

修士論文

階層化マルチキャストにおける
受信者間の協調による
複数ストリームの帯域制御方式

指導教官 美濃 導彦 教授

京都大学大学院情報学研究科
修士課程知能情報学専攻

小林 悦史

平成 15 年 2 月 5 日

階層化マルチキャストにおける 受信者間の協調による 複数ストリームの帯域制御方式

小林 悦史

内容梗概

IP ネットワークの広帯域化により、データ量が大きい映像ストリームを IP ネットワークで伝送することが可能となった。そのため、IP ネットワーク経由でのストリームの受信者が増加している。また、提供されるストリームの数も増加している。

IP ネットワークでは経路によって伝送できる帯域が異なるので、受信者のネットワーク上の位置によって、受信できるストリームの帯域が異なる。各受信者が、受信できる帯域にあった分だけのストリームを受信する手法として、階層化マルチキャストがある。しかし、階層化マルチキャストを用いた従来の手法は、受信者が1つのストリームを受信するという前提があり、あるストリームを視聴しながら別のストリームを記録するというような、2つ以上のストリームを同時に受信する場合は想定されていない。

本論文では、従来の階層化マルチキャストを拡張し、各受信者が複数のストリームを同時に受信する場合における、ストリームの受信帯域の制御方式を提案する。各受信者は、映像や音声を高品質で再現したいストリームの順に優先順位を設定する。ある受信者が受信している複数のストリームが、あるリンクにおいて、同時にパケットロスやパケットの遅延を起こした場合、その受信者は、優先順位の低いストリームの帯域を減らす。これによって、その受信者にとって、優先順位が上位であるストリームほど、高い品質の映像や音声を再現できるようにし、その受信者の要求を満たす。

複数の受信者がそれぞれ別のストリームを受信していて、それらのストリームが、あるリンクにおいて、同時にパケットロスやパケットの遅延を起こした場合、それらのストリームを受信している受信者同士が優先順位や受信帯域の情報を交換しあう。交換した情報にしたがって、それぞれの受信者が高品質の映像や音声を視聴できるように、ストリームの帯域を調節する。その上で各受信者において、優先順位の高いストリームをより高品質で再現できることを目指す。

提案した手法を実装し、実験した結果、各受信者の要求に合った帯域が得られることが確認された。

Rate selection of multiple streams by negotiation among receivers for layered multicast

Etsushi KOBAYASHI

Abstract

Layered multicast enables us to transmit video streams over heterogeneous IP networks such as the Internet. In previous work on layered multicast, each receiver was supposed to receive only one stream. In our study, we extended the previous work and proposed a method to receive multiple streams and control their bandwidths by negotiation among receivers.

It often happens that a receiver, which receives multiple streams, cannot view them with the highest quality, owing to bandwidth limitations. In this case, the receiver may view the streams with a lower quality by dropping their bandwidths.

In our method, the receiver sets a priority ordering on each stream and manages receiving bandwidths according to the priority and bandwidth limitations. The higher the priority of a stream, the better the receiver get the stream quality. By our method, if there is only one link, where all the streams pass, and a congestion occurs in this link, the receivers negotiate which bandwidth of the stream they would drop according to the current bandwidths and priorities of the streams.

The proposed method has been validated through experiments where receivers obtained as good streams as the receivers' demands after the described procedure of ordering and negotiation has been applied.

階層化マルチキャストにおける 受信者間の協調による 複数ストリームの帯域制御方式

目次

第1章	はじめに	1
第2章	IP ネットワークでのストリームの伝送	4
2.1	ストリームの伝送	4
2.2	マルチキャスト	5
2.3	階層化マルチキャスト	6
2.3.1	RLM	6
2.3.2	PLM	10
2.4	ストリーム伝送への需要とそれに対する従来手法の問題点	11
第3章	複数ストリームの受信	13
3.1	目的	13
3.2	各受信者が個別に複数のストリームを受信する手法	14
3.2.1	複数ストリームの受信における優先順位の設定	14
3.2.2	受信者の操作	15
3.2.3	システムが受信の際に目指す点	15
3.2.4	優先順位に基づいて行う制御	17
3.3	複数受信者間の帯域制御の必要性	22
第4章	受信者間の協調	24
4.1	受信者間の協調の意義と手順の概要	24
4.2	マルチキャストによる通知手法	26
4.2.1	通知のためのマルチキャストグループへの参加	26
4.2.2	輻輳発生のお知らせ	26
4.2.3	帯域を減少するストリームの決定	27
第5章	実験	29
5.1	実験環境	29
5.2	実験	29

5.2.1	実験 1	29
5.2.2	実験 2	32
5.2.3	実験 3	34
5.3	考察	37
第 6 章	まとめ	39
	謝辞	40
	参考文献	41

第1章 はじめに

IP ネットワークの広帯域化が進んでいる。特に xDSL や FTTH の普及により、企業だけではなく、一般の家庭においても、広帯域な IP ネットワークを安価に利用できるようになってきた。そのため、IP ネットワークの利用者が増加している。

IP ネットワークの広帯域化により、IP ネットワークの利用者が増加しているだけでなく、IP ネットワーク上で伝送できるメディアのデータ量も増えている。従来はテキストデータや静止画データのような、もともとデータ量の小さいメディアや、品質を落としてデータのビットレートを数十 kbps 程度に抑えた音声ストリームや映像ストリームしか扱えなかったが、データ量が数百 kbps ~ 数 Mbps に達する大きさの映像ストリームを IP ネットワーク経由で伝送することができるようになり、そのようなアプリケーションが普及し始めている。特に、映像ストリームのリアルタイム伝送は、計算機の性能の向上もあって、ますます普及が進んでいくと考えられる。従来は少数の利用者のみに対して IP ネットワークでのストリーム伝送を行っていたのが、現在のテレビ放送のような不特定多数の利用者を想定した伝送形態に、すでになりつつある。

ユニキャスト通信で映像や音声のストリームを不特定多数の受信者に伝送しようとした場合、ストリームの受信者の数が増加すると受信者ごとに独立して帯域が必要になり、拡張性がない。受信者の数が増加しても、伝送に必要な帯域が増加しないようにするための手法として、マルチキャストがある。マルチキャストでは、受信者の数が増えても、送信者が直接送信するパケットの数は増えないので、帯域が節約できる。映像や音声のストリームを不特定多数に伝送する機会が増えるにつれ、このマルチキャストに対する期待が高まっている。

IP ネットワーク上の各ルータを結ぶ区間(リンク)では、物理的な帯域が固定されているため、そこを伝送できるトラフィックの量には限界がある。伝送できる量を超えるトラフィックが流れると、そのリンクで輻輳が発生する。輻輳が発生すると、ストリームを構成するパケットが受信者に到達しなかったり、到達の遅れが発生する。パケットロスやパケットの遅延は、受信される映像や音声の品質の低下につながる。そのため、ストリームを伝送する際は、経路上のリンクの帯域で輻輳を起こさないように制御する必要がある。

しかし、伝送できる帯域はリンクによって異なるので、受信者が受信できる

ストリームの帯域は、異なる受信者間では同じであるとは限らない。ストリームの送信者が、送信するストリームの帯域を1つに固定してマルチキャストで伝送した場合、受信できる帯域がストリームの帯域よりも小さければ、ストリームを受信できない。逆に、受信できる帯域が小さい受信者が受信できるように、映像や音声の品質を落とすことにより帯域を減らしてストリームを送信すると、別の受信者は帯域に余裕があるにもかかわらず、高い品質の映像や音声を受信することができない。

このような、複数の受信者間で互いに使える帯域の異なる環境において、各受信者が受信できる帯域の分のストリームを受信するための手法の一つとして、受信者主導の階層化マルチキャスト (RLM[1],PLM[2]) がある。階層化マルチキャストでは、送信者は1つのストリームを複数の階層に分けて送信する。各受信者は受信できる帯域にあった分だけの階層を受信し、それらの階層から、映像や音声を再現する。このため、送信者は受信者が受信できる帯域の差を考慮する必要がなく、各受信者は受信できる帯域に見合う品質の映像や音声を受信できる。

IP ネットワーク上で利用できる帯域が大きくなるにつれ、受信者の数が増加するだけでなく、提供される映像コンテンツの数も増加している。現在のテレビ放送では、チャンネル数の増加にともない、複数の番組を同時に受信したいという要求が高まっている。その要求の下で、2画面で2つの番組を同時に視聴したり、1つの番組を録画しながら別の番組を見ろといったことがよく行われている。このようなことと同様に、IP ネットワーク上で提供される映像コンテンツの数が増加すると、1受信者が複数のストリームを同時に受信したいという要求が生まれることが考えられる。

複数のストリームを同時に受信すると、あるリンクにおいて複数のストリームにパケットロスやパケットの遅延が発生する可能性がある。このような場合、輻輳による映像や音声の品質低下を防ぐために、パケットロスやパケットの遅延を起こしているストリームのうちのいずれかの帯域を減らす必要がある。RLM や PLM には、各受信者は1つのストリームを受信するという前提があり、2つ以上のストリームを受信する場合は想定されていない。そのため、RLM や PLM では、どのストリームの帯域を減らすかを決定する仕組みがなく、帯域を減らすストリームは場面によって変わる上に、全く受信ができないストリームがある可能性がある。

しかし、現在のテレビ放送のように、コンテンツを不特定多数の受信者に提供しようとする場合、各受信者に高品質の映像や音声を提供すると同時に、受信できる帯域が同程度の受信者間では、均等な品質の映像や音声を提供できるように努めるべきである。そのため、複数のストリームがパケットロスやパケットの遅延を起こした場合は、それらのストリームを受信している受信者同士が情報を交換しあい、どのストリームの帯域を調節すれば、受信できる帯域が同程度の受信者間で均等な品質が得られるようになるのかを決定する仕組みが望まれる。

本論文では、IP ネットワークにおいて、受信できる帯域が異なる複数の受信者がそれぞれ複数の映像ストリームを受信する場合に、各受信者において、再現される映像や音声の品質を受信できる帯域の範囲内で向上させることを目指す。次に、経路上のリンクで輻輳が発生することを抑える。そして、受信できる帯域が同程度の受信者では、均等な品質の映像や音声を受信できるようにすることを目指す。そのために、従来の階層化マルチキャストのアルゴリズムでは想定されていなかった、各受信者がユーザの要求に基づき、異なる受信者間で協調することにより、複数のストリームを受信するための帯域制御方式を提案する。

本論文の構成は以下の通りである。第2章で、IP ネットワークでストリームを伝送する際に用いられてきた手法について述べる。第3章で、受信者が複数の映像ストリームを受信する手法について提案する。第4章で、第3章で述べた手法を、複数の受信者間で協調するように拡張する。第5章で実験を行い、第6章で結論を述べる。

第2章 IP ネットワークでのストリームの伝送

本論文では、IP(Internet Protocol) に基づいた通信が行われる IP ネットワークにおいて、映像データや音声データを伝送する手法を提案する。

本章では、IP ネットワークにおいてストリームを伝送するための基本技術と、伝送時の問題を解決するために提案されてきた手法を紹介する。

2.1 ストリームの伝送

ストリームの伝送は、以下のようにして行われる。

- 送信者側は、伝送したい映像データや音声データを符号化する。
- 送信者側は、符号化した映像データや音声データをストリームとして伝送する。
- 受信者側は、伝送されてきたストリームを受信する。
- 受信者側は、受信したストリームを復号化し、映像や音声を再現する。

ストリームを不特定多数の受信者に対して IP ネットワークで伝送する際、考えるべき点は以下の通りである。

- 送信される映像や音声をリアルタイムに視聴する場合は、ストリームの伝送途中でパケットロスやパケットの遅延が発生すると、受信する映像や音声の品質が低下する。したがって、パケットロスの発生やパケットの遅延を抑える必要がある。
- もし、映像と音声を別々のストリームにして伝送する場合は、受信者においてそれらの同期をとる必要がある。
- インターネットのように、ストリーム以外のトラフィックが流れている環境では、ストリーム以外のトラフィックによるパケットロスやパケットの遅延の影響も考慮する必要がある。

パケットロスやパケットの遅延を抑えるための手段の一つとして、経路上のルータにおける QoS(Quality of Service) 制御がある。しかし、インターネット上には、さまざまなトラフィックが伝送されており、それらのトラフィックを全体として管理するのは困難である。そのため、現在のインターネットでは、ルータにおいて QoS 制御が行われていない。本論文で考える IP ネットワーク上のルータでも、現在のインターネットと同様に、QoS 制御が行われていないものとする。

2.2 マルチキャスト

従来、IP ネットワークにおけるストリームの伝送では、データの送信者と受信者が1対1で通信を行うユニキャストが主に用いられてきた。受信者が多数存在する環境でユニキャストを適用する場合、送信者は受信者の数だけデータを複製し、データをそれぞれの受信者に送信する。

ユニキャストによるストリームの伝送の様子を図 2.1 に示す。図中、「Sender」がストリームの送信者であり、「Receiver」がストリームの受信者である。ユニキャストで伝送される、ストリームを構成するパケットの個数は、図中の矢印の数に比例する。

ユニキャストによる伝送では、受信者の数の増加に比例して、送信者が直接送信するパケットの数が増加する。送信できる帯域は有限であるので、ユニキャストで複数の受信者にデータを送信しようとした場合、許容できる受信者の数に限界が生じてしまう。

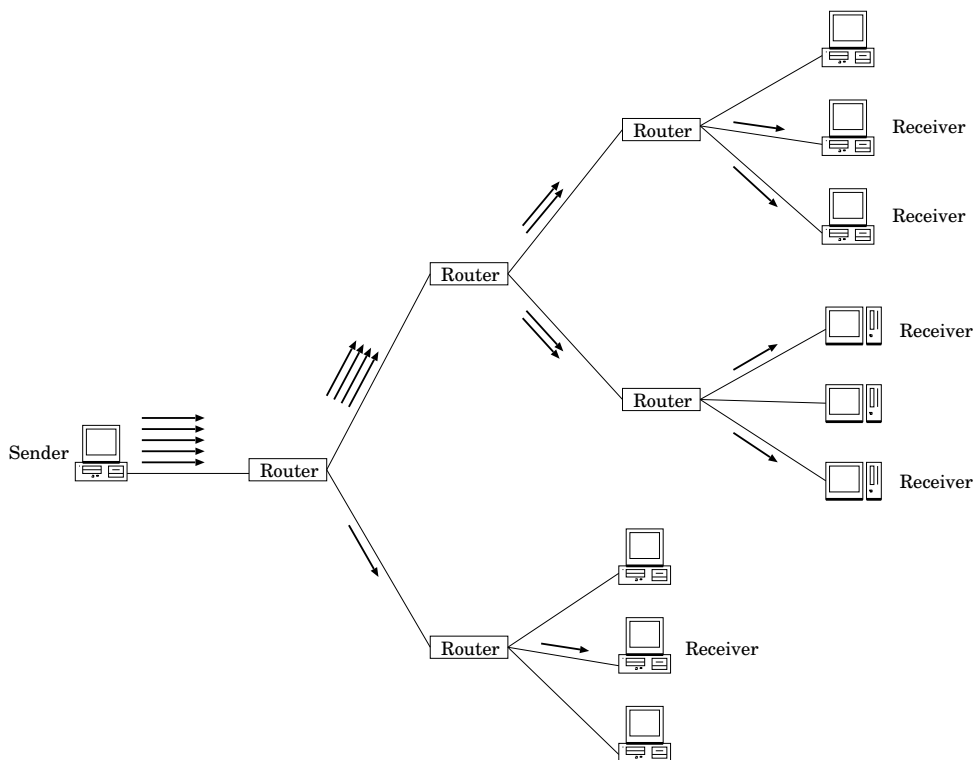


図 2.1: ユニキャストによるストリームの伝送

第 1 章で述べたように、広帯域な IP ネットワークの普及に従い、ストリーム

の受信者が増加すると考えられる。多数の受信者にストリームを送信できるようにするためには、ユニキャストは適切な手法ではない。

ユニキャストに対して、1送信者が複数の受信者に同じデータを効率的に伝送するための手法として、マルチキャストという手法がある。IP ネットワークにおけるマルチキャストの基本動作は、以下の通りである。

- 送信者は、あるマルチキャストグループ宛てにデータを送信する。
- 受信者は、データが送信されているマルチキャストグループに参加することで、そのデータが受信できるようになる。
- どの受信者がマルチキャストグループに参加しているのかは、送信者ではなく、経路上のルータが管理し、受信者が存在する経路にのみデータを伝送する。

ユニキャストでは、送信者は受信者の数だけデータを複製し、それぞれにおいてデータを送信する必要があった。しかし、マルチキャストでは、受信者の数にかかわらず、送信者は1つのマルチキャストグループ宛てにデータを送信するだけで全ての受信者に伝送することができる。複数の受信者が存在する場合は、データの複製はすべて経路の分岐点上のルータによって行われる。このため、複数の受信者が下流に存在する伝送経路上のリンクでは、ユニキャストの場合と比較して、データの伝送に必要な帯域が節約できる。

マルチキャストによるストリームの伝送の様子を図 2.2 に示す。

2.3 階層化マルチキャスト

2.3.1 RLM

受信者の数が増加しても、マルチキャストで伝送をすることにより、ストリームを伝送する際のリンクにおける帯域の増加を抑えることが可能である。しかし、送信者から単一の伝送帯域で各受信者にマルチキャストでストリームを送信することは、各受信者が受信できる帯域を効率的に利用していることにはならない。なぜならば、ストリームを受信できる帯域が最小である受信者に合わせた帯域でストリームを伝送した場合、受信できる帯域の大きい受信者が十分に帯域を使用できず、再現される映像や音声の品質向上の余地が残されるからである。各受信者間で受信できる帯域に大きく差があるとき、受信できる帯域がストリームの帯域よりも小さい受信者は、ストリームを受信できない。したがって、全ての受信者が受信できるようにするには、受信できる帯域が最小で

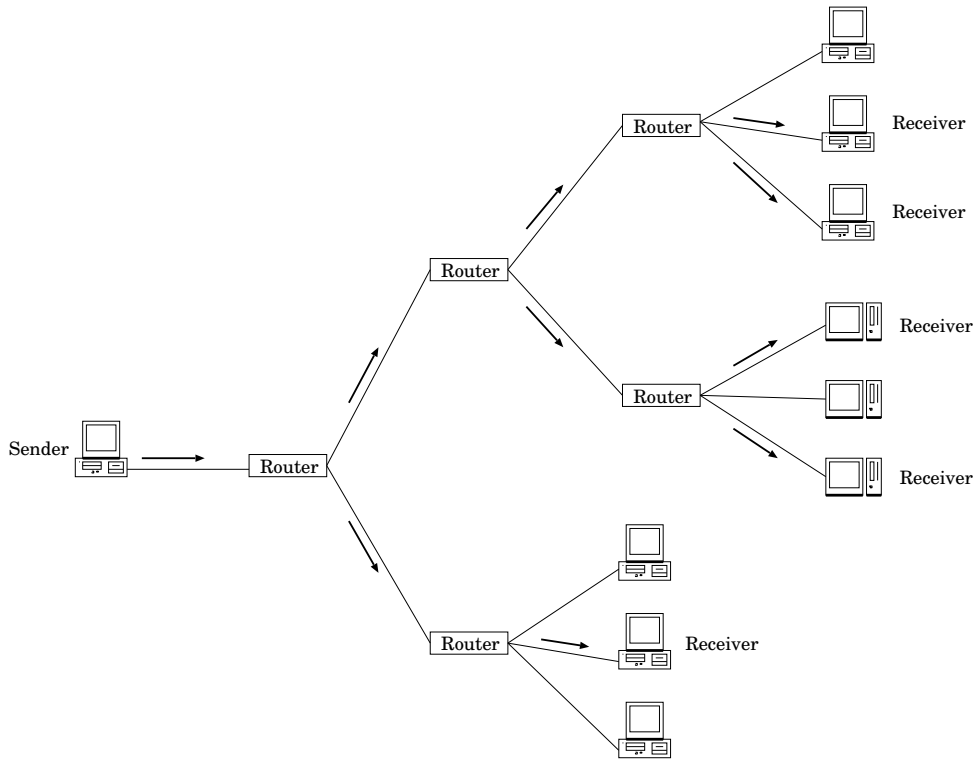


図 2.2: マルチキャストによるストリームの伝送

ある受信者に合わせる必要がある。

この問題に対する解決策の1つとして、受信できる帯域が同程度である受信者ごとに1つのマルチキャストグループを設け、帯域の異なるマルチキャストグループに対し、個々に独立したストリームをマルチキャストで伝送する方法がある。しかし、受信者が存在するマルチキャストグループの数だけ送信者が別々にストリームを生成し、それらを別々に送信する必要がある。そのため、1つのマルチキャストグループに伝送する場合に対して、受信できる帯域が異なる複数の受信者が存在するリンクにおける、ストリームの伝送に利用する帯域が増加する。さらに、グループごとに別々の符号化を行わなければならないため、送信者における符号化にかかる負荷が増加する。

送信者における伝送のための帯域を増加させずに、受信できる帯域の異なる複数の受信者に伝送する手法として、RLM[1]がある。RLMでは、送信者は1つのストリームを複数の階層に分割して、各階層を別のマルチキャストグループ宛てに送信する。各受信者は、この複数に分割された階層のうち、下位の階層から受信できる帯域の分だけの階層数だけを受信し、復号化する。受信した

階層数が大きいほど、再現される映像や音声の品質は向上するが、受信に必要な帯域も大きくなる。受信者は映像や音声の品質を向上するために、一定間隔で受信階層数を増やそうとする。しかし、受信階層数を増やした結果、パケットロスが発生した場合は、受信階層数を元に戻す。

RLMによるストリームの伝送を図2.3に示す。図では、ストリームを「Layer 1」、「Layer 2」、「Layer 3」の3つの階層に分割して送信している。図中の線の太さがリンクの帯域の大きさに対応しており、各受信者は受信できる帯域の分だけの階層を受信している。

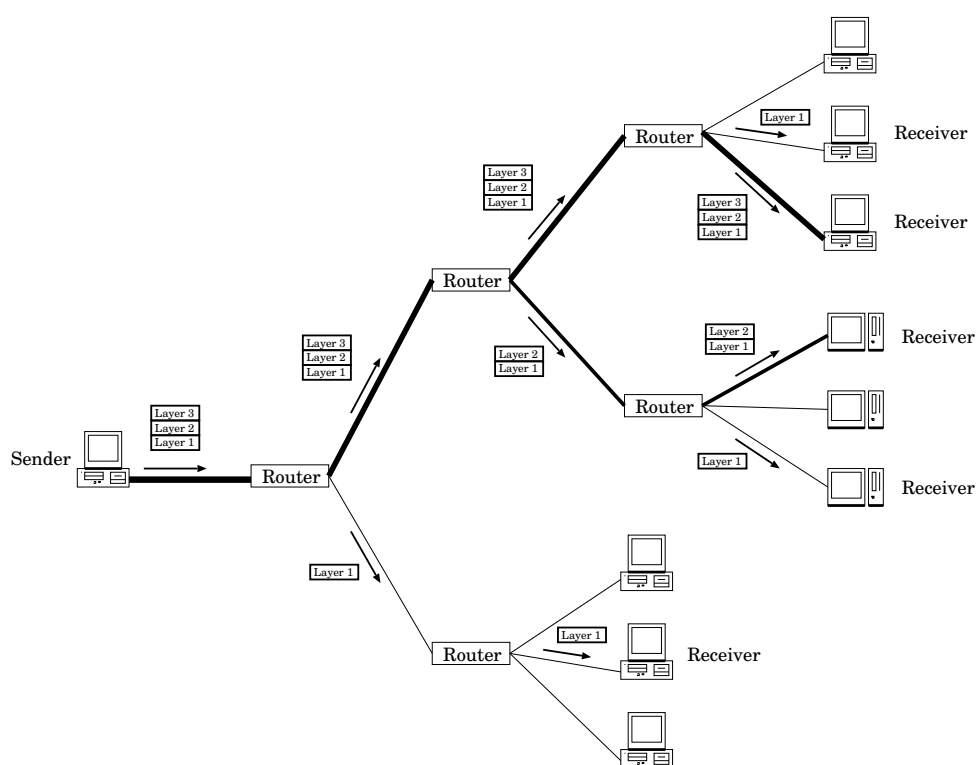


図 2.3: RLM によるストリームの伝送

RLMを利用することによって、受信できる帯域が異なる受信者が混在している環境でも、それぞれの受信者が、受信できる帯域にあった分の階層だけを受信することができる。送信者は、受信者の環境を考慮する必要がなく、映像に対してただ1通りの符号化を行い、その符号化によって得られたストリームを階層に分けて伝送すればよい。

RLMでは、受信階層数を増加させることによって生じるパケットロスによっ

ではじめて、受信できる帯域にあった階層数を確認する。しかし、伝送途中にパケットロスやパケットの遅延が発生すると、再現される映像や音声の品質が低下するだけでなく、その経路における他のトラフィックにも影響を及ぼしてしまう。したがって、もしも受信者が新たな階層を増加させることによるパケットロスやパケットの遅延の発生を予想できるのならば、受信階層数を増加すべきではない。

またRLMでは、各受信者が別々に階層の増減を繰り返す。ある受信者が受信しているストリームの階層を増やし、そのストリームが伝送途中のリンクでパケットロスやパケットの遅延を起こした場合、同じストリームを、パケットロスやパケットの遅延が起こったリンクを経由して受信している別の受信者にも、その影響が及んでしまう。

例えば図2.4で、送信者 S_1 からのストリームを受信者 R_1 と R_2 がRLMで受信しているとする。そして、各リンクにおいて伝送できる帯域が、以下の通りであるとする。

- S_1 とRouter間のリンクで伝送できる帯域は、ストリームのLayer 1の帯域とLayer 2の帯域の合計分である。
- Routerと R_1 間のリンクで伝送できる帯域は、ストリームのLayer 1の帯域とLayer 2の帯域とLayer 3の帯域の合計分である。
- Routerと R_2 間のリンクで伝送できる帯域は、ストリームのLayer 1の帯域の分である。

このとき、 R_1 がLayer 3の受信を試みると、 S_1 とRouter間でパケットロスやパケットの遅延が発生するが、この影響は R_1 だけでなく R_2 にも及ぶ。

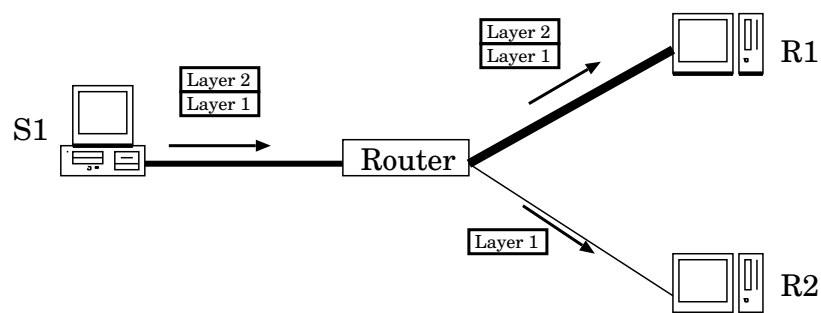


図 2.4: RLM の問題点の例

2.3.2 PLM

RLMでは、新たな階層を受信することによって帯域が増加し、それによってパケットロスやパケットの遅延が生じる可能性があった。これを避けるために、新たな階層を受信を試みることを抑え、受信側で受信できる帯域を推定して受信する階層を決定する手法が考えられる。このような手法として、PLM[2]がある。

PLMにおける送信者の動作は、RLMと同じである。PLMにおける受信者の動作は、次の通りである。

- 受信者は、受信したストリームから、Packet Pair[3],[4]を用いて、ストリームが伝送される経路の帯域 PP を推定する。
- 受信者は、推定した帯域 PP と、現在受信している階層の帯域の合計 B とを比較して、次の処理を行う。
 - もし、 $PP < B$ ならば、 $PP > B$ となるまで受信階層数を減らす。
 - もし、 $PP \geq B$ ならば、 $B < PP$ の範囲内で、受信階層数を最大まで増加させる。

送信者から受信者へ至る経路上のリンクの中で、伝送できるトラフィックの帯域が最も小さいリンクのことを「ボトルネックリンク」と呼ぶ。Packet Pairで推定されるのは、ボトルネックリンクの帯域である。

Packet Pairでは、送信者から、パケット長が s であるパケットを2つ送信する。2つのパケットの送信時刻をそれぞれ t_0^0 、 t_0^1 ($t_0^0 < t_0^1$) とし、それらのパケットが受信者に到達した時刻を順に t_1^0 、 t_1^1 とすると、これらの関係は、ボトルネックリンクの帯域 b_l を用いて、以下のように求められる。

$$t_1^1 - t_1^0 = \max\left(\frac{s}{b_l}, t_0^1 - t_0^0\right)$$

送信者において2つのパケットをごく短い間隔で送信した場合、 $\frac{s}{b_l} > t_0^1 - t_0^0$ となるので、 b_l は以下のように求められる。

$$b_l = \frac{s}{t_1^1 - t_1^0}$$

PLMでは、RLMとは違って、これ以上受信帯域を上げたらボトルネックリンクの帯域を超える場合は、一時的に帯域を増加させる操作を行わない。また、送信者から見て、ボトルネックリンクよりも下流にある受信者同士では、Packet Pairによる推定値がほぼ同じとなる。したがって、階層数の増加や減少が同時

に行われる傾向になり、RLMで生じる、ある受信者が階層を増やしたことで発生するパケットロスやパケットの遅延の影響を別の受信者が受ける可能性が低くなる。文献[2]による検証では、PLMはパケットロスを起こさずに、RLMと同様に受信階層数を最大化している。

しかし、PLMにおいて推定した経路の帯域には誤差がある場合がある。特に、経路上に他のトラフィックが流れている場合、誤差が生じる可能性が高い。誤差が生じると、受信できる帯域を超える受信帯域でストリームを受信しようとしてパケットロスやパケットの遅延が生じたり、逆にまだ余裕があるのに受信帯域が小さく、再現される映像や音声の品質が低くなるといった問題が発生する。たとえ推定が正しかったとしても、ネットワーク上を流れるトラフィックは時間とともに変動するので、推定した値の通りにストリームが受信できるとは限らない。実際に受信できる帯域が推定値よりも小さい場合は、推定値の誤差が生じた場合と同じ問題が発生する可能性がある。このように、PLMもRLMと同様に、パケットロスやパケットの遅延を全く起こさないようにすることはできない。

2.4 ストリーム伝送への需要とそれに対する従来手法の問題点

2.3節で、階層化マルチキャストの従来手法であるRLMやPLMについて述べた。これらの手法は、1つのストリームを複数の階層に分割して送信し、各受信者が階層に分割された1つのストリームを階層を選択しながら受信することを前提とした手法である。

しかし、第1章で述べたように、今後、1受信者で複数のストリームを受信する需要が高まると考えられる。需要の例としては、個人があるストリームを記録しながら別のストリームを視聴するという需要や、1つの家庭で、数人の家族がそれぞれ別々のストリームを別々のモニタで視聴するという需要があげられる。受信者が受信できる帯域は有限であるので、階層化マルチキャストを用いて複数のストリームを受信する場合、受信するストリームの階層数によっては、ストリームの帯域の合計が、その受信者が受信できる帯域を超えてしまう可能性がある。

本章で述べたRLMやPLMは各受信者が1つのストリームを受信する場合の手法である。これらの手法では、複数のストリームの帯域の合計がその受信者で受信できる帯域を超え、パケットロスやパケットの遅延が発生した場合、そ

れぞれのストリームで個別に処理がなされる。どちらの手法も、その受信者がどのストリームの帯域を減らすのかという決定機能を持たない。そのため、受信しているストリームの中で、他のストリームよりも高品質での受信を確保したいストリームがあるという要求を持つ受信者において、その要求に反して、高品質で受信したいストリームの受信帯域が減少してしまう場合がある。この要求に応じるためには、複数のストリームにパケットロスやパケットの遅延が発生したときに、他のストリームよりも高品質での受信を確保したいストリームの受信帯域ではなく、他のストリームの受信帯域を減らす必要がある。第3章で、複数のストリームを受信する際、特定のストリームにおける映像や音声の品質を他のストリームの映像や音声の品質よりも向上するという、受信者の要求を満たすための手法について提案する。

第3章 複数ストリームの受信

本章と第4章で、本論文で提案する手法を述べる。まず本章では、各受信者が個別に、複数のストリームを受信する手法を提案する。次に第4章で、複数の受信者が協調して、複数のストリームを受信する手法を提案する。

3.1 目的

複数の受信者がそれぞれ複数のストリームを受信する際に、各受信者が受信可能な帯域の範囲内で、品質の高い映像や音声を視聴できるようにすることが、本章で提案する手法の目的である。この目的を達成するために、以下のことを行う。

- ストリームが通る経路上のルータで発生する輻輳を抑える。
- 受信者で受信している複数のストリームそれぞれにおいて、再現される映像や音声の品質を、輻輳が発生しない範囲で向上させる。
- ある受信者において、受信している複数のストリームの中で、あるストリームの映像や音声を他のストリームの映像や音声よりも比較的高品質で受信したいという要求がある場合、受信できる帯域の範囲内で、その受信者の要求を満たす。

受信者がより高品質の映像や音声を視聴できるようにするためには、その映像や音声に該当するストリームの受信帯域を大きくする必要がある。しかし、ストリームが経由するリンクにおいて伝送できる帯域を超えてストリームを伝送することは、そのリンクでパケットロスやパケットの遅延が発生する原因となる。あるリンクでパケットロスやパケットの遅延が発生すると、そのリンクを經由しているストリームにおける映像や音声の品質が低下する。したがって、リンクにおいてパケットロスやパケットの遅延を発生させない範囲で、ストリームの受信帯域を最大化する必要がある。

パケットロスやパケットの遅延が発生しているときでも、FEC(Forward Error Correction)を施した伝送を行っていれば、パケットロスやパケットの遅延によって損なわれた再現品質を回復できる場合がある。しかし、あるリンクでパケットロスやパケットの遅延が発生すると、そのリンクを經由するトラフィック全てに影響を及ぼすので、それらを抑える必要がある。このため、本論文では、FECによる伝送は行わず、パケットロスやパケットの遅延を抑えることにより、

ストリームから再現される映像や音声の品質を向上させることを目指す。

第2章で述べたように、受信者によっては、その受信者が受信しているストリームの中で、他のストリームに比較して、より高品質の映像や音声を視聴したいストリームが存在する。第2章で紹介した従来手法に対し、本章で提案する手法ではこの要求に応えることを目指す。

3.2 各受信者が個別に複数のストリームを受信する手法

2.1で述べたように、本論文では、経路上のルータでQoS制御が行われていないものとする。この前提で、3.1節で目的を達成するために、以下のような、受信者による制御手法を提案する。

3.2.1 複数ストリームの受信における優先順位の設定

1 受信者が複数のストリームを受信する場合、その受信者が受信できる帯域には限界があるので、すべてのストリームを最高帯域では受信できない場合がある。もし、他のストリームよりも比較的高品質の映像や音声を視聴したいというストリームがあるときは、そのストリームに優先的に帯域を割り当てられるように、各ストリームに優先順位を設定し、その順によりよい品質が得られるようにする。これにより、受信者が優先順位を上位に設定したストリームほど、再現される映像や音声の品質の劣化が抑えられ、そのストリームを比較的高品質で受信したいという受信者の要求に応えられる。その上で、受信しているそれぞれのストリームの帯域を、受信できる帯域の範囲内で最大化し、ストリームから再現される映像や音声の品質が向上することを目指す。

まず、以下のように優先順位を定義する。

- 受信者は、新しいストリームの受信開始時に、そのストリームの優先順位を設定する。
- ストリームの受信中の任意のタイミングで、受信者が優先順位の値を変更することを可能とする。
- 受信者は、より高品質の映像や音声で視聴したいストリームほど、優先順位の値を小さな値に設定する。例えば、ストリーム S^1 とストリーム S^2 の2つを受信していて、 S^1 の映像や音声を S^2 の映像や音声よりも高品質で視聴したい場合は、 S^1 の優先順位を S^2 の優先順位よりも小さな値に設定する。
- 異なるストリームに対して、同じ優先順位をつけても良い。複数のストリー

ムを、同じ品質の映像や音声になるように受信したいときに、それらに同じ優先順位を設定する。

システムは受信者による優先順位の設定を受けて、優先順位が上位である順に、ストリームの帯域が大きく割り当てられるように制御する。

3.2.2 受信者の操作

各受信者は、随時、次のいずれかの操作をするものとする。

- 新たなストリームの受信
- 現在受信しているストリームの優先順位の設定および変更
- 現在受信しているストリームの受信の停止

3.2.3 システムが受信の際に目指す点

システムが受信者の操作に基づいてストリームを受信する際に目指すべき点を、以下に示す。

- ストリームの受信帯域を受信できる帯域の範囲内で上げることで、再現される映像や音声の品質を向上させる。その際、受信者が設定した優先順位が上位であるものから、ストリームの映像や音声の品質を良いものとすることを目指す。
- パケットロスやパケットの遅延を抑える。
- 受信帯域の振動を抑える。

この3点について、それぞれ説明する。

再現される映像や音声の品質の向上 ある受信者がストリーム S^x と S^y を受信しており、その中で S^x の優先順位を S^y の優先順位よりも上位に設定していたとする。このとき、 S^x の受信帯域が S^y の受信帯域よりも大きければ、受信者が設定した優先順位に従ったストリームの帯域を得ることができている。もし、受信者が優先順位を変更するなどをしたために、 S^x の受信帯域が S^y の受信帯域よりも大きくないという状況になった場合は、目的を達成するために、 S^x の受信帯域を S^y の受信帯域よりも大きくすることが必要である。

優先順位が上位である順に、大きな受信帯域が割り当てられている場合でも、再現される映像や音声の品質向上をはかるために、受信できる帯域の範囲内でストリームの受信帯域を上げることに努める。

パケットロスやパケットの遅延の抑制 ストリームの伝送途中でパケットロスやパケットの遅延が生じると、再現される映像や音声の品質が低下する。ストリームにパケットロスやパケットの遅延が発生する原因は、以下の2つが考え

られる。

- ストリームの受信帯域を増加させた
- 他のトラフィックが増加した

ある受信者がストリームの受信帯域を増加させた結果、ストリームの帯域が経由するリンクで伝送できる帯域を超えると、そのストリームにパケットロスやパケットの遅延が生じる。本手法では、2.3.2 で述べた Packet Pair を採用する。これによって経路の帯域を推定できるが、2.3.2 で述べた問題点により、パケットロスやパケットの遅延が生じる可能性は残る。ある受信者が受信している複数のストリームが同じリンクを通過しており、そのリンクでパケットロスやパケットの遅延が発生した場合は、リンク上のストリームすべてにパケットロスやパケットの遅延が及ぶ可能性がある。

また、ストリーム以外のトラフィックが増加したことにより、あるリンクでパケットロスやパケットの遅延が生じた場合も、そのリンクを通るストリームにパケットロスやパケットの遅延が生じる可能性がある。

どちらの場合でも、映像や音声の品質低下の原因となるパケットロスやパケットの遅延を抑えるために、ストリームの受信帯域を減らす。

TCP(Transmission Control Protocol) による伝送では、送信者が送信したパケットに対して、一定時間が経過してもそのパケットの確認応答が受信されなかった場合、送信者は伝送経路で輻輳が発生しているとみなして、送信帯域を減らす。本手法では、受信者においてパケットロスやパケットの遅延が観測されたときに、受信帯域を減らすことにより、TCP による制御と同じく、伝送経路で発生する輻輳を抑える。

受信帯域の振動の抑制 各受信者は、再現される映像や音声の品質を向上させるため、ストリームの受信帯域を増加させるが、そのストリームでパケットロスやパケットの遅延が観測された場合、パケットロスやパケットの遅延を回避するために、そのストリームの受信帯域を元に戻す。これを繰り返すと、受信帯域の増減に関して振動が発生する可能性がある。例えば、次のような状況において振動が発生する。

- ある受信者 R_1 が、 S^1 を優先順位 1 位で、 S^2 を優先順位 2 位で受信しているとする。
- R_1 は階層化マルチキャストを用いてストリームの受信帯域を増減しているとする。 S^1 も S^2 も各階層の帯域が等しく、さらに S^1 と S^2 で、1 階層あた

りの帯域も同じであるとする。

- S^1 の伝送経路で伝送できる帯域が S^1 の 2 階層分で、 S^2 の伝送経路で伝送できる帯域が S^2 の 3 階層分であるとする (図 3.1 の上)。
- 以上の前提で、もし、 S^1 の受信階層数が 2 で、 S^2 の受信階層数が 3 である場合は、 S^1 の受信帯域を増加させようとする (図 3.1 の下)。
- S^1 の受信帯域を増加させると、受信帯域が経路で伝送できる帯域を上回るため、パケットロスやパケットの遅延が発生する。そこで R_1 は、 S^1 の受信帯域を元に戻す (図 3.1 の上)。
- しかし、 S^1 は優先順位が 1 位であるので、 S^1 の受信帯域を元に戻した後に、再び S^1 の受信帯域を増加させようとする (図 3.1 の下)。
- ここでまたパケットロスやパケットの遅延が起こり、 S^1 の受信帯域が元に戻る。
- このような制御が短い周期で繰り返されることによって、 S^1 の受信帯域が振動する。

受信帯域が頻繁に振動すると、再現される映像や音声の品質も頻繁に変動する。映像や音声の品質が頻繁に変動するのは、受信者にとって見苦しいものとなるので、好ましくない [6]。したがって、受信帯域の頻繁な振動を抑えるべきである。

3.2.4 優先順位に基づいて行う制御

受信できる帯域が異なる受信者が存在する環境において効率的な伝送を行うために、本手法では第 2 章で説明した階層化マルチキャストを用いる。ストリームの受信階層数を変化させることによって、そのストリームの受信帯域を調節する。受信ストリームの階層数は、そのストリームの受信者が設定している優先順位と、2.3.2 で述べた、Packet Pair によるボトルネックリンクの帯域の推定値を判断材料として、リアルタイムに、自動的に決定する。この決定の仕方も含めた、受信者が実際に行う動作について述べる。以下では、ある受信者において Packet Pair を用いて推定した、ストリーム S^m が通る経路のボトルネックの帯域を b^m とする。

新たにストリームを受信する場合 まず、ある受信者 R_n があるストリーム S^m を新たに受信するときの操作について説明する。

- はじめに、ストリーム S^m を 1 階層だけ受信する。
- ストリーム S^m の受信を開始した時点から、受信者 R_n がすでに受信して

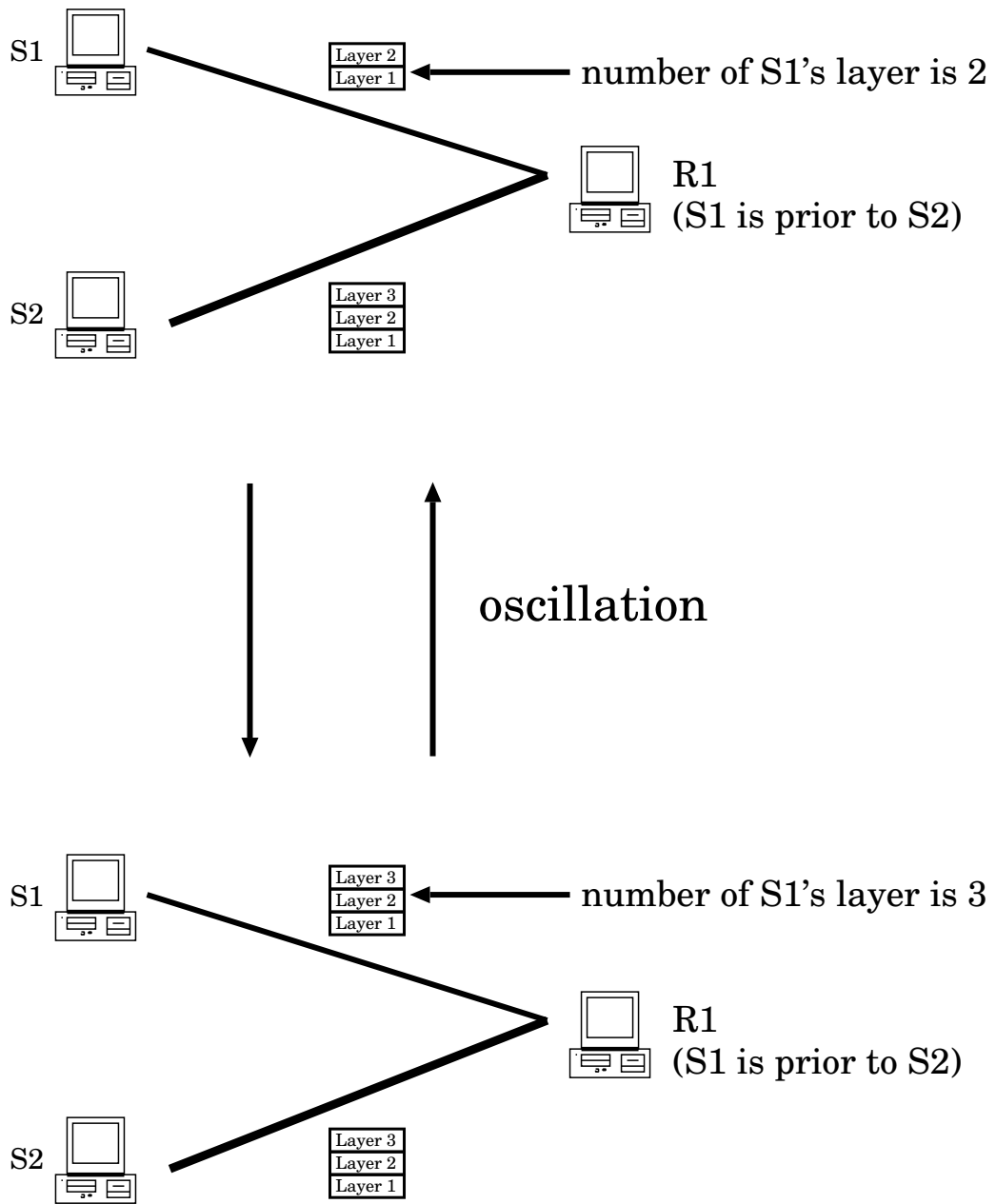


図 3.1: 受信帯域の振動

いる別のストリームにパケットロスやパケットの遅延が観測された場合は、以下の操作を順に、パケットロスやパケットの遅延がなくなるまで繰り返し行う。

- ストリーム S^m と、すでに受信しているストリームのうちパケットロスやパケットの遅延が観測されたストリームの中から、受信階層数が1よりも大きいものをリストアップする。
- リストアップされたストリームの中から、優先順位が最下位であるストリームを選び、その受信階層数を1つ減らす。該当するストリームが複数あるときは、その中で最も受信帯域が大きいストリームを選ぶ。
- もし、上の条件に当てはまるストリームが存在しないときは、 S^m の受信を停止する。

例えば、新たに受信を開始したストリームが S^2 で、リストアップされたストリームの一覧が表 3.1 であった場合、 S^3 の受信階層数を1つ減らす。

表 3.1: リストアップされたストリームの例

ストリーム	優先順位	受信帯域	受信階層数
S^1	1	$2 \times c$	2
S^2	2	$1 \times c$	1
S^3	3	$2 \times c$	2

- S^m の受信を開始してからパケットロスやパケットの遅延が観測されたために、上記の通りに別のストリームの受信階層数を1つ以上減らしたが、それでもパケットロスやパケットの遅延が収まらず、結局 S^m の受信を停止した場合は、階層数を減らしたストリームを元の階層数に戻す。

ストリームの受信を停止する場合 ストリーム S^m の受信を停止する場合は、とくに条件はなく、受信者の操作と同時にストリームの受信を停止する。

ストリームの受信帯域の増加 ある周期 T_0 で次の 1、2 を交互に試みることで、ストリームの受信帯域を上げる。

1. 優先順位が1位であるストリーム S^p の受信階層数を1つ増やす。優先順位が1位であるストリームが複数存在するときは、それらの中から受信帯域が最も小さいストリームを選ぶ。ただし、もし S^p の受信階層数を増やすこ

とで受信帯域が b^p を上回る場合は、この操作は行わずに、そのかわりに 2 を行う。

2. 次の A、B、C、D の操作を順に行う。
 - A ある受信ストリーム S^i において、もしも S^i よりも優先順位が下位であるストリーム S^j も受信しており、かつ S^i の受信帯域が S^j の受信帯域よりも大きくない場合、 S^i の受信階層数を 1 つ増やす。
 - B もし S^i に該当するストリームが複数存在する場合は、その中から受信階層数を増やしてもボトルネックリンクの帯域を上回らないものの中で、優先順位が最も上位であるストリーム S^k をとりあげ、その受信階層数を 1 つ増やす。
 - C もし S^k に該当するストリームが複数存在する場合は、ランダムにどれか 1 つを選び、その受信階層数を 1 つ増やす。
 - D もし S^i に該当するストリームが存在しない場合は、Packet Pair によって推定したボトルネックリンクの帯域から受信帯域を引いた差が最も大きいストリームの受信階層数を 1 つ増やす。

例えば、現在の受信ストリームの状況が表 3.2 のとき、 S^2 は S^3 よりも優先順位が上位であるにもかかわらず受信帯域が小さいので、A の動作により、 S^2 の受信階層数を 1 つ増やす。もし、現在の受信ストリームの状況が表 3.3 のとき、 S^2 及び S^3 が S^i に該当するが、B の動作により、 S^2 の受信階層数を 1 つ増やす。

表 3.2: 操作 A に該当する例

ストリーム	優先順位	受信帯域	受信階層数
S^1	1	$3 \times c$	3
S^2	2	$2 \times c$	2
S^3	3	$3 \times c$	3
S^4	4	$2 \times c$	2

- ただし、1、2いずれの場合でも、もし、「 S^1 の受信帯域を増加させてみたが、 S^1 自身のパケットロスやパケットの遅延により帯域を元に戻した」ということが 2 回続いた場合、以後時間 T_1 の間、 S^1 を帯域を増加するストリームとして選ばない。典型的には [1],[6]、 T_0 の長さは数十秒であるが、 T_1

表 3.3: 操作 B に該当する例

ストリーム	優先順位	受信帯域	受信階層数
S^1	1	$3 \times c$	3
S^2	2	$2 \times c$	2
S^3	3	$2 \times c$	2
S^4	4	$2 \times c$	2

の長さを 1 分～2 分程度とする。この操作により、 T_0 の周期で発生する S^1 の受信帯域の振動を抑え、再現される映像や音声の品質が数十秒単位で変動することを防ぐ。品質が変動したとしても、その周期は T_1 となり、受信者の不満が軽減される。

1 により優先順位が 1 位のストリームの受信帯域を上げることで、このストリームから再現される映像や音声の品質向上を目指す。他のストリームの受信帯域は優先順位が 1 位のストリームの受信帯域より大きくなるので、優先順位が 1 位のストリームの受信帯域を上げることで、他のストリームの受信帯域を上げられる余地を大きくすることができ、それによって受信ストリーム全ての品質を向上することができる。

2 により優先順位が上位である順にストリームの帯域を大きくすることで、受信者の要求を満たす。また、2 で優先順位が上位である順にストリームの帯域が大きな値になっていたとしても、受信ストリームのどれかの受信帯域を上げることで、そのストリームから再現される映像や音声の品質を向上することを目指す。

1、2 のどちらの場合でも、PLM と同じように、Packet Pair を用いてボトルネックリンクの帯域を推定していることで、受信できる帯域に余裕があるのかどうかの判断をしている。そのため、PLM と同じく、推定が正しくてトラフィックの量が時間によらず一定であるという前提におけるパケットロスやパケットの遅延の発生を防いでいる。しかし、推定が間違っていたり、推定の後にトラフィックが増加した場合において、パケットロスやパケットの遅延が発生する可能性が残る。

ストリームの受信帯域の減少 ある受信者で、複数の受信ストリームにパケットロスやパケットの遅延が発生したときは、パケットロスやパケットの遅延が

発生したストリームの中で、現在の受信階層数が1ではないものから、優先順位が最下位であるストリームを選び、そのストリームの受信階層数を1つ減少させる。もしも該当するストリームが複数存在するときは、それらの中から受信帯域が最大であるストリームを選び、そのストリームの受信階層数を1つ減少させる。

パケットロスやパケットの遅延が発生したストリームが1つである場合は、RLMにおける操作と同じようにして、パケットロスやパケットの遅延が発生したストリームの受信階層数を1つ減少させる。

3.3 複数受信者間の帯域制御の必要性

本論文では、複数の受信者がそれぞれ複数のストリームを受信する環境を対象にしている。このような環境下では、たとえば受信者 R_1 が受信しているストリーム S^1 と、受信者 R_2 が受信している S^2 が、伝送される経路の中で同じリンクを経由している可能性がある。このとき、もし R_1 または R_2 が、 S^1 と S^2 のどちらかの受信しているストリームの帯域を増加させたことにより、 S^1 と S^2 の両方が経由しているリンクでパケットロスやパケットの遅延が発生すると、 S^1 と S^2 の両方にその影響が及ぶ。ここで S^1 と S^2 の両方のパケットロスやパケットの遅延を抑えるためには、 S^1 と S^2 の中から、少なくとも一方のストリームの受信帯域を下げる必要がある。

本章においてここまで述べた手法は、1 受信者が複数のストリームの帯域を制御する手法であり、この場合に本章で述べた手法を適用すると、 R_1 と R_2 がそれぞれ別々に動作し、 R_1 は S^1 の受信帯域を、 R_2 は S^2 の受信帯域を、それぞれ下げる。

しかしこの場合は、 S^1 と S^2 の両方ではなく、どちらか一方のストリームのみの受信帯域を下れば、パケットロスやパケットの遅延が抑えられる可能性がある。例えば図 3.2 で、 R_1 が S^1 を 2 階層分、 R_2 が S^2 を 2 階層分受信しており、 R_1 が S^1 の受信階層数を 1 つ増やしたら、2 つの Router 間でパケットロスやパケットの遅延が発生したとする。ここで、従来手法や本章までに述べた手法では、 R_1 と R_2 の両方が受信階層数を減少させるが、 S^1 と S^2 の 1 階層あたりの帯域が同じである場合は、どちらか一方のストリームのみの受信帯域を下れば、パケットロスやパケットの遅延が抑えられる。再現される映像や音声の品質を向上させるためには、帯域を減らすストリームは、必要最低限にしば

るべきである。

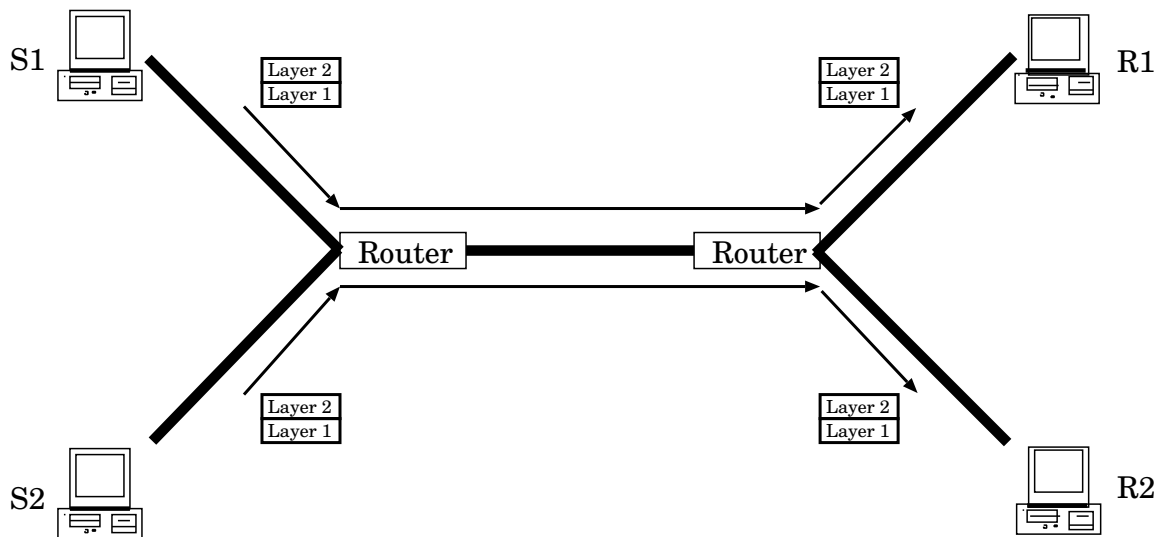


図 3.2: 受信者間の協調による帯域制御の可能性

ここで、 R_1 が設定している S^1 の優先順位と、 R_2 が設定している S^2 の優先順位を比較する。第 1 章で述べたように、複数の受信者にストリームを伝送する場合、受信できる帯域が同程度である受信者には、均等な品質の映像や音声を提供すべきである。それぞれの受信者が複数のストリームを受信しているときは、それぞれの受信者において、優先順位が上位である順にストリームを高品質で受信することを期待しているので、もしも S^1 の優先順位が比較的上位である場合は、 S^2 から再現される映像や音声の品質の低下よりも、 S^1 から再現される映像や音声の品質の低下を避けるべきである。

以上の要求を満たすためには、 R_1 と R_2 が協調して、 S^1 と S^2 の帯域を調整する必要がある。次章で、その手法について提案する。

第4章 受信者間の協調

4.1 受信者間の協調の意義と手順の概要

ある受信者 R_1 がストリーム S^1 の受信帯域を増加させた結果、 S^1 が伝送される経路上のあるリンクでパケットロスやパケットの遅延が発生した場合に、もし異なる受信者 R_2 が受信している別のストリーム S^2 もそのリンクを経由していると、 S^1 と S^2 の両方にパケットロスやパケットの遅延が生じる可能性が高い。このとき、第2章で述べた従来手法や、第3章で述べた手法では、パケットロスを観測した R_1 と R_2 がそれぞれ別々に動作し、 R_1 は S^1 の受信帯域を、 R_2 は S^2 の受信帯域を、それぞれ下げることになる。

もし、 R_1 及び R_2 が、 S^1 と S^2 の両方でパケットロスやパケットの遅延が生じたということを知ることができれば、何らかの基準により、どちらのストリームの受信階層数を減少したほうがよいのかを判断することが可能となる。この判断のもとに、もし R_1 と R_2 が協調をして、 S^1 と S^2 のどちらかのストリームのみの受信帯域を下げた結果、パケットロスやパケットの遅延が収まった場合は、従来手法のような、 R_1 が S^1 の受信帯域を下げ、かつ R_2 が S^2 の受信帯域を下げる場合に対して、受信帯域を下げなかったストリームから再現される映像や音声の受信品質が良いものとなる。

複数の受信者でパケットロスやパケットの遅延が観測された場合に、それらが発生しているストリームの一部の受信帯域を下げれば、パケットロスやパケットの遅延が回避される可能性がある。そこで、受信者間で以下の手順で示すような協調をすることによって、どのストリームの受信帯域を下げるのかを決定する。

- パケットロスやパケットの遅延を観測した受信者は、その状況を他の受信者に通知する。
- パケットロスやパケットの遅延を観測した全ての受信者は、他の受信者からの通知により、どの受信者で同時にパケットロスやパケットの遅延が発生したのかが分かる。
- これらの受信者の中から、何らかの基準に基づいて、受信帯域を減らすストリームを選ぶ。
- これらの受信者のうち、選んだストリームを受信している受信者は、そのストリームの受信帯域を減らす。

一方、この方法では、以下の問題点がある。

- この方法は、同時にパケットロスやパケットの遅延を起こしたストリームが、全て同じリンクを経由していて、そのリンクでパケットロスやパケットの遅延を起こしたとみなしている。もし、異なるリンクを経由していて、同時に偶然にパケットロスやパケットの遅延を起こしたストリームがあった場合、そのストリームの受信帯域を減らしても、他のストリームのパケットロスやパケットの遅延は解消されない。例えば、図 4.1 で、 R_1 が受信している S^1 と、 R_2 が受信している S^2 で同時にパケットロスが発生した場合は、 S^1 と S^2 が同じリンクを経由していないので、一方の受信帯域を減らしても、他方のパケットロスやパケットの遅延は解消されない。

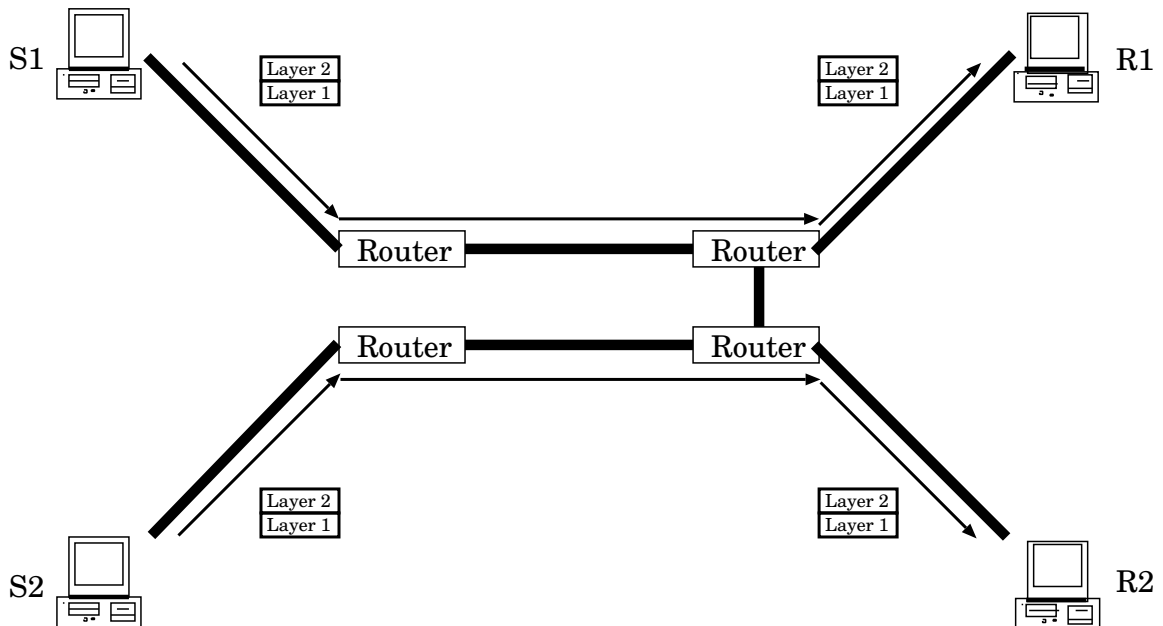


図 4.1: 1つ目の問題点

- 受信帯域を減らすように決定したにもかかわらず、そのストリームの受信帯域を実際に下げない受信者が存在する可能性がある。このような受信者が存在する場合、パケットロスやパケットの遅延が発生しているリンクにおいてストリームの帯域が減らないので、受信者における影響は解消されない。
- 通知そのものの伝送により、経路上の帯域が消費される。
そこで、パケットロスやパケットの遅延がなくなるまで別のストリームの受

信帯域を減らすことを繰り返すことにより、1つ目と2つ目の問題点を回避する。受信帯域を減らしてもパケットロスやパケットの遅延が解消されなかったストリームについては、パケットロスやパケットの遅延が解消されてから、その受信帯域を元に戻す。

3つ目の問題点について、通知そのものの帯域の大きさは、ストリームの帯域の大きさよりも十分小さい。また、ストリームと異なり、通知は継続して伝送されるものではない。そのため、通知のために一時的にネットワークの帯域が消費されたとしても、通知によるストリームの受信帯域の減少が行われれば、複数の受信者で観測されているパケットロスやパケットの遅延を抑えることができる。

4.2 マルチキャストによる通知手法

4.2.1 通知のためのマルチキャストグループへの参加

4.1節で述べたように、例えば、 S^1 を受信している R_1 と S^2 を受信している R_2 との間のような、異なるストリームを受信している受信者の間でも、協調ができるようにする必要がある。そのためには、 R_1 と R_2 が互いの通知を受け取れなければならない。

そこで、全ての受信者が、他の受信者の通知を受けられるようにするために、通知のためのマルチキャストグループを1つ用意する。受信者は、ストリームの受信開始時にこのマルチキャストグループに参加する。自らが通知するときはこのマルチキャストグループ宛てに通知し、他の受信者からの通知はこのマルチキャストグループにを通して受け取ることで、受信者間の協調ができるようにする。

4.2.2 輻輳発生時の通知

ある受信者 R_i において、 R_i が受信しているストリーム S^m にパケットロスやパケットの遅延を観測した場合は、速やかに以下のことを他の受信者に通知する。

- パケットロスやパケットの遅延が発生した受信者 R_i
- パケットロスやパケットの遅延が発生したストリーム S^m
- R_i における S^m の優先順位
- R_i における S^m の受信帯域
- R_i における S^m の受信階層数

4.2.3 帯域を減少するストリームの決定

パケットロスやパケットの遅延が発生した受信者は、4.2.2で説明した、他の受信者の通知を互いに受け取る。各受信者は、自分が送信した通知と受け取った通知をリストアップする。リストの中から、以下の条件の順で受信帯域を減らすストリームを決定する。

1. リスト上で、優先順位を1位に設定している受信者がいないストリームを探す。もしそのようなストリームがある場合、その受信者の中で受信帯域が最大の(ただし、受信階層数が1より大きい)受信者を求める。
2. 条件1に該当するストリームと受信者が見つからないときは、リスト上で、優先順位を1位に設定している受信者と優先順位を2位以下に設定している受信者が混在しているストリームを探す。そのストリームにおいて、優先順位を2位以下に設定しているにもかかわらず、優先順位を1位にしている受信者よりも受信帯域が大きい受信者を求める。
3. 条件1、条件2のどちらにも該当するストリームと受信者が見つからないときは、優先順位を1位に設定している受信者の数が最も少ないストリームを探す。そのストリームにおいて、受信帯域が最も多い(ただし、受信階層数が1より大きい値)受信者を求める。

例えば、 R_1 、 R_2 、 R_3 にパケットロスやパケットの遅延が発生して、これらの受信者が通知し合うことによって得られたリストが表4.1となった場合は、条件1に当てはまるストリームはなく、受信者 R_3 のストリーム S^2 が条件2に当てはまる。したがって各受信者は、受信帯域を減らすストリームとして、 R_3 が受信している S^2 を選ぶ。

表4.1: リストの例

ストリーム	受信者	優先順位	受信帯域	受信階層数
S^1	R_1	1	$2 \times c_1$	2
S^2	R_2	1	$2 \times c_2$	2
S^2	R_3	2	$3 \times c_2$	3
S^3	R_3	1	$3 \times c_3$	3

以上によって、受信帯域を減らす受信者とストリームが求まる。ここで求められた受信者が自分自身である場合、直ちに該当するストリームの受信帯域を減らす。

例えば、表 4.1 の場合は、 R_3 が受信している S^2 を受信帯域の減らす対象として選んでいるので、 R_3 は速やかに S^2 の受信帯域を減らす。

受信帯域を減らした受信者は、以下のことを他の受信者に通知する。

- 受信帯域を減らした受信者 R_i
- 受信帯域を減らしたストリーム S^m

これにより、他の受信者は、表の該当する受信者が受信帯域を減らしたことを確認する。

もし、表の中で自分が受信しているストリームが受信帯域を減らすストリームに該当しているにもかかわらず、その受信者が受信帯域を実際に減らさなかった場合は、パケットロスやパケットの遅延が継続する。このような場合、パケットロスやパケットの遅延が収まっていない他の受信者は、表の中から受信帯域を減らさなかった受信者のレコードを除外して、受信帯域を減らすストリームを決定しなおす。決定にしたがって、受信帯域を減らすように決定した、該当するストリームの受信帯域を減らす。

第5章 実験

第3章及び第4章で提案した手法の有効性を示すために、提案した手法を実装し、実証実験を行った。

5.1 実験環境

第3章及び第4章で提案したストリームの送信及び受信システムを、Linux上で動作するプロセスとして実装した。各計算機をIPネットワークで接続し、従来手法であるPLMと提案手法をそれぞれ用いて、ストリームの送信と受信を行った。マルチキャストルーティングプロトコルにはPIM-SM[7]を、ストリームの送受信にはRTP[8]/UDPを利用した。

ストリームの伝送におけるパラメータを次のように設定した。

- 送信するストリームは、3MbpsのMPEG-2トランスポートストリームである。
- 受信者が受信しているいずれかのストリームの受信階層数の増加を試みる間隔 T_0 を10秒とした。
- 送信するストリームの階層数は5で、各階層の帯域は等しく600Kbpsずつである。
- ストリームの受信帯域の振動を防ぐために、受信帯域を増加しない時間 T_1 は60秒である。

このような条件下で、ネットワークの形態をさまざまに変えて、PLMと提案手法を比較することにより、提案手法の有効性を評価した。

5.2 実験

5.2.1 実験1

まず、第3章で示した複数のストリームの受信手法の有効性を検証するために、図5.1のようなネットワークを構成し、受信者 R_1 がストリーム S^1 、 S^2 、 S^3 の3つを受信する実験を行った。これらのストリーム以外のトラフィックは、流れていない。図中の2つのルータ間で伝送できる帯域は、6Mbpsである。その他のリンクで伝送できる帯域は、3つのストリームの合計帯域である9Mbpsよりも大きい。 R_1 は3つのストリームの受信を同時に開始し、 S^1 、 S^2 、 S^3 の順に高品質の映像や音声を受信したいという要求を持っているとする。

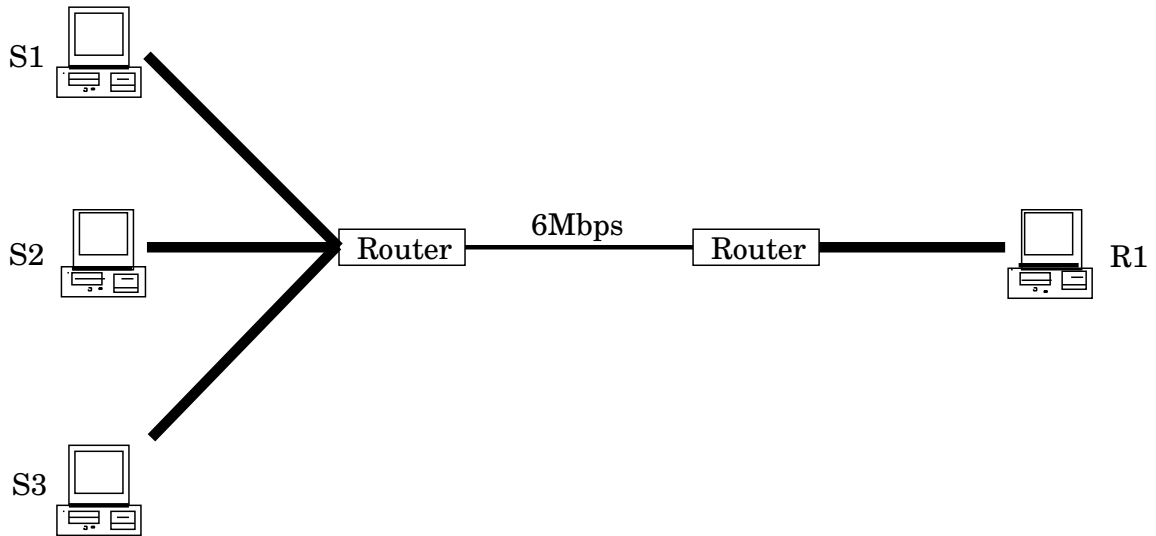


図 5.1: 実験 1 のネットワーク形態

優先順位概念がない従来手法である PLM 及び優先順位概念を導入した提案手法のそれぞれを用いて、3 つのストリームの受信を行った。提案手法では、10 秒ごとに 3 つのストリームのうちどれか 1 つの受信帯域を増加させるので、ある 1 つのストリームの受信帯域を増加させる間隔は、平均して 30 秒である。PLM では各ストリームが別々に受信帯域を増加させるので、 T_0 をストリーム数の 3 だけ乗じ、 $T_0 = 30$ 秒とした。提案手法では、 R_1 の要求に基づき、 S^1 を優先順位 1 位、 S^2 を優先順位 2 位、 S^3 を優先順位 3 位に設定した。

R_1 の受信状況を元にして、PLM と提案手法のそれぞれにおいて、ルータ間で伝送されたストリームの帯域の推移を測定した。その結果のグラフを図 5.2 に示す。上のグラフから順に、 S^1 、 S^2 、 S^3 の伝送帯域の推移である。グラフの点線が PLM での推移、実線が提案手法での推移である。グラフの横軸は時間を示し、 R_1 が受信を開始した時刻を 0 とする。縦軸はそれぞれのストリームの伝送帯域を階層数で示している。

PLM による結果では、 S^2 の帯域が増加できているのに対して、 S^1 及び S^3 の帯域は一時的に増加した場合でも、すぐに元に戻ってしまっている。提案手法では、 R_1 における優先順位が上位であるストリームに、優先的に帯域を割り当てられている。また、優先順位が下位であるストリームの受信階層数を増加させることも、PLM と比較してできている。

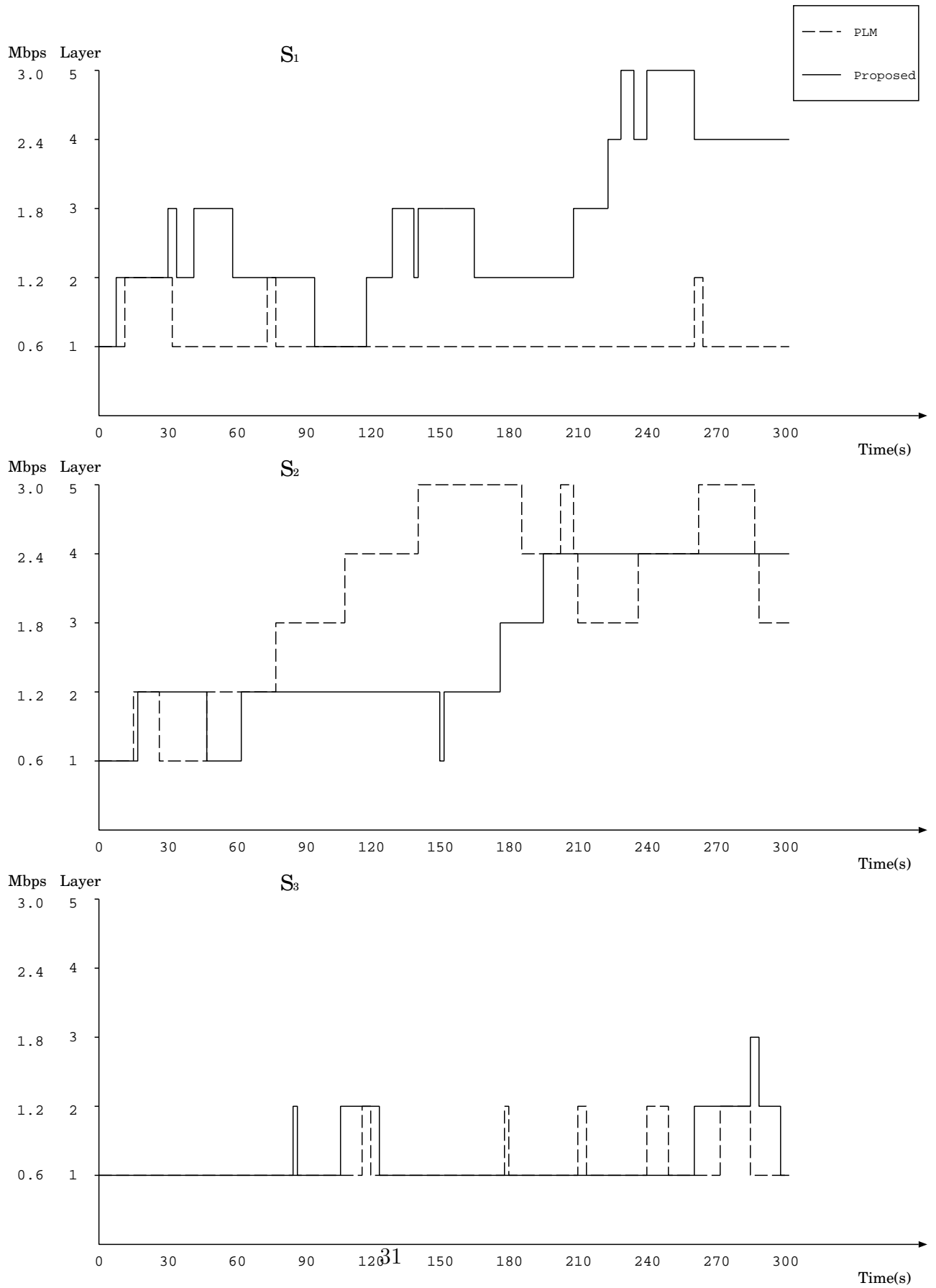


図 5.2: 実験 1

5.2.2 実験 2

次に、第 4 章で示した受信者間の協調による手法の有効性を検証するために、図 5.3 のようなネットワークを構成し、受信者 R_1 がストリーム S^1 を、 R_2 が S^2 を受信する実験を行った。これらのストリーム以外のトラフィックは流れていない。図中の 2 つのルータ間で伝送できる帯域は、3Mbps である。その他のリンクで伝送できる帯域は、2 つのストリームの合計帯域である 6Mbps よりも大きい。 R_1 と R_2 は、同時にストリームの受信を開始した。

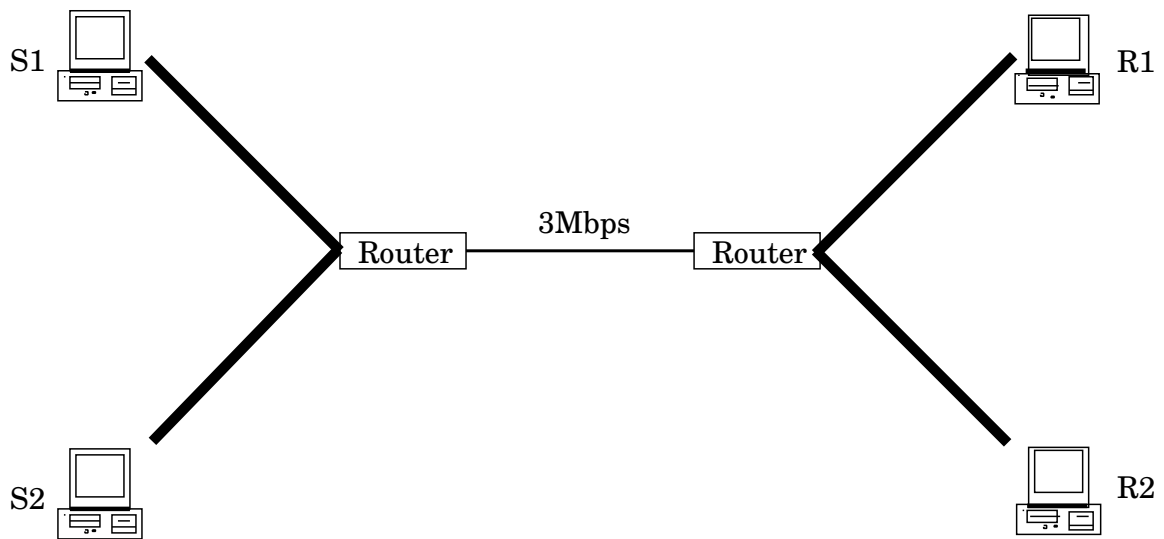


図 5.3: 実験 2 のネットワーク形態

R_1 と R_2 の受信状況を元にして、PLM と提案手法のそれぞれにおいて、ルータ間で伝送されたストリームの帯域の推移を測定した。その結果のグラフを図 5.4 に示す。上のグラフから順に、 S^1 、 S^2 の伝送帯域の推移である。グラフの点線が PLM での推移、実線が提案手法での推移である。

PLM による結果では、 R_2 が受信している S^2 の帯域は増加できているのに対して、 R_1 が受信している S^1 の帯域はほとんど増加できていない。このため、 R_1 と R_2 との間でストリーム受信帯域の差が観測期間を通して開いたままである。提案手法では、一方のみのストリームに帯域が偏って割り当てられることなく、 S^1 、 S^2 と同程度の伝送帯域が得られており、 R_1 と R_2 との間で、受信帯域の差が抑えられている。

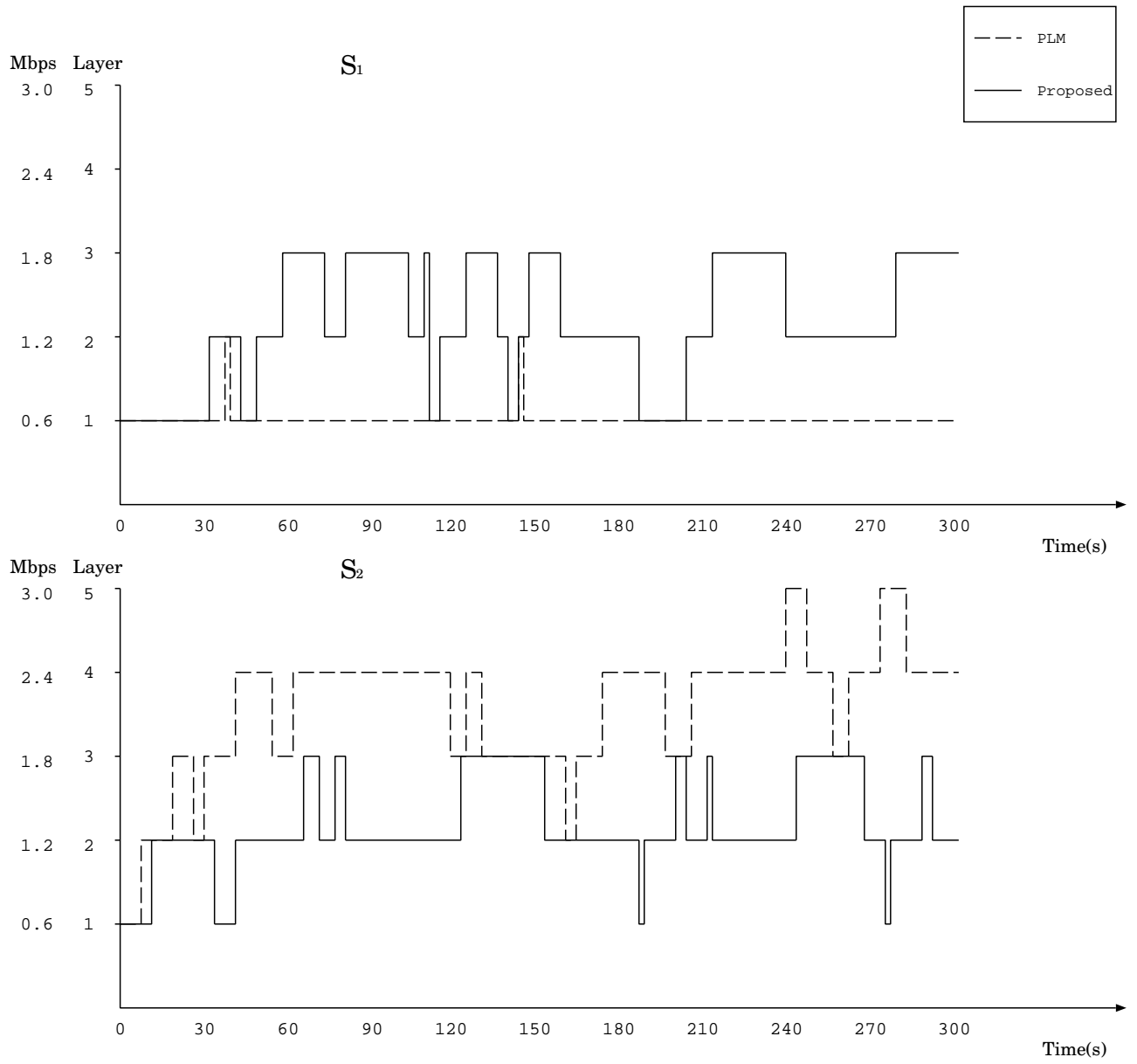


图 5.4: 实验 2

5.2.3 実験 3

最後に、より複雑な伝送形態における本手法の有効性を検証するために、図 5.5 のようなネットワークを構成し、受信者 R_1 、 R_2 、 R_3 がストリーム S^1 、 S^2 、 S^3 を受信する実験を行った。図中の 2 つのルータ間で伝送できる帯域は、7Mbps である。その他のリンクで伝送できる帯域は、3 つのストリームの合計帯域である 9Mbps よりも大きい。

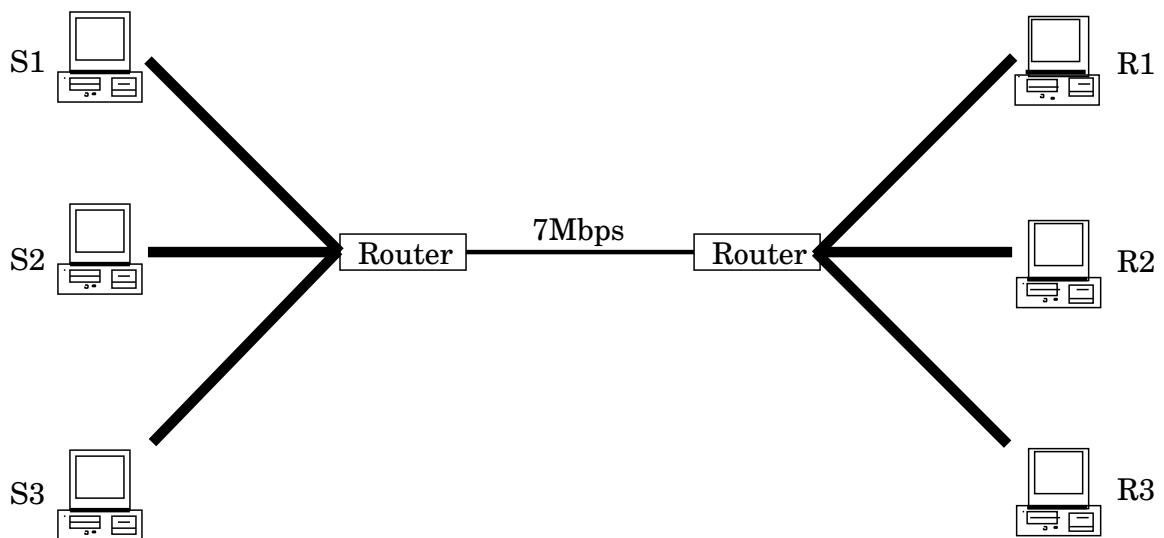


図 5.5: 実験 3 のネットワーク形態

本実験における伝送形態は、以下の通りである。

- R_1 は S^1 と S^2 を受信した。
- R_2 は S^1 と S^2 を受信した。
- R_3 は S^3 のみを受信した。
- 全ての受信者は、同時に受信を開始した。
- 受信開始から 150 秒後に、ルータ間に 2Mbps の別のトラフィックを流した。

さらに、 R_1 は S^1 を S^2 よりも高品質で、 R_2 は S^2 を S^1 よりも高品質で再現したいという要求を、それぞれ持っているとする。提案手法では、この要求にしたがって、以下のように優先順位を設定した。

- R_1 は S^1 を優先順位 1 位で、 S^2 を優先順位 2 位で受信した。
- R_2 は S^2 を優先順位 1 位で、 S^1 を優先順位 2 位で受信した。

提案手法では、 R_1 と R_2 は、10 秒ごとに 2 つのストリームのうちどれか 1 つ

の受信帯域を増加させるので、ある1つのストリームの受信帯域を増加させる間隔は、平均して20秒である。PLMでは各ストリームが別々に受信帯域を増加させるので、 R_1 と R_2 では T_0 をストリーム数の2だけ乗じ、 $T_0 = 20$ 秒とした。 R_3 は1つのストリームを受信するので、PLMと提案手法のいずれの場合でも、 $T_0 = 10$ 秒とした。

R_1 、 R_2 、 R_3 の受信状況を元にして、PLMと提案手法のそれぞれにおいて、ルータ間で伝送されたストリームの帯域の推移を測定した。その結果のグラフを図5.4に示す。上のグラフから順に、 S^1 、 S^2 、 S^3 の伝送帯域の推移である。グラフの点線がPLMでの推移、実線が提案手法での推移である。

R_1 は S^1 を優先順位1位で、 R_2 は S^2 を優先順位1位で受信しているので、 S^1 と S^2 の間で、伝送帯域の差が生じないのが理想である。PLMでは、他のトラフィックが発生した150秒後に、 S^1 の伝送帯域が S^2 や S^3 に対して大きくなっている。このため、 R_2 の要求に応えられておらず、 R_1 と R_3 で受信帯域に差が生じている。提案手法では、全時間を通して、3つのストリームがほぼ同じ帯域で伝送されており、各受信者の要求を満たしている。

また、PLMでは、パケットロスやパケットの遅延が発生したときに、同時に複数のストリームの受信帯域を下げるが見られたが、提案手法では、受信者間で協調を行うことで、1つのストリームのみの受信帯域を下げることで、これにより、受信帯域を下げなかったストリームの再現品質が保たれる。

しかし、提案手法では、 R_1 及び R_2 で、ルータ間の伝送帯域に余裕があるにもかかわらず、優先順位が低いストリームの受信帯域が、優先順位が高いストリームよりも低くなってしまっている場合が見られた。

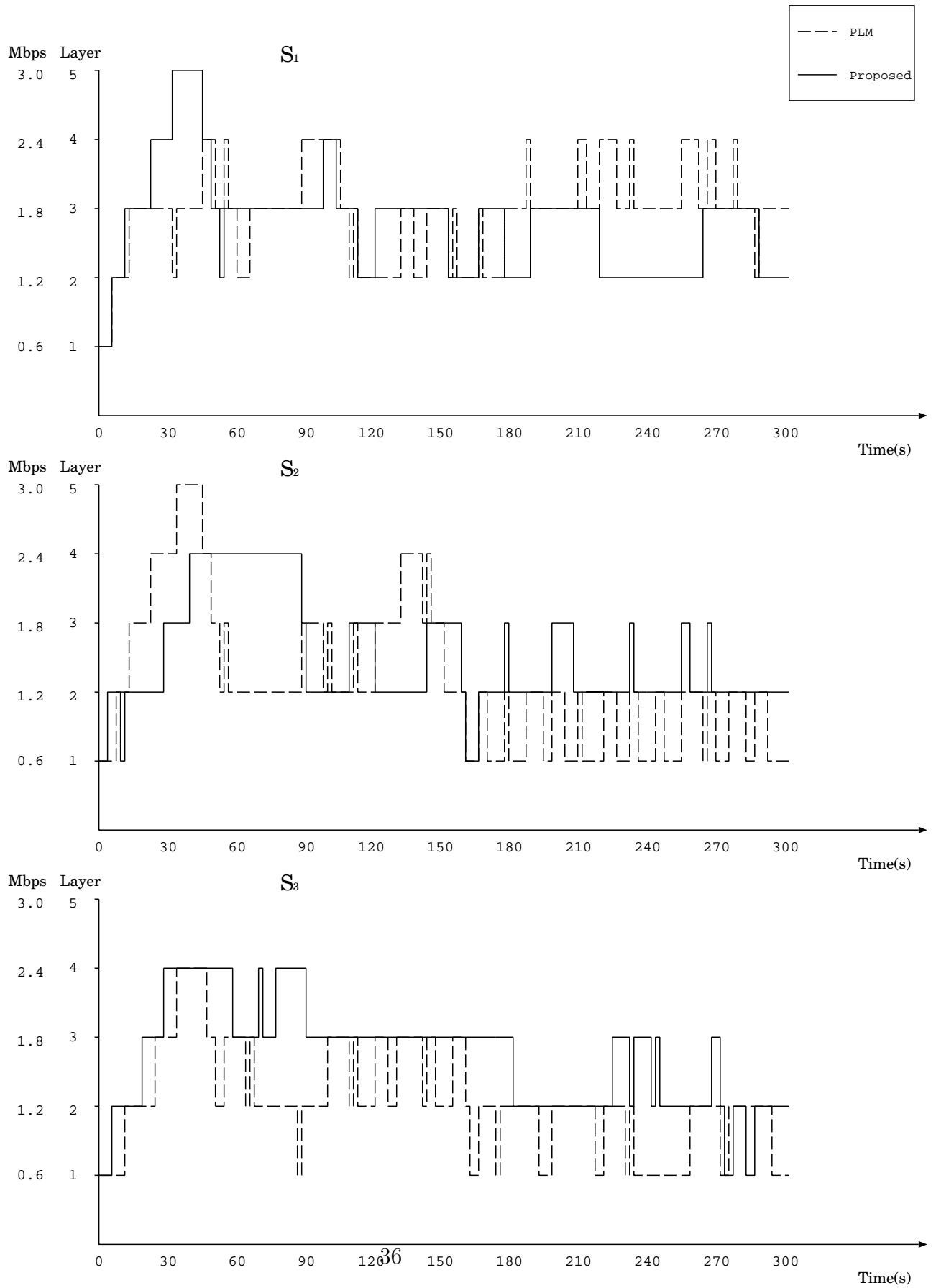


图 5.6: 实验 3

5.3 考察

実験1と実験2から、次のことにより、受信者の要求が満たされることが確認された。

- 優先順位の高いストリームに、より大きな受信帯域を得られることができた。
- 従来手法では受信者間で受信帯域に差が生じていたが、提案手法ではその差を抑えることができた。

実験3から、他のトラフィックが発生している環境でも、受信者の要求が満たされることが確認された。また、パケットロスやパケットの遅延が発生したときに、受信帯域を減らすストリームを最低限に抑えることができた。

しかし実験3において、あるストリームの優先順位を低く設定しているために、受信できる帯域に余裕があるにもかかわらず、そのストリームの受信帯域が上がらなかった、という場合が見られた。このような場合でも、ストリームから再現される映像や音声の品質を向上するためには、受信帯域に余裕があるストリームを受信者に知らせることにより、優先順位変更などの操作を促すような工夫が必要である。

本論文で提案した手法は、IP マルチキャストを用いている。IP マルチキャストの他に、映像や音声をIP ネットワークで伝送する手法の一つとして、CDN(Content Delivery Network)[9]がある。これは、ネットワーク上のさまざまな場所にストリームのキャッシュサーバを設置し、各受信者は最適な位置のキャッシュサーバからストリームを受信する手法である。CDNは、ユーザ管理や課金処理、著作権管理の機能を備えている。

これらの機能を利用しつつ、本手法による帯域制御を行うために、本手法とCDNを組み合わせて、ストリームの伝送を行うことも可能である。例えば、ストリームの送信元から各キャッシュサーバまではCDNを用いて、各キャッシュサーバが本手法を用い、各受信者に伝送するといった利用形態が考えられる。その様子を図5.7に示す。図中、円と円間の太い矢印がユニキャストによるCDNで、円内の細い線がマルチキャストによる本手法を表している。

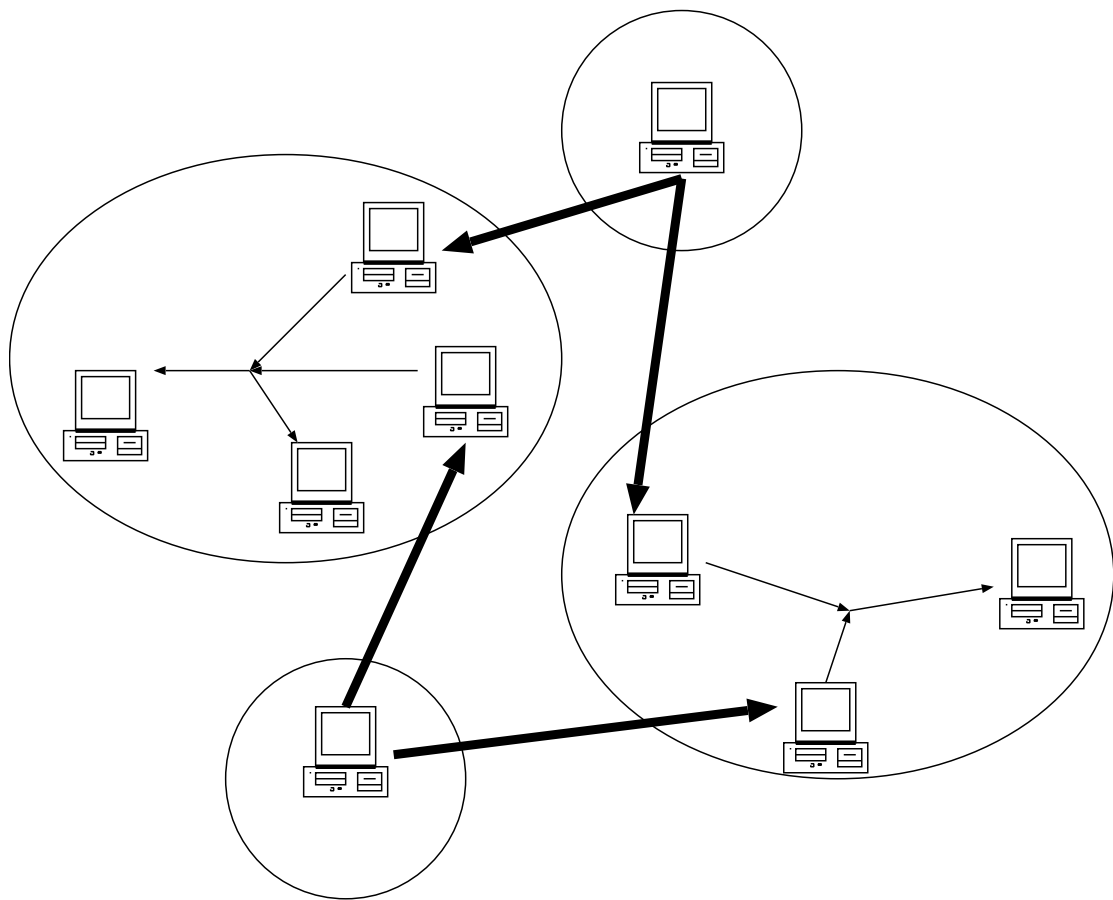


図 5.7: CDN との併用による本手法の利用形態の例

第6章 まとめ

本論文では、従来の階層化マルチキャストを拡張し、各受信者が複数のストリームを同時に受信する場合における、ストリームの受信帯域の制御方式を提案した。

ある受信者において、あるストリームを他のストリームよりも高品質で再現したいという要求があった場合、従来手法ではその要求に応じるための仕組みがなかった。提案手法では、受信ストリームに優先順位を設定し、複数のストリームに帯域を割り当てる際、優先順位が高い順に大きな受信帯域が得られる制御を導入している。これにより、優先順位の高いストリームほど、再現される映像や音声の品質を良くすることができる。

また、受信者間で情報を交換し、帯域を減らすストリームを優先順位に基づいて決定するという協調をすることにより、受信できる帯域が同程度の受信者間で、ストリームの受信帯域のばらつきを抑えるようにした。これにより、受信者間で生じる再現される映像や音声の品質のばらつきも抑えることができる。

本手法の有効性を示すために、いくつかのネットワークトポロジを構成し、実験を行った。その結果、各受信者がより高品質で視聴したいストリームに、より大きな帯域を割り当てることにより、受信者の要求を満たすことができた。また、受信者間で協調することにより、ストリームの受信帯域の減少を最低限にとどめることができたとともに、受信できる帯域が同程度の受信者間で、ストリームの受信帯域のばらつきを抑えることができることを確認した。

今後の課題としては、5.3節で述べた受信者に対する情報提供の強化や、CDNなどの他手法との連携可能性の検討の他、VOD(Video On Demand)における本手法の応用可能性の検討などが挙げられる。

謝辞

本研究を行うにあたり多くの御教示を賜りました美濃導彦教授に深く感謝致します。また、日頃より熱心な御指導と数多くの貴重な助言を頂きました中村素典助教授に心より感謝致します。そして、多くの意見を頂きました角所考助教授、亀田能成助手、八木啓介助手、並びに美濃研究室の皆様には感謝致します。

参考文献

- [1] S. McCanne, V. Jacobson and M. Vetterli, "Receiver-driven layered multicast", Proceeding of ACM SIGCOMM '96, 1996
- [2] A. Legout and E. W. Biersack, "PLM: Fast Convergence for Cumulative Layered Multicast Transmission Schemes", ACM SIGMETRICS '2000, 2000
- [3] S. Keshav., "Congestion Control in Computer Networks", PhD thesis, EECS, University of Berkeley, 1991
- [4] K. Lai, M. Baker, "Nettimer: A Tool for Measuring Bottleneck Link Bandwidth", Proceedings of 3rd USENIX Symposium on Internet Technologies and Systems., 2001
- [5] Masato Kawada, Hiroyuki Morikawa, Tomonori Aoyama, "Cooperative Inter-stream Rate Control Scheme for Layered Multicast", Proceedings of SAINT 2001 Symposium on Applications and the Internet, 2001
- [6] X. Li, S. Paul, M. H. Ammar, "Multi-Session Rate Control for Layered Video Multicast", Multimedia Computing and Networking 1999, 1998
- [7] "Protocol Independent Multicast-Sparse Mode (PIM-SM): Protocol Specification", RFC 2362, 1998
- [8] "RTP: A Transport Protocol for Real-Time Applications", RFC 1889, 1996
- [9] Akamai Technologies, Inc. <http://www.akamai.com/>