

TR-AC-0044

013

WACNetにおける動的セグメンテーションと
メディアアクセス制御、ルーチングに関する
研究報告

大野 雄一郎

2000. 3.31

ATR環境適応通信研究所

目次

概要	1
1. はじめに	1
2. ベクトル演算によるダイナミックセグメンテーション	3
2. 1 研究の背景	3
2. 2 ネットワークモデル	4
2. 3 ベクトルの定義と内積	4
2. 4 TDVS アルゴリズム	4
2. 5 シミュレーション	4
2. 6 まとめ	7
3. デマンドアサイン CDMA-TDMA	8
3. 1 研究の背景	8
3. 2 システムモデル	8
3. 3 送信チャネル割り当てアルゴリズム	9
3. 4 ランダム割り当て方式の近似解析	9
3. 5 シミュレーション	10
3. 6 まとめ	11
4. アンテナ走査角対 SINR 情報に基づくルーチング方式	13
4. 1 研究の背景	13
4. 2 ATR 方式の概要	13
4. 3 ルーチングアルゴリズム	14
4. 4 ATR 方式の利点	14
4. 5 まとめ	16
5. おわりに	16
参考文献	17
付録A. ベクトルの内積と TDVS ベクトルの要素について	18
A. 1 ベクトルの内積の計算	18
A. 2 TDVS ベクトルの内積計算	18
付録B. ランダム割り当てデマンドアサイン CDMA-TDMA におけるスループット近似式 の導出	19

概要

一時的に特定地域集まった人々の通信を無線でサポートする“ワイヤレスアドホックネットワーク”では、基本的にピアツーピアで通信をおこなうため、基地局等インフラへの投資が不要であるばかりか、ユーザ数やトラフィックなどの通信環境に対するスケーラビリティも格段に良くなり、またユーザにとっては、公衆網を利用しないため通信コストがかからない、といった利点もある。

ところがワイヤレスアドホックネットワークでは、通信環境がダイナミックに変化するため、ネットワーク自体に、それらの変化に適応していく機能が必要となる。本報告書では、ネットワークが持つべき適応的な機能のうち、ネットワークセグメンテーション、適応型メディアアクセスコントロール及びルーティングの各手法について提案、検討し、計算機シミュレーション等をおこなったので報告する。また、これらの手法により、ネットワークリソースが有効利用できることを示す。

1. はじめに

近年の、携帯電話やPHS等の移動電話の普及は、その契約台数が一般の加入者電話を上回るところまできた。また、ノートPCなどの情報端末の小型化/軽量化の進展により、アクセス系に携帯電話等の無線通信を用いてネットワークへ接続することへの需要が高まって来ている。それどころか、今や携帯電話/PHSそのもので電子メールやブラウザ、各種チケット予約等のアプリケーションを利用でき、データ系トラフィックが音声系トラフィックを追い抜くのは時間の問題と見られている。また2001年には、第3世代の移動通信網としてIMT2000のサービス開始が予定されている[1,2]。ところがこのような公衆網を用いた無線アクセスには、

- ・トラフィックやユーザ数等に対するスケーラビリティが、無線基地局や交換機などのインフラストラクチャに制限される
- ・通信環境のダイナミックな変動に適応できない
- ・通信コストが高い
- ・伝送速度が低い

といった問題点がある。

一方、ネットワーク設計の視点から見た場合、従来の音声トラフィックのための電話網に対しては、

- (1) トラフィック測定
- (2) 需要予測
- (3) 保証品質の決定
- (4) ネットワーク設計

といった手順でおこなわれていた。ところがインターネットのような分散型コンピュータネットワークの場合、利用者が爆発的に増え続けていることや、それが成立した歴史的、技術的な経緯もあって、基本的にはベストエフォート型のサービスとなり、電話網の時の

ようなネットワーク設計/制御技術を用いることができない[35]。

そこで、これらの問題点を解決するため、インフラを必要とせず、一時的にある特定地域内に集まった人々の通信を、ユーザ端末だけを用いて無線でサポートするアドホックネットワークの研究がさかんにおこなわれている[4-6]。一般的にネットワークにおいて人と人との通信が成立するためには、その集団内において、

- ・仕事関係や友人関係といった人間関係が成立している
- ・同窓生や同郷であるといった共通基盤が存在している
- ・共通の趣味や話題、目的を持っている

といったような社会的な共通意識が必要である。そのため通信の世界においても“コミュニティ”(共同体)の概念が成立し得る[3]。アドホックネットワークにおいては、上記のうち、

- ・コンベンションセンタに集まった見物客
- ・国際会議の出席者
- ・スポーツスタジアムの観客
- ・バスや電車の乗客
- ・自然災害の被災地での、被災者や救助者、ボランティア

などをユーザとして想定している。このような使用形態においては、ネットワークに対して

- ・アクセス系に無線を用いること
- ・無線基地局、ルータ等のインフラが不要であること
- ・ユーザ端末だけでネットワークが構築できること
- ・ユーザ数のダイナミックな増減や、地理的な偏りに適応できること
- ・トラフィックのダイナミックな増減や地理的な偏りに適応できること

といった条件が求められる。

そこで我々は、コミュニティにおける通信をサポートするネットワークとして、従来の固定的な網設計技術によらず、通信環境のダイナミックな変動に、トポロジを動的に変化させつつ自律的に適応していくことのできる、WACNet (Wireless Ad-Hoc Community Network) を提案している[7-10]。WACNetにおいては、従来のクライアント/サーバのような階層構造は持たず、ユーザ端末同士のピアツーピア通信を基本とする。

ところで近年、多数のユーザを収容するためのワイヤレス多重アクセス方式としてSDMA (Space Division Multiple Access) が注目を集めている[36-37]。SDMAは、同一ネットワーク内の複数のユーザに同一の無線チャネルを割り当て、受信ユーザ側で干渉波の影響を除去し希望信号のみを取り出すことにより通信をおこなう方式であり、周波数的、あるいは時間的制約が大きかった従来の多重アクセス方式に比べ、周波数リソースの有効利用が期待できる方式として注目されている (図1)。

WACNetにおいては、SDMAの一方式として、通信環境のダイナミックな変動に適応するためのアーキテクチャである“ダイナミックセグメンテーション”を導入する。(図2)[13-16]。ダイナミックセグメンテーションでは、トラヒックの増加やネットワークの地理的拡大などによりスループットが低下したネットワー

クを複数の“セグメント”と呼ばれる単位に分割する。これによりセグメントあたりのユーザ数やトラヒックを減少させ、他セグメントからの干渉波の影響を緩和することができる。各セグメントの物理的/論理的形態は通信環境の変動に合わせてダイナミックに変化し、また、ネットワークの管理/制御をそのセグメント単位でおこなう。これにより、ネットワーク全体からみれば、通信環境への柔軟かつロバスタな適応性とネットワーク設計/管理の簡易化が同時に実現できる。

このような適応的な機能を備えることにより、有限のネットワークリソースを有効利用することが可能となる。ところがWACNetでは、そのネットワークの性質上、従来のルーチング技術やメディアアクセスコントロールを適用することができない。また、より多数のユーザを収容し、その無線通信路を確保するためには、メインビームやヌルの方向を制御できる可変ビームアンテナの、小型化/軽量化の実現も望まれる。

我々は、WACNetの基本アーキテクチャである“ダイナミックセグメンテーション”の効率化とともに、WACNetに適用できるメディアアクセスコントロールや適応ルーチング、アダプティブアンテナの研究を進めている[7-34]。本報告ではこれらWACNetにおける所要機能のうち、2章でベクトル演算を用いたダイナミックセグメンテーションについて説明し、適応的なメディアアクセスコントロールであるデマンドアサイ

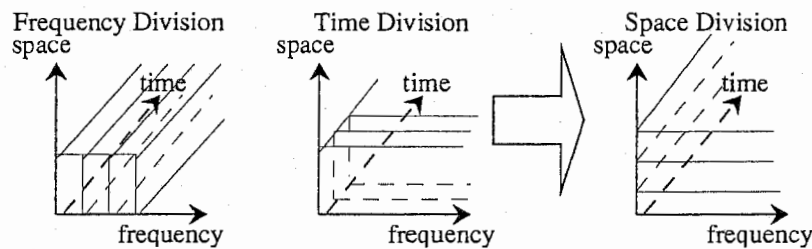


図1 SDMAと従来のマルチプルアクセス (FDMA、TDMA) との違い

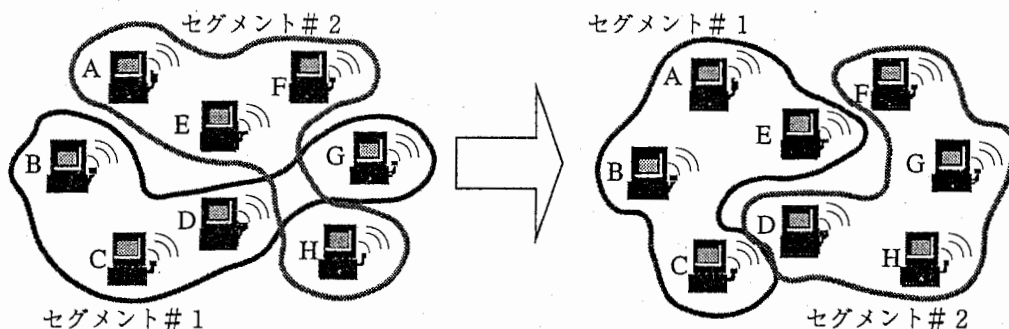


図2 WACNetにおけるダイナミックセグメンテーションの様子

ンCDMA-TDMAについて3章で述べる。また、4章で、指向性のある可変ビームアンテナをユーザ端末に用いたルーチング方式を提案し、5章でまとめを述べる。

2. ベクトル演算によるダイナミックセグメンテーション

2. 1 研究の背景

セグメンテーションアルゴリズムは従来から、各ユーザ間のトラヒックのみに着目し、ユーザを頂点、各ユーザ間のトラヒック量を辺の数で表現したグラフ分割問題として扱われてきた。トラヒックの多いユーザのペアを同じセグメントに収容し、セグメントをまたがるトラヒック(クロストラヒック)を小さくすることで、最適なセグメンテーションが実現できる、という考え方である(図3)。そのセグメンテーションアルゴリズムとしては、Minimum-Cut法[38]やそれを改良したEnhanced Pairing Minimum-Cut法[14-15]のようなヒューリスティックな手法から、遺伝的アルゴリズムを用いるもの[14-15]まで様々提案されてきた。ところがこの問題をワイヤレスネットワークに対して適用する場合、雑音や干渉波、遠近問題に適応できる手法が必要となる。また、通信環境のダイナミックな変動に追随するためには、少ない計算時間で高いスループットが実現できる手法を採用すべきであるが、グラフ分割問題はNP完全であることが知られており[9]、従来手法では短時間で解を探索することができなかった。ところが、WACNetでは通信環境がダイナミックに変動するため、セグメンテーションにおいては必ずしも最適解を求める必要はなく、むしろ、通信環境に素早く適応できる計算時間の短い手法が必要となる。

そこで本章では、グラフの辺として、ユーザ間のトラヒック量だけでなく、ユーザ間の物理的な距離の情報を取り入れ、それらの情報を要素として持つベクトルを各ユーザ端末ごとに作り、ユーザのペアごとにそのベクトルを用いて内積を計算し、その内積値に基づいてセグメンテーションをおこなう方式、TDVS (Traffic and Distance oriented Vector-based Segmentation)を提案し、計算機シミュレーションによりその性能を評価する。TDVSによれば、周波数の有効利用や送信電力の省電力化が達成できる。また、ベクトルの内積

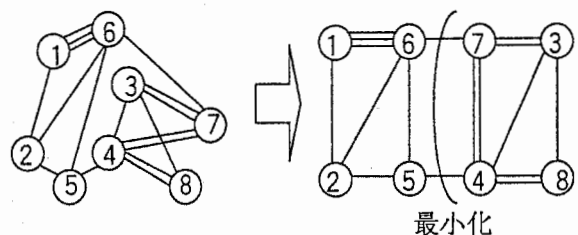


図3 グラフ分割問題

計算を用いることにより、探索解空間を狭くすることができ、計算時間の短縮が実現できる。

2.2 ネットワークモデル

図4のように、2次元平面上の5m間隔の格子点に正方形にユーザ端末が分布し、ピアツーピアで固定長パケットを全方向性アンテナを用いてワイヤレス通信をおこなうネットワークにおいて、そのユーザが図4(右)のように2つのセグメントに分割されているモデルを対象とする。本ネットワークにおいては、ユーザは静止した状態で、ALOHA[39]でネットワークにアクセスするものとする。

本モデルにおいて送受信されるパケット(トラヒック)の種類を下記のように定義する。

(1) 収容パケット (トラヒック)

当該パケットの発着ユーザが同一のセグメントに属しているもの。発信ユーザと着信ユーザの間を直接(1ホップで)送受信される。

(2) 中継パケット (トラヒック)

当該パケットの発着ユーザが別々のセグメントに属しているもの。発信ユーザはまず中継ユーザにパケットを送信し、中継ユーザが着信ユーザにそのパケットを転送する。

2.3 ベクトルの定義と内積

任意のユーザ $i, j \in U$ (U はネットワーク中のユーザが属する集合、 $i \neq j$) の間のトラヒック(パケットの個数)を $t_{i,j}$ と書くと、ユーザ数 n に対して各ユーザ間のトラヒックは $n \times n$ 行列として次のように書ける。

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} 0 & t_{1,2} & \cdots & t_{1,n} \\ t_{2,1} & 0 & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & t_{n-1,n} \\ t_{n,1} & \cdots & t_{n,n-1} & 0 \end{pmatrix} \quad (2-1)$$

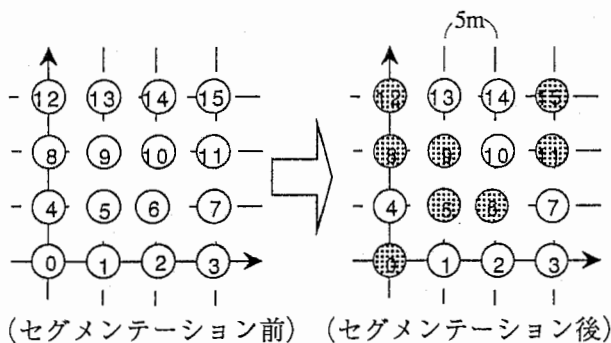


図4 ネットワークモデル

ここで i, j 間の方向は考慮しない。すなわち $t_{i,j} = t_{j,i}$ とする。またユーザ i は2次元平面上に座標 (x_i, y_i) を持つものとする。すなわち任意の i, j ($i \neq j$) に対して、その間のユークリッド距離 $d_{i,j}$ が定義できる。これらを用いて、ユーザ i が j ($i \neq j$) との間の内積を計算する際に用いるベクトルを次のように定義する。

$$\mathbf{v}_{i,j} = \left(\frac{t_{ij}}{d_{ij}^2}, \frac{t_{i,1}}{d_{i,1}^2}, \frac{t_{i,2}}{d_{i,2}^2}, \dots, \frac{t_{i,n}}{d_{i,n}^2} \right) \quad (2-2)$$

ベクトルの要素の第1項のみは、相手先ユーザ j に依存して決まるが、第2項以降は任意の j に対して同一である(付録A参照)。同様に j が i との内積を計算する際に用いるベクトルは、

$$\mathbf{v}_{j,i} = \left(\frac{t_{ji}}{d_{ji}^2}, \frac{t_{j,1}}{d_{j,1}^2}, \frac{t_{j,2}}{d_{j,2}^2}, \dots, \frac{t_{j,n}}{d_{j,n}^2} \right) \quad (2-3)$$

となる(付録A参照)。各要素の分母に距離の2乗を用いているのは、一般的に電波が距離の2乗に反比例して減衰するためである。ユーザがそれぞれ自分のベクトルを他の端末と交換することで、任意のユーザ i と j ($i \neq j$) に対する内積 $\langle \mathbf{v}_{i,j}, \mathbf{v}_{j,i} \rangle$ が計算できる。

2.4 TDVS アルゴリズム

TDVSのアルゴリズムは、各セグメントに同程度のトラヒックが収容されるように、前節で定義したベクトルの内積値に従って、次のように決める。

- ① 内積値の降順でユーザのペアをソートする
- ② 収容トラヒックの少ないほうのセグメント s を選択する
- ③ まだどちらもセグメントに収容されていないユーザのペアのうち、内積値最大のペアを選択する
- ④ どちらか一方がセグメント s に収容されており、もう一方がどちらのセグメントにも収容されていないペアのうち、内積値最大のペアを選択する
- ⑤ ③④で選択したペアのうち、内積値の大きいペアを選択し、③の場合は両方のユーザを、④の場合はセグメントに収容されていないユーザをセグメント s に収容する
- ⑥ すべてのノードがどちらかのセグメントに収容されるまで、②から繰り返す

2.5 シミュレーション

2.5.1 シミュレーション条件

TDVSの性能を検証するため、計算機シミュレーションをおこなった。セグメンテーションアルゴリズムとして

(a) アダプティブ(Adaptive)方式

2. 4節に基づくセグメンテーションアルゴリズム

(b) トラヒック(Traffic)方式

トラヒック情報のみを用いてセグメンテーションをおこなうアルゴリズム

(c) ランダム(Random)方式

ランダムにセグメンテーションをおこなうアルゴリズム

の3つの方式を採用し、比較する。また、本シミュレーションにおける評価関数は、スループット(Throughput)を次式で定義して用いる。

$$\text{Throughput} = \frac{\text{受信パケット数}}{\text{送信パケット数}} \times \text{トラヒック負荷} \quad (2-4)$$

中継パケットを中継するユーザ(中継ユーザ)は次式に基づいて決定されるものとする(図5)。

$$\text{中継ユーザ} = \left\{ r \in U \mid \min(|d_{ar} + d_{rb} - d_{ab}| + |d_{ar} - d_{rb}|) \right\} \quad (2-5)$$

シミュレーションパラメータを表1に示す。

本シミュレーションにおいては、セグメンテーションは一定間隔で一斉におこなわれ、また、各ユーザ端末で生起するパケットは、正規乱数に従って決定される宛先を持ち、熱雑音もしくは干渉波により1ビットでもビットエラーの生じたパケットは廃棄されるものとし、その上でネットワーク全体のトラヒック密度

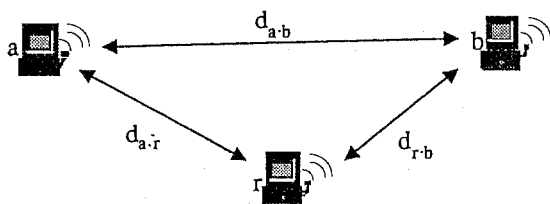


図5 中継ユーザの決定

表1 シミュレーションパラメータ

変調方式	BPSK	周波数帯域	2.4GHz帯
伝送帯域	2Mbps	Process Gain	10dB
トラヒック	poisson到着	パケット長	1000ビット
セグメンテーションインターバル	30sec		
シミュレーション時間	600sec		

式(3-2)及び(3-3)のベクトルの要素において、分母を全て1.0として(すなわち距離情報を考慮しない)3.4節のアルゴリズムを用いてセグメンテーションをおこなう方式。

(Traffic Intensity)、ユーザ数、送信電力を変えてシミュレーションをおこなった。

2. 5. 2 シミュレーション結果

送信電力10mW/MHzでユーザ数が25、36、49の時のスループットをそれぞれ図6、7、8に示す。これらによると、ユーザ数25ではトラヒック負荷が高くなるに従って、ランダム方式<トラヒック方式<アダプティブ方式、のように10%ずつスループットが高くなっており、TDVSの効果が表れている。ところがユーザ数が36、49と増えるに従って、トラヒック方式とアダプティブ方式の差が小さくなっている。これは、ユーザ数が大きくなるとパケットの伝搬距離も長くなるため、受信ユーザ側もしくは中継ユーザ側でのSN比が低下したためではないかと思われる。これを改善するためには、ユーザが地理的に広範囲に分布している場合には、2分割ではなく3分割以上にセグメンテーションすべきであると考えられる。

次に、送信電力1mW/MHzでユーザ数が25、36、49の時のスループットをそれぞれ図9、10、11に示す。この場合も、送信電力10mW/MHzの場合(図6、7、8)と同様、ユーザ数が増えるに従ってトラヒック方式とアダプティブ方式の差が小さくなっていることがわかる。

また、図12に、ユーザ数25の時のアダプティブ方式におけるスループットの送信電力による比較を示す。これによると、本シミュレーションの範囲ではスループットは送信電力の違いには左右されないことがわかる。よって、ユーザ端末のバッテリーから見ると、送信電力は小さいほうが良い。このことは、ユーザ数36、49の場合にも言える。ただし送信電力は、ユーザやトラヒックの地理的な分布を考慮して慎重に決める必要がある。

2. 5. 3 計算時間の比較

本方式による計算時間を評価するため、決定論的トラヒックに対して本方式と最適解全探索方式(全ての組み合わせについて評価して最適解を探索する方式)とで、ユーザ数25でセグメンテーションを実行し、その計算時間を比較した。図13にその結果を示す。計算はSun Ultra10 + Solaris2.6でおこなった。

本稿で扱っているような最適化問題の場合、一般には最適解の探索に要する計算時間は問題のサイズN(=ユーザ数)に対して指数的に増加する。ところが本提案方式では、Nに対してほとんど計算時間が左右されない。図より、ユーザ数が128までなら、10秒以内のオーダーで計算できることがわかった。これに対し最適解全探索では、ユーザ数32の時点で事実上、計

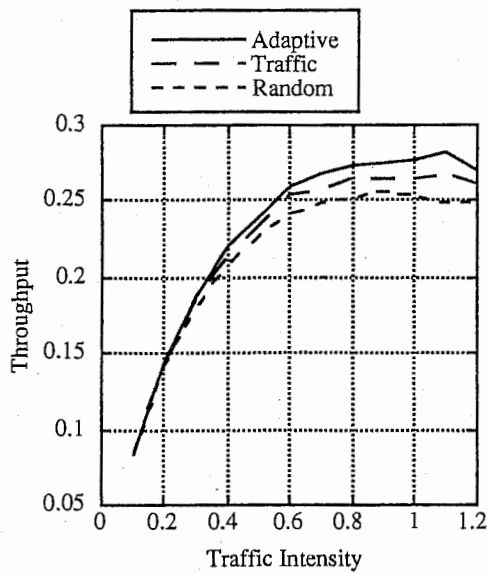


図6 方式別スループットの比較
(ユーザ数 25、送信電力 10mW/MHz)

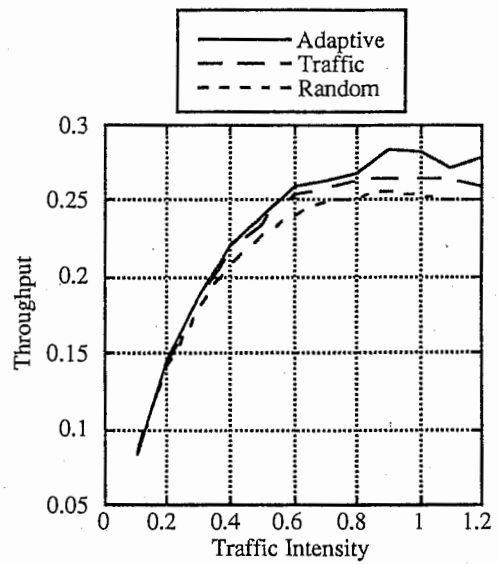


図9 方式別スループットの比較
(ユーザ数 25、送信電力 1mW/MHz)

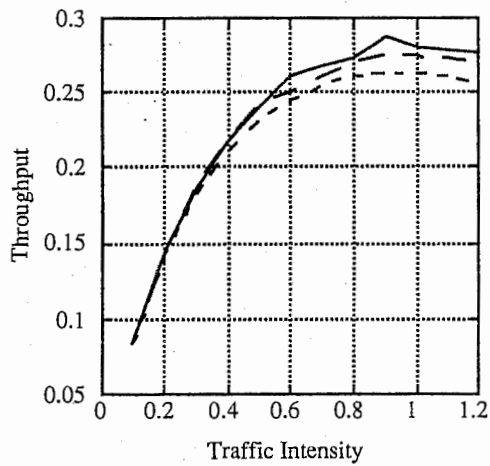


図7 方式別スループットの比較
(ユーザ数 36、送信電力 10mW/MHz)

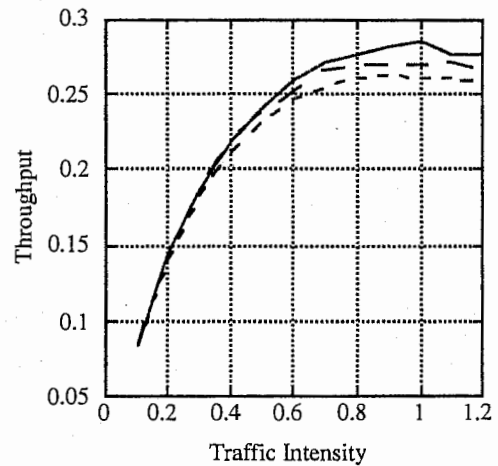


図10 方式別スループットの比較
(ユーザ数 36、送信電力 1mW/MHz)

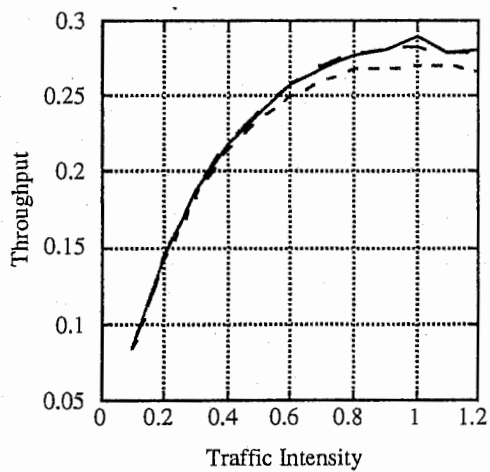


図8 方式別スループットの比較
(ユーザ数 49、送信電力 10mW/MHz)

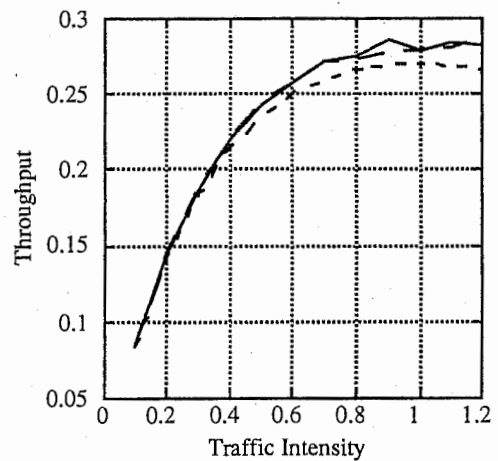


図11 方式別スループットの比較
(ユーザ数 49、送信電力 1mW/MHz)

算時間が発散してしまうことがわかる。

2.6 まとめ

アドホックネットワークにおいては、移動性、一時性といった無線通信の特性を生かしつつ、動的に変化する通信環境に適応できる制御をインフラ無しで実現する技術が必要である。本章ではそのような技術のうち、SDMAの一方式であるネットワークセグメンテーションアーキテクチャに着目し、短い計算時間で解を算出し、通信環境のダイナミックな変動に素早く適応できるアルゴリズムとして、各ユーザ間にベクトルを定義し、その内積に基づいてセグメンテーションをお

こなう方式を提案した。ベクトルの要素として、トラフィックのみならずユーザの位置情報を取り入れることで、トラフィック情報だけしか使わない場合よりもスループットを約10%改善できるセグメンテーションを、桁違いに短時間で算出できることを確認した。

今後は、より低いビットエラーレートを達成できるセグメンテーションを算出できるベクトルの要素の作成方法や、自律分散型アルゴリズムの検討をおこなう必要がある。

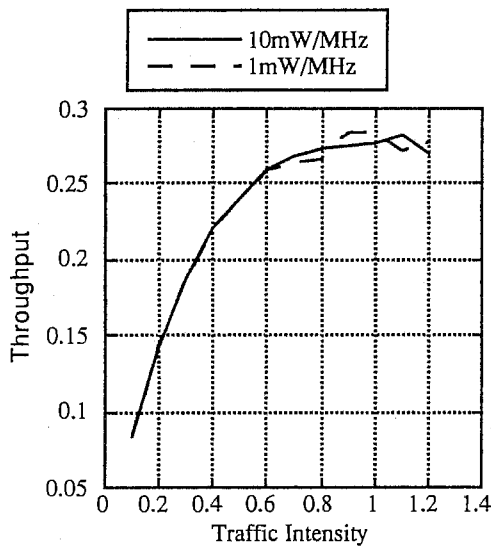


図1.2 送信電力別スループットの比較
(ユーザ数25、アダプティブ方式)

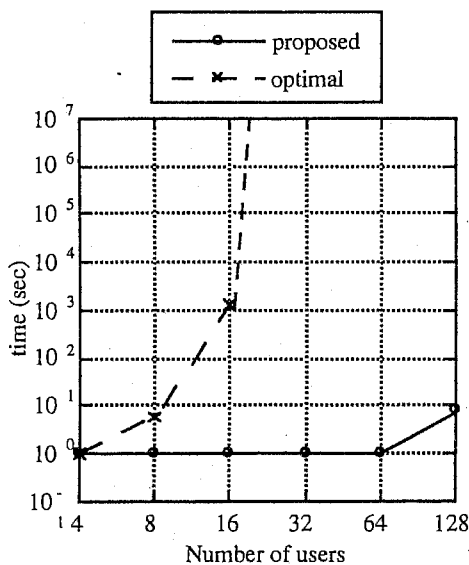


図1.3 計算時間の比較

3. デマンドアサイン CDMA-TDMA

3.1 研究の背景

近年、スペクトル拡散通信技術は、耐干渉性に優れ、伝送帯域が広いなどの理由から、マルチメディア移動通信に優れた性能を発揮できる変調方式として注目を集めている[2]。例えば無線LANでは、スペクトル拡散を念頭においた標準化が進められているし[40-41]、最近にわかに脚光を浴びているBluetooth[42]にも採用されている。ITS (Intelligent Transport Systems: 高度道路交通システム)[2,43-45]においては、その距離分解能の高さを生かしたGPS (Global Positioning System) への応用や、車車間通信などへの適用についても研究が進められている[46]。また、スペクトル拡散を用いた多元接続方式であるCDMA (Code Division Multiple Access: 符号分割多元接続) は、IS-95として商用携帯電話で実用化されており、アメリカ、韓国に次いで日本でもサービスが開始されている(サービス名: cdmaOne)[2]。次世代携帯電話方式であるIMT-2000でも、CDMAを取り入れた方式が採択される見込みとなっている[1,2]。

一方WACNetにおいては、基本アーキテクチャとして“ダイナミックセグメンテーション”を導入しており[7-11]、各セグメントに対して異なる拡散符号を割り当てることでCDMAを実現すれば、セグメントの独立性が高まり、セグメント管理の簡易化やスループットの改善が期待できる。ところがCDMAでは、時間軸/周波数軸において同一の無線リソースを利用するため、同時に使用されるCDMAチャネルの増加に伴ってMAI (Multiple Access Interference: 多元接続干渉) も増え、ビットエラーが起りやすくなる[49]。すなわちCDMAの同時送信パケット数同時使用チャネル数を抑えることによりビットエラーを減少させ、スループットの低下を防ぐことができる。

CDMAチャネルへのアクセス方式としてALOHAを用いた、CDMA-ALOHAの研究が行われている[47]。CDMA-ALOHAはプロトコルが簡易で遅延が小さい反面、トラヒック変動への適応力が弱くなり、同

時使用チャネル数を抑える効果は期待できない。ところが、CDMAの各チャネルへのアクセスにデマンドアサインTDMAを用い、同時送信パケット数を基にしたタイムスロット割り当てをおこなうことで、トラヒック変動に適応し、MAIを平均化できるのではないかと考えられる。

そこで本章では、図14のように無線メディアを共有する、CDMAとデマンドアサインTDMAのハイブリッド方式(デマンドアサインCDMA-TDMA)について、そのチャネル割り当てアルゴリズムを提案し、計算機シミュレーションを用いてその性能を評価する。

3.2 システムモデル

本章で扱うモデルを、次の通り定義する。

- (1) ネットワーク中には、一台のホストと十分多いユーザが存在し、ユーザはいずれかのセグメントに属する(図15)。(ホストはユーザとしても動作する)
- (2) 各セグメントには固有の拡散符号(spreading code)が割り当てられ、CDMAで多重されている。
- (3) 各CDMAチャネルはスロット化され、複数のスロットでTDMAフレームを構成している。
- (4) メッセージ(送信データのひとかたまり)は、スロット長と等しい1個以上の固定長パケットに分割される。
- (5) ユーザは、メッセージ毎にホストからタイムスロットの割り当てを受け、そのタイムスロットと自分の属するセグメントに固有の拡散符号とを用いて、連続する数フレームに渡ってパケットをホストに送信する。
- (6) チャネルの割り当て処理用として、CDMAチャネルのうちの1つを、全セグメントに共通の制御用チャネル(control channel)として使用する。制御用チャネルでは、ユーザはUp-linkをCSMAでアク

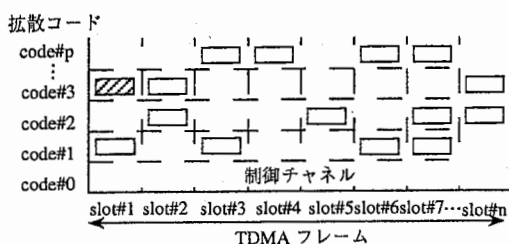


図14 フレーム構成

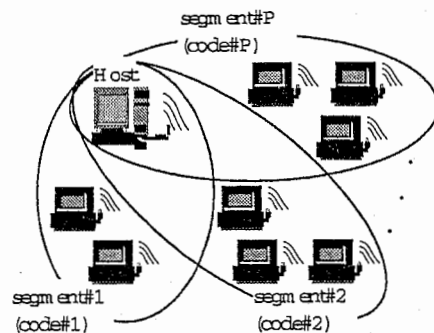


図15 ネットワークモデル

セスしてチャンネル割り当て要求パケットを送信し、ホストはDown-linkを用いてチャンネルの利用状況をBroadcastする(図16)。

(7) ホストは常時、各スロットにおける同時送信パケット数をモニターする。

3.3 送信チャンネル割り当てアルゴリズム

送信チャンネルをユーザに割り当てるアルゴリズムとして、以下の(A)(B)2方式を提案する。

(A) ランダム方式

ユーザは、ランダムにタイムスロットを割り当てられる。

(B) アダプティブ方式

ユーザは、同時送信パケット数が最少のタイムスロット(図14のcode#3ではslot#1であり、斜線のパケットが、新たにチャンネル割り当てを受けたパケット)を割り当てられる。

また、(A)(B)双方とも、タイムスロットが全て使用中でチャンネルの割り当てを受けられなかった場合は、ある適当な待ち時間の後、再度チャンネル割り当て要求をホストに送信するものとする。

3.4 ランダム割り当て方式の近似解析

トラヒックは、到着率 λ で平均 μ^{-1} の指数長メッセージがポアソン到着するものとする。このとき、トラヒック密度 G は、

$$G = \lambda / \mu \quad (3-1)$$

で表される。この時、メッセージは各ユーザに均等に到着するものとする。ここで、ある時刻 t における同時送信パケット数 k の状態遷移をM/M/m(m はセグメント数に相当。 k の上限値。)モデルと見なすと、定常状態確率は次のようになる[48]。

$$P_s(k) = \begin{cases} P_s(0) \cdot \frac{(m\rho)^k}{k!}, & \text{for } k \leq m \\ P_s(0) \cdot \frac{\rho^k m^m}{m!}, & \text{for } k \geq m \end{cases} \quad (3-2)$$

但し、

$$\rho = \frac{\lambda}{m\mu} \quad (3-3)$$

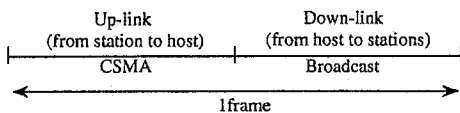


図16 制御用チャンネルのアクセス方式

$$P_s(0) = \left[\sum_{k=0}^{m-1} \frac{(m\rho)^k}{k!} + \frac{(m\rho)^m}{m!} \left(\frac{1}{1-\rho} \right) \right]^{-1} \quad (3-4)$$

である。

ところがCDMA-TDMAでは無線メディアがスロット化されているため、 k の状態変化が一時に複数ステップ起こる(図17)。式(4-2)は k の状態変化が一時に1ステップしか起こらない出生死滅過程を表しているため、これを直接適用することはできない。

そこで、本システムにおいて、メッセージをパケットに分割する際に生じる冗長分を考慮することにより、式(4-2)の修正をおこなう。まず、1つのメッセージが占有するスロット数 n の従う確率関数が次のようになる。

$$p(n) = \begin{cases} \int_{n-1}^n \mu e^{-\mu x} dx = e^{-\mu n} (1 - e^{-\mu}), & \text{for } n=1,2,3,\dots \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3-5)$$

これを用いると、 n の期待値が求まる。

$$E(n) = \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot p(n) = \frac{1}{1 - e^{-\mu}} \quad (3-6)$$

そこで本章では、式(3-3)において μ^{-1} の代わりに $E(n)$ を用い、それを方式(A)(ランダム方式)の近似値とする。すなわち、

$$\rho = \frac{\lambda}{m} \cdot (1 - e^{-\mu}) \quad (3-7)$$

を式(3-2)及び(3-4)に代入して用いる。

一方で、CDMAネットワークのビットエラーレ-

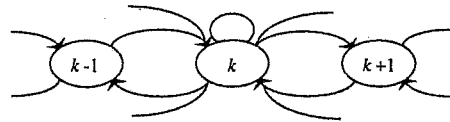


図17 CDMA-TDMA方式の状態遷移図

表2 シミュレーションパラメータ

セグメント数	30
ユーザ数	256
TDMAフレーム数	8 timeslot
メッセージ到着	poisson到着
メッセージ長	平均5.0timeslotの指数長
CDMA拡散率	31
E_b/N_0	∞

ト (BER) は、同時送信パケット数 k の関数として次のように書ける[49]。

$$P_e(k) = \frac{2}{3} Q \left[\left(\frac{k-1}{3N} + \frac{N_0}{2E_b} \right)^{-0.5} \right] + \frac{1}{6} Q \left[\left(\frac{(k-1)(NB) + \sqrt{3}\sigma}{N^2} + \frac{N_0}{2E_b} \right)^{-0.5} \right] + \frac{1}{6} Q \left[\left(\frac{(k-1)(NB) - \sqrt{3}\sigma}{N^2} + \frac{N_0}{2E_b} \right)^{-0.5} \right] \quad (3-8)$$

但し、 N は CDMA の拡散率、

$$Q[x] = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du \quad (3-9)$$

$$\sigma^2 = (k-1) \left[N^2 \frac{23}{360} + N \left(\frac{1}{20} + \frac{k-2}{36} \right) - \frac{1}{20} - \frac{k-2}{36} \right] \quad (3-10)$$

である。ここで、雑音あるいは MAI により、1 ビットでもエラーの生じたパケットは廃棄されるものとする、パケット長が l [bit] のとき、スループット S は、式(3-1)、(3-2)、(3-8)を用いて次のように表せる(式の導出は、付録 B 参照)。

$$S = G \cdot \frac{\sum_{k=1}^m k \cdot P_S(k) \cdot (1 - P_e(k))^l}{\sum_{k=1}^m k \cdot P_S(k)} \quad (3-11)$$

3. 5 シミュレーション

3. 5. 1 シミュレーション条件

デマンドアサイン CDMA-TDMA の性能を検証するため、計算機シミュレーションをおこなった。送信チャネル割り当てアルゴリズムとして、4. 3 節で紹介した(A)ランダム方式、(B)アダプティブ方式の2つを用い、同時送信パケット数、スループットを比較した。シミュレーションパラメータを表2に示す。

本シミュレーションにおいては、MAI により1ビットでもビットエラーの生じたパケットは廃棄され、また、パケットはホストにおいてすべて等電力で受信されるものとした。

3. 5. 2 シミュレーション結果

図18に、トラフィック密度 $G=3.0$ の時の同時送信パケット数の頻度分布を、近似解析値とともに示す。縦軸は合計が1になるように正規化している。これによると、式(3-3)の代わりに式(3-7)を用いた式(3-2)が、方式Aを良く近似しているのがわかる。また、BはAよりも同時送信パケット数のピーク値が抑えられ、ばらつきが小さくなっており、無線リソースをより平均的に利用できていることがわかる。これは MAI が大きくビットエラーの起きやすい状況を減らすことになり、結果としてスループットの増加が期待できる。

図19では、トラフィック密度を変化させた際の同時

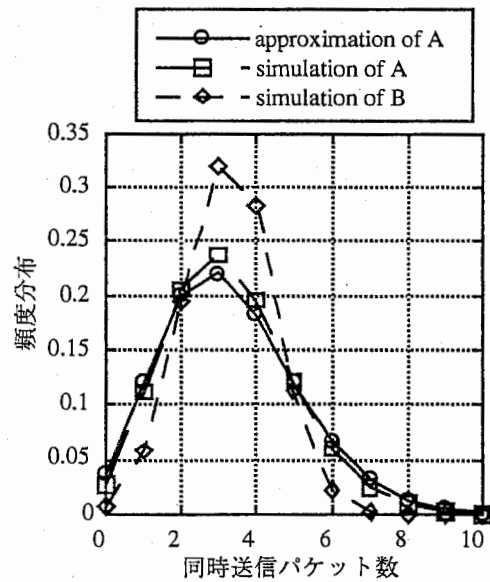


図18 同時送信パケット数の頻度分布 ($G=3.0$)

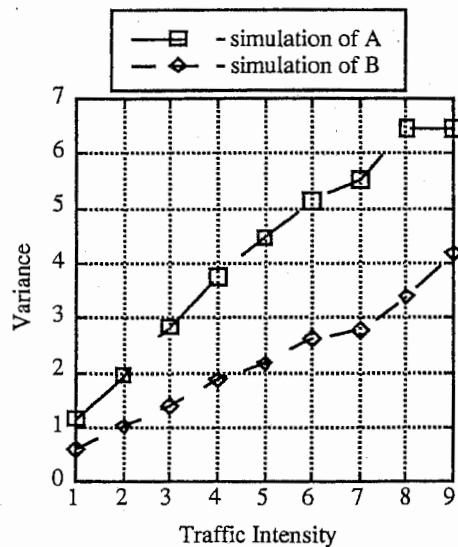


図19 同時送信パケット数の分散

送信パケット数の分散を表している。本シミュレーションの範囲では、BはAの半分程度の値を維持しており、本方式がトラフィック密度の変動に対して適応できることがわかる。

また、図20に、トラフィック密度を変化させた時のスループットの値を示す。これによると、A、B共にG=6.0の時に最大値をとっているが、BはAより20%ほど改善されており、無線リソースを平均的に利用することによる効果が出ているのが、わかる。また、一度スループットの最大値をとった後は、トラフィック密度が高くなるにつれてAとBに差が見られなくなってくる。これは、トラフィック密度が低い場所では、MAIが低くパケット損失が起こりにくいタイムスロットでの送信がBのほうが多いためにBのほうがスループットが高くなるが、トラフィック密度が高くなるにつれて、あるしきい値を境にして、同時送信パケット数の分散の大きいAのほうがMAIの低いタイムスロットでの送信が多くなるためであると考えられる。このしきい値は、CDMAの拡散率やセグメント数により変動すると考えられる。

3.6 まとめ

本章では、デマンドアサインCDMA-TDMAにおける同時送信パケット数及びスループットについて、近似解析および計算機シミュレーションにより評価した。同時送信パケット数が最小のタイムスロットをユーザに動的に割り当てるアルゴリズムを採用することにより、同時送信パケット数のピーク値が抑えられ無線リソースが平均的に利用できること、並びにトラフィック密度が高い場合にもその性能が維持できること

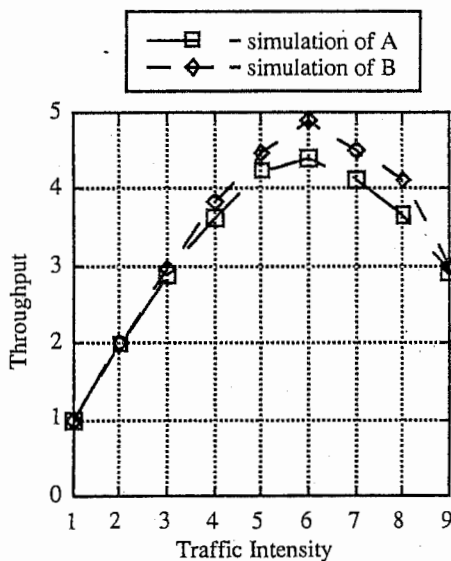


図20 スループットの比較

を示した。また、スループットにおいても、ランダムにタイムスロットを割り当てる方式と較べて、最大値で約20%の改善効果があることがわかった。

これらの計算機シミュレーション結果を基にして、我々は現在、PCを用いたデマンドアサインCDMA-TDMA実験システム構築を進めている。本システムの概観図を図21に示す。本システムは、1台のホストと8台のステーションで構成される。ステーションは全て同一のセグメントに属するものとし、他セグメントについてはホストで仮想的にシミュレートする。また、ホスト及び各ステーションは、制御チャンネルとしてイーサネット、データ通信チャンネルとしてもつ。次に、各PCにおけるハードウェア構成を図22に示す。本システムで用いる無線LANは、IEEE802.11b準拠の最高11Mbpsの製品をカスタマイズしたものである。PCと無線LAN間は10base-Tでつなぐれ、データパケットや送信タイミング制御情報の送受信をおこなう。また、通信処理シーケンスを図23に示す。ステーション側は送信メッセージが到着するとホストへイーサネット経由でタイムスロット割り当てリクエストを送信する。ホストはそれに対し、割り当て結果リプライを返信する。ステーション側では割り当てられたタイムスロットを用いてデータパケットを送信する。

今後は本システムを用いて実験及び性能評価をおこない、計算機シミュレーションでは把握できなかった問題点を抽出するとともに、実用化へ向けた検討をおこなう必要がある。

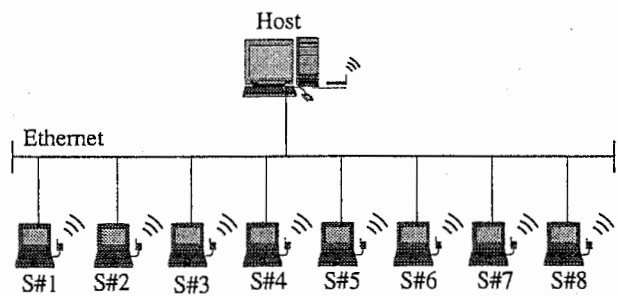


図21 実験システム概観

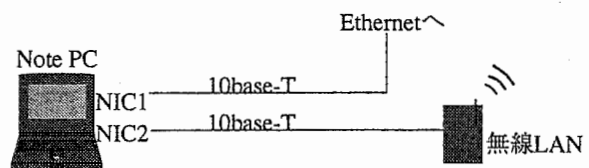


図22 ハードウェア構成図

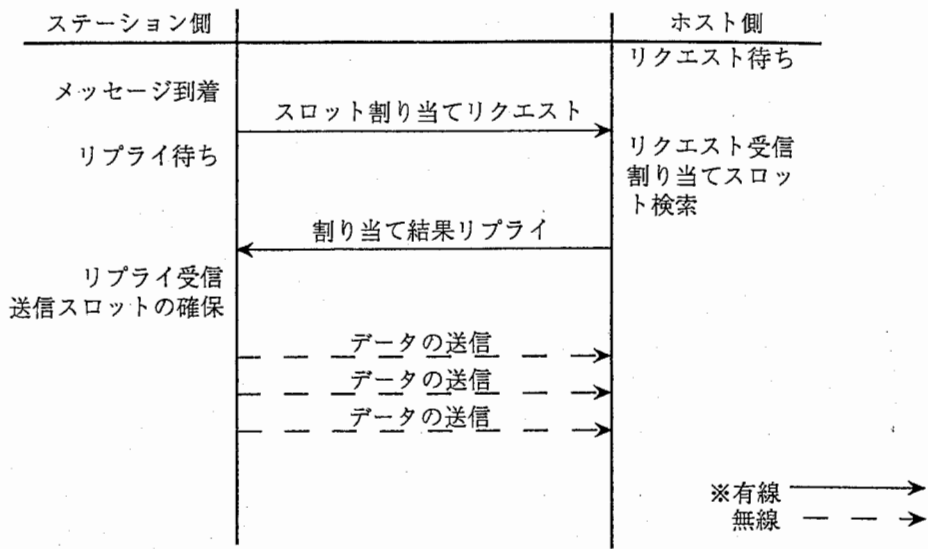


図 2 3 通信処理シーケンス

4. アンテナ走査角対 SINR 情報に基づくルーチング方式

4.1 研究の背景

近年のパーソナルコンピュータの小型化や無線通信技術の発達、広帯域化により、かつてはデスクトップPC+有線（イーサネットや加入者電話など）で構成されていたネットワークの、ラップトップPC+無線（IEEE802.11[40-41]や携帯電話など）への転換が急速に進んでいる。無線通信の利用はそのまま移動通信の普及へとつながるが、有線と較べて格段に通信路の品質の劣る無線通信では、一般にその接続性と手軽さとはトレードオフの関係になる。

WACNetのように、一時的に特定地域内に集まった不特定多数の人々の間の通信を無線でサポートするアドホックネットワークは、ピアツーピアを基本とした通信形態であり、ルータのようなインフラストラクチャが存在しないため、パケットのルーチングも含む接続性の維持は、大変重要な課題となる。アドホックネットワークでは通常、ネットワーク中のユーザが協調してパケットを中継し、ルーチングをおこなう必要があるが、その具体的な方法として従来から、ルート探索パケットをブロードキャストしてルートを発見する方法が数多く提案されてきた[4]。ところがこの方法は、電波を全方向に出すため、ネットワークに与える負荷が大きくなるのが問題であった。また、アンテナの指向性についても全く考慮されていなかった。

一方、メインビームを所望波へ、あるいはヌル点を干渉波へ、といったように、電波環境にアンテナが自律的に適応することのできるアダプティブアンテナは、そのコストの高さから、軍用や一部の商業用無線基地局など、用途が限られており、一般ユーザ向けとしては普及が進んでいなかった。ところが最近になって可変ビームアンテナ等の指向性アンテナの小型

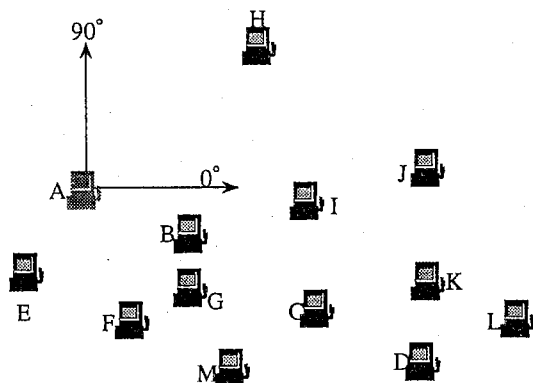


図 2 4 端末の分布

化/軽量化の研究が急速にすすみ[27-34]、近い将来ユーザ端末に指向性アンテナを搭載するのはほぼ間違いのないことだと考えられる。

本章では、指向性アンテナをアドホックネットワーク内の端末に搭載した場合に、それを有効利用するためのルーチング方式として、中継端末別かつメインビーム方向別の SINR を用いたルーチング方式「Angle-SINR Table Routing (ATR)」を提案する。本方式により同一チャンネル間干渉が抑圧され、周波数利用効率の飛躍的向上が期待できる。

4.2 ATR 方式の概要

ATR 方式では、各端末は指向性アンテナを用いて 360° 走査をおこない、直接通信可能な隣接端末からのフィードバックにより Angle-SINR Table (AT表) を得る。ATR 方式では、この AT 表を用いてルーチングをおこなう。例として、図 2 4 のように端末が分布している時の AT 表を表 3 に示す。これは、メインビーム方向を 30° おきに変化させた際の SINR (単位 dB) を表している。図 2 5 のような指向性パターンをもつ

表 3 端末 A における Angle-SINR Table

方位角	隣接端末					
	B	E	F	G	H	M
0°	+11.4	-5.9	-14.0	-9.1	----	----
30°	+4.3	-8.2	----	----	-10.8	----
60°	-2.3	-8.7	-13.6	-21.8	-15.4	----
90°	-5.8	+2.5	-16.9	-16.0	+5.7	----
:	:	:	:	:	:	:
330°	+7.2	+5.1	+8.3	+9.1	----	-19.2

----: 測定限界以下を表す

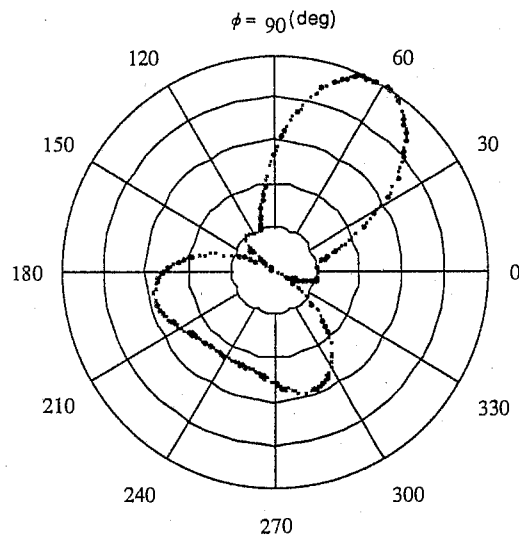


図 2 5 可変ビームアンテナの指向性パターン例

アンテナを各端末が搭載していることを仮定した。

4. 3 ルーチングアルゴリズム

図 2 6 に、ATR 方式のアルゴリズムのフローチャートを示す。フローは図にある通り(a) イニシャライズステージ、(b) アイドリングステージ、(c) データパケット送信ステージの 3 つに分けることができる。

(a) イニシャライズステージ

イニシャライズステージでは、ネットワーク加入時の初期化処理をおこなう。

まず、(a-2)あらかじめ決められたメインビームの方位角毎に加入通知を送信し、(a-3)他端末からのリプライを受信する。(a-4)リプライパケットの受信 SINR から AT 表を作成する。この処理を、全ての方位角に対しておこなう(a-5)。

(b) アイドリングステージ

アイドルステージでは、イベント発生 (パケットの送信や受信など、通信にかかわる状態遷移) の管理及びパケット受信時の処理をおこなう。

まず(b-2)イベントが発生し、(b-3)そのイベントが“受信”であった場合には、(b-4)受信パケットの SINR に基づいて AT 表を更新する。もし(b-5)受信パケットが他端末からの加入通知パケットと判断されれば、(b-6)リプライパケットを返信する。また、(b-3)イベントがパケット送信であった場合には、データ送信ステージに移る。

(c) データパケット送信ステージ

データパケット送信ステージでは、ルートの探索からデータパケットの送信までをおこなう。また本ステージにおいては、AT 表とは別に、表 4 のようなルーチングテーブルを保持する。

(b-3)において、イベントが“送信”であると判断された場合にデータパケット送信ステージに入り、まず(c-1)そのパケット送信が同一宛先端末への連続送信であるかどうか判断される。ここで言う“連続送信”とは、ネットワーク層で IP フラ

グメントされているような場合を言う。

連続送信であった場合には、(c-9)ルーチングテーブルを参照し、(c-10) 1 ホップ目の中継端末にビーム形成してパケット送信し、(c-11)ルーチングテーブルを更新後、アイドルステージに戻る。

次に、(c-1)で連続送信でなかった場合には、(c-2)宛先端末のホップ数を示す変数 n に 1 を代入する。(c-3)自端末の AT 表内に宛先端末が存在する場合には、(c-10)直接宛先端末にビーム形成してパケットを送信し、(c-11)ルーチングテーブルを更新後、アイドルステージに戻る。(c-3)自端末の AT 表内に宛先端末が存在しなかった場合には、(c-4)AT 表内の SINR の高い端末に AT 表を要求し、そのリプライとして AT 表データパケットを受信する。(c-5)受信した AT 表内に宛先端末があれば、(c-10)の処理に移る。(c-6) n ホップの端末全てから AT 表データを受信しても、その中に宛先端末が含まれていなかった場合には、(c-8)宛先端末探索のホップ数を 1 ホップ増やし、(c-4)から探索を続行する。もし(c-7)最大のホップ数まで探索しても宛先端末を見つけないことができなかった場合には、(c-12)宛先端末はネットワークから離脱していると判断し、その時点でのパケット送信を断念し、アイドルステージへ戻る。

端末 A が端末 D までのルートを探るイメージを図 2 7 に示す。

4. 4 ATR 方式の利点

ATR 方式では、次の効果が期待できる。

- ・ルーチング制御に起因するトラヒック負荷の軽減
- ・BER の低減

表 3 端末 A におけるルーチングテーブル

最終宛先 端末	隣接中継 端末	ホップ数	更新時刻
C	B	2	14:25:31
D	B	3	14:35:56
J	H	2	14:05:11
M	G	2	13:48:35

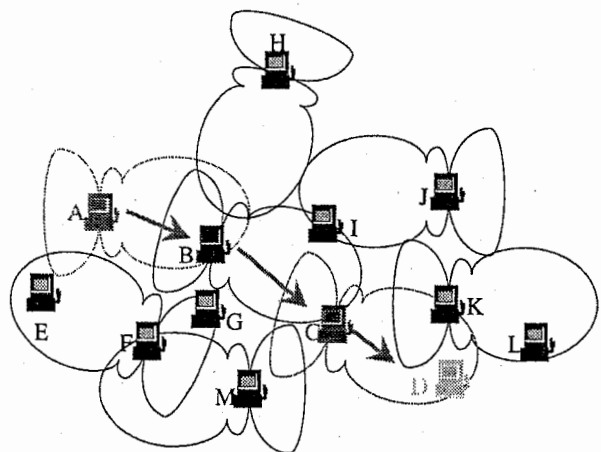


図 2 7 ルート探索イメージ

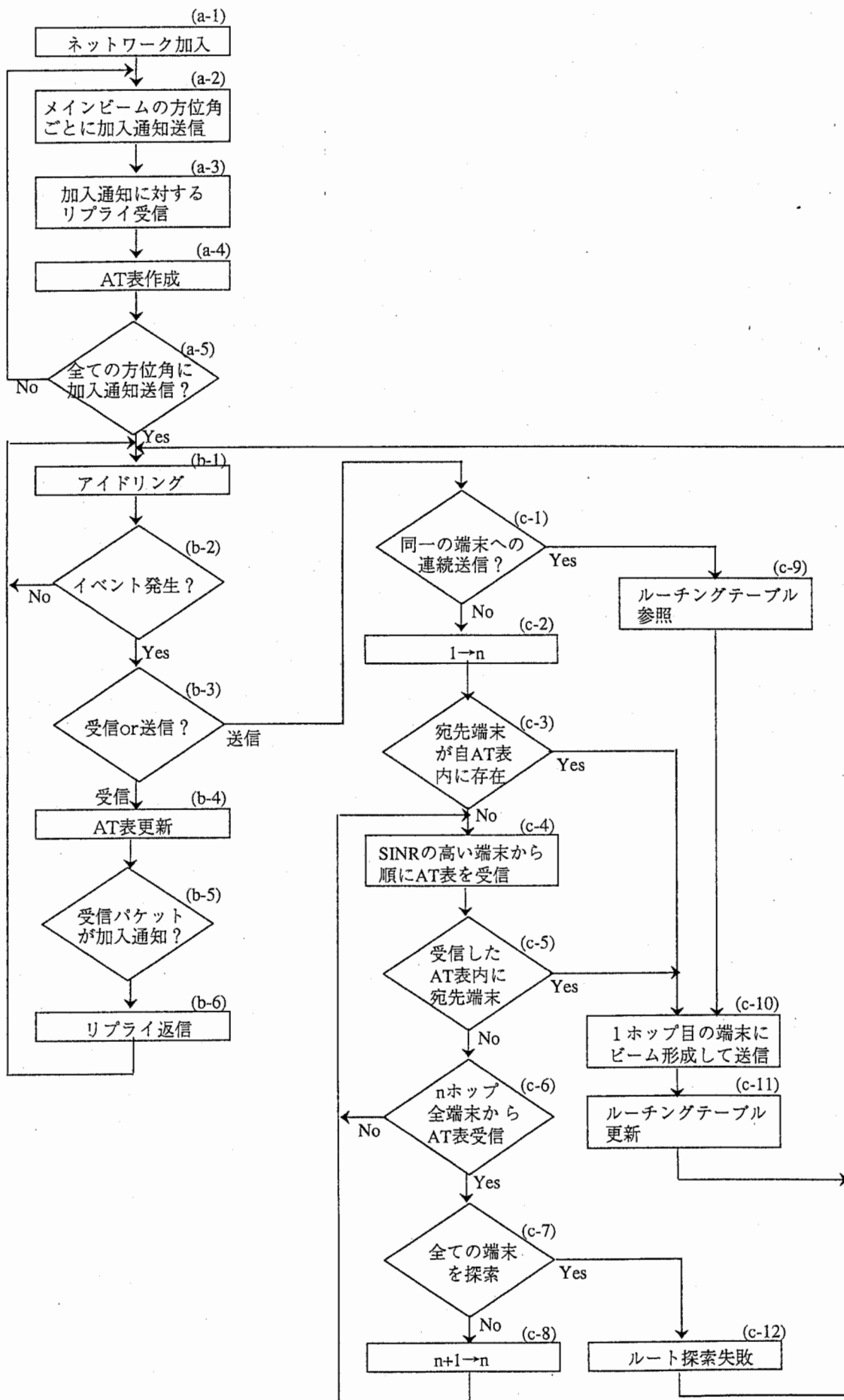


図 2 6 ATR アルゴリズムのフローチャート

- ・端末の実際の位置ではなく到来波方向を用いてAT表を得るので、マルチパスのうち受信状態の良いパスを選択できる
- ・複数端末へのルートが同時に探索できる
- ・SDMA (Space Division Multiple Access)への親和性が高い
- ・AT表を他の用途へ転用できる (例えば、受信時のアンテナ指向性制御など)

4. 5 まとめ

本章では、アドホックネットワークにおいて、各端末が指向性アンテナを持つ場合のルーチング方式、「ATR方式」を提案した。今後は、シミュレーション等による性能評価をおこなう必要がある。

5. おわりに

本報告では、WACNetの基本アーキテクチャである“ダイナミックセグメンテーション”の効率化と、適応型メディアアクセスコントロールであるデマンドアサインCDMA-TDMAの性能評価、並びに指向性のある可変ビームアンテナを用いた適応ルーチングについて述べた。

ダイナミックセグメンテーションでは、従来、トラフィック情報のみを用いておこなわれていた手法を改め、新たにユーザ間の距離情報も取り入れることによりスループットが高くなることを確認した。また、セグメンテーションの計算方法としてベクトル演算を用いることにより、従来の手法よりも計算時間を短くすることができた。

次に、デマンドアサインCDMA-TDMAでは、同時送信パケット数の少ないタイムスロットを新たなトラヒックに割り当てることにより、ランダムに割り当てた場合と較べて最大値で20%収容トラヒックを増やすことができることが分かった。また、ランダム割り当ての場合について理論解析をおこない、同時送信パケット数において精度良く近似できていることを確認した。

またルーチングについては、最近小型化/軽量化の研究が進む可変ビームアンテナをユーザ端末に搭載した状況を仮定し、アンテナ性能を最大限に引き出すことのできるルーチングアルゴリズムとして、アンテナ走査角毎のSINR情報に基づく方式を提案し、そのフローチャートとルーチングイメージを示した。

WACNetにおいては今後、これら要素技術の他方式との比較検証や定量的評価、要素技術の組み合わせの評価や実網への実装などが課題であろう。

参考文献

- [1] “小特集：次世代の移動通信”，信学誌，vol.82，no.2，pp.101-107，1999年2月。
- [2] “特集：CDMAの基礎とモバイル通信技術”，Interface，vol.26，no.2，pp.51-134，CQ出版社，2000年2月。
- [3] 池田，“ネットワークング・コミュニティ”，東京大学出版会，1997年10月。
- [4] T. Imielinski and H. F. Korth，“Mobile Computing”，Kluwer Academic Publishers，1996。
- [5] C-K Toh，“Wireless ATM and Ad-Hoc Networks”，Kluwer Academic Publishers，1997。
- [6] K-C Chen，“Medium Access Control of Wireless LANs for Mobile Computing”，IEEE Networking Magazine，vol.8，no.5，1994。
- [7] 川合，野崎，“ワイヤレスを利用したアドホックコミュニティネットワーク”，信学総大B-7-234，1997年3月。
- [8] M. Kawai, M. Nozaki and K. Gyoda，“A Wireless Ad-Hoc Community Network with Reconfigurable Topology Architecture”，Proc. Globecom'98，pp.2002-2006。
- [9] 川合，“どこでもネットワーク-Reconfigurable Ad-Hoc Network-”，ATR Journal，第32号，pp.8-9，1998年8月。
- [10] 大平，行田，門，大野，田野，“ワイヤレスアドホックコミュニティネットワーク”，信学総大PB-1-4，2000年3月。
- [11] 行田，野崎，川合，“ワイヤレスアドホックコミュニティネットワークにおけるネットワーク再構成機能の実装とその評価”，信学論，vol.J82-B，no.6，pp.1291-1293，1999年6月。
- [12] 行田，川合，“WACNet評価システム”，電気学会電子・情報・システム部門大会，OS6-6，pp.393-398，1999年8月。
- [13] 野崎，川合，“WACNetにおける動的セグメンテーションに関する一検討”，信学ソ大B-7-138，1997年9月。
- [14] M. Nozaki, K. Gyoda and M. Kawai，“Dynamic Segmentation Schemes for a Wireless Ad-Hoc Community Network”，Proc. The third Int. Symp. on Multi-Dimensional Mobile Communications，pp.202-206，Sep. 1998。
- [15] 野崎，川合，“WACNetにおけるネットワーク分割手法の性能評価”，信学総大B-7-49，1999年3月。
- [16] 川合，行田，野崎，“ワイヤレスアドホックコミュニティネットワーク（WACNet）のトポロジーの最適化”，電気学会電子・情報・システム部門大会，OS6-5，pp.387-392，1999年8月。
- [17] 大野，大平，行田，“ノードの位置とトラフィック交流度を考慮したネットワークセグメンテーション手法の提案”，情処第59回全国大会3-435，1999年9月。
- [18] 大野，大平，行田，“SDMAアドホックネットワークのためのセグメンテーション方式”，信学技報IN99-77，1999年11月。
- [19] 大野，川合，“WACNetにおける動的メディアアクセス制御に関する検討”，信学総大B-7-234，1998年3月。
- [20] 大野，川合，“CDMA-TDMA方式の送信特性に関する考察”，信学ソ大A-5-7，1998年9月。
- [21] 大野，川合，“デマンドアサインCDMA-TDMAにおける複数スロット割り当て法の検討”，信学総大B-7-120，1999年3月。
- [22] Y. Ohno and M. Kawai，“Performance Evaluations of Demand-assigned CDMA-TDMA”，Proc. OPNETWORK'99，MIL3，Washington D.C.，Sep. 1999。
- [23] 大野，川合，“デマンドアサインCDMA-TDMAにおけるスループット特性”，信学ソ大B-7-13，1999年9月。
- [24] 青山，門，大平，“無線アドホックネットワークのルーティングに関する一検討”，信学技報IN99-78，1999年11月。
- [25] 門，大野，行田，大平，“各端末において受信電力に基づき自律的に中継優先度を決定するルーティング方式の提案”，信学総大B-5-164，2000年3月。
- [26] 大野，門，行田，大平，“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B-5-109，2000年3月。
- [27] 大平，行田，田野，“マイクロ波信号処理によるアダプティブビーム形成と電子制御導波器（ESPAR）アンテナの提案”，信学技報AP/SAT99-61，1999年7月。
- [28] 行田，大平，“電子制御導波器アレーアンテナの設計”，信学技報AP/SAT99-63，1999年7月。
- [29] 大平，行田，田野，“マイクロ波信号処理とデジタル信号処理を融合したアダプティブアンテナ”，信学ソ大SB-1-6，1999年9月。
- [30] 行田，大平，“電子制御導波器アレーアンテナ”，信学ソ大SB-1-10，1999年9月。
- [31] 滝沢，行田，大平，“電子制御導波器アレーアンテナ（ESPARアンテナ）の基本検討”，信学技報AP99-116，RCS99-113，1999年10月。
- [32] 松崎，行田，大平，“電子制御導波器アンテナ（ESPARアンテナ）の基本検討：ビームとヌルの同時形成”，信学技報SST99-79，ITS99-75，AP99-201，RCS99-221，MW99-241，2000年2月。
- [33] 行田，大平，“電子制御導波器（ESPAR）アンテナの指向性制御可能性”，信学総大B-1-184，2000年3月。
- [34] 大平，“適応アンテナの民生化に向けて”，電気関係学会関西支部連合大会，S8-1，p.S41，1999年11月。
- [35] 間瀬，“インターネットの品質・トラフィック管理 [I]”，信学誌，vol.82，no.10，pp.1054-1061，1999年10月。
- [36] 鈴木，平出，“バス分割多元接続（PDMA）移動通信方式”，信学技報RCS93-84，1994年1月。
- [37] T. Ohgane, Y. Ogawa and K. Itoh，“A Study on a Channel Allocation Scheme with an Adaptive Array in SDMA”，Proc. VTC'97，vol.2，pp.725-729，May 1997。
- [38] B. W. Kernighan and S. Lin，“An Efficient Heuristic

Procedure for Partitioning Graphs”, Bell Systems Technical Journal, vol.49, pp.291-307, 1970.

- [39] N. Abramson, “The ALOHA system : Another Alternative for Computer Communications”, AFIPS SJCC, vol.37, pp.281-285, 1970.
- [40] IEEE802.11, “Standard for Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications”, 1997.
- [41] IEEE802.11B/D2.2draft, “Standard for Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications : Higher speed physical layer (PHY) extension in the 2.4Ghz band”, 1998.
- [42] <http://www.bluetooth.com/>
- [43] “開発進むITS”, 日刊工業新聞, 1998年7月23, 24, 28, 29日.
- [44] “ITS特集”, 日刊工業新聞第2部, 1998年9月3日.
- [45] 福井, “ITS通信技術”, 信学ソ大SAD-2-1, 1998年9月.
- [46] 屋代, “動的にPN符号を割り当てる車両間通信プロトコル:DAP”, 信学論, vol.J81-A, no.4, pp.496-504, 1998年4月.
- [47] R. K. Morrow, Jr and J. S. Lehnert, “Packet Throughput in Slotted ALOHA DS/SSMA Radio Systems with Random Signature Sequences”, IEEE Trans. Commun., vol.40, no.7, pp.1223-1230, July 1992.
- [48] L. Kleinrock, “Queueing Systems Volume 1”, Wiley-Interscience, New York, 1975.
- [49] J. M. Holtzman, “A Simple Accurate Method to Calculate Spread-Spectrum Multiple-Access Error Probabilities”, IEEE Trans. Commun., vol.40, no.3, pp.461-464, Mar. 1992.

付録A. ベクトルの内積とTDVSベクトルの要素について

A. 1 ベクトルの内積の計算

ベクトルの内積は、次のように定義される。

2つの n 次元ベクトル

$$\mathbf{a} = (a_1, a_2, \dots, a_n) \quad (\text{A-1})$$

$$\mathbf{b} = (b_1, b_2, \dots, b_n) \quad (\text{A-2})$$

に対して、 \mathbf{a} 、 \mathbf{b} のなす角を θ とするとき、その内積は、

$$\begin{aligned} \langle \mathbf{a}, \mathbf{b} \rangle &= \|\mathbf{a}\| \cdot \|\mathbf{b}\| \cos \theta \\ &= a_1 \cdot b_1 + a_2 \cdot b_2 + \dots + a_n \cdot b_n \end{aligned} \quad (\text{A-3})$$

となる。ここで、

$$\|\mathbf{a}\| = \sqrt{\langle \mathbf{a}, \mathbf{a} \rangle} = \sqrt{a_1^2 + a_2^2 + \dots + a_n^2} \quad (\text{A-4})$$

は \mathbf{a} のノルムという。

A. 2 TDVSベクトルの内積計算

TDVSで用いるベクトルは、(2-2)及び(2-3)のように $(n+1)$ 次元ベクトルとして定義している。すなわち(A-3)より、 $i < j$ となるように i と j を選んだとき、

$$\begin{aligned} \langle \mathbf{v}_{ij}, \mathbf{v}_{ji} \rangle &= \frac{t_{ij}}{d_{ij}^2} \cdot \frac{t_{ji}}{d_{ji}^2} + \frac{t_{i1}}{d_{i1}^2} \cdot \frac{t_{j1}}{d_{j1}^2} + \frac{t_{i2}}{d_{i2}^2} \cdot \frac{t_{j2}}{d_{j2}^2} + \dots \\ &+ \frac{t_{ii}}{d_{ii}^2} \cdot \frac{t_{ji}}{d_{ji}^2} + \dots + \frac{t_{ij}}{d_{ij}^2} \cdot \frac{t_{jj}}{d_{jj}^2} + \dots + \frac{t_{in}}{d_{in}^2} \cdot \frac{t_{jn}}{d_{jn}^2} \end{aligned} \quad (\text{A-5})$$

となる。ところが、

$$d_{ii}^2 = d_{jj}^2 = 0 \quad (\text{A-6})$$

となるため、(A-6)式はこのままでは定義されない。そこで(A-6)式の右辺において、 $(i+1)$ 番目の項と $(j+1)$ 番目の項を無視する(便宜上0とする)こととし、本稿における内積とする。

付録B. ランダム割り当てデマンドアサイン
CDMA-TDMA におけるスループット
近似式の導出

BER が式(3-8)の P_e で与えられた時、 l [bit]長のパケット中 x ビットがエラーとなる確率は、二項分布 $B(l, P_e(k))$ の確率関数を用いて、次のように表せる。

$$f_l(x, P_e(k)) = \binom{l}{x} P_e(k)^x (1 - P_e(k))^{l-x} \quad (\text{B-1})$$

よって、 $x=0$ となる（ある1つのパケットが正常に受信される）確率は、以下のようになる。

$$f_l(0, P_e(k)) = (1 - P_e(k))^l \quad (\text{B-2})$$

一方、式(3-2)より k の期待値が求められる。

$$E(k) = \sum_{k=1}^m k \cdot P_S(k) \quad (\text{B-3})$$

よって、 $E(k)$ に対する正常受信パケットの期待値は、

$$E_S(k) = \sum_{k=1}^m k \cdot P_S(k) \cdot (1 - P_e(k))^l \quad (\text{B-4})$$

となる。すなわち、式(3-1)、(B-3)、(B-4)を用いると、スループットは次のように表せる。

$$S = G \cdot \frac{\sum_{k=1}^m k \cdot P_S(k) \cdot (1 - P_e(k))^l}{\sum_{k=1}^m k \cdot P_S(k)} \quad (\text{B-5})$$