

無線ネットワークにおける自律的経路制御方式

菅野 伸一

Packet Radio User's Group
E-mail: kanno@m.ieice.org

あらまし 本報告では、無線伝送路を使用して屋外環境などのノード間伝送距離が大きなネットワークを構成する場合において、各ノードが他のノードとの回線品質情報を測定し、その情報を互いに交換し経路制御に利用する自律的にパケット中継ネットワークを構成する方法を提案する。

また、動的にノード間の接続関係が変化するような不安定なネットワークでも自律的にパケット中継ネットワークを形成することが可能であり、経路情報を階層化することにより、大規模ネットワークの構成が可能であることを示す。

Autonomous Hierarchical Routing Control Method for Packet Radio Networks

KANNO, Shin-ichi

Packet Radio User's Group

abstract In this paper, the autonomous hierarchical routing control method for packet radio networks which are located in outdoor environment (e.g. city area) and consist of huge number radio nodes is proposed. And the construction method of the routing information from properties of each link which are measured continuously is also proposed.

We estimate the information for routing control. The proposed scheme can reduce the routing information and can construct wide area packet radio networks reasonably.

1 はじめに

無線回線を利用したネットワーク構築方式では、制御機能をもつ基地局を配置し、そのサービスエリア内の単純な機能をもつクライアントと通信を行なう方法が多く利用されている。しかし大規模災害時のように、基地局や基地局間回線の破損などの大規模なインフラ破壊が想定される状況ではこのようなシステムでは機能しない場合が多いと考えられる。

また、無線回線を使用してネットワークを構築する試みも MANET [2] などで行なわれているが、送受信双方向で一定以上の高品質が得られた無線回線を使用するという手段がとられているため、必ずしも効率の良いネットワーク構築が行なえるとは言えない。

そこで、筆者らはこのような状況において無線回線

を効率良く使用した広い地域をカバーする頑健なネットワークを構築するため、随時ノード間の回線品質の測定を行ない、それを基に経路制御を行なうことを提案している [5]。

本報告では、図 1 のような全ての無線ノードが互いにパケットの中継を行なうネットワークにおいて、メディアアクセス方式の特性を考慮し、なおかつ回線品質の測定を効率良く行なうためのデータリンク層プロトコルの構成方法、大規模ネットワークの構築に不可欠な階層化経路制御方式の提案を行なう。

さらに、提案方式を利用して IP パケットの伝送を行う事例について紹介し、経路情報の階層化を行うことによる大規模の無線ネットワークを構築した際の経路情報量削減効果について述べる。

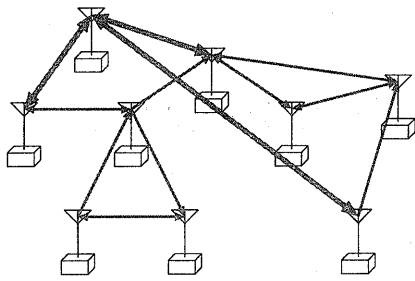


図 1: ネットワーク構成の例

2 電波伝搬モデル

ここでは、本報告で提案する方式において考慮する無線伝送路の性質について述べる。

2.1 伝送路の安定性

屋外などのノード間距離の長い環境での無線回線では、電波の伝搬経路の長短やマルチパスフェージング、周囲雑音などの影響により通信相手ごとに回線品質が異なる。さらに、天候の変動や電波伝搬に影響を与える障害物の移動等、伝送路が不安定になる要因が数多い [9]。そのため安定したパケット伝送ネットワークを構築するためには、ノード間の伝送状態をリアルタイムに反映した伝送制御が必要になる¹。

2.2 伝送範囲の対称性

ノード間距離の長い無線ネットワークでは、ネットワーク中に雑音源が存在する確率が高く、図 2 のよう

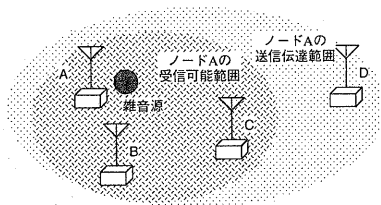


図 2: 送受信で伝送範囲が非対称な伝送路

¹本報告では、高速に移動するノードへの対応は考えない。

に、ノードの送受信で非対称な伝達範囲を持つ場合がしばしば存在する。

IP 上で非対称伝送路を取り扱う経路制御方式として、UDLR[3] が提案されている。しかし、これは回線設計時から非対称伝送路を取り扱う方式であり、ノードが送受信で非対称な伝達範囲を持つ場合には対応することができない [5]。

2.3 パケットの衝突

無線回線を使用してデータ通信を行う場合の大きな問題点の一つとして、衝突によるパケットの消失に関する問題がある。パケットの消失に伴う再送処理は大幅な通信効率の低下をもたらすことが知られている。

広い地域を無線伝送路を用いてネットワークを構成する場合には隠れ端末の存在にともなうパケットの衝突が起きやすいという問題があり、隠れ端末問題を有効に解決できるメディアアクセス手法として MACA[6] などが提案されている。

MACA あるいは MACAW[1] 方式は、パケット送信の可否を受信ノードに短いパケット (RTS パケット) で問い合わせ、送信許可 (CTS パケット) をやはりパケットで受け取ってから本来送るべき長いパケットを送る方式である。これは、隠れ端末による衝突を軽減できるため、アクセス効率を上げることが示されている [1]。その反面、RTS パケットにより発生する衝突の影響によりパケットを失うという欠点がある。

3 パケットの構造と回線品質測定

ここでは、本報告で提案を行なう方式におけるパケットの構造と回線品質の測定について述べる。

3.1 パケットの構造

無線伝送における衝突の影響を軽減する方法として、パケットをセルに断片化して送信を行なうことを提案する。セルは提案方式における最小の送信単位である。ヘッダーには送信ノードを示すデータリンク層アドレス、そのセルがどのパケットのどの部分であるかを示す情報、セル送信毎に更新させるシーケンス番号、ならびに検査符号を含む。

セルには、雑音やマルチパスフェーディングの影響下であっても高信頼な伝送を行なうためにランダム誤り訂正能力を重視した誤り訂正符号化を行なう。一般に誤り訂正能力が高い誤り訂正符号は冗長度が大きく[4]、不必要に訂正能力の高い符号を使用するとスループットが低下することになる。そこで、回線品質が良好な場合には冗長度の低い符号を使用し、回線品質が悪くなるに従い冗長度の多い符号を利用する。

また、無線伝送における復調時にセル先頭のデータ同期に失敗したような場合、複数のノードが同時に送信してしまい衝突を発生させたような場合、MACAのように制御パケットの送出時にどうしても衝突が避けられないメディアアクセス方式を用いた場合には、セル単位の損失が発生する。そこで、セルそのものの損失が起きた場合に対応できる誤り訂正を導入する。

ここで使用する誤り訂正符号は、大きなデータブロックを訂正できるリード・ソロモン符号のようなバイト誤り訂正符号が適当であると考えられる。しかし、誤り位置はセルのヘッダーを解析することで容易に特定可能であるので、誤りベクトルを特定することができる誤り訂正符号であれば十分に使用に耐える。

図3に1個のパケット送出中に1回まで衝突に対応する衝突に耐える誤り訂正符号の例を示す。これは、1回の衝突で最大で連続した2個のセルが破壊されることに着目し、偶数番目に送出するセルと奇数番目に送出するセルとに分け、それぞれのパリティをとったセルを送出する方法である。セルの大きさを256octedにとり、1500octedのパケットを伝送した場合におけるセル損失とパケット損失の関係を図4に示す。この符号をMACAで使用した場合には、1パケットあたり1回までの制御パケットとの衝突に耐えるためスループットが向上する。

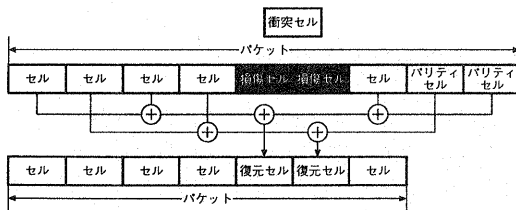


図3: 損傷セルの復元

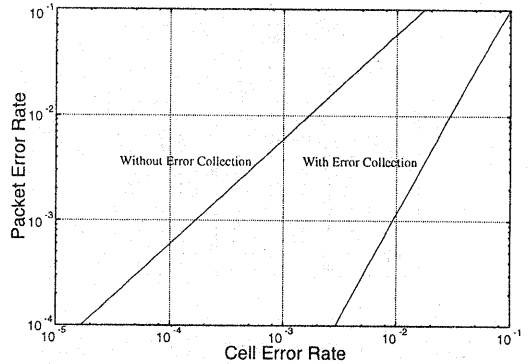


図4: セル損失率対パケット損失率

3.2 回線品質の測定

ここでは、ノード間の回線品質は、あるノードが送信したセルの数と受信ノードに到達したセルの数とを比較することによって測定する²。回線品質を測定するには受信側ノードで、実際に届いたセルから送信されたセル数を推定する必要がある。これは、各セルに示されるシーケンス番号を利用し、測定開始時と終了時のシーケンス番号の差分から推定できる。

また、これまで述べたようにセルは複数の訂正符号が用いられるがセルの符号化後の大きさを統一すれば、受信側で復号時の誤り訂正数を参照することにより、より訂正能力の高い符号を用いたセルからより訂正能力の低いセルの回線品質を推定することができる。そのため、訂正能力の低い符号を使用する場合の回線品質の標本数を増やし測定精度を高めることができる。

4 近距離経路制御

本報告では無線回線の不安定性を考慮し、リンクステート型経路制御方式を採用する。ここでは、比較的経路回数の少ない範囲を対象とする経路制御について述べる。経路の計算とパケットの中継は以下の方法をとる。以下、この方法を“近距離経路制御”と表記する。

- 送信元ノードは、最初にパケットを構築する際に、ノード間の回線品質から生成した経路情報表から目的地ノードまでの中継経路を計算する。

²本報告ではノードの送信電力は不変であるとして議論する。

表 1: 回線品質テーブルの例

		送信ノード			
		A	B	C	D
受	A	-	14	12	1
	B	14	-	14	8
	C	10	14	-	12
信	D	12	6	11	-

- 送信元ノードは、中継経路をデータリンク層の packets ヘッダーに列記し、パケットを送信する。
- 各中継ノードでは受け取ったパケットのヘッダーに記載された内容にしたがい中継処理を行なう。中継ノードでは経路の再計算は行なわない。

4.1 経路情報の獲得と伝達

近距離経路制御で使用する経路情報は、伝送コストと回線品質という2種類の指標で表す。

- 伝送コストは、1個のセルを送信するのに必要な時間で表す。伝送速度の速い伝送路では小さく、遅い場合には大きい。
- 回線品質は、ノード組ごとにセル損失率から規定したパケット損失率以下(例えば1%)で到達できる最大セル数の期待値を表す。セル損失が少ない伝送路では大きく、多い場合には小さい。

経路情報の伝達は、以下の手順を適当な時間間隔で繰り返すことにより行なう。この手順により得られた、図2のようなネットワークにおいて伝送コストを同一とした場合の回線品質テーブルの例を表1に示す。

- 自ノードで観測されるセルを受信して、自ノードと隣接する全てのノードから自ノードへの回線品質を測定する。
- 他のノードに自ノードで観測した回線品質を測定時刻および有効期限とともに通知する。
- 他のノードにて観測された回線品質のうち、最も新しい測定時刻のものを中継し、フラッディングを行なう。ただし、測定時刻が有効期限切れ、あるいは中継回数制限を超えた回線品質情報は除く。

なお、初期状態においては回線品質情報を持たないため送信する情報を持たないが、この場合は回線品質情報が無いということをフラッディングすることとする。これは、全てのノードが何も送信しないことにより永遠に経路情報の測定と交換ができないことが発生する可能性を排除するためである。

4.2 経路計算

経路を計算する方法は以下の通りである。

まず、使用する経路の候補から、伝送しようとするパケットの長さを伝送するのに不十分な回線品質のリンクを削除する。そして残った候補から、伝送コストが最も小さい経路の組み合わせを探索する。

例えば、表1のネットワークにおいて、セル長8の packets を送出する場合には D→A と B→D の経路が回線品質が不足するので経路の候補から除外する。これより、D→A へは C あるいは B を経由して伝送するという経路計算結果を得る。

4.3 IP への対応

提案方式を用いて IP(v4) を使用した通信を行なうには、IP アドレスから目的ノードのデータリンク層アドレスを特定し、経路を計算の上データリンク層の packets に中継経路を記載し、packets 中継機構により目的ノードに伝送を行なうという手順になる。

ただし、有線ネットワークで用いられるような ARP のようにノード間に直接到達性の必要なプロトコルを利用することはできないので、[5]と同様に、中継回数制限付きフラッディングにより IP アドレスとデータリンク層アドレスの対応情報を近傍のノードに伝送し、適宜それを使用して変換する。

5 遠距離経路制御

近距離経路制御は一種のリンクステート型プロトコルである。経路情報はノード数の自乗のオーダーで大きくなり、ネットワークが大規模になると経路制御に支障をもたらすことになる。そこで OSI IS-IS[8] や OSPF[7] のようにネットワークを分割し経路情報を削減することを検討する。ここでは、ノードが近距離経

路制御によるパケット中継機能を持っていることを考慮したネットワークの分割方法を提案する。

5.1 コロニー

有線ネットワークにおいては、物理的ネットワークの境界でネットワークを分割しサブネットワークに分割するということが行なわれている。しかし、無線ネットワークでは物理的なネットワークの境界は存在しないので、このような手法でのサブネットワーク化は困難である。そこで、ここではサブネットワークに相当するネットワーク層におけるネットワーク管理単位をコロニーとして定義する(図5)³。

これは、ネットワーク分割におけるコネクティビティに関する制約を緩やかにしたものである。基地局と端末局によるネットワークにおいては端末局は基地局との直接接続できることが求められるが、この方式では、近距離経路制御で接続できる範囲で接続できていれば良い。場合によってはコロニー外のノードを中継に使用することもできる。

ここで、論理的なコロニーへの出入口となるノードをコロニーの代表ノードと言う。代表ノードの役割は以下の通りである。

- 自コロニー所属のノードとの近距離経路制御による中継経路を把握する。
- 隣接コロニーの代表ノードとの近距離経路制御による中継経路を把握する。

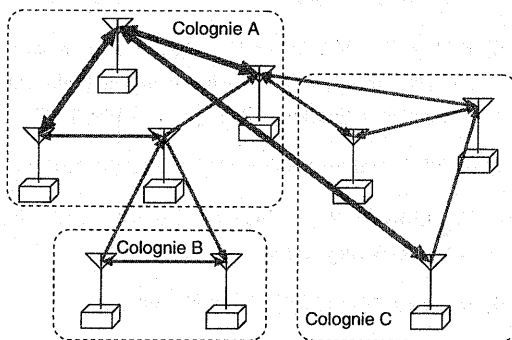


図5: コロニー

³OSPFにおけるエリアの機能に相当する。

- 他のコロニーとの間の接続関係を遠距離経路制御により把握する。
- 他コロニーへのパケットの中継を担当する。

また、その性質上代表ノードは他のノードに比べて安定して動作することが求められる。そのため、頑健性を確保するためには協調して動作する代表ノードを複数設けることが求められる。

本方式では、所属コロニーの代表ノードとの通信が可能な範囲であれば、ノードが移動しても通信を継続できる移動透過性を実現できる。代表ノードとの通信が不可能な範囲へ移動した場合でも移動透過性を確保するためには、代表ノードを Mobile IP の HA のように動作させるような仕組みが必要になる。

5.2 コロニー間の経路情報

コロニー間の経路情報は、代表ノード間の経路情報で表す。ただし、経路情報は代表ノード間の近距離経路制御で得られる伝送コストと回線品質である。

5.3 コロニー間のパケット中継

コロニー間のパケット中継は代表ノード間で、コロニー間の経路情報を参照し、近距離経路制御による方法と同じように行なう。ただし、代表ノード間の伝送は近距離経路制御によって行なう。

なお、代表ノード以外のノードが他のコロニーにパケットを送信するとき、代表ノードにパケットを送信し、代表ノードが目的ノードの所属するコロニーにパケットを送信することにより行なう。

5.4 IPの伝送とコロニー

階層化経路制御の場合でも、IPの伝送は4.3節と同様に考えることができる。ただし、IPアドレスを割り当てる際にはコロニー内を全て同一のサブネットとする。また、フラiddingする内容がサブネットとコロニーの名前になり、フラiddingは代表ノード同士のみで行う。

6 経路情報量の評価

ここでは、ネットワークの経路情報量の上限を理論的に検討する。ネットワークを構成するノードの数を n 、コロニーの数を c とし、各コロニーに同数のノードが配置されたものとする。また、コロニー内の経路制御は全て近距離経路制御で行なわれているものとする。

近距離経路制御で使われる経路情報量は、 $(n/c)^2$ に比例する。また、遠距離経路制御で使われる経路情報量は、 c^2 に比例する。

ここで近距離経路制御と遠距離経路制御の経路あたりの情報量を同一とした場合に、ノード数 n を一定とし、ノード数 n を変化させ、コロニーの数 c を一定とした場合のノード数と経路情報量の関係を図6に示す。

これより、ノードの数に比べてコロニーを少なくすると経路情報が多くなり、ノード数の増加にともない爆発的に増加しることがわかる。さらに、階層化を行なうことにより経路情報量の増加が抑えられることがわかる。

7 まとめ

本報告では、無線伝送路のメディアアクセスの性能を高めるデータリンク層プロトコル、ならびに効率の良い通信を行うために、誤り訂正符号を使い分ける方法の提案を行った。

さらに、無線ネットワークのノード数が多くなった場合に、経路情報を階層化することにより経路情報を削減する手法の提案を行ない、その効果について述べた。

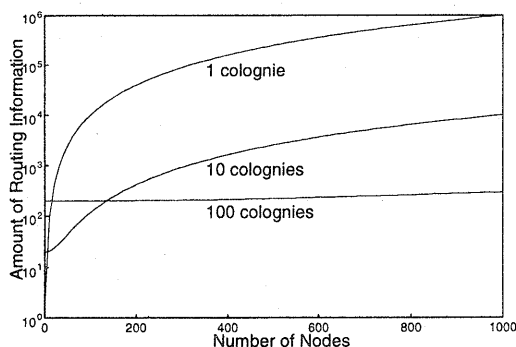


図6: ノード数と経路情報量の関係

今後は、計算機上に無線ルーターを実現しそれをネットワークシミュレーターで結合して動作の評価、実際に無線伝送路を使用しているネットワーク構築実験を行なう予定である。

また、提案方式でのコロニー間の経路情報は、コロニー間の接続関係、回線の実効速度、コロニーのネットワークアドレスがリンクステート型の情報として格納されている。これは OSPF における経路情報とほぼ同等の情報である。そこで、無線側の経路情報と OSPF との経路情報の相互交換を行なうことを検討したい。

なお、メディアアクセス手法と提案方式データリンク層プロトコルとスループットの関係については別の機会に発表したい。

参考文献

- [1] BHARGHAVAN, V. et al: "MACAW: A Media Access Protocol for Wireless LAN's", ACM, SIGCOMM 94, pp. 212-225, Aug. 1994.
- [2] IETF MANET WG: "Mobile Ad-hoc Networks". <http://www.ietf.org/html.charters/manet-charter.html>
- [3] IETF UDLR WG: "UniDirectional Link Routing". <http://www.ietf.org/html.charters/udlr-charter.html>
- [4] 今井 秀樹: "符号理論", 電子情報通信学会, 1990.
- [5] 菅野 伸一: "無線回線用非対称適応経路制御プロトコル", コンピュータソフトウェア, Vol. 17, No. 4, pp. 70-82, 日本ソフトウェア科学会, 2000.
- [6] KARN, P.: "MACA - A New channel access protocol for packet radio", ARRL/CRRL Amateur Radio 9th Computer Networking Conf., pp. 134-140, 1990.
- [7] MOY, J.: "OSPF Version 2", RFC2328, Apr. 1998.
- [8] PERLMAN, R.: "Interconnections", 2nd ed., Addison-Wesley, 1999.
- [9] 進士昌明 編: "移動通信", 丸善, 1989.
- [10] TANENBAUM, A.: "Computer Networks", 3rd ed., Prentice Hall, 1996.