

Dynamic TDMA アルゴリズムの研究

真野 浩 / JJ1CEI

1998/ 8/22

あらまし アマチュア無線のような一元的な管理に適さない無線通信ネットワークを構成する場合、隠れ端末によるパケットの衝突が全体のスループットを著しく低下させる問題がある。特に利用形態としてインターネット等の有線系との接続を目的とする場合には、G/W局側への呼の集中により、衝突の発生頻度が高くなる。一方で、高速通信を行うためには、ある程度の周波数帯域幅が必要なことから、より高い周波数帯での無線運用が必要となり、電波伝播特性からも隠れ端末局が生じる頻度が高くなる。

そこで、TDMAアルゴリズムに、各無線局が独自に時刻同期を行う手法、タイムスロットを動的に割り当てる手法、無線空間の使用状況を交換する手法、伝送容量に応じて割り当てるスロット数を動的に切り替える手法を取り入れることで、特定の基地局を設けずに、隠れ端末問題の解消とスループットの保証をする、動的なTDMAアルゴリズムの可能性を示す。

1. はじめに

スペクトラム拡散通信を用いた無線高速データ通信ネットワークの実運用レベルにおける実験がPRUG96¹によって開始された。

実運用においては、閉じたネットワークの接続よりも、インターネット、イントラネット等の有線系ネットワークへのアクセス手段として、無線ネットワークを用いることが目的となる場合が多くみられる。ここでは図1 スター型ネットワーク構成に示すように、複数の無線局のうち、有線系へのG/W機能を持つ局を中心とした、ネットワーク構成の例が多くなる。

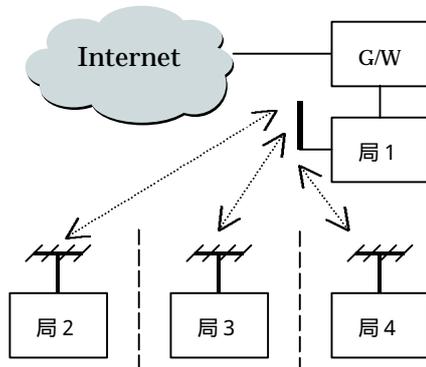


図1 スター型ネットワーク構成

現在用いている2.4GHzの周波数では、その電波伝播特性から、広い範囲で互いが接続される環境を得ることは難しく、各端末同士が隠れ端末となる場合が多く発生している。

このような構成では、非同期的に発生される各端末からの送信電波は、G/W局に集中するため、G/W局側での無線パケットの衝突が発生する。

この衝突によるパケットの喪失は、上位層のプロトコルとしてTCP/IPを用いた場合、回線の遅延として捉えられることから、TCPの輻輳制御ともあいまって著しくシステムのスループットを劣化させることになる。

このような問題を回避し、多くの端末局に対して一定の速度と遅延時間による回線を提供するアルゴリズムとして、TDMAやFDMAによる多重化方式が存在し、移動体通信などでは広く用いられているが、これらの多くは一元的な無線局の管理統制の上においてのみ有効であり、システム規模が大きくなってしまふ。特に、各無線局の運用が自主的に管理されるアマチュア無線局によってネットワークを構成する場合に適している多重化技術は少ない。

一方で、スペクトラム拡散通信によるデータ通信では、無線回線の速度が十分に速いこと、データ復調の為のオーバーヘッドが少ないことなどの、従来

¹ PRUG(Packet Radio User's Group)の有志による高速データ通信の実験プロジェクト、東京工業大学を中心とした地区で5~6局によるテストが行われている。

の無線通信路とは異なる特長がある。

そこで、これらの無線層（物理層）の特長を生かし、TDMAアルゴリズムに、以下の手法を組み込むことによって、特定の基地局を設けずに、隠れ端末問題の解消とスループットの保証をする、動的なTDMAアルゴリズムの可能性を示す。

- 時刻同期
各無線局が独自に時刻同期を行う手法
- 収容局数の改善
タイムスロットを動的に割り当てる手法
- 隠れ端末問題の解消
無線空間の使用状況を交換し、隠れ端末問題を解消する手法
- 伝送効率の改善
伝送容量に応じて割り当てるスロット数を動的に切り替え、伝送効率を改善する手法

2. 原理

a. 時刻同期方式

TDMA は、複数の局が時間スロットで無線空間の共用を行う方式であり、何らかの手法で、各無線局間で時刻同期を取る必要がある。

いま、図 2 n 局による TDMA 構成に示すように n 局からなる無線局で 1 つの電波空間を共用し、TDMA を行う場合を考える。

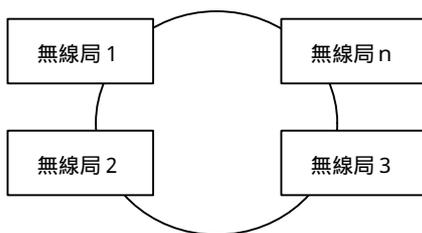


図 2 n 局による TDMA 構成

この構成において、図 3 n 局による動作タイミングに示すようにタイムスロット T_s 毎に各無線局が電波を送信することとする。

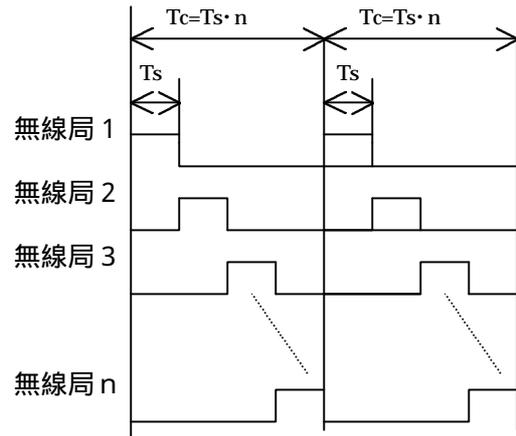


図 3 n 局による動作タイミング

いま、タイムスロットの数、すなわち多重化する局数 n と、タイムスロットの長さ T_s が予め取り決められており、各無線局は予め決められたタイムスロットを使用することとする。ここで、 $T_c = T_s \cdot n$ をサイクルタイムという。

このような状態において、以下の手順を用いることによって、互いのタイムスロットの同期を取ることが可能となる。

- 1) 各無線局は、予め 1 ~ n までの範囲で、重複しないように自身のスロット番号を決定しておく。
- 2) 送信をしようとする無線局は、少なくともサイクルタイム $T_c = T_s \cdot n$ の時間以上、受信動作を行う。
- 3) 上記の受信期間において、1 局も他の局を受信出来ない場合には、送信データに自身のスロット番号を付加して、任意のタイミングで送信を開始する。
- 4) 上記受信により、他の送信局を受信した場合には、その送信開始点の時刻 T_{cd} とその局のスロット番号から以下のように、自身の使用スロット開始時刻 T_{ts} を求めて、その時刻に送信を行う。
自身のスロット番号 : N_t
受信したスロット番号 : N_r
受信スロットの開始時刻 : T_{rs}
 $N_t > N_r$: $T_{ts} = (N_r - N_t) \times T_s + T_{rs}$
 $N_t < N_r$: $T_{ts} = \{(N_{max} - N_r) + N_t\} \times T_s + T_{rs}$
- 5) 以降は、常に上記の方式により自局の送信タイミングを計算し、調整する。

この条件では、1局も無線空間を使用していない状態から、複数の無線局が同時に上記のシーケンスを開始すると、衝突を回避することは出来ない。

そこで、送信時にキャリアセンスを併用して、衝突回避を行う。ただし、この場合には、一度スロットを確保してしまえば、以降の衝突が無くなる。

b. 収容局数の改善

前述の方式においては、無線局とタイムスロットを一意的に関係つけているため、共有空間における収容局数が固定され、無線空間も固定されてしまう。そこで、各無線局が使用するタイムスロットを固定化せずに動的に割り当てることにより、これらの問題を回避する手順を以下に示す。

- 1) 送信しようとする無線局は、少なくともサイクルタイムの間だけ、受信を行う。
- 2) 上記受信により、1局も送信している局がない場合には、自身のスロット番号 $N_t=1$ として、この情報を添付し、任意のタイミングで送信を開始する。
- 3) 上記受信により、他の送信局を受信した場合には、そのスロット番号 N_{rs} を記憶する。
- 4) 3)の動作をサイクルタイム以上行うことにより、空きスロットの番号を得る。
- 5) 求められた空きスロット番号を自身のスロット番号 N_{tx} に割り当てる。
- 6) 上記により選られたスロット番号を基に固定スロット方式と同様に自身の送信開始時刻を求めて送信を行う。

この方法では、自局以外の局が同様の手順により同一のタイムスロットを確保した場合、衝突がおこる。

そこで、送信時にキャリアセンスを併用して、衝突回避を行い、スロットの確保に失敗した場合には、上記シーケンスを再度行う。ただし、この場合も、一度スロットを確保してしまえば、以降の衝突が無くなる。

c. 隠れ端末の解消

前述の時刻同期方式、収容局数の改善手法とも、全ての無線局が互いに通信できることを条件としている。そこでさらに、送信するデータに各無線局が受信しているスロット番号の情報を付加することによって、システム内に直接通信することが出来ない無線局が存在したとしても、同様のTDMAが可能となることを示す。

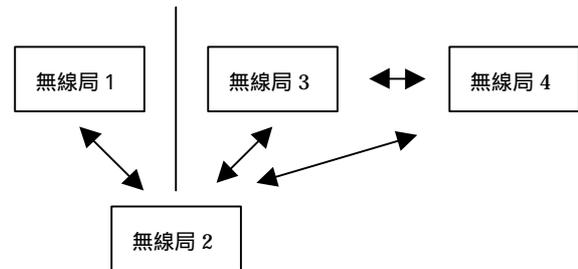


図 4 隠れ端末の存在する構成

今、図 4 隠れ端末の存在する構成に示すような無線局の構成を考える。

この構成において、無線局 1 と無線局 3,4 は互いに通信できない。無線局 2 は無線局 1,3,4 と通信が可能である。

この状況において前述の方式を採用した場合、無線局 3,4 の送信が行われていることを無線局 1 は検出できない。従って、無線局 1 は、任意のタイミングで送信を開始し、無線局 2 と通信を行おうとする。この結果、無線局 2 においては、無線局 1 の送信と無線局 3,4 の送信が重複し衝突を起こす可能性が生じる。

このような状態においても、各無線局が送信するデータに、以下の情報を付加することによって、隠れ端末問題を回避することが出来る。

1) 1次 map :

自身が直接受信可能な使用中スロットのリスト

2) 2次 map :

自身が直接受信している局の 1次 map の総和リスト

図 5 初期状態において、丸が無線局、丸の中の数字が使用しているタイムスロットの番号、矢印が通信の可否を示している。

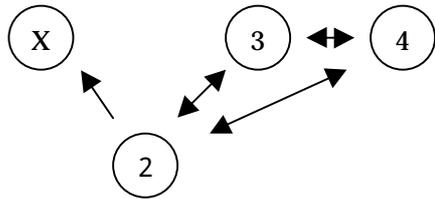


図 5 初期状態

この状態で、無線局 X が無線局 2 に対して、送信を行う場合を考える。

まず、無線局 X は、最初の受信サイクルにおいて、以下の map 情報を得ることができる。

1 次 map={2},

2 次 map={3,4} 2 の 1 次 map

ここで、自身が影響を与えるであろう使用中のタイムスロットは、1 次 map と 2 次 map の総和によって示される。

すなわち、使用中のタイムスロット、

map={2}+{3,4}={2,3,4}

を知ることが出来る。

この結果、仮にシステムとしての最大タイムスロット数が 6 であるならば、無線局 X は、タイムスロット 1,5,6 のいずれかを使用し、送信を開始することが出来る。

いま、タイムスロット 1 を使用したとすると、図 5 初期状態 は、図 6 タイムスロット取得後のように変化する。

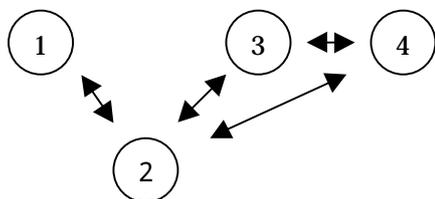


図 6 タイムスロット取得後

この結果、全ての局は互いに重複しないタイムスロットを取得することができる。

次に、同様の手順によりタイムスロット 4 を使用している局のみを受信できる無線局 Y がこの構成に加わる場合を考える。

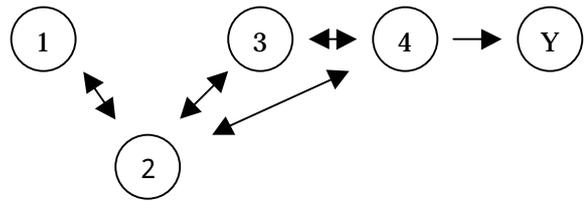


図 7 Y 局の追加

図 7 Y 局の追加に示す状態で、Y 局の取得する map 情報は以下ようになる。

1 次 map={4},

2 次 map={2,3} 4 の 1 次 map

使用中 map={2,3,4}

この結果、Y 局は前述の X 局同様に、タイムスロット 1,5,6 を使用することが出来る。

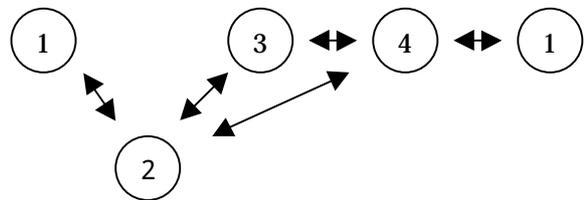


図 8 Y 局がタイムスロット 1 を取得

この状態では、図 8 Y 局がタイムスロット 1 を取得に示すように、システムの中で同じタイムスロットを使用する局が複数存在することになる。

この構成において二つのタイムスロット 1 を使用する局が、同時に受信できる局は存在しないため、システムは安定した状態を保つことが可能である。

しかしながら、図 9 不安定な構成に示すように、これら二つの局を同時に受信することが可能な局 Z にとっては、タイムスロット 1 において衝突が発生し、システムの安定を失うことになる。

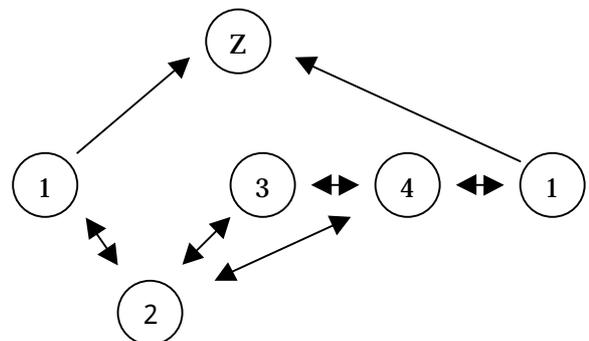


図 9 不安定な構成

そこで、交換する map 情報の次数を増やすことを考えてみる。

すなわち、

1) 1次 map :

自身が直接受信可能な使用中スロットのリスト

2) 2次 map :

自身が直接受信している局の1次 map の総和リスト

3) 3次 map :

自身が直接受信している局の2次 map の総和リストとし、これらの総和から使用中のタイムスロットを求めることとする。

図 5~図 8は、3次 map までを用いると、図 11 次数を3次にした時の変化のようになり、安定な状態を保つことができる。

ここで、これらの図が示す矢印を各無線局の伝播エリアとして円で示してモデル化し、互いに接する円は、通信が可能である状態を示すようにしてみる。

図 9と図 11をそれぞれ図 10 伝播エリアのモデルのように表現できる。

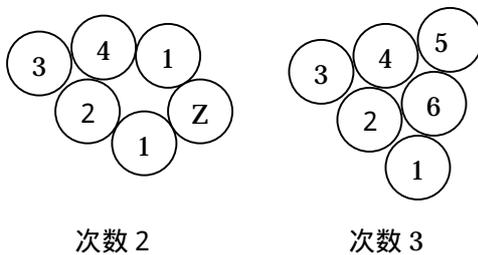


図 10 伝播エリアのモデル

この図は、実際の無線伝播特性などを配慮して、この次数を適当な値にすることで、安定した構成が確保できることを示している。

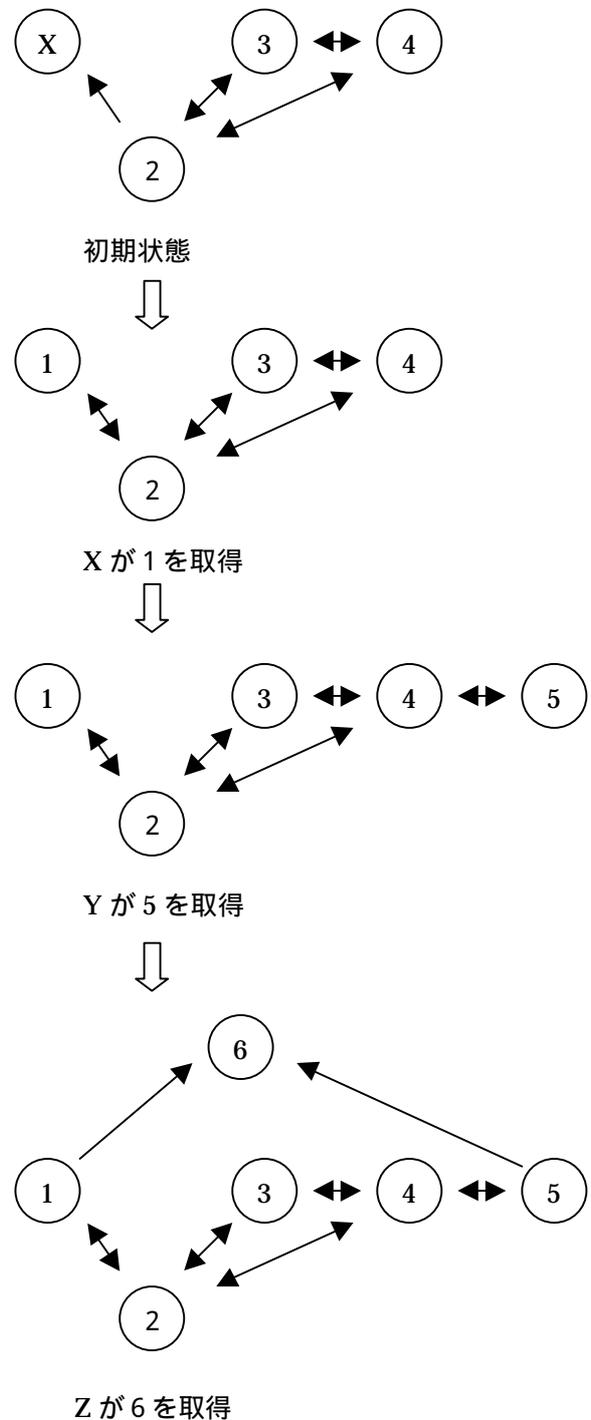


図 11 次数を3次にした時の変化

前述のように交換する map の次数を上げたとしても、次のような状態では隠れ端末問題が発生する。

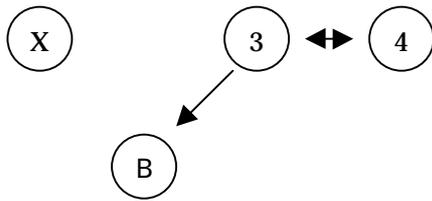


図 12 待機局へのアクセス

図 12 待機局へのアクセスに示すような状態では、次のように隠れ端末問題が存在する。

この図において、B の局は、何ら送信を行っていない。この為、B の局にアクセスしようとしている無線局 X は、自身以外に無線空間を使用している局が存在しないと判断し、任意のタイミングで送信を開始する。

この結果、B の局側においては、タイムスロット 3 の局と X の局の送信が衝突をおこし、B の局へのアクセスが認識されない状態となる。

そこで、図 12 のように受信できる局が一局も存在しない状態で、新たにネットワークへの接続を行う手順を図 13 起動シーケンスに沿って以下に示す。

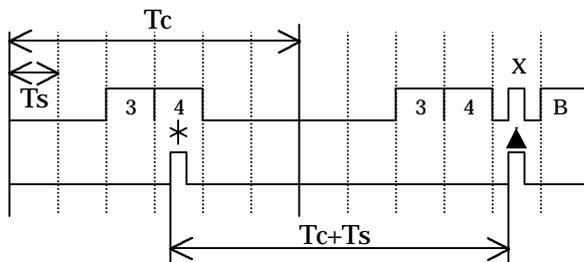


図 13 起動シーケンス

無線局 X は、タイムスロットに対して、十分に短い長さ T_{req} のパケット = REQ パケットを任意のタイミングで送信する。

これに対して、無線局 B は、以下の条件の場合に、無線局 3,4 と同期して取得した スロットで map 情報も含めて応答する。

- 1) 無線局 X のパケットが受信出来た、すなわち無線局 3,4 と X からのパケットが衝突していない。
- 2) すくなくとも、無線局 3,4 からの map 情報により、自局と X 局の 2 つのスロットが空いている。

これ以降、X 局は B 局の応答に同期して、タイムスロットを確保することができる。

一方無線局 X は、自局の送信後 1 サイクルタイム受信しても、B 局からの応答が無い場合には、直前の REQ パケットの送信開始時刻に対し T_c+T_s 後に、再度 REQ パケットを送信する。

以上の動作をタイムスロットの数 n 回繰り返し替えれば、タイムスロットの確保が出来る。

但し、最初の REQ パケットの送信時間が、タイムスロットの境界にまだがっており、かつ 2 以上の連続空きスロットが無い場合には、空きスロットがあるにも関わらず、スロット確保が出来ない。そこで、 n 回繰り返してもタイムスロットの確保が出来ない時は、送出時刻を T_{req} だけ遅らせて上記のシーケンスを繰り返し替え。

最終的に $2 \times n$ 回繰り返しても、タイムスロットが確保できない場合には、全てのタイムスロットが使用中か、B 局との通信が成立しない場合である。

図 13 起動シーケンスの例では、結果的に B 局は、タイムスロット 6 を取得することになる。

このシーケンスによる衝突の回数は、スロット数 n であり、ネットワーク上の各無線局側からみれば、それぞれ一回だけである。

しかしながら、このようなシーケンスは、図 1 スター型ネットワーク構成に示される状況においては、特に必要とならない。

なぜならば、B 局が受信状態にありつづけるということは、他の局が 1 局も B 局と通信をしていないことに他ならないからである。

さらに、Prug96 システムの $mavid^2$ では、TCP/IP の経路制御を動的に行うため、定期的に各無線局が経路情報パケットを送出している。従って、無線ネットワークに接続するには、この経路情報の取得が必須であることから、この待機局へのアクセス状態は、無線局のシステム起動時に限定されることになる。

² JN1JDZ 菅野氏の開発した、経路制御システムで、一定の間隔で無線ネットワーク上の経路の品質情報などを交換し、動的な経路制御を行っている。

d. 伝送効率の改善

TDMA を行う場合には、多重化数に応じて各無線局に対する伝送速度が低くなることは明らかである。

物理層の伝送速度 V_i bit/Sec を持つトランシーバを用いて、最大スロット数 n の TDMA を行うことを考える。

この時、各無線局に与えられる実質伝送速度 V_r bit/Sec の理論限界は、送受信切り替え時間等のオーバーヘッド T_h Sec と 1 タイムスロットの時間 T_s から、次のように求めることができる。

$$V_r = V_i \cdot (T_s - T_h) / n \cdot T_s \text{ [bit/Sec]} \quad \text{式 1}$$

また、この時の伝播遅延を除くシステムの遅延時間 T_d は、

$$T_d = n \cdot T_s \text{ [Sec]} \quad \text{式 2}$$

となる。

この式からも明らかなように、各端末局に与えられる実質的な伝送速度は、多重化するスロット数によって大きく決定される。

ここで、前述のような動的なタイムスロットの割り当てを行う場合には、常時全ての端末局が無線空間を使用しているわけではない。

そこで、取得するタイムスロットの数を、その時の空きスロットの状況に合わせて、増減することにより、最大伝送速度を上げることが可能となる。

収容局数の改善、隠れ端末の解消に示した方式で、各無線局は、使用するタイムスロット番号及び他のタイムスロットの使用状況を交換することで、任意のタイムスロットを取得している。

例えば、図 7 に示されたような状況で、最大タイムスロットを n とすると、 Y 局はタイムスロット 2, 3, 4 以外のタイムスロットを使用することができる。すなわち、タイムスロット 1 と $5 \sim n$ までを使用できることになる。

このようなタイムスロットの空きに対して、最大いくつまでの使用を許可するかは、システムの設計要素となる。

ここで、タイムスロットの空き状況には、以下の

ような二つのパターンが起こりうる。

- 1) 連続してタイムスロットが空いている状態
- 2) 離散的にタイムスロットが空いている状態

このうち、連続してタイムスロットが空いている状態の時には、連続した n 個のスロットを一つの連続した時間として、使用することにより送受信切り替えのためのオーバーヘッドを減らし、より伝送効率を改善することが可能となる。

この場合、タイムスロット番号、map 情報の他に、連続して使用しているタイムスロット数を送信データに付加することが必要となる。

実際には、全タイムスロット中、最大何スロットまでの使用を許可するか、連続スロットのサイズをいくつまでにするかなどが、システム全体での設計事項となる。

3. 実装

原理に示した各手法を現在の Prug96 システムで使用されているスペクトラム拡散通信無線機 ³Rz95001A を用いて実装する場合の例を示す。

そこで、この無線機を用いて、図 14 実装例に示すような運用形態を想定し、実装の検証をおこなう。

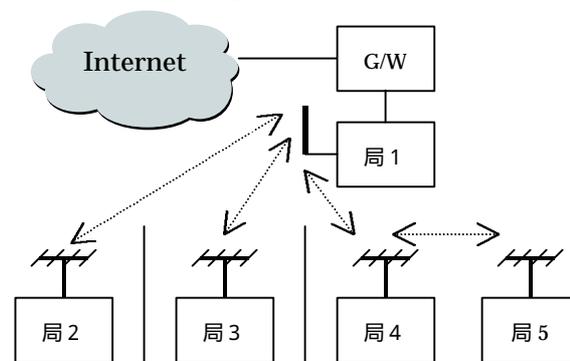


図 14 実装例

a. 実装するハードウェア

現時点で、本研究は机上の検討段階ではあるが、PRUG96 システムにおける、SS 無線機、IPSM⁴、PS といった構成のうち、IPSM に相当する無線機の制御部分について、CPU の強化を行い、このアルゴリズムを実装することを検討している。

³ PRUG96 では、アルインコ社、ルート社製の SS 無線機、JN1JDZ 菅野氏設計の MSK モデム等のソリューションに対応しているが、ここではルート社製の SS 無線機を基に検証している。

⁴ IP Shell Machine 7M3LCG 船田氏の開発した、Ethernet と

b. 時刻同期

まず、時刻同期を各無線局が独自に管理することで行うことから、その時刻精度について検証する。

時刻精度を検証する上で必要なのは、送受信の切り替え時間や、キャリア検出に要する時間ではなく、時間軸方向の検出精度である。

いま、2.a時刻同期方式に示すように、時刻同期を行うためには、他の無線機からのパケットの受信開始時刻と自局内に置いた計時機能が必要となる。

これらは、CPUの持つタイマを用いて、計時されることになる。CPUクロックを20MHz100ppm程度のCXOとすると、各無線局間での計時誤差は1秒あたり0.1mSecである。また、SS無線機のチップングレートは、4.4MHzであるからキャリア検出のタイミング精度は、227nSec程度でとなっている。さらに、2.4GHzで現在実現している伝送距離は30Km程度であり、この時の伝送遅延時間は0.1mSecとなる。以上のことからサイクルタイムにおいて、1msec程度の時刻精度の管理が出れば十分である。

c. スロット数

図14実装例は、局1がG/Wとなり他の4局は、局1を経由してインターネットにアクセスする形態である。このとき、局2~4は、互いに隠れ端末となっており、局5は直接に局4以外に通信が出来ないとする。

この運用形態では、局4-5間の通信は、局2と他の局の通信に影響を与えない、局2~4は、全て局1との通信を行うことに着目すると、以下の4つのスロットがあれば良いことになる。

- 1) 局1の送信スロット
- 2) 局2or3の送信スロット
- 3) 局4の送信スロット
- 4) 局5の送信スロット

さらに、局2or3の送信スロットと局5の送信スロットは、重複可能であることから、最大3スロットあれば、運用できることになる。

d. オーバーヘッド

この例における、各無線局の伝播エリアのモデルを図15伝播エリアモデルに示す。

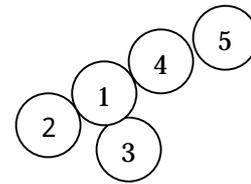


図15 伝播エリアモデル

このモデルはスロット情報の交換に必要なmap数は1次までであることを示す。従って、自身のスロット番号とあわせて、4bit程度の情報を付加すれば良いことになる。

e. 付加情報の保護

実際の実装においては、map情報やスロット番号といったオーバーヘッドは、数十ビット程度で十分である。これらの情報に対して、エラー訂正符号を付加したとしても、100ビット以下で実現できる。このことは、電波伝播に伴うビット誤りが大きい場合でも、このTDMAを維持するに有効である。

f. 実装例での検証

現在のIPSMでは、一度に送信するパケットの大きさは、ユーザーデータ1404バイト、同期データ4バイトの計1408byte=11,264bitsと固定である。

また、Rz95001Aは、256bits単位でデータを伝送することから、パケットの長さを256の整数倍とすることが望ましいので、 $256 \times 45 = 11,565$ bitsのパケットを各タイムスロットで送出することとする。

この時タイムスロット時間 T_s は、送受信切り替えなどの時間とデータ伝送時間+ガードタイムとなる。

実際に、Rz95001Aでの送受信切替えを含めた送信時間は15.9mSecであり、ガードタイムを1.1mSecとすると、 $T_s = 17$ mSecとなり、

今、タイムスロットの数 $n=3$ であるから、サイクルタイム $T_c = n \cdot T_s = 51$ mSecとなる。

以上から、この構成例では、各無線局は51mSec毎に、11,264bitsの伝送が可能となる。

すなわち、 $11,264 / 51 = 220.86$ K bit/Secが各無線局での実行伝送速度となる。また、この時の遅延時間はサイクルタイムと等しく、51mSecとなる。

無線機を仲介するI/F、ここで無線機の送受信制御を行っている。

実際に、現在の Prug96 では、808Kbit/Sec の物理層速度で、スループット 128Kbit/Sec を実現していることから、単純に直線近似できるとすれば、図 14 実装例 の構成において、34Kbit/Sec 程度の速度が安定して、全ての無線局に与えられることになる。

これは、全ての無線局が同時に通信を行っている状態であり、2.d 伝送効率の改善に示すような複数スロットの割り当てを行うことで、最大速度の向上が可能である。

4. 今後の予定

現段階では、方式の可能性を示したに過ぎない。

次に、この手法によって、より大規模なシステムを構築した場合の理論限界について、シミュレーションする予定である。

さらに、現在の Prug96 システムのうち、IPSM と PS に相当する部分を、1 枚の CPU 基板で実験することを検討している。

この CPU 基板では、比較的高速な CPU を採用することから、ここで示したいいくつかの手法を取り入れる予定である。

5. 謝辞

本稿の執筆にあたり、パケット通信、ネットワーク技術を始め、多くの有意義な議論と指導を頂いた Packet Radio User's Group の各位に感謝する。