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

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,^{†1,†2} MASAKI BANDAI,^{†3} SADAO OBANA^{†1} and TAKASHI WATANABE^{†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 ESPAR 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

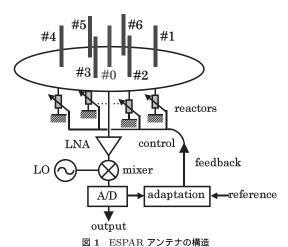


Fig. 1 Structure of ESPAR antenna.

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		
ı	1	送信電力	1 mW		
ı	2	変調方式	offset-QPSK		
ı	3	拡散方式	DS-SS		
ı	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 り,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-CC2420 ¹³⁾ 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

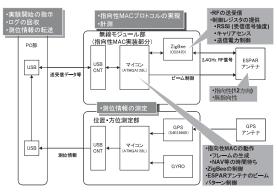


図 2 テストベッドのブロック図

Fig. 2 Block diagram of Ad hoc testbed.

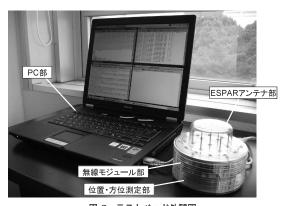


図 3 テストベッド外観図

Fig. 3 Overview of Ad hoc testbed.

段階の制御で $25\,\mathrm{dB}$ のダイナミックレンジ (送信電力値として $-25\,\mathrm{dBm} \sim 0\,\mathrm{dBm}$)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.プロック図を図2、外観を図3に示す.

 $\rm MAC$ 層においては , $\rm ZigBee\ MAC$ のデータフレームのペイロードに指向性 $\rm MAC$ プロトコルの $\rm MAC$ 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 . $\rm ZigBee\ MAC$ の制御フレー

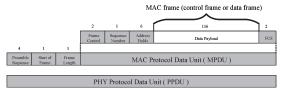


図 $oldsymbol{4}$ 評価対象の指向性 MAC プロトコルのフレーム構成

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

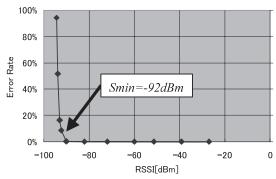


図 5 最小受信感度 (RSSI 値に応じたパケットエラーレート) Fig. 5 Smin (PER vs RSSI).

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 となる.ここで,10%のエラー地点を最小受信感度と定義しており,これは無線LANカードのカタログにも記載されている条件である.RSSIの値はパケットの先頭のプリアンブル部分で読み取るものとする.図5にRSSIの値に応じたパケットのエラーレートを示す.

3. SWAMP プロトコル

 ${
m SWAMP}^{\,11)}$ は ${
m IEEE}802.11{
m DCF}^{\,14)}$ 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 ${
m MAC}$ プロトコルであり,シミュレーションによる評価では, ${
m IEEE}802.11$ 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。

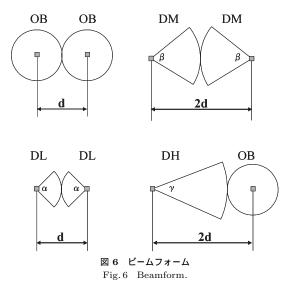
Vol. 48 No. 7

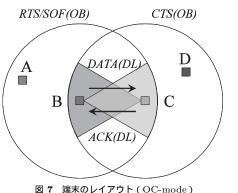
- アクセスモードとして, OC-mode (Omni-directional transmission range Communication mode)と, EC-mode (Extended omni-directional transmission range Communication mode)を設けて,送信元端末と送信先端末の位置に応じて選択して使用する.
- OC-mode では,無指向性ビームとアンテナ利得が同等の指向性ビームを使用することで,無指向性ビームどうしで通信する場合に比べて,空間利用効率を向上させる.また,送信元端末と送信先端末それぞれから,相手を除く1ホップ以内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





37 婦未のレイアワト (OC-mode Fig. 7 Layout (OC-mode).

距離 2 d 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 .

一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

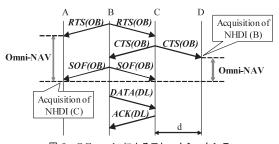


図 8 OC-mode によるフレームシーケンス Fig. 8 OC-mode frame sequence (B to C).

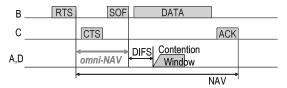


図9 SOFとomni-NAV Fig. 9 SOF and omni-NAV.

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 A へ端末 C および端末 B 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

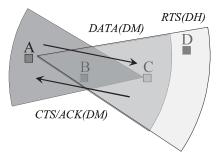


図 10 端末のレイアウト (EC-mode) Fig. 10 Layout (EC-mode).

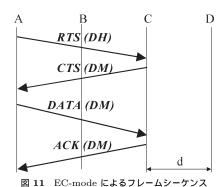


Fig. 11 EC-mode frame sequence (A to C).

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、EC-mode 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 $-23\,\mathrm{dBm}$ であり,標準 アンテナの最大受信レベルは $-27 \, \mathrm{dBm}$ であったので, この 4dB 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 $(=6\,\mathrm{dBi}-10\,\mathrm{dB})$ 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

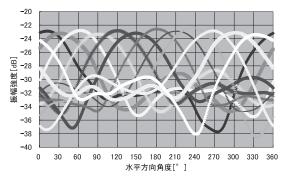


図 12 ESPAR アンテナの指向性ビーム形状 Fig. 12 Directional pattern of ESPAR antenna.

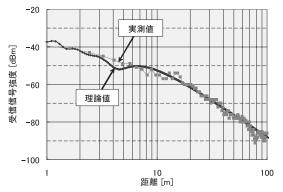


図 13 マルチパス下での受信信号強度の変化 Fig. 13 RSSI vs communication distance.

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 $1\,\mathrm{mW}$ ($0\,\mathrm{dBm}$), ESPAR アンテナの高さは $55\,\mathrm{cm}$ 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 $7\,\mathrm{dB}$ 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 .

$$Pr = P_t G_t G_r \left[D_d \left(\frac{\lambda}{4\pi r_d} \right) + D_r \left(\frac{\lambda}{4\pi r_r} \right) \right]$$
$$\Gamma v e^{-j\{k(r_d - r_r) + \phi\}}$$
(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	項目	指向性ビーム			無指向性	単位
pu /J	3(1)	バックーバック	パックーメイン	メインーメイン	ビーム	45/17
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	干渉距離	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, $k:2\pi/\lambda$, 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 $6 \, \mathrm{dBi} - 2 \, \mathrm{dBi} = 4 \, \mathrm{dB}$ 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 $(3.25\,\mathrm{dB})$ 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, $-92\,\mathrm{dBm}$ 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 $80\,\mathrm{m}$ となった.また,指向性ビームを用いた場合で,バックローブ間の干渉距離が $8\,\mathrm{m}$,メインビームとバックローブ間の干渉距離

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ブ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 T, 2 組の通信ペア (端末 $1 \rightarrow$ 端末 2 と端末 $4 \leftarrow$ 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 $1 \to$ 端末 2と端末 $4 \leftarrow$ 端末 3)間の距離(X)は 0 m 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 $1 \to$ 端末 2と端末 $4 \leftarrow$ 端末 3)間で干渉する距離(X)は 0 m 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 $1 \to$ 端末 2と端末 $4 \leftarrow$ 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

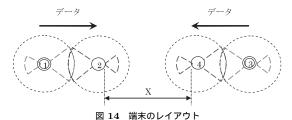


Fig. 14 Layout for 4 nodes.



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 6 m とし,ペア間の距離(X)を 10 m 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 $1 \rightarrow$ 端末 2 と端末 $4 \leftarrow$ 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~ 80 m 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

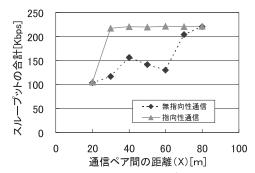
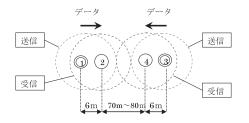
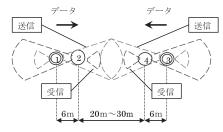


図 16 2 組の通信ペアのスループットの合計 Fig. 16 Throughput vs distance (X).



無指向性ビームの場合



指向性ビームの場合

図 17 端末の位置関係と通信距離(干渉距離) Fig. 17 Node location and communication distance (interference distance).

離の予測結果では,無指向性ビームどうしでは $80 \, \mathrm{m}$, メインビームとバックローブの間では $25 \, \mathrm{m}$ 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

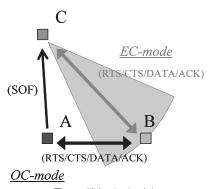


図 18 端末のレイアウト Fig. 18 Layout for 3 nodes.

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 $80\,\mathrm{m}$,指向性ビームの場合は $20\,\mathrm{m}$ 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

テストベッド 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 の受信により 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 $512 \, N$

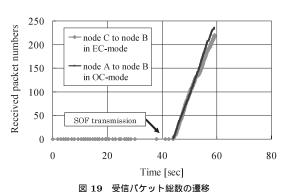


Fig. 19 Received packet numbers vs time.

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 $-25\,\mathrm{dBm}$, 通信可能距離は $80\,\mathrm{m}$ 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11.25dB(= 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 288 m (= 3.6×80 m)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 (≤160 m=2倍×80 m) 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 80 m , 指向性ビームの場合は 20 m 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).
- 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).
- 9) 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).
- 10) Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks, IEEE Std $802.15.4^{\rm TM}$ -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.同年德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 .