

パケット無線ネットワークにおける指向性アンテナの本質的効果

南 拓也[†] 有信 明彦^{††} 松野 浩嗣^{††a)}

Essential Effect of Directional Antenna on Packet Radio Network

Takuya MINAMI[†], Akihiko ARINOBU^{††}, and Hiroshi MATSUNO^{††a)}

あらまし パケット無線ネットワーク (PRN) において指向性アンテナを用いることで伝送効率の向上を図ったメディアアクセス制御プロトコルがこれまでに多く提案されている。本論文では、PRN のトポロジーと各局のデータ伝送量を与えられたときのすべてのデータが送信を終了するまでの最短時間を尺度として、プロトコルに依存しない、すなわち本質的な指向性アンテナを用いることの効果について考察する。結果として、各局に与える指向性アンテナの数はその局に隣接する局数だけ用意すれば十分であること、及び指向性アンテナは密な PRN のときにその効果が顕著に現れることなどが示される。更に、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通信バッファを組み合わせた場合の効果についても考察する。

キーワード パケット無線ネットワーク, 指向性アンテナ, プロトコル, 最適な送信計画, 送受信バッファ

1. ま え が き

これまでに多くのパケット無線ネットワーク (PRN) のメディアアクセス制御プロトコルが提案されているが、これらのプロトコルは大きく二つに大別できる。一つは CSMA 方式 [1] を代表とする、キャリアセンスを行うことでパケットどうしの衝突を回避しようとするものである。このプロトコルを、直接通信ができない局間があっても、すべての局間でお互いにデータ送信の存在を検知できるよう (これをキャリアセンス動作と呼ぶ) 拡張したものに、BTMA [2], ISMA [3], 及び CTMA [4], [5] などがある。

もう一つは、MACA [6], MACAW [7], STS [8], 及び STMA/DA [9] などの、データ送信に先だって送信局と受信局で短いパケットやトーンのやり取りを行うことによって隣接局とのパケットの衝突を回避しようとするものである。これらのプロトコルではキャリアセンス動作を行わないために、PRN 内で同時に複数の局が並行して送信することが可能であり、1 を超える高スループットを得ることができることが確認さ

れている [8], [9]。

また、以上のようなランダムアクセス型ではないが、文献 [10] で提案されている TDMA/MPT 方式でも並行送信を行うことで高効率の TDMA が実現できることが報告されている。

これらのプロトコルのうち、STS [8], STMA/DA [9]、及び TDMA/MPT [10] では指向性アンテナを使うことで通信を空間分割し、並行して送信できる局数を更に増やすことが指向されており、実際に高い通信効率を得られることが計算機シミュレーションによって示されている。このように、指向性アンテナは、ある特定のプロトコルの通信効率を更に向上させる具体的な手段として導入されてきた。

本論文の目的は、指向性アンテナを導入することの本質的効果、すなわちプロトコルに依存しない指向性アンテナの効果を調べることである。その効果を図る尺度として、PRN のトポロジーと各局のデータ量を与えられたときに、すべての局がデータを送信し終わるまでに要する最短の時間に着目する。同一の PRN のトポロジー及び同一のデータ量を設定した状況で、指向性アンテナを用いた場合に、これを用いない場合よりも短い時間で送信が終了するスケジュールを得ることができれば、指向性アンテナによる通信効率向上の効果があつたと判定できる。この最短時間とスケジュールを得るアルゴリズムは文献 [11] で提案されているものを用いる。

[†] NTT 情報流通プラットフォーム研究所, 武蔵野市
NTT Information Sharing Platform Laboratory, Musashino-shi, 180-8585 Japan

^{††} 山口大学理学部自然情報科学科, 山口市
Faculty of Science, Yamaguchi University, 1677-1, Yoshida, Yamaguchi-shi, 753-8512 Japan

a) E-mail: matsuno@sci.yamaguchi-u.ac.jp

本論文では、まず 2. で、文献 [11] で導入された最適並行送信計画問題について、後の議論で重要となる、コンフリクト集合 C の構成の仕方に注意しながら整理する。3. では、指向性アンテナを用いた場合のコンフリクト集合 C' の構成の仕方について説明する。このコンフリクト集合 C' をコンフリクト集合 C の代わりに用いることで、文献 [11] で示されているアルゴリズムによって指向性アンテナを用いた場合の最短送信時間を求めることが可能になる。更に、各指向性アンテナに通信バッファを付加した場合の通信効率の向上の度合いについても考察するため、3 番目のコンフリクト集合 C'' も導入する。4. では文献 [11] のアルゴリズムと構成した三つのコンフリクト集合 C, C', C'' の各々を組み合わせて求める最短データ送信時間を比較することによって、「指向性アンテナ」及び「指向性アンテナと通信バッファ」を用いた場合の効果を実験的に調べる。

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 は局の集合であり、局 $a \in V$ の送信範囲内に局 $b \in V$ 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、局 a から局 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。

本論文では、すべての局は同一の周波数を使用すると仮定する。したがって、ある局が隣り合う局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局以外のすべての隣り合う局に届く。以上のことから、PRN でのデータ通信には次のような自然な制約がある。

(I) どの局も、二つの異なるパケットを同時に二つの局へ送信することはできない。

(II) どの局も、パケットの送信と受信を同時に行うことはできない。

(III) どの局も、同時に二つ以上のパケットを受信することはできない。

リンク (a, b) と並行送信できないすべてのリンクの集合 C_{ab} は次のように定義できる。

$$C_{ab} = \{(x, y) \in A \mid (x, b) \in A, a \neq x, b \neq y\}^{(1)}$$

$$\cup \{(x, y) \in A \mid (a, y) \in A, a \neq x, b \neq y\}^{(2)}$$

$$\cup \{(x, y) \in A \mid b = x\}^{(3)}$$

$$\cup \{(x, y) \in A \mid a = y\}^{(4)}$$

$$\cup \{(x, y) \in A \mid a = x, b \neq y\}^{(5)}$$

$$\cup \{(x, y) \in A \mid b = y, a \neq x\}^{(6)}$$

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。

集合 C_{ab} を図示したものを図 1 に示す。上の式中のそれぞれの集合の右肩に付けられた添字は図 1 との対応を表す。(1) ((2)) はリンク (x, y) ((a, b)) における送信がリンク (a, b) ((x, y)) における送信を妨害し、両者が並行送信不可能となることを表す。(3) ((4)) は局 $b (= x)$ ($a (= y)$) 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。(5) ((6)) は局 $a (= x)$ ($b (= y)$) において、異なる二つ以上のパケットを同時に送信 (受信) できないことを表す。

ある PRN G のリンク集合 A は順序づけられた $L (\geq 1)$ 個の要素をもつとし、これら L 個の各リンクの太さ、すなわ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。 i 番目のリンクの始点に対応する局から終点に対応する局に送られるデータ量、すなわちパケットの長さを $f_i \geq 0$ 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。

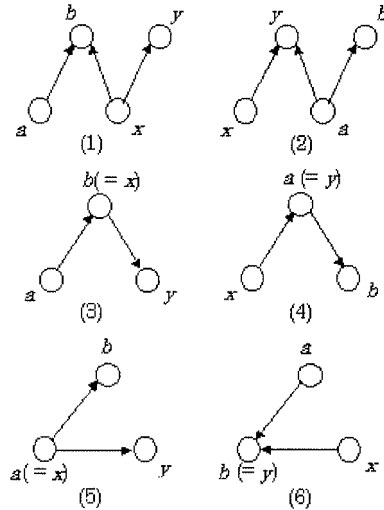


図 1 リンク (a, b) と並行送信できないリンク (x, y)
 Fig. 1 The data over link (x, y) can not transmit parallel with the the data over link (a, b) .

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、 $\{i \mid \forall i(1 \leq i \leq L)[t_i = 1]\}$ であるすべてのリンクは並行して送信が可能である。

L 個の送信ベクトルの列 $\vec{t}_1 \vec{t}_2 \dots \vec{t}_L$ に対応した 0 と 1 の成分からなる $L \times L$ 行列を S とし、これを送信行列と呼ぶ。一般性を失うことなく、すべてのデータの送信が完了するまでに、それぞれの送信ベクトルは 1 回だけ使用されるとしてよい。すべての成分が 0 であるような送信ベクトルでは、どのリンクにおいてもデータの伝送は行われぬ。

送信ベクトル \vec{t}_i に対応するリンクではすべて同じ長さの packets が送信され、この長さを $x_i \geq 0$ とする。このとき、 $\vec{x} = {}^t(x_1 x_2 \dots x_L)$ で表される列ベクトルをスロットベクトルと呼ぶ。

ある PRN G と伝送量ベクトル \vec{f} が与えられたときに、すべての局が packets を送り終えるまでの最短の時間を求める問題を以下のように定式化する。

[OPTIMAL SCHEDULE (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 $L \times L$ の送信行列 S とスロットベクトル $\vec{x} = {}^t(x_1 x_2 \dots x_L)$ を以下の条件のもとで求めよ。

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

ここで、 $\vec{1}(\vec{0})$ は全要素が 1(0) からなる行(列)ベクトルであり、 $\vec{1} \cdot \vec{x}$ は \vec{x} の要素をすべて足し合わせた数値である。

問題 OPTIMAL SCHEDULE が、以下の手順により解くことができることが文献 [11] に示されている。詳細は文献 [11] を参照されたい。

[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 S を求める。

[手順 2] 手順 1 で求めた送信行列 S と伝送量ベクトル \vec{f} を入力とし、シンプレックス法によってスロットベクトル \vec{x} を求める。

3. 指向性アンテナと通信バッファによる本質的效果

本章では、指向性アンテナや通信バッファによる本質的效果を調べるために、コンフリクト集合 C_{ab} の再構成を行う。まず、次の準備が必要である。

無線では、ある局 a から発した電波が目的の局 b へ到達するが局 b からの電波が局 a に到達しないという場合は普通に起こりえる。この状況で局 b から局 a に packets を届けるためには、一つ以上の局を中継する必要がある、任意の 2 局間の packets の到達がルーティングによって保証されていることが PRN の条件となる。この条件は指向性アンテナの効果を探るといふ本論文の目的にとって本質的に必要なものではなく、更にこの条件を考慮すると、後に行う計算機シミュレーションも煩雑なものになってしまう。そこで議論をわかりやすくするために、ここでは PRN の任意の二つの局に対し、相互に直接電波が到達し合うか、全く届かないかのどちらかとする。すなわち、PRN は対称有向グラフで与えられ、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。

PRN のある局に対して、その局と直接受信が行える局の個数を次数と呼ぶ。後に 4. で行う計算機実験では次数の平均数を PRN のパラメータの一つとしているが、次数の平均数が大きいと PRN の密度は高くなり、小さいとその密度は低くなる。

$n \geq 1$ 個の要素からなる順序づけられたリンク集合を A とし、各要素は表 1 のデータ構造をもつとする。図中の ant は、始点の局 x が終点の局 y に packets を送信するとき、及び始点の局 x が終点の局 y から packets を受信するときに局 x が使うアンテナ番号 $k(1 \leq k \leq k_x)$ (k_x は局 x がもつすべてのアンテナの数)を表す。ある二つの局 x, y に対してアンテナ番号を求める関数を $w(x, y)$ とする。二つの異なるリンク (x, y) 及び (x, z) に対して、 $w(x, y) = w(x, z)$ であれば局 x は局 y と局 z の通信に同じアンテナを使っていることになる。

局 x の次数にかかわらず、局 x を端点にもつリン

表 1 各リンクのデータの構造
Table 1 Data structure of each link.

Num. of link	source	destination	antenna
i	x	y	ant

クにはすべてアンテナ数 k_x 以下の正の整数がアンテナ番号として一つ割り当てられることに注意されたい。すなわち、局の次数がアンテナ数よりも大きいときには必ず複数の局がある一つのアンテナの送受信範囲に入る。また、局の次数とアンテナ数の大小関係にかかわらず、その送受信範囲にどの局も入っていないようなアンテナが存在することが起こりえる。

3.1 指向性アンテナの効果

PRN のある局において、その送信範囲内にある異なる局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、送信元である局が目的の局にパケットを送信したとき、パケットは意図しない局に届くことなく送信される。図 1(1) の状況で局 x に図 2 のように指向性アンテナを導入すると $(w(x, b) \neq w(x, y))$ 、コンフリクトが起こらなくなり、 (x, b) と (x, y) のリンクは並行送信が可能となる。図 2 の局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た場合の送信範囲、矢印はパケットの流れを表す。図 1(2) について指向性アンテナを導入した場合についても同様なおことがいえる。図 1(3)~(6) については、指向性アンテナの導入によってもコンフリクトを防げないことは容易にわかる。

以上のことから、PRN に指向性アンテナを導入した場合のコンフリクト集合 C_{ab} は以下のような集合 C'_{ab} に書き換えることができる。

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

$$\cup \{(x, y) \in A \mid (a, y) \in A, a \neq x, w(a, y) = w(x, y)\}^{(2)}$$

$$\cup \{(x, y) \in A \mid b = x\}^{(3)}$$

$$\cup \{(x, y) \in A \mid a = y\}^{(4)}$$

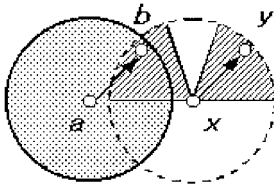


図 2 指向性アンテナを使用した場合の通信の例
Fig. 2 An example of communications in the case of using directional antennas.

$$\cup \{(x, y) \in A \mid a = x, b \neq x\}^{(5)}$$

$$\cup \{(x, y) \in A \mid b = y, a \neq x\}^{(6)}$$

3.2 指向性アンテナと通信バッファを導入した場合

次に、各局にアンテナの個数と同じ数の通信バッファを用意し、送信及び受信されるパケットはいったんアンテナに対応づけられた通信バッファに蓄積された後に各アンテナから送受信されるとしよう。この場合、通信バッファを端末装置の内部バスと直結するなどすれば、端末装置からのアクセスに要する時間はアンテナからの送受信に要する時間と比べると極めて短くなるように構成できる。これにより、以下に示すように、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更に増やすことができる。

図 1(1) においては、局 b が局 a からの受信と局 x からの受信に別々のアンテナを使用している、すなわち $w(b, a) \neq w(b, x)$ である場合もリンク (a, b) とリンク (x, y) は並行送信可能である。したがって、リンク (a, b) とリンク (x, y) がコンフリクトするのは $w(x, y) = w(x, b)$ かつ $w(b, a) = w(b, x)$ の場合だけである。同様のことが図 1(2) についてもいえる。

図 1(6) の場合を考えよう。これは局 a 及び局 x から送信されたパケットが同時に局 b に到達する場合である。局 b が指向性アンテナをもつ場合は図 3 のような状況になるので $(w(y, x) \neq w(b, a), b = y)$ 、局 b での (a, b) と (x, b) の二つのパケットの衝突は起こらない。更に局 b が通信バッファをもてば、これら二つのパケットを同時に受信することができる。同様なことは図 1(3)~(5) についてもいえるので、コンフリクト集合は次の集合 C''_{ab} のように書き換えることができる。

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

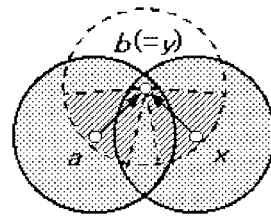


図 3 指向性アンテナとバッファを使用した場合の通信の例
Fig. 3 An example of communications in the case of using directional antennas and buffers.

$$\cup \{(x, y) \in A \mid (a, y) \in A, a \neq x, b \neq y, \\ w(a, y) = w(x, y), w(y, a) = w(y, x)\}^{(2)}$$

$$\cup \{(x, y) \in A \mid b = x, w(x, y) = w(b, a)\}^{(3)}$$

$$\cup \{(x, y) \in A \mid a = y, w(y, x) = w(a, b)\}^{(4)}$$

$$\cup \{(x, y) \in A \mid a = x, b \neq y, \\ w(x, y) = w(a, b)\}^{(5)}$$

$$\cup \{(x, y) \in A \mid b = y, a \neq x, \\ w(y, x) = w(b, a)\}^{(6)}$$

4. 最適並行送信計画による指向性アンテナと通信バッファの効果の評価

文献 [11] では、すべての送信ベクトルを求める手続き $FindT(G)$ 、及びこの手続きのなかで用いられる、コンフリクト集合 C_{ab} を求めるための手続き $Conflict((a, b))$ が示されている。図 4 に指向性アンテナを用いた場合のコンフリクト集合を求める手続き $DAconf((a, b))$ を示す。 $Conflict((a, b))$ の代わ

```

procedure DAconf((a, b))
begin
  C := φ; Co := {a, b}; Cd := {a, b};
  for each (x, y) ∈ A do
    begin
      if x = a
      then Cd := Cd ∪ {y};
      else if y = b
      then Co := Co ∪ {x};
    end;
  for each (x, y) ∈ A do
    if (x ∈ Co) or (y ∈ Cd)
    then C := C ∪ {(x, y)};
  for each (x, y) ∈ C do
    begin
      if (x, b) ∈ C and w(x, y) ≠ w(x, b)
      then C := C - {(x, y)};
      if (a, y) ∈ C and w(x, y) ≠ w(a, y)
      then C := C - {(x, y)};
    end
  return(C);
end

```

図 4 指向性アンテナを用いた場合のコンフリクト集合を求める手続き $DAconf((a, b))$

Fig. 4 Procedure $DAconf((a, b))$ for getting conflict set in the case of using directional antennas.

りにこの手続き $DAconf((a, b))$ を用いることによって、指向性アンテナを用いた場合の最適な並行送信計画を求めることができる。

また、指向性アンテナと通信バッファを用いた場合のコンフリクト集合を求める手続きを同様にして求め（これを $DBconf((a, b))$ とする）、これを手続き $FindT(G)$ のなかで用いられれば、指向性アンテナと通信バッファを用いた場合の最適な並行送信計画を求めることができる。

PRN における指向性アンテナ及び通信バッファの効果を見るため計算機実験を行った。

PRN の局数（ノード数）を 10、各局の次数の平均数を 3 とし、アンテナ数が 1 ~ 10 までのそれぞれに対して入力となる PRN を 50 個ランダムに作成し（作成された各グラフのリンク集合の要素は表 1 のデータ構造をもつとする）、「無指向性アンテナ ($Conflict((a, b))$)」、「指向性アンテナ ($DAconf((a, b))$)」、「指向性アンテナと通信バッファ ($DBconf((a, b))$)」のそれぞれについて $FindT(G)$ を使ってスロットベクトル長を求めた。今回、計算機実験に使用した計算機（CPU：MIPS R10000(180 MHz)、Memory：256 MB）の性能では、計算可能なネットワークの規模はノード数 10 が限界であったので、ノード数 10 において計算機実験を行った。本実験の本質は、ネットワークの密度の変化が最適並行送信時間に与える影響を調べることであり、ネットワークの規模が変わっても同様な結果が得られると考えている。この実験の結果を図 5 に示す。このグラフは「無指向性アンテナ」の場合のスロットベクトル長を 1 とした場合の、残り二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、指向性アンテナ、指向性アンテナと通信バッファの両方について、各局がもつ指向性アンテナの数が 3 までは最適送信時間が無指向性アンテナの場合と比べて順調に減少しているが、3 を超えるとアンテナ数を増やしてもその比はあまり変化しなくなることがわかる。これより、PRN において指向性アンテナを用いる場合に、隣接する局数を超える本数のアンテナを用いてもその効果はあまり期待できないことがわかる。これは隣接局数以上の空間分割には意味がないためであり、自然な結果であるといえる。より詳細に見てみると、指向性アンテナのみの場合ではアンテナ数が 3 よりも大きくなると最適送信時間は改善しなくなるが、通信バッファを付加した場合には緩やかに最適送信時間の比が減少していることが観察できる。

これは、コンフリクト集合 C'_{ab} と C''_{ab} の作り方からわかるように、通信バッファを付加すると並行送信できるリンク数がより増えるため、アンテナ数（すなわち通信バッファ数）がより増えた場合にも最適送信時間が改善できる場合があるからである。また「指向性アンテナ」と「指向性アンテナと通信バッファ」の場合を比べると通信バッファがあるほうが常に送信時間が短いことも観察できる。

PRNの局数を10、各局がもつ指向性アンテナの平均数を3に固定し、次数の平均数が2~9までのそれぞれに対して入力を50個ランダムに作成し、「無指向性アンテナ」、「指向性アンテナ」、及び「指向性アンテナと通信バッファ」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。図5と同様、無指向性アンテナの場合を1とした相対比で示してある。

グラフより、指向性アンテナ、指向性アンテナと通信バッファの両方について、PRNが密であるほどこれらの導入の効果が現れ、データを送信するのに必要な時間を短くできることがわかる。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できるリンク数が著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。これにより、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。また、図5と同様に、この図においても通信バッファを付加したほうが指向性アンテナだけよりも送信時間が短くできることが観察できるが、指向性アンテナの効果に比べるとこの通信バッファの導入の効果は小さいことがわかる。

図7は、図6の実験を最適送信計画を行わない場合の送信時間を1として「無指向性アンテナ」、「指向性アンテナ」、及び「指向性アンテナと通信バッファ」の

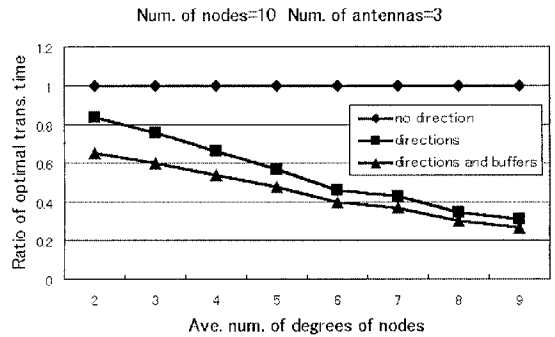


図6 無指向性アンテナの場合を1とした、局の次数の平均数と最適送信時間の比の関係 [局数10、アンテナ数3の場合]

Fig.6 Relationship between the ratio of optimal transmission time (let the optimal transmission time of no-directional antenna case be 1) and the average number of degrees of terminals [the average number of terminals: 10, the number of antennas: 3].

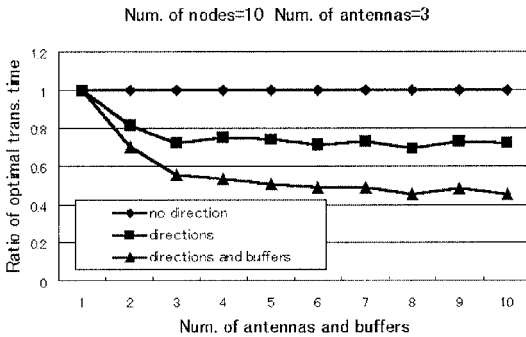


図5 無指向性アンテナの場合を1とした、アンテナ数と最適送信時間の比の関係 [局数10、次数の平均数3の場合]

Fig.5 Relationship between the ratio of optimal transmission time (let the optimal transmission time of no-directional antenna case be 1) and the number of antennas [the number of terminals: 10, the average number of degrees: 3].

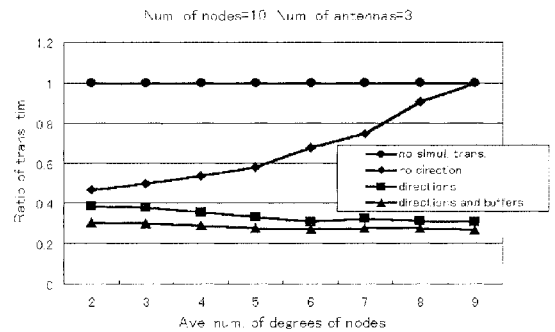


図7 最適送信計画を行わない場合を1とした、局の次数の平均数と最適送信時間の比の関係 [局数10、アンテナ数3の場合]

Fig.7 Relationship between the ratio of optimal transmission time (let the time of no simultaneous transmissions case be 1) and the average number of degrees of terminals [the average number of terminals: 10, the number of antennas: 3].

最適送信時間の相対比を求めたグラフである「無指向性アンテナ」の場合は、次数が大きくなるにつれて最適送信計画を行わない場合の送信時間に近づいていることが観察できる。これはグラフが密になるにつれて、並行送信できるリンクが減少するためである。更に興味深いことに「指向性アンテナ」及び「指向性アンテナと通信バッファ」の場合は、次数が上がるにつれて、緩やかではあるが最適送信時間の比が減少していることが観察できる。この実験結果より、指向性アンテナの導入は PRN が密になるほどその効果が顕著に現れることがわかる。

5. む す び

本論文では、PRN の各局に隣接する局数と同じ数の指向性アンテナを用いれば十分な伝送効率向上の効果が得られること、及び指向性アンテナの効果は特に密な PRN において表れることなどを示した。

1. で述べたように、あるメディアアクセス制御プロトコルの伝送効率を更に高めるために指向性アンテナを導入して、その効果を計算機シミュレーションなどによって実験的に確かめるとい研究はこれまでよく行われてきた。これに対して、本論文で得られた結果は特定のプロトコルを前提としていない。すなわち、最適送信時間という定量的な客観的尺度を導入し、この量の変化をアンテナ本数、局の次数をパラメータとして観察することで、純粋に指向性アンテナを導入する効果だけを評価することを行った。この意味で、本論文は指向性アンテナを導入する効果に対する明快な肯定的解を与えているといえる。

図 6 より、指向性アンテナだけの場合でも局の次数の平均数が大きくなるにつれて最適送信時間の比が小さくなっていることがわかり、図 1 (1), (2) の条件を緩めるだけでも、十分な並行送信が可能となるような状況を作り出すことができることが確認できる。

通信バッファを付加すると図 1 (1)~(6) すべてについてコンフリクトの条件を緩めることができる。図 6, 図 7 を見ると、局の次数の平均数が小さいときには通信バッファの付加によってかなりの改善ができるが、局の次数の平均数が大きくなる、すなわちネットワークの密度が大きくなると通信バッファを付加しても効果がそれほど現れなくなることがわかる。これは、通信バッファによって増えた並行送信可能なリンク数も、次数がある程度大きくなるとその効果が薄れてくるためである。

文 献

- [1] L. Kleinrock and F.A. Tobagi, "Packet switching in radio channels: Part I - Carrier sense multiple access modes and their throughput delay characteristics," IEEE Trans. Commun., vol.COM-23, no.12, pp.1400-1416, 1975.
 - [2] F.A. Tobagi and L. Kleinrock, "Packet switching in radio channels: Part II - The hidden terminal problem in carrier sense multiple-access and the busy-tone solution," IEEE Trans. Commun., vol.COM-23, no.12, pp.1417-1433, 1975.
 - [3] 椛本 介士, 福田 明, "アイドル信号多元接続 (ISMA) 方式による無線パケット通信システム," 信学論 (B), vol.J64-B, no.10, pp.1107-1114, Oct. 1981.
 - [4] 重野 寛, 大西祥浩, 横山光男, 松下 温, "隠れ端末問題を考慮した CTMA 方式の評価," 信学技報, SAT92-18 (IN92-17), 1992.
 - [5] 松野浩嗣, 戎井 徹, 安藤宏行, "CTMA 方式における中央局機能向上の効果," 情処学論, vol.39, no.4, pp.1049-1057, 1998.
 - [6] P. Karn, "MACA - A new channel access protocol for packet radio," ARRL/CRRL Amateur Radio Ninth Computer Networking Conf., pp.134-140, 1990.
 - [7] 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.
 - [8] T.S. Yum and K.W. Hung, "Design algorithms for multihop packet radio networks with multiple directional antennas stations," IEEE Trans. Commun., vol.40, no.11, pp.1716-1724, 1992.
 - [9] 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 (B-I), vol.J79-B-I, no.2, pp.41-50, Feb. 1996.
 - [10] 秋月 治, 鈴木紳吾, 六浦光一, 大下眞二郎, "指向性アンテナを用いた多並行送信を可能とする時分割マルチプルアクセス方式," 信学論 (B-I), vol.J80-B-I, no.10, pp.719-728, Oct. 1997.
 - [11] 南 拓也, 市村美佐子, 松野浩嗣, "パケット無線ネットワークにおける最適な並行送信計画を求めるアルゴリズム," 信学論 (B), vol.J82-B, no.6, pp.1151-1158, June 1999.
- (平成 11 年 8 月 16 日受付, 12 年 1 月 31 日再受付)

南 拓也 (正員)



平 9 山口大・理・物理卒。平 11 同大大学院修士課程了。同年日本電信電話 (株) 入社。現在, NTT 情報流通プラットフォーム研究所所属。在学時, 無線ネットワークの送信スケジューリングに関する研究に従事。現在, 広域ネットワークサービスプラットフォームの研究開発に従事。



有信 明彦

平 10 山口大・理・物理卒．平 12 同大大学院修士課程了．同年日本電気通信システム(株)入社．無線ネットワーク構築技術に関する研究に従事．



松野 浩嗣 (正員)

昭 57 山口大・工・電子卒．昭 59 同大大学院修士課程了．昭 59～62 山口短期大，昭 62～平 6 大島商船高専勤務．平 7 山口大・理・助教授．計算機ネットワーク構築技術に関する研究に従事．ゲノム解析への計算機応用にも興味をもつ．理博．情報処理学会，IEEE，ACM 各会員．