

スマートアンテナを有効利用する通信システムの構築に関する研究

メタデータ	言語: ja 出版者: 静岡大学 公開日: 2012-01-31 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 渡邊, 正浩 メールアドレス: 所属:
URL	<a href="https://doi.org/10.14945/00006392">https://doi.org/10.14945/00006392</a>

静岡大学 博士論文

スマートアンテナを有効利用する  
通信システムの構築に関する研究



2008年12月

創造科学技術大学院 自然科学系教育部

情報科学専攻

渡邊正浩

## 目次

1. 序論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 研究の目的	2
1.3 本論文の構成	3
2. センサデバイスと無線アドホックネットワークの連携	6
2.1 センサデバイス	6
2.2 無線アドホックネットワークの基盤部分	11
2.3 実証的研究方針	12
3. スマートアンテナを用いた無線装置の構築と実験評価	14
3.1 緒言	14
3.2 テストベッド	15
3.2.1 基本構成	15
3.2.2 ESPAR アンテナ	19
3.2.3 データ通信とビーム制御のタイミング調整	21
3.2.4 周辺端末の方向探知	23
3.2.5 MAC 透過処理	26
3.3 基本特性	29
3.3.1 タイミング調整とスループットへの影響	29
3.3.2 周辺端末の方向探知	30
3.3.3 スループットと通信距離	34
3.3.4 ストリーミング	38
3.4 まとめ	44

4. 指向性 MAC プロトコルの実装と実験評価	4 6
4.1 緒言	4 6
4.2 テストベッド	4 7
4.2.1 ESPAR アンテナ	4 8
4.2.2 IEEE802.15.4/ZigBee チップ	5 0
4.2.3 全体構成	5 1
4.3 SWAMP プロトコル	5 5
4.3.1 アンテナモデル	5 6
4.3.2 OC-mode	5 8
4.3.3 EC-mode	6 1
4.4 基礎実験	6 3
4.5 SWAMP プロトコルの実験	6 8
4.5.1 OC-mode の評価	6 8
4.5.2 EC-mode の評価	7 4
4.6 まとめ	7 8
5. 移動体におけるルーティングプロトコルの提案と実験評価	7 9
5.1 緒言	7 9
5.2 関連研究との関係	8 0
5.3 基礎実験	8 3
5.3.1 アドホックネットワーク無線装置	8 3
5.3.2 移動実験	8 5
5.3.3 MANET による方式	8 8
5.3.4 受信信号強度を考慮した方式	8 9
5.3.5 位置情報を用いた方式	9 3

5.3.6 基礎実験のまとめ	96
5.4 提案方式と計算機シミュレーション	97
5.4.1 提案方式	97
5.4.2 実環境を考慮した計算機シミュレーション	98
5.4.3 移動速度について	104
5.5 まとめ	107
6. 結論	108
参考文献	112
謝辞	121
原著論文	123

# 第1章 序論

## 1.1 研究の背景

センサからの情報を伝送するための手段として、無線アドホックネットワークの応用が注目されている。このネットワークでは、基地局やアクセスポイント等のインフラによる集中制御は行われず、端末自身がルータの機能を有し、所謂、電波が届かない場合には、周辺端末に関する情報収集をベースに、最適なルートを確立できる中継端末を選択し、バケツリレーのように目的端末までマルチホップ的に情報を転送する分散制御が行われている。

従って、無線アドホックネットワークにおいては、ネットワーク内の端末の移動に伴うトポロジー変化や、周辺端末との情報交換で発生するオーバーヘッドも考慮した効率的な通信を行うことが課題である。

また、図 1.1 に示すように、アンテナからのビーム形状に指向性ビームや無指向性ビームを、用途に応じて切り替えることにより下記の効果が挙げられる。

- ・空間分割による多重効果 (SDMA: Space Division Multiple Access)
- ・通信距離の延伸化と高 SNR (Signal to Noise Ratio) による高品質化
- ・周辺端末の位置 (方向や距離) 推定

無線アドホックネットワークにおいては、MAC (Medium Access Control) やルーティングのプロトコルの中で、これらのビームを効果的に駆動することにより、次の効果が考えられる。

- ・電波エネルギー (周波数, 送信電力) の有効利用
- ・ネットワーク性能 (スループット, 遅延時間) の品質向上
- ・ダイバーシティ (ビームやルート切り替え) による設置場所不問

一方、指向性ビームを用いることにより、新たな課題も発生する。互いに指向性ビームで送受信する通信中の端末ペアは、周辺端末からの呼びかけに対して応答不能となるデフネスの問題や、通信中の端末ペアへ指向性ビームと無指向性ビームのアンテナ利得の違いから指向性ビームの高い利得によるパケットが届いて進行中の通信データと衝突させてしまう指向性隠れ端末問題や、指向

性ビームの高い利得が得られる狭いビーム幅と反比例して、周辺端末との情報交換においては、更にオーバーヘッドが増大してしまう等が挙げられる。

従って、想定するネットワークの特質に応じて、指向性ビームを用いることによる長所と短所のトレードオフを適切に判断していくことが重要である。

このような課題も踏まえて、無線アドホックネットワークは、災害時の緊急通信，ITS (Intelligent Transportation Systems) 車車間通信，小会議等での情報共有等，各種産業分野へ展開を図るために研究が進められている。

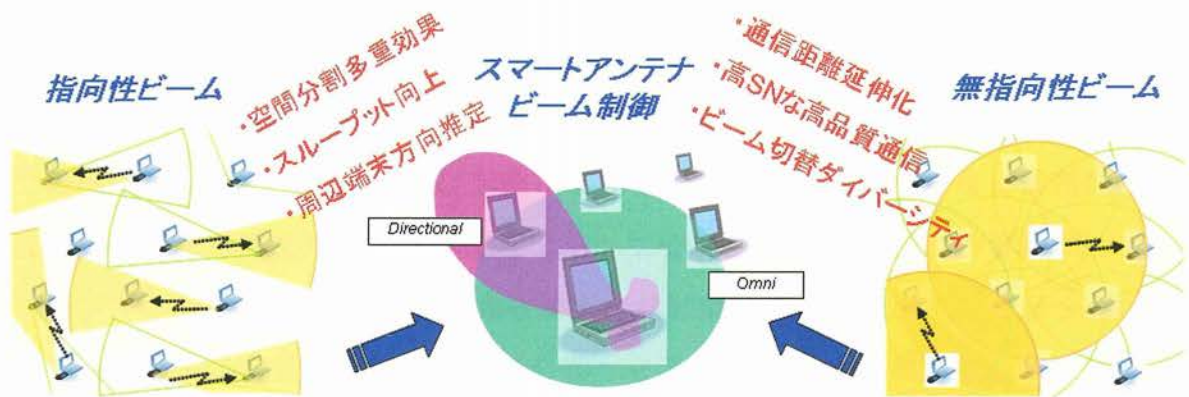


図 1.1 スマートアンテナによる効果

Fig.1.1 Benefits owing to smart antennas

## 1.2 研究の目的

無線アドホックネットワークに関する研究で、提案される通信プロトコルが、アンテナのビーム形状や電波伝搬モデルを理想的状態に仮定してシミュレーションにより評価されることが多い。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。

本論文では、スマートアンテナを用いてビーム形状を適応的に制御し、データ通信が可能なテストベッドの設計手法と、このようなテストベッドに MAC やルーティングを実装し、スマートアンテナを有効利用する通信システムの構築において、実環境における実験評価から、その効果や課題について実証的に把握することを目的とする。

### 1.3 本論文の構成

本論文は、第1章の序論、第2章のセンサデバイスと無線アドホックネットワークの連携に関する基礎、本論として、第3章では無線LANをベースとしてスマートアンテナを用いるテストベッドの基本設計手法の提案と実環境における特性評価、第4章ではIEEE802.15.4(ZigBee)をベースとして指向性MACプロトコルの実装による実環境での特性評価、第5章では移動体におけるルーティングプロトコルの提案と実装を行い実環境での特性評価の説明を行い、第6章の結論から構成される。本論文の構成を図1.2に示す。

本章に続いて、第2章では、ITS (Intelligent Transportation Systems)分野を例として、センサとしてミリ波帯の高周波電波を用いたレーダと、レーダ検知情報を車車間通信によって配信する方法について、レーダと通信の連携プレーヤや両者の融合化が期待されることと、そこでアドホックネットワークの必要性を示して、研究対象の基盤部分と実証方法を説明する。

第3章以降は本論文の主題である。第3章について、近年、低価格化と普及が進んでいる無線LAN (Local Area Network) カード; IEEE802.11 とノートPCを用いて無線アドホックネットワークの実験が行われるようになっているが、現行の無線LANドライバにビーム制御機能を組み込むことは、ドライバのソフトウェアやハードウェアのインターフェース等に詳細な情報が必要となり、無線LANチップメーカと特別な契約を結んで詳細な情報を入手しない限り、組み込みは実現が難しい。そこで、現行の無線LANドライバによるデータ通信と、新たに行う指向性ビーム制御との連携動作を、アプリケーション側から行う方法を提案する。アプリケーション側には制御部 (CPU ボード) を設けて、連携動作の中心となるデータ通信とビーム制御のタイミング調整を専用に行うものとし、スループットへの影響を出来るだけ低減させるための具体的な方策と効果を示す。この提案手法と、アンテナはビーム形状を制御できる装置としてESPAR (Electronically Steerable Parasitic Array Radiator) アンテナを用い、指向性ビームを用いてデータ通信が可能となるテストベッドの設計における基本的な構成や方式を示す。基本特性として、周辺端末の位置計測精度として標準



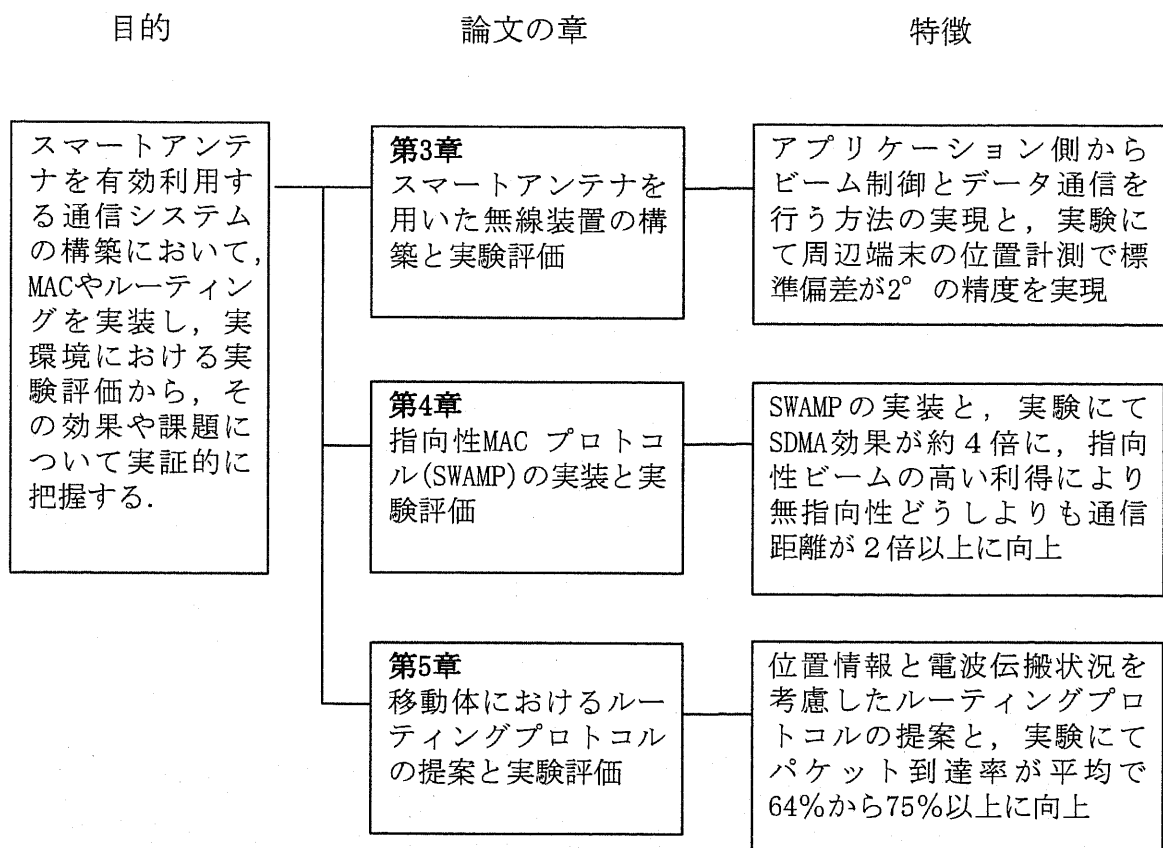
偏差で  $2^{\circ}$  , 1 対 1 での実効スループットとして 9.5 Mbps (UDP) 及び 5.8 Mbps (TCP), 送信側の指向性ビームの比較的高いアンテナ利得から最大通信距離として, 無指向性ビームどうしに対して 1.6 倍となる効果があることを説明する.

第 4 章について, 無線チップメーカーとのライセンスを考慮する必要なく, 様々な指向性 MAC プロトコルを容易に実装して実験評価を可能とするために, 無線装置には, IEEE802.15.4 規格の ZigBee チップをベースとして用いる. この無線チップは, IEEE802.11 無線 LAN よりもデータレートが低速となるが, 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点が大きな長所である. アンテナには ESPAR アンテナを用い, 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. 更に, 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) の実装を行い, 実環境にて実証評価を行う. テストベッド 4 台にて, 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り約 4 倍の効果があること. また, テストベッド 3 台にて, 遠距離端末の位置情報転送と指向性ビームどうしの高利得により, 無指向性ビームどうし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説明する.

第 5 章について, 無線アドホックネットワークにおけるマルチホップ通信について, 移動端末を有する環境では, 電波伝搬状況やトポロジーの変化によりルートが不安定となり, パケット到達率などの通信性能が低下してしまう. 例えば, ITS 車車間通信の場合には, 路面反射によるマルチパスの影響により受信信号強度がバースト的に低下する. そこで, GPS からの位置情報を利用して, 端末間距離に応じてメトリックをトポロジーに反映するルーティングプロトコルをベースに, 電波伝搬状況を監視してマルチパスの発生する距離範囲ではイベント的にメトリック値を変化させてルートを変更させる方法により, ルートを

急変させることなく安定に切り替えながらパケット到達率を向上させる方法を提案する。実験結果と計算機シミュレーションにより、1台の移動端末が10台の静止端末を通過していく場合に、End to End のマルチホップ通信特性で、従来方式と比較してパケット到達率が平均で64%から75%以上に向上出来ることを説明する。

第6章について、結論として、研究で得られた成果を総括するとともに、今後の課題や展開について述べる。



原著論文【筆頭のみ】:

論文(3), 国際(10), 著書(1), 口頭(31/うち招待(3)), 表彰(4)

図 1.2 本論文の構成

Fig. 1.2 Configuration of this thesis

## 第2章 センサデバイスと無線アドホックネットワークの連携

### 2.1 センサデバイス

ITS 分野を例として、輸送効率の向上や安全運転支援のために、車両操作情報並びに衝突防止用レーダ等で得られる障害物情報 [1]～ [6]などを、車両間でやりとりする車車間通信技術の確立が不可欠であり、図 2.1-1 に示すように、レーダが検知した情報を含めて、車車間通信によって配信する方法が求められている。ここでの通信は、1対1の通信であり、更に情報を伝送するためには、再度、通信を行う必要があり、必要に応じて目的端末までこの手順を繰り返していく必要がある。

一方、レーダと通信の機能を同時に有する融合化により、装置の一体化や小型化、狭隘な車載環境のなかでの搭載スペース確保等に貢献することが期待出来る。そこで、このような融合装置として、比較的小型で狭ビームなアンテナが可能なミリ波帯 (60/77GHz) の高周波を用いたレーダの電波ビームと無線機の電波ビームを独立したまま同時に放射する共用アンテナを用いる方式や、レーダの電波ビームと無線機の電波ビームを全く同じビームで共有して放射する共有アンテナを用いる方法について検討[7]～[9]が行われている。

ここでは、アンテナビームのスキャンの方式について分類が行われており、その分類表を表 2.1-1 に示す。レーダ用には比較的狭いビームを形成し、通信用には比較的広いビームを形成するビーム独立方式と、通信用とレーダ用でビームを共有するビーム共有方式とに分類することが出来る。更に、レーダと通信で周波数を分けるものや、同じ周波数を用いるものに分類することが出来る。一般的に、ビーム独立方式は、ビームや周波数がレーダと通信で独立して設定できるので、設計の自由度は高いが、共有できる部分がアンテナ部を中心に限られるので、装置構成の上でのメリットは大きくないと考えられる。また、ビーム共有型では、ビームを共有して周波数も同じとすることにより、アンテナから高周波部までを共有化出来るので装置構成の上でのメリットは大きいですが、レーダと通信の制御や、周波数が同じとなることにより、アクセス方式等に多

くの課題が残されている。ビーム独立方式とビーム共用方式の運用例を、それぞれ、図 2-1-2 及び図 2.1-3 に示す。

ビーム独立方式の実験[7][8]において、共用アンテナのアイソレーション性能は、現実的には、20dB~30dB であり、通常の運用におけるダイナミックレンジは最低でも 80dB 以上（最長 100m/最短 1m の場合）必要なので、アイソレーションを十分に確保できないと、レーダ通信距離が短くなることや、通信における送受信チャンネル間のアイソレーションが十分でない、送信側のデータが自身側に漏れ込む等の問題があり、近距離での実験範囲で性能の確認が行われている。共用化する上での装置としては、更なるアイソレーションの向上として強力なフィルタリング等が必要となっている。

ビーム共用方式の実験[9]において、測距と通信を同時に行うスペクトラム拡散 (SS: Spread Spectrum)方式が用いられ、比較的広範囲の角度をスキャンしながら角度毎に距離方向の端末を検知し距離測定を行い、検知した端末と通信する際には、通信対象となる端末位置に相当する角度及び距離の位置ゲートを固定して補足を維持しながら通信を行う。従って、測距等のセンシングに要する時間及びデータレートに基づく通信に要する時間を考慮して、測距と通信の切り替えタイミングを図ることや、端末毎に PN (Pseudo Noise)符号を割り振ることにより端末間のアイソレーションを確保する方法が使用されている。従って、想定される運用シナリオにおけるモビリティや端末台数等との整合性を考慮したビーム制御によるアクセス方式が必要となっている。

センサデバイスについては、センサ単体の性能向上や融合化に向けた更なる研究が行われていくが、ここでは、1対1の直接通信での性能拡張が中心である。従って、情報を次々に転送していく方策として、マルチホップ通信のような機能を有する無線アドホックネットワークによって、情報の効率的な転送方策が求められる。

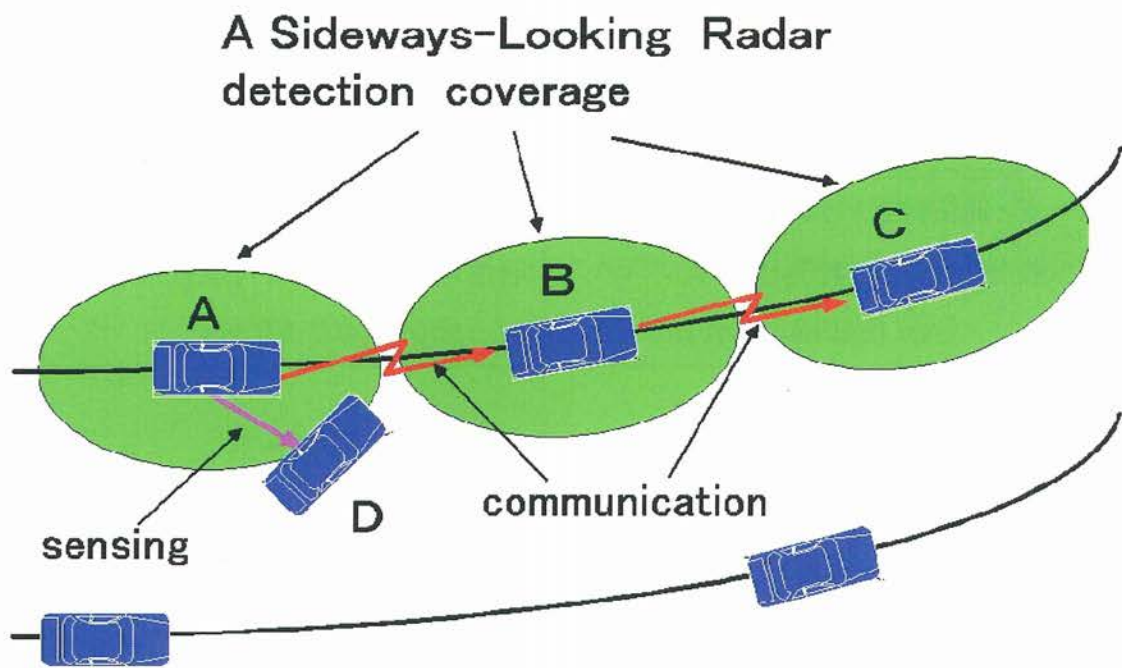


図 2-1-1 レーダ情報の転送イメージ

Fig.2.1-1 Forwarding the Radar Informations

表 2.1-1 レーダと通信の融合方式一覧

Table.2.1-1 Fusion between Radar and Communications

ビーム独立方式	ビーム共用方式
レーダ・通信は互いに制約を受け難い。 現状技術で比較的实现し易い。	アンテナ構成は比較的簡単となる。 通信性能に制約の可能性有り（間欠、アクセス）

Br:レーダビーム幅, f1:レーダ周波数  
 Bc:通信用ビーム幅, f2:通信用周波数

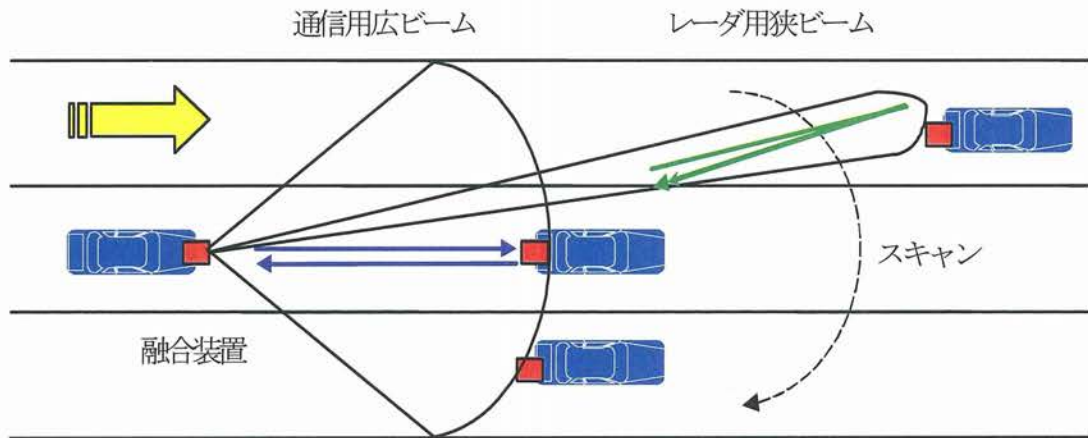


図 2.1-2 ビーム独立方式の運用イメージ

Fig.2.1-2 Operation Image (Beam Independent use)

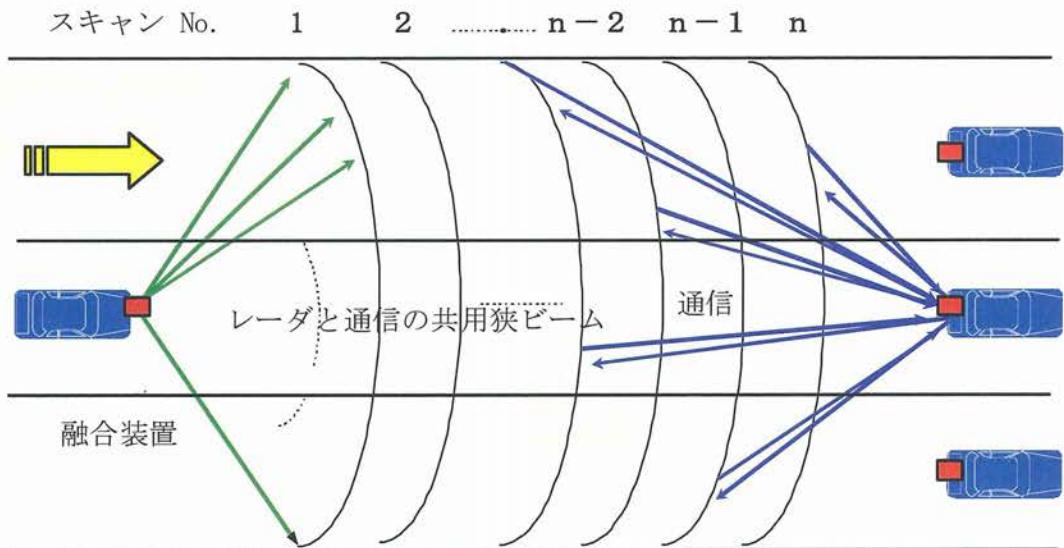


図 2.1-3 ビーム共用方式の運用イメージ

Fig.2.1-3 Operation Image (Beam Common use)

## 2.2 無線アドホックネットワークの基盤部分

図 2.2-1 に、OSI: Open System Interconnection (ネットワークの階層構造) をベースとして、アドホックネットワークにおける情報転送を担う基盤部分を示す。図中、物理層が無線機ハードウェア、データリンク層が MAC、ネットワーク層とトランスポート層がルーティングに該当し、これらの各層が情報交換を行う。更に、物理層においては、アンテナからのビーム形状を指向性ビームや無指向性ビームに切り替えてデータ通信を行う。本研究では、物理層からネットワーク層までを基盤部分として注力することとする。セッション層以上は、主としてアプリケーションであり、本基盤研究をベースとして創出する新たなユビキタス・アプリケーションである。

本論文において、第 3 章は物理層の無線機ハードウェアに関する内容であり、第 4 章はデータリンク層の MAC について指向性 MAC プロトコルに関する内容であり、第 5 章はネットワーク層及びトランスポート層でのルーティングに関する内容である。



図 2.2-1 OSI 参照モデルと注力部分

Fig.2.2-1 Focus parts in OSI model



## 2.3 実証的研究方針

本研究の特徴である実証的研究を行うなかで開発したスマートアンテナを用いた通信装置の構成を図 2.3-1 に示す。図中の WACNet 装置は、第 3 章におけるスマートアンテナと無線機ハードウェアとの接続手法や第 5 章の移動体向けアドホックルーティングにおいて説明するものである。図中の UNAGI 装置は、第 4 章におけるスマートアンテナを用いた指向性 MAC の実装と実特性において説明するものである。どちらの装置についても、スマートアンテナとして ESPAR アンテナを用いている。このアンテナの詳細については、以降からの章中にて説明を行う。

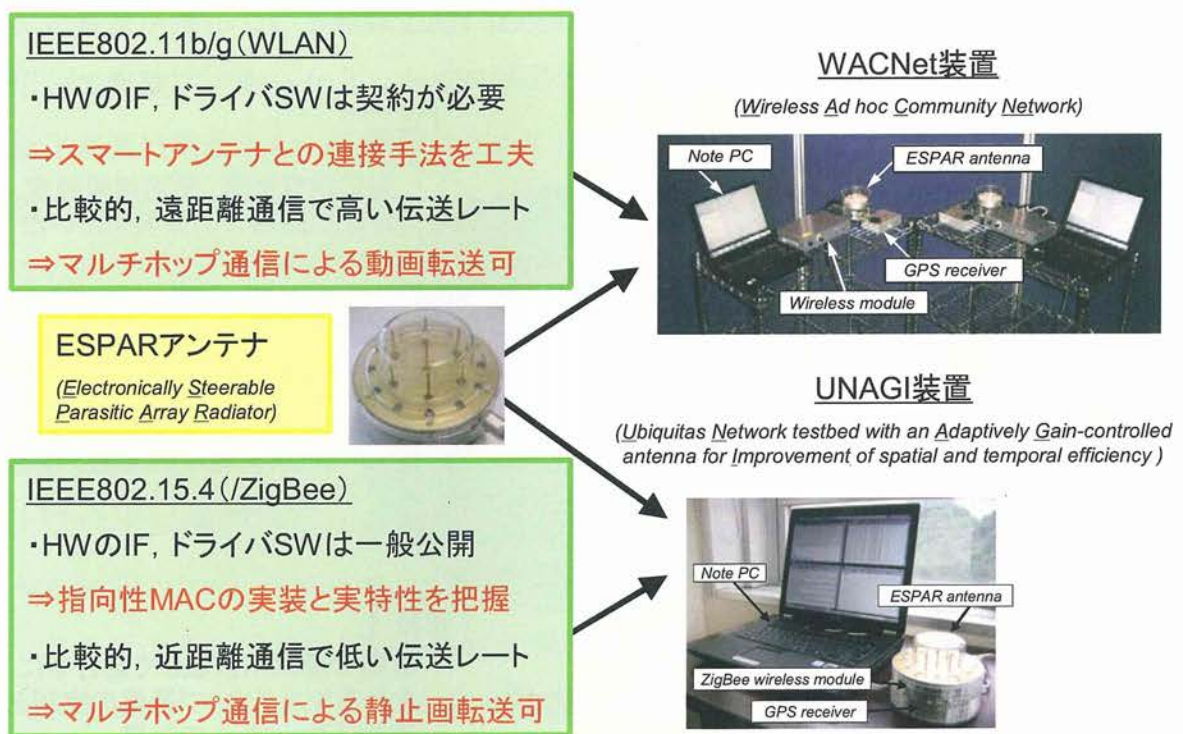


図 2.3-1 スマートアンテナを用いた通信装置の構成

Fig.2.3-1 Configuration of wireless ad hoc communication systems on smart antennas

これらの装置を用いた実証的研究の具体的な内容について図 2.3-2 に示す. 図中の通信システムの構築において, 無線機ハードウェアについては, パケットタイプに応じたビーム制御とデータ通信の連携動作を行う制御手法を提案し, 実際の車両に搭載して走行中におけるマルチホップ通信の実現と実効スループットについて検証を行う. 指向性 MAC については, 実際にスマートアンテナを用いた指向性 MAC プロトコル[SWAMP]の実装評価を提案し, 実際のアンテナ特性における空間分割の多重効果と最大通信距離の延伸化について検証を行う. アドホックルーティングについては, 周辺端末位置, 受信信号強度, 電波伝搬環境の情報を用いたルーティングプロトコルを提案し, 車載追い越し走行におけるマルチホップ通信でのパケット到達率の向上について検証を行う.

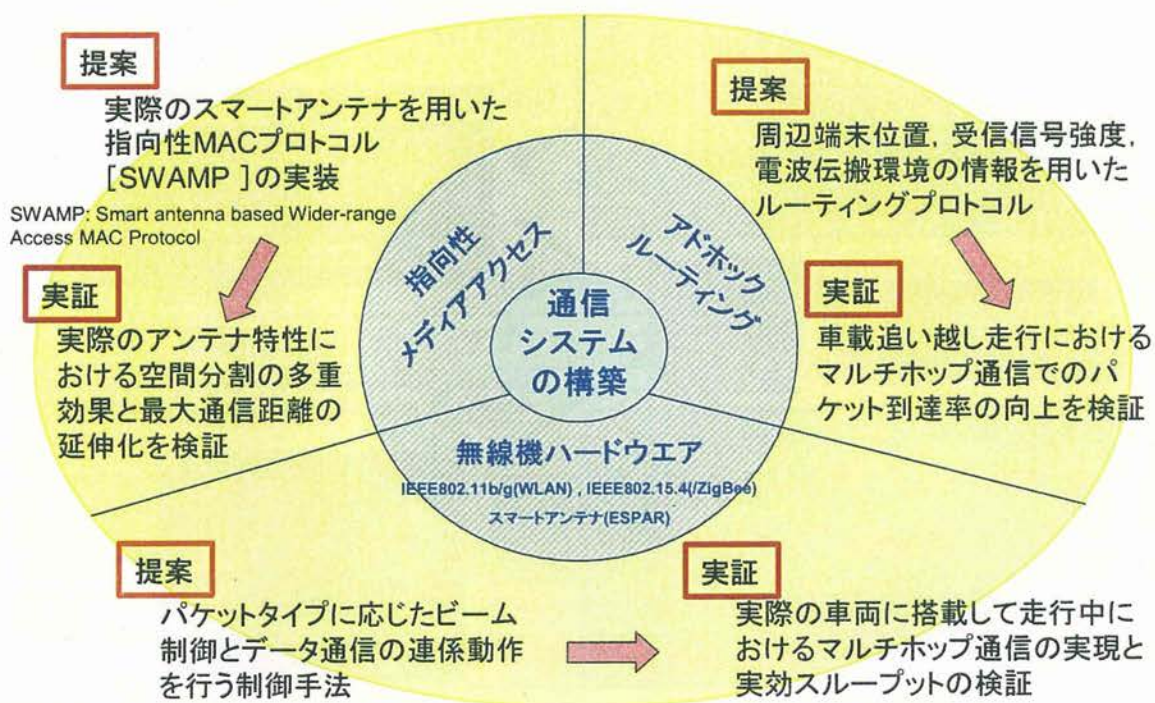


図 2.3-2 スマートアンテナを用いた通信装置の実証的研究

Fig.2.3-2 Empirical discussion for wireless ad hoc communication systems on smart antennas

## 第3章 スマートアンテナを用いた無線装置の構築と実験評価

### 3.1 緒言

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、その場の端末だけでネットワークを構築することができる。また、端末自身がルータ機能を有しているので、所謂、端末間で電波が届かない場合には、中継端末を介して通信を確保するマルチホップ通信が可能である。

そこで、ITS (Intelligent Transport Systems)の分野への応用として、高速道路で車群内の任意の車どうしでの通信による協調走行や、交差点での見通し外道路状況の伝送による事故回避等に有効と考えられている。近年では低価格化と普及が進んでいる無線 LAN (Local Area Network) カードとノート PC を用いて無線アドホックネットワークの実験が行われるようになって来た。元々、伝送速度は無線 LAN が圧倒的に携帯電話よりも優れており、道路状況等の大規模なデータを短時間で伝送することが期待出来る。

この時、通常無線 LAN カードを使用した場合、アンテナのビーム形状として無指向性ビームでの使用が前提となる。一方、アンテナのビーム形状に指向性ビームを想定すると、周辺端末の方向探知、周辺端末との電波干渉の低減、利得向上による通信距離の延伸化等が期待出来る。そこで、無線アドホックネットワークに指向性ビームを用いたメディアアクセス制御 (MAC: Medium Access Control) プロトコルの研究が必要とされている[10]-[17]。

ここで、アンテナのビーム形状や電波伝搬モデルを理想的なモデルに仮定したシミュレーションによる評価ではなく、ITS のような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、無線装置固有の特性、実空間の電波伝搬による影響も考慮して実証的に評価する必要がある。

本研究では、指向性ビームを用いたデータ通信が可能なテストベッドを開発するものとする。しかし、現行の無線 LAN ドライバにビーム制御機能を組み込むことは、ドライバのソフトウェアやハードウェアのインターフェース等に詳細な情報が必要となるが、無線 LAN チップメーカーと特別な契約を結んで詳細な

情報を入手しない限り、組み込みは実現が難しい。そこで、現行の無線 LAN ドライバによるデータ通信と、新たに行う指向性ビーム制御との連携動作を、アプリケーション側から行う方法を提案する。アプリケーション側には制御部（CPU ボード）を設けて、連携動作の中心となるデータ通信とビーム制御のタイミング調整を専用に行うものとし、スループットへの影響を出来るだけ低減させるための具体的な方策と効果について示す。

第 3.2 章にて、このような指向性ビームを用いてデータ通信が可能となるテストベッドの設計における基本的な構成や方式を説明する。また、関連研究として、文献[18]では、指向性ビームを用いたアドホック無線装置の紹介はあるが、シミュレーション結果のみで、実際の装置の構成や方式、及び、実験結果については報告されていない。

第 3.3 章にて、このように指向性ビームを用いてデータ通信が可能となるテストベッドを用いて、屋内での基本特性や、屋外での移動体におけるマルチホップ通信の特性を説明する。また、関連研究として、文献[19]では、IEEE802.11b 規格の無線 LAN を用いた移動体におけるマルチホップ通信の実験結果が報告されているが、アンテナのビーム形状は無指向性ビームのみによるものである。

従って、本論文では、無線 LAN をベースとして、指向性ビームを用いてデータ通信を可能とする無線装置の設計内容と実験による基本特性を実証的に評価することを特徴とする。

## 3.2 テストベッド

### 3.2.1 基本構成

本テストベッドの基本的な構成を、図 3.1 に外観、図 3.2 にブロック図にて示す。

スマートアンテナとして ESPAR アンテナ[20]を用い、2.4GHz 帯 ISM (Industry Scientific Medical)バンドの周波数を使用し、DC 電圧制御により無指向性及び指向性のビームを切り替えて生成する。本アンテナについては、第 3.2.2 節にて説明を行う。



無線モジュールには高速のデータ伝送が可能な IEEE802.11g 規格[20]の無線 LAN カードをベースとし、各種パケットに応じて ESPAR アンテナで生成する無指向性や指向性のビームを切り替えるために、アプリケーション側の制御部から、無線 LAN チップ用ドライバとビーム制御ドライバの連携動作を制御する。また、制御部はノート PC と汎用性の高い Ethernet で接続し、ノート PC に実装したルーティングプロトコルにより、マルチホップ通信を可能としている。本テストベッドでは、データの送受信とビーム制御のタイミングをスムーズに行うことが重要であり、スループットへの影響をできるだけ低減することが目標となる。第 3.2.3 節にて、具体的な方策について説明する。

各端末は通信したい端末の方向に指向性ビームを設定するために、周辺端末の方向を知る必要がある。GPS (Global Positioning System)を用いて位置情報から方向を知って指向性ビームを正しく設定する方法があるが、構造物等により電波が遮蔽され、電波伝搬状況が良くない場合には利用が出来ないことがある。そこで、位置情報を利用するのではなく、電波伝搬的に最も良い方向を探知して指向性ビームを設定する方法を用いる。

文献[22][23]では、各端末は一定周期毎に指向性ビームで全方位走査（最大 12 方位）しながら送信する。この時、周辺端末は受信状態で、アンテナビームは無指向性ビームとし、方位毎の受信信号強度を計測して、この情報を返送する。従って、各端末は周辺端末に関する方向と受信信号強度の情報を得て、AST (Angle SINR Table)の生成を行い、この方向情報を元に指向性ビームを設定し、データ通信を行うものとしている。

この方法では、角度分解能（12 方向の場合は  $30^\circ$ ）よりも詳細な方向を探知することが出来ない。そこで、文献[24][25]のように、シーケンシャルに得られた 2 つ(左右)の指向性ビームの受信信号強度を元に、モノパルス測角処理により求める方法を用いる。第 3.2.4 節にて、周辺端末の方向探知について説明する。

ノート PC(Linux Red Hat 9)は、本テストベッドにおける操作装置として、スループット、遅延時間、転送時間を計測する機能や、内部ログ、タスクの振り舞いを時系列的に把握する機能を有し、ルーティングプロトコルの実装を行う。

また、操作装置は制御部（CPU カード）と Ethernet を通じて収集した周辺端末との電波伝搬状況や方向情報に基づき、次にデータを送る相手端末を決定し指向性ビームを設定する。この時、Ethernet で接続している制御部や無線 LAN 部分を必ず中継してから送信することとなる。また、相手側の端末でも制御部や無線 LAN 部分を必ず中継してから、Ethernet を通じて相手側の操作装置がデータを受信することとなる。その結果、ホップ数に送信と受信での無線 LAN を経由する 2 ホップが加算される。このままでは、操作装置のルーティングテーブルには、Ethernet で接続された制御部との無線 LAN が登録されてしまうことになるが、無線 LAN は、指向性ビームを設定した次にデータを送る相手端末とは異なるので、無線 LAN 部分を、いわば、透過させる必要がある。

操作装置のノート PC と、制御部や無線 LAN は一体化が望ましいが、データ通信とビーム制御のタイミング調整に伴う処理時間を出来るだけ短時間で行ってスループットへの影響を低減させるために別体とする。そこで、イーサネットフレームを IEEE802.11 のペイロードにカプセル化する方法により、無線 LAN 部分を透過させて、無線区間を意識することなくデータ通信を行うことが出来るようにする。この結果、ルーティングテーブルには、無線 LAN ではなく、指向性ビームを設定した次にデータを送る相手端末を登録することが出来る。第 3.2.5 節にて、この MAC 透過処理について説明する。

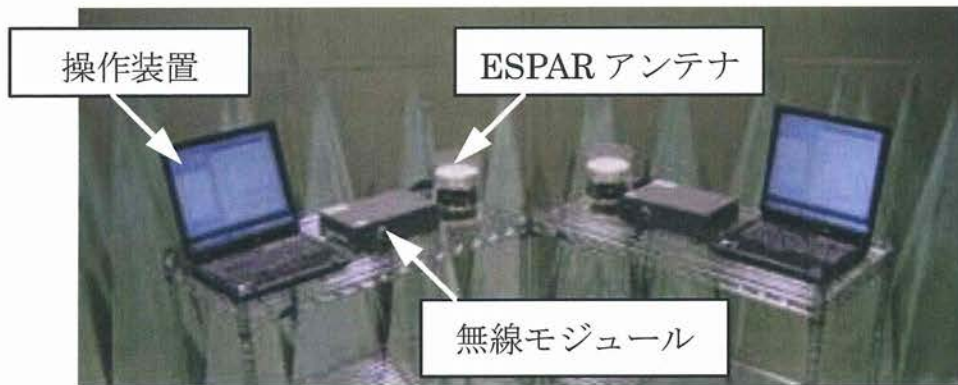


図 3.1 アドホック無線装置の外観

Fig.3.1 Overview of Ad hoc testbed

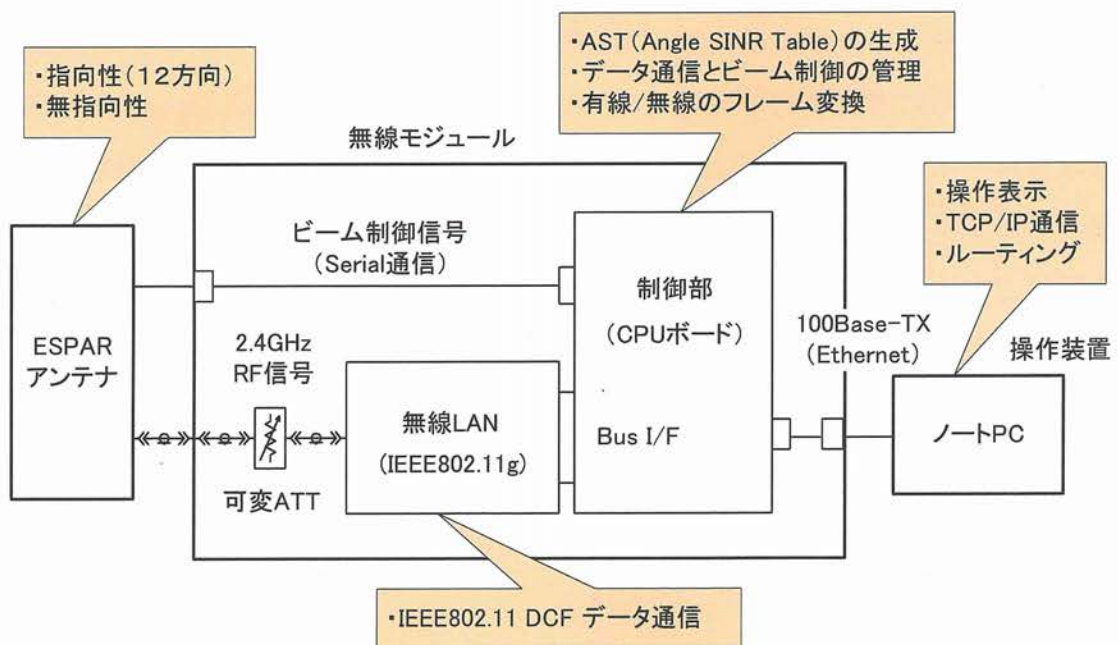


図 3.2 アドホック無線装置のブロック図

Fig.3.2 Block diagram of Ad hoc testbed

### 3.2.2 ESPAR アンテナ

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出来るアンテナとして ESPAR アンテナを用いることとする。図 3.3 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 電圧で逆バイアスにて印加し、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  $30^\circ$  毎の 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があるが、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全て用いて最適な重み付け係数を低周波のデジタル回路で演算するため、高速にビーム形成が出来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イオードだけで逆バイアス条件からも低消費電力であり、バッテリー駆動が必要な携帯端末への親和性が高いと言う特徴がある。



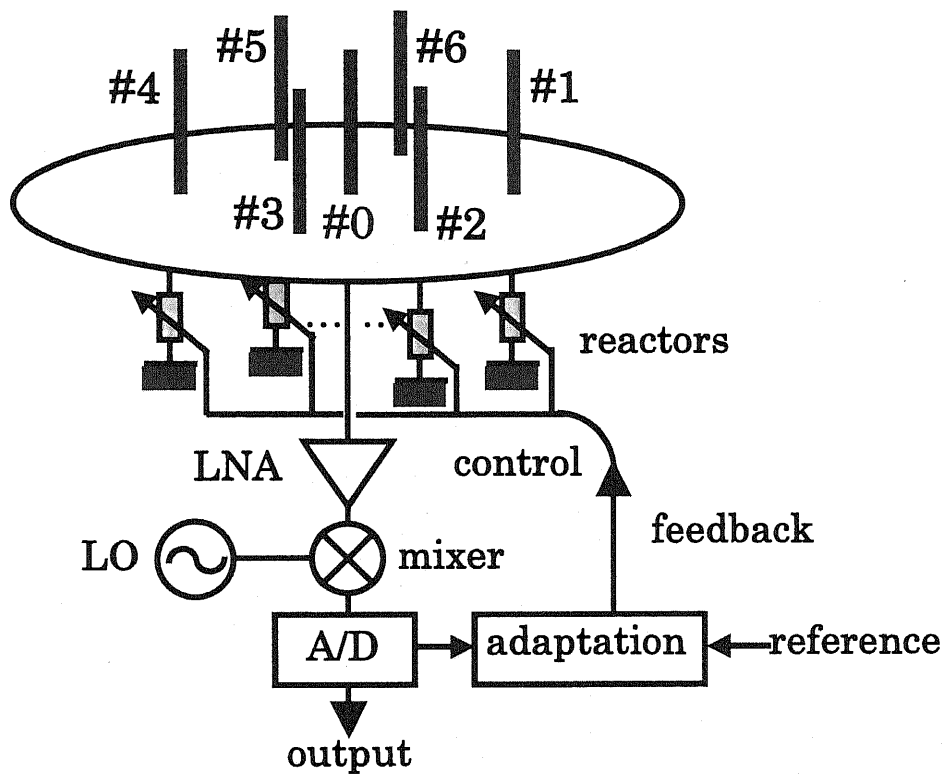


図 3.3 ESPAR アンテナの構造

Fig.3.3 Structure of ESPAR antenna

### 3.2.3 データ通信とビーム制御のタイミング調整

通常のタイミング調整では、無線 LAN ドライバとビーム制御ドライバとは分離して動作しているので、無線モジュールの制御部におけるアプリケーション側から同期をとることになる。その際に、スループットの低下を出来るだけ低減するため、最適化が重要であり、その方策について次に示す。

まず、データの送信設定を行う送信応答時間について、無線 LAN ドライバとビーム制御ドライバを、順次、設定するのでは遅延が大きくなる。そこで、図 4 に示すように、無線 LAN ドライバとビーム制御ドライバを一体化して、無線 LAN ドライバによるデータのフレームを送信するタイミングでビーム制御までを同時に実施する方式を行う。その際、宛先 MAC アドレスとビーム方向の情報は、アプリケーション側から、一体化した無線 LAN ドライバへ渡され、ビーム制御ドライバで使用される。

次に、データの送信完了を確認する送信確認時間について、システム上の統計情報カウンタを参照する方法では、カウンタファイルをポーリングすることにより、連続してオープン・リード処理が発生するので、大きな負荷が発生する。また、カウンタ値は送信完了と同時にカウントアップされる事が保証されておらず、実際の送信完了から遅延が発生する可能性がある。そこで、図 5 に示すように、無線 LAN ドライバがデータのフレーム送信完了後、割り込み処理にて、直接、アプリケーションへ送信完了のイベントを通知する方式を行う。これにより、次のビーム制御までの時間を出来るだけ短くなるようにする。

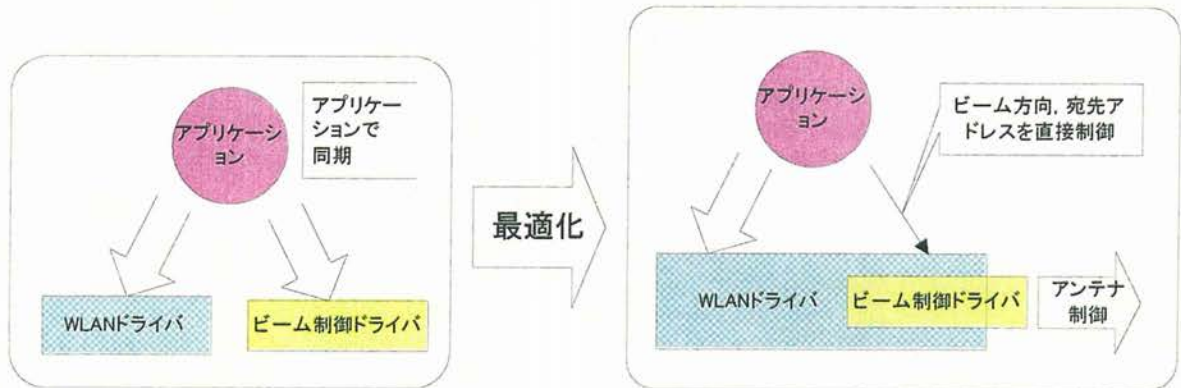


図 3.4 無線 LAN ドライバとアンテナ制御ドライバの融合

Fig.3.4 Merging for Driver Software between WLAN and Beam Control

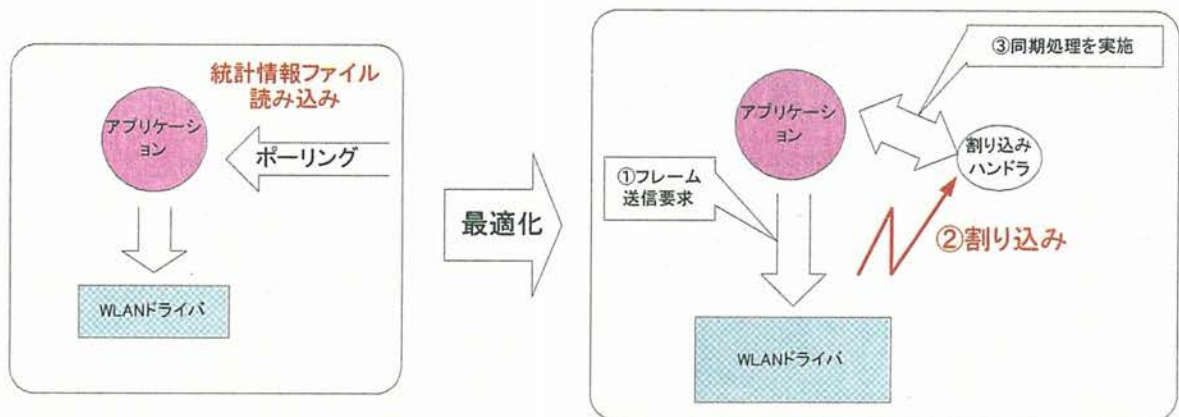


図 3.5 送信完了通知方式

Fig.3.5 Notification of data transmission completed

### 3.2.4 周辺端末の方向探知

図 3.6 に示すとおり，AST (Angle SINR Table)情報は，各端末がキャリアセンスを行いながら，作成元端末が周辺へ通知(Setup 信号)して指向性ビーム(RQ 信号)を走査し，周辺端末がその角度毎の受信信号強度の測定結果を返信(RE 信号)することにより収集される．この AST の値から式①，式②及び図 3.7 に示す振幅モノパルス処理を行い，表 1 に示すように詳細な方向を算出する．

従って，無線モジュールは電源投入後，内部の初期設定を行った後，無指向性ビームに設定し，無線 LAN 上の周辺端末の通信状況を確認する(待ち受け状態)．この時，Set up 信号を受信すると，続いて受信した RQ 信号を元に RE 信号を生成し Set up 信号を送信元へ返信する．また，周辺端末が通信していなければ定周期で自端末の AST 生成フェーズに移行する．データ通信は，AST 情報を元に目的端末へ指向性ビームを向けて送信する．ACK 信号が確認出来なければ IEEE802.11 規格により最短周期(SIFS 間隔)で最大 10 回まで再送を行うものとする．

また，AST により得た周辺端末の方向情報をブロードキャストで送信することにより，この方向情報を受け取った端末は，自ら AST により得た周辺端末の方向情報も含めて，更にブロードキャストで転送する．このような手順を定期的に繰り返すことにより，無指向性ビームでは，直接，届かない端末間でも，例えば，転送できる中継端末が 2 台以上あれば，互いの方向関係を知ることが出来るようになる．具体的な例を付録で示す．

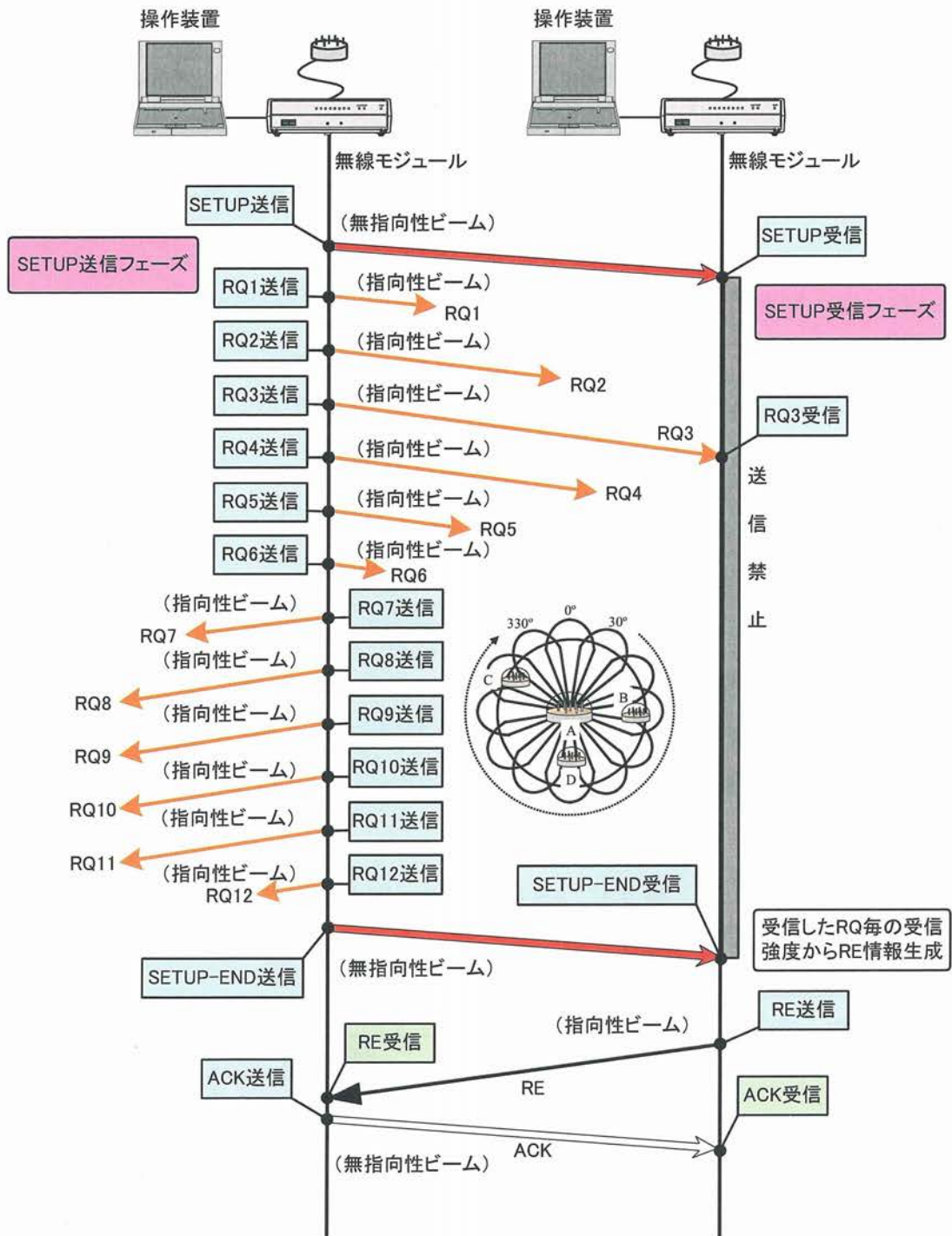


図 3.6 AST 作成手順

Fig.3.6 AST Creation Protocol

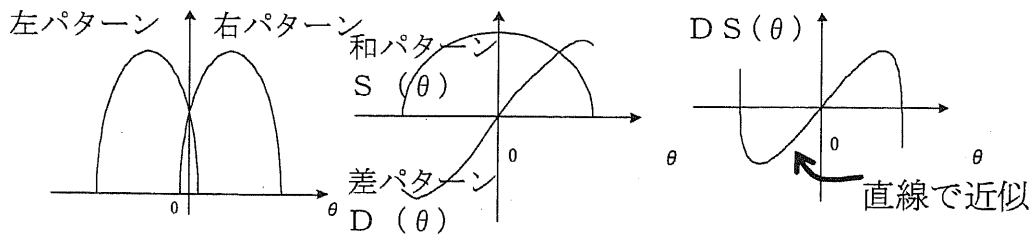


図 3.7 モノパルス処理

Fig.3.7 Sequential lobbing monopulse processing

$$\theta = \frac{\theta_s \cdot DS(\theta)}{k} \quad \dots \textcircled{1}$$

$$\sigma = \frac{\theta_s}{k \cdot \sqrt{SNR \cdot n}} \quad \dots \textcircled{2}$$

$\theta_s$  : 和パターンの幅,  $DS(\theta)=D(\theta)/S(\theta)$ ,  $k$  : 傾き,  
 $\sigma$  : 標準偏差,  $SNR$  : 受信信号レベル,  $n$  : 観測回数

表 3.1 AST 情報例 (端末D)

Table.3.1 AST Example (Node D)

角度 (°)	受信信号レベル (RSSI)		
	端末A	端末B	端末C
0°	11.4	-59	-14
30°	4.3	-82	4.3
60°	-2.3	8.7	-13.6
.....	.....	.....	.....
330°	7.2	5.1	8.3
モノパルス処理	358度	78度	315度

### 3.2.5 MAC 透過処理

操作装置と Ethernet で接続した無線モジュール（制御部の無線 LAN）とのデータ転送処理（MAC 変換処理）を MAC 透過処理と呼ぶ。図 3.8 及び図 3.9 に示すように、無線モジュールでは、操作装置からのイーサネットフレームを受信した場合、その宛先 MAC アドレスから送信先無線モジュールの MAC アドレスを判定し、イーサネットフレーム全体を IEEE802.11 フレームのデータ部として、カプセル化することにより IEEE802.11 フレームへと変換する。送信先 MAC アドレス変換 (DA→RA) については、操作装置と無線モジュールの MAC アドレスの対応を予め記録した MAC アドレス変換テーブルを用いる。

MAC アドレス変換テーブルで送信先無線モジュールの MAC アドレスが見つからない場合は、そのイーサネットフレームは棄却されるものとする。但し、イーサネットフレームの宛先 MAC アドレスが自端末の場合には、MAC アドレス変換テーブルによる宛先変換することなく、自端末にて処理する。なお、ブロードキャストアドレスの場合は、そのままブロードキャストし、マルチキャストアドレスの場合は、マルチキャストを行う。

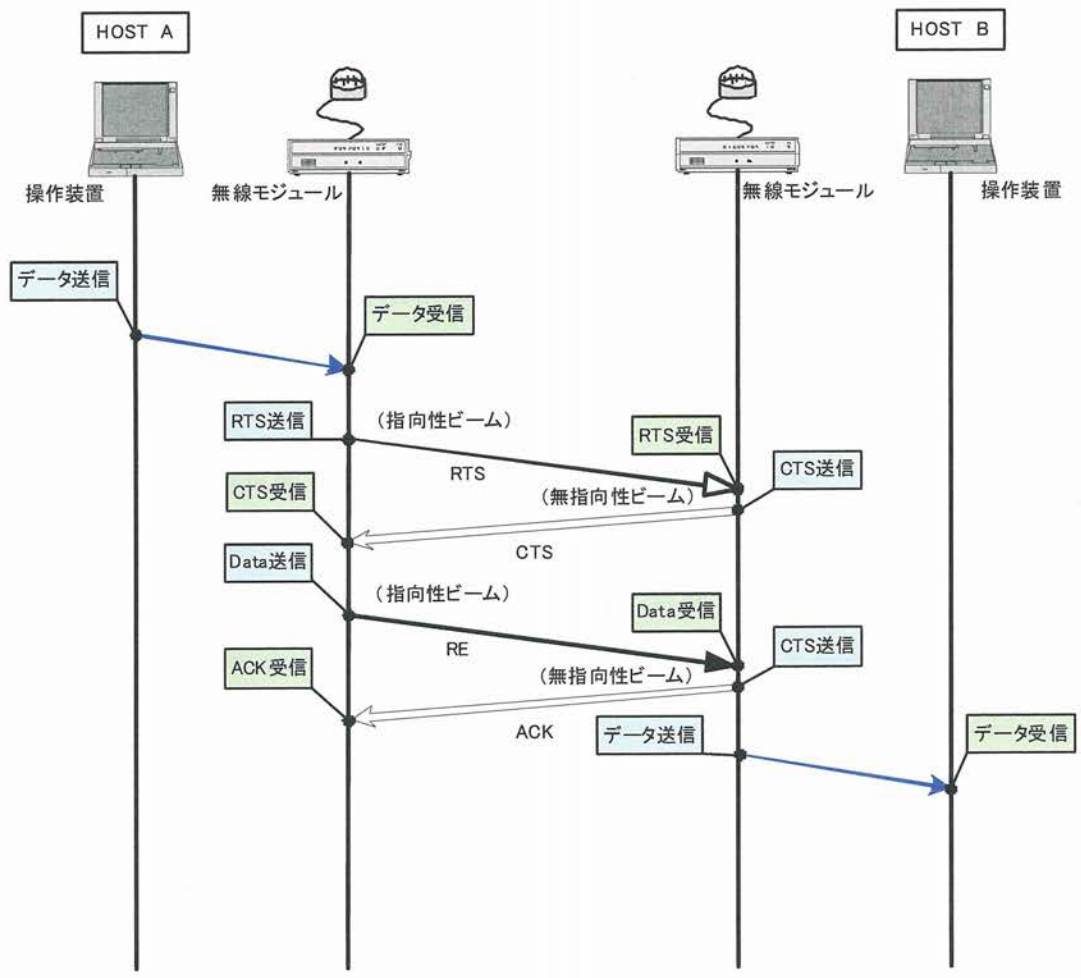


図 3.8 データの流れ

Fig.3.8 Data flow sequence



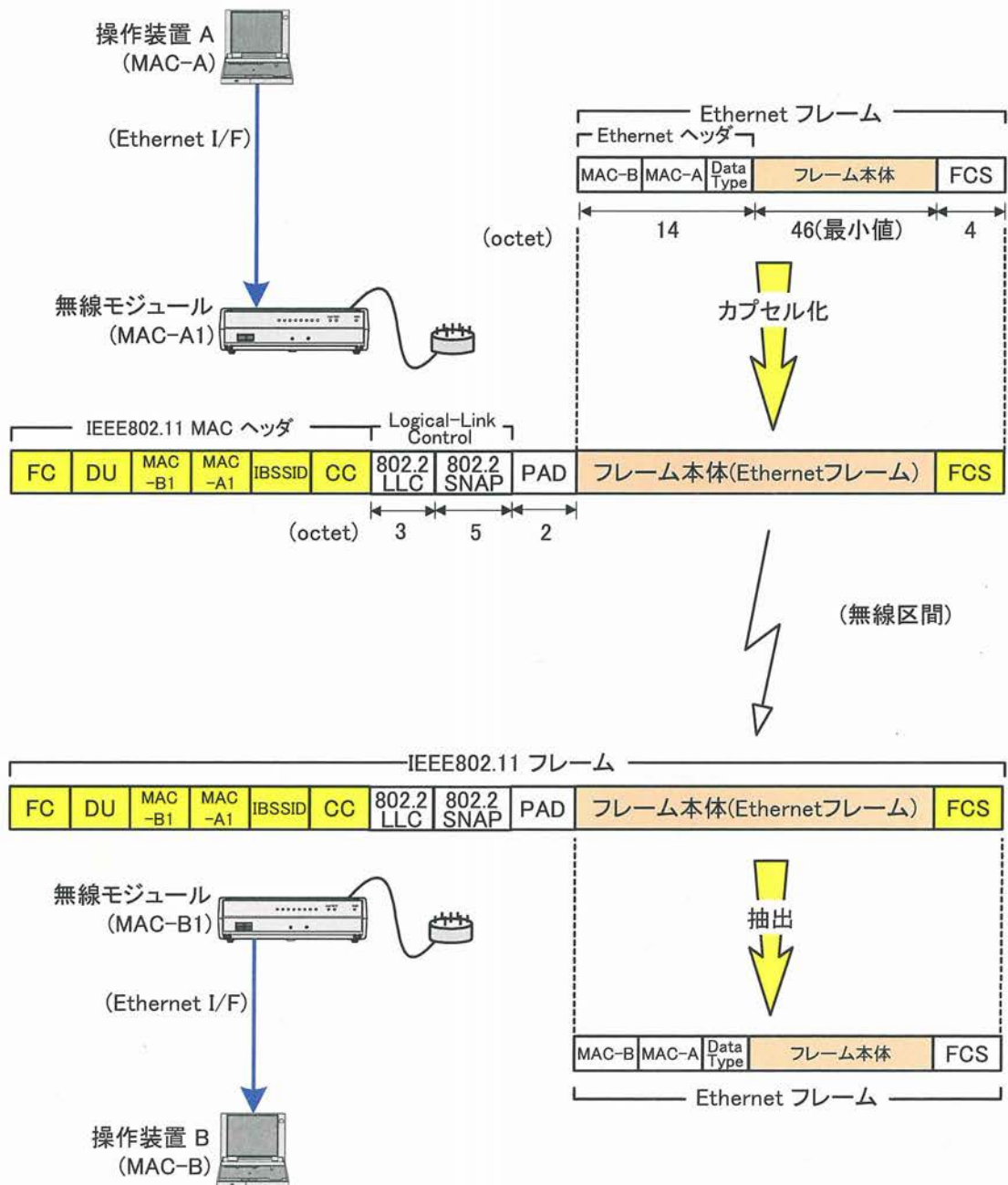


図 3.9 フレーム変換処理

Fig.3.9 Frame converter

### 3.3 基本特性

#### 3.3.1 タイミング調整とスループットへの影響

無線 LAN ドライバとビーム制御ドライバのタイミング調整を、アプリケーションから行うに当たり、第 3.2.3 節で説明したような最適化を実施することにより、処理時間を大幅に短縮することが可能となった。また、送信応答処理及び送信確認処理の時間が短縮されたことで、無線モジュールの制御部の負荷が軽減され、MAC 透過処理の時間についても、短縮することが可能となった。送信応答処理、送信確認処理、及び MAC 透過処理における最適化後の改善効果は、プログラム上のチェックポイントによるモニタの結果、それぞれ約 40%に低減していると考えられる。

送信応答処理の最適化は、送信する全てのフレームに対して効果がある。

送信確認処理の最適化は、次々にビームを切り替える場合に効果大きい。例えば、周辺端末の方向探知を行う際には、指向性ビームを 30° 毎の 12 方向に走査させる処理が含まれることから、方向毎にこの様な送信確認処理を行えば、AST 生成時間を短縮することに効果がある。この結果、AST 生成時間は、キャリアセンス等による再送は無しの条件下で、最適化前の 48.8msec/回から最適化後は 16.5msec/回へと、約 34%へ低減することが出来る。

また、MAC 透過処理時間の短縮は、データを連続して送信する場合に効果大きい。データ送信時における有線フレームから無線フレームへの変換処理と、データ受信時における無線フレームから有線フレームへの変換処理を、全ての送信フレームに対して行うので、スループットへの影響が大きい。この結果、例えば、AST 更新周期を 1 sec として、伝送速度を 54Mbits/sec 固定とし、50Mbytes のデータを送信するとき、TCP/IP 通信におけるスループットは、キャリアセンス等による再送は無しの条件下で、最適化前の 2.3Mbits/sec から最適化後は 5.2Mbits/sec へと、約 2.3 倍に向上することが出来る。

図 3.10 に、AST 更新周期と送信データのサイズに応じたスループットの一覧を示す。図より、AST 更新周期が 1sec 以下となると、スループットに影響があることが判る。送信するデータのサイズに対して、最適化する前後のそれぞれ

のスループットに大きな差が無いのは、1フレーム毎にMAC透過処理の変換処理に伴う処理時間が付随するので、実データを送信している時間に対して、相対的なオーバーヘッド（処理時間等）の比率が下がらないためと考えられる。

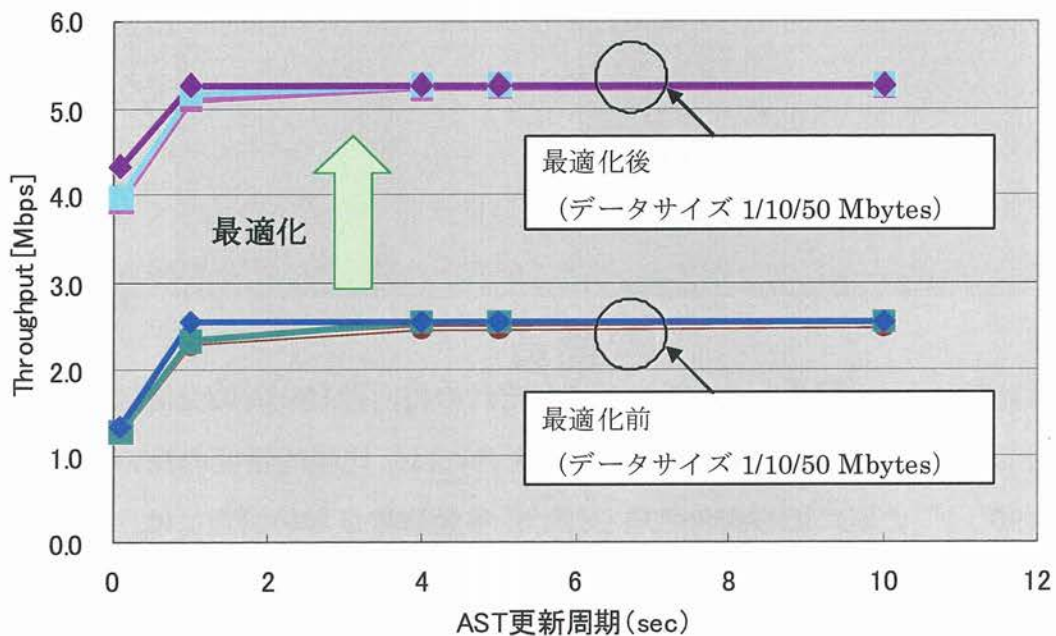


図 3.10 AST 更新周期に対するスループット特性（最適化前後）

Fig.3.10 Throughput vs. AST cycle (Before/After Tuning)

### 3.3.2 周辺端末の方向探知

モノパルス処理における2つ(左・右)の指向性ビームの組み合わせとして、図3.6における、隣どうし(30°) / 一つ飛ばし(60°) / 二つ飛ばし(90°)を想定する。二つ飛ばし(90°)の場合で、ほぼ電力3dB幅の組み合わせとなる。それぞれの指向性ビームから差/和=DS( $\theta$ )のパターン特性は、図3.11に示すように指向性ビーム間角度が大きいほど、 $k$ (傾き)の値は大きくなる。その結果、測角の $\sigma$ (標準偏差)は小さくなる。しかし、指向性ビーム間角度が、二つ飛ばし(90°)のほぼ電力3dB幅の組み合わせより大きくなるとSNRが低下して $\sigma$

の値が劣化してしまう。また、電力 3dB 幅の組み合わせの場合でも、サイドローブの影響を受けて  $k$  の値が変動するので、リニアな領域から外れ、実際には角度処理範囲に制限を受けて狭くなる。

電波暗室にて、相手端末を設置して固定した場合の、式②による  $\sigma$  (標準偏差) の算出値と実測による値の比較を表に示す。算出の際、SNR は ADC が 6bit なので 22dB 程度と想定し、ほぼ算出値に近い値が得られており、誤差は振幅変動による影響と思われる。同じく、電波暗室にて、移動端末に対する推定角度と測角処理角度を比較する。図 3.12 に示すように“二つ飛ばし (90°)”における処理角度の  $\sigma$  は 5.2° と表 2 に示される静止状態での値より大きくなったが、実験においては手動により端末を回転する際の“ぶれ”による影響も含まれている。

これらにより、AST で得られたそれぞれの指向性ビームの受信信号強度の値に対して、周辺端末の移動速度が遅い場合には、比較的精度の良い“二つ飛ばし (90°)”の値による測角処理を行い、移動速度が早い場合には、精度は若干低下するが“隣どうし (30°)”の値による測角処理を、組み合わせを変えて処理していくことが望ましいと考えられる。

また、周辺端末の位置測定のために行う AST 情報の更新周期については、実際の無線装置に固有の性能からの制約により、本来のデータ通信に与える影響についても考慮が必要である。図 3.13 に、本テストベッドにおける、AST プロトコルの更新周期や周辺端末の数と ping コマンドによるエラーとの関係を計測した結果を示す。図中より 1 対 1 の通信で干渉端末台数が 8 台の場合、AST 更新周期を 1 秒よりも短くすると大幅にエラーが増えることが判る。今後、無線装置の性能が大幅に向上しても制約は生まれると考えられるので、AST 更新周期を更に短くする場合には、予測的な手法についても検討が必要となる。

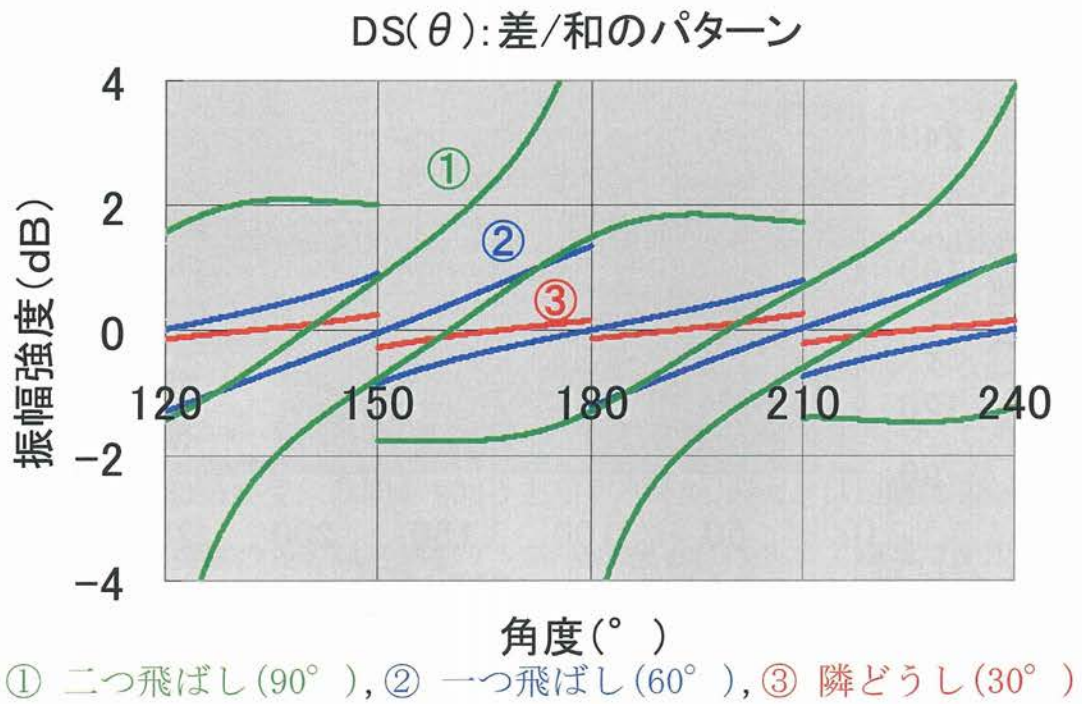


図 3.11 DS( $\theta$ ): 差/和のパターン特性

Fig.3.11 DS( $\theta$ ): pattern characteristics

表 3.2 測角の標準偏差

Table.3.2 Standard deviation( $\sigma$ ) between calculated and measured

ビーム組み合わせ	$\sigma$ (算出値)	$\sigma$ (実測値)
二つ飛ばし (90° )	2.50°	1.38°
一つ飛ばし (60° )	4.18°	4.03°
隣どうし (30° )	5.39°	4.72°



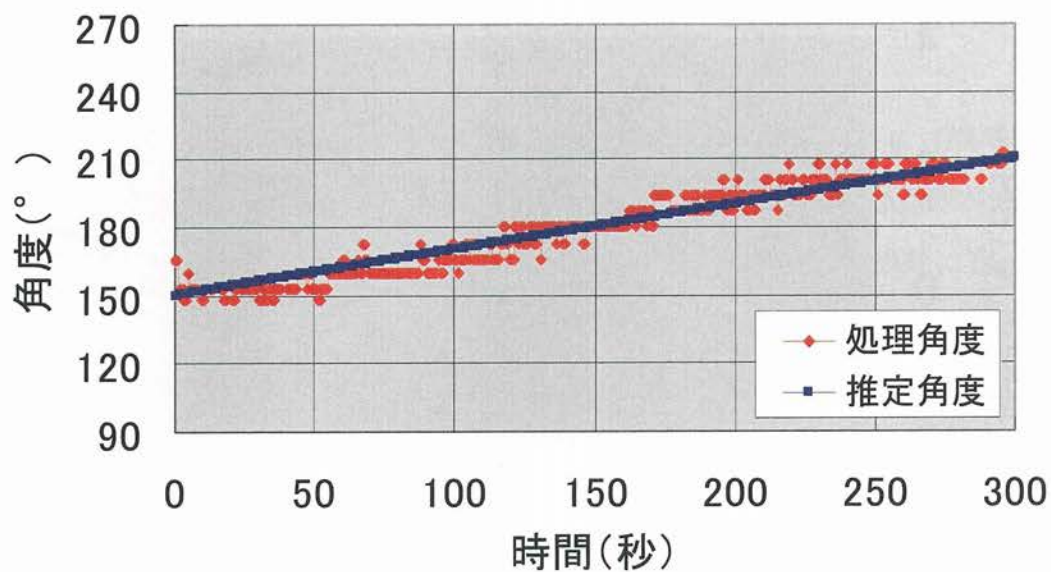


図 3.12 移動端末に対する測角処理結果

Fig.3.12 Angle measurement result for mobile node

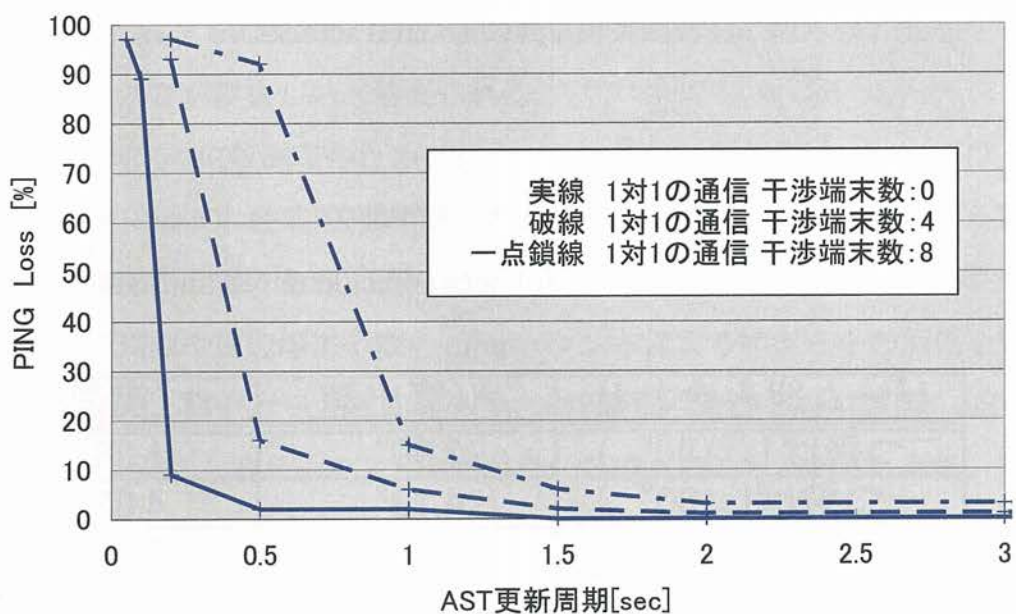


図 3.13 AST 更新周期と干渉端末数を与える ping エラーの関係

Fig.3.13 Ping error rate vs. AST cycle related to interference node's

### 3.3.3 スループットと通信距離

本テストベッドを用いた1対1の対向状態において、伝送速度を固定化して ping コマンドを用いた時のエラーレートを計測した結果を図 3.14 に示す。最小受信感度としては、無線 LAN カードメーカー公称値とあったエラーレート 10% で定義するものとする。この結果、最も低速レート(1Mbps)では約-90dBm、最も高速レート(54Mbps)では約-70dBm となる。適応変調の機能があるので、最も低速レートの場合を基準に式③により回線設計(フェージングによる影響等を除く)を行うと、表 3 に示すとおり最大通信距離は 2,330m となる。一方、最も高速レートでは最小受信感度が 20dB 上昇するので、最大通信距離は 233m となるが、高速変復調の場合は送信側アンプを出来るだけリニア領域で使用するために送信電力を低く抑える無線 LAN メーカーもあるので、これより少し短い通信距離となる。

無指向性ビームどうしでの最大通信距離は、送信側の指向性ビームと無指向性ビームとの利得差が 4dB (=6dBi-2dBi) あるので、最大通信距離としては約 63% (=1/1.6 倍) となり、同じく式③により最も低速レートの場合では 1470m、最も高速レートでは 147m 以下となる。

また、ルーティングテーブル更新用のハローパケットは最も伝送速度が低く、データ通信は最も高速で行おうとすると、受信感度で 20dB の違いが有り、所謂、グレーゾーンとなる通信距離は最大で 10 倍にもなることが判る。適応変調時の UDP と TCP のスループット及び ping によるエラーレートの総合通信特性を図 3.15 に、伝送速度を固定した時の UDP と TCP のスループットを図 3.16 と図 3.17 に示す。

実験結果により、UDP で約 9.5Mbps、TCP で 5.8Mbps の実効スループットの値が得られている。操作装置では、スループット、遅延時間、転送時間を計測する機能や、内部ログ、タスクの振る舞いを時系列的に把握する機能を有しているが、これらの処理が負担となってスループットを低下させることにもなるので、実験での解析目的ではなく運用に近い状況のときは、これらの作業を停止させることにより、更にスループットを向上させることが可能である。また、

操作装置から Ethernet で送られてくるデータを、MAC 透過処理を行って無線 LAN から送信するに当たり、操作装置側で無線 LAN 側のキャリアセンス等による待ち状況に応じて Ethernet データの送信制御を行うことによっても、更にスループットを向上させることが可能と考える。

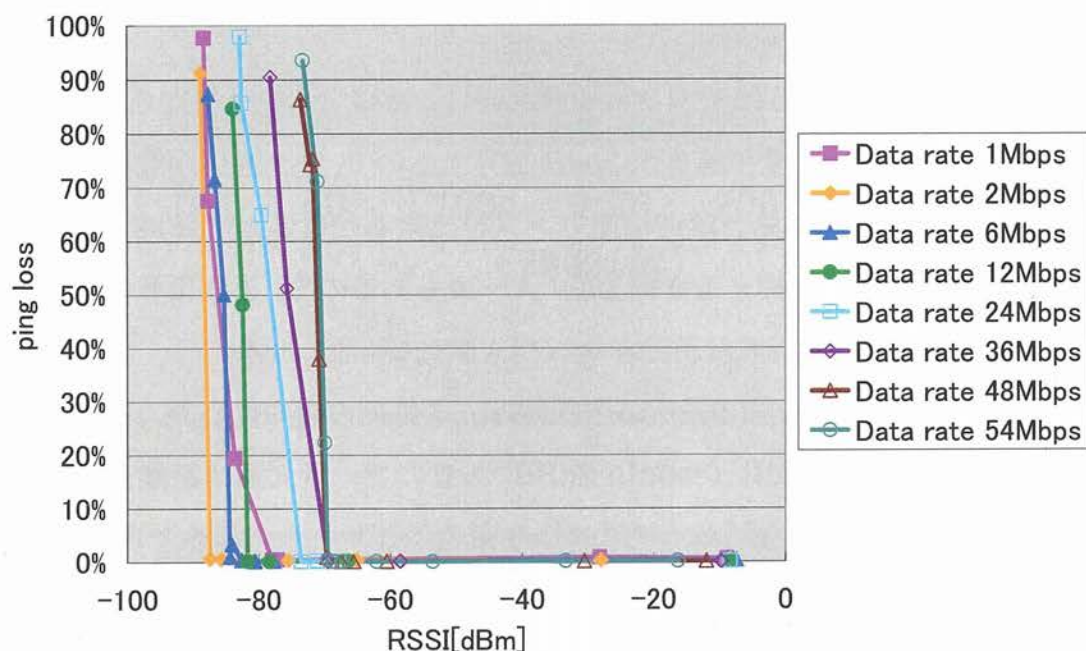


図 3.14 伝送速度毎の受信感度

Fig.3.14 Minimum received signal level (ping)

$$R \max^2 = \frac{PtGtGr \lambda^2 LtLr}{(4\pi)^2 S \min} \dots \textcircled{3}$$



表 3.3 回線設計例

Table.3.3 Maximum communication distance

記号	項目	諸元	単位	備考
f	周波数	2.472	GHz	IEEE802.11g_ch13 波長 $\lambda = c/f$ (c:光速)
Pt	送信電力	18	dBm	無線LANモジュール出力端最大値(公称)
Lt	アンテナ給電ロス	-4.2	dB	筐体内及び車載用RFケーブル×5m相当
Gt	送信アンテナ利得	6	dBi	指向性ビームのアンテナ利得(Tx)
PGt	実効輻射電力	19.8	dBm	
Rmax	最大通信距離	2330	m	Pr=Sminとなる地点
Gr	受信アンテナ利得	2	dBi	無指向性ビームのアンテナ利得(Rx)
Lr	アンテナ給電ロス	-4.2	dB	筐体内及び車載用RFケーブル×5m相当
Pr	受信機入力レベル	-90.0	dBm	
Smin	最小受信感度	-90.0	dBm	10%エラーで定義

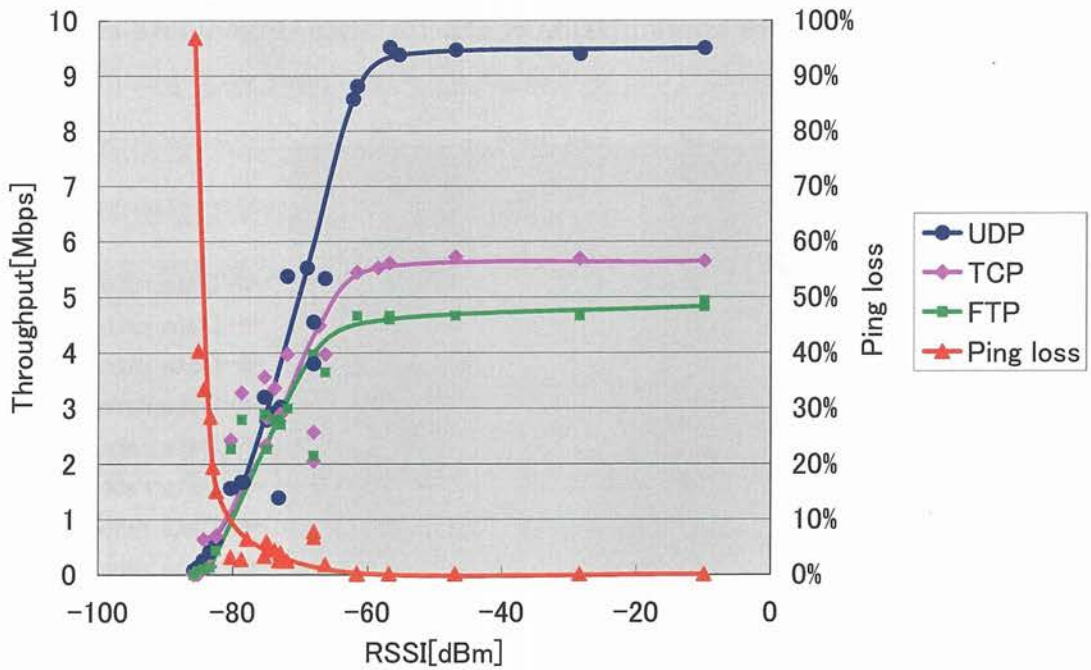


図 3.15 総合通信特性 (適応変調)

Fig.3.15 Adaptive data transmission characteristics

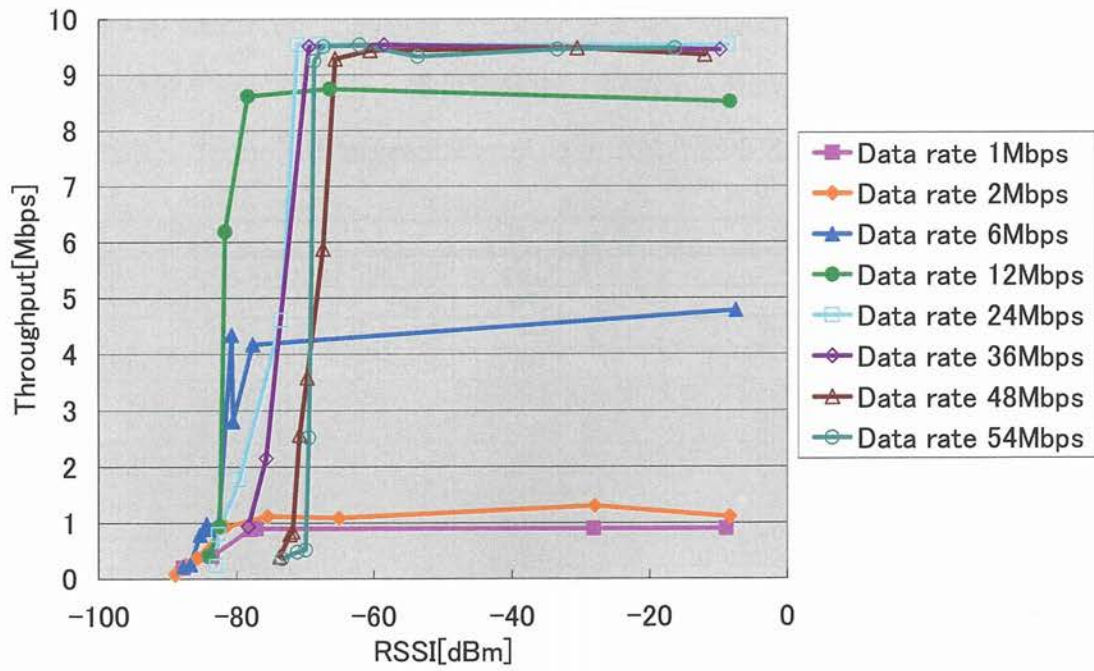


図 3.16 UDP 通信特性 (伝送速度固定)

Fig.3.16 UDP data transmission characteristics (Fixed data rate)

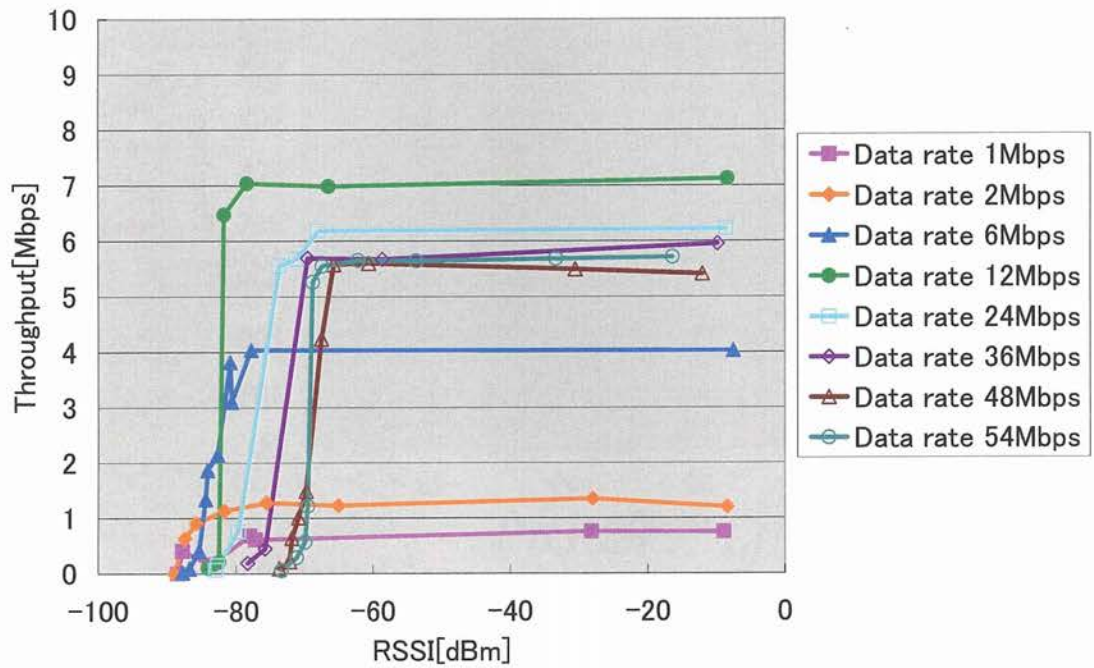


図 3.17 TCP 通信特性 (伝送速度固定)

Fig.3.17 TCP data transmission characteristics (Fixed data rate)

### 3.3.4 ストリーミング

本テストベッドとカメラ及び画像処理用コーデック [26] を、Hub を経由し Ethernet で接続して、ストリーミング配信技術を使用したアプリケーションを組合せることにより、移動局にて撮影した映像をマルチホップ通信によってリアルタイム配信し、直接電波の届かない移動局にて映像を表示することが出来る。実験の構成を図 3.18 に示す。例えば、見通しの効かない道路の交通情報をマルチホップ通信により転送することや、渋滞情報や緊急車両接近情報を届けることで、交差点での出会い頭事故の低減に効果が期待出来る。

ストリーミング構成における主要性能を下記に示す。

- (1) ビデオビットレート            50kbps 以上
- (2) ストリーミングプロトコル    RTSP, RTP
- (3) ストリーミング方式            ユニキャスト
- (4) 同時配信数                    4 クライアント以上
- (5) 対向映像通信プロトコル      H.323

尚、(5) は保守装置の web カメラによる 1 対 1 の通信である。

各端末における IP アドレスの設定は以下の手順とし、斜体字の部分を号機番号への対応とした。

- (1) 無線モジュール            192.168.1.1
- (2) 操作装置                    192.168.1.101
- (3) コーデック                 192.168.1.102
- (4) 保守装置                    192.168.1.103

操作装置と無線モジュールはMAC透過処理により、Gatewayの設定は無いが、コーデックと保守装置の Gateway は操作装置となる。従って、操作装置のスタティックルートにコーデックと保守装置の IP アドレスを登録しておく必要がある。また、操作装置と無線モジュール、及びコーデックと保守装置では、Sub Netmask の設定を変え、255.255.0.0、及び 255.255.255.0 とする。これにより、操作装置からは、自分のグループの構成品と他のグループの構成品を認識することが出来る。また、自分のグループの構成品からのデータは操作装置が Gateway となって、データを送信することとなる。

ストリーミングの構成を実験車両に搭載して、static ルートにて、ping によるエラーレートや遅延時間及び UDP,TCP のスループットを1回当たり 10 秒で、移動状態で5分間の連続で、順次、計測評価を行う。ESPAR アンテナは車上部のキャリア上に据え付け、地上からの高さは 1.8m である。端末は全部で4台であり、カメラを搭載した車両のみが移動または静止し、中継端末及び表示端末は静止状態とした。各端末間距離は、静止及び移動の状態です約 50m 間隔の範囲を走行した。移動はクリープ状態で、ほぼ歩行状態と同程度である。実験結果を図 3.19～図 3.21 に示す。UDP では TCP と異なり再送制御が無く、static ルートのようにルートの再構築が不可能な場合、スループットは端末間の電波伝搬状況に左右され易い。一方、TCP では同様の環境でも、スループットの計測に大きな影響は見られなかった。Ping については UDP でスループットが低下した時に、エラーも増えており整合がとれている。今回の実験は会社構内の道路を利用して実施しており、端末間距離が 50m 程度となり比較的短く、端末間の電波伝搬状況が比較的良くて、動的なルーティングプロトコルでは直接通信となってしまう環境である。3ホップの static ルートによる実験で、ある程度安定した区間のスループットとして、UDP で約 2.9Mbps(ave)、TCP で約 1.8Mbps(ave)の値が得られ、1対1のスループットに対して約 1/3 の値となり、ほぼ整合が取れた値と考えられる。

また、関連研究として、文献[19]では、IEEE802.11b 規格の無線 LAN を用いた移動体におけるマルチホップ通信の実験結果が報告されている。アンテナの

ビーム形状は無指向性ビームのみで、1対1の直接通信で5Mbps近い値、5台4ホップのスタティックルートにて最大1.2Mbps、動的ルーティング（AODV; Ad-hoc On-demand Distance Vector routing）のときの3ホップで420Kbpsの値が報告されており、これらの値は、IEEE802.11bの伝送レートが最大でも11Mbpsであるためと考えられる。

また、カメラからの動画の映像はMPEG4方式で差分のみを伝送することとしている。画面全体の映像がフルに変化するような場合には、UDPで残像が残ることが多い。但し、遅延時間は少なく応答性に優れている。TCPでは殆ど残像は残らないが、遅延時間がUDPの場合よりも増える。また、TCPでは再送制御で上手くいかなかった時には画面が若干の間フリーズすることもある。コーデックにおけるビデオフレームのサイズは最大で360×240で比較的小さく、目的の端末側でのモニタ画面の表示方法には工夫も必要である。

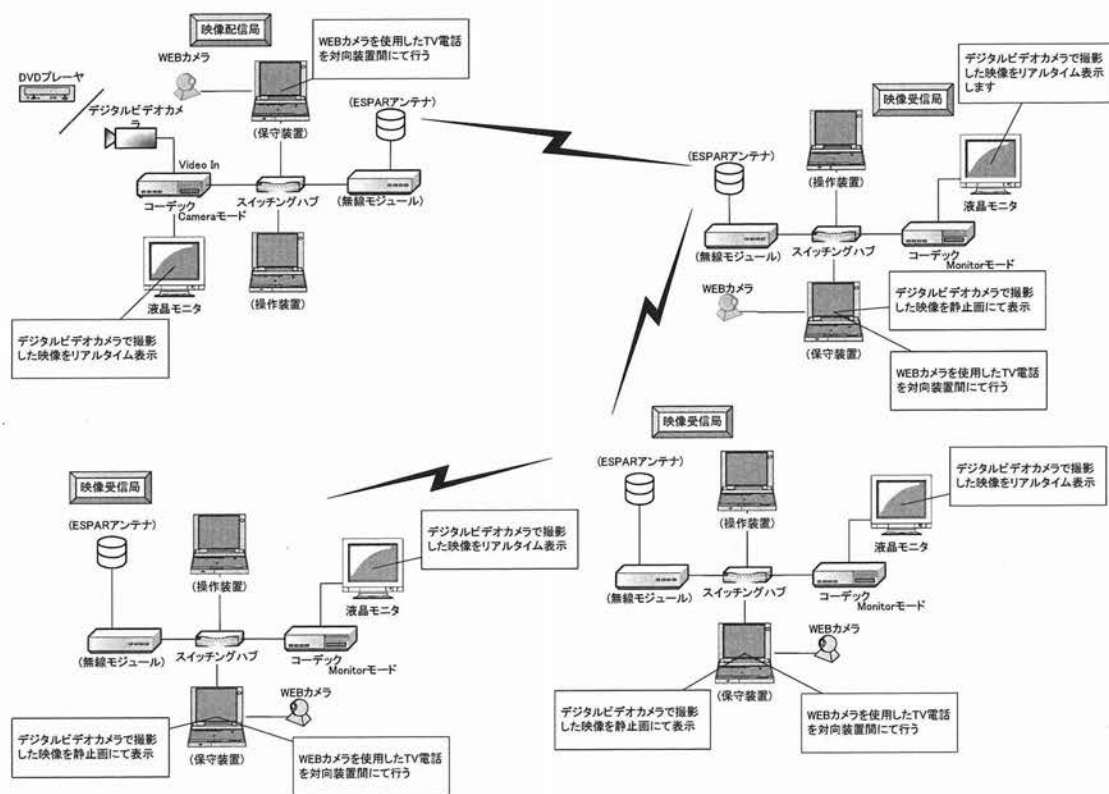


図 3.18 ストリーミング構成図

Fig.3.18 Block diagram for Ad hoc streaming

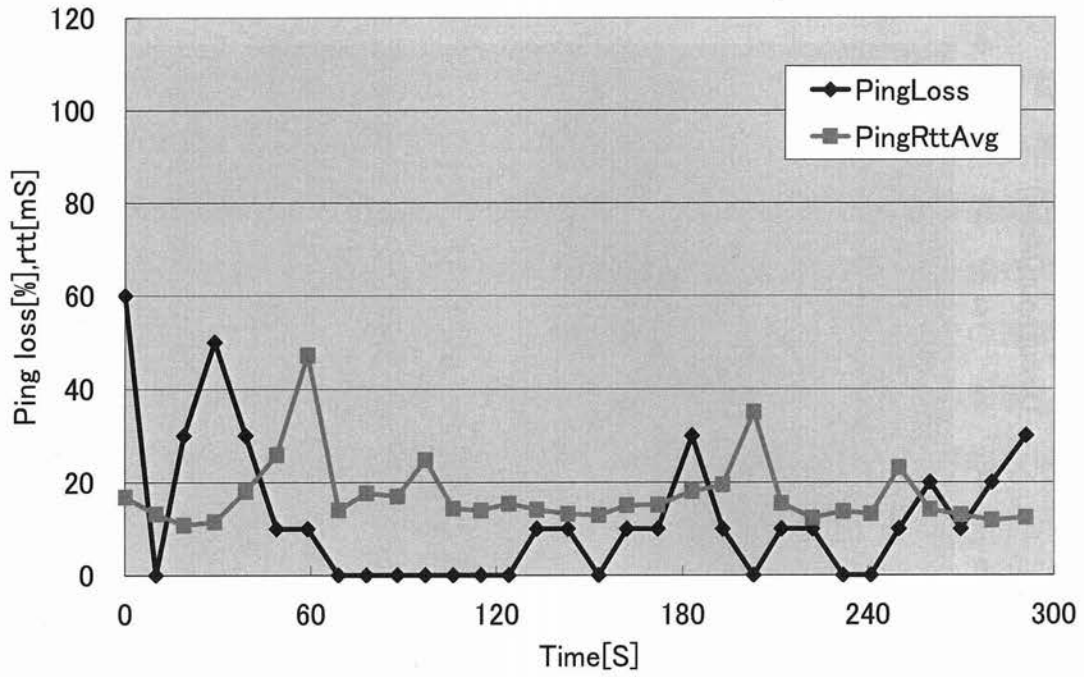


図 3.19 Ping Loss and RTT (適応変調)

Fig.3.19 Ping Loss and RTT (Adaptive data rate)

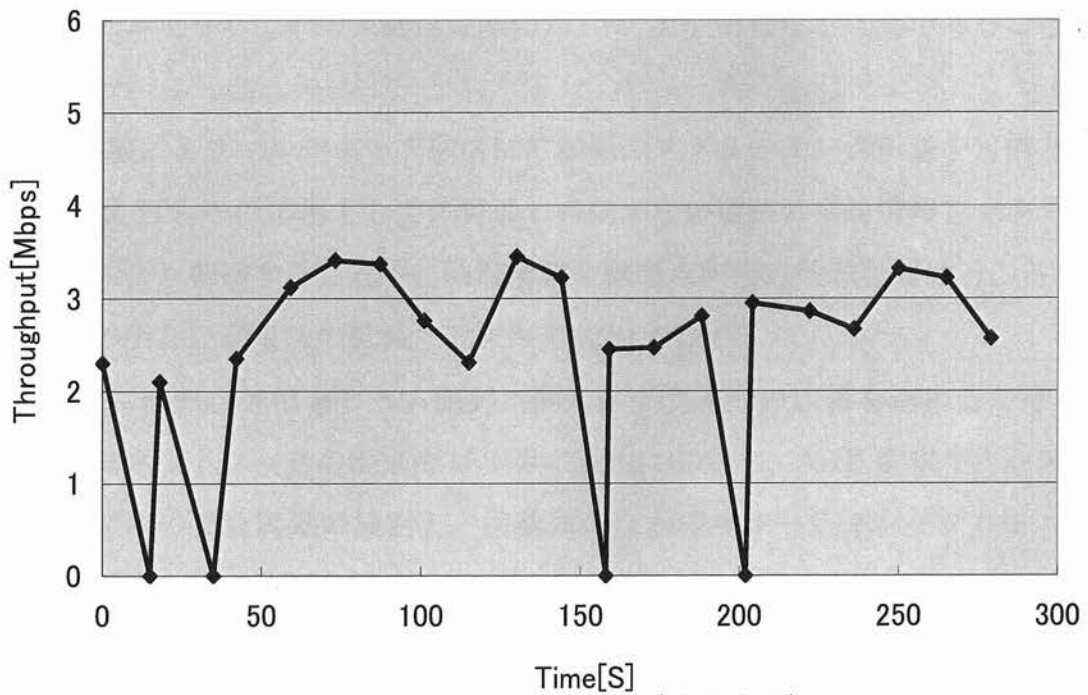


図 3.20 UDP Throughput(適応変調)

Fig.3.20 UDP Throughput (Adaptive data rate)



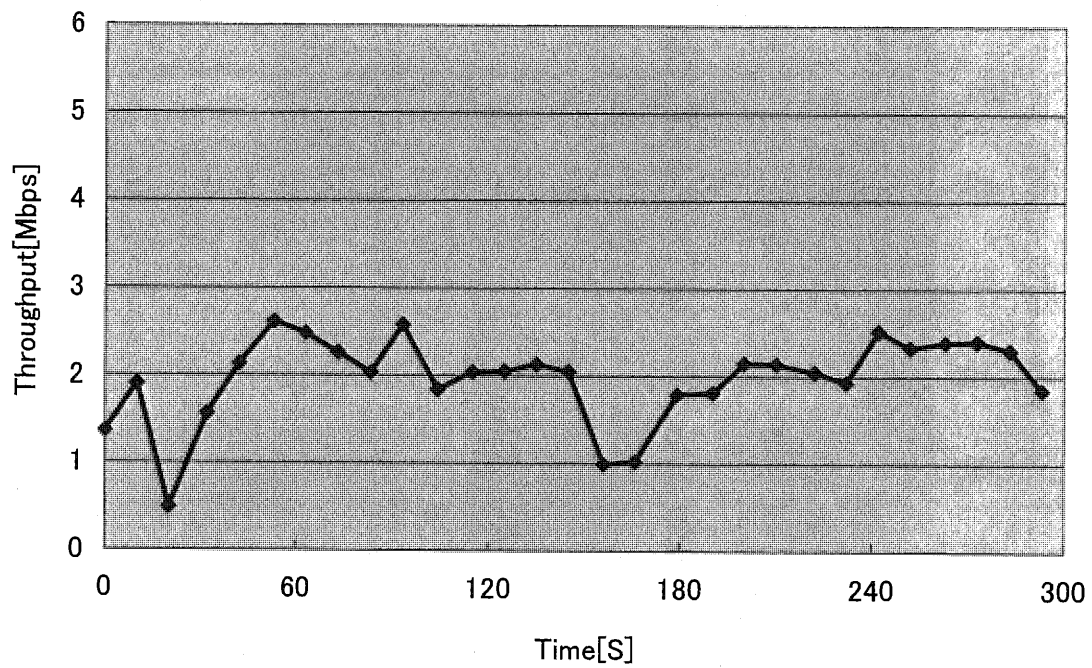


図 3.21 TCP Throughput(適応変調)

Fig.3.21 TCP Throughput (Adaptive data rate)



### 3.4 まとめ

スマートアンテナとして ESPAR アンテナを用い、高速なデータ通信が可能な IEEE802.11g 無線 LAN をベースにビーム制御を可能としたアドホック無線装置を開発した。開発に当たり、現行の無線 LAN ドライバにビーム制御機能を組み込むことは、公開されている以上に詳細な情報が必要となるので、現行の無線 LAN ドライバによるデータ通信と、新たに行う指向性ビーム制御との連携動作を、アプリケーション側から行う方法を提案し、スループットへの影響を出来るだけ低減させるための具体的な方策と効果や、設計における基本的な構成や方式を示した。

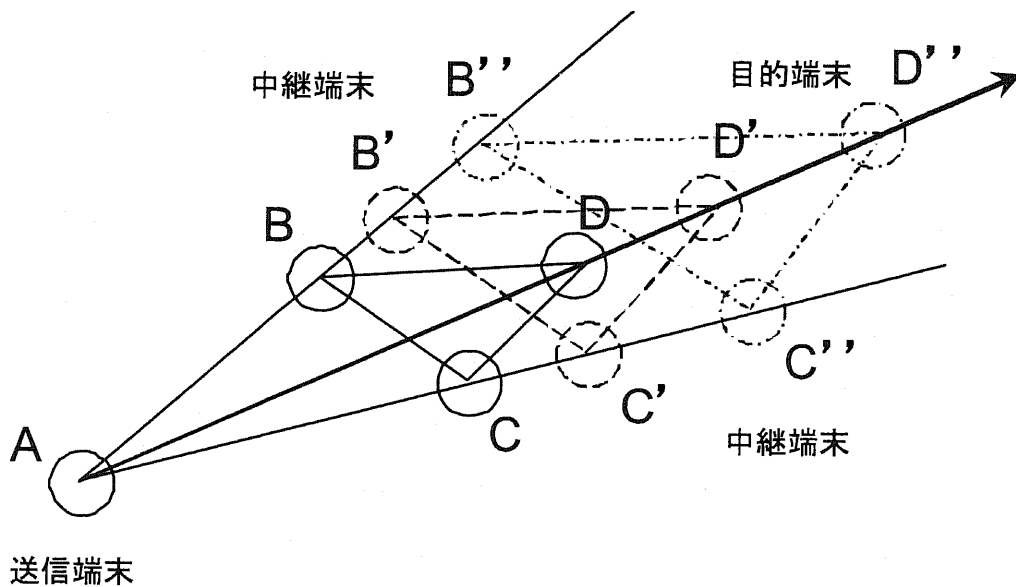
指向性ビームを用いた周辺端末の方向探知方法や、複数の構成品を Ethernet で接続して無線通信を担う端末のゲートウェイと MAC 透過処理との関係を示した。これらにより、実験によって基本特性の実証評価を行い、周辺端末の方向探知精度として標準偏差で  $2^\circ$ 、1対1での実効スループットとして 9.5 Mbps (UDP)及び 5.8 Mbps (TCP)、指向性ビームの比較的高いアンテナ利得から、無指向性ビームどうしでの最大通信距離に対して 1.6 倍となる効果があることを示した。

また、実験によりマルチホップ通信にて動画のストリーミング伝送を可能とした。例えば ITS への応用として、見通しの効かない道路の交通情報をマルチホップ通信により転送することや、渋滞情報や緊急車両接近情報を届けることで、交差点での出会い頭事故の低減に効果が期待出来る。

今後、更にデータ通信とビーム制御に関わるドライバの改善を進めると共に、アドホックネットワークの端末モビリティ特性に応じて、AST 情報やルーティングテーブルの更新周期の検討と、移動体のなかでのルーティングプロトコルの性能向上について検討を行う。

付録

送信端末(A)と目的端末(D)と中継端末の2台(B,C)で決まる四角形群 (ABDC, A' B' D' C', A'' B'' D'' C'',) は, 一辺の長さに相当する距離が変わっても, 全ての内角がASTにより決まることから相似であり, 無指向性ビームでは, 直接, 届かなかった送信端末(A)と目的端末(D)は互いの方向関係を知ることが出来るようになる. 各端末のレイアウト関係を付録図 3.1 に示す.



付録図 3.1 各端末のレイアウト関係

Appendix 3.1 Layout for four Node's

## 第4章 指向性 MAC プロトコルの実装と実験評価

### 4.1 緒言

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、近年盛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[10]-[17]。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など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当たり、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[20]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 [27] 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。更に、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) [28] の実装を行い実環境にて実証評価を行う。テストベッド 4 台にて、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 台にて、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。

## 4.2 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無しにプログラミングできることが望ましい。例えば、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ン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当てはまる。デバッグを行い易い環境や、計測作業やデータ収集が容易で、結果の集計も解析し易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など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出来るアンテナ、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、及び、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、テストベッドの構成品として、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、入手出来るものとして、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。

#### 4.2.1 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出来る ESPAR アンテナ[19]を用いることとする。図 4.1 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 電圧で逆バイアスにて印加し、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  $30^\circ$  毎の 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全て用いて最適な重み付け係数を低周波のデジタル回路で演算するため、高速にビーム形成が出来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、バッテリー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。

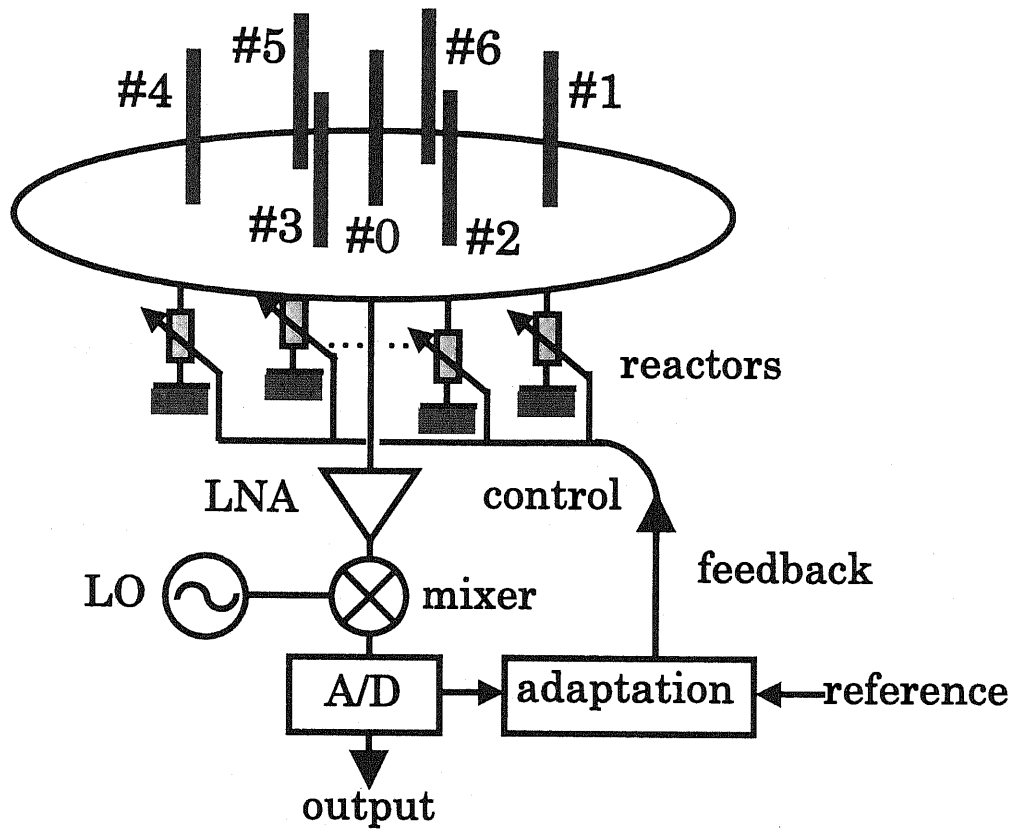


図 4.1 ESPAR アンテナの構造

Fig. 4.1 Structure of ESPAR antenna

#### 4.2.2 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 [18] の無線LANについては、現在もチップメーカーとの特別な契約無しでは、実装されているドライバソフ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。IEEE802.15.4規格のZigBeeチップ [27] 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。更に、ZigBeeTM [29] 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。IEEE802.15.4規格のZigBeeチップの伝送速度は250Kbps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IEEE802.15.4規格のZigBeeチップはChipcon-CC2420 [30] である。表4.1に主要諸元を示す。

表 4.1 ZigBee チップ:Chipcon-CC2420

Table4.1 ZigBee chip: Chipcon-CC2420

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

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換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、タイマカウントなどを用意している。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。中でも、送信電力制御については、29段階の制御で25dBのダイナミックレンジ(送信電力値として-25dBm～0dBm)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換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、タイマカウントなどを用意している。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。中でも、送信電力制御については、29段階の制御で25dBのダイナミックレンジ(送信電力値として-25dBm～0dBm)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。

#### 4.2.3 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、無線モジュール部及び位置・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 4.2、外観を図 4.3 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 4.4 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 128bytes 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 ( $S_{min}$ ) 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無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、 $S_{min} = -92\text{dBm}$  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プル部分にて読み取るものとする。図 4.5 に RSSI の値に応じたパケットのエラーレートを示す。

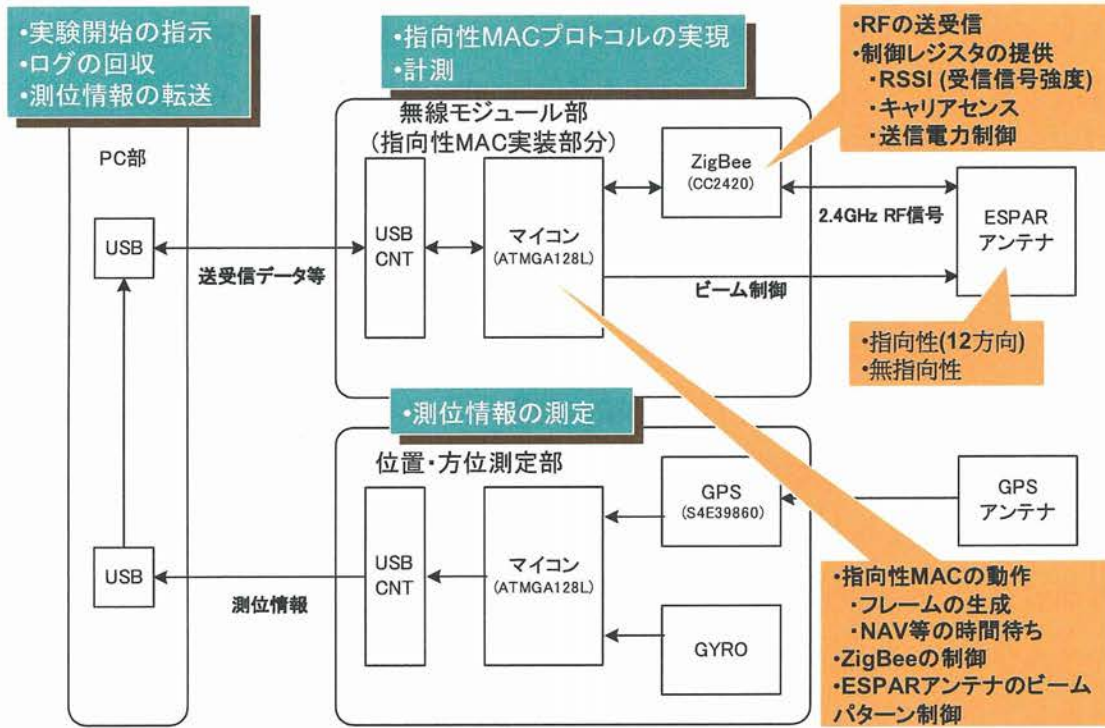


図 4.2 テストベッドのブロック図

Fig. 4.2 Block diagram of Ad hoc testbed



図 4.3 テストベッド外観図

Fig. 4.3 Overview of Ad hoc testbed

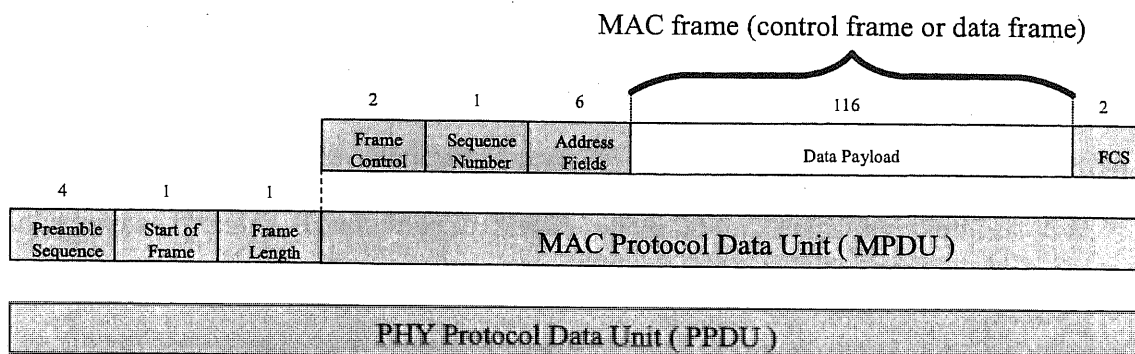


図 4.4 評価対象の指向性 MAC プロトコルのフレーム構成

Fig. 4.4 Configuration of MAC Frame (control frame or data frame) for evaluated Directional MAC protocol

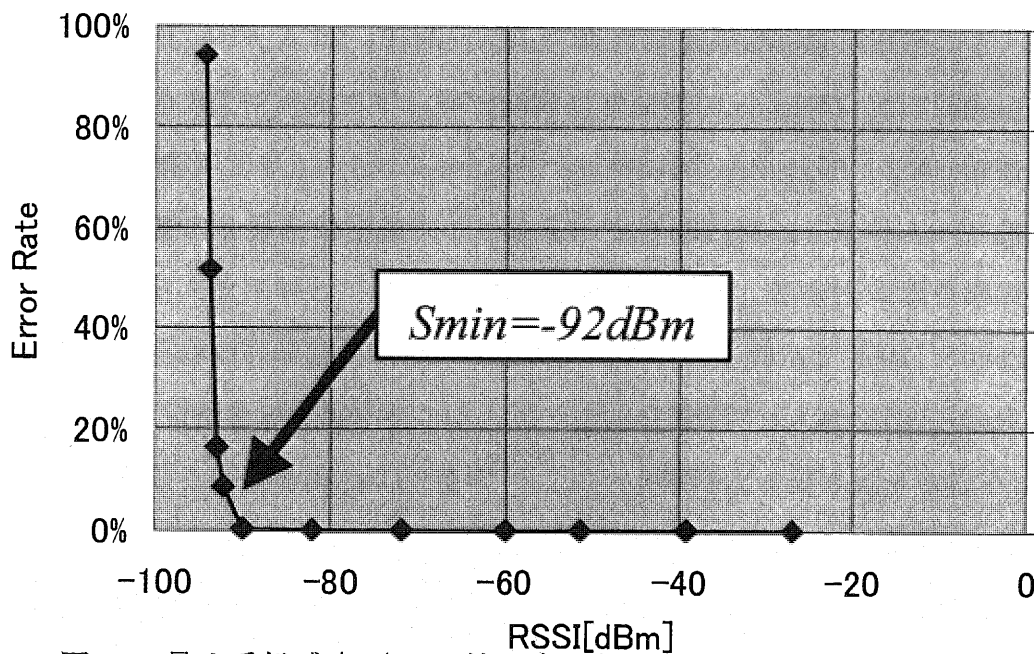


図 4.5 最小受信感度 (RSSI 値に応じたパケットエラーレート)

Fig. 4.5  $S_{min}$  (PER vs. RSSI)

### 4.3 SWAMP プロトコル

SWAMP [28] は IEEE802.11DCF [18] 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 に較べてスループットが約3倍に向上する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、無指向性ビームどうしで通信する場合に較べて、空間利用効率を向上する。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較べて、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。

### 4.3.1 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 4.6 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時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  $G_0$ 。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  $\alpha$ 。全方位に対してアンテナ利得  $G_0$ 。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  $\beta$ 。全方位に対してアンテナ利得  $G_m (> G_0)$ 。同アンテナ対抗により距離  $2d$  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  $\gamma$ 。全方位に対してアンテナ利得  $G_H (> G_m)$ 。アンテナ利得  $G_0$  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、 $\alpha \geq \beta \geq \gamma$  となる。

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

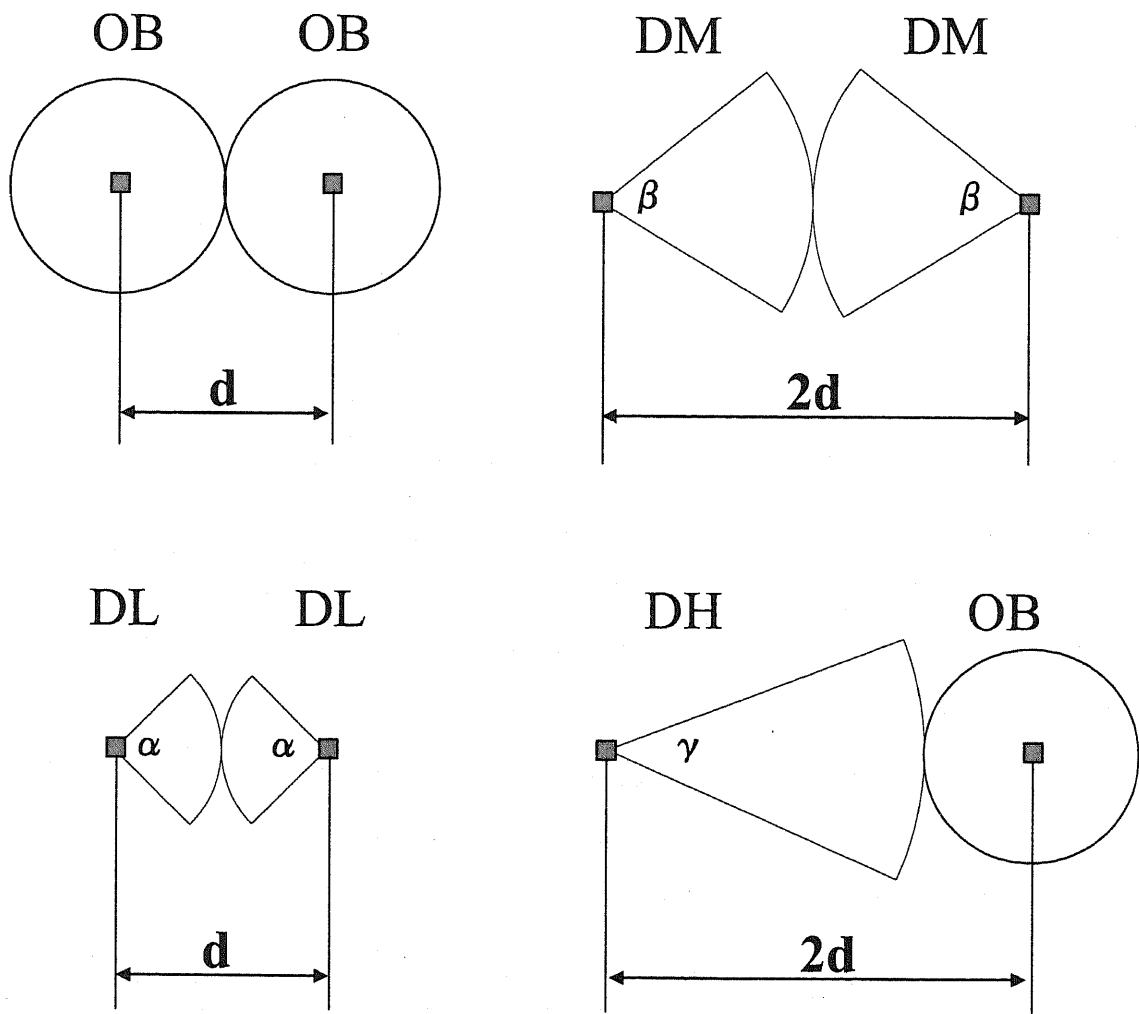


図 4.6 ビームフォーム

Fig. 4.6 Beamform

### 4.3.2 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、位置が判らない場合に用いられる。図 4.7 に端末のレイアウト、図 4.8 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。更に、これによって得られた通信相手の位置情報を、更に近隣の端末へ配布する。例えば、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 及び端末 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 及び端末 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 及び端末 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 及び端末 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利用される。また、SOF 受信後は、RTS/CTS にて取得した GPS からの位置情報を元に、端末 B 及び端末 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。

この時、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無い。従って、図 4.9 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出来る。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出来る。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。

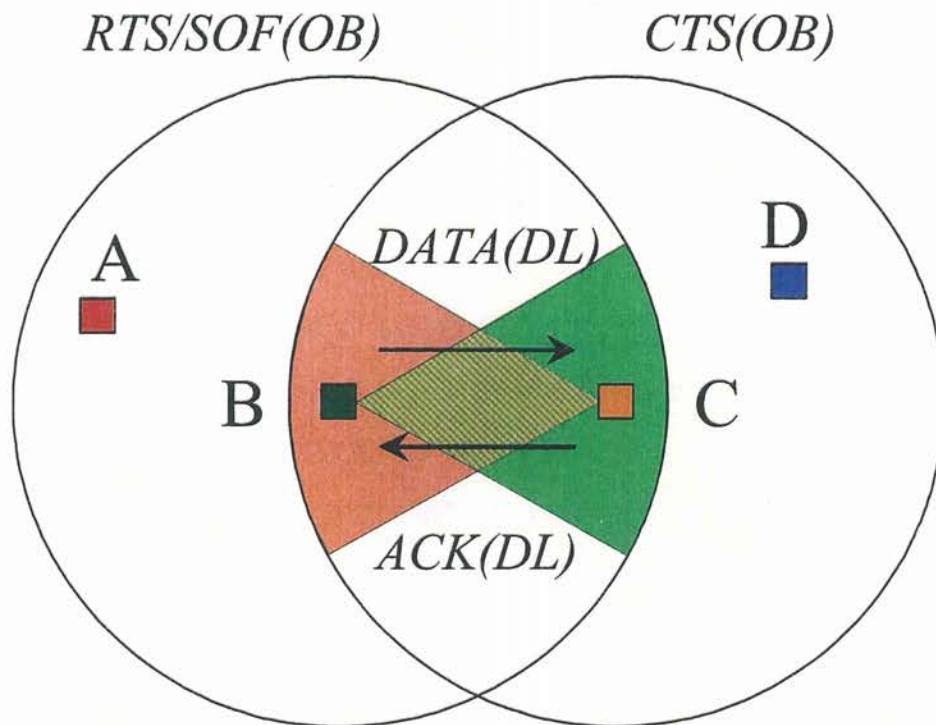


図 4.7 端末のレイアウト (OC-mode)

Fig. 4.7 Layout (OC-mode)

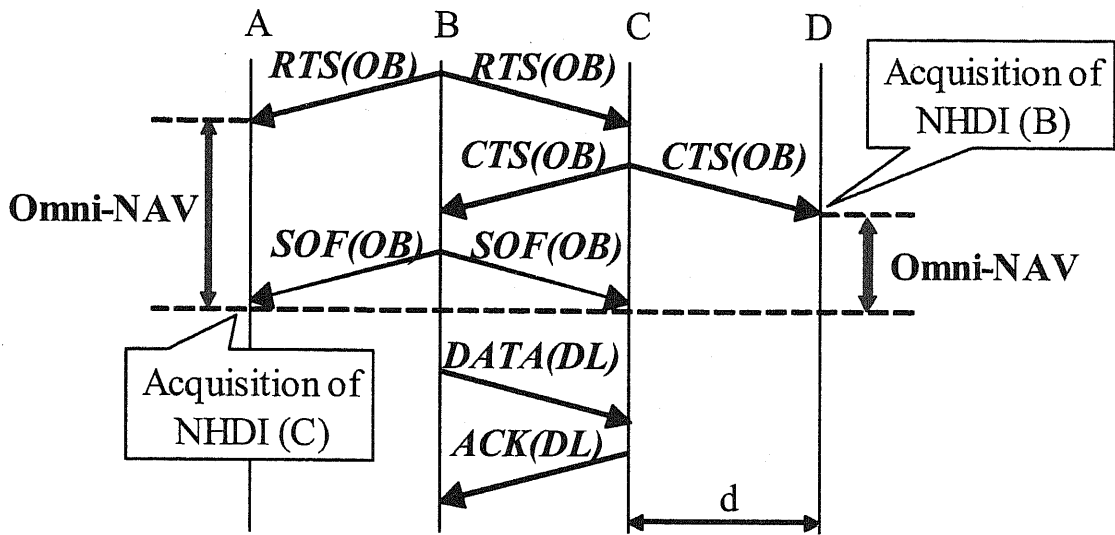


図 4.8 OC-mode によるフレームシーケンス  
 Fig. 4.8 OC-mode frame sequence (B to C)

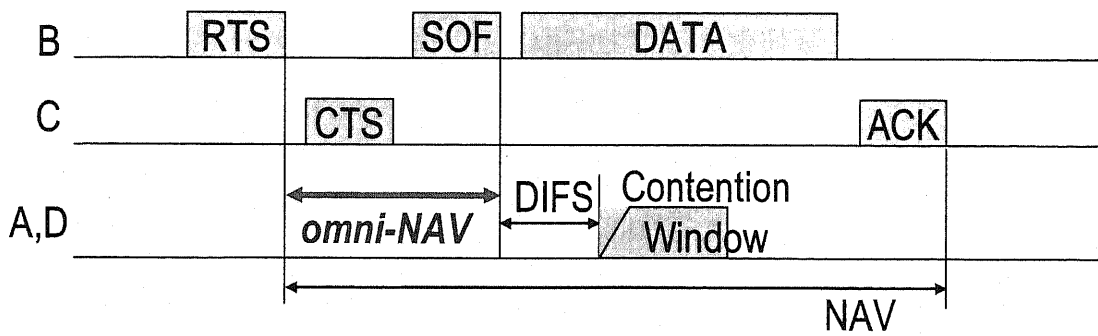


図 4.9 SOF と omni-NAV  
 Fig. 4.9 SOF and omni-NAV

### 4.3.3 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 4.10 に端末のレイアウト、図 4.11 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時、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出来る。

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 テーブルを基に、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。従って、EC-mode の通信範囲は無指向性ビーム (OB) を用いた時に較べて延伸化することが出来る。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。

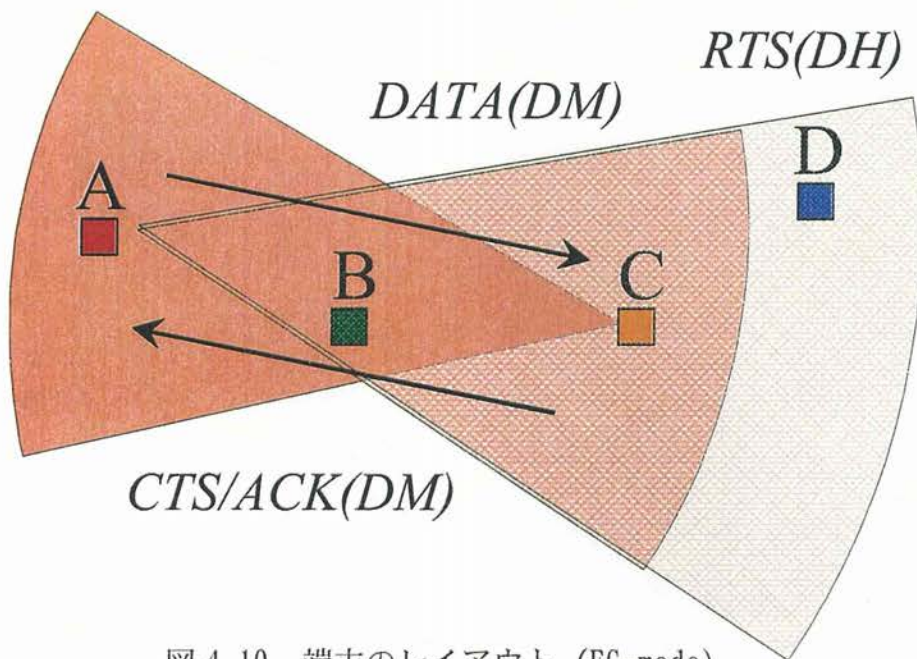


図 4.10 端末のレイアウト (EC-mode)

Fig. 4.10 Layout (EC-mode)

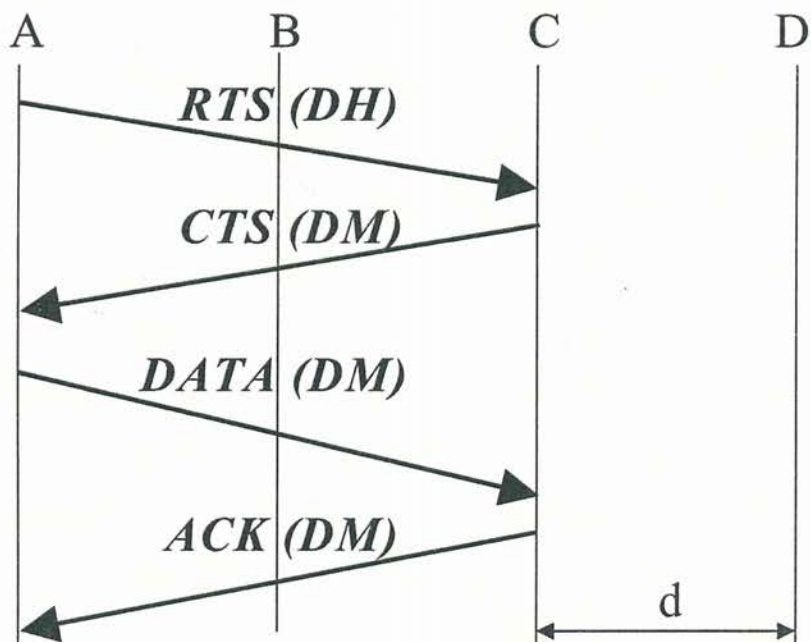


図 4.11 EC-mode によるフレームシーケンス

Fig. 4.11 EC-mode frame sequence (A to C)

## 4.4 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時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 4.12 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 4.12 より、ESPAR アンテナの最大受信レベルは-23dBm であり、標準アンテナの最大受信レベルは-27dBm 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 6dBi ( $=2\text{dBi}+4\text{dB}$ ) とする。また、図 4.12 より、それぞれの方向の指向性ビームに対して、 $180^\circ$  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 10dB 程度小さいので-4dBi ( $=6\text{dBi}-10\text{dB}$ ) となる。但し、図中にあるようにビーム方向毎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。

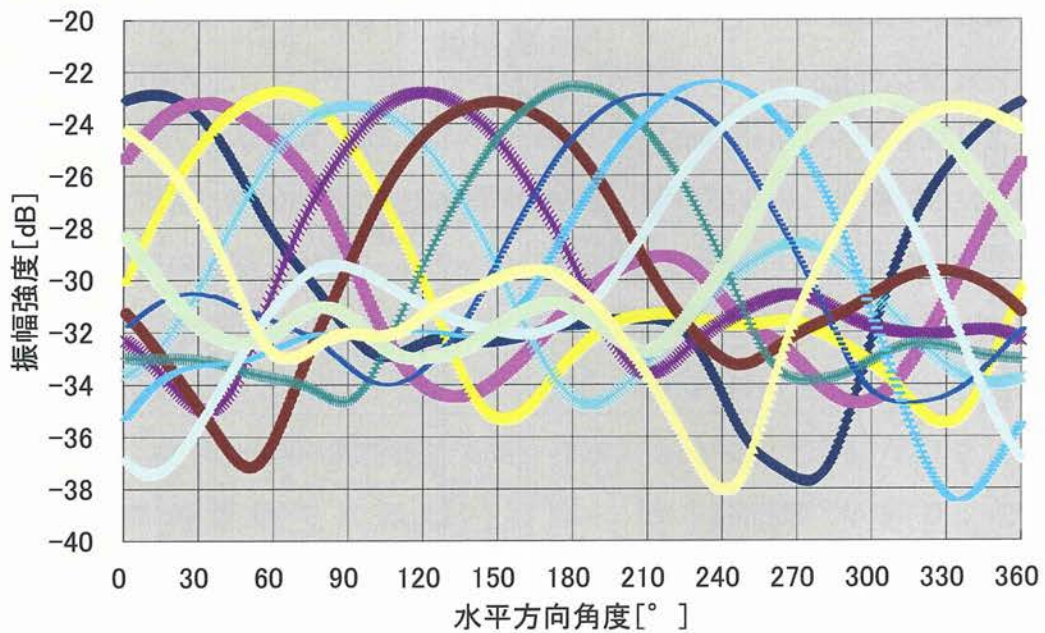


図 4.12 ESPAR アンテナの指向性ビーム形状

Fig. 4.12 Directional pattern of ESPAR antenna

## (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 4.13 に示す。無線モジュール部の ZigBee チップの定格出力は 1mW (0dBm)、ESPAR 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易いと思われる。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 程度あることが判る。



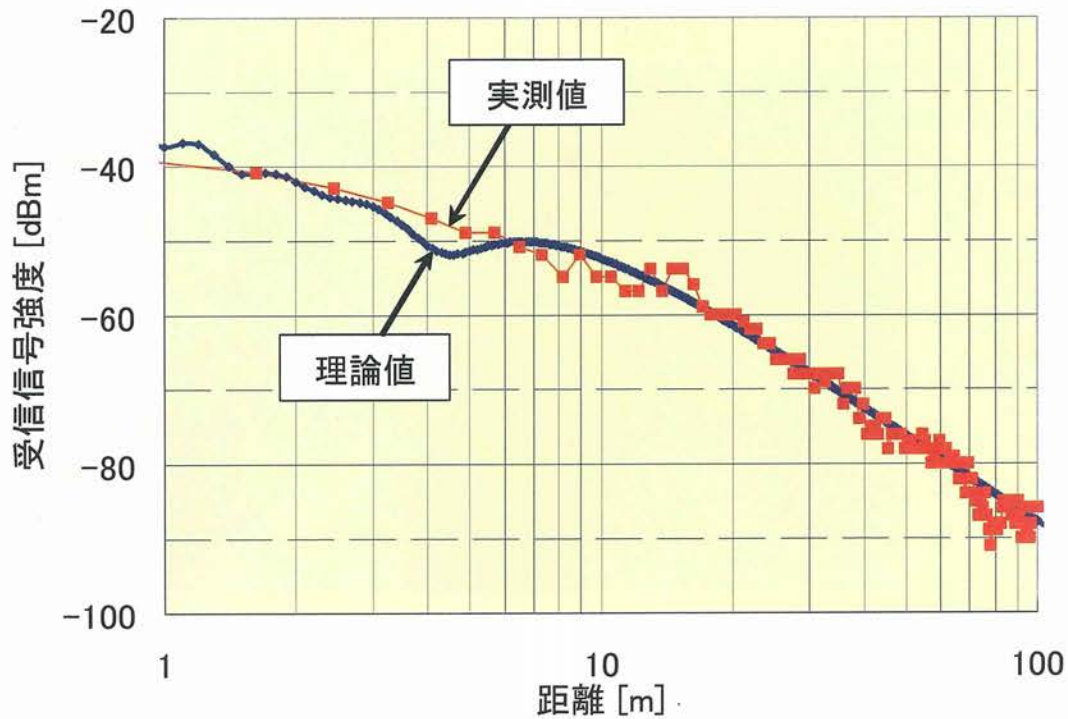


図 4.13 マルチパス下での受信信号強度の変化

Fig. 4.13 RSSI vs. communication distance

なお、計算値では ESPAR アンテナの垂直方向のビーム形状を基に、合成波の受信信号電力の値 ( $P_r$ ) 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 ( $\epsilon_r$ ) から求めた複素反射係数 ( $\Gamma_v$ ) を使用して下記の式から算出した [31]。

$$P_r = P_t G_t G_r \left[ D_d \left( \frac{\lambda}{4\pi r_d} \right) + D_r \left( \frac{\lambda}{4\pi r_r} \right) \Gamma_v e^{-j\{k(r_d - r_r) + \phi\}} \right]^2 \dots (1)$$

$P_r$ : 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,  $k: 2\pi/\lambda$ ,  $\Phi$ : 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 ZigBee 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時には $-25\text{dB}$ の電力制御最大値の減衰を行い、この時、無指向性ビームには $-13.75\text{dB}$ 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 $(-13.75\text{dB}) - (-25\text{dB}) = 11.25\text{dB}$ 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 $6\text{dBi} - 2\text{dBi} = 4\text{dB}$ で、送受信なので2倍して $8\text{dB}$ の差が予想できるが、実際には $11.25\text{dB}$ であり、更に $3.25\text{dB} (= 11.25\text{dB} - 8\text{dB})$ の減衰が必要であった。この原因は、図 4.13 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、ビーム形状の組み合わ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值( $3.25\text{dB}$ )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 ( $S_{\text{min}}$ ) 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、 $-92\text{dBm}$ と判明している。表 4.2 に回線設計の例を示す。

表 4.2 回線設計例

Table 4.2 Maximum communication distance

記号	項目	指向性ビーム			無指向性ビーム	単位
		バック-バック	バック-メイン	メイン-メイン		
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	-58.1	-68.0	-78.1	-78.1	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	-3	-3	0	dB

$$R^2 = \frac{PtGtGr \lambda^2 LtLr}{(4\pi)^2 S_{min}} \dots\dots\dots (2)$$

表より、送信電力制御及び補正を含めて最大通信距離の算出を行った結果、無指向性ビーム及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、バックローブ間の干渉距離が 8m、メインビームとバックローブ間の干渉距離が 25mとなった。

## 4.5. SWAMP プロトコルの実験

### 4.5.1 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ドである。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に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）を一行に配置し、通信ペア間の距離（ $X$ ）を変化させた時の2組のそれぞれの通信特性を測定する。この時、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4.14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。

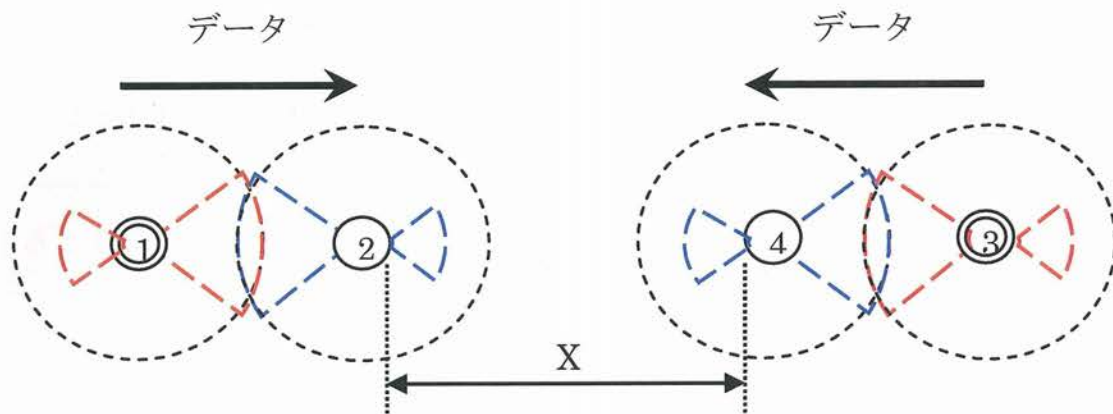


図 4.14 端末のレイアウト

Fig. 4.14 Layout for 4 Nodes

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迄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）にて，図 4.14 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末1と端末2の通信距離及び端末4と端末3の通信距離を6mとし，ペア間の距離（X）を10m毎に変化させて，その時のスループットを計測した．実験の様子を図4.15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CBR125kbps，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．この時の通信ペア内の端末間で受信信号強度は約-70dBm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4.16に示す．図より，図4.14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判る．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4.17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．4.4.(3)節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）にて距離の制約により端末1と端末2の通信距離及び端末4と端末3の通信距離を6mと言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，バックローブ同士の干渉よりも，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出来ると考えられる．

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、一列に並べた時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 まで最も干渉無く接近させることが出来て、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。



図 4.15 実験シーン

Fig. 4.15 Overview of experiment

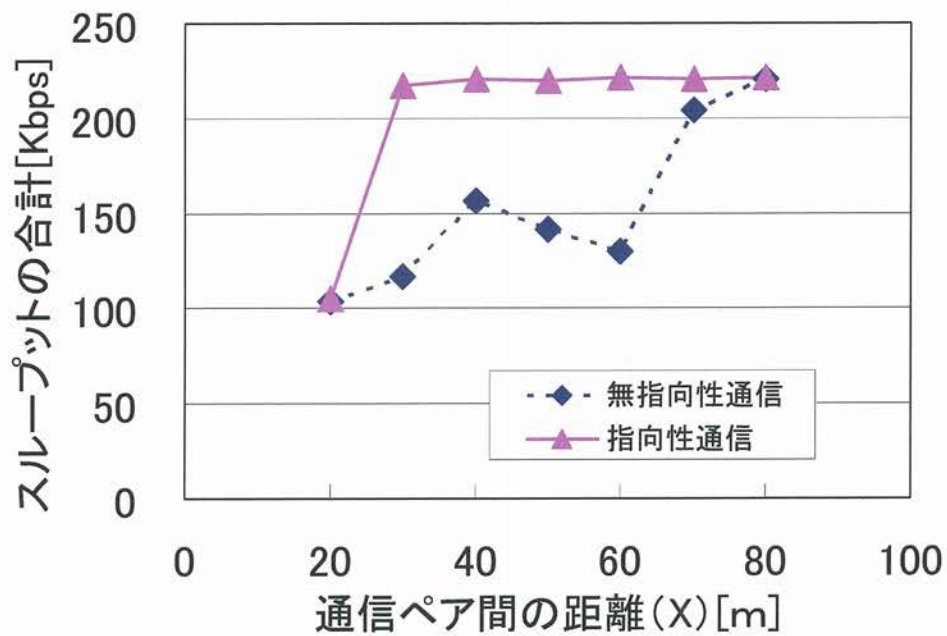
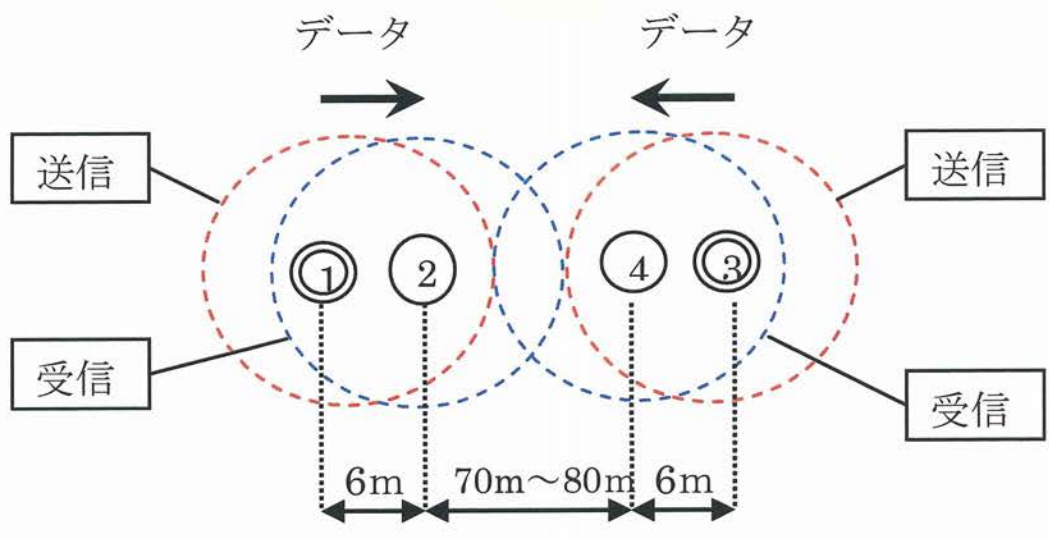
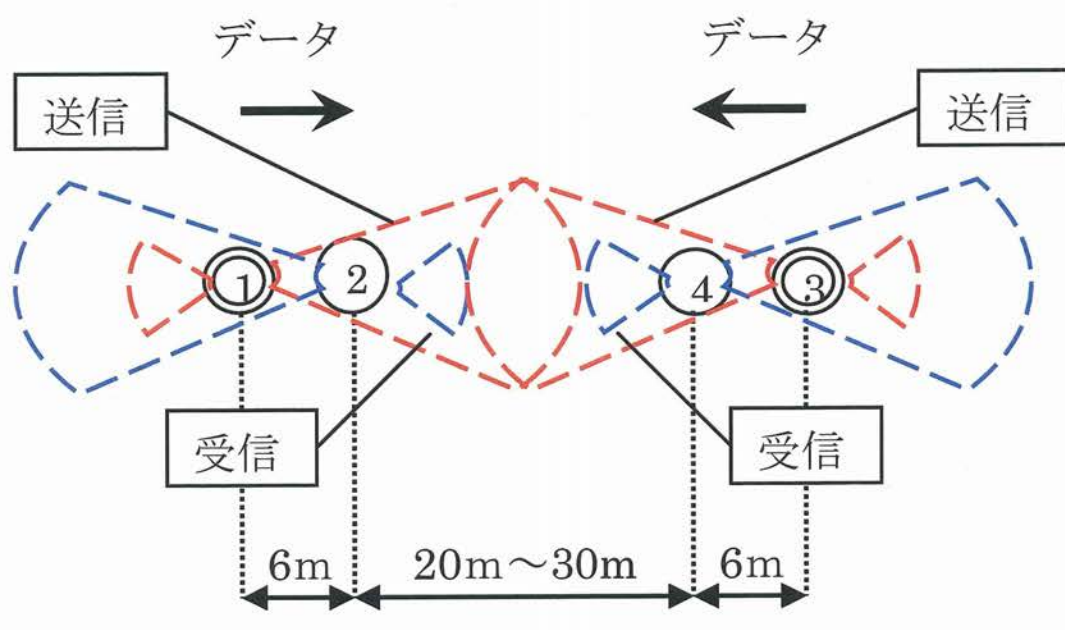


図 4.16 2組の通信ペアのスループットの合計

Fig. 4.16 Throughput vs distance (X)



無指向性ビームの場合



指向性ビームの場合

図 4.17 端末の位置関係と通信距離 (干渉距離)

Fig. 4.17 Node location and communication distance (interference distance)



## 4.5.2 EC-mode の評価

EC-mode は、無指向性ビームを用いた通信範囲に較べて、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出来ることを評価する。

### (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及び端末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。従って、（端末A～端末B）及び（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4.18に実験における各端末のレイアウトを示す。端末A及び端末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

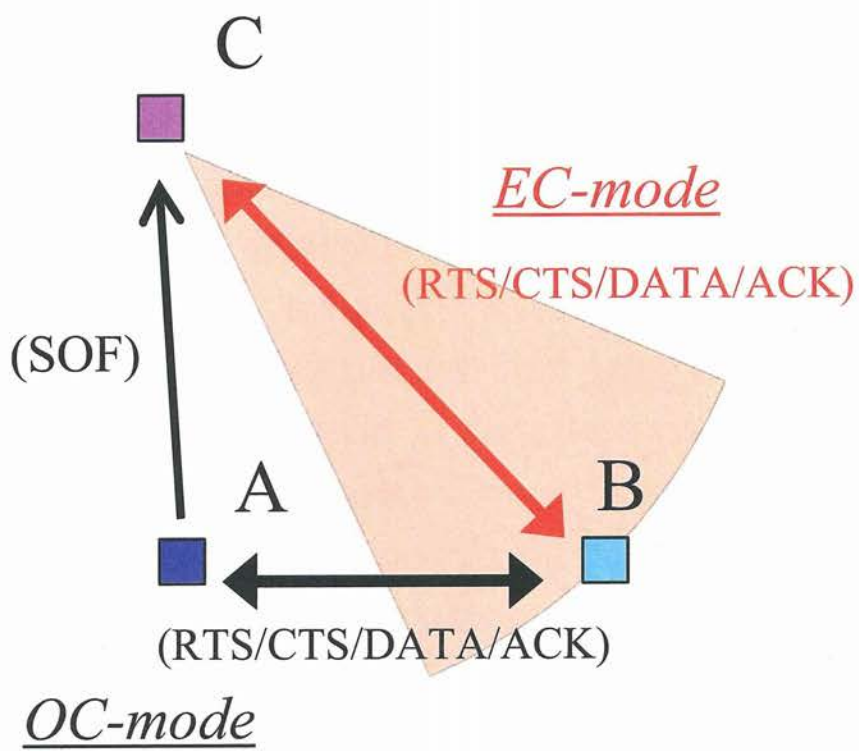


図 4.18 端末のレイアウト

Fig. 4.18 Layout for 3 Nodes

## (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 CBR125kbps、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 4.19 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判る。

この実験においても、OC-mode での無指向性ビーム及び指向性ビームの送信電力は前述の 4.4. (3) 節の回線設計の表 4.2 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 $-13.75\text{dBm}$ 、指向性ビームの場合は $-25\text{dBm}$ 、通信可能距離は 80m である。EC-mode の際には、端末C及び端末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 ( $-13.75\text{dBm}$ ) 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  $11.25\text{dB}$  ( $=25\text{dBm}-13.75\text{dBm}$ ) 増えるので、式(2)を用いると通信距離が 3.6 倍に伸びて  $288\text{m}$  ( $=3.6\times 80\text{m}$ ) となる。本実験では、実験上の制約（一般の公園に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出来ていないが、三角形の斜辺相当の最大距離 ( $\leq 160\text{m}=2 \text{ 倍}\times 80\text{m}$ ) は通信可能になることを確認した。図 4.18 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。尚、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時よりも、通信距離を 3.6 倍に延伸化出来ることが考えられる。

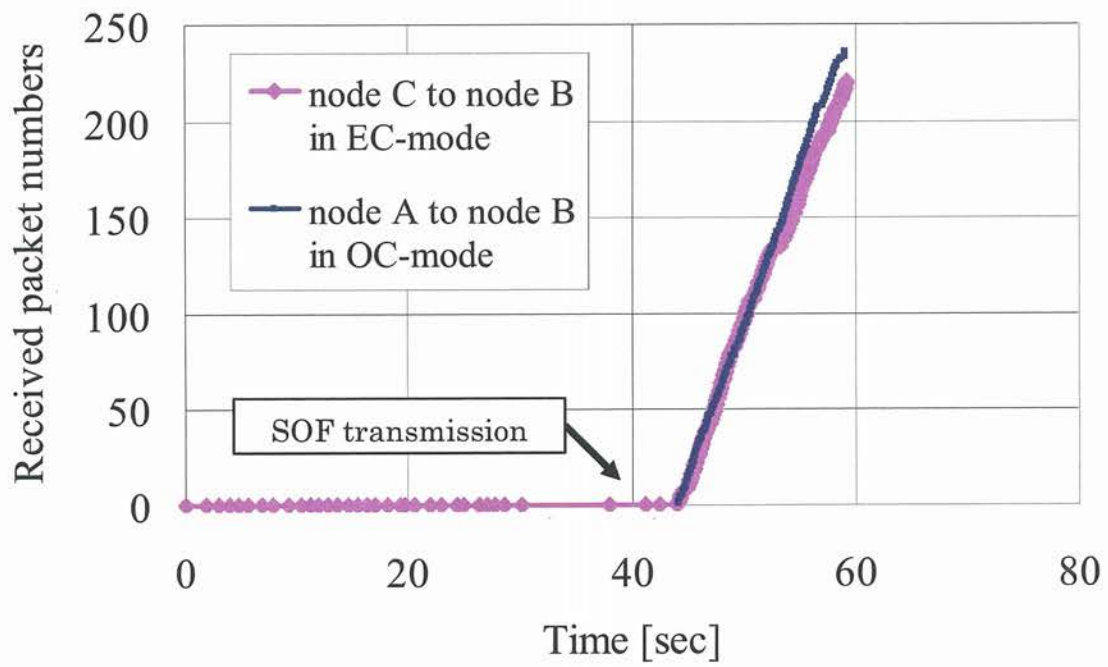


図 4.19 受信パケット総数の遷移

Fig. 4.19 Received packet numbers vs. time

#### 4.6. まとめ

任意の MAC プロトコルを実装して実環境にて評価できる 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換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、タイマカウントなどを用意した。

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 台にて、比較的近距离(6m)での通信ペアを 2 組設け、一列に並べた時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 まで最も干渉無く接近させることが出来て、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 台にて、三角形に並べた時に、最も一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、電力制御に伴う 11.25dB 相当の 3.6 倍に通信距離が伸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、実環境下にて評価を行い、実用的なプロトコルの研究を進める。

## 第5章 移動体におけるルーティングプロトコルの提案と実証評価

### 5.1 緒言

近年，携帯電話や無線 LAN カード及び PC（ノート型コンピュータ）は低価格化が進み，一般家庭の多くの人たちが所有するようになった．また，ホットスポットから WiMAX のような比較的広いエリアまでをカバーするサービスが提供され始めたことにより，無線 LAN の AP（アクセスポイント）カバーエリアが拡大している．元々，伝送速度では無線 LAN が圧倒的に携帯電話よりも優れているので，大規模なメディアのダウンロードを短時間で行うことが可能である等，無線ネットワークの利用が急速に進んでいる．また，IEEE802.11 が規定する無線 LAN の機能のうち，インフラに依存しないアドホックネットワークについては，災害発生時の被災地との通信に並んで，ITS（高度道路交通システム）の車車間通信への応用[32]が期待されている．ここでの通信サービスでは，通信したい相手まで中継端末を介して接続するマルチホップ通信が必要不可欠となる．マルチホップ通信では，最適な中継端末を選択するルーティングの機能が重要である．IETF（Internet Engineering Task Force）の標準化組織では，MANET（Mobile Ad-Hoc Network）ワーキンググループにて，移動端末で自律的に構成されるネットワークを実現するルーティングプロトコルについて議論がなされている．ここでのネットワークでは，端末が頻繁に移動することにより，端末間のリンクがつながったり切れたりを繰り返すことを想定している．このように，ノードの移動特性，ノードの数や密集の度合いなど，環境の違いについても検討されている[33]～[35]．そして，実際の移動体におけるルーティングを用いたマルチホップ通信においては，端末の移動だけでなく，フェージングやマルチパスによる電波伝搬の変動によりルートの切り替わりが頻繁に起きる．また，MANET によるルーティングでは最短経路（最小ホップ数）が選択されるために，受信信号強度が低くてリンクの弱い電波伝搬経路が選ばれるとリンクが切断され易くなる．従って，移動中において，中継端末を適切なタイミン

グや安定に切り替えることが難しく、通信性能としてパケット到達率が低下してしまう。

本論文では、このような移動体におけるルーティングの問題を改善するために、受信信号強度を考慮した方式と、GPS(Global Positioning System)からの位置情報を用いた方式について、屋外での基礎実験を行った結果から、両者を組み合わせた方式を提案し、シミュレーションの結果、提案方式によってルートを安定に切り替えることにより通信特性を向上出来ることを示す。

## 5.2 関連研究との関係

位置情報がアドホックネットワークに利用されることにより、従来の MANET による方式よりも効率的に情報の配信や共有の可能性が考えられる。文献[36]の LAR では、送信元端末が送信先端末へのルートを築けていない場合、送信先端末の今までの位置と速度に基づいて現在の位置を予測し、RREQ 信号のフラッディングゾーンを算出し、このゾーン内でのみ RREQ 信号をフラッディングしてネットワーク全体へのフラッディングを避けるようにしている。位置情報を利用することにより、オンデマンドプロトコルのルート探索時における RREQ 信号の効率的な配信を図っている。

このような GPS から得られた各端末の位置情報を管理する場合、文献[37]の DREAM では、定期的に自らの位置情報をネットワーク全体に配信している。この時、最大転送距離に制限を加えて、近くの端末や速度の速い端末とは更新の頻度を多くし、遠くの端末や速度の遅い端末とは更新の頻度を少なくするようにしている。また、文献[38]の GLS では、自端末を中心に領域 (geographical hierarchical level) を設け、この領域が含む周辺端末の数に応じて複数の領域を定義し、その領域ごとに分散的に自分の位置サーバーを設定して、定期的にそれらの位置サーバーへ自らの位置を更新している。ある端末が送信先端末と通信する場合、同じ方法で送信先端末が分散的に設定した位置サーバーに対して、送信元端末は送信先端末の位置情報の検索を行って通信を開始するよう

にしている。どちらも、位置情報を共有する際におけるネットワーク全体へのフラッディングを避けてオーバーヘッドの低減を図っている。

これらの文献[36]～[38]では、位置情報を利用することによる効率的な情報配信や位置情報の効率的な共有方法について提案されたものである。

次に、位置情報を利用したルーティングプロトコルにおけるルート決定方法として、文献[39]の GPSR では、送信元端末は送信先端末の位置情報を検索してから、パケットのヘッダに送信先端末の位置情報を入れておき、中継端末がそのパケットを受信すると、送信先端末との距離が最も小さい中継端末を選択して転送 (Greedy Forwarding) するようにしている。従って、送信元端末と送信先端末との距離が最も小さいルートが選択されることになる。また、送信元端末と送信先端末の距離が一番小さく送信先側に適当な中継候補となる端末がない時には、周辺端末の位置関係を平面的に展開して、右手規則 (回り) に中継端末を選択しながら転送 (Perimeter Forwarding) する方法をとっている。また、文献[40]の TRR/TLR では、送信元端末と送信先端末との間に、通過地点としてアンカー (anchor) となる端末を見つけ、これらのアンカーに沿ってパケットを転送するようにしている。更に、このコンセプトの進化した文献[41]の TRP では、送信元端末と送信先端末との間に経路曲線 (Trajectory) を設定して、この経路に沿った一番近い端末を中継端末として選択している。

これらの文献[39]～[41]では、各端末の位置情報がネットワーク全体で共有されていることを前提として、所謂、平面的に展開された全ての端末の位置関係からルートを策定するために、最終的にリンクが確立出来ず、送信先端末へパケットが配送出来ない場合がある。また、通過地点や経路曲線の適切な設定の仕方にも課題がある。従って、位置情報をトポロジーに反映したルーティングプロトコルの必要性が考えられる。そこで、提案する方式は、定期的にハローパケットのような制御パケットを利用して隣り合う端末と位置情報を局所的に交換し合い、自端末と隣り合う端末との距離を算出し、予め設定した距離とメトリックの対応に従ってトポロジーに端末間の距離に基づくメトリックの情



報を反映し、総合的なメトリックによりルートを策定するものである。更に、メトリックにはリンクの品質について考慮する必要がある、電波伝搬状況を反映する必要がある。ここでは、文献[42]により、MANETによるルーティング方式では、最小ホップ数のルートを選択するので、電波伝搬状況の良くない弱いリンクが選択されるとマルチホップ通信の総合スループットが低下する指摘がなされている。そこで、文献[43]では、パケットごとに双方向期待送信数 (ETX) をメトリック値に反映する手法が提案されたが、文献[44]により ETX は統計情報でありデータ収束までに長い時間が必要となるので、端末が静止した環境では効果があるが移動体の中では性能が低下する指摘がなされている。そこで、提案する方式は、電波伝搬状況を反映するために、瞬時の受信信号強度の値を取得してメトリックに反映するものとし、特に ITS の車車間通信で特有の路面反射によるマルチパスには再現性があり、ある距離範囲でバースト的に受信信号強度が低下するので、予めその距離範囲ではメトリックの変換モデルを別に設定して、イベント的に対応することにより、すばやく異なるルートを選択するものとしている。

このように、GPS からの位置情報を利用して端末間距離に応じたメトリックを求めてトポロジーに反映するルーティングプロトコルをベースとする。更に、電波伝搬状況を反映するために受信信号強度を監視し、特にマルチパスのように受信信号強度がバースト的に低下するような場合にはイベント的にメトリックを変更してトポロジーに反映し、総合的なメトリックによりルートを策定する方法を提案する。

次章より、基礎実験として移動体における、MANET によるルーティング方式の場合や、受信信号強度や位置情報からの端末間距離に応じたメトリックをトポロジーに反映してルートを策定した場合の、それぞれのパケット到達率の様子を比較する。そして、受信信号強度や位置情報に応じたメトリックをトポロジーに反映する場合に、両者を組み合わせた提案方式とシミュレーションの結果を示す。

## 5.3 基礎実験

### 5.3.1 アドホックネットワーク無線装置

実験のための無線装置としては、アンテナとしてDC電圧制御によりセクタ又はオムニのビームに切り替えることが出来る ESPAR アンテナ[19]を使用し、無線モジュールとして IEEE802.11g 無線 LAN カードをベースとして、ブロードキャスト時にはオムニビームで送信し、データ通信のようにユニキャスト時にはセクタビームで送信するように改造したものである[45]。PC は OS として Linux Red Hat9, カーネル 2.4.20 を使用し、ルーティングプロトコルとしてテーブル駆動型の FSR[46]やオンデマンド型の AODV[47]を実装した。本研究では、無線モジュールに GPS を接続し、位置情報を取得するようにした。図 5.1 に無線装置の外観図を示す。

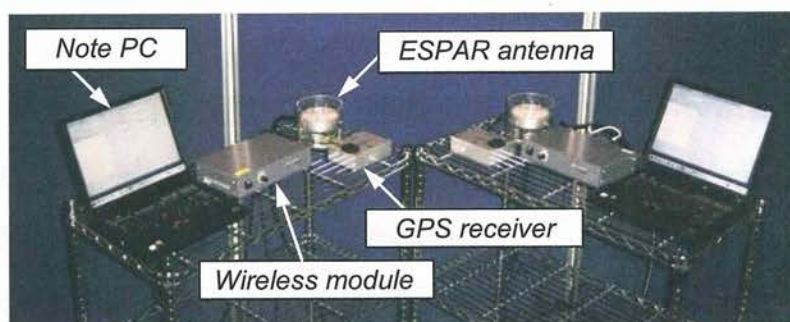


図 5.1 アドホックネットワーク無線装置

Fig.5.1 Overview of wireless ad hoc network test bed

この無線装置では、セクタビームを通信したい相手方向にセットするために、以下の手順を行っている。各端末は、定期的にセクタビームで全方位（最大 12 方位）を走査しながら送信し、周辺端末はオムニビームで受信して受信信号強度 (RSSI) の測定を行って結果を返送する。その結果、各端末には周辺端末毎に

12 方位の RSSI 情報を収納した AST (Angle-SINR Table) を形成し、最も強い RSSI の方向へセクタビームをセットして送信するようにしている。AST のプロトコルは端末のモビリティ等によって更新周期を選択する必要があるが、実際の無線装置においては、装置に固有の性能面からの制約により、パケットの衝突が与える影響についても検討が必要である。図 2 に、AST プロトコルの更新周期や周辺端末の数と ping コマンドによるエラーとの関係を計測した結果を示す。図中より 1 対 1 の通信で干渉端末台数が 8 台の場合、AST 更新周期を 1 秒よりも短くと大幅にエラーが増えることが判る。従って、この無線装置を全 10 台程度で行う基礎実験では AST プロトコルの更新周期を 1 秒以上で使用して基礎特性を評価することが望ましい。

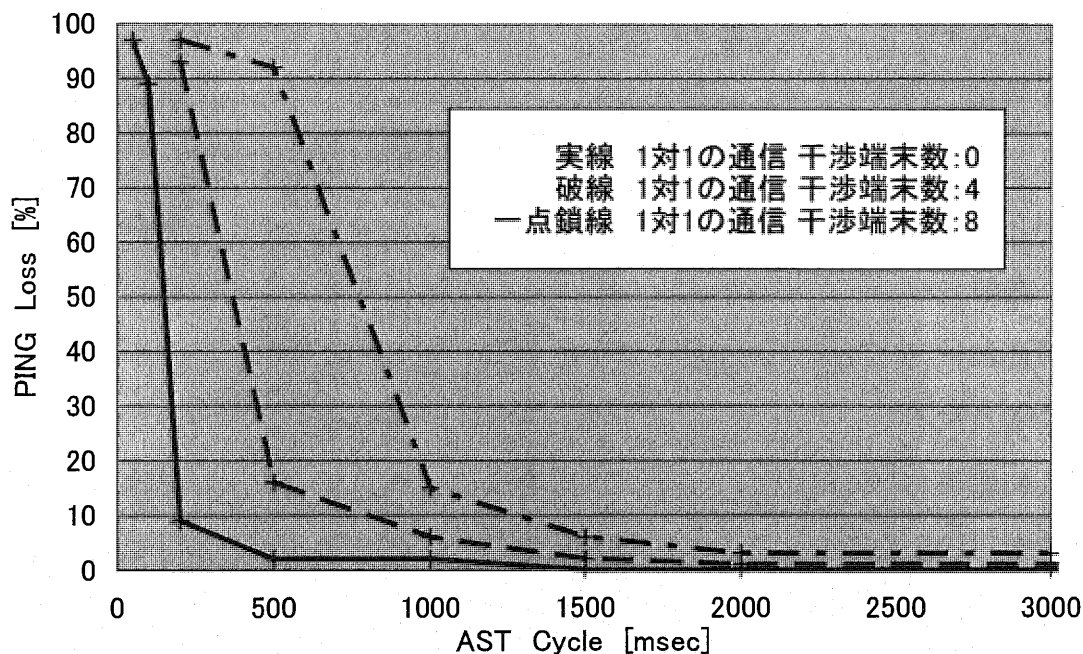


図 5.2 AST 更新周期と干渉端末数を与える ping エラーの関係

Fig. 5.2 Ping err rate vs AST cycle related to interference node' s

### 5.3.2 移動実験

図 5.3, 図 5.4 に示すように, 移動実験の設定としては, 前述の無線装置を 4 台用意して車両に搭載し, 会社構内の単純な直線道路の部分にて, 送信先端末①を静止させて固定し, 送信元端末④が移動して遠ざかり, 途中経路に中継候補となる 2 台の静止させた固定端末②及び固定端末③を設置した. 前述したとおり各端末が行っている AST プロトコルは 1 秒周期としており, セクタビームの方向は 1 秒毎に計測される受信信号強度の値から設定される. 従って, 相対的な移動速度を 1m/sec ( $\approx 3.6\text{km/h}$ ) として実験を行うと, 距離方向で 1m ごとにセクタビームが所定の手順で方向設定されることになる. 送信元端末④が 1 秒間で移動する時に送信先端末①との角度は  $16^\circ$  ( $\approx \tan^{-1}(1\text{m}/3.5\text{m})$ ) ずれることになるが, ESPAR アンテナのセクタビーム幅 (3dB 低下点) は約  $\pm 45^\circ$  であるので, 送信先端末①は充分セクタビーム幅内にあると考えられる. また, 移動速度を速くして例えば 5m/sec ( $\approx 18\text{km/h}$ ) 程度とした場合, 送信元端末④が 1 秒間で移動する時に送信先端末①との角度は  $55^\circ$  ( $\approx \tan^{-1}(5\text{m}/3.5\text{m})$ ) ずれることになり, 送信先端末①はセクタビーム幅の外側に位置してしまう可能性があるため, パケット到達率への評価が難しくなる. この実験の目的としては, 送信先端末と送信元端末との相対距離を変化させて, この場合は離れて行く時における, 各端末間の受信信号強度 (RSSI) をモニタし, マルチホップ通信により次々と中継端末を採用しながらパケット転送を行う時のルートの切り替えの様子とその時のパケット到達率を評価するものである. 実際の道路における運用状況としては, 相対距離が長くなっていく場合の例として, 高速道路を走行する車両群を隣車線で追い越して行く特定車両から, 情報として例えば緊急情報や交通状況を通過後も安定に受信し続ける場合が想定される. また, 相対距離が短くなっていく場合の例として, 交差点での見通し外等の道路情報を交差点に進入しようとする車両が早い段階から安定に受信し続ける場合が想定される.

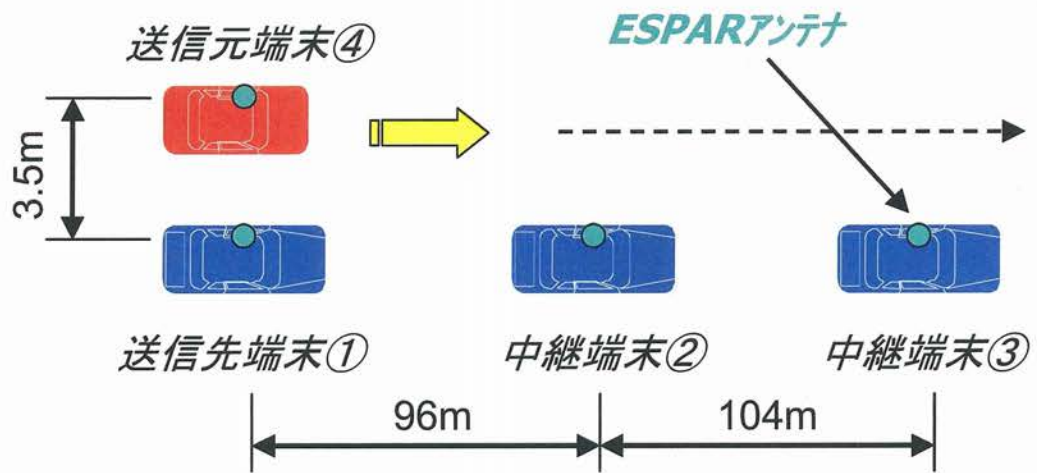


図 5.3 移動実験レイアウト

Fig.5.3 Formation of mobile experiment



図 5.4 実験車両

Fig.5.4 Overview of experimental car



実験の結果，図 5.5 に示すように移動する送信元端末④と静止した送信先端末①及び 2 台の中継端末②と③との間の受信信号強度は，端末間距離に応じて変動しながらも増加又は減少している．但し，単調に増加や減少せずに，局部的に受信信号強度は急激に低下しており，これは路面からの反射波によるマルチパスの影響である．ESPAR アンテナの地上からの高さは 1.8m であり，図 5.6 に示すように端末間距離が 28m と 56m の付近に，受信信号強度が急激に低下する現象が再現されている[48][49]．なお，実験車両の走行に当たっては，毎回，同じ様な状況とは言えず，また，必ずしも等速度とは言えないので時間と距離の値とは若干の相違が生じる場合もある．

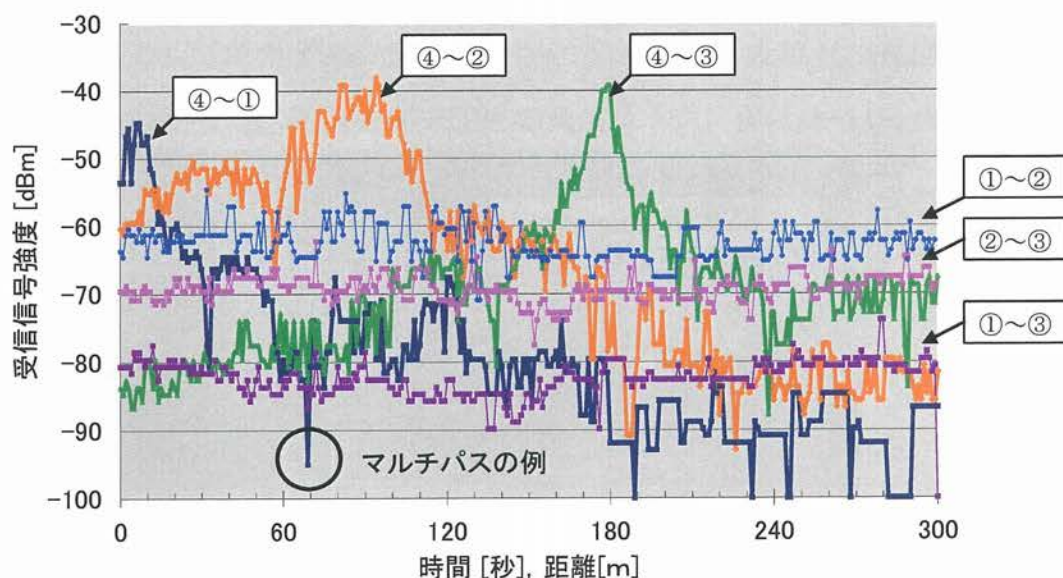


図 5.5 RSSI の変化 (MANET AODV)

Fig.5.5 RSSI in mobile experiment (MANET AODV)

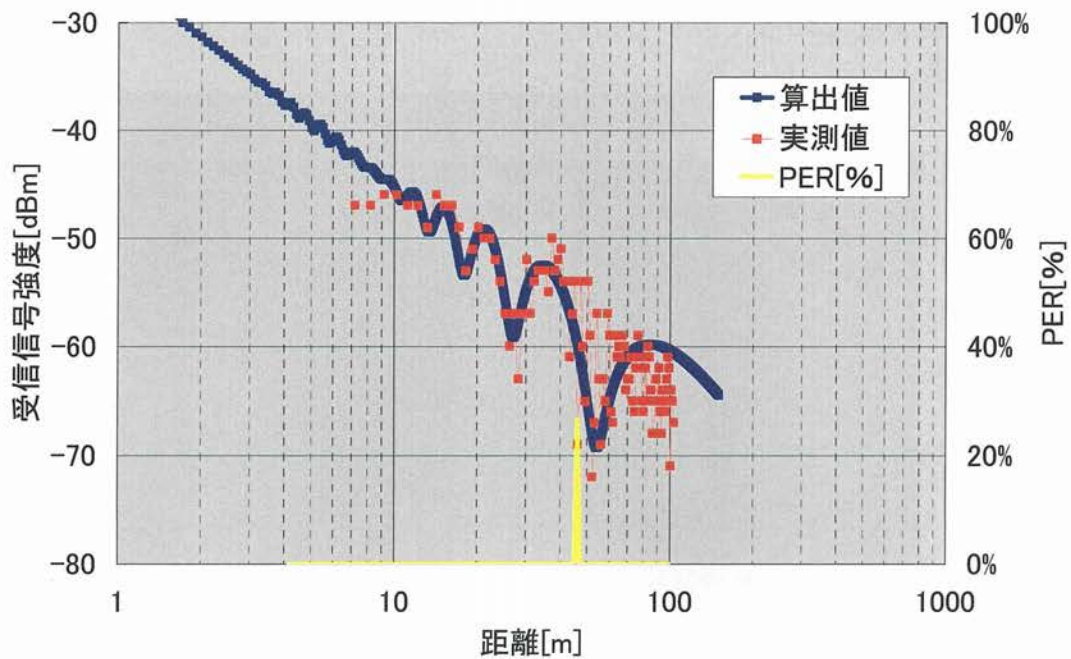


図 5.6 マルチパス下での RSSI

Fig.5.6 RSSI under multipath fading

### 5.3.3 MANET による方式

図 5.7 には MANET による AODV を用いた時のパケット到達率とホップ数を示す。パケットは 1,500byte のデータを 10msec 間隔で UDP 送信し、1 秒(100 パケット)毎の到達率 (%) を算出した。AST プロトコルの更新周期は 1 秒で、ハローパケットの周期も 1 秒に合わせており、ビーム方向の設定周期と通信したい相手端末の選定周期を同じとした。伝送速度は適応変調を用いており、最小伝送速度は 1Mbps で、この時の最小受信感度は約-90dBm である。送信元端末④は送信先端末①と最小ホップ数で接続しようとするために、180 秒付近の最小受信感度(-90dBm)まで直接通信が続き、切断してから新たな中継ルートを選択している。その後も送信先端末①との受信信号強度は最小受信感度付近にあるので直接通信やマルチホップ通信となりルートが安定せずにパケット到達率が良くない。また、60 秒付近では路面からの反射波によるマルチパスの影響により、受信信号強度がバースト的に最小受信感度を下回るのでパケット到達率も一時的

に大きく低下している。

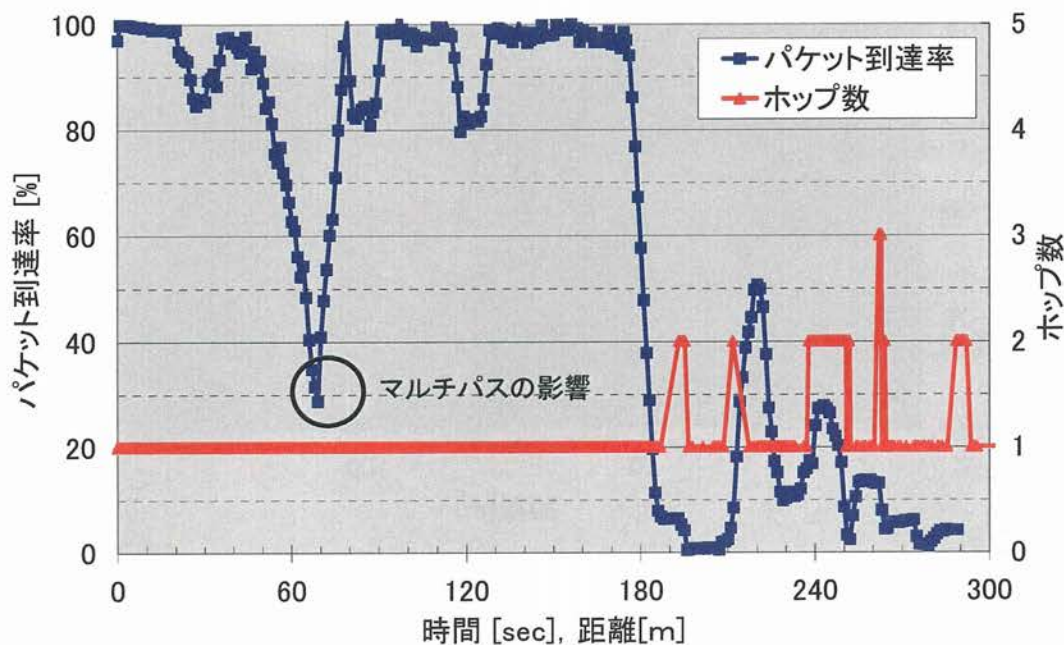


図 5.7 パケット到達率 (MANET による AODV)

Fig.5.7 Packet delivery ratio (MANET AODV)

#### 5.3.4 受信信号強度を考慮した方式

MANET による FSR, AODV に対して, 筆者は文献[50]~[53]にて, 伝搬状況の良い中継端末を選択することにより, マルチホップ通信の総合スループットを向上させる方式を提案し, 静止端末の中での実験において, 伝搬状況の良い方のホップ数が多い経路を選択しても総合性能が優れることを示した. 具体的には, 図 5.8 に無線モジュールの受信信号強度に応じたエラーレートとスループットの特性に示すように, 受信信号強度が約 $-50\text{dBm}$ ~ $-90\text{dBm}$  に応じて, 伝送速度が $54\text{Mbps}$ ~ $1\text{Mbps}$  まで変化し, この区間に対してメトリックの値に重み付けを行って対応させ, 総合メトリックの小さい方の経路を選択する手法である.



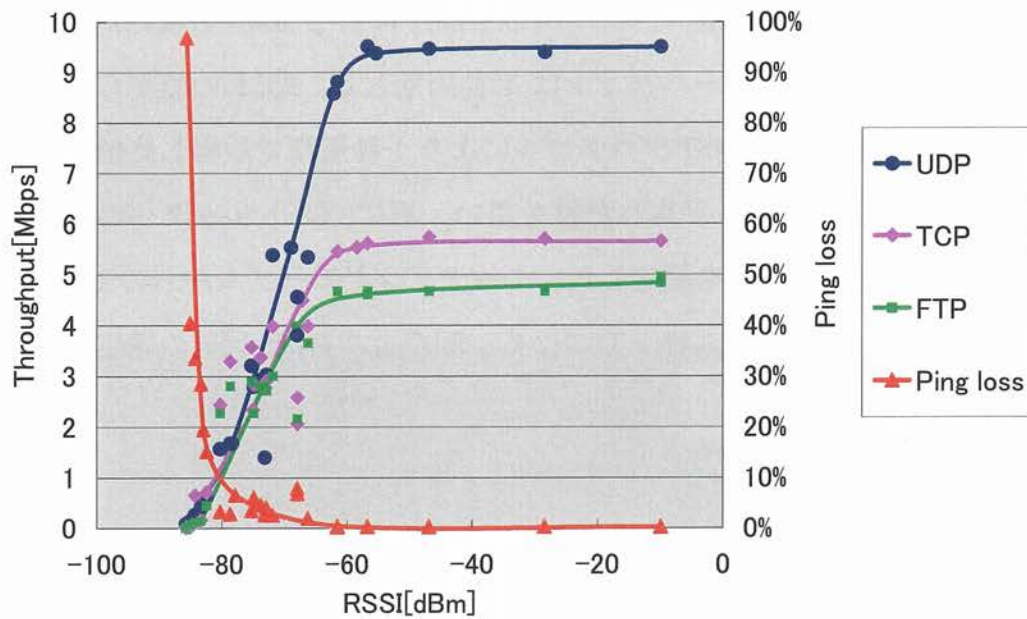


図 5.8 スループット特性 (適応変調)

Fig. 5.8 Characteristics of throughput (Adaptive modulation)

適応変調におけるスループット特性により、ルーティングにおけるメトリック値は通信特性が劣化し始める約-55dBm 以下で表 1 に示す重み付けを施すこととした。

表 5.1 メトリックの設定

Table 5.1 Metric due to RSSI

信号強度 (dBm)	-55	-65	-75	-85	
メトリック値	1	2	4	8	16

今回の移動実験においても同様の方式を用いて、移動時のホップ数やパケット到達率を測定した結果を図 5.9 に示す。MANET による AODV を用いた実験と同様に、AST の更新及びハローパケットは 1 秒周期とし、RSSI の値からメトリックへの変換に当たっては、AST プロトコルにより 1 秒周期で取得した値を 5 回分オーバーラップさせながら平均した値を用い、更に、メトリックへの移行の際には  $\pm 2\text{dB}$  のヒステリシスを設定した。ルーティングテーブルからの life time は Hello パケット 3 回分の 3 秒としている。図中より 60 秒付近の送信元端末④と送信先端末①との路面からの反射波によるマルチパスの影響による受信信号強度のバースト的な低下時に、中継端末②を経由した 2 ホップのマルチホップ通信となることにより、この付近のバースト的なパケット到達率の低下が起きていないことが判る。また 160 秒付近より送信元端末④と中継端末②の受信信号強度の低下に伴いパケット到達率も低下していくが、200 秒付近では送信元端末④と中継端末②との路面からの反射波によるマルチパスの影響による受信信号強度のバースト的な低下により、中継端末②及び中継端末③をも経由した 3 ホップのマルチホップ通信となることにより、パケット到達率が若干回復している。しかし、200sec 付近以降では、RSSI の 10dB ごとの閾値に応じた可変メトリックに対して、送信元端末④との間で送信先端末①や中継端末①及び③との受信信号強度に大きな差が無いために、経路を決定付けるための総合メトリックに差が生じず、経路が頻繁に変更されて、パケット到達率が低下している。MANET による AODV を用いた場合 (図 5.7) に較べて、全般的にホップ数が多く、マルチホップ通信における各区間の受信信号強度の値が高いため伝送速度も高く、パケット到達率は比較的良くなっている。

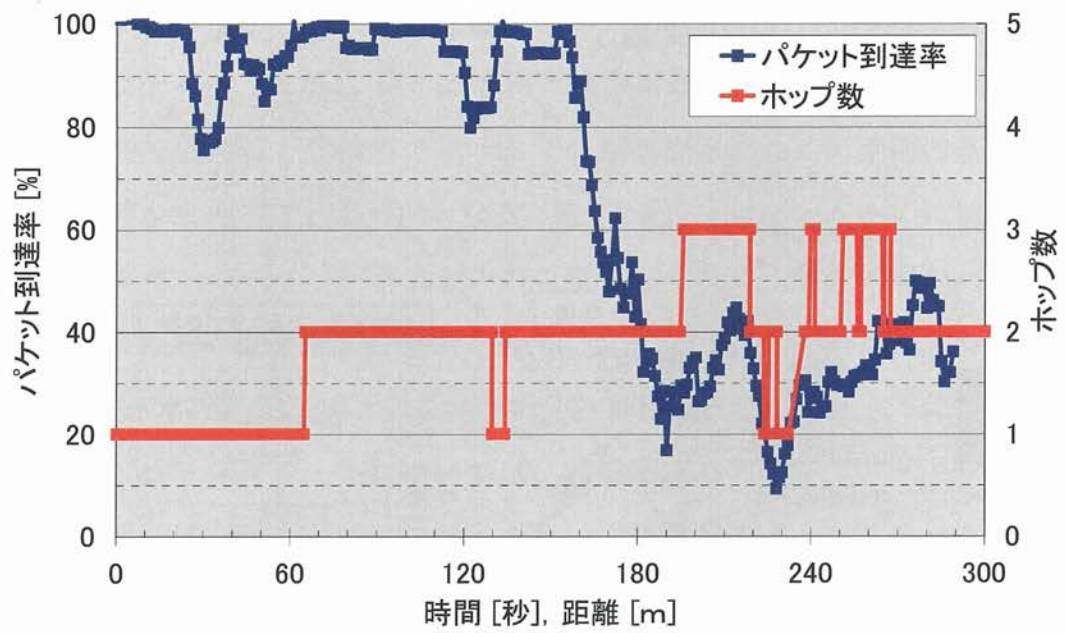


図 5.9 パケット到達率 (RSSI AODV)

Fig. 5.9 Packet delivery ratio (RSSI AODV)

### 5.3.5 位置情報を用いた方式

経路の頻繁な変動に対して、GPS からの位置情報を基に、端末間距離を算出し、距離に応じたメトリックの値をトポロジーに反映し、経路を安定に切り替えることを目的としている。図 5.10 に実験の構成を示す。

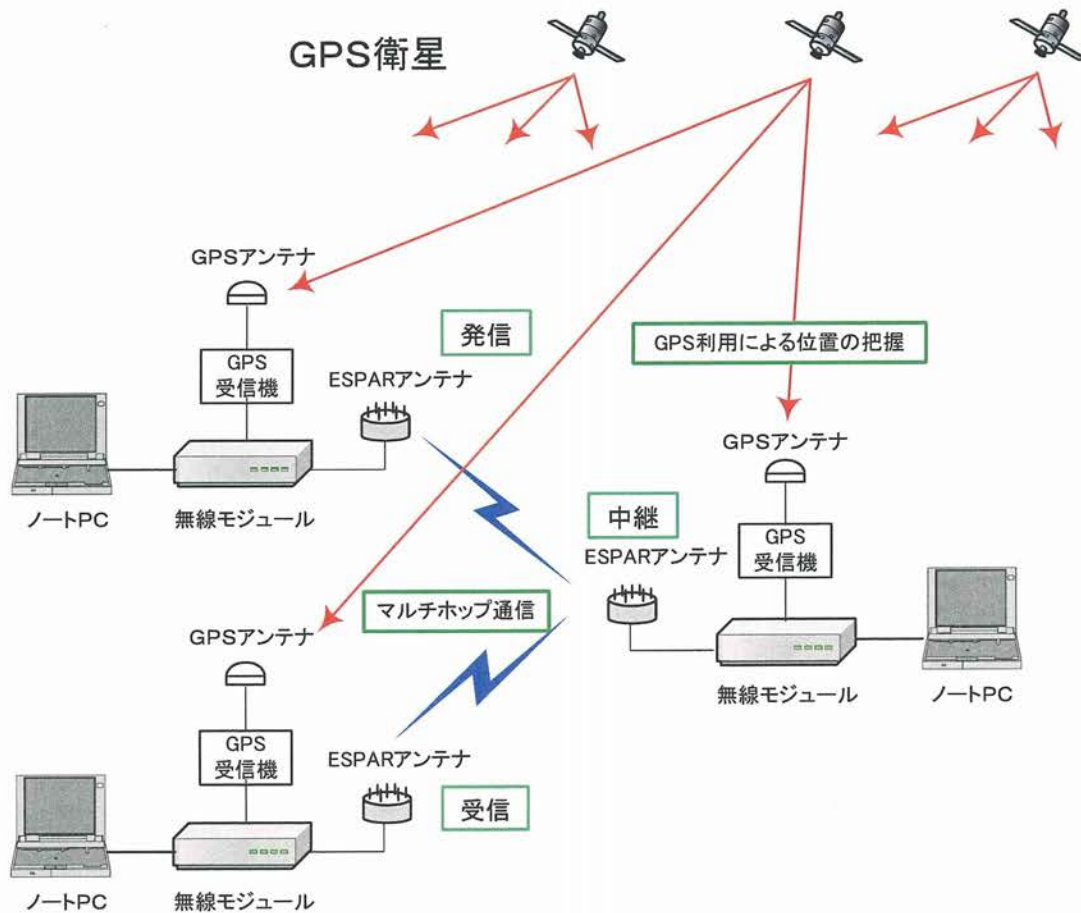


図 5.10 GPS を用いた実験の構成

Fig. 5.10 Structure of test bed with GPS

移動実験の関係により、はじめは送信元端末④と送信先端末①が直接通信となっているが、直接通信となる一定距離の中継端末を追い越した時点で、その中継端末を経由するマルチホップ通信に切り替えるものとした。従って、各端末間距離のメトリックを1とし、この距離を越えた時点でメトリックの値を大きな値として例えば16と設定する。選定したい経路のホップ数が総合メトリックの値であり、選定したくない経路のメトリックの値は想定されるホップ数の最大値以上とすれば良い。また、AST生成における返信(Reply)パケットやルーティングのハローパケット等にGPSから得た位置情報を盛りこんでおけば、受信側では自分の位置情報と比較して相手までの距離を算出して、距離に基づくメトリックの値を求めることが可能となる。但し、ASTプロトコルへの位置情報の追加は、元々オーバーヘッドが大きいので望ましくなく、比較的軽いハローパケットへの自端末の位置情報の追加であれば今までと殆ど影響は無い。

AODVのルーティングにおいては、ハローやRREQ/REPYのパケットに、自分の位置情報とアクティブルートについては、隣接端末のアドレスとメトリックの値を盛り込む改造を行い、経路の制御を行い、移動時のホップ数やパケット到達率の測定を行った。この結果、図5.11に示すように、経路は安定に切り替えられたが、MANETによるAODVを用いた時と同様に、60秒付近の送信元端末④と送信先端末①との路面からの反射波によるマルチパスの影響による受信信号強度のバースト的な低下時に、中継端末を利用せず直接通信が続くので、パケット到達率が良くないことが判る。また160秒付近より送信元端末④と中継端末②の受信信号強度の低下に伴いパケット到達率も低下していくが、200秒付近では送信元端末④と中継端末②との路面からの反射波によるマルチパスの影響による受信信号強度のバースト的な低下時に、中継端末③を追い越した時点で、中継端末②及び中継端末③も含めた安定な3ホップとなり、再び、パケット到達率が回復する。これ以降は、送信元端末④が遠ざかり、受信信号強度の低下に伴い、パケット到達率も低下していく。

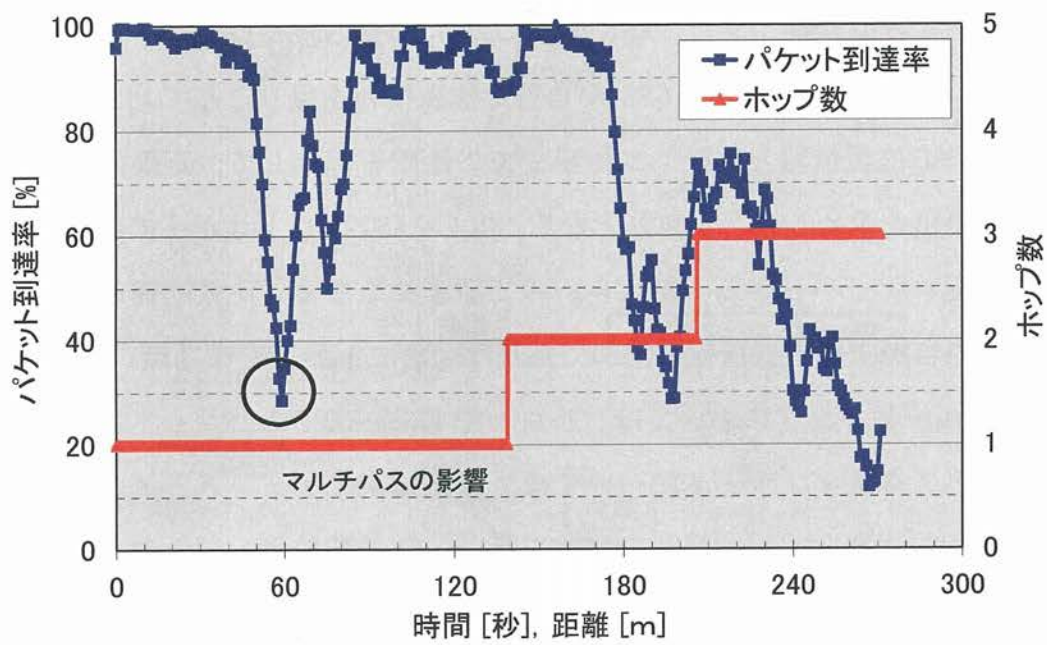


図 5.11 パケット到達率(GPS 対応 AODV)

Fig.5.11 Packet delivery ratio (GPS AODV)

### 5.3.6 基礎実験のまとめ

MANET による AODV, RSSI AODV, GPS AODV の 3つのプロトコルに対して, 移動実験におけるパケット到達率の結果を表 2 に示す. 表中, 実験開始から 180 秒を境に前半と後半に設定した.

表 5.2 基礎実験のまとめ

Table 5.2 Result of mobile experiment

		MANET AODV	RSSI AODV	GPS AODV
前半	平均値 (ave)	89.8	94.5	88.4
	標準偏差 ( $\sigma$ )	14.7	6.1	15.4
後半	平均値 (ave)	14.4	35.6	47.1
	標準偏差 ( $\sigma$ )	51.3	12.1	40.5
総合	平均値 (ave)	60.1	68.6	75.3
	標準偏差 ( $\sigma$ )	44.0	36.8	33.3

単位 (%)

MANET による AODV を用いた場合, 最小ホップ数の経路が優先され, 受信信号強度の変化を受け易く, 総合的にもパケット到達率が 60.1%であった. 受信信号強度を考慮した RSSI AODV 方式では, 前半のマルチパスによる受信信号強度の低下に対して, 中継端末を用いたマルチホップにより影響を低減しているが, 後半では MANET による AODV の場合と同様に, 送信元端末と各端末との受信信号強度の差が小さいために, 経路を決定出来ずに頻繁に経路が変更されて, パケット到達率が低下している. 総合的にもパケット到達率が 68.6%であった. 位置情報を用いた GPS AODV 方式では, 移動中に経路を安定して切り替えることが出来たが, マルチパスによる影響を受け易く, この時のパケット到達率が急激に低下している. また, 180sec 付近より後半では, 送信元端末と各端末との間で受信信号強度の差が小さいが, ルートを安定に切り替えて 3 ホップとなり, 総合的にはパケット到達率が 75.3%であった. 従って, 受信信号強度を考慮した方式で, 特に, 路面からの反射波によるマルチパスへの対応と, 位置情報を用いた方式を, 状況に応じて使い分けることが望ましい.

## 5.4 提案方式と計算機シミュレーション

### 5.4.1 提案方式

GPSからの位置情報を利用して、端末間距離に応じたメトリックをトポロジーに反映するルーティングプロトコルをベースに、電波伝搬状況を監視してマルチパスの発生する距離範囲ではイベント的にメトリック値を変化させてルートを変更させる方法により、ルートを不安定や急変させることなく安定にルートを切り替えながらパケット到達率を向上させるマルチパス対応位置方式 RecMP AODV (Recover MultiPath AODV)を提案する。本方式では、定期的にハローパケットを利用して隣り合う端末と GPS からの位置情報を局所的に交換し合い、自端末と隣り合う端末との距離を算出し、予め設定した距離とメトリックの対応に従ってトポロジーに端末間の距離に基づくメトリックの情報を反映し、一定距離以内の端末を追い越してこの距離を越えると、例えばメトリックの値を1から16へと大きく設定し、経路を切り替えていくものとする。また、路面からの反射波によるマルチパスの影響により受信信号強度がバースト的に低下する距離地点(50m~60m)に対しては、優先的にメトリックの値を、同じく1から16へと大きく設定し、異なる経路を選択するものである。



#### 5.4.2 実環境を考慮した計算機シミュレーション

計算機シミュレーションにおいては、実際の環境で得られた路面反射によるマルチパスの影響を受けた受信信号強度の値を実装した。シミュレーションソフトウェアとしては Qualnet3.8 版を使用し、無線 LAN は IEEE802.11b, 1Mbps 固定レート、パケット発生は CBR=1,400 バイト/パケット, 20 パケット/sec とした。ESPAR アンテナのオムニ及びセクタのビームパターンを実装した。また、実装した AST プロトコルの更新周期及び AODV のハローパケットの周期は 1 秒とした。実際の実験時よりも静止した中継端末の台数を最大で 9 台まで増やして各端末間距離はマルチホップ通信で直接通信可能な 100m と設定した。シミュレーションのトポロジーを図 5.12 に示す。

MANET による AODV, 受信信号強度を考慮した RSSI AODV, 位置情報を用いた GPS AODV, マルチパス対応位置方式である RecMP AODV について、シミュレーション結果を図 5.13~図 5.16 に示し、これらを総括した結果を図 5.17 に示す。

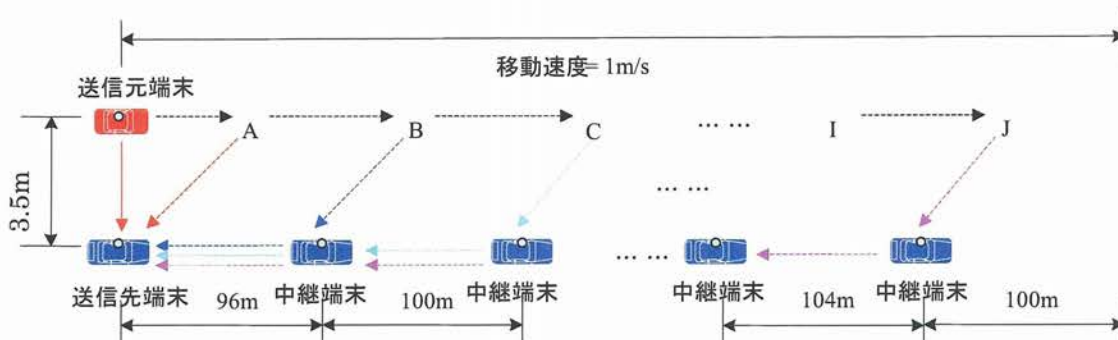


図 5.12 シミュレーション・トポロジー

Fig. 5.12 Topology for simulation

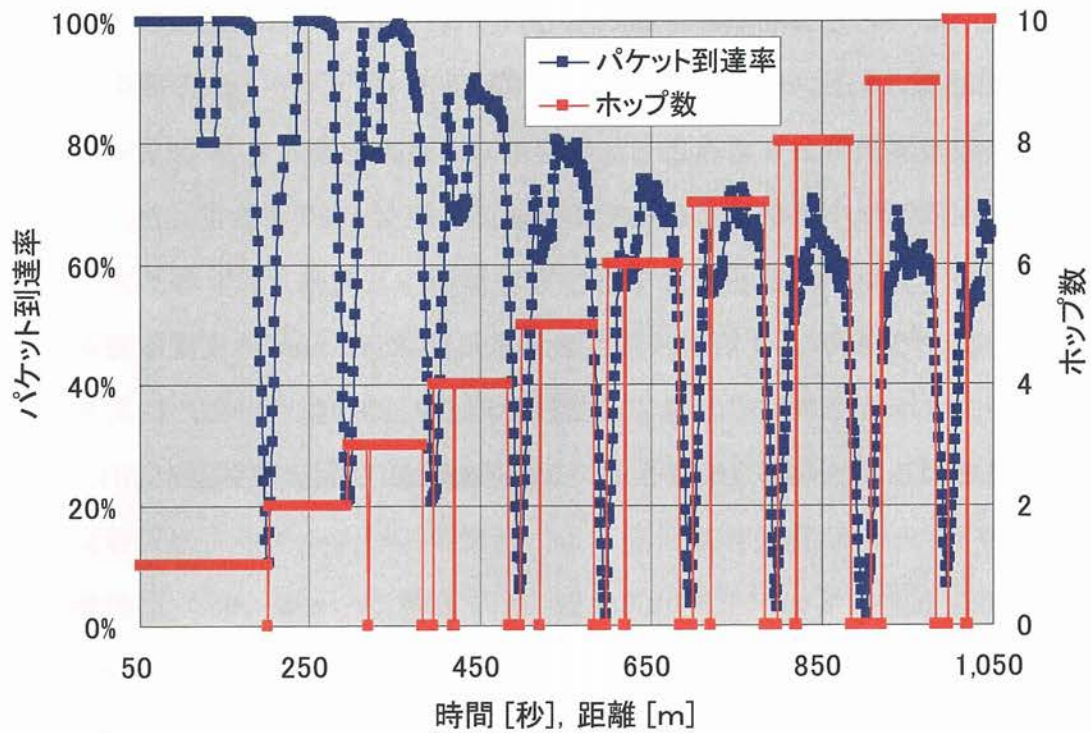


図 5.13 MANET AODV の時系列的パケット到達率とホップ (平均パケット到達率は 64.31%)

Fig. 5.13 Packet delivery ratio and hop count (MANET AODV) (Average delivery ratio = 64.31%)

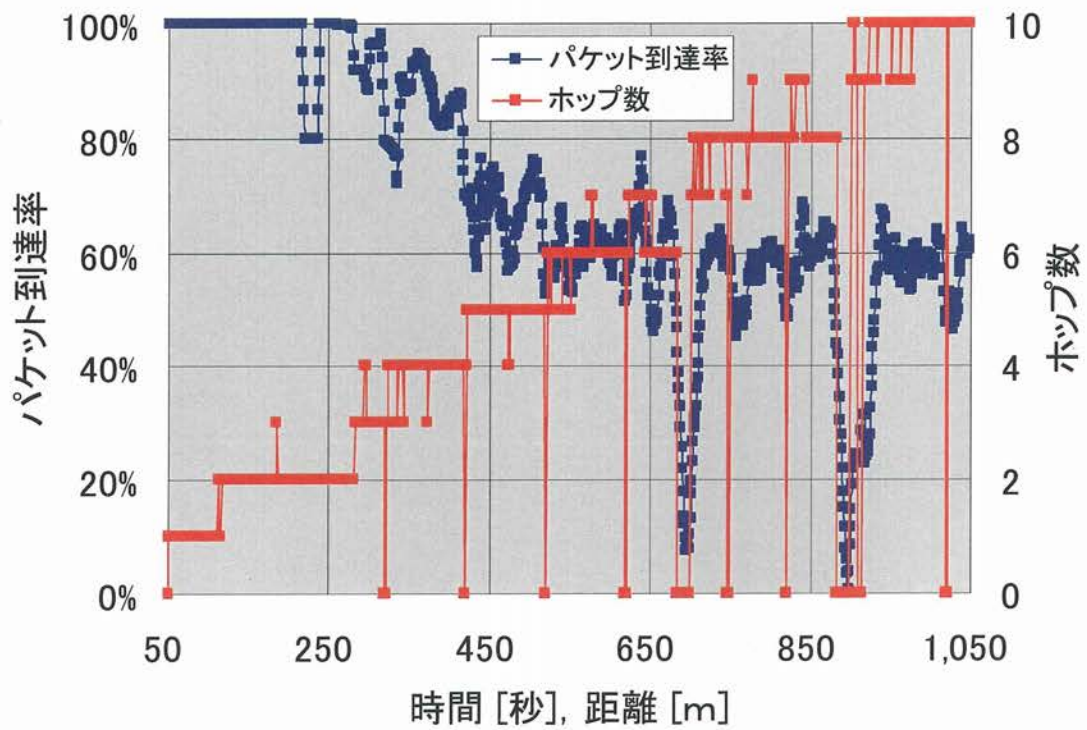


図 5.14 RSSI AODV の時系列的パケット到達率とホップ (全体のパケット到達率は 70.17%)

Fig. 5.14 Packet delivery ratio and hop count (RSSI AODV) (Average delivery ratio = 70.17%)

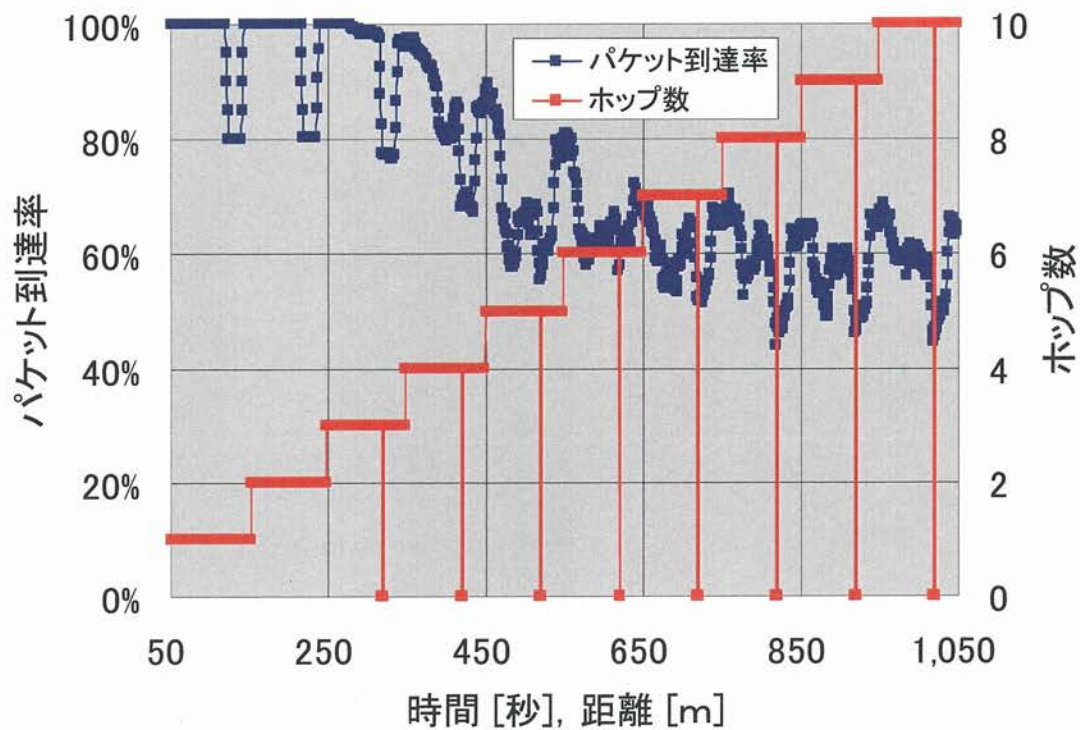


図 5.15 GPS AODV の時系列的パケット到達率とホップ (平均パケット到達率は 74.14%)

Fig. 5.15 Packet delivery ratio and hop count (GPS AODV) (Average delivery ratio = 74.14%)

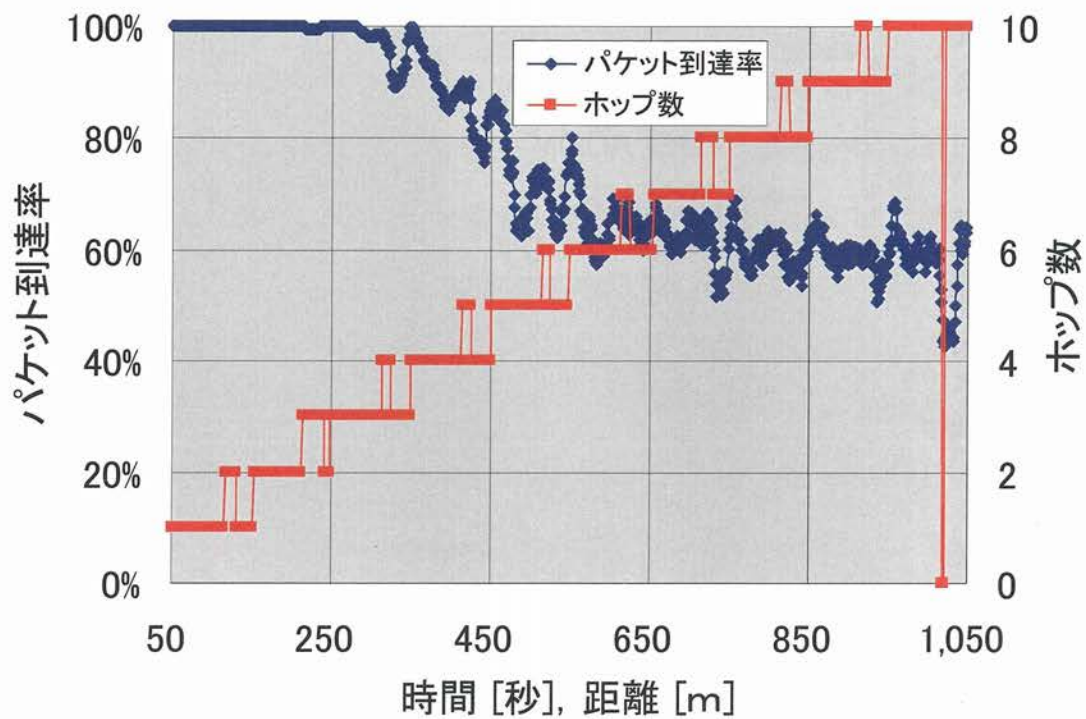


図 5.16 RecMP AODV の時系列的パケット到達率とホップ (平均パケット到達率は 75.39%)

Fig. 5.16 Packet delivery ratio and hop count (RecMP AODV) (Average delivery ratio = 75.39%)



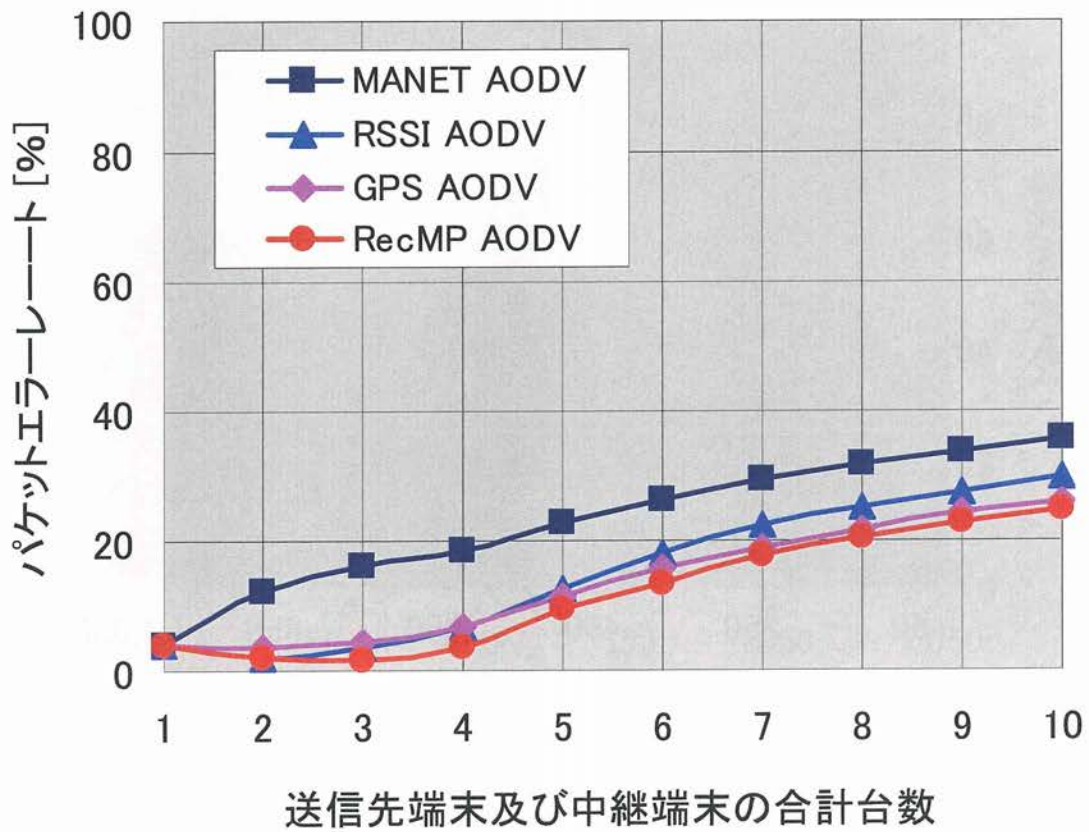


図 5.17 送信先端末及び中継端末の合計台数と PER

Fig. 5.17 PER vs node numbers related to several AODV' s

この結果、MANETによるAODV、受信信号強度を考慮したRSSI AODV、位置情報を用いたGPS AODVについては、基礎実験とほぼ同様の結果となった。MANETによるAODVでは、送信端末と受信端末が最小ホップ数で接続しようとするために、電波伝搬の限界まで直接通信が続き、切断してから新たな中継ルートを選択している。また、受信信号強度の変動に伴い経路が頻繁に変更され、マルチパスの発生する距離地点ではバースト的にパケット到達率が低下している。受信信号強度を考慮したRSSI AODVでは、最初のマルチパスによる受信信号強度の低下に対して、中継端末を用いたマルチホップにより影響を低減しているが、後半では受信端末と各端末との受信信号強度の差が小さいために、経路を決定出来ずに頻繁に経路が変更されて、パケット到達率が低下している。位置情報を用いたGPS AODVでは、送信元端末との間で送信先端末や中継端末との受信信号強度の差が小さくても、経路を安定して切り替えることが出来たが、マルチパスによる影響を受け易く、この時のパケット到達率が急激に低下している。提案するマルチパス対応位置方式のRecMP AODVでは、経路を安定して切り替えながら、中継端末とマルチパス発生距離地点ではイベント的に経路を変更することにより、マルチパスによる影響を回避しており、パケット到達率にはバースト的な低下が殆ど無く、平均的にも最も良い値となった。

#### 5.4.3 移動速度について

基礎実験及び計算機シミュレーションについて、送信元端末の他端末に対する相対的な移動速度は1m/secとしている。これは、3.1章で説明したように、使用する無線装置に固有の性能面からの制約のなかで、スループットを確保するために、ASTプロトコルは更新周期を1秒に選定したものである。また、3.2章で説明したように、セクタビームを通信したい相手端末の方向に設定されていることを前提に、移動体における各種ルーティングプロトコルのパケット到達率の評価を行うためである。所定以上の移動速度となると、セクタビームの方向設定精度の問題だけでなく、ハローパケットによる他の端末の位置情報取

得が遅れるので経路制御のタイミングが問題となる。更に、ルートが更新されるまでの間に環境が変化してしまい、パケットの不達が増えることが考えられる。今後、無線装置の性能が大幅に向上しても制約は生まれるので、予測的な手法が必要となってくる。現行の条件のままで、相対的な移動速度が 1m/s (≒ 3.6Km/h) 及び 5m/s (≒ 18Km/h) におけるパケットの再送回数を、それぞれ図 5.18 に示す。移動速度が速くなることにより全てのプロトコルの再送回数が増えている。MANET による AODV は、品質の弱いリンクを使う可能性があり、移動速度が速くなるとリンクの品質の信頼性が更に低下するので、最も再送回数が増える。受信信号強度の情報を用いる RSSI AODV や RecMP AODV は、移動速度が速くなると、見かけ上フェージングの影響が低下する可能性がある。しかし、位置情報のみを用いた GPS AODV は移動速度が速くなると、送信元端末から通信したい相手に対するセクタビームの設定精度が低下するので、受信信号強度の情報を用いる RSSI AODV や RecMP AODV よりも再送回数が増えることになる。



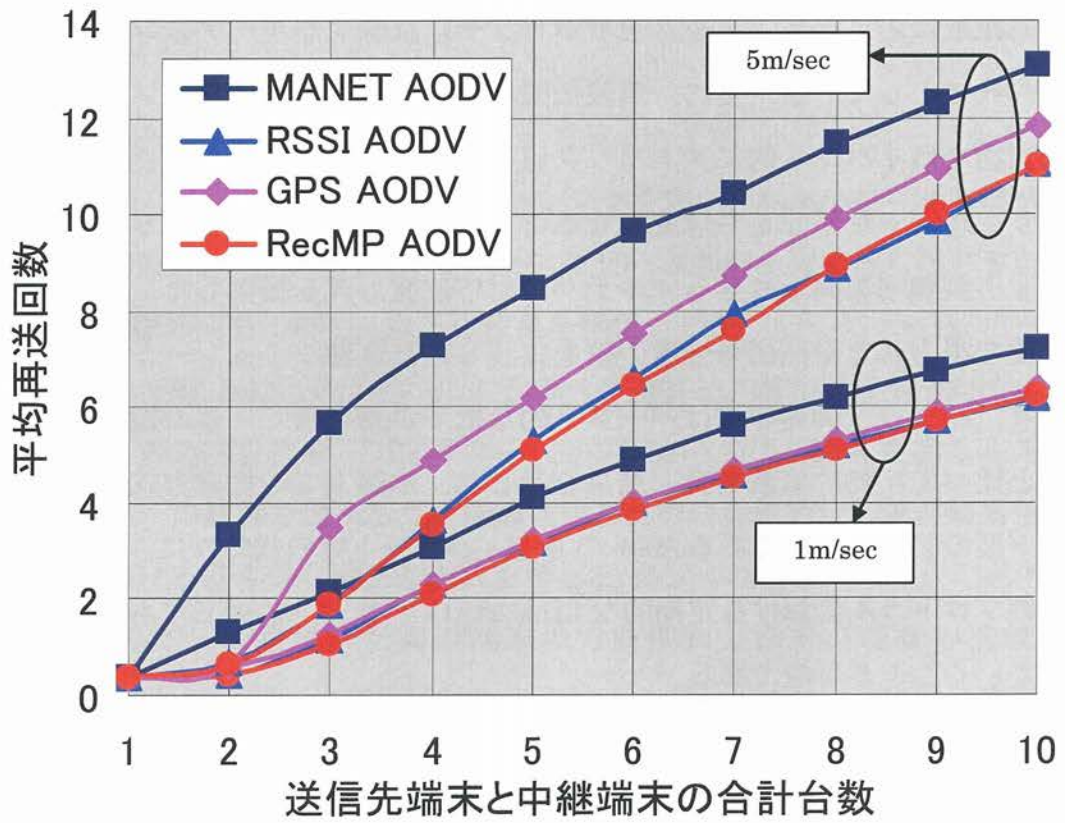


図 5.18 移動速度とパケットの再送回数

Fig.5.18 Average number of retransmission related to mobility

## 5.5 まとめ

移動体における無線アドホックネットワークでは端末の参入や離散によるトポロジーの変化だけでなく、電波伝搬状況の変化によりルートが不安定となつて、通信性能が劣化することから、実用化への課題となっている。本論文では、ITSの車車間通信への応用を想定して、GPSからの位置情報を利用して、端末間距離に応じたメトリックをトポロジーに反映するルーティングプロトコルをベースとしている。更に、電波伝搬状況を監視してマルチパスの発生する距離範囲ではイベント的にメトリック値を変化させてルートを変更させる方法により、ルートを不安定や急変させることなく安定にルートを切り替えながらパケット到達率を向上させるマルチパス対応位置方式を提案した。また、実際の環境で得られた受信信号強度の値を実装した計算機シミュレーションの結果により、パケット到達率にはバースト的な低下が殆ど無く、他の個別のプロトコルと比べて平均的に最も良い結果を示した。本論文での提案方式は、オンデマンド型のプロトコルであるAODVのHelloパケット等の代わりに、テーブル駆動型のプロトコルにおける定期的なLink stateパケットに対しても改造し、導入していくことが可能である。

## 第6章 結論

スマートアンテナを用いてビーム形状を適応的に制御し、データ通信が可能なテストベッドの設計手法と、このテストベッドへMACやルーティングを実装し、実環境における実験評価から、スマートアンテナを有効利用する無線システムの構築について提案し、その有用性を明らかにした。

以下、本研究で得られた成果を要約する。

- (1) スマートアンテナとして ESPAR アンテナを用い、高速なデータ通信が可能な IEEE802.11g 無線 LAN をベースにビーム制御を可能としたアドホック無線装置の開発に関し、以下の成果を得た。
  - ・ 現行の無線 LAN ドライバによるデータ通信と、新たに行う指向性ビーム制御との連携動作を、アプリケーション側から行う方法を提案し、スループットへの影響を出来るだけ低減させるための具体的な方策と効果や、設計における基本的な構成や方式を示した。
  - ・ 指向性ビームを用いた周辺端末の方向探知方法や、複数の構成品を Ethernet で接続して無線通信を担う端末のゲートウェイと MAC 透過処理との関係を示した。
  - ・ 実験によって基本特性の実証評価を行い、周辺端末の方向探知精度として標準偏差で  $2^\circ$ 、1対1での実効スループットとして 9.5 Mbps (UDP)及び 5.8 Mbps (TCP)、指向性ビームの比較的高いアンテナ利得から、無指向性ビームどうしでの最大通信距離に対して 1.6 倍となる効果があることを示した。
- (2) 任意の MAC プロトコルを実装して実環境にて評価できる 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、指向性 MAC プロトコルとして SWAMP プロトコルを実装し、以下の成果を得た。
  - ・ 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 台にて、比較的

近距離(6m)での通信ペアを2組設け、一列に並べた時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まで最も干渉無く接近させることが出来て、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。

- テストベッド3台にて、三角形に並べた時に、最も一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、電力制御に伴う11.25dB相当の3.6倍に通信距離が伸ばせることを示した。

(3) スマートアンテナとして ESPAR アンテナを用い、高速なデータ通信が可能な IEEE802.11g 無線 LAN をベースにビーム制御を可能としたアドホック無線装置に、GPS を付加して位置情報を利用するルーティングプロトコルを実装し、以下の成果を得た。

- GPS からの位置情報を利用して、端末間距離に応じたメトリックをトポロジーに反映するルーティングプロトコルをベースとし、電波伝搬状況を監視してマルチパスの発生する距離範囲ではイベント的にメトリック値を変化させてルートを変更させる方法により、ルートを急変させることなく安定に切り替えながらパケット到達率を向上させるマルチパス対応位置方式を示した。
- 実験結果と計算機シミュレーションにより、1台の移動端末が10台の静止端末を通過していく場合に、End to End のマルチホップ通信特性で、MANET の従来方式と比較して、バースト的なエラーを無くし、パケット到達率が平均で64%から75%以上に向上出来ることを示した。

今後の課題として、本研究で実現したテストベッドを更に拡張させて、指向性 MAC プロトコルについては、特有な問題である、指向性隠れ端末や晒され端末の問題、デフネスの問題対策に向けたプロトコルの提案と実装により、実

証評価を行う。また、ルーティングプロトコルについても、MANETで規定されたプロトコルに対して、運用条件と整合を図りながら、より高機能な方式の提案と実装により実証評価を行う。

実際に、現在の展開例について、事例の一部を説明する。

(1) ZigBee チップについては、ドライバソフ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が公開されていることから、このチップを用いた無線システムは拡張が容易であり、実用的な運用への展開が可能である。そこで、ノート PC と接続し、TCP/IP パケット通信のトンネル処理を行い、VPN (Virtual Private Network)でも利用されている TUN/TAP ドライバを利用したゲートウェイを構成し、Ethernet フレームは IEEE802.15.4/ZigBee フレームにカプセル化し、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ものとする。これにより、IP レイヤにて動作するルーティングプロトコルをそのまま用いることができ、通常、よく使われている無線 LAN カードと同等の動作を、RF チップのみ ZigBee チップに置き換えた形態で、マルチホップ通信の動作を可能とした。ここでは、周辺端末方向推定やマルチホップ通信の様子、更には、階層型ネットワークと関連付けてわかり易くデモンストレーションを実現している。 [54]~[56], [59]~[68]

(2) ZigBee チップについては、ファームウェアをマイコン側で独自に制御することにより、所謂、ノン ZigBee 方式として、独自のプロトコルを実現可能である。例として、CSMA/CA に基づく衝突回避のためのバックオフ制御について、IEEE802.11 DCF の比較的冗長な待ち時間を短縮して、高効率な MAC プロトコルへの展開を進めている。ここでは、受信信号強度の RSSI (Received Signal Strength Indicator) 値のランダム性を利用し、且つ、ルーティングテーブルのホップ数からバックオフ制御に重み付けを行う効率的なマルチホップ通信のプロトコルを展開中である。低消費電力化が重要なセンサネットワークにおいては、この高効率な MAC プロトコルが大きな役割を果たすと考えて

いる。更に、これらを反映したプロトコルを MAC レイヤのみで小型のマイコンで実現できる小規模なソフトウェアで構築し、現在、実証評価を行っている。[57], [58]

最後に、本研究の成果が、無線ネットワークの発展に役立てば幸いと念じ、本論文を締めくくることとしたい。

## 参考文献

- [1] 渡辺正浩, 森英貴, 深江唯正, 高原弘之, “レーダ測角処理の一例”, 電子情報通信学会ソサエティ大会, A-17-20, 2000
- [2] 渡辺正浩, 永縄浩, 秋山正躬, “周辺監視レーダ – 車車間通信への適用 – ”, 電子情報通信学会総合大会, A-17-47, 2001
- [3] Masahiro Watanabe, Shinsaku Noda, Katsuzi Okazaki, Tadamasa Fukae, Akihito Kato, Masayuki Fujise, “60GHz Millimeter wave spread spectrum radar for inter-vehicle communication” ITST2001, No.S7-5, pp.255-260, 2001
- [4] Masahiro Watanabe, Kenji Inomata, Shinsaku Noda, Katsuji Okazaki, Tadamasa Fukae, H,Yamabuchi, “A sideways-looking radar and its measuring principles,” European Microwave Week (EuMW'2001) , pp.261-264, 2001
- [5] Masahiro Watanabe, Katsuzi Okazaki, Tadamasa Fukae, Norihiro Tamiya, Naoki Ueda, Makoto Nagashima, “An obstacle sensing system for railway crossing application: A 60GHz mm-wave spread spectrum radar,” International Microwave Symposirm (IMS/MTT2002), pp.791-794, 2002.
- [6] Masahiro Watanabe, Katsuzi Okazaki, Tadamasa Fukae, Akio Kato, Katsuji .Sato, Masayuki .Fujise, “A 60GHz mm-wave spread spectrum radar and several data in different situation,” IEEE Intelligent Vehicle Symposium (IVS'2002), vol. 1, pp.87-91, 2002.
- [7] 渡辺正浩, 深江唯正, 川原祐紀, 手代木扶, 加藤明人, 佐藤勝善, 藤瀬雅行, “車車間通信におけるレーダと通信の融合装置 – 共用アンテナを用いた S S レーダと通信の融合 – “電子情報通信学会技術研究報告, ITS2002-5, pp.25-30, 2002
- [8] Masahiro Watanabe, Tadamasa Fukae, Yuuki Kawahara, Tasuku.Teshirogi, Akio Kato, Katsuji Sato, Masayuki Fujise, “A 60.5GHz Millimeter Wave

- Spread Spectrum Radar and Communication System Using a Co-use Antenna,” European Microwave Week (EUMW’2002), pp.941-944, 2002.
- [9] 佐藤勝善, 加藤明人, 高橋賢, 藤瀬雅行, 堀松哲夫, 佐藤純, 深江唯正, 田村禎啓, 赤澤逸人, “YRP におけるミリ波車々間通信実証実験の報告”, 電子情報通信学会技術研究報告, ITS2003-4, pp.17-22, 2003
- [10] Y. -B. Ko, V. Shankarkumar and N. H. Vaidya, “Medium Access Control Protocols Using Directional Antennas in Ad Hoc Networks”, Proc. IEEE INFOCOM, pp.13-21, March 2000.
- [11] R. R. Choudhury, X. Yang, R. Ramanathan and N. H. Vaidya, “Using Directional Antennas for Medium Access Control in Ad Hoc Networks”, Proc. ACM Mobile computing and Network (MobiCom), pp.59-70, Sep. 2002.
- [12] N. S. Fahmy, T. D. Todd and V. Kezys, “Ad Hoc Networks with Smart Antennas using IEEE 802.11-Based Protocols”, Proc. IEEE International Conference on Communications (ICC), pp.3144-3148, April 2002.
- [13] A. Nasipuri, K. Li and U. R. Sappidi, “Power Consumption and Throughput in Mobile Ad Hoc Networks using Directional Antennas”, Proc. IEEE International Conference on Computer Communications and Networking (ICCCN), pp.620-626, Oct. 2002.
- [14] M. Takai, J. Martin, A. Ren and R. Bagrodia, “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.
- [15] R. Ramanathan, “On the Performance of Ad Hoc Networks with Beamforming Antennas”, Proc. ACM Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MOBIHOC), pp.95-105, Oct. 2001.
- [16] T. Korakis, G. Jakllari and L. Tassiulas, “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.



- [17] S. Bandyopadhyay, K. Hasuike, S. Horisawa and S. Tawara, "An Adaptive MAC Protocol for Wireless Ad Hoc Community Network (WACNet) Using Electronically Steerable Passive Array Radiator Antenna", Proc. IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), pp.2896-2900, Nov. 2001.
- [18] R. Ramanathan, "Ad Hoc Networking With Directional Antennas: A Complete System Solution", IEEE Journal in Communication, Vol.23, No.3, March 2005
- [19] T. Nishida, K. Eguchi, Y. Okamoto, T. Warabino, T. Ohseki, T. Fukuhara, K. Saito, K. Sugiyama, "Multi-Hop Vehicle-to-Vehicle Communication", ITST2005, pp.163-166, June 2005
- [20] 大平 孝, "エスパアンテナの動作原理とシステム応用", 電子情報通信学会論文誌, 87,12, pp1061-1064 (2004-12).
- [21] ANSI/IEEE Std 802.11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications (1999)
- [22] 大野雄一郎, 門洋一, 行田弘一, 大平孝, "アンテナ走査角対 SINR 情報に基づくルーティング方式の提案", 電子情報通信学会総合大会, B-5-109, 3月 2000年
- [23] 大野雄一郎, 門洋一, 行田弘一, 大平孝, "アンテナ走査角対 SINR 情報に基づくルーティング方式の性能評価", 電子情報通信学会総合大会, SB-3-1, 9月 2000年
- [24] M.Watanabe, S. Tanaka, "Directional Beam MAC for Node Direction Measurement in Wireless Ad hoc Network", ECWT2003, pp155-158, Oct.2003
- [25] 渡辺正浩, 田中信介, "WACNet(IEEE802.11b)による周辺端末の方向推定方式", 電子情報通信学会技術研究報告, MoMuC2003-69, 11月 2003年
- [26] Network Codec DM-NC40 VICTOR Company of Japan
- [27] Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY)

Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks, IEEE Std 802.15.4™-2003

- [28] M. Takata, K. Nagashima and T. Watanabe, "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.
- [29] 福井潔, 谷本晃一, 福永茂, "ZigBee って何だ?", 信学誌, vol.88,1,pp.40-45,Jan.2005
- [30] "CC2420 Datasheet rev.1.2", June 2004, [http://www.chipcon.com/files/CC2420\\_Data\\_Sheet\\_1\\_2.pdf](http://www.chipcon.com/files/CC2420_Data_Sheet_1_2.pdf)
- [31] 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, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 9月2003年
- [32] 渡辺正浩, "無線アドホックネットワーク", 自動車技術会春季大会ヒューマトロニクスフォーラム, pp18-23, 横浜, 5月2003年
- [33] C.E.Perkins, "AD HOC NETWORKING", Addition-Wesley Pub,2000.
- [34] C.K.Toh, "Ad Hoc Mobile Wireless Networks Protocols and System", Prentice Hall PTR, 2001
- [35] X.Hong, K.Xu, M.Gerla, "Scalable Routing Protocols for Mobile Ad Hoc Networks", IEEE Network, pp.11-21, 2002
- [36] Y.B.Ko and N.H.Vaidya, Location-Aided Routing (LAR) in Mobile Ad hoc Networks, Wireless Networks, Vol.6, No.4, pp. 307-321, 2000
- [37] S.Basagni, I.Chlamatac, and V.R.Syrotiuk, "A distance routing effect algorithm for mobility (DREAM)," MobiCom '98, pp.76-84, 1998.
- [38] R.Morris, "A Scalable Location Service for Geographic Ad Hoc Routing", MobiCom 2000, pp.120-130, 2000.
- [39] B.Karp and H.T.Kung, GPSR: Greedy Perimeter Stateless Routing for Wireless Networks, MobiCom 2000, pp.243-254, 2000.

- [40] L.Blazevic, L.Butyyan, S.Capkun, S.Giordano, J.P.Hubaux, and J.Y.L.Boudec, "Self-organization in mobile ad hoc networks: The approach of Terminodes", IEEE Commun. Mag., Vol.39, No.6, pp.166-173, 2001.
- [41] D.Niculescu and B.Nath, "Trajectory Based Forwarding and Its Applications", MobiCom 2003, pp.260-272, 2003.
- [42] Douglas S. J. De Couto, Daniel Aguayo, Benjamin A. Chambers, Robert Morris, "Performance of multihop wireless networks: shortest path is not enough", ACM SIGCOMM Computer Communication Review, Vol.33, Iss.1, pp.83-88, 2003
- [43] Douglas S. J. De Couto, Daniel Aguayo, John Bicket, Robert Morris "A high-throughput path metric for multi-hop wireless routing", MobiCom 2003, pp.134-146, 2003
- [44] Richard Draves, Jitendra Padhye, Brian Zill, "Comparison of routing metrics for static multi-hop wireless networks", ACM SIGCOMM'04, pp.133-144, 2004
- [45] 渡辺正浩, 田中信介, 小宮山牧兒, 小花貞夫, 藤瀬雅行, "マルチホップ通信による動画ストリーミングの実験評価", 電子情報通信学会技術研究報告, IN2005-56, 7月 2005年
- [46] Guangyu Pei, et al, "Fisheye state routing: a routing scheme for ad hoc wireless networks" ICC2000. Commun., Volume 1, pp70-74, L.A., June 2000
- [47] C.E.Perkins, E.Belding-Royer and S.Das, Ad hoc on-demand distance vector (AODV) routing, RFC3561, July 2003
- [48] 渡辺正浩, 田中信介, "WACNet(11b アドホック)におけるルートダイバーシティの実験", 電子情報通信学会技術研究報告, MoMuC2004-16, 5月 2004年
- [49] 渡辺正浩, 田中信介, 仲田周二, 熊本和夫, 安川交二, "WACNet(11b アドホック)におけるルートダイバーシティの実験", 電子情報通信学会総合大

会 ,B-1-280, 2004

- [50] 渡辺正浩, 湯素華, 田中信介, “受信信号強度を考慮したルーティングプロトコルの提案”, 電子情報通信学会技術研究報告, RCS2004-130, 8月2004年
- [51] 渡辺正浩, 湯素華, 田中信介, “受信信号強度を考慮したルーティングプロトコルの屋内実験評価 “, B-5-125, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 9月2004年
- [52] S. Tang, B. Zhang, M. Watanabe, S. Tanaka, “A Robust AODV using RSSI with local update”, B-5-124, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 9月2004年
- [53] 湯素華, 張 兵, 渡辺正浩, 田中信介 “Link Heterogeniety を考慮したオンデマンド・ルーティング方式とその屋内実験評価”, 電子情報通信学会技術研究報告, MoMuC2004-85, 11月2004年
- [54] Naoya Kohmura, Hikaru Mitsuhashi, Masahiro Watanabe, Masaki Bandai, Sadao Obana, Takashi Watanabe, “UNAGI: a protocol testbed with practical smart antennas for ad hoc networks,” ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review (MC2R), Vol.12, Issue 1, pp. 59-61, Jan. 2008.
- [55] Hikaru Mitsuhashi, Naoya Koumura, Masahiro Watanabe, Sadao Obana, Masaki Bandai, Takashi Watanabe, “UNAGI: a Protocol Testbed with a Practical Smart Antenna for Ad hoc Networks” in Proc. ACM MobiCom2007, 2007.
- [56] Hiraru Mitsuhashi, Masahiro Watanabe, Sadao Obana, Masaki Bandai and Takashi Watanabe, “A testbed with a practical smart antenna for directional MAC protocols in ad hoc networks,” in Proc. IEEE HWISE'07, 2007
- [57] 渡辺正浩, 小花貞夫, 渡辺尚, “RSSI を用いてバックオフ制御を行う指向性 MAC プロトコルの提案” 電子情報通信学会技術究報告, RCS2008-86,

pp.199-204, 2008

- [58] 渡辺正浩,小花貞夫, 渡辺尚, “RSSI を用いて QoS 制御を行う指向性メディアアクセス制御について”情報処理学会, マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2008) シンポジウム, Vol.2008, No.8, pp.872-875, 2008
- [59] 坂本浩, 渡辺正浩, 萬代雅希, 小花貞夫, 渡辺尚, “S-UNAGI : スマートアンテナを用いた階層型センサネットワークの実装” 情報処理学会, マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2008) シンポジウム, Vol.2008, No.8, pp. 2020 - 2024, 2008
- [60] 河村直哉, 渡辺正浩, 萬代雅希, 小花貞夫, 渡辺尚, [技術展示] “UNAGI: スマートアンテナを用いるアドホックネットワークテストベッドの構築” 電子情報通信学会技術研究報告, MoMuC2007-93, pp.105-106, 2008
- [61] 河村直哉, 渡辺正浩, 萬代雅希, 小花貞夫, 渡辺尚, [技術展示] “UNAGI: スマートアンテナを用いるアドホックネットワークテストベッド” 電子情報通信学会技術研究報告, AN2007-41, pp. 43-46, 2007
- [62] 渡辺正浩,小花貞夫, 渡辺尚, “スマートアンテナを用いた ZigBee 無線装置の構築とマルチホップ通信基本特性,”電子情報通信学会技術研究報告, RCS2007-44, pp.89-84, 2007
- [63] 渡辺正浩,河村直哉,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 の空間利用効率に関する実証的考察”情報処理学会, マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2007) シンポジウム, Vol.2007, No.7, pp.639-648, 2007
- [64] 渡辺正浩,三觜輝,萬代雅希,小花貞夫,渡辺尚,“指向性 MAC を実装した TCP/IP インターフェース IEEE802.15.4/ZigBee アドホック無線装置の構築”情報処理学会, マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2007) シンポジウム, Vol.2007, No.7, pp.1777-178, 2007
- [65] 三觜輝, 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る MAC プロトコルテストベッドについて” 電子情報通信学会技術研究報告, AN2007-13, pp.71-76, 2007

- [66] 三觜輝, 渡辺正浩, 萬代雅希, 小花貞夫, 渡辺尚, “アドホックネットワーク MAC プロトコルのテストベッドの構築とその評価について” 情報処理学会, 情報学ワークショップ 2006 (WiNF2006), pp. 60-64, 2006
- [67] 渡辺正浩, 萬代雅希, 小花貞夫, 渡辺尚, “ESPAR アンテナと Zigbee チップを組み合わせたアドホック無線装置の MAC プロトコル実験と考察,” 情報処理学会, マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2006) シンポジウム, Vol.2006, No.6, pp.569--572, 2006
- [68] 三觜輝, 渡辺正浩, 小花貞夫, 萬代雅希, 渡辺尚“無線アドホックネットワークにおける MAC プロトコルのテストベッドについて”情報処理学会, マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2006) シンポジウム, Vol.2006, No.6, pp.565-568, 2006

## 謝辞

本論分をまとめるにあたり，終始懇切なるご指導，ご鞭撻を賜りました静岡大学創造科学技術大学院教授渡辺尚博士に謹んで感謝の意を表します。

本研究は，著者が静岡大学創造科学技術大学院自然科学系教育部情報科学専攻博士後期課程に在籍した 2006 年度から 2008 年度に行った研究成果と，この間，三菱電機(株)先端技術総合研究所にて業務の一環として携わった研究成果，及び，(株)国際電気通信基礎技術研究所 [ATR: Advanced Telecommunications Research Institute International] 適応コミュニケーション研究所 [ACR: Adaptive Communications Research Laboratories] へ出向した 2002 年から 2006 年までと，2006 年からの ATR 客員研究員としての業務の一環として携わった研究成果をまとめたものであり，本研究を進めるに当たってご協力戴いた方々に深く御礼を申し上げます。

本研究を進める機会を与えて頂き，終始ご指導を賜った三菱電機(株)先端技術総合研究所田中健一副所長に深く感謝致します。本研究の推進を強力に進めて頂いた(株)ATR 適応コミュニケーション研究所所長小花貞夫博士，並びに(財)データ通信協会所長（元同研究所所長）小宮山牧兒博士，有益な助言を戴いた(株)KDDI 研究所（元同研究所室長）田中信介博士に深く感謝致します。本研究の遂行に，ご支援と有益な助言を戴いた(独)情報通信研究機構アジアリサーチセンター長藤瀬雅行博士，並びに(独)情報通信研究機構マネージャ加藤明人博士に深く感謝致します。本研究を遂行するに当たって，スマートアンテナの役割を担う ESPAR [ Electronic Steerable Parasitic Array Radiator ] アンテナの原理についてご指導戴いた豊橋技術科学大学教授大平孝博士（元 ATR 電波研究所所長）に深く感謝致します。ESPAR アンテナ及び IEEE802.15.4(ZigBee)をベースとする無線装置の設計・評価と実験にご協力とご支援を賜った三菱電機通菱テクニカ(株)木崎一廣部長，他関係者の方々に深く感謝致します。IEEE802.11 無線 LAN をベースとする無線装置の設計・評価と実験にご協力とご支援を賜った三菱スペースソフトウェア(株)杉田智哉専任，西澤峰雄専任，辻敏専任，他関

係者の方々に深く感謝致します。また、同無線装置の基本モデルについて設計・評価にご協力とご支援を賜ったNTTアドバンステクノロジー(株)厚木岳夫氏、岡部重利氏、他関係者の方々に深く感謝致します。無線測距装置の設計・評価と実験にご協力とご支援を賜ったアルモテック(株)田村禎啓社長、他関係者の方々に深く感謝致します。無線環境における物理特性の計測・評価と実験にご協力とご支援を賜ったキーコム(株)鈴木洋介社長、他関係者の方々に深く感謝致します。国内及び海外のミリ波帯における高周波デバイスの設計・評価と実験にご協力とご支援を賜った(株)セスナ熊沢みえ子社長、他関係者の方々に深く感謝致します。筆者がATR 適応コミュニケーション在職時に、同職場にて無線アドホックネットワークの研究について議論を行ったピーター・デービス博士、湯素華博士、他関係者の方々に深く感謝致します。また、同時期に、三菱電機(株)通信機製作所よりATR 電波研究所へ出向され、ESPAR アンテナの研究について議論を行った橋口正哉氏、青野智之氏、他関係者の方々に深く感謝致します。本研究における移動体実験に向けて、筆者がATR 在職中の殆ど3年半に渡って延べ7人の学生実習に派遣して頂き、格別のご協力を戴いた大阪工業大学教授安川交二博士、並びに熊本和夫博士に深く感謝致します。実験及びデータ計算で協力戴いた、元大阪工業大学大学院 仲田信二君、松田真知君、井川英哲君、山下真君、山口俊介君、三成琢也君、稲井慶一君に感謝致します。筆者が静岡大学において、研究の議論を進めて頂いた静岡大学 萬代雅希博士、並びに、高田昌忠博士に深く感謝致します。実験に協力頂いた、元静岡大学大学院 岡田辰博君、三觜輝君、静岡大学大学院 河村直哉君、坂本浩君に感謝致します。また、本研究の推進に当たり、終始暖かい励ましを戴きました三菱電機(株)先端技術総合研究所センサ情報処理システム技術部の皆様、並びに、(株)ATR 適応コミュニケーション研究所の皆様、関係する方々に深く感謝致します。

最後に、本研究は、以上のほか無線アドホックネットワークの研究及び無線システムの構築に携わる多くの方々のご指導、ご鞭撻のもとに達成されたものであります。これまでの研究の遂行を支えて下さった多くの方々に、心より御礼申し上げます。



## 付録 本研究に関連する原著論文

### 1. 論文

- [1] 渡辺正浩, 小花貞夫, 渡辺尚, “スマートアンテナを用いた無線 LAN をベースとするアドホック無線装置の設計と考察,” 情報処理学会論文誌, Vol.49, No.1, pp.3214-3224, 2008.
- [2] 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,” 情報処理学会論文誌, Vol.48, No.7, pp.2187-2198, 2007.
- [3] 渡辺正浩, 湯素華, 小花貞夫, “位置情報に基づきマルチパスフェージングを考慮した移動体向けアドホックルーティングプロトコルの特性評価,” 情報処理学会論文誌, Vol.47, No.12, pp.288-299, 2006.
- [4] Naoya Kohmura, Hikaru Mitsuhashi, Masahiro Watanabe, Masaki Bandai, Sadao Obana, Takashi Watanabe, “UNAGI: a protocol testbed with practical smart antennas for ad hoc networks,” ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review (MC2R), Vol.12, Issue 1, pp. 59-61, Jan. 2008.
- [5] Suhua Tang, Bing Zhang, Masahiro Watanabe, Shinsuke Tanaka, “A link Heterogeneity-Aware On-Demand Routing (LHAOR) Protocol Utilizing Local Update and RSSI Information” IEICE Transaction Communication, Vol.E88-B, No.9, pp.3588-3597, Sept. 2005

## 2. 国際会議

- [1] Hikaru Mitsuhashi, Naoya Koumura, Masahiro Watanabe, Sadao Obana, Masaki Bandai, Takashi Watanabe, “UNAGI: a Protocol Testbed with a Practical Smart Antenna for Ad hoc Networks” in Proc. ACM MobiCom2007, 2007. (*Demo: Best 4 Prize of 24 Teams*)
- [2] Masahiro Watanabe, Sadao Obana, Masaki Bandai, Takashi Watanabe, “Empirical discussion on directional MAC protocols for ad hoc networks using a practice smart antenna,” in Proc. IEEE ICC2007, 2007
- [3] Hiraru Mitsuhashi, Masahiro Watanabe, Sadao Obana, Masaki Bandai and Takashi Watanabe, “A testbed with a practical smart antenna for directional MAC protocols in ad hoc networks,” in Proc. IEEE HWISE'07, 2007
- [4] Masahiro Watanabe, Shinsuke Tanaka, “The video streaming at multihop communication on WACNet (Wireless Ad hoc community Network) test system for ITS inter vehicle communications” European Microwave Week (EUMW'2005), pp.169-172, 2005.
- [5] Masahiro Watanabe, Shinsuke Tanaka, Bokuji Komiyama, Sadao Obana, Masayuki Fujise, “Multihop communication characteristics of WACNet (Wireless Ad hoc Community Network) test system based on IEEE802.11g and ESPAR antenna” ,ITST2005, pp.251-254, 2005
- [6] Maasahiro Watanabe, Shinsuke Tanaka, “Experimental result of route

- diversity in WACNet based on ESPAR antenna and 802.11b Ad hoc system,” European Microwave Week (EUMW’2004), pp.301-304, 2004.
- [7] Masahiro Watanabe, Shinsuke Tanaka, “Directional Beam MAC for Node Direction Measurement in Wireless Ad Hoc Network,” European Microwave Week (EUMW’2003), pp.155-158, 2003.
- [8] Masahiro Watanabe, Tadamasa Fukae, Yuuki Kawahara, Tasuku.Teshirogi, Akio Kato, Katsuji Sato, Masayuki Fujise, “A 60.5GHz Millimeter Wave Spread Spectrum Radar and Communication System Using a Co-use Antenna,” European Microwave Week (EUMW’2002), pp.941-944, 2002.
- [9] Masahiro Watanabe, Katsuzi Okazaki, Tadamasa Fukae, Akio Kato, Katsuji Sato, Masayuki Fujise, “A 60GHz mm-wave spread spectrum radar and several data in different situation,” IEEE Intelligent Vehicle Symposium (IVS’2002), vol. 1, pp.87-91, 2002.
- [10] Masahiro Watanabe, Katsuzi Okazaki, Tadamasa Fukae, Norihiro Tamiya, Naoki Ueda, Makoto Nagashima, “An obstacle sensing system for railway crossing application: A 60GHz mm-wave spread spectrum radar,” International Microwave Symposirm (IMS/MTT2002), pp.791-794, 2002.
- [11] Masahiro Watanabe, Shinsaku Noda, Katsuzi Okazaki, Tadamasa Fukae, Akihito Kato, Masayuki Fujise, “60GHz Millimeter wave spread spectrum radar for inter-vehicle communication” ITST2001, No.S7-5, pp.255-260, 2001

- [12] Masahiro Watanabe, Kenji Inomata, Shinsaku Noda, Katsuji Okazaki, Tadamasu Fukae, H. Yamabuchi, "A sideways-looking radar and its measuring principles," European Microwave Week (EuMW'2001) , pp.261-264, 2001

### 3. 著書

- [1] Masahiro Watanabe, Sadao Obana, Takashi Watanabe, "Ad hoc Networks Testbed using a Practice Smart Antenna with IEEE802.15.4 Wireless Modules", Chapter XXIII, pp.500-512, July 2008, IGI, ISBN: 978-1-59904-988-52008, Handbook on Advancements in Smart Antenna Technologies for Wireless Networks

### 4. 口頭発表

- [1] 渡辺正浩, 小花貞夫, 渡辺尚, "RSSI を用いてバックオフ制御を行う指向性MACプロトコルの提案" 電子情報通信学会技術報告, RCS2008-86, pp.199-204, 2008
- [2] 渡辺正浩, 小花貞夫, 渡辺尚, "RSSI を用いて QoS 制御を行う指向性メディアアクセス制御について" 情報処理学会, マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2008) シンポジウム, Vol.2008, No.8, pp.872-875, 2008
- [3] 坂本浩, 渡辺正浩, 萬代雅希, 小花貞夫, 渡辺尚, "S-UNAGI : スマート

アンテナを用いた階層型センサネットワークの実装” 情報処理学会, マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICO2008) シンポジウム 「野口賞」, Vol.2008, No.8, pp. 2020 - 2024, 2008

- [4] 河村直哉, 渡辺正浩, 萬代雅希, 小花貞夫, 渡辺尚, [技術展示] “UNAGI: スマートアンテナを用いるアドホックネットワークテストベッドの構築” 電子情報通信学会技術研究報告, MoMuC2007-93, pp.105-106, 2008
- [5] 河村直哉, 渡辺正浩, 萬代雅希, 小花貞夫, 渡辺尚, [技術展示] “UNAGI: スマートアンテナを用いるアドホックネットワークテストベッド” 電子情報通信学会技術研究報告, AN2007-41, pp. 43-46, 2007
- [6] 渡辺正浩, 小花貞夫, 渡辺尚, “スマートアンテナを用いた ZigBee 無線装置の構築とマルチホップ通信基本特性,” 電子情報通信学会技術研究報告, RCS2007-44, pp.89-84, 2007
- [7] 渡辺正浩, 河村直哉, 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の空間利用効率に関する実証的考察” 情報処理学会, マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICO2007) シンポジウム, Vol.2007, No.7, pp.639-648, 2007
- [8] 渡辺正浩, 三觜輝, 萬代雅希, 小花貞夫, 渡辺尚, “指向性MACを実装したTCP/IPインターフェースIEEE802.15.4/ZigBeeアドホック無線装置の構築” 情報処理学会, マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICO2007) シンポジウム 「野口賞」, Vol.2007, No.7, pp.1777-178, 2007
- [9] 三觜輝, 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

いる MAC プロトコルテストベッドについて” 電子情報通信学会技術研究報告, AN2007-13, pp.71-76, 2007

- [10] 三觜輝, 渡辺正浩, 萬代雅希, 小花貞夫, 渡辺尚, “アドホックネットワーク MAC プロトコルのテストベッドの構築とその評価について” 情報処理学会, 情報学ワークショップ 2006 (WiNF2006), pp. 60-64, 2006
- [11] 渡辺正浩, 湯素華, 門脇直人, 小花貞夫, “位置情報に基づきマルチパスフェージングを考慮した移動体向けアドホックルーティングの特性評価” 電子情報通信学会技術研究報告, RCS2006-86, pp. 163-168, 2006
- [12] 渡辺正浩, 萬代雅希, 小花貞夫, 渡辺尚, “ESPAR アンテナと Zigbee チップを組み合わせたアドホック無線装置の MAC プロトコル実験と考察,” 情報処理学会, マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2006) シンポジウム 「優秀論文賞」, Vol.2006, No.6, pp.569-572, 2006
- [13] 三觜輝, 渡辺正浩, 小花貞夫, 萬代雅希, 渡辺尚, “無線アドホックネットワークにおける MAC プロトコルのテストベッドについて” 情報処理学会, マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2006) シンポジウム, Vol.2006, No.6, pp.565-568, 2006
- [14] 岡田辰博, 渡辺正浩, 小花貞夫, 萬代雅希, 渡辺尚, “スマートアンテナを用いたアドホック MAC プロトコルの実装について” 情報処理学会全国大会, pp.3-433-3-434, 2006
- [15] 渡辺正浩, 湯素華, 三成琢也, 山口俊介, 門脇直人, 小花貞夫, 熊本和夫, 安川交二, “位置情報を用いたルーティング(AODV ベース)の実験” 電子情報通信学会技総合大会, B-21-46, 2006

- [16] 渡辺 正浩, 門脇 直人, 小花 貞夫, 藤瀬雅行, “アドホックルーティングプロトコルを用いた移動体におけるマルチホップ通信によるビデオストリーミングの実験評価” 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-21-005, 2005
- [17] 渡辺正浩, 門脇 直人, 小花貞夫, 藤瀬雅行, “マルチホップ通信による動画ストリーミングの実験評価”, 電子情報通信学会技術研究報告, IN2005-56, pp.161-166, 2005 年
- [18] 渡辺正浩, 岩井誠人, 小花貞夫, “周辺端末位置測定方法の提案と実験評価—複数の周波数における位相差に応じた端末間距離測定方法と実験評価—” 電子情報通信学会技術研究報告, RCS2005-23, pp.41-46, 2005
- [19] Suhua Tang, Bing Zhang, Masahiro Watanabe, Hisato Iwai, Sadao Obana, ” Avoiding asymmetric links and link breaks by using RSSI information” 電子情報通信学会技術研究報告, RCS2005-22, pp.35-40, 2005
- [20] Suhua TANG, Masahiro Watanabe, Hisato. Iwai, Makoto Yamashita, "Experiment of the LHA-AODV routing protocol", 電子情報通信学会総合大会, B-21-43, 2005
- [21] Suhua Tang, Bing Zhang, Masahiro Watanabe, Hisato Iwai, "LHA-AODV with Optimized Local Update", 電子情報通信学会総合大会, B-21-42, 2005
- [22] 渡辺正浩, 岩井誠人, 小花貞夫, “二周波の位相差を用いた端末間距離測定方式” , 電子情報通信学会総合大会, B-21-37, 2005

- [23] 渡辺正浩, 湯素華, 岩井誠人, 井川英哲, 熊本和夫, 安川交二, “アドホックルーティングプロトコルの屋外移動実験評価”, 電子情報通信学会総合大会, B-21-14, 2005
- [24] 渡辺正浩, 田中信介, 小宮山牧兒, 小花貞夫, 藤瀬雅行, “IEEE802.11g 無線 LAN をベースとして ESPAR アンテナと組み合わせた無線アドホックネットワーク実験装置(WACNet)”, 電子情報通信学会総合大会, B-21-2, 2005
- [25] 渡辺正浩, “ミリ波車車間通信とアドホックネットワークの応用” ミリ波技術のグローバルシステム応用とその展開, 電気学会ミリ波調査専門委員会「招待講演」, 2005
- [26] 渡辺正浩, 田中信介, 小宮山牧兒, 小花貞夫, 藤瀬雅行, “ITS 車車間通信におけるマルチホップ動画ストリーミングの実験評価”, 情報処理学会技術研究報告, ITS2004-20(6), 2005
- [27] 渡辺正浩, 田中信介, 小宮山牧兒, 小花貞夫, 藤瀬雅行, “IEEE802.11g 無線 LAN をベースとして ESPAR アンテナと組み合わせた無線アドホックネットワーク実験装置(WACNet)”, 電子情報通信学会技術研究報告, RCS2004-242, pp.37-42, 2005
- [28] 湯素華, 張兵, 渡辺正浩, 田中信介, “Link Heterogeneity を考慮したオンデマンド・ルーティング方式とその屋内実験評価 “電子情報通信学会技術研究報告, MoMuC2004-85, pp.43-48, 2004
- [29] Suhua Tang, Bing Zhang, Masahiro Watanabe, Shinsuke Tanaka, "A



Robust AODV using RSSI with local update", 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-5-124, 2004

- [30] 渡辺正浩, 湯素華, 田中信介, "受信信号強度を考慮したルーティングプロトコルの屋内実験評価", 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-5-125, 2004
- [31] 渡辺正浩, 湯素華, 田中信介, "受信信号強度を考慮したルーティングプロトコルの提案と屋内実験評価" 電子情報通信学会技術研究報告, RCS2004-130, pp.61-66, 2004
- [32] 渡辺正浩, "無線アドホックネットワークの研究と課題: WACNet 実験装置(11b アドホック)" アドホックネットワークコンソーシアム記念シンポジウム **「招待講演」**, pp.117-122, 2004
- [33] 渡辺正浩, 田中信介, "WACNet(11b アドホック)におけるルートダイバーシティの実験" 電子情報通信学会技術研究報告, MoMuC2004-16, pp.17-22, 2004
- [34] 渡辺正浩, 田中信介, 仲田周二, 熊本和夫, 安川交二, "WACNet(11b アドホック)におけるルートダイバーシティの実験", 電子情報通信学会総合大会, B-1-280, 2004
- [35] 渡辺正浩, 田中信介, 松田真知, 安川交二, "周辺端末方向推定の実験" 電子情報通信学会総合大会, B-1-279, 2004
- [36] 渡辺正浩, 田中信介, "WACNet(11b アドホック)における周辺端末方向推定方式によるオーバーヘッド低減効果", 電子情報通信学会総合大会,

B-1-278, 2004

- [37] 渡辺正浩, 田中信介, “WACNet( IEEE802.11b )による周辺端末の方向推定方式” 電子情報通信学会技術研究報告, MoMuC2003-69, pp.53-57, 2003
- [38] 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” 電子情報通信学会ソサイエティ大会, A-17-17, 2003
- [39] 渡辺正浩, “無線アドホックネットワーク”, 自動車技術会春季大会ヒューマトロニクスフォーラム 「招待講演」, pp.18-23, 2003
- [40] 渡辺正浩, 田中信介, “無線アドホックネットワークの指向性ビームMAC : 端末の方向測定の検討”, 電子情報通信学会総合大会, B-5-343, 2003
- [41] 渡辺正浩, 深江唯正, 川原祐紀, 手代木扶, 加藤明人, 佐藤勝善, 藤瀬雅行, “車車間通信におけるレーダと通信の融合装置－共用アンテナを用いたSSレーダと通信の融合－” 電子情報通信学会技術研究報告, ITS2002-5, pp.25-30, 2002
- [42] 渡辺正浩, 永縄浩, 秋山正躬, “周辺監視レーダ－車車間通信への適用－” 電子情報通信学会総合大会, A-17-47, 2001
- [43] 渡辺正浩, 森英貴, 深江唯正, 高原弘之, “レーダ測角処理の一例” 電子情報通信学会ソサイエティ大会, A-17-20, 2000