するためには、マルチチャネル化する必要がある。多くの研究では、FDMA 型/CDMA 型メディアアクセス制御と SDMA 型メディアアクセス制御は区別して呼称しているが、本論文ではどちらもマルチチャネルメディアアクセス制御と呼ぶことに注意されたい。

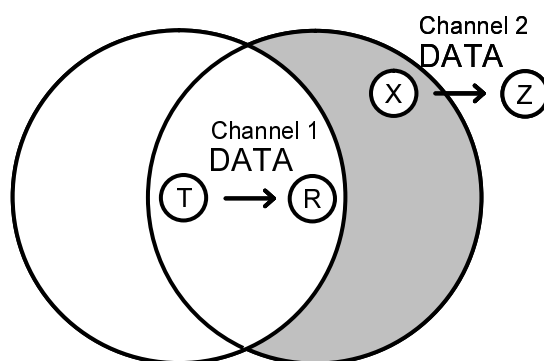


図 1.7 FDMA/CDMA 型メディアアクセス制御と隠れ端末の関係

まず、隠れ端末問題が発生する環境で FDMA 型または CDMA 型のマルチチャ

ネルメディアアクセス制御を用いた場合の影響を考える。ここで、使用できるチャンネル数は2であるとする。図1.7中の端末TとRは、チャンネル1でDATAパケットを送信している。このとき、通常であれば隠れ端末である端末Xは、チャンネル2を使用してDATAパケットを送信することで衝突を回避することができる。

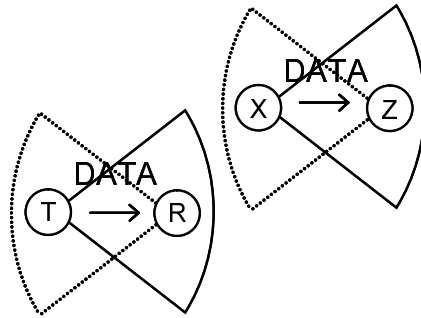


図 1.8 SDMA 型メディアアクセス制御と隠れ端末の関係

また、隠れ端末問題が発生する環境でSDMA型のメディアアクセス制御を用いた場合の影響を考える。図1.8中の端末Tは、指向性ビームを端末Rに向けてDATAパケットを送信している。このとき、通常であれば隠れ端末である端末Xは、指向性ビームを端末Zに向けてDATAパケットを送信することで衝突を回避することができる。図1.7と図1.8から、隠れ端末問題が発生する環境においてマルチチャンネルメディアアクセス制御を用いることで同時にDATAを送信できるためスループットの向上が見込めることが分かる。

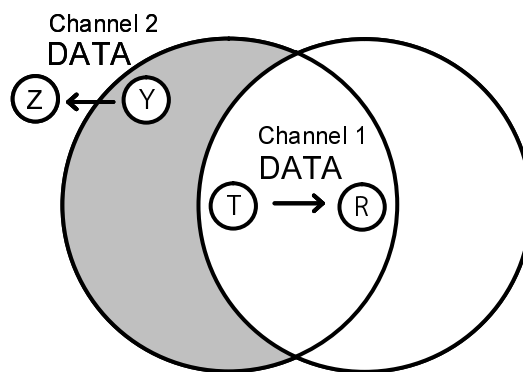


図 1.9 FDMA/CDMA 型メディアアクセス制御とさらし端末の関係

次に、さらし端末問題が発生する環境でFDMA型またはCDMA型のマルチチャンネルメディアアクセス制御を用いた場合の影響を考える。ここで、使用できるチャンネル数は2であるとする。図1.9中の端末TとRは、チャンネル1でDATA

パケットを送信している。このとき、通常であればさらされ端末である端末 Y は、チャンネル 2 で待ち受けることによって、端末 T の DATA 送信による搬送波検出は起きない。さらに、端末 Y はチャンネル 2 を用いて端末 Z に DATA 送信ができる。

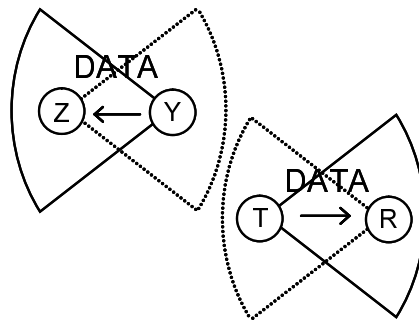


図 1.10 SDMA 型メディアアクセス制御とさらし端末の関係

また、さらし端末問題が発生する環境で SDMA 型メディアアクセス制御を用いた場合の影響を考える。図 1.10 中の端末 T は、指向性ビームを端末 R に向けて DATA パケットを送信している。このとき、通常であればさらされ端末である端末 Y は、端末 T の指向性ビームが端末 R を向いていることによって、端末 T の DATA 送信による搬送波検出は起きない。さらに、端末 Y は指向性ビームを用いて端末 Z に DATA 送信ができる。図 1.9 と図 1.10 から、さらし端末問題が発生する環境において、マルチチャンネルメディアアクセス制御を用いることで同時に DATA を送信できるためスループットの向上が見込めることが分かる。

1.5 マルチチャンネルメディアアクセス制御の問題点

メディアアクセス制御をマルチチャンネル化することで、隠れ端末/さらし端末問題を同時に解決することがわかった。ただし、チャンネルを選択する際や指向性ビームを用いる方向によっては一部隠れ端末の影響が残ることが示されている [17] [18]。ここでは、新たな隠れ端末問題と難聴端末問題 [19] について説明する。

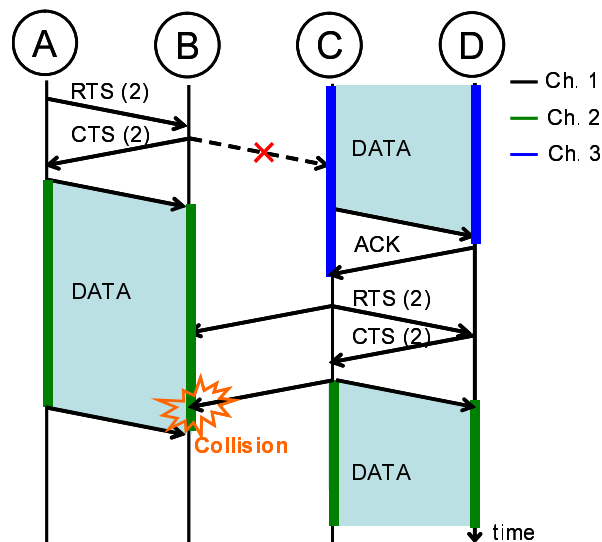


図 1.11 マルチチャネル隠れ端末問題

1.5.1 新たな隠れ端末問題

マルチチャネル隠れ端末問題

一般的に、マルチチャネルメディアアクセス制御では、RTS/CTSなどの制御信号とデータ信号は別々のチャネルを使用する。しかし、端末の送受信機が半二重通信の場合、データ送受信中の端末はRTSやCTSを受信することができず、通信抑制と隣接端末とのチャネル情報の共有が正しく動作しない。したがって、隣接端末がすでに使用しているチャネルを選択してしまい、フレーム衝突を誘発する。この問題をマルチチャネル隠れ端末問題と呼ぶ。

端末Aから端末Bへの通信と端末Cから端末Dへの通信を同時に行うときのタイムチャート例を図1.11に示し、マルチチャネル隠れ端末問題を説明する。端末Aは物理キャリアセンスによって制御チャネルの空きを確認し、隣接端末に使用されていないチャネル2を選択する。その後、端末BとのRTS/CTS交換によって使用チャネルの通知を行った後にデータを送信する。一方、端末Cはデータ送信中であったために端末BからのCTSフレームを受信できず、端末A、Bがチャネル2で通信していることを把握できない。したがって、その後の通信で端末C、Dがチャネル2を選択してしまった場合、フレームの衝突が発生する。

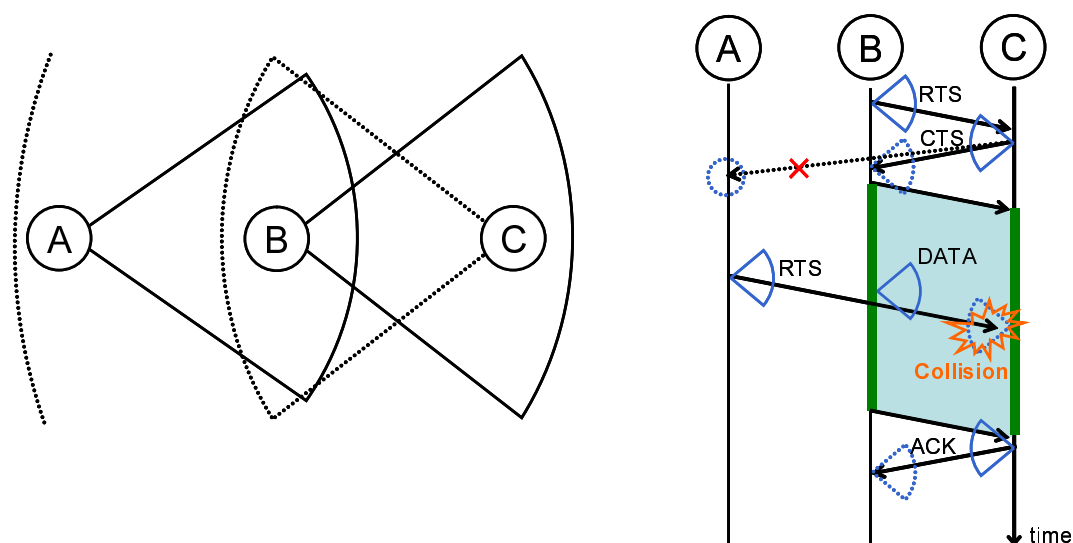


図 1.12 指向性隠れ端末問題

指向性隠れ端末問題

一般的に、SDMA 型メディアアクセス制御では、待機時は全方位性のビームパターンを用いる。しかし、全方位性ビームで待機している場合、利得の関係上 RTS や CTS を受信できない隣接端末が発生する。このような RTS/CTS を受信できなかった端末が、既に通信している端末と同じ方向にビームパターンを向けて RTS を送信してしまうとフレーム衝突が起こる。この問題を指向性隠れ端末問題と呼ぶ。

端末 A が中継端末 B を介し、あて先端末である端末 C へ 2 ホップ通信する際のタイムチャート例を図 1.12 に示し、指向性隠れ端末問題を説明する。ここではすでに端末 A から端末 B への 1 ホップ目の通信が終了した状況を想定する。端末 B は物理キャリアセンスによってチャンネルの空きを確認すると、指向性ビームを端末 C に向けて RTS/CTS 交換を開始する。端末 A は CTS を受信できる方向に位置しているが、全方位性ビームで待機しているため利得が足りずに CTS を受信できない。よって端末 A は NAV が設定されない。ここで、端末 A において再び端末 C へのデータ送信要求が発生した場合、物理キャリアセンスとバックオフの手順を経て、中継端末である端末 B に対して RTS フレームを送信する。端末 A の RTS は指向性ビームで送られるため、送信利得が大きくなり端末 B の DATA フレームとの衝突が発生する。

1.5.2 難聴端末の問題

短縮 NAV 問題

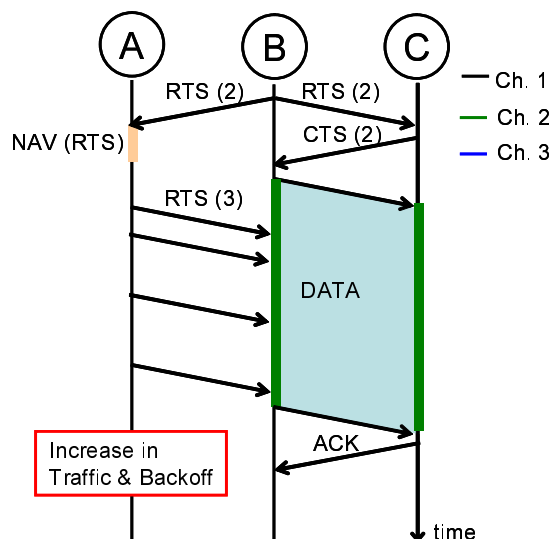


図 1.13 短縮 NAV 端末問題

IEEE 802.11 DCF では、NAV による通信抑制は通信終了まで設定される。一方、マルチチャネルメディアアクセス制御では、RTS/CTS 交換を行う短い期間のみを NAV に設定することで同時通信ペア数の増加を図る。すなわち、さらされる端末の数を減らしスループットの向上が期待できる。しかしながら、マルチホップ環境では短縮 NAV の後に、データ伝送中の中継端末に対して不要な通信要求を行ってしまう。この問題を短縮 NAV 問題と呼ぶ。

端末 A が中継端末 B を介し、あて先端末である端末 C へ 2 ホップ通信する際のタイムチャート例を図 1.13 に示し、短縮 NAV 問題を説明する。ここではすでに端末 A から端末 B への 1 ホップ目の通信が終了した状況を想定する。端末 B は物理キャリアセンスによって制御チャンネルの空きを確認すると、隣接端末に使用されていないチャンネル 2 を選択し、端末 C との RTS/CTS 交換によって使用チャンネルを通知した後にデータ送信を開始する。一方、端末 A は RTS フレームを受信し、NAV が設定される。ここで、端末 A において再び端末 C へのデータ送信要求が発生した場合、NAV で規定された期間だけ待機し、制御チャンネルの物理キャリアセンスとバックオフの手順を経て、中継端末である端末 B に対して RTS フレームを送信する。しかし、端末 B はデータ送信中であるため、RTS フレームを受信できない。したがって、端末 A は RTS フレームの再送信を繰り返してしま

い、制御チャネルのトラフィック増加やバックオフ時間の増加、ひいては再送回数の上限に達してリンク誤切断を引き起こす。

Deafness 問題

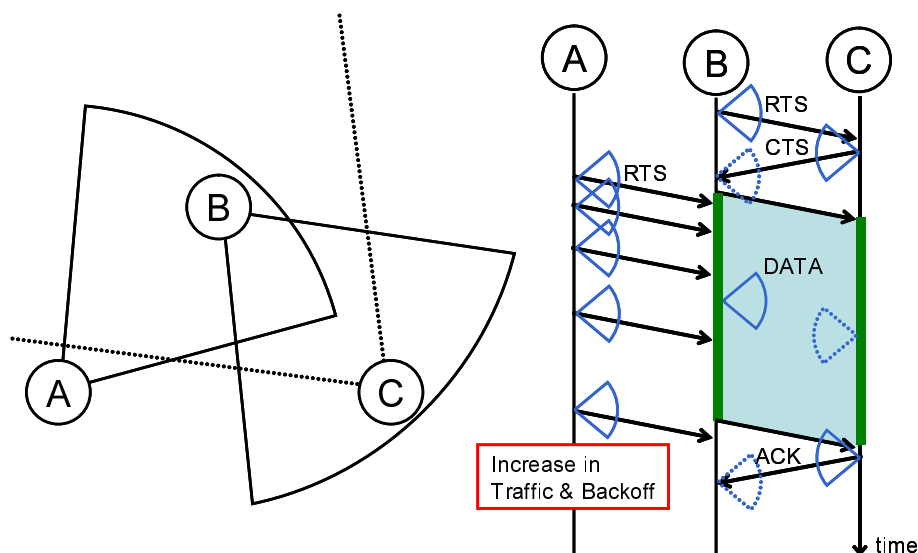


図 1.14 Deafness 問題

SDMA 型メディアアクセス制御では、RTS/CTS 交換を指向性ビームを用いて行うことで、同時通信ペア数の増加を図る。すなわち、さらされる端末の数を減らしスループットの向上が期待できる。しかしながら、マルチホップ環境では多くの端末に NAV が設定されておらず、データ伝送中の中継端末に対して不要な通信要求を行ってしまう。この問題を Deafness 問題と呼ぶ。Deafness 問題は短縮 NAV 問題とはほぼ同じ現象の問題であるが、発生原因が異なる。

端末 A が中継端末 B を介し、あて先端末である端末 C へ 2 ホップ通信する際のタイムチャート例を図 1.14 に示し、Deafness 問題を説明する。ここではすでに端末 A から端末 B への 1 ホップ目の通信が終了した状況を想定する。端末 B は物理キャリアセンスによってチャネルの空きを確認すると、指向性ビームを端末 C に向けて RTS/CTS 交換を開始する。一方、端末 A は RTS や CTS を受信できないため、NAV が設定されない。この点が、短縮 NAV 問題と異なる点である。ここで、端末 A において再び端末 C へのデータ送信要求が発生した場合、物理キャリアセンスとバックオフの手順を経て、中継端末である端末 B に対して RTS フレームを送信する。しかし、端末 B はデータ送信中であるため、RTS フレームを

受信できない。したがって、端末 A は RTS フレームの再送信を繰り返してしまい、制御チャンネルのトラヒック増加やバックオフ時間の増加、ひいては再送回数の上限に達してリンク誤切断を引き起こす。

1.6 目的および論文の構成

本論文では、アドホックネットワークにおけるスループットの向上を目的として、マルチチャンネル化したメディアアクセス制御方式の研究を行う。隠れ端末問題とさらし端末問題を同時に解決するためには、マルチチャンネル化したメディアアクセス制御の検討が必須である。単純にマルチチャンネル化するだけでもスループットは向上するが、さらなるスループットの改善を目指す。そこで、本論文では新たな隠れ端末問題と難聴端末の問題にも着目したマルチチャンネルメディアアクセス制御法を検討する。

第2章では、マルチチャンネルメディアアクセス制御法の関連研究について述べる。ここでは、新たな隠れ端末問題であるマルチチャンネル隠れ端末問題と指向性隠れ端末問題や難聴端末の問題に対処するメディアアクセス制御法について説明する。マルチチャンネル化において FDMA/CDMA 型メディアアクセス制御法と SDMA 型メディアアクセス制御法では対処法に違いがあるため、それぞれの解決手法の特徴を述べる。また、第3章と第4章で提案するメディアアクセス方式と従来手法との着眼点の違いについて記述する。

第3章では、マルチチャンネル隠れ端末問題と短縮 NAV 問題を解決するために、全ての拡散符号の状況を把握できるコードセンス CDMA 型のメディアアクセス制御法について述べる。提案したコードセンス CDMA 型メディアアクセス制御法は、マルチチャンネル隠れ端末問題と拡散符号割当てに対処するために拡散符号管理テーブルを導入し、状況にあった最適な拡散符号による通信が可能となる。また、短縮 NAV 問題を解決するために拡張 NAV を導入し、通信中の端末をテーブルで管理することで、不要な通信要求の発生を削減することができる。さらに、CDMA 特有の問題である遠近問題に対しては送信抑制制御を用いて、自身の通信が遠近問題による衝突の原因であるかを判断することが可能となる。

第4章では、指向性隠れ端末問題と Deafness 問題を解決するために、待機状態のビームパターンを適切に制御する指向性傍受を用いるメディアアクセス制御法について述べる。提案した指向性傍受 SDMA 型メディアアクセス制御法は、指向

性隠れ端末問題に対処するために指向性傍受方式を導入した。従来の SDMA 型メディアアクセス制御では ACK 受信後、全方位性ビームで待機（全方位性待機モード）していた。一方、指向性傍受方式は、あて先方向に対して指向性ビームを向けて待機（指向性傍受モード）し、あて先方向の通信状況を傍受する。これにより、指向性隠れ端末は DNAV を設定することが可能となり衝突を回避することができる。また、Deafness 問題を解決するために切換型バックオフ方式を導入し、RTS の再送によるバックオフ値の増加を抑制した。バックオフ値の増加を抑制することで、自身の通信が遅延せずに行えようになる。

第5章では、メディアアクセス制御法を実環境で評価するためのシステム構築について述べる。本論文では、CDMA 型メディアアクセス制御法と SDMA 型メディアアクセス制御法に関する検討を行っているが、システム設計としてはまず SDMA 型メディアアクセス制御法を評価するシステムを対象とした。開発したシステムは、通信端末の多様性を考慮して設計を行った。可変指向性アンテナとして小型化・平面化が可能なエスパアンテナを用い、無線端末装置にソフトウェア無線のプラットフォームである GNU Radio と USRP2 を用いることでより柔軟に送信電力や周波数帯を設定できる。メディアアクセス制御法の機能の全ては、GNU Radio を用いてソフトウェアで実装する。

第2章

マルチチャネルメディアアクセス制御 の関連研究

2.1 FDMA/CDMA 型メディアアクセス制御

FDMA/CDMA 型メディアアクセス制御は主に，RTS/CTS や追加制御フレームを用いた方式，複数送受信機やビジートーンを用いた方式，協調端末を用いた方式に分類できる．各メディアアクセス制御法の分類図を図 2.1 に示す．

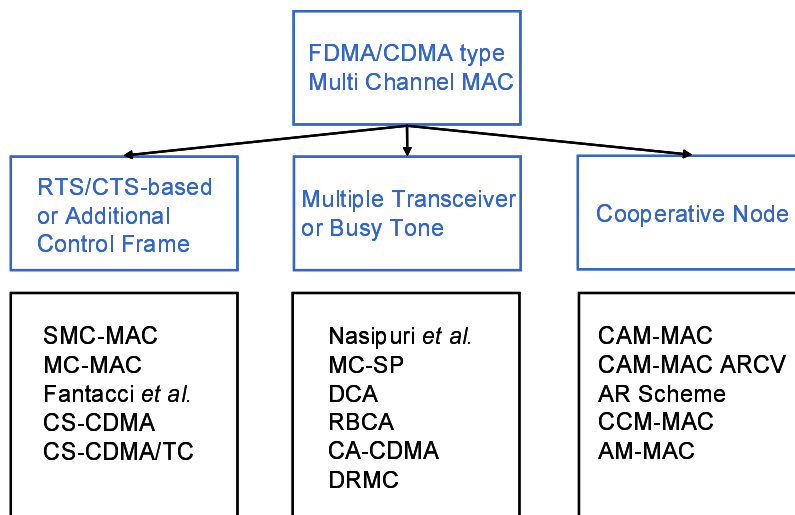


図 2.1 FDMA/CDMA 型メディアアクセス制御法

2.1.1 RTS/CTS や追加制御フレームを用いるメディアアクセス制御

マルチチャネルメディアアクセス制御法を単一送受信機で行う方式が提案されている。Simple Multi-Channel MAC (SMC-MAC) [20] は、RTS/CTSに加えRES (Reservation) フレームを用いて、近隣端末に使用するデータチャネルの通知を行う。Multi-Channel MAC (MC-MAC) [21] は、チャネルを切り換えながら物理キャリアセンスを行い、使用中でないデータチャネルを選択し通信を行う。SMC-MAC, MC-MACについては次章で詳細を述べる。Fantacciらの提案したCDMA型メディアアクセス制御 [22] は、あらかじめ端末ごとに拡散符号が割当てられており、送信端末はRTS/CTSで受信端末の拡散符号を確認し、指定された拡散符号でデータを送信する。Code Sense CDMA (CS-CDMA) は近隣で使用されている拡散符号の信号強度を検知可能な方式である。本論文では、CS-CDMAに送信抑制制御を加えたCode Sense CDMA with Transmission Control (CS-CDMA/TC) を提案している。CS-CDMA, CS-CDMA/TCについては次章で詳細を述べる。

2.1.2 複数送受信機やビジトーンを用いるメディアアクセス制御

マルチチャネルメディアアクセス制御においてマルチチャネル隠れ端末などの問題を解決するために複数送受信機を用いる解決法が提案されている。Nasipuriらの提案したマルチチャネルメディアアクセス制御 [23,24] では使用するチャネル数が N の場合、送受信機も N 機搭載している。使用するチャネル数 N の内、1つを制御チャネル、 $N-1$ をデータチャネルとして用いる。文献 [23] では直前の通信に成功したチャネルをデータチャネルとして用いており、文献 [24] のMultichannel MAC with Signal Power based channel selection (MC-SP) は、全チャネルの受信信号強度をもとにデータチャネルを決定している。Dynamic Channel Assignment (DCA) [25] と Receiver-Based Channel Selection (RBCS) [26] は、使用するチャネル数を N とし、制御チャネル用の送受信機とデータチャネル用の送受信機の合計2機を搭載している。チャネルの構成はNasipuriらの方式と同様にチャネル数 N の内、1つを制御チャネル、 $N-1$ をデータチャネルとして用いている。図2.2にDCAの動作例を示す。各端末は、チャネルの利用状況をChannel Usage List (CUL) に保持する。送信端末 S は、RTS送信時に自身の空きチャネルリストであるFree Channel List (FCL) を送信することにより、あて先端末 D が自

身の FCL と比較し，データ送信時に使用するチャネルを決定する．あて先端末は，データチャネルとして選択しチャネル番号を CTS フレームに記載し送信する．CTS フレームを受け取った送信端末は CTS に記載されているチャネル番号を RES フレームに記載し送信する．また，制御チャネルとデータチャネルの送受信機の 2 機を使用しているので，送信端末は RES フレーム送信中にデータ送信も同時に開始する．あて先端末は，DATA フレームを受信した後，ACK フレームを送信する．また，端末 S がデータ送信中に端末 X-Y 間の通信が開始されるが，データ送受信中であっても端末 X,Y の制御フレームを受信し CUL を更新できる．よって，特定のデータチャネルで DATA を送受信中であっても，制御チャネルの情報を得ることができるためマルチチャネル隠れ端末問題を解決することができる．

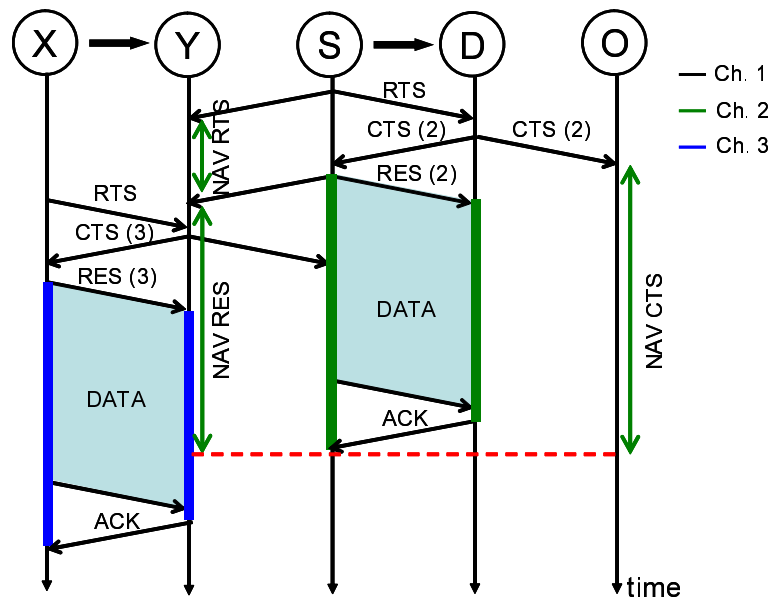


図 2.2 DCA のタイムチャート例

Controlled Access CDMA (CA-CDMA) [27] は，CDMA 型のマルチチャネルアクセス制御法であるが，DCA と同様に送受信機を 2 機搭載することを前提としている．Dual Reservation MAC Protocol based on CDMA (DRMC) は，CDMA 型のマルチチャネルアクセス制御法でトーン信号を用いた方式である．

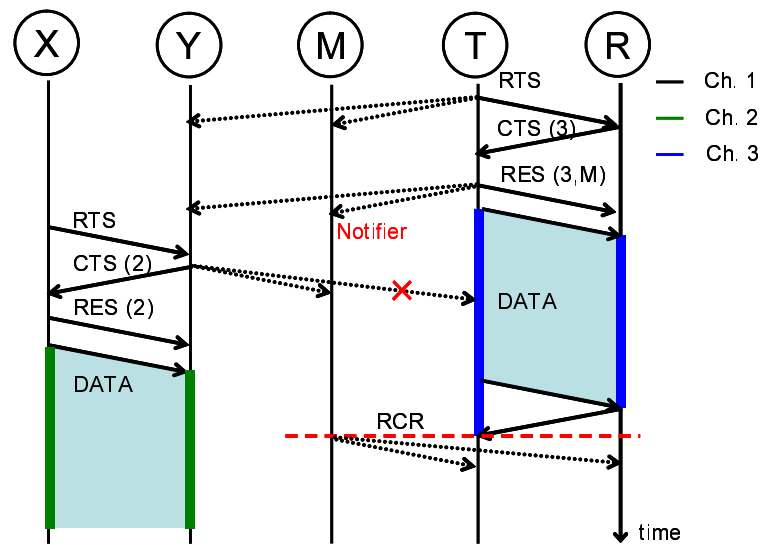


図 2.3 AR 方式のタイムチャート例

2.1.3 協調端末を用いるメディアアクセス制御

単一送受信機のままで問題に対処するために協調端末を利用した方式が提案されている。Cooperative Asynchronous Multi-channel MAC (CAM-MAC) [28] は、協調端末を用いた代表的なメディアアクセス制御方式である。送受信端末は、プローブパケットを交換することでデータチャネルを決定する。プローブパケットを受信した協調端末は、プローブパケットに記載されているチャンネルが使用中であれば INV (invalid) パケットを衝突させることで指定されたチャンネルが使用できないことを通知する。衝突が起これなければ、送受信端末はプローブパケットで指定したデータチャネルを使用し、DATA 送信する。協調端末を用いることで DATA 送受信中に聞き逃した情報を得ることができる。CAM-MAC Avoiding Redundant Channel Blocking problem (CAM-MAC ARCB) [29] と Asynchronous Multi-channel MAC (AM-MAC) [30] は CAM-MAC を拡張した方式である。この他にも、自身の通信終了後にあらかじめ指定した第三者が近隣の通信状況を通知する Active Recovery (AR) 方式 [20] が提案されている。AR 方式では、DATA/ACK 交換を終えた後に RCR (Recovery) フレームを近隣の第三者 (Notifier) から受信することで、近隣端末の通信状況を得る。図 2.3 に AR 方式の動作例を示す。まず端末 T は自分の保持している空きチャンネルリストを RTS フレームに付加して端末 R に送信する。端末 R は T の受信したチャンネルリストと自身のチャンネルリストを元に DATA 送信に利用するチャンネルを決定し、CTS に決

定したチャンネル番号を記載し端末 T に送信する。端末 T は近隣端末から Notifier を選択し、利用するチャンネルとともに Reservation フレームで近隣端末に通知する。Notifier に選択された端末 M は、端末 T と R がデータ送信中、制御チャンネルを聞き続け、端末 T-R 間の通信終了後に RCR フレームにて端末 T と R が聞き逃した端末 X-Y 間のチャンネル予約を通知する。また、Cooperative CDMA-based Multi-channel MAC (CCM-MAC) [31] は、CDMA 型のマルチチャネルアクセス制御であり、AR 方式同様に第三者から近隣の通信情報を収集し衝突を回避している。

2.2 SDMA 型メディアアクセス制御

SDMA 型メディアアクセス制御は主に、FDMA/CDMA 型メディアアクセス制御と同様に RTS/CTS や追加制御フレームを用いた方式、複数送受信機やビジートーンを用いた方式、協調端末を用いた方式に分類できる。各メディアアクセス制御法の分類図を図 2.4 に示す。

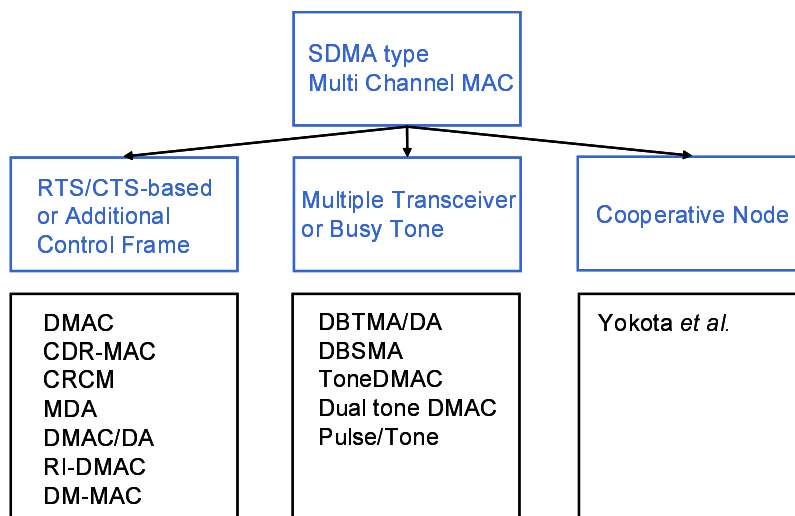


図 2.4 SDMA 型メディアアクセス制御法

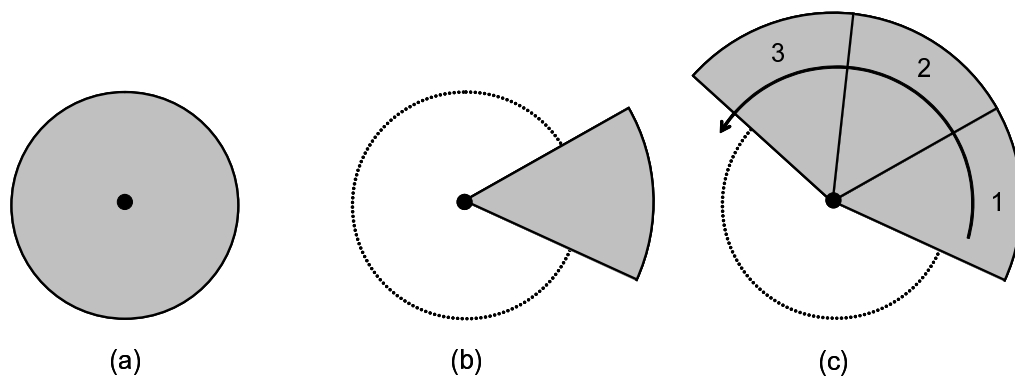


図 2.5 ビームパターンと送信範囲の関係

2.2.1 RTS/CTS や追加制御フレームを用いるメディアアクセス制御

全方位性のメディアアクセス制御では、図 2.5 の (a) のビームパターンで RTS と CTS を送信し、隣接する端末に通信の開始を通知する。一方、Directional MAC (DMAC) [19] では、図 2.5 の (b) のビームパターンで RTS/CTS を送信する。図 2.5 の (b) のビームパターンを用いることで、さらされる端末を軽減することができる。ただし、このことが指向性隠れ端末問題や Deafness 端末問題の原因にもなる。

そこで SDMA 型メディアアクセス制御では、複数の RTS/CTS を用いた解決法が提案されている。代表的な手法として、送信端末が図 2.5 の (c) のように指向性ビームを周回させながら RTS を送信する CDR-MAC (Circular Directional RTS MAC) [32] が提案されている。RTS を受け取った隣接端末は、パケットの情報から通信期間を把握できる。また、DNAV を設定することで仮想キャリアセンスが働き、隣接端末の無駄な RTS 送信を抑制する。複数方向に RTS を送信することで、さらされる端末が増えるように見えるが、実際にはある一方向に指向性ビームを向けて DATA を送信しており、問題は起きない。CDR-MAC の方式をベースとして、さまざまな方式が提案されている。CRCM (Circular RTS and CTS MAC) [33] では、受信端末においても CTS を周回させながら送信することで受信端末の隣接端末に対して通信の開始を通知できる。RTS/CTS を単純に複数送信することは、オーバーヘッドの増加につながる。そこで、オーバーヘッドを削減しつつ RTS/CTS を複数送信する方法がある。MDA (MAC protocol for Directional Antennas) [34] と DMAC/DA (Directional MAC with Deafness Avoidance) [35] は、RTS/CTS

交換を終えた後に、同時に RTS と CTS の複数送信を行う。RTS/CTS をそれぞれ複数送信する手法に比べて時間を短縮することができる。Receiver Initiated DMAC (RI-DMAC) [36] は、自身の通信終了後に RTR (Ready To Receive) フレームを難聴問題の影響を受けている端末に対して送信する。RTR フレームを受信した端末は、すぐにデータ送信が可能となる。難聴問題の影響については過去の通信履歴をもとに計算している。本論文では、待機時のビームパターンを適応的に切り換える Directional Monitoring MAC (DM-MAC) を提案している。DM-MAC については4章で詳細を述べる。

2.2.2 複数送受信機やビジートーンを用いるメディアアクセス制御

SDMA 型メディアアクセス制御においても、1.3.2 で述べたトーン信号を用いた解決法が提案されている。SDMA 型メディアアクセス制御では、トーン信号はビジートーンの役割以外にも用いられる。Dual Busy Tone Multiple Access with Directional Antenna (DBTMA/DA) [37] は、名前の通り 1.3.2 で述べた DBTMA を SDMA 型メディアアクセス制御に拡張した方式である。DBTMA/DA では、送信ビジートーンと受信ビジートーンをどのビームパターンで送るのが適しているか検討している。シミュレーションの結果から、送信ビジートーン・受信ビジートーンともに指向性ビームパターンを用いることが性能が良いことを示している。Directional Busy Signal Multiple Access (DBSMA) [38] は、送信、受信、待機の全てに指向性ビームパターンを用いるメディアアクセス制御方式である。送信端末は、Invitation Signal (IS) の役割をもったトーン信号を受信端末に送信する。指向性ビームパターンを周回させながら待機している受信端末は IS を検出すると、最も感度の良い方向に指向性ビームを固定する。この後は、RTS/CTS/DATA/ACK の一連の動作を行う。受信端末は、RTS を受信した後、ビジートーンを送信することで指向性隠れ端末問題に対処している。この方式は、トーン信号を有効に利用し、通信距離の拡張と指向性隠れ端末問題の解決に成功している。

この他にも、難聴端末問題に対処するためにトーン信号を用いる方式も提案されている。ToneDMAC [19] では、自身の通信終了時に全方位性ビームで通信の終了を意味するトーン信号を送信する。トーン信号は、送信端末と受信端末の両方が送信する。一般的に、ビジートーンを含めトーン信号は無変調信号である。ToneDMAC で用いるトーン信号も無変調信号であるが、周波数と信号の長さに

よって送信した端末を特定できるようになっている。この信号を受信した送・受信端末の隣接端末は、これまでの再送が衝突によるものではなく難聴によるものであったと区別することができる。そして、バックオフ中の端末で送信したい相手からのトーン信号を受信した端末は、バックオフの Contention Window (CW) を初期化する。これにより 2 進数バックオフの影響を回避し、難聴端末問題を解決している。Dual tone DMAC [39] は、ToneDMAC を拡張し通信の開始を意味するトーン信号を追加している。これにより難聴による再送を回避している。Pulse/Tone [40] は 2 種類の狭帯域信号を用いている。送信端末は RTS を送信する前に、Pulse 信号を指向性ビームで送信する。Pulse 信号を受信した端末は Tone 信号を返信する。Tone 信号を受信した送信端末は RTS を送信し、通常の手続きを行う。この方式により、難聴問題や隠れ端末問題を軽減できるが、Pulse 信号には情報が含まれていないため、意図しない端末から Tone 信号を受け取る可能性がある。

2.2.3 協調端末を用いるメディアアクセス制御

SDMA 型メディアアクセス制御においても、単一送受信機のままで問題に対処するために協調端末を利用した方式が提案されている。横田らの方式 [41] は、AR 方式と同様にあらかじめ協調端末を選択する方式である。動作例を図 2.6 に示す。端末 S と D は指向性ビームを用いて RTS/CTS を交換する。次に、端末 S は RES (Reservation) フレームを送信し協調端末として端末 M を選択する。RES フレームを受信した協調端末 M は隠れ端末 X に BCTS (Backward CTS) フレームを送信する。これにより端末 X は、端末 S や端末 M の方向に DNAV を設定する。その協調端末 M は指向性ビームを周回させながら受信状態となる。受信状態時に RTS を受信した場合には、受信した方向に RCR (ReCoveRy) フレームを送信し、再び受信状態へ戻る。

2.3 関連研究に関する議論と研究の位置づけ

FDMA 型/CDMA 型のメディアアクセス制御では、マルチチャネル隠れ端末問題と難聴端末問題の解決法として、複数送受信機を用いる方式や協調端末を用いる方式が提案されていることを 2.1 で述べた。送受信機を複数用いることでマル

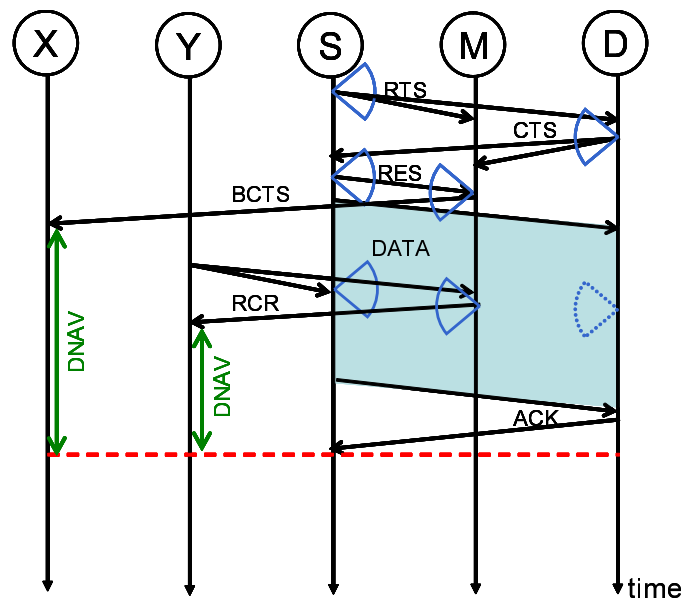


図 2.6 横田らの方式のタイムチャート例

マルチチャネル隠れ端末問題を確実に解決できるが、ハードウェア規模が大きくなってしまふ。アドホックネットワークでは、多くの端末を用いるため1つの端末のハードウェア規模が大きくなることは避けたい。単一送受信機を用いた端末での解決方法として協調端末の利用が考えられている。第三者の協調端末から周辺の通信状況を取得することで、送受信機を増やすことなく問題に対処することが可能である。しかし、アドホックネットワークでは協調端末自身も通信の要求があり競合する端末の1つである。また、情報収集に適した端末を選ぶことも難しく、大規模ネットワークでの運用にはまだ課題が残されている。

SDMA 型のメディアアクセス制御では、指向性隠れ端末問題と Deafness 問題の解決法として、トーン信号を用いる方式や複数 RTS/CTS による方式が提案されていることを 2.2 で述べた。トーン信号を用いることで指向性隠れ端末問題や Deafness 問題に対処できるが、トーン信号専用の送受信機が必要となる。一般的に無変調信号を送信するため、複数送受信機を用いる場合に比べて簡素に設計できることが考えられるが、ハードウェア規模が大きくなることを避けたい。単一送受信機を用いた端末での解決方法として複数 RTS/CTS による解決法が考えられている。複数の制御パケットを送信することで周辺への通知が可能となるが、通信時のオーバーヘッドが懸念される。また、現在普及している IEEE 802.11 系の通信機器では複数制御パケットを送信する方式がないため親和性が低い。

そこで、本論文ではFDMA/CDMA型メディアアクセスとSDMA型メディアアクセスのそれぞれにおいて、複数送受信機（トーン信号送受信機を含む）や協調端末を利用せず、単一のRTS/CTS/DATA/ACKのハンドシェイクで各隠れ端末問題と難聴端末問題を解決する方式を提案する。これらの制約の上で、問題点に対処するためには物理層の振る舞いを理解し、クロスレイヤ設計でメディアアクセス制御を構築する必要がある。3章で説明する、コードセンスCDMA型メディアアクセス制御では物理層とMAC層で得られる情報をテーブル化し適切に管理することで各種問題を解決し、スループットの向上を図っている。4章で説明する、指向性傍受SDMA型メディアアクセス制御では待機時のビームパターンの違いによって得られる情報から、端末が問題の判別を行い、状況に応じた動作をすることでスループットの向上を図っている。

第3章

コードセンスCDMA型メディア アクセス制御法

アドホックネットワークのメディアアクセス制御方式にはIEEE 802.11 DCFに代表されるシングルチャネルメディアアクセス制御が広く用いられている。近年，さらなるスループット向上のためにFDMA型やCDMA型のマルチチャネルメディアアクセス制御法が検討されている。しかし，マルチチャネルメディアアクセス制御法ではマルチチャネル隠れ端末問題や短縮NAV問題といった新たな問題が発生してしまう。本章では，問題に対処するコードセンス機能を有するCDMA型メディアアクセス制御法を提案し，シミュレーションによってその有効性を示す。

3.1 まえがき

アドホックネットワークのメディアアクセス制御法には，無線LANの標準規格であるIEEE 802.11 DCF [12]に代表されるシングルチャネルメディアアクセス制御法が広く利用されている。しかし，端末同士がお互いの送信を把握できずにフレームの衝突を起こす隠れ端末問題などに対しては未だに根本的な解決に至っていない。加えて，通信したい端末が，他の通信中の信号を検知した場合に，衝突が起こらないにも関わらず通信が不要に抑制されてしまうさらし端末問題が生じスループット特性の低下を招く。そこで近年では，隠れ端末/さらし端末問題の解決のためにFDMA (Frequency Division Multiple Access) 型 [23, 24, 26, 42] およびCDMA (Code Division Multiple Access) 型 [22, 43, 44] のマルチチャネルメディアアクセス制御法が検討されている。通常マルチチャネルメディアアクセ

ス制御法では、RTS (Request To Send) /CTS (Clear To Send) などの制御信号とデータ信号は別々のチャンネルを使用する。しかし、端末の送受信機が半二重通信である場合、制御信号とデータ信号を同時に受信することができないため、RTS/CTS 交換による通信抑制と隣接端末とのチャンネル情報の共有が正しく動作せず、フレームの衝突を誘発する問題がある。この問題はマルチチャンネル隠れ端末問題 [17] と呼ばれる。単一送受信機を用いる FDMA 型のマルチチャンネルメディアアクセス制御法 [21] [20] において解決困難な問題である。また、マルチチャンネルメディアアクセス制御法では、通信抑制期間を RTS/CTS 交換の短い期間のみに設定することで同時通信ペアの増加を図る。そのため、マルチホップ通信環境下ではデータ送受信中の端末へ不要な通信要求を行い、通信性能の低下を引き起こす。これを短縮 NAV (Network Allocation Vector) 問題と呼ぶ。

本章では CDMA 型に着目し、複数送受信機や協調ノードを利用せず、単一送受信機・半二重通信の制約のもとマルチチャンネル隠れ端末問題・短縮 NAV 問題、更には自律分散制御下における拡散符号割り当てと遠近問題を一挙に解決する CS-CDMA/TC (Code Sense CDMA with Transmission Control) メディアアクセス制御法を提案する。本論文では、計算機シミュレーションによって提案法の有効性を示す。

3.2 マルチチャンネルメディアアクセス制御法

3.2.1 Simple Multi-Channel MAC (SMC-MAC)

SMC-MAC は、単一送受信機を用いた FDMA 型の単純なマルチチャンネルメディアアクセス制御法である。文献 [20] において AR 方式の比較方式として定義されており、本論文でもマルチチャンネル隠れ端末問題と短縮 NAV 問題が発生するベンチマークとして取り上げる。なお、ランダムトポロジでは AR 方式よりも高いスループットを示すことも報告されている。SMC-MAC では制御チャンネルで RTS/CTS/RES (Reservation) フレームを送受信した後、送受信機をデータチャンネルに切り替えて DATA/ACK フレームを送受信する。RES フレームは、送信端末が利用するデータチャンネルを近隣端末に通知するために使用される。使用するデータチャンネルの選択は仮想キャリアセンスにより実現し、データチャンネルの物理キャリアセンスは行わない。

SMC-MAC の動作例を図 3.1 に示す。各端末は、チャンネルの利用状況を Channel

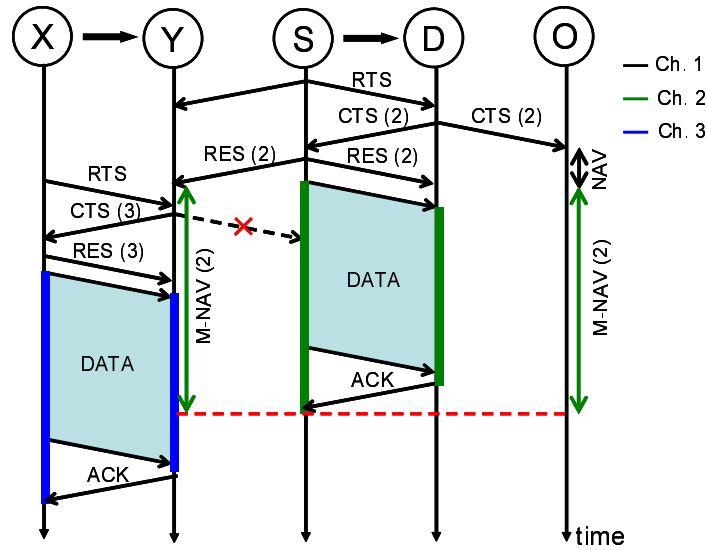


図 3.1 SMC-MAC のタイムチャート例

Usage List (CUL) に保持する。送信端末は、RTS 送信時に自身の空きチャンネルリストである Free Channel List (FCL) を送信することにより、あて先端末が自身の FCL と比較し、データ送信時に使用するチャンネルを決定する。あて先端末は、データチャンネルとして選択したチャンネル番号を CTS フレームに記載し送信する。CTS フレームを受け取った送信端末は CTS に記載されているチャンネル番号を RES フレームに記載し送信する。なお、制御フレームを受信した隣接端末は、制御チャンネルとデータチャンネルに別々の NAV を設定する。送信端末はデータチャンネルに切り替えて DATA フレームを送信する。あて先端末は、DATA フレームを受信した後、ACK フレームを送信する。

3.2.2 Multi-Channel MAC (MC-MAC)

MC-MAC は文献 [21] で提案された、単一送受信機を用いた FDMA 型マルチチャンネルメディアアクセス制御法である。使用するデータチャンネルの選択は仮想キャリアセンスと送信端末の物理キャリアセンスにより実現する。

MC-MAC の動作例を図 3.2 に示す。送信端末はデータチャンネルをランダムに選択し、選択したチャンネルに同調しキャリアセンスを行う。キャリアセンスしたチャンネルがアイドルならば、DATA/ACK フレーム用データチャンネルとして選択する。ビジーならば残りのデータチャンネルをランダムに選択して、同様のステップをアイドルチャンネルが見つかるまで繰り返す。アイドルチャンネルが見つかった端末は制

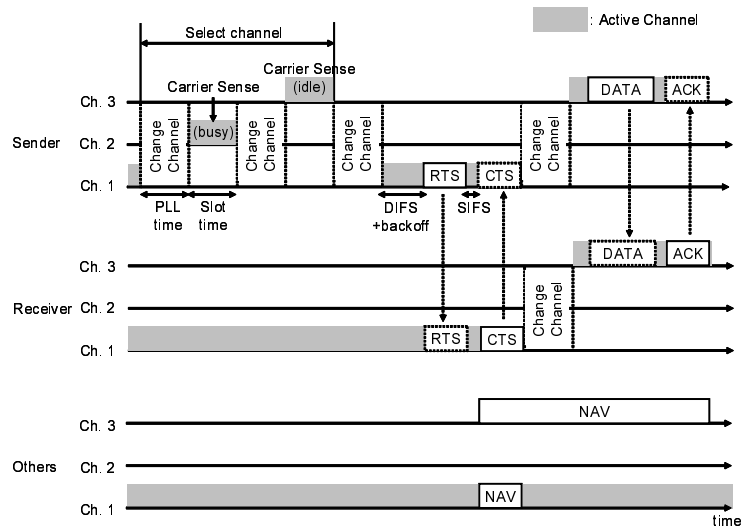


図 3.2 MC-MAC のタイムチャート例

御チャンネルに同調し、RTS フレームにアイドルチャンネル番号を記載し、RTS フレームを送信する。あて先端末は RTS フレームを受信した後、記載されたチャンネル番号を保持し、CTS フレームに記載して送信する。あて先端末は CTS フレームを送信した後、記載されたチャンネルに同調し、DATA フレームの到着を待つ。RTS/CTS フレームを受信した隣接端末は制御チャンネルとデータチャンネルに別々の NAV を設定する。送信端末は CTS フレームを受信した後、選択したチャンネルに同調し、DATA フレームを送信する。あて先端末は DATA フレームを受信した後、ACK フレームを送信する。

3.3 コードセンス CDMA 型メディアアクセス制御法

提案方式は、自律分散制御下で CDMA を達成する受信機構成を含めた物理レイヤと前述したマルチチャンネルメディアアクセス制御法の問題を解決するための MAC レイヤの両方を考慮したクロスレイヤ設計によって実現される。

干渉制限チャンネルである CDMA では、干渉除去受信機によって非希望信号を除去することで通信品質の向上を図ることができる。また、自律分散制御下で CDMA を実現するには、物理レイヤにおいて、近隣で使用される拡散符号を検知できるコードセンスと簡易な同期機構が必要である。3.3.1, 3.3.2 のそれぞれに干渉除去受信機とコードセンスの詳細を述べる。

MAC レイヤでは、マルチチャンネル隠れ端末問題や短縮 NAV 問題へ対処するた

めに、近隣で使用されている拡散符号の把握と適切な NAV の設定が重要な課題である。CS-CDMA では、近隣で使用されている拡散符号を把握するための拡散符号管理テーブルと適切な NAV 設定のための拡張 NAV 機能を有している。また、拡散符号管理テーブルは拡散符号割当てに対しても機能する。さらに提案方式 (CS-CDMA/TC) は、CDMA 特有の問題である遠近問題の解決のために送信抑制制御の機能を備えている。加えて、物理レイヤの機能を考慮したマルチチャネルバックオフを行う。MAC レイヤの各機能の詳細は 3.3.3 以降に述べる。

3.3.1 干渉除去受信機

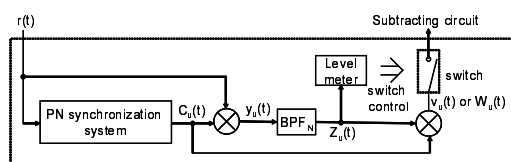


図 3.3 干渉除去受信機に含まれる基本回路

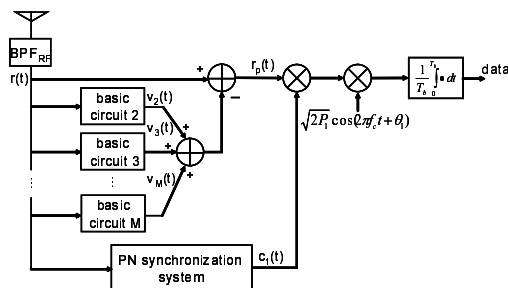


図 3.4 干渉除去受信機

荒木ら [45] によって提案された干渉除去受信機を図 3.3, 図 3.4 に示し、その概要を説明する。本来受信機において、受信信号に含まれる干渉信号に用いられている拡散符号を知ることはできない。しかしながら、拡散符号に用いる PN (Pseudo-random Noise) 系列が持つ Cycle-and-Add 特性を利用した PN 同期回路において干渉信号の推定拡散符号 C_u を発生させ、受信信号 $r(t)$ との乗算で拡散復号し、狭帯域になった信号を BPF_N で抽出する。その出力 $Z_u(t)$ がレベル判定しきい値以上の電力レベルであるとき干渉信号が再生できたと判断してスイッチを閉じ、再び拡散した干渉信号 $v_u(t)$ を減算器へと導く、図 3.4 に示す受信機において基本回路は並列に接続され、各々から出力される干渉信号 $v_i(t) (i = 2, 3, \dots, M)$ を受信信号 $r(t)$ から差し引くことで到来する全ての干渉信号を除去する。本論文で、干渉除去受信機は到来信号の同期点検出を完全に行えるものとする。また、干渉除去率は基本回路における BPF_N に依存するが、文献 [45] に従い 0.9 とする。その他システムの詳細については、文献 [45] を参照されたい。

3.3.2 コードセンス

コードセンスは、到来信号から使用されている拡散符号の種類とその受信電力値を検知し、隣接端末によって使用されている拡散符号を判別する機能である。従来の受信機では、到来信号から拡散符号を推定することができずコードセンスを達成できなかった。しかしながら、干渉除去受信機では、図 3.3 に示す基本回路において干渉信号に使用されている拡散符号を推定する PN 同期回路とその受信電力レベルを測定するレベルメータがすでに備わっているため、それらを利用することで特別な機能を追加することなくコードセンスを実現することができる。コードセンスの動作タイミングは、干渉除去受信機の基本回路が動作する状況にあるとき、つまり端末の状態が受信機中または待機中の場合に動作し続ける。

3.3.3 RTS/CTS フレームの検討

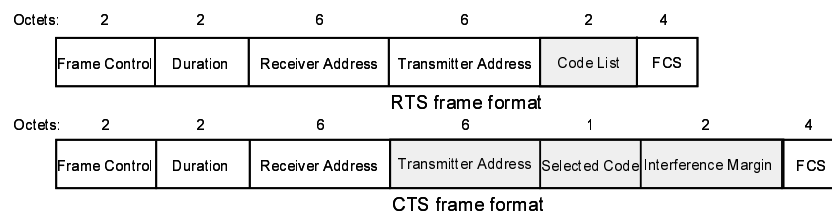


図 3.5 RTS/CTS フレーム構成

図 3.5 に、提案方式に用いる制御フレームの構成を示す。RTS には、拡散符号管理テーブルを基に送信機周辺で使用されていないいくつかのコードをデータコード候補として受信機に通知するためにコードリストフィールドを追加する。CTS には、送信機アドレスフィールド・選択コードフィールド・許容干渉フィールドを新たに追加する。送信機アドレスフィールドは、CTS を送信した端末に対して個別の NAV を設定するためのフィールドであり、拡張 NAV テーブルのエントリに用いられる。また、選択コードフィールドは、RTS のコードリストフィールドに記載されているデータコード候補のうち、拡散符号管理テーブルを基に受信機周辺でも使用されていないコードをデータコードとして使うことを通知するフィールドである。最後に、許容干渉電力フィールドは受信機が許容できる干渉電力量を近隣端末に通知するためのフィールドであり、送信抑制制御に用いられる。

3.3.4 拡散符号管理テーブル

表 3.1 拡散符号管理テーブル

Spreading code	Interference
C_1	$x[\text{dBm}]$
C_2	$y[\text{dBm}]$
\vdots	\vdots
C_N	$z[\text{dBm}]$

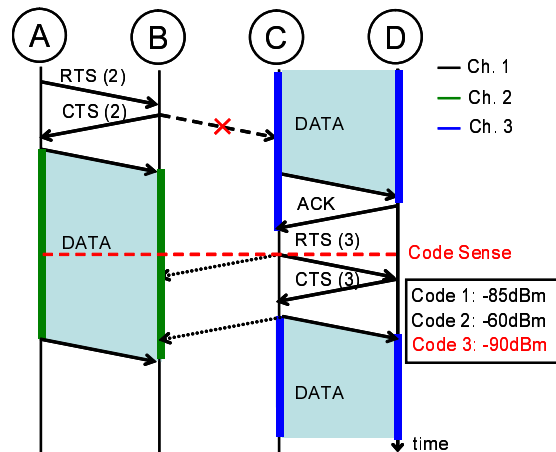


図 3.6 拡散符号選択を行うタイムチャート例

提案方式では、拡散符号割当てとマルチチャネル隠れ端末問題に対処するために、拡散符号管理テーブルを導入する。各端末は拡散符号管理テーブルを保持し、近隣で使用されている拡散符号を把握するために用いる。各端末は待機中におけるコードセンスによって、使用されている拡散符号とその受信電力値の対応を把握し、拡散符号管理テーブルに記載する。受信電力値の大きい拡散符号は近隣の端末に使用されている可能性が高いことを表す。したがって、各端末は RTS/CTS フレーム送信時に拡散符号管理テーブルを参照し、受信電力値の小さい符号を選択し、データフレーム伝送に用いる。送信機と受信機の双方で受信電力値の小さい符号を選択することで同一エリアにおける拡散符号の重複使用を確実に避けることができる。また、コードセンスは端末の状態が受信または待機中のすべてで動作するため、拡散符号管理テーブルの更新頻度は非常に高く、つねに最新の状態に保たれる。

表 3.1 に拡散符号管理テーブルの構成を示す。また、拡散符号選択時に拡散符号管理テーブルを参照し、マルチチャネル隠れ端末問題を解決する様子を図 3.6 に示す。なお、図 3.6 は図 1.11 のマルチチャネル隠れ端末問題と対応している。端末 A は拡散符号管理テーブルを参照して制御コードの空きを確認すると、隣接端末に使用されていないデータコード C_2 を選択する。その後、端末 B との RTS/CTS 交換によってデータコードの通知を行った後にデータを送信する。一方、端末 C はデータ送信中であったために、端末 B からの CTS フレームを受信できず、端

末 A, B がデータコード C_2 で通信していることを把握できない。しかし、拡散符号選択の前にコードセンスを行い拡散符号管理テーブルを更新し、周辺からの干渉の少ないデータコード C_3 を選択することでフレームの衝突を回避できる。

3.3.5 拡張 NAV

表 3.2 拡張 NAV テーブル

Node ID	NAV duration
⋮	⋮
B	x[msec]
C	y[msec]
⋮	⋮

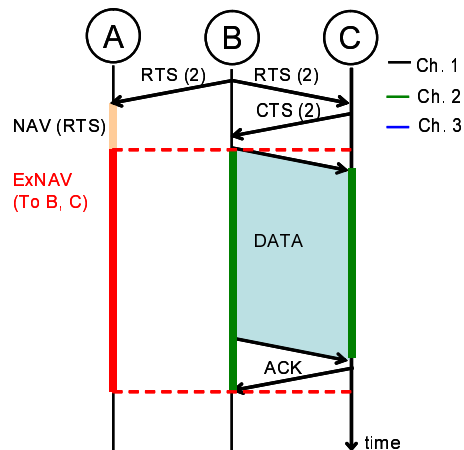


図 3.7 拡張 NAV を設定するタイムチャート例

提案方式は、短縮 NAV 問題に対処するために拡張 NAV を用いる。各端末は、自分あてでない RTS/CTS フレームを受信すると受信フレームから送信機アドレス・受信機アドレス・通信期間を読み取り、端末アドレスと通信期間の対応を拡張 NAV テーブルに保持する。拡張 NAV は通常の NAV タイマを延長するように動作する。上位層から通信要求を受け取った端末は、まず初めに通常の NAV の手順に従い NAV タイマが満期となるまで待機する。次に拡張 NAV テーブルを参照してあて先端末アドレスが含まれていないか確認し、含まれている場合は端末アドレスごとに個別に設定されている拡張 NAV タイマが満期となるまで待機する。これにより不要な通信要求の送信を抑えることができる。

表 3.2 に拡張 NAV テーブルの構成を示す。また、拡張 NAV テーブルを用いることで短縮 NAV 問題を解決する様子を図 3.7 に示す。なお、図 3.7 は図 1.13 の短縮 NAV 問題と対応している。端末 B は拡散符号管理テーブルを参照して制御コードの空きを確認すると、隣接端末に使用されていないデータコード C_2 を選択し、端末 C との RTS/CTS 交換によってデータコードの通知を行った後にデータ送信を開始する。一方、端末 A は RTS フレームを受信し、NAV (RTS) と拡

張 NAV (To B, C) が設定される. ここで端末 A において端末 B へのデータ送信要求が発生した場合, NAV と拡張 NAV の期間待機し, あて先端末である端末 B が通信中の間は RTS フレームの送信を抑制される. ここで拡張 NAV は端末 B, C への通信のみを抑制するため, 拡張 NAV 期間に端末 B, C 以外の端末と通信することができる.

3.3.6 送信抑制制御

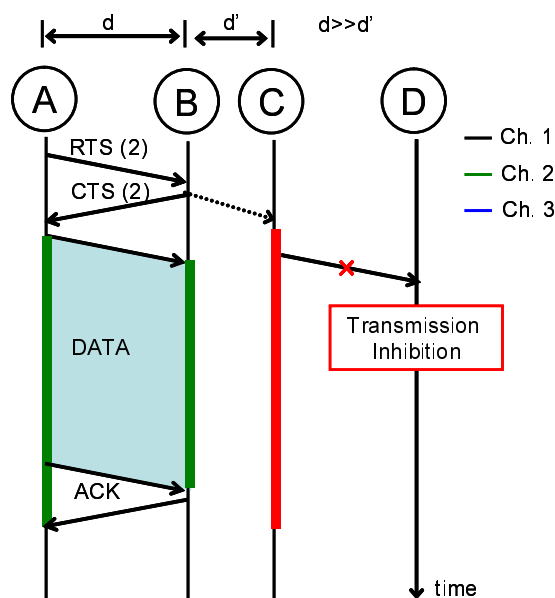


図 3.8 送信抑制制御

送信抑制制御とは, 端末が自身の通信を開始する前に与干渉を計算して, 自身の送信信号が近隣の通信を破壊してしまう場合に自身の送信を控える処理である. 送信抑制制御を行うことで, CDMA 特有の遠近問題による通信性能低下の改善が見込まれる.

各端末は自身の送信抑制期間を格納する送信抑制期間フィールドを保持する. 端末は自身が RTS/CTS フレームを送信するに先立って送信抑制期間フィールドを参照し, 送信抑制期間内ならば送信抑制制御期間が終わるまで送信を控える. 送信抑制期間外ならば RTS/CTS フレームを送信する. RTS フレームを受信したあて先端末は自身の最大許容干渉電力を計算し, CTS フレームの許容干渉電力フィールドに記載し送信する. CTS フレームを受信した送信端末以外の近隣端末

は CTS フレームを受信した際の電力と、許容干渉電力フィールドに記載された最大許容干渉電力を比較する。CTS フレームの受信電力が最大許容干渉電力以上ならば、自身の送信が許容できないと判断し、CTS の通信期間フィールドに記載された期間を送信抑制期間として保持する。

送信抑制制御の様子を図 3.8 に示す。ここで、端末 A-B 間の距離 d に比べ、端末 B-C 間の距離 d' が非常に近い環境を考える。まず、端末 A に端末 B への通信要求が発生した場合、端末 A は RTS フレームを送信する。端末 B は RTS フレームを受信した際に、自身の最大許容電力を計算し CTS フレームに記載し送信する。CTS フレームを受信した端末 A は DATA フレームを送信する。また、CTS フレームを傍受した端末 C は CTS フレームの受信電力と CTS フレームに記載された最大許容干渉電力を比較する。この図では CTS フレームの受信電力の方が大きいとすると、端末 C は自身の送信が許容できないと判断し、CTS フレームに記載された期間を送信抑制期間として設定する。ここで、端末 C に端末 D への通信要求が発生した場合を考える。端末 C はコードセンスにより空きコードを見つけるに先立って、自身の送信抑制期間フィールドを確認する。端末 B からの CTS フレームにより送信抑制期間が設定されているので、端末 C は送信抑制期間内は RTS フレームの送信を控え、送信抑制期間終了後に送信する。

また、最大許容干渉電力の計算方法を以下に示す。受信端末の希望信号対干渉電力比 (SINR : Signal to Interference and Noise RAtio) を SINR, 最低限必要とする SINR を $SINR_{MIN}$ とする。受信端末が許容できる最大 SINR を $SINR_{tolerable}$ とすると、 $SINR_{tolerable}$ は式 3.1 で計算できる。

$$SINR_{tolerable} = SINR - SINR_{MIN} \quad (3.1)$$

式 3.1 で求めた $SINR_{tolerable}$ より、最大許容干渉電力を算出する。P を希望信号電力、I を現時点での干渉電力の総和、N を雑音電力、X を最大許容電力とすると、 $SINR_{tolerable}$ は式 3.2 で表される。

$$SINR_{tolerable} = 10 \log_{10} \frac{P}{X + I + N} \quad (3.2)$$

式 3.2 から、最大許容干渉電力 X は次のように得られる。

$$X = \frac{P}{10^{SINR_{tolerable}/10}} - (I + N) \quad (3.3)$$

3.3.7 マルチチャネルバックオフ

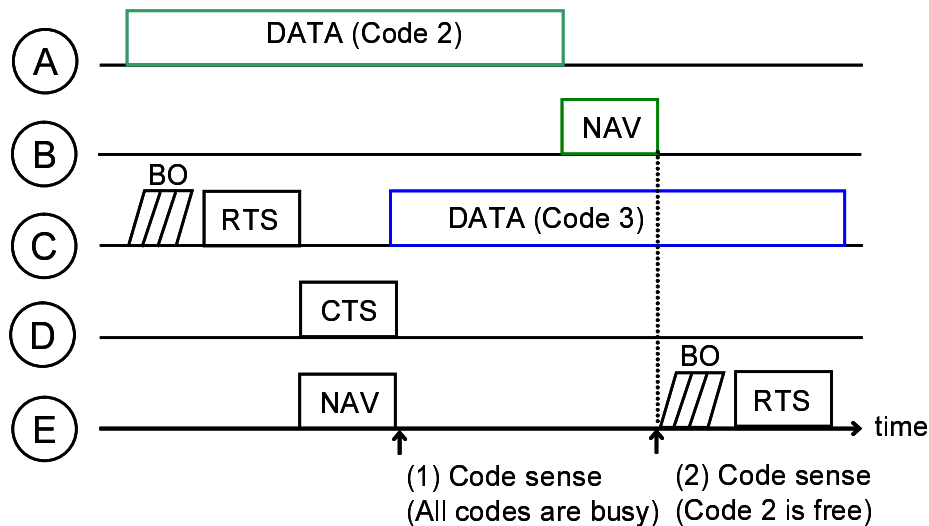


図 3.9 マルチチャネルバックオフ

CS-CDMA では、制御コードのみを監視してバックオフ処理を行っていた。制御コードのみの監視では、制御コードのみがフリーであってデータコードがビジーの場合に RTS の再送が頻繁に起こる。これは、受信端末が選択できるデータコードがない場合に CTS を送信しないためである。RTS の連続再送はリンク切れの原因となりスループットを劣化させていた。

CS-CDMA/TC では制御コードとデータコードの両方を監視してバックオフ処理を行うマルチチャネルバックオフを導入する。図 3.9 にマルチチャネルバックオフのタイムチャート例を示し、端末 E が図中 (1) の時間に端末 A～D 以外の端末に対して通信要求が発生した状況を考える。ただし、全ての端末は各々の通信範囲に位置するものとし、DATA/ACK フレームに使用できるデータコード数は 2 とする。端末 E は送信抑制期間が設定されていないことを確認した後に、コードセンスを行い近隣端末のコード情報を得る。(1) の時間では制御コードは近隣端末に使用されておらずフリーコードとなっているがフリーのデータコードが存在しないため自身のバックオフ時間を減少させず、データコードもフリーとなるまで待機する。(2) の時間に端末 A と端末 B の通信が終了し、データコード 2 がフリーとなるため自身のバックオフ時間を減らし、送信処理を開始する。以上のようにマルチチャネルバックオフによって、MAC レイヤにおけるパケット損失を減らし通信性能の向上が見込まれる。

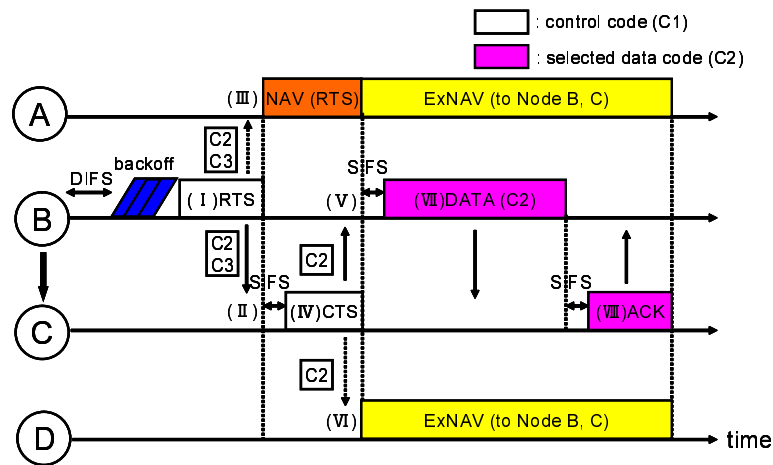


図 3.10 提案方式のタイムチャート例

3.3.8 提案法の通信手順

図 3.10 に提案方式のタイムチャート例を示し、提案法の通信手順について説明する。ここでは、端末 A, B, C, D の 4 端末からなるストリングトポロジにおいて、隣接する端末どうしのみが通信範囲とコードセンス範囲に含まれる場合を想定し、端末 B から端末 C への通信を例に手順を説明する。

1. 待機

制御コード (C₁) をアクティブコードとして待機する。

2. 通信要求発生

上位層からデータパケットを受け取った端末 B は、データの種類やサイズにより次の動作をする。

(a) ブロードキャストデータもしくは RTS しきい値未満のユニキャストデータであった場合、IEEE 802.11 DCF と同じ手順を踏み、制御コードで拡散して送信する。その後手順 1 に戻る。

(b) RTS しきい値以上のユニキャストデータであった場合、IEEE 802.11 DCF と同じ手順を踏み、手順 3 に進む。

3. 送信抑制制御 (送信端末側)

端末 B は送信抑制期間フィールドを参照し、送信抑制期間が設定されているか否かを判断する。

- (a) 送信抑制期間内である場合は、送信抑制期間が終わるまで待機した後、手順4に進む。
- (b) 送信抑制期間外ならば直ちに手順4に進む。

4. RTS 送信

端末Bは拡散符号管理テーブルを参照し、干渉電力量がコードセンスしきい値未満であるデータコードをランダムに2つ選択する (C_2, C_3)。選択されたデータコードはRTSフレームのコードリストフィールドに挿入される。端末BはRTSフレームを制御コードで拡散して送信する。ただし、選択できるデータコードが1つもない場合は、選択できるようになるまで待つ。

(図3.10の(I))

5. RTS 受信

RTSフレームを正しく受信できる端末は端末A、Cである。端末A、CはRTSフレームに含まれる受信機アドレスを読み取り、自分宛か否かを判断する。

- (a) 自分宛であることを確認した端末Cは手順6に進む。

(図3.10の(II))

- (b) 自分宛でないことを確認した端末Aは、NAV (RTS) を設定してRTS/CTS交換を保護する。また、送信機アドレス・受信機アドレス・通信期間を読み取り、端末B、Cに対する通信を抑制する拡張NAVを設定し、手順1に戻る。

(図3.10の(III))

6. 送信抑制制御 (あて先端末側)

端末Cは送信抑制期間フィールドを参照し、送信抑制期間が設定されているか否かを判断する。

- (a) 送信抑制期間内である場合は、送信抑制期間が終わるまで待機した後、手順1に戻りRTSフレームの再送を待つ。
- (b) 送信抑制期間外ならば直ちに手順7に進む。

7. CTS 送信

端末 C は拡散符号管理テーブルを参照し、RTS フレームから得た 2 つのデータコードのうち干渉電力量がコードセンスしきい値未満かつ最小のものを 1 つ選択する (C_2)。選択されたデータコードは CTS フレームの選択コードフィールドに記載される。端末 C は CTS フレームを制御コードで拡散して送信し、選択したデータコードをアクティブコードとして DATA フレームを待つ。ただし、選択できるデータコードがない場合は手順 1 に戻り、RTS フレームの再送を待つ。

(図 3.10 の (IV))

8. CTS 受信

CTS フレームを正しく受信できる端末は端末 B, D である。端末 B, D は CTS フレームに含まれる受信機アドレスを読み取り、自分宛か否かを判断する。

(a) 自分宛であることを確認した端末 B は手順 9 に進む。

(図 3.10 の (V))

(b) 自分宛でないことを確認した端末 D は、送信機アドレス・受信機アドレス・通信期間を読み取り、端末 B, C に対する通信を抑制する拡張 NAV および送信抑制期間を設定し、手順 1 に戻る。

(3.10 の (VI))

9. DATA 送信

端末 B は CTS フレームから得たデータコード (C_2) をアクティブコードとし、そのデータコードで DATA フレームを拡散して送信し、ACK フレームの伝送を待つ。

(図 3.10 の (VII))

10. DATA 受信・ACK 送信

DATA フレームを正しく受信できる端末は端末 C のみである。DATA フレームを正しく受信した端末 C はデータを上位層に引き渡し、データコード (C_2) で ACK フレームを拡散して送信し、手順 1 に戻る。

(図 3.10 の (VIII))

表 3.3 シミュレーション諸元

Simulation time, Repeat	200sec, 10times
Packet arrival rate	Poisson process
Data packet size	1460bytes
Radio propagation model	Two-ray ground
Bandwidth	2Mbps
Tx power	10dBm
Cs threshold (Cs range)	-91dBm (430m)
Rx threshold (Rx range)	-81dBm (230m)

11. ACK 受信

ACK フレームを正しく受信できる端末は端末 B のみである。ACK フレームを正しく受信した端末 B は手順 1 に戻る。

12. 例外処理

受信エラーやタイムアウトが発生した場合はアクティブコードを制御コードに戻し、IEEE 802.11 DCF と同様の再送手順を踏む。

3.4 性能評価

3.4.1 シミュレーション諸元

ネットワークシミュレータ QualNet [46] を使用し、提案方式である CS-CDMA/TC とシングルチャネルメディアアクセス制御の IEEE 802.11 DCF, FDMA 型のマルチチャネルメディアアクセス制御法の SMC-MAC および MC-MAC, CDMA 型のマルチチャネルメディアアクセス制御法の CS-CDMA について比較を行う。シミュレーション諸元を表 3.3 に示す。その他の諸元は IEEE 802.11b に準拠する。また、IEEE 802.11b は 3 つの独立したチャンネルが得られることより SMC-MAC と MC-MAC のチャンネル数を 3, CS-CDMA と CS-CDMA/TC の拡散符号数を 3 とする。提案手法は、RTS と CTS に追加したフィールドをオーバーヘッドとして考慮する。

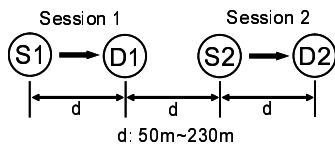


図 3.11 シミュレーション
トポロジ 1

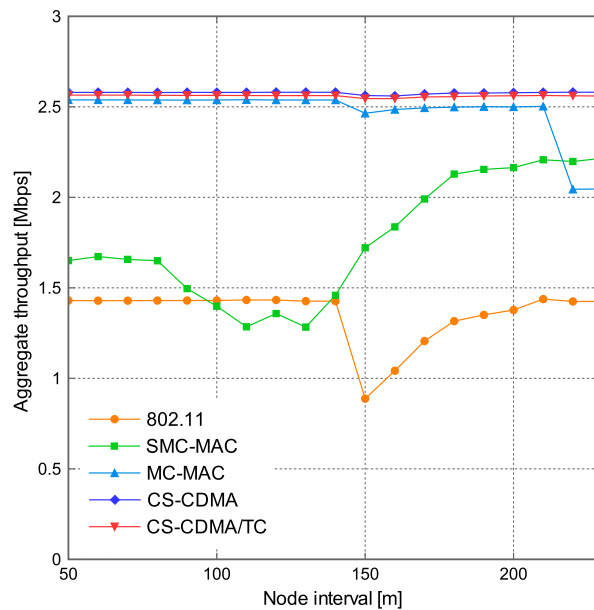


図 3.12 合計スループット特性

3.4.2 基礎評価シミュレーション

マルチチャネル隠れ端末問題，短縮 NAV 問題が発生する環境下での通信性能を評価する。

マルチチャネル隠れ端末問題発生環境下における評価

マルチチャネル隠れ端末問題が発生する環境下での各方式の通信性能を評価する。図 3.11 にマルチチャネル隠れ端末問題が発生するトポロジを示す。ここでは，端末 S1 から端末 D1 への通信を Session 1，端末 S2 から端末 D2 への通信を Session 2 として 2 つの通信を同時に行い，端末間距離を 50m から 230m まで変化させたときのスループット特性を評価する。パケット発生率は 50[packets/sec] とする。

図 3.12 に各方式の合計スループット特性を示す。IEEE 802.11 DCF では，端末間距離 150m 以降においてキャリアセンスできる端末が 2 ホップ先までに減少するため，フレーム衝突の機会が増加する隠れ端末問題が発生し，地理的に有利なセッション 2 が優先的に通信している。また，SMC-MAC では通信に使えるチャネルは 2 つあるが，仮想キャリアセンスから得られる情報のみでチャネル選択を

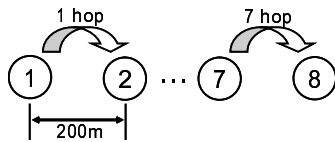


図 3.13 シミュレーション
トポロジ 2

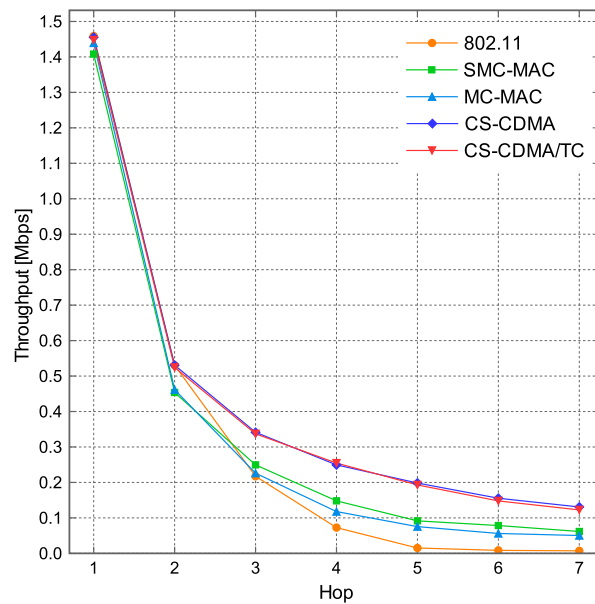


図 3.14 ホップ数対スループット特性

行うためにマルチチャネル隠れ端末が発生し、低スループットとなる。MC-MAC では端末間距離が 220m 以降においてスループット特性が劣化している。この原因として、MC-MAC はチャネル選択後にバックオフ手続きをとるために制御フレームを送信する頃にはチャネルの使用状況が変わってしまうことやチャネル選択時に受信側を考慮していない事から、マルチチャネル隠れ端末問題が発生してしまうことが挙げられる。一方、CS-CDMA や CS-CDMA/TC では拡散符号選択時に送受信端末双方の干渉電力を考慮していること、コードセンスを使用したリアルタイムな拡散符号管理、さらに制御フレーム送信直前に行う拡散符号選択によりマルチチャネル隠れ端末問題を解決している。このことから、CS-CDMA と CS-CDMA/TC のスループット特性は端末間距離に依存しない結果となった。

短縮 NAV 問題発生環境下における評価

短縮 NAV 問題が発生する環境下での各方式の通信性能を評価する。図 3.13 に短縮 NAV 問題が発生する 1 セッションの直線トポロジを示す。ここでは送信端末を端末 1 に固定し、あて先端末を端末 2 から端末 8 まで変化させてホップ数を変化させたときのスループット特性を評価する。端末間距離は 200m で固定とす

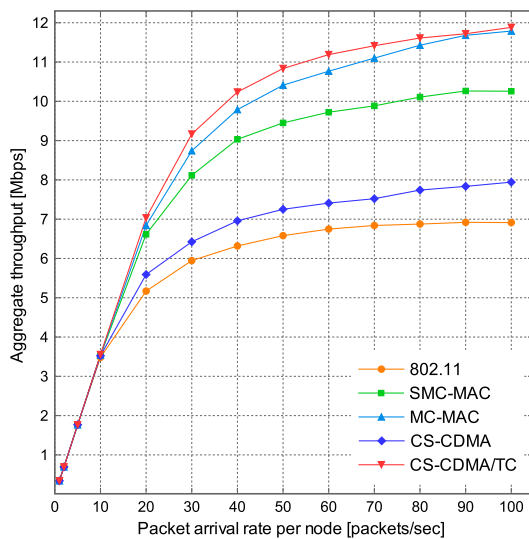


図 3.15 合計スループット特性

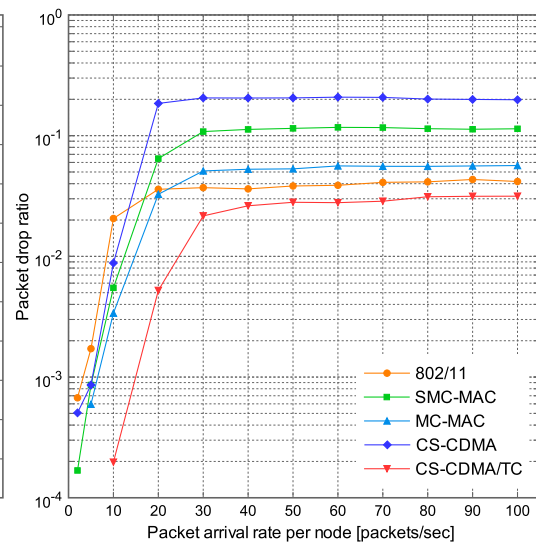


図 3.16 MAC 層におけるパケット損失率

る。パケット発生率は $30[\text{packets}/\text{sec}]$ とする。

図 3.14 に 1 セッションの直線トポロジにおける各方式のスループット特性を示す。図 3.14 より、IEEE 802.11 DCF と比較して SMC-MAC および MC-MAC では 2 ホップ時にスループットの低下が見られる。この原因は、マルチチャネルメディアアクセス制御法では NAV を短く設定することで同時通信を実現しているために、DATA フレーム転送中の中継端末に RTS フレームを連続して送信してしまい、バックオフ時間の増加などを引き起こしたためである。CS-CDMA と CS-CDMA/TC は、拡張 NAV 機能によって中継端末への無駄な通信が抑制され 2 ホップ時には、問題の発生しない IEEE 802.11 DCF と同程度までスループットが改善している。ホップ数が 3 以上の場合は、CS-CDMA と CS-CDMA/TC は他の方式に比べてスループットの向上を確認できる。

3.4.3 大規模ネットワークにおける応用評価

大規模なネットワークを想定した場合の各方式の通信性能を評価する。

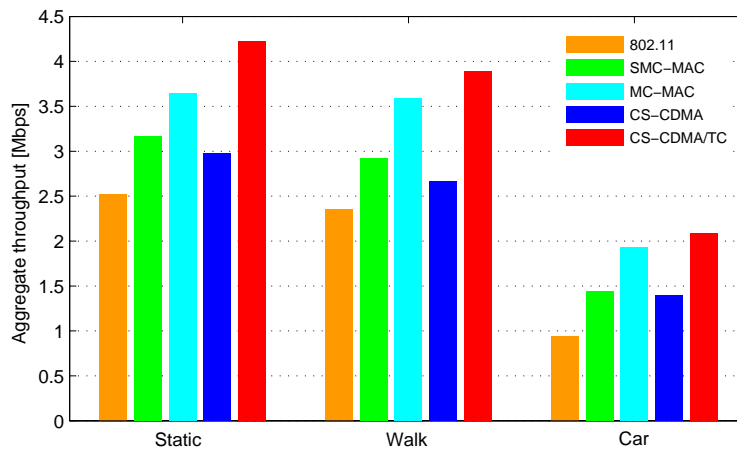


図 3.17 各モビリティにおける合計スループット特性

シングルホップ環境下における評価

1500 × 1500[m²] のエリアに 100 端末をランダムに配置する。シミュレーション開始時に送信端末をランダムに 30 端末決め、あて先端末は送信端末のデータ発生時に、送信端末の近隣 1 ホップ内の端末からランダムに選択する。各々の送信端末の packets 発生率を変化させたときの合計スループット特性と MAC 層における packets 損失率を評価する。

図 3.15 に各方式の合計スループット特性を、図 3.16 に MAC 層における packets 損失率を示す。図 3.15, 図 3.16 より、提案方式は遠近問題による衝突を回避する送信抑制制御と制御コードとデータコードの両方を考慮してバックオフを行うマルチチャネルバックオフの効果によって、全ての packets 発生率においてスループット特性および packets 損失率の改善が見られる。スループット特性は IEEE 802.11 DCF と比較すると最大 72% の向上, SMC-MAC とは最大 16% の向上, MC-MAC とは最大 5% の向上, CS-CDMA とは最大 52% の向上が見られた。packets 損失率は IEEE 802.11 DCF と比較すると最大 99% の向上, SMC-MAC とは最大 96% の向上, MC-MAC とは最大 94% の向上, CS-CDMA とは最大 97% の向上が見られた。

マルチホップ環境下における評価

シングルホップ環境と同様に、 $1500 \times 1500[m^2]$ のエリアに 100 端末をランダムに配置する。シミュレーション開始時に送信端末とあて先端末のペアをランダムに決め、セッションを形成する。パケット発生率は $30[\text{packets/sec}]$ とし、同時通信セッション数を 15 とする。端末の移動速度は位置固定・徒歩・車を想定する。徒歩、車での移動については移動速度をそれぞれ $0-1.2[m/s]$ 、 $0-16.7[m/s]$ とし、Random Waypoint モデルを用いる。Random Waypoint モデルは端末がランダムな目的地を選び、指定速度内のランダムな速度で等速度運動し、目的地に到着するとランダム時間静止し、再び新しい目的地を選び手順を繰り返す。ただし、今回のシミュレーションでは静止時間を 0 とする。ルーティングには AODV [47] を用いる。

図 3.17 に各方式の合計スループット特性を示す。提案方式は全てのモビリティタイプにおいてスループット特性の向上が見られる。IEEE 802.11 DCF と比較すると最大 121% の向上、SMC-MAC とは最大 45% の向上、MC-MAC とは最大 16% の向上、CS-CDMA とは最大 50% の向上が見られた。提案方式の CS-CDMA/TC は、各問題の解決だけでなく、コードセンスにより最新のチャネル情報を保持することができるため、移動の伴う環境においても他の方式に比べ高いスループットを維持できる。

3.5 まとめ

本章では、コードセンス機能を有し、マルチチャネル隠れ端末問題、短縮 NAV 問題、遠近問題へ対処する CS-CDMA/TC を提案した。それぞれの問題が発生するトポロジを用いて提案法の有効性を計算機シミュレーションで評価した。シミュレーション結果から、マルチチャネル隠れ端末問題・短縮 NAV 問題の発生するトポロジにおいて提案方式の拡散符号管理テーブルと拡張 NAV の機能により各問題の発生を抑制し、スループット特性が改善することを示した。また提案方式は、遠近問題の発生する大規模ネットワーク環境において、送信抑制制御により衝突を回避し、コードセンス機能と拡張 NAV 機能のみの CS-CDMA 方式よりも高いスループットが得られた。移動を伴う環境においても、IEEE 802.11 DCF に比べて最大 121%、SMC-MAC に比べて最大 45%、MC-MAC に比べて最大 16%、CS-CDMA に比べて最大 50% スループットが向上した。今後の課題として、各

メディアアクセス制御法を実機実装し、フィールド実験による性能評価が挙げられる。

第4章

指向性傍受SDMA型メディア アクセス制御法

アドホックネットワークのメディアアクセス制御法には IEEE 802.11 DCF に代表される全方位アンテナを用いたメディアアクセス制御法が広く用いられている。近年，さらなるスループット向上のために可変指向性アンテナを用いた SDMA 型メディアアクセス制御法が検討されている。しかし，SDMA 型メディアアクセス制御法では指向性隠れ端末問題や Deafness 問題といった新たな問題が発生してしまう。本章では，問題に対処する指向性傍受 SDMA 型メディアアクセス制御法を提案し，シミュレーションによってその有効性を示す。

4.1 まえがき

アドホックネットワークを用いたサービスを実現する上で，通信のアクセス制御を行うメディアアクセス制御法が不可欠となっている。また，アドホックネットワークにおいて限りある周波数資源で多くのサービスを提供するためにもネットワークの空間分割がメディアアクセス制御法と同様に必要とされている。そこで，近年ではアドホックネットワークにおいて可変指向性アンテナを利用することが注目されている [48–52]。可変指向性アンテナは，所望する方向へアンテナの指向性を電子制御することができ，空間利用効率の向上および通信距離の拡張が期待できる。一方で，従来の IEEE 802.11 DCF [12] に代表されるメディアアクセス制御方式は，全方位性アンテナの使用が想定されている。そのため，従来のメディアアクセス制御法に可変指向性アンテナを適用するだけでは，可変指向

性アンテナの利点を活かすことができない。また、可変指向性アンテナを利用したために生じる SDMA 型メディアアクセス制御法特有の問題も明らかになっている。

本章では可変指向性アンテナに着目し、トーン信号や複数 RTS 送信を利用せず、単一送受信機・半二重通信の制約のもと指向性隠れ端末問題・Deafness 問題、を解決する指向性傍受 SDMA 型メディアアクセス制御法を提案する。本論文では、計算機シミュレーションによって提案法の有効性を示す。

4.2 SDMA 型メディアアクセス制御法

4.2.1 Directional MAC (DMAC)

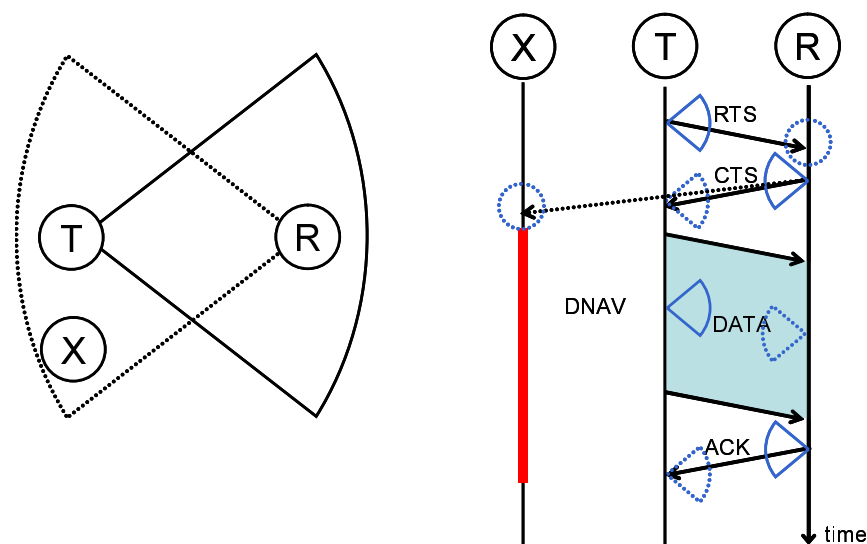


図 4.1 DMAC のタイムチャート例

DMAC [19] は可変指向性アンテナの空間分割能力を最大限に活かすために、図 4.1 のように RTS/CTS/DATA/ACK の全フレームを指向性ビームで送信する。ただし、各端末は待機状態では全方位性ビームを用いて待機している。パケットの発生した端末 T は、端末 R に指向性ビームを向けて RTS を送信する。RTS を受信した端末 R は、端末 T に向けて CTS を送信する。RTS/CTS 交換が成功した端末 T と R は指向性ビームを向け合い、DATA と ACK をそれぞれ送信する。また、RTS/CTS を受信した周辺端末（端末 X）は、受信した方向に対して Directional NAV (DNAV) を設定する。DNAV を設定した端末は、設定した方向への送信を

抑制する。また、このときに DNAV によって抑制されていない方向へのパケット送信を許可することにより、空間利用効率を全方位性メディアアクセス制御法と比べて向上させている。

4.2.2 Circular Directional RTS MAC (CDR-MAC)

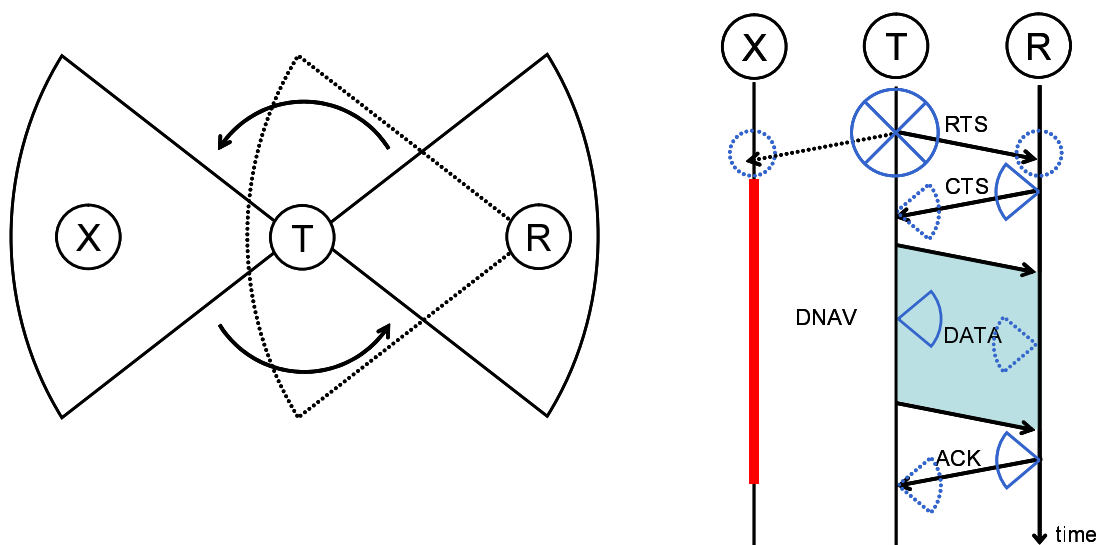


図 4.2 CDR-MAC のタイムチャート例

CDR-MAC [32] は、指向性隠れ端末問題と Deafness 問題の両問題の解決を目的としたメディアアクセス制御法である。CDR-MAC は、通常の待機状態は全方位性ビームで待機し、RTS/CTS/DATA/ACK パケットは指向性ビームで送信する。ただし、RTS に関しては全方位に周回させ、各方向に送信する。この動作により仮想的に全方位性ビームで RTS を送信したことになり、近隣端末に DNAV を設定することができる。

CDR-MAC の動作例を図 4.2 に示す。図 4.2 は、送信端末 T はあて先端末 R に対して通信する状況を表している。パケットの発生した端末 T は、端末 R に指向性ビームを向けて RTS を送信する。その後、端末 T は RTS を周回させながら各方向に送信することで、近隣端末 X に端末 T と R の通信を事前に通知する。RTS を受信した端末 X は、受信方向に対して DNAV を設定する。これにより、近隣端末 X は端末 T と R の通信が終了するまで確実に待機できる。

4.3 指向性傍受 SDMA 型メディアアクセス制御法

指向性隠れ端末問題と Deafness 問題に対処する指向性傍受 SDMA 型メディアアクセス制御法 (DM-MAC : Directional Monitoring MAC) について説明する。指向性傍受 SDMA 型メディアアクセス制御法は、指向性ビームと全方位性ビームの両方のビームを用いる。ここで、指向性ビームと全方位性ビームには利得差があるものとする。また、経路選択は可変指向性アンテナを用いて行われるものとする。指向性傍受 SDMA 型メディアアクセス制御法には、問題に対処する2つの機構が用意されている。第1の方式である指向性傍受方式は、指向性傍受モードによって通信相手の通信状況を事前に把握することで指向性隠れ端末問題に対処する。第2の方式である切換型バックオフ方式は、Deafness 問題の発生時に、バックオフ方式を通常の2進数バックオフ方式から固定のバックオフ方式に切り換えることで Deafness 問題に対処する。

4.3.1 指向性傍受方式

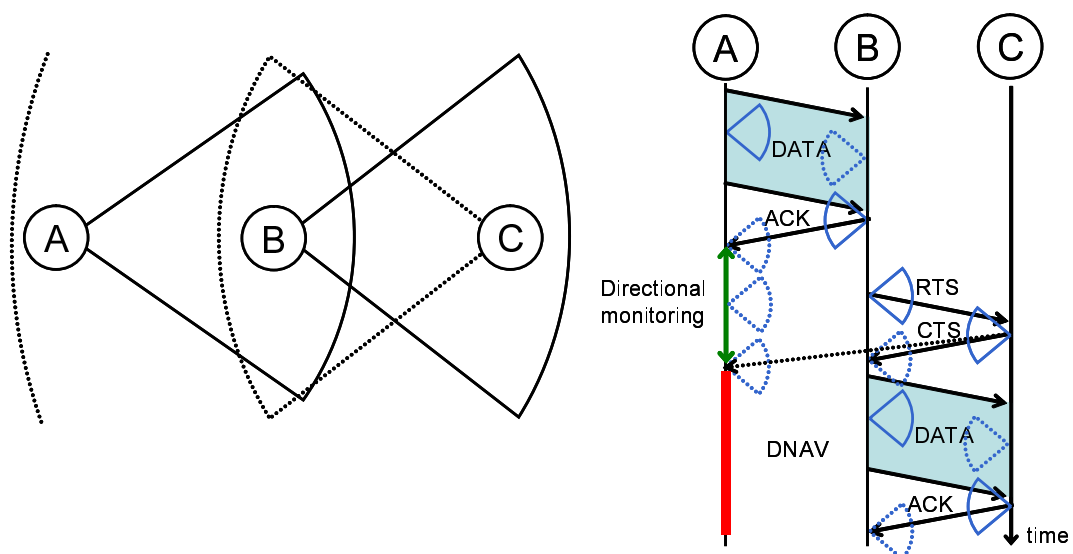


図 4.3 指向性傍受方式

従来の DMAC では ACK 受信後、全方位性ビームで待機 (全方位性待機モード) していた。指向性傍受方式は、あて先方向に対して指向性ビームを向けて待機 (指向性傍受モード) し、あて先方向の通信状況を傍受する。またこのとき、指向性傍受モード中の端末は、マルチホップ通信の packets 伝送の特徴を利用し

て傍受先の端末が CTS を受信すると予想される時刻（傍受終了時刻）まではパケットを送信せず、指向性傍受モードで待機する。傍受のあて先端末と通信方向が同じ直線ルートでは、2ホップ先の端末からの CTS を受信することができ、指向性隠れ端末問題に対処することができる。

提案方式では、傍受先の端末が他端末との衝突などにより RTS 送信が失敗する場合を想定し、傍受先端末の RTS 送信成功率の期待値を統計的に算出し、期待値に応じて傍受端末が傍受時間を変更する方式を取り入れている。つまり、傍受時間の予測は、RTS 送信成功率の期待値と RTS/CTS/DATA/ACK の伝送時間を用いて計算・予測することになる。ただし、本論文で扱うシミュレーションにて想定している環境は、各端末が同一ホップ先に連続してデータパケット送信し、傍受先の端末は RTS 送信失敗しない環境である。そのため、シミュレーションでは、RTS 送信の成功率の期待値に応じて傍受時間を変更せずに傍受時間を予測している。

提案方式では、傍受モードによる不必要なオーバーヘッドを防ぐために2つの設定を用意している。第1の設定は傍受終了時刻に達しても CTS パケットを受信しなかった場合、傍受終了時刻後に通常の全方位性ビームの待機状態に移行することである。第2の設定は経路情報により傍受先の端末がマルチホップの最終あて先端末であった場合、ACK 受信後の傍受をせずに通常の全方位性ビームの待機状態となることである。

図 4.3 に指向性傍受方式のメカニズムについて示す。図 4.3 は、端末 B を中継端末として端末 A から端末 C にマルチホップ通信する状況を表している。端末 A と端末 B は DMAC と同様の手続きで RTS/CTS 交換を行い、DATA と ACK を送受信する。端末 A は端末 B からの ACK を受信後、これまでの通信に使用していた指向性ビームで待機を始める。端末 B はパケットを伝送するために、端末 C に対して指向性ビームを向けて RTS を送信する。RTS を受信した端末 C は指向性ビームを端末 B に向けて CTS を送信する。端末 C が送信した CTS は端末 B だけでなく、指向性ビームで待機している端末 A に対しても届く。これにより端末 A は端末 B-C 間の通信期間を把握し、DNAV を設定することができる。結果として、端末 B-C 間の通信が保護される。指向性傍受方式は、直線ルートにおいて指向性隠れ端末問題に対処し、可変指向性アンテナの通信距離拡張性能を最大限に活用することができる。

4.3.2 切換型バックオフ方式

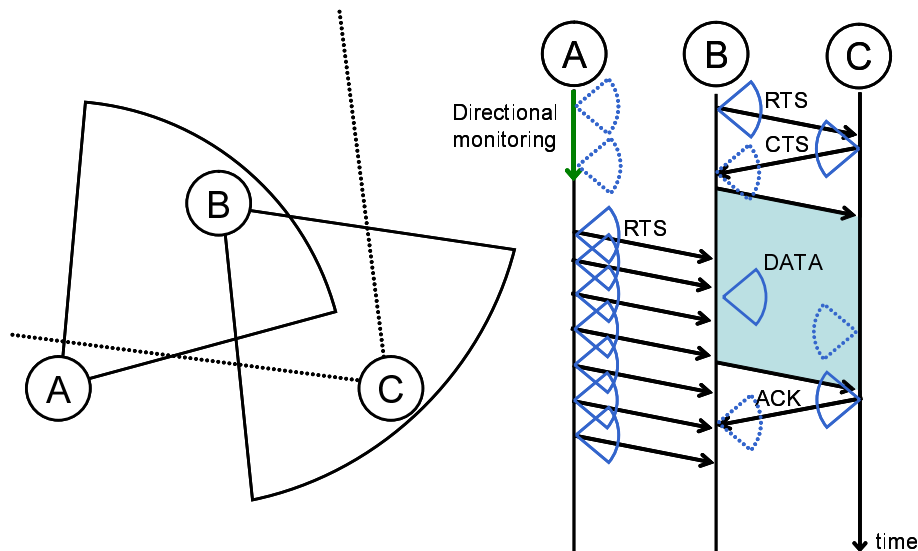


図 4.4 切換型バックオフ方式

切換型バックオフ方式は、従来のメディアアクセス制御法に用いられている2進数バックオフ方式とバックオフ間隔が固定の方式を切り換えることにより、Deafness問題の軽減を図る。2進数バックオフは再送のたびにCWサイズを2倍とするため衝突の抑制には効果的である。一方、Deafness問題は衝突が発生していないため、CWサイズの拡大が遅延として影響する。切換型バックオフ方式では、Deafness端末は指向性傍受後のCTSタイムアウトの検出を切換タイミングとしてCWサイズを最小値にする。切換後は、CWサイズを最小値で固定することでRTS再送によるバックオフ間隔を短くする。これにより、Deafness端末が通信可能な状態になった際、遅延なく通信を開始することができる。

切換型バックオフ方式の手順を図4.4のDeafness問題が発生する状況を用いて説明する。図4.4は、端末Bを中継端末として端末Aから端末Cにマルチホップ通信する状況を表している。端末Aと端末BはDMACと同様の手続きでRTS/CTS交換を行い、DATAとACKを送受信する。端末Aは端末BからのACKを受信後、これまでの通信に使用していた指向性ビームで待機を始める。端末Bはパケットを伝送するために、端末Cに対して指向性ビームを向けてRTSを送信する。RTSを受信した端末CはCTSを指向性ビームを端末Bに向けてCTSを送信する。端末Cが送信したCTSは端末Bにのみ届く。これは、端末Aが端末Cの指向性ビームの方向に位置しないためである。端末Aは指向性傍受の期間が終

了し、端末 B への送信要求が発生すると RTS を送信する。しかし、端末 B はすでに通信中であるため、CTS が返信されない。端末 A は、このときの RTS 失敗を機会にバックオフを固定方式に切り換える。端末 A は、RTS の再送を繰り返すが、バックオフ間隔が短いため少ない遅延で次通信を開始できる。

無線通信では、RTS 送信の失敗原因が Deafness 問題によるものではなく、他端末とのパケット衝突による場合も考えられる。しかし、パケット衝突の多くの場合は、指向性隠れ端末問題が原因だと考えられる。提案方式では、指向性隠れ端末問題は指向性傍受方式によって対処している。そのため、CW サイズが最小値固定による衝突誘発の可能性は低いと考えられる。

4.3.3 再送上限しきい値の検討

切換型バックオフ方式では、端末が Deafness 状態である間、バックオフ間隔は固定であるため、通常の 2 進数バックオフ方式と比べて短い時間で上限の再送回数に達する可能性が高い。そこで、Deafness 状態である間のパケット破棄を防ぐために、再送上限のしきい値を増加させる必要がある。しかし、過大な再送上限しきい値を設定すると、あて先端末が通信不能でルートの再構築が必要な状態でも再送を続け、大きな遅延を発生させてしまう。このため、適切な再送上限しきい値を設定する必要がある。

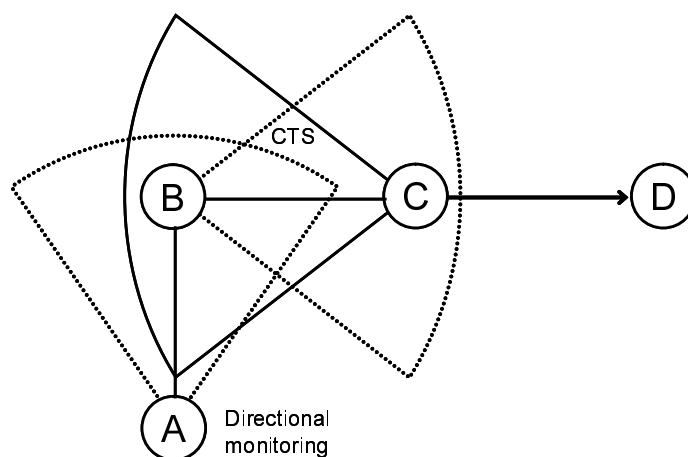


図 4.5 再送上限しきい値を検討する際のトポロジー

再送上限しきい値の設定方法を図 4.5、図 4.6 を用いて説明する。図 4.5 は、端末 A が B に対して指向性傍受を行うが、CTS を受信できない状態を表している。

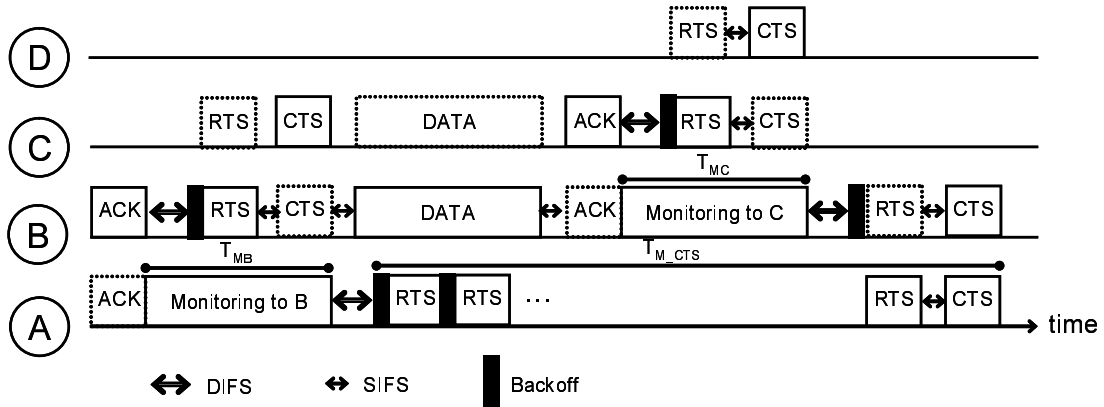


図 4.6 DM-MAC の制御フロー

端末 A は指向性傍受後，端末 B が端末 C からの ACK を受信するまで Deafness 状態となるため，図 4.6 のように短いバックオフ間隔で RTS 送信を繰り返す．提案する方式では，端末 A が Deafness 状態である間は，パケットを破棄せずに再送を続ける必要がある．本方式は，端末 A の指向性傍受終了後から端末 A の CTS 受信終了までの間で，端末 A が送信可能な RTS 回数を再送上限しきい値として設定する．具体的には以下の式 4.1 を用いて再送上限しきい値（RLT : Retry Limit Threshold）を求める．

$$RLT = \frac{T_{M_CTS}}{T_{Backoff} + T_{RTS}} \quad (4.1)$$

$$T_{M_CTS} = 2T_{RTS} + 2T_{CTS} + T_{DATA} + T_{ACK} + T_{Backoff} + 4SIFS + T_{ex} \quad (4.2)$$

$$T_{MC} = T_{RTS} + T_{CTS} + DIFS + SIFS + T_{Backoff} + T_{ex} \quad (4.3)$$

ただし， T_{M_CTS} は端末 A から端末 B への指向性傍受終了後から端末 A の CTS 受信終了までの時間， T_{ex} は端末 A が算出した端末 B から端末 C への RTS 送信成功率の期待値， T_{MB} は端末 A から端末 B への傍受時間， T_{MC} は端末 B から端末 C への指向性傍受時間， $T_{backoff}$ は平均バックオフ時間， T_{RTS} は RTS の伝送時間， T_{CTS} は CTS の伝送時間， T_{DATA} はデータの伝送時間， T_{ACK} は ACK の伝送時間を表すものとする．平均バックオフ時間 $T_{Backoff}$ は，CW サイズの最小値である CW_{min} を用いて式 4.4 のように表す．また， T_{M_CTS} は，式 4.2 から分かるように傍受先の RTS 送信成功率の期待値に応じて再送上限しきい値を変更す

る方式を取り入れている。ただし、本論文のシミュレーションの想定環境は、傍受先の RTS 送信失敗がない環境であるためシミュレーションにおいて期待値 T_{ex} は考慮しない。

$$T_{Backoff} = \frac{CW_{min}}{2} * SlotTime \quad (4.4)$$

再送上限しきい値は、データの Paket サイズと伝送レートの関係によって変化する。このため、伝送する Paket サイズと伝送レートに応じて適切な再送上限しきい値を求める必要がある。

4.4 特性評価

4.4.1 オーバヘッド

提案法である DM-MAC と比較対象である CDR-MAC のオーバヘッドについて検討する。オーバヘッドとは、全方位性メディアアクセス制御法で行われるハンドシェイク (RTS/CTS/DATA/ACK) 以外の余分な手順のことである。提案法のオーバヘッドは、式 4.5 のように与えられる。CDR-MAC のオーバヘッドは、周回送信する RTS 送信時間がオーバヘッドになる。CDR-MAC のオーバヘッドは式 4.6 のようになる。ただし、CDR-MAC では RTS の周回送信を 5 回行うものとする。

$$DM_{overhead} = T_{RTS} + T_{CTS} + DIFS + SIFS + T_{Backoff} \quad (4.5)$$

$$CDR_{overhead} = 5T_{RTS} \quad (4.6)$$

ここで、制御 Paket である RTS Paket および CTS Paket は最低レート 1Mbps で送信されるものとする。式 4.5 と式 4.6 より $DM_{overhead} = 1026\mu$ 秒、 $CDR_{overhead} = 1760\mu$ 秒となり、 $DM_{overhead}$ は $CDR_{overhead}$ と比べて約 5 分の 3 となることが分かる。これより、提案法は、比較対象である CDR-MAC と比べて低オーバヘッドであることが分かる。

表 4.1 シミュレーション諸元

Packet arrival rate	Poisson process
Data packet size	1024bytes
Radio propagation model	Free space propagation loss
Bandwidth	2Mbps
Cs threshold (Cs range)	-69dBm
Rx threshold (Rx range)	-63dBm
Directional beam width	60deg
Communication range	50m(D_{oo}), 100m(D_{od}), 200(D_{dd})

4.4.2 計算機シミュレーション

計算機シミュレーションによって提案法である DM-MAC の性能を評価する。シミュレータは C 言語による自作シミュレータを用いる。比較対象に従来方式である DMAC, 複数 RTS 送信をする CDR-MAC, 全方位性メディアアクセス制御法である dot11 を用いる。提案法は, Deafness 発生時の CW サイズを IEEE 802.11 b の最小値である 31 とした。また, 切り換え後の再送上限しきい値は, 式 4.1 を用いて求め, 15 とした。その他のシミュレーション諸元は表 4.1 に示す。ただし, D_{oo} は送受信アンテナに全方位性アンテナを用いた場合の通信距離, D_{od} は送受信アンテナに可変指向性アンテナおよび全方位性アンテナのどちらか一方ずつ用いた場合の通信距離, D_{dd} は送受信アンテナに可変指向性アンテナを用いた場合の通信距離を表す。なお, 位置情報取得に要するオーバーヘッドは考慮せず, 位置情報は既知とする。

シミュレーションモデル

シミュレーション 1 では, 指向性隠れ端末問題が発生する環境下での性能評価を行う。評価トポロジは, 図 4.7 (a) に示す 2 ホップの直線トポロジを用いる。評価指標には, シミュレーション時間 60 秒での衝突確率とスループット特性を用いる。なお, 衝突確率の定義は, 全送信パケット数に対する衝突回数の割合, スループット特性の定義は単位時間内であて先端末が受信するデータパケット数とする。

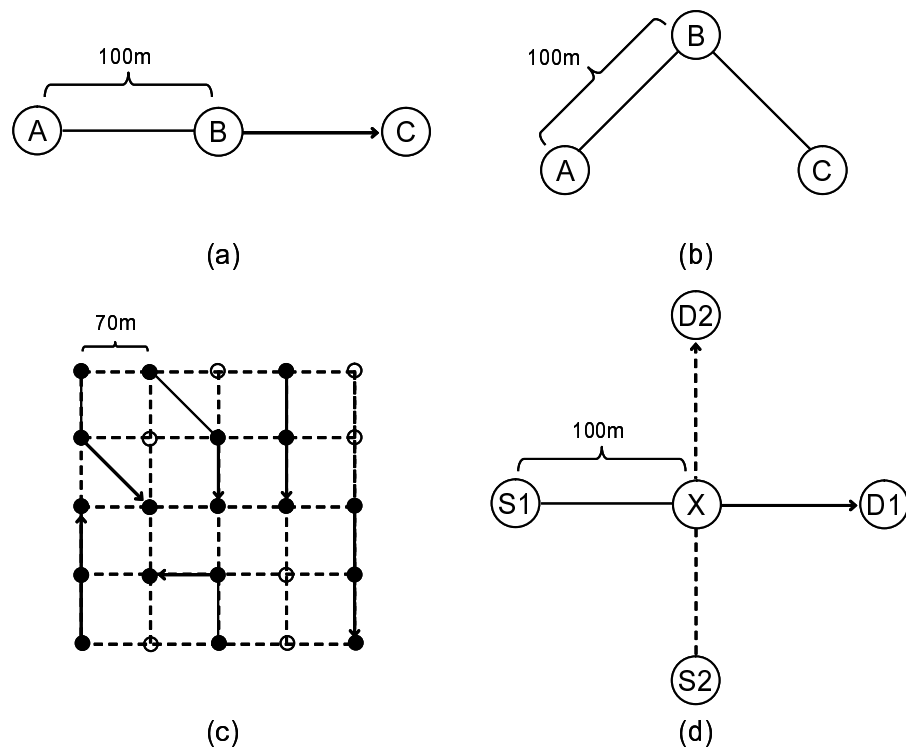


図 4.7 シミュレーショントポロジー

シミュレーション2では、Deafness問題が発生する環境下での性能評価を行う。評価トポロジは、図4.7 (b)に示す非直線トポロジを用いる。評価指標には、シミュレーション時間60秒でのDeafness率とスループット特性を用いる。また、シミュレーション1と2では、dot11を基準値に用いる。これは、図4.7 (a), 4.7 (b)は、空間分割できないトポロジであり、dot11は指向性隠れ端末問題とDeafness問題が発生しないためである。ただし、dot11の通信距離は、送信電力を上げることによってSDMA型メディアアクセス制御法と同じ D_{od} の通信距離でシミュレーションするものとする。なお、Deafness率の定義は、シミュレーション時間に対するDeafness loss timeの割合とする。

シミュレーション3では、両問題が発生する環境下での評価を行う。図4.7 (c)に示すように280m × 280mの領域に25端末を格子状に配置し、その中から2ホップのマルチホップ通信のフローを6個ランダムに構築する。ただし、両問題の評価を行うため、3フローは直線ルートを構築し、残り3フローは非直線ルートを構築するように設定する。また、dot11は通信距離 $D_{oo} = 50\text{m}$ であるため、他方式と評価するためには送信電力を上げる必要がある。しかし、ランダムなシミュレーションにおいてdot11のみ送信電力を上げることは、空間分割に影響して公

平な評価ができないと考えられる。このため、dot11は比較対象とはせず、DMACとCDR-MACを比較対象として用いる。シミュレーション時間は30秒、試行回数は10とし、1フローあたりの衝突確率、Deafness率、平均スループット特性を評価指標として用いる。

シミュレーション4では、ランダムトポロジでの評価を行う。900m×900mの領域に50端末をランダム配置し、その中から5つの通信フローをランダムに選択する。経路選択には、最短ホップ経路を算出するダイクストラアルゴリズムを用いる。シミュレーション時間は30秒、試行回数は10とし、1フローあたりの衝突確率、Deafness率、平均スループット特性を評価指標として用い、比較対象にはDMACとCDR-MACを用いる。また、シミュレーション3およびシミュレーション4では、各端末は他フローと中継が重複しないように経路選択する。これは、中継が重複する端末が存在すると、その端末がボトルネックとなって空間分割が有効に機能しづらくなると考えられるためである。

シミュレーション5では、クロストラフィック環境での提案方式の性能評価を行う。評価トポロジは、図4.7(d)の中継が重複する直線2セッションのクロストポロジを用いる。評価指標には、パケット発生率100packets/secにおけるシミュレーション時間10秒～40秒のスループットの時系列データを用いる。その他のシミュレーション諸元は表4.1に示すとおりである。

直線トポロジの結果

シミュレーション1の結果を図4.8, 4.9に示す。図4.8の結果より、提案法は、DMACで発生している指向性隠れ端末問題を、CDR-MAC同様に回避していることが分かる。また、図4.9の結果より、スループット特性もDMACと比べて約2.5倍に向上し、基準値であるdot11と同等のスループット特性を示していることが分かる。DMACは指向性隠れ端末問題が発生するため、端末Cにおいて端末AのRTSパケットと端末BのDATAパケットが衝突する。このため、DMACは衝突によるスループット特性の低下が生じる。提案法は、端末Aが指向性傍受によって端末B-C間の通信状況を把握し、指向性隠れ端末問題を回避できるため、DMACと比較してスループット特性が向上したと考えられる。また、提案法は、指向性隠れ端末問題に対処しているCDR-MACと比べて約1.25倍スループット特性が向上している。これは、CDR-MACは事前通知に用いる複数回のRTS送信が大きなオーバーヘッドとなり、スループット特性の低下が生じるためである。図4.9のスルー

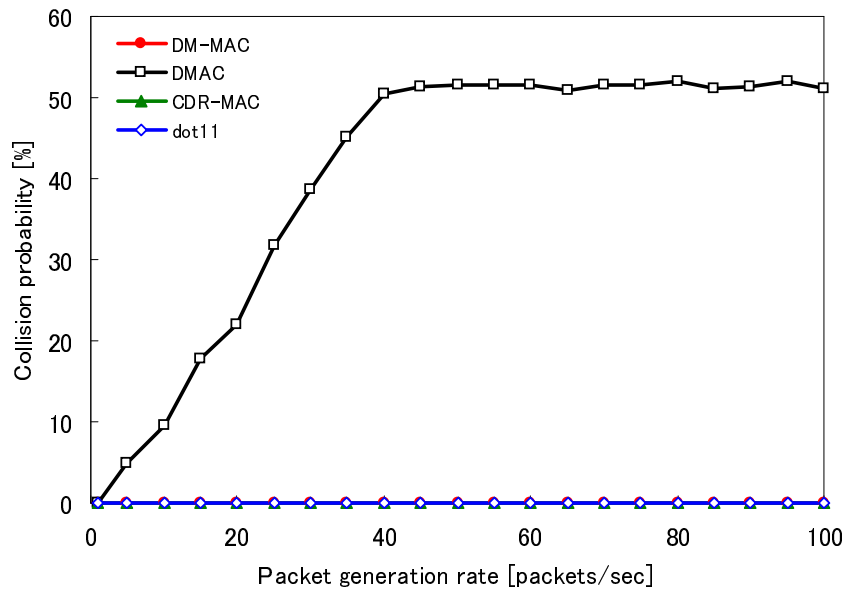


図 4.8 衝突確率 (直線トポロジ)

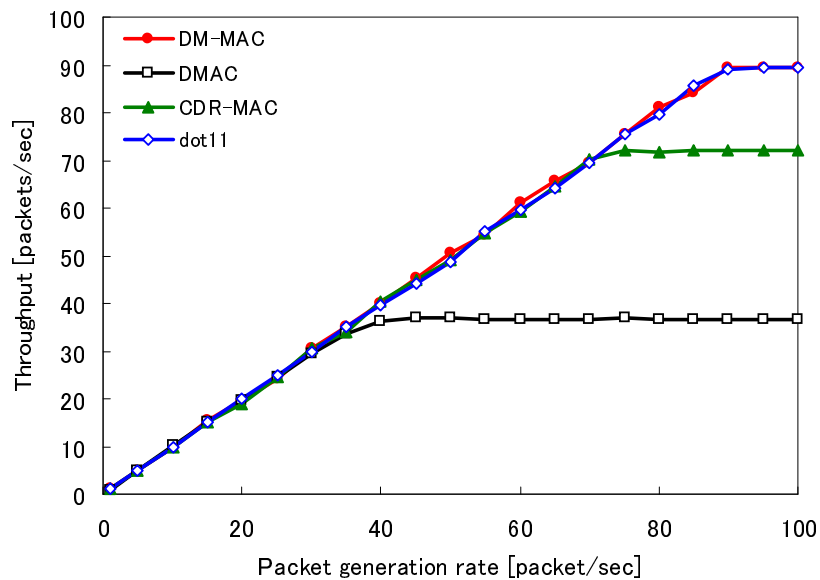


図 4.9 スループット特性 (直線トポロジ)

プット差は、オーバヘッドと dot11 の通信手順 RTS/CTS/DATA/ACK (計 5336μ 秒) を含めた差である。ただし、提案法は図 4.7 (a) のトポロジにおいては、オーバヘッドになる傍受時間が有効に機能するためスループットに影響しない、そのため、パケットの全伝送時間は dot11 と同じである。以上のことからオーバヘッドを含めたパケットの全伝送時間を計算すると、DM-MAC は 5336μ 秒、CDR-MAC は dot11 の 5336μ 秒を含めた 7096μ 秒となり、DM-MAC は CDR-MAC と比べて約 1.25 倍となる。これより、図 4.9 の結果と一致することが分かる。

非直線トポロジの結果

シミュレーション 2 の結果を図 4.10, 4.11 に示す。図 4.10 の結果より、提案法は DMAC と比べて Deafness Loss Time が約 90% 減少している。また、図 4.11 の結果より、DMAC と比べてスループット特性も約 1.2 倍に向上し、基準値である dot11 と同等のスループット特性を示していることが分かる。DMAC は端末 B-C 間が通信中に端末 A が RTS を送信することで Deafness 問題が発生する。このため、DMAC は Deafness Loss Time によるスループット特性の低下が生じる。提案法は、端末 A が傍受後の RTS 失敗を切り換えタイミングとしてバックオフ方式を固定方式に切り換えることにより、Deafness Loss Time を軽減できる。これにより、DMAC と比較してスループット特性が向上したと考えられる。また、CDR-MAC は、提案法と同様に指向性隠れ端末問題を回避しているが、基準値である dot11 と比べてスループット特性が低下している。これは、RTS の周回送信によるオーバヘッドが原因と考えられる。

格子トポロジの結果

シミュレーション 3 の結果を図 4.12, 4.13, 4.14 に示す。図 4.12 の結果より、提案法は DMAC と比べてスループット特性は約 1.5 倍に向上している。これは、提案法は図 4.13, 4.14 の結果から分かるように指向性隠れ端末問題を回避し、Deafness 問題を DMAC と比べて約 85% 軽減できているためと考えられる。CDR-MAC は、DMAC と比べてスループット特性が低下している。これは、図 4.13 の結果より CDR-MAC は衝突が発生しているためと考えられる。ここでの衝突とは、周回送信する RTS と他フローの制御パケットとの間の衝突であると考えられる。

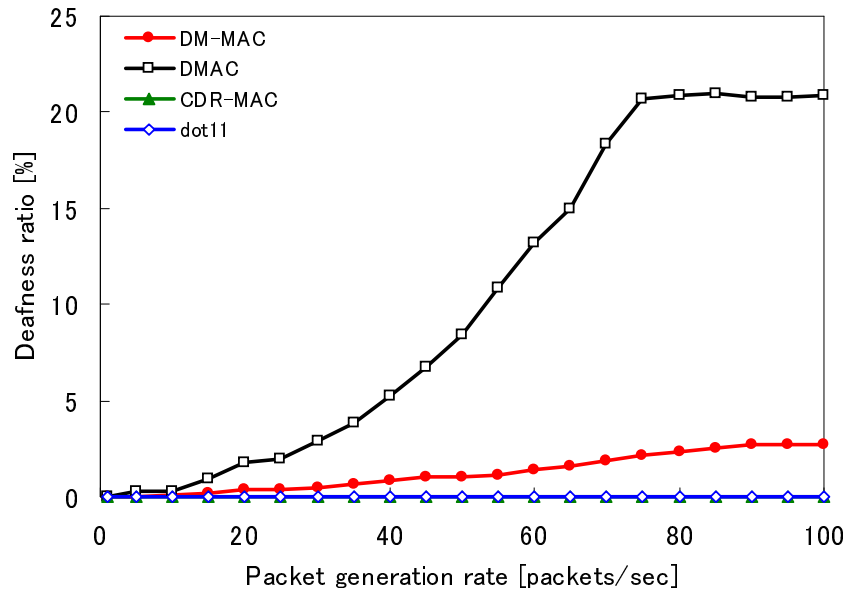


図 4.10 Deafness 率 (非直線トポロジ)

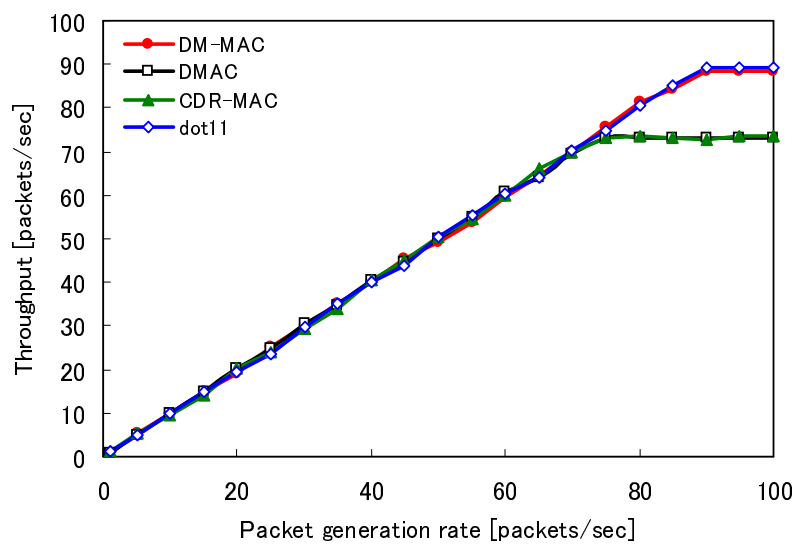


図 4.11 スループット特性 (非直線トポロジ)

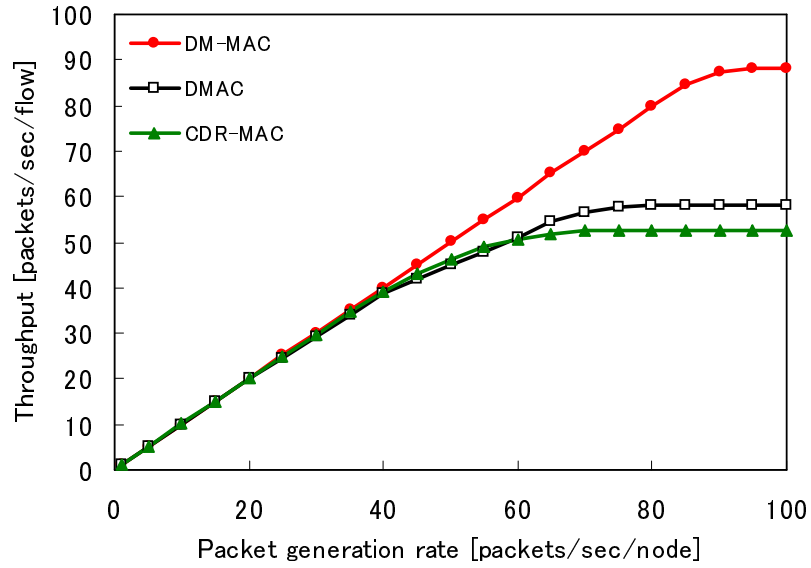


図 4.12 スループット特性 (格子トポロジ)

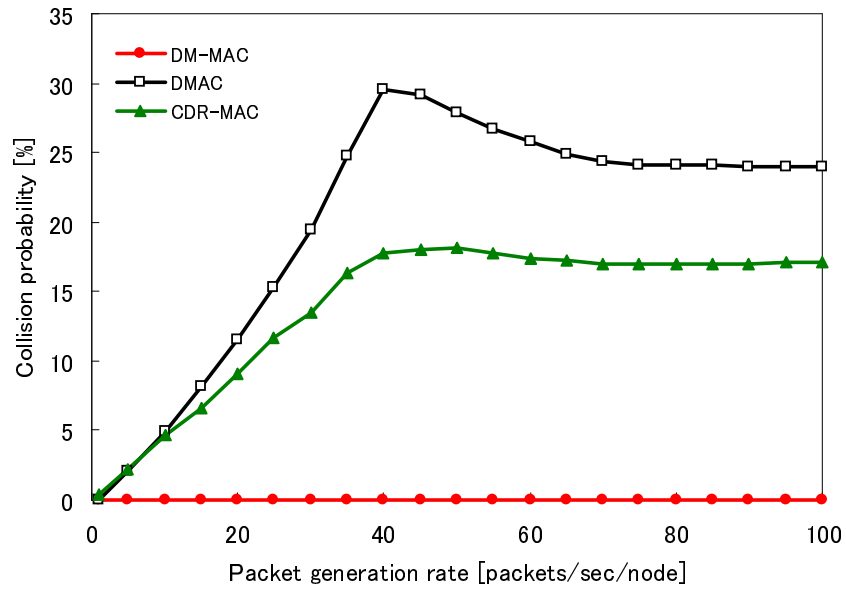


図 4.13 衝突確率 (格子トポロジ)

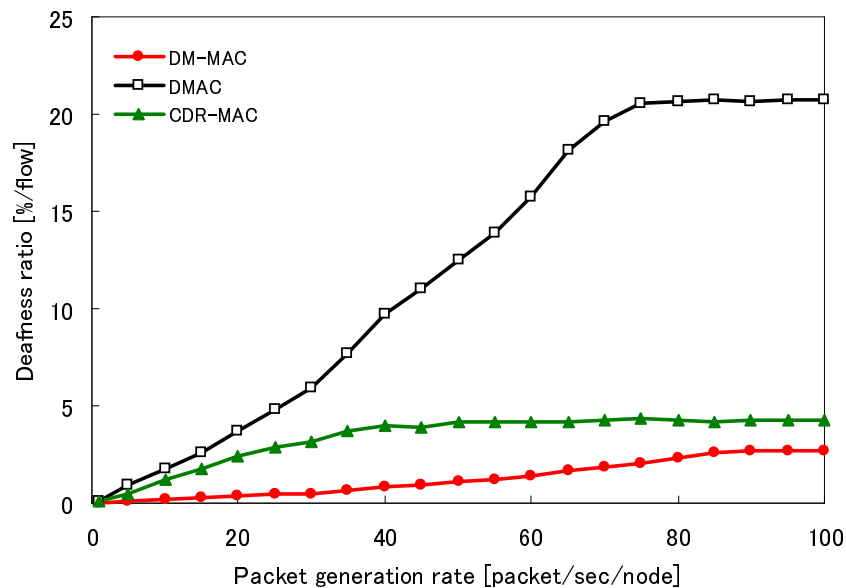


図 4.14 Deafness 率 (格子トポロジ)

ランダムトポロジの結果

シミュレーション4の結果を図4.15, 4.16, 4.17に示す. 図4.15の結果より, 提案法は他法と比べてスループット特性が一番高く, DMACと比べて約1.1倍に向上していることが分かる. これは, 図4.17の結果から分かるように Deafness 問題を DMACと比べて約78%軽減できているためと考えられる. また, 図4.16の結果より提案法はDMACと比べて衝突発生確率が増加している. これは, 提案方式は, 切換型バックオフ方式によるバックオフの固定により, RTSと他フローの PACKETとの衝突する確率が高くなるためと考えられる.

クロストポロジの結果

シミュレーション5の結果を図4.18に示す. 図4.18の結果より, セッション1とセッション2の間でスループットは時間ごとに差がある. これは, 提案法は, 切換型バックオフ方式の機能としてバックオフを決めるCW値を最小値固定に設定するためと考えられる. また, 34秒を過ぎるとセッション1が完全に通信できなくなる. これは, セッション2が通信中にセッション1がCW値が固定で通信

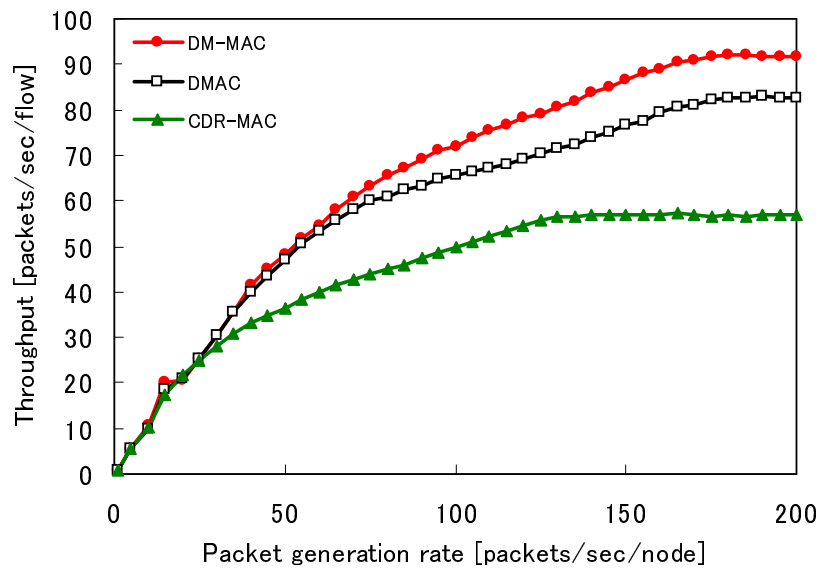


図 4.15 スループット特性 (ランダムトポロジ)

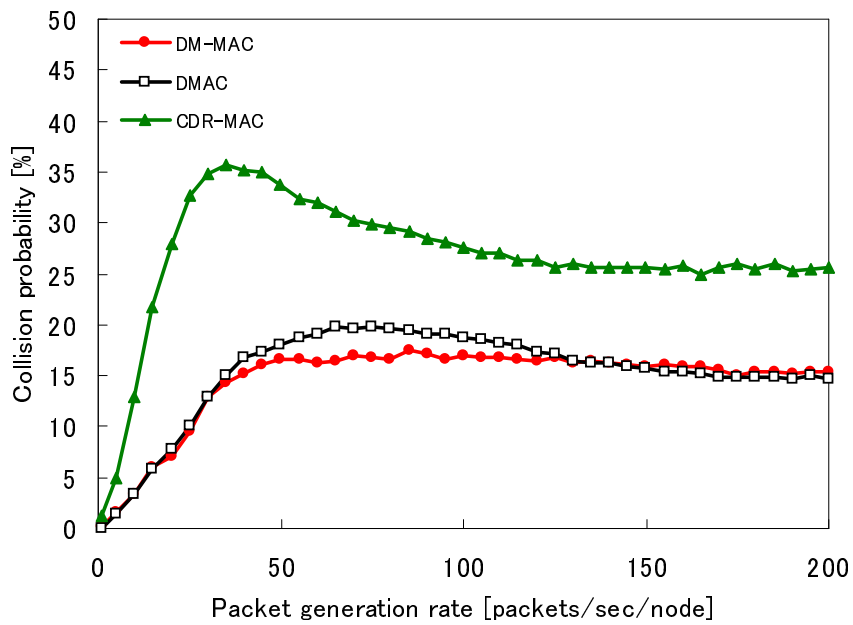


図 4.16 衝突確率 (ランダムトポロジ)

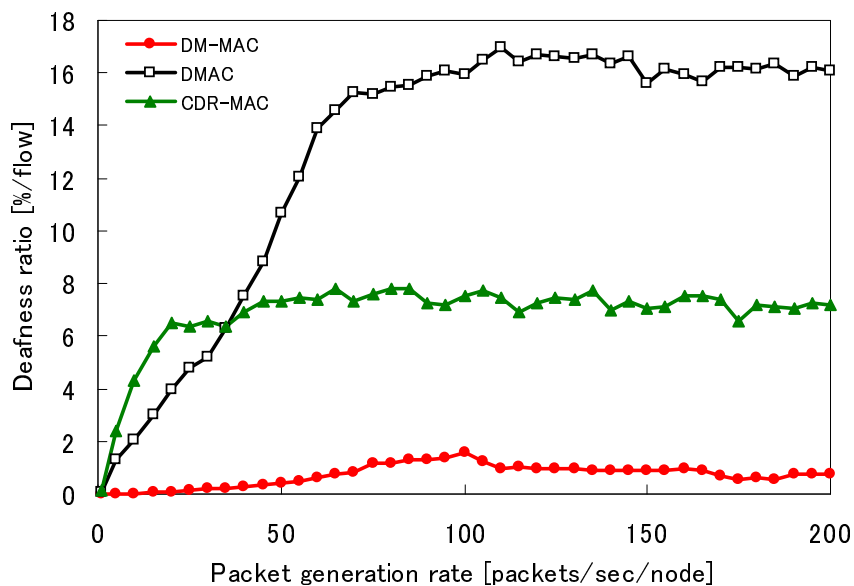


図 4.17 Deafness 率 (ランダムトポロジ)

を始めると、セッション1においてパケットドロップが頻繁に発生するためと考えられる。また、パケットドロップ後は、2進数バックオフ方式を設定するため、Deafness問題が発生してセッション1の通信を妨げていることも原因として考えられる。このように、中継が重複する環境においては、セッション間で通信の不公平性が発生してしまう。

不公平性への対処法としては、一つは経路選択によって中継端末が重複する端末を避ける方法が考えられる。しかし、経路選択で中継が重複しない環境を必ず作り出すのは難しい。そこで、中継が重複した場合の対処法として中継が重複するXがS1, S2からのパケットの到達量に応じてバックオフ方式を2進数バックオフ方式とCW値の固定方式を交互に切り換える適応選択型バックオフ方式が考えられる。具体的には、Xがセッション1, セッション2のパケット到達量を計算し、パケット到達量が最も少ないセッションに対しては固定方式を用い、その他のセッションは2進数バックオフ方式を用いるようにACKを通じてS1, S2に伝える。これより、セッション間で公平な通信ができると考えられる。この方式を用いた場合のシミュレーション結果を図4.19に示す。図4.19の結果より、図4.18と比べるとセッション間における通信の不公平性が改善され、セッション間

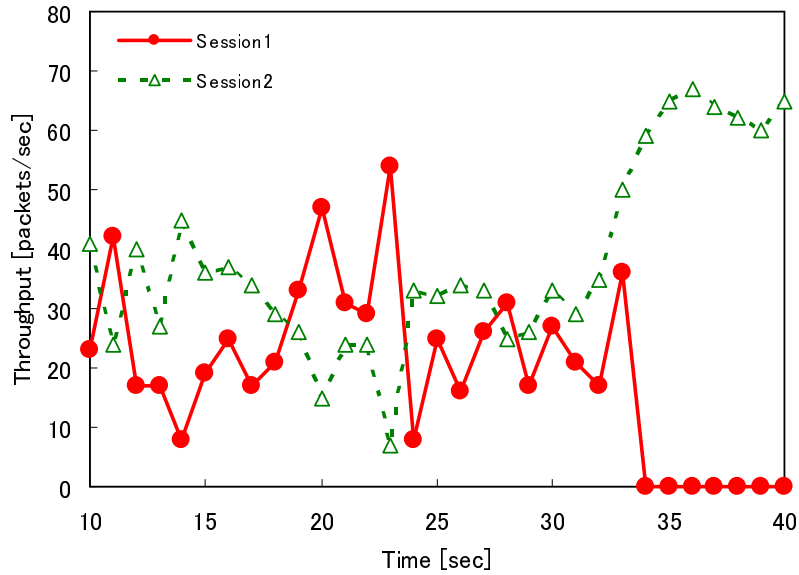


図 4.18 スループットの時系列データ

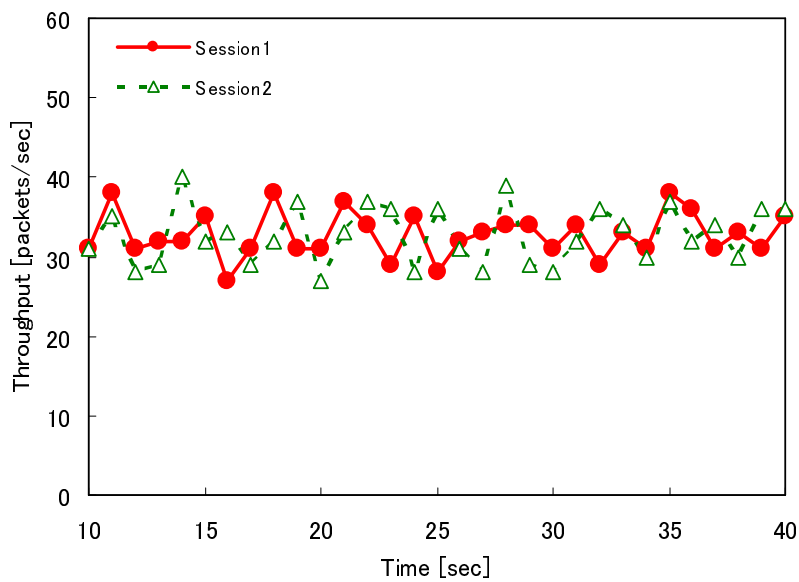


図 4.19 スループットの時系列データ (適応選択型)

で公平な通信ができていることが分かる。これより、中継が重複する環境では、バックオフ方式に適応選択型バックオフ方式を用いるのが有効といえる。

4.5 まとめ

本章では、指向性傍受機能を有し指向性隠れ端末問題と Deafness 問題へ対処する指向性傍受 SDMA 型メディアアクセス制御法を提案した。それぞれの問題が発生するトポロジーを用いて提案法の有効性を計算機シミュレーションで評価した。シミュレーション結果から、指向性隠れ端末問題・Deafness 問題の発生するトポロジーにおいて提案方式の指向性傍受と切換型バックオフの機能により各問題の発生を抑制し、スループット特性が改善することを示した。また、両問題の発生する格子トポロジーでは DMAC と比べて約 1.5 倍、ランダムトポロジーでは約 1.1 倍のスループット特性を得ることを示した。

第5章

メディアアクセス制御法の 評価システム

アドホックネットワークにおいて指向性通信を要する様々なメディアアクセス制御法が開発されており、様々な方式を評価するためのシステム構築が望まれている。これまでの評価システムは、ZigBeeを基に構築されており規定以上の動作変更は困難であった。本章ではZigBeeの制約なく物理層、MAC層の仕様を決定できるシステムを構築する。

5.1 まえがき

現在、メディアアクセス制御法に関する研究では、アンテナや電波伝搬モデルを理想的に仮定したシミュレーションによる性能評価が行われている。そのため、実環境での運用を考えると実際のアンテナの指向性や発振周波数の精度や搬送波対雑音比などの無線通信装置固有の問題、実空間における電波伝搬による影響も考慮して評価する必要がある。これらの問題に対処するために、実環境評価を行うテストベッドとしてMica mote [53]、UNAGI [54]などが開発され、これらを利用してメディアアクセス制御法を評価している。しかし、これらは主に既存のZigBee [55]無線モジュールを利用しているため、物理層、MAC層のプロトコルまたはクロスレイヤプロトコルを実装する際にはZigBeeで規定されている以上の機能実装、動作変更は困難となる。特にアドホックネットワークでは、端末の多様性を考慮する必要があるため、送信電力の範囲が広いものや様々な周波数帯を利用できるシステムが望ましい。送信電力の範囲が広がることで、最大送信

電力の異なるシステムが混在した環境を擬似的に構築できる。また、最大送信電力が高いほど送信電力制御を行うメディアアクセス制御法の通信効率や消費電力特性を明確に評価できる。さらには、様々な周波数帯を利用できることで、コグニティブ無線環境を構築し周波数帯の異なるシステムが混在した環境を構築できる。これらによって、無線 LAN や ZigBee のみにとらわれない自由なシステム環境でメディアアクセス制御法の性能を検討することが可能となる。

本章では、SDMA 型メディアアクセス制御法をアドホックネットワーク環境で性能評価するためのシステム構築について説明する。開発するシステムは、通信端末の多様性を考慮し設計する。可変指向性アンテナとして小型化・平面化が可能なエスパ (ESPAR: Electronically Steerable Parasitic Array Radiator) アンテナ [56] を用い、無線端末装置にソフトウェア無線のプラットフォームである GNU Radio [57] と USRP2 (Universal Software Radio Peripheral) [58] を用いることでより柔軟に送信電力や周波数帯の設定が可能となる。メディアアクセス制御法の機能の全ては、GNU Radio を用いてソフトウェアで実装する。評価システム上には、全方位性メディアアクセス制御法と SDMA 型メディアアクセス制御法を実装し、通信性能を評価する。

5.2 SDMA 型メディアアクセス制御法の評価システム

SDMA 型メディアアクセス制御法を評価するシステムの構築には、可変指向性アンテナと無線通信端末を用意する必要がある。可変指向性アンテナとしてエスパアンテナを用いる。エスパアンテナは、UNAGI にも採用されている可変指向性アンテナである。指向性ビームは素子間の電磁界結合を用いているためアンテナの小型化が可能である。よって小型端末にも実装可能であり、端末の多様性を考慮したシステム要求に適している。また、本システムでは様々な素子数、素子配置、素子形状のエスパアンテナの利用を可能とする必要がある。そこで、エスパアンテナの指向性ビームを、PC 上から USB のシリアル通信によって制御するための指向性制御回路を別途作製する。無線通信端末として、PC 上で動作するソフトウェアに GNU Radio を利用し、無線通信端末のフロントエンドである USRP2 を用いる。USRP2 はドータボードにより使用周波数帯を変更できる。本システムの使用周波数は、特別実験試験局の取得を考慮し 5.11GHz 帯とした。次より、システムの全体構成と各構成要素の詳細について述べる。

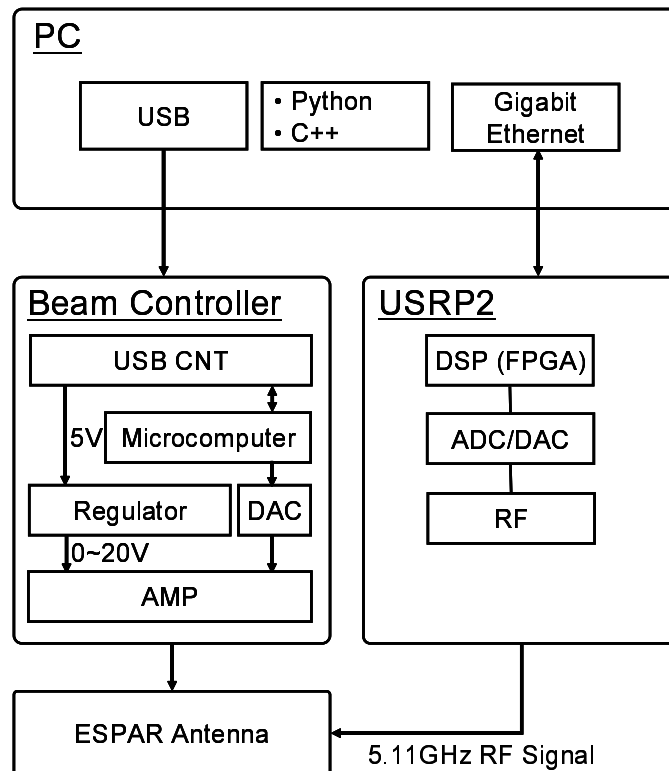


図 5.1 システムの構成

5.2.1 全体構成

システムの全体構成は GNU Radio が動作する PC を中心に、実際に無線通信の処理を行う USRP2、エスパアンテナとその指向性を制御する指向性制御回路で構成される。図 5.1 のように PC と USRP2 はギガビットイーサケーブルで接続する。USRP2 の RF 出力にはエスパアンテナが同軸ケーブルによって装着される。さらに、エスパアンテナは各無給電素子と接地面が指向性制御回路の出力ポートと繋がっており、指向性制御回路は USB によって PC と接続される。図 5.2 に作製したシステムの外観を示す。

5.2.2 エスパアンテナ

図 5.3 にエスパアンテナの構造を示す。エスパアンテナは、1 本の給電素子 (#0) と複数本の無給電素子 (#1~#6) で構成される可変指向性アンテナである。開発するシステムには、無給電素子の本数が 6 本の 7 素子エスパアンテナを用いる。

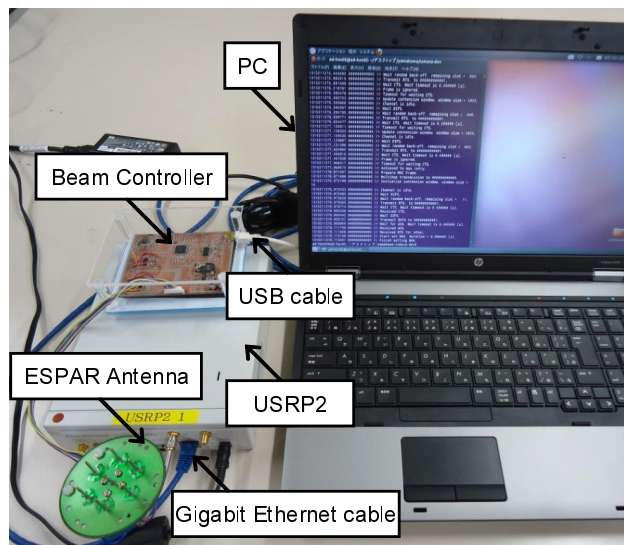


図 5.2 システムの外観図

無給電素子の電気長は，無給電素子に装荷されたバラクタ（可変容量ダイオード）のリアクタンス値を変化させることで調整できる．また，リアクタンス値はバラクタに直流電圧を印加することで変化する．エスパアンテナでは，無給電素子の電気長を調整し，給電素子と電気長の異なる無給電素子を電磁界的に結合させることで指向性を形成する．

エスパアンテナは以下の特長がある．

- 給電素子が1本のみ
- 無給電素子は電力を消費しない
- 素子間結合により指向性を形成する

給電素子が1本であるため，送受信回路は1つでよい．また無給電素子においては，バラクタに直流電圧を印加するのみであり電流は流れないため，電力を消費しない．さらに，1つの送受信回路，D/A コンバータ，バラクタおよび制御用のマイコンで指向性制御用のハードウェアを構成できるため，部品点数が少なく安価にそして簡易的に作製できる．以上のことから，エスパアンテナは他の可変指向性アンテナと比較し，低消費電力で可変指向性を得ることができ，小型化・低コスト化・指向性制御が簡易なアンテナと言える．現在は，エスパアンテナのバラクタを適切に調整することで複数の周波数帯で用いる研究 [59] やエスパアン

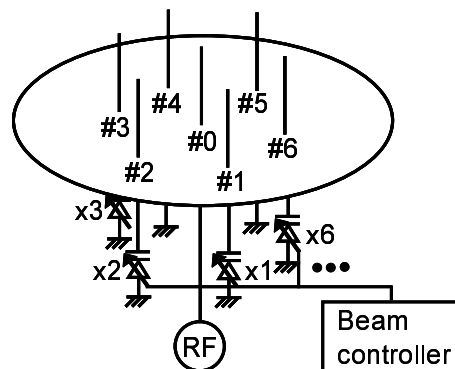


図 5.3 エスパアンテナの構造

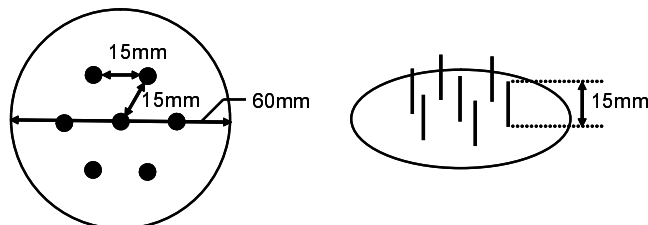


図 5.4 7素子エスパアンテナの寸法

テナを用いた MIMO (Multiple Input Multiple Output) [60], 電波の到来方向推定 [61] や秘密鍵の共有方式 [62] の検討が行われている。

作製したエスパアンテナの寸法を, 図 5.4 に示す. 本体の直径は 60mm, 各素子の長さは 15mm とした. 給電素子, 各無給電素子の間隔はそれぞれ 15mm であり, 素子の材質は半径 0.8mm の鈴めつき線を使用している. 本体に使用した基板はガラスエポキシ両面基板 (FR-4) で板厚は 1.6mm, 銅箔厚さは $35\mu\text{m}$ である. 無給電素子に装荷するバラクタには Infineon 社 BB833E6327 を使用した. BB833E6327 は 0~30V の直流電圧を印加することで, 静電容量が 0.75~9.3pF の間で変化する.

5.2.3 指向性制御回路

ここでは, エスパアンテナの指向性制御回路について説明する. GNU Radio 上からエスパアンテナの指向性を制御できるよう, 指向性制御回路は FTDI 社の USB コントローラ (FT245RL) を用いて PC と USB で接続される. マイコ

ンでは USB 経由で送られてきたビット系列から，GNU Radio 上で指定された電圧がアンテナに印加されるように DAC を制御する．マイコンには Atmel 社の ATMEGA32-16AU を使用し，DAC の制御などを C 言語によって記述する．DAC には Linear Technology 社の LTC2620CGN を使用する．LTC2620CGN には 12bit の DAC が 8ch あるため，最大 8 ポートまでの電圧制御が可能である．指向性制御回路の電源は USB から供給される 5V 電源を利用する．しかし，利用するバラクタから考えると 0～5V の電圧では不十分である．そこで，USB の電源電圧を Maxim 社 MAX629ESA（レギュレータチップ）により昇圧し，Texas Instruments 社のオペアンプ（LM124DRG4）によって DAC の出力を増幅する．最終的に，0～20V の電圧をエスパアンテナの無給電素子に印加することができる．

5.2.4 GNU Radio

GNU Radio はソフトウェア無線開発用のツールキットで，変調方式などを C++ でモジュールとして記述できる．各モジュールは Python を利用して結合でき，複数のモジュールを組み合わせることで 1 つの無線機を構築する．変調方式などの物理層技術以外にも，機能を書き加えることでルーチング手法やメディアアクセス制御法を実装できる．本システムでは，アンテナの指向性制御回路を用いることで，GNU Radio 上で指向性ビームを制御できるようになっている．そのため指向性ビームの変更を，組み込み型のハードウェアと異なり GNU Radio 上の高級言語で記述できる．

5.2.5 USRP2

USRP2 は，メインボードとドータブードから構成される GNU Radio の無線フロントエンドとして開発された無線ハードウェアモジュールである．USRP2 はメディアアクセス制御法の実装 [63,64] の他にも，全二重通信 [65]，干渉除去 [66] やスペクトラムセンシング [67] などの研究にも用いられている．メインボードでは，入力された信号をデジタル信号として扱えるよう A/D 変換を施したり，設定された通信レートに応じた処理を行う．ドータブードではアンテナから入ってきた電波を中間周波数に落とす処理や，メインボードから送られてきた信号を送信周波数に上げる処理を行う．使用する周波数に合わせてドータブードを変更することで，様々な周波数帯において無線機の構築が可能となる．本システムのドー

	2	2	6	6	6	2	6	0-2312	4
Frame control	Duration/ ID	Address 1	Address 2	Address 3	Sequence control	Address 4	Frame Body	FCS	

図 5.5 MAC フレーム構造

表 5.1 メディアアクセス制御法のパラメータ

Slot time	1msec
SIFS	1msec
DIFS	20msec
Carrier sense threshold	-50dB
Contention window	15~1023
Retry limit	9
Overhead for changing beam	5msec

ボードは、使用する周波数が 5.11GHz 帯のため XCVR2450 を選択した。USRP2 は、通信に利用するアンテナを自由に変更できる。よって、作製した指向性制御回路で制御可能であれば様々な種類・形状のエスパアンテナを装着できる。

5.3 メディアアクセス制御法の実装

GNU Radio を利用して、メディアアクセス制御法を実装する。メディアアクセス制御法の実装のために、RSSI（受信信号強度）の計測、キャリアセンス、送信電力制御、バックオフ、フレーム制御、NAV（Network Allocation Vector）機能およびエスパアンテナの指向性ビーム制御の機能を実装し、通信方式に従い動作するようにした。メディアアクセス制御法は CSMA/CA [12] をベースとした全方位性メディアアクセスと DMAC をベースとした SDMA 型メディアアクセスを実装した。MAC 層のフレームフォーマットは図 5.5 のように設定した。図 5.5 において Frame Body に MAC 層のペイロードが記載され、Frame Body と FCS を除いた部分が MAC 層のヘッダとなる。

GNU Radio/USRP2 を用いた実装では、物理層からの情報を MAC 層で扱う際にソフトウェア上の遅延を伴うことが報告されている。遅延により、MAC 層で参照している RSSI 値と実時間での RSSI 値が異なる場合はキャリアセンス機能が

表 5.2 7 素子エスパアンテナの水平面内指向性測定 of 諸元

Frequency	5.11GHz
Transmission antenna	Horn antenna
Distance between antennas	1m
Varactor control voltage	0~20V (Digital value : 0~1024)
Receive power measurement	Network analyser

正常に動作しない。その他にも、NAV 期間が指定した時間と異なるなど遅延によって予期せぬ誤動作が発生する。実装では、文献 [68] を基にキャリアセンス時の遅延と PC - USRP 間の処理時間を考慮した。また、エスパアンテナの指向性を切り替える際、GNU Radio と指向性制御回路の通信は USB ポートのシリアル通信を利用している。よって、GNU Radio 上から指向性ビーム切り替えの命令を送ってから、指向性が切り替わるまでに一定時間を要する。SDMA 型メディアアクセス制御法では、この切り替え時間が送信時間のオーバーヘッドとなる。ソフトウェア上の遅延を考慮したメディアアクセス制御法の主要パラメータを表 5.1 に示す。

5.4 システムの動作検証

5.4.1 ビームパターンの測定

作製したエスパアンテナの水平面内指向性ビームの測定を行った。エスパアンテナの水平面内指向性の実験諸元を表 5.2 に示す。エスパアンテナより 1m 離れた位置に設置したホーンアンテナから 5.11GHz の正弦波を出力し、エスパアンテナで受信電力を測定した。なお、バラクタ制御電圧は 0, 20V の 2 通りで切り替えを行い、1つのアンテナに対して全 64 通りのバラクタ制御電圧セットについて受信電力を測定した。測定したエスパアンテナの指向性ビームの例を図 5.6 に示す。ここで、DAC への入力値 $v_{1\sim6}$ とそれぞれ無給電素子のバラクタに印加される電圧 $V_{\#1\sim\#6}$ は以下の関係がある。

$$V_{\#1\sim\#6} = \frac{20 * v_{1\sim6}}{2^{10} - 1} \quad (5.1)$$

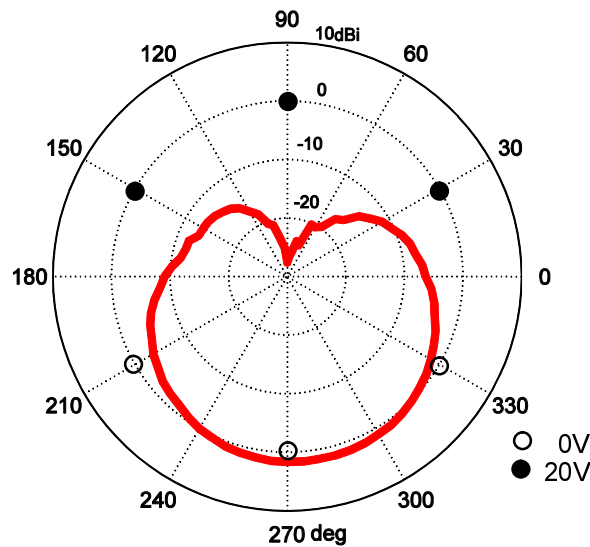


図 5.6 形成した指向性ビーム

5.4.2 通信実験環境

実験諸元を表 5.3 に示す。実験を行うトポロジとして図 5.7 に示すように、電波暗室内（図 5.8）で端末を一直線に等間隔で複数台並べる。表 5.3 のパラメータでパケットを送信した際に、3m 離れた隣接端末でのパケット受信成功率が 99 パーセント以上、6m 離れた端末でパケット受信成功率が 1 パーセント以下となるような送信電力を設定している。自身の通信相手以外からのパケットを受信した場合、メディアアクセス制御法に従い NAV を設定する。マルチホップ通信の場合は、並べた端末のうち両端の端末をそれぞれ送信端末と受信端末とし、その他の端末は全て中継端末とする。スループットの測定は受信端末で行う。

通信実験では、まず全方位性メディアアクセス制御法と SDMA 型メディアアクセス制御法の最大スループットを 2 端末間で測定した。次に 4 台の端末を用いて通信ペアを 2 組とした場合のスループットを測定し、各方式で比較した。最後に、2 ホップ、3 ホップのマルチホップ通信時のスループットを測定し、各方式で比較した。それぞれの実験における端末の位置情報は既知とし、ルーチングはあらかじめ固定で割り当てている。また実験結果の妥当性を示すために、実験環境を模したシミュレーションについても行った。

表 5.3 実験諸元

Environment	Anechoic chamber
Distance between node	3m
Frequency	5.11GHz
Transmission power	6mW
Modulation scheme	GMSK
Bitrate	1Mbps
Data size	100byte
Traffic load	1~21packet/sec

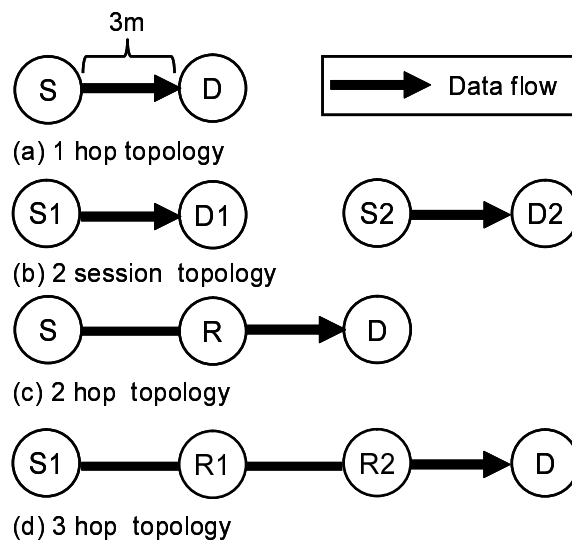


図 5.7 実験トポロジ



図 5.8 実験環境

5.4.3 シングルホップ通信特性

実装した各メディアアクセス制御法の最大スループットを求めるために、トラヒックを変化させて2端末間のスループットを評価した。スループット特性を図5.9に示す。全方位性メディアアクセス制御法の最大スループットが16packet/secであるのに対して、SDMA型メディアアクセス制御法のスループットは12packet/secであった。SDMA型メディアアクセス制御法では、指向性の切り替えに時間を要する。具体的な指向性切り替えタイミングは、送信端末のRTS送信時、受信端末のCTS送信時、通信終了による送受信端末の待機状態移行時である。指向性の切り替え1回あたりに5msecかかるため、SDMA型メディアアクセス制御法は全方位性メディアアクセス制御法に比べ、1回のデータパケットの送信に15msecだけ余分に時間を要する。そのため、SDMA型メディアアクセス制御法は全方位性メディアアクセス制御法よりも最大スループットが低いことが実証実験によって裏付けられた。また、図5.9の結果は、実験とシミュレーションで同等の値が得られた。

次に、図5.7(b)に示す2つの通信ペアがある場合の各ペアのスループットを測定した。測定時のトラヒックは21packet/secである。図5.10に全方位性メディアアクセス制御法、SDMA型メディアアクセス制御法における各通信ペアのスループットを示す。図5.10より、全方位性メディアアクセス制御法では極端なスループットの偏りが生じていることが分かる。図5.7(b)の端末配置において、セッション

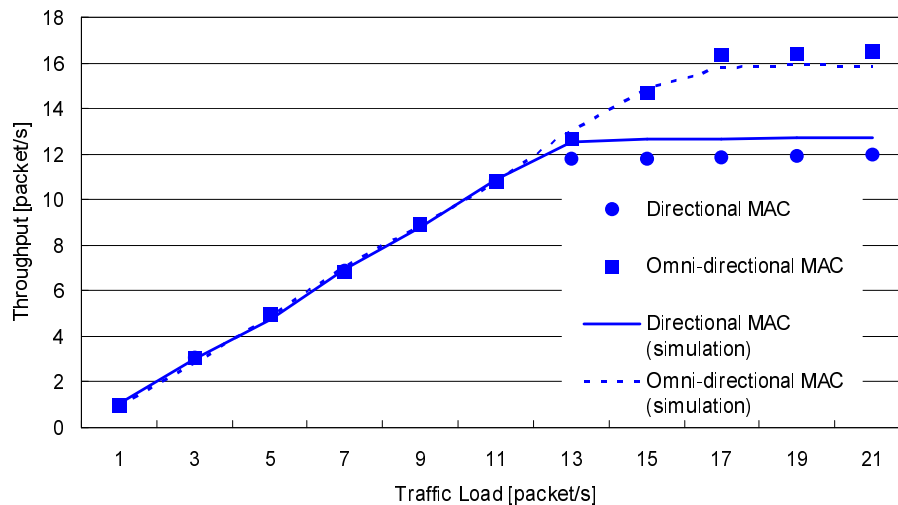


図 5.9 1 ホップ通信でのスループット特性

ン2の端末S2はRTSを送信することでセッション1のD1にNAVを設定し、自身のセッションの通信を保護できる。一方、セッション1の通信は端末D1がCTSを送信することで、セッション2のS2にNAVを設定する。また、S1とS2は隠れ端末の関係であるためRTSを送信した場合、D1はRTSの受信に失敗しD2は成功する。このため、セッション2の通信がセッション1の通信を一方向的に抑制してしまう。一方で、SDMA型メディアアクセス制御法はスループットの不公平性を緩和し、2つの通信ペアの合計スループットが全方位性メディアアクセス制御法に比べ向上している。これは、指向性ビームを用いることでもう一方の通信ペアへの干渉を軽減でき、それぞれのセッションで同時に通信する機会が増加したためである。指向性ビームにより通信機会の公平性が向上することを実験によって確認できた。全方位性メディアアクセス制御法のスループットの偏りとSDMA型メディアアクセス制御法の公平なスループットはシミュレーションの結果からも確認することができる。

5.4.4 マルチホップ通信特性

マルチホップ通信環境において、SDMA型メディアアクセス制御法のキャリアセンス閾値 (CS_{th}) がスループットに影響を与えることが文献 [69] により報告されている。そこで、マルチホップ通信での測定はSDMA型メディアアクセス制御

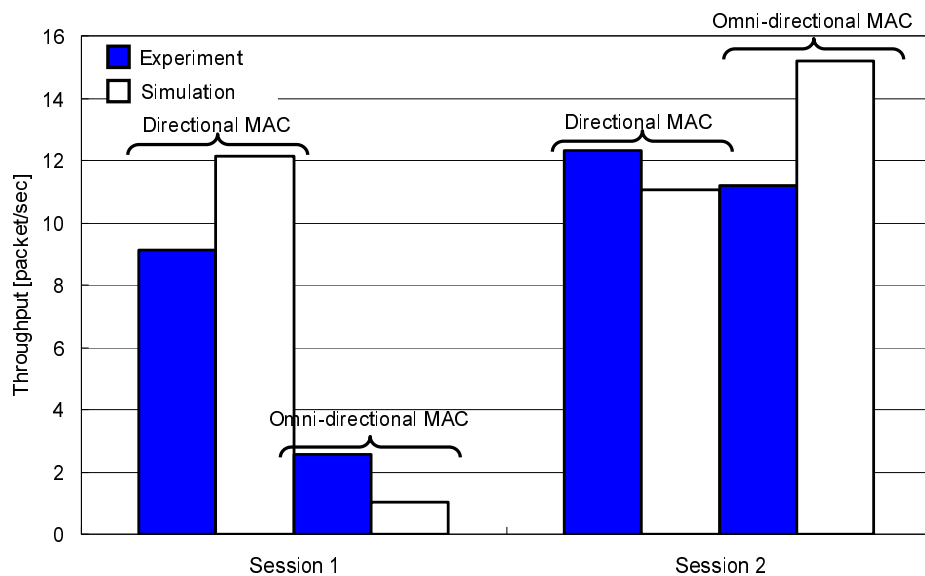


図 5.10 2セッションのスループット特性

法の各端末のキャリアセンス閾値を -50dB と -60dB の2通りとし、スループットを測定した。また、測定時のトラヒックは 21packet/sec とした。図 5.7(c)に示す2ホップ通信でのスループット特性を図 5.11に示す。2ホップ通信の場合は、全方位性メディアアクセス制御法のスループットが最も高い。これは、指向性ビームを用いても同時に通信可能な端末が存在しないことと、指向性隠れ端末問題に起因している。SDMA型メディアアクセス制御法の場合、端末Dが指向性ビームで受信中に端末SがRTSを送信し衝突が発生する。しかし、端末のキャリアセンス閾値を下げた場合、スループットの向上が見られる。これは、キャリアセンス閾値を下げることで端末Sは端末Rの指向性ビームのバックローブから通信状況を把握することができ、衝突を軽減したためである。多くのシミュレーションで考慮されていないバックローブを積極的に利用することで、スループットの改善が見込めることを実験によって確認できた。実験環境を模したシミュレーションでもバックローブの利用によるスループットの改善効果を確認できる。

次に、図 5.7(d)に示す3ホップ通信でのスループットを図 5.12に示す。全方位性メディアアクセス制御法は、ホップ数の増加に伴いスループットが低下している。一方、SDMA型メディアアクセス制御法は図 5.7(b)のような同時通信を可能とする通信ペアが存在する。そのため、ホップ数の増加によるスループットの低下が少ない。また、図 5.12において端末のキャリアセンス閾値を制御した場合

に、2ホップ通信と同様にスループットが向上することを確認した。さらに、ビームを切り替えるオーバーヘッドを含んでいるにも関わらず、全方位性メディアアクセス制御法のスループットよりも高い値を実験より得られた。図5.12のシミュレーション結果では全方位性メディアアクセス制御法とキャリアセンス閾値を下げたSDMA型メディアアクセス制御法のスループットがほぼ等しい値になり、実験結果の優劣関係を再現できていない。これは、マルチホップ時のソフトウェア遅延をシミュレーションに反映できなかったためである。図5.11でもマルチホップ時の遅延の影響はあるが、ホップ数の多い3ホップ通信で遅延の影響が顕著に表れたためと考えられる。図5.9～図5.12より、実験結果とシミュレーション結果の傾向は一致しており実験結果は妥当である。

5.5 まとめ

本章では、エスパアンテナとGNU Radio/USRPを用いてSDMA型メディアアクセス制御法評価システムについて述べた。エスパアンテナは5.11GHz帯で動作するように寸法を設計し、自作した。また、指向性制御回路を作製し、GNU Radio上での指向性制御を可能にした。システムの動作検証では、GNU Radio上にメディアアクセス制御法を実装し電波暗室内でスループットを測定した。スループット測定の結果より、SDMA型メディアアクセス制御法は複数の通信ペアが存在する場合に与・被干渉を削減し空間利用効率が高まりスループットが向上することを示した。また、適切なキャリアセンス閾値を与えることで効率よくマルチホップ通信することを確認した。今後は、様々なSDMA型メディアアクセス制御法の実装・評価、更に大規模ネットワークや端末の移動を考慮したルーチング手法や物理層での適応ビームフォーミングを実現する。また、キャリアセンス閾値を端末が自律的に設定する機能について検討する必要がある。

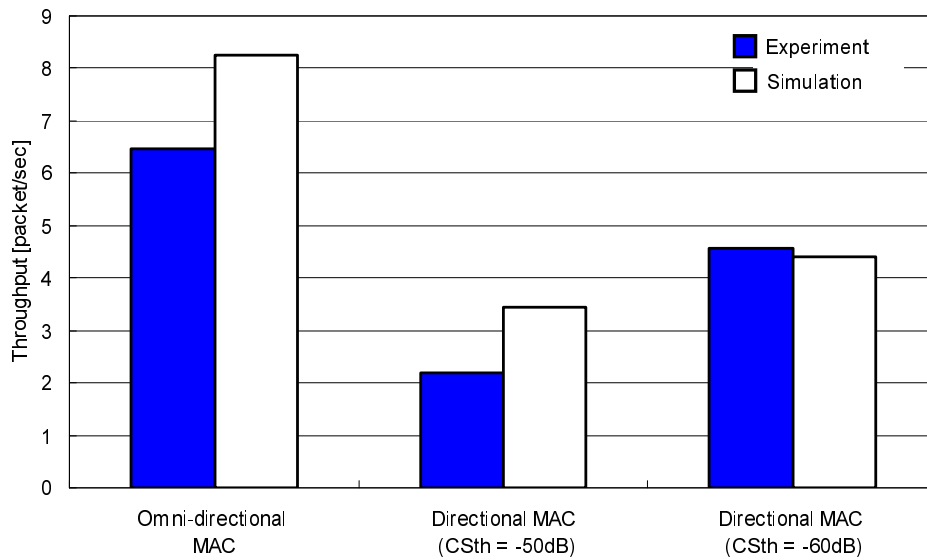


図 5.11 2 ホップ通信でのスループット特性

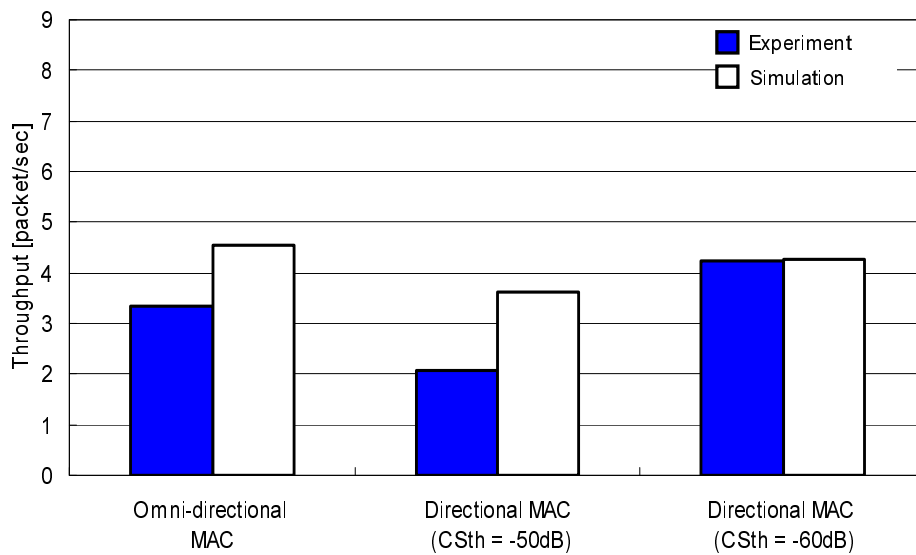


図 5.12 3 ホップ通信でのスループット特性

第6章

結論

本論文では、アドホックネットワークにおけるスループットの向上を目的として、マルチチャネル化したメディアアクセス制御方式について述べた。アドホックネットワークでは、集中管理システムが存在しないため、端末が自律的にメディアアクセス制御する必要がある。また、メディアアクセス制御方式には隠れ端末問題とさらし端末問題といったスループットを劣化させる要因がある。隠れ端末問題とさらし端末問題を同時に解決するには、マルチチャネル化したメディアアクセス制御の検討が必須となる。単純にマルチチャネル化することでもスループットは向上するが、本論文では新たな隠れ端末問題と難聴問題にも着目し、メディアアクセス制御法を検討した。

第3章では、マルチチャネル隠れ端末問題と短縮 NAV 問題を解決するために、全ての拡散符号の状況を把握できるコードセンス CDMA 型のメディアアクセス制御法について述べた。提案したコードセンス CDMA 型メディアアクセス制御法は、マルチチャネル隠れ端末問題と拡散符号割当てに対処するために拡散符号管理テーブルを導入し、状況にあった最適な拡散符号により通信が可能となる。また、短縮 NAV 問題を解決するために拡張 NAV を導入し、通信中の端末をテーブルで管理することで、不要な通信要求の発生を削減することができる。さらに、CDMA 特有の問題である遠近問題に対しては送信抑制制御を用いて、自身の通信が遠近問題による衝突の原因になるかを判断することが可能となった。シミュレーションにより、移動をともなう環境において、IEEE 802.11 DCF に比べて最大 121%、SMC-MAC に比べて最大 45%、MC-MAC に比べて最大 16%、CS-CDMA に比べて最大 50%スループットが向上した。

第4章では、指向性隠れ端末問題と Deafness 問題を解決するために、待機状態

のビームパターンを適切に制御する指向性傍受を用いるメディアアクセス制御法について述べた。提案した指向性傍受 SDMA 型メディアアクセス制御法は、指向性隠れ端末問題に対処するために指向性傍受方式を導入した。従来の SDMA 型メディアアクセス制御法では ACK 受信後、全方位ビームで待機（全方位待機モード）していた。一方、指向性傍受方式は、あて先方向に対して指向性ビームを向けて待機（指向性傍受モード）し、あて先方向の通信状況を傍受する。これにより、指向性隠れ端末は DNAV を設定することが可能となり衝突を回避することができる。また、Deafness 問題を解決するために切換型バックオフ方式を導入し、RTS の再送によるバックオフ値の増加を抑制した。バックオフ値の増加を抑制することで、自身の通信が遅延せずに行えようになった。シミュレーションにより、格子状トポロジーでは、DMAC に比べて 1.5 倍のスループットを達成した。ランダムトポロジーにおいては、DMAC に比べて最大 1.1 倍のスループットを達成した。

第5章では、メディアアクセス制御法を実環境で評価するためのシステム構築について述べた。本論文では、CDMA 型メディアアクセス制御法と SDMA 型メディアアクセス制御法に関する検討を行っているが、システム設計としてはまず SDMA 型メディアアクセス制御法を評価するシステムを対象とした。開発したシステムは、通信端末の多様性を考慮して設計を行った。可変指向性アンテナとして小型化・平面化が可能なエスパアンテナを用い、無線端末装置にソフトウェア無線のプラットフォームである GNU Radio と USRP2 を用いることでより柔軟に送信電力や周波数帯の設定が可能となった。メディアアクセス制御法の機能の全ては、GNU Radio を用いてソフトウェアで実装した。システムの動作検証では、電波暗室内でエスパアンテナの指向性と各メディアアクセス制御法のスループットを測定した。スループット測定の結果より、SDMA 型メディアアクセス制御法は複数の通信ペアが存在する場合に与・被干渉を削減し空間利用効率が高まりスループットが向上することを示した。また、適切なキャリアセンス閾値を与えることで効率よくマルチホップ通信することを確認した。

本論文で示したメディアアクセス制御方式によって、アドホックネットワークにおいてスループットの高いネットワークを実現できる。本論文で示した CDMA 型メディアアクセス制御と SDMA 型メディアアクセス制御は組み合わせ可能である。そのため、適切に組み合わせることで更なる高スループットを実現できる可能性がある。本論文で示した方式は、それぞれの端末が同じ通信機能であるこ

とを前提としていた。アドホックネットワークでは、それぞれの端末の多様性を考慮した設計も必要である。そこで、今後は全方位性アンテナを搭載した端末や可変指向性アンテナを搭載した端末が混在した環境など、異種端末ネットワークを考慮したメディアアクセス制御法の研究開発を行う必要がある。

謝辞

本研究を進めるにあたり，多くの方々に御世話になりました．ここに深く感謝の意を表します．

研究活動全般にわたり格別なるご指導を賜りました電気・電子情報工学系 上原秀幸教授に甚大なる謝意を表します．

また，本論文の審査過程において，貴重な御教示を賜りました電気・電子情報工学系 大平孝教授，市川周一教授，情報・知能工学系 梅村恭司教授に心より感謝申し上げます．

研究に関して熱心に議論をしていただいたワイヤレス通信研究室，波動工学研究室の皆様には深く感謝しております．特に論文の共著者となっている皆様にはたいへん御世話になりました．ありがとうございました．

私が研究代表者である研究活動費においては，豊橋技術科学大学未来技術流動研究センターならびに豊橋技術科学大学グローバル COE プログラム“インテリジェントセンシングのフロンティア”からのご支援を頂戴しました．大変感謝しております．

最後になりましたが，博士課程に進学する機会を与えてくださり，いかなるときも私を温かく見守り続けてくれた両親に深く感謝いたします．

参考文献

- [1] 山口匠, 間瀬憲一, “東日本大震災に伴う無線マルチホップネットワークの構築と避難所通信システムの運用,” 信学技報 (AN), pp.25–30, January 2012.
- [2] 岡宏典, 岡田啓, 間瀬憲一, “気球を用いたアドホックネットワークシステム“スカイメッシュ”におけるネットワーク構築法に関する検討,” 信学技報 (AN), pp.19–24, March 2012.
- [3] 大和田泰伯, 井上真杉, 大西真晶, 森野博之, 実藤亨, “NerveNet におけるリアルタイム広告配信実証実験,” 信学技報 (USN), pp.125–128, October 2011.
- [4] 間瀬憲一, “車車間通信とアドホックネットワーク,” 信学論 (B), vol.J89-B, no.6, pp.824–835, June 2006.
- [5] T. Willke, P. Tientrakool, and N. Maxemchuk, “A survey of inter-vehicle communication protocols and their applications,” IEEE Communications Surveys Tutorials, vol.11, no.2, pp.3–20, 2009.
- [6] “クルマと交通安全「事故死半減」、IT が担う,” 日経ビジネス, vol.1559, pp.106–109, September 2010.
- [7] F. Tobagi, and L. Kleinrock, “Packet switching in radio channels: Part ii—the hidden terminal problem in carrier sense multiple-access and the busy-tone solution,” IEEE Transactions on Communications, vol.23, no.12, pp.1417–1433, December 1975.
- [8] P. Karn, “A new channel access method for packet radio,” ARRL/CRRL Amateur Radio 9th Computer Networking Conference, pp.134–140, 1990.

- [9] C.L. Fullmer, and J.J. Garcia-Luna-Aceves, "Solutions to hidden terminal problems in wireless networks," Proceedings of the ACM SIGCOMM '97 conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communication, pp.39–49, New York, NY, USA, 1997, ACM.
- [10] V. Bharghavan, A. Demers, S. Shenker, and L. Zhang, "Macaw: a media access protocol for wireless lans," Proceedings of the ACM Conference on Communications Architectures, Protocols and Applications, pp.212–225, 1994.
- [11] F. Talucci, M. Gerla, and L. Fratta, "Maca-bi (maca by invitation)-a receiver oriented access protocol for wireless multihop networks," IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications., vol.2, pp.435–439, September 1997.
- [12] IEEE Std 802.11b, "Wireless lan medium access control (mac) and physical layer (phy) extention in the 2.4ghz band," , 1999.
- [13] C. Wu, and V. Li, "Receiver-initiated busy-tone multiple access in packet radio networks," SIGCOMM Comput. Commun. Rev., vol.17, no.5, pp.336–342, Aug. 1987.
- [14] S. Singh, and C.S. Raghavendra, "Pamas-power aware multi-access protocol with signalling for ad hoc networks," SIGCOMM Comput. Commun. Rev., vol.28, no.3, pp.5–26, July 1998.
- [15] Z. Haas, and J. Deng, "Dual busy tone multiple access (dbtma)-a multiple access control scheme for ad hoc networks," IEEE Transactions on Communications, vol.50, no.6, pp.975–985, June 2002.
- [16] 後藤秀暢, 渡邊晃, "アドホックネットワークのスループットを向上するストロングビジートーンの提案," 情処研報 (MBL) , vol.2011, no.26, pp.1–8, July 2011.
- [17] J. So, and N.H. Vaidya, "Multi-channel mac for ad hoc networks: handling multi-channel hidden terminals using a single transceiver," Proceedings of the 5th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing, pp.222–233, 2004.

- [18] R.R. Choudhury, X. Yang, R. Ramanathan, and N.H. Vaidya, "Using directional antennas for medium access control in ad hoc networks," Proceedings of the 8th annual international conference on Mobile computing and networking, pp.59–70, 2002.
- [19] R.R. Choudhury, and N.H. Vaidya, "Deafness: a mac problem in ad hoc networks when using directional antennas," Proceedings of the 12th IEEE International Conference on Network Protocols, pp.283–292, October 2004.
- [20] 三觜輝, 萬代雅希, 渡辺尚, "アドホックネットワークにおける単一送受信機を利用したマルチチャネル MAC プロトコルについて," 情処研報 (MBL), vol.2008, no.44, pp.129–134, 2008.
- [21] T. Kobayashi, "Tcp performance over ieee 802.11 based multi channel mac protocol for mobile ad hoc networks," IEICE TRANS. COMMUN, vol.E86-B, no.4, pp.1307–1316, April 2003.
- [22] R. Fantacci, A. Ferri, and D. Tarchi, "A novel mac technique for ad-hoc cdma networks," International Workshop on Wireless Ad-Hoc Networks, pp.310–314, June 2004.
- [23] A. Nasipuri, J. Zhuang, and S. Das, "A multichannel csma mac protocol for multihop wireless networks," IEEE Wireless Communications and Networking Conference, pp.1402–1406, 1999.
- [24] A. Nasipuri, and S. Das, "Multichannel csma with signal power-based channel selection for multihop wireless networks," IEEE Vehicular Technology Conference, pp.211–218, 2000.
- [25] S.L. Wu, C.Y. Lin, Y.C. Tseng, and J.L. Sheu, "A new multi-channel mac protocol with on-demand channel assignment for multi-hop mobile ad hoc networks," Proceedings of International Symposium on Parallel Architectures, Algorithms and Networks, pp.232–237, 2000.
- [26] N. Jain, S. Das, and A. Nasipuri, "A multichannel csma mac protocol with receiver-based channel selection for multihop wireless networks," Proceed-

- ings of Tenth International Conference on Computer Communications and Networks, pp.432–439, 2001.
- [27] A. Muqattash, and M. Krunz, “Cdma-based mac protocol for wireless ad hoc networks,” Proceedings of the 4th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking & computing, pp.153–164, 2003.
- [28] T. Luo, M. Motani, and V. Srinivasan, “Cam-mac: A cooperative asynchronous multi-channel mac protocol for ad hoc networks,” International Conference on Broadband Communications, Networks and Systems, pp.1–10, October 2006.
- [29] S. Ivanov, D. Botvich, S. Balasubramaniam, and N. Popova, “Avoiding redundant channel blocking in cooperative multi-channel mac protocols through virtual topology inferencing,” IEEE International Conference on Communications Workshops, pp.1–5, June 2009.
- [30] Y. Liu, X. Wang, and H. Zhang, “An asynchronous multi-channel mac protocol for cooperative networks,” IEEE 73rd Vehicular Technology Conference, pp.1–5, May 2011.
- [31] Y. Moon, and V.R. Syrotiuk, “A cooperative cdma-based multi-channel mac protocol for mobile ad hoc networks,” Comput. Commun., vol.32, no.17, pp.1810–1819, November 2009.
- [32] T. Korakis, G. Jakllari, and L. Tassiulas, “Cdr-mac: A protocol for full exploitation of directional antennas in ad hoc wireless networks,” IEEE Transactions on Mobile Computing, vol.7, no.2, pp.145–155, February 2008.
- [33] G. Jakllari, I. Broustis, T. Korakis, S. Krishnamurthy, and L. Tassiulas, “Handling asymmetry in gain in directional antenna equipped ad hoc networks,” IEEE 16th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, pp.1284–1288, September 2005.
- [34] H. Gossain, C. Cordeiro, and D. Agrawal, “Mda: an efficient directional mac scheme for wireless ad hoc networks,” IEEE Global Telecommunications Conference, pp.3633–3637, December 2005.

- [35] M. Takata, M. Bandai, and T. Watanabe, "A directional mac protocol with deafness avoidance in ad hoc networks," *IEICE TRANS. COMMUN*, vol.E90-B, no.4, pp.866–875, April 2007.
- [36] M. Takata, M. Bandai, and T. Watanabe, "A receiver-initiated directional mac protocol for handling deafness in ad hoc network," *IEEE International Conference on Communications*, pp.4089–4095, 2006.
- [37] Z. Huang, C.C. Shen, C. Srisathapornphat, and C. Jaikaeo, "A busy-tone based directional mac protocol for ad hoc networks," *Proceedings of MIL-COM*, vol.2, pp.1233–1238, October 2002.
- [38] S. Kulkarni, and C. Rosenberg, "Dbsma: a mac protocol for multi-hop ad-hoc networks with directional antennas," *IEEE 16th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, vol.2, pp.1371–1377, September 2005.
- [39] S.B. Ko, and J.W. JWA, "A dual-tone dmac protocol for mobile ad hoc networks," *IEICE TRANS. COMMUN*, vol.E90-B, no.2, pp.354–357, February 2007.
- [40] J. MA, H. Sekiya, A. Nagasaki, N. Komuro, and S. Sakata, "Mac protocol for ad hoc networks using smart antennas for mitigating hidden and deafness problems," *IEICE TRANS. COMMUN*, vol.E95-B, no.11, pp.3545–3555, November 2012.
- [41] 横田翔子, 萬代雅希, 渡辺尚, "代理端末を用いるアドホックネットワークプロトコルの検討," *信学総大*, B-21-12, March 2011.
- [42] Hoi-Sheung, W. So, J. Walrand, and J. Mo, "Mcmac: A parallel rendezvous multi-channel mac protocol," *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, pp.334–339, March 2007.
- [43] M. Jia, H. Chen, and Y. Yuan, "A dual reservation mac protocol based on cdma for ad hoc networks," *Asia-Pacific Conference on Communications*, pp.53–56, October 2005.

- [44] T. Al-Meshhadany, and W. Ajib, “New cdma-based mac protocol for ad hoc networks,” IEEE Vehicular Technology Conference, pp.91–95, October 2007.
- [45] 荒木真里子, ヘッティアーラッチランガ, 横山光雄, 上原秀幸, “DS-CDMAにおける Cycle-and-Add 特性を利用した干渉除去方式,” 信学論 (A), vol.J90-A, no.3, pp.217–227, March 2007.
- [46] Scalable Network Technologies, “Qualnet 3.9.5,” available from <http://www.scalablenetworks.com/>, (accessed 2012-12-2).
- [47] C. Perkins, and E. Royer, “Ad-hoc on-demand distance vector routing,” Proceedings of Second IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications, pp.90–100, February 1999.
- [48] Y.B. Ko, V. Shankarkumar, and N. Vaidya, “Medium access control protocols using directional antennas in ad hoc networks,” Proceedings of Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, pp.13–21, 2000.
- [49] 古樋知重, 大平孝, “無線アドホックネットワークにおける指向性アンテナの効能に関する考察,” 信学論 (B), vol.J85-B, no.12, pp.2223–2233, December 2002.
- [50] 高田昌忠, 長島勝城, 渡辺尚, “スマートアンテナを利用したアドホックネットワーク MAC プロトコルの特性評価,” 情処学論, vol.46, no.10, pp.2187–2198, October 2005.
- [51] M. Sekido, M. Takata, M. Bandai, and T. Watanabe, “A directional hidden terminal problem in ad hoc network mac protocols with smart antennas and its solutions,” IEEE Global Telecommunications Conference, vol.5, pp.2579–2583, December 2005.
- [52] O. Bazan, and M. Jaseemuddin, “An opportunistic directional mac protocol for multihop wireless networks with switched beam directional antennas,” IEEE International Conference on Communications, pp.2775–2779, May 2008.

- [53] クロスボー株式会社, “MEMSIC,” available from <http://www.xbow.jp/>, (accessed 2012-12-2).
- [54] 渡辺正浩, 萬代雅希, 小花貞夫, 渡辺尚, “スマートアンテナを用いた指向性MACプロトコルのテストベッドの構築と実験による効果の考察,” 情処学論, vol.48, no.7, pp.2513–2522, July 2007.
- [55] IEEE Std 802.15.4, “Wireless medium access control (mac) and physical layer (phy) specifications for low-rate wireless personal area networks (wpans),” , 2006.
- [56] 大平孝, 飯草恭一, “電子走査導波器アレーアンテナ,” 信学論 (C), vol.J87-C, no.1, pp.12–21, January 2004.
- [57] GNU Radio, “Gnu radio,” available from <http://gnuradio.org/>, (accessed 2012-12-2).
- [58] Ettus Research LLC, “Ettus research,” available from <http://www.ettus.com/>, (accessed 2012-12-2).
- [59] E. Tsakalaki, O. Alrabadi, C. Papadias, and R. Prasad, “Spatial spectrum sensing for wireless handheld terminals: design challenges and novel solutions based on tunable parasitic antennas [dynamic spectrum management],” IEEE Wireless Communications, vol.17, no.4, pp.33–40, August 2010.
- [60] O. Alrabadi, C. Papadias, A. Kalis, N. Marchetti, and R. Prasad, “Mimo transmission and reception techniques using three-element espar antennas,” IEEE Communications Letters, vol.13, no.4, pp.236–238, April 2009.
- [61] E. Taillefer, W. Nomura, J. Cheng, M. Taromaru, Y. Watanabe, and T. Ohira, “Enhanced reactance-domain esprit algorithm employing multiple beams and translational-invariance soft selection for direction-of-arrival estimation in the full azimuth,” IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol.56, no.8, pp.2514–2526, August 2008.
- [62] 長谷川拓, 斎藤隆史, 植松和正, 成田譲二, 上原秀幸, 大平孝, “エスパアンテナを用いた秘密鍵生成共有方式の雑音耐性と盗聴耐性を高める指向性選択,” 信学論 (B), vol.J94-B, no.2, pp.214–225, February 2011.

- [63] S. Sen, R. Roy Choudhury, and S. Nelakuditi, “Csma/cn: Carrier sense multiple access with collision notification,” *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol.20, no.2, pp.544–556, April 2012.
- [64] K. Mandke, S.H. Choi, G. Kim, R. Grant, R. Daniels, W. Kim, R. Heath, and S. Nettles, “Early results on hydra: A flexible mac/phy multihop testbed,” *IEEE 65th Vehicular Technology Conference*, pp.1896–1900, April 2007.
- [65] J.I. Choi, M. Jain, K. Srinivasan, P. Levis, and S. Katti, “Achieving single channel, full duplex wireless communication,” *Proceedings of the sixteenth annual international conference on Mobile computing and networking*, pp.1–12, 2010.
- [66] S. Katti, D. Katabi, H. Balakrishnan, and M. Medard, “Symbol-level network coding for wireless mesh networks,” *Proceedings of the ACM SIGCOMM 2008 conference on Data communication*, pp.401–412, 2008.
- [67] A. Greco, T. Milcher, V. Kolar, P. Mähönen, and M. Petrova, “Csma interaction detection and capacity estimation in cognitive radio networks,” *Proceedings of the tenth ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing*, pp.321–322, 2009.
- [68] GNU Radio MAC Team, “GNU Radio MAC final report,” , April 2011.
- [69] 君島秋人, 宮路祐一, 上原秀幸, 大平孝, “指向性アンテナを用いた無線マルチホップ環境においてキャリアセンス閾値がスループットに与える影響,” *信学総大*, B-21-3, March 2010.

業績リスト

学術論文

1. 宮路祐一, 君島秋人, 大場昌範, 上原秀幸, 大平 孝, “GNU Radio/USRP とエスパアンテナを用いた指向性 MAC プロトコル評価システム,” 信学論 (B), Vol.J96-B, No.2, pp.83-91, Feb. 2013.
2. 宮路祐一, 村中裕貴, 古橋 彬, 上原秀幸, 大平 孝, “アドホックネットワークにおけるコードセンス CDMA 型 MAC プロトコル,” 情処学論, Vol.53, No.2, pp.879-888, Feb. 2012.
3. 河井政宏, 宮路祐一, 上原秀幸, 大平 孝, “無線マルチホップネットワークにおけるスマートアンテナを用いた指向性傍受 MAC プロトコル,” 信学論 (B), Vol.J94-B, No.4, pp.555-566, Apr. 2011.
4. 大野雅幸, 宮路祐一, 上原秀幸, 大平 孝, “無線アドホックネットワークにおいてエスパアンテナを利用した指向性適応制御 MAC プロトコル,” 信学論 (B), Vol.J94-B, No.2, pp.113-121, Feb. 2011.

国際会議

1. Yuichi Miyaji, Masahiro Kawai, Hideyuki Uehara, Takashi Ohira, “Directional Monitoring MAC Protocol Using Smart Antennas in Wireless Multi-hop Networks,” The Second International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN), 1B-1, 6 pages, Jeju island, Korea, Jun. 2010.
2. Yuichi Miyaji, Hideyuki Uehara, Takashi Ohira, “Twin-Lobe-Beam Directional MAC Protocol in Ad Hoc Networks Using ESPAR Antenna,” International Workshop on Vision, Communications and Circuits (IWVCC), 2PM1-B-4, 4 pages, Xi’an, China, Nov. 2008.

国際会議（査読なし）

1. Atsuro Furumori, Yuichi Miyaji, Hideyuki Uehara, Takashi Ohira, “Experimental Evaluation of Routing Protocols for Vehicular Ad-hoc Networks Using GNU Radio and USRP,” Bulletin of Networking, Computing, Systems, and Software, vol.2, no.1, pp.47-49, Jan. 2013.

技術報告

1. 甲斐祐弥, 小田康明, 富田真宏, 宮路祐一, 上原秀幸, 大平 孝, “無線センサネットワークにおけるセクタアンテナを用いた近隣発見手法の特性評価,” 信学技報, USN2012-8, pp.57-61, May 2012.
2. 大場昌範, 宮路祐一, 君島秋人, 上原秀幸, 大平 孝, “アドホックネットワークにおける空間利用効率向上のための空間相関による NAV 設定基準,” 信学技報, AN2012-7, pp.51-56, May 2012.
3. 君島秋人, 山川太一, 大場昌範, 宮路祐一, 上原秀幸, 大平 孝, “GNU Radio/USRP とエスパアンテナを用いたマルチホップ通信テストベッド,” 信学技報, AN2011-79, pp.143-144, Jan. 2012.
4. 君島秋人, 山川太一, 宮路祐一, 上原秀幸, 大平 孝, “GNU Radio/USRP とエスパアンテナを用いたマルチホップ通信テストベッドの構築とその特性評価について,” 信学技報, AN2011-61, pp.37-42, Jan. 2012.
5. 宮路祐一, 上原秀幸, 大平 孝, “Deafness と隠れ端末問題に対処する指向性 MAC プロトコルの適応キャリアセンシング,” 信学技報, NS2009-175, pp.77-82, Mar. 2010.
6. 河井政宏, 宮路祐一, 上原秀幸, 大平 孝, “無線アドホックネットワークにおけるスマートアンテナを用いた指向性傍受 MAC プロトコル,” 信学技報, AN2010-01, pp.1-6, Jan. 2010.
7. 大野雅幸, 宮路祐一, 上原秀幸, 大平 孝, “エスパアンテナを用いた時空間 MAC プロトコルのスループット特性評価,” 信学技報, RCS2009-59, pp.35-40, Jul. 2009.

8. 大野雅幸, 宮路祐一, 上原秀幸, 大平 孝, “エスパアンテナを用いたアドホック無線のための時空間 MAC プロトコル,” 信学技報, RCS2008-43, pp.67-72, Jul. 2008.
9. 宮路祐一, 上原秀幸, 大平 孝, “無線マルチホップ通信環境における Deafness 問題を軽減するツインローブ指向性 MAC プロトコル,” 信学技報, AN2008-19, pp.25-30, Jul. 2008.

国内学会

1. 住吉隆宏, 宮路祐一, 上原秀幸, 大平 孝, “車車間通信を用いた緊急情報配信における交通流変動の影響と配信源制御法,” 信学総大, A-17-3, Mar. 2013.
2. 大竹晋資, 島田晃郎, 伊藤有基, 宮路祐一, 上原秀幸, 大平 孝, “磁界共鳴型二次元マルチホップ無線電力伝送システムにおける受電器の位置推定,” 信学総大, B-1-18, Mar. 2013.
3. 山口 啓, 甲斐祐弥, 宮路祐一, 上原秀幸, 大平 孝, “無線センサネットワーク用可変指向性 MAC プロトコルにおける衝突回避手法,” 信学総大, B-6-55, Mar. 2013.
4. 甲斐祐弥, 宮路祐一, 上原秀幸, 大平 孝, “マイナーローブを考慮した WSN 用指向性 MAC プロトコルの省電力特性評価,” 信学東海連大, O4-3, Sep. 2012.
5. 住吉隆宏, 宮路祐一, 上原秀幸, 大平 孝, “車車間通信を用いた緊急情報配信における車両速度変動の影響,” 信学東海連大, Po2-1, Sep. 2012.
6. Yuichi Miyaji, Hideyuki Uehara, “An Adaptive Physical Carrier Sense in Directional MAC Protocols,” IEEE AP-S/MTT-S Nagoya Chapter Midland Student Express 2011 Spring, S2-1, Apr. 2011.
7. 宮路祐一, 村中裕貴, 古橋 彬, 上原秀幸, 大平 孝, “アドホックネットワークにおけるコードセンス CDMA 型 MAC プロトコル,” 情報処理学会, マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2010) シンポジウム, 7B-3, Jul. 2010.

8. 宮路祐一, 上原秀幸, 大平 孝, “マルチホップ通信環境における指向性 MAC プロトコルの適応キャリアセンシング,” 信学総大, B-21-4, Mar. 2010.
9. 君島秋人, 宮路祐一, 上原秀幸, 大平 孝, “指向性アンテナを用いた無線マルチホップ環境においてキャリアセンス閾値がスループットに与える影響,” 信学総大, B-21-3, Mar. 2010.
10. 宮路祐一, 上原秀幸, 大平 孝, “マルチホップ通信環境における NAV Blocking 問題と Deafness 問題について,” 信学ソ大, B-21-19, Sep. 2008.
11. 宮路祐一, 上原秀幸, 大平 孝, “エスパアンテナで2つの主ローブをもつビーム形成と指向性 MAC プロトコルへの応用,” ワイヤレス・テクノロジー・パーク, May 2008.

グローバル COE

1. 宮路祐一, 上原秀幸, 大平 孝, “エスパアンテナ搭載マルチホップ無線システムと通信プロトコル,” グローバル COE シンポジウム東京 2012, Mar. 2012.
2. 宮路祐一, 上原秀幸, 大平 孝, “エスパアンテナと USRP を用いた指向性 MAC プロトコルの評価,” グローバル COE シンポジウム東京 2012, Mar. 2012.
3. 宮路祐一, 上原秀幸, 大平 孝, “エスパアンテナ搭載マルチホップ無線システムとアクセス制御,” 第4回センシングアーキテクト・シンポジウム, D-2, Oct. 2011.
4. Yuichi Miyaji, Hideyuki Uehara, and Takashi Ohira, “Performance evaluation of directional monitoring using smart antennas in ad hoc networks,” International Symposium on Electronics-Inspired Interdisciplinary Research, P-12, Toyohashi, Japan, Nov. 2010.
5. 宮路祐一, 上原秀幸, 大平 孝, “マルチパス環境における指向性 MAC プロトコルの評価,” 第3回センシングアーキテクト・シンポジウム, C-7, Oct. 2010.

6. 宮路祐一, 上原秀幸, 大平 孝, “室内環境における 3 素子エスパアンテナの干渉除去能力の評価,” 第 2 回センシングアーキテクト・シンポジウム, C-5, Sep. 2009.

展示会

1. ワイヤレス通信研究室, “エスパアンテナ搭載マルチホップ無線システムとアクセス制御,” Microwave Workshop & Exhibition 2011, Nov. 30-Dec. 2.
2. グローバル COE プログラム「インテリジェントセンシングのフロンティア」, “エスパアンテナ搭載マルチホップ無線システムとアクセス制御,” CEATEC JAPAN 2011, Oct. 4-5.
3. ワイヤレス通信研究室, “エスパアンテナ搭載マルチホップ無線システムとアクセス制御,” イノベーション・ジャパン 2011, Sep. 21-22.

受賞

1. 豊橋技術科学大学グローバル COE センシングアーキテクト特別賞, 2012 年 3 月.
2. 豊橋技術科学大学グローバル COE センシングアーキテクト優秀活動賞, 2011 年 3 月.
3. 豊橋技術科学大学グローバル COE センシングアーキテクトシンポジウム ADIST2010 最優秀ポスター発表賞, 2010 年 10 月.
4. 情報処理学会 DICOMO2010 優秀論文賞, 2010 年 8 月.
5. 情報処理学会 DICOMO2010 ヤングリサーチ賞, 2010 年 7 月.
6. 電子情報通信学会東海支部学生研究奨励賞, 2009 年 6 月.

助成

1. 豊橋技術科学大学グローバル COE プログラム若手研究者研究支援, “Construction of Multihop Wireless Networks Using ESPAR Antenna and USRP,” 助成金額 30 万円, 平成 23 年度, 研究代表者.

2. 豊橋技術科学大学グローバルCOEプログラムデモ/展示支援, “エスパアンテナ搭載マルチホップ無線システムとアクセス制御,” 助成金額 300 万円, 平成 22, 23 年度, 研究代表者.
3. 豊橋技術科学大学グローバル COE プログラム若手研究者研究支援, “Directional MAC Protocol and Its Application to Inter-Vehicle Communications,” 助成金額 30 万円, 平成 22 年度, 研究代表者.
4. 豊橋技術科学大学未来技術流動研究センター学生プロジェクト, “可変指向性アンテナを用いて無線リソースの有効利用を図るメディアアクセス制御方式に関する研究,” 助成金額 20 万円, 平成 20 年度, 研究代表者.