

パケット無線ネットワークにおける メディアアクセス制御プロトコルの効率について

松野浩嗣^{†,††}

パケット無線ネットワークを構築する際の重要な問題として隠れ端末問題があり、これに有効に対処する方法として中央局設置によるアプローチがある。まず、疎なネットワークに対しては中央局設置によるアプローチは有効ではないことを実験的に示す。他の対処方法として MACA が提案されている。次に隠れ端末がない状況下での CSMA と MACA の性能の比較を行い、低トラフィックの場合には CSMA の方がよい性能を示すことを理論解析によって示す。最後に主従関係のない分散環境において動作するパケット無線ネットワークシステムを指向して進行している PRUG96 および PRUG99 プロジェクトについて紹介する。

Efficiencies of Media Access Control Protocols on Packet Radio Network

HIROSHI MATSUNO^{†,††}

Hidden terminal problem is one of the most important problem in case of constructing a packet radio network. In order to cope with this problem, some researchers have been proposed media access control (MAC) protocols which can be considered to be based on same concept called central station approach. Firstly, we show that this central station approach is not effective on a network with a low density. As an another MAC protocol for the problem, MACA was proposed. We next compare the performances of CSMA and MACA analytically, and show that CSMA has better performance than MACA under the condition of low traffic. Finally, we introduce PRUG96 and PRUG99 projects which aim to realize truly distributed packet radio network system by using the efficient MAC protocol.

1. まえがき

現在、情報通信基盤の整備が国、地方公共団体、さらに民間においても着実に取り組まれている。このための特に Last One Mile を実現するためのインフラ技術として FTTH や ADSL の他に無線が有望視されている。無線の大きな利点は、言うまでもなくケーブルの敷設を行わなくてもよいことである。しかし、無線に特有の放送特性のため、採用するメディアアクセス制御プロトコル (MAC プロトコル) の優劣によってネットワーク全体のパフォーマンスが大きく影響する。このため、ALOHA, CSMA, CSMA/CD などの伝統的な MAC プロトコルを始めとして、これまでに多くの MAC プロトコルが提案されてきた^{6),13)}。

本稿ではまず 2. で、キャリアセンス型のプロトコルである CSMA, CSMA/CD が「パケット無線ネット

ワークは 1 つのチャンネルで構成するものである」という共通認識のもとで「どの時刻においても常に 1 つのパケットがこの 1 つのチャンネルに乗せられるように努力する」という思想で設計されていることを指摘する。

パケット無線ネットワークにおける重要な問題として隠れ端末問題があり、中央局を設置してこれに対処するプロトコルとして BTMA²⁾, ISMA⁴⁾, CTMA⁴⁾ などが提案されてきた。これらのプロトコルはキャリアセンス型のプロトコルの拡張型とみなすことができる。これらのプロトコルは CSMA と同等のスループット性能が得られるので、隠れ端末には有効に対応していると判断できる。3. ではネットワークの密度とスループットの関係について考察し、疎なネットワークにおいて普通の CSMA 方式は 1 を超えるスループットを得ることができることを実験的に示す。つまりこの状況下では隠れ端末に対する対策を取る必要がない。この結果はこの中央局設置のアプローチは万能ではないこと、すなわち疎なネットワークには適用しない方が得策であることを示している。

[†] 山口大学理学部

Faculty of Science, Yamaguchi University

^{††} Packet Radio User's Group

IEEE802.11¹³⁾では、衝突回避のために RTS と CTS という2つの短いパケットを使う方法を採用している。このオリジナルのアイデアは1990年に P.Karn が提案した MACA⁵⁾にある。4. では隠れ端末のない状況での MACA のスループットの理論式を導出し、文献¹⁾で導出されている CSMA の理論式との比較を行う。

現在の無線 LAN システムのほとんどは、HUB に対応する基地局との通信を行う形式の、いわば主従関係のある構成である。5. で紹介する PRUG96 および PRUG99 プロジェクトは主従関係のない真の分散環境でのネットワークシステムを指向しているため、メディアアクセス制御プロトコルとして MACA を採用することを選択肢の一つにあげている。本稿の結果は、その実装にむけての基礎的なデータと位置づけることができる。

2. スループットの定義と CSMA

これまでに考案された伝統的な MAC プロトコルとして、ALOHA, CSMA, CSMA/CD などがある¹¹⁾。これらのうち、ALOHA および CSMA はもともとパケット無線ネットワークのために考案されたコンテンション型のプロトコルである。これら二つは無線の一つのチャンネル上で動作するものであり、CSMA は ALOHA の改良型と位置づけられ、チャンネルの利用効率がより高いことがよく知られている。このチャンネルの利用効率を表す指標としてよく用いられているのが「スループット」である。

周波数帯域や変調方式などの物理的性質が定められたチャンネルとパケットの伝送速度が与えられたときに、端末局の集団からのパケットがこの伝送路をすきまなく埋め尽くすとき、スループットが1であると定義される。実際にはパケットの衝突などが起こるので、スループットの値は0から1の間をとる³⁾。

CSMA/CD は CSMA の拡張型であり、イーサネットなどのバス型ネットワークで動作するプロトコルとして有名である。衝突検出 (Collision Detection) が困難であるので、これをパケット無線上で実現することはできないと言ってよいが¹⁴⁾、このプロトコルもやはり一つのメディア上で動作することを前提にしているので、スループットの最大値は1である。

これらの ALOHA, CSMA, CSMA/CD という MAC プロトコルの発展に見られるように、これまでの歴史では「パケット無線ネットワークはひとつのチャンネル上で構築する」という共通認識のもとで、スループットを限りなく1に近づけるためのプロトコル

の工夫が行われてきた。

CSMA と CSMA/CD 方式の基本となっているのはキャリアセンス (Carrier Sense) 動作である。CSMA 方式では、自局に送信したいデータがある場合、まずメディアをチェックし、他に送信中の局がいなければパケットの送信を開始する。キャリアセンスがうまくいかなかった場合はパケットの衝突が起こる。このとき捕捉効果などによって高々ひとつのパケットの送信が成功することもあるが、全ての衝突したパケットが占めている時間は無駄になったものとして見なされる。

すなわち、キャリアセンスによるプロトコルの設計思想は「どの時刻においても常に1つのパケットがメディアに乗せられているように努力する」ことであると言ってよい。これらのキャリアセンスによるプロトコルでは、明らかに1を越えるスループットを得ることができないことに注意されたい。

3. 隠れ端末問題に対する中央局アプローチ

CSMA は、1975年に Kleinrock と Tobagi によって提案されたものであるが¹⁾、現在ではその拡張型の CSMA/CD がイーサネットなどのバス型 LAN のプロトコルとして広く使われている。バス型では、明らかに全ての局はお互いに見えるので、CSMA や CSMA/CD はうまく働く。

一方、パケット無線ネットワークでは、バス型 LAN のように全ての局がお互いに見えるという状況の方がまれである。お互いに見えない局がある場合パケットの衝突が起こりやすい状況となり、スループットが大きく低下することが知られている。これは隠れ端末問題 (Hidden Terminal Problem) と呼ばれている²⁾。これに対処するための様々な方式が提案されてきたが^{2), 4), 5), 7)~10), 12), 15)}、主な流れのひとつとして「中央局設置によるアプローチ」がある。

これは、図1のように全ての局を見渡せる中央局を設置して、送信中の局があるときにこの中央局がトーンなどによって、他の局へこのことを伝達することで隠れ端末に対処しようとするものである。CSMA が提案された論文のすぐあとに続く論文²⁾で、隠れ端末問題が指摘されているが、これに対処するためのプロトコルとして提案されている BTMA もこの中央局設置によるアプローチである。この他の同じアプローチによる方式として、ISMA⁴⁾及び CTMA^{8), 15)}などが提案されており、いずれも隠れ端末のある状況下においても隠れ端末がない場合の CSMA と遜色ないスループット性能が得られることが示されている。

これらの論文で示されているように中央局アプロー

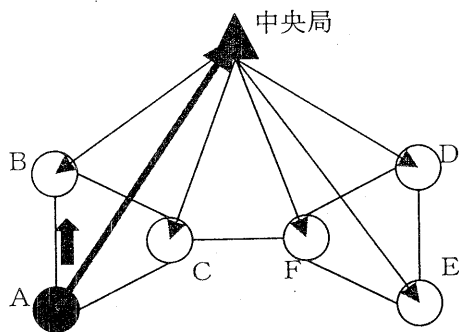


図 1 中央局による隠れ端末への対処

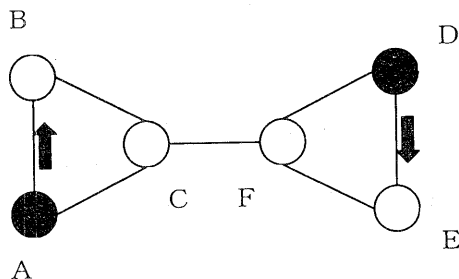


図 2 A→B と D→E は同時に送信できる

チによるプロトコルは隠れ端末問題には有効に対処できるが、以下に述べるように、より性能のよいプロトコルを得るための可能性を逃している。

図 1 は A 局から B 局へデータ送信が行われている間に D 局から E 局へのパケットが発生するが、中央局からのトーンによってその送信が抑制される状況を示している。しかし実際には図 2 のように、A 局から B 局への送信と同時に D 局から E 局への送信を行うことができる。この場合では、中央局を設置してしまったがために、同時に 2 つの送信が行える機会を逸してしまう結果となっている。

この状況がより客観的に観察できる実験結果を以下に示す。図 3 は異なる連結率（どのノード間にもエッジがあるとき値 1 をとり、どのノード間にもエッジがないとき値 0 をとる）の 50 ノードからなるグラフに対して、CSMA のトラフィックスループット特性

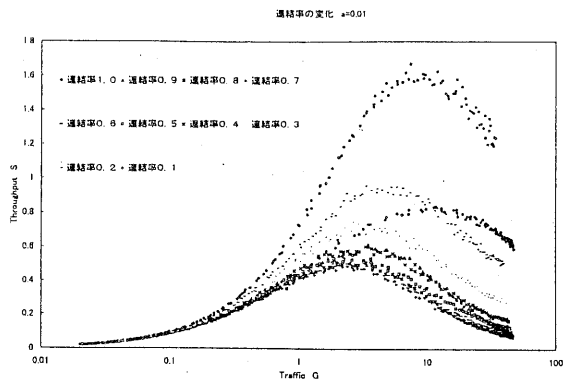


図 3 連結率に対するスループットの変化

を計算機シミュレーションによって求めたものである。正規化伝搬遅延時間は 0.01 とし、キャリアがセンスされた場合やパケットの衝突が起こった場合の再送信時間はランダムに設定している。

連結率が 1.0 の場合が隠れ端末が存在しない場合の CSMA の性能である。これは文献¹⁾中のスループットの理論式から得られたグラフとよく一致しており、シミュレーションの有効性を裏付けている。

連結率が 0.9 から 0.7 の間では、スループット性能が悪化していることが見て取れる。しかし、興味深いことに、連結率が 0.6 から再びスループット性能が向上し始め、連結率が 0.1 のときには 1 を越えるスループットが得られている。

これは、連結率が 1 から 0.7 の間では隠れ端末の影響により伝送効率が減少するものの、これより連結率が小さくなってくると図 3 に見るような並行して送信が行える箇所が多くなり、結果としてスループットが向上するためである。

中央局によるアプローチでは、どのような連結率に対しても連結率が 1.0 のグラフと同じグラフとなり、1 を越えるようなスループットを得ることはできない。

4. MACA

中央局設置によるアプローチとは別のアプローチによる MAC プロトコルとして MACA⁵⁾が提案されている。

4.1 MACA の概要

CSMA を使っているときに、1 を超えるスループットを得る機会を逃すのは中央局によるアプローチの場合だけではない。図 4 を見てみよう。局 A から局 B への電波の強さは、局 C から局 B のそれに比べて十

分強いとする。局 C から局 D へパケットが送信中のときに、局 B から局 A へのパケットが発生したとする。局 B は局 C からのパケットを漏れ聞くのでキャリアセンスによって局 A へのパケットの送信を控える。しかし実際には、局 B から局 A へのパケットは局 C から局 D へのパケットに影響を与えない。P.Karn は、文献⁵⁾でこれを「さらし端末問題 (exposed terminal problem)」と呼び、この問題及び隠れ端末問題を解決するためのプロトコルとして MACA を提案した。この名前は、CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) から“CS”を削除したものである。すなわち、隠れ端末やさらし端末などの問題はキャリアセンスによって生じるのであるから「いっそのことキャリアセンスを止めてしまおう」という発想である。

図 4 を例に MACA の動作を説明しよう。局 C から局 D へデータパケットが送られるとする。これに先だて、まず局 C は自局の ID と局 D の ID、およびこれから送るパケットの長さを含む RTS(Request To Send) という短いパケットを局 D へ送信する。局 D はこの RTS を受け取ると、直ちに CTS(Clear To Send) という短いパケットを局 C へ返す。この CTS パケットには自局すなわち局 D の ID と局 C の ID のほか、局 A からの RTS パケットに含まれていたデータパケットの長さが含まれている。

局 B は局 C から局 D への RTS を漏れ聞くことで局 C がこれから CTS を受け取ることを知り、この CTS を邪魔しないのに十分な時間だけ待機したあとに、局 B は局 A へ RTS を送る。これに応じて局 A は局 B へ CTS を返す。このとき局 C から局 D へのデータパケットが局 B に漏れ聞こえているが、局 A からの電波の方が強いので局 B はこの CTS を受信できる。このあと局 B から局 A へデータパケットが送られる。

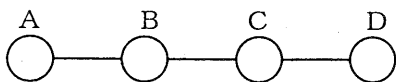


図 4 CSMA では B→A は可能なのにできない

すなわち、MACA では局 C から局 D へと局 B から局 A への 2 つのデータパケットの送信が同時に「並行して」行うことができることに注意されたい。

図 5 に、MACA のシーケンスダイアグラムを示す。

文献¹⁰⁾で MACA の改良版である MACAW が提案されている。この論文では DS(Data Sending), RRTS(Request to RTS) パケットなどの導入によってオリジナルの MACA に比べてより伝送効率が向上することが実験的に示されている。さらに MACA および MACAW は、IEEE802.11 の基本概念としても採用されている¹¹⁾。

4.2 MACA と CSMA の比較

CSMA と MACA の 2 つのプロトコルの性能比較を行ってみよう。もともと CSMA は隠れ端末の無い状況を前提にしているプロトコルであるので、これらの比較を正確に行うためには、MACA についても隠れ端末の無い状況、すなわち並行して 2 つ以上のパケットが送信できない状況での性能を調べる必要がある。

以上の MACA のスループット性能を表す式を導出しよう。以下の議論は文献¹⁾のスループット性能の解析と同様な技法によっているので、その概略のみを示す。まず、解析で用いるパラメータについて整理する。トラフィック G をパケット時間あたりの新しく生じたパケットと歳計閣されて生じたパケットの個数の和とする。これらのパケットの生起は、単位時間あたりに平均 G 回のポアソン分布に従うものとする。正規化伝搬遅延 α を、最大伝搬遅延時間をパケット時間長で割ったものとする。さらに以下の議論では、パケット時間長 T を単位時間として (すなわち $T = 1$ として) 考える。

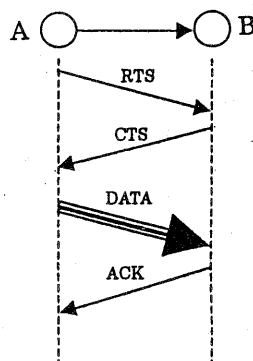


図 5 MACA のシーケンス

RTS を受け取った端末局がこれを認識して、CTS が出すまでの時間を x とする。隠れ端末のない状況を考えているので、この時間 x 内にどの端末からもパケットが送信されないときかつそのときに限り図 5 のシーケンスが全て成功することに注意されたい。

データパケットの時間長を 1 としているので、データパケットの時間長の期待値 \bar{U} は、ある端末局に RTS パケットが到着してからこれに答える CTS パケットが出ていくまでの時間 x の間にどの端末局からもパケットが送信されない確率に一致するので、これは

$$\bar{U} = e^{-xG}$$

で与えられる。

すべての端末局が送信パケットを持っていない時間を空き区間 (idle period) と呼び、これ以外の時間を話中区間 (busy period) と呼ぶ。話中区間の期待値を \bar{B} 、空き区間の期待値を \bar{I} とすると、スループット S は、

$$S = \frac{\bar{U}}{\bar{B} + \bar{I}}$$

で与えられる。

P_{RTS0} を RTS パケットの送信が成功する確率とすると、この確率は時間 x の間にどの端末局も RTS を送信しない確率に等しいから、

$$P_{RTS0} = e^{-xG}$$

となる。このときの話中区間の時間長を B_{RTS0} とすると、

$$B_{RTS0} = 4a + c + d + x + 1$$

となる。ここで定数 c (d) は、CTS (データパケット) が到着してからデータパケット (ACK パケット) が出ていくまでの時間である。一方、RTS パケットの送信が見送られる確率は

$$P_{RTS1} = 1 - P_{RTS0}$$

で与えられる。時間 x の間にいくつかの端末局からの RTS パケットが送信された状況を考える。図 6 に示すように、 $Y (< x)$ を最初の端末局が RTS を送信してから最後の端末局が RTS を送信するまでの時間とし、 \bar{Y} で Y の期待値を表すとする。

ある端末局が、RTS パケットを送信してから一定の時間の間に CTS パケットが帰ってこなかった場合はその端末局はもう一度 RTS を送信するが、図 6 中の定数 b がその時間である。この場合、話中区間の期待値は

$$B_{RTS1} = \bar{Y} + b$$

で与えられる。 Y の分布関数 $F_Y(y)$ は

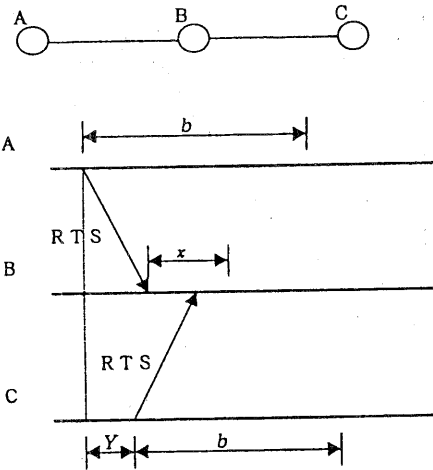


図 6 RTS の競争

$$\begin{aligned} F_Y(y) &\triangleq \Pr\{Y < y\} \\ &= \Pr\{a - z \text{ の時間の間に RTS パケット} \\ &\quad \text{の到着が起こらない}\} \\ &= e^{-G(x-y)}, (y \geq x). \end{aligned}$$

で与えられるので、 Y の期待値は

$$\bar{Y} = x - \frac{1}{G}(1 - e^{-xG})$$

となる。したがって、RTS パケットの送信が見送られる場合の話中区間の期待値は

$$B_{RTS1} = b + x - \frac{1}{G}(1 - e^{-xG})$$

で与えられるので、話中区間全体の期待値 \bar{B} はとなる。以上のことと、空き区間の期待値が $\bar{I} = \frac{1}{G}$ で与えられることから、次のスループットの式が得られる。

$$S = \frac{Ge^{-xG}}{G\{(4a + c + d - b + 1)e^{-xG} + b + x\} - (1 - e^{-xG})^2 + 1}$$

ところで、CSMA のスループットの式が

$$S = \frac{Ge^{-aG}}{G(1 + 2a) + e^{-aG}}$$

が文献¹⁾に与えられているので、以下ではこれと導出した MACA の式によって CSMA と MACA の性能の比較を行ってみよう。正規化伝搬遅延 a と RTS を受け取ってから CTS が出るまでの時間 x の 2 つがこれらの式の変数であるので、この 2 つの変数の違いによる変化を観察してみる。図 7 から図 10 の 4 つの図がその結果である。

図 7 は、 $a = 0.001$ かつ $x = 0.05$ の場合である。高

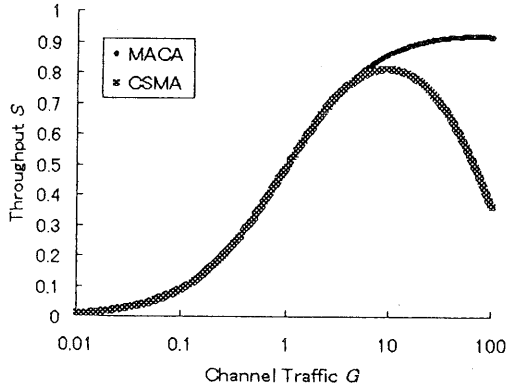


図7 $\alpha = 0.01, x = 0.005$

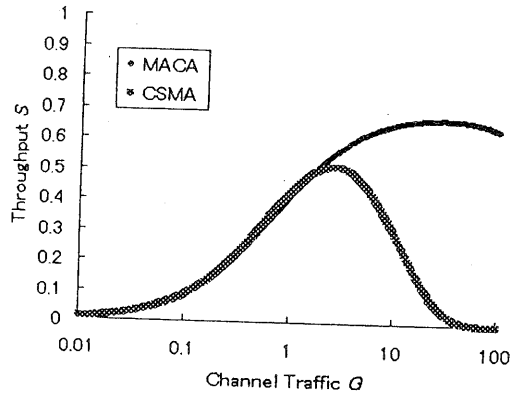


図9 $\alpha = 0.1, x = 0.005$

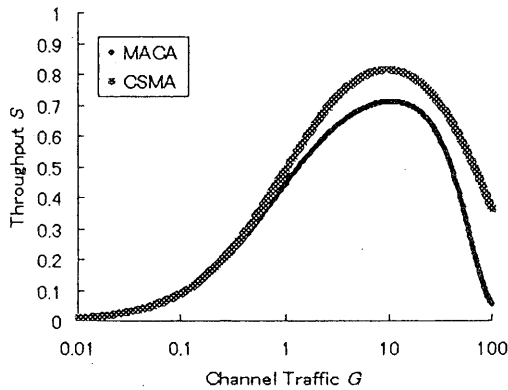


図8 $\alpha = 0.01, x = 0.01$

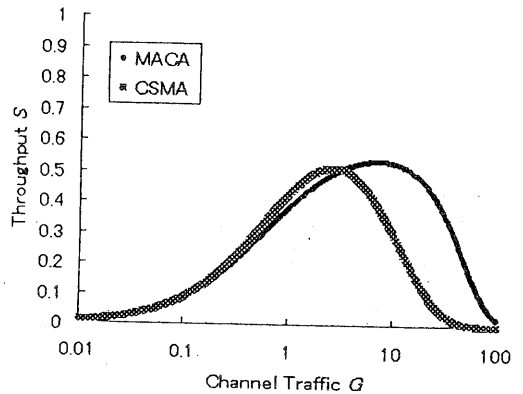


図10 $\alpha = 0.1, x = 0.01$

トラフィック時に CSMA ではスループットが減少しているが、MACA ではそのような現象が起らない。これは、CSMA でパケットの衝突が起こった場合は少なくとも一つのパケット長の時間（この場合は1）が失われるが、MACA ではデータパケットの送出にさきがけて RTS と CTS のやりとりをしているので、衝突が起こったとしても失われる時間がこのトーンのやりとりの時間で済むからである。

図7と図8を比較すると、CSMA は変わっていないが MACA のスループットが悪化していることが分かる。変数 x は CSMA には関係なく MACA だけに関係するものである。このような結果になるのであるが、変数 x は MACA の動作を司るネットワーク装置の性能を反映していると考えられる。したがって、隠れ端末がない状況においても MACA は CSMA よりもすぐれた性能をもつためには、ネットワーク装置の

性能が十分によくなければならない。

図7と図9の比較からは、MACA の方が CSMA よりも伝搬遅延時間に対して敏感でないことが読みとれる。

図10は $\alpha = 0.1$ および $x = 0.01$ の場合であるが、この場合は CSMA のスループットのピークの方が MACA のそれよりも低トラフィック時に位置している。従って、2つの変数の両方があまりよい値でないときには CSMA の方が MACA よりもよい性能をもつと言ってよい。また、図8と図9にも言えることであるが、低トラフィックのときでは CSMA の方が MACA よりも性能が勝っている。これは低トラフィック時にはもともと衝突があまり起らないので、MACA のトーンのやりとり時間が余分に必要となっているからである。

伝搬遅延時間には CSMA や MACA を動作を司る

ネットワーク装置の動作時間も含まれているので、変数 a もネットワーク装置の性能を表すパラメータであると考えてよい。以上のことから、これらの2つのプロトコルの性能は、ネットワーク装置の性能によって幾分かの違いが出るものの、隠れ端末がない状況下においては大きな差はない。このようなコンテンション方式の MAC プロトコルは、一般にトラフィックの少ないネットワークで使われることを考慮すれば、隠れ端末のない状況では CSMA の方が若干であるが有利であると言える。

5. PRUG96&99 プロジェクト

現在市場に出回っている無線 LAN システムは、ノートパソコンなどに無線用カードを差し、このカードと見通しのよい所に置いた基地局との通信を行うものである。これはツイストペア線などの代わりに電波を使う、いわば主従関係のあるネットワーク構成である。本稿で考察している CSMA や MACA などは、このような主従関係のあるものではなく、どの端末局も対等な分散環境のネットワーク上で動作させることを念頭に設計されたものである。端末局間のルーティング手法などについても、この特徴を生かした方式をとることが望ましい。

このような分散環境のネットワーク上で実用的なシステムを開発しているプロジェクトとして PRUG96 がある。

PRUG(Packet Radio User's Group) は、アマチュア無線でのコンピュータ通信を趣味とする人たちのグループであるが、現在はそれにとどまらずインターネットに関係する幅広い活動を行っている²¹⁾。

図 11 に、PRUG96 プロジェクトによって開発されたシステムの構成図を示す。これは、WWW クライアントが無線を介して WWW サーバにアクセスする様子を示している。SS トランシーバは 2.4GHz 帯を用いたスペクトラム拡散による装置であり、もちろん正式なアマチュア無線の免許を受けて運用されている¹⁷⁾。

IPSM(Internet Protocol Shield Machine)-ZZ は、LAN 上を流れるイーサネット packets を拾って無線側にあうフォーマットの packets に変換して無線ポートへ送出したり、その逆を行う装置であり、TMPZ84C015 を CPU をもつ超小型ワンボードマイコン AKI80 に NE2000 イーサネットカード及びフレーム同期検出回路(無線側)をインターフェイスした構成になっている。

SS トランシーバと IPSM を同一を筐体に格納して、

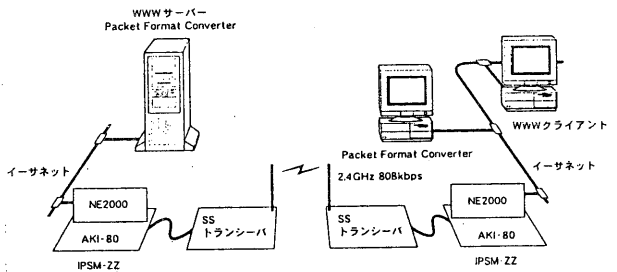


図 11 PRUG96 システム (文献¹⁷⁾より引用)

アンテナ直下に取り付けることで、無線機からアンテナまでの同軸ケーブル内のロスを低減することができる。

Packet Format Converter は FreeBSD または Linux を OS とするコンピュータであり、WWW クライアントや WWW サーバと TCP/IP によって通信を行い、誤り訂正、フレーム組み立て、ルーティングなどの作業を行い、IPSM とのデータの橋渡しをする。このような構成をとることは実用的とは思えないかもしれないが、システム開発上の自由度が大きく、UNIX 上の豊富なツールが使えるので効率の良い開発が行える。

PRUG96 システムではリンク層の経路制御手法として独自に開発された APFS(Asymmetric Path Finding System) を用いている²⁰⁾。このシステムは、耐故障性や分散管理のしやすさを考慮して全てのノードが同じ機能をもつ、すなわち特別な基地局が存在しないネットワークを前提としており、文献²⁰⁾にその有用性に関する報告がある。

PRUG96 システムの開発フェーズは終了し、新たに PRUG99 プロジェクトが開始されている。PRUG96 では MAC プロトコルとして CSMA を用いているが、PRUG99 システムではより効率のよい MAC プロトコルを開発することが目標の一つとなっており、その一つとして MACA が候補にあげられている。

6. あとがき

本稿ではまず、CSMA や CSMA/CD などのキャリアアセスによる MAC プロトコルを用いた場合に起こる隠れ端末問題を解決するための一つの手法として取られてきた中央局設置によるアプローチについて述

べ、疎な結合のネットワークにおいてはこのアプローチは逆にスループット1を越える高効率な伝送の機会を逃してしまう可能性があることを指摘した。

次に隠れ端末のない状況での MACA のスループット性能を表す式を導出して CSMA との比較を行い、低トラフィック時には CSMA の方が有利であることを示した。隠れ端末がない場合には、MACA が CSMA に比べて高いスループットをもつことが予想され、現在いくつかの結果を得ているが、これについてはまた稿を改めて議論したい。

さらに、MACA にさらに改良を加えた MACAW^{10),19)} のパフォーマンスについて同様な考察を行うことも今後の課題である。

謝辞 日頃ご議論頂く、Packet Radio User's Group の各氏に感謝する。

参 考 文 献

- 1) Kleinrock, L. and Tobagi, F.A.: 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) Tobagi, F.A. and Kleinrock, L.: 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) Tobagi, F.A., Gerla, M., Peebles, R.W., and Manning, E.G.: Modeling and measurement techniques in packet radio communication networks, *Proc. of IEEE*, Vol.66, No.11, pp.1423-1447, 1978.
- 4) 椋本介士, 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, 電子通信学会論文誌, Vol.J64-B; No.10, pp.1107-1114 (1981).
- 5) Karn, P.: MACA - A new channel access protocol for packet radio, *ARRL/CRRL Amateur Radio Ninth Computer Networking Conf.*, pp.134-140 (1990).
- 6) 秦正人, 山内雪路編: パケット無線ネットワーク, CQ 出版社 (1990).
- 7) 石田朗, 六浦光一, 山本幹, 岡田博美, 手塚慶一: 隠れ端末を考慮した CSMA パケット無線網における時変出力制御の基本特性, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J74-B-I, No.9, pp.707-710 (1991).
- 8) 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, 電子情報通信学会技術研究報告, SAT92-18(IN92-17) (1992).
- 9) Yum, T.S. and Hung, K.W.: Design algorithms for multihop packet radio networks with multiple directional antennas station, *IEEE Trans. Commun.*, Vol.40, No.11, pp.1716-1724, (1992).
- 10) Bharghavan, V., Demers, A., Shenker, S., and Zhang, L.: MACAW: A media access protocol for wireless LANs, *Proc. SIGCOMM'94 Conf.*, ACM, pp.212-225 (1994).
- 11) Tanenbaum, A. S.: Computer networks (third edition), *Prentice-Hall Inc.* (1996).
- 12) 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, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J79-B-I, No.2, pp.41-50 (1996).
- 13) 松下温, 中川正雄編著: ワイヤレス LAN アーキテクチャ, 共立出版, (1996).
- 14) 山内雪路: モバイルコンピュータのデータ通信, 東京電機大学出版局, 1998.
- 15) 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, 情報処理学会論文誌, Vol.39, No.4, pp.1049-1057 (1998).
- 16) Kawamura, I., Ishinaka, H., and Matsuno, H.: Back to the Packet Radio with MACA, *Proc. ARRL and TAPR Diginal Communications Conf.*, pp.53-57, 1998.
- 17) 真野浩: スペクトラム拡散データ伝送と応用, 無線データ伝送とインターネット, pp.16-24, CQ 出版社, (1998).
- 18) 船田悟史: IPSM(Internet Protocol Shield Machine) の開発, 無線データ伝送とインターネット, pp.41-51, CQ 出版社, (1998).
- 19) 松野浩嗣, 河村育子: パケット無線の媒体アクセス方式 "MACA", 無線データ伝送とインターネット, pp.64-71, CQ 出版社, (1998).
- 20) 菅野伸一: 無線回線用非対称適応経路制御システム APFS, インターネットコンファレンス'98 論文集, 日本ソフトウェア科学会研究会資料シリーズ No.9, pp.107-116, (1998).
- 21) <http://www.prug.or.jp/>