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

渡	辺	正		² 萬	代	雅	希 ^{†3}
小	花	貞	夫 $^{\dagger 1}$	渡	辺		尚 $^{\dagger 4}$

無線アドホックネットワークのメディアアクセス制御(MAC: Medium Access Control) プロト コルの研究においては,アンテナのビーム形状や電波伝搬モデルを理想的に仮定してシミュレーショ ンにより評価することが多い.しかし,実環境での運用を視野に入れて,実際のアンテナのビーム形 状,無線装置の固有の特性,実空間の電波伝搬による影響を考慮しなければならない.そこで,本研 究では,指向性 MAC プロトコルの実環境での性能を評価するための MAC プロトコルテストベッド を開発することとする.本テストベッドは,実際のスマートアンテナとして ESPAR (Electronically Steerable Parasitic Array Radiator)アンテナ,無線装置として IEEE802.15.4 規格の ZigBee チッ プをベースとして用い,位置情報取得装置として GPS およびジャイロを搭載している.そして,指向 性ビームを用いた MAC プロトコルとして SWAMP (Smart antenna based Wider range Access MAC Protocol)方式を実装して実験を行い,実環境において評価する.評価の結果,SWAMPでは 実際のスマートアンテナを利用することによって空間分割多重効果が約4倍に,また,指向性ビーム の高利得により,無指向性ビームとの利得差から通信距離が2倍以上に延びる効果があることを示す.

A Testbed for Directional MAC Protocols Using a Practice Smart Antenna and Empirical Discussion

MASAHIRO WATANABE, $^{\dagger 1, \dagger 2}$ MASAKI BANDAI, $^{\dagger 3}$ SADAO Obana $^{\dagger 1}$ and Takashi Watanabe $^{\dagger 4}$

Recent studies on directional media access protocols (MACs) using smart antennas for wireless ad hoc networks have shown that directional MACs outperform against traditional omini-directional MACs. Those studies evaluate the performance mainly on simulations, where antenna beam is assumed to be ideal, i.e., with neither side-lobes nor back-lobes. However, for the real application of ad hoc networks those optimistic assumptions do not hold anytime. In this paper, we develop at first a testbed for directional MAC protocols which enables to investigate performance of MAC protocols in the real environment. It incorporates ESPAR (Electronically Steerable Parasitic Array Radiator) as a practical smart antenna, IEEE802.15.4/ZigBee, GPS and gyro modules to allow easy installment of different MAC protocols. To our knowledge, it is the first compact testbed with a practical smart antenna for directional MACs. We implement a directional MAC protocol called SWAMP (Smart antenna based Wider range Access MAC Protocol) to evaluate it in the real environment. The empirical discussion based on the experimental results shows that the degradation of the protocol with ideal antennas, and that the protocol still achieves the SDMA four times effective of spatial reuse and two times effective of communication range extension compared with using omni-directional beam.

- †1 株式会社国際電気通信基礎技術研究所(ATR)適応コミュニケー ション研究所
- ATR Adaptive Communications Research Laboratories †2 三菱電機株式会社先端技術総合研究所
 - Mitsubishi Electric Corporation Advanced Technology R&D Center
- †3 静岡大学情報学部 Faculty of Information, Shizuoka University
- †4 静岡大学創造科学技術大学院 Graduate school of Science and Technology, Shizuoka University

1. はじめに

無線アドホックネットワークは,特定の固定インフ ラを必要とせずにその場で端末だけで構築できるため 災害時等に有効とされ,近年さかんに研究がなされて いる.その一分野として,アンテナのビーム形状を適 応的に制御する指向性メディアアクセス制御(指向性 MAC)プロトコルの研究がある^{1)~8)}.指向性 MAC プロトコルは,データ通信の手順や状況に応じてアン テナのビーム形状を変化させ,周辺端末との干渉を抑 制して空間利用効率を上げることにより,遅延時間の 低減やネットワーク全体のスループットの向上等の効 果が期待できる.指向性 MAC プロトコルに関する研 究では,アンテナのビーム形状や電波伝搬モデルを理 想的に仮定してシミュレーションにより評価すること が多い.しかし,実環境での運用を視野に入れて,実 際のアンテナのビーム形状,無線装置の固有の特性, 実空間の電波伝搬による影響を考慮しなければなら ない.

そこで,本研究では,指向性 MAC プロトコルの実 環境での性能を評価するためのテストベッドを開発す ることとする.テストベッドを開発するにあたり,ア ンテナのビーム形状を制御できる装置として ESPAR (Electronically Steerable Parasitic Array Radiator) アンテナ⁹⁾を用い,無線装置としては内部のハードウェ ア制御に係わる情報が公開されている IEEE802.15.4 規格の ZigBee チップ¹⁰⁾ をベースとして用いる.また, 多くの指向性 MAC プロトコルが位置情報を利用する ので, GPS (Global Positioning System)を搭載し て端末の位置を把握する.さらに,ジャイロを搭載し て水平方向の変動した角度情報を得ることにより,所 定の指向性ビームに対して角度の補正を行うものとす る.そして,指向性 MAC プロトコルとして SWAMP (Smart antenna based Wider range Access MAC Protocol)¹¹⁾ の実装を行い実環境において実証評価を 行う.テストベッド4台で,アンテナのビーム形状と して無指向性ビームや指向性ビームを切り替えた場 合の空間分割多重 (SDMA: Space Division Multiple Access) 効果について評価する. また, テストベッド 3台で,遠距離端末の位置情報転送と指向性ビームの 高利得により通信距離の延伸化結果についても評価 する.

2. テストベッド

指向性 MAC プロトコルを実装して実環境にて実証 評価するためのテストベッドとしての要求条件として 以下のことが考えられる.

- 指向性 MAC プロトコルの実装が容易であること.
- さまざまな指向性 MAC プロトコルを実装できる こと.
- デバイスの入手性が良く安価であること.

これらに対する設計方針として,まず,実装を容易 とするためには,特別な無線装置のハードウェアの知 識なしにプログラミングできることが望ましい.たと えば,計算機シミュレータに指向性 MAC プロトコル を実装するように,無線装置のハードウェアを意識せ ずにプログラミグできる環境が求められる.そこで, 汎用的なプログラミング言語(C言語)を利用して, 無線装置のハードウェアを制御する部分をライブラリ として用意することにより,無線装置のハードウェア に関する部分を隠蔽し,意識せずにプログラミングす ることが可能となる.また,指向性 MAC プロトコ ルのプログラムはマイコンに実装して実行するので, 計算機上でのデバッグ作業のように動作を随時確認す ることが難しくなる.これは,実際に通信実験を行う 際にもあてはまる.デバッグを行いやすい環境や,計 測作業やデータ収集が容易で,結果の集計も解析しや すい環境が必要である.そこで,そのための環境とし ては, PCを用意し, マイコンからデバッグ用の文字 列をシリアル通信によって PC 側へ送信して表示さ せる.また,通信でやりとりされるパケットをモニタ して PC 側へ表示させる仕組みを設けることにより, デバッグや計測および解析を容易にすることが可能と なる.

次に,指向性 MAC プロトコルの研究では,位置情 報や指向性ビームによる通信や送信電力制御等を利用 したプロトコルの開発が行われている.多様なプロト コルを実装して実環境で実証評価していくために,テ ストベッドの構成品として,GPS やジャイロ,指向 性ビームを制御できるアンテナ,ハードウェア制御に 係わる情報が公開されている無線装置,および,可変 減衰器等を搭載し,必要に応じてマイコンから情報の 参照や設定を行う.これにより,GPS やジャイロの情 報を利用し,指向性ビームの制御や電力制御を行う指 向性 MAC プロトコルへの対応が可能となる.

そして, テストベットの構成品として, まず, GPS やジャイロはメーカより汎用品で多数あり, 安価で小 型のものが利用可能である.アンテナと無線装置は機 能を満たし,入手できるものとして, ESPAR アンテ ナと IEEE802.15.4 規格の ZigBee チップが利用可能 である.これらの機能の詳細とテストベッドの全体構 成について,次より説明を行う.

2.1 ESPAR アンテナ

指向性 MAC プロトコルを実装評価するためのテス トベッドで用いるアンテナとして,アンテナのビーム 形状を無指向性や指向性に制御することができる ES-PAR アンテナ⁹⁾を用いることとする.図1にESPAR アンテナの構造を示す.今回用いている7素子タイプ のESPAR アンテナでは,給電素子が中央の1本のみ で,その周りに6本の無給電素子が円周上に等間隔で 配置されている.無給電素子には可変容量ダイオード であるバラクタがそれぞれ装荷され,それらを DC 電





圧により逆バイアスで印加し,それぞれの DC 電圧の 値を制御することにより,各素子のバラクタのリアク タンス値を変化させ,アンテナのビーム形状として無 指向性や指向性に制御可能である.指向性のビームに おいては 30°ごとの12方向のうち任意の方向に設定 することが可能である.

アンテナのビームを制御する装置としては,機械的 にビームを切り替える方法はあるが,駆動用モータ部 が必要となる.また,ステップ的に切り替える場合は スイッチング回路部が必要となってしまう.フェーズ ドアレーで電子的にビームを切り替える方法では複 数の移相器が必要であり, PIN ダイオードや FET を 用いるために消費電力が大きくなってしまう.DBF (Digital Beam Forming)方式では, 各アンテナ素子 の受信信号をすべて用いて最適な重み付け係数を低周 波のディジタル回路で演算するため,高速にビーム形 成ができるが,アンテナ素子系統ごとにRF受信機が 必要となってしまう.これらを考慮すると, ESPAR アンテナは,給電素子が1系統で構成が簡素であり, 電気部品はバラクタダオードだけで逆バイアス条件か らも低消費電力であり,バッテリ駆動が必要な携帯端 末への親和性が高いという特徴があり採用することと する.

2.2 IEEE802.15.4/ZigBee チップ

指向性 MAC プロトコルを実装評価するためのテス トベッドで用いる無線装置として,さまざまな指向性 MAC プロトコルを実装することを想定して,無線装置 内部のハードウェア制御に係わる情報が公開されて利 用可能であることが必要である.また,ドライバソフト ウェアが公開されていれば,これをベースとした変更 設計は比較的容易となる.しかし,IEEE802.11a/b/g

表1 ZigBee チップ: Chipcon-CC2420 Table 1 ZigBee chip: Chipcon-CC2420.

No.	項目	諸元
1	送信電力	1 mW
2	変調方式	offset-QPSK
3	拡散方式	DS-SS
4	拡散速度	2Mcps

の無線 LAN については,現在もチップメーカとの特 別な契約なしでは,実装されているドライバソウト ウェアや無線装置内部のハードウェア制御に係わる情 報は非公開の部分が多く,さまざまな指向性 MAC プ ロトコルを実装して評価しようとするテストベッド 用の無線モジュールとしては実装段階で障害となって しまう.IEEE502.15.4 規格の ZigBee チップ¹⁰⁾は, 国際標準規格として物理層や MAC 層を規定してお リ,一般に公開されている.さらに, $ZigBee^{TM \ 12)}$ は ZigBee Alliance にて,ネットワーク層やアプリケー ション層の規格化を行っている.IEEE502.15.4 規格の ZigBee チップの伝送速度は 250 Kbps と, 無線 LAN に比べて低速だが,さまざまな指向性 MAC プロト コルを実装して評価することが可能であり,省電力 で安価でもあることからこれを採用することとする. 今回採用した IEEE502.15.4 規格の ZigBee チップは Chipcon-CC2420¹³⁾である.表1に主要諸元を示す.

指向性 MAC プロトコルはテストベッドのマイコン のプログラムを書き替えることで容易に変更可能であ り,無線装置のハードウェア制御に係わる部分はプロ グラムのライブラリとして提供するものとする.ライ ブラリには,キャリアセンス,アンテナのビーム制御, 送信電力制御,タイマカウント等を用意している.ラ イブラリによって,設計者は,メモリマップや無線装 置のハードウェア制御を意識することがなく実装する ことができる.なかでも,送信電力制御については, 29 段階の制御で25 dBのダイナミックレンジ(送信電 力値として -25 dBm~0 dBm)を有しており,アン テナのビーム形状として無指向性ビームや指向性ビー ムにおける利得差を考慮する場合に有効な機能となる.

指向性 MAC プロトコルはテストベッドのマイコン のプログラムを書き替えることで容易に変更可能であ り,無線装置のハードウェア制御に係わる部分はプロ グラムのライブラリとして提供するものとする.ライ プラリには,キャリアセンス,アンテナのビーム制御, 送信電力制御,タイマカウント等を用意している.ラ イブラリによって,設計者は,メモリマップや無線装 置のハードウェア制御を意識することなく実装するこ とができる.なかでも,送信電力制御については,29



図 2 テストベッドのブロック図 Fig. 2 Block diagram of Ad hoc testbed.



図 3 テストベッド外観図 Fig. 3 Overview of Ad hoc testbed.

段階の制御で 25 dB のダイナミックレンジ(送信電力 値として -25 dBm~0 dBm)を有しており,アンテ ナのビーム形状として無指向性ビームや指向性ビーム における利得差を考慮する場合に有効な機能となる. 2.3 全体構成

テストベッドの構成は,データ発生やログ収集を行 うPC部を中心に,MACプロトコルを実装する無線 モジュール部と,GPS受信機やジャイロを有する位置・ 方位測定部をUSBで接続する.また,無線モジュー ル部および位置・方位測定部には,それぞれESPAR アンテナとGPSアンテナを接続する.ESPARアン テナの指向性ビーム制御については,GPSから端末の 位置を把握し,ジャイロによって水平方向の変動した 角度情報を得ることにより,所定の指向性ビームに対 して角度の補正を行うものとする.ブロック図を図2, 外観を図3に示す.

MAC 層においては, ZigBee MAC のデータフレー ムのペイロードに指向性 MAC プロトコルの MAC フ レーム (データフレームまたは制御フレーム)を格納 し送信することとする. ZigBee MAC の制御フレー



図 4 評価対象の指向性 MAC プロトコルのフレーム構成

Fig. 4 Configuration of MAC Frame (control frame or data frame) for evaluated Directional MAC protocol.



ムである ACK やビーコンのフレームは指向性 MAC プロトコルの実装化のために用いないこととする.評 価対象として実装する指向性 MAC プロトコルのフ レーム構成について図4に示す.フレームの最大ペイ ロードサイズは,ZigBeeの MAC フレームと同じく 128 bytes である.これを超えるサイズのデータを送 信する場合はデータフレームを連続送信することで対 応するものとする.

最小受信感度(Smin)について、2つのテストベッドを用いて、ZigBee チップの送受信用のRF端子から同軸ケーブルと校正された可変減衰器を用いて接続し、外部からのフェージングの影響のない状態で計測を行った.RSSI(Received Signal Strength Indicator)の値に応じて100バイトのデータを500回送受信してエラーレートを計測した結果、Smin = $-92 \, dBm \ casebox casebo$

3. SWAMP プロトコル

SWAMP¹¹⁾は IEEE802.11DCF¹⁴⁾をベースとし, スマートアンテナによる可変指向性ビームを適用した アドホックネットワーク MAC プロトコルであり,シ ミュレーションによる評価では, IEEE802.11 に比べ てスループットが約3倍に向上するという結果が得られている.下記にSWAMPの特徴を示す.

- アクセスモードとして, OC-mode (Omni-directional transmission range Communication mode)と, EC-mode (Extended omni-directional transmission range Communication mode)を設けて,送信元端末と送信先端末の位置に応じて選択して使用する.
- OC-mode では,無指向性ビームとアンテナ利得が同等の指向性ビームを使用することで,無指向性ビームを使用することで,無指向性ビームどうしで通信する場合に比べて,空間利用効率を向上させる.また,送信元端末と送信先端末それぞれから,相手を除く1ホップ以内の端末の位置情報を交換し,NHDI(Next Hop Direction Information)に登録する.この情報はEC-mode で利用する.
- EC-modeでは,OC-modeで得た無指向性ビーム で2ホップ先に位置する端末の位置情報:NHDI (Next Hop Direction Information)から,この情 報と高利得な指向性ビームにより,無指向性ビー ムどうしで通信する場合に比べて,2倍に通信距 離を延伸化する.
- IEEE802.11DCF で定義された NAV (Network Allocation Vector)よりも短い時間の omni-NAV を導入し,仮想キャリアセンスによる通信延期時 間を短縮化する.
- 3.1 アンテナモデル

SWAMP で用いる 4 種類 (無指向性ビームと,利 得の異なる 3 種類の指向性ビーム)のアンテナモデル を図 6 に示す.図中,左側が送信時のビーム形状,右 側が受信時のビーム形状を表し,送信側のビームと受 信側のビームが重なったときに受信信号の復調に十分 な受信電力が得られていることを示している.指向性 ビームは,任意の方向へ制御できるものとし,d は無 指向性ビームでの最大通信距離であり通信距離の基準 とする.図中のビームフォームについて次に示す.

- 無指向性ビームフォーム OB (Omni-directional Beam form)全方位に対してアンテナ利得 G₀.
 同アンテナ対抗により距離 d での通信が可能.
- 指向性ビームフォーム DL (Directional Low gain beam form) ビーム幅 α. 全方位に対してアンテ ナ利得 G₀. 同アンテナ対抗により距離 d での通 信が可能.
- 指向性ビームフォーム DM (Directional Middle gain beam form) ビーム幅 β. 全方位に対して アンテナ利得 G_m(> G₀). 同アンテナ対抗により



図 7 端末のレイアウト(OC-mode) Fig.7 Layout (OC-mode).

距離2dでの通信が可能.

指向性ビームフォーム DH (Directional High gain beam form)ビーム幅 γ. 全方位に対してアンテナ利得 G_H(> G_m).アンテナ利得 G₀ との対抗により距離 d での通信が可能.

ー般的にアンテナビームの指向性は,ビーム幅を狭 くするほど電力が集中されて利得が高くなる性質を 持っているので,ビーム幅は, $\alpha \ge \beta \ge \gamma$ となる.

ビームフォームの OB および DL は OC-mode の空 間分割効果用で,ビームフォームの DM および DH は EC-mode の延伸化通信用のものである.

3.2 OC-mode

OC-mode は,宛先端末が無指向性ビームによる通 信可能な範囲以内に存在する場合や,位置が分からな い場合に用いられる.図7に端末のレイアウト,図8 にOC-modeのフレームシーケンスとフレーム送信で 用いるビーム形状について示す.送信元を端末B,送 信先を端末Cとし,端末Bと端末Cはアンテナの







Fig. 9 SOF and omni-NAV.

指向性制御に必要な通信相手の位置情報を,無指向性 ビームを用いて RTS/CTS のフレームに GPS から得 た位置情報を反映して交換することにより取得する. さらに,これによって得られた通信相手の位置情報を, さらに近隣の端末へ配布する.たとえば,端末Cは, 端末 B からの RTS の受信により端末 B の位置情報 を得て, CTS により近隣端末の端末 D へ端末 B およ び端末 C 自身の位置情報を送信する.また,端末 B は,端末 C からの CTS の受信により端末 C の位置 情報を得て, SOF (Start Of Frame)により近隣端末 の端末 А へ端末 С および端末 В 自身の位置情報を送 信する.これにより,近隣端末の端末 A および端末 Dは,無指向性ビームによる通信範囲外の,それぞれ 端末 C および端末 B の位置情報を取得して,各々の 2 ホップ先の通信相手を示す NHDI テーブルに付加す ることにより,次の EC-mode による通信可能な距離 を延伸化するときに利用される.また,SOF 受信後 は, RTS/CTS で取得した GPS からの位置情報をも とに,端末Bおよび端末Cで指向性ビーム(DL)を 互いに相手方向へ向けて DATA/ACK による通信を 行う.

このとき,DATA/ACK の指向性ビーム(DL)が 理想的なビーム形状で,相手方向以外にアンテナ利得 が存在しなければ,端末Aや端末Dは,端末Bと端 末Cの間の通信と干渉することはない.したがって, 図9に示すように,omni-NAV(Network Allocation Vector)完了後には,端末Aや端末Dは通信を再開す ることができる.その結果,従来のIEEE802.11DCF による規定よりも,通信延期期間を短縮することがで



図 10 端末のレイアウト(EC-mode) Fig. 10 Layout (EC-mode).





き,空間利用効率の向上・同時通信数の増加を期待す ることができる.しかし,指向性ビーム(DL)が理 想的なビーム形状ではなく,相手方向以外にもアンテ ナ利得が存在すれば,その強度に応じて,端末Aや 端末Dは端末Bと端末Cの間の通信と干渉する機会 が増えてしまう.よって,実際には,使用するアンテ ナの指向性ビームにおいて,通信したい相手方向以外 のアンテナ利得の存在を把握し,これによる干渉の影 響を考慮する必要がある.

3.3 EC-mode

EC-modeは,宛先端末が無指向性ビームによる通 信可能な範囲外に存在し,お互いにNHDI取得済みの 端末間での通信に用いられる.図10に端末のレイア ウト,図11にEC-modeのフレームシーケンスとフ レーム送信で用いるビーム形状について示す.送信元 を端末Aとし以前取得したNHDIテーブルから送信 先の端末Cの方向を算出して指向性ビームを形成して RTSを送信する.各端末はアイドル状態のとき,無指 向性ビーム(OB)で待機しているので,EC-modeで 通信を要求するRTSフレームは最も高利得な指向性 ビーム(DH)を用いる.その後の通信は,送受信と もに次に利得の高い指向性ビーム(DM)を相手方向 へ向け合って行われる.また,端末Bと端末Cが無指 向性ビーム(OB)による RTS/CTS を行っている間 は,近隣端末の端末A は端末Bの方向に対して,端末 D は端末Cの方向に対してのみ DNAV(Directional Network Allocation Vector)を設定して通信を行わ ず,DNAV が設定されていない方向の端末に対して は通信を開始することができる.

このように, EC-mode は, 以前行われた OC-mode による通信によって, 近隣端末間で取得した NHDI テーブルをもとに,全フレームに対して指向性ビーム (DM または DH)を用いている.したがって, ECmode の通信範囲は無指向性ビーム(OB)を用いたと きに比べて延伸化することができる.また,スマート アンテナを考慮した他のプロトコルと同様に,位置情 報の鮮度を把握することが重要である.よって,実際 には,移動端末を有するネットワークにおいて,端末 の移動速度や方向等を把握し,これによる NHDI テー ブルの TTL 値の設定方法を考慮する必要がある.

4. 基礎実験

(1) アンテナ利得

ESPAR アンテナのアンテナ利得を求める.そこで, 電波暗室内でターンテーブル上に ESPAR アンテナを 配置し,水平面で回転させながら対抗方向からの信号 を受信したときのレベルを測定する.次に,ESPAR アンテナを,校正済みのアンテナ利得が判明している 標準アンテナへ置き換えて,同様の測定を行い,受信 信号レベルの差から ESPAR アンテナの利得を算出す ることとする.置換用の標準アンテナは,MA5612B4 (アンリツ製)でアンテナ利得は2dBiであり,図12 に ESPAR アンテナを設置し, 指向性ビームにおける 受信信号レベルの実測値を示す.図12より, ESPAR アンテナの最大受信レベルは -23 dBm であり,標準 アンテナの最大受信レベルは -27 dBm であったので, この 4 dB の差を考慮して ESPAR アンテナの指向性 ビームのアンテナ利得は $6 \, dBi (= 2 \, dBi + 4 \, dB)$ とす る.また,図12より,それぞれの方向の指向性ビー ムに対して,180°方向のバックローブのアンテナ利得 はメインビームよりも 10 dB 程度小さいので -4 dBi (= 6 dBi-10 dB)となる.ただし,図中にあるよう にビーム方向ごとに若干特性が異なるので数 dB 程度 の誤差が生じる.無指向性ビームの場合も,同様の計 測を行い,受信信号のレベルは標準アンテナを用いた 場合と同等であったので利得は2dBiとする.

(2) **マル**チパス

屋外(一般の公園)での実験において,テストベッドを移動したときの受信信号強度と式(1)を用いた理





論値の変化の様子を図13に示す.無線モジュール部のZigBeeチップの定格出力は1mW(0dBm),ES-PARアンテナの高さは55cmである.一般の公園なので,地面には土や石や芝生が混ざっており,マルチ パスにおける地面からの反射電力は変動しやすいと思われる.図中,実測値と理論値は距離によっては最大で7dB程度の誤差があり,信号強度の変動は距離によっては数dB程度あることが分かる.

なお,計算値ではESPAR アンテナの垂直方向のビー ム形状をもとに,合成波の受信信号電力の値(Pr)は, 直接波と地面からの反射波の2波合成モデルとし,参 考までにアスファルトの複素比誘電率(εr)から求め た複素反射係数(Γv)を使用して下記の式から算出し た¹⁵⁾.

$$\Pr = P_t G_t G_r \left[D_d \left(\frac{\lambda}{4\pi r_d} \right) + D_r \left(\frac{\lambda}{4\pi r_r} \right) \right]^2$$

$$\Gamma v e^{-j\{k(r_d - r_r) + \phi\}}$$
(1)

Pr:受信電力, P_t :送信電力, G_t :送信アンテ ナ利得, G_r :受信アンテナ利得, D_d :直接波の 送受アンテナ指向性, D_r :反射波の送受アンテ

表 2 回線設計例 Table 2 Maximum communication distance.

記号	喧日	-	無指向性	甾位		
	20	パ ックーパ ック	パックーメイン	メインーメイン	ビーム	4515
f	周波数	2.405	2.405	2.405	2.405	GHz
Pt	送信電力制御有り	-25	-25	-25	-13.75	dBm
Lt	アンテナ給電ロス	-2	-2	-2	-2	dB
Gt	送信アンテナ利得	-4	6	6	2	dBi
PtGt	実効輻射電力	-31	-21	-21	-13.75	dBm
R	干涉距離	8	25	80	80	m
-	自由空間損失	-58	-68	-78	-78	dB
Gr	受信アンテナ利得	-4	-4	6	2	dBi
Lr	アンテナ給電ロス	-2	-2	-2	-2	dB
Pr	受信機入力	-95	-95	-95	-92	dBm
Smin	感度	-92	-92	-92	-92	dB
-	補正 (Pr-Smin)	-3.25	-3.25	-3.25	0	dB

ナ指向性, r_d:直接波の伝搬距離, r_r:反射波の 伝搬距離, k:2π/λ,Φ:反射係数の位相遅れ (3)回線設計

このような ESPAR アンテナ固有の特性や,マルチ パス下での受信信号強度の変化の中で,無指向性ビー ムを用いた場合と,指向性ビームを用いた場合で,実効 輻射電力が等しくなるように無線モジュール部の Zig-Bee チップに対して送信電力制御を行った.その結果, 比較的利得の高い指向性ビームのときには -25 dB の 電力制御最大値の減衰を行い,このとき,無指向性ビー ムには -13.75 dB の減衰を行うことで, 受信信号強度 の値がほぼ同じとなった.この電力差は(-13.75 dB) $-(-25 \, dB) = 11.25 \, dB$ であるが, ESPAR アンテナ の指向性(セクタ)ビームと無指向性(オムニ)ビー ムの利得差は6 dBi-2 dBi = 4 dB で,送受信なので2倍して 8 dB の差が予想できるが,実際には 11.25 dB であり,さらに 3.25 dB (=11.25 dB-8 dB)の減衰が 必要であった.この原因は,図13に示すようにマル チパスやフェージングによる受信信号強度の変動の影 響と考えられる.

そして,ビーム形状の組合せに応じた干渉距離を予 想するために,式(2)の自由空間での最大通信距離を 求める式に,電力制御の結果による補正値(3.25 dB) を考慮して回線設計を行った.無線モジュール部の ZigBee チップの最小受信感度(Smin)は,RFケー ブルや可変減衰器を用いてフェージングを排除した キャリブレーションの結果,-92 dBm と判明してい る.表2に回線設計の例を示す.

$$R^2 = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 L_t L_r}{(4\pi)^2 S \min} \tag{2}$$

表より,送信電力制御および補正を含めて最大通信 距離の算出を行った結果,無指向性ビームおよび指向 性ビームにおける干渉距離は80mとなった.また,指 向性ビームを用いた場合で,バックロープ間の干渉距 離が8m,メインビームとバックロープ間の干渉距離 が 25 m となった .

5. SWAMP プロトコルの実験

5.1 OC-mode の評価

OC-mode は空間利用効率の向上・同時通信数の増加 を狙ったアクセスモーデである.しかし,指向性ビー ムが理想的なビーム形状ではなく,相手方向以外にも アンテナ利得が存在すれば,その強度に応じて,周辺 端末と干渉する機会が増えてしまう.よって,実際に 使用する ESPAR アンテナの指向性ビームにおいて, 通信したい相手方向以外としてバックロープのアンテ ナ利得の存在よる干渉の影響を評価する.

(1) 実験の構成

テストベッド4台(端末番号1,2,3,4)におい て,2組の通信ペア(端末1→端末2と端末4←端 末3)を一列に配置し,通信ペア間の距離(X)を変化 させたときの2組のそれぞれの通信特性を測定する. このとき,アンテナのビームとして無指向性ビームを 用いた場合と,指向性ビームを用いた場合で,2組の 通信特性に影響が出る距離(X)を比較し,空間分割 多重効果の相違を評価するものとする.本実験では, 無指向性ビームを用いた場合と,指向性ビームを用い た場合で,利得差を相殺して実効輻射電力が等しくな るように,送信電力に電力制御を行っている.図14 に実験における端末のレイアウトを示す. 図中, 点線 の円は無指向性ビーム, 点線の扇型は指向性ビームを 示す.指向性ビームの大きい方はメインビーム,小さ い方はバックローブである.データの流れを矢印で示 し, 端末1と端末3が送信側, 端末2と端末4が受 信側である.

理想的な指向性ビームを用いた場合,前方のメイン ビームのみに電力が集中すると仮定するので,2組の 通信ペア(端末1→端末2と端末4 ←端末3)間 の距離(X)は0mまで近づけても干渉しないことに なる.しかし,実際の指向性ビームを用いた場合,後 方のバックローブのアンテナ利得により,2組の通信 ペア(端末1→端末2と端末4 ←端末3)間で干 渉する距離(X)は0mとはならないことが予想でき る.また,無指向性ビームを用いた場合には,前方や 後方にも同程度の電力が存在するので,2組の通信ペ ア(端末1→端末2と端末4 ←端末3)間で干渉す る距離(X)は,指向性ビームを用いた場合よりも比 較的短い距離になると考えられる.

(2) 実験結果

屋外(一般の公園)において,図14に示すレイアウ トでテストベッド4台を設置し,距離の制約により端



図 14 端末のレイアウト Fig. 14 Layout for 4 nodes.



図 15 実験シーン Fig.15 Overview of experiment.

末1と端末2の通信距離および端末4と端末3の通信 距離を6mとし、ペア間の距離(X)を10mごとに変 化させて,そのときのスループットを計測した.実験 の様子を図 15 に示す.計測におけるパラメータとし ては,パケットの発生を CBR125 kbps,パケットのサ イズを 512 バイトとし,約 60 秒間連続で送信するも のとした.このときの通信ペア内の端末間で受信信号 強度は約-70 dBm であった.2 組の通信ペア(端末 1→端末2と端末4←端末3)のペア間の距離(X) の変化に対する2組のスループットの合計を図16に 示す.図より,図14で規定した通信ペア間距離(X) が近くなるにつれ,もう一方の通信ペアと干渉する ために全体のスループットが低下していることが分か る.無指向性ビームでの通信は,距離(X)が70m~ 80mの間で,全体のスループットが低下し始め,指向 性ビームでの通信は,距離(X)が20m~30mの間 で,全体のスループットが低下し始める.図17にそ れぞれの実験における端末の位置関係と通信距離(干 渉距離)を示す.図より距離(X)に通信ペア内の通 信距離として6mを考慮すると,無指向性ビームでの 通信は,76m~86mの間で干渉が始まっており,指向 性ビームでの通信は,26m~36mの間で干渉が始まっ ていることになる.4章(3)の回線設計による干渉距







離の予測結果では,無指向性ビームどうしでは80m, メインビームとバックローブの間では25mと予想さ れており,実験結果とほぼ合っていると考えられる.

本実験では,屋外(一般の公園)において距離の制 約により端末1と端末2の通信距離および端末4と端 末3の通信距離を6mという十分に通信可能な距離 に設定した関係により,通信ペア間の距離(X)が小 さくなると,バックローブどうしの干渉よりも,先に 通信ペア内のバックローブ(受信)と他の通信ペア内 のメインビーム(送信)で干渉が始まることとなる. 通信ペア内の距離を干渉の最大となる80mに設定す れば,バックローブどうしの干渉が始まる8mまで近 づけることができると考えられる.

以上のことから,実際の ESPAR アンテナや無線モ ジュールに ZigBee チップを用い,SWAMP プロトコ



ルを実装して,一列に並べたときの通信ペア間の距離 が,アンテナのビーム形状として無指向性ビームの場 合は80m,指向性ビームの場合は20mまで最も干渉 なく接近させることができて,空間分割多重効果が最 大で4倍に向上することが示される.

5.2 EC-mode の評価

EC-mode は,無指向性ビームを用いた通信範囲に 比べて,通信距離を延伸化することを狙ったアクセス モードである.実際に使用するESPAR アンテナにお いて,OC-modeによる通信により,SOF フレームを 受信して2ホップ先の端末の位置情報をNHDIテー ブルに登録することにより,利得の高い指向性ビーム に切り替えて2ホップ先の端末へ通信できることを評 価する.

(1) 実験の構成

テストペッド3台(端末番号A,B,C)において, 3台の端末をほぼ三角形に配置し,端末Aは端末B および端末Cに対してOC-modeで通信可能な距離 とし,端末Bと端末CとはOC-modeでは通信不可 能な距離とする.したがって(端末A~端末B)お よび(端末A~端末C)までは,ほぼ同じ距離であ るが(端末B~端末C)までの方が長い距離となる. 図18に実験における各端末のレイアウトを示す.端 末Aおよび端末Cは送信側とし,端末Bは受信側と する.本実験では,このレイアウトにてSWAMPプ ロトコルを動作させ,当初はOC-modeによる通信可 能な端末間で空間分割効果を得て,SOFの受信によ リEC-modeによる長距離の通信を可能とするシーケ ンシャルな動作を計測する.

(2) 実験結果

端末 C と端末 B は EC-mode の設定とし,計 測におけるパラメータとしては,パケットの発生を CBR125 kbps,パケットのサイズを512 バイトとし,





約 60 秒間連続で送信するものとした.また,端末 A と端末 B は OC-mode の設定とし,計測におけるパ ラメータは同じとして,端末 C と端末 B の EC-mode 開始後の約 44 秒後に OC-mode を開始するものとし た.実験結果を図 19 に示す.図より,当初,端末 C と端末 B の EC-mode による通信が不可能な状態で あるが,約 44 秒後に端末 A と端末 B で OC-mode が 開始されると,端末 A から端末 C へ,端末 B の位置 情報が含まれた SOF が送られることにより,端末 C から端末 B への EC-mode が開始されていることが 分かる.

この実験においても, OC-mode での無指向性ビー ムおよび指向性ビームの送信電力は前述の 4 章 (3) の回線設計の表2に示す値のとおり,送信電力制御 により無指向性ビームの場合は -13.75 dBm, 指向 性ビームの場合は -25 dBm, 通信可能距離は 80 m である. EC-mode の際には,端末 C および端末 Bの指向性ビームへの送信電力を無指向性ビーム と同じ値 (-13.75 dBm) になるように切り替える ものとした.これにより,送信電力が11.25 dB(= 25 dBm-13.75 dBm) 増えるので,式(2) を用いると 通信距離が 3.6 倍に延びて 288m(= 3.6×80m)と なる.本実験では,実験上の制約(一般の公園におい て実施したため距離に制約が存在した)により,最大 通信可能な距離までの確認はできていないが,三角形 の斜辺相当の最大距離(≤160m=2倍×80m)は通信 可能になることを確認した.図18における扇型部分 は,端末 C から端末 B への EC-mode による指向性 ビームを示したものである.なお,端末Cは端末A に対して DNAV の設定となるので通信は不可として いる.

以上のことから,実物の ESPAR アンテナや無線 モジュールに ZigBee チップを用い,SWAMP プロト コルを実装して,実環境で実験を行ったところ,OC- mode による位置情報転送と EC-mode による指向性 ビームを用いた高い利得により,無指向性ビームを用 いたときよりも,通信距離を 3.6 倍に延伸化できるこ とが考えられる.

6. ま と め

任意の MAC プロトコルを実装して実環境で評価で きる ESPAR アンテナと ZigBee チップを組み合わせ たテストベッドを開発した.MAC プロトコルはテス トベッドのマイコンのプログラムを書き替えることで 容易に変更可能であり,無線装置内部のハードウェア 制御に係わる部分はプログラムのライブラリとして提 供するものとした.ライブラリには,キャリアセンス, アンテナのビーム制御,送信電力制御,タイマカウン ト等を用意した.

このテストベッドに SWAMP プロトコルを実装し て,屋外のマルチパスやフェージングの下で,テスト ベッド4台で,比較的近距離(6m)での通信ペアを 2 組設け,一列に並べたときの通信ペア間の距離が, アンテナのビーム形状として無指向性ビームの場合は 80m,指向性ビームの場合は20mまで最も干渉なく 接近させることができて,空間分割多重効果が最大で 4 倍に向上することを示した.また,テストベッド3 台で,三角形に並べたときに,最も1辺が長い斜辺 に相当する比較的遠距離な端末間の通信が,無指向性 ビームの場合には80m以上で不可でも,位置情報転 送と指向性ビームの高利得により,指向性ビームの場 合は通信可能となることを示し,電力制御にともなう 11.25 dB 相当の 3.6 倍に通信距離が延ばせることを示 した.今後は,このテストベッドのスループット等の 性能向上とさまざまな指向性 MAC プロトコルを実装 して,実環境下において評価を行い,実用的なプロト コルの研究を進める.

謝辞 静岡大学大学院情報学研究科岡田辰博氏,三觜 輝氏には機器開発および実験データ収集に関して協力 をいただいた.本研究は科研費基盤研究A(17200003) の助成を受けて行った.

参考文献

- Ko, Y.-B., Shankarkumar, V. and Vaidya, N.H.: Medium Access Control Protocols Using Directional Antennas in Ad Hoc Networks, *Proc. IEEE INFOCOM*, pp.13–21 (Mar. 2000).
- 2) Choudhury, R.R., Yang, X., Ramanathan, R. and Vaidya, N.H.: Using Directional Antennas for Medium Access Control in Ad Hoc Networks, Proc. ACM Mobile computing and Net-

work (MobiCom), pp.59–70 (Sep. 2002).

- 3) Fahmy, N.S., Todd, T.D. and Kezys, V.: Ad Hoc Networks with Smart Antennas using IEEE 802.11-Based Protocols, *Proc. IEEE International Conference on Communications* (*ICC*), pp.3144–3148 (Apr. 2002).
- 4) Nasipuri, A., Li, K. and Sappidi, U.R.: Power Consumption and Throughput in Mobile Ad Hoc Networks using Directional Antennas, Proc. IEEE International Conference on Computer Communications and Networking (IC-CCN), pp.620–626 (Oct. 2002).
- 5) Takai, M., Martin, J., Ren, A. and Bagrodia, R.: Directional Virtual Carrier Sensing for Directional Antennas in Mobile Ad Hoc Networks, Proc. ACM Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MOBIHOC), pp.183–193 (June 2002).
- 6) Ramanathan, R.: On the Performance of Ad Hoc Networks with Beamforming Antennas, Proc. ACM Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MOBIHOC), pp.95–105 (Oct. 2001).
- 7) Korakis, T., Jakllari, G. and Tassiulas, L.: A MAC protocol for full exploitation of Directional Antennas in Ad-hoc Wireless Networks, *Proc. ACM Mobile Ad Hoc Networking* and Computing (MOBIHOC), pp.98–107 (June 2003).
- 8) Bandyopadhyay, S., Hasuike, K., Horisawa, S. and Tawara, S.: An Adaptive MAC Protocol for Wireless Ad Hoc Community Network (WACNet) Using Electronically Steerable Passive Array Radiator Antenna, *Proc. IEEE Global Communications Conference (GLOBE-COM)*, pp.2896–2900 (Nov. 2001).
- 5) 大平 孝:エスパアンテナの動作原理とシステム応用,信学誌, Vol.87, No.12, pp.1061–1064 (2004).
- Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks, IEEE Std 802.15.4TM-2003
- 11) Takata, M., Nagashima, K. and Watanabe, T.: A Dual Access Mode MAC Protocol for Ad Hoc Networks Using Smart Antennas, Proc. IEEE International Conference on Communications (ICC), pp.4182–4186 (June 2004).
- 12) 福井 潔,谷本晃一,福永 茂: ZigBeeって何 だ?,信学誌, Vol.88, No.1, pp.40-45 (2005).
- 13) CC2420 Datasheet rev.1.2, (June 2004). http://www.chipcon.com/files/CC2420_Data_ Sheet_1_2.pdf
- 14) ANSI/IEEE Std 802.11, Wireless LAN

Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications (1999).

 15) 渡辺正浩,鈴木洋介:WACNet(IEEE802.11b)
 無線通信におけるアスファルト路面反射の特性, A-17-17,信学ソ大会(2003).

(平成 18 年 11 月 1 日受付)(平成 19 年 4 月 6 日採録)



渡辺 正浩

1982年京都工芸繊維大学工芸学部 電子工学科卒業.同年三菱電機(株) 入社.レーダ装置および車車間通信 装置の研究・開発に従事.2002年 (株)国際電気通信基礎技術研究所

(ATR)適応コミュニケーション研究所出向.2006年 三菱電機(株)復職.現在,同社先端技術総合研究所 勤務.2006年よりATR客員研究員.DICOMO2006 優秀論文賞.アドホックネットワークおよびセンサ情 報処理システムに関する研究に従事.電子情報通信学 会会員.



萬代 雅希(正会員)

1996年慶應義塾大学理工学部電気 工学科卒業.1998年同大学大学院修 士課程修了.2004年同大学院後期博 士課程修了.2004年静岡大学情報学 部助手.2007年同大学助教,現在に

至る.1998~2000年ソニー(株)勤務.2001~2003 年日本学術振興会特別研究員(DC2).2006~2007年 ブリティッシュコロンビア大学(カナダ)訪問研究員. 博士(工学).主として,通信ネットワークの研究に 従事.IEEE,電子情報通信学会各会員.2006年度情 報処理学会山下記念研究賞受賞.



小花 貞夫(フェロー) 1976年慶應義塾大学工学部電気工 学科卒業.1978年同大学大学院修士 課程修了.同年国際電信電話(株) (現KDDI(株))入社.パケット交換 方式,ネットワークアーキテクチャ,

OSI プロトコル実装,データベース,ビデオテック ス,分散処理,ネットワーク管理,ITSの研究・開発 に従事.2004年(株)国際電気通信基礎技術研究所 (ATR)執行役員適応コミュニケーション研究所所長, アドホックネットワーク,ITS,センサネットワーク の研究・開発に従事.工学博士.2001年文部科学大 臣賞(研究功績者),本会フェロー,電子情報通信学 会会員.



渡辺 尚(正会員)

1982 年大阪大学工学部通信工学 科卒業.1984 年同大学大学院博士 前期課程修了.1987 年同大学院博 士後期課程修了.工学博士.同年徳 島大学工学部情報工学科助手.1990

年静岡大学工学部情報知識工学科助教授.1996年静 岡大学情報学部情報科学科教授.現在,静岡大学創造 科学技術大学院教授.静岡大学情報学部情報科学科教 授兼任.1995年文部省在外研究員(カリフォルニア 大学アーバイン校).計算機ネットワーク,分散シス テム,アドホックネットワーク,センサネットワーク に関する研究等に従事.2005年情報処理学会モバイ ルコンピューティングとユビキタス通信研究会主査. 訳書『計算機設計技法』,『802.11 無線ネットワーク管 理』等 IEEE,電子情報通信学会各会員.