

セルラーインターネットワーキングのための新しい通信パラダイム： Packet Division Multiple Access (PDMA)

太田 昌孝[†]

[†] 東京工業大学大学院情報理工学研究所 〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1

E-mail: [†] mohta@necom830.hpcl.titech.ac.jp

あらまし Packet Division Multiple Access (PDMA) は、インターネットによるセルラー環境の構築に適した新たな通信パラダイムである。情報通信インフラがインターネットに集約されると、個別のデータはIPヘッダにより弁別できるため二重化、多重化はIPパケット単位のみで行えばよい。しかも、現状のベストエフォートインターネットでは通信量の変動が激しく上り下りの通信量も対称でないため、在来のCDD/FDD/TDD/CDM/FDM/TDMのような(半)固定的な帯域割り当てでは多くの帯域が無駄になる。PDMAは、全セルで同じ伝送チャンネルを共有し、通信時間をCSMA/CAによりパケット単位で完全に動的に割り当てようというパラダイムである。CSMA/CAにより、セルごとのチャンネル割り当て設計は不要となり、複数の事業者が同じ伝送チャンネルを共有した場合の調整も自動的に行われる。単純な解析では、CSMA/CAのオーバーヘッドを除けば、通信量が定常な場合でもPDMAは(半)固定的な帯域割り当てと同程度の性能が期待できる。また、優先度制御等によりQoS保証を実現することも可能である。

キーワード CSMA/CA

Packet Division Multiple Access (PDMA): A New Paradigm for Cellular Internetworking

Masataka OHTA[†]

[†] Graduate School of Information Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology

2-12-1 O-okayama, Meguro-ku, Tokyo, 152-8552 Japan

E-mail: [†] mohta@necom830.hpcl.titech.ac.jp

Abstract Packet Division Multiple Access (PDMA) is a new paradigm for cellular internetworking. As the Internet is becoming the only information infrastructure, data units can be identified by IP header only that duplex and multiplex can be performed packet-wise only. Moreover, with the current best-effort Internet, traffic varies very much and often and the traffic is asymmetric that (half-) fixed bandwidth allocation with conventional CDD/FDD/TDD/CDM/FDM/TDM wastes a lot of bandwidth. PDMA is a paradigm to share the same communication channel by all the cells and allocate communication time slot fully dynamically packet by packet using CSMA/CA. With CSMA/CA, channel assignment design for each cell is unnecessary and multiple providers can share the same communication channel with automated negotiation. With preliminary analysis, PDMA is expected to be as efficient as (half-) fixed bandwidth allocation paradigm, save CSMA/CA overhead, even if traffic is persistent and stable. It is possible to introduce QoS assurance with, for example, prioritization.

Keyword CSMA/CA

1. はじめに

インターネットのネットワーク層はコネクションレスであり、一般に個々のパケットの間に関連はなく、完全に独立したものとして扱われる。従来のセルラーネットワークは電話利用が主体であり電話の通信特性にあわせて設計されてきたが、今後のモバイル情報通信基盤がインターネットに集約されていくことを考慮

し、その通信特性に合わせたセルラー通信方式として、PDMA (Packet Division Multiple Access) を提案する。

1.1. 電話とインターネット

従来の移動体通信プロトコルは、電話利用主体で考えられてきたが、今後インターネットが社会の唯一無二の情報通信基盤となるにつれ、その通信内容も電話

だけにとどまらず（現在ではウェブアクセスに代表されるいわゆる）データ系の比重が大きくなり、電話もその一部として伝送されるようになる。そこで、今後の移動体通信プロトコルはインターネットのみを考慮して設計すればよい。

ところが、電話とインターネットでは、その通信特性が大きくことなる。インターネットの通信特性を一言であらわすと「コネクションレス」ということになる。インターネットではパケット単位で通信が行われるが、一般に異なるパケットの間に関連はなく、個々のパケット通信が完全に独立したものととして扱われる。同じパケット単位の通信でも、事前に VC が設定される X.25 のようなコネクションオリエンテッド型の通信方式とは大いに趣を異にしている。コネクションオリエンテッド型のネットワークにおいても CLS (Connection-Less Server)を導入してコネクションレス通信を模倣できるが、あくまで模倣であり効率は悪く、情報通信基盤が全面的にインターネットに移行しつつある現在、下層プロトコルにおいてもインターネットと直接的に親和性のある通信方式が利用されるべきである。

電話に適した通信方式をインターネットに利用する場合の大きな問題は、個々の通信に通信帯域が割り当てられてしまうことである。割り当てられる帯域は電話のように一定の場合もあれば、混雑状況や通信量によって変化する場合もあるが、通信量は短期的に大きな変動はしないと仮定されている。しかし、コネクションレスのインターネットにおいては通信量が短期的に大幅に変動することが多い。その結果、割り当てられた帯域が無駄になったり一時的に多くの通信が必要なのになかなか帯域を割り当ててもらえなかったりという事態が頻発し、通信容量が無駄になる。

インターネットでもトランスポート層では TCP のようにコネクションオリエンテッドなプロトコルが存在するが、TCP は割り当てられただけの帯域を送るデータがある限り全部使い尽くすだけのプロトコルであり、TCP が必要としている帯域など定義しようもない。また、TCP の状態は末端にしか存在せず、それを途中のネットワーク機器で推測しても不正確で非効率な推測しか行えないし、そもそもそのような行為はインターネットのエンドツーエンド原理に反するものであり、無理に導入してもインターネットの特性を大きく損なうことになる。例えば、IP 上では TCP 以外のトランスポートプロトコルも端末さえそれに対応すれば自由に使えるが、ネットワーク内が TCP に特化してしまっただけでは、このような自由度は失われる。

電話に適した通信方式をインターネットに利用する場合の別の問題は、インターネットにおける通信は一

般に双方向でも連続的でもないことである。電話の場合は音声データは双方向に流れ、それをかなり細かい時間間隔に分割することができる。このようなデータの流れに適切な制御信号を載せれば通信主体間で迅速に制御情報をやりとりすることができる。ところがインターネットではデータの流れは一般に散発的で一方方向である。TCP ですら、一応双方向ではあるものの上りと下りの帯域もパケットの数も一致するわけではないし、上位アプリケーションが一本の TCP 接続を断続的に使えば TCP にしばらく何の通信も流れないのはよくあることである。また、これらのふるまいの予測を途中のネットワーク機器が予測することは一般に不可能である。

なお、ADSL やケーブルインターネットでは家庭のクライアントがウェブコンテンツをダウンロードするような利用方法しか想定しておらず、下り帯域は広いが上り帯域は狭くてよいという考え方がみられる。しかし、これはインターネットの特性ではなく、クライアントサーバモデルでサーバがネットワーク事業者や大企業しか保持できない特殊な存在である場合にしか成立しない特性である。家庭にウェブサーバがおかれたり、家庭や携帯端末から他の家庭や携帯端末に動画像を伝送されたりするようなピアツーピアモデルによる通信では、アクセス系の末端に必要な帯域はある瞬間には非対称であっても上りと下りのどちらも同程度の最大帯域を必要とする。一方、幹線においては個々の通信の非対称性の時間的変動が平均化されるので、上り下りに同程度の帯域を固定的に割り当てておいて問題ない。

1.2. 有線通信のインターネット対応

有線通信においては、日本においても世界的にもインターネット幹線の通信容量が電話幹線の通信容量を超えて久しく、インターネット対応がかなり進んでいる。かつては X.25 のように通信毎に VC を設定することが当然であったが、その延長線上の技術である ATM は、商用 SVC サービスは絶望的でほぼ消滅した。それにかわって台頭したのが CSMA/CD に基づくイーサネット[1]技術である。X.25 による ISDN を置き換えたのは ADSL やケーブルインターネットである。それらの内部仕様には ATM の残滓が見られ外部インターフェースが ATM である局用設備も存在するが、インターネットアクセスのためには意味がなく、今日では外部インターフェースはイーサネットとなっている。

さらにインターネットでは、SONET/SDH のような時分割多重(TDM)も不要である。インターネットでは個々のパケットが完結した情報を含んでいるため、多重化はパケット単位で行えばよく、時分割多重のため

の機器やプロトコルヘッダは無駄となるからである。10Gbpsのイーサネット規格では SONET/SDH のフレミングを利用したものもあり既存 SONET/SDH 網にインターネットトラフィックを流す場合には有用だが、インターネット用幹線を新たに作成する場合には、ダークファイバーでルータ間を直結し直接的にイーサネットを利用するのが、最も効率的である。

なお、インターネットへの対応は、現状では QoS 保証を必要としないが、QoS 保証を否定するものではない。CSMA/CD 環境下では QoS 保証は容易ではないが、現在のイーサネットでは物理層は全二重で対一接続が普通であり、データリンク層で IEEE802.1p 等による優先度制御を行えば QoS 保証も原理的に可能である。

このような状況踏まえ筆者は[2]において、パケット多重による対一通信のみを考えたイーサネット以上に単純で高速なプロトコルを提案した。

このような考え方を移動体無線通信に適用したのが PDMA である。

2. PDMA の概要

PDMA は同様の考えを移動体無線通信に適用したものであり、多重化をパケット単位で行おうというものである。ただし、光ファイバーが全二重対一の物理層であるのと異なり、無線は本質的に多対多の物理層であるため、[2]等とは別の考え方も必要となる。

まず、個々のパケットが完全に独立であり、トラフィック量の予測も原理的に無理ということから、通信スロットはパケットごとにそのつど確保する必要がある。そのために適切な多重化技術としては、IEEE 802.11[3]でその有効性が実証されている CSMA/CA があ

る。また、上り下りに必要な帯域が非対称で時間的に変動し上りにも広い帯域が必要ということから、二重化についても上りと下りの伝送チャンネルをわけずに「通信スロットはパケットごとにそのつど確保」すればよいが、それには CSMA/CA 技術がそのまま利用できる。

セル間の伝送チャンネルについても、隣接セルでわざわざ別のものを使わず一つのチャンネルに全帯域を割り当て全てのセルで共用しても、CSMA/CA により通信スロットはセル間で協調して割り当てられる。しかも、個々のセルへ別々のチャンネルを割り当てる場合より、一つのセルで利用可能な最大帯域が多くなるので、一つのセルにだけ通信需要が集中した場合に有利である。しかも、セルがチャンネルを共有しセル間の通信スロット割り当てが CSMA/CA 等で完全に自動的かつ動的に行われると、複数の事業者が同じチャンネルを利用した場合の調整も完全に自動的かつ動的に行え、事業者ご

とに別のチャンネルを割り当てる必要もなくなる。

これらの利点は、CDMA 等でダイナミックなチャンネル割り当てを行った場合にも得られるが、PDMA との大きな違いは、チャンネル割り当てのオーバーヘッドによりトラフィック変動への対応が遅いことである。

CDMA 同様、PDMA でも同一の RF 回路で複数のセルと同時に通信できるため、単一の RF 回路だけで make-before-break 型のスムーズハンドオーバーも可能である。なお、CDMA では異なるコード間の RF での干渉を防ぐために電力制御は必須だが、干渉を積極的に使う PDMA では、その必要はない。

3. PDMA の性能解析

まず、CSMA/CA のオーバーヘッドを無視して、PDMA の性能を非常に粗く在来の方式と比較する。

利用可能な通信帯域を B とし、それらを N チャンネルに分けてうまく各セルに割り当てれば、同じチャンネルを割り当てられたセルの距離が十分遠くなりセル間の干渉が無視できるとする。セルに固定的な帯域のチャンネルを割り当てると各セルで利用可能な帯域は B/N となる。PDMA においても、各セルはたかだか N セルとしか干渉しないので、同じ量の定常的通信が行われるとすると、CSMA/CA のオーバーヘッドを無視すれば各セルで利用可能な帯域は少なくとも B/N となる。つまり「各セルで同じ量の定常的通信が行われる」という音声主体の通信パラダイムに有利な条件下でも、PDMA の能力は在来の方式と同等である。

在来の方式ではインターネットでみられるような短期的に変動する通信量の上り下りの差、セル間の差、事業者間の差などに対応できないことを考えると、PDMA は非常に優れた方式であることがわかる。

次に、CSMA/CA のオーバーヘッドを考慮した評価をおこなう。ここで、CSMA/CA のパラメータは IEEE 802.11a[4]と同等(パケット間隔はパケット衝突やロスが検出された再送の場合ではない最小のものとする)のものを、セル半径として 500m (PHS の基地局のセル半径)、物理層の帯域を 100Mbps と仮定し、パケット長 1500B (在来イーサネットの最大パケット長)、データリンクオーバーヘッドが 34B (IEEE802.11 しており)の場合の通信速度を求める。

IEEE802.11a の CSMA/CA 制御のためのパケット間のギャップの期待値は、通常優先度で再送でない場合平均して 110.5us である。しかし、IEEE802.11a では、送受信者の間の伝播遅延が 1us よりはるかに小さいと仮定しているため、500m の距離での伝播遅延 1.66us を加味すると、パケット間のギャップは 128us となる。一方 100Mbps での 1534B のパケットの送出には 122.7us かかるので、ネットワーク層に見える通信は

47Mbps となり、物理層の帯域である 100Mbps の約半分が利用できることとなる。通信スロットが完全に動的に与えられることを考えると、そこそこの効率である。

また、IEEE802.11a とは異なるパラメータを利用すれば以上の数値を改良することも可能である。

4. 非常時通信と QoS 保証

CSMA/CA では、CSMA/CD と異なり、パケット送出前にある程度のランダムな遅延を置くので、この遅延の量を一般のパケットより少なめにすることにより、あるパケットを他のパケットより優先して送出でき、一般のパケットが極めて多数送出待ちをしている場合にも、ある程度の帯域を優先パケットのために確保できる。

IEEE802.11 では、このような機構を制御パケットを優先して送ることに用いているが、同様にして非常時に公益性の高い通信を優先して送ることに用いることができるし、QoS 保証されたパケットを優先して送ることに利用できる。

QoS 保証された通信が消費する帯域を全帯域の一定以下に抑えておけば、制御パケットや非常時の公益性の高い通信が邪魔されることはない。非常時の QoS 保証された公益性の高い通信のためには、そうでない QoS 保証された通信を強制的に中断して帯域を確保することができる。

5. おわりに

CSMA/CA 技術等を利用して完全に動的にパケット送出を制御する PDMA という新たな通信パラダイムにより、動的、非対称かつ予測不可能なインターネットの通信パターンに対処したセルラーブロードバンド無線環境が、50%程度の効率で構築できることが示された。

PDMA の効率は物理層の改良により短縮できるし、PDMA により、時間、セル間、事業者間の帯域割り当てが完全に動的に行えることを考慮すると、PDMA の実質的効率は、在来方式よりかえってよくなることが期待できる。

隠れ端末などを考慮した PDMA のより詳しい解析、より適切な CSMA/CA 方式の探索、PDMA のさらなる最適化、サービスエリアの大きさの異なる複数の CSMA/CA を同一チャンネルで共存させる方法等が、今後の課題である。

文 献

[1] “CSMA/CD Access Method and Physical Layer

Specifications IEEE802.3”, ANSI/IEEE Std 802.3

- [2] Masataka OHTA, Hideaki Oonaka, Kaz Satoh, Shinichi Aoki, Shigeyuki Takayama, Akio Iijima, “IOG: A Protocol for IP over Glass”, IEICE Transactions on Communications, E83-B[10], pp. 2216-2223, 2000.
- [3] “Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications”, ANSI/IEEE Std 802.11, 1999.
- [4] “Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications: High-speed Physical Layer in the 5 GHz Band”, IEEE Std 802.11a-1999.