

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

渡辺 正浩^{†1,†2} 小花 貞夫^{†1} 渡辺 尚^{†3}

無線アドホックネットワークの ITS 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 カードとノート PC を用いて実験が可能となってきた。このとき、通常の無線 LAN カードを使用すると、アンテナのビーム形状は無指向性ビームとなるが、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できる。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。そこで、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、このような設計における基本的な構成や方式を示す。本装置では、無線 LAN として IEEE802.11g、スマートアンテナとして ESPAR アンテナを用い、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° 、1 対 1 での実効スループットとして 9.5 Mbps (UDP) および 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示す。

Design and Evaluation for Ad Hoc Testbed Using a Practice Smart Antenna Based on Wireless LAN

MASAHIRO WATANABE,^{†1,†2} SADA OOBANA^{†1}
and TAKASHI WATANABE^{†3}

Wireless ad hoc networks, in the mobile application of ITS inter-vehicle communications, it is expected to keep safety in co-driving by sharing the information among unknown driver's cars in the highway, and to avoid the traffic accidents bumped into coming cars from invisible road sides at the road crossing area. Recently, we can execute the ad hoc network experiment with cheap and fluent WLAN cards and note PCs in the actual field. Recent studies on directional media access protocols (MACs) using smart antennas for wireless ad hoc networks have shown that directional MACs outperform against traditional omni-directional MACs. In this paper, we develop a testbed for directional MAC protocols, which incorporates an additional coordinator on application layer between ESPAR (Electronically Steerable Parasitic Array Radiator) as a practical smart antenna and data transmission on IEEE802.11g WLAN without the detail information due to a special contract to WLAN chip makers. We will explain its basic design process and structure and show the fundamental characteristics in the experiment about neighbor node's direction measurement result to be 2 degree of standard deviation, effective throughput to be (UDP = 9.5 Mbps/TCP = 5.2 Mbps) and 1.6 times extended communication distance compared with that of omni-omni communications.

1. はじめに

無線アドホックネットワークは、特定の固定インフラを必要とせずに、その場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、いわゆる、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

†1 株式会社国際電気通信基礎技術研究所 ATR 適応コミュニケーション研究所

ATR Adaptive Communications Research Laboratories

†2 三菱電機株式会社先端技術総合研究所

Advanced Technology R&D Center, Mitsubishi Electric Corporation

†3 静岡大学創造科学技術大学院

Graduate School of Science and Technology, Shizuoka University

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；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きた。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できる。

このとき、通常の無線 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できる。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^{1)~8)}。

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フェース等の詳細な情報が必要となるが、無線 LAN チップメ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でき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。

2 章では、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 11) 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、および、実験結果については

報告されていない。

3 章では、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 12) 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。

したがって、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。

2. テストベッド

2.1 基本構成

本テストベッドの基本的な構成を、図 1 に外観、図 2 にブロック図で示す。

スマートアンテナとして ESPAR アンテナを用い、2.4 GHz 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およ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、2.2 節で説明を行う。

無線モジュールには高速のデータ伝送が可能な IEEE802.11g 規格の無線 LAN カードをベースとし、

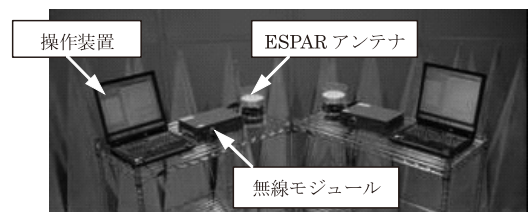


図 1 アドホック無線装置の外観
Fig. 1 Overview of ad hoc testbed.

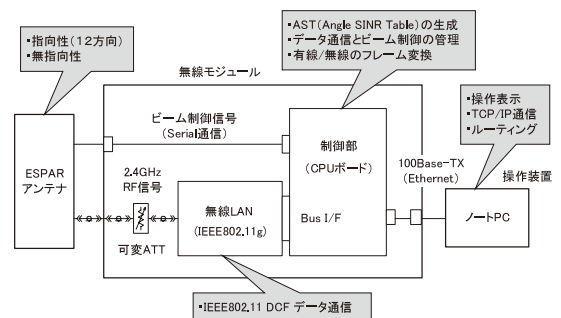


図 2 アドホック無線装置のブロック図
Fig. 2 Block diagram of ad hoc testbed.

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。2.3 節で、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できないことがある。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感知して指向性ビームを設定する方法を用いる。

文献 13), 14) では、各端末は一定周期ごと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。このとき、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、方位ごとの受信信号強度を計測して、この情報を返送する。したがって、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、この方向情報をもと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°) よりも詳細な方向を感知することができない。そこで、文献 15), 16) 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もとに、モノパルス測角処理により求める方法を用いる。2.4 節で、周辺端末の方向感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。このとき、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

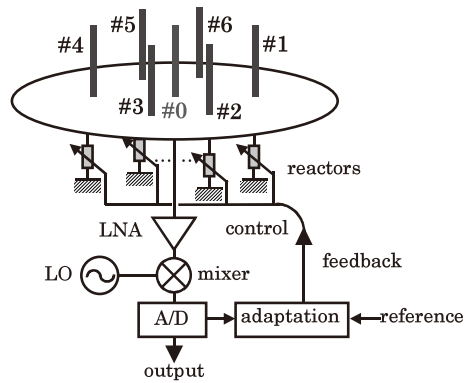


図 3 ESPAR アンテナの構造
Fig. 3 Structure of ESPAR antenna.

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ともなう処理時間をでき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できるようにする。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できる。2.5 節で、この MAC 透過処理について説明する。

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できるアンテナとして ESPAR アンテナを用いることとする。図 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 電圧で逆バイアスで印加し、それぞれの DC 電圧の値を制御することにより、各素子のバラクタのリアクタンス値を変化させ、アンテナのビーム形状として無指向性や指向性に制御可能

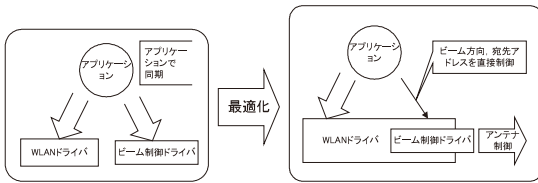


図 4 無線 LAN ドライバとアンテナ制御ドライバの融合

Fig. 4 Merging for driver software between WLAN and beam control.

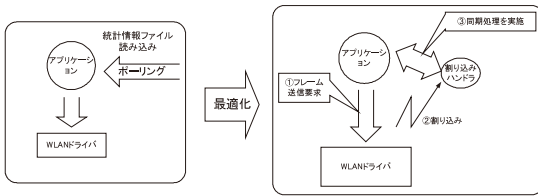


図 5 送信完了通知方式

Fig. 5 Notification of data transmission completed.

である。指向性のビームにおいては 30° ごとの 12 方向のうち任意の方向に設定することが可能である。

アンテナのビームを制御する装置としては、機械的にビームを切り替える方法があるが、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ふ。DBF (Digital Beam Forming) 方式では、各アンテナ素子の受信信号をすべて用いて最適な重み付け係数を低周波のデジタル回路で演算するため高速にビーム形成ができるが、アンテナ素子系統ごとに RF 受信機が必要となってしまう。これらを考慮すると、ESPAR アンテナは、給電素子が 1 系統で構成が簡素であり、電気部品はバラクタダ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いう特徴がある。

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できるだけ低減させるため、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

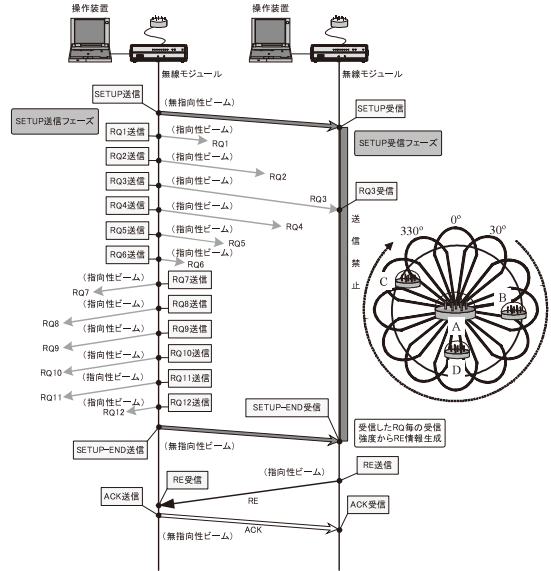


図 6 AST 作成手順

Fig. 6 AST creation Protocol.

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述べる。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こと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、割込み処理で、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できるだけ短くなるようにする。

2.4 周辺端末の方向探知

図 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ごと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) および図 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。

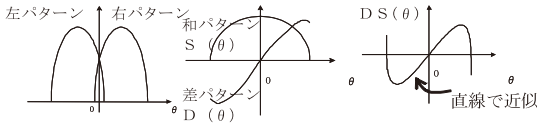


図 7 Monopulse processing. Sequential lobbing monopulse processing.

表 1 AST 情報例 (端末 D)
Table 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

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

$$\sigma = \frac{\theta_s}{k \cdot \sqrt{SNR \cdot n}} \quad (2)$$

θ_s : とパターンの幅, $DS(\theta) = D(\theta)/S(\theta)$,

k : 傾き,

σ : 標準偏差,

SNR : 受信信号レベル,

n : 観測回数

したがって、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）。このとき、Set up 信号を受信すると、続いて受信した RQ 信号をもとに 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 情報をもとに目的端末へ指向性ビームを向けて送信する。ACK 信号が確認できなければ 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、さら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、たとえば、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できるようになる。具体的な例を付録に示す。

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

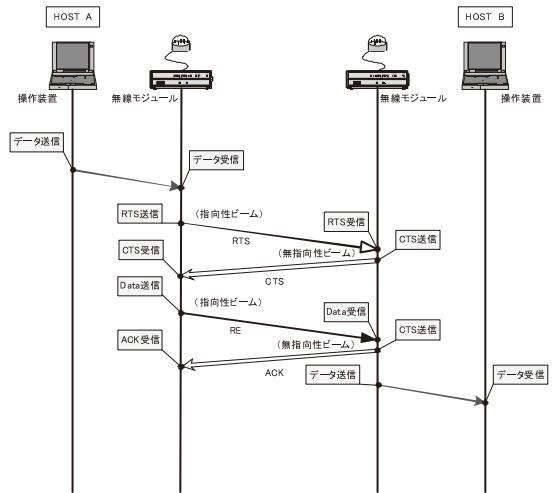


図 8 データの流れ
Fig. 8 Data flow sequence.

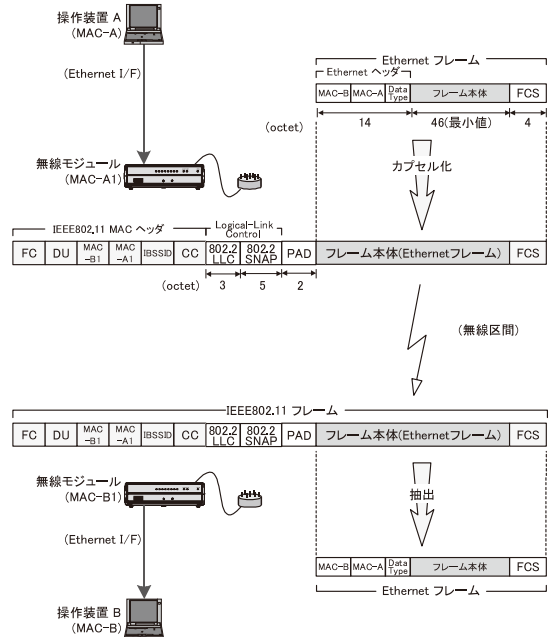


図 9 フレーム変換処理
Fig. 9 Frame converter.

理) を MAC 透過処理と呼ぶ。図 8 および図 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 アドレスの対応をあらかじめ記録した 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。ただし、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、自端末で処理する。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。

3. 基本特性

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あたり、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、送信応答処理およ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、および 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% に低減されていると考えられる。

送信応答処理の最適化は、送信するすべ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。たとえば、周辺端末の方向探知を行う際には、指向性ビームを 30° ごとの 12 方向に走査させる処理が含まれることから、方向ごと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なしの条件下で、最適化前の 48.8 msec/回から最適化後は 16.5 msec/回へと、約 34% へ低減させることができる。

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、すべ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、たとえば、AST 更新周期を 1 sec とし、伝送速度を 54 Mbits/sec 固定とし、50 Mbytes 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なしの条件下で、最適化

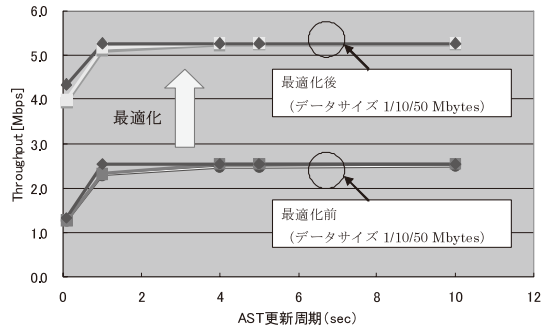
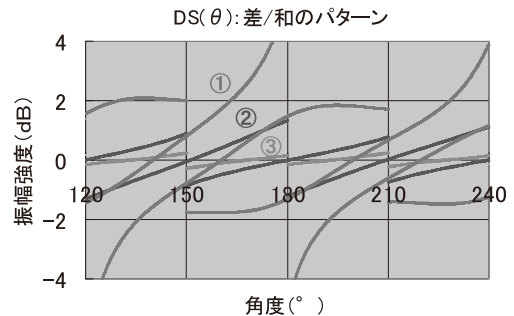


図 10 AST 更新周期に対するスループット特性 (最適化前後)
Fig. 10 Throughput vs. AST cycle (before/after tuning).



① 二つ飛ばし (90°), ② 一つ飛ばし (60°), ③ 隣どうし (30°)

図 11 $DS(\theta)$: 差/和のパターン特性

Fig. 11 $DS(\theta)$: pattern characteristics.

前の 2.3 Mbits/sec から最適化後は 5.2 Mbits/sec へと、約 2.3 倍に向上させることができる。

図 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 1 sec 以下となると、スループットに影響があることが分かる。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ないのは、1 フレームごとに MAC 透過処理の変換処理にともな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。

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合せとして、図 6 における、隣どうし (30°)/1 つ飛ばし (60°)/2 つ飛ばし (90°) を想定する。2 つ飛ばし (90°) の場合で、ほぼ電力 3 dB 幅の組合せとなる。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 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 σ (標準偏差) は小さくなる。しかし、指向性ビーム間角度が、2 つ飛ばし (90°) のほぼ電力 3 dB 幅の組合せより大きくなると SNR が低下し

表 2 測角の標準偏差

Table 2 Standard deviation (σ) between calculated and measured.

ビーム組み合わせ	σ (算出値)	σ (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°

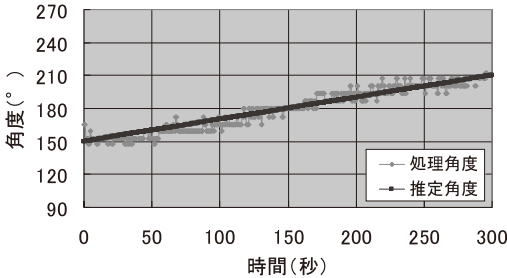


図 12 移動端末に対する測角処理結果

Fig. 12 Angle measurement result for mobile node.

て σ の値が劣化してしまう。また、電力 3 dB 幅の組合せの場合でも、サイドロープの影響を受けて 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。

電波暗室で、相手端末を設置して固定した場合の、式 (2) による σ (標準偏差) の算出値と実測による値の比較を表 2 に示す。算出の際、SNR は ADC が 6 bit なので 22 dB 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、電波暗室で、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 12 に示すように“2 つ飛ばし (90°)”における処理角度の σ 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“2 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、組合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 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実測した結果を示す。図中より 1 対 1 の通信で干渉端末台数

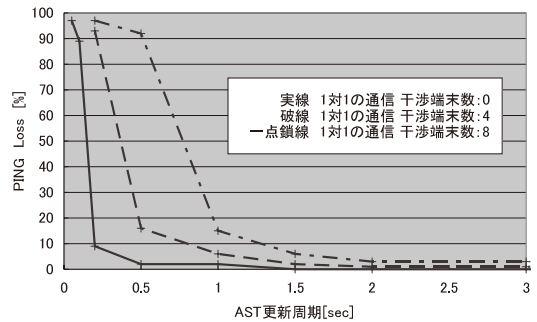


図 13 AST 更新周期と干渉端末数と与える ping エラーの関係 Fig. 13 Ping error rate vs. AST cycle related to interference node's.

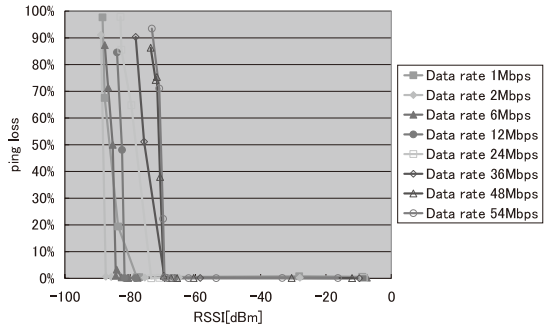


図 14 伝送速度ごとの受信感度

Fig. 14 Minimum received signal level (ping).

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分かる。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 更新周期をさら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。

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 コマンドを用いたときのエラーレートを計測した結果を図 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 (1 Mbps) では約 -90 dBm、最も高速レート (54 Mbps) では約 -70 dBm 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 2,330 m となる。一方、最も高速レートでは最小受信感度が 20 dB 上昇するので、最大通信距離は 233 m となるが、高速変復調の場合は送信側アンプをでき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。

表 3 回線設計例

Table 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λ=c/f (c:光速)
Pt	送信電力	78	dBm	無線LANシールド出力最大値(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)
PGr	実効輻射電力	19.8	dBm	
Rmax	最大通信距離	2370	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

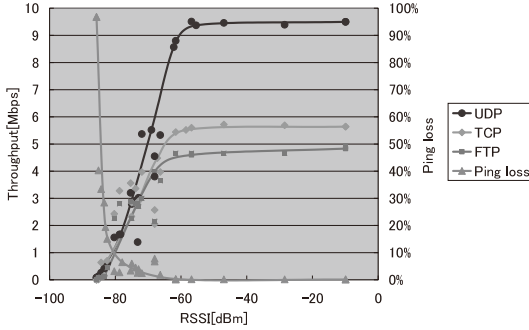


図 15 総合通信特性 (適応変調)

Fig. 15 Adaptive data transmission characteristics.

$$R_{max}^2 = \frac{Pt Gt Gr \lambda^2 Lt Lr}{(4\pi)^2 S_{min}} \quad (3)$$

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 4 dB (= 6 dBi - 2 dBi) 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 1,470 m、最も高速レートでは 147 m 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 20 dB の違いがあり、いわゆる、グレーゾーンとなる通信距離は最大で 10 倍にもなることが分かる。適応変調時の UDP と TCP のスループットおよび ping によるエラーレートの総合通信特性を図 15 に、伝送速度を固定したときの UDP と TCP のスループットを図 16 と図 17 に示す。

実験結果により、UDP で約 9.5 Mbps、TCP で 5.8 Mbps 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、さら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

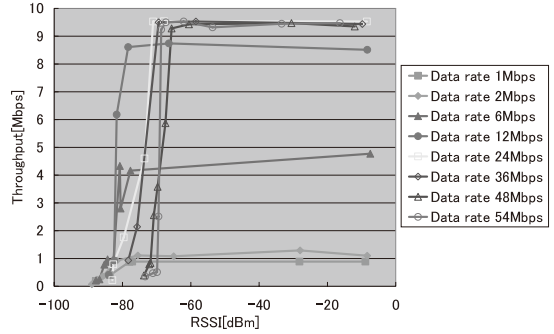


図 16 UDP 通信特性 (伝送速度固定)

Fig. 16 UDP data transmission characteristics (Fixed data rate).

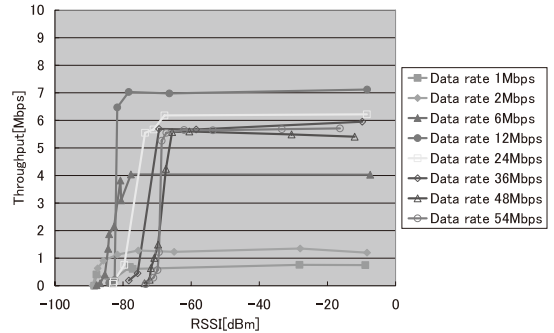


図 17 TCP 通信特性 (伝送速度固定)

Fig. 17 TCP data transmission characteristics (Fixed data rate).

過処理を行って無線 LAN から送信するにあたり、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、さらにスループットを向上させることが可能と考える。

3.4 ストリーミング

本テストベッドとカメラおよび画像処理用コーデック¹⁷⁾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み合わせるにより、移動局で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で映像を表示することができる。実験の構成を図 18 に示す。たとえば、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できる。

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 50 kbps 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

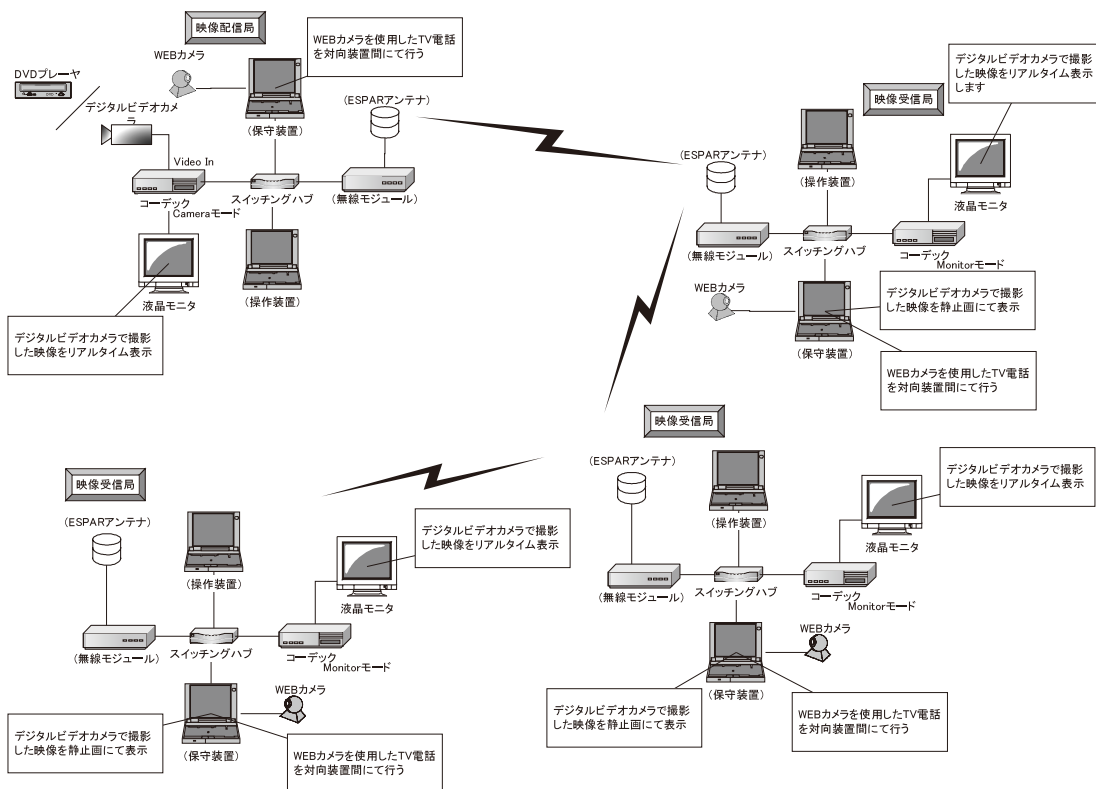


図 18 ストリーミング構成図

Fig. 18 Block diagram for ad hoc streaming.

- (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

なお、(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の設定はないが、コーデックと保守装置のGatewayは操作装置となる。したがって、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、およ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、および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と他のグループの構成を認識することができる。また、自分のグループの構成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ルートで、pingによるエラーレートや遅延時間およびUDP、TCPのスループットを1回あたり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、中継端末および表示端末は静止状態とした。各端末間距離は、静止および移動の状態では約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19、図20、図21に示す。UDPではTCPと異なり再送制御がなく、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やすい。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ときに、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

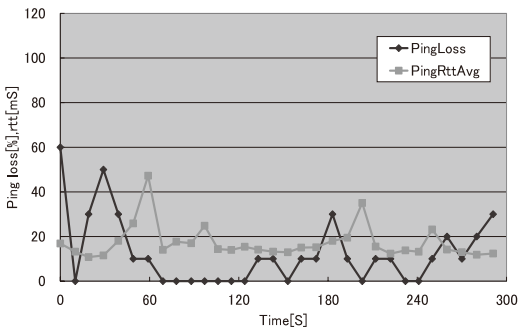


図 19 Ping Loss and RTT (適応変調)

Fig. 19 Ping loss and RTT (Adaptive data rate).

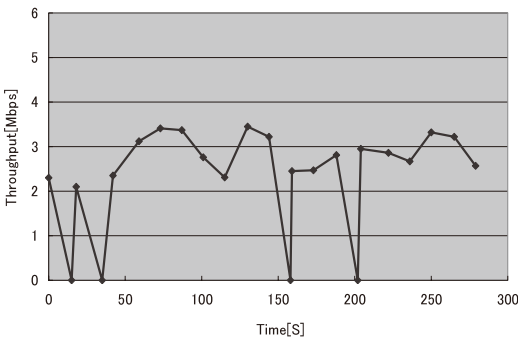


図 20 UDP Throughput (適応変調)

Fig. 20 UDP throughput (Adaptive data rate).

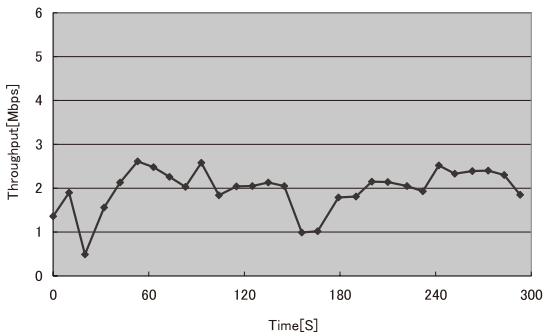


図 21 TCP Throughput (適応変調)

Fig. 21 TCP throughput (Adaptive data rate).

比較的良く、動的なルーティングプロトコルでは直接通信に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 2.9 Mbps (ave), TCP で約 1.8 Mbps (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、ほぼ整合がとれた値と考えられる。

また、関連研究として、文献 12) 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 5 Mbps 近い値、5 台 4 ホップのスタティックルートで最大 1.2 Mbps、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 420 Kbps 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 11 Mbps 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。ただし、遅延時間は少なく応答性に優れている。TCP ではほとん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 では再送制御でうまくいかなかったとき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 と比較的小さく、目的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。

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。開発にあたり、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でき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、複数の構成部品を 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°, 1 対 1 での実効スループットとして 9.5 Mbps (UDP) および 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で動画のストリーミング伝送を可能とした。たとえば 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できる。

今後、さら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ともに、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。

謝辞 研究遂行に際しご指導いただいた元 ATR 適応コミュニケーション研究所小宮山牧児所長、ならびに有益な助言をいただいた元 ATR 適応コミュニケーション研究所田中信介室長に深謝します。本研究は科研費基盤研究 A (17200003) の助成を受けて行った。

参 考 文 献

- 1) Ko, Y.-B., Shankarkumar, V. and Vaidya, N.H.: Medium Access Control Protocols Using Directional Antennas in Ad Hoc Networks, *Proc. IEEE INFOCOM*, pp.13–21 (Mar. 2000).
- 2) Choudhury, R.R., Yang, X., Ramanathan, R. and Vaidya, N.H.: Using Directional Antennas for Medium Access Control in Ad Hoc Networks, *Proc. ACM Mobile Computing and Network (MobiCom)*, pp.59–70 (Sep. 2002).
- 3) Fahmy, N.S., Todd, T.D. and Kezys, V.: Ad Hoc Networks with Smart Antennas using IEEE 802.11-Based Protocols, *Proc. IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pp.3144–3148 (Apr. 2002).
- 4) Nasipuri, A., Li, K. and Sappidi, U.R.: Power Consumption and Throughput in Mobile Ad Hoc Networks using Directional Antennas, *Proc. IEEE International Conference on Computer Communications and Networking (ICCCN)*, pp.620–626 (Oct. 2002).
- 5) Takai, M., Martin, J., Ren, A. and Bagrodia, R.: Directional Virtual Carrier Sensing for Directional Antennas in Mobile Ad Hoc Networks, *Proc. ACM Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MOBIHOC)*, pp.183–193 (June 2002).
- 6) Ramanathan, R.: On the Performance of Ad Hoc Networks with Beamforming Antennas, *Proc. ACM Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MOBIHOC)*, pp.95–105 (Oct. 2001).
- 7) Korakis, T., Jakllari, G. and Tassioulas, L.: A MAC protocol for full exploitation of Directional Antennas in Ad-hoc Wireless Networks, *Proc. ACM Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MOBIHOC)*, pp.98–107 (June 2003).
- 8) Bandyopadhyay, S., Hasuike, K., Horisawa, S. and Tawara, S.: An Adaptive MAC Protocol for Wireless Ad Hoc Community Network (WACNet) Using Electronically Steerable Passive Array Radiator Antenna, *Proc. IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, pp.2896–2900 (Nov. 2001).
- 9) ANSI/IEEE Std 802.11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications (1999).
- 10) 大平 孝: エスパアンテナの動作原理とシステム応用, *信学誌*, Vol.87, No.12, pp.1061–1064 (2004).
- 11) Ramanathan, R.: Ad Hoc Networking With Directional Antennas: A Complete System Solution, *IEEE Journal in Communication*, Vol.23, No.3 (2005).
- 12) Nishida, T., Eguchi, K., Okamoto, Y., Warabino, T., Ohseki, T., Fukuhara, T., Saito, K. and Sugiyama, K.: Multi-Hop Vehicle-to-Vehicle Communication, *ITST2005*, pp.163–166 (June 2005).
- 13) 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, *信学総大会*, B-5-109 (Mar. 2000).
- 14) 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, *信学ソ大会*, SB-3-1 (Sep. 2000).
- 15) Watanabe, M. and Tanaka, S.: Directional Beam MAC for Node Direction Measurement in Wireless Ad hoc Network, *ECWT2003*, pp.155–158 (Oct. 2003).
- 16) 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, *信学技報*, MoMuC2003-69 (Nov. 2003).
- 17) Network Codec DM-NC40 VICTOR Company of Japan.

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, 1 辺の長さに相当する距離が変わっても, すべての内角が 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できるようになる。各端末のレイアウト関係を図 22 に示す。

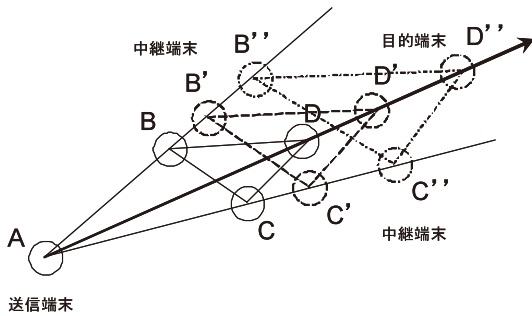


図 22 各端末のレイアウト関係
Fig. 22 Layout for four node's.

(平成 19 年 4 月 2 日受付)

(平成 19 年 10 月 2 日採録)



渡辺 正浩

1982 年京都工芸繊維大学工学部電子工学科卒業。同年三菱電機(株)入社。レーダ装置および車車間通信装置の研究・開発に従事。2002 年(株)国際電気通信基礎技術研究所(ATR)適応コミュニケーション研究所出向。2006 年三菱電機(株)復職。現在、同社先端技術総合研究所勤務。2006 年より ATR 客員研究員。DICOMO2006 優秀論文賞。DICOMO2007 野口賞。アドホックネットワークおよびセンサ情報処理システムに関する研究に従事。電子情報通信学会会員。



小花 貞夫(フェロー)

1976 年慶應義塾大学工学部電気工学科卒業。1978 年同大学院修士課程修了。同年国際電信電話(株)(現、KDDI(株))入社。パケット交換方式、ネットワークアーキテクチャ、OSI プロトコル実装、データベース、ビデオテクニクス、分散処理、ネットワーク管理、ITS の研究・開発に従事。2004 年(株)国際電気通信基礎技術研究所(ATR)執行役員、適応コミュニケーション研究所所長、アドホックネットワーク、ITS、センサネットワークの研究・開発に従事。工学博士。2001 年文部科学大臣賞(研究功績者)、本会フェロー、電子情報通信学会会員。



渡辺 尚(正会員)

1982 年大阪大学工学部通信工学科卒業。1984 年同大学院博士前期課程修了。1987 年同大学院博士後期課程修了。工学博士。同年徳島大学工学部情報工学科助手。1990 年静岡大学工学部情報知識工学科助教授。1996 年静岡大学情報学部情報科学科教授。現在、静岡大学創造科学技術大学院教授。静岡大学情報学部情報科学科教授兼任。1995 年文部省在外研究員(カリフォルニア大学アーバイン校)。計算機ネットワーク、分散システム、アドホックネットワーク、センサネットワークに関する研究等に従事。2005 年情報処理学会モバイルコンピューティングとユビキタス通信研究会主査。訳書『計算機設計技法』、『802.11 無線ネットワーク管理』等。IEEE、電子情報通信学会各会員。