



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	フォトリックアグリゲーションによる高速光アクセスネットワークの省電力化・高機能化の研究
Author(s)	妹尾, 由美子
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第12643号
Issue Date	2017-03-23
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k12643
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/65763
Type	doctoral thesis
File Information	Yumiko_Senoo.pdf



博士論文

フォトリックアグリゲーションによる
高速光アクセスネットワークの省電力化・高機能化の研究
2017 年 3 月

北海道大学大学院情報科学研究科

妹尾 由美子

目次

第1章	序論	1
1-1	研究背景	1
1-1-1	ブロードバンドサービスの普及とアクセスシステムの光化	1
1-1-2	PON システムの原理	3
1-1-3	PON システムの標準化動向	4
1-1-4	一般的なアクセスネットワークアーキテクチャ	10
1-2	本研究の意義及び目的	12
1-2-1	将来アクセスネットワークの要求条件	12
1-2-2	アクセスネットワークにおける課題	13
1-2-3	本研究の目的	15
1-3	本論文の構成	17
1-4	参考文献	18
第2章	将来アクセスネットワークアーキテクチャの検討	19
2-1	はじめに	19
2-2	将来アクセスネットワークアーキテクチャの検討	20
2-2-1	設計指針	20
2-2-2	アーキテクチャの候補	22
2-2-3	要求を満たすアクセスネットワークアーキテクチャ	26
2-3	将来トラフィック要求の予測	27
2-3-1	従来のトラフィック予測手法	27
2-3-2	ユーザ毎の平均トラフィックの統計値	28
2-3-3	アクセスネットワークアーキテクチャのモデル化	30
2-3-4	集線リンクにおける時間平均トラフィックの予測	31
2-4	予測トラフィック要求量における高速光アクセスネットワーク構成	35
2-5	本章のまとめ	37
2-6	参考文献	38
第3章	光集線ノード構成技術	40
3-1	はじめに	40
3-2	光集線ノードに求められる条件	41
3-3	光集線ノード構成の検討	43
3-3-1	集線・波長振分機能を実現する構成の検討	43

3-3-2	カバーエリアを確保する構成の検討.....	46
3-3-3	省電力効果を最大化する構成の検討.....	59
3-4	従来構成と提案構成の消費電力比較	60
3-5	本章のまとめ.....	62
3-6	参考文献.....	63
第4章	動的負荷分散技術	65
4-1	はじめに.....	65
4-2	先行研究.....	66
4-3	提案する動的負荷分散技術	67
4-3-1	システム構成.....	67
4-3-2	動的負荷分散制御のシーケンス.....	68
4-3-3	動的負荷分散アルゴリズム.....	69
4-4	動的負荷分散制御の実証検証.....	73
4-5	平均遅延の検証実験	80
4-6	スループット公平化.....	82
4-6-1	スループット公平化の仕組み	82
4-6-2	スループット公平化の実証実験.....	84
4-7	本章のまとめ.....	88
4-8	参考文献.....	89
第5章	高速波長切替技術	91
5-1	はじめに.....	91
5-2	従来の波長切替シーケンス	93
5-3	提案する波長切替シーケンス.....	96
5-4	最大上りスループットを向上するグラント決定手法.....	98
5-5	最大遅延の検証実験	100
5-6	最大上りスループットの検証実験.....	104
5-7	本章のまとめ.....	108
5-8	参考文献.....	109
第6章	結論	111
謝辞	114	
研究業績	115	

第1章 序論

1-1 研究背景

1-1-1 ブロードバンドサービスの普及とアクセスシステムの光化

1970 年、米国のコーニング社から 1 km あたり 20 dB という当時としては画期的な低損失光ファイバが発表され[1]、ほぼそれと時を同じくして AT&T のベル研究所でそれまで困難視されていた GaAs（ガリウムヒ素）半導体レーザの室温連続発振が達成された[2]。以来、光ファイバ通信技術の開発が急速に展開された。当初、GaAs 半導体レーザの発信波長である 0.8 μm 帯の光ファイバ通信システムの実用化が進められた。光ファイバの低損失化が進展するにつれて、ファイバの低損失な波長帯が長波長側の 1.3 μm 帯、さらには 1.5 μm 帯にと移り、それに伴って、InGaAsP（インジウムガリウムヒ素リン）系の長波長帯の半導体レーザの研究が始まった。幸運にも InGaAsP 半導体レーザが信頼性の点で素質の良さに恵まれたこともあって、1980 年代に入ると 1.3 μm 帯や 1.55 μm 帯のシステム開発が本格化し、それらは既に実用化されている。その後、1987 年、活性物質としてエルビウムを光ファイバにドーピングした光ファイバ増幅器が英国のサザンプトン大学より発表された[3]。それまでの中継系は光信号を電気信号に変換して再生増幅した後、光信号に変えるものであった。しかし、光増幅器の出現により、光信号のまま増幅が可能になった。

光ファイバ通信技術は、はじめに電話局と電話局を結ぶ中継伝送技術として発展を遂げた。中継伝送としての光ファイバ通信技術は、長距離化、高速・広帯域化への挑戦であった。1981 年に日本電信電話公社（現 NTT）が、マルチモード光ファイバを用いて世界で初めて伝送距離 2 km の市外電話の光中継通信システムを導入した後、伝送速度、伝送距離は飛躍的に拡大し、現在では 800 Gb/s (10 Gb/s $\times$ 80 波長の波長多重システム) で約 400 km の光ファイバ通信システムが実用に供されている。

一方、ユーザ宅と通信設備センタを 1 対 1 で結ぶアクセスネットワークへの光ファイバ通信の適用においては、光ファイバでなければ提供不可能な高速広帯域サービスか、或いはメタル設備に比べ経済的な構築が可能であることが求められてきた。

高速広帯域サービスについては、ビジネスユーザを対象に GI（グレーデッドインデックス）型光ファイバを用いた映像伝送サービスの提供が 1982 年に開始され、1984 年には 150 Mb/s までの高速データ通信等を提供する高速専用線サービスが、1997 年には、ATM 伝送方式（非同期式）により高速・広帯域通信ニーズに対する ATM 専用サービスの提供が開始された。また、30 km 以下の経済的な近距離デジタル専用サービス、デジタルアクセス 1500 等の専用線サービスが順次開始され、アクセスネットワークにおける光ファイバ通信の適用は、企業内通信ネットワークを中心に利用が広まった。

経済性の観点からは、メタリック設備の経年劣化に伴う設備公開のタイミングに合わせ、電話、ISDN（Integrated Services Digital Network：デジタル総合サービス網）

基本インタフェース、低速専用網等の低速狭帯域系サービスを多重して伝送する新光アクセスシステム（ π システム）が 1988 年から導入され、通信設備センタから大規模集合住宅・オフィスビルまでの地下設備区間の光化が進められた。なお同年、技術の進展により経済化が図られた SM（シングルモード）型光ファイバが、アクセスネットワークにおいても導入されるようになった。

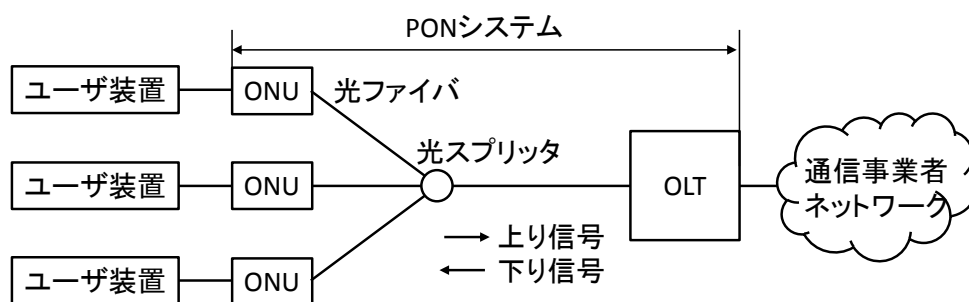
更に 2001 年には、上述のような社会背景の変化と光ファイバや局側インタフェースを複数のユーザで共有することで経済化が可能な PON（Passive Optical Network）システム等の技術の進展により、光加入者回線をアクセスラインとした定額制インターネット向け高速サービス（B フレッツ）の提供が開始された。このように日本では、2001 年に世界に先駆けて FTTH（Fiber To The Home）サービスを開始し、各家庭までの光化を構築した。光アクセスシステムの高速化と経済化に向けた技術開発はその後も精力的に進められ、その後 5 年ほどの間に、1 ユーザあたりのネットワークアクセス環境は約 1,000 倍もの高速・広帯域化が進むことになった。このような FTTH への積極的な取り組みにより、日本における FTTH 契約回線数は 2700 万加入を超え（2015 年 12 月末現在）[4]、日本はブロードバンド先進国になった。

1-1-2 PON システムの原理

PON システムは受動光ネットワーク（Passive Optical Network）システムの略で、1 台の局側装置と複数台のユーザ側装置とが受動（Passive）部品である光スプリッタと光ファイバからなる伝送路を介して接続された、ツリー構造を持つポイント・トゥ・マルチポイント型光アクセスシステムの一形態である。日本では NTT のフレッツ光や KDDI の au ひかり等の FTTH サービスにおける光アクセスシステムとして普及している。欧米でも FTTH サービス提供時の主力システムとして商用導入が積極的に進められ、世界的にユーザ数を拡大している。

PON システムの基本構成を図 1-1 に示す。通信事業者のビルに置かれる装置を OLT（Optical Line Terminal）と呼び、ユーザ宅に置かれる装置を ONU（Optical Network Unit）と呼ぶ。OLT に接続された 1 本の光ファイバは光スプリッタと接続される。光スプリッタは 1 本の光ファイバを複数本の光ファイバに分岐し、分岐した個々の光ファイバはそれぞれ 1 台の ONU に接続される。PON システムでは、OLT から ONU に向かう信号を下り信号、ONU から OLT に向かう信号を上り信号と呼ぶ。下り信号と上り信号はともにパケット或いはセルと呼ばれるかたまりを単位として伝送され、必要に応じて PON システム専用のオーバーヘッドが付加される。

PON システムは、OLT と光スプリッタ間の光ファイバや OLT そのものを複数のユーザで共用するので、ユーザ 1 人当たりのコストが SS（Single Star）型光アクセスシステムに比べて安くなるという利点がある。また伝送路が受動部品のみで構成されているため保守運用が容易であり、光スプリッタの代わりに光スイッチやイーサネットスイッチなどの能動（Active）デバイスを用いて同様のシステムを構成する場合に比べ、保守運用コストを低減することができる。



OLT（Optical line termination）：PON システムの局側装置

ONU（Optical network unite）：PON システムのユーザ側装置

図 1-1 PON システムの基本構成

1-1-3 PON システムの標準化動向

光アクセスシステムの標準化は IEEE (The Institute of Electrical and Electronics Engineers)、および ITU-T (International Telecommunication Union Telecommunication standardization sector)によって進められている。図 1-2 に、IEEE における Ethernet の標準化動向、および、IEEE と ITU-T における PON システムの標準化動向を示す。Ethernet は LAN (Local area network) において最も普及している伝送プロトコルであり、PON システムに先行して標準化が進行している。PON システムの国際標準仕様としては、ITU-T で G. 983 シリーズとして勧告化された B-PON (Broadband-PON) と G. 984 シリーズとして勧告化された G-PON (Gigabit-capable-PON) [5]、G. 987 シリーズとして勧告化された XG-PON (10 Gigabit capable PON) [6]、及び、G. 989 シリーズとして勧告化された NG-PON2 (Next Generation-PON2) [7]がある。加えて、IEEE で 802.3ah として標準化された GE-PON (Gigabit Ethernet-PON) [8]、及び、802.3av として勧告化された 10G-EPON (10 Gigabit-Ethernet PON) [9]がある。

図 1-2 から分かるように、PON システムの標準化は 1997 年の B-PON システムの標準化に始まり、ビットレートの観点においては、Ethernet 標準化から約 7 年遅れて標準化がなされている。日本国内においては、2001 年に B-PON による FTTH サービスが商用導入され、続いて IEEE にて標準化された GE-PON が 2004 年に商用導入されている。現在、日本で導入されている PON システムの大部分は GE-PON となっている。海外においても、中国をはじめとしたアジア各国において、GE-PON システムの導入が進められている。一方、北米およびヨーロッパ各国においては、ITU-T にて標準化された G-PON システムの商用導入が積極的に進められている。表 1-1 に G-PON システム及び GE-PON システムの標準化規格の概要を示す。

G-PON システム及び GE-PON システムでは、OLT から ONU に向かう下り方向通信において、時分割多重 (TDM : Time Division Multiplexing) 技術を用いている。TDM は複数の ONU 向けの信号を、時間的に重ならないように多重化して伝送する技術である。尚、下り信号は、同一の PON につながる全ての ONU へ、同じ信号が光スプリッタで分岐されて転送される。そのため、各 ONU へは自分以外の ONU 宛のデータも転送されるため、各 ONU において自分宛のデータだけを抽出し、それ以外の ONU 宛のデータを廃棄する。一方で、ONU から OLT に向かう上り方向通信においては、時分割多元接続 (TDMA : Time Division Multiple Access) 技術を用いている。上り信号は、光スプリッタにより複数 ONU からの信号が合波されることになる。そこで、ONU のデータ送信タイミングと送信量を制御することにより、伝送路上で衝突することなく多重化されるようにしている。

図 1-3 に GE-PON のレイヤ構造を示す。物理層では、光信号の送受信レベルや波形などを規定している。従来の 1 Gb/s の伝送速度を持つギガビットイーサネットで標準

とされていた 1000BASE-X ファミリーとは別に GE-PON で特徴的なバースト信号の送受信を考慮した 1000BASE-PX 規格が追加された。尚、下り信号は、全く同一のものが放送形式で全 ONU に到達するため、各 ONU は、受信したフレームが自分宛であるかどうかを判断し、受信フレームの取捨選択を行う必要がある。GE-PON ではこの判断を LLID (Logical Link ID) という識別子を用いて行う。LLID は、図 1-4 のようにイーサネットフレームのプリアンブル内に配置される。

データリンク層のマルチポイント MAC (Media Access Control) においては、PON 特有の信号制御方式を記述している。上り信号は光スプリッタで合流するため、各 ONU からの上り信号が合流時に衝突しないように制御する必要がある。GE-PON では OLT が司令塔の役割を務め、各 ONU に対して送信許可を通知することにより、各 ONU からの上り信号を時間的に分離して衝突を回避している。尚、IEEE 802.3ah では各 ONU への上り信号送信許可方法は規定されているが、各 ONU への帯域の割当て方法については規定されていない。各 ONU への帯域割当を行う機能は動的帯域割当 (DBA : Dynamic Bandwidth Allocation) 機能と呼ばれており、通信事業者が、サービスの内容や事業者のポリシーに合わせて自由に実装できるようになっている。

将来光アクセスシステムについては、伝送容量 10 Gbit/s 級の PON システムの標準化が、2010 年までに、IEEE 及び ITU-T でそれぞれ完了している。そして、最先端の光アクセスシステムとして、2015 年に、10 Gbit/s 級の TDM-PON システムをベースに、波長多重 (WDM : Wavelength Division Multiplexing) 技術を導入して伝送容量の拡大とサービス拡張性を強化した 40Gbit/s 級の PON の標準化が、ITU-T で完了した。表 1-2 に、伝送容量 10 Gbit/s 級の次世代 PON システムである 10G-EPON システムと XG-PON システム、そして伝送容量 40 Gbit/s 級の PON システムである NG-PON2 の標準化規格の概要を示す。

NG-PON2 のシステムイメージを図 1-5 に示す。従来の PON システムでは、主にマス (一般) ユーザを収容することを想定していたが、NG-PON2 では、マスマスユーザに加えて、ビジネスユーザ及びモバイルユーザも同一の光アクセスシステムにより収容することを想定する。NG-PON2 の基本システムは、TDM 技術に加えて WDM 技術を用いた TDM と WDM のハイブリッド PON (WDM/TDM-PON : Wavelength Division Multiplexing / Time Division Multiplexing-PON) システムであるが、モバイルなど厳しい伝送遅延条件が要求されるサービスについてはオプションとして規定されている Point-to-Point (PtP) 型の WDM (PtP WDM) オーバレイの適用が期待される。また、NG-PON2 においては、WDM 技術の導入に伴い、NG-PON2 では、波長毎に異なる ONU を製造・管理する必要をなくすために、ONU の送信器及び受信器に波長可変機能を持たせることを必須としている。NG-PON2 は、1 波長あたり上り 2.5 Gbit/s、下り 10 Gbit/s の非対称構成、及び、上り下り共に 10 Gbit/s の対称構成に対して、上り

下り信号にそれぞれ 4 波長を割当てた 40 Gbit/s 級の伝送容量を基本構成として標準化された。

NG-PON2 の波長配置は、図 1-6 のように規定されている。既存の PON システムや 10 Gbit/s 級 PON との共存を図るため、NG-PON2 向けの波長帯は、WDM/TDM-PON 用に上り 1524～1544 nm 及び下り 1596～1603 nm が規定されている。NG-PON2 の TC (Transmission Convergence) 層仕様である G.989.3 は、ITU-T で勧告化された 10 Gbit/s 級 PON システムの TC 層仕様 G.987.3 をベースに、波長の割当てプロトコルを補完している。具体的には、波長 ID の規定法、ONU 初期登録時の波長割当て法、サービス運用中の ONU の波長切替シーケンスなどが補完されている。このように、サービス運用中の ONU の波長可変機能により割当て波長を切り替えることで、NG-PON2 システムの高機能化が期待される。

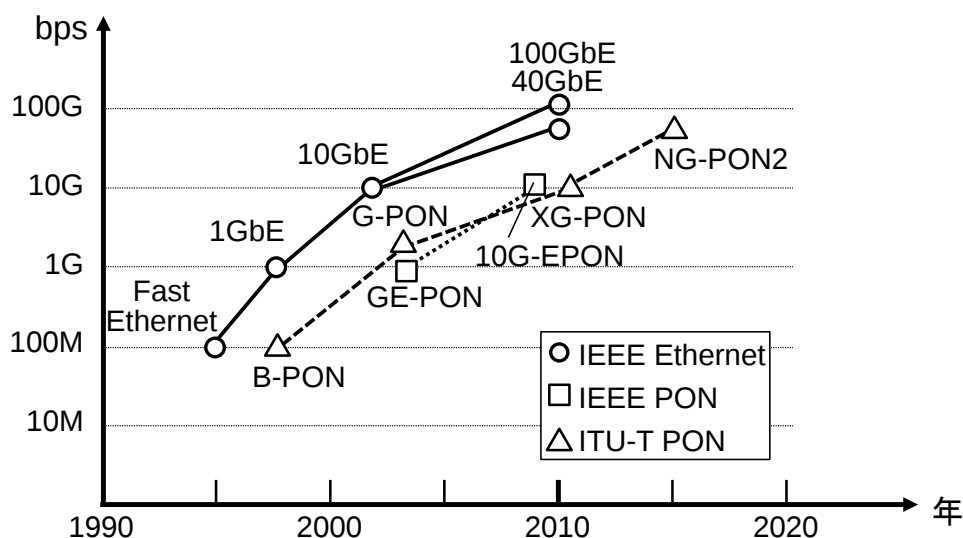


図 1-2 IEEE と ITU-T における Ethernet 及び PON システムの標準化動向

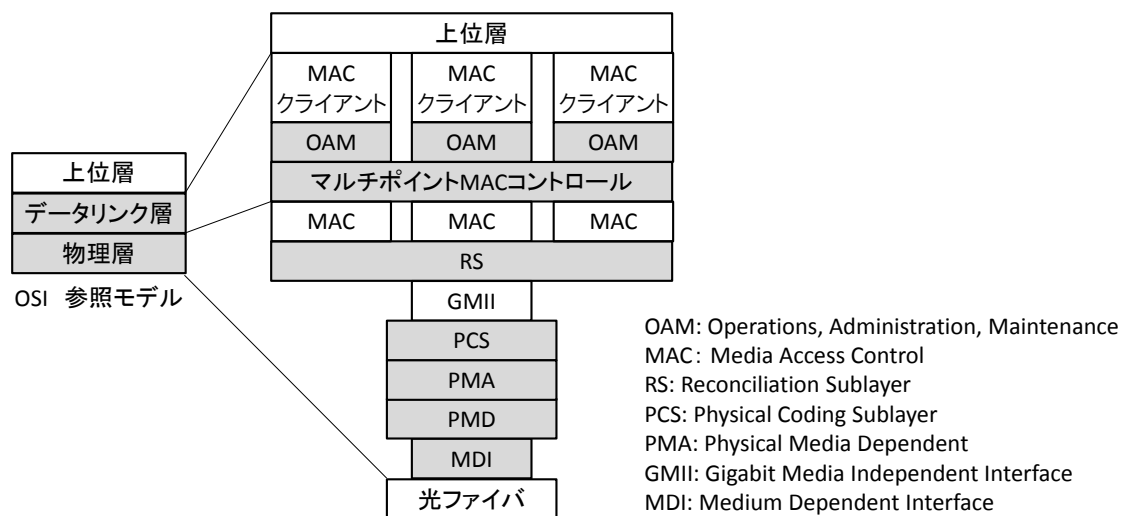


図 1-3 GE-PON のレイヤ構造

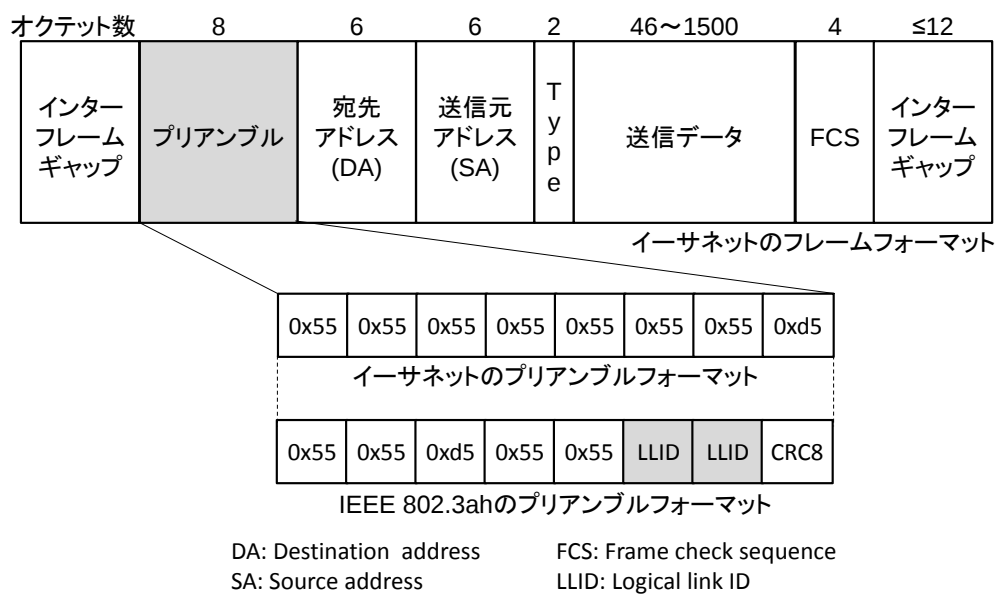


図 1-4 LLID の収容位置

表 1- 1 G-PON システム及び GE-PON システムの標準化規格の概要

システム名		GE-PON	G-PON
標準化規格		IEEE 802.3ah	ITU-T G.984
標準化完了時期		2004年9月	2004年9月
伝送速度	上り	1.25 Gbit/s	2.5 Gbit/s
	下り	1.25 Gbit/s	1.25/2.5 Gbit/s
使用波長	上り	1260 – 1360 nm	1260 – 1360 nm 1290 – 1320 nm 1300 – 1320 nm
	下り	1480 – 1500 nm	1480 – 1500 nm
波長数	上り	1	1
	下り	1	1
伝送距離		10/20 km	60 km
光線路損失		5 – 20 dB (PX10) 10 – 24 dB (PX20)	5 – 20 dB (Class A) 10 – 25 dB (Class B) 13 – 25 dB (Class B+) 15 – 30 dB (Class C)
収容ONU数		16 / 32 台	64 台以上
フレーム		Ethernet	ATM, GEM, GTC

表 1- 2 次世代 PON システムの標準化規格の概要

システム名		10G-EPON	XG-PON	NG-PON2 (TWDM-PON)
標準化規格		IEEE 802.3av	ITU-T G.987	ITU-T G.989
標準化完了時期		2009年10月	2010年6月	2015年7月
伝送速度	上り	1.25/10.3125Gbit/s	2.5 Gbit/s	2.5/10 Gbit/s
	下り	10.3125 Gbit/s	10 Gbit/s	10 Gbit/s
使用波長	上り	1260 – 1280 nm	1260 – 1280 nm	1524 – 1544 nm
	下り	1575 – 1580 nm	1575 – 1580 nm	1596 – 1603 nm
波長数	上り	1	1	4 – 8
	下り	1	1	4 – 8
伝送距離		10/20 km	60 km	40 km
光線路損失		5 – 20 dB (PR10) 10 – 24 dB (PR20) 15 – 29 dB (PR30)	29 dB (Nominal 1) 31 dB (Nominal 2)	29 dB (N1) 31 dB (N2) 33 dB (E1) 35 dB (E2)
収容ONU数		32 台以上	64 台以上	32 – 64 台以上
フレーム		Ethernet	XGTC, XGEM	XGTC, XGEM

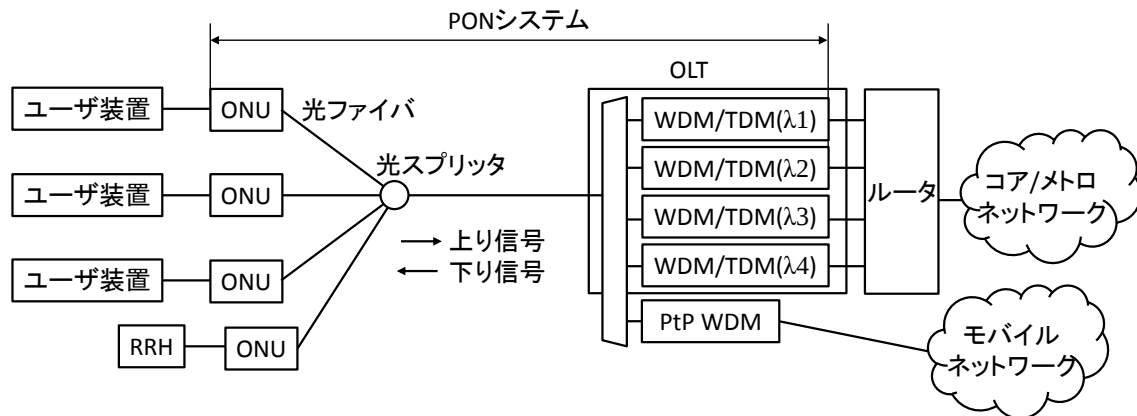


図 1-5 NG-PON2 のシステムイメージ

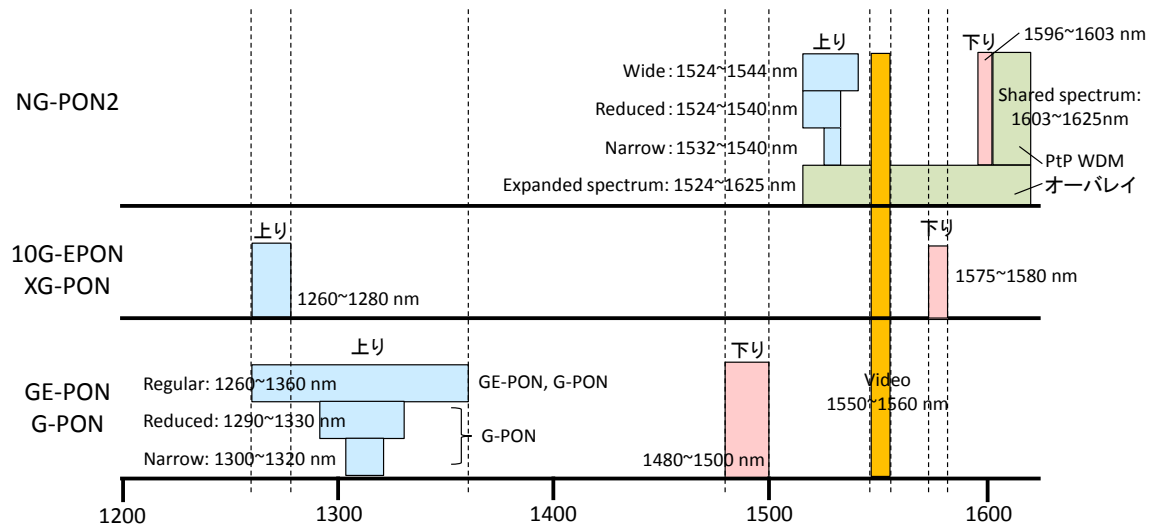


図 1-6 波長配置

1-1-4 一般的なアクセスネットワークアーキテクチャ

図 1- 7 に、TDM-PON をベースとした一般的なアクセスネットワークアーキテクチャを示す[10]。TDM-PON としては、GE-PON、10G-EPON、G-PON、XG-PON の適用が可能である。収容局内の複数台の OLT は、データリンク層でトラフィックを集線するスイッチ（L2SW : Layer-2 SWitch）を介して、コア/メトロネットワークと接続する。OLT と ONU 間の接続は PON 方式によって行われ、PON 区間の信号は、PON の標準化規格によって異なる符号化・多重化をされる。一方で、L2SW など、PON 区間以外では、信号は、通信事業者内での転送に適した標準的なプロトコルで転送される。今日、最も使われているプロトコルは、Ethernet である。

図 1- 8 及び図 1- 9 に、それぞれ、一般的な TDM-PON の OLT 及び ONU の装置構成を示す[11]。OLT と ONU 内の PMD（Physical Medium Dependent）レイヤは、光送受信器と波長合分波デバイスを示す。MAC（Medium Access Control）レイヤは、ファイバを複数ユーザで共有するために、物理媒体を使用する権利をスケジューリングする。PON システムでは、OLT の MAC 層がマスタであり、ONU の MAC 層がクライアントである。OLT は、ONU 個々の伝送開始時刻と終了時刻を指定する。

図 1- 8 に示すように、OLT は複数の MAC と PMD を備え、複数の PON システムと接続するとともに、内部に L2SW を備え、異なる PON システム（ONU）とコア/メトロネットワーク間の相互接続やスイッチングを行う。OLT 内のサービス適応層（Service Adaptation Layer）はコア/メトロの信号プロトコルへの（からの）翻訳を行う。OLT からコア/メトロネットワークに繋がるインタフェースを SNI（Service Network Interface）と呼ぶ。図 1- 9 に示すように、PON 区間では、ONU MAC と PMD を介して、ONU は OLT と接続する。ONU 内のサービス適応層は、ユーザ装置の信号プロトコルからの（への）翻訳を行う。ONU からユーザ端末に繋がるインタフェースを UNI（user network interface）と呼ぶ。図中のサービス MUX/DEMUX は、異なるユーザ端末の信号を多重分離する。一般的に、それぞれの UNI は、異なるサービス向けの異なる信号フォーマットをサポートする。

ONU は、種類の異なる複数のサービス（電話、テレビ会議、映像配信サービス、大容量データ通信、インターネット）を提供するために、一般的に、サービス品質クラス毎に数種類のバッファを備えている。各バッファに溜まったデータ量に応じて、上り通信許可を各 ONU へ割り当てる動的帯域帯域割当（DBA）により、上りのサービス優先制御・ユーザ間帯域公平制御を行っている。

図 1- 7 と図 1- 8 に示すように、一般的なアクセスネットワークアーキテクチャでは、OLT-コア/メトロネットワーク間の L2SW と、OLT 内の L2SW を用いた構成となっている。それぞれの L2SW では、複数の下位ネットワーク回線（リンク）から転送された上り信号を、単一の上位ネットワークリンクへ集線（多重）している。このときに、L2SW 内でユーザ毎のバッファ処理を行うことで、上りのサービス優先制御・ユーザ間

公平制御を行うことができる。PON 区間では、複数の ONU から転送された上り信号を、単一のファイバへ集線している。L2SW による集線を電気段の集線、そして、PON 区間の光スプリッタを用いた集線を光段の集線と呼ぶ。このアクセスネットワークアーキテクチャでは、電気段と光段の二段階の集線構成を用いることで、大規模ユーザのトラフィックを単一のリンクに集線し、通信装置数を削減できる。

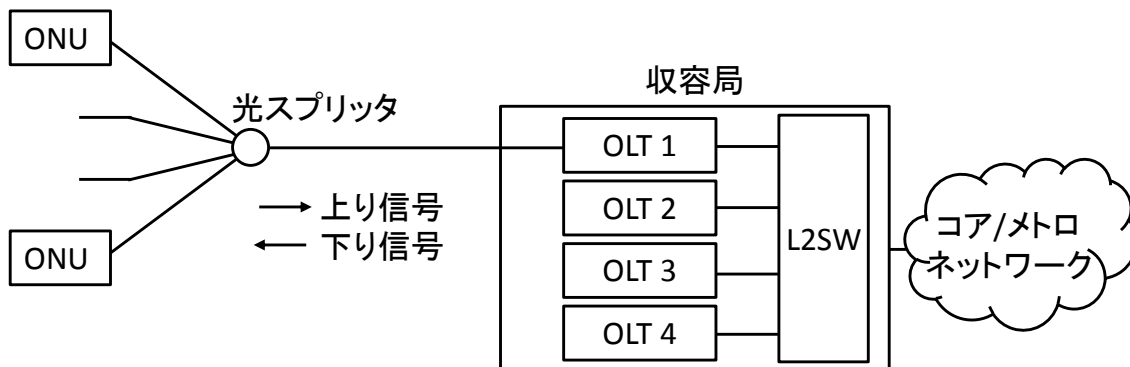


図 1-7 TDM-PON をベースとした一般的なアクセスネットワークアーキテクチャ

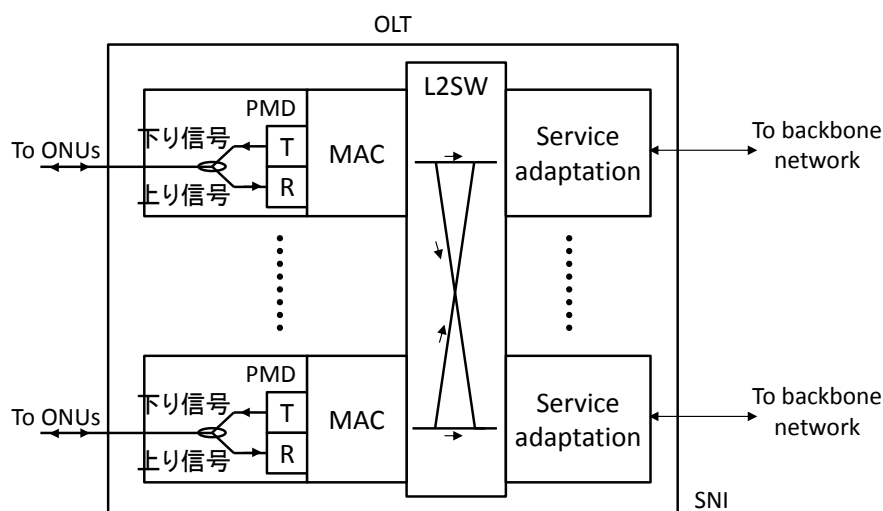


図 1-8 一般的な TDM-PON OLT の装置構成

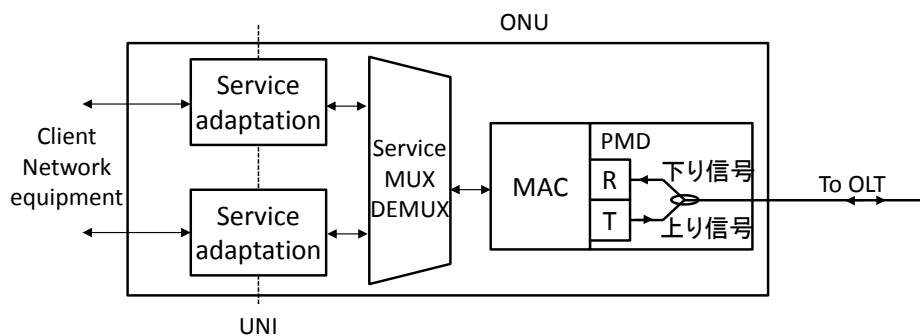


図 1-9 一般的な TDM-PON ONU の装置構成

1-2 本研究の意義及び目的

1-2-1 将来アクセスネットワークの要求条件

1-1 で説明した研究背景に基づいて、高品質な FTTH サービスを継続的に提供していくために、将来のアクセスネットワークには以下のことが求められる。

(I) 広帯域化

映像系サービスの高精細化・多チャンネル化、大容量ファイル交換などのアプリケーションの登場により、ユーザ当たりのアップロードトラフィック、及び、ダウンロードトラフィックの年次増加率は、それぞれ、9 %、及び、22 %であり[12]、光アクセス回線の益々の広帯域化が求められる。

(II) 省電力化

環境意識の高まりから、CO₂ 排出量削減が世界的に求められている。NTT グループは 2020 年度の CO₂ 排出量を 2008 年度比で 15 %以上削減することを目指しており、その主な削減対象は電力である[13]。特にアクセスシステムの消費電力はネットワーク全体で消費する電力の約 81 %を占めると試算されている[14]。例えば、GE-PON システムと L2SW を用いるアクセスシステムの各装置の消費電力は、ONU、OLT、及び L2SW で、それぞれ約 74 %、約 9 %、及び約 17 %を占める[14]。このうち、ONU の消費電力は、スリープ技術の適用による間欠動作により、大幅な削減が可能である[15]。一方で、OLT と L2SW により構成される集線部分は複数ユーザで共用しているため間欠動作が難しく、スリープ技術の適用による省電力化が困難である。従って、集線部分の省電力化がアクセスシステムの省電力化の鍵である。

(III) 高信頼化

設備投資費や運営費削減のために、マスマーザに加えて、ビジネスユーザ及びモバイルユーザも同一の光アクセスシステムにより収容することが将来的に想定され、アクセスネットワークには社会的インフラとしての高い信頼性が求められる。

(IV) ユーザ間公平性の向上

特定の少数ユーザの送受信データが総トラフィックの大部分を占める状況が顕著になっており、2010 年にはユーザあたりのトラフィック量上位 10 %のヘビーユーザが、上り総トラフィックの 96 %、下り総トラフィックの 78 %を占めている[16]。その結果、他ユーザの帯域が圧迫され、サービス品質が低下するケースが生じている。これに対し、インターネットサービスプロバイダの約 4 割が特定ユーザの帯域制限を行っており、2011 年より一部通信キャリアが総量規制方式による上り通信の帯域制限を開始した。今後、アクセスシステムにおいても、ユーザ要求量の多様化に対して、ユーザ間公平性の確保が求められる。

1-2-2 アクセスネットワークにおける課題

前述の要求を受けて、将来のアクセスネットワークの課題を述べる。

(I),(II) 広帯域化と省電力化について

既存の GE-PON システムに対してさらに帯域をアップグレードした 10G 級 PON システム及び 40G 級 PON システムの標準化は、2010 年及び 2015 年に完了している。続いて、IEEE P802.3ca において、2015 年 5 月より 100G-EPON と名付けられた 25 Gbps、50 Gbps、100 Gbps 級 PON の標準化に向けた議論が進められている[17]。このように、広帯域な PON システムの標準化が進められており、PON 区間の広帯域化に対応可能なように、集線用 L2SW の広帯域化が求められる。

一方で、L2SW を用いた集線では、ユーザ毎のバッファ処理により QoS を保証しているため、大規模な演算が必要となる。演算速度を増加させるためには、CPU (Central Processing Unit) 性能の増大、もしくは、同性能の CPU の使用数を増やすことが求められるため、消費電力の増大が予想される。そこで、今後予想される PON 区間の広帯域化に対して、L2SW に必要なバッファ処理における消費電力が益々増大することが予想される。このように、一般的な PON システムと L2SW を用いた 2 段階の集線構成によるアクセスネットワークアーキテクチャでは、特に L2SW の省電力化が難しいため、広帯域化と省電力化を同時に達成することが難しい。

(III),(IV) 高信頼化とユーザ間公平性の向上について

2 台のスイッチ間で並行して張られた複数のリンク（回線）を統合し、論理的に 1 本のリンクのように取り扱うリンクアグリゲーションを用いることで、冗長化（故障に対するバックアップ）のメカニズムとして使用することができる。すなわち、2 台のスイッチを接続する際に、冗長化のために 2 本のリンクを設定し、普段はリンクアグリゲーションによって、2 倍の帯域を持った 1 本の仮想的なビッグパイプ（大容量の回線）として活用し、どちらかのリンクに障害が発生した時は、リンクアグリゲーションを解除して、通常の帯域を持った 1 本のリンクとして接続を維持することが可能である。一般的な TDM-PON と L2SW を用いた 2 段階の集線構成によるアクセスネットワークアーキテクチャでは、このリンクアグリゲーションを用いることで、集線ユーザ数の大きな L2SW 間及び、L2SW とコア/メトロネットワーク内のエッジルータ間で冗長構成を実現している。しかし、OLT と ONU 間の経路は単一の固定経路であり、PON 区間は経路を変更することができず、冗長構成とすることができない。

更に、OLT と ONU 間の経路は単一の固定経路であり、PON 区間は経路を変更することができないため、OLT 毎に収容するユーザ数の違いや、収容ユーザのトラフ

ック要求量の違いによって、複数の OLT 間のトラフィック要求、及び、輻輳状態に差が生じる。このように、複数の OLT 間の輻輳状態に差が生じている場合、混雑している OLT において、スループット、遅延、及び、フレームロス等のサービス品質が劣化するという課題が生じる。そこで、複数 OLT 間で帯域公平性が保証されていない現状のアーキテクチャでは、ユーザ要求量の多様化に伴って、複数 OLT 間でサービス品質の差が拡大し、異なる OLT に收容される ONU 間でのサービス品質の不公平が顕在化するといった課題が生じる。

1-2-3 本研究の目的

1-1-4 において、一般的なアクセスネットワークアーキテクチャでは、TDM-PON と L2SW を用いた 2 段階の集線構成により、FTTH サービスの経済化を実現していることを説明した。このようなネットワークでは、上り通信は、同一 PON 内での各ユーザへの動的帯域割り当て (DBA) と L2SW 内でのユーザ毎のバッファ処理により、2 段階でサービス優先制御・ユーザ間帯域公平制御を行うことで、サービス品質を保証することができる。続いて、1-2-2 において、PON 区間の広帯域化に対して、L2SW 内のバッファ処理における大規模演算での消費電力増大が課題となること、加えて、上り通信・下り通信ともにユーザ毎にアクセスネットワーク内経路は単一の固定経路であり、今後のサービスの広帯域化・多様化を考えると、信頼性や複数 OLT 間でのユーザ間帯域公平性が課題となることを示した。

本研究では、前述の課題に対し、以下の特徴を有するフォトニックアグリゲーションによる高速光アクセスネットワークを検討する。

- ・ L2SW を用いた集線を不要化し、L2SW 内のユーザ毎のバッファ処理を不要化することで、集線機能の広帯域化と省電力化の両立を実現

従来アーキテクチャにおいて L2SW で行っていた集線を、光区間に移行する。従来、L2SW 内のユーザ毎のバッファ処理により実現していたサービス優先制御・ユーザ間帯域制御は、光区間において DBA にて実現する。

- ・ PON 区間において、ユーザ単位での経路切替を実現することで、高信頼化とユーザ間公平性を実現

従来アーキテクチャでは単一であったユーザ毎経路を、複数経路から動的に選択できるようにしくみを導入する。更に、PON 区間に WDM 技術を採用して、経路と波長がユーザ毎に 1 対 1 に対応した光集線ノードを光区間に組み込み、ユーザ毎に波長を変更することで、経路変更を可能とする。

更に、フォトニックアグリゲーションによる高速光アクセスネットワークを実現するための以下の 3 つの主要技術について、後の第 3 章から第 5 章でそれぞれ検討を行う。

- ・ 光集線ノード構成技術

フォトニックアグリゲーションによる高速光アクセスネットワークにおいて、集線機能 (光集線と光スイッチング) を実現可能、且つ、省電力効果が最大となる光集線ノード (PA: Photonic aggregator) の構成を提案する。

- ・ 動的負荷分散技術

少ない波長切替回数で、複数の OLT 間のトラフィック負荷を分散する動的負荷分散技術を提案する。

- ・高速波長切替技術

波長可変型 WDM/TDM-PON において、フレームロスなしの経路切替を実現する高速波長切替手順を提案する。

1-3 本論文の構成

本論文は、全 6 章から構成される。本論文の構成を図 1-10 に示す。第 1 章では、本研究の背景及び狙いを明らかにし、本研究の意義および目的を示した。第 2 章では、アクセスネットワークにおけるトラフィック予測手法を提案し、将来のトラフィック要求を明確化した上で、第 1 章で述べた課題を解決するアクセスネットワークアーキテクチャを検討する。そして、第 3~5 章では、第 2 章で検討したアクセスネットワークアーキテクチャである、フォトニックアグリゲーションアーキテクチャを実現するための要素技術について検討する。第 3 章では、集線構成を低消費電力で実現可能な光集線ノードの構成を提案し、省電力効果を理論計算により示す。第 4 章では、少ない波長切替回数で複数の集線リンク間のトラフィック負荷を分散する動的負荷分散技術を提案し、提案手法を用いた場合の負荷の均一性、切替頻度、平均遅延を実験により評価する。第 5 章では、短い波長切替時間で、フレームロスなしの経路切り替えを実現する高速波長切替手順を提案し、切替時間を実験により評価する。最後に、第 6 章で、本論文の結論を述べる。

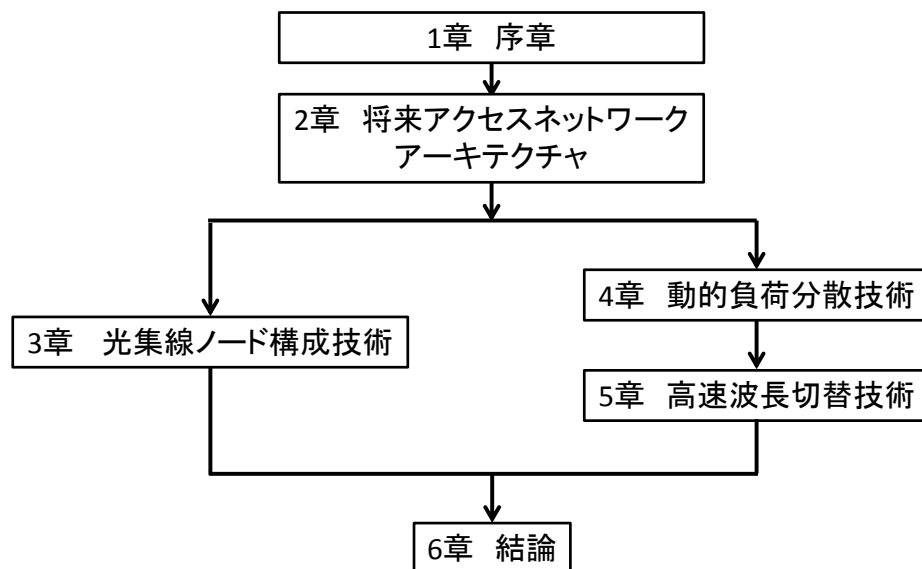


図 1-10 本論文の構成

1-4 参考文献

- [1] K. C. Kao, and G. A. Hockham, "Dielectric-fiber surface waveguides for optical frequencies," IET Electrical Engineers, vol. 113, no. 7, pp. 1151-1158, 1966
- [2] I. Hayashi, M. B. Panish, P. W. Foy, and S. Sumski, "Junction lasers which operate continuously at room temperature," Appl. Phys. Lett., vol. 17, pp. 109, 1970
- [3] R. J. Mears, L. Reekie, I. M. Jauncey, and D. N. Payne, "Low-noise erbium-doped fiber amplifier operating at 1.54 μm ," IET Electron. Lett., vol. 23, no. 19, pp. 1026-1028, 1987
- [4] 総務省, "電気通信サービスの契約数及びシェアに関する四半期データの公表 (平成 27 年度第 3 四半期(12 月末)) ," 2017
http://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01kiban04_02000104.html
- [5] ITU-T recommendation G.984 series,
- [6] ITU-T recommendation G.987 series.
- [7] ITU-T recommendation G.989 series.
- [8] IEEE 802.3 ah
- [9] IEEE 802.3 av
- [10] Cedric Lam, "Passive Optical Networks," 2007, Elsevier Inc.
- [11] ITU-T recommendation G.983.1, Broadband Optical Access Systems Based on Passive Optical Networks (PON), 2005
- [12] 総務省, "我が国のインターネットにおけるトラフィックの集計・試算," 2016,
http://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01kiban04_02000107.html
- [13] NTT グループ CSR 報告書, 2010
- [14] Akihiro Otaka, "Power saving ad-hoc report." Retrieved 2 2012, from IEEE 802.3av: [http:// www. ieee802.org/3/av/public/2008_09/3av_809_otaka_1.pdf](http://www.ieee802.org/3/av/public/2008_09/3av_809_otaka_1.pdf)
- [15] Ryogo Kubo, Jun-ichi Kani, Hirotaka Ujikawa, Takashi Sakamoto, Yukihiro Fujimoto, Naoto Yoshimoto, and Hisaya Hadama, "Study and Demonstration of Sleep and Adaptive Link Rate Control Mechanisms for Energy Efficient 10G-EPON," J. Opt. Commun. Netw., vol. 2, no. 9, pp. 716-729, Dec. 2015
- [16] Internet Initiative Japan, "Broadband traffic report" February 2, 2016 (in Japanese). Available: <http://www.iiij.ad.jp/company/development/report/iir/028.html>
- [17] "IEEE 802.3 Next Generation Ethernet Passive Optical Network (NG-EPON) Study Group,"
<http://www.ieee802.org/3/NGEPONSG/>

第2章 将来アクセスネットワークアーキテクチャの検討

2-1 はじめに

1-2-1 では、将来光ネットワークの要求条件として、(I) 広帯域化、(II) 省電力化、(III) 高信頼化、(IV) ユーザ間公平性の向上を挙げた。そして、1-2-2 において、PON 区間の広帯域化に対して、L2SW 内のバッファ処理における大規模演算での消費電力増大が課題となること、加えて、上り通信・下り通信ともにユーザ毎に PON 区間の経路は固定であり、今後のマルチサービス化・ユーザ要求量の多様化を考えると、信頼性や複数 OLT 間でのユーザ間帯域公平性が課題となることを示した。

本章では、まず初めに、上記(I)~(IV)の4つの要求条件を満たす将来ネットワークアーキテクチャを検討する。ネットワークアーキテクチャの検討は、まず設計指針を述べ、その後、設計指針を満たす構成を網羅的に考察し、最適構成を抽出する。

続いて、統計情報からアクセスネットワークの集線リンクのトラフィックを予測するトラフィック予測手法を提案し、将来のトラフィック要求を明らかにする。そして、予測トラフィック量において、提案するフォトニックアグリゲーションによる高速光アクセスネットワークを構成した場合の一例を示す。

本章の構成は以下の通りである。まず 2-2 にて、将来アクセスネットワークアーキテクチャの設計指針を述べ、そして設計指針を満たすアーキテクチャの候補を網羅的に述べた後で、要求を満たすアクセスネットワークアーキテクチャを決定する。次に、2-3 にて、統計情報からアクセスネットワークの集線リンクの時間平均トラフィックを予測するトラフィック予測手法を提案し、将来のトラフィック要求量とユーザ要求量のばらつきを明確化する。続いて、2-4 にて、予測したトラフィック要求量に基づいて、フォトニックアグリゲーションによる高速光アクセスネットワークを構成した場合の構成例について議論する。最後に 2-5 を本章のまとめとする。

2-2 将来アクセスネットワークアーキテクチャの検討

2-2-1 設計指針

本項では、1-2-3 で述べた、以下の特徴を有する将来アクセスネットワークアーキテクチャを検討する。

- (i) L2SW を用いた集線を不要化し、L2SW 内のユーザ毎のバッファ処理を不要化することで、集線機能の広帯域化と省電力化の両立を実現
- (ii) PON 区間において、ユーザ単位での経路切替を実現することで、高信頼化とユーザ間公平性を実現

上記のそれぞれの特徴に対して、将来アクセスネットワークアーキテクチャの設計指針を以下のように設定する。

- (i) L2SW を用いた集線を不要化し、L2SW 内のユーザ毎のバッファ処理を不要化

L2SW 内のユーザ毎のバッファ処理を不要化し、サービス優先制御・ユーザ間帯域公平制御を DBA のみで実現することで、L2SW 内のユーザ毎のバッファ処理を不要化し、消費電力を削減することができる。これを実現する構成として、以下の 3 通りのアプローチが考えられる。ここで、メトロ/コアネットワークからの入力ポート数は、現状のアクセスネットワークアーキテクチャから変更しないと仮定する。

(i-1) 光集線：PON の分岐数を拡大することで電気集線を不要化する。

(i-2) 電気集線：光区間の接続をポイント・トゥ・ポイントとし、各光回線の帯域を管理する DBA を設ける。サービス優先制御・ユーザ間公平制御は前記の DBA にて実行するため、L2SW での集線は、サービス優先制御・ユーザ公平制御用のユーザ毎のバッファ処理を不要化する。光区間は ONU と OLT を 1 対 1 接続したシングルスター構成または WDM 技術などを適用した帯域占有型 PON 構成でもよい。

(i-3) 光・電気多段集線：各 OLT の DBA 機能を管理する上位 DBA を設け、これらを連携させる。

- (ii) PON 区間において、ユーザ単位での経路切替を実現

アクセスネットワーク内のユーザ毎の経路切替を実現するために、以下の 2 通りのアプローチが考えられる。

(ii-1) 光スイッチング：TDM-PON に WDM 技術を採用して波長と経路を 1 対 1 に対応させ、ユーザ毎に割当波長を選択することで、PON 区間の経路切替を可能とする（光スイッチング）ようなアーキテクチャを提案する。このアーキテクチャを実現するために、複数の入出力ポートを有し、ユーザ毎に割り当てた波長に応じて

入出力経路が決まる光スイッチ構成を ONU・OLT 間に組み込む。波長の割り当てはユーザ単位で可変とする。

(ii-2) 電気スイッチング: 複数の入出力ポートを有し、ユーザ VLAN (Virtual Local Area Network) タグに応じた入出力関係を定める入出力テーブルによりデータ振り分けを行う電気マトリックススイッチを OLT・コア/メトロネットワーク間に組み込む。入出力テーブルは可変とする。尚、電気マトリックススイッチは、スイッチングを行うだけであり、集線は行わないため、サービス優先制御・ユーザ公平制御用のユーザ毎のバッファ処理は不要である。

2-2-2 アーキテクチャの候補

まず初めに、図 2-1 に従来のアクセスネットワークアーキテクチャを示す。尚、OLT 内の単一の PMD と MAC の組を光加入者ユニット OSU (Optical Subscriber Unit) と定義する。従来の一般的な構成では、PON 区間において光スプリッタを用いた光段の集線と、PON の上位で L2SW を用いた電気段の集線の二段階の集線構成とすることで、経済化を達成している。しかし、将来的に PON 区間が高速化した際には、L2SW 内の制御部 (C) にて高速なバッファ処理が必要となり、L2SW の消費電力が増大する。加えて、現状のアーキテクチャでは、ONU と集線リンクの対応は 1 対 1 であるため、ONU の接続するリンクを変更し、複数 OSU 間の負荷を分散することができない。そして、その結果、混雑リンクで輻輳が生じ、混雑リンクに属する ONU において、フレームロスや遅延が生じ、サービス品質が低下する。

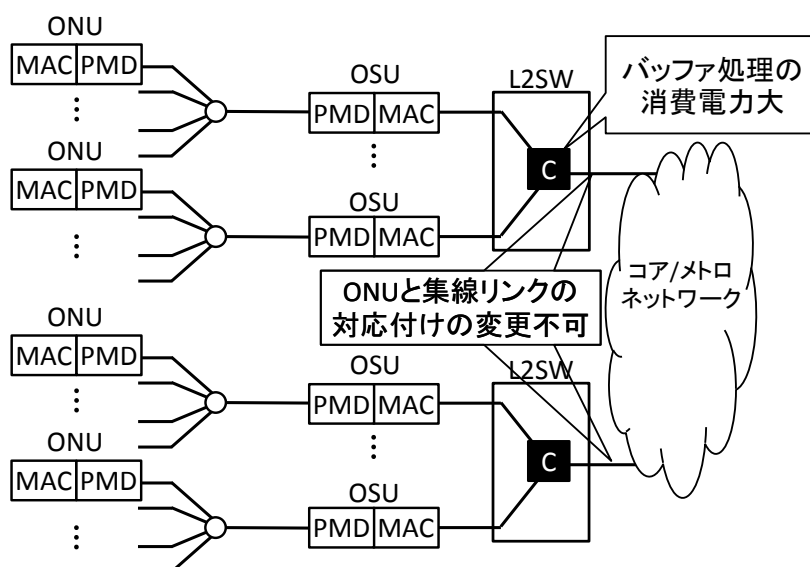
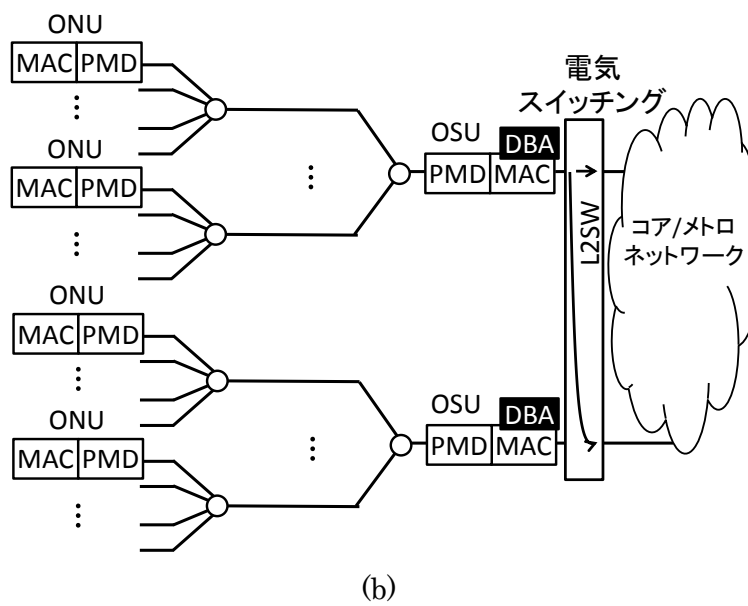
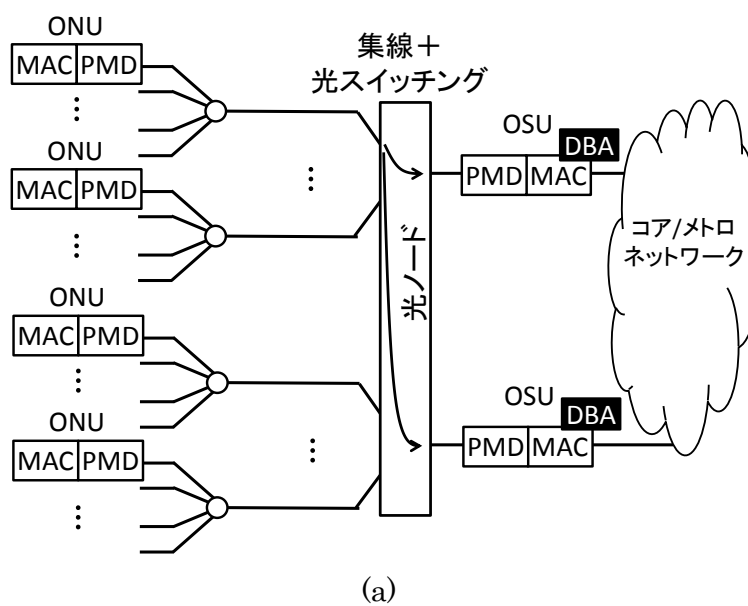
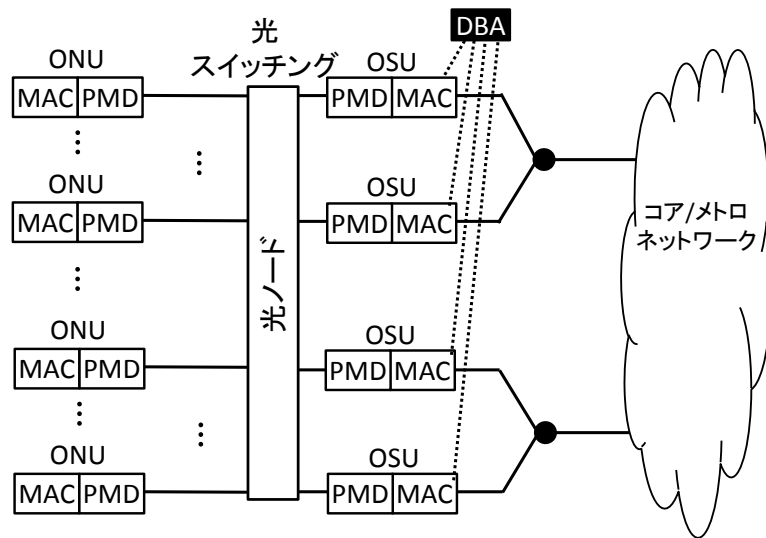


図 2-1 従来のアクセスネットワークアーキテクチャ

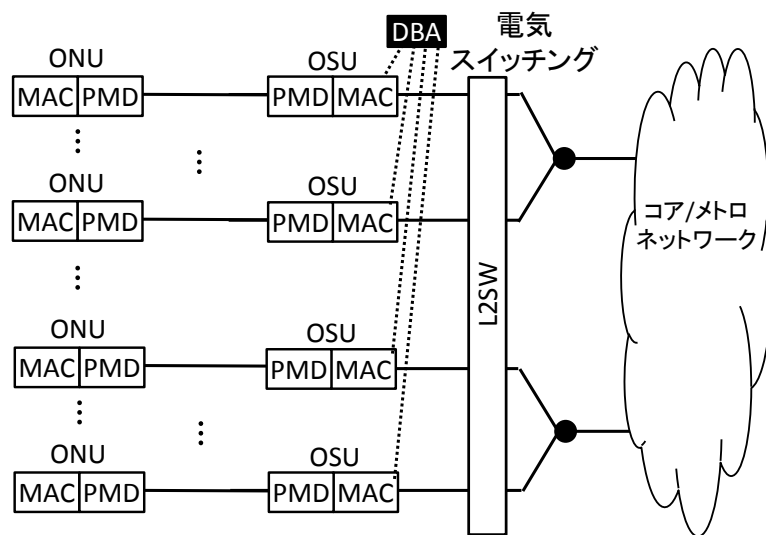
2-2-1 の設計指針(i-1)～(i-3)と(ii-1),(ii-2)を組み合わせた 6 通りの将来アクセスネットワークアーキテクチャ候補を図 2-2 に示す。図中の DBA 制御部は、各 ONU に上り信号の送信許可を与えることで、サービス優先制御とユーザ間公平制御を実現する。DBA が OSU 内の MAC のみに備わっているアーキテクチャである図 2-2 (a)と(b)では、単一の OSU に接続する複数 ONU の上り信号は、優先・公平制御され、衝突しないように送信制御される。次に、DBA が OSU 外のみ備わっているアーキテクチャである図 2-2 (c)と(d)では、単一の集線リンクに接続する複数 ONU の上り信号は、優先・公平制御され、衝突しないように送信制御される。最後に、DBA が OSU 内の MAC と OSU 外の両方に備わっているアーキテクチャである図 2-2 (e)と(f)では、単一の集線リンクに接続する複数 OSU の上り信号は、優先・公平制御され、衝突しないように送信制御されており、更に、単一の OSU に接続する複数 ONU の上り信号は、優先・公平

制御され、衝突しないように送信制御されており、二段階の送信制御となる。





(c)



(d)

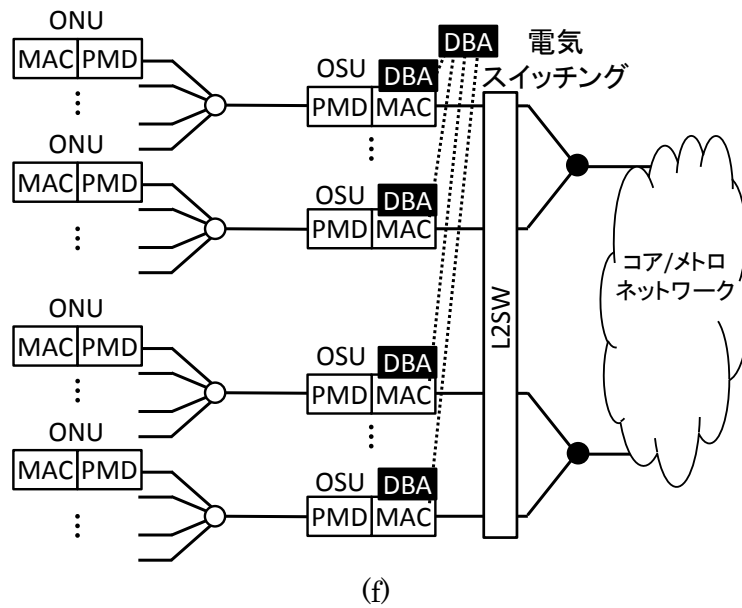
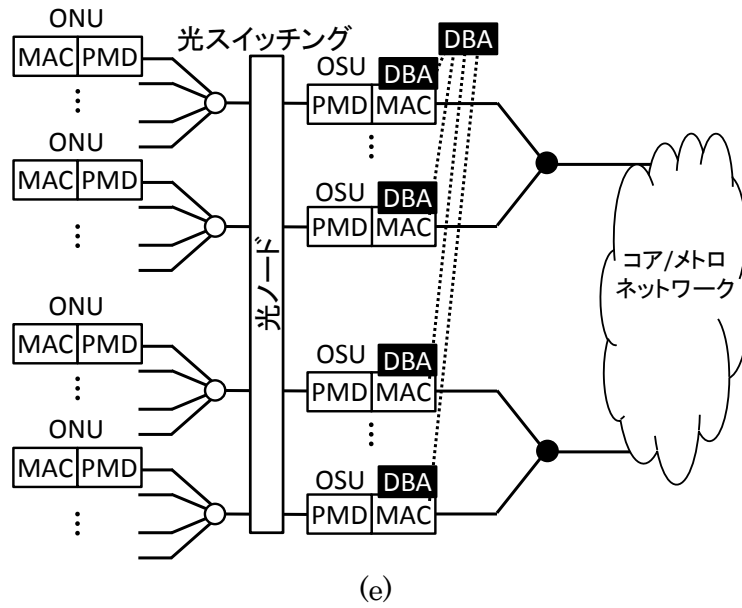


図 2-2 将来アクセスネットワークアーキテクチャの候補

- (a) 光集線+光スイッチング, (b) 光集線+電気スイッチング,
(c) 電気集線+光スイッチング, (d) 電気集線+電気スイッチング,
(e) 光・電気多段集線+光スイッチング, (f) 光・電気多段集線+電気スイッチング

2-2-3 要求を満たすアクセスネットワークアーキテクチャ

図 2-2 の各構成について考察する。局内装置における消費電力・コストの支配要因は OSU 数であるとした。また、電気・光スイッチおよび DBA 回路の故障については考慮しなかった。

・省電力性：OSU 数は、光集線で最少、電気集線で最大となる。よって、(a,b),(e,f),(c,d) の順で低消費電力であり、優位であるとした。

・信頼性：光スイッチングの構成では、ONU と OSU 間での経路が切り替わるため OSU の故障に対応可能である。電気スイッチングの構成では、ONU での終端後に経路を切り替えるため、OSU の故障に対応可能できない。よって、(a,c,e), (b,d,f) の順で優位であるとした。

・ユーザ間公平性：電気スイッチング(a,c,e)および電気集線+電気スイッチング(d)の構成では、ユーザ毎に独立してエッジルータへの接続経路を変更できる。PON とシステムと電気スイッチングを用いる(b,f)の構成では、PON 毎にエッジルータへの接続経路を変更する。(f)では上位 DBA により PON 毎の総帯域が可変であるが、(b)では各 PON の総帯域は固定である。よって、(a,c,d,e), (f), (b)の順でユーザ間公平性が高いとした。

・経済性：OSU 数は、光集線で最少、電気集線で最大となる。よって、(a,b), (e,f), (c,d) の順で低コストであり、優位であるとした。

表 2-1 上り構成の比較検討

	省電力性	信頼性	ユーザ間 公平性	経済性
(a)	○	○	○	○
(b)	○	×	×	○
(c)	×	○	○	×
(d)	×	×	○	×
(e)	△	○	○	△
(f)	△	×	△	△

表 2-1 に示す比較結果より、本研究では、フォトニックアグリゲーションによる高速光アクセスネットワークとして、(a)光集線+光スイッチングの構成について検討を行う。

2-3 将来トラフィック要求の予測

2-3-1 従来のトラフィック予測手法

2-2-3 で決定した、(a)光集線+光スイッチングを用いたフォトニックアグリゲーションによる高速光アクセスネットワークアーキテクチャの詳細構成を検討する際には、将来に向けて、正確にネットワーク要求を把握し、そして最適なシステムの拡張投資をする必要がある。トラフィック要求を満たさない容量のネットワークを構築した場合は、ネットワーク性能は不十分であり、加入者を満足させることができないだろう。一方で、トラフィック要求を超える過剰なネットワークを構築した場合は、他にもっと有効活用できるであろう資本を無駄使いしてしまうことになる。従って、将来アクセスネットワークにおけるトラフィック要求を正確に予測することが重要である。

トラフィック予測手法については、これまでに、複数の研究が行われている。“Nielsen’s Law of Internet Bandwidth” [1]では、ハイエンドユーザのインターネットの接続速度は年率 50 %で増加すると予測している。また、他の情報源である、Annual Cisco Visual Networking Index [2]では、インターネットトラフィックを世界的に予測しており、予測結果はトラフィックの成長率を調べるのに役立つが、例えば、アジア太平洋や北アメリカといった広域な地域毎のトラフィック予測をターゲットとしており、ユーザ単位やアクセスネットワーク単位のトラフィック予測はターゲットとしていない。一方で、インターネット TV と有料 TV のビデオトラフィックの両方を含むトラフィック要求を予測するモデルが提案されている[3, 4]。このモデルは、トラフィック要求が平均的な場合と過度な場合を予想しており、そして、トラフィック要求が過度な場合は、家毎に同時に視聴するストリーム数が大きいと仮定している。しかしながら、このモデルのターゲットはビデオトラフィックに限定されている。他方、ネットワーク内のユーザのインターネット使用頻度を考慮して、アクセスネットワークのトラフィック要求を予測する手法が提案されている[5, 6]。このモデルでは、要求帯域とアクティブユーザ数から、システム帯域に対する利用可能帯域の割合を予測している。しかしながら、実際の集線リンクのトラフィック要求量は予測していない。従って、今まで、アクセスネットワークにおいて、集線リンクのトラフィック要求量の予測を行った研究はまだない。

そこで、本節では、統計情報からアクセスネットワークの集線リンクのトラフィックを予測するトラフィック予測手法を提案し、将来のトラフィック要求とユーザ要求量のばらつきを明確化する。

2-3-2 ユーザ毎の平均トラフィックの統計値

図 2-3 は、レジデンシャルユーザトラフィックの傾向を示す。図 2-3 (a)の左軸、及び、右軸は、それぞれ、日本におけるユーザ毎の平均トラフィック量と、FTTH ユーザ数を示す[7, 8]。ユーザ毎の平均トラフィックレートはブロードバンドサービスの総トラフィックレートを、ブロードバンドサービスの契約ユーザ数で割って算出した値である。ブロードバンドサービスの総トラフィックレートは、インターネットTV、有料TV、ビデオトラフィック、そして、インターネットトラフィックを含む。

図 2-3 (a)より、2015 年のユーザ毎平均トラフィックは、上り、及び、下りで、それぞれ 33 kbps、及び、118 kbps であった。この場合、32 ユーザの集線リンクは、上り、及び、下りで、それぞれ、1.1 Mbps、及び、3.8 Mbps である。また、2005 年から 2015 年の、上り、及び、下りの平均トラフィックは、それぞれ、年率 9 %、及び、年率 22 % 増加している。このように平均トラフィックは増加し続けているのにも関わらず、FTTH サービスの契約者数は頭打ちである。現状、FTTH サービス契約者数は 2400 万であり、これは、日本の全戸数の約半分に相当する。

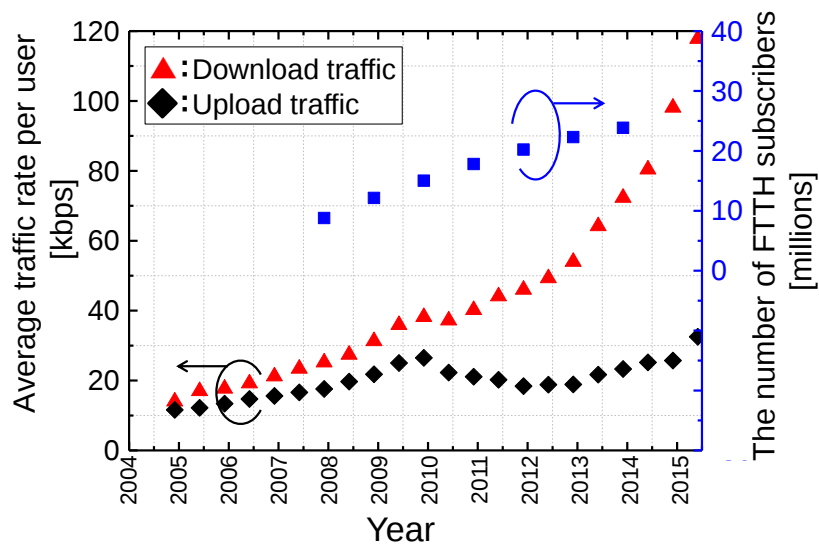
図 2-3 (b)は、2015 年のユーザ毎の 1 日の使用トラフィック量の累積分布のフィッティング値を示す。参考文献[9]の累積分布は、参考文献[10]と同様の方法で測定されている。黒線、及び、赤線は、それぞれ、上り、及び、下りのフィッティング値を示す。我々は、参考文献[9]で測定されたユーザ毎の 1 日の使用トラフィック量の累積分布を、ロングテール性とフラクタル性を持つ指数分布である $F(x)$ を用いてフィッティングした。 $F(x)$ は、下記の式で示す。式(2-1)の単位は bytes/day である。

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(x)dx = \left\{ (a \cdot x)^b + c \cdot x + 1 \right\}^d \quad (2-1)$$

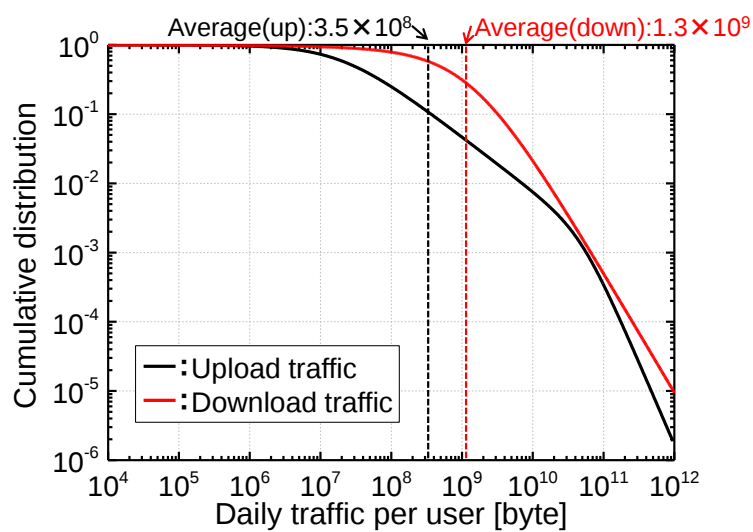
x は、ユーザ毎の 1 日の使用トラフィック量を示す。パラメータ a 、 b 、 c 、及び、 d は、測定値とフィッティング値の二乗誤差が最も小さくなるように算出した。アップロードに関しては、 a 、 b 、 c 、及び、 d は、それぞれ、 2.68×10^{-10} 、3.02、 4.85×10^{-8} 、及び、-0.79 であった。ダウンロードに関しては、 a 、 b 、 c 、及び、 d は、それぞれ、 8.92×10^{-12} 、0.38、 7.87×10^{-10} 、及び、-1.73 であった。加えて、2015 年におけるユーザ毎の平均トラフィックは、アップロードで 33 kbps、ダウンロードで 118 kbps であるために、ユーザ毎の 1 日の累計トラフィックは、アップロードで 3.5×10^8 byte、ダウンロードで 1.3×10^9 byte である。アップロードとダウンロードの両方において、平均トラフィックの 1000 倍以上のトラフィックを発生させるヘビーユーザが、1 万分の 1 の割合で存在することも確認できる。つまり、ユーザ毎の 1 日のトラフィック量は、ユーザ毎の使い方によって大きく異なると言える。

図 2-3 (a)と図 2-3 (b)の両方から、FTTH サービス契約者数の増加は頭打ちであるものの、総トラフィック量の著しい増加と、ユーザ要求帯域の多様化が起きている。従って、ネットワークオペレータは、将来に向けた適切な拡張投資を行うために、トラフィ

ック要求の増加量と多様性を絶えず予測し続けなければならない。



(a)



(b)

図 2-3 日本におけるレジデンシャルユーザトラフィックの動向

(a) ユーザ毎のトラフィックの推移とブロードバンドサービス加入者数,

(b) 2015 年におけるユーザ毎の 1 日のトラフィック量の累積分布

2-3-3 アクセスネットワークアーキテクチャのモデル化

TDM-PONをベースとした一般的なアクセスネットワークアーキテクチャにおいて、各装置の集線比を図 2-4 に示すように定義する。つまり、収容局外スプリッタの集線比を P_1 、収容局内スプリッタの集線比を P_2 、L2SW の集線比を Q 、コアネットワークに位置するエッジルータの入出力ポート数を K とする。このように、収容局とユーザ宅をつなぐ光ファイバや収容局内装置を複数のユーザで共有することで、FTTH サービスの経済性は実現されている。また、L2SW-エッジルータ間は、1 リンクに多重されるユーザ数が多いため、リンクを冗長化して信頼性を確保する。

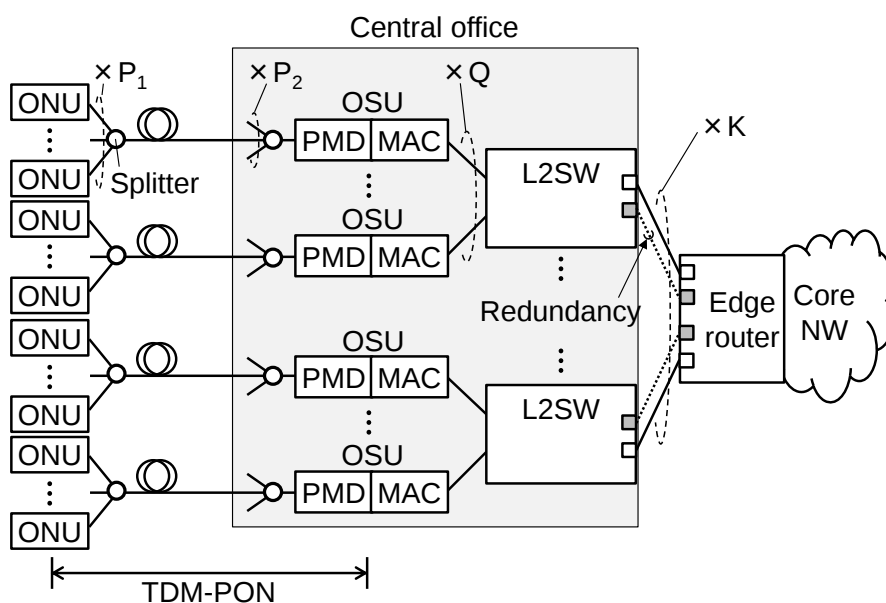


図 2-4 TDM-PON をベースとした一般的なアクセスネットワークアーキテクチャにおける各装置の集線比

2-3-4 集線リンクにおける時間平均トラフィックの予測

まず初めに、集線リンクにおける時間平均トラフィックを予測するために、以下の手順を提案する。時間平均トラフィックは、集線ユーザ数と、ユーザ毎の1日のトラフィック量のばらつきから算出する。

手順 1-1 : ユーザ毎の1日の使用トラフィック量の分散値である σ_U^2 を、測定値に基づいて算出する。

手順 1-2 : n ユーザを集線したリンク毎の1日の使用トラフィック量の分散値である σ_L^2 を、中心極限定理を用いて算出する。

手順 1-3 : 手順 1-2 で導出した分散値を用いて、混雑リンクの時間平均トラフィックを算出する。

手順 1-1 において、ユーザ毎の1日の使用トラフィック量の分散値である σ_U^2 を算出する。確率密度関数 $f(x)$ は、式(2-1)で示した $F(x)$ を微分することで算出できる。 $f(x)$ は、連続した確率分布であるため、 σ_U^2 は式(2-2)より算出できる。

$$\sigma_U^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \bar{x})^2 f(x) dx \quad (2-2)$$

$\bar{x}$ はユーザ毎の1日の使用トラフィック量の平均値である。2015 年の日本における、上り、及び、下りの $\bar{x}$ の値は、それぞれ、 $33 \cdot (60 \cdot 60 \cdot 24 / 8)$ kbyte/day、及び、 $118 \cdot (60 \cdot 60 \cdot 24 / 8)$ kbyte/day である。このとき、上り、及び、下りの σ_U^2 の値は、それぞれ、 2.25×10^{19} (bytes/day)²、及び、 4.81×10^{19} (bytes/day)² となる。

手順 1-2 において、1 リンク毎の1日の使用トラフィック量の分散値である σ_L^2 を算出する。 σ_L^2 は、手順 1-1 で算出した σ_U^2 と、中心極限定理を用いて算出することができる。中心極限定理とは、 $x_1, x_2, \dots, x_n$ が平均値 μ で、分散値 σ^2 である分布から n 個をランダムに選択した集合とした場合に、 n が十分大きな値である場合は、 $\bar{x}$ は、平均値 μ 、分散値 σ^2/n にほぼ等しくなるという定理である。従って、 σ_L^2 は式(2-3)で表すことができる。

$$\sigma_L^2 = \sigma_U^2 / n \quad (2-3)$$

手順1-3において、混雑リンクの時間平均トラフィックを予測する。混雑リンクの時間平均トラフィックを X_s とすると、 X_s は式(2-4)で表される。尚、単位はbytes/dayである。

$$X_s = (\bar{x} + Z\sigma_L) \cdot n = (\bar{x} + Z \frac{\sigma_U}{\sqrt{n}}) \cdot n \quad (2-4)$$

$\bar{x}$ は、ユーザ毎の1日の合計トラフィックの平均値である。 Z は、集合の上位に位置

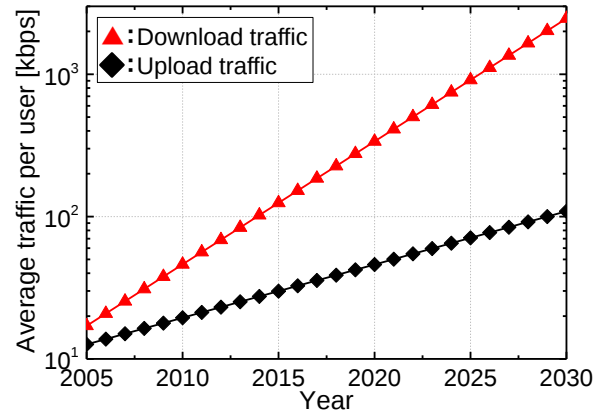
する確率変数である。 n は、1本のリンクに集線されるユーザ数である。ユーザ毎の1日の合計トラフィックの平均値を $\alpha \bar{x}$ とすると、標準偏差は平均値に比例するため、ユーザ毎の1日の合計トラフィックの分散値は $\alpha^2 \cdot \sigma_U$ となる。次に、リンク毎の時間平均トラフィックの 95 パーセンタイル値と 99.5 パーセンタイル値を算出する。時間平均トラフィックの 95 パーセンタイル値とは、全リンクの内の 95 % のリンクのトラフィック要求は、前述の 95 パーセンタイル値のトラフィック要求以下であり、且つ、全リンクの内の 5 % のリンクのトラフィック要求は、前述の 95 パーセンタイル値のトラフィック要求以上であることを示す。さらに、時間平均トラフィックの 99.5 パーセンタイル値とは、全リンクの内の 99.5 % のリンクのトラフィック要求は、前述の 99.5 パーセンタイル値のトラフィック要求以下であり、且つ、全リンクの内の 0.5 % のリンクのトラフィック要求は、前述の 99.5 パーセンタイル値のトラフィック要求以上であることを示す。95 パーセンタイル値、及び、99.5 パーセンタイル値は、式(2-4)中の Z が、1.65、及び、2.58 に相当する。

続いて、図 2-5 は、時間平均トラフィックの予測結果を示している。図 2-5 (a) は、ユーザ毎の平均トラフィックを示す。図 2-5 (a) より、1 ユーザの平均トラフィックは、上り、及び、下りで、それぞれ、年率 9 %、及び、年率 22 % 増加している。従って、1 ユーザの平均トラフィックは、2030 年に、上り、及び、下りで、それぞれ、109 kbps、及び、2.5 Mbps となる。

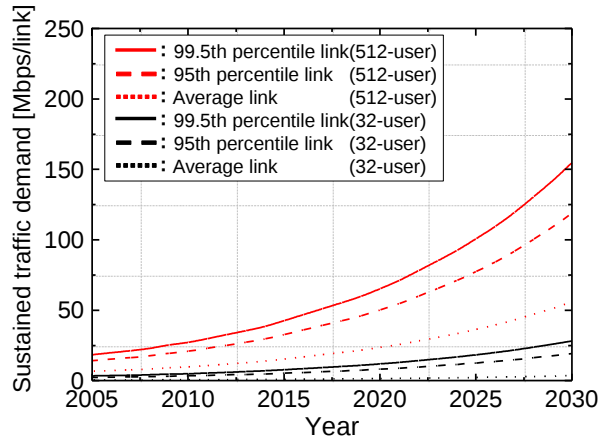
図 2-5 (b)、及び、図 2-5 (c) は、それぞれ、上りリンク、及び、下りリンクの時間平均トラフィックの予測結果を示している。これらは、式(2-4)に基づいて単位 bytes/day で算出し、さらに、トラフィックが時間変動しないと仮定して、単位を bits/sec に変換した。一例として、1 リンクあたりの集線ユーザ数を 32、または、512 とした。図 2-4 において、 $P_1 \times P_2$ 、及び Q が、それぞれ、32、及び、16 の場合、32 ユーザの時間平均トラフィックは OSU 毎のトラフィックを示し、512 ユーザの時間平均トラフィックは L2SW 毎のトラフィックを示す。

図 2-5 (b) の 2030 年の予測結果より、512 ユーザの上り時間平均トラフィックの 99.5 パーセンタイル値は 154 Mbps であった。更に、32 ユーザ、及び、512 ユーザ集線リンクの上り時間平均トラフィックの 99.5 パーセンタイル値は、それぞれ、平均値の 8.07 倍、及び、2.77 倍であった。一方で、図 2-5 (c) の 2030 年の予測結果より、512 ユーザの下り時間平均トラフィックの 99.5 パーセンタイル値は 2.04 Gbps であった。更に、32 ユーザ、及び、512 ユーザ集線リンクの下り時間平均トラフィックの 99.5 パーセンタイル値は、それぞれ、平均値の 3.48 倍、及び、1.62 倍であった。図 2-5 (b) と (c) より、99.5 パーセンタイルリンク、及び、平均リンクのトラフィック比は、年度が変わっても変化しなかった。さらに、1 リンクの集線ユーザ数が増えるに従って、統計多重効果が働くため、512 ユーザ集線リンクのほうが、32 ユーザ集線リンクに比べて、99.5 パーセンタイルリンクと平均リンクのトラフィック要求の比率は小さくなった。

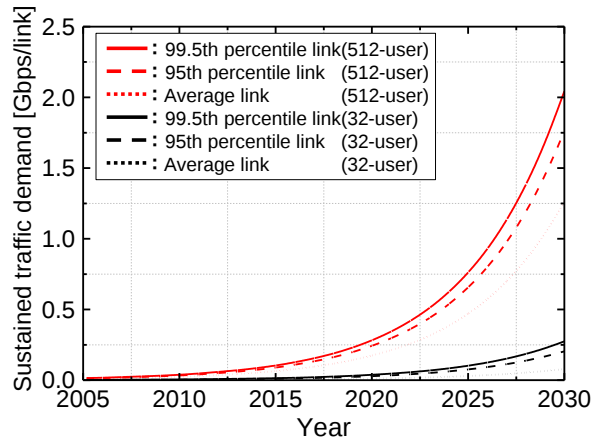
これ以降、99.5 パーセンタイルリンクを混雑リンクと定義する。測定値から予測したユーザ要求の分布を考慮すると、512 ユーザを集線する混雑リンクの時間平均トラフィックは、平均リンクのトラフィック要求に比べて最大 2.77 倍大きくなった。この結果より、複数の集線リンク間で負荷を分散する機能をシステムに搭載し、混雑リンクを緩和する動的負荷分散制御をアクセスネットワークに適用することで、リンク毎の時間平均トラフィックのばらつきを考慮し、混雑リンクにおいても、十分なサービス品質を保証してユーザを満足させることができる。仮に、トラフィック負荷を完全に分散できたとすると、ネットワークオペレータは、平均リンクのトラフィック要求と等しい総帯域となるアクセスシステムを構築すればよく、必要なシステム総帯域を削減することができる。



(a)



(b)



(c)

図 2-5 時間平均トラフィックの予測結果

(a) ユーザ毎の平均トラフィック, (b) リンク毎の上り時間平均トラフィック, (c) リンク毎の下り時間平均トラフィック

2-4 予測トラフィック要求量における高速光アクセスネットワーク構成

2-3-4 に示した集線リンクにおける時間平均トラフィックの予測より、512 ユーザを集線するリンクの 2030 年の混雑リンクにおけるトラフィック要求は、上り及び下りで、それぞれ、154 Mbps 及び 2.04 Gbps であった。また、512 ユーザを集線するリンクの 99.5 パーセンタイル混雑リンクの上り及び下りの時間平均トラフィックは、平均リンクに比べて、2.77 倍及び 1.62 倍大きかった。従って、負荷分散を行うリンク数が十分大きく、負荷分散によって複数リンク間のトラフィック負荷の偏りが完全に解消されると仮定すると、512 ユーザを集線するリンクの 2030 年における時間平均トラフィックは、上り及び下りで、それぞれ、 $154 / 2.77 = 55.6$ Mbps 及び $2.04 / 1.62 = 1.26$ Gbps となることが予想される。

本節では、2030 年におけるトラフィック予測結果に基づいて、フォトニックアグリゲーションによる高速光アクセスネットワーク構成例を検討する。従来の一般的な構成において TDM-PON と L2SW の 2 段階の集線構成で 1 リンクあたり 512 ユーザの集線を行っていたと仮定すると、提案するフォトニックアグリゲーションによる高速光アクセスネットワークにおいて、1 台の OSU が収容するユーザ数は 512 となる。トラフィック予測結果より、1 台の OSU の要求帯域は、上りで 154 Mbps、下りで 2.04 Gbps である。従って、現状で標準化が完了している 10G-EPON、及び、NG-PON2 といったラインレート 10G 級の PON システムをフォトニックアグリゲーションを用いた高速アクセスネットワークへ適用することで、2030 年における要求トラフィックレートを十分達成可能である。

更に、波長可変型 WDM/TDM 技術を用いた NG-PON2 は、ONU 毎に送受信波長を変更することで、収容先 OSU を変更できる[11]。この波長可変機能を用いた NG-PON2 の一つの機能は、複数 OSU 間の負荷分散である[12]。従って、複数 OSU 間で負荷分散し、複数 OSU 間の負荷の偏りを完全に解消することができると仮定すると、1 台の OSU の要求帯域は、上りで 55.6 Mbps、下りで 1.26 Gbps に低減することができる。

図 2-6 にフォトニックアグリゲーションを波長可変型 WDM/TDM-PON へ適用した場合の高速光アクセスネットワーク構成例を示す。各 OSU はエッジルータの入出力ポートと 1 対 1 で直接接続され、PON はエッジルータのみを介してコアネットワークと接続される。PON システムは、収容局内に設置された OSU が、収容局内に設置された光集線ノード（PA : Photonic Aggregator）と収容局所外に設置されたスプリッタを介して接続する複数の ONU を、波長可変型 WDM/TDM 技術により集線している。ONU 内の光送受信器は一波長を割り当てられ、同一波長を割り当てられた OSU と通信し、論理接続を確立する。

尚、提案するアクセスネットワーク構成では、従来構成において L2SW が実現していた集線機能と冗長機能を PON 区間の PA へ移行することで L2SW を不要化する。更に、PON 区間の集線比を拡大することで、OSU 数を従来構成で必要であった $K \times Q$ 台

から、提案構成では K 台へ削減することができる。

このようなアクセスネットワーク構成を実現するためには、従来構成と同等のシステム要件を満たす PA 構成を省電力で構成できるかどうか重要であり、PA 構成を第 3 章で検討する。加えて、複数 OSU 間の負荷を分散するような OSU への ONU 割当を行う動的負荷分散技術を第 4 章で検討する。続いて、フレームロスなしで ONU 毎に収容先 OSU を変更する高速波長切替技術を第 5 章で検討する。

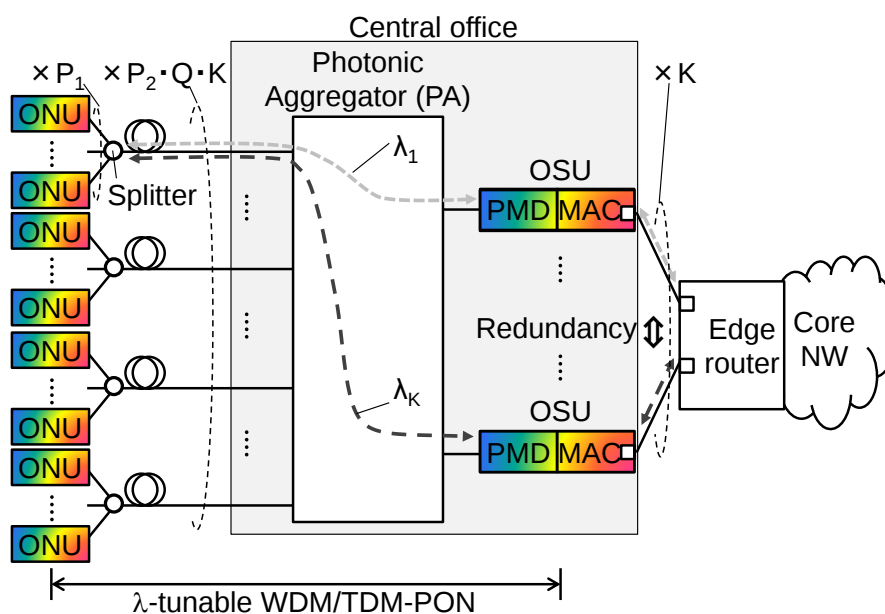


図 2-6 フォトニックアグリゲーションを波長可変型 WDM/TDM-PON へ適用した場合の高速光アクセスネットワーク構成

2-5 本章のまとめ

本章では、将来アクセスネットワークにおいて課題となる消費電力、ユーザ間公平性に対して、フォトニックアグリゲーションによるアーキテクチャを検討した。消費電力に関するアーキテクチャの設計指針としては、サービス優先制御・ユーザ間帯域公平制御を DBA のみで実現することで、L2SW 内のユーザ毎のバッファ処理を不要化して L2SW の消費電力を削減することができるような、3 通りのアプローチとして、光集線、電気集線、光・電気多段集線を提案した。次に、ユーザ間公平性に関するアーキテクチャの設計指針としては、ONU とコア/メトロネットワークとの間におけるスイッチングによりアクセスネットワーク内経路を可変とすることができるような、2 通りのアプローチとして、光スイッチング、電気スイッチングを提案した。最後に、省電力性、信頼性、ユーザ間公平性に加え、アクセスネットワークに強く求められる経済性の 4 つの観点から比較し、最適なアクセスネットワークアーキテクチャとして、光集線と光スイッチングの組み合わせによるアーキテクチャを決定した。

続いて、将来のアクセスネットワークにおける集線リンクのトラフィック要求を明らかにするために、統計データに基づいたトラフィック予測手法を提案した。提案した手法は、測定されたトラフィックデータの統計量から、集線リンクにおける時間平均トラフィックを抽出した。2030 年における時間平均トラフィックの予測結果から、512 ユーザを集線する 99.5 パーセンタイルリンクのトラフィック要求は、上り、及び、下りで、それぞれ、154 Mbps、及び、2.04 Gbps であった。更に、複数 OSU 間で動的負荷分散を行い、且つ、OSU 数が十分大きい場合に各 OSU に求められる帯域は、上りで 55.6 Mbps、下りで 1.26 Gbps と低減できることを明らかにした。従って、ラインレート 10G 級であり、更に、ONU の収容先 OSU を変更することで動的負荷分散を実現できる波長可変型 WDM/TDM-PON へフォトニックアグリゲーションを適用することで、将来の広帯域化要求に十分応えることができることを確認した。

2-6 参考文献

- [1] J. Nielsen, "Nielsen's law of internet bandwidth," Available: <https://www.nngroup.com/articles/law-of-bandwidth/>
- [2] Cisco, "Cisco visual networking index: forecast and methodology, 2013–2018," June 2014, http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/ipngn-ip-next-generation-network/white_paper_c11-481360.pdf, and interactive tool http://www.cisco.com/web/solutions/sp/vni/vni_forecast_highlights/index.html.
- [3] E. Harstead and R. Sharpe, "Future fiber-to-the-home traffic demands favor time division multiplexing passive optical networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 50, no. 11, pp. 218-223, Nov. 2012.
- [4] E. Harstead, and R. Sharpe, "Forecasting of access network traffic demands for aggregated subscribers using monte carlo methods," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 53, no. 3, pp. 199-207, Mar. 2015.
- [5] J. Segarra, V. Sales, and J. Prat, "Access services availability and traffic forecast in PON deployment," in *Proc. ICTON*, Stockholm, 2011, Tu.A6.4.
- [6] R. Sánchez, J. A. Hernández, J. M. García, and D. Larrabeiti, "Provisioning 1 Gb/s symmetrical services with next-generation passive optical network technologies," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 54, no. 2, pp. 72-77, Feb. 2016.
- [7] Ministry of Internal Affairs and Communications, "Changes in the number of broadband subscribers" February 1, 2016 (in Japanese). Available: <http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h25/html/nc245210.html>
- [8] Ministry of Internal Affairs and Communications, "Statistics of Internet traffic in Japan" February 1, 2016 (in Japanese). Available: http://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01kiban_04_02000098.html
- [9] Internet Initiative Japan, "Broadband traffic report" February 2, 2016 (in Japanese). Available: <http://www.iiij.ad.jp/company/development/report/iir/028.html>
- [10] K. Cho, K. Fukuda, H. Esaki, and A. Kato, "Observing slow crustal movement in residential user traffic," in *Proc. CoNEXT*, New York, 2008, No. 12.
- [11] J. Kani, "Enabling Technologies for Future Scalable and Flexible WDM-PON and WDM/TDM-PON Systems," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, Vol. 16, No. 5, September/October 2010.
- [12] K. Asaka., "Consideration of Tunable Components for Next-Generation Passive

Optical Network Stage 2,” IEEE J. Lightw. Technol., Vol. 33, no. 5, p. 1072, 2015.

第3章 光集線ノード構成技術

3-1 はじめに

第2章では、従来の一般的なアクセスネットワークにおいて L2SW が実現していた集線機能と冗長機能を PON 区間へ移行する波長可変型 WDM /TDM-PON[1]を用いたフォトニックアグリゲーションを提案した。提案技術では、従来構成における L2SW の機能を代替する光集線ノード（PA : Photonic Aggregator）を PON 区間に配置する。更に、アクセスシステムでは、伝送距離の異なる複数の ONU を 1 台の OSU で収容するため、最大伝送距離だけでなく、最小伝送距離も含めて、従来構成と同等のカバーエリアを保つことができる PA 構成である必要がある。そこで、本章では、従来構成における L2SW の機能を代替し、且つ、従来構成と同等のカバーエリアを確保しつつ、省電力効果が最大となる PA 構成を抽出し、フォトニックアグリゲーションによる省電力効果を明らかにする[2, 3]。

本章の構成は以下の通りである。まず 3-2 にて、PA の要求条件を提示する。3-3 では、それぞれ、3-2 で挙げた要求条件である、集線・波長振分機能の実現、従来構成と同等のカバーエリアの確保、及び、省電力効果が最大となる PA の構成を明らかにする。

3-4 では、3-3-3 で明らかにした PA 構成を用いた集線部分の総消費電力を算出し、省電力効果を示す。最後に 3-5 を本章のまとめとする。

3-2 光集線ノードに求められる条件

まず、図 2-4 に示した TDM-PON をベースとした一般的なアクセスネットワークアーキテクチャにおいて、L2SW が実現していた集線機能、及び、冗長機能を、図 2-6 に示したフォトニックアグリゲーションを用いた高速アクセスネットワークアーキテクチャにおいて、PON 区間に移行するために、PA にはそれぞれ、集線機能、及び、波長振分機能が求められる。以下に説明する。

(i) 集線・波長振分機能の実現

PA は、従来構成の収容局内で行っていた集線比と同等の集線比を達成する必要がある。そこで、PA は、集線比 $P_2 \times Q$ を達成するために、OSU 側のポート数が ONU 側のポート数の $1/(P_2 \times Q)$ 倍である構成でなければならない。加えて、提案するアクセスネットワーク構成では、PON の集線比の拡大により、従来構成で L2SW-エッジルータ間のリンク断に対して要求された高い信頼性が、OSU-エッジルータ間のリンク断に対して求められる。そこで、OSU-エッジルータ間のリンク断が発生した場合に、ONU と OSU 間の論理接続を変更することで、正常なリンクへ経路を切り替えて通信を確保する必要がある。従って、PA は信号光波長に応じて、入力ポートと出力ポートの対応関係を変更できる構成でなければならない。

前記の条件(i)は、PON 区間に新たな光デバイスを追加することで実現できるが、新たな光デバイスの追加は通常、損失を増加させる。そこで、この損失増加による受信信号の SNR(Signal to Noise Ratio)の劣化を補償するために、PA 内に光増幅器を配置する。光増幅器の配置により、PA 構成に追加される条件を以下に示す。

(ii) カバーエリアの確保

一般的に光増幅器は損失限界、過負荷限界、そして、サージ限界による最少、または、最大伝送距離の制限を有する。光増幅器を内部に配置した PA を PON 区間に追加した場合も、PON システムは従来構成と同等の最小伝送距離から最大伝送距離までのカバーエリアを確保できる構成でなければならない。

(iii) 省電力効果の最大化

光増幅器の追加は消費電力が増加する要因となりうる。しかし、光増幅器の追加による消費電力の増加量が、L2SW の不要化と OSU 数の低減による消費電力の削減量よりも小さければ、集線部分の省電力化は可能である。提案構成による省電力効果を最大とするために、PA 内に用いる光増幅器の個数が最小となるような構成でなければならない。

次節では、以上で述べた要求条件である、集線・波長振分機能の実現、カバーエリアの確保、そして、省電力効果の最大化を満たす PA 構成を検討する。

3-3 光集線ノード構成の検討

3-3-1 集線・波長振分機能を実現する構成の検討

本項では、3-2 節で述べた(i)集線・波長振分機能の実現を満たす PA 構成を光デバイスの組み合わせから全て列挙し、それぞれの組み合わせにおける構成の具体化を行う。更に、各構成における信号伝送状態を示しながら、集線・波長振分機能の実現方法を説明する。

まず、集線機能を実現する光デバイスはスプリッタが考えられる。更に、波長振分機能を実現する光デバイスはスプリッタとフィルタの組み合わせ、もしくは $K \times K$ ポート周回性 AWG (Arrayed Waveguide Grating) が考えられる。また、各機能の配置場所の順番は、上り信号光の伝搬方向に従って集線機能の後に波長振分機能を配置する順番と、上り信号光の伝搬方向に従って波長振分機能の後に集線機能を配置する順番の 2 通りが考えられる。

表 3-1 に光デバイスの組み合わせを示す。表 3-1 より、光デバイスの組み合わせは、全部で(a)、(b)、(c)の 3 通りである。尚、表 3-1 の斜線部は、フィルタにより波長毎に信号を分離した後で、再度スプリッタで集線する構成となってしまうため、PA の出力において波長に応じて信号を振り分ける波長振分機能を実現できないことから除外する。

表 3-1 光デバイスの組み合わせ

Optical device		Layout for upstream	
Aggregation function	Wavelength-routing function	Aggregation → Wavelength-routing	Wavelength-routing → Aggregation
Splitter	Splitter and filter	(a)	
	Cyclic AWG	(b)	(c)

表 3-1 の(a)、(b)、及び(c)で示した光デバイスの組み合わせにおけるアクセスネットワーク構成を、それぞれ図 3-1 (a)、(b)、及び(c)に示す。アクセスネットワーク構成は、以下 2 点を想定して決定した。

1 点目は、上り波長帯と下り波長帯を分離する WDM フィルタを PA の ONU 側ポートに備え、例えば、上りは図 3-1 (a)、下りは図 3-1 (b)というように、上りと下りで別々の最適構成を選択できるようにしたことである。このように上り下り別々にすると、光デバイスのコストが増大することが懸念されるが、消費電力の削減を重視し、最も低消費電力になる PA 構成とするため、上り下り別々に最適化できる構成としている。

2 点目は、集線機能を実現するために PA 内に用いるスプリッタを、上り信号の伝搬方向に従って N 分岐スプリッタと M 分岐スプリッタの 2 段とすることである。このように 2 段とすることで、後の 3-3-2 と 3-3-3 で検討する光増幅器の雑音の影響と消費電力を決める光増幅器数を変更して評価できるようにする。N 分岐と M 分岐のスプリ

ットは全体の集線比($N \times M$)が一定となるようにし、且つ、 N 分岐スプリッタは、上り信号光の伝搬方向に従って、WDM フィルタのすぐ後に配置するとした。

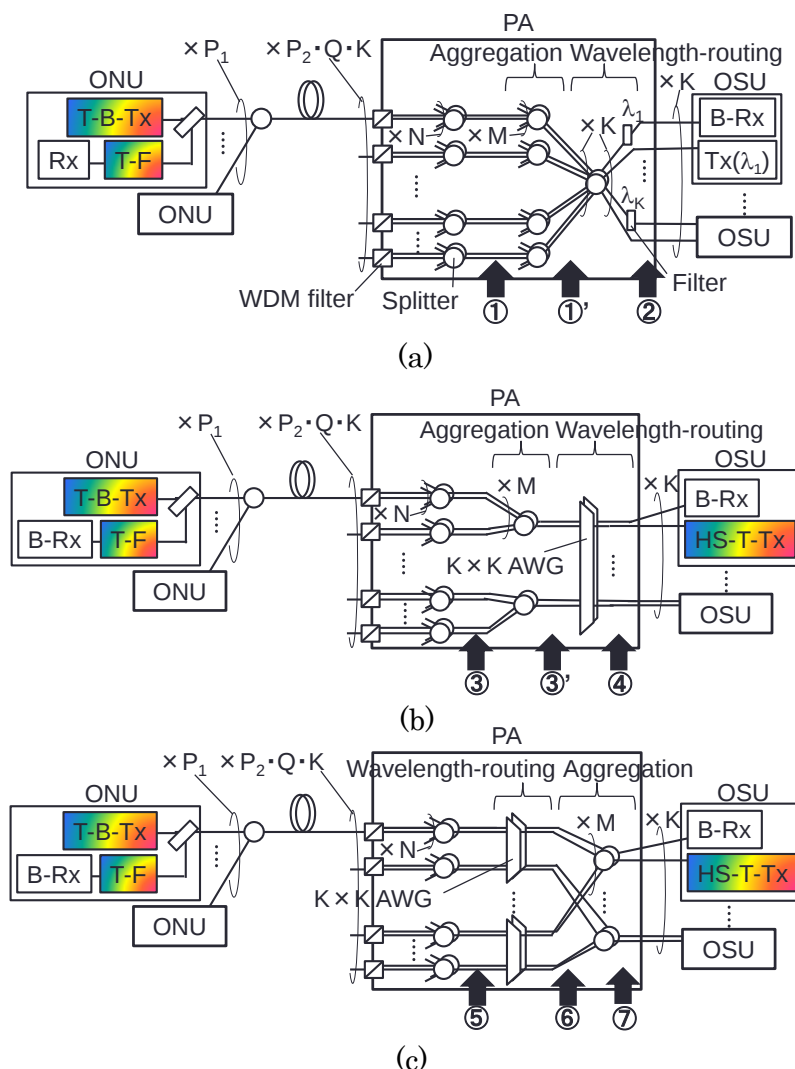


図 3-1 PA 構成

図 3-1(a)の構成は、PA は WDM フィルタ、 N 分岐スプリッタ、 M 分岐スプリッタ、 K 分岐スプリッタ、そして、それぞれ異なる波長を透過する波長フィルタにより構成される。ONU は、波長可変バースト送信器 (T-B-Tx: Tunable Burst Transmitter)、波長可変フィルタ (T-F: Tunable Filter)、そして、光受信器 (Rx: Receiver) で構成される。OSU は、バースト光受信器 (B-Rx: Burst Receiver) と OSU 毎に異なる固定波長に設定された光送信器 (Tx: Transceiver) で構成される。まず、ONU 内 T-B-Tx から送信された上り信号は、PA 通過後、OSU 内 B-Rx で受信される。ONU 内 T-B-Tx の送信波長を変更することで、PA 内で信号が透過する波長フィルタが変わり、PA の出力ポートが変わることで、ONU-OSU 間の論理接続を変更して収容 OSU を変更できる。一方、OSU 内 Tx から送信された下り信号は、PA 通過後、ONU 内 T-F で 1 波長のみ

が透過され、Rx で受信される。ONU 内 T-F の透過波長を変更することで、ONU-OSU 間の論理接続を変更できる。

図 3-1 (b)の構成は、PA は WDM フィルタ、N 分岐スプリッタ、M 分岐スプリッタ、そして、 $K \times K$ ポート周回性 AWG により構成される。ONU は、T-B-Tx、T-F、そして、B-Rx で構成される。OSU は、B-Rx と高速波長可変送信器 (HS-T-Tx: High-Speed Tunable Transceiver) で構成される。まず、ONU 内 T-B-Tx から送信された上り信号は、PA 通過後、OSU 内 B-Rx で受信される。ONU 内 T-B-Tx の送信波長を変更することで、PA 内の周回性 AWG の出力ポートが変わり、PA の出力ポートが変わることで、ONU-OSU 間の論理接続を変更して収容 OSU を変更できる。一方、OSU 内 HS-T-Tx から、宛先の ONU に届く波長を用いて送信された下り信号は、PA 通過後、ONU 内 T-F で 1 波長のみが透過され、B-Rx で受信される。ONU 内 T-F の透過波長を変更することで、ONU-OSU 間の論理接続を変更できる。ただし、図 3-1 (b)の構成は PA 内に周回性 AWG を有するため、下り信号を宛先の ONU へ送信するためには、OSU にて送信先の ONU 毎に信号光波長を変更する必要がある。そこで、OSU 内の HS-T-Tx は信号の宛先毎に高速に波長を変更しなければならない[4]。

図 3-1 (c)の構成は、PA は WDM フィルタ、N 分岐スプリッタ、 $K \times K$ ポート周回性 AWG、そして、M 分岐スプリッタにより構成される。ONU は、T-B-Tx、T-F、そして、B-Rx で構成される。OSU は、B-Rx と HS-T-Tx で構成される。上り信号伝送と下り信号伝送は、上記で述べた図 3-1 (b)の構成における信号伝送と等しい。

3-3-2 カバーエリアを確保する構成の検討

本節では、3-2 節で述べた(ii)カバーエリアの確保を満たす PA 構成を以下の順序で全て列挙する。まず、前提とするシステム規模を定め、PA 内における光増幅器の挿入場所を列挙する。また、上り信号の受信感度劣化を改善するために光増幅器に適用する自動レベル制御について説明する。次に、ONU-OSU 間の損失を評価しやすいように伝送路と PA 内の光デバイスの損失をモデル化し、光増幅器の適用領域を定式化する。最後に、計算に用いるパラメータを定義した後に、スプリッタの分岐比(N、M)の組み合わせに応じた各 PA 構成の損失を算出し、光増幅器の適用領域内となるスプリッタの分岐比(N、M)の組み合わせを、光増幅器の配置場所毎に明らかにする。

3-3-2-1 前提条件 1：光増幅器の挿入場所

まず、図 3-1 (a)、(b)、(c)の各構成において、光増幅部の挿入場所を全て列挙する。本節の後半で述べるが、想定するシステム規模に応じて、光増幅部内に用いる光増幅器の台数は、一台、もしくは複数台のどちらにすべきなのかを検討する必要がある。光増幅器の台数が一台または複数台のどちらの場合も合わせて、光増幅を行う機能ブロックを光増幅部と呼ぶ。図 3-1(a)における光増幅部の挿入場所は、上り信号光の伝搬方向に従って、集線機能部の前である①、集線機能部と波長振分機能部の中間である①'、及び、波長振分機能部の後である②が考えられる。ここで、①'は①における $M=1$ の場合と同じ構成である。図 3-1 (b)における光増幅部の挿入場所は、③、③'、④が考えられるが、③'は③における $M=1$ の場合と同じである。図 3-1 (c)における光増幅部の挿入場所は、⑤、⑥、⑦が考えられる。従って、3-3-1 節で明らかにした光デバイスの配置構成に対して、光増幅部の挿入場所を考慮すると、考えられる PA 構成は①から⑦の全部で7通りとなる。

続いて、PA 構成①から⑦に対して光増幅部の構成を決めるために、図 3-1 に示したシステムの規模を決めるパラメータを表 3-2 のように定義する。表 3-2 で示した P_1 、 P_2 、 Q の場合、従来構成において 1 台の OSU と通信する ONU 台数は、 $P_1 \times P_2 = 32$ である。一方で、提案構成において 1 台の OSU と通信する ONU 台数は、 $P_1 \times P_2 \times Q = 512$ である。従って、提案構成では、1 台の OSU で従来構成よりも多数の ONU を収容する必要がある。ただし、PON 内で個々の ONU を識別するために用いる LLID(Logical Link ID)は 15 ビットであり 32768 台の ONU に相当すること、512 台の ONU のディスカバリが可能なディスカバリ手法が提案されていること[5]、そして、512 台の ONU に一括で上り帯域を割り当てる DBA (Dynamic Bandwidth Allocation) 手法が提案されていること[6]、これらの 3 点より、1 台の OSU で 512 台の ONU を収容するためのメディアアクセス制御の実現は可能である。

表 3-2 システム規模を決定するパラメータ

Parameter	Value
P1	8
P2	4
Q	16
K	64

また、上記で述べたように LLID を用いて個々の ONU を識別できる最大 ONU 数は 32768 であり、且つ、1 台の OSU で 512 ユーザを収容するため、OSU 数 K は $32768/512=64$ に設定した。従って、波長可変型 WDM/TDM-PON において、用いる波長数も 64 とした。このように、最大収容 ONU 数が非常に大規模な広域アクセスネットワークを想定する。

上記で述べたパラメータを基に、光増幅部の挿入場所毎に、用いる光増幅器の台数は、一台、もしくは複数台のどちらにすべきなのかを検討する必要がある。なぜなら、光増幅器の挿入場所によって、多波長の信号光が同時に光増幅器に入力し、且つ、同時に入力する波長数が 1 から 64 まで時間的に変化するからである。この場合、光増幅器の入力光強度差は 18 dB となり、一般的な光増幅器では、このように広い範囲の入力光強度に対して一定の利得を得ることは難しい。そこで、光増幅器に同時に入力する信号数に関わらず、利得が時間的に変化せず一定の利得を得るために、光増幅器へは単一波長の信号が入力される構成とした。以降に、図 3-1 中の光増幅器の挿入場所①から⑦に対して、光増幅部の構成を順に説明する。

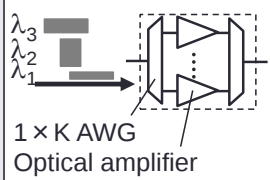
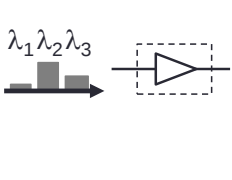
図 3-1 (a)の①では、上り下り用の両構成ともに、多波長の信号光が同時に入力するため、 $1 \times K$ ポートの AWG を用いて波長毎に信号を分離し、各ポートからの出力をそれぞれ光増幅する。従って、波長数と同数の光増幅器を用いる。一方、②の挿入場所では上り下り用の両構成ともに、光増幅部へは、同一の OSU へ入力、または同一の OSU から出力される単一波長の TDM 信号が入力され、多波長の信号光が同時に入力することはないため、ポート毎に単一の光増幅器を用いる。

図 3-1 (b)の③の挿入場所では、上り下り用の両構成ともに、多波長の信号光が同時に入力するため、波長数と同数の光増幅器を用いる。一方、④の挿入場所では、上り下りの両構成ともに、光増幅部へは、同一 OSU へ入力、または同一 OSU から出力される TDM 信号が入力され、多波長の信号光が同時に入力することはないため、ポート毎に単一の光増幅器を用いる。

図 3-1 (c)の⑤の挿入場所では、上り下り用の両構成ともに、多波長の信号光が同時に入力するため、波長数と同数の光増幅器を用いる。一方、⑥、⑦の挿入場所では、上り下りの両構成ともに、同一 OSU から入力または出力される TDM 信号が入力され、多波長の信号光が同時に入力することはないため、ポート毎に単一の光増幅器を用いる。

表 3-3 に挿入場所毎の光増幅部の構成をまとめた。表 3-3 より、光増幅部の挿入場所①～⑦それぞれに対して、1通りの構成を決定した。

表 3-3 光増幅部の構成

	Amplifier type1	Amplifier type2
	 1×K AWG Optical amplifier	
①	●	
②		●
③	●	
④		●
⑤	●	
⑥		●
⑦		●

3-3-2-2 前提条件 2：自動レベル制御の適用

一般的に光増幅器を用いた光伝送システムでは、光増幅器から放出される自然放出光（ASE: Amplified Spontaneous Emission）雑音の影響で、受信信号の SNR が劣化する。特に、光増幅器-受信器間の損失が小さい場合、信号光-ASE 間ビート雑音が受信感度に支配的となり、ASE の影響で受信信号の SNR が劣化する。一方で、光増幅器-受信器間の損失が大きい場合は、ASE の減衰が大きいことから、受信器の回路雑音が受信感度に支配的となり、ASE の影響による受信信号の SNR の劣化は無視できる。

図 4-1 で示した提案構成では、PA を収容局内に設置することを想定しているため、上り通信は光増幅器-受信器間に伝送損失を含まず、光増幅器-受信器間の損失が小さい。したがって、ASE の影響で受信信号の SNR が劣化する。図 3-2 (a)に ASE の影響を示す。上り通信では、ASE の影響で受信信号の SNR が劣化する。更に、スプリッタにより複数の光増幅器から放出される ASE が足し合わされるため、ASE 強度が強くなり、受信信号の SNR が大幅に劣化するという課題が生じると予想される。

この課題に対し、PA 内に自動レベル制御（ALC :Automatic Level Control）機能付き光増幅器を適用することとする。ALC とは、入力した信号光強度に応じて、高速に光減衰量を制御する技術である[7]。図 3-2(b)に示すように、ALC を用いて、上りバースト信号通過時以外は光減衰量を最大とすることで、ASE が足し合わされる影響を無視できるほど小さくできる。加えて、受信器の最大受光強度を超えるバースト信号が入力される場合は、ALC を用いて信号光強度を減衰させることで、最大受光強度以上の信号が受信器へ入力することを回避することもできる。

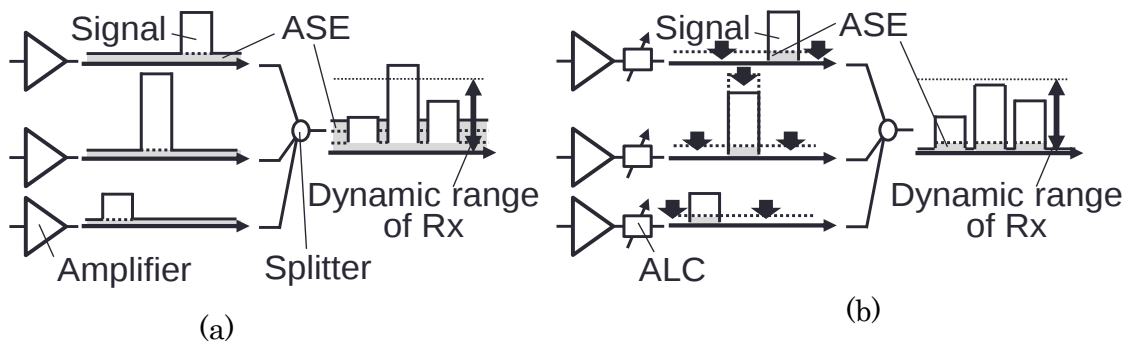


図 3-2 光増幅器における ALC の効果

(a) ALC なし (b) ALC あり

3-3-2-3 伝送路と光デバイスによる損失のモデル化

図 3-3 に、図 3-1(a)、(b)、(c)を統一して扱うための ONU-OSU 間の光損失モデルを示す。図 3-3 (a)は上り用構成のモデル、図 3-3 (b)は下り用構成のモデルである。図 3-3 (a)は、3-3-2-2 で述べたように ALC を適用することで、スプリッタ配下の複数の光増幅器から放出される ASE が足し合わされる影響を無視できる。そこで、複数ではなく、1 つの光増幅器を用いてモデル化した。

まず、PA の ONU 側ポートと光増幅器の間に挿入した複数の光デバイスを **Devices1**、光増幅器と PA の OSU 側ポートの間に挿入した複数の光デバイスを **Devices2** とした。

続いて、上り信号に対して、ONU から PA の ONU 側ポートまでの伝送損失と P_1 分岐スプリッタの損失の和、及び、PA の OSU 側ポートから OSU までの伝送損失を、それぞれ $L_{US,1}$ 、及び $L_{US,2}$ とした。更に、ONU から PA 内の光増幅器までの損失、及び、PA 内の光増幅器から OSU までの損失を、それぞれ L_{Tx-AMP} 、及び L_{AMP-Rx} とした。すなわち、上り構成において L_{Tx-AMP} 、及び L_{AMP-Rx} は、それぞれ、 $L_{US,1}$ と **Devices1** の損失の和、及び、**Devices2** の損失と $L_{US,2}$ の和である。

一方で、下り信号に対して、OSU から PA の OSU 側ポートまでの伝送損失、及び、PA の ONU 側ポートから ONU までの伝送損失と P_1 分岐スプリッタの損失の和を、それぞれ $L_{DS,1}$ 、及び $L_{DS,2}$ とした。更に、OSU から PA 内の光増幅器までの損失、及び、PA 内の光増幅器から ONU までの損失を、それぞれを L_{Tx-AMP} 、及び L_{AMP-Rx} とした。すなわち、下り構成において L_{Tx-AMP} 、及び L_{AMP-Rx} は、それぞれ、 $L_{DS,1}$ と **Devices2** の損失の和、及び、**Devices1** の損失と $L_{DS,2}$ の和である。

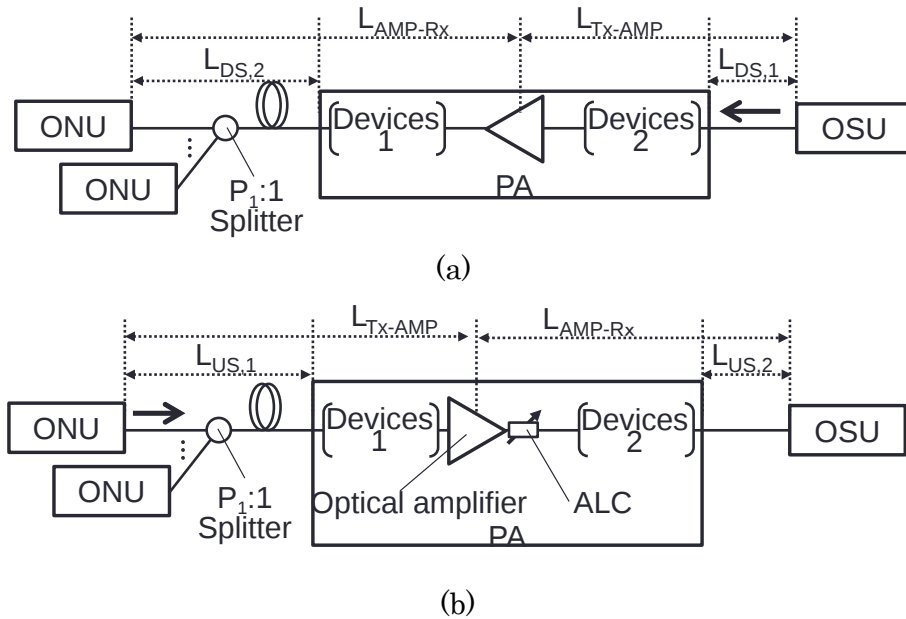


図 3-3 ONU-OSU 間の損失モデル
(a) 上り信号のモデル (b) 下り信号のモデル

3-3-2-4 光増幅器の適用領域の定式化

光増幅器の適用領域は、以下に示す 3 つの限界により決まる。1 つめは最小受信感度を満たす損失限界、2 つめは受信信号が最大受光強度を超えない過負荷限界、そして、3 つめは光サージが発生せずバースト信号の受信が可能であるサージ限界である。それぞれの計算式を順に導出する。

まず、損失限界を定式化する。損失限界とは、送信器の最小出力光強度の信号に対し、受信信号が定められた符号誤り率 (BER: Bit Error Rate) を満たすために伝送路中で許容される最大損失である。この限界は、受信信号の SNR によって決まる。図 3-3 における受信信号の SNR を、式(3-1)に示す[8]。損失限界は、式(3-1)中の SNR が決められた BER と等しくなる時の L_{Tx-AMP} と L_{AMP-Rx} の組み合わせによって求められる。 e は電荷素量、 η は量子効率、 h はプランク定数、 ν は信号光の周波数、 G 及び n_{sp} は光増幅器の利得及び反転分布パラメータ、 R は受信回路の負荷抵抗、 k はボルツマン定数、 T は絶対温度、 r は信号光の消光比の逆数、 P_s はマーク時の光強度、 Δf は ASE を除去するために挿入する光フィルタの透過帯域幅、 B は受信器の帯域である。 A と C は、信号光の論理がそれぞれマークとスペースの時の雑音電力であり、それぞれの式における第 1 項は信号光のショット雑音、第 2 項は ASE のショット雑音、第 3 項は信号光-ASE 間ビート雑音、第 4 項は ASE-ASE 間ビート雑音、第 5 項は受信回路の熱雑音を示す。

$$SNR = \frac{(2 \frac{e\eta}{h\nu} \frac{1}{L_{Tx-AMP}} G \frac{1}{L_{AMP-Rx}} (1-r)P_s)^2}{(\sqrt{A} + \sqrt{C})^2 B} \quad (3-1)$$

$$\begin{aligned} A = & 2e \frac{e\eta}{h\nu} \frac{1}{L_{Tx-AMP}} G \frac{1}{L_{AMP-Rx}} P_s + 2e^2 \eta (G-1) \frac{1}{L_{AMP-Rx}} Xn_{sp} \Delta f \\ & + 4e^2 \frac{1}{L_{Tx-AMP}} G \frac{1}{L_{AMP-Rx}} \frac{\eta^2 P_s}{h\nu} (G-1) \frac{1}{L_{AMP-Rx}} Xn_{sp} \\ & + 4 \left(e\eta (G-1) \frac{1}{L_{AMP-Rx}} Xn_{sp} \right)^2 \Delta f + \frac{2kT}{R} \\ C = & 2e \frac{e\eta}{h\nu} \frac{1}{L_{Tx-AMP}} G \frac{1}{L_{AMP-Rx}} rP_s + 2e^2 \eta (G-1) \frac{1}{L_{AMP-Rx}} Xn_{sp} \Delta f \\ & + 4e^2 \frac{1}{L_{Tx-AMP}} G \frac{1}{L_{AMP-Rx}} \frac{\eta^2 rP_s}{h\nu} (G-1) \frac{1}{L_{AMP-Rx}} Xn_{sp} \\ & + 4 \left(e\eta (G-1) \frac{1}{L_{AMP-Rx}} Xn_{sp} \right)^2 \Delta f + \frac{2kT}{R} \end{aligned}$$

次に、過負荷限界を定式化する。過負荷限界とは、想定する送信器の最大出力光強度 $P_{\max}$ において、受信器への入力光強度が、想定する受信器の最大受光強度以下となるために伝送路中で許容される最小損失である。この限界は、受信器における入力光強度によって決まる。受信器における入力光強度 P_{in} を式(2)に示す[8]。過負荷限界は、式(3-2)中の P_{in} が受信器の最大受光強度となる時の L_{Tx-AMP} と L_{AMP-Rx} の組み合わせによって決まる。式(3-2)の第1項は信号光強度、第2項は ASE 光強度を示す。

$$P_{in} = \frac{1}{L_{Tx-AMP}} G \frac{1}{L_{AMP-Rx}} P_{\max} + (G-1) \frac{1}{L_{AMP-Rx}} n_{sp} \Delta f h\nu \quad (3-2)$$

最後に、サージ限界を定式化する。バースト光信号を光ファイバ増幅器の利得飽和領域で増幅すると、バースト光信号のフレーム間隔と光ファイバ増幅器の利得応答時間がマイクロ秒オーダーと同程度であるため、バースト光信号の立ち上がりに光サージが発生する。このため、受信器ではバースト信号の立ち上がりにおいて、受信器が破損する恐れがある。そこで、サージ限界とは、想定する送信器の最大出力光強度 $P_{\max}$ において、光増幅器への入力光強度が光増幅器の利得飽和を起こさないために、伝送路中で許容される最小損失である。この限界は、光増幅器への入力光強度によって決まる。光増幅器への入力光強度 P_{AMP-in} を式(3-3)に示す[9]。サージ限界は、式(3-3)中の P_{AMP-in} が光増幅器の利得が劣化する信号光強度 P_{surge} となる時の L_{Tx-AMP} によって求められる。

$$P_{AMP-in} = P_{\max} - L_{Tx-AMP} \quad (3-3)$$

3-3-2-5 計算に用いるパラメータ

光増幅器は表 3-4 の特性で表される一般的な希土類添加光ファイバ増幅器（DFA: Doped Fiber Amplifier）の使用を想定する。表 3-4 に示すように、DFA の利得 G は、一般的な光増幅器の最大利得 30 dB、そして、29 dB、19 dB と設定した。その理由については、後の 3-3-2-6 で述べる。

表 3-4 DFA の特性

Quantity	Symbol	Value	Unit
Noise Figure	$NF(=2n_{sp})$	7	dB
Gain	G	30,29,19	dB
Surge power	P_{surge}	-11	dBm

また、PA 構成①～⑦に対して、PA の ONU 側ポートと光増幅器の間に挿入した複数の光デバイスである Devices 1 と、光増幅器と PA の OSU 側ポートの間に挿入した複数の光デバイスである Devices 2 の損失を表 3-5 に示す。表 3-5 の定式化において、フィルタ、及び、AWG の光損失は、それぞれ、1 dB、及び 5 dB とした。また、 N 分岐スプリッタの光損失は、接続損失も加えて、 $(10\log N + 0.5)$ dB とした。構成①②は上り信号のみが波長振分用のフィルタを通過するため、上り信号の損失は、下り信号に比べて 1 dB 増えるとして、表 3-5 の括弧内に示した。尚、スプリッタの分岐比(N 、 M)の組み合わせは、 $N \times M (=P_2 \times Q) = 64$ となる約数の組み合わせとする。

表 3-5 PA の各構成の損失

Conf.	Optical loss [dB]	
	Devices 1	Devices 2
①	$1 + 10\log N + 0.5 + 5$	$5 + 10\log M + 0.5 + 10\log K + 0.5(+1)$
②	$1 + 10\log N + 0.5 + 10\log M + 0.5 + 10\log K + 0.5(+1)$	0
③	$1 + 10\log N + 0.5 + 5$	$5 + 10\log M + 0.5 + 5$
④	$1 + 10\log N + 0.5 + 10\log M + 0.5 + 5$	0
⑤	$1 + 10\log N + 0.5 + 5$	$5 + 5 + 10\log M + 0.5$
⑥	$1 + 10\log N + 0.5 + 5$	$10\log M + 0.5$
⑦	$1 + 10\log N + 0.5 + 5 + 10\log M + 0.5$	0

続いて、光増幅器の適用領域の計算に用いた仮定を説明する。トランシーバ特性は 10G-EPON の標準である IEEE 802.3av に準拠するとし、表 3-6 の特性とした。尚、本検討では 10G-EPON とは異なる、例えば ONU 内に T-F を用いるトランシーバ構成が考えられるが、T-F の損失を考慮しても表 3-6 の特性を達成可能である[10]と考え、表 3-6 の特性を想定した。

表 3-6 10G-EPON システムのトランシーバ特性

		ONU	OSU
Tx	Average launch power (max)	9 dBm	5 dBm
	Average launch power (min)	4 dBm	2 dBm
	Extinction ratio (min)	6dB	6dB
Rx	Average receive power (max)	-10dBm	-6dBm
	Receiver sensitivity (min)	-28.5 dBm	-28dBm

表 3-6 のトランシーバ特性を参考に、 $L_{US,1}$ 、 $L_{US,2}$ 、 $L_{DS,1}$ 、 $L_{DS,2}$ を表 3-7 に示すように設定した。 $L_{US,1}$ 、及び、 $L_{DS,2}$ の最大値は、表 3-6 から導出される ONU-OSU 間で許容される上り、及び下りの最大損失である 32 dB 及び 30.5 dB から、4 分岐スプリッタの損失 6 dB を引いて、それぞれ、26 dB 及び 24.5 dB とした。一方で、 $L_{US,1}$ 、及び、 $L_{DS,2}$ の最小値は、表 3-6 の ONU-OSU 間で許容される上りと下りの最小損失 15 dB から、4 分岐スプリッタの損失 6 dB を引いて 9 dB とした。従って、 $L_{US,1}$ 、及び、 $L_{DS,2}$ の最大と最小の差は、それぞれ、17 dB、及び、15.5 dB である。加えて、PA と OSU は同じ収容局内に位置するとし、 $L_{US,2}$ 、及び、 $L_{DS,1}$ は 0 dB とした。

表 3-7 損失範囲

Loss budget	Min.loss	Max.loss	Max – Min
$L_{US,1}$	9 dB	26 dB	17 dB
$L_{US,2}$	0 dB		-
$L_{DS,1}$	0 dB		-
$L_{DS,2}$	9 dB	24.5 dB	15.5 dB

また、受信器の最小受信感度は FEC の使用を想定し、 $BER=10^{-3}$ 時の受信器への入力光強度とした。 $\eta=0.8$ 、 $\nu=193$ THz、 $R=700 \Omega$ 、 $T=300$ K、 $r=-6$ dB とした。B は伝送レート 10.315 Gbps に 0.75 を掛けて[11]、7.73 Gbps とした。更に、WDM/TDM-PON の波長間隔、及び、ASE を除去するために挿入する光フィルタの透過帯域幅 Δf は、それぞれ、50 GHz、及び、光受信器へ入力する信号光の光帯域幅と等しいとした。つまり、 Δf は 50 GHz に入力信号光の波長数を掛けた値とした。従って、上り用の、構成①②は OSU 内の B-Rx に 1 波長の信号が入力するため $\Delta f=50$ GHz、構成③～⑦は B-Rx に全波長の信号が入力するため $\Delta f=50 \cdot K$ GHz とした。下り用の構成①～⑦は、各 ONU において受信する 1 波長の信号のみを透過するため、 $\Delta f=50$ GHz とした。加えて、ONU 内 HS-T-Tx が送出するバースト信号のフレーム間隔は、数十ナノ秒[4]であるとした。

前記 HS-T-Tx の性能より、構成④⑥⑦の下りでは、各信号波長が異なるバースト信号が光増幅器を通過するが、バースト信号のフレーム間隔は、光サージが発生するフレーム間隔であるマイクロ秒オーダーに比べて短いため、サージ限界の考慮は不要とした。尚、構成①②の下りは、連続信号が光増幅器を通過し、バースト信号が通過しないため、

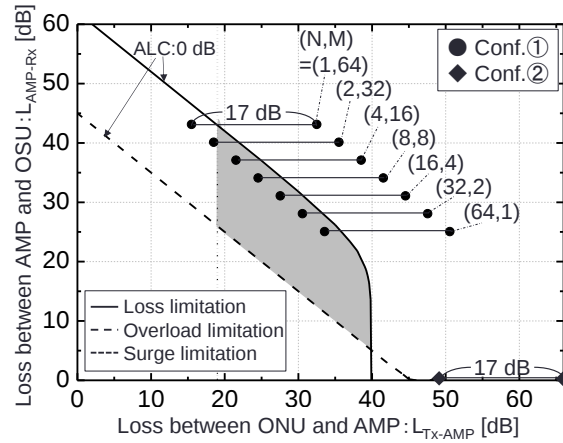
サージ限界の考慮は不要とした。

3-3-2-6 スプリッタの分岐比(N、M)の抽出

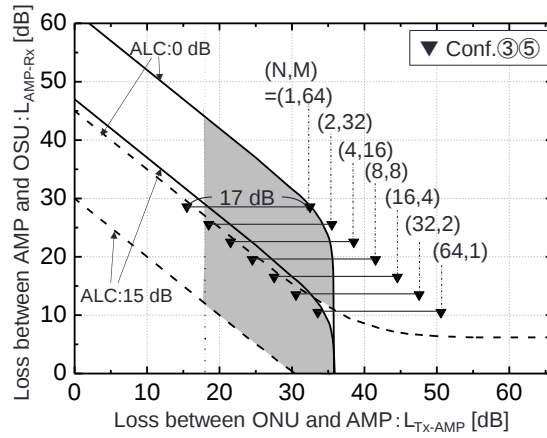
光増幅器の特性によって許容される L_{Tx-AMP} と L_{AMP-Rx} の範囲内に、スプリッタの分岐比(N、M)の組み合わせと、伝送距離によって変わる L_{Tx-AMP} と L_{AMP-Rx} の取りうる範囲が包含されるのであれば、従来構成と同等のカバーエリアを確保できる。本節では、上り構成、及び、下り構成に対して、その条件を満たすスプリッタの分岐比(N、M)の組み合わせを検討する。

初めに、上り構成について検討する。図 3-4 (a)、(b)、(c)の実線、破線、及び、点線に、それぞれ、式(1)に記載した損失限界、式(2)に記載した過負荷限界、及び式(3)に記載したサージ限界を示す。ONU-OSU 間に許容される L_{Tx-AMP} と L_{AMP-Rx} の範囲は、損失限界、過負荷限界、そして、サージ限界に囲まれた領域である。

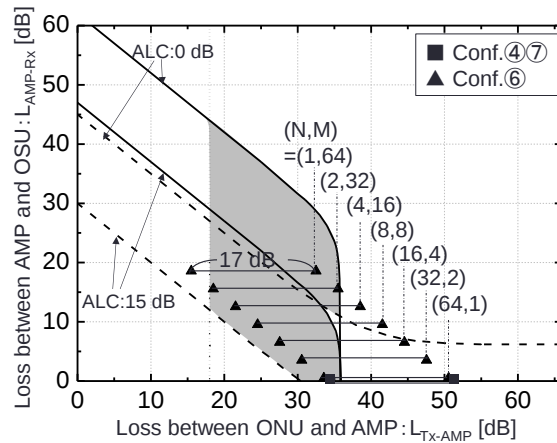
図 3-1 の構成①、構成②、構成③⑤、構成④⑦、及び、構成⑥における L_{Tx-AMP} と L_{AMP-Rx} をそれぞれ、図 3-4 (a)の記号●、図 3-4 (a)の記号◆、図 3-4 (b)の記号▼、図 3-4 (c)の記号■、及び、図 3-4 (c)の記号▲で示した。図 3-4 中の L_{Tx-AMP} は、伝送距離に応じて変化するため、伝送距離が最大と最小の点を記号で表示し、伝送距離によって変わる範囲を横線で示した。



(a)



(b)



(c)

図 3-4 上り信号に対する、光増幅器の適用領域と PA の各構成の損失

(a) $\Delta f=50$ GHz の時の適用領域と構成①②の損失, (b) $\Delta f=50 \cdot K$ GHz の時の適用領域と構成③⑤の損失, (c) $\Delta f=50 \cdot K$ GHz の時の適用領域と構成④⑥⑦の損失

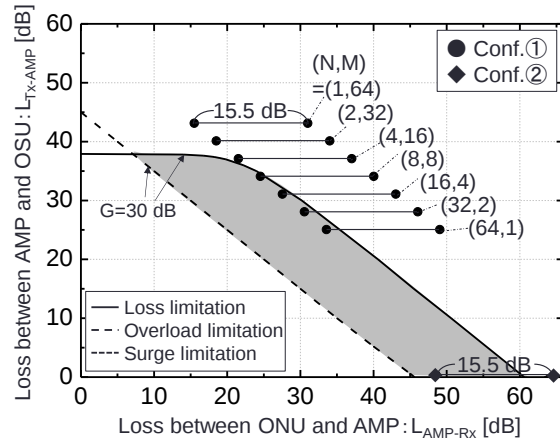
図 3-4 (a)では、伝送距離が最大の時の L_{TX-AMP} は損失限界外となる。一方で、図 3-4 (b)、(c)では、一部の(N、M)において伝送距離が最大の時の L_{TX-AMP} は損失限界内となるが、伝送距離が最小の時の L_{TX-AMP} は過負荷限界外となってしまう。そこで、図 3-4 (b)、(c)では、ALC による減衰量をバースト信号の入力光強度に対して 0 dB と 15 dB の 2 通りに設定することとした。

一例として、図 3-4 (c)に示す構成⑥において、(N、M)=(2, 32)の時を説明する。ALC による減衰量が 0 dB 且つ L_{TX-AMP} が 30 dB 以上では過負荷限界内であるが、ALC による減衰量が 0 dB 且つ L_{TX-AMP} が 30 dB 以下では過負荷限界外となる。 L_{TX-AMP} が 30 dB の場合、ONU 内送信器の最大出力光強度 9 dBm と、光増幅器利得 30 dB を考慮すると、ALC 機能部に入力する信号光強度は 9 dBm である。つまり、 L_{TX-AMP} が 30 dB 以上であり ALC 機能部への入力光強度が 9 dBm 以下の時は減衰量を 0 dB と設定し、 L_{TX-AMP} が 30 dB 以下であり ALC 機能部への入力光強度が 9 dBm 以上の時は減衰量を 15 dB に設定するといった動作を行う。このように、4-3-2-2 の最後で説明したように、最大受光強度以上の信号が受信器へ入力することを回避し、過負荷限界を緩和する動作が可能となる。

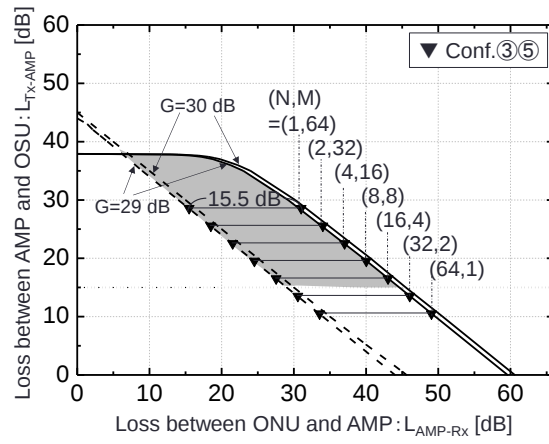
図 3-4 (a)、(b)、(c)より、上り信号に対して ONU-OSU 間に許容される L_{TX-AMP} と L_{AMP-Rx} の範囲は、損失限界、過負荷限界、そして、サージ限界に囲まれた領域であり、塗りつぶしで示した。損失が塗りつぶしの範囲内にあり、従来構成と同等のカバーエリアを確保できる PA 構成は、図 3-4 (c)の構成⑥の(N、M)=(2, 32)の 1 通りである。

続いて、下り構成について検討する。図 3-5 (a)、(b)、(c)の実線、破線、及び、点線に、それぞれ、下り信号における式(1)に記載した損失限界、式(2)に記載した過負荷限界、及び式(3)に記載したサージ限界を示す。ONU-OSU 間に許容される L_{TX-AMP} と L_{AMP-Rx} の範囲は、損失限界、過負荷限界、そして、サージ限界に囲まれた領域である。

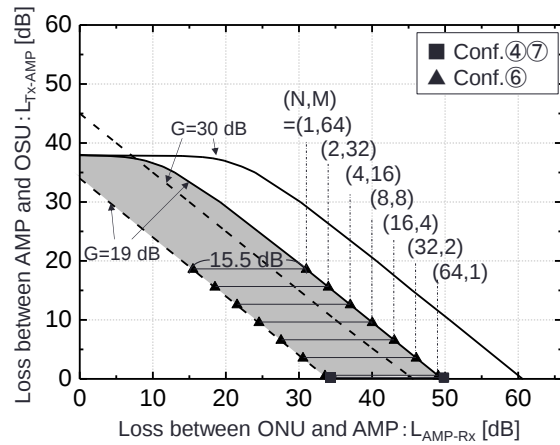
図 3-1 の構成①、構成②、構成③⑤、構成④⑦、及び、構成⑥における L_{TX-AMP} と L_{AMP-Rx} をそれぞれ、図 3-5 (a)の記号●、図 3-5 (a)の記号◆、図 3-5 (b)の記号▼、図 3-5 (c)の記号■、及び、図 3-5 (c)の記号▲で示した。図 3-5 中の L_{AMP-Rx} は、伝送距離に応じて変化するため、伝送距離が最大と最小の点を記号で表示し、伝送距離によって変わる範囲を横線で示した。



(a)



(b)



(c)

図 3-5 下り信号に対する、光増幅器の適用領域と PA の各構成の損失

(a) $\Delta f=50$ GHz の時の適用領域と構成①②の損失, (b) $\Delta f=50$ GHz の時の適用領域と構成③⑤の損失, (c) $\Delta f=50$ GHz の時の適用領域と構成④⑥⑦の損失

図 3-5 (a)では、 G を最大値である 30 dB としても、伝送距離が最大の時の $L_{\text{TX-AMP}}$ は損失限界外となってしまう。一方で、図 3-5 (b)、(c)では、 G を 30 dB とした場合、全ての (N, M) において伝送距離が最大の時の $L_{\text{TX-AMP}}$ は損失限界内となるが、伝送距離が最小の時の $L_{\text{TX-AMP}}$ は過負荷限界外となってしまう。そこで、図 3-5 (b)、及び図 3-5 (c)では G を、それぞれ、29 dB、及び 19 dB と変更した。図 3-5 (b)、(c)では、 G を調整することで、スプリッタの分岐比の組み合わせ (N, M) にかかわらず、各 PA の損失は、損失限界と過負荷限界内となることがわかる。これは、光増幅器-受信器間の損失が大きい下り通信では、光増幅器を設置しても、ASE の影響による SNR の劣化をほぼ無視できるからである。

図 3-5 (a)、(b)、(c)より、下り信号に対して ONU-OSU 間に許容される $L_{\text{Tx-AMP}}$ と $L_{\text{AMP-Rx}}$ の範囲は、損失限界、過負荷限界、そして、サージ限界に囲まれた領域であり、塗りつぶしで示した。損失が塗りつぶしの範囲内にあり、従来構成と同等のカバーエリアを確保できる (N, M) の組み合わせは、構成③⑤、及び、構成④⑥⑦で、それぞれ、(1, 64)、(2, 32)、(4, 16)、(8, 8)、(16, 4)、及び、(1, 64)、(2, 32)、(4, 16)、(8, 8)、(16, 4)、(32, 2)、(64, 1)である。従って、2 通りの構成に対して 5 通りのスプリッタの分岐比と、3 通りの構成に対して 7 通りのスプリッタの分岐比が考えられるため、損失が塗りつぶしの範囲内にあり、従来構成と同等のカバーエリアを確保できる PA 構成は、全部で 31 通りである。

3-3-3 省電力効果を最大化する構成の検討

本節では、3-2 節で述べた(iii)省電力効果の最大化を満たす PA 構成を決定する。3-3-2 節より、従来構成と同等のカバーエリアを確保可能な PA 構成は、上りが 1 通り、下りが 31 通りである。これらの構成の中で、必要な光増幅器数の最も少ないスプリッタの分岐比の組み合わせ(N, M)を決定する。

表 3-8 に、構成①～⑦の上り下りに対して、必要な光増幅器数、従来構成同等のカバーエリアを確保できる M の値、そして、その M の値の中で M が最小の時に必要な光増幅器数を示す。構成①③⑤⑥では、光増幅器数は M に比例するため、M が最小値の時に必要な光増幅器数も最小となり、省電力効果が最も大きくなる。

上り信号に対しては、構成⑥の(N, M)=(2, 32)の時に省電力効果が最大となり、必要な光増幅器数は 2048 個である。このとき、1 台の光増幅器は 16 台の ONU で共有される。また、下り信号に対しては、構成④⑥⑦の(N, M)=(64, 1)の時に省電力効果が最大となり、必要な光増幅器数は 64 個である。構成④⑥⑦のどれも同じ構成であり、このとき、1 台の光増幅器は 512 台の ONU で共有される。以上の検討より、3-2 で示した要求条件(i), (ii),(iii)を満たす PA 構成を図 3-6 に示す。

表 3-8 各構成に必要な光増幅器数

Conf.	For upstream			For downstream		
	Number of AMPs	M	Minimum number of AMPs	Number of AMPs	M	Minimum number of AMPs
①	$K \cdot M \cdot K$	—	—	$K \cdot M \cdot K$	—	—
②	K	—	—	K	—	—
③	$K \cdot M \cdot K$	—	—	$K \cdot M \cdot K$	4,8,16,32,64	16384
④	K	—	—	K	1,2,4,8,16,32,64	64
⑤	$K \cdot M \cdot K$	—	—	$K \cdot M \cdot K$	4,8,16,32,64	16384
⑥	$K \cdot M$	32	2048	$K \cdot M$	1,2,4,8,16,32,64	64
⑦	K	—	—	K	1,2,4,8,16,32,64	64

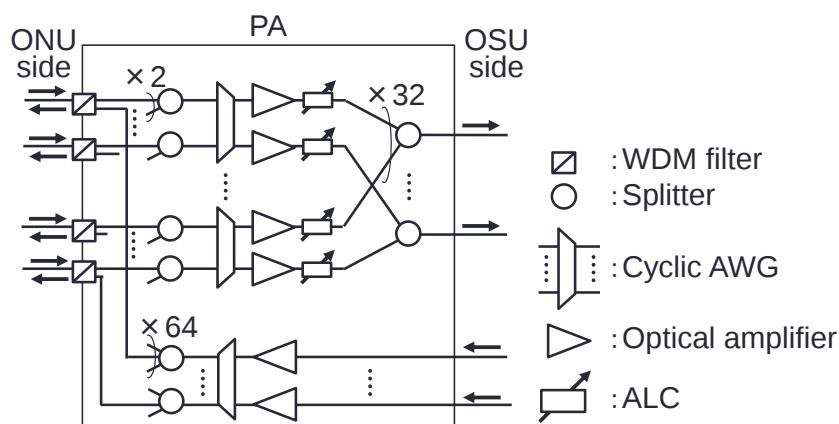


図 3-6 PA の最終構成

3-4 従来構成と提案構成の消費電力比較

本章では、図 3-6 に示した PA を用いた場合の集線部分の省電力効果を明らかにする。集線部分の電力は、図 2-4 の従来構成では L2SW と OSU によって消費され、また、図 2-6 の提案構成では光増幅器と OSU によって消費される。尚、消費電力比較では集線部分のみを考慮し ONU は考慮しない。表 3-8 に、各構成要素の単位個数あたりの消費電力、必要な個数、 $K=64$ の時に必要な個数、そして、 $K=64$ の時の消費電力の合計を示す。L2SW の消費電力は、1 台の総消費電力がポート数に比例すると仮定し、10GBASE SFP+ を 80 ポート搭載、スイッチング性能 2 Tbps、そして消費電力 3 kW[12]から 1 ポートあたり 37.5 W とした。OSU の消費電力は、1 台あたり 45 W[13]であり、従来構成と提案構成で同じとした。DFA の消費電力は 1 台あたり 15 W[14]であり、ALC を用いる場合は可変光アッテネータモジュールの消費電力 12.5 W[15]を加えた値とした。

図 3-7 に従来構成と提案構成の消費電力比較を示す。従来構成の集線部の消費電力の合計を 100 %とすると、それぞれの消費電力は、従来構成において L2SW、及び OSU が、それぞれ 47 %、及び 53 %であり、提案構成において光増幅器、及び OSU が、それぞれ 67 %、及び 3 %である。提案構成では、L2SW の削減と OSU 数の低減による消費電力の削減効果が、光増幅器の追加による消費電力の増加効果より大きいので、従来構成に比べて、集線部分の消費電力を 30 %削減できる。また、表 3-9 より、各装置の必要個数は全て K に比例しているため、どのような K の値であっても、集線部分の消費電力を 30 %削減することができる。

更に、PON 区間が高速化した際に、L2SW は消費電力が増加すると予想されるのに対して、光増幅器を用いる方法では、伝送速度に依存せずに受信信号の SNR の劣化を補償できるため、今後の PON 区間の高速化に対しても消費電力は増加しない。従って、本提案構成では更なる省電力効果を得ることが期待できる。

表 3-9 各装置の消費電力

	Component	Power consumption	Number of components	Total number of components (K=64)	Total power consumption (K=64)
Conventional	L2SW	37.5 W / port	$(Q+1) \cdot K$	1088 ports	41 kW
	OSU	45 W / unit	$Q \cdot K$	1024 台	46 kW
Proposed	DFA	15 W / unit	K	64 台	0.96 kW
	DFA+ALC	27.5 W / unit	$32 \cdot K$	2048 台	56 kW
	OSU	45 W / unit	K	64 台	2.9 kW

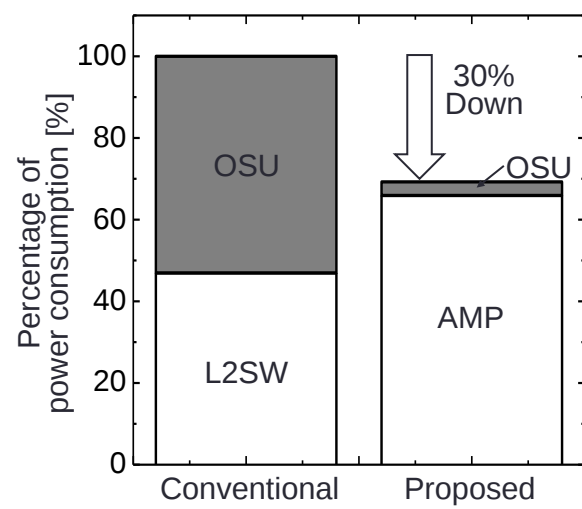


图 3-7 省電力効果

3-5 本章のまとめ

本章では、フォトニックアグリゲーションを用いた波長可変型 WDM/TDM-PON において、従来構成と同等の集線・冗長機能とカバーエリアを確保し、且つ、最大の省電力効果が得られる光集線ノード(PA)構成を提案した。PA 構成は、集線・波長振分機能を代替できる光デバイスの組み合わせと、従来構成と同等のカバーエリアを確保するために必要となる光増幅器の個数が最小となる光増幅器の挿入場所を検討することで決定した。PA の集線比を 64 とした場合、PA の ONU 側ポートから入力した上り信号は順番に、WDM フィルタ、2 分岐スプリッタ、周回性 AWG、自動レベル制御機能付き光増幅器、32 分岐スプリッタを通過し、PA の OSU 側ポートから出力する。一方で、PA の OSU 側ポートから入力した下り信号は順番に、光増幅器、周回性 AWG、64 分岐スプリッタ、WDM フィルタを通過し、PA の ONU 側ポートから出力する。自動レベル制御機能は、上りバースト信号通過時以外は光減衰量を最大として、ASE が足し合わされる影響を軽減し、且つ、自動レベル制御部に入力する光強度が 9 dBm 以上の時は減衰量を 15 dB とすることで、受信信号が受信器の最大受光強度を超えることを防ぐことを可能とした。最後に、提案技術における省電力効果を算出し、PA の集線比を 64 とした場合に、集線部分にかかる消費電力を 30 %削減可能であることを示した。これは、本章で決定した PA を適用することで、光増幅器の追加による消費電力の増加よりも、L2SW の削減と OSU 数の低減による消費電力の削減が、十分大きいためである。

3-6 参考文献

- [1] Jun-ichi Kani, “Enabling Technologies for Future Scalable and Flexible WDM-PON and WDM/TDM-PON Systems,” IEEE JSTQE., vol.16,no.5, pp.1290-1297, 2010.
- [2] Yumiko Senoo, Shin Kaneko, Shunji Kimura, and Naoto Yoshimoto, “Wavelength router for energy efficient photonic aggregation with large-scale λ -tunable WDM/TDM-PON,” APCC2012, Jeju Island, Korea, pp.350-354, Oct 2012.
- [3] 妹尾由美子, 金子慎, 吉田智暁, 田口勝久, 木村俊二, 吉本直人, “波長可変型 WDM/TDM-PON を用いた広域フォトニックアグリゲーション技術と光増幅器の最適配置による集線機能の省電力化”, 電子情報通信学会論文誌 B, Vol. J98-B, No. 6, pp. 1-13, 2013
- [4] Hirotaka Nakamura, Katsuhisa Taguchi, Shinya Tamaki, Takayuki Mizuno, Yasuaki Hashizume, Takashi Yamada, Mikitaka Ito, Hiroshi Takahashi, Shunji Kimura, and Naoto Yoshimono, “40Gbit/s-class- λ -tunable WDM/TDM-PON using Tunable B-Tx and Cyclic AWG Router for Flexible Photonic Aggregation Networks,” ECOC 2012, Tu.4.B.3, 2012.
- [5] Masahiro Sarashina, Hideaki Tamai, Satoshi Furusawa, Akiya Suzuki, Masayuki Kashima, Toshiaki Mukojima, Shin Kaneko, Tomoaki Yoshida, Shunji Kimura, and Naoto Yoshimoto, “First demonstration of a wavelength swept discovery process for λ -tunable WDM/TDM-PON system,” OFC2014, W2A.34, 2014.
- [6] Hiroshi Ou, Yoshihito Sakai, Ken-ichi Suzuki, and Naoto Yoshimoto, “Integrated Dynamic Bandwidth Allocation Considering Overhead in Passive Optical Network,” APCC2013, Bali, Indonesia, pp.351-355, Oct 2013.
- [7] Masamichi Fujiwara, Ken-Ichi Suzuki, Katsuhisa Taguchi, Takeshi Imai, Hiroshi Ishii, Naoto Yoshimoto, and Hisaya Hadama, “Effective Accommodation for Users Located im Long / Short Distance Areas through PONs with Dual Stage Splitter Configuration Using ALC Burst-Mode Optical Amplifier,” OFC/NFOEC2011, NThF3, 2011.
- [8] 小西良弘, 山本杲也, ” 光ファイバ通信技術”, 日刊工業新聞社, 1995.
- [9] 田口勝久, 藤原正満, 機能今井健之, 鈴木謙一, 吉本直人, 葉玉寿弥, “長延化 PON システムにおけるバースト対応光増幅器の適用領域に関する検討,” 2009 CS 研究会, CS2009-68, 2009.
- [10] Hirotaka Nakamura, Sinya Tamaki, Kazutaka Hara, Shunji Kimura, and Hisaya Hadama, “40Gbit/s λ -tunable stacked-WDM/TDM-PON using dynamic

- wavelength and bandwidth allocation”, OFC/OFOEC 2011, OThT4, 2011.
- [11] Hiroki Takesue, and Toshihiko Sugie, “Wavelength Channel Data Rewrite Using Saturated SOA Modulator for WDM Networks With Centralized Light Sources,” JLT., vol.21,no.11, pp.2546-2556, 2003.
 - [12] “ Cisco Catalyst 6880-X シ リ ー ズ ア グ リ デ ー シ ョ ン ス イ ッ チ , ”
http://www.cisco.com/web/JP/product/hs/switches/cat6800/prodlit/pdf/data_sheet_c78-728228.pdf
 - [13] Akihiro Otaka, "Power saving ad-hoc report." Retrieved 2 2012, from IEEE 802.3av: [http:// www. ieee802.org/3/av/public/2008_09/3av_809_otaka_1.pdf](http://www.ieee802.org/3/av/public/2008_09/3av_809_otaka_1.pdf)
 - [14] “Cisco ONS 15501 Erbium Doped Fiber Amplifier,”
http://www.cisco.com/warp/public/cc/pd/olpl/metro/on15500/on15501/prodlit/ons_15_ds.pdf
 - [15] “HIGH-SPEED VARIABLE OPTICAL ATTENUATOR,” triMATIZ,
http://www.trimatiz.com/jp/Home_JP_htm_files/VOAC-010JP.pdf

第4章 動的負荷分散技術

4-1 はじめに

波長可変型 WDM/TDM-PON において、負荷の高い OSU から負荷の低い OSU へ、ONU の割当先を変更していくことで、複数 OSU 間でトラフィック負荷が均等になるように分散することができる。このように、複数 OSU 間でトラフィック負荷を分散することで、異なる OSU に所属するユーザ間のスループットを均一化し、ダウンロード時間の不公平を解消することができる。

複数 OSU 間の負荷分散を実現するためには、以下に述べる 2 つの技術が必要である。一つ目は、フレームロスなく ONU 内の光送受信器の設定波長を変更するための波長切替シーケンスである。そして、二つ目は、複数 OSU 間のトラフィック負荷を分散するために、ONU に収容先 OSU を割当てる動的負荷分散アルゴリズムである。これら 2 つの技術の先行研究は、後の 4-2 で説明する。一般的に、波長切替シーケンスは、トラフィック遅延や変動を引き起こすため、その影響を小さくするために、少ない波長切替回数で複数 OSU 間のトラフィック負荷を分散するアルゴリズムが求められる。

そこで、本章では、少ない波長切替回数で複数 OSU 間のトラフィック負荷を分散可能な動的負荷分散アルゴリズムを提案する[1-4]。提案アルゴリズムは、波長可変型 WDM/TDM-PON において、単位時間あたりの波長切替回数である、波長切替頻度を抑制しつつ、複数 OSU 間の負荷を分散することができる。そして、512 ユーザのリアルタイム動的負荷分散動作と、動的負荷分散動作が平均遅延に与える影響について実機で評価する。最後に、複数 OSU 間の負荷を分散することで、異なる OSU に収容された複数 ONU 間のスループットの公平性について評価する[5]。

本章の構成は以下の通りである。4-2 では、複数 OSU 間の負荷分散を実現するためのキー技術である、波長可変シーケンスと動的波長割当アルゴリズムについて先行技術を説明する。4-3 では、提案する動的負荷分散アルゴリズムを説明する。4-4 では、リアルタイム動的負荷分散動作を実験で評価する。4-5 では、提案する動的負荷分散アルゴリズムを用いた場合の波長切替頻度が平均遅延に与える影響を実機で評価する。4-6 では、提案する動的負荷分散アルゴリズムを用いた場合の複数 ONU 間のスループット公平化を実機で評価する。最後に、4-7 を本章のまとめとする。

4-2 先行研究

一つ目のキー技術として、これまでいくつかの波長切替シーケンスが提案されている[6, 7]。[6]では、上りと下り通信のバッファ制御による、双方向のフレームロスなし波長切替を提案している。[7]では、ONU 毎のキュー状態の監視に基づいた、波長切替手法を提案している。これらの研究より、フレームロスなしの波長切替によって、波長の再割り当てを実現することができる。波長切替が実行されるときに、フレームロスを防ぐために上り・下りトラフィックはバッファリングされるため、フレームロスなしの波長切替は、遅延やトラフィック変動を引き起こす。更に、これらの遅延やトラフィック変動が非常に大きい場合は、バッファ溢れを引き起こし、結果として、フレームロスやスループットの劣化を引き起こす。そこで、スループットの劣化やフレームロスといったペナルティを軽減して、波長切替による負荷分散を実現するために、波長の再割り当て数は小さいほうがより。

二つ目のキー技術として、今までに、いくつかの動的波長割当アルゴリズム (DWA: Dynamic Wavelength Allocation) が提案されている。上り通信のスケジューリングを対象とした研究が参考文献[8-10]、下り通信のスケジューリングを対象とした研究が参考文献[11]、そして、上りと下りの両方向の通信のスケジューリングを対象とした研究が参考文献[12]で実施された。上り通信のスケジューリングを対象とした動的波長割当アルゴリズムでは、余剰帯域はどの ONU であっても自由に使うことができ、必要であれば、ネットワーク内のどの ONU も任意の波長の利用可能なタイムスロットを使用することができる[8-10]。また、参考文献[11]で提案されたネットワークアーキテクチャでは、OLT 内に冗長用の下り波長を用意し、複数 ONU で共用しており、そして、ONU 内には二つの受信器を備える。ここで、一つの受信器は、割り当てられた波長に設定されており、そして、もう一つの受信器は、冗長用の波長に設定される。それぞれの波長は、ONU 毎の帯域要求に従って、異なる数の ONU によって共用される。続いて、参考文献[12]においては、それぞれの ONU への波長割当は、複数 ONU 間の帯域使用率を向上させるために、通信中に動的に再割り当てされる。参考文献[12]の目的は、全ての ONU の送信要求を満たしつつ、スケジュール長を最小化することである。従って、これらの先行研究より、複数 OSU 間の負荷を分散することで、帯域を効率的に使用できることを示している。しかしながら、これらの研究は、波長切替回数を削減することを目的としていない。そこで、本章では、少ない波長切替回数で複数 OSU 間の負荷を分散する動的負荷分散 (DLB: Dynamic Load Balancing) アルゴリズムを提案する。

4-3 提案する動的負荷分散技術

4-3-1 システム構成

図 4-1 に、波長可変型 WDM/TDM-PON 構成を示す。それぞれの ONU は、波長可変光送受信器を備える。光送信器は波長 $\lambda_{U1} \sim \lambda_{UJ}$ の上り信号を出力し、光受信器は波長 $\lambda_{D1} \sim \lambda_{DJ}$ の下り信号を受信する。OLT は、複数の OSU と、DLB 制御部、そして、L2SW を備える。それぞれの OSU は、固定波長に設定された光送受信器と ONU 毎のトラフィックカウンタを備える。DLB 制御部は、前期トラフィックカウンタの値を参照して、複数 OSU 間のトラフィック負荷を分散するために、ONU に OSU を割当てる。OSU#j ($j=1,2,\dots,J$) は、固定波長 λ_{Dj} の下り信号を出力し、固定波長 λ_{Uj} のバースト上り信号を受信する。ONU は、波長可変光送受信器の送信波長と受信波長の両方を変更することで任意の OSU と通信することができる。OLT 内の DLB 制御部は OSU と ONU の割当を決定する。そして、L2SW はスイッチングテーブルに従って下り信号を転送する。

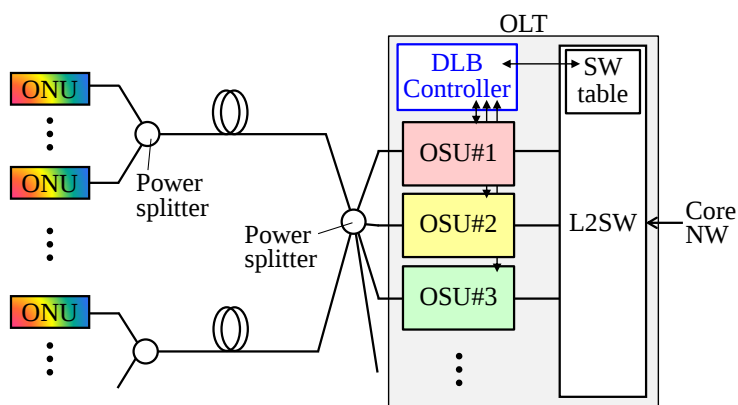


図 4-1 システム構成

4-3-2 動的負荷分散制御のシーケンス

DLB 制御は、図 4-2 に示すように、以下の 3 手順により実現する。

I. 開始処理

DLB 制御部は ONU# i ($i=1,2,\dots,I$) の時刻 $t-\Delta t$ から t までの間のトラフィック量を、OSU 内の全てのトラフィックカウンタから測定する。そして、測定値を $T_{i,t}$ とする。

II. DLB 計算

DLB 制御部は、ONU と OSU の割当を決定し、再割り当てリストを作成する。

III. 波長切替

再割り当てリストに従って、スイッチングテーブルを書き換える。同時に、波長切替によって ONU の接続先 OSU を変更する。

手順 I、手順 II、そして、手順 III に要する時間をそれぞれ T_1 、 T_2 、そして、 T_3 とする。この 3 つの手順は周期 Δt で繰り返される。 Δt は $T_1+T_2+T_3$ に等しい。手順 III における波長再割り当てにおいて、フレームロスなしの波長切替が重要である。波長切替が実行されている間のフレームロスを防ぐために、下りトラフィックはバッファに蓄積される。データのバッファリングは、遅延やトラフィックの変動を引き起こすため、波長切替回数は少ない方がよい。

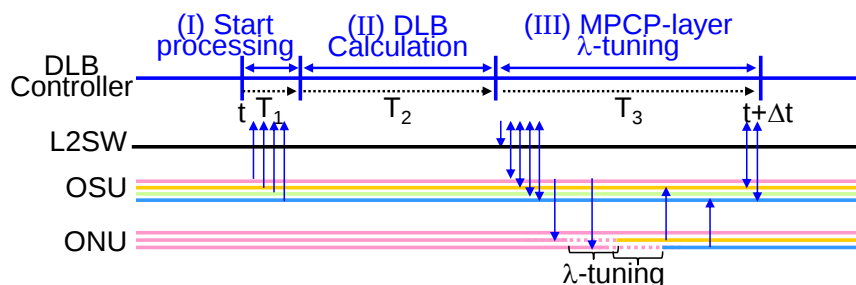


図 4-2 DLB シーケンス

4-3-3 動的負荷分散アルゴリズム

図 4-3 に DLB アルゴリズムの概念図を示す。図 4-3 中のバーの大きさは ONU 毎のトラフィック量を示し、バー内の数字は ONU 番号を示す。一例として、8 台の ONU が 4 台の OSU へ接続する場合を示す。初期割当として、ONU#1-3、ONU#4-5、ONU#6-7、そして、ONU#8、はそれぞれ、OSU#1、OSU#2、OSU#3、そして、OSU#4 に接続する。後に説明する提案アルゴリズムでは、最もトラフィック負荷の大きい OSU に接続する ONU のうち、最もトラフィック負荷の大きい OSU と最もトラフィック負荷の小さい OSU のトラフィック負荷の差の半分に最も等しい量のトラフィック負荷である ONU を、最もトラフィック負荷の小さい OSU へ再割り当てする。そして、その再割り当てを繰り返す。図 4-3 では、第一に ONU#3 を OSU#1 から OSU#4 へ再割り当てする。そして、次に、ONU#5 を OSU#2 から OSU#3 へ再割り当てする。DLB アルゴリズムが計算を終えた後に、ONU#3 と ONU#5 の光送受信器の設定波長は同時に変更される。

図 4-4 は、提案アルゴリズムのフローチャートを示す。表 4-1 は、アルゴリズム内で使用したパラメータ一覧を示す。提案アルゴリズムでは、ONU 毎のトラフィック量の測定値として、移動平均を用いる。提案アルゴリズムは以下に示す 9 つの手順から構成される。

手順 1：それぞれの ONU のトラフィック量の移動平均を算出する

手順 2：前周期の割当を保存する

手順 3：フローチャートのループ回数をカウントすることで、1DLB 周期内の再割り当て数が最大値を超えていないかを判断する

手順 4: OSU# j ($j=1,2,\dots,J$)の時刻 $t-\Delta t$ から t までの間の総トラフィック量 $L_{j,t}$ を算出する

手順 5： $L_{j,t}$ を昇順に並べ替える

手順 6：最適なトラフィックの移動量である α を算出する

手順 7： α にトラフィック負荷が最も近い ONU を検索する

手順 8：手順 7 で選択した ONU を再割り当てした場合に、フェアネスインデックスが向上するかどうかを判断する

手順 9：手順 7 で選択した ONU を最も負荷の小さい OSU へ再割り当てするように、再割り当てリストを更新する

提案アルゴリズムでは、手順 3-9 を n 回繰り返すことで、 n 台の ONU の波長切替が再割り当てリストに記入される。

提案アルゴリズム中で最も重要な手順は手順 7 と 8 である。以降では、提案アルゴリ

ズムを用いた場合に、どのように、ONU の再割り当てにより複数 OSU 間のトラフィック負荷の公平性が向上するのかを説明する。時刻 t における、それぞれの OSU のトラフィック間の公平性をジェインのフェアネスインデックス[13]で定義し、 f_t とする。 f_t は式(4-1)で表すことができる。

$$f_t = \left(\sum_{j=1}^J L_{j,t} \right)^2 / J \sum_{j=1}^J L_{j,t}^2 \quad (4-1)$$

ここで、 $L_{j,t}$ は、時刻 t における OSU# j ($j = 1, 2, \dots, J$) の総トラフィック量である。複数 OSU 間のトラフィック負荷は、 f_t が最大値である 1 に近いほど公平度が高い。また、OSU# j_a から OSU# j_b へトラフィック量 α を再割り当てした場合の、 f_t の変化である Δf_t は、以降の式で表される。

$$\Delta f_t = \frac{\left(\sum_{j=1}^J L_{j,t} \right)^2}{J \left\{ \sum_{j=1}^J L_{j,t}^2 - L_{j_a,t}^2 - L_{j_b,t}^2 + (L_{j_a,t} - \alpha)^2 + (L_{j_b,t} + \alpha)^2 \right\}} - \frac{\left(\sum_{j=1}^J L_{j,t} \right)^2}{J \sum_{j=1}^J L_{j,t}^2} \quad (4-2a)$$

$$= \frac{\left(\sum_{j=1}^J L_{j,t} \right)^2}{J \left\{ \sum_{j=1}^J L_{j,t}^2 + 2\left(\alpha - \frac{L_{j_a,t} - L_{j_b,t}}{2}\right)^2 - \frac{1}{2}(L_{j_a,t} - L_{j_b,t})^2 \right\}} - \frac{\left(\sum_{j=1}^J L_{j,t} \right)^2}{J \sum_{j=1}^J L_{j,t}^2} \quad (4-2b)$$

$$= \frac{\left(\sum_{j=1}^J L_{j,t} \right)^2 J \left\{ -2\alpha(\alpha - (L_{j_a,t} - L_{j_b,t})) \right\}}{J^2 \left\{ \sum_{j=1}^J L_{j,t}^2 - L_{j_a,t}^2 - L_{j_b,t}^2 + (L_{j_a,t} - \alpha)^2 + (L_{j_b,t} + \alpha)^2 \right\} \left\{ \sum_{j=1}^J L_{j,t}^2 \right\}} \quad (4-2c)$$

式(4-2b)より、 α が $(L_{j_a,t} - L_{j_b,t})/2$ に近い値であり、そして、 $(L_{j_a,t} - L_{j_b,t})^2$ が大きな値であればあるほど、 Δf_t は大きな値となる。これは、トラフィック負荷が最も大きい OSU に属する ONU のうち、最も負荷の大きな OSU と最も負荷の小さな OSU のトラフィック負荷の差の半分に等しいトラフィック負荷である ONU を、トラフィック負荷が最も大きい OSU からトラフィック負荷が最も小さい OSU へ移動することで、時刻 $t + \Delta t$ の公平度である $f_{t+\Delta t}$ は最も向上することを意味する。しかしながら、 Δf_t が負の値であるときに、フェアネスは劣化するため、 Δf_t は正の値である必要がある。式(4-2c)より、 α が $(L_{j_a,t} - L_{j_b,t})$ より大きい場合は分子が正の値となるため、 Δf_t は正の値となることを示している。これは、選択した ONU のトラフィック量がトラフィック負荷が最も大きい OSU とトラフィック負荷が最も小さい OSU のトラフィック負荷の差より

も小さい場合に等しい。従って、 Δf_i が正の値となる場合のみ、選択した ONU を再割り当てする。 Δf_i が負の値となった場合は、再割り当て計算は中止し、フェーズ III に移行する。

式(4-2b)、及び、式(4-2c)は、それぞれ、手順 7、及び、手順 8 で実行される。手順 7 と手順 8 により ONU を再割り当てすることで、一回の再割り当てで複数 OSU 間のトラフィック負荷の公平性を最も向上することができる。加えて、再割り当てする ONU を選択する手順である、手順 3 から手順 8 は Δf_i が正の値である間繰り返される。従って、提案する DLB アルゴリズムは、非常に少ない再割り当て数で、複数 OSU 間のトラフィック負荷を公平に分散することができる。

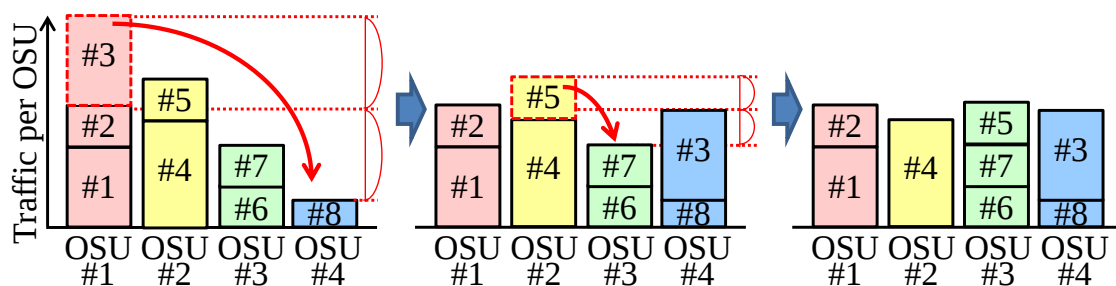


図 4-3 DLB アルゴリズムの概念

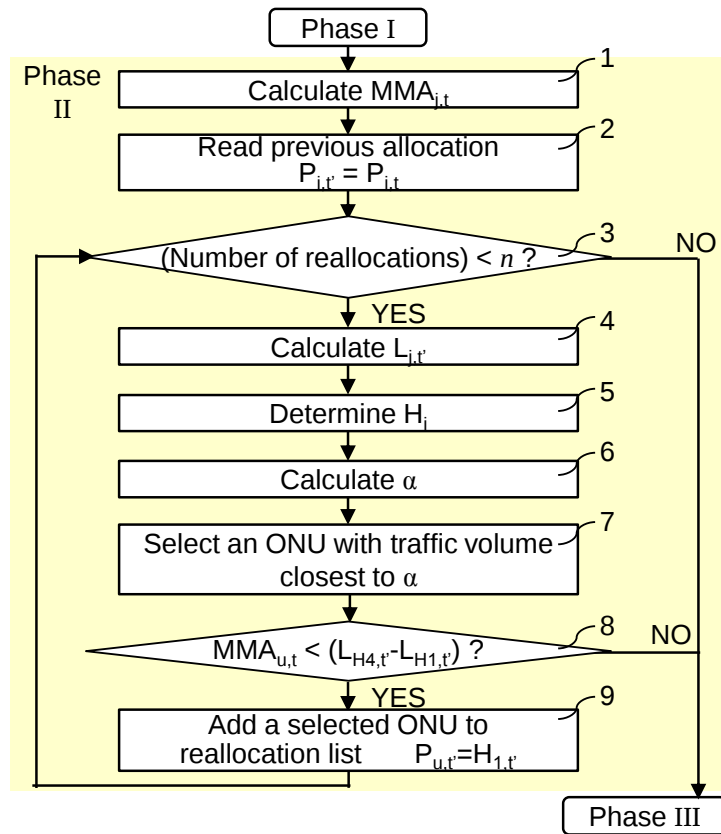


図 4-4 提案する DLB アルゴリズムのフローチャート

表 4-1 パラメータリスト

Article		Value
ONU number	i	1,2,...,512
OSU number	j	1,2,3,4
Traffic volume of ONU#i between $t-\Delta t$ to t	$T_{i,t}$	The measured values
Modified moving average (MMA) of ONU#i between $t-\Delta t \cdot N$ to t	$MMA_{i,t}$	$((N-1) \cdot MMA_{i,t-\Delta t} + T_{i,t})/N$
OSU identifier that ONU#i is connected to at t	$P_{i,t}$	The read or overwrite values
Total MMA of OSU#j between $t-\Delta t \cdot N$ to t	$L_{j,t'}$	$\sum_{P_{i,t'}=j}^i MMA_{i,t}$
Sequence number of OSU after sorting $L_{j,t'}$ in ascending order	H_j	$L_{H_1,t'} \leq L_{H_2,t'} \leq L_{H_3,t'} \leq L_{H_4,t'}$
Optimum displacement value	α	$(L_{H_4,t'} - L_{H_1,t'})/2$
Number of selected ONU	u	—

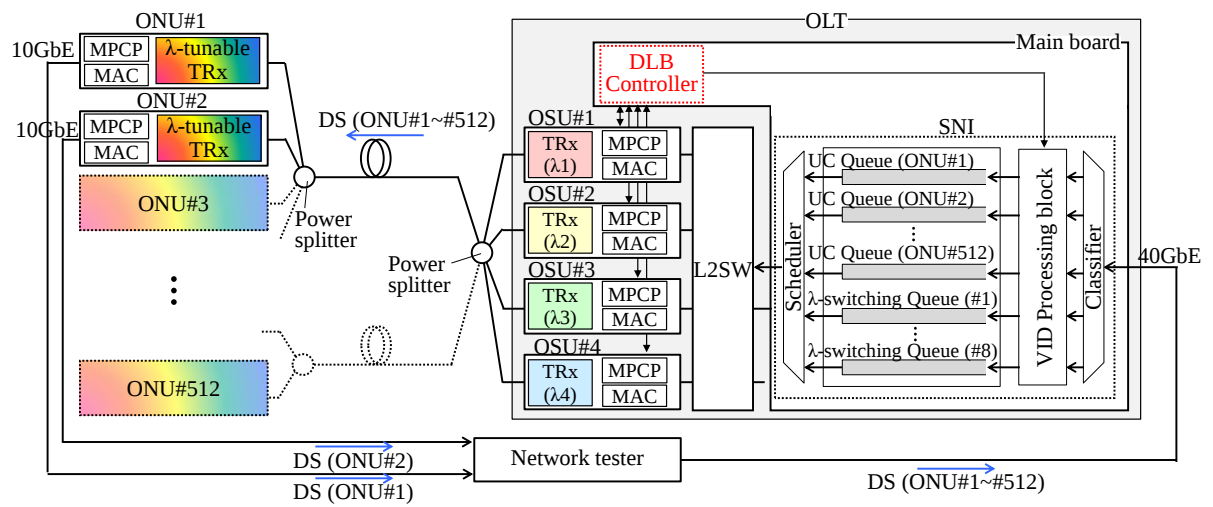
4-4 動的負荷分散制御の実証検証

図 4-5(a)に下り伝送実験を行うための、波長可変型 WDM/TDM-PON システムの構成を示す。加えて、図 4-5 (b)は、提案する DLB アルゴリズムを実装した OLT 試作機の写真である。このシステムは、1 台の OLT と、2 台の実 ONU、そして、510 台の仮想 ONU で構成される。実 ONU は、MPCP (Multi Point Control Protocol) 制御部、MAC (Media Access Control) 処理部、そして 10 Gbps バーストモード波長可変光送受信器[14]によって構成される。波長可変光送受信器の波長切替時間は、100 ns である。ONU 台数の少ない実験構成で、大多数の ONU 間の DLB 制御を模擬するために、仮想 ONU は存在しないが、仮想 ONU 宛の下りトラフィックは入力した。40GbE、及び、10GbE は、それぞれ、ネットワークテスト (Spirent, SPT-N4U, version 4.41) と OLT 間、及び、実 ONU とネットワークテスト間を接続した。ネットワークテストは、ONU#1-512 宛の下りトラフィックを出力し、ONU#1 と ONU#2 からの出力トラフィックを入力した。510 台の仮想 ONU は、OLT に事前に登録し、そして、OLT は ONU#1-512 宛の下りトラフィックを送信した。そして、OLT 内で 512 台の ONU の動的負荷分散動作を評価した。ONU#1 と ONU#2 のフレームロスと遅延をテストセンタで測定した。

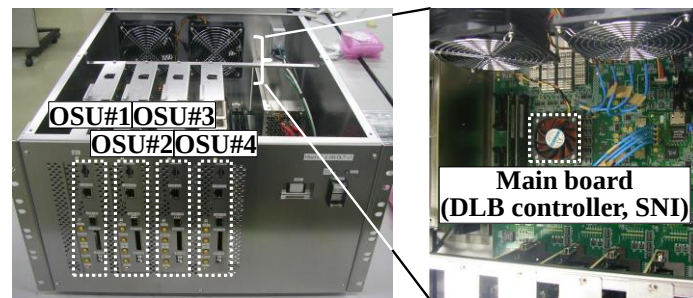
OLT は 4 台の OSU、1 台の L2SW、そして、メインボードから構成される。このメインボードは、DLB 制御部と SNI (Service Node Interface) 部から成る[7]。OSU は 10 Gbit/s の固定波長に設定された光送受信器、MPCP 部、そして、MAC 制御部から成る。この MAC 制御部は、ONU 毎の下りユニキャストトラフィックを測定する 512 個のユニキャストキューを含む。MPCP ブロックの動作は、[6]と等しい。GATE フレームと λ -tuning GATE フレームは、OLT から ONU#1-512 に送信する。ONU#1-2 から送信された、REPORT フレームと λ -tuning REPORT フレームを OLT は受信する。 λ -tuning REPORT フレームは仮想 ONU から受信できないので、仮想 ONU の波長切替は、波長切替開始時刻から 2 ms 経過後に完了したとみなした。実 ONU と仮想 ONU の両方宛の下りユニキャストトラフィックは、OSU の MAC 処理部内の 512 個のユニキャストキューで測定した。DLB 制御部は、それぞれの OSU の 512 個のユニキャストキューの状態を監視し、それぞれの ONU を OSU へ再割り当てした。DLB 制御部は、クロック周波数 156.25 MHz で動作する Nios II Embedded Processor 上で提案する DLB アルゴリズムを動作した。実験では、下りトラフィックとして VLAN (Virtual Local Area Network) タグフレームを使用し、複数フローは VLAN タグ内の VID (VLAN Identifier) によって識別した。SNI 部は、スケジューラ、512 個のユニキャストキュー、8 個の波長切替用キュー、VID 処理部、そして、クラシファイアーで構成される。ONU の再割り当てのために波長切替を実行している間、下りトラフィックをバッファに蓄積してフレームロスを防ぐために、波長切替用キューを使用する。VID 処理部は、VLAN タグ内の VID を、DLB 制御部によって決められた値に変更する。

L2SW は、VID に従って、下りトラフィックを SNI によって決められた適切な OSU へ転送する。

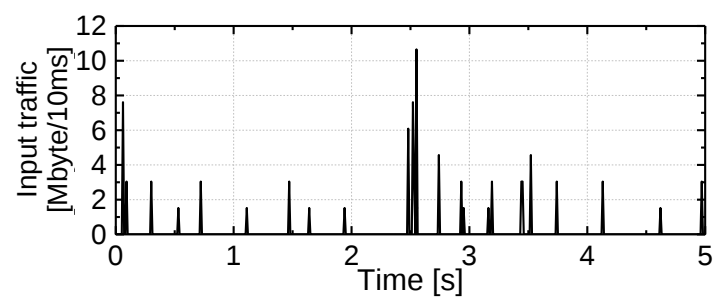
提案するDLBアルゴリズムがリアルタイムに動作することを確認するために、下りトラフィックはG. Kramerによって提案されたモデル[15]を使用した。パレートsubstream数を1、ハーストパラメータを0.8として、5秒間のトラフィックパターンを作成した。ONU毎の入力トラフィックレートを関数として変化させるために、ユーザ毎のトラフィック負荷は0.05-50 Mbpsと定義した。実験では、入力トラフィックのフレーム長は1522 byteで固定長とし、そして、入力トラフィックの Δt 秒間のトラフィック量が、G. Kramerによって提案されたモデルを使用して作成した下りトラフィックパターンのトラフィック量と等しくなるようにフレーム数を決定した。図 4-5 (c)は、入力トラフィックレートが0.05 MbpsのときのONU#1の入力トラフィックレートを示している。DLB周期 Δt は、手順IからIIIを繰り返す周期を示しており、50 msecに設定する。DLB周期一回の最大再割り当て数は4、DLB周期は2 msecとした。また、測定トラフィック量として、1秒間の移動平均を用いた。



(a)



(b)



(c)

図 4-5 実験設定

(a) 実験構成, (b) OLT 試作機の写真, (c) ONU#1 の入力トラフィック,
入力レート 0.05 Mbps

続いて、図 4-6 に ONU 毎の入力トラフィックレートが 0.05 Mbps の時の実験結果を示す。図 4-6 (a)は DLB 制御を行わなかった場合の OSU 毎の下りトラフィックを示し、図 4-6(b)は DLB 制御を行った場合の OSU 毎の下りトラフィックを示す。ONU#1 も ONU#2 も測定中のフレームロスにはなかった。図 4-6(a)、及び、図 4-6(b)のフェアネスインデックス f_t の 5 秒間の平均値は、それぞれ、0.981、及び、0.998 であった。 f_t が最大値である 1 に近い値であるほど、複数 OSU 間のトラフィック負荷の公平性は高いので、提案するアルゴリズムが複数 OSU 間の公平性を向上していることを示した。

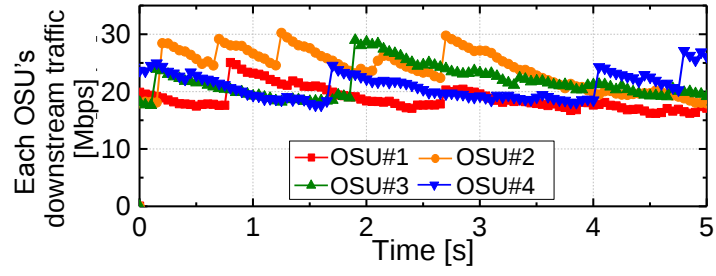
図 4-6(c)にそれぞれの OSU に割り当てられている ONU 数を示す。それぞれの OSU に割り当てられる ONU 数はトラフィック負荷によって変わる。例えば、図 4-6(b)の 0.2 秒において OSU#1 のトラフィック負荷が急激に増加したときに、図 4-6(c)より OSU#1 に割り当てられた ONU 数は急激に減少している。これらの実験結果より、提案する DLB アルゴリズムを用いることで、512 台の ONU のトラフィック負荷を複数 OSU 間でリアルタイムに分散できていることを示した。

図 4-6 (d)は、512 台の ONU のうち、 Δt 秒間に波長の再割り当てを行った ONU 数を示す。そして、1 秒間に、ある特定の ONU が波長切替を行う回数を切替頻度と定義する。すると、それぞれの ONU スループットにおける、図 4-6(d)に示す 5 秒間の切替頻度の平均は、0.12 回/秒であった。続いて、比較対象として、トラフィック負荷を分散するための従来手法であるラウンドロビンアルゴリズムを用いた場合の切替頻度を計算する。ラウンドロビンアルゴリズムは、周期 Δt 毎に、ONU をランダムに 1 台ずつ選択し、複数 OSU に順番に割り当てる方法を示す。4 台の OSU でシステムが構成される場合、ある特定の ONU が Δt 毎に再割り当てされる確率は 75 % である。従って、それぞれの ONU の切替頻度は、 Δt を 50 ms とした場合に、 $(1/0.05) \cdot 0.75 = 15$ 回/秒と計算できる。提案アルゴリズムを用いた場合の切替頻度は 0.12 回/秒であるため、提案アルゴリズムを用いた場合は、ラウンドロビンアルゴリズムを用いた場合に比べて、切替周期を $15/0.12 = 1/125$ に削減することができる。

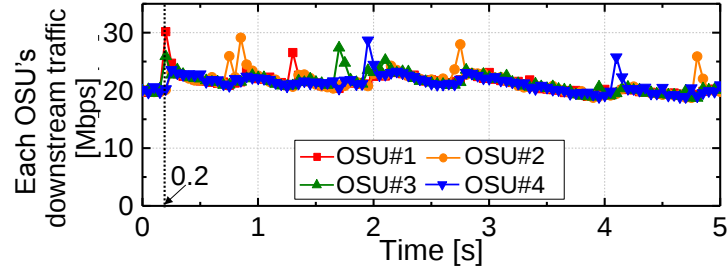
図 4-7 に、ONU 毎の入力トラフィックレートを変更した場合の DLB 動作結果を示す。ONU#1 と ONU#2 のどちらもフレームロスは発生しなかった。図 4-7 (a)は、フェアネスインデックスである f_t の 5 秒間平均値を示す。DLB 制御なしの場合、ONU 毎の入力トラフィックレートが増えるに従って、フェアネスインデックスの平均値が増加する。これは、入力トラフィックレートが大きい場合、生成したトラフィックモデルにおいて、複数 OSU 間のトラフィック負荷の不均一性が減少するためである。ONU 毎の入力トラフィックレートが 0.05 Mbps から 50 Mbps の全ての場合において、DLB 制御ありの場合の f_t の平均値は、DLB 制御なしの場合よりも高い値であったため、提案した DLB アルゴリズムは複数 OSU 間の負荷の均一性を向上させることができることを示した。

図 4-7 (b)に、切替頻度の 5 秒間平均値を示す。DLB 制御ありの場合の切替頻度の平

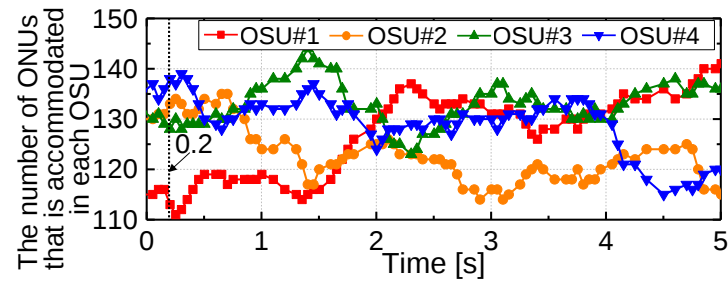
均は、入力トラフィックレートが 0.05 Mbps、0.5 Mbps、5 Mbps、及び 50 Mbps において、それぞれ 0.12 回/秒、0.57 回/秒、0.57 回/秒、及び、0.28 回/秒であった。従って、ONU 毎の入力トラフィックレートが 0.05 Mbps から 50 Mbps の場合において、提案アルゴリズムを用いた場合の切替頻度は 0.6 回/秒以下となった。従来手法であるラウンドロビンアルゴリズムを用いた場合の切替頻度は 15 回/秒と計算できるため、提案するアルゴリズムは、ラウンドロビンアルゴリズムに比べて、切替頻度を $15/0.6=1/25$ に低減することができる。更に、入力レートが大きい場合も切替頻度に有意な増加はなかった。



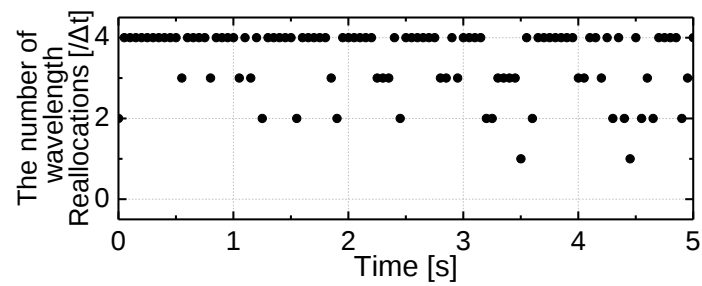
(a)



(b)



(c)



(d)

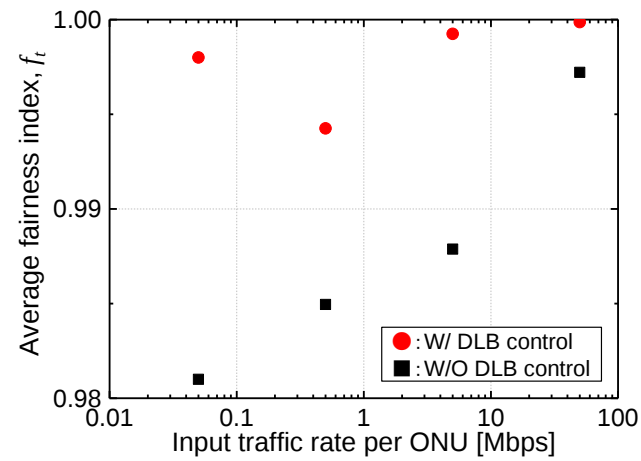
図 4-6 ONU の入力レートが 0.05 Mbps の時の実験結果

(a) DLB 制御なしの場合の OSU 毎の下りトラフィック

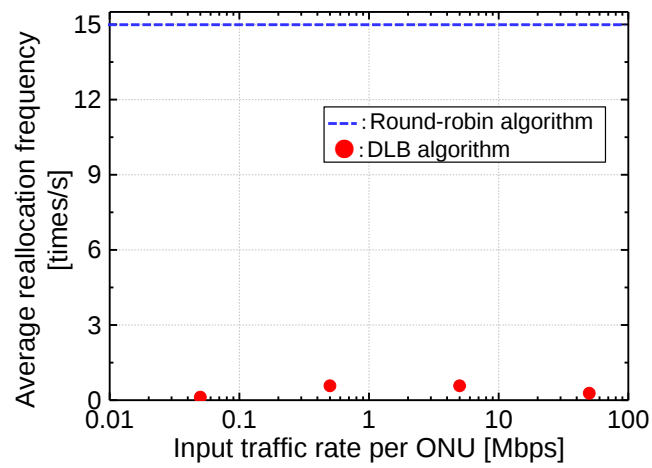
(b) DLB 制御ありの場合の OSU 毎の下りトラフィック

(c) それぞれの OSU に収容される ONU 数

(d) Δt 毎の波長切替数



(a)



(b)

図 4-7 ONU 毎の入力トラフィックレートを変更した場合の
DLB 動作結果

(a) フェアネスインデックスの 5 秒間平均

(b) 切替頻度の 5 秒間平均

4-5 平均遅延の検証実験

初めに、1回の波長切替による遅延劣化を測定するために最大遅延を測定した。続いて、使用するアルゴリズムに依る遅延劣化の差を明確化するために、さまざまな切替周期における平均遅延を測定した。アルゴリズムは、提案するDLBアルゴリズムとラウンドロビンアルゴリズムを用いた。

30秒間の下りトラフィックを、ネットワークテストからONU#1-512へ送信した。本章では、波長切替の影響のみを評価し、トラフィック変動の影響を除外するために、固定レート of トラフィックを入力した。前章では、動的に変動するレート of トラフィックを入力していたため、入力レートの条件が異なる。ONU毎の下りビットレートは、0.05 Mbpsから50 Mbpsに設定した。初期割当として、ONU#1-128、ONU#129-256、ONU#257-384、及び、ONU#385-512は、それぞれ、OSU#1、OSU#2、OSU#3、及び、OSU#4に属することとした。ONU#1-2の切替頻度は、最大遅延の測定時は20 回/秒、平均遅延の測定時は0.6から20 回/秒に設定した。DLB周期 Δt は50 msに設定したので、 $33 \cdot \Delta t$ 、 $20 \cdot \Delta t$ 、 $10 \cdot \Delta t$ 、 $5 \cdot \Delta t$ 、 $2 \cdot \Delta t$ 、及び、 $1 \cdot \Delta t$ の切替間隔は、それぞれ、切替頻度で表すと、0.6 回/秒、1 回/秒、2 回/秒、4 回/秒、10 回/秒、及び、20 回/秒に相当する。ONU#1-2の最大遅延と平均遅延は、ONU内の光送受信器の設定波長を λ_1 と λ_2 で交互に切り替えながら、同時に測定した。

表 4-2 に、ONU あたりの入力トラフィックレートが 0.05 Mbps から 50 Mbps の場合の最大遅延の測定結果を示す。ONU#1 と ONU#2 のどちらもフレームロスが発生しなかった。表 4-2 より、最大遅延の全ての測定結果の誤差が 10 %以内であったため、波長切替を 1 回行ったときの最大遅延は、ONU 毎の入力トラフィックレートや平均切替頻度に関係なく、等しくなることを示した。最大遅延は 5.02 ms 以下であった、従って、フレームロスなしの波長切替は、5.02 ms 以下の遅延を生ずる。波長切替による遅延劣化は、およそ DBA 周期長である 2 ms の 2 倍となる。この結果は参考文献[6]とほぼ等しい。

波長切替を実行するときのフレームロスを防ぐために、下りトラフィックは 5.02 ms 以下の時間だけバッファに蓄積されるため、平均遅延は切替頻度に従って増加する。図 4-8 に ONU 毎の入力レートを変更した場合における、ONU#1 の平均切替頻度に対する平均遅延の測定結果を示す。表 4-2 に示すように、ONU#1 と ONU#2 の最大遅延はほぼ等しかったため、ONU#1 と ONU#2 の平均遅延もほぼ等しくなると想定される。従って、図 4-8 には、ONU#1 の結果のみを記載した。丸点、上三角点、下三角点、及び、四角点は、それぞれ、ONU 毎の入力レートが 0.05 Mbps、0.5 Mbps、5 Mbps、そして、50 Mbps のときの測定結果を示す。点線は、切替を実行した時と切替を実行しなかった時の、それぞれの入力レートの平均を示す。切替を実行しなかった時、全 512 台の ONU は、OSU 毎に 128 台ずつ接続した 4 グループに分けられ、再割り当ては行わなかった。測定中は、ONU#1 と ONU#2 でフレームロスは発生しなかった。切

替を実行しなかった時の平均遅延は 154 μs であり、最大遅延は ONU 毎の入力トラフィックレートに関わらず、ほぼ一定であった。加えて、平均遅延は、平均切替頻度に従って増加した。

図 4-8 より、提案する DLB アルゴリズム、及び、ラウンドロビンアルゴリズムの平均切替頻度は 0.6 回/秒、及び、15 回/秒であったため、それぞれの平均遅延は、167 μs 、及び、314 μs となると予想される。提案する DLB アルゴリズム、及び、ラウンドロビンアルゴリズムを用いた場合は、動的負荷分散を行うことで、それぞれ、平均遅延が 13 μs 、及び 160 μs 増加する。提案する DLB アルゴリズムでは切替頻度を大幅に削減することができるため、平均遅延の増加はほとんど無視できるほど小さい。従って、提案する DLB アルゴリズムを用いた動的負荷分散制御では、平均遅延にほとんど影響がないと言える。

表 4-2 ONU の入力レートを変更した場合の最大遅延の測定値

Input traffic rate per ONU [Mbps]	Maximum latency [ms]	
	ONU#1	ONU#2
0.05	4.68	5.02
0.5	4.91	4.87
5	4.77	4.78
50	4.83	4.87

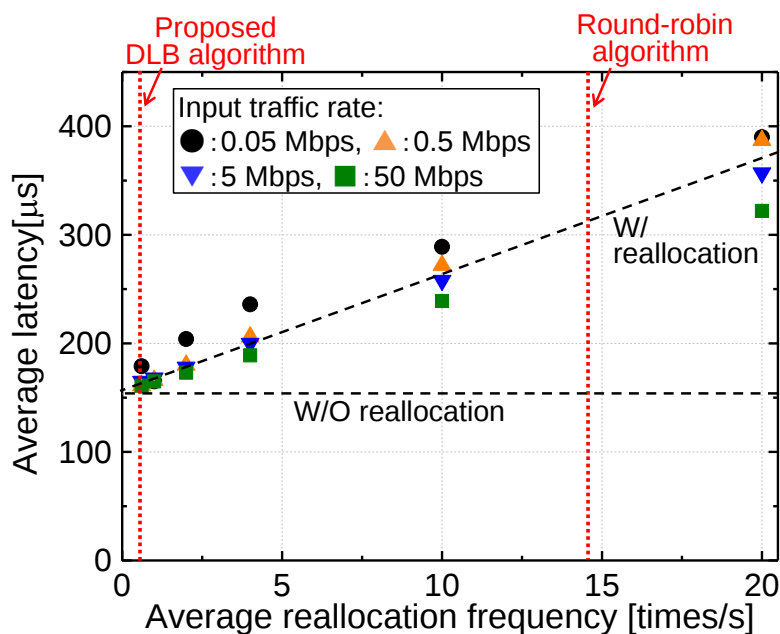


図 4-8 ONU の入力レートを変更した場合の平均遅延と切替頻度の関係

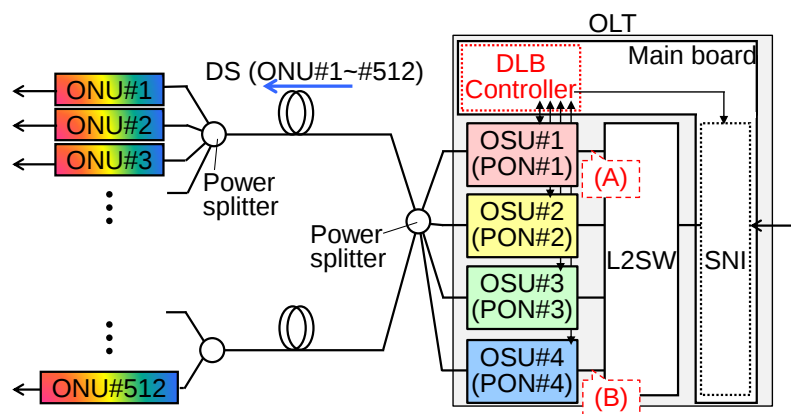
4-6 スループット公平化

4-6-1 スループット公平化の仕組み

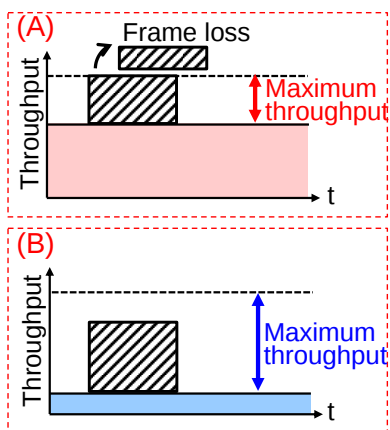
これまで提案した動的負荷分散アルゴリズムを用いることで、少ない波長切替数で複数 OSU 間のトラフィック負荷を分散できることを示した。本節では、更に、複数 OSU 間のトラフィック負荷を分散することで、異なる OSU に接続する複数の OSU 間のスループットが公平化する仕組みを説明する。図 4-9(b)及び(c)は、それぞれ、DLB 制御なし及び DLB 制御ありの場合の下りスループットの時間変動を示す。スループットは、L2SW と OSU#1 の間の高負荷のリンクである(A)と、L2SW と OSU#4 の間の低負荷のリンクである(B)において測定した。図 4-9 (b)及び(c)中の、点線及び実線は、それぞれ、各 OSU の最大帯域、及び、各 OSU と通信する全ての ONU の総消費帯域を示す。最大帯域と消費帯域の差は、追加で使用可能な帯域に等しい。そして、OSU#1 は OSU#4 よりも高負荷であり、そして、ONU#1 は OSU#1 と通信し、ONU#2 は OSU#4 と通信しているとした。さらに、同時に ONU#1 と ONU#2 に向けて同レートのダウンストリームを入力し、結果として、高負荷である OSU#1 のみ輻輳すると仮定した。ONU#1 と ONU#2 の入力トラフィックは、図 4-9 (b)及び(c)の斜線塗りつぶしで示した。

図 4-9 (b)の(A)に示すように、DLB 制御なしの場合は、OSU#1 の総入力レートは最大帯域を超えている。従って、ONU#1 のフレームロスが発生し、ONU#1 のスループットは低下する。一方で、図 4-9 (b)の(B)に示すように、DLB 制御ありの場合は、OSU#1 の総入力レートは最大帯域を超えていないため、フレームロスは発生せず、スループットも低下しない。従って、OSU 間のトラフィック負荷の不均衡のために、ONU#1 と ONU#2 のスループットに差が生じてしまう。

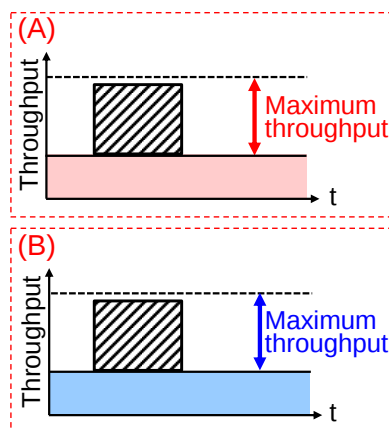
DLB制御ありの場合は、図 4-9 (c)の(A)と(B)に示すように、複数OSU間のトラフィック負荷は公平に分散されているため、それぞれのOSUの追加で入力可能な最大スループットは等しい。従って、OSU#1とOSU#2の総入力レートが最大帯域よりも小さい場合は、フレームロスは発生せず、スループットも低下しないため、異なるOSUと通信するONU#1とONU#2間の最大スループットが等しくなる。一方で、OSU#1とOSU#2の総入力レートが最大帯域よりも小さい場合は、異なるOSUと通信するONU#1とONU#2間のフレームロス率とスループットは、ONU間で等しい値に近づく。



(a)



(b)



(c)

図 4-9 (a) システム構成, (b) DLB 制御なしの場合のスループット変動, (c) DLB 制御ありの場合のスループット変動

4-6-2 スループット公平化の実証実験

図 4-9(a)で示す 40 Gbps 波長可変型 WDM/TDM-PON において、異なる OSU と通信する ONU のスループットとフレームロスを測定した。ネットワークテストは、40 GbE リンクを通して SNI に向けて ONU#1-512 の下りトラフィックを送信した。そして、ネットワークテストは、10 GbE リンクを通して、ONU#1-2 の UNI から出力されるフレームを受信し、ONU#1-2 のスループットとフレームロスを測定した。表 4-3 に、ONU への OSU の初期割当と、ONU#1-512 への入力トラフィックを示す。ONU#3-512 へ向けて入力した背景トラフィックと、ONU#1-2 へ向けて入力した測定用トラフィックは、ONU 毎に個別にセルフシミラートラフィック発生モデル[15]を用いて発生させた。1 つのパレートサブストリームを用い、ハーストパラメータを 0.8 として、6 秒間のセルフシミラートラフィックを作成した。ONU#1-256、及び、ONU#257-512 のユーザあたりのトラフィック負荷は、それぞれ、50 Mbps/user 及び 5 Mbps/user に設定した。従って、OSU#1-2 及び OSU#3-4 の背景トラフィックは、それぞれ、約 6.4 Gbps 及び 640 Mbps となった。背景トラフィックに加えて、ONU#1 と ONU#2 に 3.6 Gbps の固定レートのトラフィックを 2.4 から 5.4 秒の間だけ、同時に入力して、大容量データのダウンロードを模擬した。入力フレームのフレーム長は、1522 Byte で固定とした。

表 4-3 入力トラフィックレート

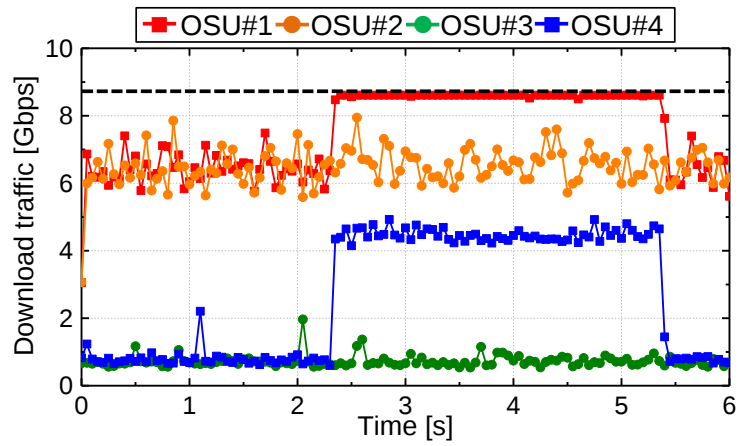
	ONU#	Initial allocation	Traffic model	Input rate [Mbps]	Time [sec]
Background traffic	3 – 128	OSU#1	Self-similar	50	0 – 6
	129 – 256	OSU#2	Self-similar	50	0 – 6
	257 – 384	OSU#3	Self-similar	5	0 – 6
	385 – 512	OSU#4	Self-similar	5	0 – 6
Measuring traffic	1	OSU#1	Self-similar	50	0 – 6
			Fixed rate	3600	2.4 – 5.4
	2	OSU#4	Self-similar	50	0 – 6
			Fixed rate	3600	2.4 – 5.4

図 4-10(a)及び(b)は、それぞれ、DLB 制御なし、及び、DLB 制御ありの場合の OSU#1-4 の下りトラフィック負荷の時間変動を示す。再割り当て周期に等しい、50 ms 間隔で測定した測定値を示す。点線は、それぞれの OSU の最大帯域である 8.6 Gbps を示す。図 4-10 (a)の 2.4 から 5.4 秒に示すように、DLB 制御なしの場合は、OSU#1 への総入力トラフィックは最大帯域を超えている一方で、OSU#2 への総入力トラフィックは、最大帯域を超えていない。一方で、図 4-10 (b)に示すように、DLB 制御ありの場合は、どの OSU の総入力トラフィックも最大帯域を超えていない。加えて、図 4-10 (a)及び図

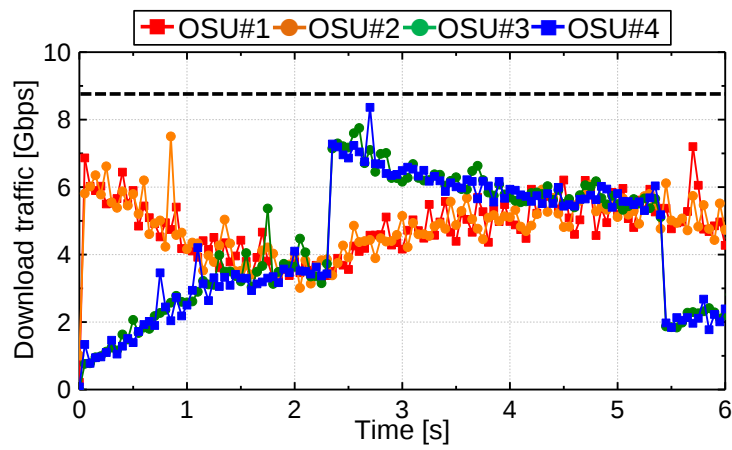
4-10 (b)全体の、各 OSU の下りスループットのフェアネスインデックスの平均は、それぞれ、0.68 及び 0.93 であった。図 4-10 (b)のフェアネスインデックスの平均は、図 4-10 (a)のフェアネスインデックスの平均よりも大きな値であったため、提案する DLB 制御を適用することで、複数 OSU 間のトラフィック負荷の公平性が向上していることを確認した。

図 4-11(a)及び図 4-11 (b)に、それぞれ、DLB 制御なし、及び DLB 制御ありの場合の ONU#1-2 の下りスループットの時間変動を示す。図 4-11 (a)に示すように、DLB 制御を行わない場合は、時間 2.4 から 5.4 秒における ONU#1 及び ONU#2 の平均スループットは、それぞれ 1.99 Gbps 及び 3.71 Gbps であった。また、OSU#1 のスループットは、大きく時間変動している。そして、ONU#2 の平均スループットは、ONU#1 の平均スループットの 1.86 倍であった。従って、大容量ファイルをダウンロードしようとした場合に、ダウンロードに要する時間は、ONU#1 と ONU#2 で約 2 倍異なる。加えて、時間 2.4 から 5.4 秒におけるフレームロス数は、ONU#1 及び ONU#2 で、それぞれ、 4.4×10^6 、及び 0 であった。ONU#1 のトラフィックを入力することで、OSU#1 の入力レートが最大帯域を超えてしまうため、ONU#1 のフレームロスのみが発生した。

図 4-11 (b)より、時間 2.4 から 5.4 秒における、ONU#1 および ONU#2 の平均スループットは、それぞれ 3.72 Gbps 及び 3.69 Gbps であった。ONU#2 の平均スループットは、ONU#1 の平均スループットの 0.99 倍であった。従って、提案する DLB 制御を適用することで、大容量ファイルをダウンロードしようとした場合に、ダウンロードに要する時間は、ONU#1 と ONU#2 でほぼ均一に近づいた。加えて、時間 2.4 から 5.4 秒におけるフレームロス数は、ONU#1 及び ONU#2 で、それぞれ、 3.84×10^3 フレーム、及び 4.31×10^3 フレームであった。大部分のフレームロスは、時刻 2.6 秒において発生した。これは、ONU#1 が接続する OSU#3 と、ONU#2 が接続する OSU#4 の総入力レートが最大レートを瞬間的に超えたためだと考えられる。このことは、提案する DLB 制御によって、OSU#3 と OSU#4 に接続する ONU 数が減少した後は、追加のフレームロスが発生していないことから説明できる。

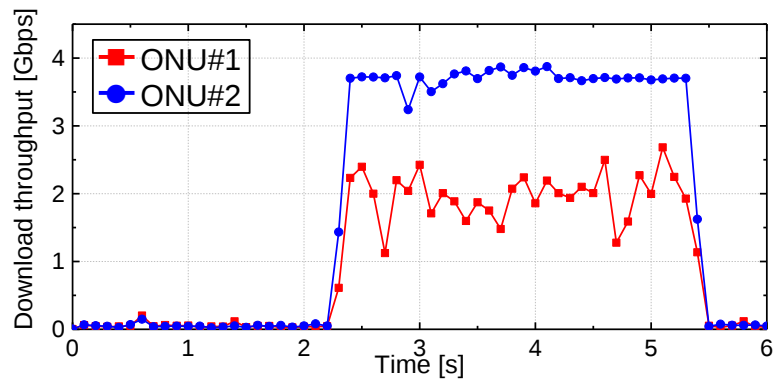


(a)

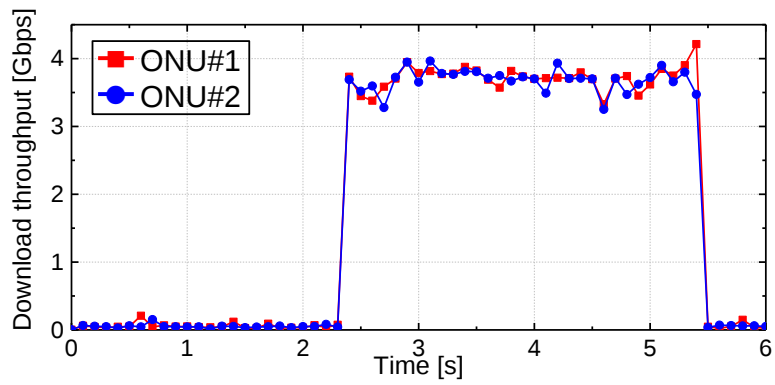


(b)

図 4-10 OSU 毎の下りトラフィック負荷の時間変動
(a) DLB 制御なし, (b) DLB 制御あり



(a)



(b)

図 4-11 ONU#1 と ONU#2 の下りスループットの時間変動
(a) DLB 制御なしの場合, (b) DLB 制御ありの場合

4-7 本章のまとめ

少ない波長切替数で複数 OSU 間のトラフィック負荷を分散できる動的負荷分散 (DLB) アルゴリズムを提案し、我々の知る限り初めて波長可変型 WDM/TDM-PON における動的負荷分散動作を実機で実現した。提案する DLB アルゴリズムを実機実装し、切替頻度が平均遅延に与える影響を評価した。DLB アルゴリズムを用いることで、たった 1 回の波長切替で複数 OSU 間のトラフィック負荷の偏りを最も改善できるため、トラフィック負荷を分散するための波長切替数を少なくすることができる。まず初めに、DLB アルゴリズムを用いることで 512 台の ONU のトラフィック負荷を 4 台の OSU 間でリアルタイムに分散できることを示した。続いて、DLB アルゴリズムを用いた動的負荷分散動作は、ラウンドロビンアルゴリズムを用いた動的負荷分散動作に比べて、切替頻度を 25 分の 1 に削減できることを示した。この実験結果は、ONU の入力レートが 0.05 Mbps から 50 Mbps において測定した。最後に、DLB アルゴリズムが平均遅延に与える影響を評価した。様々な切替頻度で測定した平均遅延の測定結果から、DLB アルゴリズム、及び、ラウンドロビンアルゴリズムを用いた場合の平均遅延の増加分は、それぞれ、13 μ s、及び、160 μ s であった。これは、提案した DLB アルゴリズムが平均遅延にほとんど影響しないことを示している。このように、平均遅延にほとんど影響しないのは、DLB アルゴリズムが切替頻度を大幅に削減できるためである。実験結果により、我々の提案する DLB アルゴリズムが、非常に少ない波長切替数で、リアルタイムに 512 台の ONU のトラフィック負荷を分散し、平均遅延にほぼ影響がないことを示した。

続いて、波長可変型 WDM/TDM-PON に提案する DLB 制御を適用することで、異なる OSU に收容される複数 ONU 間で公平なスループット制御を実現した。まず初めに、複数 OSU 間の利用帯域を公平化した場合に、複数 ONU 間で公平なスループットに達成するスループット公平化のメカニズムを説明した。次に、DLB 制御を適用した場合と適用しない場合で、スループットとフレームロスの公平性を評価した。提案する DLB 制御を適用した実験により、高負荷の OSU と低負荷の OSU に接続する ONU の平均スループットの比を 1.88 から 0.99 に低減したこと、そして同時に、総フレームロス率を 3 桁改善したことを示した。これらの実験結果より、複数 OSU 間のトラフィック負荷が異なる場合も、DLB 制御を適用することで、異なる OSU に接続する複数 ONU 間で公平なスループットをリアルタイムに提供できることを示した。

4-8 参考文献

- [1] Y. Senoo, S. Kaneko, T. Yoshida, S. Kimura, and N. Yoshimoto, "Dynamic load-balancing by monitoring traffic volume for λ -tunable WDM/TDM-PON," *IEICE Commun. Ex.*, vol. 2, no. 11, pp. 501-506. Nov. 2013.
Available: https://www.jstage.jst.go.jp/article/comex/2/11/2_501/_pdf
- [2] Y. Senoo, S. Kaneko, T. Yoshida, J. Sugawa, T. Odaka, S. Kimura, N. Yoshimoto and H. Kimura, "Dynamic-Load-Balancing Algorithm Suppressing the Number of Wavelength Reallocations for λ -tunable WDM/TDM-PON," in *Proc. ECOC*, 2014, Tu.1.2.2.
- [3] Y. Senoo, S. Kaneko, T. Yoshida¹, J. Sugawa, K. Wakayama, S. Kimura, K. Suzuki and A. Otaka, "Demonstration of 512-ONU real-time dynamic-load-balancing with few wavelength reallocations for λ -tunable WDM/TDM-PON," in *Proc. OFC*, 2015, Tu3E.1.
- [4] Y. Senoo, T. Yoshida, S. Kaneko, J. Sugawa, K. Wakayama, S. Kimura, K. Suzuki, and A. Otaka, "512-ONU real-time dynamic-load-balancing with few wavelength reallocations in 40-Gbps λ -tunable WDM/TDM-PON," *J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 7, no. 12, pp. B202–B211, Dec. 2015
- [5] Y. Senoo, S. Kaneko, T. Yoshida, J. Sugawa, K. Wakayama, K. Suzuki, and A. Otaka, "Real-time and fair throughput control in different OSU traffic bias with DLB algorithm for λ -tunable WDM/TDM-PON," in *Proc. ECOC 2015*, Tu.3.1.2, Sep. 2015
- [6] S. Kaneko, T. Yoshida, S. Furusawa, M. Sarashina, H. Tamai, A. Suzuki, T. Mukojima, S. Kimura, and N. Yoshimoto, "Demonstration of Load-Balancing Operation Based on Hitless Dynamic Wavelength Allocation on Symmetric 40-Gbit/s λ -Tunable WDM/TDM-PON," *IEEE J. Lightw. Technol.*, Vol. 33, no. 3, p. 645-652, 2015.
- [7] J. Sugawa, T. Odaka, and H. Toyoda, "Wavelength Tuning Method combined with Downstream Queue Monitoring per ONU for λ -tunable WDM/TDM-PON," in *Proc. ECOC*, 2014, Tu.1.2.3.
- [8] A. R. Dhaini, C. M. Assi, M. Maier, and A. Shami, "Dynamic Wavelength and Bandwidth Allocation in Hybrid TDM/WDM EPON Networks," *IEEE J. Lightw. Technol.*, Vol. 25, no. 1, p. 277-286, 2007.
- [9] M. P. McGarry, M. Reisslein, C. J. Colbourn, M. Maier, F. Aurzada, and M. Scheutzow, "Just-in-Time Scheduling for Multichannel EPONs," *IEEE J. Lightw. Technol.*, Vol. 26, no. 10, p. 1204-1216, 2008.
- [10] T. Yoshida, S. Kaneko, S. Kimura, and N. Yoshimoto, "An automatic

- load-balancing DWBA algorithm considering long-time tuning devices for λ -tunable WDM/TDM-PON,” in Proc. ECOC, 2013, We.2.F.5.
- [11] H. Song, B. Mukherjee, Y. Park, and S. Yang, “Shared-Wavelength WDM-PON Access Network for Supporting Downstream Traffic with QoS,” in Proc. OFC, 2006, OThK2.
- [12] J. Zhang, and N. Ansari, “Scheduling Hybrid WDM/TDM Passive Optical Networks With Nonzero Laser Tuning Time,” ACM Transaction on networking, vol. 19, no. 4, 2011.
- [13] R. K. Jain, D. W. Chiu, and W. R. Hawe, “A quantitative measure of fairness and discrimination for resource allocation in shared computer systems,” DEC Research, Tech. Rep. TR-301, 1984.
- [14] K. Taguchi, H. Nakamura, K. Asaka, S. Nakano, S. Kimura, and N. Yoshimoto, “100-ns λ -selective burst-mode transceiver for 40-km reach symmetric 40-Gbit/s WDM/TDM-PON,” in Proc. ECOC, 2013, Mo.4.F.5.
- [15] G. Kramer, “Generator of Self-Similar Traffic,” http://glenkramer.com/ucdavis/code/trf_gen3.htm

第5章 高速波長切替技術

5-1 はじめに

先行研究では、波長可変型WDM/TDM-PONにおいて、フレームロスなしの波長切替を実現する波長切替シーケンスがいくつか提案されている[1, 2]。この手順では、OLTが波長切替対象のONU宛に波長切替ゲートを送信することで波長切替を指示し、ONUは波長切替ゲート受信後に波長切替を実行し、そして、OLTに向かって波長切替完了フレームを送信する。OLTは、この波長切替完了フレームを受信した後に、ONUに対して上り送信許可を与える。このような手順とすることで、OLTは、ONU内の波長可変光送受信器の波長切替時間を把握していなくても、波長切替完了後に通信再開を指示することができるので、フレームロスなく波長切替を達成することができる。

一方で、波長可変性に加えて、収容局内装置の集約による設備投資コスト/運用コストの削減のために、光アクセスシステムの多分岐数と長延化の要求がある。これらの要求を満たすために、多数の研究が行われている[3-5]。参考文献[5]では、40 km、1024分岐の波長可変型WDM/TDM-PONのフィールドトライアルに成功している。しかし、このフィールドトライアルは、物理層だけに限定しており、MAC層の実現可能性は評価していない。

多分岐PONシステムでは、制御信号のオーバーヘッドの比率を削減するために、DBA周期を長くすることが必要である[6]。また、長延化PONシステムにおいても、伝搬遅延が増加するために、DBA周期を長くすることが必要である[7, 8]。しかしながら、従来の波長切替シーケンスでは、OLTとONU間の制御信号のやりとりによって、波長切替完了を確認しているため[1, 2]、DBA周期が長い場合は、波長切替にかかる時間が増加し、波長切替中のフレームロスを防ぐためのバッファリング時間が長くなるため、ONUまたはOLT内に大きなバッファ容量が必要となる。従って、DBA周期が長い場合は、必要となるバッファ容量の拡張に伴って、システムコストと消費電力が増大する。

そこで、本章では、DBA周期長に関わらず、波長切替遅延を短縮するフレームロスなしの高速波長切替シーケンスを提案する[9]。提案シーケンスでは、波長切替の完了時刻を、事前に登録しておいたONU内の波長可変光送受信器の波長切替時間と波長切替開始時刻を用いた計算により算出する。波長切替時の上りフレームと下りフレームのバッファリングは、前記計算に基づいて決定された波長切替の完了時刻に解除することで、フレームロスを防ぐ。従って、提案シーケンスでは、ONU内の波長可変光送受信器の波長切替時間を事前に登録しておくことで、波長切替の完了時刻を計算により算出し、ONUから送信された波長切替完了フレームの到着を待つことなく、フレームロスなしの波長切替を達成する。更に、波長切替後すぐに通信を再開することができるため、

提案シーケンスを用いることで、従来シーケンスを用いた場合に比べて、波長切替遅延を、DBA 周期長に依存しない短時間に短縮することができる。

更に、従来シーケンス及び提案シーケンスを実装した 40 Gbit/s 波長可変型 WDM/TDM-PON の試作機を用いて、DBA 周期長を変更した時の最大遅延を評価する。加えて、上り最大スループットを向上することができるグラント決定手法を備えた提案シーケンスについても実機評価する。

本章の構成は以下の通りである。まず、5-2 にて従来の波長切替シーケンスを説明した後、5-3 にて提案する波長切替シーケンスを説明する。更に、提案する波長切替シーケンス中で用いることで最大上りスループットを向上できるグラント決定手法を 5-4 にて提案する。続いて、5-5 、及び、5-6 において、提案する波長切替シーケンスを 40G 級波長可変型 WDM/TDM-PON に実装した場合の、最大遅延、及び、最大上りスループットの実験結果を示す。最後に 5-7 を本章のまとめとする。

5-2 従来の波長切替シーケンス

図 5-1 に波長可変型 WDM/TDM-PON 構成を示す。それぞれの ONU は、出力波長を $\lambda_{D_1} \sim \lambda_{D_4}$ に設定可能な波長可変光送信器と、受信波長を $\lambda_{U_1} \sim \lambda_{U_4}$ に設定可能な波長可変光受信器を備える。OLT はいくつかの OSU、動的波長帯域割当 (DWBA: Dynamic Wavelength Bandwidth Allocation) 計算部、そして、L2SW を備える。L2SW はスイッチングテーブルに従って、入力フレームを出力ポートへ転送する。それぞれの OSU は、固定波長を送受信する光送受信器と MAC を備える。OSU#j ($j=1,2,3,4$) は、固定波長 λ_{D_j} の下り信号を出力し、そして、固定波長 λ_{U_j} の上りバースト信号を受信する。ONU は、受信波長と送信波長の両方を変更することで、任意の OSU と通信することができる。DWBA 計算部は、動的波長割当 (DWA: Dynamic Wavelength Allocation) と動的帯域割当 (DBA: Dynamic Bandwidth Allocation) を実行する。DWA は、負荷分散や省電力化といった目標を達成するために、それぞれの ONU に新しい波長を自動的に割当てて、DBA は、複数 ONU 間で上り割当帯域を公平化するために、自動的にgrantサイズを決定し ONU に通信許可時間を割当て、更に、複数 ONU の上りフレームの衝突を避けるために、通信開始時刻を ONU へ指示する。L2SW は、SW テーブルに従って、下りフレームをコアネットワークからフレームの宛先 OSU へ向かって転送する。SW テーブルは、DWA 計算によって決められた波長割当に従って、書き換えられる。

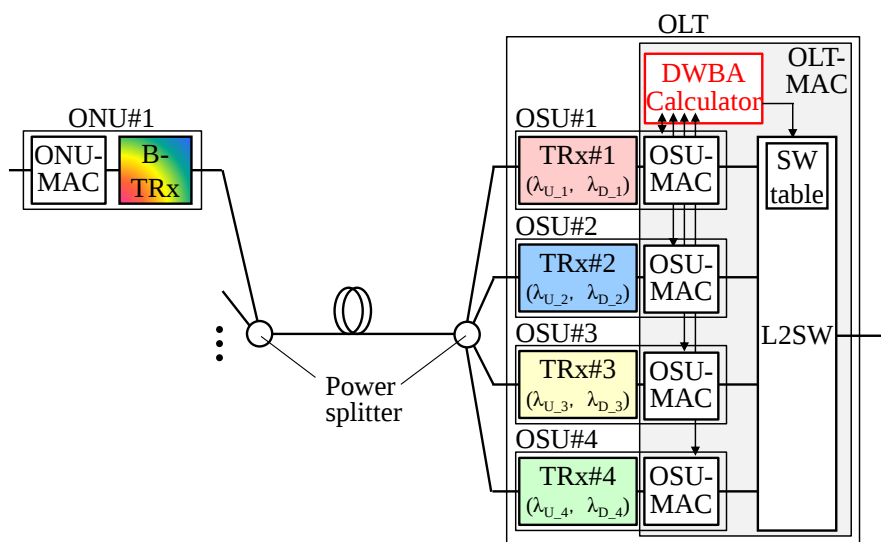


図 5-1 波長可変型 WDM/TDM-PON 構成

動的に波長を切り替えるために、OLT 内の DWA 計算に従って、ONU 内の受信波長と送信波長を変更する動作が求められる。DWA 動作自体が信号品質を劣化させないために、上り通信と下り通信の両方でフレームロスを防ぐことが必要である。図 5-2 に、参考文献[1]で提案された従来シーケンスを示す。一例として、ONU#1 の所属する OSU

が OSU#1 から OSU#2 へ変更される場合を示す。このシーケンスは、以下に示す手順で実行される。

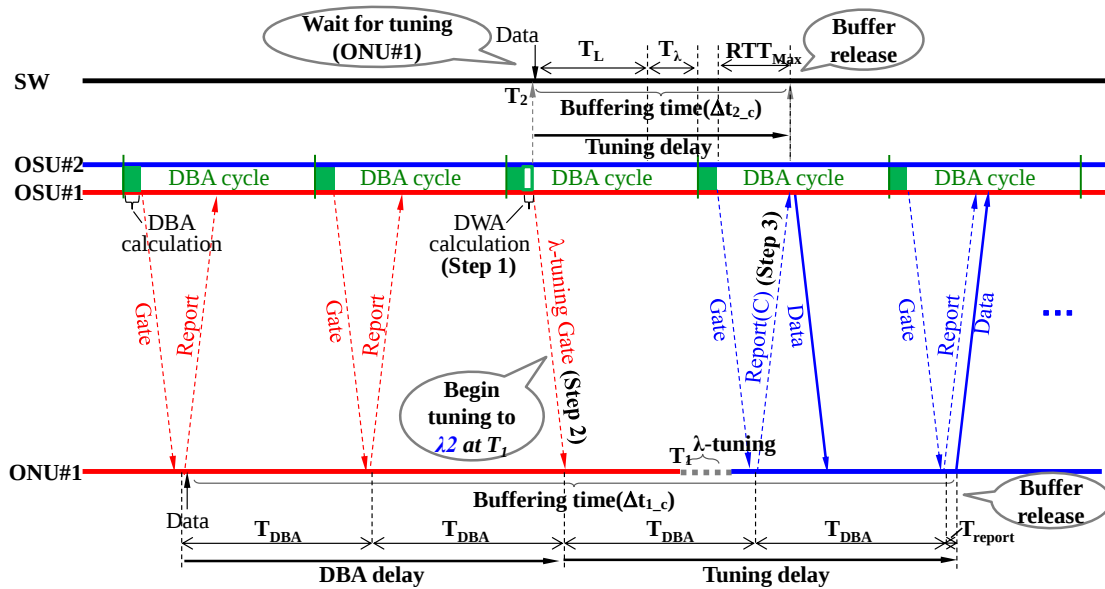


図 5-2 従来の波長可変シーケンス

手順 1 : DWA 計算は、ONU へ接続先 OSU を割当てて。

手順 2 : DWA 計算に従って、波長切替ゲートフレームが波長切替対象 ONU へ送信される。波長切替ゲートフレームは、新しい割当波長情報と、波長切替開始時刻である T_1 を含む。

手順 3 : 新しい接続先 OSU から送信されたゲートフレームへの応答として、ONU は波長切替完了レポートを送信する。

図 5-2 には、ONU がフレームロスなしの波長切替を実現するための、OSU 内のバッファ制御も示している。OSU が波長切替完了レポートを受信した後に、上りデータの送信許可が与えられる。そこで、ONU は、波長切替動作の間は、上りデータフレームをバッファリングし続け、そして、波長切替動作中に上り信号を送信することはない。従って、波長切替に要する時間である t_{1c} を賄うよりも十分大きなバッファメモリを ONU 内に導入することで、上りデータのフレームロスを防ぐことができる。 t_{1c} は式(5-1)で定義される。

$$t_{1c} = 4 \times T_{DBA} + T_{report} \quad (5-1)$$

T_{DBA} と T_{report} は、それぞれ DBA 周期長とレポートフレームの送信時間を示す。ここで、波長切替なし時の上りデータの最大遅延、つまり、DBA 動作に由来する最大遅延を、

DBA 遅延として定義する。式(5-1)中の $2 \times T_{\text{DBA}}$ は DBA 遅延であり、式(5-1)中の $2 \times T_{\text{DBA}} + T_{\text{report}}$ は、波長切替遅延である。ONU からの波長切替完了レポートが到達してから、データフレームの送信許可が与えられるまでに数 DBA 周期かかるため、上り信号の波長切替遅延は DBA 周期長に比例する。

下り信号をフレームロスなく波長切替するためには、更に2点の要求がある。まず初めに、OSU 内の下りバッファ内のフレームを全て排出するために十分な時間を波長切替開始時刻である T_1 の前に設定する必要がある。続いて、新たに割当られた OSU は、波長切替が完了するまで、データフレームをバッファリングし続ける必要がある。従って、下りフレームをフレームロスなく波長切替するためには、波長切替に要する時間である $\Delta t_{2,c}$ を賄うために十分大きなバッファ容量を OSU 内に備える必要がある。 $\Delta t_{2,c}$ を式(5-2)で示す。

$$\Delta t_{2,c} = \min\{n \in \mathbb{Z} \mid (T_L + T_\lambda)/T_{\text{DBA}} \leq n\} \times T_{\text{DBA}} + \text{RTT}_{\text{MAX}} \quad (5-2)$$

式(5-2)中の $\min\{n \in \mathbb{Z} \mid (T_L + T_\lambda)/T_{\text{DBA}} \leq n\}$ は、 $(T_L + T_\lambda)/T_{\text{DBA}}$ 以上の最小の整数を示す。 T_λ と RTT_{MAX} は、それぞれ、ONU 内の光送受信器の波長切替時間と複数 ONU の最大ラウンドトリップタイム (RTT : Round Trip Time) を示す。また、式(5-2)は、全て波長切替遅延である。従って、波長切替遅延は DBA 周期長に比例して増加する。それは、ONU が送信した波長切替完了レポートを OSU が受信するまでに数 DBA 周期要するためである。従って、従来手法においては、上りと下り信号の波長切替遅延は DBA 周期長に比例するため、DBA 周期長が長い場合は、フレームロスなく波長切替するために必要なバッファサイズを拡張する必要があり、装置費用と消費電力が増大する。

5-3 提案する波長切替シーケンス

提案するシステム構成は、DWBA 計算部の機能を除いて、図 5-1 に示した従来のシステム構成と等しい。従来の DWBA 計算部が、DWA 計算と DBA 計算を独立して行っていたのに対して、提案する DWBA 計算部は、DWA 計算と DBA 計算を同時に行う。

図 5-3 に提案する波長切替シーケンスを示す。提案シーケンスでは、DWBA 計算部は、まず初めに各 ONU へ新しい割当帯域を自動的に決定する。次に、全ての ONU の帯域要求を集約し、波長割当に従って、全ての ONU に対して上り送信許可と上り通信開始時刻を決定する。

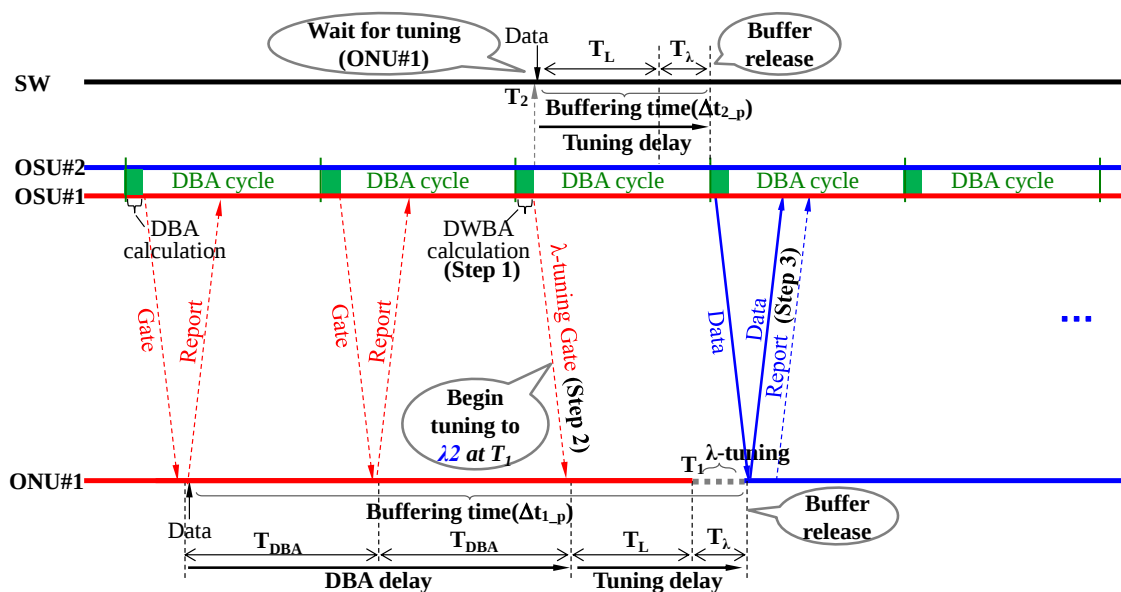


図 5-3 提案する波長切替シーケンス

提案する波長切替シーケンスは、以降に示す 3 手順である。一例として、ONU#1 を OSU#1 から OSU#2 へ再割り当てした場合を示す。

- 手順 1 : DWBA 計算部は、OSU への新しい ONU 割当と、ONU グラントの両方を決定する。上りグラントの決定手法は、後の 5-4 で示す。
- 手順 2 : DWBA 計算に従って、波長切替ゲートフレームを波長切替対象 ONU へ送信する。波長切替ゲートフレームは、新規割当波長、波長切替の開始時刻である T_1 、そして、レポートグラントとデータグラントを含む。
- 手順 3 : 波長切替前に接続していた OSU から与えられた波長切替ゲートフレームの指示に従って、ONU は、波長切替後に、データフレームとレポートフレームを送信する。

図 5-3 は、提案する波長切替シーケンスを用いて、フレームロスなしの波長切替を行った場合の OLT と ONU のバッファ制御も示す。上り通信に対して、波長切替前に接続していた OSU から与えられた波長切替ゲートフレームの指示に従って、ONU は、上りデータフレームを送信する。従って、波長切替に要する時間である Δt_{1_p} を賄うのに十分大きなバッファ容量を ONU 内に備えることで、フレームロスを防ぐことができる。 Δt_{1_p} は、式(5-3)で表される。

$$\Delta t_{1_p} = 2 \times T_{DBA} + T_L + T_\lambda \quad (5-3)$$

ここで、式(5-3)中の $2 \times T_{DBA}$ は DBA 遅延であり、式(5-3)中の $T_L + T_\lambda$ は波長切替遅延である。提案する波長切替シーケンスでは、波長切替前に接続していた OSU から送信された波長切替ゲートフレーム中に、データグラントとレポートグラントの割当てが行われているので、波長切替後に新たに接続した OSU から送信されたゲートフレームに従って上り通信を再開する必要がある。そこで、波長切替遅延は DBA 周期長に依存しない。

下り通信においては、従来の波長切替シーケンスと同様に、フレームロスなしの波長切替を達成するために 2 点必要である。まず初めに、OSU 内バッファに蓄積された下りフレームを排出するために、波長切替開始時刻である T_1 の前に十分な時間を確保することである。続いて、二つめは、新しく割り当てられた OSU は、波長切替の完了まで下りフレームをバッファリングし続けることである。提案する波長切替シーケンスでは、波長切替に要する時間である Δt_{2_p} を賄うのに十分大きなバッファ容量を OSU 内に備えることで、フレームロスすることなく、波長切替を行うことができる。 Δt_{2_p} は式(5-4)で与えられる。

$$\Delta t_{2_p} = T_L + T_\lambda \quad (5-4)$$

式(5-4)は、波長切替遅延を示す。下りバッファ蓄積は、OLT によって決められた時刻に解除されるので、ONU からの波長切替完了フレームの到着を待つ必要はない。そこで、波長切替遅延は、DBA 周期長に依存しない。従って、提案する波長切替シーケンスを用いた場合は、上り通信と下り通信の波長切替遅延は、DBA 周期長に依存しないため、装置費用と消費電力は DBA 周期長に従って増加せず、DBA 周期長の影響を受けない。

5-4 最大上りスループットを向上するグラント決定手法

DBA 周期長に依存しない波長切替遅延を達成するために、提案シーケンス中の波長切替ゲートフレームはレポートグラントとデータグラントを含む。DWBA 計算部は、新しい割当波長に加えて、レポートフレームとデータフレームのためのグラントサイズと送信開始時刻を決定する。従って、本章では、グラント決定手法を提案する。提案するグラント決定手法では、高い上りスループットを実現するために、波長切替対象である ONU と波長切替対象でない ONU 両方のレポートグラントとデータグラントを割当てる。提案するグラント決定手法の上りフレーム配置を図 5-4 に示す。G と R は、それぞれ、ゲートフレームとレポートフレームを表す。R_n と R_s は、それぞれ、波長切替対象でない ONU から送信されるレポートフレームの送信ウィンドウと、波長切替対象である ONU から送信されるレポートフレームの送信ウィンドウを示す。U₂ は、R_n と R_s の間の空きウィンドウである。U₁ は、波長切替対象 ONU と波長切替対象でない ONU の両方から送信されるデータ信号の送信ウィンドウである。R_n、U₂、そして R_s の合計で与えられるウィンドウは、以降、レポートウィンドウと呼ぶ。レポートウィンドウは、レポートフレームの送信ウィンドウと ONU 内の TRx の波長可変時間の合計に等しい。R_s は、波長切替対象 ONU 内の TRx の波長可変時間を最大化するために、レポートウィンドウの最後に設定する。

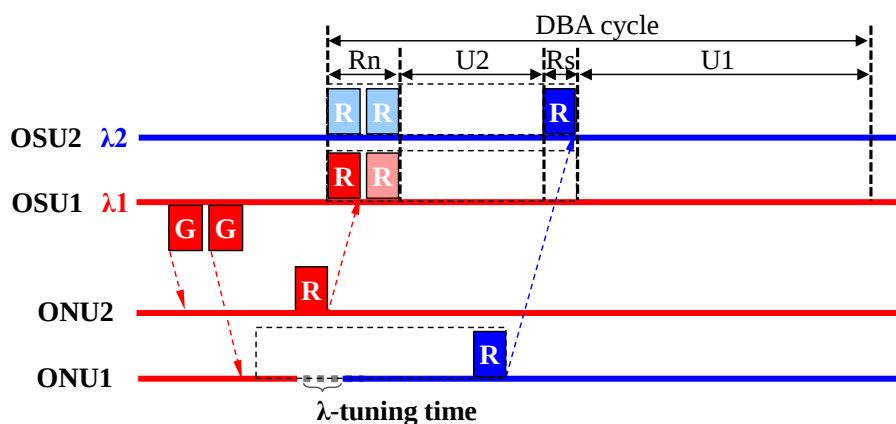


図 5-4 提案するグラント決定手法による上りフレームの配置

グラント割当手法は、次に示す手順により実行する

- G-Step1: 波長切替対象でない ONU のレポートフレームのグラントを、R_n のスロットに割り当てる。
- G-Step2: 波長切替対象 ONU のレポートフレームのグラントを、R_s のスロットに割り当てる。
- G-Step3: 波長切替対象 ONU と波長切替対象でない ONU のデータフレームのグラントを、U₁ のスロットに割り当てる。

レポートフレーム数が小さいときや、ONU 内波長可変光送受信器の波長切替時間が長いときは、U2 が長くなってしまいます。そして、U2 が長くなることで、最大上りスループットが低下する。従って、上り帯域を更に有効に使用するために G-Step4 を追加で提案する。G-Step4 では、波長切替対象でない ONU のデータフレームのグラントを U2 のスロットに割り当てる。波長切替対象 ONU のデータフレームは、U2 のスロットに割り当てない。G-Step4 適用時、または、G-Step4 非適用時のモードを、それぞれ U2_disable と、U2_enable と定義する。

G-Step4 : データフレームのグラントを U1 のスロットに割り当てた後に、波長切替対象でない ONU のデータフレームのグラントを U2 に割り当てる。

G-Step4 は、DBA 計算を多少複雑にするが、波長切替対象でない ONU のデータフレームのグラントを空きウィンドウである U2 のスロットに割り当てることができるため、上りの最大スループットを向上することができる。

5-5 最大遅延の検証実験

最大遅延を測定するための実験構成を図 5-5 に示す。1 台の ONU が、光ファイバを介して、1 台の OLT に接続する。ネットワークテストは、上りトラフィックを ONU#1 の 10 GbE UNI へ送信し、そして、下りトラフィックを OLT の 40 GbE SNI へ送信する。上りと下りの入力レートは 1.0 Gbps とした。入力トラフィックのフレーム長は 1522 byte とした。ONU#1 の波長は、20 ms の周期で λ_2 と λ_4 を交互に変更した。このような条件において、波長切替を行った場合と、波長切替を行わない場合の ONU#1 のフレームロスと最大遅延をネットワークテストで 60 秒間測定した。 T_{DBA} は 1 ms から 4 ms に、 T_λ は 0.1 μ s[10]に設定した。 T_{report} は 130 μ s に設定した。 T_L は 136 μ s に設定しており、これは、最大転送レートが 8.7 Gbps のときに、波長切替用のバッファサイズが 147 kByte であることに相当する。 RTT_{MAX} は、ファイバ長が 40 km の時のファイバ遅延に相当する 400 μ s に設定した。

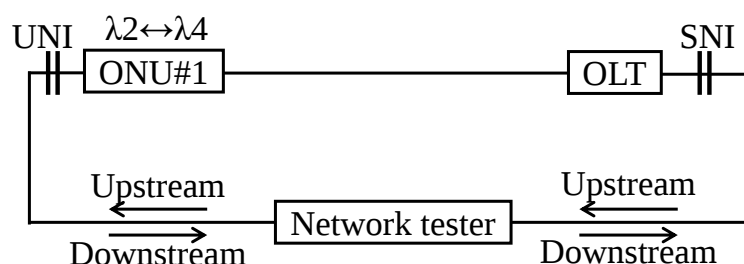


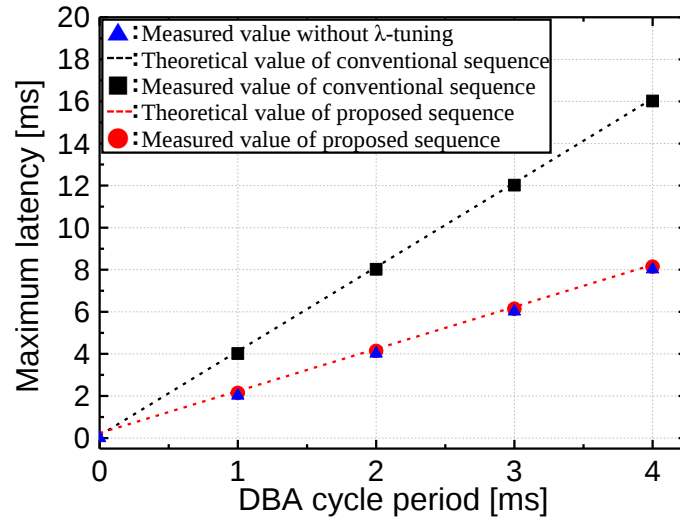
図 5-5 最大遅延測定の実験構成

図 5-6 (a)、及び、図 5-6 (b)に、DBA 周期長と上り最大遅延の関係、及び、DBA 周期長と下り最大遅延の関係を示す。青の三角、黒の四角、そして、赤の丸は、それぞれ、波長切替を行わない場合の測定値、従来手法で波長切替を行った場合の測定値、そして、提案手法で波長切替を行った場合の測定値を示す。黒の点線、及び、赤の点線は、それぞれ、従来手法で波長切替を行った場合、及び、提案手法で波長切替を行った場合の、最大遅延の理論計算値を示す。図 5-6 (a)中の黒の点線、及び、赤の点線は、それぞれ、式(1)、及び、式(2)を用いて計算した。図 5-6 (b)中の黒の点線、及び、赤の点線は、それぞれ、式(3)、及び、式(4)を用いて計算した。どの測定においても、フレームロスは発生しなかった。加えて、上りと下りの両方において、最大遅延の測定値は理論計算値とほぼ等しい値となった。

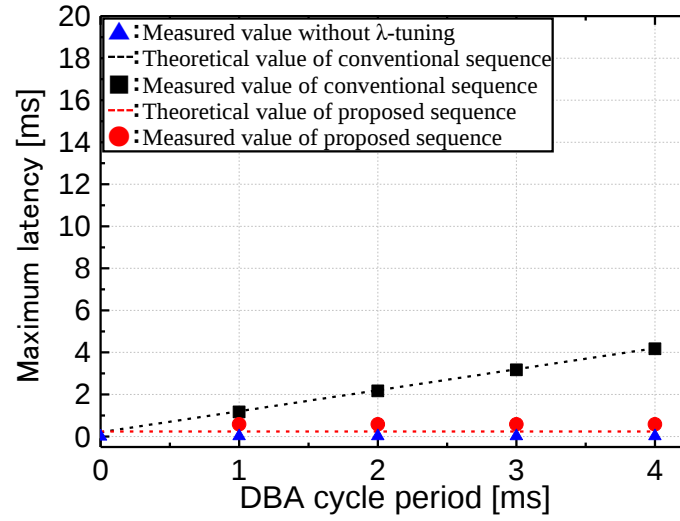
図 5-6 (c)、及び、図 5-6 (d)に、DBA 周期長と上り波長切替遅延の関係、及び、DBA 周期長と下り波長切替遅延の関係を示す。波長切替遅延は、波長切替実行時に測定した最大遅延から、波長切替を実行しなかった時に測定した最大遅延を引くことにより計算した。図 5-6 (c)から、従来手法を用いた場合は、上りの波長切替遅延が DBA 周期長の

約 2 倍であるのに対して、提案手法を用いた場合は、上りの波長切替遅延が 126 μs と一定であることが分かる。従って、提案手法を用いることで、上りの波長切替遅延を DBA 周期長に依存しない、非常に小さい固定値とすることができる。続いて、図 5-6 (d) から、提案手法を用いた場合は下りの波長切替遅延が DBA 周期長とほぼ等しいのに対して、提案手法を用いた場合は、下りの波長切替遅延が 567 μs と一定であることが分かる。従って、提案手法を用いることで、下りの波長切替遅延も、DBA 周期長に依存しない、非常に小さい固定値とすることができる。

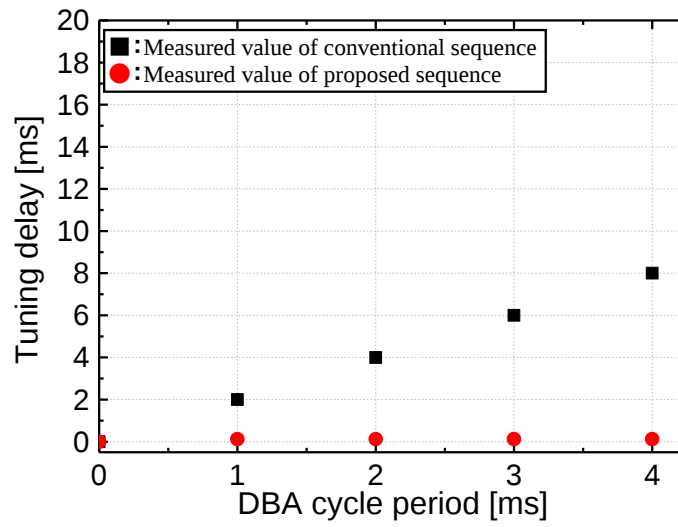
図 5-6 (a)と図 5-6 (b)に戻ると、波長切替遅延が削減できたおかげで、提案手法を用いた場合の最大遅延は、従来手法を用いた場合に比べて、大幅に削減することができた。図 5-6 (a)に示すように、DBA 周期長が 4 ms のとき、従来手法を用いた場合、及び、提案手法を用いた場合の上りの最大遅延は、それぞれ、16.02 ms、及び、8.14 ms であった。これは、最大転送レートを 8.7 Gbps とすると、フレームロスなしの波長切替を達成するために必要なバッファサイズは、従来手法を用いる場合、及び、提案手法を用いる場合で、それぞれ、17.4 Mbyte、及び、8.85 Mbyteであることを示す。従って、提案手法を用いた場合は、従来手法を用いた場合に比べて、上りのフレームロスなしの波長切替を達成するために必要なバッファサイズを半分に削減できる。一方で、図 5-6 (b)に示すように、DBA 周期長が 4 ms のとき、従来手法を用いた場合、及び、提案手法を用いた場合の下りの最大遅延は、それぞれ、4.17 ms、及び、0.58 ms であった。これは、最大転送レートを 8.7 Gbps とすると、フレームロスなしの波長切替を達成するために必要なバッファサイズは、従来手法を用いる場合、及び、提案手法を用いる場合で、それぞれ、4.53 Mbyte、及び、0.63 Mbyteであることを示す。従って、提案手法を用いた場合は、従来手法を用いた場合に比べて、下りのフレームロスなしの波長切替を達成するために必要なバッファサイズを 7 分の 1 に削減できる。



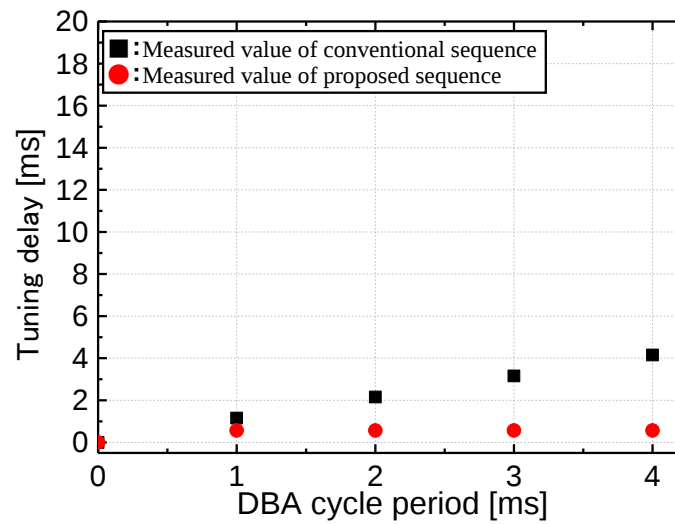
(a)



(b)



(c)



(d)

図 5-6 実験結果

(a) 上り最大遅延, (b) 下り最大遅延,
(c) 上り波長切替遅延, (d) 下り波長切替遅延

5-6 最大上りスループットの検証実験

最大スループット測定のための実験構成を図 5-7 に示す。4 台の ONU がパワースプリッタと光ファイバを介して、1 台の OLT に接続する。ネットワークテストは、上りトラフィックを ONU#2-4 の 10 GbE UNI へ送信する。この実験構成において、2 種の実験を実施した。

まず初めに、データグラントがレポートウィンドウに割り当てられているかいないかを確認するために、U2_disable と U2_enable の状態において、上りパケットのキャプチャを行った。実験結果を図 5-8 に示す。ネットワークテストから ONU#2-4 への入力レートは 10 Gbps に設定した。入力トラフィックのフレーム長は 1522 byte とした。ONU#1 の設定波長を λ_4 から λ_2 へ変更する間の OSU#2 の上りフレームをキャプチャした。ONU#2-4 の波長は λ_2 に設定した。ONU 内の光送受信器の波長切替時間は、0.1 μs とした。

続いて、受信した総フレーム数をネットワークテストで合計することで、上り最大スループットを評価した。上り最大スループットは、最小のインターフレームギャップ 12 byte とプリアンブル 8 byte を、フレーム長に含めて計算した。実験結果を図 5-9 に示す。ネットワークテストから ONU#1、及び、ONU#2-4 への入力レートは、それぞれ 0 bps、及び、10 Gbps に設定した。入力トラフィックのフレーム長は 1522 byte とした。様々な ONU 内光送受信器の波長切替時間や、様々な波長切替周期に設定した場合の、ONU#2-4 の総受信フレーム数をネットワークテストで測定した。総受信フレーム数は 60 秒間測定した。ONU 内光送受信器の波長切替時間は、0.1 μs 、または、50 μs に設定した。更に、ONU#1 の波長は、 λ_2 と λ_4 の交互に変更し、その波長切替周期は 1 ms と 1s の間で変更した。DBA 周期長は 1 s とした。つまり、ONU#1 の光送受信器の波長は、DBA 周期 1000 回に 1 度変更した。また、ONU#2-4 の全ての波長は、 λ_2 に設定した。 T_{report} は 130 μs に設定した。

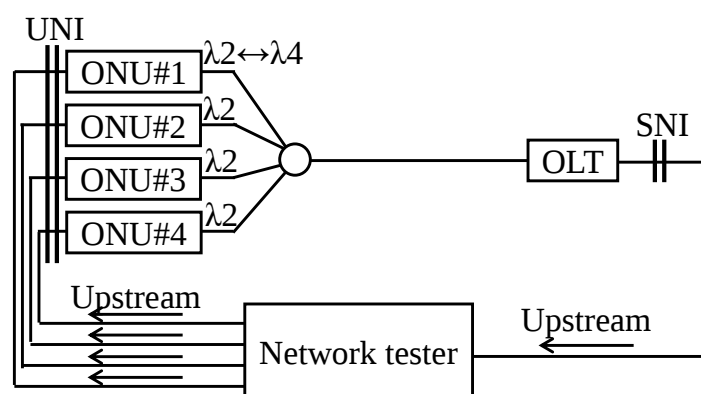


図 5-7 最大スループット測定の実験構成

レポートウィンドウを確認するために、U2_disable と U2_enable の状態で、上りフレームをキャプチャした。6-5 で述べたように、U2_disable の設定では、レポートウィンドウ中にデータフレームは割り当てられない一方で、U2_enable の設定では、レポートウィンドウ中にデータフレームが割り当てられる。

図 5-8 に Wireshark で測定したパケットキャプチャ結果を示す。図中の Time は、受信したパケットの受信間隔を示す。図 5-8 (a)の U2_disable において、No. 331-333 のフレームは波長切替対象でない ONU#4-2 から送信されたフレームであり、No. 334 のフレームは波長切替対象 ONU#1 から送信されたフレームである。No. 333 と No. 334 のフレーム間の間隔は、124 μ s であった。従って、U2_disable の状態では、波長切替対象でない ONU から送信されたレポートフレームと、波長切替対象である ONU から送信されたレポートフレームの間に比較的大きな空きウィンドウが存在する。一方で、図 5-8 (b)の U2_enable の状態では、No. 246-248 のフレームは波長切替対象でない ONU#4-2 から送信されたフレームであり、No. 334 のフレームは波長切替対象 ONU#1 から送信されたフレームである。No. 248 のフレームと、No. 334 のフレーム間の間隔は 127 μ s である。No. 248 と No. 334 のフレーム間に送信された総フレーム数は、86 である。従って、U2_enable の状態では、波長切替対象でない ONU のデータグラントが、波長切替対象でない ONU のレポートフレームグラントと、波長切替対象である ONU のレポートフレームグラントの間に割り当てられていることが分かる。

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
329	0.000001413	192.85.1.2	192.0.0.1	IPv4	1522	Unknown (253)
330	0.000001427	192.85.1.2	192.0.0.1	IPv4	1522	Unknown (253)
331	0.000001235	MS-NLB-PhysServer-17_57:20:00:04	91:80:c2:00:00:01	MAC CTRL	68	Report
332	0.000001145	MS-NLB-PhysServer-17_57:20:00:03	91:80:c2:00:00:01	MAC CTRL	68	Report
333	0.000001133	MS-NLB-PhysServer-17_57:20:00:02	91:80:c2:00:00:01	MAC CTRL	68	Report
334	0.000123775	MS-NLB-PhysServer-17_57:20:00:01	91:80:c2:00:00:01	MAC CTRL	68	Report
335	0.000004875	192.85.1.2	192.0.0.1	IPv4	1522	Unknown (253)
336	0.000001412	192.85.1.2	192.0.0.1	IPv4	1522	Unknown (253)
337	0.000001428	192.85.1.2	192.0.0.1	IPv4	1522	Unknown (253)

(a)

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
244	0.000001413	192.85.1.2	192.0.0.1	IPv4	1522	Unknown (253)
245	0.000001395	192.85.1.2	192.0.0.1	IPv4	1522	Unknown (253)
246	0.000001217	MS-NLB-PhysServer-17_57:20:00:04	91:80:c2:00:00:01	MAC CTRL	68	Report
247	0.000001195	MS-NLB-PhysServer-17_57:20:00:03	91:80:c2:00:00:01	MAC CTRL	68	Report
248	0.000001103	MS-NLB-PhysServer-17_57:20:00:02	91:80:c2:00:00:01	MAC CTRL	68	Report
249	0.000004990	192.85.1.2	192.0.0.1	IPv4	1522	Unknown (253)
250	0.000001410	192.85.1.2	192.0.0.1	IPv4	1522	Unknown (253)
251	0.000001427	192.85.1.2	192.0.0.1	IPv4	1522	Unknown (253)
332	0.000001413	192.85.1.2	192.0.0.1	IPv4	1522	Unknown (253)
333	0.000001430	192.85.1.2	192.0.0.1	IPv4	1522	Unknown (253)
334	0.000003110	MS-NLB-PhysServer-17_57:20:00:01	91:80:c2:00:00:01	MAC CTRL	68	Report
335	0.000004430	192.85.1.2	192.0.0.1	IPv4	1522	Unknown (253)
336	0.000001407	192.85.1.2	192.0.0.1	IPv4	1522	Unknown (253)
337	0.000001418	192.85.1.2	192.0.0.1	IPv4	1522	Unknown (253)

(b)

図 5-8 パケットキャプチャ結果

(a) U2_disable, (b) U2_enable

図 5-9 に、波長切替周期と最大上りスループットの測定結果を示す。黒で塗りつぶした点、及び、赤で塗りつぶした点は、それぞれ、U2_disable、及び、U2_enable の状態において測定した上り最大スループットを示す。加えて、三角、及び、丸は、それぞれ、ONU 内光送受信器の波長切替時間が 0.1 μ s、及び、50 μ s の場合を示す。どの測定点においても、フレームロスが発生しなかった。

測定した上り最大スループットは、全て 8.7 Gbps を下回った。ここで、8.7 Gbps は、誤り訂正符号方式 (FEC: Forward Error Correction) として、リードソロモン(255, 223)を用いた場合に 10G-EPON システムで想定される、MAC レイヤの最大伝送レートである。上り最大スループットが、全て 8.7 Gbps を下回った理由は、波長切替対象でない ONU のレポートフレームグラントと、波長切替対象である ONU のレポートフレームグラント間に空きウィンドウが存在するためである。上り最大スループットは、U2_disable の場合に、波長切替周期が大きい場合や、ONU 内の波長可変光送受信器の波長切替時間が大きいときに大幅に劣化した。この劣化の原因は、ONU 内の波長可変光送受信器の波長切替時間が大きいときに、全体に対する空きウィンドウの割合が大きいためである。そして、この最大スループットの劣化は、U2_enable の設定を適用し、波長切替対象でない ONU のデータフレームグラントを空きウィンドウに割り当てることで、空きウィ

ンドウを削除することによって、抑制することができる。

U2_disable の状態で、ONU 内の波長可変光送受信器の波長切替時間が 50 μ s、波長切替周期が 1 ms のとき、上り最大スループットは、U2_disable、及び、U2_enable で、それぞれ、7.909 Gbps、及び、8.600 Gbps であった。従って、上り最大スループットは 8.74 % 向上した。上り最大スループットは、以降に述べる数値計算において 9.07 % 向上するという結果が得られたため、測定値と理論計算値は、ほぼ等しかった。

$$\text{Improved rate} = (R_n + U_2 + R_s) / ((\lambda\text{-tuning interval}) \cdot 2) \quad (5-5)$$

ONU 内の波長可変光送受信器の波長切替時間は 50 μ s であるため、 $R_n + U_2 + R_s$ は 180 μ s である。式(5-5)において、分母を波長切替周期の 2 倍とした理由は、ONU#1 の波長が波長切替周期の 2 回に 1 回だけ λ_2 に設定されるため、ONU#2 の空きウィンドウが 2 回の波長切替で 1 回だけ現れるためである。

これらの測定結果より、U2_enable を適用した場合の、提案するグラント決定手法は、上り最大スループットを向上できることを示した。特に、波長切替周期が短い場合や、ONU 内の波長可変光送受信器の波長切替時間が長い場合は、U2_enable を適用することで、最大スループットを大幅に向上できる。従って、DWBA 制御[11, 12]に応用した場合のように、パケットバイパケットの波長切替動作を行ったとしても、高い上り最大スループットを実現することができる。

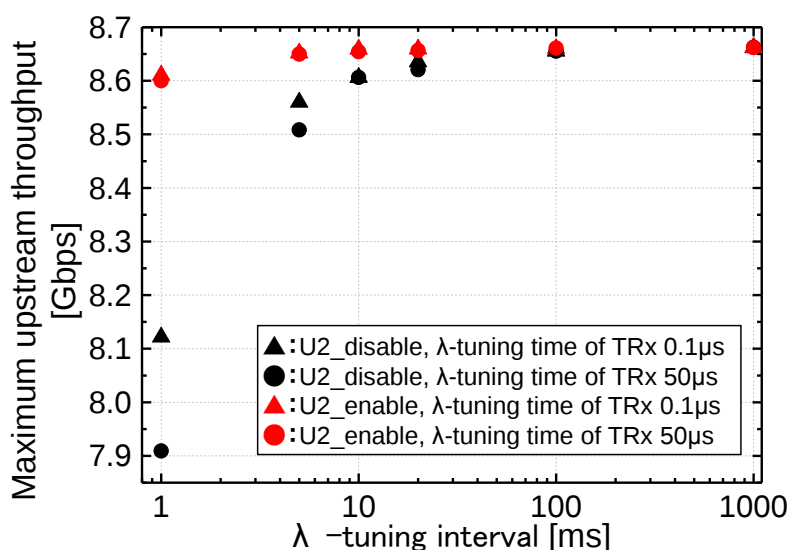


図 5-9 実験結果：上り最大スループット vs 波長切替間隔

5-7 本章のまとめ

DBA 周期長が大きい場合に、フレームロスなしの波長切替に必要なバッファサイズを抑制するために、波長切替遅延を DBA 周期長無依存にする波長切替シーケンスを提案した。フレームロスを防ぐために、ONU と OLT は、波長切替の開始時刻から、波長切替の完了時刻まで、フレームをバッファに蓄積し続ける。提案シーケンスでは、ONU 内の波長可変光送受信器の波長切替時間に基づいて決定した一定時間後に、OLT は、波長切替が完了したとみなす。ONU は、波長切替ゲートフレームによって与えられたデータグラントの時刻まで、上りデータフレームをバッファに蓄積し続ける。加えて、OLT は、ONU 内の波長可変光送受信器の波長切替時間に基づいて決められた時刻まで、下りデータフレームをバッファに蓄積し続ける。従って、提案シーケンスを用いた場合は、ONU の波長切替完了の応答なく、バッファリング解除することができるため、波長切替遅延を DBA 周期長無依存にすることができる。提案シーケンスの実現可能性を確かめるために、提案シーケンスは、40 Gbit/s 波長可変型 WDM/TDM-PON に実装され、実験にて動作確認を行った。最大遅延の実験結果により、提案シーケンスを用いることで、フレームロスなく、且つ、DBA 周期長に関係ない固定の波長切替遅延で、ONU 内の波長可変光送信器は送受信波長を変更することができた。DBA 周期長が 4 ms の場合、提案シーケンスを用いることで、従来シーケンスを用いた場合に比べて、上り、及び、下りに必要なバッファメモリを、2 分の 1、及び、7 分の 1 に削減することができた。また、実験により、提案シーケンスを用いることで、波長切替周期が高い場合や ONU 内の波長可変光送受信器の波長切替時間が長い場合も、上り最大スループットを劣化させることなく、波長切替できることを示した。従って、提案シーケンスを適用して波長切替を実行することで、高い上り最大スループットを実現しながら、波長切替遅延を抑制することで、バッファサイズの削減によるシステムコストの低減と消費電力の削減を達成することができる。

5-8 参考文献

- [1] S. Kaneko, T. Yoshida, S. Furusawa, M. Sarashina, H. Tamai, A. Suzuki, T. Mukojima, S. Kimura, and N. Yoshimoto, "Demonstration of Load-Balancing Operation Based on Hitless Dynamic Wavelength Allocation on Symmetric 40-Gbit/s λ -Tunable WDM/TDM-PON," *IEEE J. Lightw. Technol.*, vol. 33, no. 3, pp. 645-652, February, 2015.
- [2] J. Sugawa, T. Odaka, and H. Toyoda, "Wavelength Tuning Method combined with Downstream Queue Monitoring per ONU for λ -tunable WDM/TDM-PON," in *Proc. ECOC 2014*, Tu.1.2.3.
- [3] Y. Luo, X. Zhou, F. Effenberger, X. Yan, G. Peng, Y. Qian, and Y. Ma, "Time- and Wavelength-Division Multiplexed Passive Optical Network (TWDM-PON) for Next-Generation PON Stage 2 (NG-PON2)," *IEEE J. Lightw. Technol.*, vol. 31, no. 4, pp. 587-593, February, 2013.
- [4] L. Yi, Z. Li, M. Bi, W. Wei, and W. Hu, "Symmetric 40-Gb/s TWDM-PON With 39-dB Power Budget," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 25, no. 7, pp. 644-647, Apr. 1, 2013.
- [5] K. Taguchi, K. Asaka, M. Fujiwara, S. Kaneko, T. Yoshida, Y. Fujita, H. Iwamura, M. Kashima, S. Furusawa, M. Sarashina, H. Tamai, A. Suzuki, T. Mukojima, S. Kimura, K. Suzuki, and A. Otaka, "First Field Trial of 40-km Reach and 1024-Split Symmetric-Rate 40-Gbit/s λ -tunable WDM/TDM-PON," *Proc. OFC 2015*, Th5A.6
- [6] R. Roy, G. Kramer, M. Hajduczenia, HJ. Silva, "Performance of 10G-EPON," *IEEE Communications Magazine*, vol. 49, issue 11, pp. 78-85, 2011
- [7] B. Skubic, J. Chen, J. Ahmed, B. Chen, L. Wosinska, and B. Mukherjee, "Dynamic Bandwidth Allocation for Large-Reach PON: Overcoming Performance Degradation," *IEEE Communications Magazine*, vol. 48, issue 11, pp. 100-108, 2010
- [8] D. Murayama, N. Oota, K. Suzuki, and N. Yoshimoto, "Low-Latency Dynamic Bandwidth Allocation for 100km Large-Reach EPONs," *OSA J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 5, no. 1, pp. 48-55, January, 2013.
- [9] Y. Senoo, S. Kaneko, T. Yoshida, J. Kani, K. Asaka, K. Suzuki, and A. Otaka, "Hitless λ -Tuning Sequence to Reduce Tuning Delay in λ -Tunable WDM/TDM-PON," *J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 8, no. 7, pp. 486-494, Jul. 2016
- [10] K. Taguchi, H. Nakamura, K. Asaka, S. Nakano, S. Kimura, and N. Yoshimoto, "100-ns λ -selective burst-mode transceiver for 40-km reach symmetric 40-Gbit/s WDM/TDM-PON," in *Proc. ECOC*, 2013, Mo.4.F.5.

- [11] A. R. Dhaini, C. M. Assi, M. Maier, and A. Shami, "Dynamic Wavelength and Bandwidth Allocation in Hybrid TDM/WDM EPON Networks," *IEEE J. Lightw. Technol.*, vol. 25, no. 1, pp. 277-286, January, 2007.
- [12] T. Yoshida, S. Kaneko, S. Kimura, and N. Yoshimoto, "An automatic load-balancing DWBA algorithm considering large-time tuning devices for λ -tunable WDM/TDM-PON," in *Proc. ECOC 2013*, We.2.F.5.

第6章 結論

PONを用いたFTTHサービスは、高いスループットと経済性から、ブロードバンドサービスを提供するために、多くの国で導入されている。現状の一般的なアクセスネットワークアーキテクチャは、TDM-PONとL2SWを用いた、光段と電気段による2段階の集線構成を用いており、これにより大規模ユーザのトラフィックを1本の集線リンク（回線）に収容して経済化を図ることができる。

また、日本では、FTTHサービスが提供され始めてから約15年が経過し、広帯域化以外に省電力化への社会的要求も高まっている。そこで、PONの広帯域化と省電力化に向けた研究が進められている。しかしながら、一般的なPONとL2SWを用いた2段階の集線構成によるアクセスネットワークアーキテクチャでは、L2SWの広帯域化と省電力化を同時に達成することが難しい。さらに、PON区間のONUとOLTの接続経路は固定であるため、故障時に経路切替により冗長系へ移行し信頼性を向上されることや、異なるPON間で負荷分散を行いユーザ間公平性を向上させることができないという課題がある。

これらの課題に対し、本研究では、L2SWを用いた集線を不要化するとともに、ユーザ単位でPON区間の経路切替を可能とするフォトリックアグリゲーションによる高速光アクセスネットワークを提案した。更に、フォトリックアグリゲーションによる高速光アクセスネットワークを実現するための主要技術として、光集線ノード構成技術・動的負荷分散技術・高速波長切替技術を検討した。

第1章では、本研究の背景及び狙いを明らかにし、本研究の意義および目的を示した。まず初めに、研究背景として、ブロードバンドサービスの普及とアクセスシステムの光化、PONシステムの原理、PONシステムの標準化動向、そして、一般的なアクセスネットワークアーキテクチャについて説明した。次に、将来アクセスネットワークの要求条件と課題をまとめ、本研究の目的を述べた。

第2章では、高速光アクセスネットワークのアーキテクチャを網羅的に検討し、これらの中から、省電力性・信頼性・ユーザ間公平性の3つの観点で最適なアーキテクチャとして、PON区間の多分岐化によりL2SWを不要化し（光集線）、更に、TDM-PONに波長多重技術を採用して波長と経路を1対1に対応させ、ユーザ毎に割当波長を選択することで、PON区間の経路切替を可能とする（光スイッチング）ようなアーキテクチャを提案した。このようなアーキテクチャとすることで、L2SWの削減により省電力性を高め、また、PON区間の経路を切り替えることで帯域を共有するユーザの組み合わせを変更することによりユーザ間公平性を高めることができる。さらに、アクセスネットワークにおけるトラフィック予測を行い、その結果から、フォトリックアグリゲーションによる高速光アクセスネットワークの構成を検討した。2030年において512ユーザを集線する集線リンクのトラフィックは、混雑リンクにおいて、上り、及び、下りで、

それぞれ、154 Mbps、及び、2.04 Gbpsと予測されるため、ラインレート10G級のPONシステムである波長可変型WDM/TDM-PONへフォトリニアアグリゲーションを適用することで、広帯域化要求に十分応えることができることを確認した。これを踏まえ、第3章以降は、波長可変型WDM/TDM-PONへフォトリニアアグリゲーションを適用する検討を行った。

第3章では、フォトリニアアグリゲーションによる高速光アクセスネットワークにおいて、集線機能（光集線と光スイッチング）を実現可能、且つ、省電力効果が最大となる光集線ノード（PA: Photonic aggregator）の構成を提案した。PAは、従来構成と同等の集線・波長振分機能を代替できる光デバイス（光スプリッタ、周回性AWG）の組み合わせと、従来構成と同等のカバーエリアを確保するために必要となる光増幅器の個数が最小となるように光増幅器の挿入場所を検討することで決定した。提案技術を用いることで、PAの集線比を64とした場合に、集線部分にかかる消費電力を30 %削減可能であることを理論計算より明らかにした。これは、提案したPA構成を適用することで、光増幅器の追加による消費電力の増加よりも、L2SWの削減とOLT数の低減による消費電力の削減が、十分大きくなるためである。

第4章では、複数のOLT間のトラフィック負荷を分散する動的負荷分散技術を提案し、提案手法を用いた場合の負荷の均一性、切替頻度、平均遅延を実験により評価した結果を示した。複数OLT間のトラフィック負荷を分散するために、ONUに接続先OLTを割当てる動的負荷分散（DLB: Dynamic load balancing）アルゴリズムを提案した。本アルゴリズムを用いることで、1回の波長切替で複数OLT間のトラフィック負荷の偏りを最も改善できるため、負荷を分散するための波長切替数を少なくすることができる。提案するDLBアルゴリズムを用いることで、従来手法であるラウンドロビンアルゴリズムに比べて25分の1の波長切替数で、512台のONUのトラフィック負荷を4台のOLT間でリアルタイムに分散できること、加えて、平均遅延にほとんど影響を与えずに負荷分散できるという実験結果を示した。

第5章では、フレームロスなしでの経路切り替えを実現する高速波長切替手順を提案し、切替時間を実験により評価した。まず初めに、フレームロスなしの波長切替に必要なバッファサイズを抑制するために、波長切替時間を動的帯域割当（DBA: Dynamic bandwidth allocation）の周期に依存せず短時間とする波長切替シーケンスを提案した。提案シーケンスでは、ONU内の波長可変光送受信器の波長切替時間に基づいて決定した一定時間経過後に、波長切替が完了したとみなしてバッファリングを解除するため、波長切替遅延をDBA周期長無依存の短時間とすることができる。続いて、DBA周期長が4 msの場合、提案シーケンスを用いた場合は、従来シーケンスを用いた場合に比べて、上り、及び、下りの波長切替時間を、それぞれ、2分の1、及び、7分の1に削減できるという実験結果を示した。

以上の検討より、フォトニックアグリゲーションの適用により、L2SWを用いた集線を不要化するとともに、ユーザ単位でPON区間の経路切替を可能とする高速光アクセスネットワークアーキテクチャを提案し、その主要技術である、光集線ノード構成技術・動的負荷分散技術・高速波長切替技術の実現可能性を明らかにした。日本のブロードバンドサービスを支える光アクセスネットワークに対して、本論文でまとめたフォトニックアグリゲーションは、広帯域化・省電力化・高信頼化・ユーザ間公平性の向上を実現する技術として期待される。

謝辞

本論文を作成するにあたり、懇切なる御指導と御鞭撻を賜りました北海道大学大学院情報科学研究科 可児淳一客員教授（日本電信電話株式会社 NTT アクセスサービスシステム研究所 光アクセス基盤プロジェクト 光アクセス基盤SEグループ 特別研究員）に謹んで深謝の意を表します。また、有益な御指導と御助言を賜りました北海道大学大学院情報科学研究科 山本強教授、大鐘武雄教授、斉藤晋聖教授に謹んで深謝の意を表します。

本論文は、筆者が NTT アクセスサービスシステム研究所において 2010 年から取り組んできた研究成果をまとめたものです。本論文をまとめる機会を与えていただきました、NTT アクセスサービスシステム研究所 光アクセス基盤プロジェクト 大高明浩プロジェクトマネージャ、ならびに、同プロジェクト 光アクセス基盤SEグループ 鈴木謙一グループリーダーに深謝いたします。また、防衛大学校 葉玉寿弥教授（元光アクセスシステムプロジェクト プロジェクトマネージャ）、千歳科学技術大学 吉本直人教授（元同プロジェクト プロジェクトマネージャ）、NTT デバイスイノベーションセンター スマートコネクションデバイスプロジェクト 木村俊二プロジェクトマネージャ（元同プロジェクト 次世代アクセスシステムグループ グループリーダー）には、本研究の機会を与えていただくとともに、多くの御指導、及び御激励をいただきました。ここに謹んで感謝の意を表します。

さらに、吉田智暁主幹研究員、浅香航太主任研究員、金子慎主任研究員には、研究業務を進めていく上で多くの御指導、及び、御協力をいただきました。ここに心から感謝申し上げます。特に、金子慎主任研究員には、指導者として、研究テーマの立て方から、研究の進め方、光伝送に関する基礎知識や論文執筆方法に至るまで、多岐にわたり懇切なる御指導を賜りました。感謝申し上げます。その他、筆者が本研究遂行時に在籍した研究グループの皆様を中心として多くの方々に、御助言や励ましをいただくとともに、実験装置の使用等ではいろいろとお世話になりました。皆様に心から御礼申し上げます。

本論文の第 4 章で述べた動的負荷分散技術の研究は、その一部を情報通信研究機構（NICT : The National Institute of Information and Communications Technology）の委託研究「エラスティック光アグリゲーションネットワークの研究」を受託する形で行いました。5 年間に渡り共同研究を行い、多くの御協力をいただきました、株式会社日立製作所の関係者の皆様に厚く御礼申し上げます。

最後に、著者が博士前期課程において御指導を賜り、研究の醍醐味を教えて頂き、光ファイバ通信分野に強い興味を持つきっかけを提供して頂いた大阪大学 伊東一良教授、西澤典彦教授に御礼申し上げるとともに、これまで支援してくれた両親、ならびに、論文をまとめるにあたり献身的にサポートしてくれた夫 智也に心からの謝意を記します。

研究業績

主著

本論文

- [1] 妹尾由美子, 金子慎, 吉田智暁, 田口勝久, 木村俊二, 吉本直人, “波長可変型 WDM/TDM-PON を用いた広域フォトニックアグリゲーション技術と光増幅器の最適配置による集線機能の省電力化”, 電子情報通信学会論文誌 B, Vol. J98-B, No. 6, pp. 1-13, 平成 25 年 1 月
- [2] Y. Senoo, T. Yoshida, S. Kaneko, J. Sugawa, K. Wakayama, S. Kimura, K. Suzuki, and A. Otaka, “512-ONU real-time dynamic-load-balancing with few wavelength reallocations in 40-Gbps λ -tunable WDM/TDM-PON (Invited),” J. Opt. Commun. Netw., vol. 7, no. 12, pp. B202–B211, Dec. 2015
- [3] Y. Senoo, S. Kaneko, T. Yoshida, J. Kani, K. Asaka, K. Suzuki, and A. Otaka, “Hitless λ -Tuning Sequence to Reduce Tuning Delay in λ -Tunable WDM/TDM-PON,” J. Opt. Commun. Netw., vol. 8, no. 7, pp. 486–494, Jul. 2016

レター

- [1] Y. Senoo, S. Kaneko, S. Kim, S. Kimura, and N. Yoshimoto, “Super-dense WDM detection technique with single coherent receiver employing wavelength-swept local light,” Electron Lett, vol. 48, no. 2, pp. 107-108, January 2012.
- [2] Y. Senoo, S. Kaneko, T. Yoshida, S. Kimura, and N. Yoshimoto, “Dynamic load-balancing by monitoring traffic volume for λ -tunable WDM/TDM-PON,” IEICE Commun. Ex., vol. 2, no. 11, pp. 501-506, Nov. 2013.

国際会議

- [1] Y. Senoo, S. Kaneko, S. Kimura, and N. Yoshimoto, “Wavelength router for energy efficient photonic aggregation with large-scale λ -tunable WDM/TDM-PON,” in Proc. APCC 2012, pp. 350–354, Oct. 2012
- [2] Y. Senoo, S. Kaneko, T. Yoshida, S. Kimura, and N. Yoshimoto, “Throughput Fairness Evaluation with Dynamic-Load-Balancing in Photonic Aggregated λ -tunable WDM/TDM-PON,” in Proc. OECC/ACOF 2014, pp. 147–149, Jul. 2014
- [3] Y. Senoo, S. Kaneko, T. Yoshida, J. Sugawa, T. Odaka, S. Kimura, N. Yoshimoto, and H. Kimura, “Dynamic-Load-Balancing Algorithm Suppressing the Number

of Wavelength Reallocations for λ -tunable WDM/TDM-PON,” in Proc. ECOC 2014, Tu.1.2.2, Sep. 2014

- [4] **Y. Senoo**, S. Kaneko, T. Yoshida, J. Sugawa, K. Wakayama, S. Kimura, K. Suzuki, and A. Otaka, “Demonstration of 512ONU real-time dynamic-load-balancing with few wavelength reallocations for λ -tunable WDM/TDM-PON,” in Proc. OFC 2015, Tu3E.1, Mar. 2015
- [5] **Y. Senoo**, S. Kaneko, T. Yoshida, J. Sugawa, K. Wakayama, K. Suzuki, and A. Otaka, “Real-time and fair throughput control in different OSU traffic bias with DLB algorithm for λ -tunable WDM/TDM-PON,” in Proc. ECOC 2015, Tu.3.1.2, Sep. 2015
- [6] **Y. Senoo**, K. Asaka, T. Kanai, J. Sugawa, K. Wakayama, K. Suzuki, and A. Otaka, “Real-time Demonstration of Fairness-aware Dynamic Subcarrier Allocation for Adaptive Modulation in Elastic Lambda Aggregation Network,” in Proc. OFC 2017, Th2A.31, Mar. 2017
- [7] **Y. Senoo**, K. Asaka, and J. Kani, “Dynamic Wavelength Allocation and Rapid Wavelength Tuning for Load Balancing in λ -tunable WDM/TDM-PON (Invited),” in Proc. OFC 2017, M3I.1, Mar. 2017

国内学会

- [1] **妹尾由美子**, 金子慎, 吉田智暁, 木村俊二, 吉本直人, “波長可変型WDM/TDM-PONを用いた広域フォトニックアグリゲーション技術による省電力効果の検討”, 電子情報通信学会研究報告, 通信方式, CS2012-100, pp. 21-26, 2013年1月
- [2] **妹尾由美子**, 金子慎, 吉田智暁, 木村俊二, 吉本直人, “波長可変型WDM/TDM-PONを用いた広域フォトニックアグリゲーション技術による省電力効果及び適用領域の検討”, 電子情報通信学会研究報告, 通信方式, CS2013-18, pp. 59-64, 2013年7月
- [3] **妹尾由美子**, 金子慎, 吉田智暁, 木村俊二, 吉本直人, “広域フォトニックアグリゲーションアクセスNWにおける動的負荷分散手法の提案”, 電子情報通信学会研究報告, 通信方式, CS2014-01-16, pp. 103-108, 2014年1月
- [4] **妹尾由美子**, 金子慎, 三鬼準基, 葉玉寿弥, “波長スweep局発光を用いたWDM信号一括コヒーレント受信の提案”, 2011年電子情報通信学会総合大会, B-10-76, 2011年3月
- [5] **妹尾由美子**, 金子慎, 葉玉寿弥, “直変LDのチャープ特性を用いた1.5Gbps×2波WDM信号一括コヒーレント受信”, 2011年電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-10-87, 2011年9月
- [6] **妹尾由美子**, 金子慎, 吉田智暁, 木村俊二, 吉本直人, “波長可変型WDM/TDM-PON

における動的負荷分散手法の提案”，2013年電子情報通信学会総合大会，B-8-37，2013年3月

- [7] 妹尾由美子，金子慎，吉田智暁，木村俊二，吉本直人，“広域フォトニックアグリゲーション技術における光伝送路の許容損失範囲の検討”，2013年電子情報通信学会ソサイエティ大会，B-8-28，2013年9月
- [8] 妹尾由美子，金子慎，吉田智暁，木村俊二，吉本直人，“波長可変型WDM/TDM-PONにおける動的負荷分散手法の最大同時切替 ONU 数制限時の公平性評価”，2014年電子情報通信学会総合大会，B-8-6，2014年3月
- [9] 妹尾由美子，吉田智暁，金子慎，鈴木謙一，大高明浩，“波長可変型WDM/TDM-PONの動的負荷分散における同時波長切替数の抑制効果の評価”，2015年電子情報通信学会総合大会，B-8-63，2015年3月
- [10] 妹尾由美子，吉田智暁，金子慎，鈴木謙一，大高明浩，“波長可変型WDM/TDM-PONにおける動的負荷分散制御の平均遅延の最大値評価”，2015年電子情報通信学会ソサイエティ大会，B-8-26，2015年9月
- [11] 妹尾由美子，金子慎，鈴木謙一，大高明浩，“波長可変型WDM/TDM-PONにおける波長切替遅延がDBA周期無依存な波長切替シーケンスの提案”，2016年電子情報通信学会総合大会，B-8-47，2016年3月