

卒業論文 2009年度 (平成21年度)

UDLにおける受信端末のマルチパス環境を活かした  
IPv6 リライアブルマルチキャストデータ伝送

慶應義塾大学 総合政策学部

勝利 友香

## UDLにおける受信端末のマルチパス環境を活かした IPv6 リライアブルマルチキャストデータ伝送

本研究では、片方向衛星回線や地上デジタル放送のような UDL(Uni-directional Link; 片方向伝送路) の持つ同報性・広域性と、受信端末の持つマルチパス環境を活かした信頼性保証型の IPv6 マルチキャストデータ配信技術を設計し、実装した。

UDL は LLTM(Link-Layer Tunneling Mechanism) により、BDL(Bi-directional Link; 双方向伝送路) として扱うことができる。UDL の受信端末は LLTM を適用した UDL と、BDL のどちらでもインターネットに接続可能なマルチパス環境を持つ。本研究では、この受信端末のマルチパス環境に着目し、受信端末における各リンクの通信品質にもとづいて、リライアブルマルチキャストのデータ再送時におけるパスの切り替えを実現した。

一般的な UDL を用いたリライアブルマルチキャストの問題点として、信頼性、帯域の効率性、規模性の問題が挙げられる。IP マルチキャストは UDP を使用するため、信頼性を保証しない。このため、リライアブルマルチキャストでは、再送や誤り訂正技術等を用いて信頼性を保証するのが一般的である。しかし、UDL の帯域は限られており、再送の繰り返しや誤り訂正技術における冗長の度合いが、UDL でのデータ伝送における帯域消費のオーバーヘッドを増大させる直接の原因となり得る。また、受信側からの多数のリクエストによるフィードバックメッセージの集中や、送信側における過負荷が問題として挙げられる。

本研究で取り組む新しい課題として、地上デジタル放送において受信端末毎に通信品質が異なる点に注目する。片方向衛星回線と異なり、地上デジタル放送では、対象とする受信端末の種類、及び端末数、遅延やパケットロスパターンが異なる。地上デジタル放送では受信端末数が多い一方、受信端末に家庭のテレビや、自動車、携帯電話といった移動体端末を想定するため、受信端末毎に UDL の通信品質に差異が生じることが考えられる。しかし、UDL を用いた既存のリライアブルマルチキャストは通信品質の変動に対して、受信端末が持つマルチパスの特性を活かした柔軟なパス選択ができず、UDL 帯域利用の効率化のさまざまな課題となる。

本手法では、信頼性を受信端末において一定時間内にファイルの完全なコピーを受信することと定義し、その手法として FEC と再送を用いる。再送は、受信端末が変動する通信品

質をもとに最適なパスを決定する。これにより、同一データが繰り返し伝送されることによる UDL の帯域消費を低減し、全体の伝送時間や受信端末におけるスループット等のアプリケーション全体のパフォーマンスを向上させる。また、パスの選択に要する計算の大部分を受信端末でおこなうことにより、送信端末側におけるステート管理の負荷を低減し、スケーラビリティを向上させられる。

設計・実装したシステムの評価結果は、本研究が提案した手法が既存のシステムに比べ、オーバーヘッドを低減でき、より効率的な UDL の帯域利用を実現できることを示した。

キーワード

1. UDL, 2. マルチパス環境, 3. IPv6 リライアブルマルチキャスト

## IPv6 Reliable Multicast Data Delivery for Multipath Environment of Receivers on Uni-directional Link

This research presents the design and implementation of an application for IPv6 reliable multicast data delivery for multipath environment of receivers on a uni-directional link (UDL). UDL provides an effective one-way connectivity to many nodes. UDL is widely deployed for satellite broadcasting link and terrestrial digital broadcasting. UDL employs a link-layer tunneling mechanism (LLTM) to emulate full bi-directional connectivity between all UDL nodes. From the LLTM concept, each UDL receiver has two interfaces. One is a UDL interface and the other is a bi-directional link (BDL) interface. This infrastructure which has this multipath environment is suitable for one-to-many IP multicast communication.

IP multicast provides an efficient data distribution to many destinations simultaneously. However, when we want to apply IP multicast over UDL, most of existing reliable multicast protocols over UDL do not work well. If UDL reception condition is getting worse in some receivers, retransmission data will be sent via UDL repeatedly. It could consume UDL bandwidth inefficiently. On the other hand, on a large-scale network, reliable multicast could overload a sender by a numerous amount of requests from receivers, called feedback implosion.

To solve the above problems this research has two main approaches. One is path selection mechanism based on the link quality metrics, such as packet loss rate, latency and link speed to utilize UDL more effectively. In this mechanism, receivers can request the sender to retransmit data over UDL and BDL based on link quality condition by selecting its outgoing interfaces. The other is retransmission and forward error collection (FEC) rate control to ensure reliability. This approach avoids feedback implosion on sender and has better scalability.

As the result, our evaluation result shows this approach provides reliable multicast communication, low overhead on the sender and effectively utilizes UDL as compared to the existing system.

Keywords :

1. UDL, 2. Multipath Environment, 3. IPv6 Reliable Multicast

# 目次

<b>第1章</b>	<b>はじめに</b>	<b>1</b>
1.1	研究の背景	1
1.2	本研究の目的	2
1.3	本研究の成果	2
1.4	本論文の構成	3
<b>第2章</b>	<b>UDL を用いたリライアブルマルチキャストの問題点と要件の整理</b>	<b>4</b>
2.1	本研究における想定環境	4
2.2	ネットワークトポロジ	5
2.3	LLTM の概要と仕組み	5
2.4	リライアブルマルチキャスト	7
2.4.1	再送制御	8
2.4.2	FEC	9
2.4.3	Multicast Tree Mirroring (MTM)	11
2.5	UDL におけるリライアブルマルチキャストの問題点	11
2.5.1	信頼性の保証	12
2.5.2	UDL 帯域のオーバーヘッド	12
2.5.3	フィードバックメッセージの集中	12
2.6	要件の整理	12
<b>第3章</b>	<b>関連研究</b>	<b>14</b>
3.1	UDL を用いた既存のリライアブルマルチキャスト	14
3.1.1	データカルーセル方式	14
3.1.2	RMUS (Reliable Multicast for Uni-directional Satellite Link)	15
3.1.3	ISDB-Tmm (携帯端末向けマルチメディア放送) におけるファイルキャスト スティングサービス	16
3.1.4	SDMB (Satellite Digital Media Broadcasting) におけるリライアブル マルチキャスト	17

3.1.5	要件事項にもとづく各方式の比較	18
<b>第4章</b>	<b>受信端末のマルチパス環境を活用したリライアブルマルチキャスト</b>	<b>20</b>
4.1	概要	20
4.2	マルチパス環境を考慮したシステムモデル	20
4.3	送信端末, 受信端末間における UDL/BDL の想定品質	21
4.3.1	AI <sup>3</sup> における衛星インターネット環境における通信品質	21
4.3.2	移動体ネットワークにおける通信品質	22
4.4	解決手法	23
4.5	まとめ	24
<b>第5章</b>	<b>本システムの設計</b>	<b>25</b>
5.1	設計概要	25
5.2	三段階のシステム動作	25
5.3	Effective Path Selection (EPS)	26
5.4	FEC Rate Control	27
5.5	Priority Multicast Retransmission (PMR)	28
5.6	送信端末と受信端末における各機能の配置	29
<b>第6章</b>	<b>実装</b>	<b>31</b>
6.1	動作概要	31
6.2	パケットフォーマット	32
6.3	Effective Path Selection (EPS)	34
6.4	FEC Rate Control	35
6.5	Priority Multicast Retransmission (PMR)	35
<b>第7章</b>	<b>評価</b>	<b>36</b>
7.1	評価の概要	36
7.2	評価環境	36
7.3	評価項目	38
7.4	既存方式と本提案方式の比較	38
7.5	本提案方式の性能評価	41
7.5.1	各受信端末の UDL におけるパケットロス率が等しい場合	41
7.5.2	各受信端末の UDL におけるパケットロス率が異なる場合	43
7.6	評価のまとめ	46

<b>第8章 おわりに</b>	<b>47</b>
8.1 まとめ . . . . .	47
8.2 今後の課題 . . . . .	47
<b>付録A 付録</b>	<b>53</b>
A.1 AI <sup>3</sup> ネットワークのリンク品質の測定結果 . . . . .	53
A.2 移動体を対象としたネットワークにおけるリンク品質の測定結果 . . . . .	56

# 目次

2.1	UDL を用いたインターネット環境 . . . . .	4
2.2	LLTM における IP パケット伝送の流れ . . . . .	6
2.3	LLTM を用いたネットワークの物理トポロジ . . . . .	7
2.4	LLTM を用いたネットワークの論理トポロジ . . . . .	7
2.5	リードソロモン符号によるエンコード/デコードの処理 . . . . .	10
2.6	MTM の動作概要 . . . . .	11
3.1	データカルーセル方式におけるシステムモデル . . . . .	15
3.2	RMUS におけるシステムモデル . . . . .	16
3.3	ISDB-Tmm におけるシステムモデル . . . . .	17
3.4	SDMB におけるシステムモデル . . . . .	18
4.1	本研究が提案するシステムモデル . . . . .	21
5.1	Effective Path Selection . . . . .	27
5.2	FEC Rate Control . . . . .	28
5.3	Priority Multicast Retransmission . . . . .	29
5.4	送信端末と受信端末における各機能の配置 . . . . .	30
6.1	動作概要 . . . . .	31
6.2	パケットフォーマット . . . . .	33
7.1	IPv6 の LAN を用いた評価環境 . . . . .	37
7.2	受信時間の推移 . . . . .	40
7.3	UDL におけるオーバーヘッドの推移 . . . . .	40
7.4	受信時間の推移 . . . . .	42
7.5	UDL と BDL における再送データの総量の比較 (転送速度が 2Mbps の場合)	42
7.6	UDL におけるオーバーヘッドの推移 (転送速度が 2Mbps の場合) . . . . .	43
7.7	全体の受信時間の推移 . . . . .	44

7.8	受信端末毎の受信時間の推移 . . . . .	44
7.9	UDL と BDL における再送データの比較 (転送速度が 2Mbps の場合) . . . . .	45
7.10	UDL におけるオーバーヘッドの推移 (転送速度が 2Mbps の場合) . . . . .	46
8.1	LLTM を用いたネットワークに特化したトランスポート層プロトコルの外観	48
A.1	AI <sup>3</sup> の組織図 . . . . .	53
A.2	衛星 UDL における片方向遅延 . . . . .	54
A.3	各パートナーサイトが持つ BDL における片方向遅延 . . . . .	54
A.4	各パートナーサイトが持つ BDL におけるパケットロス率 . . . . .	55
A.5	64Byte のデータ伝送時における RTT . . . . .	56
A.6	258Byte のデータ伝送時における RTT . . . . .	57
A.7	508Byte のデータ伝送時における RTT . . . . .	57
A.8	1408Byte のデータ伝送時における RTT . . . . .	58

# 表 目 次

2.1	片方向衛星回線と地上デジタル放送におけるリンク特性の比較 . . . . .	4
2.2	受信端末の戻り回線 . . . . .	5
2.3	要件のまとめ . . . . .	13
3.1	既存のリライアブルマルチキャスト方式と再送制御 . . . . .	14
3.2	要件事項に基づく各方式の比較 . . . . .	19
4.1	各地球局が持つBDLにおける片方向遅延 . . . . .	22
4.2	各地球局が持つBDLにおけるパケットロス率 . . . . .	22
4.3	3G ネットワークにおける RTT の平均値と中央値 . . . . .	23
5.1	各機能の持つ役割 . . . . .	25
6.1	本システムの実装環境 . . . . .	31
6.2	各リンクにおけるダウンリンクの実効速度の目安 . . . . .	34
7.1	各リンクの設定値 . . . . .	37
7.2	評価で用いた機材の仕様 . . . . .	37
A.1	各パートナーサイトが持つBDLにおける片方向遅延 . . . . .	55
A.2	各パートナーサイトが持つBDLにおけるパケットロス率 . . . . .	55
A.3	3G ネットワークにおける RTT の平均値と中央値 . . . . .	56

# 第1章 はじめに

## 1.1 研究の背景

片方向衛星回線や地上デジタル放送などの UDL(Uni-directional Link: 片方向伝送路) は広範囲に一对多の接続性を提供し、一度の送信でカバーエリア内にある複数の受信端末に同一データを伝送できる。そのため、地上系通信網では困難とされている IP マルチキャストを実現する伝送路として UDL が有効に機能すると期待できる。現在、第三代携帯電話(3G) システムの仕様を定める 3GPP において MBMS(Multimedia Broadcast and Multicast Service)[4] は、3G/2.5G の携帯電話網を用いて携帯端末に直接マルチメディアコンテンツを一斉配信する技術であり、現在標準化段階にある。また、SDMB(Satellite Digital Multimedia Broadcasting)[6] は MBMS で配送するマルチメディアコンテンツを片方向衛星回線を用いて一对多の効率的なデータ配信を可能にする技術であり、標準化が進んでいる。

一方、地上デジタル放送では、世界各国で MPEG-2 TS[13] における IP 多重化伝送技術の標準化が進んでいる。日本では、ISDB-Tmm[24] や MediaFLO[10] において、携帯端末に対して IP を用いたマルチメディア放送サービスが提案されている。しかし、これらのサービスがグローバルなインターネットにおいて他の伝送路と相互運用性があるインフラとして活用できるかどうかは、明確な指針が示されていない。「IP over デジタル放送」[12] は、デジタル放送のようなブロードキャストメディアをインターネットの一般的な伝送路として活用する取り組みであり、既存のテレビ、ラジオやデータ放送の枠組みにとらわれず、より柔軟なサービスが期待できる。例えば、映画・音楽アーカイブ、セキュリティパッチや防災・気象情報など、多様なデータ形式に柔軟に対応する、ビジネス、公共性の高いデータの一斉配信が実現でき、放送を用いた情報インフラとしての価値がより高まると考えられる。

しかし、UDL の帯域は現在広く用いられている LAN や WAN 技術に比べて限られており、インターネットのような双方向伝送路として扱う際には、帯域使用の効率性を考慮する必要がある。また、受信端末においてデータが欠損した場合の誤り訂正では効率性の他に規模性が要求される。しかし、似かよった特徴を持つ片方向衛星回線と地上デジタル放送でも、使用可能な帯域、遅延、リンクの安定性等において異なる特徴を持つため、従来から開発や実証実験がすすめられてきた片方向衛星回線を用いたインターネットの技術がそのまま地上デジタル放送の環境に転用できるわけではない。

UDL を用いた既存のリライアブルマルチキャストのデータ伝送では、受信端末における UDL の通信品質を考慮せず、柔軟なパス選択ができない。再送時に UDL を用いる既存方式では、UDL における通信品質が悪化した場合、UDL を用いて再送を繰り返すことにより、UDL 帯域を非効率に消費してしまう。また、再送時には BDL を用い、HTTP 等のプロトコルによって欠損データの修復をする既存方式では、多数の受信端末が接続する大規模なネットワークにおいては送信端末における負荷が増大するといった問題がある。

## 1.2 本研究の目的

本研究の目的は、UDL を活用した一対多のマルチメディアコンテンツの配信においてリライアブルマルチキャストのアプリケーションを実現し、マルチパス環境の活用が帯域の有効利用にどのように貢献するかを検証することである。

また、本研究で実現するシステムを衛星を用いたインターネットの研究開発を行う AI<sup>3</sup>(Asian Internet Interconnection Initiatives Project)[1] など実ネットワークで動作させ、MTM(Multicast Tree Mirroring)[17] を補完するシステムとして実用化することを目的とする。

## 1.3 本研究の成果

本研究では、LLTM を用いたネットワークにおいて受信端末が UDL と BDL 双方に接続するマルチパス環境であることに着目した。受信端末の通信品質にもとづいて再送時に UDL と BDL を切り替え可能なシステムを設計し、UDL を活用した IPv6 リライアブルマルチキャストデータ伝送をアプリケーション層で実装した。本手法では、信頼性の保証に FEC と再送を用い、再送の繰り返しを低減するために、送信端末は、受信端末の期待する冗長度を設定して再送するようにした。また、UDL 帯域のオーバーヘッドを低減するために、受信端末がリンクの通信品質にもとづいて再送時のパスを選択する EPS(Effective Path Selection) を実装した。評価の結果より、本提案手法は既存のシステムと比較して、UDL における通信品質が悪化しても、受信端末におけるデータの受信時間の増加を抑止し、UDL 帯域におけるオーバーヘッドを低減できた。本研究で取り組んだシステムの設計・実装・評価を通じて、LLTM を用いたネットワークにおけるマルチパス環境の活用は、UDL 帯域の有効利用およびスケーラビリティの向上に貢献することを示した。

## 1.4 本論文の構成

本論文では、第2章でUDLを用いたリライアブルマルチキャストの問題点を述べ、本研究が想定するネットワーク環境において、問題を解決するための要件事項を考察する。第3章では、関連研究について述べ、本研究が実現すべきシステムの要件事項を考察する。第4章では、要件事項を満たすシステムモデルを提案し、第5章で、本システム的设计を述べる。第6章では、本システムの実装について述べる。第7章では、本システムをプライベートネットワークにおいて実施した評価結果を掲示し、システムの有効性を考察する。第8章では、本研究のまとめと今後の課題について述べる。

## 第2章 UDLを用いたリライアブルマルチキャストの問題点と要件の整理

### 2.1 本研究における想定環境

本研究は、片方向衛星回線や地上デジタル放送などのUDLを動作環境として想定する。しかし、片方向衛星回線と地上デジタル放送では、利用可能な帯域、片方向遅延、想定する受信端末の移動性などといった点でリンクの特性が異なる。双方のリンク特性を表2.1で比較する。また、図2.1に示すように、本研究は、車や携帯電話、家庭の固定テレビなどがUDLの受信端末としてインターネットに接続する環境を想定する。各受信端末では、移動性の有無など異なる状況で動作するため、受信端末毎にUDLの受信状況が変動すると考えられる。

表. 2.1: 片方向衛星回線と地上デジタル放送におけるリンク特性の比較

	片方向衛星回線	地上デジタル放送
帯域	36MHz(1XPDRあたり)	6MHz(1chあたり)
片方向遅延	250ms~	1sec~
UDL 受信状況	均一	不均一
受信端末の移動性	低~中	低~高

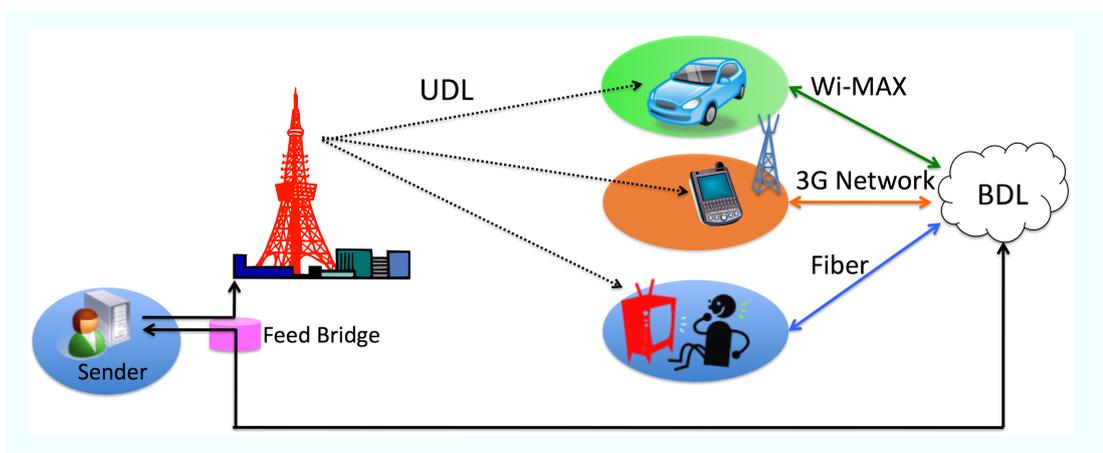


図. 2.1: UDLを用いたインターネット環境

表 2.2 で示すように, 各受信端末が使用する戻り回線には WiMAX, 3G ネットワーク, 光通信回線を想定し, 各リンクは異なる伝送速度を有している. また, 地上デジタル放送に接続する受信台数として, 東京都内に存在する携帯端末の台数は 1000 万台程度が接続することが考えられるため, 本想定環境で動作するシステムにはスケーラビリティが求められる.

表. 2.2: 受信端末の戻り回線

受信端末	戻り回線	最大伝送速度 (Mbps)
1: 車	Mobile WiMAX[3]	Uplink:10 Downlink: 40
2: 携帯電話	3G ネットワーク [2]	Uplink: 1.4 Downlink: 7.2
3: STB	光通信回線 [16]	Downlink: 100

## 2.2 ネットワークトポロジ

本研究では LLTM[7] を用いた UDL を含むネットワークを想定環境とする. 今回は, Feed Bridge は 1 台 (Single Feed) を想定する. LLTM の用語は次のように定義する.

### LLTM の用語

- UDL(Uni-directional link): 片方向衛星回線などの片方向伝送路
- BDL(Bi-directional link): インターネット, 携帯電話網などの双方向伝送路
- Feed Bridge: UDL に接続し, UDL へ送信するインターフェイスと BDL に接続し, 送受信可能なインターフェイスの両方を持つ
- 受信端末: UDL に接続し, UDL から受信するインターフェイスと BDL に接続し, 送受信可能なインターフェイスの両方を持つ

## 2.3 LLTM の概要と仕組み

UDL をインターネットが前提とする双方向伝送路として扱うために, LLTM が用いられる. LLTM が動作する環境として, 受信端末は UDL と BDL の双方に接続するマルチパス環境を持つことが前提となる. 図 2.2 に LLTM における IP パケット伝送の流れを示す. 受信端末が UDL を介して送信端末に直接 IP パケットを送信する際に, LLTM は, その IP パケットを含むデータリンクフレームを GRE ヘッダを用いてカプセル化する. GRE パケットは, 宛先 IP アドレスとして Feed Bridge の BDL 側インターフェイスが指定され, 受信端末が持つ BDL インターフェイスから送信される. Feed Bridge が GRE パケットを受信すると, カ

プセル化されているデータリンクフレームを抽出し、送信端末に転送する。したがって、本来はUDLへの送信機能をもたない受信端末から、同一リンク上の送信端末へのIPパケットの送信をBDLを用いたトンネルによって実現し、UDLでの双方向通信を可能としている。LLTMを用いてアドレス解決や経路制御プロトコルを動作させる仕組みをUni-directional Link Routing (UDLR) と呼び、UDLを含むネットワークはインターネットの中間経路やラストワンマイルとして活用できるようになる。

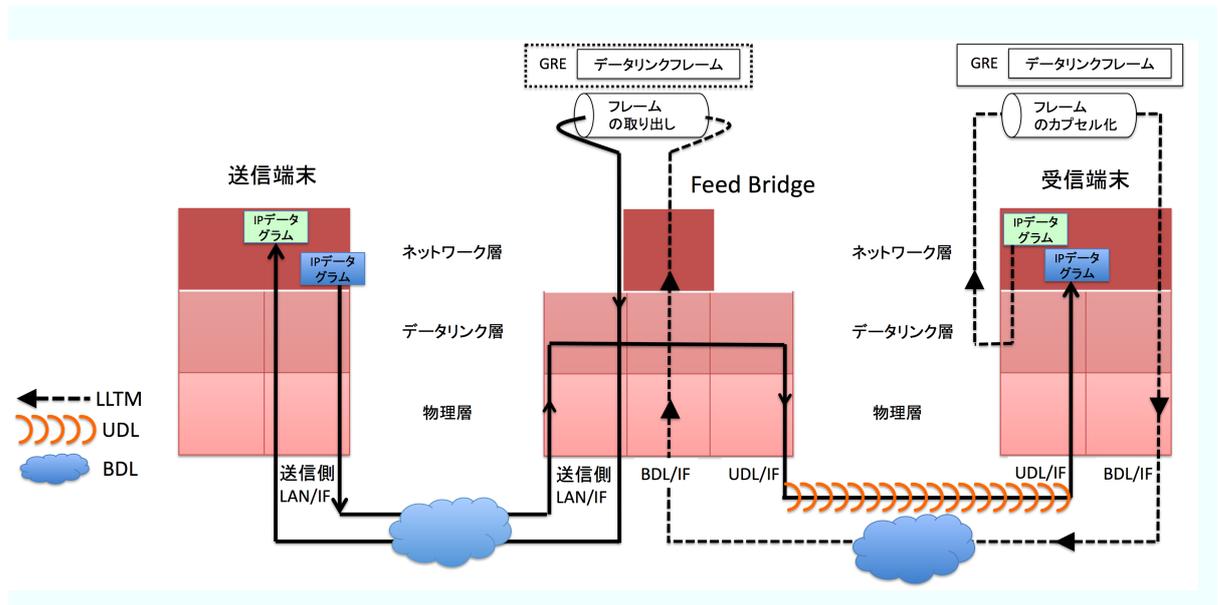


図. 2.2: LLTMにおけるIPパケット伝送の流れ

図 2.3, 2.4 は AI<sup>3</sup> において LLTM を動作させたネットワークの物理トポロジと論理トポロジをそれぞれ示す。このネットワークにおいて、LLTM のモジュールは受信端末におけるルータで動作させている。受信端末から送信端末へのパケットは BDL 上の複数のルータを経由して伝送されるが、LLTM によって UDL 上の端末間で双方向通信が可能なデータリンクを構築している。

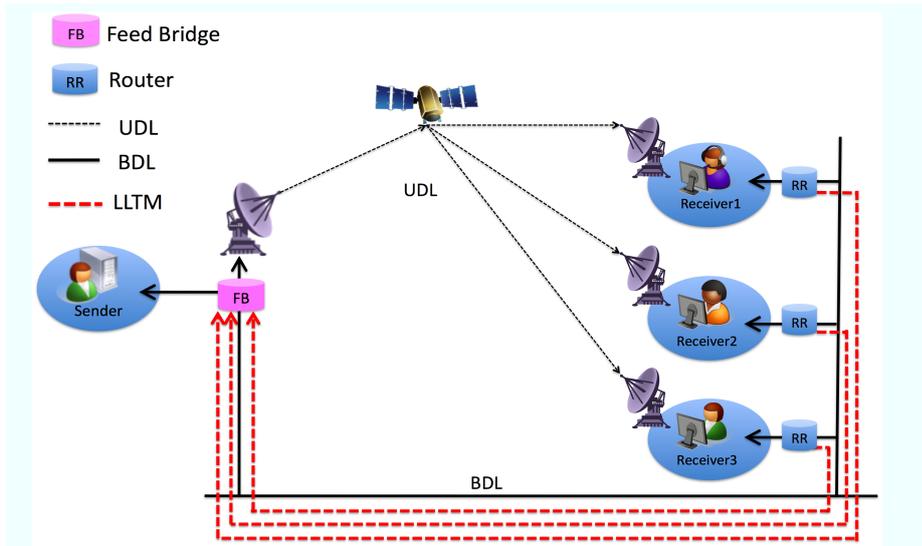


図. 2.3: LLTM を用いたネットワークの物理トポロジ

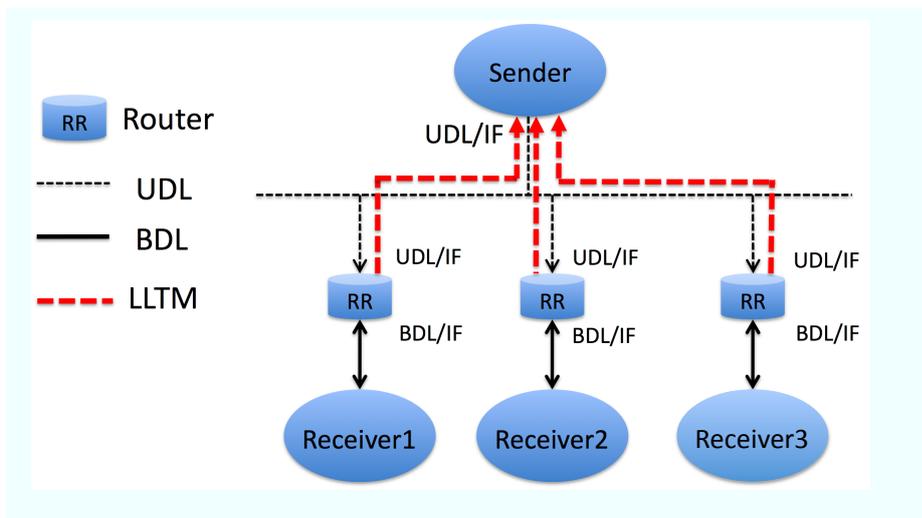


図. 2.4: LLTM を用いたネットワークの論理トポロジ

## 2.4 リライアブルマルチキャスト

IP マルチキャストは一度の送信により、多数の宛て先に同一データを配信する技術である。しかし、IP マルチキャストは一般的にトランスポート層の UDP を使用するため、信頼性を保証しない。リライアブルマルチキャストにおいて、伝送するコンテンツの種類によって信頼性の定義やその保証の手法が異なる。例えば、ビデオストリーミングはデータの順番

を正しく受信することが要求される。一方アーカイブやファイルデータは、最終的に完全なデータのコピーを作成することで信頼性を保証している。リライアブルマルチキャストでは一般的に、トランスポート層より上位層で信頼性保証の機能を実装する研究が多く行われている [20]。本節では、リライアブルマルチキャストにおける既存のプロトコルで採用されている方法として、再送制御と FEC(Forward Error Correction) を挙げる。また、リライアブルマルチキャストのプロトコルを用いたアプリケーションとして、MTM(Multicast Tree Mirroring) について述べる。

### 2.4.1 再送制御

リライアブルマルチキャストでは、再送時に受信端末からの送信端末への応答メッセージとして ACK と NACK のどちらを使用するかでプロトコルが大別される。ACK を使用するプロトコルでは、全ての受信端末がデータ受信完了の応答として送信端末側に対して ACK を送信する。送信端末側は ACK の未到着をもとに受信側のパケットロスを検知して欠損データの修復を行う。そのため、受信端末毎に確実に送信確認ができるという点で信頼性が高いといえる。しかし、送信端末に ACK が集中して到着してしまうといったデメリットがある。ACK の集中は送信端末側の負荷を増大させ、パフォーマンスを低下させてしまうため、深刻な問題となる。NACK を使用するプロトコルでは、欠損したデータを要求するために送信端末側に対して NACK を送信する。一般的にデータの受信数より、欠損データ数の方が少ないため、ACK を使用するプロトコルと比較して、NACK を使用するプロトコルの方が全体のメッセージ数を抑制することができる。また、ACK を使用するプロトコルよりも NACK を使用するプロトコルの方が、送信端末と受信端末における処理速度とデータ伝送におけるスループットが向上することを示した事例もある [21]。

### RMTP-2: ACK を使用するプロトコル

RMTP-2[20] は、ACK を使用するプロトコルである。RMTP-2 では ACK の数を低減するために、送信端末を上位層として、マルチキャストグループに属する受信端末を木構造に配置する。各受信端末からの ACK は、上位に位置する DR(Designated Router) に指定された受信端末により送信元に集約して送信される。DR はキャッシュを保持し、自身より下位層に属する受信端末でパケットロスが生じた場合に再送する。しかし、定期的にフィードバックを返すことによる受信時間の増加や、低帯域なネットワークに接続する端末によって全体のスループットが影響を受けるという問題が挙げられる。

## SRM: NACK を使用するプロトコル

NACK を使用する代表的なプロトコルとして SRM[19] が挙げられる。SRM は、会議用の共有型ホワイトボードツールをサポートするために設計・開発されたプロトコルである。SRM では、局所的に発生したパケットロスに対して近隣の端末がマルチキャストで再送する仕組みである。受信端末では、パケットロスを検知すると NACK をマルチキャストで送信する。一方、同一マルチキャストグループ内で NACK を受信した近隣の受信端末は、要求されたデータを保持している場合はマルチキャストで再送を行う。受信端末では、乱数を用いた NACK の送出時間を遅延させる機能 (ランダムバックオフタイマ) を用いる。そのため、受信端末で NACK の送信を待機している間に要求するデータを受信すれば、NACK の送信を取りやめる。バックオフタイマは、伝送遅延が大きいネットワークに多数のノードが接続する場合にはタイマの性能が十分に得られないことが問題とされている。しかし、タイマを設定する乱数の生成方法を改善することで、その問題を解決する手法も提案されている。

## RMTPv3, MFTP: ACK/NACK 両用プロトコル

ACK と NACK を両方利用するプロトコルとして、RMTPv3 と MFTP が挙げられる [20]。NACK の信頼性を保証するため、信頼性が高いプロトコルといえる。しかし、全ての受信局からの ACK/NACK 要求が必要であり、各受信端末の受信状況を管理する必要があるため、多数の受信端末が接続するネットワークでは送信端末側に負荷が掛かるといった問題がある。

### 2.4.2 FEC

再送制御とは異なり、データの信頼保証を行う方法として、FEC(Forward Error Correction: 前方誤り訂正) がある。FEC は、送信端末側でデータに予め冗長データを付加しておき、データの欠損が生じた場合、冗長データをもとに受信端末側で元のデータを復元できる仕組みである。一般的に、ノイズの混入などが原因で伝送中のデータにビット誤りが生じた場合、誤りを訂正する手法として、伝送方式の物理層における FEC が採用されている。しかし、移動体のネットワークでは受信端末が圏外エリアに入る状況も想定されるため、ビット単位の誤りに加え、パケット単位でデータが欠損する場合がある。そのため、パケット欠損率が大きいネットワークにおいては、物理層における FEC に加え、アプリケーション層で IP/UDP パケットのレベルで冗長化する手法を取り入れることにより、データ配信効率が向上するといわれている [25]。本節では、誤り訂正率が高く、リライアブルマルチキャストで使用されることが多い、リードソロモン符号について述べる。

リードソロモン符号は、ブロック符号の代表的なものである。ブロック符号とは、ビット列やシンボル列を固定サイズのブロック（パケット）に分割し、エンコードする。図 2.5 にリードソロモン符号によるエンコード、デコード処理の流れを示す。冗長データは、送信端末側のエンコーダに  $k$  個のシンボルが与えられた場合、 $n(n > k)$  個の冗長符号を含むパケットが生成される。エンコード処理された  $n$  個のパケットは同一グループとして FEC のグループ ID が付加されて伝送される。受信端末側では同一グループで、冗長データを含む  $k$  個のパケットを受信できれば、元のデータを復元可能である。

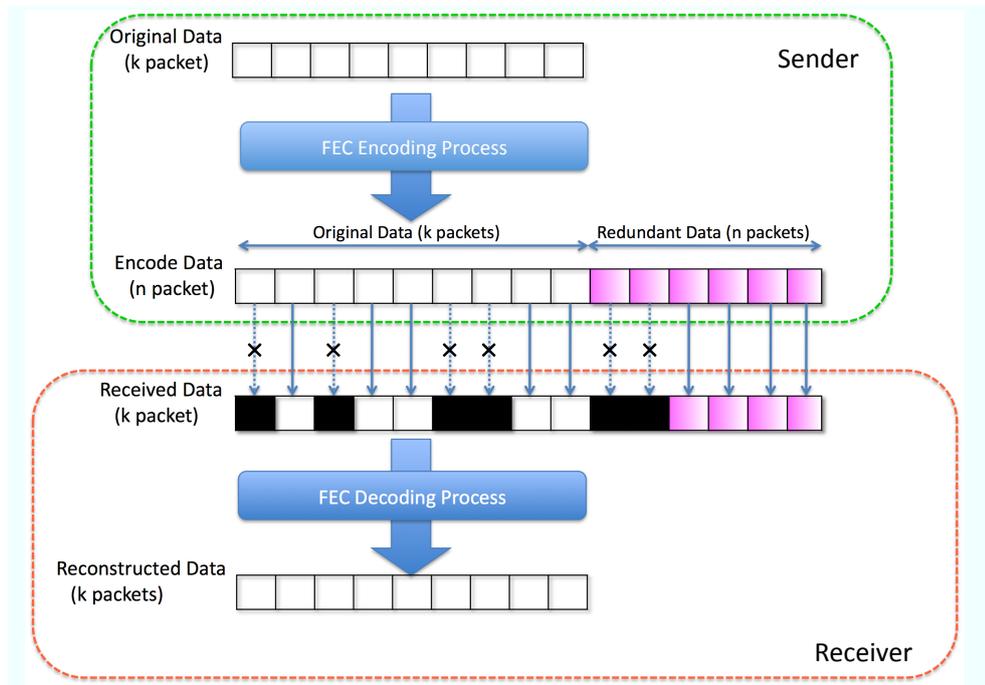


図. 2.5: リードソロモン符号によるエンコード/デコードの処理

リライアブルマルチキャストにおいて FEC を用いる場合、以下のメリットがある。

- 受信側において個別に生じたパケットロスに対しての修復に有効である
- 送信端末に対するフィードバックメッセージ数の低減

また、FEC を用いたリライアブルマルチキャストが、FEC を用いないリライアブルマルチキャストよりも、受信台数が増加するにつれ受信時間の増加を抑止できることが証明されている [11]。しかし、FEC の訂正範囲を超えるパケットロスが生じる環境では、受信端末の台数が増加する程、冗長データによるオーバーヘッドが増加し、受信時間が増加してしまうことも示されている。

### 2.4.3 Multicast Tree Mirroring (MTM)

MTMはIPマルチキャストより上位層において、信頼性を要求するデータを送信端末から複数の受信端末に伝送する。MTMでは、図2.6で示すように、送信端末はファイルを送信する前にマルチキャストで受信端末にファイル送信開始メッセージとマルチキャストグループアドレスを通知する。送信端末から通知を受け取った受信端末は、ファイルが既に受信済みであればその通知を無視する。しかし、ファイルが未受信の受信端末は送信端末が通知したマルチキャストグループに属し、ファイルを受信する。送信端末は、マルチキャストグループ内の受信端末が、ファイル受信に成功するまでこの処理を繰り返すため、信頼性を保証する。

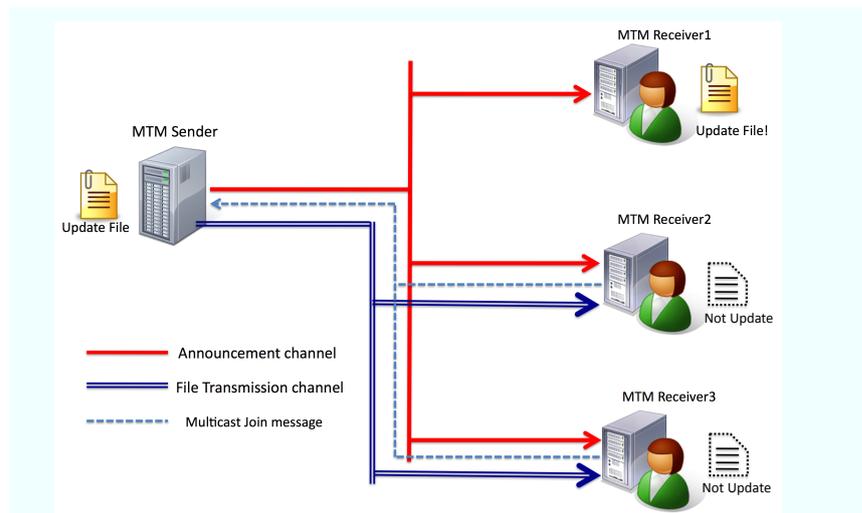


図. 2.6: MTM の動作概要

## 2.5 UDL におけるリライアブルマルチキャストの問題点

UDL を用いたリライアブルマルチキャストは数多く研究されている [18][8]. UDL を用いてリライアブルマルチキャストを応用する場合、以下のような問題が挙げられる。

- 受信端末からの再送要求が反映されるまでに時間がかかる
- 送信端末におけるパケットロスが、接続する全端末に影響を与える
- フィードバックメッセージの集中が発生する

### 2.5.1 信頼性の保証

片方向遅延の大きい UDL では、受信端末側で欠損データの検知、修復が可能な FEC は有効とされている。しかし、誤り訂正だけでは、完全な信頼性を保証することができないため、受信端末からの再送要求に基づき、受信端末の欠損データを修復する必要がある [15]。

### 2.5.2 UDL 帯域のオーバーヘッド

地上デジタル放送では、受信端末には何千、何万台が接続することが予想される。そのため、受信端末毎に通信品質に差異が生じると考えられる。また、片方向衛星回線においてもアンテナの不具合、降雨減衰等の影響によって、UDL の受信状況が悪化する場合がある。こうした UDL の受信状況が一時的に悪化した受信端末に対して UDL で再送する場合、UDL 帯域に同一データが繰り返し流れ、UDL 帯域におけるオーバーヘッドが増加する。本研究におけるオーバーヘッドは、以下のように定義する。

$$\text{オーバーヘッド} = \frac{\text{実際に伝送された総バイト数}}{\text{伝送するファイルサイズ}} - 1 \quad (2.1)$$

このオーバーヘッドの増加は、受信端末におけるデータ受信時間の増加や送信端末におけるスループットを低下させる直接の原因となる。

### 2.5.3 フィードバックメッセージの集中

LLTM を用いた UDL ネットワークでは、送信端末と各受信端末は仮想的に同一サブネットに接続し、受信端末は LLTM を用いて送信端末に再送要求を行う。そのため、受信端末から一斉に複数のリクエストが送信された場合、Feed Bridge や送信端末におけるフィードバックメッセージの集中が考えられる。このフィードバックメッセージの集中は、送信端末や Feed Bridge の負荷増大や、ネットワークにおける大幅な帯域消費に繋がる。そのため、受信端末が何千、何万台接続するようなネットワークでは、各受信端末から送信端末や、Feed Bridge に集中するリクエストをいかに減少させるか、あるいは分散させるかが課題となる。

## 2.6 要件の整理

本章では、UDL を用いてリライアブルマルチキャストを応用するための既存技術について述べた。地上デジタル放送のような大規模なネットワークでリライアブルマルチキャストを応用する場合、受信端末毎に UDL の通信品質が異なることが想定されるため、信頼性を保証するための、再送の繰り返しや FEC における冗長の度合いが UDL 帯域のオーバー

ヘッドを増大させる直接の要因となる。また、UDLにおける通信品質が悪化した一部の受信端末に対して、UDLによる再送を繰り返してもデータの完全性にはつながらないため、全体におけるデータの受信時間を増加させてしまう。また、LLTMを用いたネットワークはトポロジの特性から、UDLに接続する複数の受信端末からのフィードバックメッセージが送信端末や Feed Bridge に集中する問題がある。

UDLにおけるリライアブルマルチキャストの特性との問題点を次のように整理した。

- 受信端末の通信品質を反映しない再送の繰り返しが、UDL 帯域におけるオーバーヘッドの増大に繋がる
- オーバーヘッドの増大は、受信端末におけるデータ受信時間の増加、スループットの低下等、システム全体のパフォーマンスが低下する
- 地上デジタル放送における受信端末の台数と移動性から、受信端末から複数の異なる再送要求が Feed Bridge に集中するために、送信端末や Feed Bridge のシステム、ネットワークリソースを大幅に消費してしまう

これらの問題点に対する要件を表 2.3 に示す。

表. 2.3: 要件のまとめ

問題点	要件
信頼性が保証されない	再送による信頼性保証
伝送時間の増加 再送繰り返しによる UDL 帯域のオーバーヘッド	受信端末におけるパケットの早期回復 オーバーヘッドの低減
フィードバックメッセージの集中	送信端末, Feed Bridge における負荷分散

## 第3章 関連研究

本章では, UDL を用いた既存のリライアブルマルチキャストデータ伝送として, 地上デジタル放送におけるデータカルーセル方式 [5] と衛星インターネット環境を用いたリライアブルマルチキャストである RMUS(Reliable Multicast for Uni-directional Satellite Link)[18], ISDB-Tmm(Integrated Services Digital Broadcasting Terrestrial Mobile Multi-Media Broadcasting: 携帯端末向けマルチメディア放送システム)におけるファイルキャストサービス [24] と SDMB(Satellite Digital Multimedia Broadcasting) によるリライアブルマルチキャスト [6] の特徴と問題点を述べる.

### 3.1 UDL を用いた既存のリライアブルマルチキャスト

UDL を用いた既存のリライアブルマルチキャストには, 再送時のパスの使い方が異なる方式が提案されている. 表 3.1 に既存方式と再送時に使用するパスについてまとめる. どの既存方式も最初のデータ伝送時には UDL が用いられる. しかし, 欠損データを再送する際には, データカルーセル方式と RMUS では UDL を用い, ISDB-Tmm では BDL を用いる. 一方, SDMB では欠損データの再送に UDL と BDL 両方を用いるが, UDL での再送期間を終えると, BDL を用いて再送する.

表. 3.1: 既存のリライアブルマルチキャスト方式と再送制御

方式	再送時に使用するパス
Data-carrousel	UDL
RMUS	UDL
ISDB-Tmm	BDL
SDMB	UDL(初回), BDL(二回目以降)

#### 3.1.1 データカルーセル方式

データカルーセル方式は, 放送システムを前提とした方式であり, 同一データを周期的に送信する. 図 3.1 で示すように, パケットの欠損に対するデータの修復は, FEC を用いた再

送を繰り返すことにより信頼性を保証する。そのため、受信端末はパケットロスが生じても任意のタイミングで必要なデータを取得できる。しかし、データカルーセル方式では、FECの訂正可能な範囲を超えたパケットロスが生じた際には、再送周期を待つ必要がある。そのため、パケットロスの大きい環境では全体としての受信時間が長くなる場合がある。また、受信端末からのフィードバックメッセージを返すパスが存在しないため、既に受信したデータがUDLを用いて繰り返し伝送されるため、UDLの帯域を有効に活用できていない。

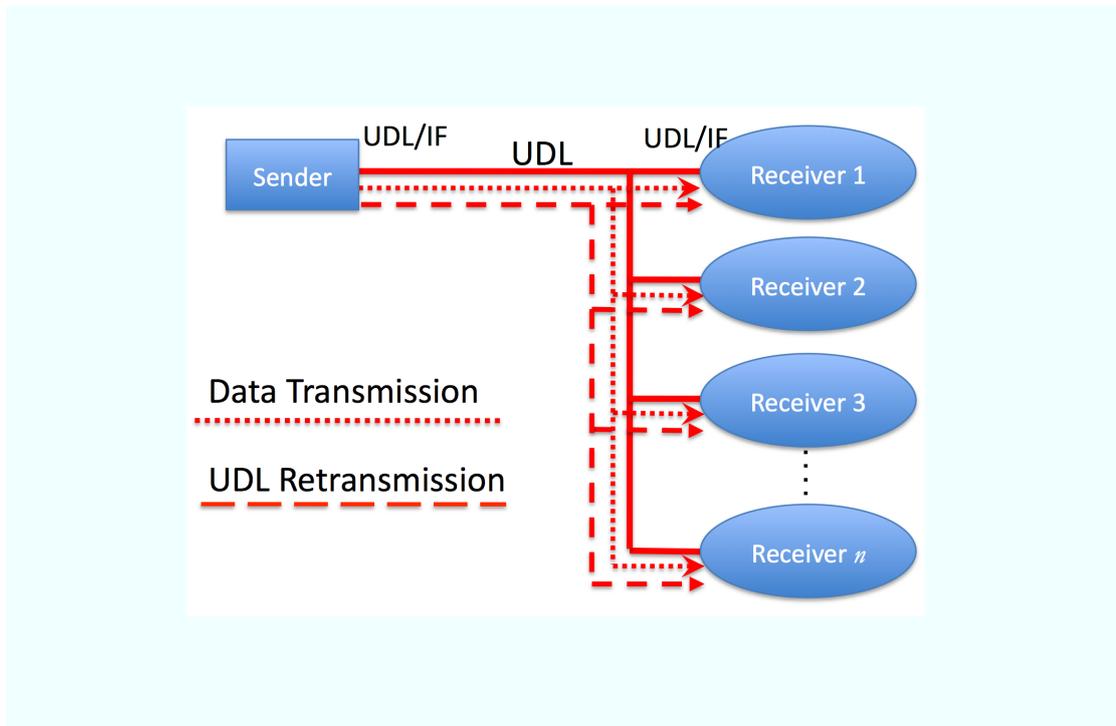


図. 3.1: データカルーセル方式におけるシステムモデル

### 3.1.2 RMUS (Reliable Multicast for Uni-directional Satellite Link)

LLTMを用いた衛星インターネット環境におけるリライアブルマルチキャストの方式としてRMUSがある。RMUSでは、UDLに接続する受信端末として固定の地球局を想定しているため、受信端末におけるUDLの受信状況は比較的安定している。図3.2で示すように、受信端末はパケットの欠損を検知すると、LLTMを用いて再送要求を送信する。一方、送信端末は受信端末からの要求に基づきUDLを用いたマルチキャストデータ伝送で欠損パケットを再送する。しかし、少数の受信端末から要求されたデータもUDLを使って配信されるため、UDLの帯域を有効に利用できない場合がある。一方、UDLの受信状況が悪化した受信端末の回復を待つマルチキャストをおこなう方式も提案されている [8]。しかし、この方式

では全体としての受信時間に遅延が生じるといった問題が挙げられる。

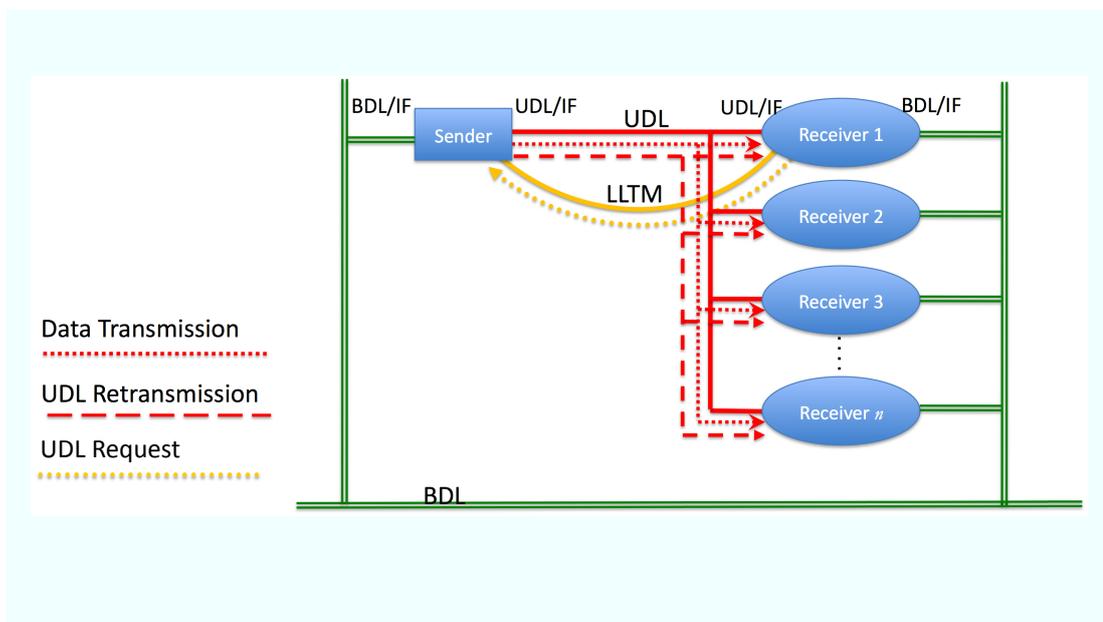


図. 3.2: RMUS におけるシステムモデル

### 3.1.3 ISDB-Tmm (携帯端末向けマルチメディア放送) におけるファイルキャストサービス

ISDB-Tmm では, MPEG-2 TS 上で IP パケットの伝送を可能としている. ISDB-Tmm におけるファイルキャストサービスでは, 片方向のファイル伝送プロトコルである FLUTE(File Delivery over Unidirectional Transport)[22] の使用が検討されている. FLUTE は, 送信端末から受信端末間は直接接続する同一セグメントの環境を前提として動作し, 定義上, データの信頼性保証には FEC を用い, 基本的には再送しないプロトコルである. そのため, 図 3.3 で示すように, ISDB-Tmm では受信端末は UDL 以外に BDL のリンクを持つマルチパス環境を前提とし, FEC で修復不可能な欠損データが生じた場合は BDL を用いた HTTP によってファイルを修復することで, 信頼性の確保を実現しようとしている. しかし, パケット欠損率の大きい環境で動作させた場合, 欠損データの再送を全てユニキャストで処理する必要があるため, 送信側の負荷が増大する可能性がある.

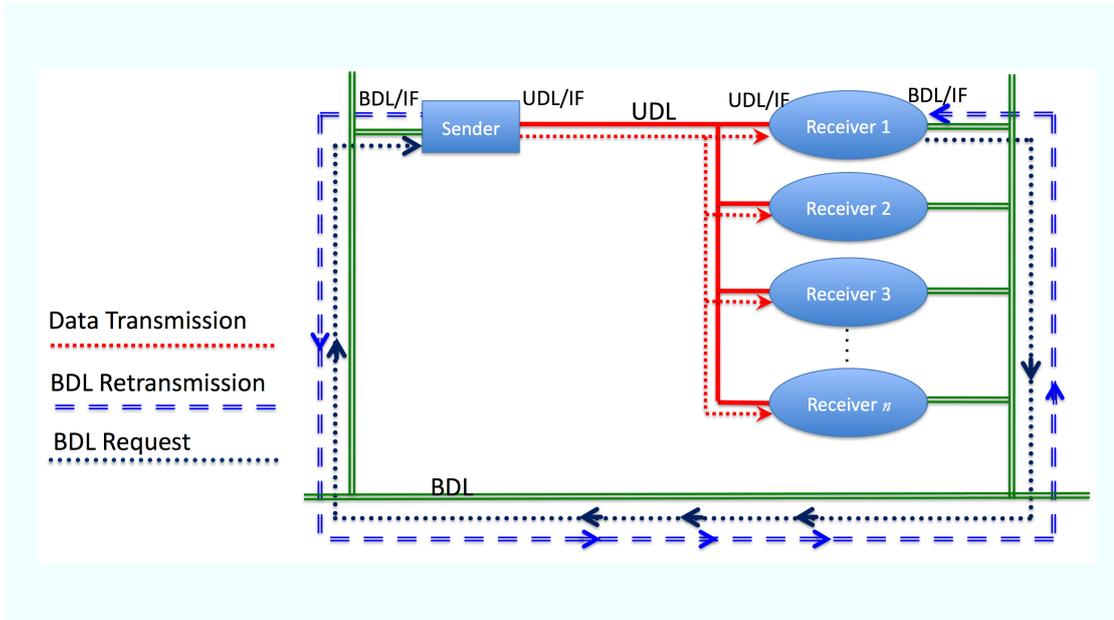


図. 3.3: ISDB-Tmm におけるシステムモデル

### 3.1.4 SDMB (Satellite Digital Media Broadcasting) におけるリライアブルマルチキャスト

SDMB を用いて信頼性を保証した方式がある [14]. SDMB は, MBMS におけるコンテンツを片方向衛星回線と 3G/2.5G の携帯電話網を用いて効率的に一斉配信する技術である. この方式では, 図3.4で示すように, UDL を用いたマルチキャストによって再送する方法と, BDL を用いてユニキャストで再送をする方法を組み合わせている. この方式では, 最初のデータ伝送に FEC を用いており, FEC によって修復できなかった欠損データが生じ, そのリクエスト数が閾値を超えた場合に UDL によってマルチキャストで再送される. 閾値未満のリクエストに関しては, 携帯電話網を用いたユニキャストで配信される. しかし, UDL を用いた再送期間が終了した場合, 残りのリクエストは全て携帯電話網を用いたユニキャスト配信によって再送される. この二段階の再送期間を用いて欠損パケットを修復できなかった受信端末において, 携帯電話網の受信状況が悪化した場合においても, 携帯電話網を用いて繰り返し再送される. そのため, この方式は, 受信端末の受信状況を反映した伝送方式とはいえない.

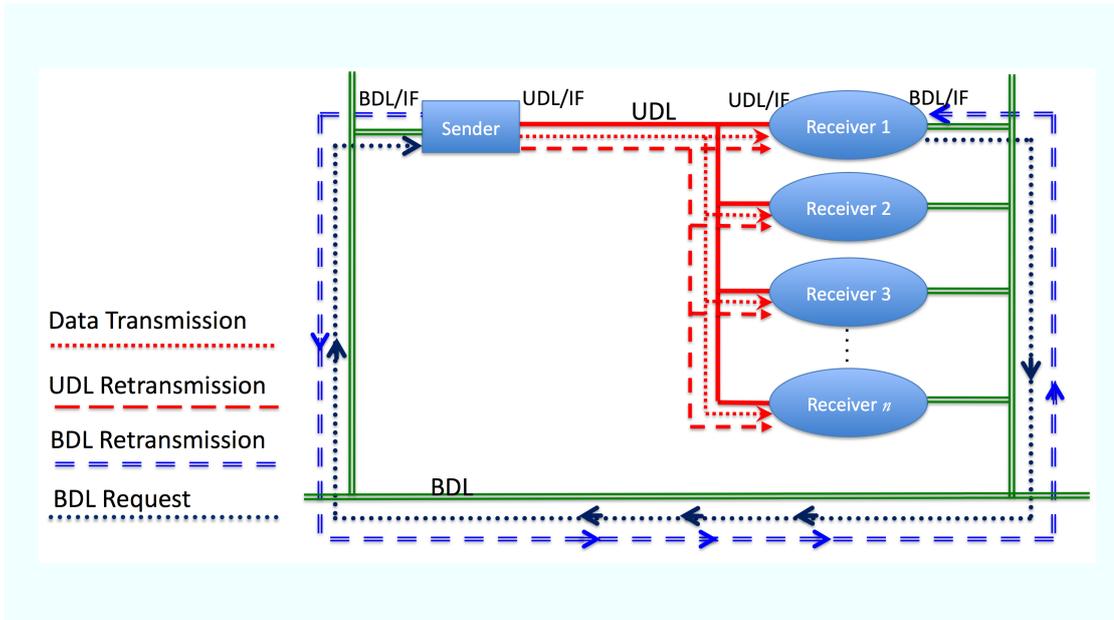


図. 3.4: SDMB におけるシステムモデル

### 3.1.5 要件事項にもとづく各方式の比較

表 3.2 に本研究における要件に基づいた各方式の比較を示す。データカールセル方式では、受信端末からフィードバックメッセージが返ることを想定しないため、フィードバックメッセージの集中は発生しない。しかし、UDL の受信状況が一向に悪化した状態の受信が存在する限り、UDL によって同一データの再送を繰り返してもデータの完全性は得られない。RMUS では、受信端末における UDL の通信品質を考慮せずに、UDL を用いた再送を繰り返す。そのため、特定の受信端末において UDL における通信品質が悪化した状態が続くと、UDL 帯域を非効率に消費してしまう。ISDB-Tmm におけるファイルキャストサービスでは、UDL で受信できなかったデータを BDL を用いて補完できる。しかし、UDL の受信状況が回復した場合でも、UDL で再送を受けることはできない。また多数の受信端末でデータが欠損した場合、送信側の負荷が増大する可能性が高い。SDMB では、受信端末では、FEC を用いても修復できなかった欠損データを、UDL を用いた再送と BDL を用いた再送の二段階で修復できる。しかし、UDL による再送期間が終了すると全て BDL を用いたユニキャストでデータを修復しなければならないため、送信側の負荷が増大する可能性が高い。

表. 3.2: 要件事項に基づく各方式の比較

要件	Data-carrousel	RMUS	ISDB-Tmm	SDMB
信頼性保証	○	○	○	○
受信端末におけるパケットの早期回復 UDL 帯域におけるオーバーヘッド低減	×	×	△	△
送信端末, FEED の負荷分散	-	○	×	△

# 第4章 受信端末のマルチパス環境を活用したリライアブルマルチキャスト

## 4.1 概要

本研究では, LLTM により構築される受信端末のマルチパス環境に着目し, 受信端末におけるリンクの通信品質に応じて, 再送に UDL と BDL 双方のパスを選択可能とした. 受信端末は, リンクの通信品質から再送時にかかる受信時間がより短いことが期待されるパスを用いて再送要求をする. 送信端末は受信端末からの再送要求に基づいてパスを選択し再送する. これにより, UDL 帯域におけるオーバーヘッドの低減, 受信端末における受信時間の短縮に貢献する.

## 4.2 マルチパス環境を考慮したシステムモデル

本研究で提案するシステムモデルを図 4.1 に示す. 本システムにおける送信端末と受信端末の持つ接続性と, 機能を以下に述べる.

- 送信端末 (Sender): 複数のインターフェイスを持ち, UDL/BDL に接続するマルチパス環境であり, データの送信と再送信する
- 受信端末 (Receiver): 複数のインターフェイスを持ち, UDL/BDL に接続するマルチパス環境であり, データを受信し, 欠落データがあれば再送要求する

本システムは, ネットワークのトポロジとして以下のような特徴を持つ.

- 送信端末と受信端末は UDL を介して直接接続する
- 送信端末/受信端末双方がマルチパス環境であるため, 全部使用することも, 必要に応じて切り替えることが可能である
- 送信端末の UDL/BDL 双方のインターフェイスと Feed Bridge にパケットが集中する

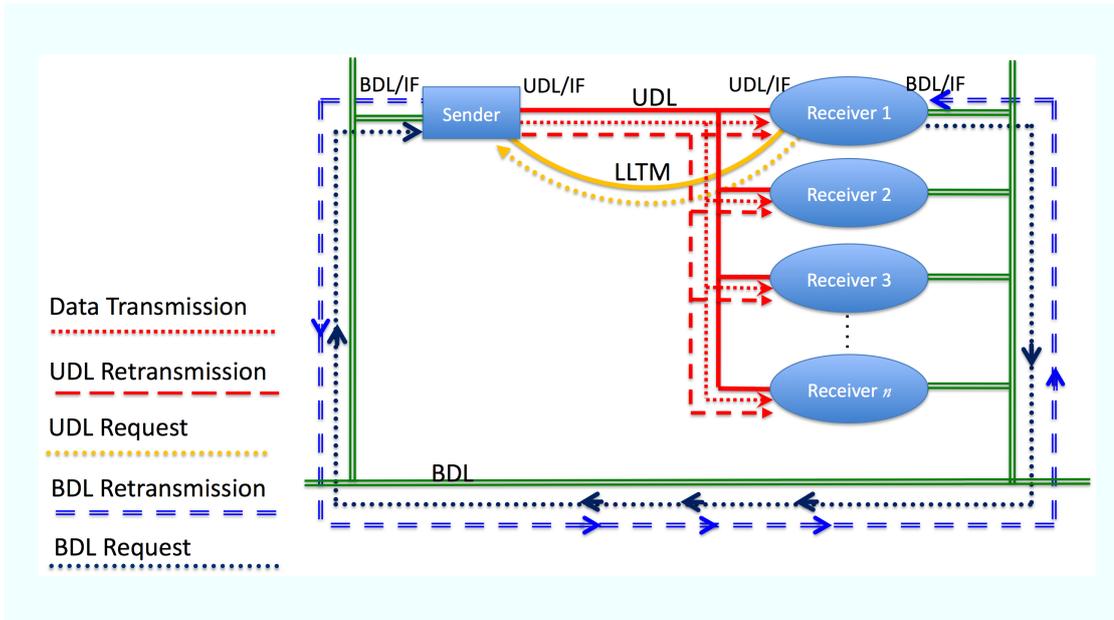


図. 4.1: 本研究が提案するシステムモデル

### 4.3 送信端末, 受信端末間における UDL/BDL の想定品質

本システムは, UDL に片方向衛星回線, 地上デジタル放送を想定する. しかし, 片方向衛星回線と地上デジタル放送では想定する受信端末の移動性や, 受信端末が戻りのパスとして使用する BDL の種類が異なる. そのため, 本システムでは双方のネットワークで想定されるリンクの通信品質を考慮した設計をする必要がある.

#### 4.3.1 AI<sup>3</sup> における衛星インターネット環境における通信品質

AI<sup>3</sup> における衛星を用いたインターネットに接続する受信端末には, 固定の地球局を想定する. そのため, 受信端末における UDL の片方向遅延は約 250ms とほぼ一定であり, パケットロス率は非常に低いものとする. また, 表 4.1 および 4.2 に, AI<sup>3</sup> ネットワークの受信端末である各地球局が戻りのパスとして使用する BDL の片方向遅延とパケットロス率の測定結果をまとめた. 各地球局では, 衛星通信や ADSL, 光通信回線など, 使用する戻りのパスが国や地域によって異なり, そのため, 片方向遅延やパケットロス率に大きく異なる.

表. 4.1: 各地球局が持つBDLにおける片方向遅延

地球局	片方向遅延の平均値 (ms)	片方向遅延の標準偏差 (ms)
UNSYIAH	262.6	8.0
UNHAS	170.4	12.1
UNIBRAW	156.9	12.1
USM	47.3	4.3
CRMA	85.9	3.3
UNSRAT	158.9	67.6
PSU	92.8	9.1

表. 4.2: 各地球局が持つBDLにおけるパケットロス率

地球局	パケットロス率の平均値 (%)	パケットロス率の標準偏差 (%)
UNSYIAH	0.1	0.35
UNHAS	0.1	0.2
UNIBRAW	0.2	0.78
USM	1.3	1.35
CRMA	7.1	2.17
UNSRAT	14.0	19.82
PSU	15.0	4.4

### 4.3.2 移動体ネットワークにおける通信品質

UDLに接続する受信端末として移動体端末を想定する場合、UDLの通信品質は受信端末毎に異なることが想定される。移動体ネットワークの通信品質として、3GネットワークのRTTを計測した結果を表4.3に示す。移動体ネットワークでは、ハンドオーバーにより受信端末が接続する基地局の切り替えをおこなう。そのため、圏外エリア、トンネル内以外ではパケットロス率はほぼ0%に等しい。また、4.3で示すように、3Gネットワークに接続する受信端末では

- 圏外エリア、トンネル内以外ではパケットロス率はほぼ0%である。
- 伝送するデータサイズが大きくなる程、RTTが増加する

表. 4.3: 3G ネットワークにおける RTT の平均値と中央値

ペイロードサイズ (Bytes)	RTT の平均値 (ms)	RTT の中央値 (ms)
64	217.15	89.66
258	215.56	156.18
508	269.85	154.30
1408	689.05	421.09

## 4.4 解決手法

本論文の要件を満たすように、本システムモデルにおけるマルチパス環境を活かした機能と、問題点を解決するための機能として、以下に示す手法を用いる。

### マルチパス環境を活かした機能

#### FEC 冗長度の設定と受信端末における再送パスの選択

受信端末では、再送要求をおこなうパスを切り替えることで、再送時のパスを選択する。パスの切り替えには、各リンクにおけるパケットロス率、伝送速度が要因となる。また、受信端末ではパケットロス率に基づいて FEC の冗長度を選択し、送信端末に通知する。この機構により、変動する UDL/BDL における通信品質に柔軟に対応可能となる。

### システムの問題点を解決する機能

#### NACK による再送制御

本システムにおいては、データ伝送の完全性の保証に NACK による再送制御をおこなう。NACK は、ACK を用いるよりも、負荷の低減に優れている。

#### 再送データへの FEC

本システムにおける FEC は、IPv6 パケットを分割して誤り訂正符号を付加する手法を用いる。FEC は、受信端末毎にパケットロスの状況が異なる環境でも誤り訂正機能の性能が高い。

#### フィードバックメッセージの抑制

本システムでは、トポロジの特性により送信端末や Feed Bridge に対するフィードバックメッセージが集中するといった問題を考慮する。

## 4.5 まとめ

本章では、本研究におけるマルチパス環境を考慮したシステムモデルとトポロジの特徴、想定するリンクの通信品質について考察した。そのうえで、本システムモデルの持つマルチパス環境を活用した設計と、システム上の問題を解決する設計の必要性を述べた。次の章で、本章で列挙した機構の設計と機能について述べる。

# 第5章 本システムの設計

## 5.1 設計概要

本研究が提案するシステムの機能を述べる。本システムは第4章でまとめた要件を満たす基本的な機能と、本システム上の特性を活用した機能と問題点を考慮した機能を持つ。表5.1に、各機能の役割をまとめる。

表. 5.1: 各機能の持つ役割

機能	役割
三段階のシステム動作 NACKによる再送制御	データ転送の完全性 フィードバックメッセージの抑制
Effective Path Selection (EPS)	帯域使用の効率性 変動する通信品質への柔軟性
FEC Rate Control	再送繰り返しの低減 パケットロスへの耐性
Priority Multicast Retransmission (PMR)	フィードバックメッセージの抑制 受信時間の短縮

## 5.2 三段階のシステム動作

本システムでは、データ伝送を完了するまでに次に示す3つの段階で動作する。

- データ伝送前処理

第一段階はデータ伝送前処理 (Initialization) であり、データ伝送を開始する前に必要となるデータの情報をやり取りする。

- データ伝送処理

第二段階はデータ伝送処理 (Data Transmission) であり、送信端末は、送信するデータを一定のパケットサイズに分割し、UDLを用いて伝送する。受信端末は受信したパケットをバッファに格納する。パケットロスを検知した場合には、欠損したデータの

情報をリスト化してローカルに保持する。

- 再送処理

第三段階は再送処理 (Retransmission) であり、送信端末は一定時間待ち受け、受信端末からの NACK を受信した場合には再送する。

### 5.3 Effective Path Selection (EPS)

EPS は、UDL でのマルチキャストと BDL でのユニキャストを組み合わせることで欠損データを再送する仕組みである。また、多数の受信端末が接続する環境でのデータ再送には、送信端末においてセッション管理の負荷が増大すると想定される。UDL と BDL どちらを用いて再送するかを受信端末が管理し、要求することで、送信端末における状態管理の負荷を軽減させる。EPS 機構では、受信端末は再送要求する出力インターフェイスを切り替える。このため、送信端末では受信した再送要求パケットの送信元アドレスにもとづいて再送をすればよい。送信端末での状態管理の負荷増大を避けられる。

受信端末では、各リンクの伝送速度、パケットロス率にもとづいて、次の再送時にどちらのリンクを使用するのが最適か決定し、再送要求を送信するインターフェイスを切り替える。図 5.1 は、再送処理における受信端末の動作を示し、受信端末は以下に示す手順で再送時に使用するパスを選択し、再送データを受信する。

- (1) UDL の再送期間が終了する
- (2) EPS により、UDL と BDL におけるパケットロス率と伝送速度から次の再送データを受信する時間を算出する
- (3) EPS により算出した受信時間がより短いことが期待されるパスを選択し、再送要求をする
- (4) 再送要求をしたパスから再送データを受信する

本システムでは、初回のデータ伝送時に UDL を用いるため、初回の再送時に EPS が受信時間の計算に用いる BDL のパケットロス率は 1%程度と仮定して計算する。しかし、BDL からデータを受信した段階で、受信端末において BDL のパケットロス率が測定され、EPS による受信時間の計算に用いられる。そのため、本システムでは UDL のパケットロス率が悪化しなければ、UDL を用いてそのまま再送データの受信を続けられる。一方、UDL のパケットロス率が悪化した場合、受信端末では一度 BDL に切り替えることで、UDL と BDL の通信品質にもとづいて最適なパスを使用できるようになる。

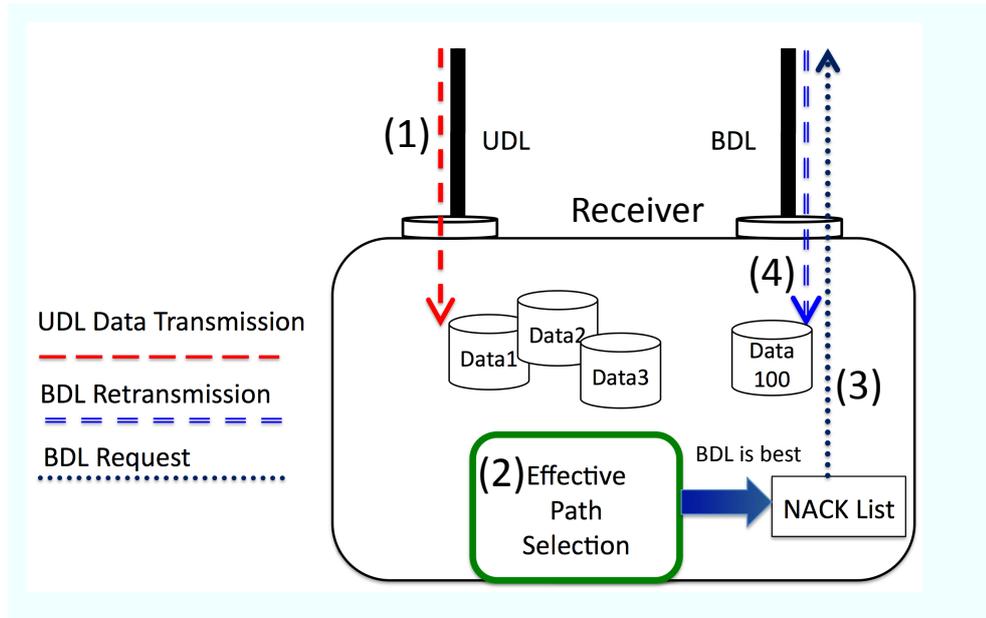


図. 5.1: Effective Path Selection

## 5.4 FEC Rate Control

本システムでは、再送するデータに FEC を適用することで、パケットロスへの耐性を向上させる。このとき、受信端末は接続する双方のリンクにおける通信品質をもとに、期待する FEC の冗長度を送信端末に通知する。再送処理における FEC Rate Control の動作を図 5.2 に示す。受信端末は、希望の FEC の冗長度を  $F_R$  として NACK に付加する。送信端末は、再送処理において一定時間待ち受け、UDL から再送要求された全ての  $F_R$  において、平均値、中央値、最大値を算出し、いずれかの値を最適な値として FEC の冗長率として設定し、マルチキャストで再送する。一方、BDL で要求されたデータは、ユニキャストによる再送のため、要求された FEC の冗長度を設定する。

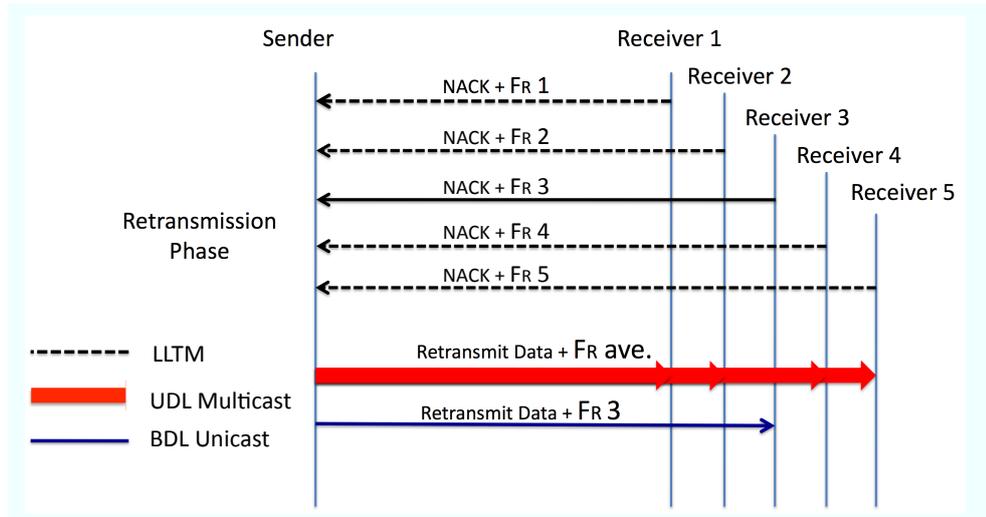


図. 5.2: FEC Rate Control

## 5.5 Priority Multicast Retransmission (PMR)

UDL を使用したマルチキャストでデータを再送する場合に、欠損データを再送する順序は、受信端末がデータ伝送を完了するまでの所要時間に影響を及ぼす。図 5.3 は、再送処理における送信端末の動作を示し、送信端末は以下に示す手順で UDL を用いたマルチキャストで再送する。

- (1) 受信端末から UDL のインターフェイスを介して NACK を受け取る
- (2) PMR により、どのデータに対して何台の受信端末からの要求を受け付けているかの情報をリクエストテーブルとして保持する
- (3) リクエストテーブルを参照し、受信端末からの要求が多いデータを優先度の高いデータとして、先にマルチキャストで再送する

また、送信端末は一定時間毎に更新されたリクエストテーブルを受信端末に向けてマルチキャストで送信する。受信端末では、NACK 送出までのランダムなバックオフタイム内にリクエストテーブルを受信した場合、既に存在するデータに対する NACK 送出を中止する。これにより、フィードバックメッセージ数の低減と、受信端末における欠損データの早期回復を実現する。

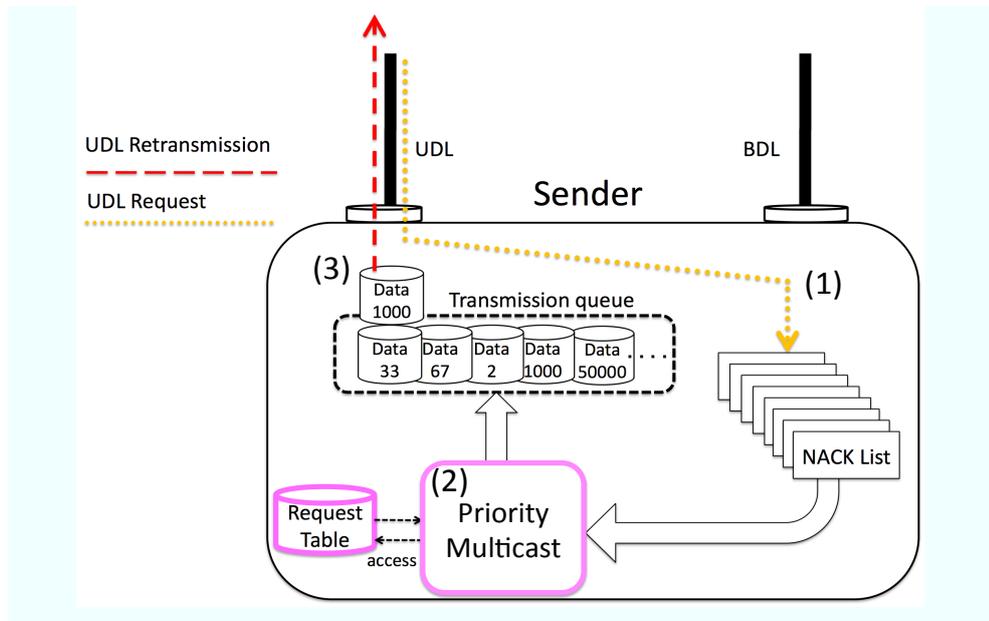


図. 5.3: Priority Multicast Retransmission

## 5.6 送信端末と受信端末における各機能の配置

本章で述べた各機能は、送信端末および受信端末において図5.4に示すように配置される。次の章で各機能の実装について述べる。受信端末は再送処理に移行すると、EPSは各リンクの packet loss rate や伝送速度にもとづいて算出した再送データの受信時間と FEC の冗長度を NACK パケットに付加して送信する。FEC 付きの再送データを受信した場合はデコード処理し、欠損データを修復できた場合はバッファに格納する。欠損データが復元できなかった場合は、再送処理を繰り返す。

送信端末は、再送処理で UDL インターフェイスを用いて受信端末からの NACK パケットを受信した場合、PMR はリクエストテーブルを更新する。一定時間が経過した場合、リクエストテーブルが保持する優先度の高いパケットから平均値をとった FEC の冗長度でのエンコード処理をして UDL を使用したマルチキャストでデータを再送する。BDL の場合は、そのまま受信端末の要求する FEC の冗長度でエンコード処理をして BDL を用いたユニキャストでデータを再送する。

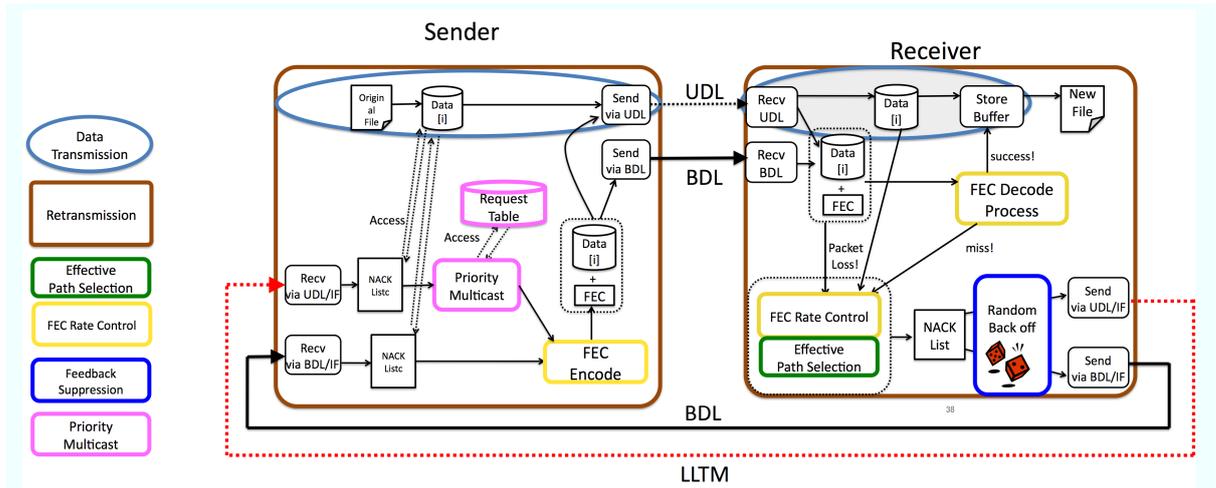


図. 5.4: 送信端末と受信端末における各機能の配置



### データ伝送前処理 (Initialization)

送信端末は、データ伝送を開始する前に必要となる情報を含む FINFO パケット、セッションの初期化を通知する CTL パケットを UDL を用いてマルチキャスト送信する。

### データ伝送処理 (Data Transmission)

送信端末は、DATA パケットを UDL を用いてマルチキャストで送信する。DATA パケットで送信されるデータはシーケンス番号を用いて識別される。受信端末は、パケットロスが生じた場合、欠損したデータのシーケンス番号を NACK リストとしてローカルに保持する。送信端末は全データを送信し終えた段階で CTL パケットを送信し、再送処理へ移行する。

### 再送処理 (Retransmission)

受信端末が CTL パケットを受信すると、ローカルに保持していた NACK リストを NACK パケットとして送信端末に通知する。CTL パケットの送信から一定時間、送信端末は受信端末からの NACK パケットを待ち受け、リクエストテーブルを更新する。送信端末は、更新されたリクエストテーブルに従って再送データを送信する。送信端末は、再送データの送信が終了すると、再び受信端末からの NACK パケットを待ち受ける。以後、再送処理におけるセッションのタイムアウト時間が経過するまでこの処理を繰り返す。受信端末はシステム全体のタイムアウトまでに全データを受け取った段階で、全データから生成したチェックサムとデータ伝送前処理で受信したチェックサムを比較し、一致していれば、正常に終了する。一致していなければ、異常終了する。

## 6.2 パケットフォーマット

伝送するパケットフォーマットを図 6.2 に示す。全てのパケットはヘッダ部とデータ部で構成される。ヘッダ部は以下の情報を含む。

#### Data Type

データの種別を示す。

#### Sequence Number

データのシーケンス番号を示す。

#### File Number

送信するファイルの個数を示す。

#### Flag

再送データの場合、冗長パケットを示す。

## FEC Rate

再送データの場合, FEC の冗長度を示す. 送信端末から送信される場合, 再送データに用いた FEC の冗長度を示し, 受信端末からの場合には要求する FEC の冗長度を示す.

各パケットの構成を図 6.2 に示し, その機能を述べる.

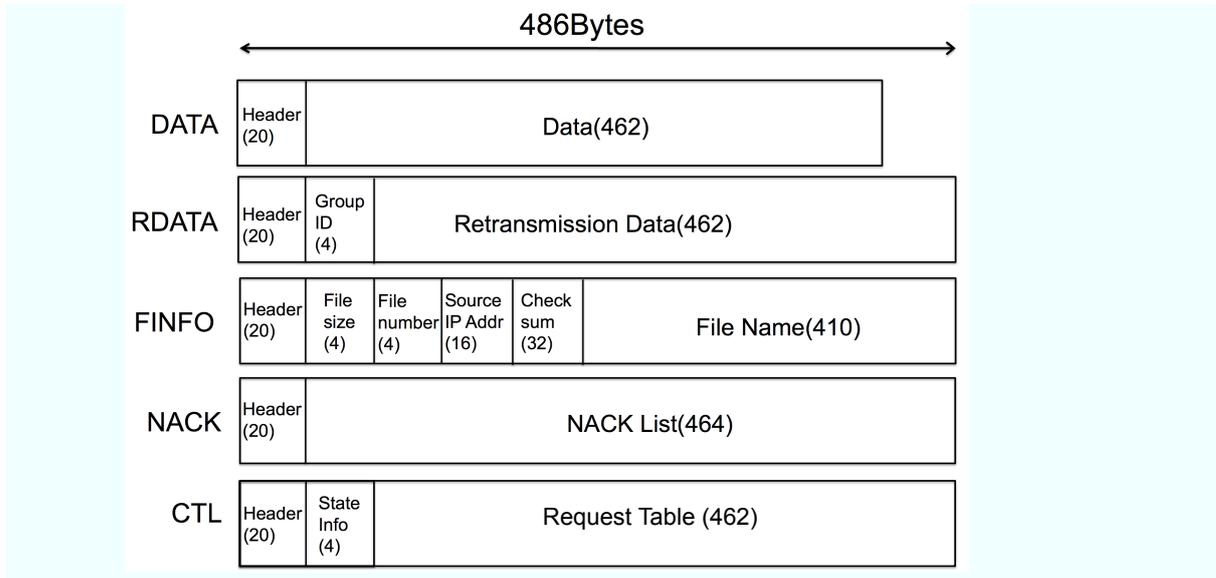


図. 6.2: パケットフォーマット

## DATA

初回のデータ伝送時に伝送されるデータ本体 (Data) を含む.

## RDATA

FEC によるエンコーディング後の冗長パケット付き再送データ (Retransmission Data) を含む. また, パケットが属する FEC のグループ ID (Group ID) を含む.

## FINFO

データ伝送開始前に必要となる情報を含む. 送信するファイルの情報として, ファイルサイズ (File Size), パケットの個数 (File Number), ファイル名 (File Name), 全ファイルサイズで生成した MD5 のチェックサム (Checksum) を含む. また, マルチパスでの通信を可能とするために, 送信端末における BDL インターフェイスの IP アドレス (Source IP Addr) を含む.

## NACK

再送要求として, 欠損パケットのリスト (NACK List), 期待する FEC の冗長度 (FEC Rate), 最適なパス情報 (Effective Path) を含む.

## CTL

アプリケーション全体の状態管理に関する情報 (State Info) を含む. 送信端末から, 受信端末に伝送される.

本システムでは次のふたつの点を考慮して再送データやNACKパケットのペイロードサイズを486bytesとした. ひとつは, 移動体端末における通信品質を考慮し, 伝送するパケットサイズを小さくするためである. もうひとつは, 片方向衛星回線や地上デジタル放送ではMPEG-2 TS上でIP伝送をするため, 伝送データ(486bytes)を含んだ, フレームサイズが, MPEG-2 TSのペイロードサイズ(184bytes)の倍数に近くなるようにするためである. これにより, MPEG-2 TS上で伝送される際に不必要なパディングを低減できる.

## 6.3 Effective Path Selection (EPS)

受信端末は, パケットロスが生じた場合, UDLとBDL双方のリンクにおけるパケットロス率と伝送速度にもとづいて次回の再送時にかかる受信時間を予測し, 受信時間がより短いと期待されるパスを選択して再送要求を送信する.

伝送速度に関しては, 本システムは起動時に, ユーザが戻りのパスの種類に関して, Satellite BDL, Fiber, 3G, Wi-Fi, あるいはWiMAXなどBDLとして使用する回線の種類を選択する. Satellite BDLとFiberに接続する場合, 固定の端末を想定するため伝送速度はユーザが手動で設定する. 3GとWi-Fi, WiMAXについては, 移動体端末を想定し, 場所により実効速度は変動するため, 予め実効速度を設定した. 一方, UDLの伝送速度は送信端末が制御する. 本システムで参照する実効速度を表6.2に示す. 3GとWi-Fiでは, 移動体端末のiPhone 3GS [2]の回線速度測定ツールであるSpeedtestを用いて異なる地点で計測した結果を参考にした. また, WiMAXの実効速度は, UQ-WiMAXホストの実効速度計測データをにおいて, 90日以内の東京で計測したデータを参照した [9].

表. 6.2: 各リンクにおけるダウンリンクの実効速度の目安

回線の種類	平均値 (Mbps)	最大値 (Mbps)	最小値 (Mbps)
3G	1.03	1.65	-
Wi-Fi	4.23	5.08	3.16
Wi-MAX	3.99	30.22	0.35

リードソロモンの冗長度は,  $k/n$  で表せる.  $k$  は実データパケットの個数であり,  $n$  は全データパケットの個数をそれぞれ意味する. 受信端末において, パケットロス率を  $P_L$ , 希望

する FEC の冗長度を  $F_R$  とするとき,  $F_R$  は,

$$F_R = \frac{k}{n} = 1 - P_L \quad (6.1)$$

と表せる. また欠損したパケット数を  $D_L$ , パケットサイズを  $L$ , 伝送速度を  $S$  とするとき, 次回の再送時に伝送されるパケット数  $n$  と, 受信時間  $T$  は,

$$\begin{aligned} n &= \frac{D_L}{1 - P_L} \\ T &= \frac{n * L}{S} \end{aligned} \quad (6.2)$$

と表せる. パケットロスが生じた受信端末では, 未受信のデータを全て受信し終えるまでの受信時間を予測し, 受信時間がより短いパスを選択して再送要求を送信する.

## 6.4 FEC Rate Control

受信端末において期待する FEC の冗長度  $F_R$  は, 数式 6.1 に示すように, データを受信したリンクのパケットロス率にもとづいて設定する. 受信端末において一定パケット数を受信した時に, 実際に伝送されたパケットの個数を  $D_A$ , 欠損したパケットの個数を  $D_L$  とするとき, 受信端末のパケットロス率  $P_L$  は以下のように設定した.

$$P_L = \frac{D_L}{D_A} \quad (6.3)$$

送信端末では, 受信端末からの NACK パケットの待ち受け時間がタイムアウトしたとき, 受信した再送要求の FEC 冗長度から平均値を算出する. この値を, マルチキャスト再送時における FEC の冗長度に設定する.

## 6.5 Priority Multicast Retransmission (PMR)

リクエストテーブルには, ハッシュ関数を用いる. インデックスには, データのシーケンス番号を用い, 変数にはリクエスト数を格納する. 送信端末は, 一定時間毎に更新されるリクエストテーブルのデータを送信する前に, リクエストテーブルが持つリストをマルチキャストで送信する. 送信が完了したデータはリクエストテーブルから除かれる.

また, 受信端末はバックオフタイマを用いて NACK パケットの送出手を遅延する. タイマは, 目安とするリンクでの  $RTT * 2$  を最大値とするランダムな値を設定する. バックオフ時間内に, 送信端末がマルチキャストで送信したリクエストテーブルを受信し, リクエストテーブルに自身の持つ NACK リストと同一データが既に存在した場合は, NACK リストから取り除く.

# 第7章 評価

## 7.1 評価の概要

本研究では、実装したシステムを IPv6 を用いた LAN で動作させ、性能を検証する。現状では、機能として EPS と FEC Rate Control は実装が完了したが、PMR の実装は未了である。本評価では、片方のリンクの通信品質を悪化させた場合において、本研究が提案するマルチパス環境の活用がどのくらいシステムの性能と帯域の有効利用に貢献するかを、UDL を用いたシングルパスで再送する既存方式と比較して考察する。

また、本システムで送信端末が UDL と BDL の各リンクを用いて送った再送データの総量を比較することで、パスの切り替えが生じた時点の分析と、受信時間・UDL のオーバーヘッドとの関係性を考察し、本システムの性能を評価する。

## 7.2 評価環境

システムの評価環境として、図 7.1 に示すように、受信端末が UDL と BDL の双方に接続するマルチパス環境を構築した。また、本システムと無関係なトラフィックが測定に影響を及ぼさないよう、コモディティータラックが無い LAN として設定した。

本システムは単一の AS 内での動作を想定し、図 7.1 に示した送信端末と受信端末間に介在するルータは、IPv6 の PIM-SM でマルチキャストパケットを中継する。また、複数の受信端末が異なるリンク特性を持つ環境を構築するために、受信端末においてダミーネットを用いた。表 7.1 に示すように、UDL のパケットロス率をパラメータに設定し、UDL の帯域、片方向遅延は衛星を用いたネットワークを想定し、固定値に設定した。BDL のパケットロス率、帯域、片方向遅延は Wi-Fi などの無線ネットワークを想定し、それぞれ固定値に設定した。

評価で用いた機材の仕様を表 7.2 に示す。

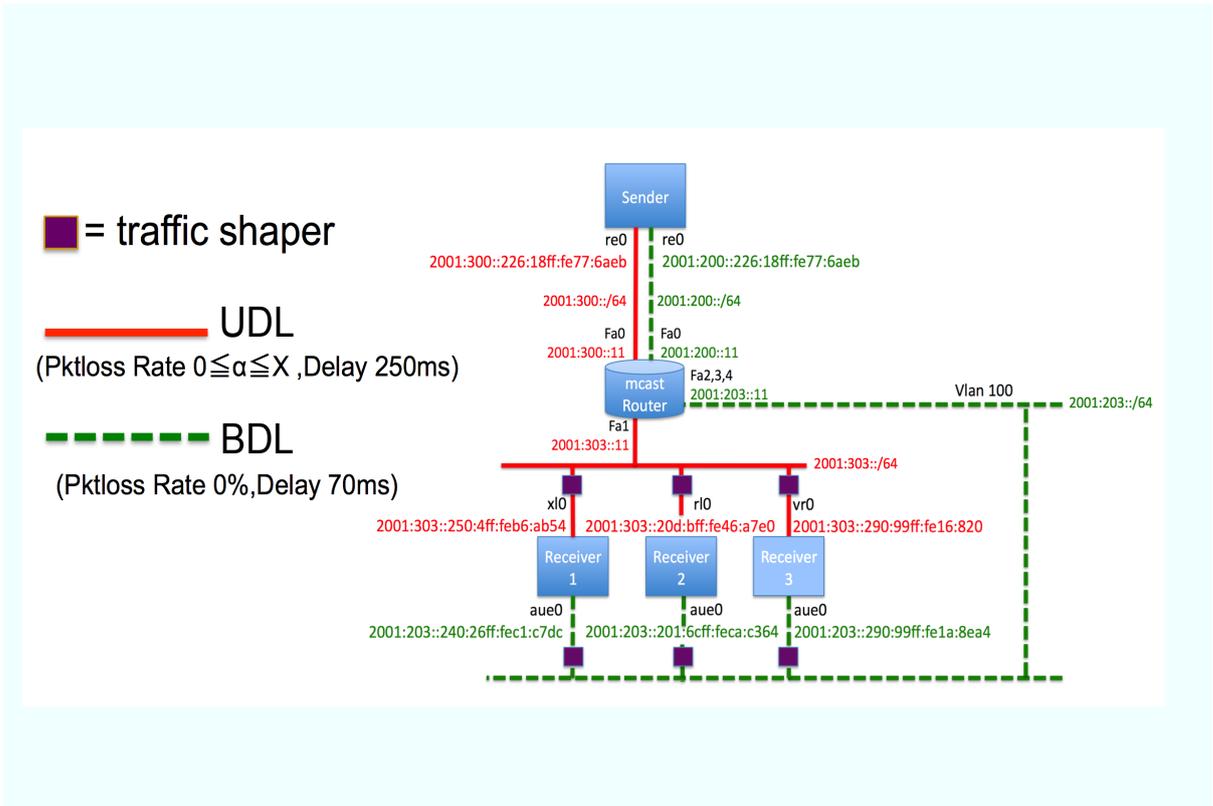


図. 7.1: IPv6 の LAN を用いた評価環境

表. 7.1: 各リンクの設定値

	帯域 (Mbps)	片方向遅延 (ms)	パケットロス率 (%)
UDL	13	250	$\alpha$ ( $0 \leq \alpha \leq X$ )
BDL	3	35	0

表. 7.2: 評価で用いた機材の仕様

	Sender	Receiver1	Receiver2	Receiver3
CPU	Intel Core i7 3.33GHz	Intel Pentium 597.41MHz	IntelPentium M 2.13MHz	Intel Celeron 2.66GHz
RAM	13.3GBytes	255MBytes	2GBytes	479MBytes
OS	FreeBSD 7.2- Release	FreeBSD 6.2- Release	FreeBSD 6.2- Release	FreeBSD 6.2- Release
gcc version	gcc4.2.1	gcc3.4.6	gcc3.4.6	gcc3.4.6

## 7.3 評価項目

評価項目は以下に示す.

- 受信時間
- 再送データの総量
- UDL 帯域のオーバーヘッド

受信時間は, 受信端末においてデータ転送の開始から正常に終了するまでの時間を示す. 再送データの総量は, 再送時に送信端末から実際に伝送された総バイト数を示す. UDL 帯域のオーバーヘッドは, 数式 7.1 に示すように, 送信する元のファイルサイズに対してどれだけ再送データが実際に送信されたかを表し, 0 に近い程余分なデータ再送がおこなわれてないことを示す.

$$UDL \text{ 帯域のオーバーヘッド} = \frac{\text{実際に伝送された総バイト数}}{\text{伝送するファイルサイズ}} - 1 \quad (7.1)$$

本システム, 既存のシステムの両方において, 転送速度は固定とし, UDL, BDL 双方のパスを用いて再送する場合でも設定した転送速度を保つものとした. 転送するファイルサイズは音楽ファイル (mp3 形式) などを想定して 4MBytes とした. シングルパスで再送する場合は, 衛星を用いたインターネット環境や固定テレビを想定し, 受信端末における UDL のパケットロス率はほぼ等しい場合にて検証した.

マルチパスで再送する本システムは, 動作環境とする片方向衛星回線と, 地上デジタル放送を用いたネットワーク両方での動作を考慮し, UDL のパケットロス率がほぼ等しい場合と, 著しく異なる場合において比較した.

## 7.4 既存方式と本提案方式の比較

既存のリライアブルマルチキャストの方式では, 通信品質を考慮せずに再送を繰り返すため, UDL 帯域におけるオーバーヘッドの増大に繋がることを述べた. そのため, UDL を用いたシングルパスで再送する既存のシステムと, 本研究が提案するマルチパスのシステムにおいて, UDL での通信品質の劣化が, どの程度受信時間と UDL のオーバーヘッドに影響を与えるかを測定し, 比較した. 既存のシステムは, アプリケーション層での FEC を採用した方式と採用しない方式の両方を動作させた. FEC は受信端末の要求した冗長率の平均値を設定し, マルチキャスト再送する方式を採用している.

図 7.2 は、10 回の試行における三台の受信端末における平均値、最大値、最小値をそれぞれ表示した結果を示す。本提案方式では UDL のパケットロス率が悪化した場合、受信端末におけるデータの受信時間はほぼ一定である。一方、既存方式におけるデータの受信時間は、UDL のパケットロス率が悪化するにつれて増加する傾向がみられる。既存方式において FEC を採用した場合、採用しない場合よりも全体の受信時間は増加せずに済むため、FEC はパケットロスへの耐性があることを示せた。また、FEC を採用した場合、採用しない場合よりもパケット欠損が生じた場合でも受信端末において欠損データを修復できるため、受信端末における受信時間の最大値と最小値の差が小さい。そのため、FEC は受信端末における欠損パケットの早期回復に有効であることがわかる。しかし、リンクの通信品質を考慮しない既存のシングルパスを用いた再送では、パケットロス率が大きい環境では、FEC を用いた再送の繰り返しが受信端末におけるデータの完全性に貢献しないため、受信時間の増加につながっている。

図 7.3 で示すように、本提案方式は、UDL のパケットロス率が 1% 以降、UDL におけるオーバーヘッドを低減できた。本提案方式では、一回目のデータ伝送においては UDL を用いるため、BDL のパケットロス率の初期値を 1% と設定している。そのため、UDL のパケットロス率が 1% の場合、オーバーヘッドが生じている。一方、既存方式は、少数の受信端末においても通信品質の悪化に伴い、オーバーヘッドが増大している。また、既存方式において FEC を使用する場合の方が、UDL の通信品質が悪化した場合には多くの冗長データが付加されるため、UDL のオーバーヘッド増加につながっている。このため、受信端末の台数が多い場合においては、UDL におけるパケット欠損率が大きい受信端末に合わせて冗長データが付加されるため、シングルパスでは帯域利用効率が悪化すると考えられる。

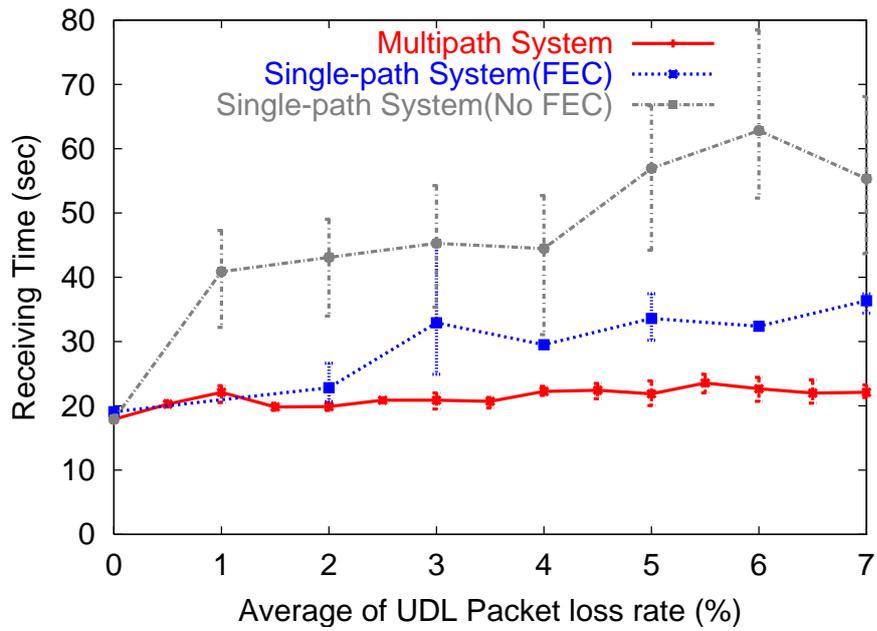


図. 7.2: 受信時間の推移

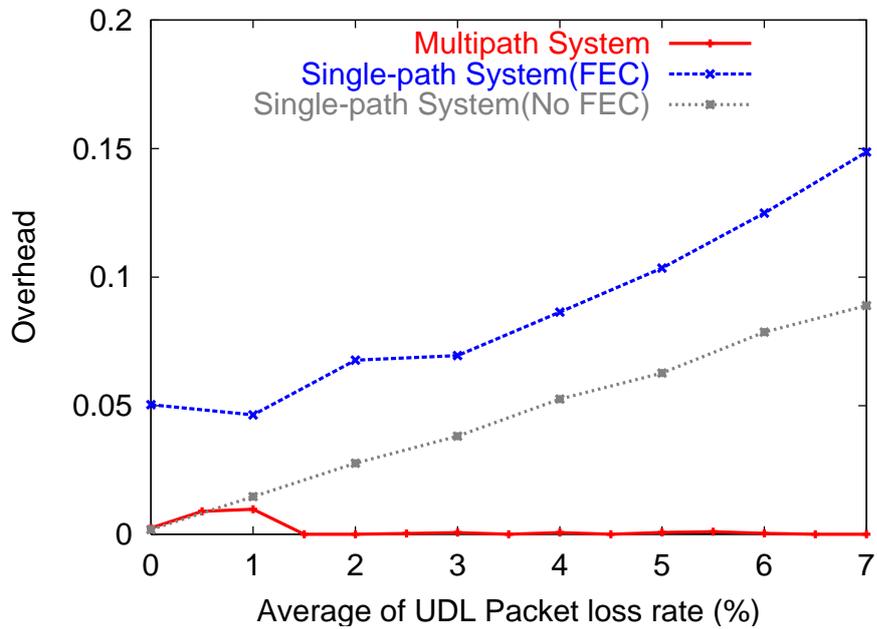


図. 7.3: UDL におけるオーバーヘッドの推移

## 7.5 本提案方式の性能評価

### 7.5.1 各受信端末の UDL におけるパケットロス率が等しい場合

複数の受信端末で、UDL のパケットロス率が同様に悪化した場合に、本システムの性能を評価した。

図 7.4 は転送速度を 2Mbps と 4Mbps に設定した場合の全体の受信時間の推移を示し、UDL のパケットロス率を高くしても、本システムは受信時間の増加を抑制し、ほぼ一定に保つことができた。また、三台の受信端末におけるデータの受信時間の最大値と最小値の差が小さく、ほぼ等しい時間で各受信端末でデータ受信を完了できた。

図 7.5, 7.6 は転送速度を 2Mbps に設定した場合の UDL と BDL における再送データの総量と UDL 帯域のオーバーヘッドを示す。図 7.5 では、UDL のパケットロス率が高くなるにつれ、0%から 1%までの間は UDL のリンク使用量が増加したが、1%を超えると UDL のリンクはほぼ使用されなくなる。一方、UDL のパケットロス率が悪化するにつれて BDL のリンク使用が増加し、UDL のパケットロス率が 1%を上回ると UDL に代わって再送時に BDL リンクを使用している。このことから、UDL の通信品質が悪化した場合においても、BDL を積極的に使用することで全体の受信時間が増加することを抑止できた。

また、図 7.6 で示すように、UDL のパケットロス率が 0%から 1%に増加すると、UDL 帯域のオーバーヘッドも増加するが、1%を上回ると UDL 帯域のオーバーヘッドはほぼ無いに等しくなる。受信端末における UDL のパケットロス率が同様に悪化する場合、UDL のオーバーヘッドが増加を抑止し、低減することができた。そのため、本システムは UDL の通信品質が悪化した場合でも、再送時に UDL を用いて再送を繰り返すことなく、通信品質の良好な別のパスに切り替えて再送することで、UDL 帯域を効率良く使用できた。

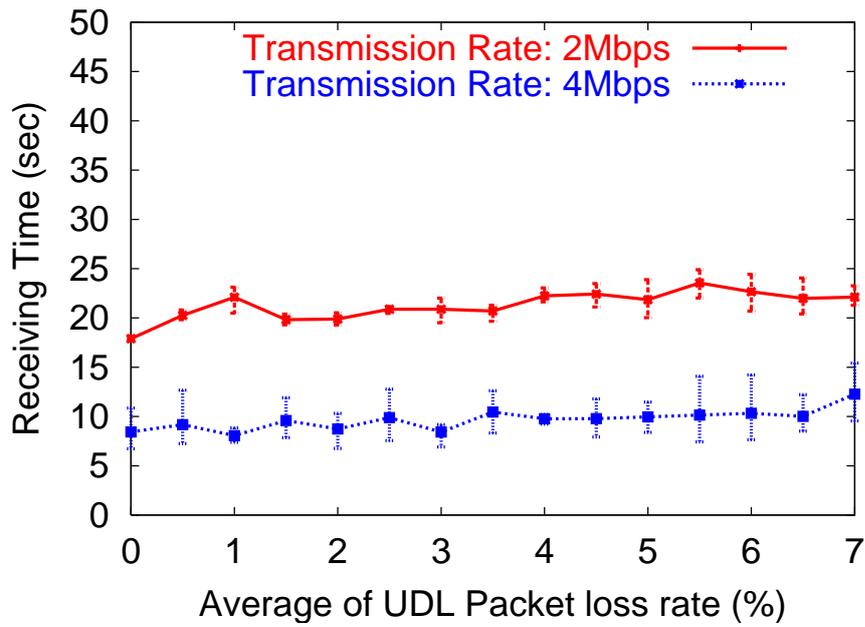


図. 7.4: 受信時間の推移

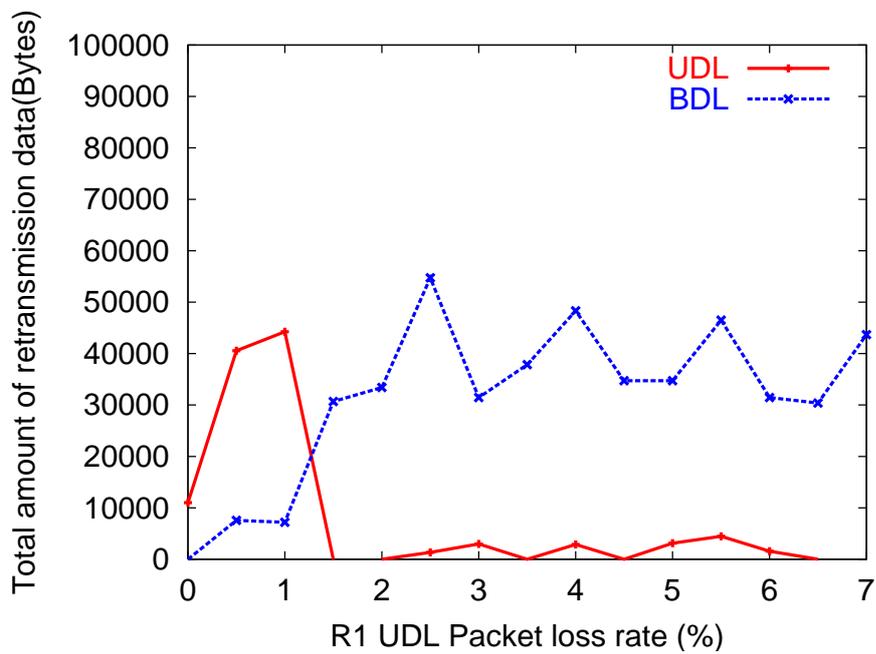


図. 7.5: UDL と BDL における再送データの総量の比較 (転送速度が 2Mbps の場合)

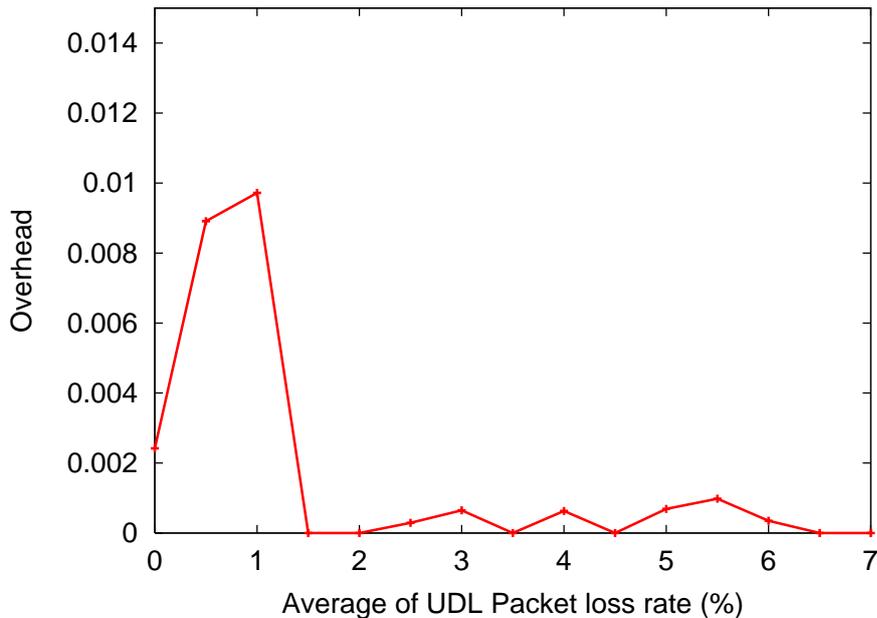


図. 7.6: UDL におけるオーバーヘッドの推移 (転送速度が2Mbps の場合)

### 7.5.2 各受信端末の UDL におけるパケットロス率が異なる場合

三台の受信端末のうち、一台の受信端末における UDL のパケットロス率を推移させて、全体の受信時間と個々の受信時間、再送データの総量、UDL 帯域のオーバーヘッドを測定した。他の二台の受信端末における UDL のパケットロス率は固定とし、それぞれ 0.2%、2% に設定した。図 7.7 が示すように、UDL におけるリンクの通信品質が受信端末毎に異なる場合、リンクの通信品質が同一の場合に比べて、最大値と最小値の差が大きい。これは、UDL の通信品質が良好な受信端末は早期にデータ受信を完了し、UDL の通信品質が悪化した受信端末ではデータ受信の完了により時間がかかっていることを示す。転送速度が 2Mbps の場合、R1 における UDL のパケットロス率が 14% 以降、全体の受信時間の増加を抑制できていることがわかる。図 7.8 は、転送速度が 2Mbps の時の受信端末毎のデータの受信時間を示す。R1 における UDL のパケットロス率が 0% から 14% にかけて、R1 における受信時間は増加しているが、14% 以降は増加から減少に転じている。しかし、UDL のパケットロス率を固定値に設定した R2 において、0% から 12% まで受信時間は増加傾向にあり、12% 以降は減少に転じており、R1 における UDL のパケットロス率の悪化に伴い、R1 と同じように受信時間が推移している。そのため、R1 における UDL のパケットロス率の悪化は、R2 のデー

タの受信時間を増加させたといえる。

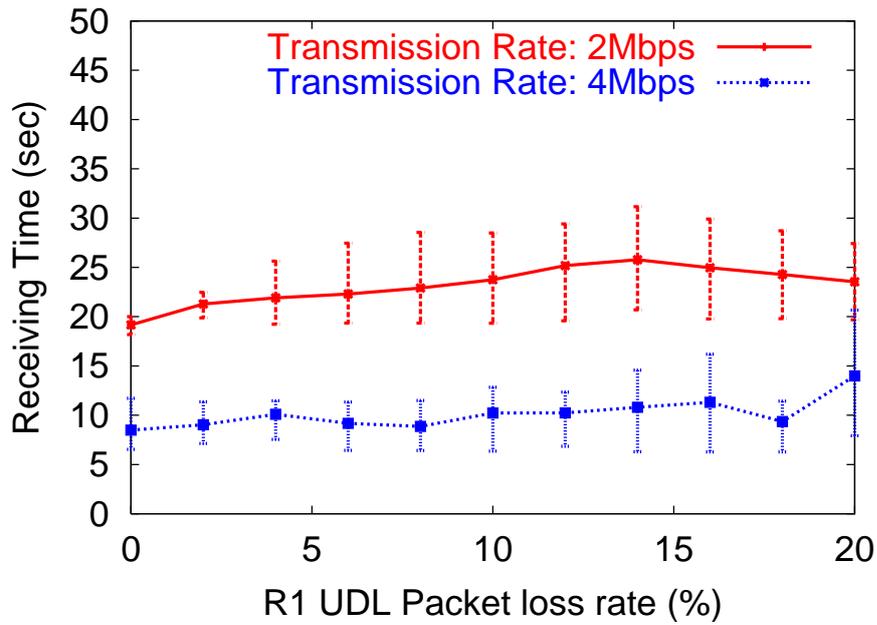


図. 7.7: 全体の受信時間の推移

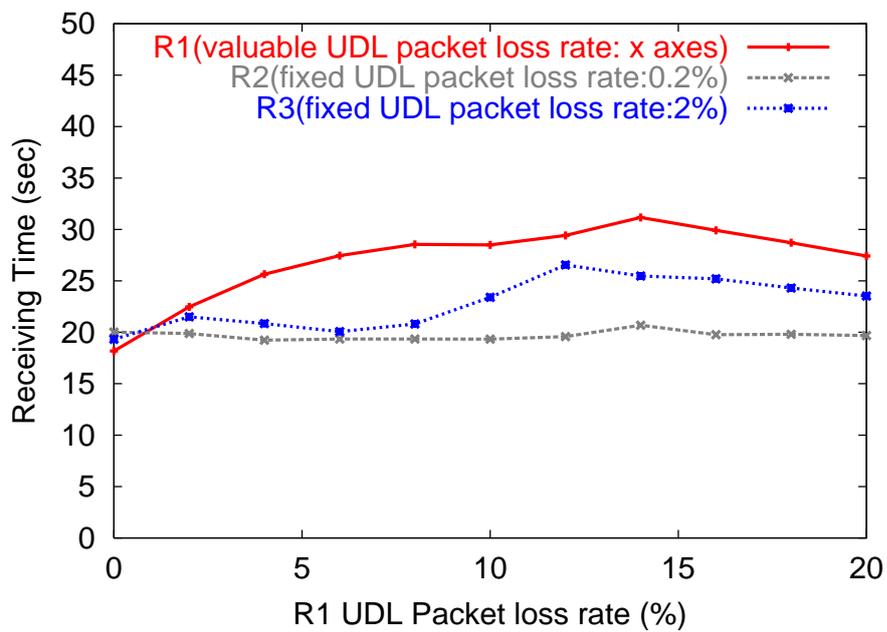


図. 7.8: 受信端末毎の受信時間の推移

図7.9において、R1におけるUDLのパケットロス率が12%以降に、再送時におけるUDLのリンク使用量が減少し、14%以降にはBDLのリンク使用量がUDLのリンク使用量を上回っていることからR1では14%以降、積極的にBDLを使用したことが全体の受信時間の

増加の抑止に繋がったといえる。一方、0%から12%まではR1は再送にUDLとBDL双方のリンクを用いる。しかし、現状のシステムではUDLではNACK到着順に再送されるため、UDLを用いて再送するデータの順序がR2の受信時間の増加につながったと考えられる。図7.10が示すように、UDL帯域におけるオーバーヘッドは、R1におけるUDLのパケットロス率が0%から12%にかけては増減を繰り返すが、12%以降はUDL帯域におけるオーバーヘッドは徐々に減少している。そのため、受信端末毎にUDLにおける通信品質が異なる場合においても、UDLにおける通信品質が悪化した受信端末に対して、BDLを用いた再送に切り替えるため、UDLにおけるオーバーヘッドの増加を抑止できた。

一方で、R1におけるUDL帯域のパケットロス率が0%から12%にかけてUDL帯域のオーバーヘッドが増減を繰り返す一つの原因として、三台の受信端末において同一データを欠損した受信端末の台数が関係していると考えられる。個々の受信端末が異なるデータを欠損した場合は、それぞれ異なるデータをUDLを用いて再送するため、複数の受信端末で同一データを欠損した場合と比較して、UDL帯域のオーバーヘッドが大きくなる。

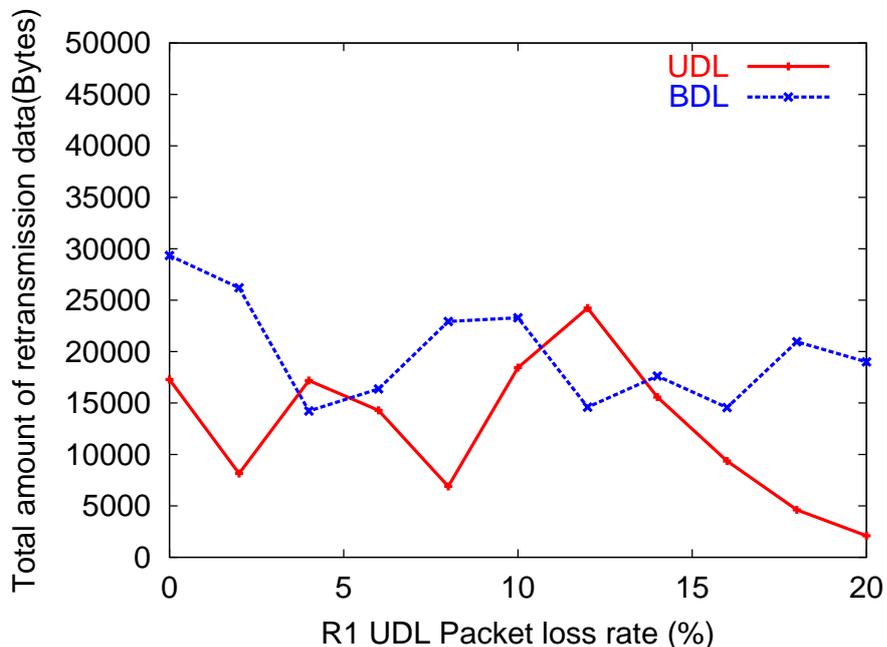


図. 7.9: UDL と BDL における再送データの比較 (転送速度が2Mbps の場合)

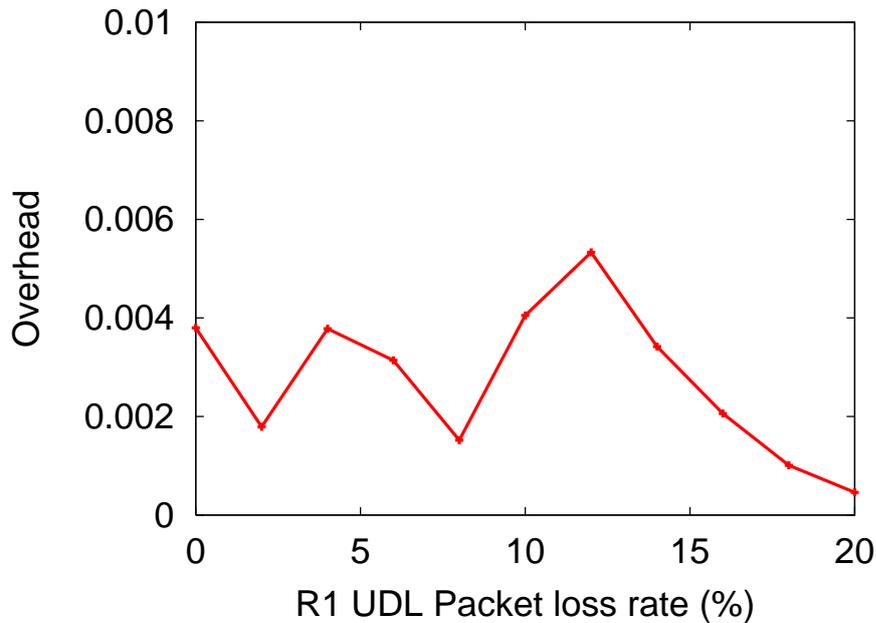


図. 7.10: UDL におけるオーバーヘッドの推移 (転送速度が 2Mbps の場合)

## 7.6 評価のまとめ

本システムでは、リンクの通信品質を考慮し、UDL と BDL の双方を使い分けを可能とし、受信端末で UDL のリンク品質が同一の場合と異なる場合の両方において動作した。本システムの特徴であるマルチパス環境を活用した場合は、シングルパスの場合より、パケットロス率が高い場合、受信端末における全体の受信時間の増加を抑制し、UDL のオーバーヘッドを減少することができた。このため、本システムは、同一のデータが UDL を用いて繰り返し伝送される問題を解決し、送信端末における負荷低減と UDL の帯域使用の効率性の向上に貢献する。しかし、現状では PMR の実装ができていないため、UDL で再送する場合、順序を考慮せず、受信端末における欠損パケットの早期回復ができない場合がある。また、現状のシステムは受信端末の選択したパスに従い、送信端末が再送する。そのため、多数の受信端末において本システムを動作させた場合、少数の受信端末が要求するデータが UDL 帯域を用いて再送されてしまうため、UDL 帯域のオーバーヘッドが増加する問題が想定される。

# 第8章 おわりに

## 8.1 まとめ

本研究は、UDLを活用した一对多のマルチメディアコンテンツの配信においてIPv6 リライアブルマルチキャストデータ伝送を実現し、マルチパス環境の活用が帯域の有効利用にどのように貢献するか検証した。UDLを用いたリライアブルマルチキャストでは、信頼性の保証、UDL帯域のオーバーヘッド、フィードバックメッセージの集中といった問題がある。また、既存の方式では、リンクの通信品質が悪化した場合に、再送を繰り返すことにより、UDL帯域が非効率に使用され、全体としてデータ伝送性能の低下につながる。

本研究では、受信端末毎に変動する通信品質を考慮し、マルチパス環境を活用したシステムモデルの提案と、再送時におけるFECの冗長率の設定や、最適なパスへの切り替え機構を設計し、実装した。評価の結果より、本システムでは、UDLの通信品質が悪くなった場合でも、BDLに切り替えることで全体の受信時間とUDL帯域におけるオーバーヘッドを低減することができた。シングルパスに比べてUDLのオーバーヘッド低減できたことにより、マルチパス環境の活用は、受信端末毎にリンクの通信品質が異なる場合において、システムの性能を落とさず、UDL帯域の有効な活用ができると考える。このため、本システムは、通信品質が悪化したリンクを用いて再送を繰り返すことでUDL帯域が非効率に使用されるといった既存方式における問題を解決できる。しかし、PMRの機能が実装できていないことから、受信台数が多数の場合、UDLで要求されたデータを再送する順序次第で、受信端末において再送データを待ち受ける時間が長くなる問題が残されている。また、現状のシステムは受信端末の選択したパス要求に従い、送信端末は再送する。そのため、多数の受信端末の接続する大規模なネットワークにおいて本システムを動作させた場合、UDL帯域を有効に使用するためには、少数の受信端末からの再送要求に対して、送信端末が最終的にUDL帯域を使用するかしないかを判断する機構を実装する必要がある。

## 8.2 今後の課題

今後の課題として以下のことが考えられる。

- ネットワークアーキテクチャにおける汎用プロトコルの実現

本研究では, LLTM が動作するマルチパス環境を想定し, アプリケーション層においてリライアブルマルチキャストデータ伝送を実装した.

今後, 地上デジタル放送における IP 伝送が一般的になれば, 配信されるコンテンツやサービス, アプリケーションの種類が多様化し, LLTM の導入に向けた要求が高まると考えられる. このとき, 本システムが様々なアプリケーションと相互連携して動作するためには, 本システムの持つ機能を現在の LLTM を用いたネットワークアーキテクチャにどのように組み込むかが重要となる.

本システムでは複数の機能を相互に連携させることにより, 信頼性, UDL 帯域使用の効率性およびスケーラビリティの向上に貢献するように構成されている. 本システムの持つ機能をアプリケーションとして実装するのではなく, 図 8.1 で示すように LLTM が動作する環境に特化した, トランスポート層プロトコルとして実装するアプローチを取ることで, より汎用性の高いデータ伝送技術としての応用が実現できるようになると考えられる.

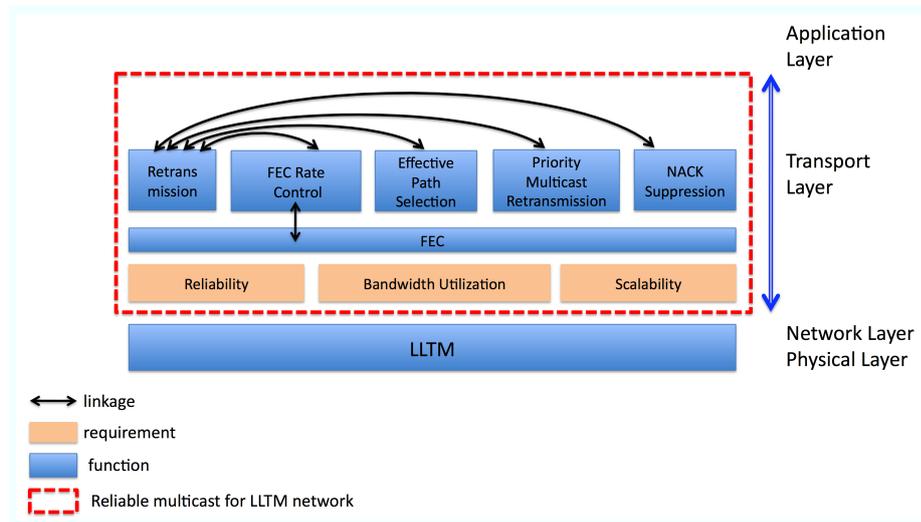


図. 8.1: LLTM を用いたネットワークに特化したトランスポート層プロトコルの外観

- 実ネットワークでの動作と冗長化手法の検討

本システムでは, ペイロードデータに FEC をかけ, パケットレベルで冗長化する手法を用いている. そのため, 地上デジタル放送システムを用いたネットワークで, 受信端末において結果的に生じる UDP/IP パケットのロスに対して有効に作用すると考えられる. しかし, 現状のシステムはブロック符号であるリードソロモン符号を採用したため, 地上デジタル放送や CS 放送で実際に用いられているインターリーブ技術

と併用して使用できるか検証する必要がある。その上で、リードソロモン符号以外にも、無線技術で多く採用されている Tornado 符号などと比較して、配信効率が良い冗長化手法を検討する必要がある。

- スケーラビリティ

本システムは、実ネットワークでの動作を考慮し、多数の受信端末においても動作することが課題である。そのため、送信端末は再送要求する受信端末の台数を考慮して最終的に UDL 帯域を使用するか判断することで UDL 帯域を有効に使用し、スケーラビリティを向上する必要がある。

- UDL を用いた再送による欠損パケットの早期回復

PMR の実装により、リクエストテーブルを用いて再送時に優先するパケットの順位付けをすることが受信端末における欠損パケットの早期回復に貢献する。

- 変動する通信品質に対するロバストネスの検証

本評価では、UDL の通信品質を段階的に悪化させた場合において本システムの性能を検証した。しかし、本システムを地上デジタル放送を用いた実ネットワークにおいて動作させるためには、UDL と BDL 両方でリンクの通信品質が変動する場合を想定し、本システムの耐性を検証する必要がある。

- 他のアプリケーションとの連携、セキュリティの対策

本システムは、信頼性、帯域の効率性、フィードバックメッセージの数を低減を基本的な要件として実装した。そのため、実ネットワークでの動作を考慮するとセキュリティに関しては脆弱性がある。また、受信端末の数が増加した場合に、送信端末がタイムアウトした場合、ファイル転送が完了しない受信端末に対する信頼性の保証をする必要がある。このため、本システムは MTM などの他のアプリケーションと連携を図ることによってより信頼性を高める必要がある。

# 謝辞

本研究の取り組みを通じて、ご指導頂いた慶應義塾大学環境情報学部 村井 純博士、並びに徳田 英幸博士に感謝します。日常の研究活動を通して厳しくも的確なご指導と、叱咤激励を頂いた楠本 博之博士、中村 修博士、高汐 一紀博士、Rodney D. Van Meter III 博士、植原 啓介博士、三次 仁博士、中澤 仁博士、武田 圭史博士に感謝します。

本論文の執筆に際して多くのご助言を頂き、研究活動においても熱心に指導して頂いた重近 範行博士に感謝します。本システムの設計・実装面で多くのご助言を頂いた Patcharee Basu 氏、Achmad Basuki 氏、松園 和久氏に感謝します。また、本論文の執筆においてきめ細やかなご指導を頂いた慶應義塾大学政策・メディア研究科 Achmad Husni Thamrin 博士、片岡 広太郎氏に感謝します。両氏は、私が研究室に所属した大学二年次より、アジアにおける衛星インターネットの研究に対して日頃から熱心にご指導して頂きました。また、本論文の作成にあたっては最後まで丁寧にご指導いただき、本当にありがとうございました。

SOI Asia/AI<sup>3</sup> プロジェクトの山口 英博士、大川 恵子博士、土本 康生博士、渡部 陽仁氏、工藤 紀篤氏、Mohamad Dikshie Fauzie 氏に感謝します。SOI Asia/AI<sup>3</sup> プロジェクトでの研究発表を通して、皆様から多くのご助言を頂き、非常に有意義な研究活動をすることができました。また、日常より研究室での活動を支えて頂いた堀場 勝広氏、岡田 耕司氏、松谷 健史氏、六田 佳祐氏に感謝します。共に卒論執筆に励み、苦楽を共にした上原 雄貴氏、佐藤 貴彦氏、永山 翔太氏、波多野 敏明氏に感謝します。研究室での生活を一緒に楽しく過ごさせて頂いた Bianco プロジェクトの村上 滋希氏、常田 彩都美氏、相見 眞男氏、谷口 遥氏、服部 将真氏、Nguyen Hung Long 氏に感謝します。最後に、日常より有益な議論と、精神面でのサポートをしてくださった慶應義塾大学村井研究室の諸氏に感謝します。

## 参考文献

- [1] Asian internet interconnection initiatives project(ai3).
- [2] iphone 3g/3gs. <http://mb.softbank.jp/mb/iphone/>.
- [3] Uq wimax speed. <http://www.uqwimax.jp/service/wimax/>.
- [4] 3GPP. *Multimedia Broadcast/Multicast Service(MBMS); Architecture and functional description*.
- [5] ARIB. デジタル放送におけるデータ放送符号化方式と伝送方式.
- [6] C.Selier and N.Chuberre. Satellite digital multimedia broadcasting(sdmb) for 3g and beyond 3g systems. In *13th IST Mobile and Wireless Communication Summit*, June, 2004.
- [7] E.Duros, W.Dabbous, H.Izumiyama, N.Fujii, and Y.Zhang. *A Link-Layer Tunneling Mechanism for Unidirectional Links*, 2001.
- [8] H.Yoshida, M.Kurihara, T.Ohno, and Y.Shimotsuma. Contents delivery system via satellite network (2). *Information Processing Society of Japan (IPSSJ)*, Feb.21, 2001.
- [9] Noshikumi Incorporated. Wimax speed map. <http://wimax.noshikumi.com/>.
- [10] ITU-R. *Broadcasting of multimedia and data applications for mobile reception by handheld receivers*.
- [11] J.Nonnenmacher, E.W.Biersack, and D.Towsley. Parity-based loss recovery for reliable multicast transmission. Mar.29-Apr.2, 1998.
- [12] K.Kataoka, H.Kimura, T.Ishida, H.Kohara, S.Izawa, H.Kusumoto, O.Nakamura, and J.Murai. An architecture of ip network over broadcast media. *EICE Transactions on Communications*, Vol. Vol.J91-B, No.12, pp. pp.1669–1681, 2008.

- [13] M.-J.Montpetit, G.Fairhurst, H.Clausen, B.Collini-Nocker, and H.Linder. *A Framework for Transmission of IP Datagrams over MPEG-2 Networks*, 2005.
- [14] M.Chipeta, M.Karaliopoulos, B.Evans, B.Garnier, and L.Roullet.
- [15] M.Jung, J.Nonnenmacher, and E W. Biersack. Reliable multicast via satellite: Unidirectional vs. bi-directional communication. In *KiVS'99*, 1999.
- [16] NTT 東日本. B フレッツサービス. <http://fleets.com/opt/>.
- [17] P.Basu. *Multicast Tree Mirroring(MTM)*.
- [18] P.Basu and K.Kanchanasut. Rmus: A reliable multicast protocol for unidirectional satellite link. In *IEEE SAINT'03*, Sep.3, 2003.
- [19] S.Floyd, V.Jacobson, S.McCanne, C.Liu, and L.Zhang. A reliable multicast framework for light-weight sessions and application level framing. *ACM SIGMETRICS'95*, pp. pp.342–356, Aug, 1995.
- [20] S.Kinoshita. リライアブルマルチキャスト技術の最新動向 (a survey of reliable multicast technology). *The Intsitute of Electric, Information and Communication Engineers*, Vol. Vol.J85-B, No.11, pp. pp.1819–1842, November.1, 2002.
- [21] S.Pingali. A comparison of sender-initiated and receiver-initiated reliable multicast protocols. *ACM SIGMETRICS'94*, pp. pp.221–230, May, 1994.
- [22] T.Paila, M.Luby, R.Lehtonen, V.Roca, and R.Walsh. *FLUTE- File Delivery over Uni-directional Transport*, October, 2004.
- [23] V.Roca, M.Cunche, J.Lacan, A.Bouabdallah, and K.Matsuzono. *Reed-Solomon Forward Error Correction (FEC) Schemes for FECFRAME*, March.4, 2009.
- [24] 情報通信審議会放送システム委員会 マルチメディア放送システム作業班アドホックグループ 1. 携帯端末向けマルチメディア放送システム ISDB-Tmm(Integrated Services Digital Broadcasting Terrestrial Mobile Multi-Media Broadcasting) の概要.
- [25] 上田雅巳, 山下剛, 森田哲郎. モバイルコンテンツ配信用パケット欠損補償ライブラリの開発. 技術論文集 SEI テクニカルビュー, July, 2008.

# 付録A 付録

## A.1 AI<sup>3</sup> ネットワークのリンク品質の測定結果

図 A.1 は、AI<sup>3</sup> の組織図を示す。AI<sup>3</sup> における衛星インターネット環境では複数のアジア地域や国が接続し、地域、国により戻りの経路として利用するネットワークが異なる。

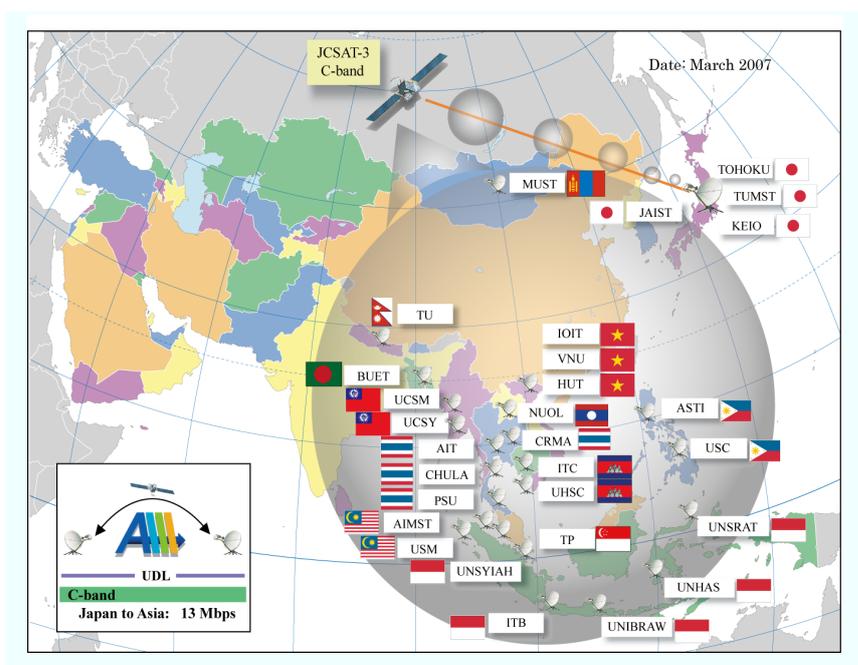


図. A.1: AI<sup>3</sup> の組織図

AI<sup>3</sup> ネットワークにおいて、ping6 の All-Nodes Multicast Address を使用して、64Bytes のペイロードを送信し、UDL, BDL の片方向遅延、パケットロス率を 24 時間計測した。図 A.2 は、UDL の片方向遅延を示す。図 A.3 は、各 AI<sup>3</sup> のパートナーサイトが戻りのパスとして使用する BDL の片方向遅延を示す。表 A.1 には AI<sup>3</sup> のパートナーサイト別に、片方向遅延の平均、標準偏差の値を示す。図 A.4 は、各 AI<sup>3</sup> のパートナーサイトが戻りのパスとして使用する BDL のパケットロス率を示す。表 A.2 には AI<sup>3</sup> のパートナーサイト別に、パケットロス率の平均、標準偏差の値を示す。

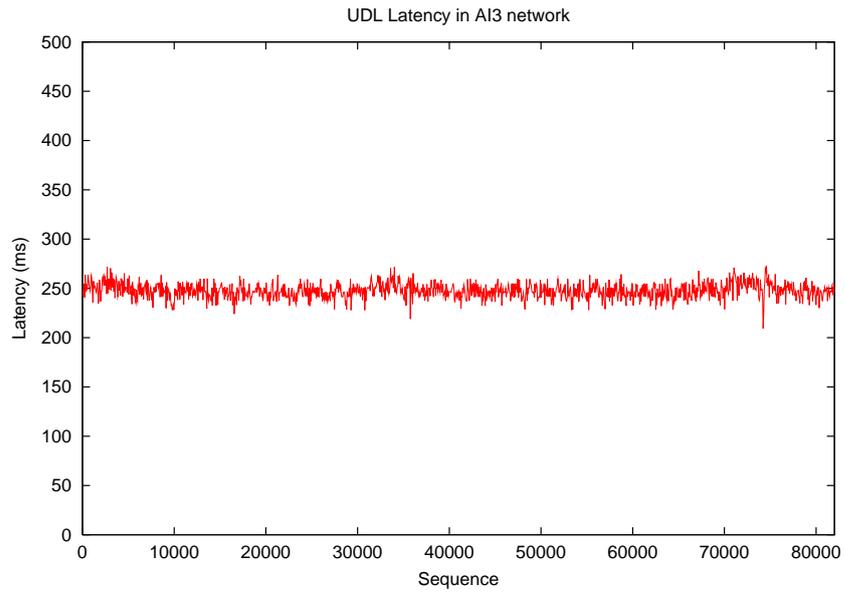


図. A.2: 衛星 UDL における片方向遅延

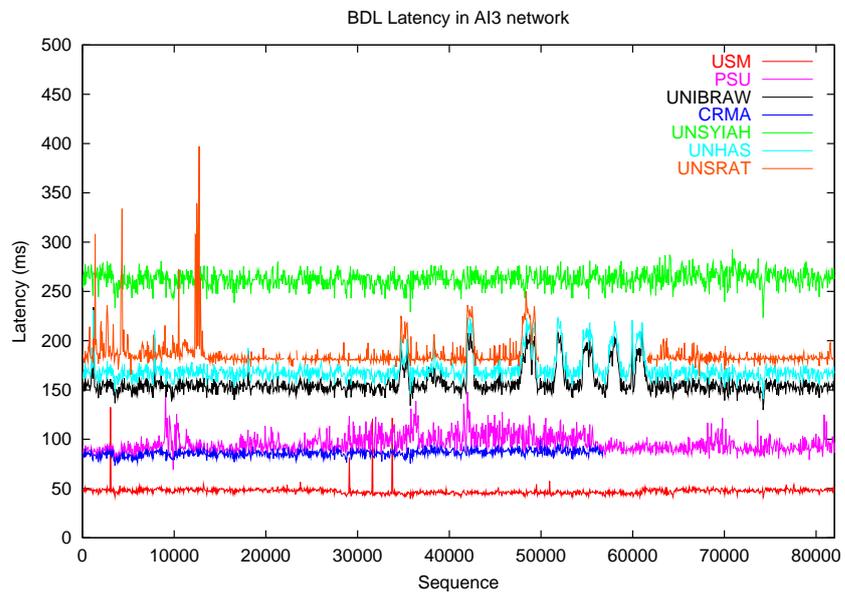


図. A.3: 各パートナーサイトが持つ BDL における片方向遅延

表. A.1: 各パートナーサイトが持つBDLにおける片方向遅延

パートナーサイト	片方向遅延の平均値 (ms)	片方向遅延の標準偏差 (ms)
UNSYIAH	262.6	8.0
UNHAS	170.4	12.1
UNIBRAW	156.9	12.1
USM	47.3	4.3
CRMA	85.9	3.3
UNSRAT	158.9	67.6
PSU	92.8	9.1

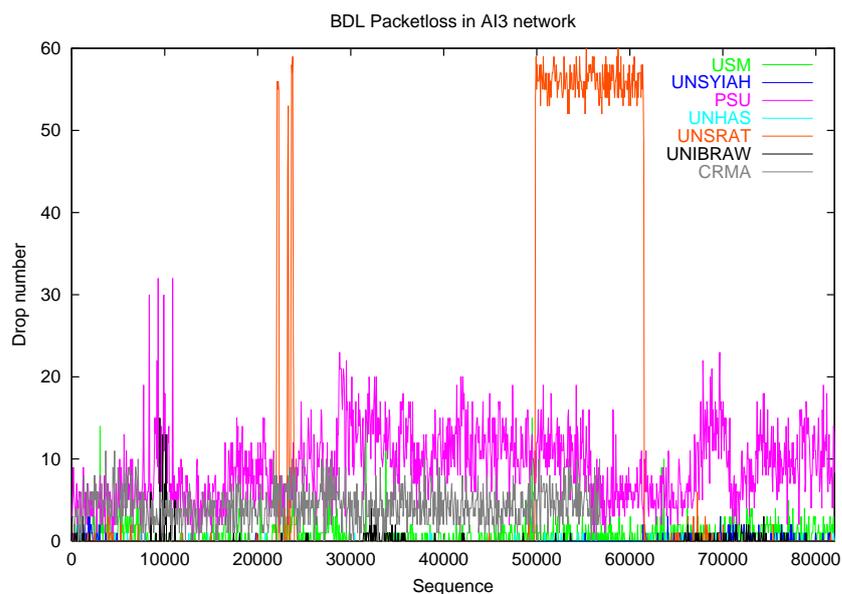


図. A.4: 各パートナーサイトが持つBDLにおけるパケットロス率

表. A.2: 各パートナーサイトが持つBDLにおけるパケットロス率

パートナーサイト	パケットロス率の平均 (%)	パケットロス率の標準偏差 (%)
UNSYIAH	0.1	0.35
UNHAS	0.1	0.2
UNIBRAW	0.2	0.78
USM	1.3	1.35
CRMA	7.1	2.17
UNSRAT	14.0	19.82
PSU	15.0	4.4

## A.2 移動体を対象としたネットワークにおけるリンク品質の測定結果

神奈川県から東京都まで約1時間の電車で移動中に、iPhone を用いて 3G ネットワークの RTT を測定した。

表. A.3: 3G ネットワークにおける RTT の平均値と中央値

ペイロードサイズ (Bytes)	RTT の平均値 (ms)	RTT の中央値 (ms)
64	217.15	89.66
258	215.56	156.18
508	269.85	154.30
1408	689.05	421.09

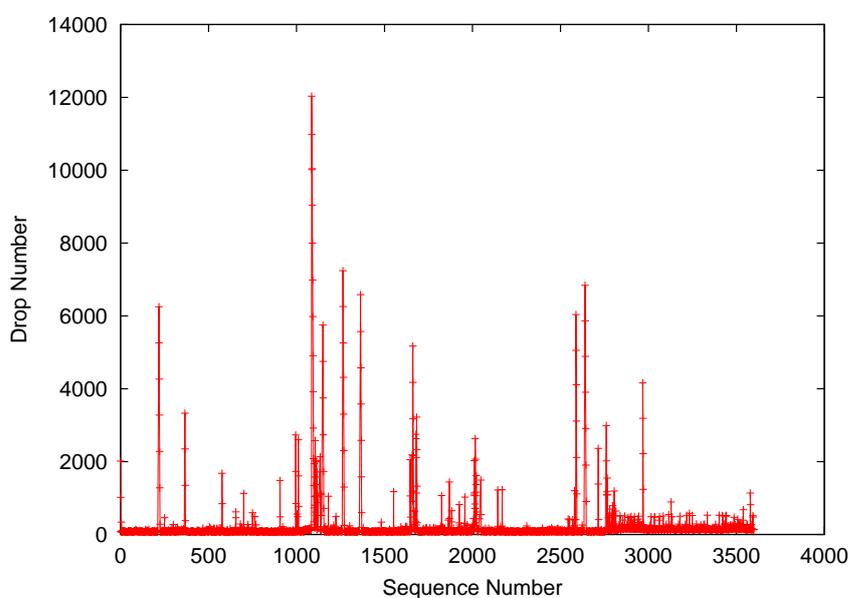


図. A.5: 64Byte のデータ伝送時における RTT

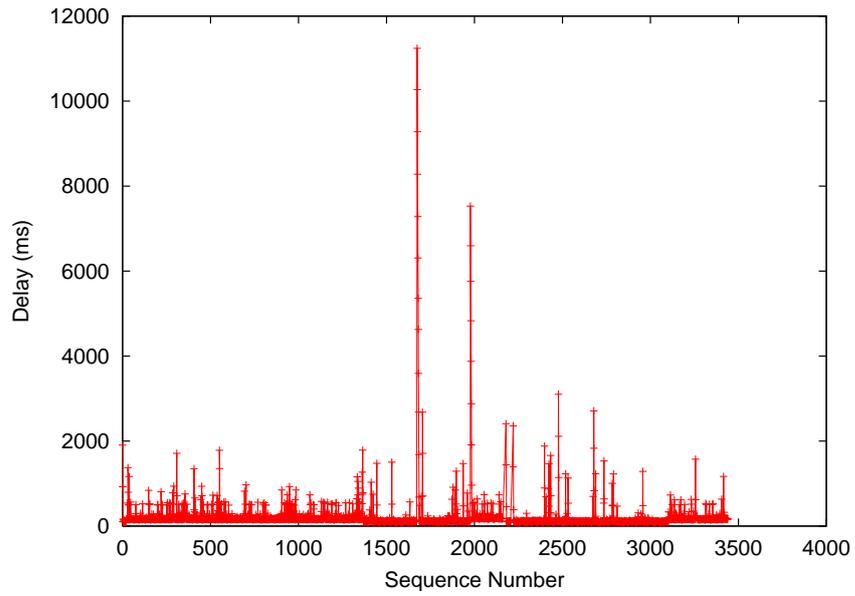


図. A.6: 258Byte のデータ伝送時における RTT

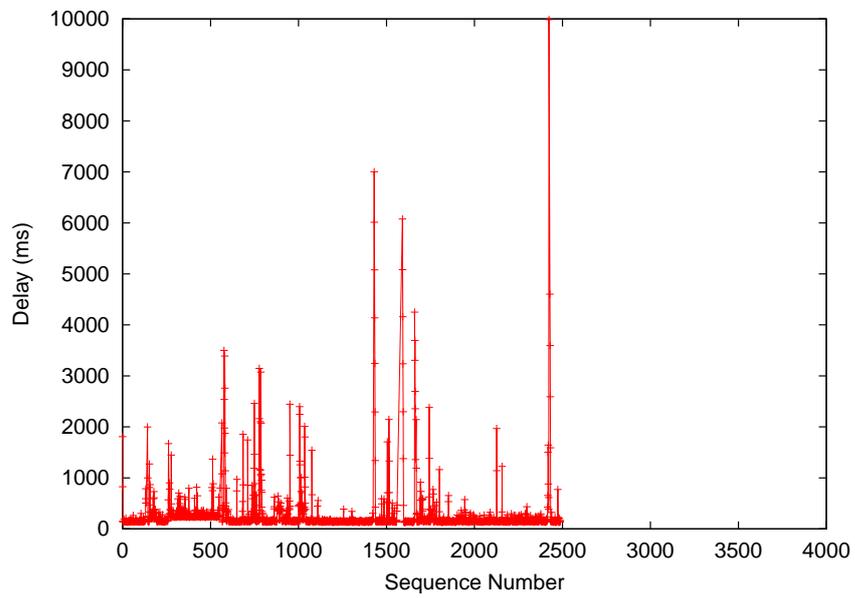


図. A.7: 508Byte のデータ伝送時における RTT

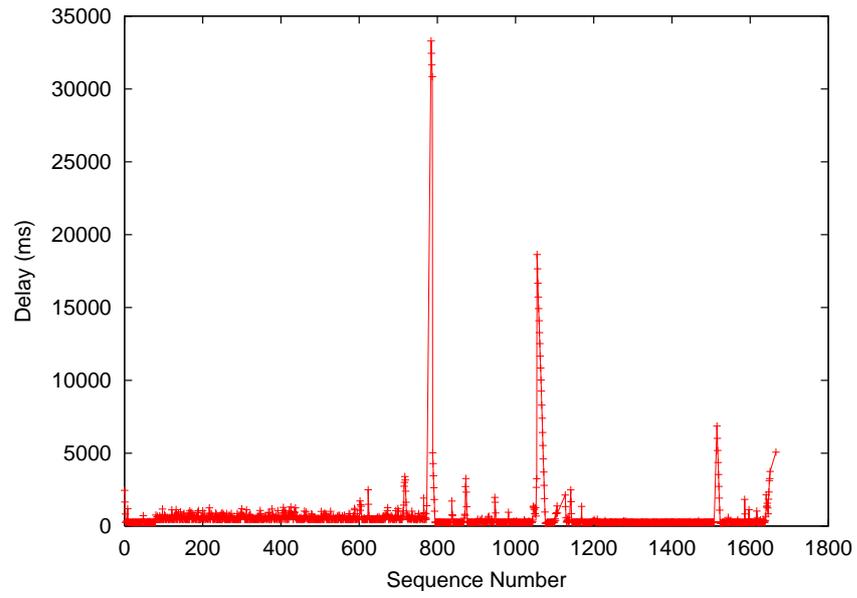


図. A.8: 1408Byte のデータ伝送時における RTT