

## パケット無線ネットワークにおける指向性アンテナの効果

南 拓也 有信明彦 松野浩嗣

山口大学理学部

あらまし パケット無線ネットワーク (PRN) において, 重野ら (1996), 秋月ら (1995) は並行送信可能であるようなプロトコルを提案することに加えて, 各端末が指向性アンテナを利用することにより並行送信可能な端末数を増やすことで, データの伝送効率の向上を試みている. さらにこれらの論文では, 提案したプロトコルのもとで指向性アンテナの効果について調べている. 本稿では, 指向性アンテナを利用した PRN においてプロトコルに依存しない最適な送信計画を求めるアルゴリズムを与えて, このアルゴリズムを用いて計算機実験を行うことにより, 指向性アンテナを利用することの本質的な効果について調べる. さらに各々の指向性アンテナに送受信するデータを蓄えることのできるバッファを設けた場合の性能についても考察する.

## Effect of Directional Antenna on Packet Radio Networks

Takuya MINAMI, Akihiko ARINOBU, and Hiroshi MATSUNO

Faculty of Science, Yamaguchi University

**Abstract** Shigeno(1996) and Akitsuki(1995) attempted to improve a throughput on Packet Radio Network (PRN) by proposing a protocol which can transmit data simultaneously. Moreover, in the papers, they used directional antennas to get more efficient performance. They showed an effect of using directional antennas on their protocol in those papers. In this paper, we propose an algorithm to get an optimal transmit schedule on PRN with directional antennas which do not depend on protocols. And we examine an essential effect of using directional antennas by a computer experiment by using our algorithm.

### 1 まえがき

パケット無線ネットワーク (PRN) では, ある時刻に複数の端末が送信すること, すなわち並行送信が可能であれば, 並行送信できる端末数が多いほど伝送効率は高くなると考えられる.

並行送信を利用したプロトコルとして MACA[1], MACAW[2], STS[3], STMA/DA[4], TDMA/PT[5] などがある. なかでも文献 [4][5] では端末のアンテナに指向性アンテナを利用することにより通信を空間分割し, 並行送信の数を増やすことをねらっており, 論文の中では指向性アンテナの効果について肯定的に述べられている. しかし, これらの場合は STMA/DA や TDMA/PT というプロトコルに依存した環境の

もとでの指向性アンテナの効果である.

本稿でも PRN における指向性アンテナの効果に関する問題を扱うが, 我々はプロトコルを特定しない. すなわち, PRN において指向性アンテナを利用することの本質的な効果について調べることが目的である.

文献 [6] において, ネットワークトポロジと隣の端末へのデータが与えられたときに, すべてのデータを最短の時間で送り終える送信計画を求めるアルゴリズムが提案されている. このアルゴリズムは, 与えられた入力に対しプロトコルに依存しない最適な送信計画と送信に必要な時間を求めることができる.

本稿では, 文献 [6] のアルゴリズムでの並行送信条件 (アンテナが無指向性の場合) を, アン

テナに指向性がある場合とアンテナに指向性とバッファがある場合のそれぞれの並行送信の条件に置き換えたアルゴリズムを提案する。このアルゴリズムにより、指向性アンテナおよび指向性アンテナとバッファを使用した場合の最適な送信計画をプロトコルに依存することなく求めることができる。さらに、計算機実験によりある1つの入力に対し、各々の場合で送信したときに必要とされる送信時間を求め、それを比較することにより、指向性アンテナおよびバッファの効果を調べる。

## 2 最適な並行送信計画を求めるアルゴリズム

### 2.1 最適並行送信計画問題

PRNを有向グラフ  $G = (V, A)$  で与える。ここで、ノード集合  $V$  は端末の集合であり、端末  $a \in V$  の送信範囲内に端末  $b \in V$  が存在するときかつそのときに限りリンク  $(a, b) \in A$  が存在するとする。また、端末  $a$  から端末  $b$  へのパケットの送信は、必ずリンク  $(a, b) \in A$  により行われるとする。

PRNでは以下の条件でパケットの通信が行われると仮定する。これらをPRNの通信条件と呼ぶ。

- (a) すべての端末は同一の周波数を使用する。したがって、ある端末が隣り合う端末へパケットを送信したとき、無線の放送特性によりこのパケットは目的の端末以外のすべての隣り合う端末に届く。
- (b) どの端末もパケットの送信と受信を同時に行うことができない。
- (c) どの端末も同時に異なる2つ以上のパケットの送信および受信を行うことができない。

リンク  $(a, b) \in A$  と並行送信ができないリンク  $(c, d) \in A$  を図1に示す。

図1(a-1)はリンク  $(c, d)$  における送信がリンク  $(a, b)$  における送信を妨害し、両者が並行送信不可能であることを表す。図1(a-2)はリンク  $(a, b)$  における送信がリンク  $(c, d)$  における送信を妨害し、両者が並行送信不可能であることを表す。これらはPRNの通信条件(a)によるものである。

図1(b-1)は端末  $b(=c)$  において、パケットの送受信が同時に行えないことを表す。図1(b-2)は端末  $a(=d)$  において、パケットの送受信が

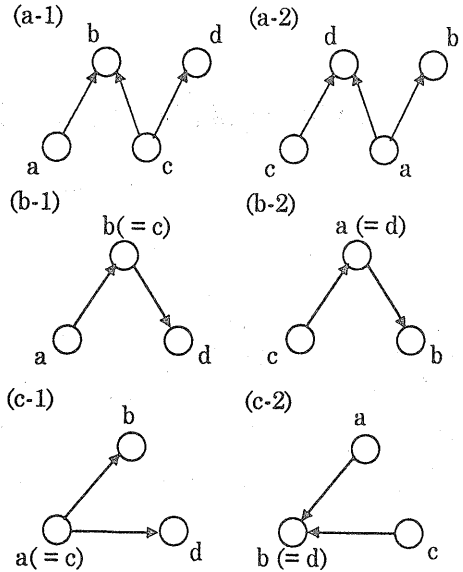


図1: リンク  $(a, b)$  と並行送信できないリンク  $(c, d)$

同時に行えないことを表す。これらはPRNの通信条件(b)によるものである。

図1(c-1)は端末  $a(=c)$  において、異なる2つ以上のパケットを同時に送信できないことを表す。図1(c-2)は端末  $b(=d)$  において、異なる2つ以上のパケットを同時に受信できないことを表す。これらはPRN通信条件(c)によるものである。

リンク  $(a, b)$  と並行送信できないすべてのリンク集合  $C_{ab}$  を次のように定義する。式中のそれぞれの集合の右肩につけられた添字は図1との対応を表す。

$$\begin{aligned}
 C_{ab} = & \{(c, d) \in A \mid (c, b) \in A, a \neq c, b \neq d\}^{(a-1)} \\
 & \cup \{(c, d) \in A \mid (a, d) \in A, a \neq c, b \neq d\}^{(a-2)} \\
 & \cup \{(c, d) \in A \mid b = c\}^{(b-1)} \\
 & \cup \{(c, d) \in A \mid a = d\}^{(b-2)} \\
 & \cup \{(c, d) \in A \mid a = c, b \neq d\}^{(c-1)} \\
 & \cup \{(c, d) \in A \mid b = d, a \neq c\}^{(c-2)}
 \end{aligned}$$

$C_{ab}$  をリンク  $(a, b)$  に対するコンフリクト集合と呼ぶ。集合  $A - C_{ab}$  は、リンク  $(a, b)$  と並行して送信することができる。

PRN  $G$  のリンク集合を  $A = \{l_1, l_2, \dots, l_L\}$  とする。簡単のため、これら  $L$  個の各リンクの

太さ、即ち単位時間に伝送されるデータ量はすべて同じであるとする。リンク  $\ell_i (1 \leq i \leq L)$  の始点に対応する端末から終点に対応する端末へ送られるデータ量、すなわちパケットの長さを  $f_i$  とする。  $\vec{f} = {}^t(f_1 f_2 \dots f_L)$  なる列ベクトルを伝送量ベクトルと呼ぶ。

$L$  個の成分からなる列ベクトルを  $\vec{t} = {}^t(t_1 t_2 \dots t_L)$  とする。ここで、 $i = 1, 2, \dots, L$  に対し、ある時刻においてリンク  $i$  が送信を行っているならば  $t_i = 1$ 、行っていないならば  $t_i = 0$  とする。  $\vec{t}$  を送信ベクトルと呼び、  $\{i \mid \forall i (1 \leq i \leq L) [t_i = 1]\}$  中のすべてのリンクは並行送信可能でなくてはならない。

すべての送信ベクトルの数を  $K$  とする。  $K$  個の送信ベクトルの列  $\vec{t}_1 \vec{t}_2 \dots \vec{t}_K$  に対応した 0 と 1 の成分からなる  $L \times K$  行列を  $T$  とし、これを送信行列と呼ぶ。

送信ベクトル  $\vec{t}_j (1 \leq j \leq K)$  に対応するリンクではすべて同じ長さのパケットが送信され、この長さを  $x_j \geq 0$  とする。このとき、  $\vec{x} = {}^t(x_1 x_2 \dots x_K)$  で表される列ベクトルをスロットベクトルと呼び、スロットベクトルの長さが送信にかかる時間となる。

ある PRN  $G$  と伝送量ベクトル  $\vec{f}$  が与えられたときに、最短の時間ですべての端末がパケットを送り終えるような送信計画を求める問題を以下のように定式化する。

### OPTIMAL SCHEDULE PROBLEM (OSP :最適並行送信計画問題)

入力 : PRN  $G$ , 伝送量ベクトル  $\vec{f}$   
 問題 : それぞれの列が送信ベクトルからなる  $L \times K$  の送信行列  $T$  とスロットベクトル  $\vec{x} = (x_1 x_2 \dots x_L)$  を以下の条件のもとで求めよ。

$$\begin{aligned} & \text{minimized} && \vec{1} \cdot \vec{x} \\ & \text{subject to} && T\vec{x} = \vec{f} \\ & && \vec{x} \geq \vec{0} \end{aligned}$$

OSP は、次の手順により解くことができる。  
 手順1: コンフリクト集合  $C_{ab}$  をもとに、PRN  $G$  から送信行列  $T$  を求める。

手順2: 手順1で求めた送信行列  $T$  と伝送量ベクトル  $\vec{f}$  をシンプレックス法の入力とし、スロットベクトル  $\vec{x}$  を求める。

手順1の送信行列を求めるアルゴリズムは  $FindT(G)$  として文献 [6][8] に示されている。手順2のシンプレックス法については文献 [7] を参照されたい。

## 3 指向性アンテナの効果

### 3.1 指向性アンテナとバッファ

無線ネットワークでは指向性アンテナを使用することにより、電波が占有する地理的面積を最小限に抑え、通信を効果的に空間分割することができる。これにより、並行送信できるリンク数を増やすことができる。

PRNのある端末において、その送信範囲内にある異なる端末に別々の指向性アンテナが割り当てられ、各通信が空間的に分割されているとする。このとき、送信元である端末が目的の端末にパケットを送信したとき、パケットは意図しない端末に届くことなく送信される。これにより、PRNの通信条件(a)が緩和される。

さらに、指向性アンテナにバッファを与え、端末の計算機からアンテナへ送られるデータ、アンテナから端末の計算機に送られるデータを一時的に蓄えることができるとする。これにより、各アンテナごとに独立した通信が可能となり、並行送信できるリンク数をさらに増やすことができる。

PRNのある端末において、その送信範囲内にある異なる端末に別々の指向性アンテナとバッファが割り当てられているとする。このとき、この端末は各バッファにそれぞれの送信先宛てのパケットを蓄え、同一時刻にそれぞれのアンテナから異なる送信先へパケットを送信することができる。送信にかかる時間に比べ、各バッファにデータを蓄える時間は非常に短いと考えることができるため、これらの送信は同一時刻に行えるとみなすことができる。異なる通信相手に別々のアンテナとバッファが割り当てられているなら、同一時刻における異なる受信先からの受信や、同一時刻における送信をしながらの受信も、同様の理由により行うことができる。これにより、PRNの通信条件(b)(c)が緩和される。

### 3.2 指向性アンテナを用いた最適並行送信計画問題

PRNの各端末に1本以上の指向性アンテナが与えられた場合の最適並行送信計画を求める問題を **OPTIMAL SCHEDULE WITH DIRECTIONAL ANTENNA PROBLEM(DAP: 指向性アンテナを用いた最適並行送信計画問題)** と呼ぶことにする。DAPは、指向性アンテナを使用することにより、OSPより同一時刻に通信できる端末数を増やすことができる。DAPは

リンク番号	始点	終点	アンテナ
$i$	$x$	$y$	$ant$

図 2: リンクデータの構造

OSP のコンフリクト集合  $C_{ab}$  を変更したものととして与えられる。DAP は、以下のように定義される。

DAP では PRN を対称有向グラフで与える。つまり、PRN  $G = (V, A)$  のリンク集合  $A$  に対し、リンク  $(a, b) \in A$  が存在するときには必ずリンク  $(b, a) \in A$  が存在するとする。さらに、各リンクを PRN  $G$  の情報とともに、各端末が送受信に使うアンテナの情報を加えた図 2 の構造で与える。 $ant$  は始点に対応する端末  $x$  が終点に対応する端末  $y$  にパケットを送信するとき、および始点に対応する端末  $x$  が終点に対応する端末  $y$  からパケットを受信するときにアンテナ  $ant$  を使用することを表す。アンテナ  $ant$  は関数  $w(x, y)$  により取り出すことができるとする。もし、リンク  $(x, y) \in A$  とリンク  $(x, z) \in A (z \neq y)$  において  $w(x, y) = w(x, z)$  であれば、端末  $x$  は端末  $y, z$  との通信に同じアンテナを使用していることとなる。

DAP では、PRN は対称有向グラフ  $G$  とリンク番号  $i (1 \leq i \leq L)$  をキーとした  $L$  個のリンクデータで与えられる。各端末のデータ伝送量は OSP と同様に  $f^i$  で与えられる。

### 3.3 指向性アンテナを用いた場合のコンフリクト

DAP において、PRN の各端末に 1 本以上の指向性アンテナが与えられている場合のコンフリクト集合を図 1 を用いて示す<sup>1</sup>。

図 1(a-1) において、リンク  $(c, b)$  とリンク  $(c, d)$  が異なるアンテナで通信が行われる場合、つまり  $w(c, b) \neq w(c, d)$  である場合、端末  $c$  が端末  $d$  へ送信するパケットは端末  $a$  に届くことはない。このとき、リンク  $(a, b)$  とリンク  $(c, d)$  は並行送信可能である。したがって、リンク  $(a, b)$  とリンク  $(c, d)$  がコンフリクトするのは  $w(c, b) = w(c, d)$  の場合だけである。同様のことが図 1(a-2) においてもいえる。

図 1(b-1)-(c-2) においては、指向性アンテナ

<sup>1</sup> 指向性アンテナが 1 本の場合は、アンテナに指向性がない場合と同等である。

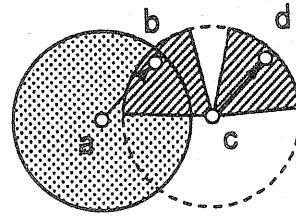


図 3: 指向性アンテナを使用した場合の通信の例

を使用しても、無指向性アンテナを使用した場合と同様のコンフリクトをする。

以上より、指向性アンテナを使用した場合のコンフリクト集合  $C'_{ab}$  は次のように定義される。式中のそれぞれの集合の右肩につけられた添字は図 1 との対応を表す。

$$\begin{aligned}
 C'_{ab} = & \{ (c, d) \in A \mid (c, b) \in A, a \neq c, b \neq d, \\
 & w(c, d) = w(c, b) \}^{(a-1)} \\
 \cup & \{ (c, d) \in A \mid (a, d) \in A, a \neq c, \\
 & w(a, d) = w(c, d) \}^{(a-2)} \\
 \cup & \{ (c, d) \in A \mid b = c \}^{(b-1)} \\
 \cup & \{ (c, d) \in A \mid a = d \}^{(b-2)} \\
 \cup & \{ (c, d) \in A \mid a = c, b \neq c \}^{(c-1)} \\
 \cup & \{ (c, d) \in A \mid b = d, a \neq c \}^{(c-2)}
 \end{aligned}$$

図 3 に端末  $c$  が指向性アンテナを使用してデータを送信することにより、リンク  $(a, b)$  とリンク  $(c, d)$  の並行送信が成功する通信の例を示す。図中の端末を中心とする円は無指向性である場合の送信範囲、扇形は指向性アンテナを使用した場合の送信範囲、矢印はパケットの流れを表す。

### 3.4 指向性アンテナとバッファを用いた場合のコンフリクト

DAP において、PRN の各端末に 1 本以上の指向性アンテナと各アンテナにバッファが与えられている場合のコンフリクトを図 1 を用いて示す。

図 1(a-1) において、3.3 節で述べた場合に加え、端末  $b$  が端末  $a$  からの受信と端末  $c$  からの受信に別々のアンテナを使用している、つまり  $w(b, a) \neq w(b, c)$  である場合、リンク  $(a, b)$  とリンク  $(c, d)$  は並行送信可能である。したがっ

て、リンク  $(a, b)$  とリンク  $(c, d)$  がコンフリクトするのは  $w(c, d) = (c, b)$  かつ  $w(b, a) = w(b, c)$  の場合だけである。同様のことが図1(a-2)においてもいえる。

図1(b-1)において、端末  $b (= c)$  が異なるアンテナで送受信を行っている場合、つまり  $w(c, d) \neq w(b, a)$  である場合、リンク  $(a, b)$  とリンク  $(c, d)$  は並行送信可能である。したがって、リンク  $(a, b)$  とリンク  $(c, d)$  がコンフリクトするのは  $w(c, d) = w(b, a)$  の場合だけである。同様のことが図1(b-2)においてもいえる。

図1(c-1)において、端末  $a (= c)$  が端末  $b$  への送信と端末  $d$  への送信を異なるアンテナで送信を行っている場合、つまり  $w(a, b) \neq w(c, d)$  である場合、リンク  $(a, b)$  とリンク  $(c, d)$  は並行送信可能である。したがって、リンク  $(a, b)$  とリンク  $(c, d)$  がコンフリクトするのは  $w(a, b) = w(c, d)$  の場合だけである。同様のことが図1(c-2)においてもいえる。

以上より、指向性アンテナとバッファを使用した場合のコンフリクト集合  $C''_{ab}$  は次のように定義される。式中のそれぞれの集合の右肩につけられた添字は図1との対応を表す。

$$C''_{ab} = \{ (c, d) \in A \mid (c, b) \in A, a \neq c, b \neq d, w(c, d) = w(c, b), w(b, a) = w(b, c) \}^{(a-1)}$$

$$\cup \{ (c, d) \in A \mid (a, d) \in A, a \neq c, b \neq d, w(a, d) = w(c, d), w(d, a) = w(d, c) \}^{(a-2)}$$

$$\cup \{ (c, d) \in A \mid b = c, w(c, d) = w(b, a) \}^{(b-1)}$$

$$\cup \{ (c, d) \in A \mid a = d, w(d, c) = w(a, b) \}^{(b-2)}$$

$$\cup \{ (c, d) \in A \mid a = c, b \neq d, w(c, d) = w(a, b) \}^{(c-1)}$$

$$\cup \{ (c, d) \in A \mid b = d, a \neq c, w(d, c) = w(b, a) \}^{(c-2)}$$

図4に端末  $b (= d)$  が受信に指向性アンテナとバッファを使用することにより、リンク  $(a, b)$  とリンク  $(c, d)$  の並行送信が成功する通信の例を示す。図中の端末を中心とする円はアンテナが無指向性である場合の送信範囲、扇形は指向性アンテナを使用して受信している様子、矢印はパケットの流れを表す。

DAPはOSPの  $C_{ab}$  を  $C'_{ab}$  ( $C''_{ab}$ ) と置き換えることにより解くことができる。

#### 4 計算機実験

PRNにおける指向性アンテナの効果を見るため計算機実験を行った。

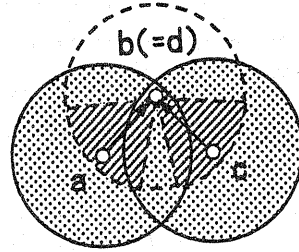


図4: 指向性アンテナとバッファを使用した場合の通信の例

PRN中の端末数、各端末の次数の平均数、端末がもつ指向性アンテナの最大数、データ伝送量ベクトルの最大値をパラメータとして、DAPの入力をランダムに作成した。1つの入力に対し、アンテナは「無指向性」、アンテナに「指向性あり」、アンテナに「指向性とバッファあり」のそれぞれの場合の最適な送信計画のスロットベクトル長を求め、「無指向性」の場合のスロットベクトル長を基準として他の2つの場合のスロットベクトル長と比較した。DAPはプロトコルに依存せず、最適な送信計画とその送信にかかる時間を求める問題である。これを利用することにより、この実験ではプロトコルに依存することのない最適な送信計画のもとで、指向性アンテナの効果を観察できる。

PRN中の端末数を10、次数の平均数4に固定し、アンテナ数が1から10までのそれぞれに対して入力を50個ランダムに作成し、「無指向性」、「指向性あり」、「指向性とバッファあり」のそれぞれについてスロットベクトル長を求めた。この実験の結果を図5に示す。グラフは「無指向性」の場合のスロットベクトル長を1とした場合の、残り2つのスロットベクトル長の相対比で表してある。

グラフより、PRN中の端末数と各端末の次数の平均数が同じであれば、各端末がもつ指向性アンテナの数が多ければ送信時間を短くすることができる。ただし、アンテナ数が端末の次数の平均数を超えたあたりからアンテナの効果は得られなくなる。これは端末の次数以上の空間分割には意味がないためである。さらに、「指向性アンテナあり」と「指向性アンテナとバッファあり」を比べるとバッファありのほうが常に送信時間が短いことがわかる。

PRN中の端末数を10、各端末がもつ指向性アンテナの平均数を3に固定し、次数の平均数

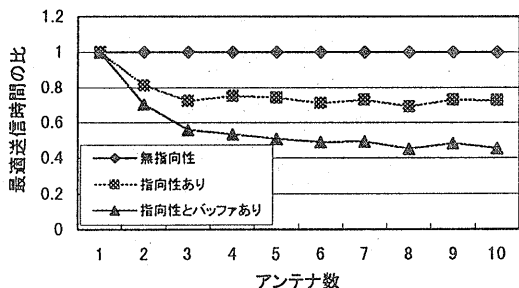


図 5: アンテナ数と最適送信時間の比の関係(端末数10, 次数の平均数3の場合)

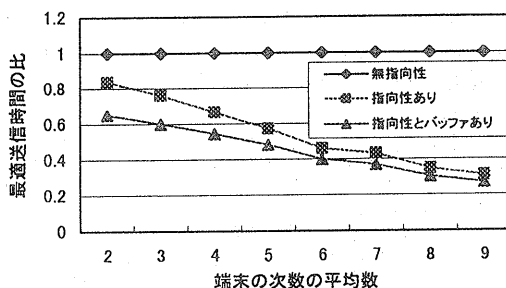


図 6: 端末の次数の平均数と最適送信時間の比の関係(端末数10, アンテナ数3の場合)

が2から9までのそれぞれに対して入力を50個ランダムに作成し、「無指向性」、「指向性あり」、「指向性とバッファあり」のそれぞれの場合についてスロットベクトル長を求めた。この実験の結果を図6に示す。グラフは先ほどと同様に表してある。

グラフより、PRN中の端末数と各端末がもつアンテナの平均数が同じであれば、指向性アンテナおよびバッファを使用した場合はPRNが密であるほど送信時間を短くすることができる。これは、アンテナが無指向性である場合はグラフが密になるにつれて並行送信可能なリンク数がいちじるしく減少するのに対し、指向性アンテナを使用した場合は指向性アンテナによる通信の空間分割により並行送信可能な状態が作られるからである。指向性アンテナはPRNが密であるほど有効に働くことがわかる。

## 5 むすび

本論文では、PRNにおいて指向性アンテナを使用した場合のプロトコルに依存しない最適な送信計画を求める問題について定式化を行い、計算機実験によって指向性アンテナの効果を調べた。

この結果、指向性アンテナはアンテナ数が端末の次数より少ない数であるとき、およびPRNが密であるときほど効果的であることがわかった。さらに、バッファを使用した場合では、より並行送信可能なリンク数を増やすことができ、指向性アンテナのみ利用した場合より効果的であることもわかった。

## 参考文献

- [1] P. Karn, "MACA - A new channel access protocol for packet radio," *ARRL/CRRL Amateur Radio Ninth Computer Networking Conf.*, pp.134-140, 1990.
- [2] V. Bharghavan, A. Demers, S. Shenker, and L. Zhang, "MACAW: A media access protocol for wireless LANs," *Proc. SIGCOMM'94 Conf.*, ACM, pp.212-225, 1994.
- [3] T. S. Yum and K. W. Hung, "Design algorithms for multihop packet radio networks with multiple directional antennas stations," *IEEE Trans. Comm.*, vol.40, no.11, pp.1716-1724, 1992.
- [4] 重野寛, 松下温, "指向性アンテナを利用した無線LANの対等分散型MAC方式STMA/DAとその性能評価," *信学論*, Vol.J79-B-I, No.2, pp.41-50, 1996.
- [5] 秋月治, 鈴木神吾, 六浦光一, 大下眞二郎, "並行送信を可能とした時分割マルチプルアクセス方式," *信学論(B-I)*, vol.J78-B-I, no.12, pp.846-854, Dec. 1995.
- [6] 市村美佐子, 南拓也, 松野浩嗣, "パケット無線ネットワークにおける並行送信TDMA列計画問題," *情報処理学会マルチメディア, 分散, 協調とモバイルワークショップ論文集*, pp.209-214, 1997.
- [7] 坂和正敏, *線形システムの最適化<一>目的から多目的へ*, 森北出版, 1986.
- [8] T. Minami, K. Someya, and H. Matsuno, "Time division scheduling problems on packet radio networks," *Tech. Rep. IEICE, COMP97-24*, 1997.