

## 第 II 部

# 超小型地球局を用いた衛星通信システム のインターネット上での利用



## 第2部 超小型地球局を用いた衛星通信システムの インターネット上での利用

### 第1章 はじめに

本報告書はWGとしての研究活動を開始して2年を経たDVB-RCS WGの2回目の年次報告書となる。

昨年度は端末局の設置およびシステム運用の know how 蓄積などに時間を費やし、春、秋の2回にわたり、大きな支障なく WIDE 合宿での回線提供を行うことができた。本年の報告書では、合宿での運用で蓄積された know how や課題を明らかにし、更に国立天文台の岡山と乗鞍岳で運用される端末局でのアプリケーションを含めた運用状況について報告する。最後に、DVB-RCS で用いられている、IP パケットを L2 の DVB パケットへカプセル化する手法についての考察を行い、衛星回線で一般的に用いられるカプセル化方式の長所短所を回線利用効率の面から述べる。

### 第2章 WIDE 合宿での運用

今年度は春、秋の WIDE 合宿において、合宿地からの対外接続性を提供するために DVB-RCS 端末局を設置し運用した。運用の know how を確立するため、2回の合宿では同様の運用手法、トポロジ構成を取った。

#### 2.1 DVB-RCS リンクのトポロジ

DVB-RCS リンクは、JSAT 衛星管制センター (YSCC) に設置された HUB 局と合宿地に設置する端末局との間で確立される。図 2.1 に 2004 年 3 月の WIDE 合宿で運用した端末局の外観を示す。

DVB-RCS リンクの本線設定は HUB 局にて行われる。HUB 局から端末局への Forward Link には最

大 10 Mbps、端末局から HUB 局への Return Link には最低 64 kbps、最大 2 Mbps の帯域が割り当てられた。また、Return Link の帯域は通信量に応じて動的に変化するように設定された。図 2.2 に DVB-RCS リンクのトポロジ構成を示す。

既存の DVB-RCS システムの実装では、端末局の Satellite Interaction Terminal (SIT) が Layer3 機器であるにもかかわらず、経路表を持っていないなどルーティング機能が不十分なため、そのままでは DVB-RCS リンクをインターネットの通信路として利用できない問題があった。また、合宿ネットワークが藤沢 NOC に収容され、WIDE バックボーンに接続する一方で、DVB-RCS リンクは HUB 局が設置されている YSCC に Layer3 で収容される。このため、YSCC と藤沢 NOC を広域 Ethernet 網で VLAN 接続し、合宿地と藤沢 NOC との間で PC ルータを用



図 2.1. DVB-RCS 端末局の概観

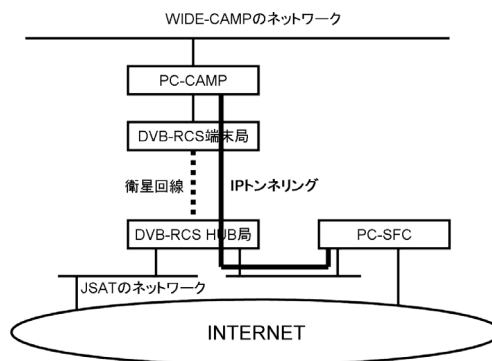


図 2.2. DVB-RCS リンクのトポロジ

いた Layer3 トンネルを確立し、端末局での経路制御や藤沢 NOC と端末局との間で DVB-RCS リンクを介した直接通信が行えるよう工夫した。

### 2.2 DVB-RCS リンクの遅延特性の調査

WIDE 合宿での DVB-RCS リンクの運用結果から、DVB-RCS リンクの遅延が一般的に想定されている値よりも大幅に大きいことがわかった。この原因を調査するため、SFC の DVB-RCS 端末局に WIDE 合宿と同トポロジのネットワークを構築して DVB-RCS リンクの遅延を測定し、その特性を調査した。

本環境にて Return Link 上で 250Kbps から 1.75Mbps のトラフィックを生成し、PC-SFC から

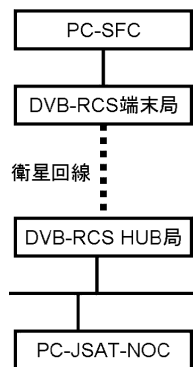


図 2.3. 遅延測定のトポロジ

ら PC-JSAT-NOC にパケットサイズを変えながら PING コマンドを実行して遅延を測定した。図 2.4 に測定結果を示す。図中の縦軸は遅延の大きさ、横軸に PING コマンドで生成するパケットサイズをそれぞれ示す。

Return Link では、トラフィック量が増加するにしたがって遅延が大きくなるのがわかる。しかし、一般的にリンクのトラフィック量が帯域幅を上回らない限り、遅延は増大しない。このため、遅延の原因が DVB-RCS の仕様によるものか、DVB-RCS システム全体の実装に起因しているのかについて現在調査を行っている。また、Forward Link の遅延特性についても調査を進め、問題点の切り分けと解決手法の検討を行っていく予定である。

### 2.3 DVB-RCS 端末局運用マニュアルの作成

無線従事者が効率的に DVB-RCS リンクを運用できる環境を構築するため、DVB-RCS 端末局の運用マニュアルを作成した。運用マニュアルは下記の項目によって構成されている。

- DVB-RCS 端末局の機材構成
- アンテナの設置方法
- 利用衛星の捕捉方法
- IDU の設定方法
- UAT の手順

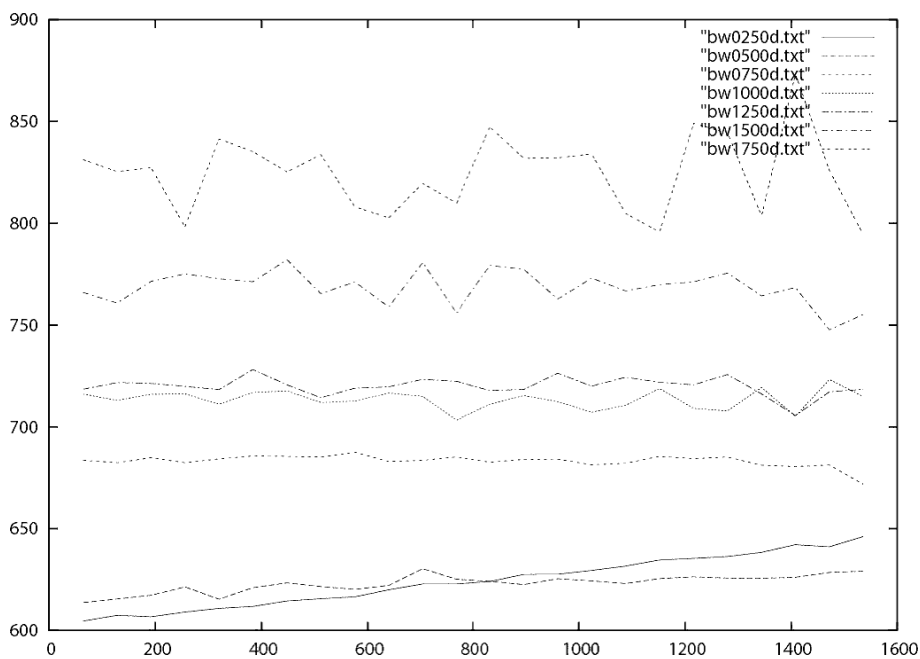


図 2.4. DVB-RCS の遅延

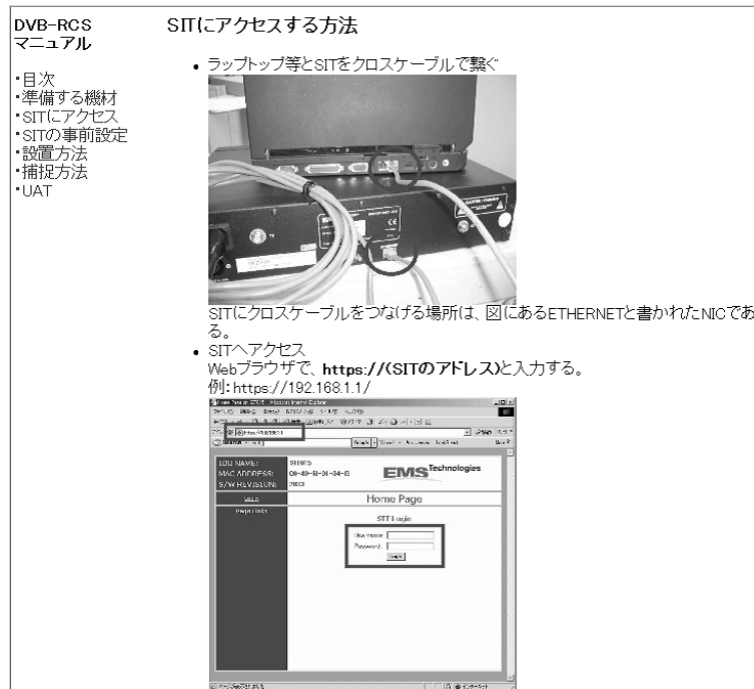


図 2.5. DVB-RCS 端末局運用マニュアルの概観

本マニュアルは WEB ベースで作成されており、下記の URL から参照可能である。また、図 2.5 に運用マニュアルの外観を示す。

- <http://www.sfc.wide.ad.jp/~soh/rcs-manual/>

今後は本マニュアルを元に DVB-RCS 端末局の運用を継続してマニュアル細部を充実させるほか、運用全体の視点からマニュアルの有効性を検証し、改善していく予定である。

### 第 3 章 DVB-RCS におけるブロードキャストエミュレーション

DVB-RCS はデジタル衛星放送において視聴者から放送局へ衛星回線を用いてフィードバックを送信するための通信規格である。DVB-RCS は親局から全子局へ接続する広帯域な片方向回線と、子局から親局へ接続する個々の狭帯域な片方向回線から構成されている。インターネットでは、ARP や経路制御プロトコルなど多くの基盤技術が双方向回線を前提に設計されており、片方向回線上ではこれらの技術が正常に動作しない。

本章は、DVB-RCS における複数の片方向回線上に擬似的な単一のブロードキャストリンクを構築し、既存のインターネット技術をそのまま動作させる手法を提案する。本システムにより、DVB-RCS を既存の通信回線と同様にインターネットで利用できる。

また、本研究は、「第 12 回マルチメディア通信と分散処理研究会」で論文を投稿し発表を行った。

- 参考 URL : <http://www.ipsfdps.org>

#### 3.1 DVB-RCS の問題点

DVB-RCS は、単一の親局と複数の子局から構成される。親局はすべての子局に接続する広帯域な片方向回線 (Forward Link) を持つ。Forward Link では、既存のデジタル衛星放送と同様に親局から複数の子局へ同報的にデータを送信できる。子局は親局にだけ接続する片方向回線 (Return Link) をもつ。Forward Link と Return Link は個別の回線であり、利用するデータリンクプロトコルも異なる。現在は、Forward Link に MPEG2-TS、Return Link に ATM を利用するのが一般的である。DVB-RCS のデータリンク構成を図 3.1 に示す。

既存のデータリンクとの違いは、親局とすべての子局が片方向リンクで接続する点と、Forward Link と Return Link で異なる通信形態をとることである。

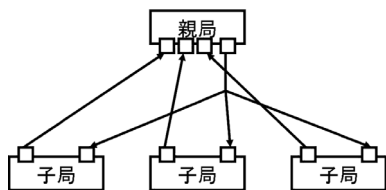


図 3.1. DVB-RCS のデータリンク構成

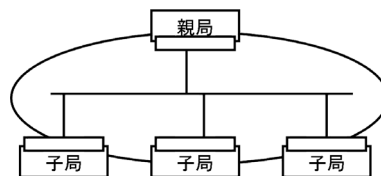


図 3.2. DVB-RCS のブロードキャストリンクエミュレーション

既存の DVB-RCS の実装では、既存のリンク形態とは異なるリンク上で IP の伝送だけを行っている。このため、ブロードキャストリンクやポイントツーポイントリンクを前提として設計されているインターネットプロトコルが動作しない。

このため、次のようなデータリンクアドレス解決の問題、経路制御プロトコルの問題が生じる。

● データリンクアドレス解決の問題

Forward Link では親局から複数の子局が接続するため、子局のデータリンクアドレスを親局が解決する必要がある。インターネットでは、動的なデータリンクアドレスの解決に ARP を用いる。ARP では、同一リンク上で ARP 要求と ARP 応答を行う。しかし、Forward Link は片方向リンクであるため、同一リンク上で双方向に通信できない。このため、親局から子局への ARP が機能しない。

● 経路制御プロトコルの問題

DVB-RCS をインターネットの一部として利用するには、DVB-RCS 上で動的な経路制御プロトコルが動作する必要がある。RIP や OSPF などの経路制御プロトコルでは、隣接するルータ同士が双方向にメッセージを交換し経路情報を取得する。DVB-RCS では、複数の片方向リンクを用いてノード同士が双方向に通信するため、これらの既存の経路制御プロトコルが正常に動作しない。

3.2 解決手法

DVB-RCS 上でインターネットプロトコルを正常に動作させるには、既存のプロトコルを改変する手法が考えられる。しかし、ARP、経路制御プロトコル、IGMP を個別に改変し DVB-RCS に適応させる必要がある。また、新たな経路制御の技術を考える場合、DVB-RCS も含めて対応しなければならない。また、改変を加えたプロトコルを既存のインターネットに導入するには困難がともなう。

本章では、既存のインターネットプロトコルに改変を加えず、そのまま DVB-RCS を用いたネットワーク上で動作させる手法を議論する。インターネットでは、多くのインターネットプロトコルがポイントツーポイントリンクとブロードキャストリンクを前提として設計されている。ATM などの NBMA や衛星回線における片方向リンクなど、それ以外の通信媒体をインターネットで用いる場合、これらをポイントツーポイントリンクかブロードキャストリンクにエミュレーションすることが多い。ATM では LANE(LAN Emulation) 片方向リンクでは UDLR(Uni-Directional Link Routing) などを用いる。

本章では、次に述べる理由により、DVB-RCS を単一の論理的なブロードキャストリンクにエミュレーションする手法を提案する。

- 既存のプロトコルに改変を加える必要がない。
- ブロードキャストリンクとして扱うことで、衛星回線の同報性がそのまま活かせる。

DVB-RCS のブロードキャストリンクエミュレーションを図 3.2 に示す。

3.3 LAN エミュレーションシステムの設計

本研究では、DVB-RCS を単一の論理的なブロードキャストリンクとして扱えるシステムを構築する。本システムを LED(Lan Emulation for DVB-RCS) と呼ぶ。

衛星回線では、ほかの回線と比較して専用の機器が多く用いられる。このため、DVB-RCS のインタフェースや親局と子局に用いるノードも専用の機器である可能性が高い。親局や子局がルータとしての機能しか持ち合わせていない場合、必要な機能がそのルータでサポートされていないなど、運用上の問題が生じる可能性がある。親局や子局がブリッジだった場合、必要な機能を専用のルータで動作させるなど柔軟な運用が可能になる。したがって、インターネットにおいて DVB-RCS を汎用的に利用するには、親

局と子局がルータあるいはブリッジのどちらであっても正常に動作するように設計する必要がある。

### 3.3.1 設計要件

DVB-RCSをブロードキャストリンクにエミュレーションするためには、次の(1)、(2)の2つの機能が必要である。

#### (1) 片方向インタフェースの集約

ブロードキャストリンクでは、リンク上の各ノードは、双方向に通信できる単一のインタフェースで接続している。DVB-RCSでは、親局と子局が複数の片方向インタフェースによって双方向に接続するため、これらの複数の片方向インタフェースを単一の双方向インタフェースに集約して動作させる機能が必要である。

#### (2) 子局同士の直接的な通信

ブロードキャストリンクでは、あるノードが送信したデータは、同一リンク上のすべてのノードが受信できる。DVB-RCSでは、子局が直接データを送信できるのは親局だけであり、ほかの子局にユニキャストを送信したり、マルチキャストやブロードキャストを行えない。このため、子局からほかの子局に対し論理的に単一リンク上でデータを送信できる機能が必要である。

LEDはこれらの機能を提供する、以下の3つの機構で構成される。

- 仮想インタフェース機構
- 親局による送信の代行機構
- LEDヘッダによる送信子局の識別機構

### 3.3.2 仮想インタフェース機構

仮想インタフェースは、複数の片方向インタフェースを論理的に単一の双方向インタフェースに抽象化する。仮想インタフェースを親局、子局の両方で導入し、親局と子局はDVB-RCS上の送受信に関して、仮想インタフェースを介してデータリンクフレーム

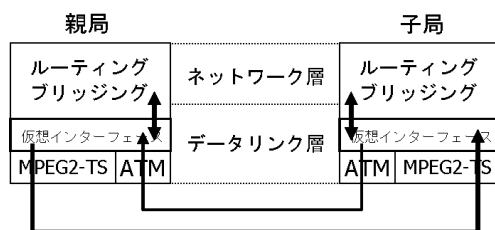


図 3.3. 仮想インタフェース機構

の送信、受信を行う。仮想インタフェースの概要を図 3.3 に示す。

### 3.3.3 親局による送信の代行機構

DVB-RCSの特性上、子局同士は直接通信できない。DVB-RCSをブロードキャストリンクにエミュレーションするには、子局同士が論理的に直接通信できるようにする必要がある。親局による送信の代行機構は、子局からのブロードキャスト、子局同士の通信を親局が代行して送信することにより、論理的に子局同士が通信できるようにする。親局による送信の代行機構を図 3.4 に示す。

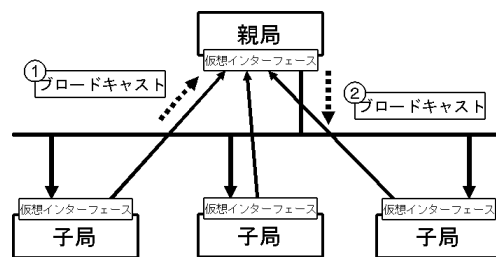


図 3.4. 親局による送信の代行機構

### 3.3.4 LEDヘッダによる送信子局の識別

親局による送信の代行機構により、子局がブロードキャストパケットやほかの子局へのユニキャストを行ったとき、その子局は自分が送信したデータを再び仮想インタフェースで受信する。子局がブリッジだった場合、これによってブリッジに用いるMACアドレステーブルを誤って学習する。LEDヘッダによる送信子局の識別機構は、子局がReturn Linkに送信するデータリンクフレームに、送信子局を識別するヘッダを付加する。受け取ったデータが自分が送信したものか、ほかの子局が送信したものか判断する。

## 3.4 評価

本章では、DVB-RCSを用いたネットワークをブロードキャストリンクにエミュレーションした場合、通信性能に影響を与えると考えられる以下の3つの点を評価した。

- ブロードキャストフレームの流量
- 経路制御メッセージの流量

### 3.4.1 ブロードキャストフレームの流量

DVB-RCSを用いたネットワークには、大多数の子局が接続すると想定される。DVB-RCSをブロード

キャストリンクにエミュレーションした場合、ノード数が増加するにしたがってブロードキャストフレームの流量が増加すると考えられる。実際に使われているイーサネットの末端ネットワークにおいて、ブロードキャストフレームを計測した。このリンクに参加するノード数は約100台であり、上流リンクには平均約3.2Mbpsのトラフィックが流れていた。このリンク上で、ARPなど、ブロードキャストリンクにおいて汎用的に用いられるインターネットプロトコルによるデータトラフィックの流量は約8.26kbpsであった。これは、通常使われるDVB-RCSのフォワードリンクの回線速度30Mbpsに比べて十分に小さいことがわかった。

#### 3.4.2 経路制御メッセージの流量

DVB-RCSを用いたネットワークをLEDによってブロードキャストリンクにエミュレーションした場合、その上で経路制御メッセージの流量がどの程度かについて評価した。親局と子局が一定量の経路数を保持し、経路、回線状態、ルータの状態は変化しないものとしてシミュレーションを行った。その結果、LEDによってブロードキャストリンクにエミュレーションされたDVB-RCS上でも、経路制御メッセージの量は既存のブロードキャストリンクと比べてほとんど差がないことがわかった。

### 3.5 まとめ

本章では、DVB-RCSを、インターネットにおいて既存の回線と同様に利用するため、ブロードキャストリンクにエミュレーションする手法を提案した。

今後、本機構の実用化を進めるため、実際にDVB-RCSを用いたネットワークにおいて本機構の動作検証と性能測定を行う必要がある。

---

## 第4章 通信衛星を利用したインターネット接続の運用事例

---

### 4.1 まえがき

2001年1月に政府の高度情報通信ネットワーク社会推進戦略本部は、IT立国の形成を目指しeJapan戦略を発表した。この中のネットワークインフラの構築目標として、「高速インターネットを3000万世

帯に、超高速インターネットを1000万世帯に利用可能な環境整備」が示されている。その結果、ブロードバンドサービス環境は、日本全国に広がり、多くの人がブロードバンドの利益を享受できるようになった。

現在、普及が進んでいるブロードバンドは、メタル（電話線）を利用したxDSLや光ファイバといった有線技術を利用している。したがって、電柱や共同溝といったメディアを整備するためのインフラが必要とされる。このため、山岳地、諸島、海上といったインフラの整備されていない地域においては、xDSLや光ファイバによるインターネット接続が困難であったり、サービスが行われていないのが現状である。

このような有線メディアが整備されていない所においては、無線メディアの利用が有効である。とくに、人工衛星を利用した通信は、人工衛星を捕捉出来れば、地上のインフラ状況に左右されずに利用する事が可能である。

人工衛星を利用したデジタル通信は、機器や回線コストがネックとなっているが、近年、デジタル衛星放送上で、データ交換を行うための標準規格であるDVB-RCS(Digital Video Broadcasting, Return Channel via Satellite)が制定され、量産効果により安価な通信機器が揃うようになった。

本章では、通信インフラの導入が困難な国立天文台乗鞍コロナ観測所においてDVB-RCSシステムを利用したインターネット接続環境の運用報告を行う。

### 4.2 システム構成

ここでは、DVB-RCSシステムの概要を説明し、乗鞍コロナ観測所での運用事例を述べる。

#### 4.2.1 DVB-RCS システム

ここでは、今回用いたDVB-RCSという技術について説明する。

DVB-RCSとは、ETSI(European Telecommunications Standard Institute)が定めたデジタル衛星放送上でデータの送受信を行う通信規格である。

通常、家庭やオフィスなどで広く用いられているデジタル衛星放送用の衛星機器は、受信専用である。そこで、DVB-RCSでは、画像用のデータフレーム(非圧縮MPEGフレーム)上に、通信用のデータを組み込み、かつ、衛星機器からの放送事業者へのフィードバック(戻り回線)も衛星回線上で可能とするた



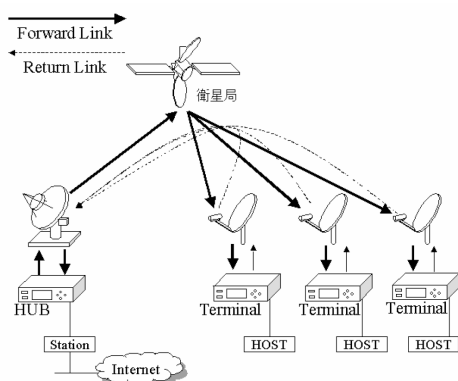


図 4.1. DVB-RCS の構成

めの必要な技術を定めている。これにより、デジタル放送上でデータを受送信が可能となっている。

DVB-RCS のシステムは、事業者側に設置される 1 つのハブ局と加入者側に設置される複数のターミナル局で構成されている。したがって、従来の 2 地球局間で帯域占有して通信を行う衛星通信ではなく、アップリンクの周波数帯とダウンリンクの周波数帯を、それぞれ、ハブ局からの指示にしたがって、ハブ・ターミナル局間で時分割多重し共有するようになっている。

また、DVB-RCS は、ハブ局側からターミナル局を管理するしくみとなっている。したがって、日本においては、VSAT (Very Small Aperture Terminal: 超小型地球局) として運用することができる。そのため、「ターミナル局」側に無線従事者を必要とせず、非常にオペレーションコストが低いのも特徴の 1 つである。

#### 4.2.2 乗鞍での運用構成

今回用いた DVB-RCS システムでは、カナダ EMS テクノロジーズ社製のターミナル局、ハブ局を利用した。

ハブ局の運用は、JSAT (株) の横浜衛星管制センター (YSCC) で行い、ターミナル局は、乗鞍コロナ観測所で運用を行った。

DVB-RCS ターミナル局を運用するための機材構成は、衛星放送を受信するために必要な機材構成とほぼ同じである。必要な機材は、アンテナ部 (アンテナ台、90 cm ディッシュ、ODU (ディッシュの焦点で電波を送受信する機器、図 4.2))、同軸ケーブル (ODU ~ IDU<sup>1</sup>間を接続)、IDU (同軸上の電波を変



図 4.2. ODU: 大きいユニット (下部) が送信・小さいユニット (上部) が受信を行う



図 4.3. DVB-RCS モデム (中央にある約 2U の黒色の機器)

調復調し、データ通信を行う機器。DVB-RCS モデム。図 4.3) である。

DVB-RCS モデム (IDU) は、衛星からの RF 入力端子・RF 出力端子、イーサネットポートで構成されている。また、DVB-RCS モデムには、ルータ機能が内蔵されているため、イーサネットポートに対しては、ネットワークと IP アドレスがハブ局側から割り当てられる。したがって、衛星回線が開通と同時に、インターネットの利用が可能となっている。

これらの機材設置に当たっての注意すべき点としては、アンテナ据付とケーブル敷設がある。

アンテナ据付は、良好な受信環境を維持するために、アンテナが風雨 (雪) に耐えることができる工法を利用しなければならない。強風などによって、アンテナがずれた場合、ターミナル局は、ハブ局からのキャリアが受信できなくなり、自動的に送受信ともに停止しキャリアが復旧するまで、サービスが中断される。

ケーブル敷設は、IDU-ODU 間を接続するための

1 ODU: Out door unit、IDU: In door unit

7C タイプの同軸ケーブル 2 本（受信用・送信用）を屋外の ODU から建屋内の IDU まで引き込む必要がある。したがって、ケーブルを固定するための架台や建屋内への引き込み口が必要となる。

#### 4.2.3 乗鞍でのアンテナ設置方法

乗鞍コロナ観測所は、2873 m に位置する乗鞍山系摩利支天岳山頂に建っているため、風が強くその風対策が焦点となった。これに対しては、地盤にコンクリートアンカーを打ち、アンテナを支えるマスト（支柱）を建てて、その上にディッシュを固定し、ODU を取り付けるといった手法が有効である。

しかしながら、時間的・費用的コストがかかるため、対風速条件などを検討した結果、今回は、マスプロ社製のアンテナ台（図 4.4）とコンクリートブロックの積み上げによる固定方式を採用した。

このアンテナ台は、鉄製の組み立て式で、アンテナマストと、マストを固定するための鉄骨で構成されている。鉄骨で架台を作り、その架台にアンテナマストを取り付け、架台は、市販のコンクリートブロックで固定する。組み立て式アンテナ台とコンクリートブロックで構築するため、設置に必要な機材や工期を大幅に抑えることができる。



図 4.4. アンテナ台

#### 4.2.4 ネットワーク機材

DVB-RCS により乗鞍コロナ観測所からインターネットに対して接続性が確保できるが、提供される

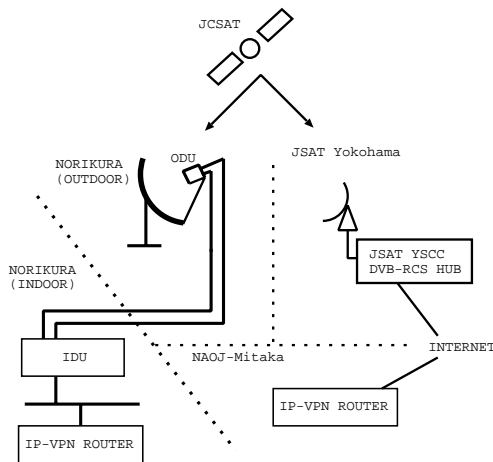


図 4.5. 構成全体図

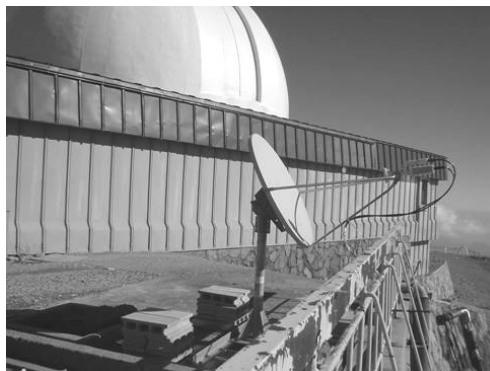


図 4.6. 設置場所（後ろは観測ドーム）

IP アドレスは、JSAT が所有するアドレスである。したがって、観測所内の LAN は、外部のネットワークとして扱われるため、国立天文台として、利用するには使い勝手が悪い。

そこで、運用では、国立天文台と DVB-RCS ターミナル局間で IP-VPN（IPsec トンネルを利用）を構築し、国立天文台が所有する IP アドレスを乗鞍コロナ観測所内 LAN にて使えるようにした。これにより、乗鞍コロナ観測所内のネットワークは、国立天文台内のネットワークと同様に取り扱うことができるため、飛躍的に利便性が向上した。

なお、IP-VPN ルータとして、乗鞍コロナ観測所側では、米 Juniper 社の Netscreen 5XP を利用し、国立天文台三鷹キャンパス側では、Netscreen204 を利用した。

最終機器構成を図 4.5 に、設置場所を図 4.6 と図 4.7 に示す。



図 4.7. 前に広がる道は、乗鞍エコーライン

#### 4.3 DVB-RCS 運用から得られた成果

ここでは、乗鞍コロナ観測所において、DVB-RCS 運用を行った結果から得られた成果を述べる。

##### 4.3.1 衛星回線の実効帯域

本システムでの周波数レベルの割り当て帯域は、ハブ局からターミナル局方向は 20 Mbps、ターミナル局からハブ局方向は 2 Mbps となっている。ハブ局からターミナル局への帯域は、時分割多重によりターミナル局間で共有し、また、ターミナル局からハブ局への帯域は、周波数・時分割多重で共有する。したがって、ターミナル局当たりでの実効帯域は、割り当て帯域より小さくなる。

そこで、実際の実効帯域を netperf を用いて計測を行った。

遅延時間は、

三鷹-ハブ局 11.901 ms

三鷹-ターミナル局 589.475 ms

となっており、静止軌道上の衛星を経由することもあって、約 0.5 秒の RTT となった。

一方、帯域は、

方向	受信 サイズ	送信 サイズ	MSG サイズ	帯域 (Mbps)
乗鞍へ	65536	32768	32768	0.39
三鷹へ	57344	32768	32768	0.32

(TCP, 計測時間 10 分)

となった。時期・時間帯によっては、ハブ局からターミナル局へは、1 Mbps 程度出る場合もあった。これは、JSAT と国立天文台間は、インターネットを経由するため、このあたりのトラフィック状況や、衛星回線自体の共有状況などに左右される。しかしな

がら、おおむね 300 Kbps 程度は安定して利用可能といえる。

##### 4.3.2 常時接続の効果

DVB-RCS 運用が始まる前の乗鞍コロナ観測所のネットワーク環境は、自動車電話を利用した 9.6 kbps のダイヤルアップ環境であった。そのため、電子メールや WEB ページの閲覧などの情報量が圧倒的に削減された状況であった。

しかし、DVB-RCS による常時接続によって、リッチコンテンツの利用が可能となり、三鷹と同等の作業環境や、天気予報や雷情報といった観測所運用に欠かせない情報が容易に手に入るようになった。したがって、乗鞍コロナ観測所における業務環境は劇的に改善した。

また、コロナ観測結果をリアルタイムに三鷹キャンパスへ転送し、WEB 公開を行うシステムによる観測支援や乗鞍の自然を伝えるライブカメラ（アクセス数平均 320 件/日）や金星の太陽面通過のリアルタイム中継（4 時間で 28000 をこえるアクセス数）など情報公開にも積極的に活用することができた。

##### 4.3.3 その他

簡易設置のアンテナだったが、台風通過にともなう風速 50 m/s を超える環境でも運用上問題なかった。

また、ターミナル局が非常にシンプルな構成となっているため、故障などのトラブルはなく、度重なる落雷予測などに基づく緊急停止（停波）においても、通電後は、運用状態に復帰し、シームレスにサービスが再開するため、大きなトラブルは発生しなかった。

しかしながら、ターミナル局の機材性能が高くないため、十分な利得マージンが得られず、たびたび瞬停する状況が見受けられた。これについては、しかたがないところである。

乗鞍コロナ観測所は、現在、冬期間閉所を実施している。冬季閉所中、アンテナディッシュと ODU は、雪害から守るために取り外し、観測所内に保管されている。したがって、運用再開には、再度アンテナの調整と無線従事者による試験が必要となる。

#### 4.4 今後の予定

2005 年度も DVB-RCS システムの運用を予定している。2004 年度は、アンテナ調整に必要なスペクトラムアナライザの輸送が困難であったため、運用開

始が5月下旬となった。この反省を活かし、2005年度は、迅速に運用再開を行うため、ポータブル型のスペクトラムアナライザによるアンテナ調整を計画している。

また、より小型化したターミナル局の導入や、通信速度の向上を図るアクセラレータの運用、観測データの即時公開システムの強化、ライブカメラによる情報公開なども行う予定である。

---

## 第5章 Analysis of IP Encapsulation Methods over DVB Satellite

---

### Abstract

Despite the fact that there are some problems with latency and high error rate with satellite connections, they are expected to play an important role in providing Internet Protocol (IP) services to complementing next-generation terrestrial network.

In this chapter we will do efficiency analysis for various encapsulation methods to transport IP packets via satellites used in Digital Video Broadcast (DVB) open standard. We do analysis based on theoretical calculations and also based on real traffic from three different scenarios or network models.

### 5.1 INTRODUCTION

Satellite communication technology has been developed for nearly 50 years. For many years Geosynchronous earth orbit (GEO) transparent (bent-pipe) satellites have been the most important element of telecommunication networks, serving particularly long distance telephone services and television broadcasting.

In the latest trend of global telecommunication, Internet Protocol (IP) traffics hold most of the share in total traffics. Consequently demand to use satellite in IP networks are increasing to complement existing terrestrial communication networks. IP over satellites offer significant advantages such as wide geographic coverage,

broadcast capability, rapid deployment and support for mobile stations. This is important for Internet connections in areas and countries which are not covered by good terrestrial connections due to the rough terrains.

Currently there are many standards exist on IP transportation via satellites. However, most of the standard is exclusive only for certain satellite connection provider. As the result, the equipments tend to be very expensive. To reduce deployment cost, open standards are required so that equipments could be mass produced. European Telecommunication Standards Institute (ETSI) defined 2 open standards in satellite communication; Digital Video Broadcast for Satellite (DVB-S) and DVB Return Channel via satellite (DVB-RCS). These standards are widely in used currently.

DVB standards initially intended for digital audio video broadcasting using MPEG-2 Transport Stream (TS) and not optimized for IP packets. Therefore in this chapter, we present IP packets encapsulation analysis for various encapsulation methods defined by DVB standards. We do analysis based on theoretical values and also based on the real traffic for various satellite network models. The analysis result is vital for research to enhance efficiency for transporting IP traffic in satellite networks.

### 5.2 SYSTEM ARCHITECTURE

In IP over DVB-S, the forward link is a broadband broadcast channel with receive only characteristic as seen by the satellite interface terminals (SIT). The return link could be a one-way channel and also could be a network connection permitting two-way operation[72] using ordinary terrestrial link such as PSTN. This kind of connection is called UniDirectional Link (UDL) and various works such as [65] have been done to address routing problems in UDL. Figure 5.1 shows the DVB-S topology.

However, in recent development, DVB with return channel via satellite (DVB-RCS) have been

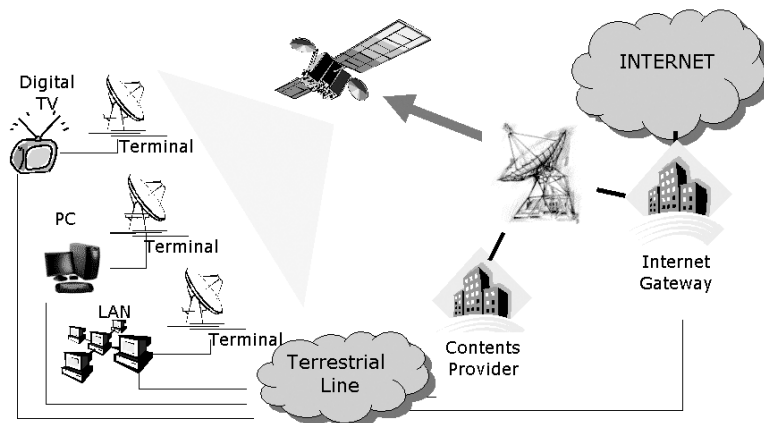


Fig. 5.1. DVB-S Topology

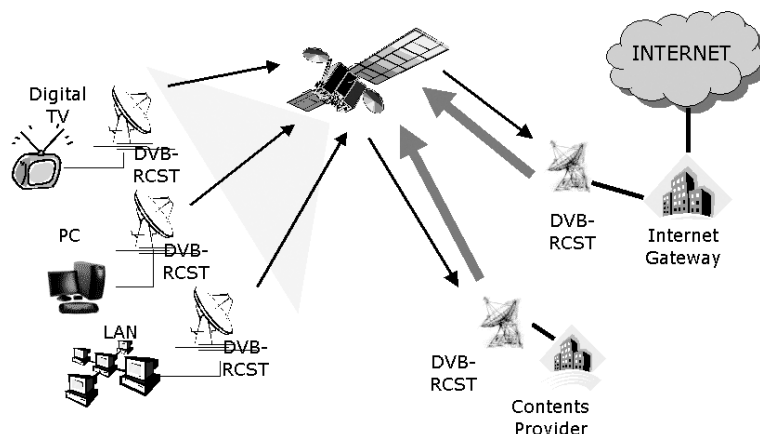


Fig. 5.2. DVB-RCS Topology

standardized enabling full independency to the terrestrial network[72]. DVB-RCS is a modified version of DVB-S with additional standards on how to create interactive return channel using satellites. Figure 5.2 shows DVB-RCS topology, which can be characterized by having broadcast channel in forward link and point to point (PPP) channel in return link.

The DVB systems family is based on cell-oriented packet transmission system defined by ISO/IEC 13818-1 MPEG-2 systems standard[71].

DVB systems family use fixed size MPEG-2 Transport stream (MPEG-2 TS) to carry packetized data in the forward link. Meanwhile in case of interactive system, return link can use various systems to transport TCP/IP based data according to the link technology in used. For example

DVB-RCS use ATM/AAL5 cells by default and also define optional MPEG-2 TS usage to be used in the return link. Since ATM is a well known system, the details about it will not be discussed in details.

**5.3 MPEG-2 TRANSPORT STREAM**

MPEG-2 TS (transport stream) initially used to transport compressed video and audio data. However MPEG-2 TS is also able to carry defined data containers such as IP packets in addition to audio and video.

Figure 5.3 shows 188 byte fixed sized TS cells[182]. Each TS cells consist 4 bytes of header and 184 bytes payload. Error recovery is easier when using constant cell length (essential in error prone line).

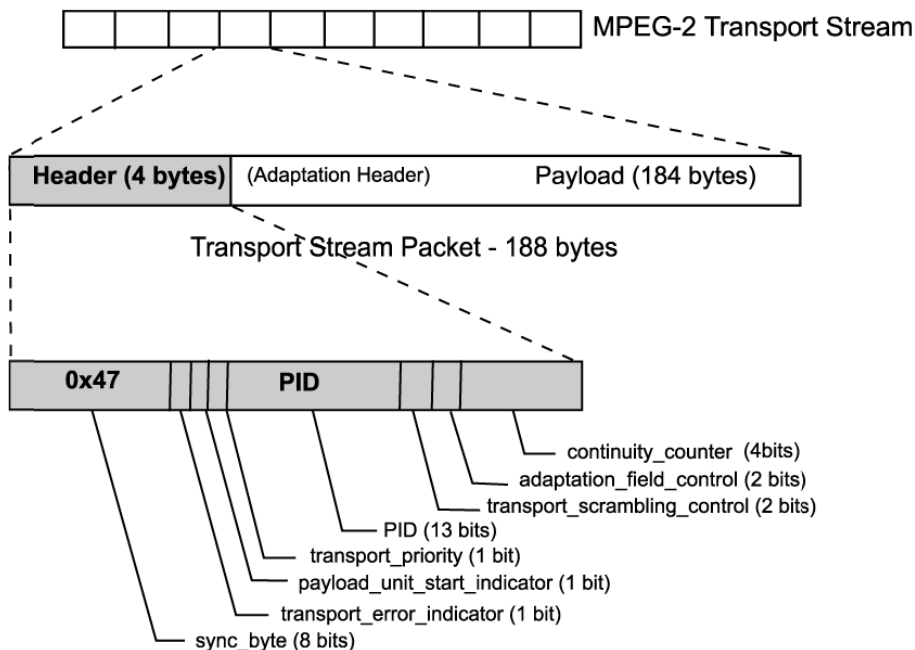


Fig. 5.3. MPEG-2 TS structure

Details about 3 important header fields in this chapter are described below.

1. Payload\_unit\_start\_indicator (1 bit): 1 indicates presence of a new PES packet or section layer packet. In case of section layer packet, if PUSI = 1, first byte in the payload contain payload\_pointer\_field.
2. Packet Identifier (PID) (13 bit): values 0x1FFF is null packet (ignored by the receiver). PID are used to distinguish between different logical channels.
3. Payload\_pointer\_field (8 bit, optional) presence if and only if PUSI equal to 1 in PSI packet. Indicate the number of byte until the new section layer packet started after the field.

Compressed data from a single source (video, audio, and data) and additional control data for the source information form elementary streams (ESs). ESs then are packetized into packetized ES (PES). Each PES packets consist of a header and payload and PES from various elementary streams are combines to form a program[252].

Several programs combine to form the TS with other descriptive data called program-specific

information (PSI). PSI contains descriptive data about the network and also assignments of PESs and PIDs into the program. Examples of main PSIs is program association table (PAT), program map table (PMT), and network information table (NIT).

Details about PSI and other header fields are out of this chapter's scope and will not be discussed in detail.

**5.4 IP ENCAPSULATION INTO MPEG-2 TS**

Figure 5.4 shows 3 different methods to encapsulate IP packets into MPEG-2 TS cells[70]. Below is the description of the methods.

1. Data streaming: IP packet encapsulation into PES packets.
2. Multi Protocol Encapsulation (MPE): IP packet encapsulation into Digital storage medium—command and control (DSM-CC) table section packet.
3. Data piping: IP packet encapsulation directly into TC cells. Current work is Ultra Light Encapsulation (ULE).

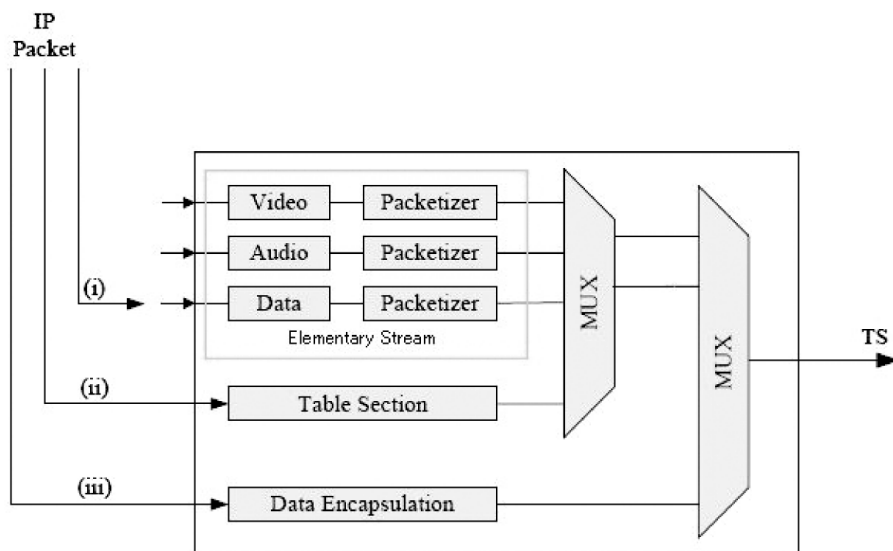


Fig. 5.4. Possible entries for IP packets in MPEG-2 TS

#### 5.4.1 MPE

MPE is the IP encapsulation standard defines in DVB family of standards. It allows transmission of IP packets or Ethernet style frames in the control plane associated with audio/video transport. Data is formatted as if it were a DSM-CC Table Section data.

MPE makes use of a medium access control (MAC) level device address and the address format follows the ISO/IEEE standards for LAN/MAN.

MPE packets have 12 bytes of header and 4 bytes of cyclic redundancy check as the tail[70].

MPE packet are suboptimal to carry IP packets since not all the header fields added are required to deliver IP packets to the destinations.

#### 5.4.2 ULE

Ultra Lightweight Encapsulation (ULE) has been introduced in an Internet draft[94] to eliminate unnecessary overhead in MPE. ULE encapsulate IP packets directly into a sequence of TS. Unlike MPE, ULE only have 4 bytes of header cutting 8 bytes from the header in MPE and have 4 bytes of CRC or checksum trailer[94].

Destination Address Present Field is the most significant bit of the header. A value of 0 indicates the presence of optional Destination Address Field

(6 byte) in the payload and value 1 indicates the field is not present.

ULE is still in the draft and yet to be standardized. Currently the standard method to encapsulate IP into MPEG-2 TS is MPE. MPE is neither elegant nor efficient solution but for the time being seems to be generally accepted.

#### 5.4.3 Padding and Section Packing

There are 2 modes to encapsulate IP packets into MPEG-2 TS using MPE or ULE. First mode is padding mode and the second one is section packing mode.

In both modes, one IP packet is encapsulated independently into one section layer packet using MPE or ULE respectively. Both modes differ only how section layer packets is divided or inserted into TS cells.

In padding mode, one section layer packet is encapsulated independently into TS cell or cells. Since TS cell is fixed size cell with 184 bytes of payload, a section layer packet is not necessary to perfectly fit into one or multiple TS cells. In that case, the leftover space will be padded with padding bytes and are considered as overhead. In padding mode, one IP packet is encapsulated into section layer packet and is instantly inserted into TS cell or cells. Therefore certain IP packet will

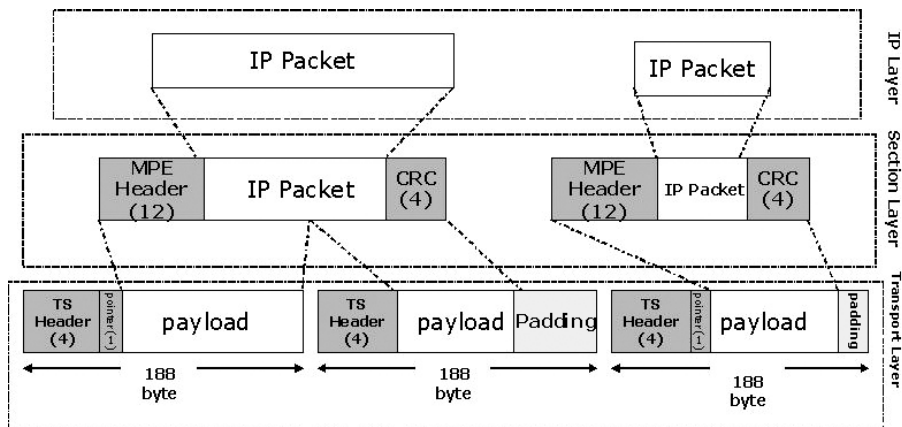


Fig. 5.5. MPE padding mode

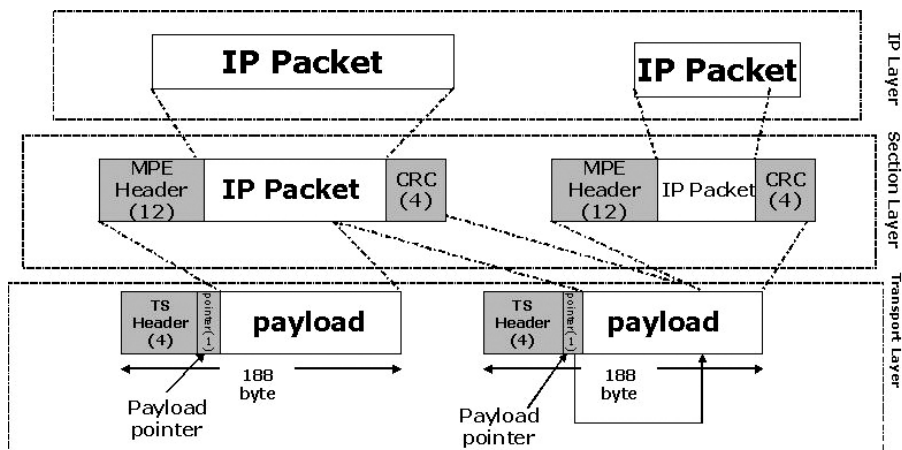


Fig. 5.6. MPE section packing mode

not have to wait for other IP packets to come. Jitter for each packet is expected to be minimal. Figure 5.5 shows MPE encapsulation method in padding mode. ULE encapsulation is similar to MPE and only differs in overhead number.

Meanwhile in section packing mode, leftover space will no be filled with padding bytes. If there are leftover spaces, it will be filled with the next section layer packet. In this mode, ULE draft defines the leftover space in TS cell should be more than 2 bytes before new section layer packet is inserted. It is because first 2 bytes of the ULE header can't be divided into multiple cells. However MPE specification does not define explicitly how to do section packing. Figure 5.6 shows section packing mode in MPE encapsulation. ULE have similar mechanism except having

different total overhead. In section packing mode, if section layer packet is smaller than TS cell payload, it has to wait for the next packet to come before being transmitted. If it is longer than TS cell size, it will be divided into multiple cells. All filled TS cells will be transmitted immediately while the last cell will have to wait for the next packet. Therefore, in this mode since no padding byte is necessary; the efficiency is expected to be higher with the cost of having longer jitter produced by different packet waiting time.

### 5.5 EFFICIENCY

In this section we describe efficiency calculation for various IP packet encapsulation methods that will be used in our analysis later. The methods are MPE, ULE, ATM/AAL5 and Ethernet.



### 5.5.1 MPE/ULE Efficiency equation

MPE and ULE have similar efficiency equation. MPE have 16 bytes total overhead without LLC/SNAP and 24 bytes overhead with LLC/SNAP.

Meanwhile total overhead for ULE is 8 bytes without Destination Address, 14 bytes with Destination Address, 22 bytes for Ethernet bridging, and 28 bytes for Ethernet bridging with Destination Address.

There are two scenarios to calculate the efficiency. First when a single IP packet encapsulated in TS cells without concatenation with other IP packets (padding mode). The later is when multiple IP packets can be concatenated into TS cells (section packing ON).

Each TS cells have 4 bytes of header and 184 bytes of payload. The first cells will have 1 byte payload pointer, so it will have only 183 bytes payload. In padding mode, IP packets only start at the beginning of Transport stream cells, and the remainder will be padded by padding bytes.

If  $L$  denotes the total overhead of the section layer (8, 14, 16, 22, 24, 28) and  $S$  denotes IP packet length, the total cells  $n$  required to transmit an IP packet can be denote by:

$$n = \left\lceil \frac{S + L + 1}{184} \right\rceil \quad (1)$$

Where  $\lceil x \rceil$  is the smallest integer greater or equal to  $x$ . Then the number of padding bytes,  $p$  can be defined as:

$$p = 184 - [S + L + 1 - (n - 1) \times 184] \quad (2)$$

The efficiency will be:

$$E = \frac{S}{n \times 188} \quad (3)$$

Now if section packing mode is ON, there will be no padding bytes. There will be 2 cases for efficiency calculation:

1. If  $S > 183 - L$  then there will be one byte pay-

load pointer for every IP packet, and for simplicity we can add the overhead into the section layer overhead. The transport overhead

will be 4 bytes for each TS cells. This means total transport layer overhead per IP packet will be:

$$\frac{S + L + 1}{184} \times 4 \quad (4)$$

And the efficiency will be:

$$E = \frac{S}{S + L + 1 + \left[ \frac{S + L + 1}{184} \times 4 \right]} \quad (5)$$

2. If  $S < 183 - L$  then there will be one payload per transport packet. We could add the overhead into TS overhead making it 5 bytes per TS packet. Therefore total transport layer overhead per IP packet will be:

$$\frac{S + L}{184} \times 5 \quad (6)$$

And the efficiency will be:

$$E = \frac{S}{S + L + \left[ \frac{S + L}{184} \times 5 \right]} \quad (7)$$

3. If  $S = 183 - L$ , Efficiency equal to equation (3).
4. In ULE, TS cells must at least contain 2 bytes of additional space before accepting another section layer packet. Therefore when  $S > 183 - L$  and padding byte  $p$  is equal to 0, 1 or 2, or  $S < 183 - L$  and  $p = 1$ , overhead is equivalent to 3. The logic is when  $S > 183 - L$ ; we divide IP packets into multiple TS cells. Then the last TS cell will not contain any payload pointer. In order to fit in a new SNDU, at least 2 bytes must be free so that length field will not be divided into multiple TS packets. Then we need another byte to put payload pointer. Therefore total free bytes needed to put a new SNDU are minimum 3 bytes. Meanwhile when  $S < 183 - L$ , TC cells will already contain payload pointer and only need 2 extra bytes for the next section layer packet.

### 5.5.2 Ethernet Efficiency equation

Ethernet adds the following overhead to IP packets:

1. 8 bytes of preamble

- 2. 14 bytes of header (MAC address 12 bytes, Ethertype 2 byte)
- 3. 4 bytes of CRC

Total Overhead is 26 byte. Minimum Ethernet frame is 64 bytes (excluding preamble), therefore, packet less than 46 bytes will be padded. If IP packets size in bytes is denoted by  $S$ , Efficiency,  $E$  will be defined as:

- 1.  $S \leq 46$

$$E = \frac{S}{72} \tag{8}$$

- 2.  $46 \leq S \leq 1500$

$$E = \frac{S}{S + 26} \tag{9}$$

**5.5.3 ATM Efficiency equation**

ATM/AAL5 have the following overhead.

- 1. AAL5 trailer 8 bytes.
- 2. 5 bytes overhead for every ATM cells.

At AAL5 layer, 8 bytes of trailer will be added to each IP packets. Then each ATM cells have fixed size (53 bytes) and each cell has 5 bytes of overhead. Section packing could not be done in ATM encapsulation. If  $S$  denotes size of the IP packets, the total cells number  $n$  required to transport the IP packet can be express by following equation:

$$n = \left\lceil \frac{S + 8}{48} \right\rceil \tag{10}$$

And the efficiency,  $E$  is:

$$E = \frac{S}{n \times 53} \tag{11}$$

AAL5 encapsulation into ATM cells only have one mode; padding mode. Section packing mode is not defined in ATM/AAL5 standards and therefore all the leftover spaces will be padded with padding byte.

**5.6 ANALYSIS METHODS**

In this chapter we present analysis based on the theoretical values and also based on real Internet traffic patterns. We divide the analysis into 2 modes; padding mode and section packing mode.

Theoretical analysis is based on the equation introduced in section 5.4. We do analysis for MPE and ULE for IP packet encapsulation into MPEG-2 cells and also ATM/AAL5 for encapsulation into ATM cells used as default in DVB-RCS's return link. For comparison purpose, we also perform analysis for Ethernet, the well known encapsulation method for IP packets.

For real traffic, we do analysis based on 3 different scenarios; single personal computer (PC), web server and local area network (LAN) shown in Figure 5.7. These scenarios have different traffic pattern and therefore have different efficiency characteristic.

In section packing mode, we assume that we have enough buffer size to buffer the packet

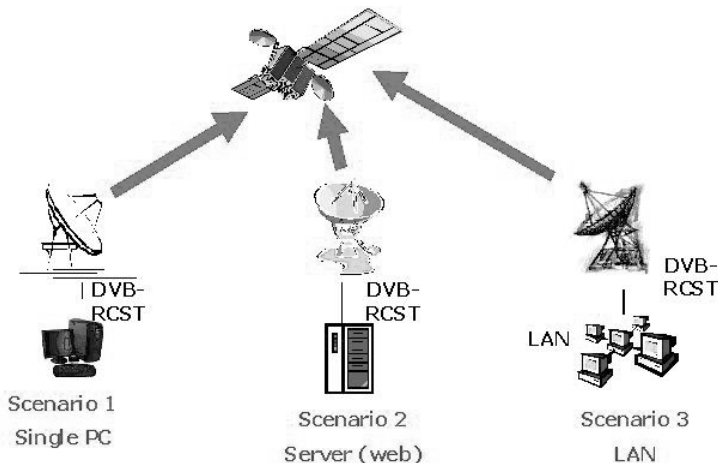


Fig. 5.7. Real traffic analysis scenarios

while waiting the next packet to be concatenated together. We also assume that if there is leftover space in a TS cell, the cell will wait long enough until the next section layer packet arrived. The objective is to fully eliminate overhead introduced by padding bytes.

## 5.7 RESULTS

We divide this section into four part; result for theoretical values, result for scenario 1 (single PC), result for scenario 2 (web server) and finally result for scenario 3 (LAN).

Within each part, there will be 2 kind of results; result for padding method and result for section packing method.

### 5.7.1 Theoretical values

Graphs in Figure 5.8 and Figure 5.9 have the same axis. Y axis denotes the efficiency percentage and X axis denotes the IP packet length. Meanwhile the lines show the efficiency percentage for each encapsulation methods corresponding to the certain IP packet length.

Figure 5.8 present efficiency graphs in padding mode meanwhile Figure 5.9 present the efficiency in section packing mode. Both figures show efficiency percentage for MPE encapsulation with total overhead,  $L$  equal to 16 and 24, graph for

ULE with  $L$  equal to 8 and 14 and graph for ATM/AAL5 efficiency. For comparison we also include Ethernet efficiency graph.

In padding mode as shown in Figure 5.8, since all the left over space have to be padded and consequently introduce additional overhead, MPE and ULE efficiency seems to be equal except for certain small range areas. It is because although ULE have much smaller header overhead, padding bytes overhead will mostly compensate the smaller header and make the total overhead same as MPE encapsulation except for certain IP packet length where it is can perfectly fit into TS cells without or less padding bytes.

For small packets (around 180 bytes and below) ATM encapsulation seems to have better efficiency comparing to Ethernet, MPE and ULE. MPE and ULE relatively have bigger oscillation compare to ATM. ATM oscillation will converge into around 90% efficiency when IP packet size is big enough. Meanwhile, MPE and ULE have better performance in certain areas compare to ATM but the areas' range is very small and will return to much smaller efficiency area just after the highest efficiency point.

Meanwhile Figure 5.9 shows efficiency graph in section packing mode. Since no overhead is introduced by padding byte and packet concatenation

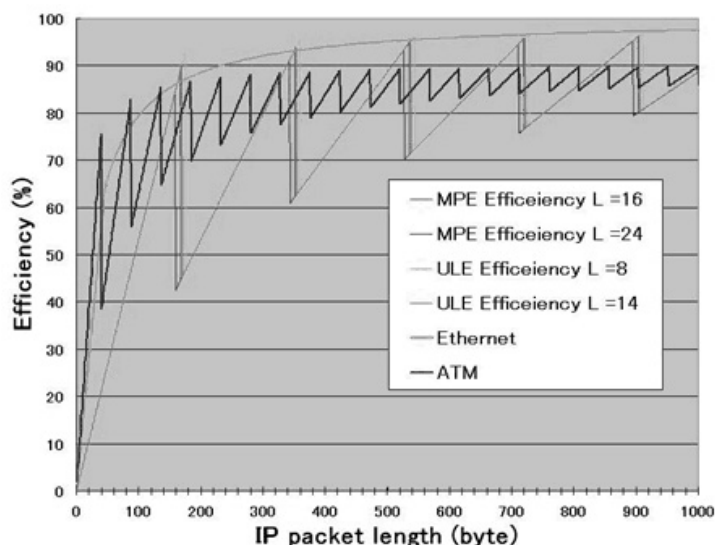


Fig. 5.8. Theoretical values—padding

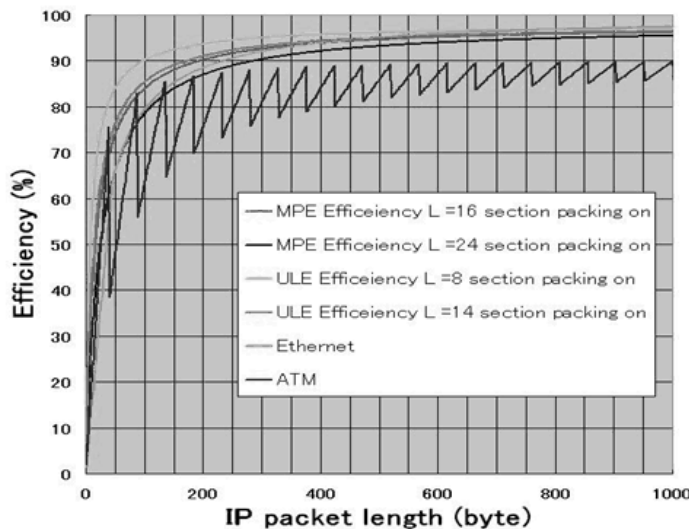


Fig. 5.9. Theoretical values—Section packing

is allowed, all the lines tend to be very smooth. However since ATM can't utilize section packing, ATM's graph in this figure is exactly the same with ATM's in Figure 5.8.

In this graph we can see ULE has better efficiency compare to MPE. Both ULE and MPE are better than Ethernet for small packets specifically below around 800 bytes for ULE and around 400 bytes for MPE. If IP packet is long enough, MPE and ULE efficiency converge to around 95%. It is 5% better compare to ATM encapsulation.

**5.7.2 Real Traffic**

Figure 5.10 shows the legend used in graphs for Figure 5.11 to 5.19. MPE and ULE efficiency are calculated using the minimum total overhead; 8 for ULE and 16 for MPE.

Figure 5.11 to 5.20 shows the result for real traffic analysis based on 3 different scenarios stated above. All the graphs have the same XY axis. X axis denotes time in second started from observation time. Y axis in the left denotes

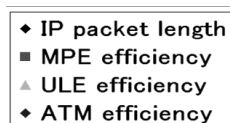


Fig. 5.10. Legend for Figure 5.11 to 5.20

the IP packet length produced in each scenario at a certain time represented by black points. Meanwhile Y axis in the right represents the efficiency (%) and is used to plot efficiency points, correspondent to each IP packet produced.

• Scenario 1

Figure 5.11 shows encapsulation efficiencies in scenario 1 in padding mode while Figure 5.12 show the result in section packing mode. IP packets produced in scenario 1 tend to be small in size. Therefore when in padding mode, ATM encapsulation proved to be the best among the others. Average ATM efficiency is around 55% while MPE and ULE have average around 33%. From figure 5.10 we can see most of time, MPE and ULE efficiency is plotted in the same place make it hard to distinguish their points. It is because as stated before, in padding mode MPE and ULE have the same efficiency most of the time.

However in section packing mode, as we can see from Figure 5.12, ULE and MPE have higher efficiency compare to ATM that did not have section packing mode. ULE is relatively has higher efficiency then MPE but the difference is small.

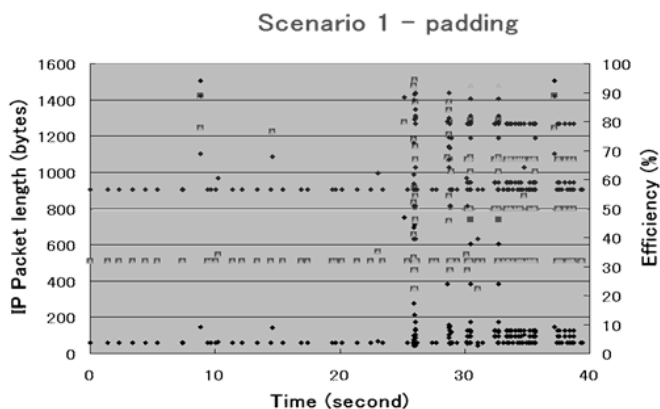


Fig. 5.11. Scenario 1—padding

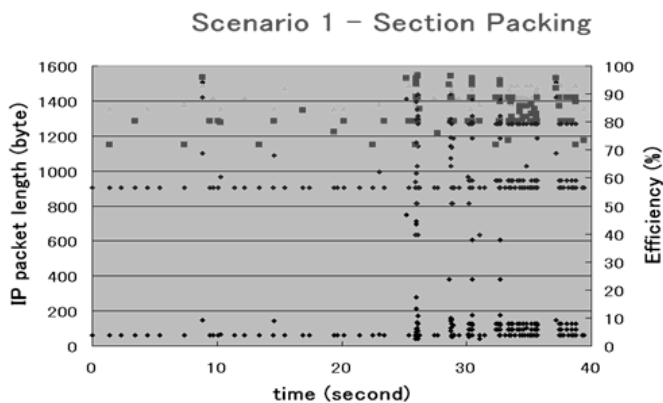


Fig. 5.12. Scenario 1—section packing

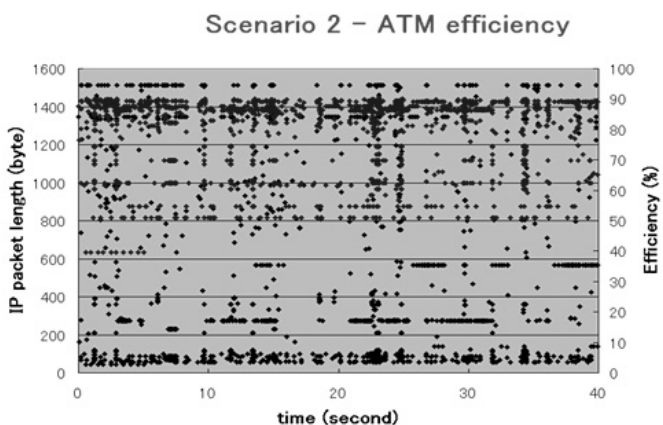


Fig. 5.13. Scenario 2 ATM efficiency

• Scenario 2

Figure 5.13 to 5.16 shows the result for scenario 2. In this scenario IP traffic seems to have more big size IP packets since it

is the traffic from a server which provides contents to the users. Figure 5.13 shows ATM efficiency in this scenario for padding mode. ATM efficiency has bigger range than

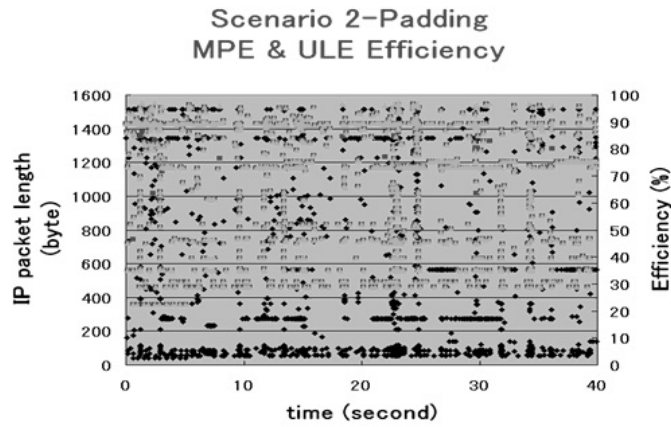


Fig. 5.14. Scenario 2 MPE & ULE efficiency in padding mode

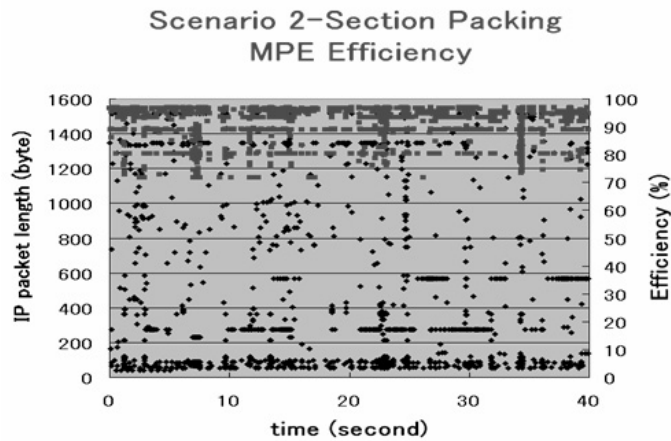


Fig. 5.15. Scenario 2 MPE efficiency in packing mode

scenario 1; from 60% to 90%. When comparing to MPE and ULE in Figure 5.14, we can conclude MPE and ULE visually have similar efficiency scattered between 30% to around 95%. The similar efficiency percentages make MPE and ULE values share the same place most of the time, making them hard to distinguish.

Meanwhile in section packing mode as shown in Figure 5.15 and 5.16, MPE and ULE obviously have much higher efficiency compare to ATM. MPE's average efficiency is around 90% and ULE's is around 93%. Although the different is small, ULE obviously is better that MPE in section packing mode.

● Scenario 3

Figure 5.17 to 5.20 shows the result for scenario 3. From the graphs we can see scenario 3 have the heaviest traffic compare to other scenarios.

Figure 5.17 shows ATM efficiency in scenario 3. As we can see majority of the packet size is relatively small packets (below 150 bytes) but there are also many IP packets with size around 1500 bytes. ATM efficiency can be seen scattered around 60% to 90% with average around 75%. It has relatively similar characteristic with scenario 2. Figure 5.18 shows MPE and ULE efficiency for padding mode. The efficiency percentage scattered from 30% to 95% with average efficiency at

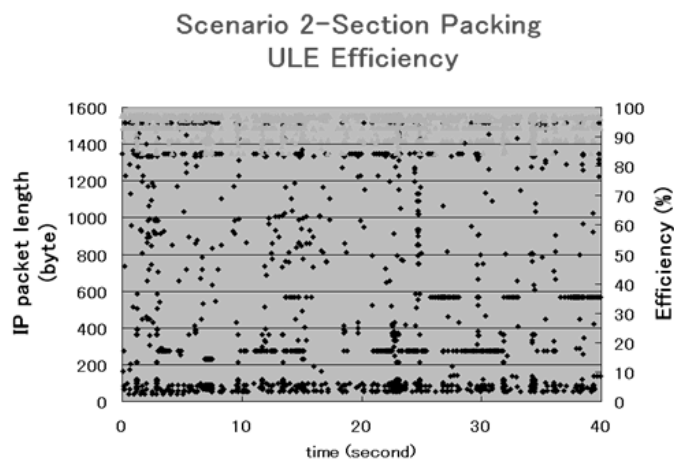


Fig. 5.16. Scenario 2 ULE efficiency in packing mode

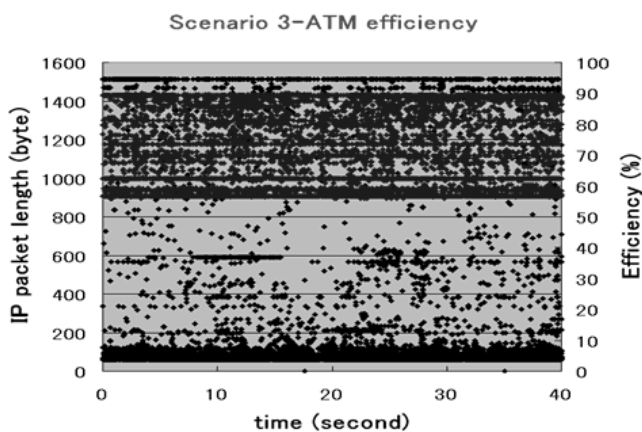


Fig. 5.17. Scenario 3 ATM efficiency

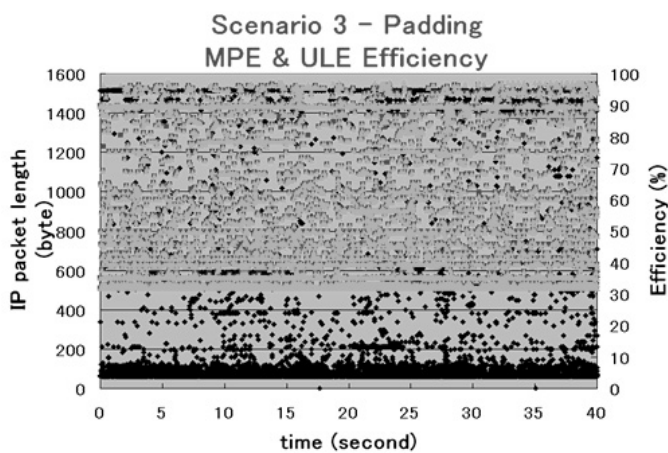


Fig. 5.18. Scenario 3 MPE & ULE efficiency in padding mode

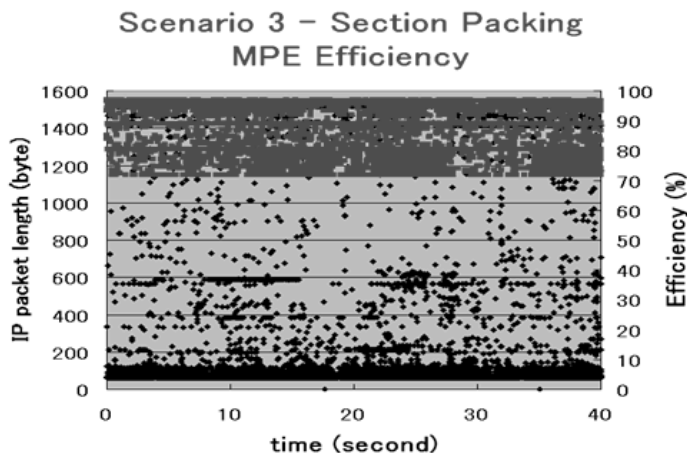


Fig. 5.19. Scenario 3 MPE efficiency in packing mode

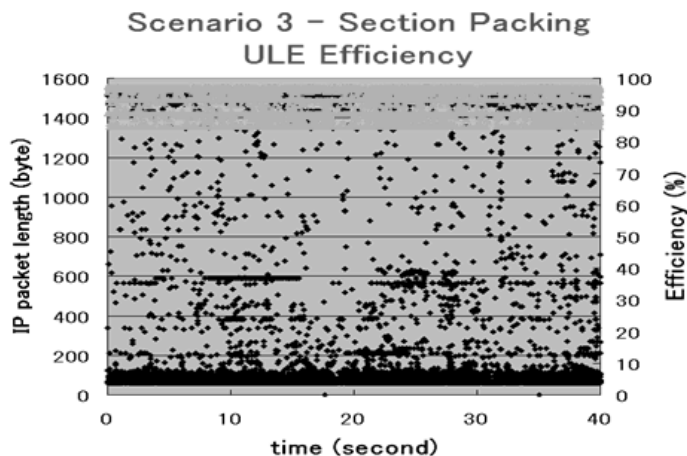


Fig. 5.20. Scenario 3 ULE efficiency in packing mode

around 60%. The distribution is bigger than ATM thus we can say that MPE and ULE have less stable efficiency compared to ATM in padding mode.

However in section packing mode shown in Figure 5.19 and 5.20, as expected MPE and ULE has better performance compare to ATM. MPE efficiency distributed between 70% and 97% and have average at around 85%. Obviously ULE is better than MPE. ULE efficiency scattered less and have average at around 92%, 5% higher than ULE.

different traffic characteristic and therefore have different encapsulation performance. However overall we can conclude ATM encapsulation has better performance when comparing to MPE and ULE in padding mode. MPE and ULE have the same efficiency in most of the time in padding mode since smaller total header overhead in ULE is compensate by padding byte overhead. Therefore although ULE have smaller header then MPE, it has similar efficiency with MPE unless section packing mode is used.

However in section packing mode, MPE and ULE have much better efficiency compare to ATM encapsulation that doesn't have section packing mode defined. In this mode ULE have around 5%

**5.8 CONCLUSION**

From the result we can see each scenario have



better efficiency compare to MPE as seen in results for both scenario 2 and scenario 3 although total overhead for ULE have been reduced 50% from total overhead in MPE.

Section packing modes have much better efficiency compare to padding mode. But it is expected to have higher jitter and delay because of having to wait next packet to arrive to be concatenated together.

When the traffic is light like scenario 1, it is wise to consider ATM usage since the jitter introduced by section packing mode in MPE/ULE is high. This can be seen from Figure 5.11 where the points for MPE and ULE efficiency seems to be sparsely distributed compare to incoming IP packets. Meanwhile in scenario 2 and scenario 3 where the traffic is heavier, the sparse distribution is not obvious. It is because the traffic is heavy and the incoming packet doesn't have to wait long before the next packet arrives.

However jitter and delay properties introduced by section packing mode have to be analyzed thoroughly before anything can be concluded. In our future work we plan to perform jitter and processing delay analysis introduced by section packing mode. After we have the result we will examine traffic characteristic for all scenarios before proposing packing method best suited for each scenarios to reduce jitter and enhance efficiency.

置を組み合わせた実験、現在の仕様の問題点の洗い出し、さらには次世代のシステム要求などについて検討を進めていく予定である。

---

## 第6章 まとめ、来年の方針

---

2年間の実運用の経験を踏まえ、徐々にシステムの特徴をとらえ、課題とその解決に向けた検討を進めてきた。DVB-RCSシステムは、VSATシステムにおけるはじめての世界標準となりえるものとして徐々にユーザの選択肢が拡大しつつある。受信端末(SIT)にとどまらず、HUBシステムも各ベンダの特徴を生かした実装、周辺システム(トラフィックコントロール、モニタ、帯域制御)を組み合わせた複数のシステムが存在する。今後は、これらの付加装

