

スマートアンテナを用いたユビキタス通信の 実証的研究開発

渡辺正浩^{†,††} 渡辺尚^{††}

スマートアンテナを用いたアドホックネットワーク無線装置の開発において、無線機（物理層）や MAC (Medium Access Control) 及びルーティングに関する提案と設計を行い、これらの実証的評価について論じる。本論文での主な貢献は次の3つである。(1) 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と移動体環境におけるマルチホップ通信特性の実証、(2) IEEE802.15.4(ZigBee)とマイコンを用いた指向性 MAC プロトコルの実装手法と指向性 MAC 特性（空間分割多重効果、通信距離の延伸化）の実証、(3) 移動体ルーティングプロトコルに電波環境と位置の情報を用いる設計手法とフェージング環境下でのパケット到達率向上の実証。

Edifice for Highly Potential of Ubiquitous Wireless Communication Systems on Smart Antennas

MASAHIRO WATANABE^{†,††} TAKASHI WATANABE^{††}

In the development of Wireless Ad Hoc Network testbed on smart antennas, we propose the design technique for testbed as physical layer, MAC (Medium Access Control) and routing protocol, and explain the evaluation of experimental results. This paper shows most three contributions as follows. (1) Basic design process and structure for the cooperation between ESPAR (Electronically Steerable Parasitic Array Radiator) antenna and data transmission on IEEE802.11b/g WLAN, and the characteristics of multihop communications in the mobile environment. (2) Implementation of directional MAC protocol to micro computer for the operation of IEEE802.15.4(ZigBee) and the performances of directional MAC advantages (SDMA and Wider communication range) in the real field. (3) Routing protocol with its topology reflected upon metric via RSSI and node's distance on GPS which avoid to the relay nodes under multipath fading, and the improvement of packets delivery ratio with one mobile node passed away besides 10-node's situated stationary on the line.

1. はじめに

無線アドホックネットワークは、アクセスポイント等の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ため、所謂、端末間で、直接、電波が届かない場合にも、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。一般的に、アンテナのビーム形状は無指向性ビームが使用されるが、指向性ビームを想定すると、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るプロトコルの研究が必要とされている。また、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たシミュレーションによる評価はあるが、実際の無線装置で評価された例はない。本論文では、実環境での運用を視野に入れてテストベッドを開発し、実際のスマート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な評価について論ずる。

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。図 1-1 に、OSI: Open System Interconnection（ネットワークの階層構造）を用いて、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、スマートアンテナ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。

本論文の特徴である実証的研究開発において、スマートアンテナを用いた無線装置の構成を図 1-2 に示す。図中の WACNet 装置 (WACNet: Wireless Ad hoc Network Community) は、第 2 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[1]や第 4 章の移動体向けアドホックルーティング[2]において説明するものである。図中の UNAGI 装置 (UNAGI: Ubiquitous Network testbed with an Adaptively Gain-controlled antenna for Improvement of spatial and temporal efficiency) は、第 3 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[3] [4]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 (Electronically Steerable Parasitic Array Radiator) アンテナ[5]を用いている。次の第 2 章から第 4 章において、提案方式の設計と実証評価の一部を説明する。

[†] 三菱電機（株）先端技術総合研究所

Mitsubishi Electric Corporation Advanced technology R&D Center

^{††} 静岡大学創造科学技術大学院

Graduate school of Science and Technology, Shizuoka University

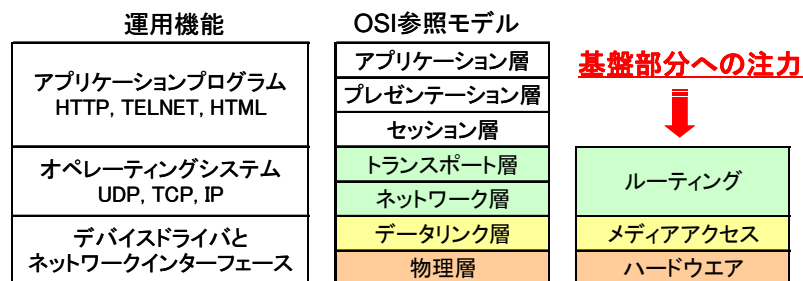


図 1-1 OSI 参照モデルと注力部分
Fig.1-1 Focus layer in OSI model

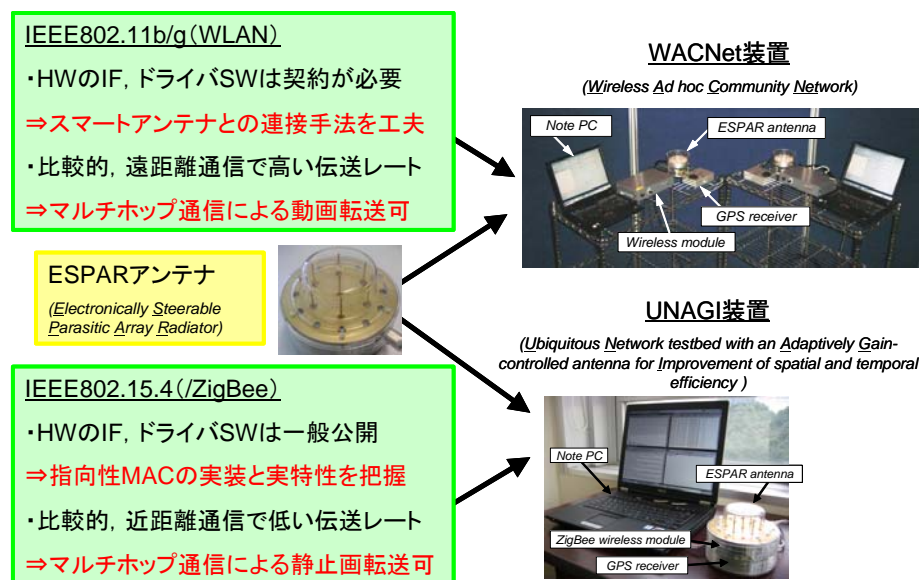


図 1-2 スマートアンテナを用いた通信装置の構成
Fig.1-2 Configuration of wireless ad hoc communication systems on smart antennas

2. スマートアンテナを用いた無線装置の構築と実証

2.1 関連研究

文献[6]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. 文献[7]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, 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.

2.2 基本構成

現行の無線LAN[8]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, 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, 制御部 (CPU カード) を設けて, アプリケーション側から無線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行う. また, 制御部は汎用性の高いEthernetで操作装置(ノートPC)と接続し, 操作装置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する. また, 各端末はAST (Angle SINR Table) 処理[9]により周辺端末に関する方向と受信信号強度の情報を得るものとする.

2.3 データ通信とビーム制御のタイミング調整

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 2.3-1 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. 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利用される.

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 2.3-2 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するようにする.

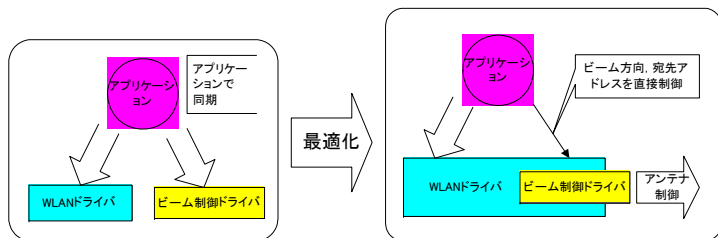


図 2.3-1 無線 LAN ドライバとアンテナ制御ドライバの融合
 Fig.2.3-1 Merging for Driver Software between WLAN and Beam Control

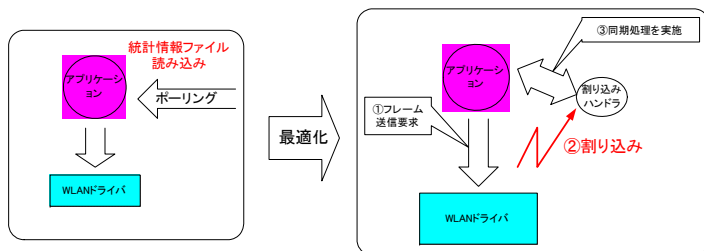


図 2.3-2 送信完了通知方式
 Fig.2.3-2 Notification of data transmission completed

2.4 MAC 透過処理

操作装置は制御部と 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。

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 2.4-1 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。

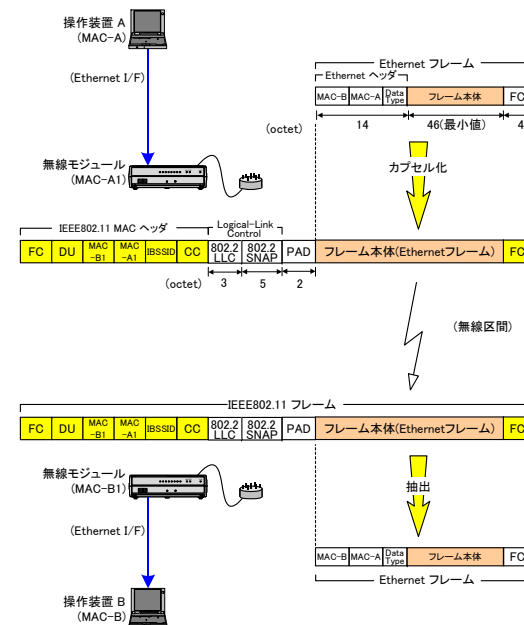


図 2.4-1 フレーム変換処理
 Fig.2.4-1 Frame converter

2.5 基本特性

第 2.3 節の最適化により、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る。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。

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、方向毎にこのよう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。

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1sec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の、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。

図2.5-1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実測結果を示す。図より、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、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。

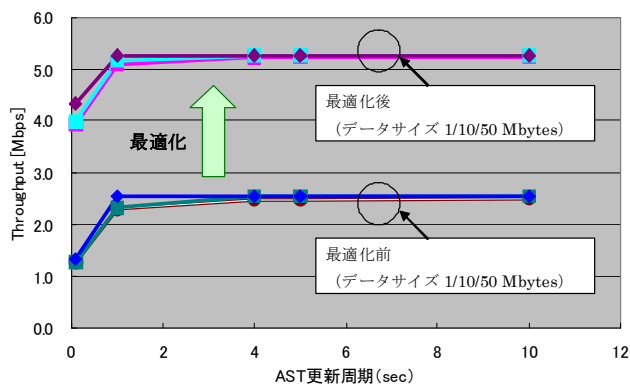


図 2.5-1 AST更新周期に対するスループット特性(最適化前後)
Fig.2.5-1 Throughput vs. AST cycle (Before/After Tuning)

3. 指向性 MAC プロトコルの実装と実証

3.1 テストベッド

任意の指向性 MAC プロトコルの実装を想定すると、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や、デバイスの入手性が良いことが必要である。IEEE502.15.4規格[10]のZigBeeチップ[11]は、国際標準規格として物理層やMAC層を規定しており、一般に公開されており、また、省電力で安価でもあることからこれを採用する。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とし、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(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)として提供するものとする。

3.2 空間分割多重効果

屋外(一般の公園)にて、図3.2-1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3.2-2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3.2-3に示す。図より、図3.2-1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3.2-4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。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、指向性及び無指向性の MAC 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でき、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。

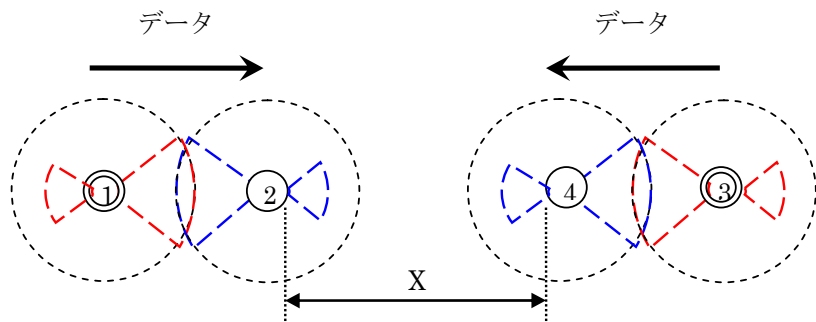


図 3.2-1 端末のレイアウト
Fig.3.2-1 Layout for 4 Nodes



図 3.2-2 実験シーン
Fig.3.2-2 Overview of experiment

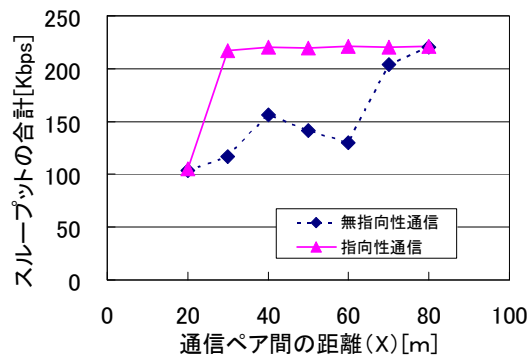
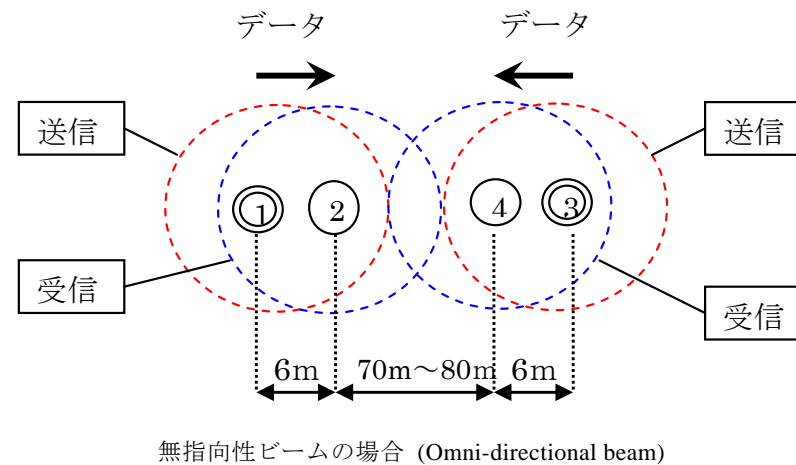
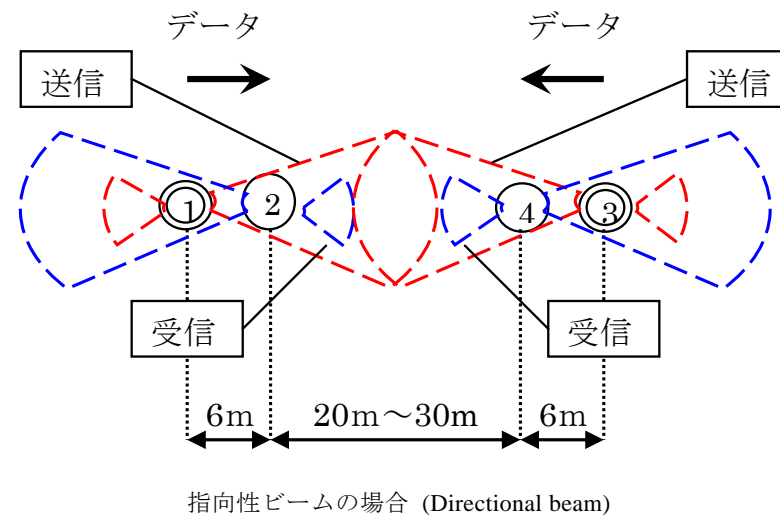


図 3.2-3 2組の通信ペアのスループット合計
Fig.3.2-3 Throughput vs. distance (X)



無指向性ビームの場合 (Omni-directional beam)



指向性ビームの場合 (Directional beam)

図 3.2-3 端末の位置関係と通信距離 (干渉距離)
Fig.3.2-3 Node location and communication distance (interference distance)

4. 移動体におけるルーティングプロトコルの提案と実証

4.1 関連研究

文献[12]~[14]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。また、文献[15]~[17]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設定するために、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。

4.2 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ながら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、ルートの設定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 **Rec. MP AODV** (**Recover MultiPath AODV**)を提案する。

4.3 運用構想

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。実験においては、送信先端末と送信元端末との相対距離を変化させて、例えば、離れて行く時において、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。

4.4 移動体特性

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 アンテナの実際のビームパターンを実装し、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。シミュレーションのトポロジーを図 4.4-1 に示す。

MANET (Mobile Ad Hoc Network) 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 **Rec. MP AODV** について、シミュレーション結果を図 4.4-2~図 4.4-5 に示す。

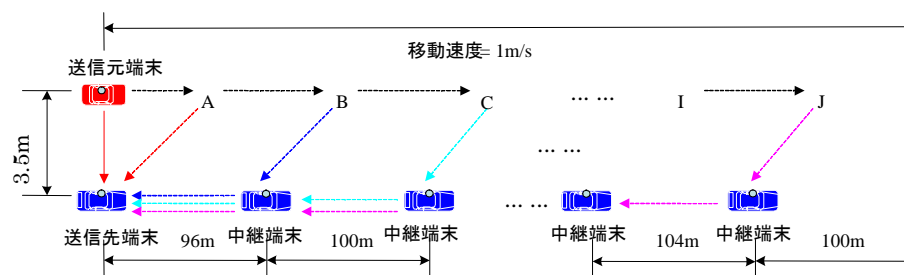


図 4.4-1 実験及びシミュレーションのトポロジー
Fig.4.4-1 Topology for experiment and simulation

この結果、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 **Rec. MP 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が得られた。

ここでの移動速度は 1m/sec としている。これは、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 秒に選定したためである。また、指向性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、指向性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、予測的な手法を考慮することも考えられる。

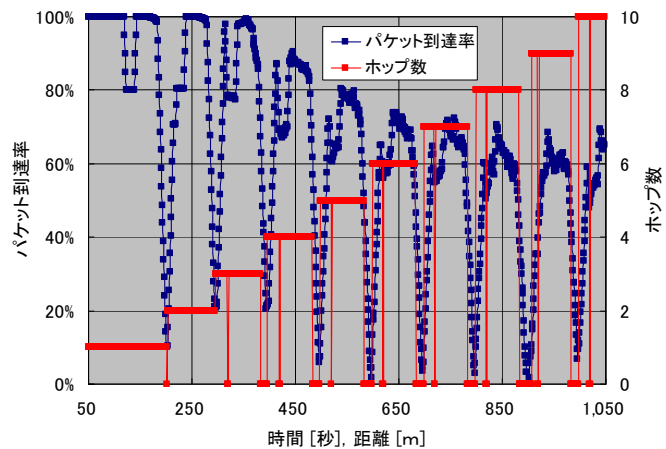


図 4.4-2 MANET AODV のパケット到達率とホップ[平均パケット到達率は 64.31%]
Fig.4.4-2 Packet delivery ratio and hop count (MANET AODV) [AVE = 64.31%]

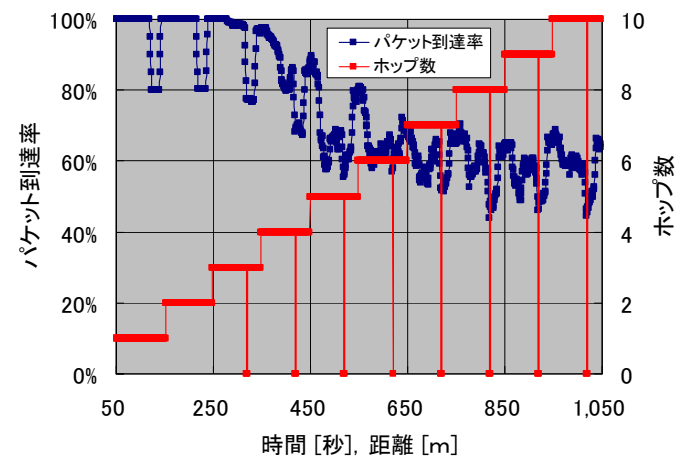


図 4.4-4 GPS AODV のパケット到達率とホップ[平均パケット到達率は 74.14%]
Fig.4.4-4 Packet delivery ratio and hop count (GPS AODV) [AVE = 74.14%]

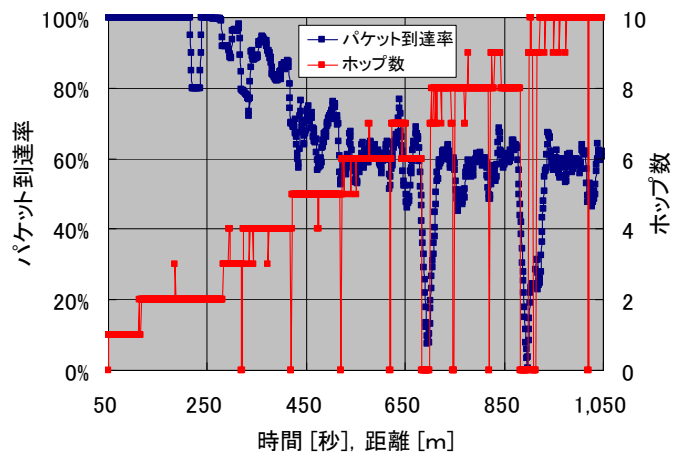


図 4.4-3 RSSI AODV のパケット到達率とホップ[全体のパケット到達率は 70.17%]
Fig.4.4-3 Packet delivery ratio and hop count (RSSI AODV) [AVE = 70.17%]

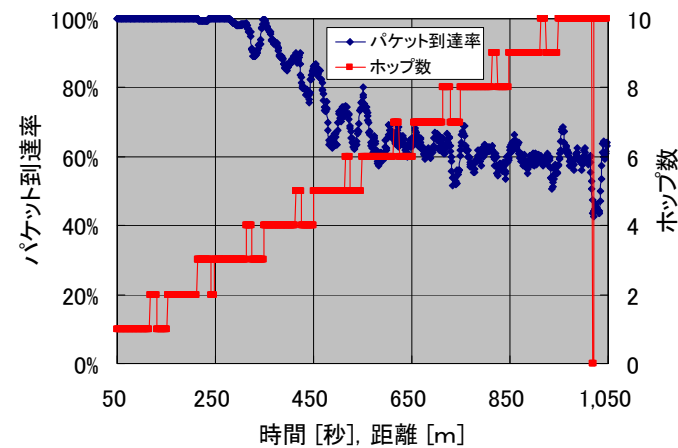


図 4.4-5 Rec. MP AODV のパケット到達率とホップ[平均パケット到達率は 75.39%]
Fig.4.4-5 Packet delivery ratio and hop count (Rec. MP AODV) [AVE = 75.39%]

5. おわりに

- (1) スマートアンテナとして ESPAR アンテナを用い、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するテストベッドの開発を行い以下の成果を得た。① 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の方向設定との連携動作を、アプリケーション側から制御する方法を提案し、スループットへの影響を低減させるための時間制御の方策を示した。② 指向性ビームを用いた周辺端末の方向探知方法を示し、これを担う無線端末は、Ethernet 接続された有線端末からのフレームを無線フレームのペイロードに埋め込む透過処理方法を提案し、無線区間を意識せずに直接データ通信が可能となる構成を示した。③ 実験にて基本特性の評価を行い、周辺端末の方向探知精度として標準偏差で 2° 、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) IEEE802.15.4(ZigBee)無線チップに任意の指向性 MAC (Medium Access Control) プロトコルの実装を可能とし、ESPAR アンテナと組み合わせたテストベッドの開発を行い以下の成果を得た。① 屋外でのマルチパスやフェージング環境の下で、テストベッド 4 台にて、比較的近距离(6m)での通信ペア 2 組を設け、一列に並べた時の通信ペア間の距離が、無指向性ビームの場合は 80m、指向性ビームの場合はバックローブでの干渉が起きる 20m まで接近させることができ、空間分割多重効果が 4 倍に向上することを示した。② テストベッド 3 台を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 以上で不可能でも、位置情報転送と指向性ビームの高利得により、指向性ビームどうしの場合には通信可能となることを示し、この時の電力制御値相当の 3.6 倍に通信距離が伸ばせることを示した。
- (3) 前述したテストベッドに、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。① GPS からの位置情報を元に端末間距離に応じてメトリック値を設定し、これをマルチホップ通信の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ながらマルチパスによるバースト的な信号強度の低下が起きる距離範囲ではイベント的にメトリック値を対応させてルートを変更させる方法を提案し、ルートを安定に切り替えながらパケット到達率を向上させるルーティング方式を示した。② 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 台の端末を追い越して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の発生を消滅させ、パケット到達率が平均で 64%から 75%以上に向上することを示した。

謝辞 本研究の一部は科研費基盤研究(A) [17200003]の助成を受けて行った。

参考文献

- 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, 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.
- 3) 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.
- 4) 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
- 5) 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).
- 6) R. Ramanathan, “Ad Hoc Networking With Directional Antennas: A Complete System Solution”, IEEE Journal in Communication, Vol.23, No.3, March 2005
- 7) 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
- 8) ANSI/IEEE Std 802.11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications (1999)
- 9) Masahiro Watanabe, Shinsuke Tanaka, “Directional Beam MAC for Node Direction Measurement in Wireless Ad hoc Network”, ECWT2003, pp155-158, Oct.2003
- 10) Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks, IEEE Std 802.15.4™-2003
- 11) “CC2420 data sheet”, <http://focus.ti.com/lit/ds/swrs041b/swrs041b.pdf> (2010.8.5 access)
- 12) 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
- 13) S.Basagni, I.Chlamatac, and V.R.Syrotiuk, “A distance routing effect algorithm for mobility (DREAM),” MobiCom '98, pp.76-84, 1998.
- 14) R.Morris, “A Scalable Location Service for Geographic Ad Hoc Routing”, MobiCom 2000, pp.120-130, 2000.Itoh, S. and Goto, N.: An Adaptive Noiseless Coding for Sources with Big Alphabet Size, Trans. IEICE, Vol.E74, No.9, pp.2495-2503 (1991).
- 15) B.Karp and H.T.Kung, GPSR: Greedy Perimeter Stateless Routing for Wireless Networks, MobiCom 2000, pp.243-254, 2000.
- 16) 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.
- 17) D.Niculescu and B.Nath, “Trajectory Based Forwarding and Its Applications”, MobiCom 2003, pp.260-272, 2003. Foley, J. D. et al.: Computer Graphics - Principles and Practice, System Programming Series, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, 2nd edition (1990).