

推薦論文

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

宮路 祐一^{1,a)} 村中 裕貴¹ 古橋 彬¹ 上原 秀幸¹ 大平 孝¹

受付日 2011年6月30日, 採録日 2011年11月7日

概要: アドホックネットワークの MAC (Medium Access Control) プロトコルには IEEE 802.11 DCF に代表されるシングルチャネル MAC プロトコル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 MAC プロトコルが検討されている。しかし, マルチチャネル MAC プロトコル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。そこで本論文では, コードセンス機能を有する CDMA 型 MAC プロトコルを提案する。提案方式では, 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用いた拡散符号の選択によって, マルチチャネル隠れ端末問題を解決できる。また, 端末ごとに個別に NAV を設定する拡張 NAV によって短縮 NAV 問題を解決する。さらに, 提案方式は CDMA 型特有の遠近問題に対処するために, 送信抑制制御を行う。シミュレーションにより, IEEE 802.11 DCF ならびに他のマルチチャネル MAC に比べ, 衝突などを抑えスループットが向上することを示す。

キーワード: マルチチャネル MAC プロトコル, CDMA, コードセンス

Code Sense CDMA Type MAC Protocol for Ad Hoc Networks

YUICHI MIYAJI^{1,a)} HIROTAKA MURANAKA¹ AKIRA FURUHASHI¹
HIDEYUKI UEHARA¹ TAKASHI OHIRA¹

Received: June 30, 2011, Accepted: November 7, 2011

Abstract: IEEE 802.11 DCF as a typical single channel MAC protocol is widely used in ad hoc networks. Recently, FDMA and CDMA type multi-channel MAC protocols have been studied for further throughput improvement. However, the multi-channel hidden terminal problem (MHTP) and the short duration NAV problem occur by using multi-channel MAC protocols. In this paper, we propose a multi-channel MAC protocol using an interference cancellation and a code sense function. In our protocol, the MHTP is solved by selecting the appropriate spreading code using the code sense mechanism which can detect codes used in neighborhood. Additionally, the short duration NAV problem is solved by employing the extension NAV set individually in each terminal. Furthermore, our protocol conducts the transmission control to handle the near-far problem. Comparing the proposed scheme with IEEE 802.11 DCF and existing multi-channel MAC protocols by computer simulations, the results show that the proposed scheme can suppress the collision and it achieves higher throughput than other protocols.

Keywords: multi-channel MAC protocol, CDMA, code sense

¹ 豊橋技術科学大学電気・電子情報工学系
Department of Electrical and Electronic Information Engineering, Toyohashi University of Technology, Toyohashi, Aichi 441-8580, Japan

^{a)} miyaji@comm.ee.tut.ac.jp
本論文の内容は 2010 年 7 月のマルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2010) シンポジウムにて報告され, モバイルコンピューティングとユビキタス通信研究会主査により情報処理学会論文誌ジャーナルへの掲載が推薦された論文である。

1. はじめに

アドホックネットワークの MAC プロトコルには, 無線 LAN の標準規格である IEEE 802.11 DCF [1] に代表されるシングルチャネル MAC プロトコルが広く利用されている。しかし, 端末どうし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はいまだに根本的

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かか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) 型および CDMA (Code Division Multiple Access) 型のマルチチャネル MAC プロトコルが検討されている。通常マルチチャネル MAC プロトコルでは、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という問題がある。この問題はマルチチャネル隠れ端末問題 [2] と呼ばれる。単一送受信機を用いる FDMA 型のマルチチャネル MAC プロトコル [3], [4] において解決困難な問題である。また、マルチチャネル MAC プロトコルでは、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。マルチチャネル隠れ端末問題の解決法として、次に示す FDMA 型マルチチャネル MAC プロトコル [3], [5] が提案されている。DCA (Dynamic Channel Assignment) [5] は、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 2 機を搭載することで制御信号とデータ信号を同時に受信できる。これによりマルチチャネル隠れ端末問題を解決している。また文献 [3] では、単一送受信機のままで問題に対処するために協調ノードを利用し、自身の通信終了後に第三者が近隣の通信状況を通知する Active Recovery (AR) 方式が提案されている。CDMA 型マルチチャネル MAC プロトコルは同一周波数帯域を用いて多重通信を行うため、マルチチャネル隠れ端末問題の解決が可能となる。一方、CDMA 型では、FDMA 型の問題に加えて、CDMA 特有の問題である自律分散制御下における拡散符号割当てと遠近問題が課題となる。ここで、遠近問題とは、距離の近い端末からの受信電力が大きすぎて遠い端末からの信号を復調できないという問題である。遠近問題の解決法として、次に示す CDMA 型マルチチャネル MAC プロトコル [6], [7] が提案されている。CA-CDMA (Controlled Access CDMA) [6] は、送信電力制御によって遠近問題を解決しているが、送受信機を 2 機搭載することを前提としている。CCM-MAC (Cooperative CDMA-based Multi-channel MAC) [7] では、通信手順中に第三者から近隣の通信情報を収集し遠近問題による衝突を回避する方式が提案されている。

本論文では CDMA 型に着目し、複数送受信機や協調

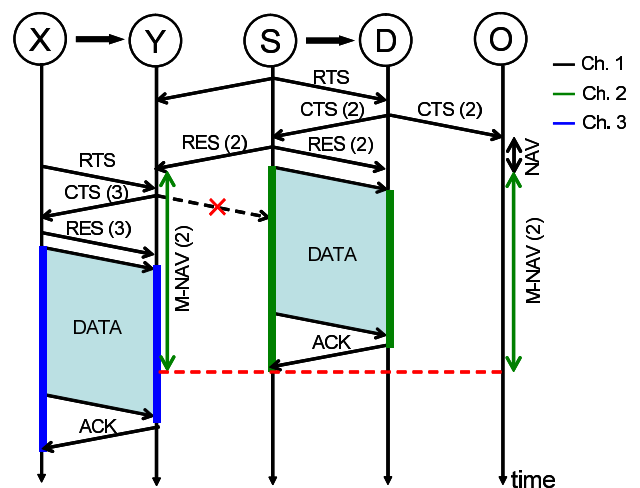


図 1 SMC-MAC プロトコルのタイムチャート例
Fig. 1 A time chart of SMC-MAC.

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ネル隠れ端末問題・短縮 NAV 問題、さらには自律分散制御下における拡散符号割当てと遠近問題を一挙に解決する CS-CDMA/TC (Code Sense CDMA with Transmission Control) MAC プロトコルを提案する。本論文では、計算機シミュレーションによって提案プロトコルの有効性を示す。

以下、2章でマルチチャネル MAC プロトコルとその問題点について述べる。3章で提案する MAC プロトコルについて説明する。4章では計算機シミュレーションによる評価を行う。最後に5章でまとめとする。

2. マルチチャネル MAC プロトコル

2.1 基準とするマルチチャネル MAC プロトコル

2.1.1 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ネル MAC プロトコルである。文献 [3] 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ネルを隣接端末に通知するために使用される。使用するデータチャ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 1 に示す。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

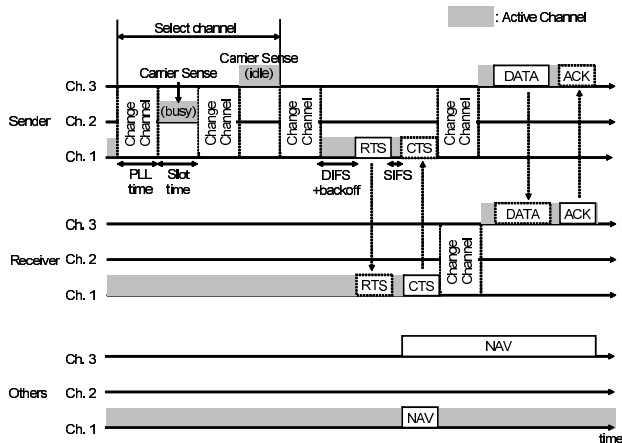


図 2 MC-MAC プロトコルのタイムチャート例
 Fig. 2 A time chart of MC-MAC.

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。

2.1.2 Multi-Channel MAC (MC-MAC)

MC-MAC は文献 [4] 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 MAC プロトコルである。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 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番号に同調し、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。

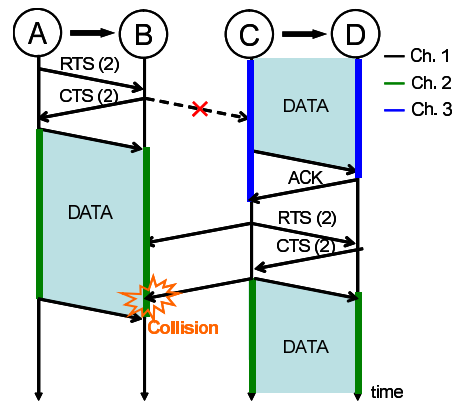


図 3 マルチチャンネル隠れ端末問題
 Fig. 3 Multi-channel hidden terminal problem.

2.2 マルチチャンネル MAC プロトコルの課題

ここでは、マルチチャンネル MAC プロトコルの問題点について説明する。

2.2.1 マルチチャンネル隠れ端末問題

マルチチャンネル MAC プロトコルは、物理キャリアセンスや仮想キャリアセンスなどのチャンネル情報を基にデータ伝送に用いる空きチャンネルを選択し、RTS/CTS 交換によりチャンネル予約および隣接端末への通信抑制を行う。しかしながら、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ン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ン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ン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 3 に示し、マルチチャン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ンネルの空きを確認し、隣接端末に使用されていないチャンネル 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ン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 がチャンネル 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 がチャンネル 2 を選択してしまった場合、フレームの衝突が発生する。

2.2.2 短縮 NAV 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、マルチチャンネル MAC プロトコルは、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。しかしながら、マルチホップ環境では、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い、制御チャンネルのトラヒック増加や送信タイミングを制御するランダム待ち時間であるバックオフ時間の増加、リンク誤切断による通信性能の低下を引き起こす。この問題を短縮 NAV 問題と呼ぶ。

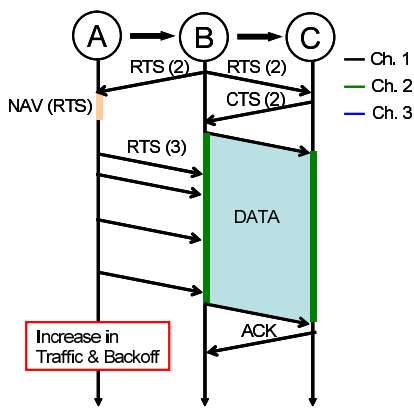


図 4 短縮 NAV 問題

Fig. 4 Short duration NAV problem.

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 4 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。

3. 提案方式 (CS-CDMA/TC MAC プロトコル)

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ネル MAC プロトコル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。

3.1 提案方式を実現する物理レイヤ

干渉制限チャネルである 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、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。次に干渉除去受信機とコードセンスの詳細を述べる。

3.1.1 干渉除去受信機

荒木ら [8] によって提案された干渉除去受信機を図 5、

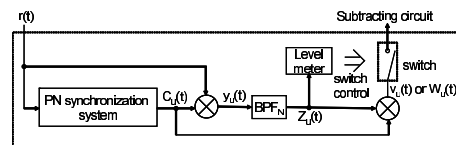


図 5 干渉除去受信機に含まれる基本回路

Fig. 5 Basic circuit included in interference canceller.

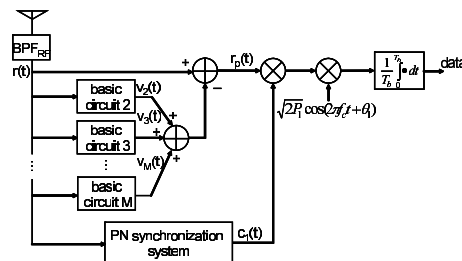


図 6 干渉除去受信機

Fig. 6 Interference canceller.

図 6 に示し、その概要を説明する。本来受信側において、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 同期回路を用いることによって、同期点を検知できる。本受信機は、図 5 に示す基本回路に含まれる 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 6 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すべ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 [8] 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 [8] を参照されたい。

3.1.2 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 5 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中または待機中の

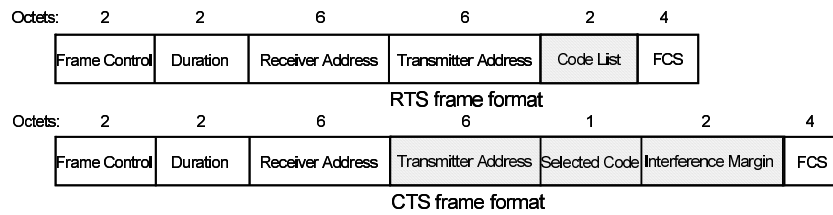


図 7 RTS/CTS フレーム構成
 Fig. 7 Frame structure of modified RTS/CTS.

場合に動作し続ける。

3.2 提案方式を実現する MAC レイヤ

MAC レイヤでは、マルチチャ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 [9] 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。図 7 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・許容干渉電力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。次に、提案方式を実現する各機能について説明する。

3.2.1 拡散符号管理テーブル

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中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。拡散符号割当ての詳細は、3.2.5 項の (4), (7) に示す。

3.2.2 拡張 NAV

提案方式では、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。

3.2.3 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

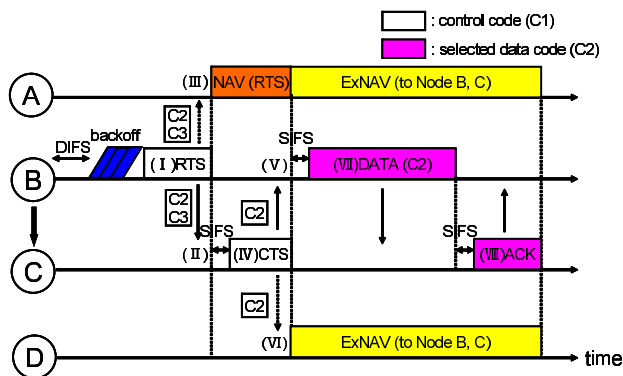


図 8 提案方式のタイムチャート例
Fig. 8 A time chart of proposed protocol.

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。

3.2.4 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。一方、提案方式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では、制御コードが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場合でも、フリーのデータコードが存在しない場合は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。

3.2.5 提案プロトコルの通信手順

図 8 に提案方式のタイムチャート例を示し、提案プロトコル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ただちに手順 (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 (C₂, C₃)。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 8 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、自分あてか否かを判断する。

(a) 自分あてであることを確認した端末 C は手順 (6) に進む。

(図 8 の (II))

(b) 自分あて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 8 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ただちに手順 (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 (C₂)。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 8 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、自分あてか否かを判断する。

(a) 自分あてであることを確認した端末 B は手順 (9) に進む。

(図 8 の (V))

(b) 自分あて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。

(図 8 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 8 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 8 の (VIII))

(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。

4. 計算機シミュレーション

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 [10] を使用し、提案方式である CS-CDMA/TC とシングルチャネル MAC の IEEE 802.11 DCF, FDMA 型のマルチチャネル MAC プロトコルの SMC-MAC および MC-MAC, CDMA 型のマルチチャネル MAC プロトコルの CS-CDMA について比較を行う。シミュレーション諸元を表 1 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 つの独立したチャネルが得られることより SMC-MAC と MC-MAC のチャネル数を 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。

表 1 シミュレーション諸元

Table 1 Simulation parameters.

Simulation time, Repeat	200 sec, 10 times
Packet arrival rate	Poisson process
Data packet size	1,460 bytes
Radio propagation model	Two-ray ground
Bandwidth	2 Mbps
Tx power	10 dBm
Cs threshold (Cs range)	-91 dBm (430 m)
Rx threshold (Rx range)	-81 dBm (230 m)

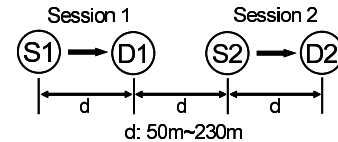


図 9 シミュレーショントポロジ 1

Fig. 9 Simulation topology 1.

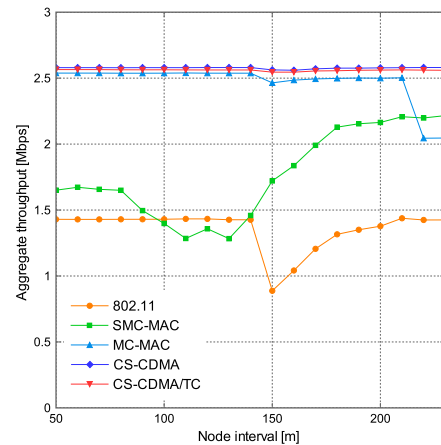


図 10 合計スループット特性

Fig. 10 Aggregate throughput.

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。

4.2.1 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プロトコルの通信性能を評価する。図 9 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 50 m から 230 m 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 10 に各プロトコル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 150 m 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ンネルは 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ンネル選択を行うためにマルチチャン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 220 m 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 はチャン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際にはチャンネルの使用状況が変わってしまうことやチャンネル選択時に受信側を考慮していないことから、マルチチャンネル隠れ端末問題が発生してしまうことがあげられる。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ン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。

4.2.2 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プロトコルの通信性能を評価する。図 11 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 200 m で固定とする。パケット発生率は 30 [packets/sec] とする。

図 12 に 1 セッションの直線トポロジにおける各プロト

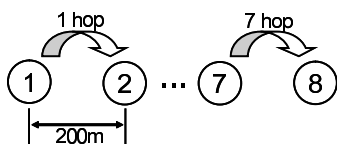


図 11 シミュレーショントポロジ 2
Fig. 11 Simulation topology 2.

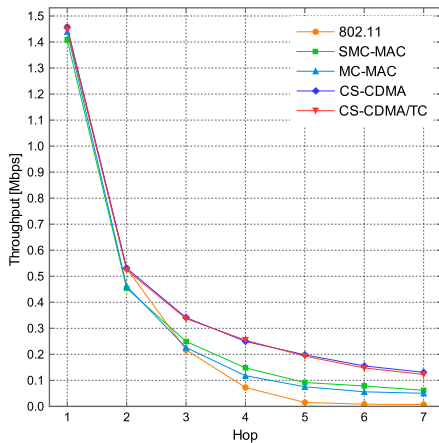


図 12 ホップ数対スループット特性
Fig. 12 Throughput vs. hop.

コルのスループット特性を示す。図 12 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、マルチチャンネル MAC プロトコルでは NAV を短く設定することで同時通信を実現していたために、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 ホップ時においては、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されている。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。

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プロトコルの通信性能を評価する。

4.3.1 シングルホップ環境下における評価

1,500 × 1,500 [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。各々の送信端末のパケット発生率を変化させたときの合計スループット特性と MAC 層におけるパケット損失率を評価する。

図 13 に各プロトコルの合計スループット特性を、図 14 に MAC 層におけるパケット損失率を示す。図 13、図 14 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ンネルバックオフの効果によって、すべてのパケット発生率においてスループット特性およびパケット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-

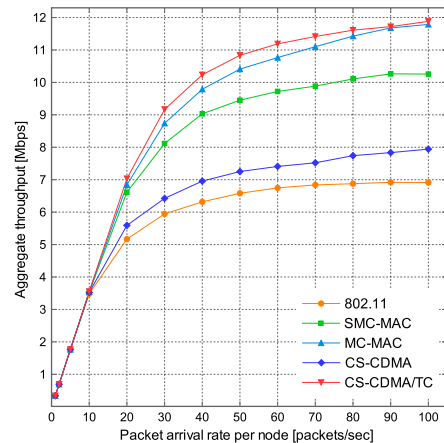


図 13 合計スループット特性
Fig. 13 Aggregate throughput.

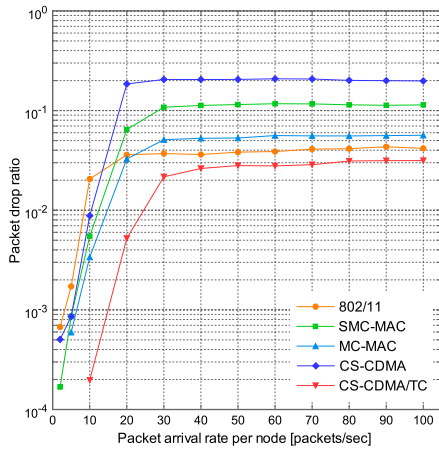


図 14 MAC 層におけるパケット損失率
Fig. 14 Packet drop ratio in MAC Layer.

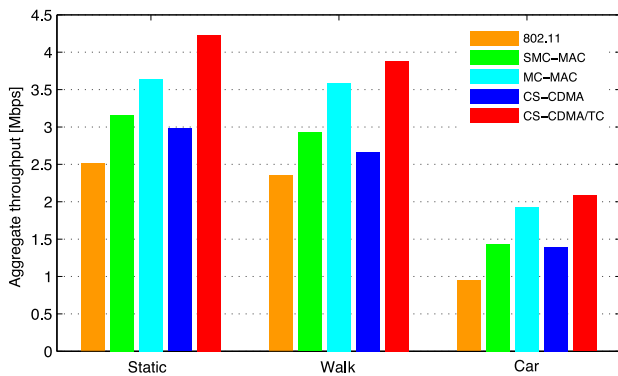


図 15 各モビリティにおける合計スループット特性
Fig. 15 Aggregate throughput vs. mobility type.

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. パケット損失率は 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.

4.3.2 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, $1,500 \times 1,500 [m^2]$ 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 $30 [packets/sec]$ 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. ルーティングプロトコルには AODV [11] を用いる.

図 15 に各プロトコルの合計スループット特性を示す. 提案方式はすべ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, 移動のともな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.

5. むすび

本論文では, 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 プロトコルを提案した. それぞれの問題が発生するトポロジを用いて提案プロトコル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させることを示した. 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. 移動をともなう環境においても, 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 MAC プロトコルを実機実装し, フィールド実験による性能評価があげられる.

謝辞 本研究の一部は, 文部科学省グローバル 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」, トヨタ車体株式会社研究助成金, 財団法人矢崎科学技術振興記念財団, 財団法人国際コミュニケーション基金 (現 KDDI 財団) の援助により行われた. 関係者各位に深謝する.

参考文献

- [1] IEEE Std 802.11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications (2007).
- [2] So, J. and Vaidya, N.: Multi-Channel MAC for Ad Hoc Networks: Handling Multi-Channel Hidden Terminals Using A Single Transceiver, *Proc. ACM Mobile Ad Hoc Networking and Computing*, pp.222-233 (2004).
- [3] 三賢 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, 情報処理学会 MBL 研報, Vol.2008, No.44, pp.129-134 (2008).
- [4] Kobayashi, T.: TCP Performance over IEEE802.11 Based Multichannel MAC Protocol for Mobile Ad Hoc Networks, *IEICE Trans. Commun.*, Vol.E86-B, No.4, pp.1307-1316 (2003).
- [5] Wu, S.-L., Lin, C.-Y., Tseng, Y.-C. and Sheu, J.-P.: A New Multi-Channel MAC Protocol with On-Demand Channel Assignment for Multi-Hop Mobile Ad Hoc Net-

works, *Proc. International Symposium on Parallel Architectures*, pp.232-237 (2000).

- [6] Muqattash, A. and Krunz, M.: CDMA-based MAC protocol for wireless ad hoc networks, *Proc. ACM Mobile Ad Hoc Networking and Computing*, pp.153-164 (2003).
- [7] Moon, Y. and Syrotiuk, V.: A cooperative CDMA-based multi-channel MAC protocol for mobile ad-hoc networks, *Elsevier Journal of Computer Communications*, Vol.32, No.4, pp.1810-1819 (2009).
- [8] 荒木真里子, ヘッティアラッチランガ, 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, 電子情報通信学会論文誌 A, Vol.J90-A, No.3, pp.217-227 (2003).
- [9] 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干渉除去とコードセンス機能を有する CDMA 型 MAC プロトコルの特性評価, 電子情報通信学会 AN 技報, Vol.108, pp.59-64 (2007).
- [10] Scalable Network Technologies: QualNet 3.9.5, available from (<http://www.scalablenetworks.com/>) (accessed 2011-11-16).
- [11] Perkins, C. and Royer, E.: Ad hoc on-demand distance vector (AODV) routing, *Proc. IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications*, pp.90-100 (1999).

推薦文

本論文では, マルチチャネル隠れ端末問題と短縮 NAV 問題というマルチチャネル MAC プロトコルにおける重要な問題を解決するために, コードセンス CDMA 型 MAC プロトコルを提案している. 提案方式では, 近隣端末の拡散符号を検知するコードセンス機能を用いて使用する拡散符号方式を選択することでマルチチャネル隠れ端末問題を解決し, 端末ごとに NAV を設定する拡張 NAV によって短縮 NAV 問題を解決している. 新しいアプローチで問題を解決しており, 価値が高い. また, シミュレーション評価により大規模ネットワークでも有効であることを明らかにしており, 実環境への応用が期待できる. 関連分野への貢献が非常に大きく, ここに研究会推薦論文として推薦する.

(モバイルコンピューティングとユビキタス通信研究会
主査 竹下 敦)



宮路 祐一

平成 19 年豊橋技術科学大学工学部情報工学科卒業. 平成 21 年同大学大学院修士課程修了. 現在, 同大学院博士課程在学中. 平成 20 年電子情報通信学会東海支部学生研究奨励賞受賞. 平成 22 年本会 DICOMO2010 ヤングリ

サーチャ賞, 優秀論文賞受賞. 主として, アドホックネットワークに関する研究に従事. 電子情報通信学会, IEEE 各会員.



村中 裕貴

平成 20 年豊橋技術科学大学工学部情報工学科卒業. 平成 22 年同大学大学院修士課程修了. 同年 DeNA 入社. 在学中, アドホックネットワークに関する研究に従事.



古橋 彬

平成 17 年豊橋技術科学大学工学部情報工学科卒業. 平成 19 年同大学大学院修士課程修了. 同年 NTT ドコモ関西入社. 在学中, アドホックネットワークに関する研究に従事.



上原 秀幸 (正会員)

平成 4 年慶應義塾大学理工学部電気工学科卒業. 平成 9 年同大学大学院博士課程修了. 同年豊橋技術科学大学工学部情報工学系助手. 平成 14 年同講師. 平成 16 年同助教授. 平成 18 年同大学未来ピークルリサーチセンター助教授, 平成 19 年同准教授, 現在, 同大学大学院電気・電子情報工学系准教授. 平成 14~15 年 ATR 適応コミュニケーション研究所客員研究員. 主として, 無線アクセス方式, マルチホップ通信の研究に従事. 電子情報通信学会, IEEE 各会員. 平成 14 年, 平成 18 年, 平成 23 年電子情報通信学会・通信ソサイエティ活動功労賞受賞.



大平 孝

昭和 53 年大阪大学工学部通信工学科卒業. 昭和 58 年同大学大学院博士課程修了. NTT にて衛星搭載 GaAs MMIC の設計を担当. ATR にてエスパアンテナの研究に従事. 平成 17 年 ATR 波動工学研究所長. 現在, 豊橋技術科学大学大学院電気・電子情報工学系教授. 昭和 61 年電子情報通信学会篠原賞. 平成 10 年 APMC Japan Microwave Prize. 平成 16 年電子情報通信学会エレクトロニクス賞. 電気学会ミリ波調査専門委員長. URSI Commission C Chair. IEEE MTT-S Kansai Chapter Founder, Nagoya Chapter Founder. 工学博士. IEEE Fellow.