



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	多分岐/長延化光アクセスシステムに関する研究
Author(s)	藤原, 正満
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第11307号
Issue Date	2014-03-25
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k11307
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/55763
Type	doctoral thesis
File Information	Masamichi_Fujiwara.pdf



博士論文

多分岐/長延化光アクセスシステムに関する研究

北海道大学大学院情報科学研究科

藤原正満

目次

第1章 序論.....	1
1-1 研究の背景.....	1
1-1-1 通信トラヒックの増加とアクセスシステムの光化.....	1
1-1-2 光アクセス方式.....	4
1-1-3 PONシステムの構成.....	8
1-1-4 PONシステムの標準化動向.....	11
1-2 本研究の目的、および課題.....	15
1-2-1 多分岐/長延化の要求、および本研究の目的.....	15
1-2-2 光増幅器を適用したPONシステムの研究開発動向、および課題.....	18
1-3 本論文の概要.....	22
1-4 参考文献.....	25
第2章 光増幅中継器を用いたTDM-PONの長延化.....	28
2-1 はじめに.....	28
2-2 光増幅中継システム構成、およびシステム設計法.....	30
2-3 バースト信号対応光増幅器.....	37
2-3-1 高速自動レベル制御機構を備えた光増幅器.....	37
2-3-2 システム動作範囲.....	42
2-4 100 km 伝送フィールドトライアル.....	51
2-4-1 100 km 伝送システム構成.....	51
2-4-2 実験室における伝送特性評価.....	54
2-4-3 フィールド映像伝送デモンストレーション.....	63
2-5 まとめ.....	66
2-6 参考文献.....	68
第3章 TDM-PONにおける光増幅器を用いた加入者の高効率収容.....	70
3-1 はじめに.....	70
3-2 加入者を効率的に収容するシステム構成.....	72
3-3 高速自動レベル制御機構を備えたバースト信号対応光増幅器の適用.....	79

3-4 システム動作範囲.....	83
3-4-1 遠近混在システム	83
3-4-2 多分岐システム.....	87
3-5 まとめ.....	91
3-6 参考文献.....	92
 第4章 SOA を用いた WDM/TDM-PON の多分岐/長延化.....	93
4-1 はじめに	93
4-2 SOA を用いた多分岐/長延化 WDM/TDM-PON システム構成.....	95
4-3 SOA の高速応答特性を利用した自動レベル制御機構.....	98
4-4 システム動作範囲.....	101
4-5 まとめ.....	105
4-6 参考文献.....	106
 第5章 結論.....	107
 謝辞	110
 発表論文	112

第 1 章 序論

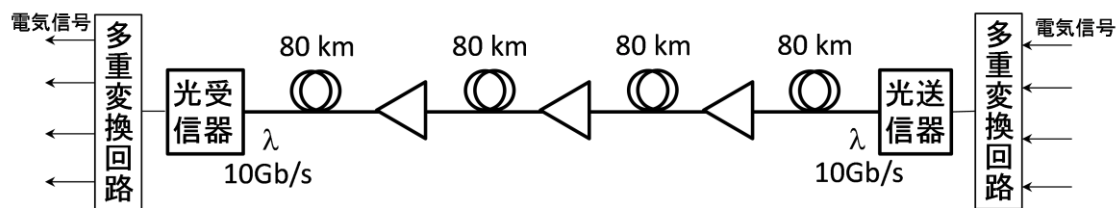
1-1 研究の背景

1-1-1 通信トラヒックの増加とアクセスシステムの光化

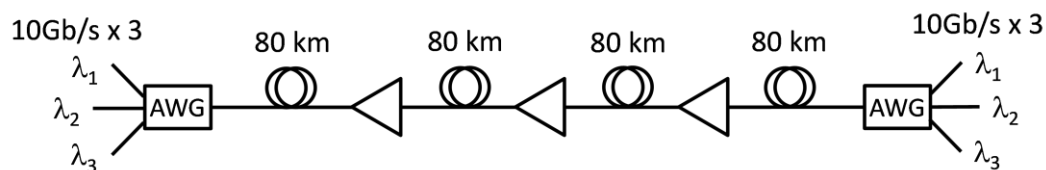
「Mr. Watson, come here, I need you! (ワトソン君、用事がある、ちょっと来たまえ!)」、後に米国の通信会社 AT&T の前身であるベル電話会社を設立したグラハム・ベルが、助手であるワトソン技師に向かって発したこの一言が人類初の電話による第一声とされている。電話の発明を誰が行ったかは厳密には定かでないようだが [1]、1876 年にベルらによって行われた電話機の試作が実用化の端緒となっている。この電話機の実現により、距離を隔てた音声情報の交換によるコミュニケーションが可能となった。以後 100 年以上に渡り、日常生活における必須のコミュニケーションツールである音声は、通信技術が伝達する情報の主役であり続けた。国内では、メタルケーブルを利用した電話サービスの加入者数が増加の一途をたどり、1990 年代半ばには 6000 万加入を突破した。その数の増加に伴う通信トラヒックの増加に対応するため、中継伝送技術もそれに併せて進歩した。特筆すべきは、米国のガラスメーカ Corning 社による 1970 年の石英系光ファイバ ($20 \text{ dB/km} @ 0.6328 \mu\text{m}$) の発表、およびそれとほぼ同時期に半導体レーザの常温発振が可能となったことを契機に、光ファイバ伝送技術が急速に進展したことである。約 10 年後の 1981 年には、早くも国内において従来の同軸ケーブルを用いたシステムに代わり、マルチモード光ファイバ (MMF: Multi mode fiber) を用いた光伝送システム ($32 \text{ Mb/s} @ 0.85 \mu\text{m}$ 帯) が商用導入された。以後伝送媒体は、同軸ケーブルから MMF、さらにはシングルモード光ファイバ (SMF: Single mode fiber) へと置き換わり、使用波長も $0.85 \mu\text{m}$ 帯から $1.3 \mu\text{m}$ 帯、さらには $1.5 \mu\text{m}$ 帯へとより低損失な波長帯域にシフトした。これにより、伝送媒体当りの伝送容量は着実に増加し、中継間隔も 80 km にまで長延化された。1995 年以降、高速化と中継間隔の長延化を支えたのが、1989 年に有用性が実証された光増幅器である [2]。増幅媒体として、 $1.5 \mu\text{m}$ 帯に増幅帯域を有するエルビウム添加光ファイバ増幅器 (EDFA: Erbium doped fiber amplifier) が用いられた。図 1-1 に、EDFA を用いた光中継伝送システムの構成例を示す。当初は、中継間隔 ($80 \text{ km} @ 1.5 \mu\text{m}$ 帯) を維持した上で、さらに高速の光信号 (10 Gb/s) を伝送することを目的に導入された。ここで、 10 Gb/s の信号は、より低速な電気信号を多重変換回路により時分割多重 (TDM: Time division multiplexing) して生成される (図 1-1 (a) 参照)。その後、EDFA の広帯域特性を利用して研究開発が進められていた波長多重 (WDM: Wavelength division multiplexing) 信号の一括増幅技術や、PLC (Planar lightwave circuit) 技術を用いたアレイ導波路回折格子 (AWG: Arrayed waveguide grating) に代表される波長合分波器の実現により [3]、単一光ファイバ上で同時に複数の光信号を伝送することが可能と

なった（図 1-1 (b) 参照）。WDM 技術は、単位光ファイバ当りの伝送容量を飛躍的に増大させることができることから、1999 年の実用化以降、中長距離ネットワークを支える基盤技術となった。現在では、40 Gb/s の光信号を 40 波長多重した 1.6 Tb/s の光中継伝送システムが商用導入されている。

一方、1990 年代半ばから、それまで大学等に限られて使用されていたインターネットが一般家庭にも普及し、電話による音声通信からデータ通信へのパラダイムシフトが起き始めた。当初のインターネットの利用方法は、電子メールの送受信、HTML 技術を用いた簡易な WWW (World wide web) の閲覧が主であり、一般家庭とアクセスポイントの接続には、アナログの電話回線を利用したモデムによるダイヤルアップ接続、または電話回線が利用するメタルケーブルで 64 ~ 128 kb/s のデジタル通信が行える ISDN (Integrated services digital network) 回線が利用された。その後、同じメタルケーブルを利用して 1 Mb/s 以上のブロードバンドサービスを提供可能な ADSL (Asymmetric digital subscriber line) の登場により、インターネットの利用環境は格段に向上した。ADSL は、開通工事が容易であり回線価格も低廉であることから急速に加入者数を増やし、インターネットの爆発的な普及をもたらす契機となった。また、従来電話回線を通じてアナログ情報として伝達された音声情報の一部が、VoIP (Voice over Internet Protocol) 技術によりデジタル情報としてインターネットを経由して通信されるようになったことをはじめ、SNS (Social networking service)、オンデマンドの音楽や映像配信、動画共有、ファイル交換等、利用可能なサービスも広がり、インターネットの利便性が格段に高まった。しかしながら、ADSL は、同一メタルケーブル上でアナログ電話とデータ通信サービスの重畳を実現するため、データ通信は音声周波数帯 (0.3 ~ 3.4 kHz) を避け伝送路として帯域が補償されていない高周波数帯 (26 kHz ~ 3.7 MHz) に割り当てざるを得ず、収容局からの距離や外来ノイズの影響により回線速度が変化するという問題があった。このため安定したサービス提供は困難であり、早期にブロードバンドサービスを提供するための暫定的な措置とも考えられた。これを見越して、ADSL が商用化されたわずか 2 年後の 2001 年には、光ファイバの低損失特性、電磁波遮断特性、および広帯域特性を利用した FTTH (Fiber to the home) が、世界に先駆けて本格的に商用導入された。図 1-2 に、FTTH と ADSL の加入者数の推移を示す。ADSL の加入者数は、2006 年に 1400 万に到達したが、その後は FTTH の回線価格の低廉化により次第に減少していった。一方、FTTH の加入者数は、低価格化に加えてデジタル技術の進展によるコンテンツ容量の増大の後押しを受け、2005 年頃から急激に増加し、2008 年には ADSL の加入者数を逆転した。現在では 2000 万を超える加入者数を獲得し、有線ブロードバンド技術の主役に躍り出ると共に、次世代システムへの移行を見据えた新たなフェーズに差し掛かっている。



(a)



(注) 光送受信器間のみ

(b)

図 1-1 光増幅器(EDFA)を用いた光中継伝送システムの構成例. (a)TDM 光中継伝送方式. (b)WDM 光中継伝送方式.

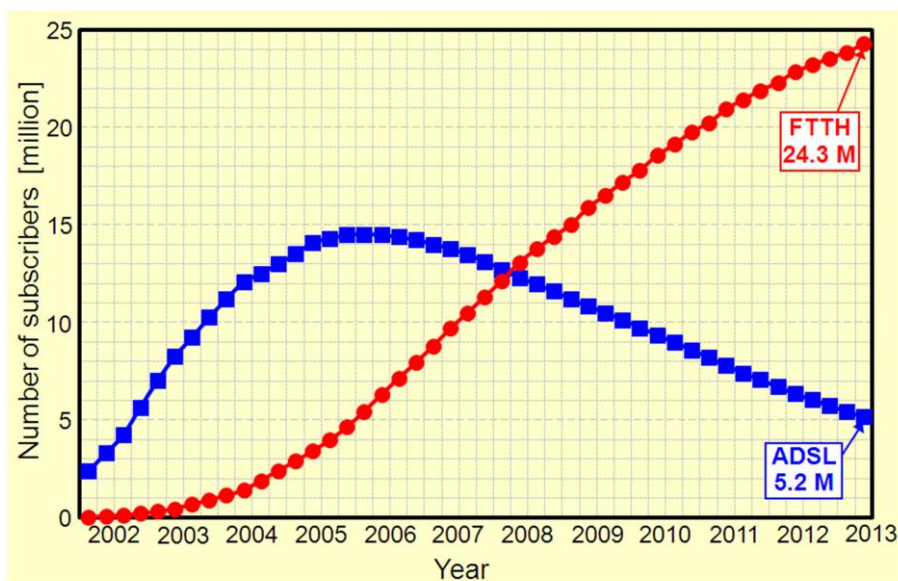


図 1-2 FTTH, および ADSL 加入者数の推移.

1-1-2 光アクセス方式

図 1-3 に、国内で用いられている一般的な通信ネットワークの構造を示す。通信ネットワークは、加入者から通信事業者（収容局）までを接続するアクセスネットワーク、複数の収容局（CO：Central office）を接続し、市内や県内レベルでアクセスネットワークを接続するメトロネットワーク、および全国のメトロネットワークを接続するコアネットワークに分けられる。メトロネットワーク、およびコアネットワークは、多数の加入者から収容局に送られた情報を束ねて伝送するため、アクセスネットワークに比べてより大容量な伝送システムが必要である。一般的には、メトロネットワークでは 100 km 以下、コアネットワークでは 100 km 以上の中～大容量光伝送システムが導入されている。特にコアネットワークでは、前項に記載の通り、Tb/s 級の光中継伝送システムが稼働している区間もある。一方、アクセスネットワークでは、多くの加入者は収容局から 10 km 以下の範囲で収容され、FTTH による光アクセスシステムが、戸建て住宅、集合住宅に居住するマスメューザや、SOHO (Small office / home office)、大規模ビルを拠点とするビジネスユーザに提供されるブロードバンドサービスの多くを支えている。

図 1-4 に、FTTH による主な光アクセス方式の構成例を示す。一般的に、光アクセス方式は、シングルスター型とダブルスター型に分類される。シングルスター型は、収容局と加入者間が光ファイバで直接接続されるポイント・ツー・ポイント（P2P：Point-to-point）構成であり（図 1-4 (a) 参照）、主に集合住宅のマスメューザや、ビジネスユーザ向けのサービス提供に利用されている。収容局から建物の管理室までは光メディアコンバータで接続される。ビジネスユーザは、建物の構内に LAN (Local Area Network) を独自に構築して光サービスを利用するが、集合住宅では、構内に配線されている既設の電話線を利用した VDSL (Very high-bit-rate digital subscriber line) 方式により、50 ~ 100 Mb/s の信号帯域が各加入者に割り当てられる。VDSL 方式を利用することにより、アクセス区間の光設備を集合住宅に居住する多数の加入者で共有できるため、ブロードバンドサービスをマスメューザ向けに経済的に提供することができる。なおこれらサービス形態は、FTTH のようにサービス利用者の居室まで光ファイバが引き込まれないため、厳密には FTTB / C (Fiber to the building / curb) と呼ばれるが、統計上 FTTH に含めて計数されるのが通常である。

一方、ダブルスター型は、収容局と加入者間の光ファイバや収容局に配置される装置の一部を加入者が共有するポイント・ツー・マルチポイント（P2MP：Point-to-multipoint）構成である。ダブルスター型は、さらにアクティブダブルスター（ADS：Active double star）型とパッシブダブルスター（PDS：Passive double star）型に分けられる。ADS は収容局と加入者間のノードに多重変換回路や集線装置等のアクティブ部品を配置する構成であり、PDS はノードにスプリッタや波長合

分波器等のパッシブ部品を配置する構成である。収容局外にアクティブ部品を配置すると電源供給の問題が常に付きまとい、設置場所の選定に苦慮することになる。そのため、別名 PON (Passive optical network) と呼ばれ、電源供給を意識せずにサービス提供可能な PDS の方が運用上優れたシステムであると言える。実際、商用システムとして用いられているのは PDS 方式である。以下、PDS に代わり PON と記載する。

PON において、複数加入者の情報を同一の光ファイバ上で共有して伝送する代表的な方式として、タイムスロットごとに情報を多重する TDM-PON 方式 (図 1-4 (b)参照)、および波長ごとに情報を多重する WDM-PON 方式 (図 1-4 (c) 参照) がある。TDM-PON 方式では、ノードに専らスプリッタが配置されるのに対し、WDM-PON 方式では、スプリッタ、または AWG 等の波長合分波器が配置される。

TDM-PON は、英国の通信会社である BT により、電話回線サービスの利用者に、通話に加えて新規のブロードバンドサービスを提供することを目的として 1987 年に提唱された方式である [4]。提唱当時、TPON (Telephony on passive optical network) と名付けられた本方式は、新規サービスとして ISDN や HDTV (High definition television) 配信等を想定していた。またこのサービスの追加は、スプリッタの波長無依存特性を活かし、電話サービスとは別の波長に多重 (WDM を利用したサービス多重) して行うものであった。コア/メトロネットワークで用いられる TDM 方式では信号 1 ビットごとに多重化が行われるのに対し、TDM-PON ではフレームやパケット単位で多重化が行われる。加入者の情報はタイムスロットごとに重畳され、信号が受信された後、フレームやパケットに付与された識別子を利用して宛先が特定されることから、情報の秘匿性を担保するための手段が必要となる。反面、光ファイバ伝送線路のみならず収容局内に配置される伝送装置 (OLT : Optical line terminal) が共有されるため、経済性の面で優れている。また加入者宅に配置される伝送装置 (ONU : Optical network unit) は単一品種であることから、システムに接続するだけでサービスが開始されるプラグアンドプレイ機能が容易に実現され、運用性にも優れる。アクセスサービスには低価格化が強く求められることから、暗号化技術により情報の秘匿性を担保した上でこれら利点を活かし、戸建てのマスユーザ向けに広く普及している。現在、アナログの映像配信サービスの一部が WDM を利用したサービス多重により提供されているが、提唱当時の提案と異なり、音声は VoIP 技術によりデジタル情報としてデータ通信回線に重畳され、WDM は主として次世代システムへのアップグレードに活用されることが期待されている。なお、本来「PON」は、WDM-PON を含めた PDS 方式一般を表す名称であるが、商用導入されているのは TDM-PON のみであることから、一般に TDM-PON を表す名称として定着している。ただし本論文では、原則通り、広く PDS 方式表す名称として「PON」の名称を使用する。

一方、WDM-PON は、AT&T の研究機関であるベル研究所により 1988 年に提唱された方式である [5]。加入者の情報は異なった波長に重畳され、光学的に波長分波されて信号が受信されることから情報の秘匿性が高く、また波長帯域を一加入者が占有するため高速の帯域保障サービスを提供するのに適している。一方、共有されるのはパッシブ部品を含めた光ファイバ伝送線路のみであり、OLT が加入者（波長）ごとに必要であるというデメリットが存在する。以上を考慮すると、ビジネスユーザへのサービス提供が期待されるシステム構成であると言える。しかしながら、前記デメリットに加えて考慮すべき重要な課題の一つとして、ONU の波長無依存（カラーレス）化がある。光ファイバの十分な共有効果をもたらすには、単一システムで数十加入者を収容することが望まれるが、それには加入者と同数の波長に対応した ONU が必要である。多品種の ONU を用いたシステムは利便性が悪く、運用が容易でないため、ONU の単一品種化によるプラグアンドプレイ機能の実現を目指した各種カラーレス化技術が研究開発されている。ノードに波長合分波器を配置すれば、OLT から ONU への下り WDM 信号は AWG 等の波長合分波器で分波されて所定の ONU に到達して受信できることから、その多くは ONU から OLT への上り信号伝送のカラーレス化技術に注力されている。代表的なものとして、① SLD (Super luminescent diode) から出力される広帯域の白色雑音をノードに配置した波長合分波器で切り出して光源として利用する方法 [6]、② 収容局から ONU に供給した無変調光を ONU に配置したカラーレス変調器で変調して収容局に折り返す方法 [7,8]、③ ONU に波長可変光源を搭載する方法 [9]、が提案されている。しかしながら、①：出力が十分でなく、また Gb/s を超える高速変調が困難であること [9]、②：収容局から ONU に供給した無変調光の一部が光ファイバ伝送線路内で反射し、ONU で変調された上り信号と干渉して雑音となり十分な伝送距離が得られないこと [10]、③：一般的に数十波長に対応した波長可変光源は非常に高価であること、によりいずれも実現の目途は立っていない。結果、WDM-PON 方式は、海外においてフィールドトライアルが行われた例はあるものの [11]、商用導入された例は存在しないというのが現状である。しかしながら、現行システムである TDM-PON は、加入者情報の多重を電気回路の高速化に頼って実現しているため、今後のサービス帯域の増大要求を鑑みると、持続的にシステムの高速化を成し得る方式とは言い難い。そこで、TDM の経済性、および WDM による帯域、およびサービスの拡張性に着目した新たな光アクセス方式として、WDM/TDM-PON が国際会議や標準化の場で活発に議論され始めている [12,13]。

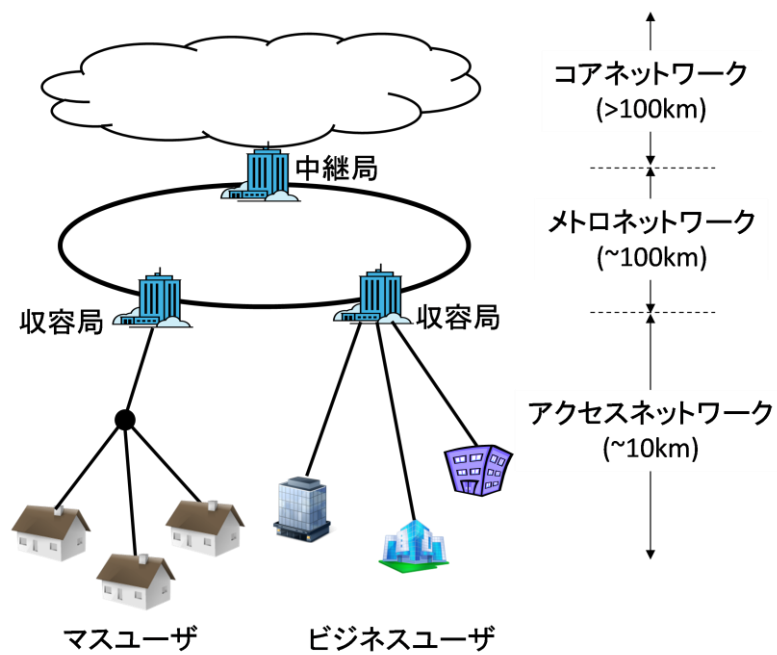


図 1-3 一般的な光ネットワークの構造.

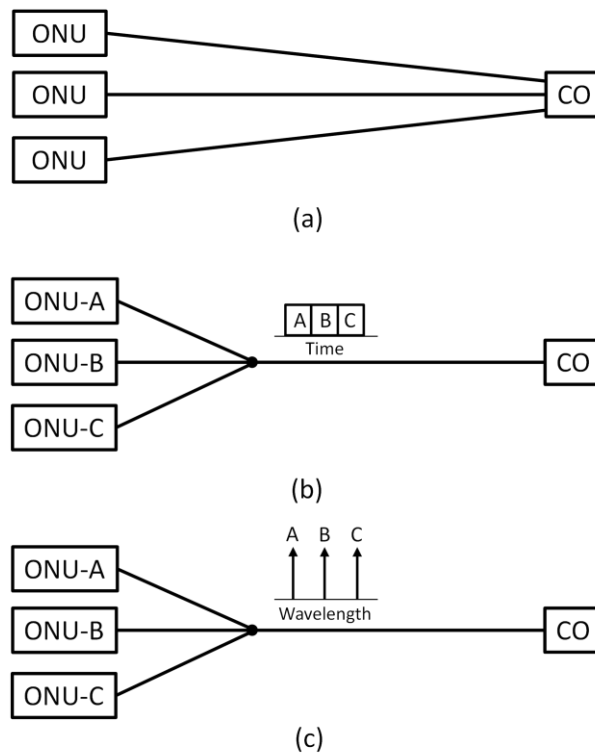


図 1-4 光アクセス方式の構成. (a)シングルスター構成. (b)ダブルスター構成(TDM-PON). (c)ダブルスター構成(WDM-PON).

1-1-3 PON システムの構成

本項では、TDM-PON システム、および WDM/TDM-PON システムの具体的なシステム構成について詳説する。

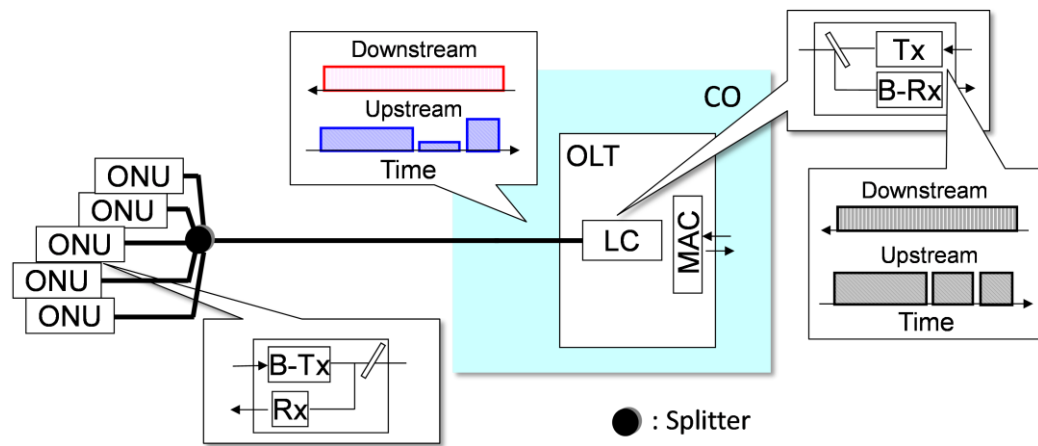
図 1-5 (a) に、TDM-PON システムの構成を示す。本システムは、収容局に配置される OLT と、複数の加入者宅に配置される ONU がスプリッタを介して光ファイバで結合される構成である。従来のアナログ電話サービスに用いられたメタルケーブルは二心が対となっており、加入者が受ける音声情報と加入者が発する音声情報は異なるケーブル上を伝達されていた。メトロ/コアネットワークで用いられる光中継伝送システムも同様に、双方向伝送が異なる光ファイバ上で行われる。それに対し PON では、コスト削減のため敷設される光ファイバは一心である。スプリッタは、国内ではクロージャと呼ばれるボックスに収められ、収容局外の電柱上に設置されるのが一般的であるが、電柱を利用しない諸外国では地中に設置される。OLT から ONU に送信される下り信号と ONU から OLT に送信される上り信号は、異なる波長により同一の光ファイバ上を双方向に伝送される。そのため、光送信器 (Tx)、および光受信器 (Rx) から成る光トランシーバの入出力は、WDM フィルタにより上り信号と下り信号を合分波することにより一心化される。下り信号は、加入者ごとの信号が TDM 技術を用いて多重された連続信号であり、各 ONU はスプリッタで分岐された連続信号から、自身に割り当てられたタイムスロットの信号を受信する。一方、上り信号は、各 ONU から間欠的に送信されるバースト信号であり、スプリッタで合流して TDM 信号となり収容局に到達する。そのため ONU には、バースト信号を送信することのできる光送信器 (B-Tx) が用いられる。合流時に各 ONU から送信された信号が時間的に重ならないように、OLT からの指示により送信時間と送信容量が制御される [14]。またこの信号は、ONU からスプリッタまでの伝送距離の相違や、送信器出力の個体差により短時間で強度が大きく変化する。そのため OLT には、バースト信号に対応した光受信器 (B-Rx) が用いられる。下りと比較して、上りバースト信号に対応した送受信技術の難易度が高いため、B-Tx、および B-Rx の研究開発が、高速 TDM-PON システム実現に向けた第一歩となる [15,16]。特に B-Rx には、スプリッタの分岐数に応じて増加する伝送線路損失に耐え得る高感度受信特性が求められるのはもとより、前記強度変化に対応した広い入力ダイナミックレンジが求められる。

図 1-5 (b)、および (c) に、WDM/TDM-PON システムの構成を示す。前者は、OLT に送受分離型の多波長光トランシーバを利用する構成であるのに対し、後者は、OLT に送受一体型の単一波長光トランシーバを利用する構成である。図 1-5 (b) の構成は (a) と同様、収容局に配置される OLT と、加入者宅に配置される複数の ONU が、スプリッタを介して光ファイバで結合される構成である。WDM-PON の研究開発の多くは、ノードに配置するパッシブ部品として AWG 等の波長合分波器

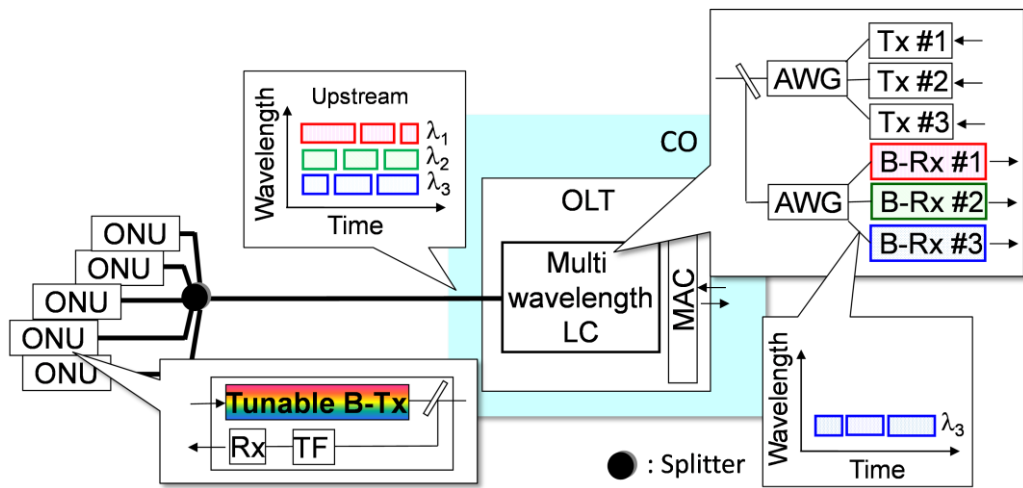
を想定していたが、ここでは既存の TDM-PON システムで用いられているスプリッタ網を活用し設備投資の抑制を図る。OLT には多波長に対応した伝送装置 (LC : Line card) を配置する。LC は、AWG 等の波長合分波器の透過中心波長に一致する固定波長の光信号を送受信する。一方、ONU には、波長可変光源を搭載した B-Tx、および受信波長を可変できる Rx を配置する。ここで波長可変型の Rx を用いるのは、ノードに波長合分波器ではなくスプリッタを配置することにより、ONU に到達した WDM 信号のうち必要な一波長を抜き出して受信する必要があるためである。一方、B-Tx が任意の波長で送信した上り信号は、LC の波長分波器により分波されていずれかの B-Rx で受信される。本 ONU 構成により、すべての ONU が波長依存特性のないスプリッタを介して任意の光トランシーバ (図中、同一番号の Tx、B-Rx ペア) と通信することができる。これにより、ONU のカラーレス化によるプラグアンドプレイ機能が実現されるのはもとより、上述の TDM-PON システムでは提供されない機能、すなわち、光トランシーバ故障時の冗長機能、光トランシーバのスリープ動作による低消費電力機能等をもたらすことができる。

一方、図 1-5 (c) の構成においても、すべての ONU が波長依存特性のないスプリッタを介して任意の LC (Tx、B-Rx ペア) と通信することができ、ONU の波長可変特性を利用して (b) と同様の機能を実現することができる。さらに、送受一体型の光トランシーバが一つの LC を構成していることから、トラヒックの増加に応じて LC を追加することにより、段階的な帯域のアップグレード機能も実現できる。またスプリッタ構成は、局外と局内で分岐を按分する構成であり、より広範囲に点在する加入者を単一 OLT により収容する効果を有する。

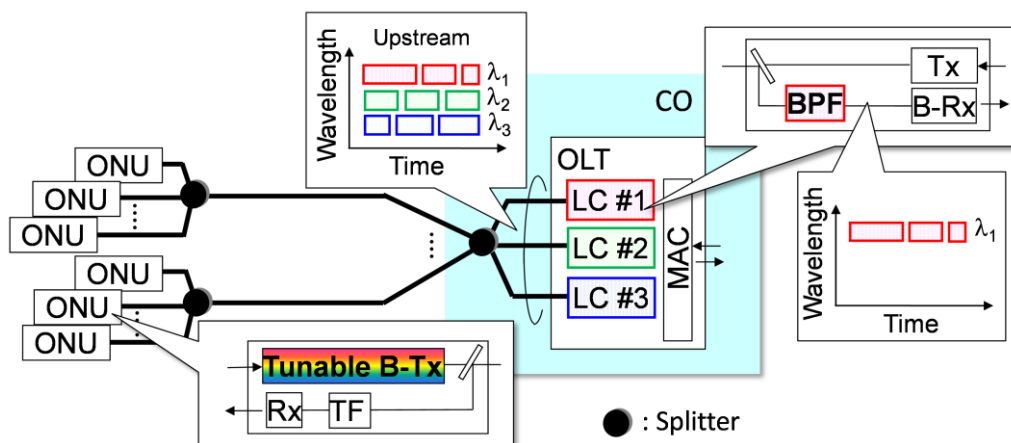
代表的な波長可変光源として、送信波長の異なる DFB-LD (Distributed feedback laser diode) をアレイ型に半導体集積したものや、注入電流により半導体の屈折率を変化させて送信波長を制御する SSG-DRB (Superstructure grating distributed Bragg reflector laser) がある。同じく代表的な波長可変光フィルタとして、誘電体多層膜光フィルタへの光信号の入射角度を変化させて透過波長を制御するものや、FBG (Fiber Bragg grating) に加える応力を変化させて透過波長を制御するものがある。前項に記載の通り、これら波長可変型の光部品は一般に非常に高価であるが、半導体をベースとした光部品の動作温度を変化させて送受信波長を変化させるタイプのものでは低コスト化が期待できる [17-19]。半導体光部品の動作温度変化による波長可変範囲は 3nm 程度と限られ、WDM 信号を 50 GHz (0.4 nm @ 1.5 μ m 帯) 間隔の高密度で配置しても 8 波長確保するのが限界であり、WDM-PON においてカラーレス ONU を実現するには不十分であった。しかしながら、本システムのベースは TDM であり、波長は数倍程度の帯域拡張や、サービス拡張を狙いとして用いられるため 4~8 波長程度の WDM 化が想定されており、可変波長範囲を限定することで低コスト化した波長可変型光部品の実現が強く期待されている。



(a)



(b)



(c)

図 1-5 PON システムの構成. (a)TDM-PON システム. (b)WDM/TDM-PON システム(送受分離型光トランシーバを利用). (c)WDM/TDM-PON システム(送受一体型光トランシーバを利用).

1-1-4 PON システムの標準化動向

通信装置の研究開発は多額の予算を投じて行われるため、通信設備を有する通信会社が主導して次期システムの標準化が行われるのが一般的である。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) の 2 つの組織により行われている。従来 ITU-T が、通信会社が保有するネットワーク上で用いられる通信技術の標準化を牽引してきたが、昨今、Ethernet による LAN 技術の進展により、その標準化を担ってきた IEEE が活躍の場をアクセスネットワークにまで広げている。IEEE と ITU-T はこれまで独自の規格を標準化してきたが、近年では一部共通仕様の策定に向けた動きがなされている。

図 1-6 に、IEEE と ITU-T における PON システムの標準化動向、および Ethernet の標準化動向を示す。Ethernet は、LAN において最も普及している信号伝送プロトコルであり、IEEE 系の PON システムでは、Ethernet 信号をそのまま伝送する方針で標準化が行われている。それに対し ITU-T 系の PON システムでは、信号伝送プロトコルに依存しないという方針のもと標準化が行われている。PON システムの標準化は、1997 年に ITU-T で標準化された B (Broadband)-PON (155 ~ 622 Mb/s) を皮切りに、Ethernet 規格の 6 ~ 7 年後を追うように標準化がなされてきている。国内では、2001 年に世界に先駆けて B-PON が商用導入され、引き続いて 2004 年に IEEE で標準化された GE (Gigabit Ethernet)-PON が同じ 2004 年に商用導入されている。また近年、GE-PON システムは、国内のみならずアジア各国への導入が進んでいる。一方、2004 年に ITU-T で標準化された G (Gigabit-capable)-PON は、とりわけ米国において、通信会社 Verison を中心に商用導入が積極的に進められ多くの加入者を獲得している。また欧州においても、仏国の通信会社である FT が導入を開始している。表 1-1 に、GE-PON、および G-PON の標準化規格を示す。GE-PON の伝送速度は、上り下り共 1.25 Gb/s の対称型のみであるのに対し、G-PON の伝送速度は、上り 1.25 Gb/s、下り 2.5 Gb/s の非対称型、および上り下り共 2.5 Gb/s の対称型がある。また光トランシーバの性能限界により、伝送距離は 32 分岐システムに対して 20 km 以下と考えられている。表に記載の G-PON の伝送距離 (60km) や収容 ONU 数 (64) は、物理的な伝送限界によるものでなく論理的な ONU の接続台数の要請によるものである。

一方、今後のサービス帯域の増大要求に応えるため、GE-PON、G-PON の次の世代を担う PON システムの標準化が行われている。表 1-2 に、次世代 PON の標準化規格を示す。IEEE では、上り下り共 10 Gb/s の対称型、および上り 1.25 Gb/s、下り 10 Gb/s の非対称型の伝送速度を有する 10G-EPON システムの標準化が 2009 年に完了している。本規格は物理層を規定するに留まることから、2010 年から異種装置ベンダ間の相互接続性を向上させるシステムレベルの標準化が、SIEPON

(Service interoperability of EPON) の枠組みで開始されている。また ITU-T では、NG-PON1 (Next generation PON1)の標準化が 2010 年に完了し、引き続いて NG-PON2 の標準化に向けた議論が進められている。NG-PON1 では、上り 2.5 Gb/s、下り 10 Gb/s の非対称型の伝送速度を有する XG-PON システムの標準化が 2010 年に完了している。また NG-PON2 では、10 Gb/s 以上の伝送速度を提供し、かつサービス提供の対象をマスメディアに限定せず、ビジネスユーザや近年トラフィックが急増している無線システムのバックホウルにまで拡張することを狙いとし、新たな光アクセスシステムの標準化に向けた議論を活発に行っている。候補として、さらなる高速化を推し進めた TDM-PON、WDM-PON、WDM/TDM-PON、さらには無線システムで実用化されている直交周波数多重 (OFDM : Orthogonal frequency division multiplexing) 技術や、符号分割多重 (CDM : Code division multiplexing) 技術を活用した OFDM-PON、CDM-PON 等が挙げたが、高速化を達成する現実解として最終的に WDM/TDM-PON が採択され、現在その仕様の詳細が検討されている。今現在、波長数は 4~8 程度、波長当りの伝送速度として、XG-PON をベースとした上り 2.5 Gb/s、下り 10 Gb/s の非対称型に加えて、上り下り共 10 Gb/s の対称型が議論の俎上に載せられている。

図 1-7 に、現行 PON システム、および次世代 PON システムの波長配置を示す。次世代システムは、現行システムとの同スプリッタ網上での共存を実現するため使用波長を工夫している。まず 10G-EPON と GE-PON との共存について説明する。下りは、WDM を用いて使用波長の重畳を防ぐ。一方、上りは、GE-PON の使用波長が 1260 ~ 1360 nm と広く 10G-EPON の使用波長 (1260 ~ 1280 nm) と重なるため、WDM ではなくデュアルレート of TDM 受信技術を用い同一の B-Rx により信号受信を行うことで共存化を実現する。次に、10G-EPON と G-PON との共存であるが、上り下り共に WDM を用いて使用波長の重畳を防ぐ。G-PON の上り波長には使用波長を限定した仕様があるため、それを利用して波長の重畳を防ぐ。XG-PON と G-PON との共存も WDM を用いて使用波長の重畳を防ぐことで実現する。次に WDM/TDM-PON と現行 PON との共存を説明する。WDM/TDM-PON の上りの使用波長はこれまでの PON と異なり 1.5 μm 帯に割り当てられるのが有力である。従って、現行 PON との使用波長の重畳は WDM により回避される。下りも同様に WDM により使用波長の重畳が回避され、現行システムとの共存が実現される。10G-EPON と XG-PON の伝送距離は、32 分岐システムに対して 20 km と考えられている。それに対し WDM/TDM-PON は、上り下り共に光ファイバの低損失な 1.5 μm 帯を使用するため、上り伝送に 1.3 μm 帯 (O 帯) を使用するこれまでの PON と比較して伝送距離や分岐数の拡大効果が期待できる。例えば、上り下り共に 10 Gb/s の対称型システムでは、64 分岐システムに対して 20 km、32 分岐システムに対して 40 km の信号伝送が実現できるものと期待されている。

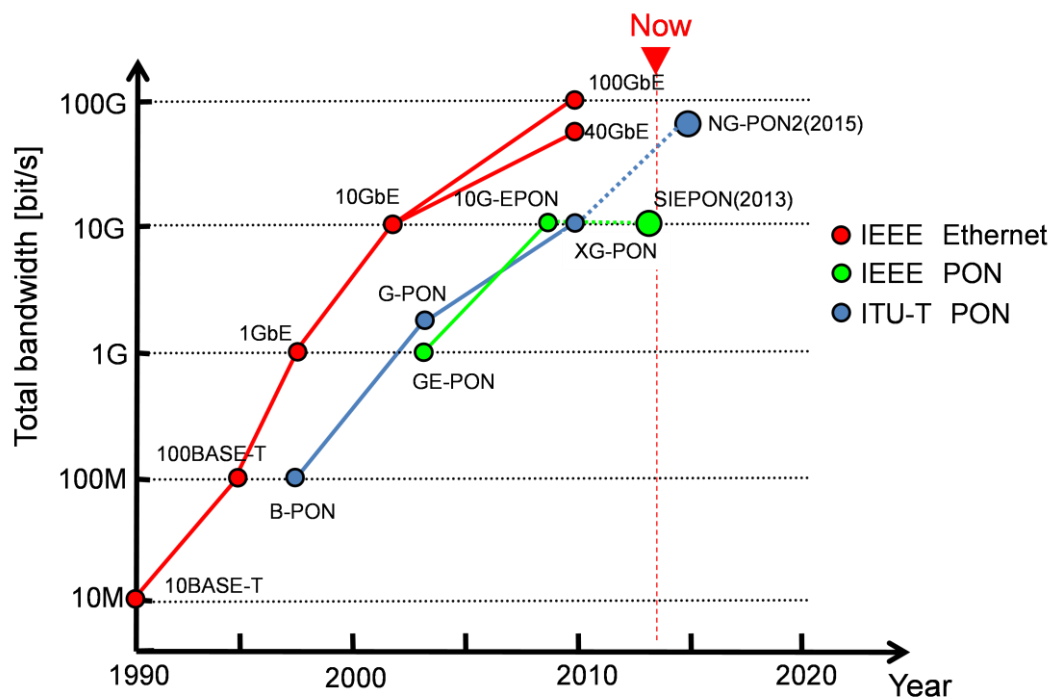


図 1-6 PON システム, および Ethernet の標準化動向.

システム名		GE-PON	G-PON
標準化規格名		IEEE802.3ah	ITU-T勧告 G.984シリーズ
標準化完了時期		2004年9月	2004年9月
伝送速度	下り	1.25 Gb/s	1.25 / 2.5 Gb/s
	上り	1.25 Gb/s	2.5 Gb/s
使用波長	下り	1480 – 1500 nm	1480 – 1500 nm
	上り	1260 – 1360 nm	1260 – 1360 nm 1290 – 1320 nm 1300 – 1320 nm
波長数	下り	1	1
	上り	1	1
伝送距離		10 / 20 km	60 km (ONUを接続できる論理的な距離)
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 台以上	64台以上
フレーム		Ethernet	ATM , GEM, GTC

表 1-1 現行 PON システムの主な仕様.

システム名		10G-EPON	XG-PON	NG-PON2 (WDM/TDM-PON)
標準化規格名		IEEE802.3av	ITU-T勧告 G.987シリーズ	ITU-T勧告G.989シリーズ (議論中)
標準化完了時期		2009年10月	2010年6月	2014年以降を予定
伝送速度	下り	10.31 Gb/s	10 Gb/s	(参考)10 Gb/s
	上り	1.25 / 10.31 Gb/s	2.5 Gb/s	(参考)2.5 – 10 Gb/s
使用波長	下り	1575 – 1580 nm	1575 – 1580 nm	(参考)1596 – 1603 nm
	上り	1260 – 1280 nm	1260 – 1280 nm	(参考)1524 – 1544 nm
波長数	下り	1	1	(参考)4 – 8
	上り	1	1	(参考)4 – 8
伝送距離		10 / 20 km	60 km (ONUを接続できる論理的な距離)	(参考)40 km
光線路損失		5 – 20 dB (PR10) 10 – 24 dB (PR20) 15 – 29 dB (PR30)	29 dB (Nominal1) 31 dB (Nominal2)	(参考)29 dB以上
収容ONU数		32 台以上	64台以上	(参考)32 – 64以上
フレーム		Ethernet	XGTC, XGEM	未定

表 1-2 次世代 PON システムの主な仕様.

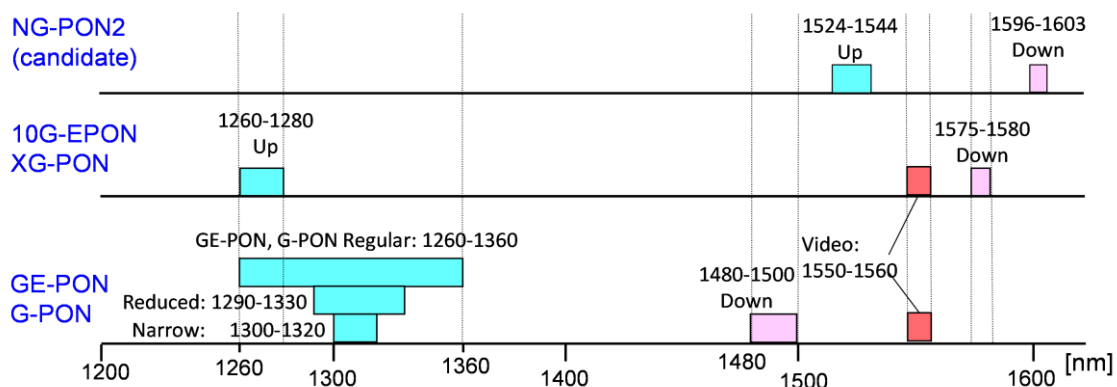


図 1-7 現行 PON システム, および次世代 PON システムの波長配置.

1-2 本研究の目的、および課題

1-2-1 多分岐/長延化の要求、および本研究の目的

前節に記載の通り、現行 PON システムでは、光ファイバの優れた低損失特性にも係らず、スプリッタの分岐損失が非常に大きいため、32 分岐システムの最大伝送距離は 20 km に制限される。そのため、サービス提供可能なエリアは距離による制約を受け、収容局から 20 km を超えるエリアに居住する世帯は FTTH サービスの恩恵を受けることができない。FTTH はサービス開始に際し、光ファイバ伝送線路や、OLT をはじめとする局内装置等、多大な新規設備投資を必要とするため、導入当初は収益性の観点から需要の多い都市部への投資が優先された。それに対して、都市部と人口密度が低く加入者が点在する農村部（ルーラルエリア）との間のデジタルデバイドを解消するため、国や自治体が保有する光伝送線路設備を通信会社が IRU (Infeasible right of user) 契約により借り受けて運用することにより、FTTH 未提供エリアの光化を促進する取り組みが積極的になされた。結果、現在では、FTTH の世帯カバー率は 90 % 超を達成するに至っている。しなしながら、光化への取り組みも踊り場に来ており、残り 10 % 弱の世帯に FTTH サービスを経済的に提供し、加入電話と同様のユニバーサルサービス実現を目指すためには、PON システムの伝送距離を 20 km 超に拡大（長延化）することが必要である。

一方、次世代 PON システムでは、現行システムよりもさらに高速の電気回路が伝送装置に実装されることから、部品価格の上昇による装置コストの増加、および消費電力の上昇による運用コストの増加が避けられず、結果的にその増加分をサービス価格に転嫁する必要に迫られることが予想される。また消費電力については、昨今問題となっている地球温暖化防止に向けた対策として、低消費電力化による CO₂ 削減の必要性が強く求められているという社会的な背景もある。ONU については、情報を送受信しない時間にその動作の一部を休止させるスリープ機能を搭載することにより低消費電力化を図る手法が提案されている [20]。しかしながら、一加入者が独占して使用する ONU と異なり OLT は複数の加入者で共有されるため、その動作を部分的にでも休止させることは困難である。従って、次世代 PON システムの装置、および運用コストを削減するため、需要の多い都市部では、次世代システムの高速度を活用して、単一 OLT によりできるだけ多くの ONU を収容（多分岐化）し、装置、および運用コストを削減することが期待されている。

以上を鑑み、本研究は、次世代 PON システムが導入される時期を想定し、長延化、および多分岐化により、複数の ONU を単一 OLT により効率的に収容することのできるシステム構成、およびそれを実現する技術を提供することを目的とする。PON システムを長延化、および多分岐化すると、それぞれ、光ファイバ伝送線路の距離に比例する損失、およびスプリッタの原理的な分岐損失が増加し、信号伝送が困

難になる。本研究では、PON システムに光増幅器を適用し、増加した損失を補償することによりこの問題の解決を図る。図 1-8 に、光増幅器を用いて加入者収容効率を向上する PON システムの構成例を示す。主として、光増幅器を局外スプリッタと OLT を接続する光ファイバ上に配置し、ルーラルエリアでは分岐数を維持した上で長延化によりサービスエリアを拡大し、都市部では次世代 PON システムの大容量特性を利用して、多分岐化により収容加入者数を拡大することを目指す。さらに次項に記載の研究開発動向を踏まえ、さらに発展した PON システム構成についても検討する。

加入者収容効率の向上

- 大容量化、および**多分岐化**による収容可能加入者数の増大
 - 長延化**により、分岐数を維持したサービス提供エリアの拡大
- ← 分岐数32、最大伝送距離20km程度

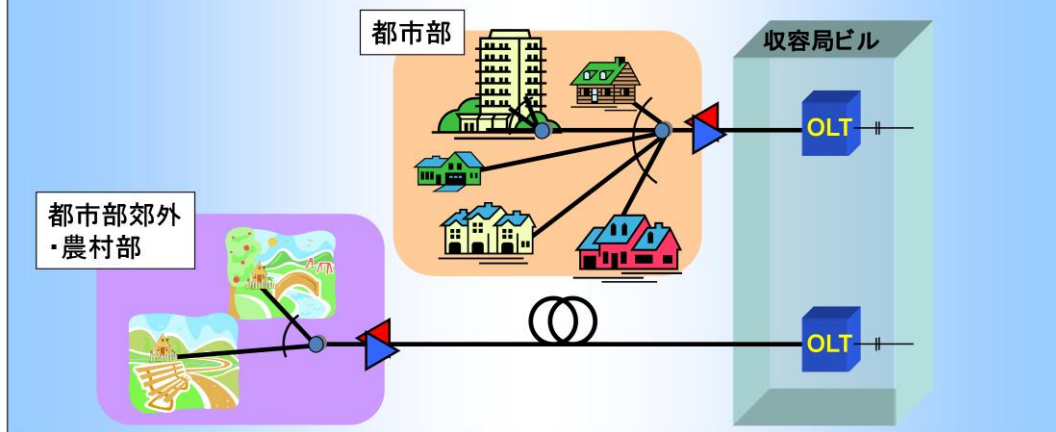


図 1-8 光増幅器を用いた PON システムの加入者収容効率の向上.

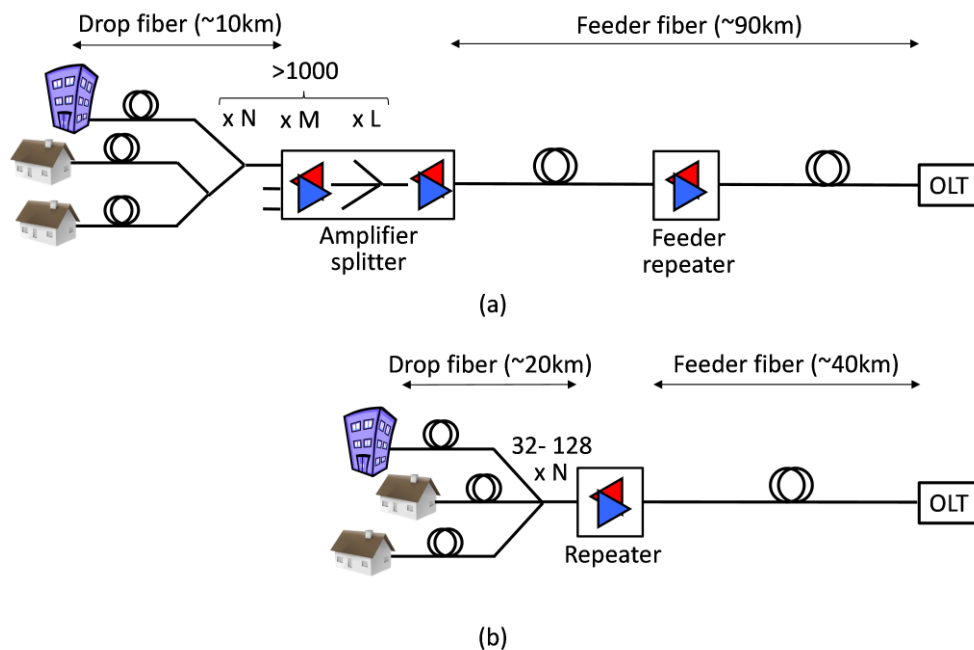


図 1-9 主に検討されている多分岐/長延化 PON システムの構成例. (a)長延化、および多分岐化の同時実現を目指した構成(SuperPON). (b)長延化の実現を目指した構成.

1-2-2 光増幅を適用した PON システムの研究開発動向、および課題

図 1-9 に、国内外で検討が進められている光増幅器を用いた多分岐/長延化 PON システムの典型的な構成例を示す。光増幅器を適用した PON システムは、TPON が提唱された数年後の 1990 年代初頭に BT により引き続いて提案された。当時の公開された資料はほとんど存在しないが [21]、BT の内部に発足したプロジェクトチームにより、後に SuperPON と呼ばれる光増幅中継型の PON システムの検討が行われた。図 1-9 (a) に、SuperPON のシステム構成例を示す [22]。システムの基本構成は、OLT が局外スプリッタ（分岐数 N ）を介して複数の ONU と接続される TDM-PON である。加えて、光増幅器組み込み型の局外スプリッタ（分岐数 $M \times L$ ）、および光増幅中継器が追加される。光増幅器を組み込むことで局外スプリッタ（分岐数 $M \times L$ ）の分岐損失を補償し、光増幅中継器により、長延化された幹線光ファイバ（Feeder fiber）の損失を補償する。本構成により、1000 分岐以上のシステムを 100 km 圏にまで拡大することを目指すとしている。机上検討の結果、下り伝送速度 1.2 Gb/s、上り伝送速度 300 Mb/s を 3000 分岐し、最大 100 km 伝送可能な PON システムが提案されている。これら伝送速度は、当時としてはチャレンジングな目標であり、ONU の低コスト化を実現する限界であった。この制約のもと求められた前記の分岐数、および伝送距離は、FTTH サービスを提供する最も経済的な解であると結論付けられている。BT の検討以降、SuperPON の概念は、仏国の通信機器メーカー Alcatel に引き継がれ、1999 年頃までその研究開発が継続された。この野心的とも言える研究開発は、FTTH システムの商用導入という形で直接実を結ぶに至らなかったが、1990 年代半ばから BT、ドイツの通信会社である DT、NTT を中心とした FTTH 導入に向けたコンソーシアムである FSAN (Full service access network) の組織化を促し、B-PON の標準化実現の契機となった。

一方、B-PON や、それに引き続いて標準化された GE-PON、および G-PON は、OLT、および ONU に搭載される光トランシーバの伝送性能限界に束縛されて仕様が決定されていた。そのため、標準仕様に準拠した装置が一部の国で導入されはじめた 2005 年頃から、光増幅器を GE-PON、および G-PON に適用した長延化システムに関する報告が数多くなされ始めた [23-28]。図 1-9 (b) に、検討されている典型的なシステム構成例を示す。図示の通り、OLT と局外スプリッタ間に光増幅中継器を配置し、長延化された幹線光ファイバの損失を補償する構成である。SuperPON は、究極を目指すあまりシステム構成が複雑になり、多分岐/長延化については概念が先行するばかりで机上検討の域を脱するに至らなかった。それに対し、標準システムが存在する現在は、より簡易な構成により現実解を目指す方向に研究開発の流れがシフトしている。システムの伝送距離は、幹線光ファイバ 40 km と配線光ファイバ (Drop fiber) 20 km の計 60 km 程度を目標としているものが多い。また分岐数は、稀に 100 以上を謳ったものもあるが [23]、32 ~ 64 を想定したものが大半である。

これら伝送距離と分岐数の設定は、G-PON における論理的な ONU の接続台数の要請に倣ったものである。

以上を踏まえて、光増幅器を PON システムに適用する際の課題を考える。まず課題を、(A) サービスを運用する通信事業者から見たアクセスシステムに対する「要求課題」、および (B) アクセスシステムに導入する装置を開発する際の「技術課題」に分けて考える。

(A)「要求課題」

① 装置/運用コストの削減

前項に記載の通り、次世代 PON システムは高速のサービスを提供可能である反面、装置、および運用コストが増加するため、トータルで考えたシステムコストの低減が求められる。それを解決する手法として、加入者の多い都市部に多分岐の PON システムを適用することが有力である。しかしながら、これまで行われてきた多分岐化の研究開発は、図 1-9 (a)のように長延化と一体となったものに注力され、近距離システムに対する多分岐化への取り組みは不十分である。

② 光サービス未提供エリアの解消

前項に記載の通り、加入電話と同様のユニバーサルサービスを実現するには、PON システムの伝送距離を 20 km 超に長延化する必要がある。標準仕様に基づいた商用機に光増幅器を適用し 60 km 程度の伝送を行った例は報告されているが、そのほとんどは、ONU と光増幅器間、および光増幅器と OLT 間について特定の光ファイバ伝送線路損失値に特化した実験例であり、損失値の変化まで考慮した検討例は極めて少ない。本件は、光増幅器の広入力ダイナミックレンジ化に関連し、技術的な詳細は (B) において後述する。

③ 収容局からの距離が大きく異なる加入者の収容

これまで近距離に多数の世帯が集中する場合（都市部）や、遠距離に少数の所帯が点在する場合（ルーラルエリア）を想定した ONU の収容方法ばかりが検討されてきた。つまり、都市部郊外等のようにその中間に居住する世帯を想定した検討はなされてこなかった。本研究では近～中距離を一つのエリアとして捉え、当該エリアに分布する加入者を効率的に収容することを新たに課題として設定する。

④ 設置場所、および電源供給

光増幅器を適用した PON システムを実際に運用するためには、まずその設置場所を何処にするかを考えなければならない。長延化システムであれば遠隔地に建てられた小型の通信局舎に設置することも期待できるが、近距離の多分岐システムでは設置する光増幅器の数が多いため、都合よく通信局舎が存在することは期待できない。これを解決するため、耐環境性に優れ、電柱上等の屋外設置可能な光増幅中継器が開発されている [29]。しかしながら、それが実現されたとしても、光増幅器は電源供給を必要とするアクティブ装置であるため、その設置は電源供給が可能な場所に制限

される。他に、局内に励起光源を配置し、高出力の励起光を光ファイバ伝送線路に入射することによって引き起こされる誘導ラマン散乱を利用して信号増幅を行う手法が提案されている [30]。しかしながら、光アクセスシステムは損失が大きいと励起効率が悪く十分な利得を得ることができないばかりか、伝送線路中に光コネクタやメカニカルスプライス等の反射点が多く、多重反射による信号性能劣化が著しいため実用的であるとは考えにくい。

⑤ 遠隔監視

通信システムに用いられる装置には何らかの故障監視機能を備える必要がある。特に、光増幅中継器が通信局舎の外に設置される場合、その故障監視を如何に行うかがシステムを運用する上で非常に重要である。これを解決するため、光増幅中継器に故障監視用の ONU を取り付け、当該 ONU の上り信号に光増幅器の監視情報を重畳して OLT に伝達する手法が提案されている [28,29]。

⑥ 低遅延サービス

前節に記載の通り、TDM-PON では、各 ONU から送信された信号がスプリッタで合流される際の時間的な重なりを防ぐため、OLT からの指示によりその送信時間と送信容量が制御されている。そのため、上り信号は OLT からの指示が来るまで ONU 内のバッファで待機する必要がある、その待ち時間により遅延が生じる。この遅延時間は、光信号が光ファイバを往復するのに要する伝搬時間に比例し、特に長延化システムにおいてその絶対値が大きくなることから、サービス品質を維持するためにこれを低減する手法が提案されている [31]。

(B)「技術課題」

① 広入力ダイナミックレンジ化

前節に記載の通り、PON システムの上り信号は短時間に強度が変化するバースト信号である。従って、上り信号を増幅する光増幅器に、近距離の ONU から送信された強度の大きい信号が入力されると、光増幅器の利得飽和効果によりバーストフレームや信号波形が劣化すると同時に、増幅後の光強度が過剰となり受信器に過負荷が生じる。すなわち、ONU と光増幅器間の光ファイバ伝送線路の損失値が小さいと、ONU のプラグアンドプレイ機能が阻害され、システムの利便性が大幅に低下する。これを回避するために、光増幅器への入力強度に依らず信号が受信できるように、光増幅器の出力レベルを高速に制御する機構を付与し、光増幅器を広入力ダイナミックレンジ化する必要がある。本機構により、ONU と光増幅器間の距離の遠近に依らずシステムの動作が保証され、ONU のプラグアンドプレイ機能が担保される。

② 高出力化

長延化 PON システムの伝送距離を、例えば、G-PON に規定される 60 km 圏にまで拡大するためには、光増幅器を高出力化する必要がある。特に PON システムの上り信号はバースト信号であるため、先述の広ダイナミックレンジ化と高出力化を

同時に実現する必要がある。

③ WDM に対応した経済化

メトロ/コアネットワークで用いられる光中継伝送システムでは、送受信される信号は連続信号であるため、利得等化器により光増幅器の利得の平坦性を保って WDM 信号を一括増幅することはさほど困難ではない。しかしながら、PON システムの上り信号はバースト信号であり、広入力ダイナミックレンジ化を実現するためには、波長ごとに出力レベルの制御を行わざるを得ず、一括増幅の実現は極めて困難である。そのため、波長ごとに光増幅器を配置する必要がある、TDM-PON システムで使用する光増幅中継器よりも波長当りの増幅機構の経済化が求められる。

④ 自然放出光雑音の影響の低減

図 1-5 (c) で説明したように、局外スプリッタと局内スプリッタで分岐を按分する多段スプリッタ構成を用いれば、単一の OLT により広範囲に点在する加入者を収容できる。本システム構成において、両スプリッタを接続する光ファイバ伝送線路上に光増幅器を配置すると、上り信号を増幅する光増幅器から出力された自然放出光 (ASE : Amplified spontaneous emission) 雑音が局内スプリッタで重畳されて、局外スプリッタのみを用いてシステムを構成した場合と比較して上り信号性能が大幅に劣化する。本研究では、(A)-①、(A)-③ の要求課題解決を目指し多段スプリッタを利用したシステム構成を提案するため、本課題への取り組みが必要となる。

⑤ 光ファイバ伝送線路の波長分散の影響による信号波形劣化

10G-EON システムの下り信号の使用波長、および WDM/TDM-PON システムの上り下り信号の使用波長は $1.5\ \mu\text{m}$ 帯である。 $1.5\ \mu\text{m}$ 帯は光ファイバの最も低損失な波長帯であるため、長距離伝送を行うのに適しているが、システム設計を行う際には光ファイバ (SMF) の波長分散の影響による信号波形劣化を考慮する必要がある。10G-EPON の下り信号の生成には、経済性を考慮し、DFB-LD と一体化して集積された EA (Electro absorption) 変調器が用いられる。そのため、変調後の光スペクトルは狭く波長分散の影響は小さい。しかしながら、40 km を超える信号伝送を行う場合その影響は無視できず、信号波形劣化を改善する手段が必要である。

1-3 本論文の概要

表 1-3 に、光増幅器を適用した 10G-EPON システムの要求課題、それに対する本研究のアプローチ、およびそこで発生する技術課題をまとめる。また表 1-4 に、光増幅器を適用した WDM/TDM-PON システムの要求課題、それに対する本研究のアプローチ、およびそこで発生する技術課題をまとめる。両表には、取り組みごとに対応する本論文の章番号を付与している。また表中、斜体で示されている項目は、本論文において特に注力した課題である。

2 章では、光サービスが未提供のルーラルエリアに居住する世帯に、高速の光アクセスサービスを新規に提供することを目指し、10G-EPON システムの長延化技術について検討する。従来の検討と同様、長延化による光ファイバ伝送線路の損失を補償するために光増幅中継器を用いる。伝送距離を大幅に拡大するために、上り光増幅器に高速のレベル制御機構を付与することにより、高出力化と広入力ダイナミックレンジ化の同時実現を目指した装置構成を提案する。増幅媒体としてプラセオジウム添加光ファイバ増幅器 (PDFA: Praseodymium-doped fiber amplifier)、および半導体光増幅器 (SOA: Semiconductor optical amplifier) を用いた提案構成による光増幅中継器を製作し、出力、および入力ダイナミックレンジ特性を評価する。また、本光増幅中継器を用いた際に実現可能な加入者収容範囲を実験により明らかにする。さらに SOA を用いた光増幅中継器については、標準仕様に準拠した 10G-EPON 装置と接続した 100 km 伝送フィールドトライアルにより、映像信号伝送デモンストレーションを行う。

3 章では、電源供給の容易な収容局に光増幅中継器を設置し、ONU を効率的に収容するシステム構成を提案する。光増幅器による許容伝送線路損失の拡大効果は、光増幅器を伝送路の中ほどに設置することで増す。このため提案システムでは、局外と局内に配置したスプリッタで分岐を按分する多段スプリッタ型の PON システム構成を想定し、OLT 直下ではなく、局内スプリッタ直下に光増幅器を設置する。具体的な提案システムは、

- 単一 OLT により局内スプリッタの一分岐に光増幅器を設置して遠距離 ONU を収容するが、他の分岐には光増幅器を設置せず近距離 ONU を収容する遠近混在システム

- 局内スプリッタの全分岐に光増幅器を設置することで多分岐スプリッタの損失を補償し、単一 OLT により多数の近距離 ONU を収容する多分岐システム

である。前章で製作した SOA を用いた光増幅中継器が有する高速の出力レベル制御機構によりもたらされる広入力ダイナミックレンジ特性、および ASE 雑音抑圧特性が、提案システム実現に有用であることを実証する。また、提案システム構成による加入者収容範囲を実験により明らかにする。

4 章では、長延化 WDM/TDM-PON システムの検討を行う。WDM/TDM-PON で

は複数波長を増幅するため、波長ごとに光増幅器を配置する必要がある。従って、10G-EPON 以上に装置の経済化が求められることから、増幅媒体として光ファイバ増幅器よりも経済化を見込むことができる SOA を用いる。SOA の利得の高速応答特性を利用して出力レベル制御を行うことにより、2 章、および 3 章の SOA を用いた光増幅中継器よりも部品点数を削減し、かつ高出力化と広入力ダイナミックレンジを実現することのできる装置構成を提案する。提案構成による光増幅中継器を製作し、出力、および入力ダイナミックレンジ特性を評価する。また、本光増幅中継器を用いた際に実現可能な加入者収容範囲を実験により明らかにする。さらに、本光増幅中継器の一部分は、前置光増幅器として OLT に組み込んで使用することもできる。本使用方法により、光増幅器の設置場所や電源供給を問題とすることなくシステムの分岐数を拡大し得ることから、それにより実現可能な加入者収容範囲についても実験により明らかにする。

以上の提案システム構成、および提案技術を、収容局から加入者までの距離に応じて適用することにより、効率的かつ距離に依存しないシームレスな加入者収容が可能であることを明らかにする。

距離	加入者数	要求課題	アプローチ	技術課題	章番号
近	大	・装置/運用コスト低減 ・設置場所 ・電源供給 ・遠隔監視	多分岐システム構成の提案	・ASE雑音の影響の低減 ・広入力ダイナミックレンジ化 ・加入者収容範囲の明確化	3
中	中	・距離の異なる加入者の収容 ・設置場所 ・電源供給 ・遠隔監視	遠近混在システム構成の提案	・ASE雑音の影響の低減 ・広入力ダイナミックレンジ化 ・加入者収容範囲の明確化	3
遠	少	・サービス未提供エリアの解消 ・設置場所 ・電源供給 ・遠隔監視 ・低遅延サービス	光増幅中継システムの高性能化	・分散による波形劣化の改善 ・高出力化 ・広入力ダイナミックレンジ化 ・加入者収容範囲の明確化	2

表 1-3 光増幅器を適用した 10G-EPON システムの要求課題に対する本研究のアプローチ、および発生する技術課題。(枠内が本研究の取り組み)

距離	加入者数	要求課題	アプローチ	技術課題	章番号
近	大	・装置/運用コスト低減 ・設置場所 ・電源供給 ・遠隔監視	光前置増幅方式の適用	・広入力ダイナミックレンジ化 ・加入者収容範囲の明確化	4
中	中	・距離の異なる加入者の収容 ・設置場所 ・電源供給 ・遠隔監視	—	—	—
遠	少	・サービス未提供エリアの解消 ・設置場所 ・電源供給 ・遠隔監視 ・低遅延サービス	光増幅中継システムの高性能化	・分散による波形劣化の改善 ・高出力化 ・広入力ダイナミックレンジ化 ・WDMに対応した経済化 ・加入者収容範囲の明確化	4

表 1-4 光増幅器を適用した WDM/TDM-PON システムの要求課題に対する本研究のアプローチ、および発生する技術課題。(枠内が本研究の取り組み)

1-4 参考文献

- [1] 例えば、セス・シュルマン(著), 吉田三知世(翻訳), “グラハム・ベル空白の12日間の謎” 日経BP社, 2010.
- [2] K. Hagimoto, K. Iwatsuki, A. Takada, M. Nakazawa, M. Saruwatari, K. Aida, and K. Nakagawa, “250 km nonrepeated transmission experiment at 1.8 Gb/s using LD pumped Er^{3+} -doped fiber amplifiers in IM/direct detection system,” IEE Electron. Lett., Vol. 25, No. 10, pp. 662-664, 1989.
- [3] H. Takahashi, S. Suzuki, and I. Nishi, “Wavelength multiplexer based on SiO_2 - Ta_2O_5 arrayed-waveguide grating,” IEEE/OSA J. Lightw. Technol., Vol. 12, No. 6, pp. 989-995, 1994.
- [4] J. Stern, J. Balance, D. Faulkner, S. Hornung, D. Payne, and K. Oakley, “Passive optical local networks for telephony applications and beyond,” IEE Electron. Lett., Vol. 23, No. 4, pp. 1255-1257, 1987.
- [5] S. Wagner, H. Kobrinski, H. Lemberg, and L. Smoot, “Experimental demonstration of a passive optical subscriber loop,” IEE Electron. Lett., Vol. 24, No. 6, pp. 344-346, 1989.
- [6] S. Wagner, and T. Chapuran, “Broadband high-density WDM transmission using superluminescent diodes,” IEE Electron. Lett., Vol. 26, No. 11, pp. 696-697, 1990.
- [7] N. Frigo, P. Iannoe, P. Magill, T. Darcie, M. Downs, B. Desai, U. Koren, T. Koch, C. Dragone, H. Presby, and G. Bodeep, “A wavelength-division multiplexed passive optical network with cost-shared components,” IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 6, No. 11, pp. 1365-1367, 1994.
- [8] M. Feuer, M. Thomas, and L. Lundardi, “Backreflection and loss in single-fiber loopback networks,” IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 12, No. 8, pp. 1106-1108, 2000.
- [9] H. Suzuki, M. Fujiwara, T. Suzuki, N. Yoshimoto, K. Iwatsuki, and T. Imai, “Colorless and plug-and-play technologies for WDM access over existing power-splitter-based infrastructure,” OSA J. Opt. Netw., Vol. 6, No. 7, pp. 830-839, 2007.
- [10] M. Fujiwara, J. Kani, H. Suzuki, and K. Iwatsuki, “Impact of backreflection on upstream transmission in WDM single-fiber loopback access networks,” IEEE J. Lightw. Technol., Vol. 24, No. 2, pp. 740-746, 2006.
- [11] C. Lee, S. Lee, K. Choi, J. Moon, S. Mun, K. Jeong, J. Kim, and B. Kim, “WDM-PON experiences in Korea,” OSA J. Opt. Commun., Vol. 6, No. 5, pp. 451-464, 2007.
- [12] Y. Luo, X. Zhou, F. Effenberger, X. Yan, G. Peng, Y. Qian, and Y. Ma, “Time-

and wavenegth-division multiplexed passive optical network (TWDM-PON) for next-generation PON stage 2 (NG-PON2),” *IEEE/OSA J. Lightw. Technol.*, Vol. 31, No. 4, pp. 587-593, 2013.

[13] 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,” *ECOC’2013, Mo.4.F.5*, 2013.

[14] T. Tatsuta, N. Oota, N. Miki, and K. Kumozaki, “Design philosophy and performance of a GE-PON system for mass deployment,” *OSA J. Opt. Netw.*, Vol. 6, No. 6, pp. 689-700, 2007.

[15] H. Nakamura, S. Kimura, H. Hara, N. Yoshimoto, M. Tsubokawa, M. Nakamura, K. Nishimura, A. Okada, and Y. Ohtomo, “AC-coupled burst-mode transmitter using baseline-wander common-mode-rejection technique for 10-Gbit/s-class PON systems,” *IEEE/OSA J. Lightw. Technol.*, Vol. 27, No. 3, pp. 336-342, 2009.

[16] K. Hara, S. Kimura, H. Nakamura, N. Yoshimoto, and H. Hadama, “New AC-coupled burst-mode optical receiver using transient-phenomena cancellation techniques for 10 Gbit/s-class high-speed TDM-PON systems,” *IEEE/OSA J. Lightw. Technol.*, Vol. 18, No. 19, pp. 2775-2782, 2010.

[17] H. Suzuki, M. Fujiwara, T. Suzuki, N. Yoshimoto, H. Kimura, and M. Tsubokawa, “Demonstration and performance of colorless ONU for coexistence-type WDM-PON using a wavelength-tunable L-band DWDM-SFP transceiver,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 20, No. 19, pp. 1603-1605, 2008.

[18] R. Murano, W. Sharf, and M. Cahill, “Tunable 2.5Gb/s receiver for wavelength-agile DWDM-PON,” *OFC/NFOEC’2008, PDP32*, 2008.

[19] N. Cheng, J. Gao, C. Xu, B. Gao, X. Wu, D. Liu, L. Wang, X. Zhou, H. Lin, and F. Effenberger, “World’s first demonstration of pluggable optical transceiver modules for flexible TWDM PONs,” *ECOC’2013, PD4.F.4*, 2013.

[20] R. Kubo, J. Kani, H. Uchiwara, T. Sakamoto, Y. Fujimoto, N. Yoshimoto, and H. Hadama, “Study and demonstration of sleep and adaptive link rate control mechanism for energy efficient 10G-EPON,” *IEEE/OSA J. Opt. Commun. Netw.*, Vol. 2, No. 9, pp. 716-729, 2010.

[21] D. Payne and R. Davey, “The future of fibre access systems?,” *BT Technol. J.*, Vol. 20, No. 20, pp. 104-114, 2002.

[22] I. Voorde, C. Martin, J. Vandeweghe, and X. Qiu, “The SuperPON demonstrator: an exploration of possible evolution paths for optical access networks,” *IEEE Commun. Mag.*, Vol. 38, Iss. 2, pp. 74-82, 2000.

- [23] N. Suzuki and J. Nakagawa, "First demonstration of full burst optical amplified GE-PON uplink with extended system budget of up to 128 splits and 58 km reach," ECOC'2005, Tu1.3.3, 2005.
- [24] Z. Belfqih, F. Saliou, P. Chanclou, T. Soret, and N. Genay, "Bidirectional amplifier for standard PON architecture in burst mode configuration with class B+ attenuation range," OFC/NFOEC'2007, OWS1, 2007.
- [25] S. Appathurai, D. Nesses, and R. Davey, "Measurement of tolerance to non-uniform burst powers in SOA amplified G-PON," OFC/NFOEC'2007, OWS2, 2007.
- [26] K.-I. Suzuki, Y. Fukada, D. Nesses, and R. Davey, "Amplified gigabit PON systems," OSA J. Opt. Netw., Vol. 6, No. 5, pp. 422-433, 2007.
- [27] F. Saliou, P. Chanclou, F. Laurent, N. Genay, J. Lazaro, F. Bonada, and J. Prat, "Reach extension strategies for passive optical networks," OSA J. Opt. Commun. Netw., Vol. 1, No. 4, pp. C51-C60, 2009.
- [28] R. Davey, D. Grossman, M. Wiech, D. Payne, D. Nesses, A. Kelly, A. Rafel, S. Appathurai, and S. Yang, "Long-reach passive optical networks," IEEE/OSA J. Lightw. Technol., Vol. 27, No. 3, pp. 273-291, 2009.
- [29] 今井健之, 藤原正満, 田口勝久, 鈴木謙一, "屋外設置型 PON 光増幅器," 電子情報通信学会技術研究報告, 通信方式, CS2011-14, pp. 23-27, 2011 年.
- [30] K. Lee, J. Riding, A. Tran, and R. Tucker, "Extended-reach gigabit passive optical network for rural areas using distributed Raman amplifiers," OFC/NFOEC'2009, NWE3, 2009.
- [31] D. Murayama, N. Oota, K.-I. Suzuki, and N. Yoshimoto, "Low-latency dynamic bandwidth allocation for 100 km long-reach EPONs," IEEE/OSA J. Opt. Commun. Netw., Vol. 5, No. 1, pp. 48-55, 2013.

第2章 光増幅中継器を用いた TDM-PON の長延化

2-1 はじめに

現在、戸建ての世帯に FTTH (Fiber to the home) による光ブロードバンドサービスを提供するために、時分割多重 (TDM: Time division multiplexing) 技術を用いた TDM-PON (Passive optical network) システムが広く用いられている [1-2]。TDM-PON は、収容局 (CO: Central office) に配置される伝送装置 (OLT: Optical line terminal) と、加入者宅に配置される伝送装置 (ONU: Optical network unit) が、局外に配置されるスプリッタを介して接続されるポイント・ツー・マルチポイント (P2MP: Point-to-multipoint) 型のトポロジーを有し、OLT、および OLT とスプリッタを接続する幹線光ファイバが複数の加入者により共有されることにより、Gb/s 級の光アクセスサービスを経済的に提供することができる。代表的なシステムが、IEEE (The institute of electrical and electronics engineering) で標準化された GE (Gigabit Ethernet)-PON、および ITU-T (International telecommunication union telecommunication standardization sector) で標準化された G (Gigabit capable)-PON である。これらシステムは信頼性が高く、多くの国で採用され順調に加入者数を伸ばしている。しかしながら、サービス提供エリアは、OLT、および ONU に搭載される光トランシーバのパワーバジェットの制限を受け、32 分岐システムの加入者収容範囲は、収容局から 20 km 以下とされている。従って、加入者数が増加するに伴い、収容局から 20 km を超える都市部郊外やルーラルエリアにまでサービスエリアを拡張する要求が高まるものと予想されている。この潜在的な要求に応えるため、光増幅器を TDM-PON に適用することにより、長延化に伴う幹線光ファイバの損失の増加分を補償し、システムの伝送距離を飛躍的に拡大する技術の検討が進められている。光増幅媒体として、光ファイバ増幅器 (OFA: Optical fiber amplifier) [3-5]、半導体光増幅器 (SOA: Semiconductor optical amplifier) [6-8]、ラマン光増幅器 [9,10] を用い、これらの中継器として適用した際に達成されるシステム動作範囲を検証した結果が多数報告されている。

一方、GE-PON、および G-PON が商用導入されて以降、次世代の光アクセスシステムとして、10 Gb/s 級の光サービスを提供可能な 10G-EPON、および XG-PON が、それぞれ、IEEE、および ITU-T で標準化され、それに準拠した伝送装置 (OLT、ONU) が開発されている [11-13]。またこの流れを受けて、10Gb/s 級の TDM-PON システムに光増幅器を適用する検討が始められている [14-23]。

本章では、次世代光アクセスシステムが導入される時期を想定し、光増幅器を用いて 10Gb/s 級 TDM-PON システムの長延化を実現する技術について述べる。TDM-PON システムの最も顕著な特徴は、下り信号が連続信号であるのに対し、上り信号が各 ONU から間欠的に送信されるバースト信号であることである。このバ

ースト信号は、時間軸方向に間欠的であるだけでなく、ONU からスプリッタまでの距離の相違や、光送信器出力の個体差により、バースト信号フレームごとに強度が大きく変化する特性を有する。従って、上り信号伝送に適用する光増幅器には、伝送距離の拡大を実現するために高出力化が求められるのはもとより、バースト信号に対応した広い入力ダイナミックレンジが求められる。

最初に、TDM-PON の上り信号伝送に光増幅器を適用した際のシステム設計法について説明する。次に、高出力化と広入力ダイナミックレンジ化の同時実現を目指した上り光増幅器の構成を提案する。光増幅媒体としてプラセオジウム添加光ファイバ増幅器 (PDFA : Praseodymium-doped fiber amplifier) を用いた提案構成による光増幅器を製作し、その性能を評価する。また、長延化 10 Gb/s 級 TDM-PON システムの加入者収容範囲を実験により明らかにする。最後に、同様の構成による SOA を用いた光増幅中継器を製作し、10G-EPON 装置を用いた 100 km のフィールド実験により、映像伝送デモンストレーションを行う。これまでフィールド実験として、光増幅器を用いた G-PON システムによる 60 km 伝送実験や、XG-PON システムを用いた映像等のアプリケーション動作に関する報告がなされていたが [8,11]、10 Gb/s 級 TDM-PON システムの長延化に関する報告なされおらず、本章に記載のフィールド実験が世界初となる。

2-2 光増幅中継システム構成、およびシステム設計法

図 2-1 (a) に、収容局から 20 km 以下のエリアに位置する加入者を収容する通常 PON システム構成を示す。図示の通り、OLT と複数の ONU が局外に配置されるスプリッタを介して接続される簡易な P2MP 構成である。ONU とスプリッタまでの伝送距離の相違や、ONU に搭載されるバースト光送信器 (B-Tx) 出力の個体差により、OLT に搭載されるバースト光受信器 (B-Rx) には、強度の異なるバースト信号フレームが入力されるため、広い入力ダイナミックレンジが求められる。表 2-1 に、IEEE802.3av で規定されている高パワーバジェット版 10G-EPON (PR30) の光送受信器に関する仕様の一部を示す。表に示される通り、OLT 内の B-Rx は、-6 dBm から -28 dBm の広い入力レンジに対してエラーフリー動作を達成することが求められている。

一方、図 2-1 (b) は、収容局から 20 km を超えるエリアに位置する加入者を収容する長延化 TDM-PON システムの構成を示す。通常 PON システムに対して伝送距離を飛躍的に拡大するため、光増幅中継器が OLT とスプリッタ間に配置される。1 中継により世帯カバー率は格段に向上するものと思われるが、それでも信号伝送ができない場合は、図 2-1 (c) のように複数中継により伝送距離をさらに拡大する。光増幅中継器は、上り信号と下り信号の波長を合分波し個別に増幅する構成の双方向光増幅器である。一般に、ONU と光増幅中継器間をアクセス区間、光増幅中継器と OLT 間をトランク区間と呼ぶ。アクセス区間は、通常 PON システムの伝送区間に相当し、長延化 PON システムの伝送距離は、通常 PON システムに対してトランク区間の分だけ延長される。上り信号伝送に利得の大きい光増幅器を用いると、長延化 PON システムの最大伝送距離、すなわち OLT と最遠 ONU との間の伝送距離を飛躍的に拡大することができる。しかしながら、上り信号伝送では、最短 ONU と光増幅器間の伝送距離が二つの要因によって制限される。

第一の要因は、光増幅器の過渡応答である。図 2-2 に、繰り返し光パルスを入力した際に観測される出力波形の一例を示す。光パルスの入力光強度は、光増幅器の利得が飽和する領域に設定されている。図 2-2 (a)、および (b) は、それぞれ、PDFA を用いた場合、および SOA を用いた場合の測定結果である。PDFA、および SOA に対して、それぞれ、1 ms、および 500 ps 周期の光パルスを入力している。図示の通り、光増幅器の利得が飽和する領域に光パルスを入力すると、光パルスの立ち上がり立ち下りに波形ひずみが生じる。立ち上がりに着目すれば、一旦高利得で急激に増幅された後、徐々に利得を下げ、やがて一定利得に落ち着く様子が分かる。この波形ひずみの時定数が PDFA と SOA で異なるのは、両光増幅媒体で利得の緩和時間が異なるためである。PDFA の利得の緩和時間は非常に長く、Gb/s オーダの光信号入力に対しては平均の光強度を感じるだけで、一定利得で増幅する。しかしながら、TDM-PON システムの上り信号のような長周期のバーストフレームが入力されると、フレームの時間幅が利得の

緩和時間と同程度になるため、出力フレーム波形にひずみが生じる。一方、SOA の利得の緩和時間は非常に短く、Gb/s オーダの光信号の時間幅と同程度であるため、信号 1 ビット毎に出力波形にひずみが生じる。一般に、OFA で増幅した際に生じる出力フレームの急峻な立ち上がりを光サージ、SOA で増幅した際に生じるアイパターンの劣化をパターン効果と呼ぶ。これら波形ひずみは、受信感度特性を劣化させるため、光増幅器への入力光強度の上限値を制限する。

第二の要因は、B・Rx の過負荷である。光増幅器に強信号が入力されるとその出力は過剰に増幅される。従って、増幅後に伝送される幹線光ファイバの損失が十分でないと、B・Rx に受信感度の上限値を超える光信号が入力され信号が受信できなくなる。この B・Rx の過負荷も、過渡応答と同様に光増幅器への入力光強度の上限値を制限する。図 2-3 に、上り信号伝送における光レベルダイヤグラムを示すと同時に、これら光増幅器への入力光強度の制限要因を示す。

以上の二つの制限要因がシステムに与える影響を評価するために、アクセス区間の損失 (Link loss A) を横軸、トランク区間の損失 (Link loss B) を縦軸に示した両対数の等高線グラフ上に、システムの動作範囲を表現する手法が用いられる。図 2-4 (a) に、上り光増幅器として OFA を用いた場合の一般的なシステム動作範囲の概略図を示す。ここでは例として OFA を取り上げるが、SOA を用いた場合も同様の図となる。図中、三つの限界線、すなわち、①伝送線路損失 (Loss)、② B・Rx の過負荷 (Overload)、および③光サージ (Surge) で囲まれた領域がシステムの動作範囲を表す。Overload 限界、および Surge 限界に加えて、Loss 限界も考慮する必要がある。図 2-3 に示される通り、Loss 限界はシステムの最大伝送距離を規定する。これら三つの限界線は、以下のように算出される。

① Loss 限界

理想的には、

$$GL_A L_B T_{x_{out}} = R_{x_{in(min)}} \quad (1)$$

により算出され、図において右肩下がりの直線で表される。ここで、 $T_{x_{out}}$ 、 $R_{x_{in(min)}}$ 、 G 、 L_A 、および L_B は、それぞれ、B・Tx の送信光強度、B・Rx の最小受信感度、光増幅器の利得、アクセス区間の損失、およびトランク区間の損失である。ただし、光増幅器は自然放出光 (ASE: Amplified spontaneous emission) 雑音を放出し、受信信号の性能を劣化させるため、その影響を考慮する必要がある。ASE 雑音の影響を考慮した受信信号の性能を表す Q 値は、

$$Q = \frac{qGL_B(N_m - N_s)}{\sigma_m + \sigma_s} \quad (2)$$

により算出される。ここで、 q は電荷素量、 N_m 、および N_s は、それぞれ、光増幅器に入力される光信号のマークレベル、およびスペースレベルにおけるフォトン数であり、

光信号の消光比 r 、プランク定数 h 、光信号の周波数 ν を用いて、

$$N_m = \frac{2rL_A T x_{out}}{(1+r)h\nu} \quad (3)$$

$$N_s = \frac{2L_A T x_{out}}{(1+r)h\nu} \quad (4)$$

で表される。また、マークレベル、およびスペースレベルにおける雑音量を表す σ_m 、および σ_s は、

$$\sigma_m = \sqrt{2q^2(GL_B N_m + 2(G-1)L_B n_{sp} \Delta f + 2G(G-1)L_B^2 N_m n_{sp} + 2(G-1)^2 L_B^2 n_{sp}^2 \Delta f + \langle i_n^2 \rangle_{cir}} \quad (5)$$

$$\sigma_s = \sqrt{2q^2(GL_B N_s + 2(G-1)L_B n_{sp} \Delta f + 2G(G-1)L_B^2 N_s n_{sp} + 2(G-1)^2 L_B^2 n_{sp}^2 \Delta f + \langle i_n^2 \rangle_{cir}} \quad (6)$$

で表される。ここで n_{sp} 、 Δf 、および $\langle i_n^2 \rangle_{cir}$ は、それぞれ、光増幅器の反転分布パラメータ、使用する ASE カット光フィルタの透過帯域幅、および受信器の回路雑音である。また、右辺の平方根内の第一項から第四項は、それぞれ、信号光のショット雑音、ASE のショット雑音、信号光と ASE 間のビート雑音、ASE 間のビート雑音を表す。ASE 雑音を考慮した Loss 限界は、式 (2) に、式 (3) から (6) を代入し、目標とする受信ビットエラーレートに対応する Q 値を満たす L_A 、および L_B の関係式を導出することにより示される。実際には、 L_A 、および L_B の値をパラメータとして二次元的に変化させて Q 値を等高線プロットし、目標とする Q 値を繋ぐ曲線を求めるのが簡便である。ASE 雑音の影響は、光増幅器への入力光強度が下がるに従い相対的に大きくなる。従って、図の右下に向かって、式 (1) により導出される直線との乖離が大きくなる。

② Overload 限界

理想的には、

$$GL_A L_B T x_{out} = R x_{in(max)} \quad (7)$$

により算出され、図において Loss 限界と並行した右肩下がりの直線で表される。ここで、 $R x_{in(max)}$ は、受信器の最大受信感度である。実際には、光増幅器の ASE 雑音が重畳されるため、

$$GL_A L_B T x_{out} + G n_{sp} \Delta f L_B = R x_{in(max)} \quad (8)$$

により、左辺第二項で表される ASE の光強度を考慮する必要がある。ASE の光強度は、光増幅器への入力光強度が下がるに従い相対的に大きくなる。従って、図の右下に向かって、式 (7) により導出される直線との乖離が大きくなる。

③ Surge 限界

光サージの影響を回避できる光増幅器の入力光強度を P_{surge} とすると、

$$L_A T x_{out} = P_{surge} \quad (9)$$

で表される。

図 2-4 (a) によると、十分に広いシステム動作範囲が得られているようにも見受けられる。しかしながら、OFA の入力ダイナミックレンジ、すなわち、許容される最遠 ONU と最短 ONU 間の L_A の差は、Overload 限界と Surge 限界により著しく制限される。またその値は、 L_B の値によって大きく変化する。このことは、通常 PON システムの上りバースト信号を、光増幅器を介してトランク区間に円滑に接続できず、ONU のプラグアンドプレイ機能が阻害されることを意味する。従って、システムを正常に動作させるためには、ONU を接続する度ごとに光ファイバ伝送線路の損失値を測定し、その結果に基づいた減衰量を有する光減衰器を ONU の出力に取り付ける等の作業が必要となり、システム運用が複雑になる。上り光増幅器が、 L_B の値に依らず、B-Rx の入力ダイナミックレンジと同等の広い入力ダイナミックレンジを有すればこの問題を回避することができる。図 2-4 (b)に、理想的な長延化 PON システムの動作範囲を示す。光増幅器の利得を適切に制御することにより、図示される長方形に近い形状のシステム動作範囲の実現を目指す。これまで、励起光とは別に用意した連続光を光増幅器に入力して利得をクランプすることにより、OFA の光サージや SOA のパターン効果の発生を抑える手法や [3,18]、フィードフォワード型の自動利得制御 (AGC: Automatic gain control) 回路を用いて、OFA の利得を入力光信号レベルに係らず一定値に制御し、光サージの発生を抑える手法が提案されている [4]。しかしながら、前者は光増幅器の過渡応答の影響を緩和することはできるが、それと引き換えに利得が低下するため十分な伝送距離の拡大効果を得ることができない。また後者は、利得を低下させることなく光サージの発生を抑えることができるが、B-Rx の過負荷を防ぐ効果は得られない。一方、SOA の利得の飽和効果を逆に利用して出力光強度を制限することにより、受信器の過負荷を緩和する手法が提案されている [14]。しかしながら、SOA の利得飽和効果が得られる入力レンジが十分でないため、図 2-4 (b) のような長方形に近い形状のシステム動作範囲は達成されていない。

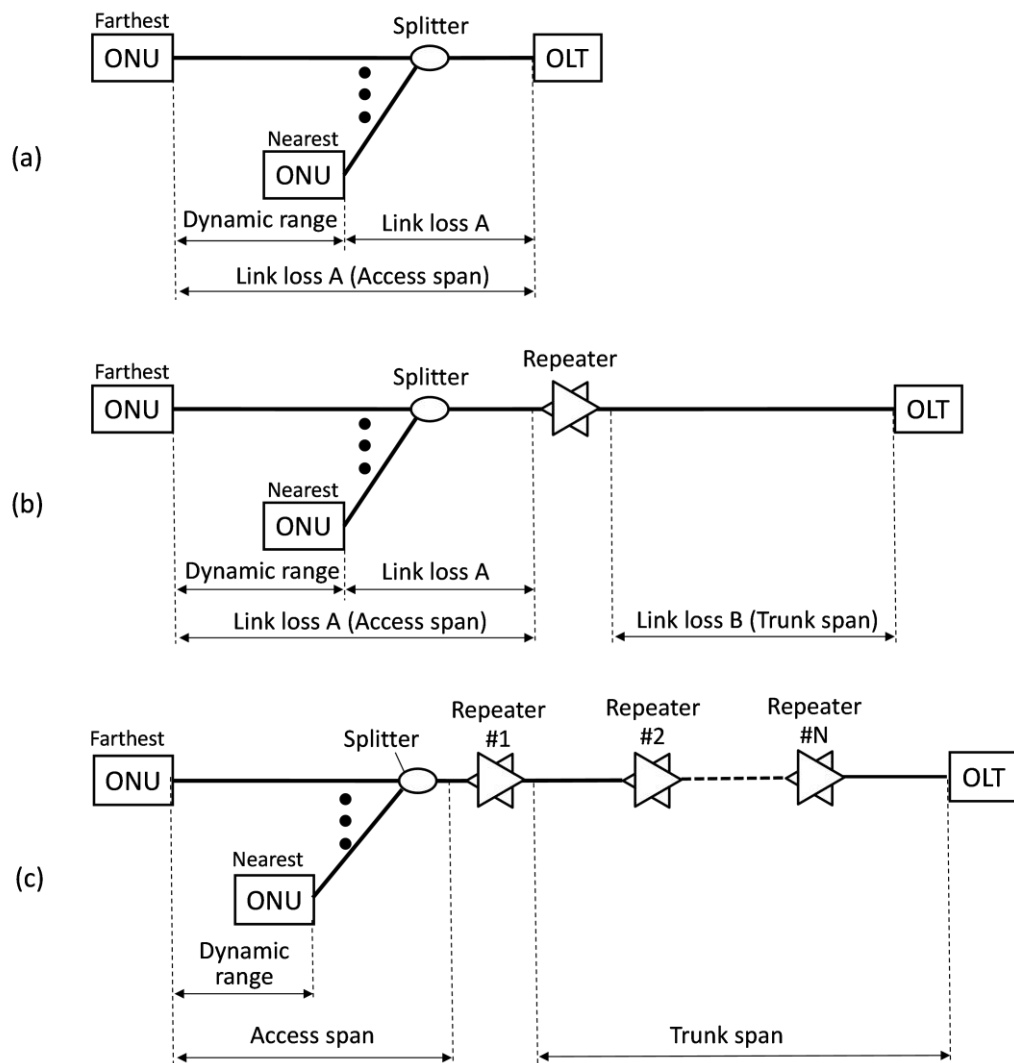


図 2-1 PON システムの構成. (a)通常 PON システム. (b)光増幅器を用いた長延化 PON システム(1 中継). (c)光増幅器を用いた長延化 PON システム(多中継).

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

表 2-1 10G-EPON で規定される光送受信器仕様.

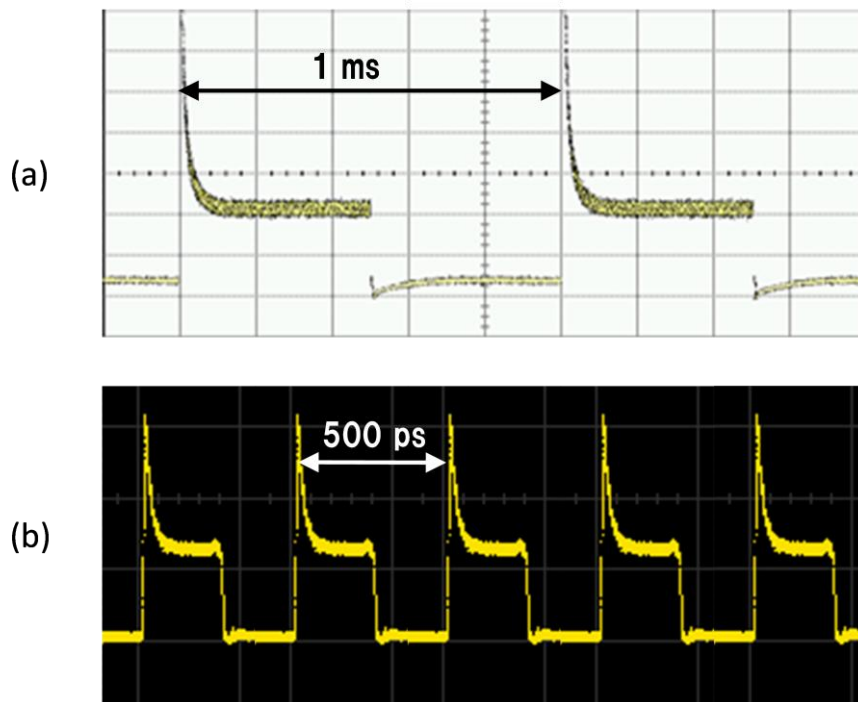


図 2-2 光増幅器の過渡応答特性. (a)PDFA の場合. (b) SOA の場合.

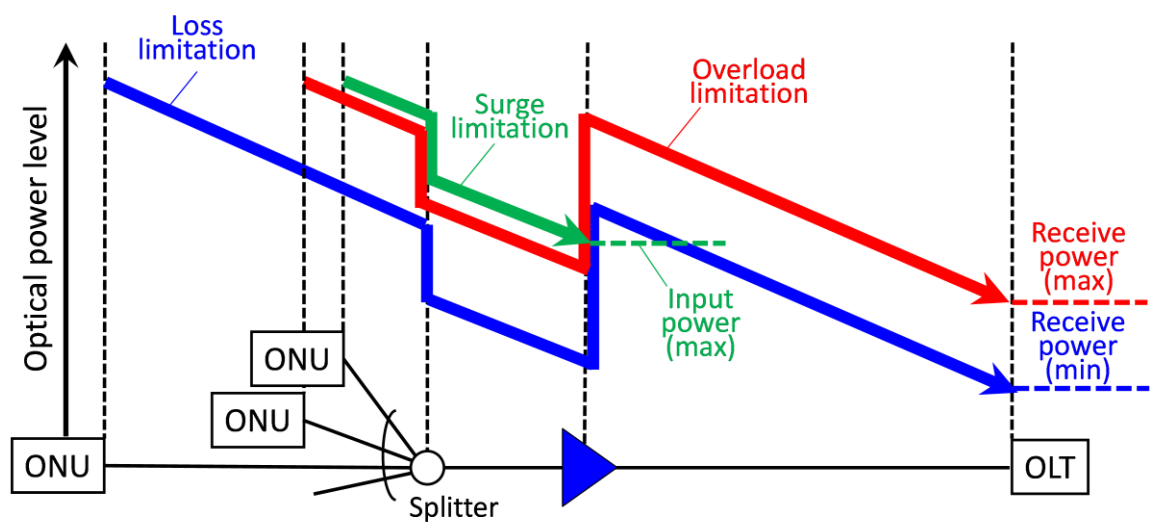


図 2-3 光増幅器を用いた長延化 TDM-PON システムにおける上り信号伝送レベルダイヤグラム, およびシステム動作範囲の制限要因.

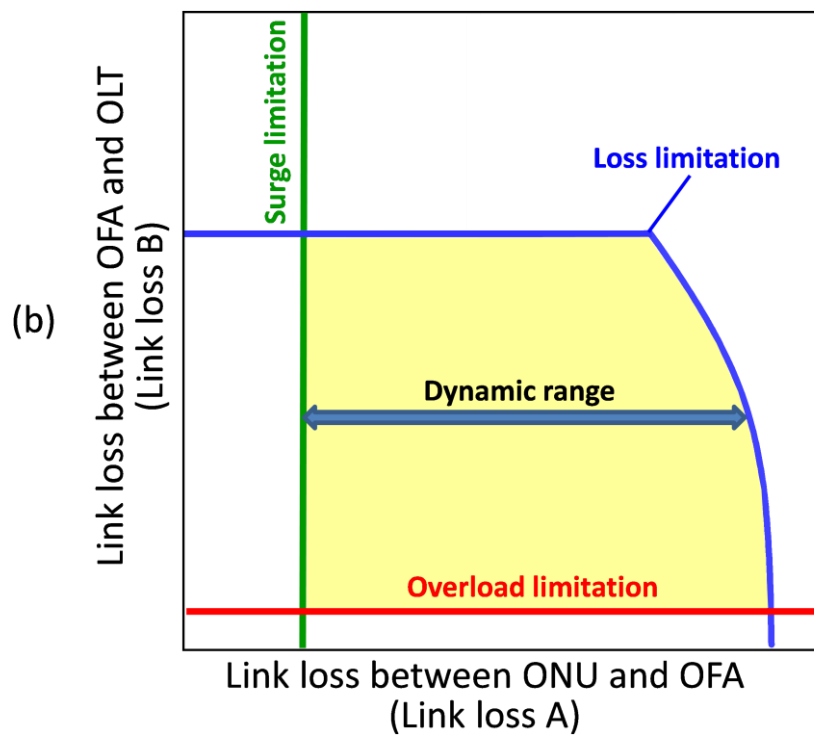
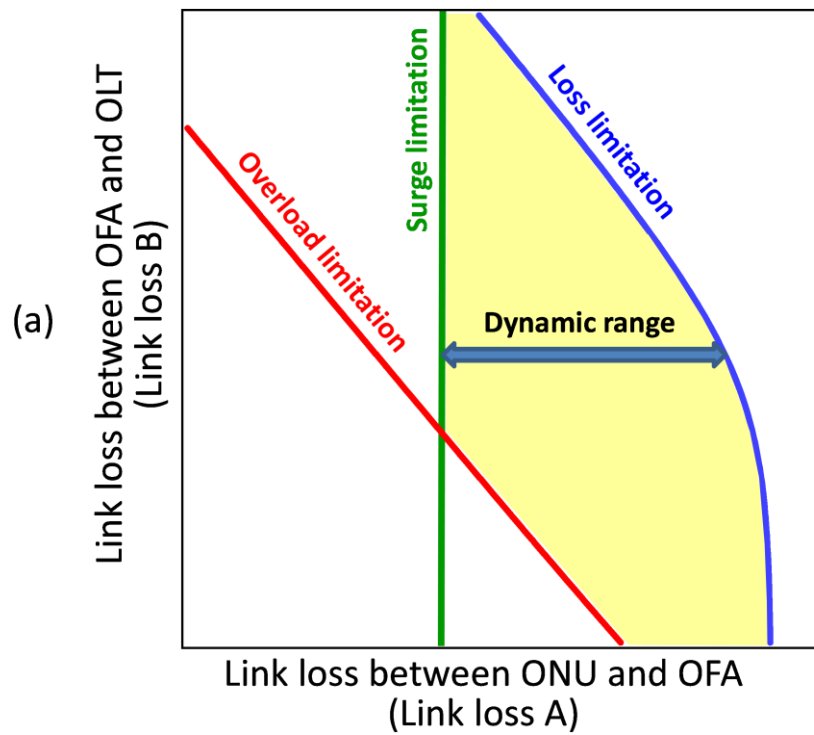


図 2-4 光増幅器(OFA)を用いた長延化 TDM-PON のシステム動作範囲. (a)光増幅器の利得制御なし. (b)光増幅器の利得制御あり.

2-3 バースト信号対応光増幅器

2-3-1 高速自動レベル制御機構を備えた光増幅器

図 2-5 に、上りバースト信号に対応した光増幅器の構成を示す。光増幅媒体として PDFA を用いる。信号波長は、PDFA の増幅帯域に合わせて 1310 nm 帯を使用する。本使用波長は、10G-EPON システムの標準波長である 1270 nm 帯と一致しないが、1270 nm 帯に比べて光ファイバ伝送線路の損失が少ないこと、また既存の GE-PON システムの標準波長と同一であることから、共通の光増幅中継器により両システムを共存させることが成し得るという利点がある [19]。(a) は従来手法の組み合わせによる構成であり [5]、(b) は提案構成である [17,20]。

(a)は、利得クランプ (GC : Gain clamp) 型の PDFA (GC-PDFA) と、高速自動利得制御型の PDFA (AGC-PDFA) をカスケード接続した構成を有する光増幅器 (以下、Hybrid-PDFA) である。PDFA をカスケード接続することにより高利得化、および高出力化を実現する。図示の通り、GC-PDFA では、光増幅媒体である PDFA を、0.98 μm の励起光で励起すると同時に、1330 nm の利得クランプ光を入力する。クランプ光の強度を信号光の強度よりも十分大きい値に設定し、クランプ光の強度に対して信号光の強度の変化が十分小さくなるようにする。これにより、信号光強度の変化に対する利得の変化を抑え、光サージの発生を防ぐ。ただし、利得クランプ光を入力することにより利得が低下するというデメリットがある。一方、AGC-PDFA は、フィードフォワード (FF : Feed forward) 制御により、入力光信号強度に応じて励起光の強度を調整する。この FF 制御により、入力光信号の強度に依らず利得を一定値に制御し、光サージの発生を抑える。信号増幅に関して励起光以外の光源を必要としないことから、得られる利得は GC-PDFA よりも大きい。いずれの PDFA も光サージの発生を抑える効果を有することから、GC-PDFA と AGC-PDFA をカスケード接続することにより、利得の制御を行わない PDFA をカスケード接続した光増幅器と比較して、より広い入力ダイナミックレンジを達成することができる。ここでは、本構成と提案構成の入力ダイナミックレンジを比較する。

一方、(b) は、Surge 限界と Overload 限界を大幅に緩和するため、高速自動レベル制御 (ALC : Automatic level control) 機構を配置した提案構成による光増幅器 (以下、ALC-PDFA) である。(a) と同様、高利得化、および高出力化を実現するため、PDFA をカスケード接続する。前段、および後段の PDFA は、それぞれ、AGC-PDFA、および前方励起による PDFA である。前段の AGC-PDFA は、(a) で使用したものと同一である。また、高速の ALC 回路を、カスケード接続した PDFA の間に配置する。本 ALC は、スプリッタ、モニタ PD (Photo detector)、FF 制御回路、および高速の可変光減衰器 (VOA : Variable optical attenuator) から構成される。本 ALC 回路は、入力光信号レベルに応じて FF 制御により VOA の減衰量を調整し、入力光信号レベル

に依らず一定レベルの光信号を出力する。その出力値を、後段の PDFA の利得の未飽和領域に設定することにより、後段の PDFA における光サージの発生を回避すると同時に、高出力化を達成することができる。また、ALC-PDFA の入力ダイナミックレンジは、前段の AGC-PDFA の入力ダイナミックレンジと同等の範囲を保つことができる。さらに、出力が一定値に制御されていることから、OLT に搭載される B-Rx に入力される光信号強度が、ONU と ALC-PDFA の距離に依らず一定となるため、B-Rx の過負荷を防ぐことができる。

入力バースト信号の光強度の検出は、スプリッタにより信号光の一部をタップして得られたモニタ光をモニタ PD により電気信号に変換し、その振幅を読み取ることにより行う。図 2-6 に、本 ALC 回路の動作原理を示す。FF 制御回路内には、ADC (Analogue-to-digital converter)、DAC (Digital-to-analogue converter)、およびデジタル演算器が搭載される。入力バースト信号フレームは、プリアンプルとペイロードにより構成され、加入者が送信する情報はペイロードに格納される。一方、プリアンプルには、マーク率が $1/2$ であり、かつ同符号が連続しない一定パターンの信号が格納され、OLT 内の B-Rx においてバースト信号を適切に受信するために用いられる。具体的には、受信バースト信号の振幅を制限して一定値に制御する時間、およびバースト信号ごとにクロックを抽出するのに要する時間を確保するために用いられる。ADC は入力信号フレームの振幅をプリアンプル長よりも十分に短い周期でサンプリングする。デジタル演算器には予め設定した閾値情報が格納され、サンプリングされた振幅データが閾値を超えた時間 (T_r) においてバースト信号の立ち上がりを検出する。図示しないが、バースト信号の立下りも同様に検出する。光信号強度は、プリアンプルにおいてサンプリングされた複数のデータ点の平均値を計算することにより求められる。ここで複数点を用いるのは、弱信号の光強度を検出する際の SNR (Signal-to-noise ratio) を向上させるためである。また、バースト信号フレームの立ち上がりが急峻でない場合、 T_r 直後のサンプリングデータ点は、入力光信号強度の正確な値を示さないため、前記の平均化計算は、 T_r 検出後の数データ点をスキップした後行う。入力光信号強度を算出した後は、検出したバースト信号フレームの立ち上がりと立ち下りの区間のデータ点を DAC によりアナログ信号に変換する。その際、アナログ信号の振幅値は、算出された入力光信号強度に応じて VOA 出力の光信号強度が一定値となるように設定される。ペイロードには、同符号が連続する信号が含まれることもあるため、これを用いて入力光信号強度を検出すると正確な入力光強度の検出ができない。ALC 回路の前段で用いる AGC-PDFA も FF 制御により高速の利得制御を行うが、PDFA の利得の応答速度は非常に遅いため、同符号連続区間において励起光の光強度が変化しても、得られる利得値は一定に保たれる。そのため、AGC-PDFA では、ペイロードを含めたすべてのフレーム区間のサンプリングデータを用いて入力光強度を検出し、全フレーム区間に対して連続した利得の制御を行うことができる。これに対して、VOA の応答速度は速く、

ペイロードのサンプリングデータを用いて計算された入力光強度の検出値を用いて同様の連続制御を行うと、同一フレーム区間内において出力光レベルが変動することになる。そのため、本 ALC 回路では、入力光信号強度の検出を同符号が連続しないプリアンプルにおいて行い、出力光レベルの変動を防ぐこととした。実際に使用した ADC、および DAC のサンプリング周期、および振幅方向の分解能は、それぞれ、10 ns、および 16 ビットである。また、FF 制御回路の応答速度は約 50 ns である。

図 2-7 に、図 2-5 の構成に基づいて製作したバースト信号対応光増幅器の利得、および出力光強度の測定結果を示す。図示しないが、3 nm の平坦な通過帯域特性を有する光バンドパスフィルタ (BPF : Band pass filter) が、Hybrid-PDFA では、GC-PDFA と AGC-PDFA の間、ALC-PDFA では、AGC-PDFA と ALC 回路の間に配置される。また測定に際しては、1307 nm の連続光を使用した。(a) に示される通り、Hybrid-PDFA の利得は、入力光強度が -15 dBm を超えた辺りから飽和し始めるが、利得の未飽和領域における小信号利得は 23 dB と高値を達成している。なお、この利得値は、ALC-PDFA との公平な比較を行うため、GC-PDFA のクランプ光の強度を調整することにより、以下に示す ALC-PDFA の利得値と一致させた。一方、ALC-PDFA では、(b-1) に示される通り、-28 dBm を超える入力光強度に対して、ALC 回路の出力が -18.5 dBm の一定値に保たれていることが分かる。(b-2) に示される通り、この値は、後段 PDFA の利得の未飽和領域における入力光強度に相当する。従って、AGC-PDFA が許容する広い入力レンジに対して、後段の PDFA においても常に光サージの発生を抑えることが期待できる。また、出力光強度として -5.0 dBm が達成されることが予測される。(c) は、ALC-PDFA の出力における光強度の測定結果であり、この予測が正しいことが示されている。また図によると、-28 dBm を超える入力光強度に対して、23 dB の利得値が達成されていることが分かる。

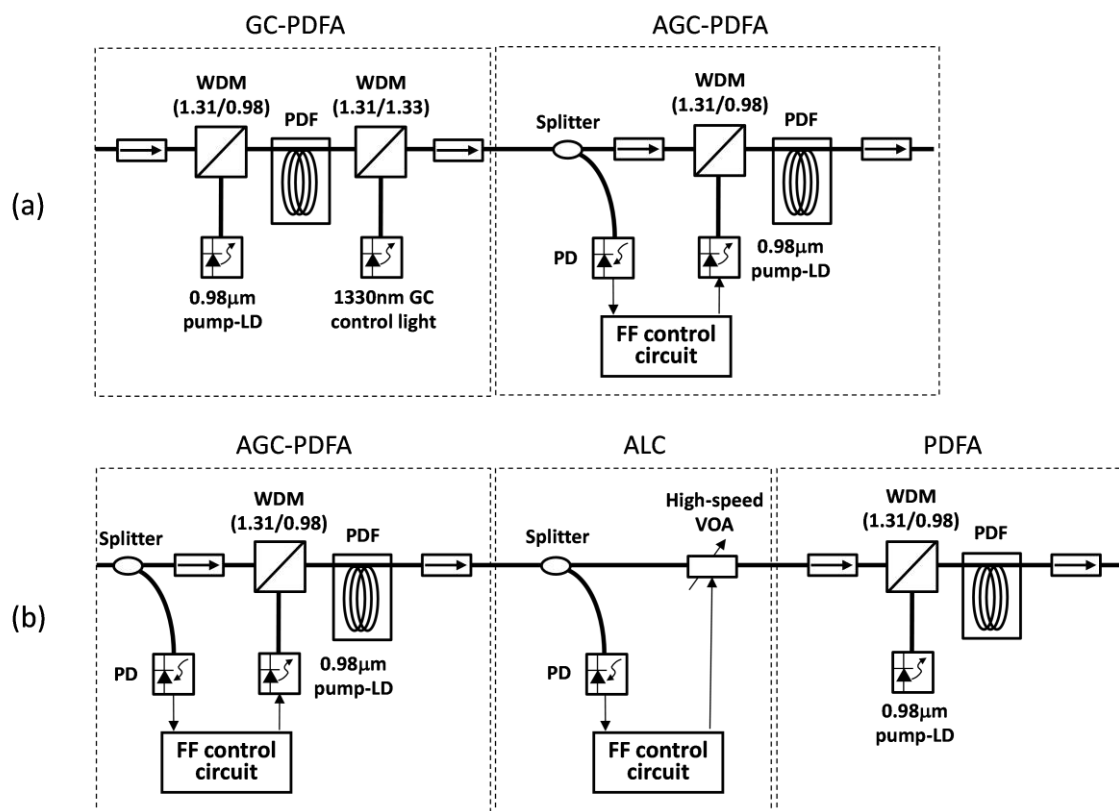


図 2-5 バースト信号対応光増幅器の構成. (a)従来構成(Hybrid-PDFA). (b)提案構成 (ALC-PDFA).

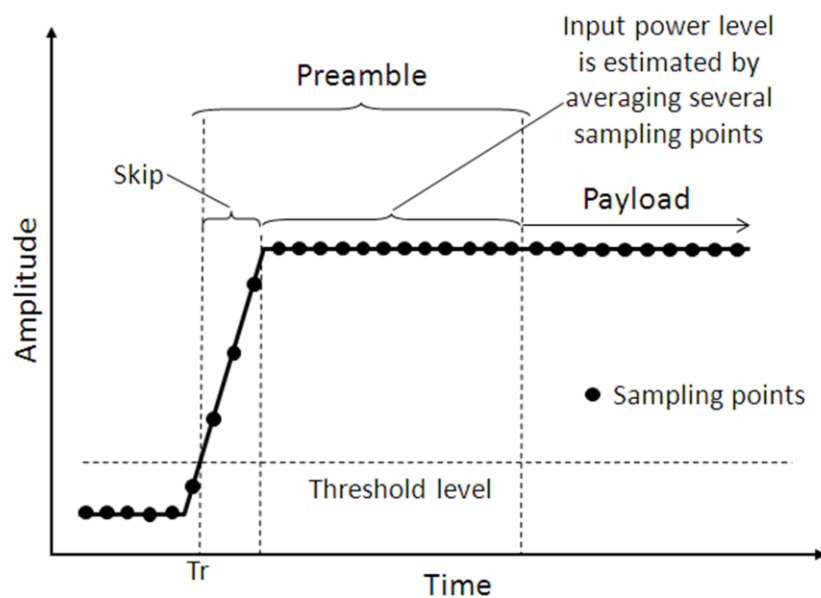


図 2-6 高速 ALC 回路の動作原理.

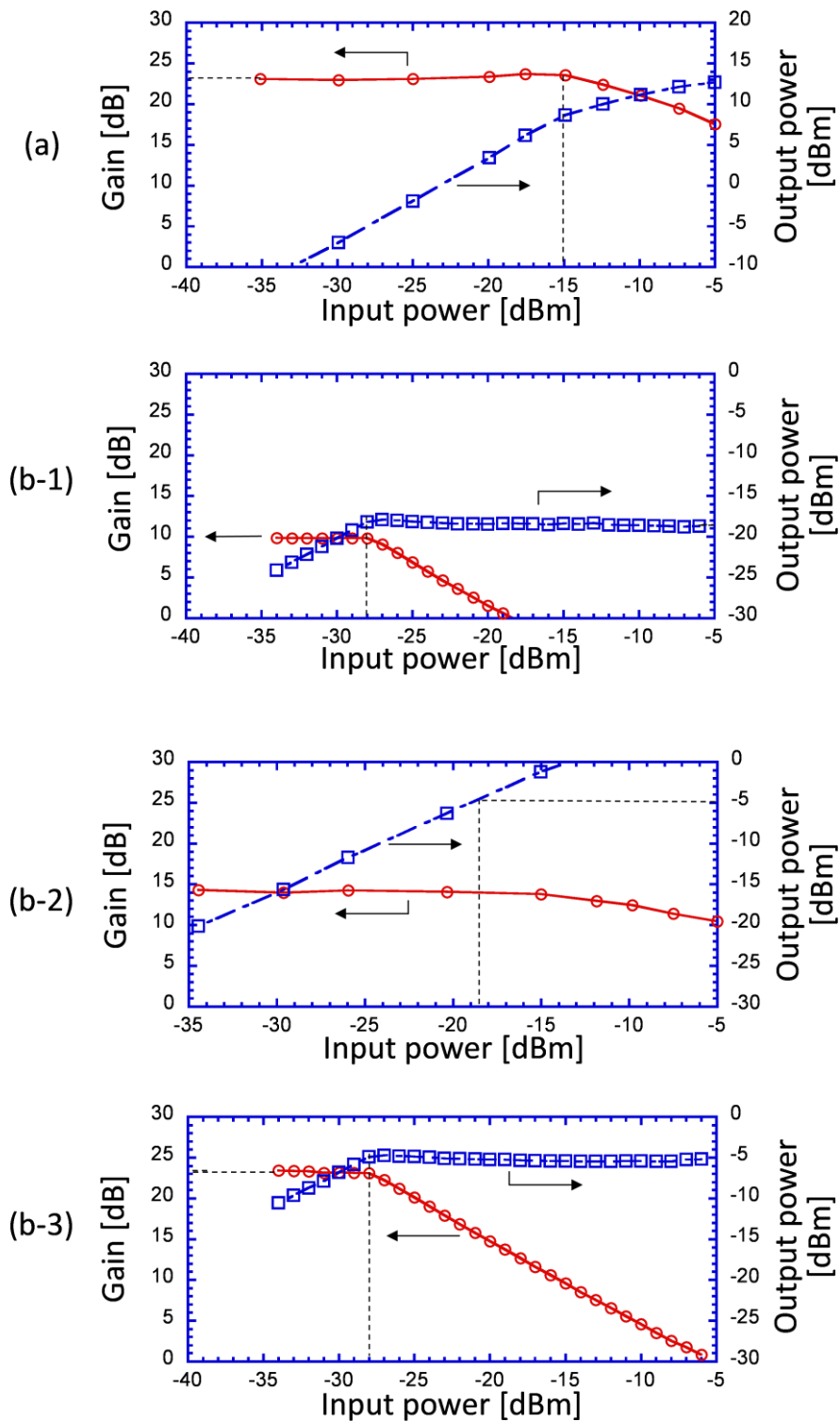


図 2-7 バースト信号対応光増幅器の入力光強度変化に対する利得, および出力光強度の測定結果. (a)Hybrid-PDFA 出力. (b-1)ALC-PDFA の ALC 回路出力. (b-2)ALC-PDFA の後段 PDFA 単体の出力. (b-3)ALC-PDFA 出力.

2-3-2 システム動作範囲

提案する ALC-PDFA による入力ダイナミックレンジ拡大効果を確認するため、10 Gb/s 級のバースト信号を用いてビットエラーレート (BER : Bit error rate) 測定を行った。図 2-8 に、実験系を示す。本実験系は、1 台の B-Rx、二台の B-Tx、およびバースト信号対応光増幅器から構成される。B-Tx のうち測定に使用されるの是一台であり、もう一台はダミー信号の生成に使用される。また、バースト信号対応光増幅器は、前節で説明した Hybrid-PDFA、および ALC-PDFA である。B-Rx は、トランスインピーダンス増幅器付きのアバランシェフォトダイオード (APD-TIA : Avalanche photo diode with trans-impedance amplifier)、および振幅制限増幅器 (LA : Limiting amplifier) から構成される。B-Tx は、高速のバースト信号対応 LD (Laser diode) ドライバ付きの分布帰還型 (DFB : Distributed-feedback laser diode)-LD であり、パルスパターン発生器 (PPG : Pulse pattern generator) により生成された 10.3125 Gb/s のバースト信号を用いて駆動電流を変化させることにより直接変調される。ここで、バースト信号フレームは、バースト信号同期パターン (0x BF 40 18 E5 C5 49 BB 59) が格納された 794.4 ns のプリアンプル、 $2^{31}-1$ 段の疑似ランダム (PRBS : Pseudo random bit sequence) パターンが格納された 19.9 μ s のプリアンプルから構成される。本バーストフレームパターンは、IEEE802.3av で規定される 10G-EPON フレームパターンに倣ったものである。2 台の B-Tx から送信されるバースト信号フレームのタイミングは、PPG と BER テスタに同期したタイミングパルス発生器から出力されるイネーブル信号 (Enable signal) によって制御される。バースト信号フレーム間のガードタイムは 198.6 ns に設定する。図 2-9 に、本バースト信号フレームを用いて行った B-Rx の受信特性の測定結果を示す。弱信号測定では、ダミー信号の光信号強度を -6.0 dBm に設定し、強信号測定では、ダミー信号の光信号強度を -28.0 dBm に設定した。弱信号の測定データによると、エラーフリー動作を達成する最小受信感度は -29.5 dBm である。ここで、エラーフリーの $BER = 10^{-12}$ を規定し、誤り符号訂正 (FEC : Forward error correction) 技術の適用を前提として、 $BER = 10^{-3}$ によりエラーフリー動作を達成するものとする。一方、強信号の測定データによると、-6.0 dBm の入力光信号強度に対して $BER = 10^{-12}$ を達成している。FEC の適用を前提としているため、-6.0 dBm を超える入力光信号強度に対してエラーフリー動作を達成しているが、入力光強度の増加に対する BER の変化が大きいことを考慮し、最大受信感度を -6.0 dBm と考える。最小、および最大受信感度は表 2-1 に記載の規定値を満たし、入力ダイナミックレンジ 23.5 dB を達成している。B-Tx1 (測定信号生成用)、および B-Tx2 (ダミー信号生成用) の出力光強度 / 消光比は、それぞれ、2.5 dBm / 6.0 dB、および 2.6 dBm / 6.1 dB である。開発途中の B-Tx であるため、出力光強度は、表 2-1 の規定値を満たしていないが、消光比は、表 2-1 の規定値を満たしている。Link loss A の値は、B-Tx、

およびスプリッタの間に配置される VOA1、および VOA2 により調整される。一方、Link loss B の値は、バースト信号対応光増幅器と B-Rx の間に配置される VOA3 により調整される。BER 測定は、VOA の減衰量を調整し、Link loss A、および Link loss B の値を変化させて行う。

最初に、Hybrid-PDFA のシステム動作範囲を調べる。図 2-7 (a) に示される通り、Hybrid-PDFA は、広い利得の未飽和領域を有するが、-15 dBm を超える光信号入力に対して光サージが発生するものと予想される。バースト信号フレームの立ち上がりには生じる光サージのピークレベルは、強信号と弱信号のレベル差が広がるに従い増加する。図 2-10 は、Hybrid-PDFA を用いた長延化システムのトランク区間に許容される伝送線路損失を測定した結果を示す。ここで、光増幅器への入力光強度を P_m と定義している。この測定結果は、弱信号の P_m を -29.0 dBm に固定した状態で、強信号の P_m を変化させて BER 測定を行うことにより得られたものである。これにより、トランク区間に許容される伝送線路損失と入力バースト信号のレベル差の関係が示される。図示の通り、強信号の P_m が -15 dBm を下回る場合、トランク区間の許容伝送線路損失 22 dB が得られている。それに対し、強信号の P_m が -6.5 dBm に向けて増加するに従い、トランク区間の許容伝送線路損失は減少する。図 2-11 に、B-Rx の出力において観測された電気波形を示す。(a-1)、および (a-2) は、それぞれ、図 2-10 に示される Case(I)、および Case(II) に対して観測された波形を示す。(a-1) では、LA の振幅制限機能が比較的適切に動作しているのに対し、(a-2) では、ペイロードを含む弱バースト信号フレームの先頭部分が著しく劣化していることが分かる。これが、B-Rx が正常に信号受信できずトランク区間の許容伝送線路損失を減ずる要因となっている。この現象は、LA の応答速度と、PDFA の利得の緩和時間が同程度である場合に起き得る。LA の応答速度を速めれば、PDFA で増幅したバースト信号フレームの受信特性を向上させることが可能であると思われる。しかしながら、LA の応答速度を速めると B-Rx の同符号連続耐性が劣化する。実際、実験で使用した LA の応答速度は 150 ns であり、過去に報告されているバースト信号に対応した LA の応答速度と比較して同程度がそれ以上である。従って、実験において本 LA を使用することは、現状において最良の選択であるものと考えられる。

図 2-12 に、Case(I) に相当するシステム動作範囲を示す。また、図 2-13 (a)、および (b) は、それぞれ、図 2-12 における Z-Z'、W-W' に沿って測定した BER の測定結果を示す。図 2-12 は、図 2-13 に示されるように、Link loss A の値を固定した上で、Link loss B の値を変化させて得られた BER の測定結果を基に描いたものである。また測定は、図 2-12 の等高線プロット図を、二つの領域、(X)、および(Y) に分けて行った。領域 (X)、および (Y) における BER 測定において、ダミー信号生成用の B-Tx2 から Hybrid-PDFA に入力される P_m を、それぞれ、-29.0 dBm、

および -15.5 dBm に設定した。ONU の送信光強度は、表 2-1 に規定される値ではなく、B-Tx1 の実測値である 2.5 dBm を使用した。等高線図にプロットされるデータ点は、エラーフリー動作を達成する境界線を示し、これらデータ点によって囲まれる領域、すなわち等高線図において色付けされている領域がシステム動作範囲となる。図 2-12 に示されるように、強信号の測定で得られた BER は、Link loss B の値の変化に対して非常に大きく変動するため、等高線プロット図では、エラーフリー動作を達成する $BER = 10^{-10}$ で規定し、それに対応する点をプロットしている。等高線プロット図における、二つの点線は、Loss 限界、および Overload 限界の計算値である。この計算では、Hybrid-PDFA の利得は、入力光強度に依らず 23 dB で一定であると仮定している。他の二つの点線は、Hybrid-PDFA に入力される P_m が、 -15.5 dBm、および -29.0 dBm に相当する線である。図示の通り、プロットされたデータ点は、Loss 限界、および Overload 限界の計算結果と良く一致する。また、入力されるバースト信号の光強度範囲 13.5 dB に対して、Link loss B の最大許容伝送線路損失、および許容伝送線路損失マージン、約 22 dB、および約 8 dB が得られている。Hybrid-PDFA に入力する P_m の最大値 -15.5 dBm は Surge 限界に相当し、得られたシステム動作範囲は、図 2-4 (a) と同様の形状を示している。

図 2-14 に、Case(II) に相当するシステム動作範囲を示す。領域 (X)、および (Y) における BER 測定において、ダミー信号生成用の B-Tx2 から Hybrid-PDFA に入力される P_m を、それぞれ、 -29.0 dBm、および -6.5 dBm に設定した。図 2-14 と異なり、本図では、Loss 限界と Overload 限界の計算値と実験値が一致していない。図示の通り、Overload 限界に相当する実験データ点は、Link loss A の値が小さい領域において、計算結果に対して改善された Link loss B の値を示す。これは、 P_m の増加により Hybrid-PDFA が飽和し、利得が低下しているためである。一方、Loss 限界に相当する実験データ点は、光サージ発生の影響により、計算結果に対して劣化した Link loss B の値を示す。本図は、図 2-12 と比較して、最大で 22.5 dB の入力ダイナミックレンジを有する広いシステム動作範囲を示している。しかしながら、この入力光強度範囲に対する Link loss B のマージンは存在しない。

図 2-15 に、ALC-PDFA の入出力波形の測定結果を示す。測定位置は、後段 PDFA の出力ではなく ALC 回路の出力である。弱信号の P_m の値は、 -27.0 dBm、および -29.0 dBm、それに対する強信号の P_m の値は、 -6.5 dBm に設定している。(a) に示される通り、ALC 回路はペイロードに $2^{31}-1$ 段の PRBS パターンが格納されたレベル差 20.5 dB の入力バースト信号フレームを、一定レベルで出力することに成功している。それに対し、レベル差 22.5 dB のバースト信号フレームを用いて測定を行った (b) では、前段の AGC-PDFA の利得が目標とする出力光レベルに不足しているため、若干のレベルばらつきが生じている。しかしながら、図 2-11 (c) に示される B-Rx の出力波形は、LA により一定レベルに出力制限されており、正常な

バースト信号受信が可能であるものと予想される。なお、 P_m の値の設定値である -6.5 dBm、および -29.0 dBm は、本 ALC 回路が正常に動作する限界値である。

図 2-16 に、ALC-PDFA を用いた場合のシステム動作領域を示す。図 2-17 (a)、および (b) は、それぞれ、図 2-16 における Z-Z'、W-W' に沿って測定した BER の測定結果である。領域 (X)、および (Y) における BER 測定において、ダミー信号生成用の B-Tx2 から ALC-PDFA に入力される P_m を、それぞれ、 -29.0 dBm、および -6.5 dBm に設定した。図示の通り、計算により得られた Loss 限界に沿ってプロットされた実験データは計算結果とよく一致している。領域 (Y) と比較して、領域 (X) において実験データと計算結果に差が生じているのは、図 2-15 (b) で示される ALC 回路出力のレベルばらつきによるものと考えられる。一方、図 2-12、および図 2-14 の結果と異なり、Overload 限界は ALC 機能により図の下方に移動している。また、光サージ限界は図示されていない。これは、光サージ限界に相当する P_m の値が、ALC 回路が正常に動作する P_m の上限値である -6.5 dBm よりも大きいためである。

図 2-16 において、プロットされたデータにより囲まれる領域がシステム動作領域である。図示の通り、ALC-PDFA に入力されるバースト信号の光強度範囲 22.5 dB に対して、Link loss B の最大許容伝送線路損失、約 22 dB が達成されている。また、Link loss B の最小許容伝送線路損失は約 8 dB であることから、Link loss B の許容伝送線路損失マージンは約 14 dB となる。得られるシステム動作範囲は、図 2-4 (b) と同様、長方形に近い形状をしており、図 2-12、および図 2-14 と比較して運用性に優れたシステム動作範囲を達成していると言える。

上記の光増幅器の入力ダイナミックレンジ (22.5 dB) は、10G-EPON に規定される B-Rx の入力ダイナミックレンジ (22.0 dB) を満たす。従って、本 ALC-PDFA を用いて、32 分岐、20 km 相当のアクセス区間をトランク区間に円滑に接続し、ONU のプラグアンドプレイ機能を担保することが可能である。さらに、上記のトランク区間の最大許容伝送線路損失 (約 22 dB) は、O 帯における光ファイバの損失を 0.5 dB/km とした場合、44 km の伝送距離に相当する。従って、本 ALC-PDFA を用いることにより、32 分岐システムの伝送距離を 60 km 超にまで長延化し得る。また、最小許容伝送線路損失 (約 8 dB) は 16 km の伝送距離に相当し、長延化システムの最小伝送距離は 36 km となる。

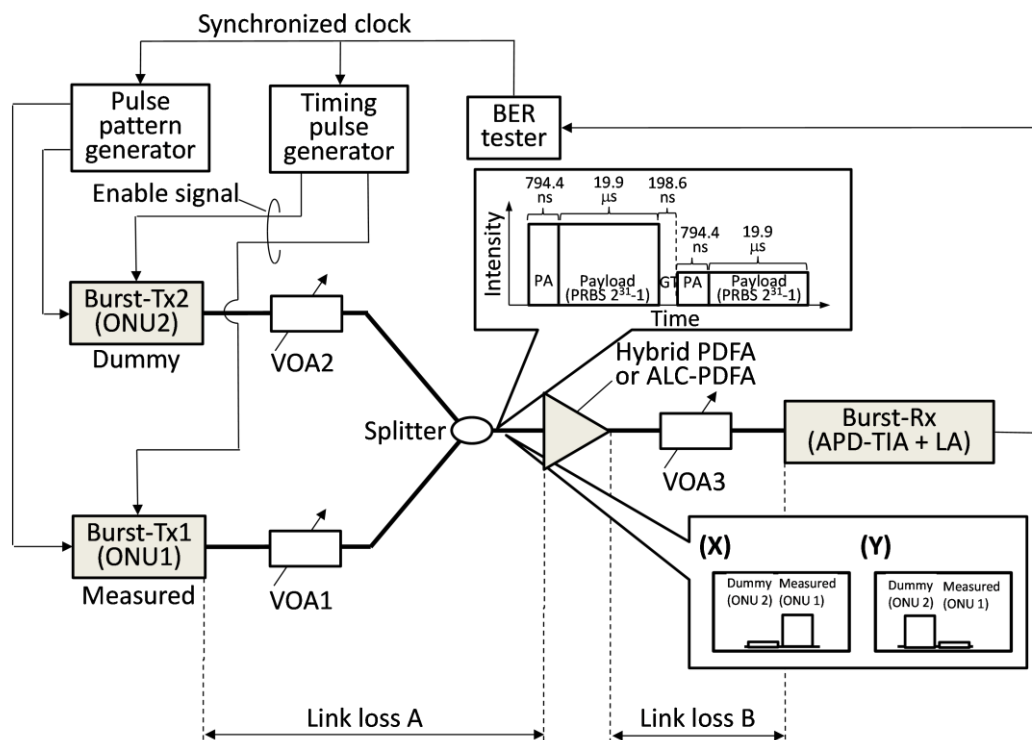


図 2-8 BER 測定実験系.

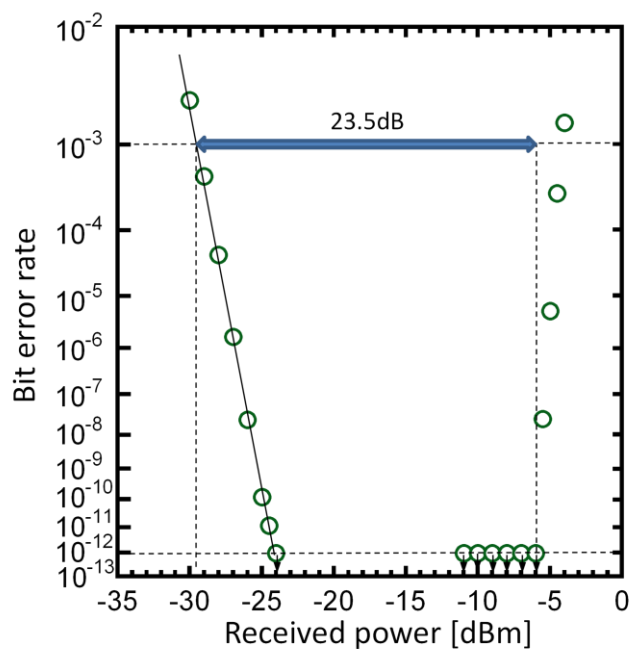


図 2-9 バースト受信器の受信特性.

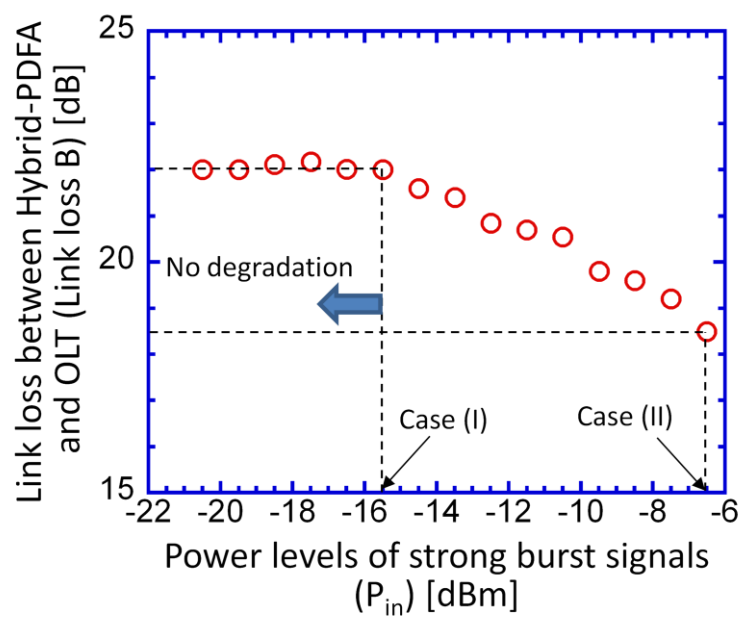


図 2-10 Hybrid-PDFA を用いた場合のトランク区間の許容伝送線路損失.

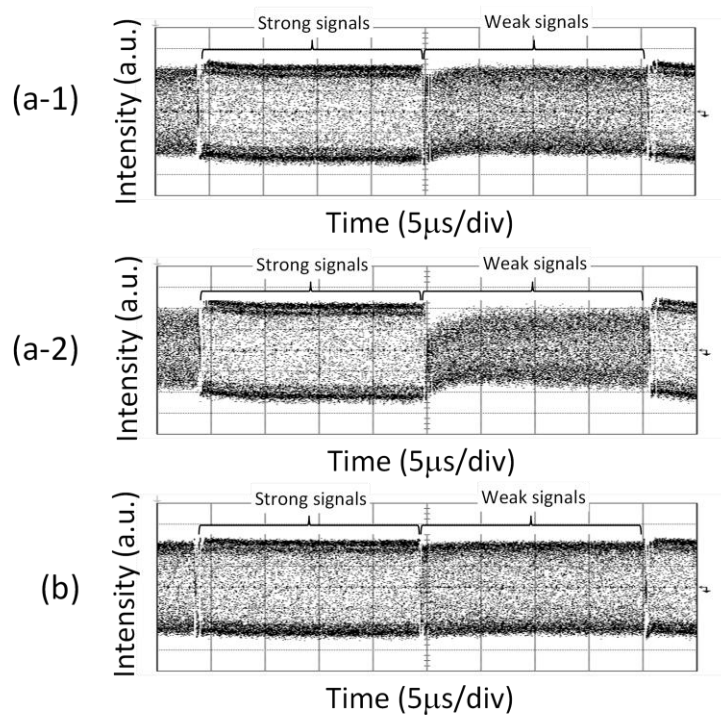


図 2-11 パースト受信器から出力される時間波形. (a-1)図 2-10 の Case(I)の場合. (a-2)図 2-10 の Case(II)の場合. (b)ALC-PDFA を用いた場合.

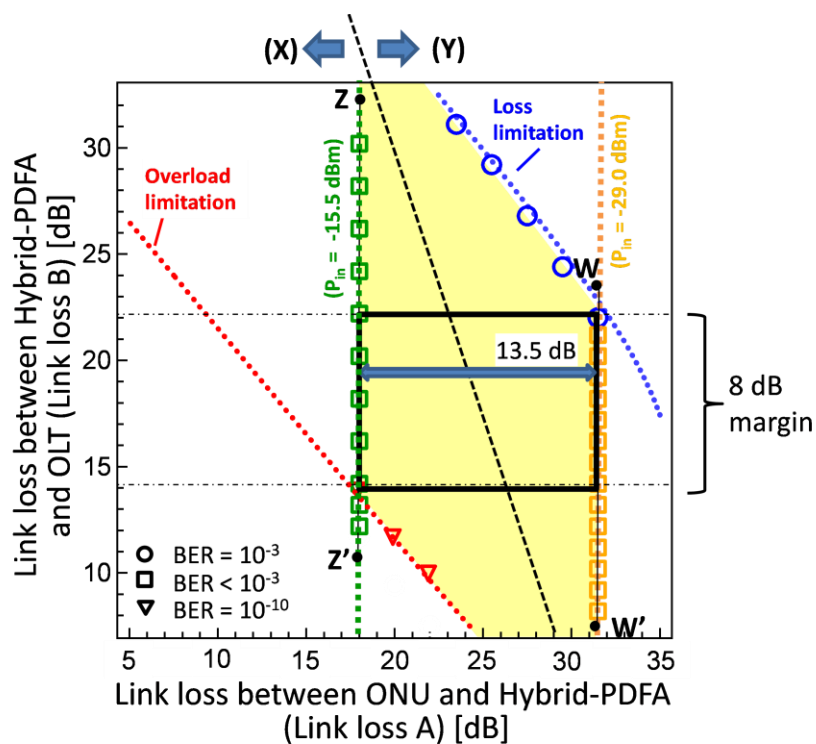


図 2-12 図 2-10 の Case(I)に相当するシステム動作範囲.

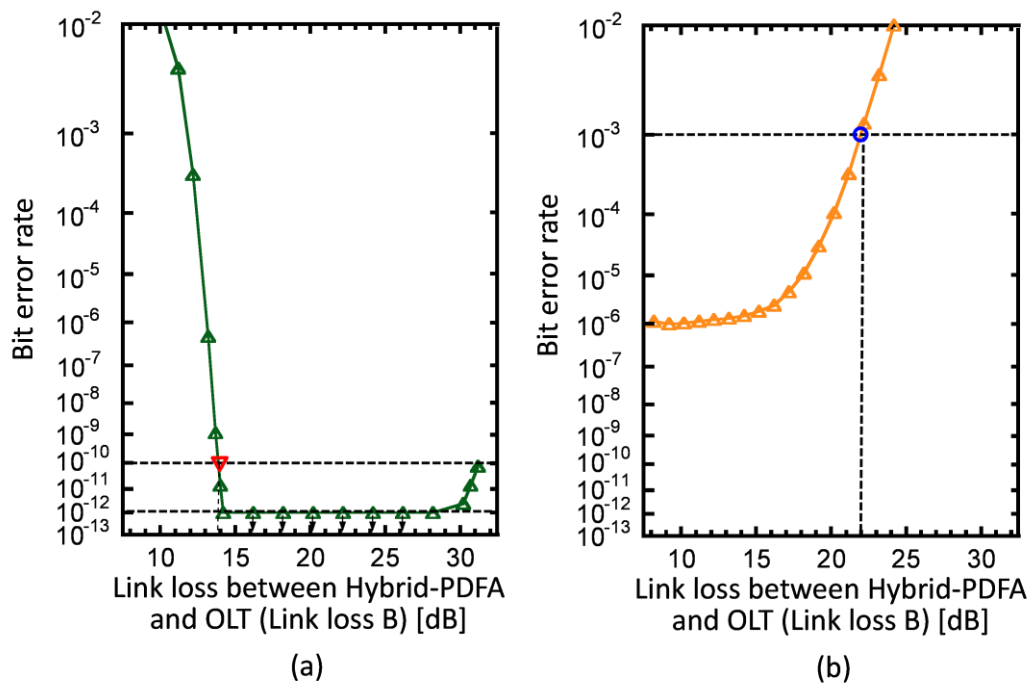


図 2-13 BER 測定結果. (a)図 2-12 の Z-Z' に沿う測定結果. (b)図 2-12 の W-W' に沿う測定結果.

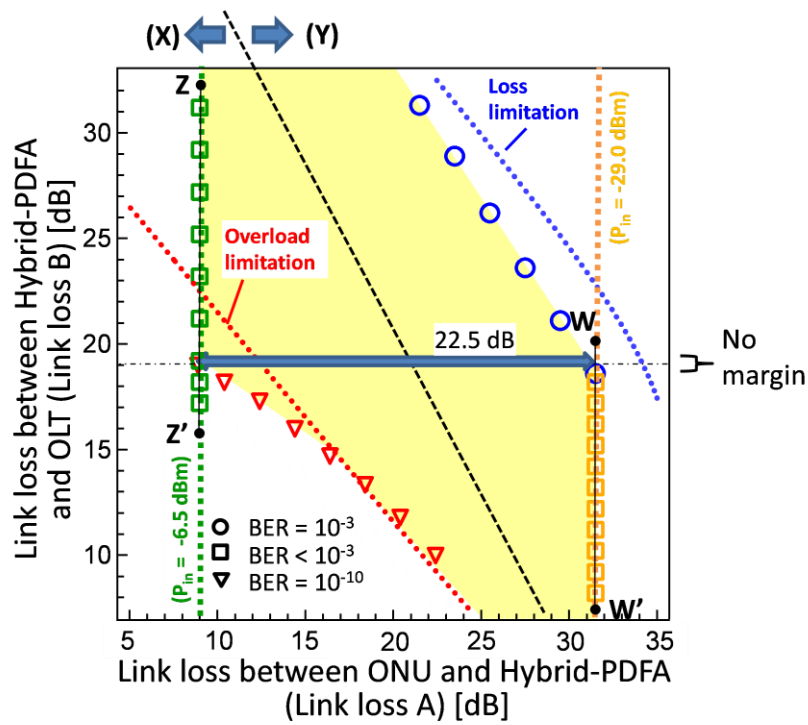


図 2-14 図 2-10 の Case(II)に相当するシステム動作範囲.

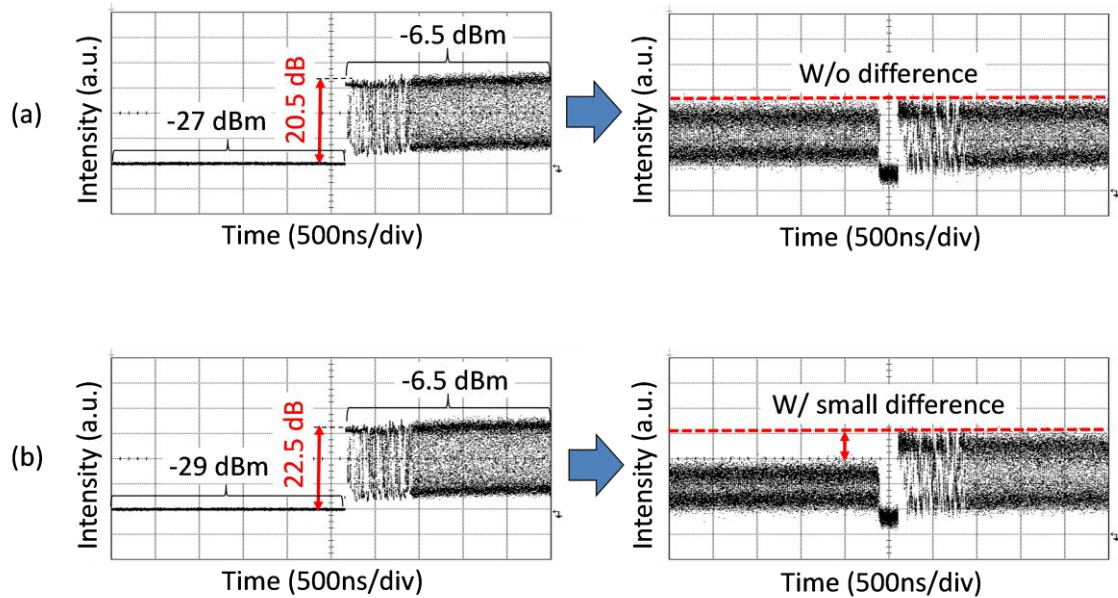


図 2-15 ALC-PDFA の入出力波形(後段 PDFA 使用せず). (a)弱信号光強度を-27.0dBm に設定した場合. (b)弱信号光強度を-29.0dBm に設定した場合.

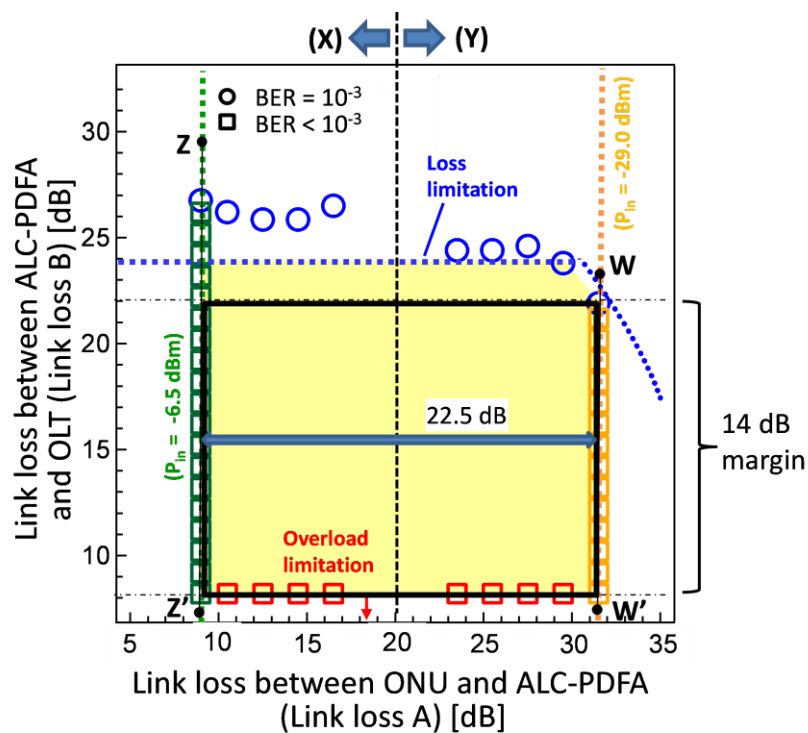


図 2-16 ALC-PDFA を用いた場合のシステム動作範囲.

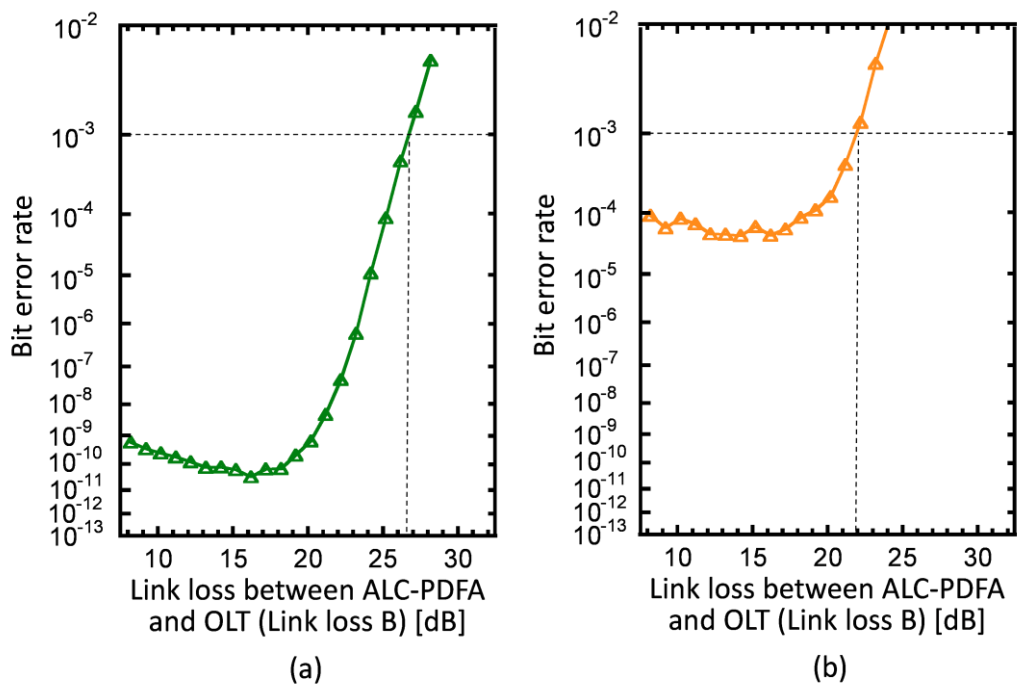


図 2-17 BER 測定結果. (a)図 2-16 の Z-Z' に沿う測定結果. (b)図 2-16 の W-W' に沿う測定結果.

2-4 100 km 伝送フィールドトライアル

2-4-1 100 km 伝送システム構成

前節に記載の通り、高速 ALC 機構を備えた提案構成によるバースト信号対応光増幅器を用いて、1 中継により伝送可能な距離は 60 km 程度である。従って、収容局から 100 km 圏に居住する加入者を収容するためには、図 2-1 (c) に示すように、複数中継する必要がある。本節では、2 中継により 100 km 伝送の実現を目指す。複数中継を行う場合、ONU と光増幅中継器 #1 の区間をアクセス区間、光増幅中継器 #1 と OLT の区間をトランク区間と規定する。なおここで、ONU から OLT に向かって、光増幅中継器の番号を、#1、#2 と定義する。アクセス区間は、通常 PON システムの伝送区間に一致し、長延化 PON システムの伝送距離が、通常 PON システムに対してトランク区間の分だけ延長されるのは、1 中継の場合と同様である。アクセス区間を伝送する上り信号をトランク区間に円滑に接続し、ONU のプラグアンドプレイ機構を担保するため、光増幅中継器 #1 の上り信号増幅に、高速 ALC 機構を備えた提案構成によるバースト信号対応光増幅器を用いる。ただし、IEEE802.3av の規定に準拠した 10G-EPON 装置を用いてフィールド実験を行うため、標準の上り波長 (1270 nm) の光信号を増幅する必要がある。そのため、光増幅媒体を PDFA よりも広帯域な増幅帯域を有し、1270 nm 帯の光信号を増幅可能な SOA に変更する。

図 2-18 に、光増幅中継器 #1 に用いるために製作した光増幅中継器の構成を示す。本光増幅中継器は、上りバースト信号を増幅するための高速 ALC 機構を備えた SOA (ALC-SOAs)、下り連続信号を増幅するための ALC 機構を備えた SOA (ALC-SOA)、および上り信号と下り信号を合分波するための 2 台の WDM フィルタから構成される。さらに、高速 ALC-SOAs は、2 台の SOA、粗密度 WDM (CWDM: Course WDM) フィルタ、および高速 ALC 回路から構成される。高速 ALC 回路は、高速の VOA、FF 制御回路、およびフィードバック (FB: Feedback) 制御回路から構成され、CWDM フィルタの後段に配置される。VOA の減衰量を FF 制御回路により高速に制御することにより、前段の SOA に入力される光信号の強度に依らず、後段の SOA に入力される光信号強度を一定に保つ。FB 制御回路は、サブ秒程度の遅い時定数により動作し、FF 制御回路の長期的な出力光レベルの変動を補償する。使用する ALC 回路の制御メカニズム、および応答速度は、前節の ALC-PDFA と同様である。本構成により、後段 SOA におけるパターン効果の発生を防ぎ、高出力化と広入力ダイナミックレンジ化を実現する。ただし、ALC-PDFA の前段に用いられる AGC-PDFA とは異なり、前段の SOA は制御機構を備えていないため、入力ダイナミックレンジは ALC-PDFA よりも若干劣ることが予想される。図 2-19 に、高速 ALC-SOAs の入出力波形の測定結果を示す。2 台の ONU から ALC-SOAs に

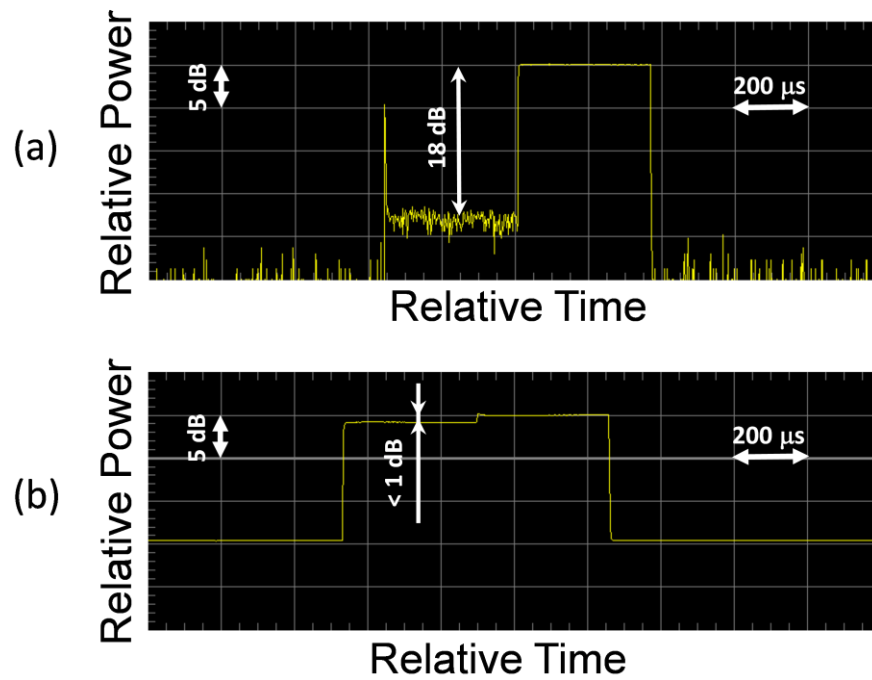


図 2-19 上り光増幅器(ALC-SOAs)の入出力波形. (a)入力波形. (b)出力波形.

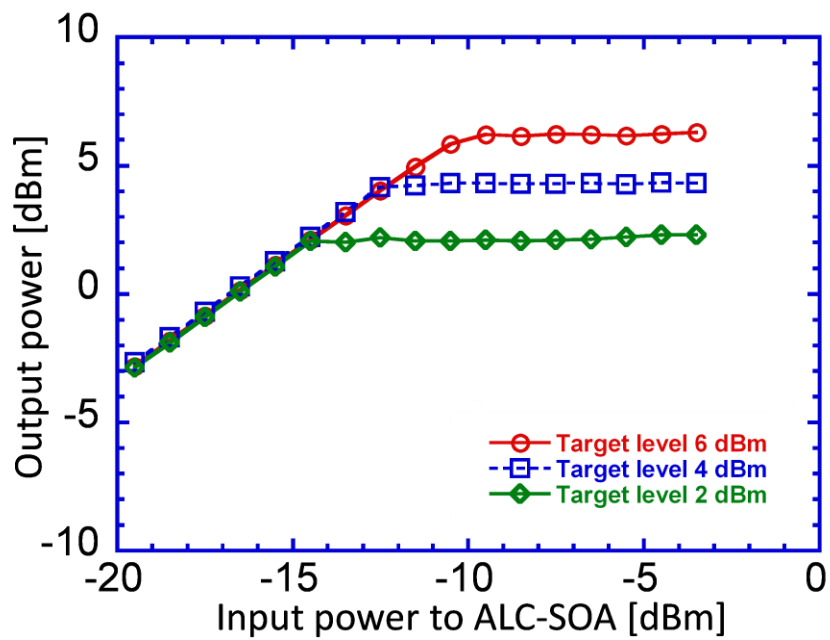


図 2-20 下り光増幅器(ALC-SOA)の入出力光強度の関係.

2-4-2 実験室における伝送特性評価

図 2-21 に、100 km TDM-PON システムの上り信号伝送における許容伝送線路損失を測定するための実験系を示す。伝送線路は、40 km 間隔、2 中継区間から成る 80 km のトランク区間、および 20 km のアクセス区間により構成され、フィールド実験の構成を模擬する。また本実験系は、SOA を用いた 2 台の光増幅中継器、および 10GE-PON 装置から構成される。光増幅中継器 #1 は、図 2-18 に示すものと同じである。一方、光増幅中継器 #2 は、上り信号を増幅するための単一の SOA (利得制御なし)、および下り信号を増幅するための ALC-SOA から構成される。TDM-PON では、各 ONU が送信した上り信号が時間的に重畳することを防ぐために、OLT から各 ONU に送信時間と送信容量を指示する動的帯域割り当て (DBA : Dynamic bandwidth allocation) 技術が用いられる。この送信時間と送信容量は、各 ONU から OLT に制御フレーム (Report) に格納して伝達される送信容量の要求値を元に計算される。Report は一定の DBA 周期で送信され、上記の計算は DBA 周期と比較して十分に短い時間で行われる。また DBA 周期は、各 ONU から OLT に Report が伝達され、さらに OLT から各 ONU に送信時間と送信容量が伝達されるのに要する時間、すなわち往復の伝播遅延以上の時間を割り当てる必要がある。ONU 内のバッファに到着したデータは直ちに送信されず、少なくとも 1 DBA 周期バッファリングされる。従って、DBA 周期を長く設定すると遅延時間が比例して大きくなるため、通常 0 ~ 20 km の範囲に位置する加入者を収容する場合を想定し、DBA 周期を短く設定する。これに対し、本 10G-EPON 装置では 100 km 伝送を実現するため、0 ~ 100 km の範囲に位置する加入者を収容できるよう DBA 周期を通常より長く設定する。具体的には、光ファイバ 10 km の往復の伝播遅延が 100 μ s であることから、100 km 伝送に対応すべく DBA 周期を 1500 μ s に設定する。また本装置は対称型の TDM-PON システムであり、上り信号、および下り信号のビットレートは共に 10.3125 Gb/s である。ここで、バースト信号フレームのプリアンブル長は 512 ns であり、2 台の ONU に対して、トラヒックアナライザにより生成した 64 byte の Ethernet フレームを、全ラインレートの 20 % 分負荷する。ここで 2 台の ONU は、それぞれ、強バースト信号 (ONU #1)、および弱バースト信号 (ONU #2) を生成するために使用される。ONU #1、および ONU #2 の出力光強度 / 消光比は、それぞれ、5.3 dBm / 6.6 dB、および 4.7 dBm / 7.2 dB である。また波長は、それぞれ、1271.9 nm、および 1271.8 nm である。図 2-22 に、上記のバースト信号フレームを用いて行った OLT の受信感度の測定結果を示す。測定に際し直接得られる結果は、フレームエラーレート (FER : Frame error rate) であるが、拡張された Ethernet フレーム長、すなわち、64 byte の Ethernet フレームに 4 byte の VLAN (Virtual local area network) タグを付加した計 68 byte のフレーム長により FER を除することにより BER を換算する。弱信号測定では、ダミー信号の光強度を -6.0

dBm に設定し、強信号測定では、ダミー信号の光強度を -28.0 dBm に設定した。弱信号の測定データによると、エラーフリーを達成する最小受信感度は -28.0 dBm であることが分かる。10G-EPON 装置には、IEEE802.3av で規定されるリードソロモン符号 RS(255,223) が FEC 技術として実装されており、FEC 適用後の BER = 10^{-12} をエラーフリーとして規定する。一方、強信号の測定データによると、 -6.0 dBm の光信号強度に対してエラーフリー動作を達成している。一方、非測定対象である下り信号は、3 台の WDM フィルタとスプリッタを用いて迂回され、測定対象である上り信号とは別の経路により接続される。アクセス区間の伝送線路損失は、VOA#1、および VOA#2 により調整され、トランク区間の伝送線路損失は、VOA#3、および VOA #4 により調整される。これら VOA の減衰量を変化させて FER 測定を行う。先述の方法により、得られた FER を BER に換算する。

図 2-23 に、高速 ALC-SOA に入力されるバースト信号フレームの光強度を変化させた際に得られた BER の測定結果を示す。トランク区間の区間損失は、 17 dB から 24 dB の間で変化させた。ここで、区間損失 17 dB は実験系において設定できる最小の値であり、 40 km のシングルモード光ファイバ (SMF : Single mode fiber) の損失値にほぼ一致する。ONU #1 から ALC-SOAs に入力されるバースト信号の光強度を -10.0 dBm に固定し、ONU #2 から ALC-SOAs に入力するバースト信号フレームの光強度のみを変化させて測定を行った。図示の通り、高速 ALC-SOAs に入力可能な光強度の下限值は -28.5 dBm であり、入力ダイナミックレンジとして 18.5 dB が達成されている。ONU #2 の出力光強度 4.7 dBm を考慮すると、上り信号伝送においてアクセス区間に許容される伝送線路損失は 33.2 dB となる。

図 2-24 に、 100 km TDM-PON システムの下り信号伝送における許容伝送線路損失を測定するための実験系を示す。先述の通り、光増幅中継器として 2 台の ALC-SOA を使用する。OLT の送信光強度の規定値が 2 dBm ~ 5 dBm であることから、ALC-SOA の出力光強度を 4 dBm に設定する。OLT から送信される下り光信号の出力光強度、消光比、および波長は、それぞれ、 2.5 dBm、 9.0 dB、および 1577.3 nm である。また、ONU の受信感度は -31.4 dBm である。この値は、上り信号と同様、FEC 技術として RS(255,239) を適用して得られた値である。一方、非測定対象である上り信号は、2 台の WDM フィルタを用いて迂回され、測定対象である下り信号とは別の経路により接続される。トランク区間の区間損失は、VOA #5、および VOA#6 により調整され、アクセス区間の損失は、VOA#7 により調整される。

10G-EPON の下り信号波長は 1.5 μ m 帯であるため、O 帯(1.3 μ m 帯)を使用する上り信号と異なり、SMF 上で 100 km の伝送を行うと波長分散の影響により信号波形が著しく劣化する。図 2-25 に、下り信号のアイパターンの測定結果を示す。図示の通り、伝送前の信号波形と比較して、 $60 \sim 100$ km 伝送後の信号波形が著しく劣化していることが分かる。このため、長延化 10G-EPON システムにおいて、下り

信号を受信する ONU の受信感度が IEEE802.3av の規定値を満たすためには、分散補償技術が必要となる。実際、ONU に電気段における分散補償 (EDC: Electronic dispersion compensation) 技術を適用する。10G-EPON 装置は、EDC の適用を前提とすることなく開発された装置であるため、外付けの EDC box を製作し、本 box を ONU #2 の前段に配置する。図 2-26 に、EDC box の構成を示す。図示の通り、ONU から送信された上り信号は、2 台の WDM フィルタを通過して直接アクセス区間に入射されるのに対し、OLT から送られた下り信号は、EDC box 内の APD-TIA により一旦電気信号に変換される。変換された電気信号は、16-tap FFE (Feed forward equalization)、および 8-state MLSD (Maximum likelihood sequence detection) により波形整形され、CDR (Clock data recovery) により識別再生される。識別再生された信号は、再度、E/O (Electrical to optical) 変換により光信号に重畳されて ONU に入力される。図 2-27 に、EDC box を用いて得られた受信感度の測定結果を示す。比較のため、EDC box を用いない場合の受信感度も併せて示す。図示の通り、EDC box を用いない場合、ONU の受信感度は光ファイバ長が増加するに伴い著しく劣化するのに対し、EDC box を用いた場合、ONU の受信感度は光ファイバ長に依存せずほぼ一定値を示す。100 km 伝送後の受信感度は -28.5 dBm を下回り、IEEE802.3av で規定される ONU の受信感度規定を満たす。

図 2-28 に、光増幅中継器 #1 において ALC-SOA から出力される下り信号の光強度、およびそれを受信した際の ONU の受信感度の測定結果を示す。図の横軸は、トランク区間の区間損失であり、その範囲は上り信号伝送の測定と同じである。下り信号波長 (1577 nm) における SMF の損失値は、上り信号波長における損失値よりも小さいが、上述の上り信号伝送特性の評価結果との比較による一貫した議論を行うために、区間損失は、上り信号波長 (1270 nm) における値を示している。また図には、ALC-SOA の出力光強度と ONU の受信感度との差により算出されるアクセス区間の損失値を示している。図示の通り、光増幅中継器 #1 における ALC-SOA の出力光強度は、測定を行ったすべてのトランク区間の区間損失に対して 2 dBm 以上であり、OLT における出力光強度の規定値を満たしている。実際、トランク区間の区間損失が 24 dB の場合の ALC-SOA の出力光強度は 2.7 dBm であり、出力光レベルの設定値である 4 dBm より 1.3 dB 低い値となっている。これは、1577 nm における実際のトランク区間の区間損失が約 16.5 dB であり、ALC-SOA への入力光強度 (-14 dBm) が、ALC 機能が正常に動作する範囲 (-12.5 dBm 以上) を下回るためである。一方、下り信号を増幅する SOA が放出する ASE 雑音が累積されるにも係らず、測定を行ったすべてのトランク区間の区間損失に対して、ONU の受信感度は -28 dBm 以下のほぼ一定値を示している。これは、ALC-SOA に入力される下り信号の光強度が、ALC-SOAs に入力される上り信号の光強度と比較して十分に大きいためである。結果として、下り信号伝送におけるアクセス区間の許容伝送線路損失

として 31.5 dB が得られている。この値は、上り信号伝送において得られた値と比較して 1.7 dB 少ない。これは、双方向伝送におけるアクセス区間の許容伝送線路損失が、下り信号伝送により決定されることを意味する。また、トランク区間における区間損失 24 dB (2 区間)、およびアクセス区間の許容伝送線路損失 31.5 dB を考慮すると、システム全体で計 79.5 dB の伝送線路損失が許容される。

さらに、100 km 伝送フィールド実験の実現に向けて、図 2-29 の実験系により双方向伝送を行った。ONU #1、および ONU #2 から光増幅中継器 #1 の ALC-SOAs に入力されるバースト信号フレームの強度を、それぞれ、-10.0 dBm、および -27.0 dBm に設定し、トランク区間の区間損失を 17 dB から 24 dB まで変化させた。これら実験条件による FER 測定により、双方向伝送においてもエラーフリー動作が達成可能であることを確認した。図 2-30 に、トランク区間の区間損失が 24 dB の場合における OLT、および ONU #2 間のレベルダイヤグラムをまとめる。

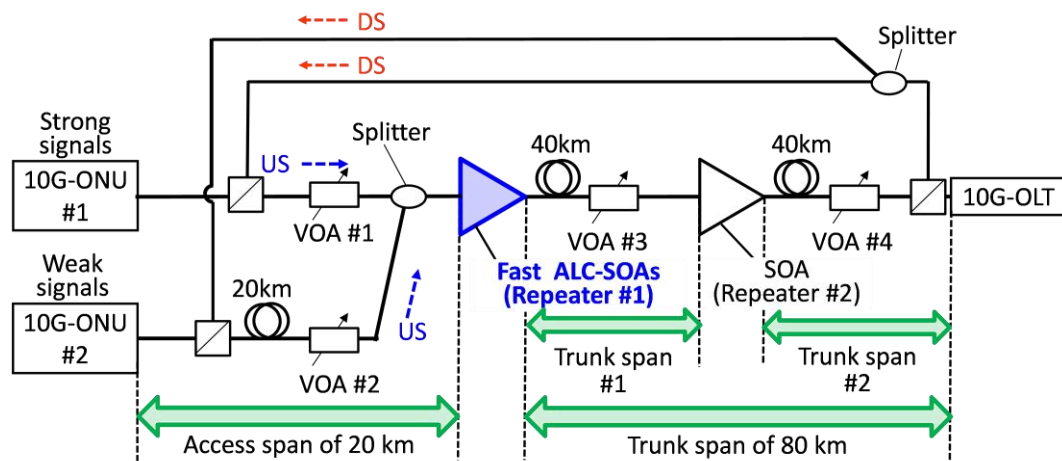


図 2-21 上り伝送特性評価実験系.

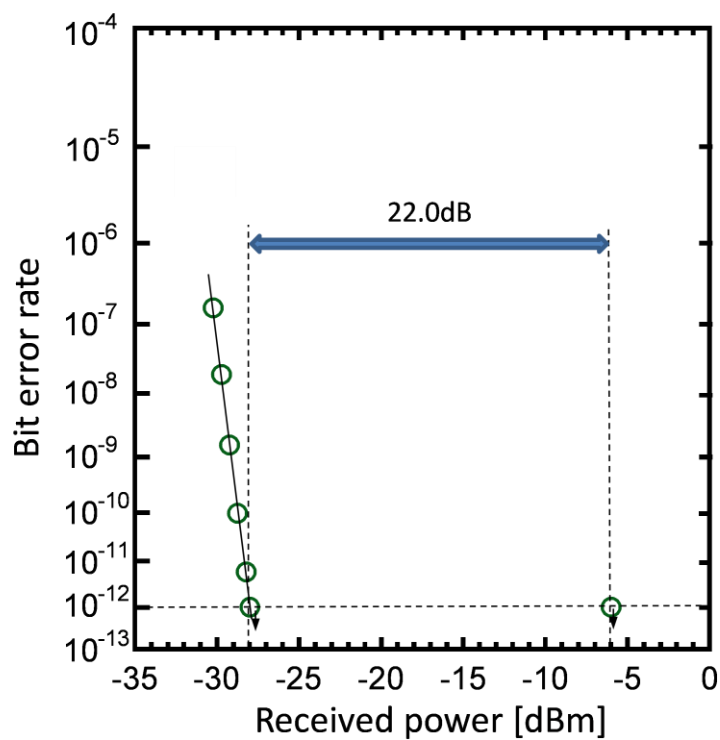


図 2-22 OLT の上り信号受信特性.

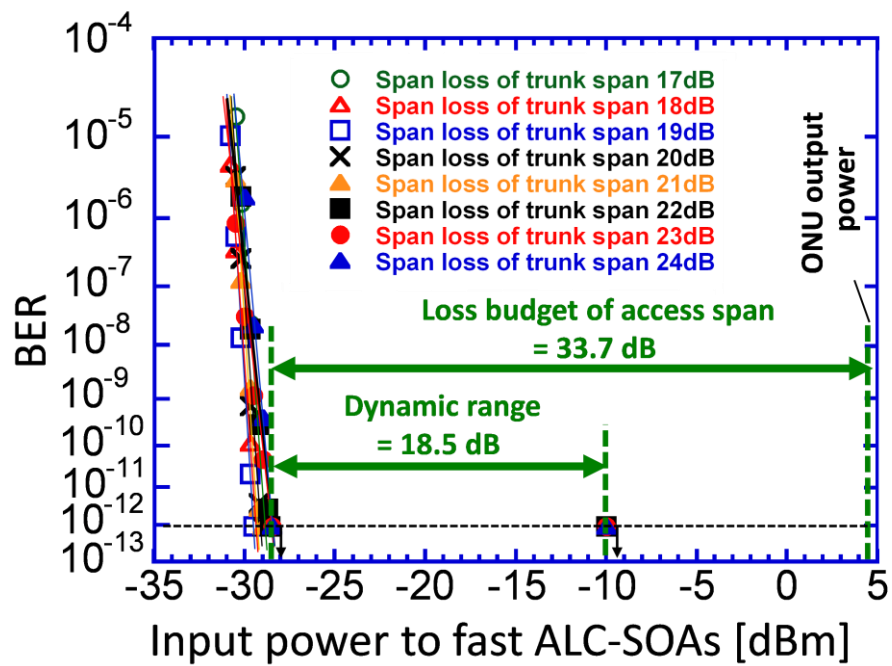


図 2-23 上り信号伝送特性.

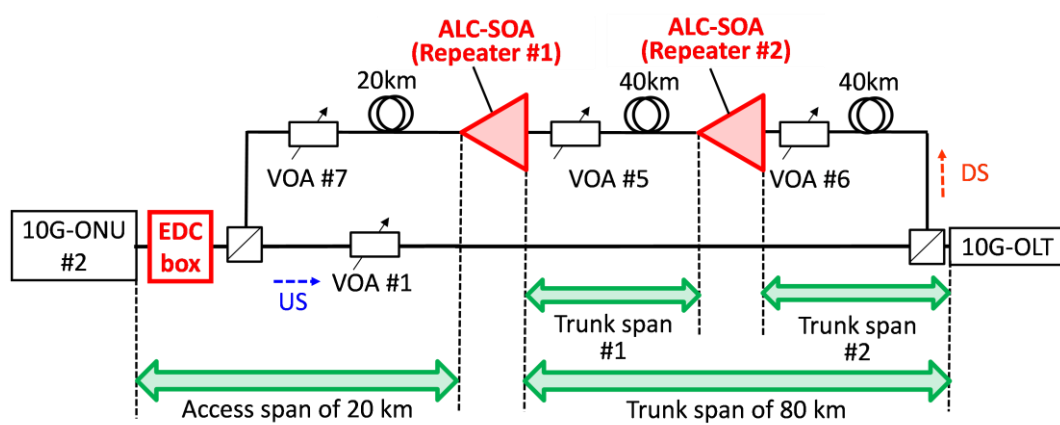


図 2-24 下り伝送特性評価実験系.

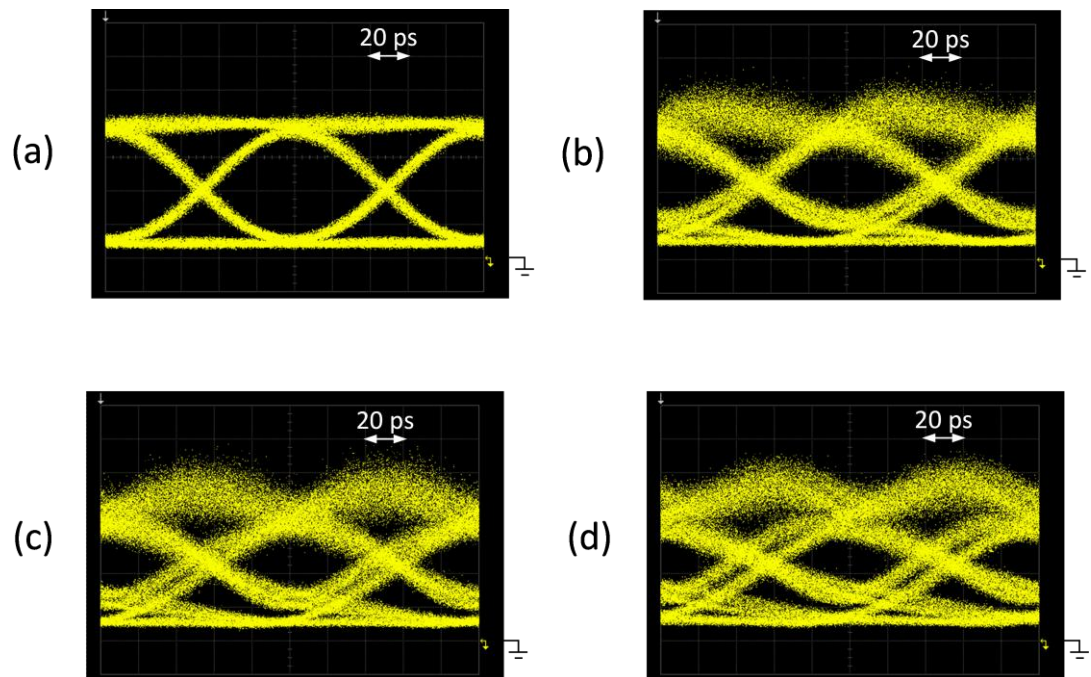


図 2-25 下り信号のアイパターン. (a) SMF 伝送前. (b) SMF60km 伝送後. (c) SMF80km 伝送後. (d) SMF100km 伝送後.

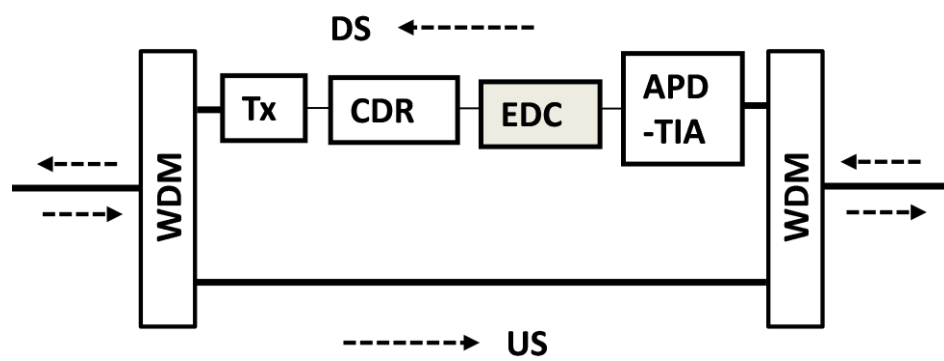


図 2-26 EDC box の構成.

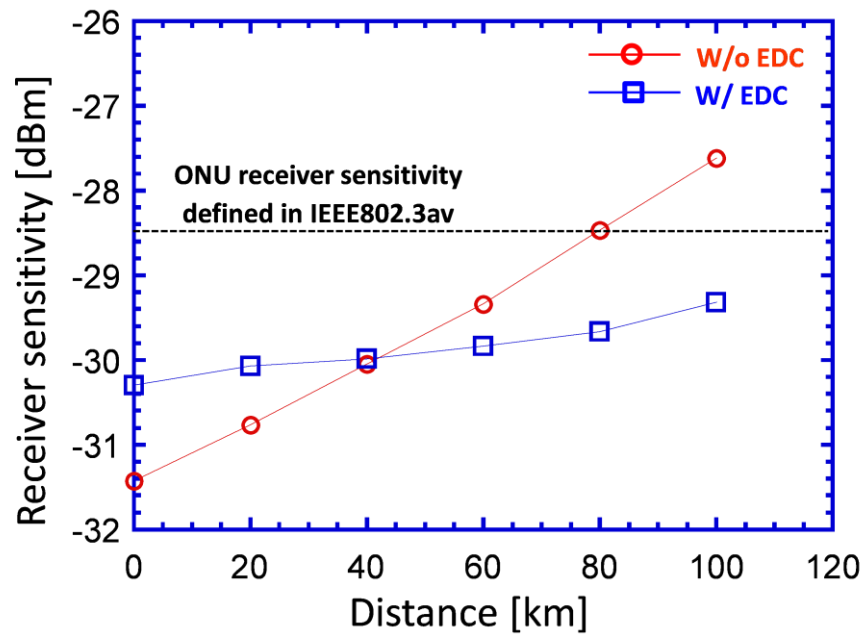


図 2-27 EDC box 有り無しの場合における ONU の受信感度.

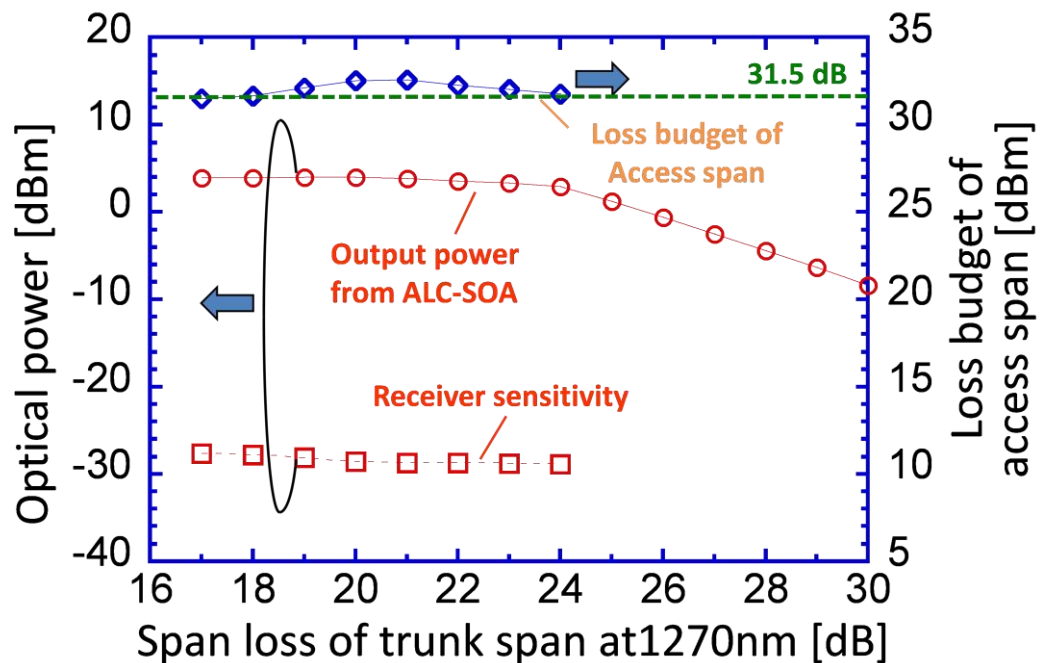


図 2-28 光増幅中継器 #1 における ALC-SOA の出力光強度, および ONU 受信感度. アクセス区間における許容伝送線路損失は, 前記強度の差により算出.

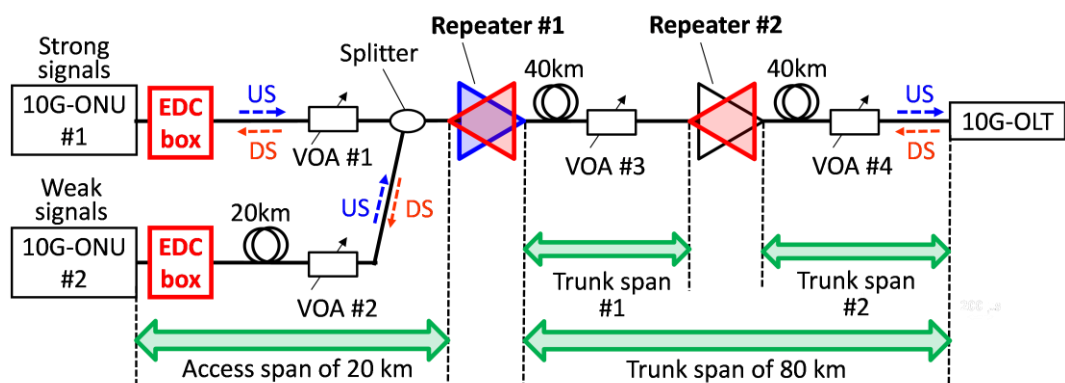


図 2-29 100km 双方向伝送実験系.

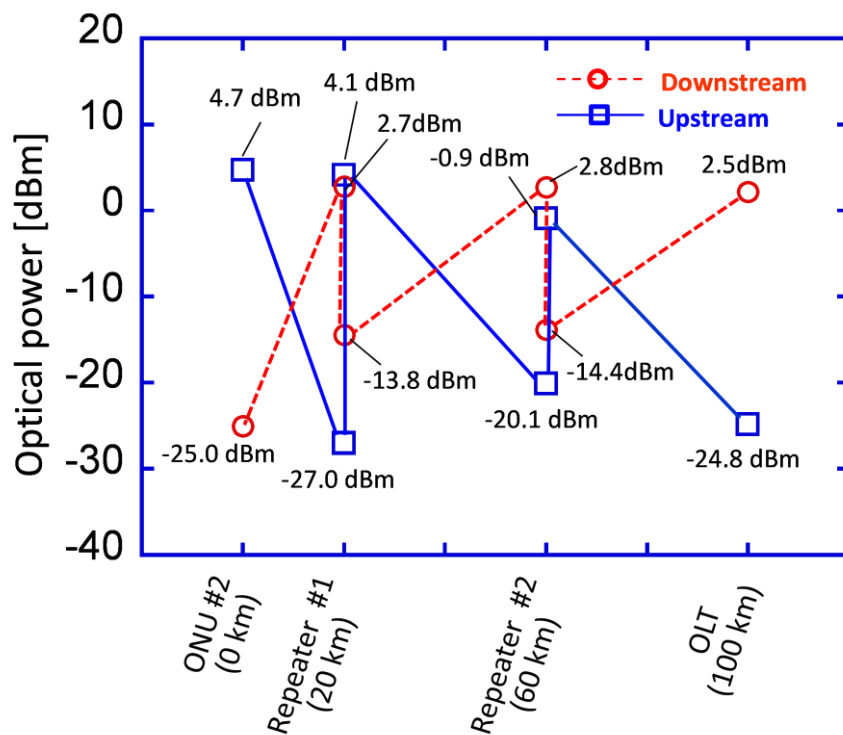


図 2-30 トランク区間の区間損失を 24dB に設定した場合における 100km 双方向伝送実験系のレベルダイアグラム.

2-4-3 フィールド映像伝送デモンストレーション

100 km 伝送フィールドトライアルを北海道で行った。フィールドの具体的な位置を図 2-31 に示す。北海道は国内において 2 番目に大きい島であり、日本の国土面積の約 20 % を占める。他に 46 ある都府県と比較して人口密度が低いことから、大部分のエリアにおいて光アクセスサービスの提供が重要な課題の一つとなっている。図 2-31 に、行ったフィールド実験の構成を示す。図示の通り、札幌 (A)、恵庭 (B)、千歳 (C)、豊平 (D) の各ビルを接続する既設光ファイバを使用する。100 km の伝送線路は、90 km の既設光ファイバ、および札幌ビルに配置する 10 km の SMF ボビンにより構成される。収容局外に 8 分岐のスプリッタを配置したパッシブダブルスター (PDS: Passive double star) 型の TDM-PON システムが、札幌ビルに始まる折り返し光ファイバループにより構成される。10G-EPON の OLT、および 2 台の ONU、光増幅中継器 #1、2 台の EDC box、およびハイビジョンテレビ (HDTV: High definition television) 装置が札幌ビルに集約され、光増幅中継器 #2 のみが千歳ビルに配置される。HDTV カメラにより撮影されたリアルタイムの映像が HDTV のエンコーダ/デコーダに送られ、非圧縮の状態で IP (Internet protocol) 信号に変換され、2 つの GbE ポートから出力される。10G-EPON 装置は、10GbE に対応した入出力インターフェースを有するため、レイヤ 2 スイッチを用いて、2 つの GbE ポートを 1 つの 10GbE ポートに変換する。エンコードされた信号は約 1.7 Gb/s の帯域を有し、OLT と ONU 間を双方向に伝送され、HDTV のエンコーダ/デコーダによりデコードされた後、HDTV モニタのスクリーン上に映し出される。光増幅中継器 #1 に入力されるバースト信号フレームの光強度を、VOA により -27.0 dBm に設定した。局外スプリッタとして 8 分岐スプリッタを用いているが、この入力光強度の設定は、32 分岐システムにおけるアクセス区間の伝送線路損失を模擬する。本構成を用いた FER 測定により、エラーフリー動作が達成されることを確認した。映像信号サービスを提供する上では、遅延時間が重要な要素となる。図 2-33 に、遅延時間の測定結果を示す。図示の通り、下り信号に対して 500 μ s、上り信号に対して 2800 μ s の遅延時間を得た。下りの遅延量は 100 km の伝播遅延とほぼ同じ値である。一方、上りの遅延時間は DBA 周期の設定値 (1500 μ s) を考慮すると妥当な値が得られている。また、これら遅延時間の値は、Ethernet フレーム長に依存しない。図 2-34 に、映像伝送デモンストレーションの様子を示す。図示の通り、双方向のリアルタイム HDTV 映像伝送を 8 時間に渡り安定的に行うことに成功した。

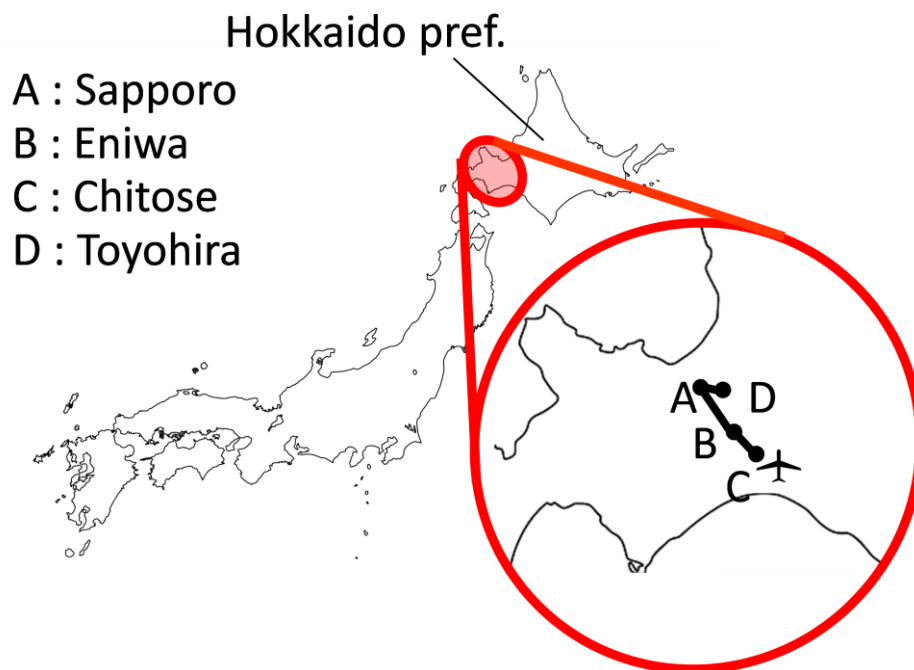


図 2-31 フィールド位置.

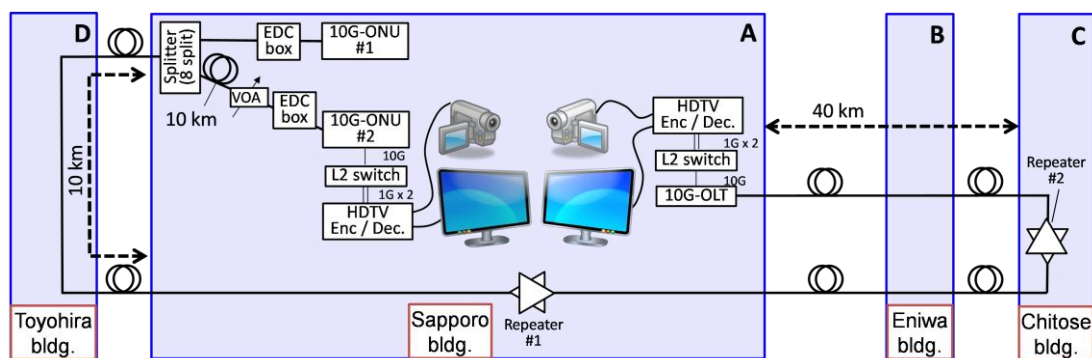


図 2-32 100km フィールド伝送実験構成.

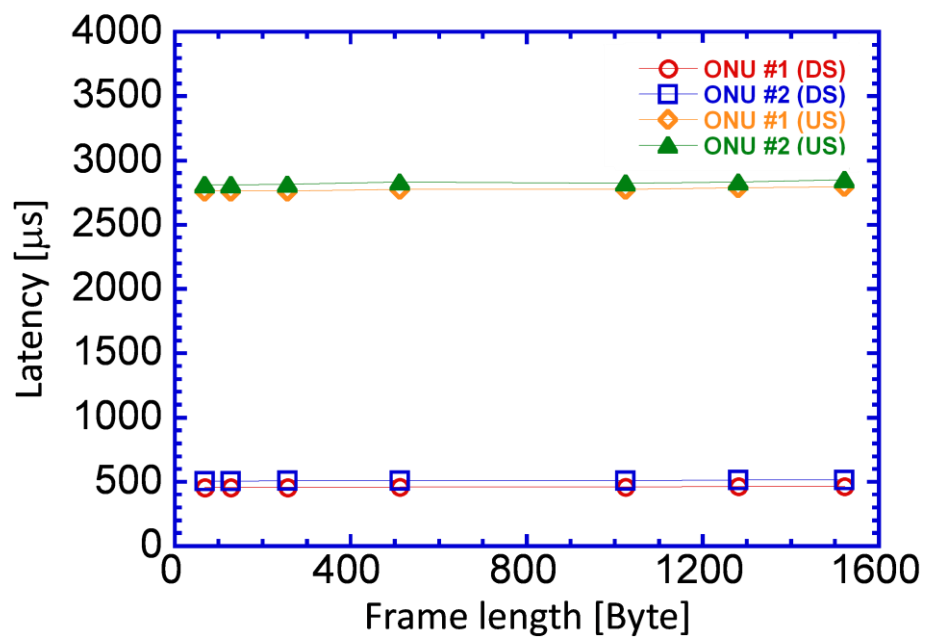


図 2-33 遅延時間の Ethernet フレーム長依存性.

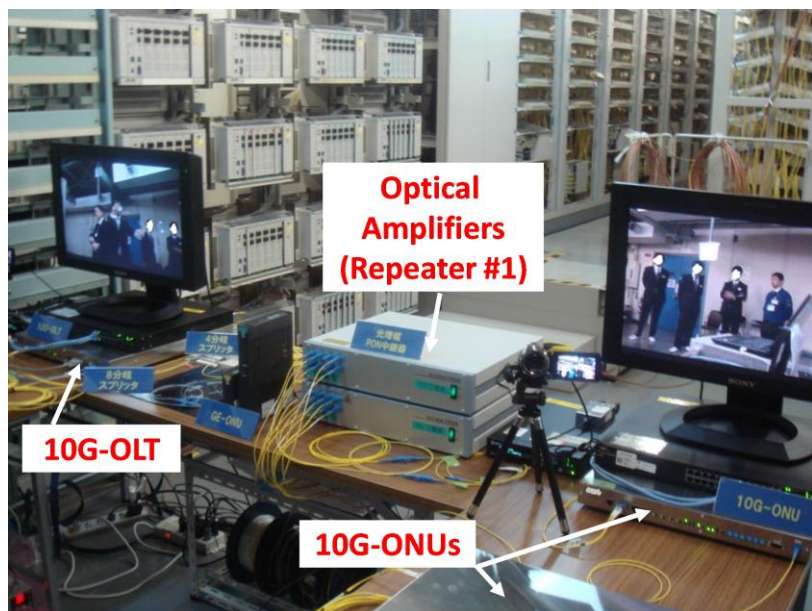


図 2-34 映像伝送デモンストレーション風景.

2-5 まとめ

10 Gb/s 級の長延化 TDM-PON システムで使用する上り光増幅器の高出力化、および広入力ダイナミックレンジ化を実現するために、高速 ALC 機構を備えたバースト信号対応光増幅器を提案した。光増幅媒体として 1.3 μm 帯に増幅帯域を有する PDFA を用いた。また、20 dB 以上の高利得を得るため、それらをカスケード接続する構成とした。前段の PDFA は AGC 機構を備え、入力バースト信号の光強度に依らず利得を一定値に保つことで、強信号入力時の光サージの発生を抑える。一方、後段の PDFA は、利得の制御を行わず前方励起により入力信号を増幅する。カスケード接続した PDFA の間に高速 ALC 回路を配置し、FF 制御によりその出力光レベルを一定値に保つ。これにより、前段の AGC-PDFA に入力されるバースト信号の光強度に依らず、後段の PDFA に入力される光信号強度を利得の飽和領域以下に保持し、後段の PDFA における光サージの発生を抑える。同時に、後段の PDFA の出力光強度が一定値に保たれることから、光増幅器と OLT の距離に依らず B-Rx の過負荷を防ぐ。これらの効果により、光増幅器の広入力ダイナミックレンジ化が実現され、長延化 TDM-PON システムは強信号入力時においても良好に動作し、ONU のプラグアンドプレイ機能が担保される。仮に、ALC 機構を具備しない光増幅器をシステムに配置する場合を考えると、ONU を接続する度ごとに ONU と光増幅器の間の伝送線路損失を測定し、それに合わせて ONU の入出力に光減衰器を取り付ける必要があり、システム運用が煩雑になる。それに対し、提案構成の ALC-PDFA を配置すれば、単に ONU を接続するだけで通信を開始することができ、システムの運用性が格段に向上する。提案構成によるバースト信号対応光増幅器を製作し、その性能を評価した。結果、-28.0 dBm ~ -6.5 dBm の範囲の光強度を有するバースト信号入力に対して、約 -5 dBm に保たれた一定の高出力を得ることに成功した。最小の入力光強度 -28.0 dBm に対する最大利得は、約 23 dB である。また、製作したバースト信号対応光増幅器の高出力、および広入力ダイナミックレンジ特性により達成される効果を確認するため、10 Gb/s 級のバースト信号を用いて BER 測定を行った。結果、ALC-PDFA に入力される光信号の強度範囲 22.5 dB (-29.0 dBm ~ -6.5 dBm) に対して、トランク区間の最大許容伝送線路損失、約 22 dB が得られた。本入力ダイナミックレンジ (22.5 dB) は、10G-EPON に規定される B-Rx の入力ダイナミックレンジ (22.0 dB) を上回る。従って、本 ALC-PDFA を用いて、32 分岐、20 km 相当のアクセス区間をトランク区間に円滑に接続し、ONU のプラグアンドプレイ機能を担保することができる。また、許容損失値は、O 帯における光ファイバの損失を 0.5 dB/km とした場合、44 km の伝送距離に相当する。結果、20 km のアクセス区間を含めると、32 分岐システムの伝送距離を 60 km 超にまで長延化し得ることになる。また、トランク区間の最小許容伝送線路損失 (約 8 dB) は、16 km の伝送距離に相当する。従って、本光増幅器を用いた長延化システムは、収容局から 40 ~

60 km のエリアに居住する加入者を収容し得る。

さらに、提案構成によるバースト信号対応光増幅器を用いて 100 km 伝送フィールドトライアルを行った。提案構成による上り光増幅器を用いて、1 中継により伝送可能な距離は 60 km 程度である。従って、40 km 間隔、2 中継のトランク区間、および 20 km のアクセス区間から成るシステム構成とした。ONU、および OLT として、標準仕様に準拠した 10G-EPON 装置を用いるため、標準の上り波長 (1270 nm) を増幅する必要がある。そのため、光増幅媒体を PDFA から SOA に変更し、新たに光増幅中継器を製作した。装置を用いた通信を成し得るには、下り信号伝送も不可欠であるため、SOA により構成される下り光増幅器を光増幅中継器に併せて組み込んだ。また、下り信号伝送では、SMF の波長分散の影響による信号波形劣化が顕著となることから、下り信号を受信する ONU に EDC 技術を適用した。以上の装置、およびシステム構成による 100 km フィールド実験を行い、双方向のリアルタイム HDTV 映像伝送を 8 時間に渡り安定的に行うことに成功した。

2-6 参考文献

- [1] H. Shinohara, "FTTH experiences in Japan", OSA J. Opt. Netw., Vo. 6, No. 6, pp. 616-623, 2007.
- [2] J. Finn, "PON technology in the Verizon network", GLOBECOM'2008, 2008.
- [3] K.-I. Suzuki, Y. Fukada, D. Nasset, and R. Davey, "Amplified gigabit PON systems", OSA J. Opt. Netw., Vol. 6, No. 5, pp. 422-433, 2007.
- [4] Y. Fukada, K.-I. Suauki, H. Nakamura, N. Yoshimoto, and M. Tsubokawa, "First demonstration of fast automatic-gain-control (AGC) PDFA for amplifying burst-mode PON upstream signal", ECOC'2008, We.2.F.4, 2008.
- [5] K.-I. Suauki, M. Fujiwara, T. Imai, N. Yoshimoto, and H. Hadama, "128 x 8 split and 60 km long-reach PON transmission using 27 dB-gain hybrid burst-mode optical fiber amplifier and commercial giga-bit PON system," OFC/NFOEC'2010, NWB3, 2010.
- [6] N. Suzuki and J. Nakagawa, "First demonstration of full burst optical amplified GE-PON uplink with extended system budget of up to 128 ONU splits and 58km reach," ECOC'2005, Tu1.3.3, 2005.
- [7] F. Saliou, P. Chanclou, F. Laurent, N. Genay, J. Lazaro, F. Bonada, and J. Prat, "Reach extension strategies for passive optical networks," IEEE/OSA J. Opt. Comm. Netw., Vol. 1, No. 4, pp. C51-C60, 2009.
- [8] R. Davey, D. Grossman, M. Rasztovits-Wiech, D. Payne, D. Nasset, A. Kelly, A. Rafel, S. Appathurai, and S. Yang, "Long-reach passive optical networks," IEEE/OSA J. Lightw. Technol., Vol. 27, No. 3, pp. 273-291, 2009.
- [9] K. Lee, J. Riding, A. Tran, and R. Tucker, "Extended-reach gigabit passive optical network for rural areas using distributed Raman amplifiers," OFC/NFOEC'2009, NME3, 2009.
- [10] D. Nasset and P. Wright, "Raman Extended GPON using 1240 nm semiconductor quantum-dot lasers," OFC/NFOEC'2010, OThW6, 2010.
- [11] S. Jain, F. Effenberger, A. Szabo, Z. Feng, A. Forcucci, W. Guo, Y. Luo, R. Mapes, Y. Zhang, and V. O'Byrne, "World's first XG-PON field trial," IEEE/OSA J. Lightw. Technol., Vol. 29, No. 4, pp. 524-528, 2011.
- [12] J. Nakagawa, M. Noda, N. Suzuki, S. Yoshima, K. Nakura, and M. Nogami, "First demonstration of 10G-EPON and GE-PON co-existing system employing dual-rate burst-mode 3R receiver," OFC/NFOEC'2010, PDPD10, 2010.
- [13] D. Veen, D. Suvakovic, M. Lau, H. Krimmel, A. Wijngaarden, J. Galaro, J. Dungee, B. Farah, S. Corteselli, B. Weeber, R. Tebbe, D. Eckard, J. Smith, J.

- Bouchard, J. Kotch, and P. Vetter, "Demonstration of a symmetrical 10/10 Gbit/s XG-PON2 system," OFC/NFOEC'2011, NTuD2, 2011.
- [14] Z. Belfqih, P. Chancelou, F. Saliou, N. Genay, and B. Landousies, "Enhanced optical budget system performance of an burst extended PON at 10.7 Gbit/s over 60 km of Fibre," ECOC'2008, Th.2.F.4, 2008.
- [15] K.-I. Suzuki, Y. Fukada, N. Yoshimoto, K. Kumozaki, and M. Tsubokawa, "Automatic level controlled burst-mode optical fiber amplifier for 10 Gbit/s PON application," OFC/NFOEC'2009, OTuH1, 2009.
- [16] J. Olmos, D. Mashimo, H. Ikeda, and K. Sakamoto, "Expanded power budget of a 10G-EPON prototype for highly scalable access networks," OECC'2010, Japan, 8A4-5, 2010.
- [17] M. Fujiwara, K.-I. Suzuki, K. Hara, T. Imai, K. Taguchi, H. Ishii, N. Yoshimoto, and H. Hadama, "Burst-mode compound optical amplifier with automatic level control circuit that offers enhanced setting flexibility in a 10 Gb/s-class PON," ECOC'2010, PD3.2, 2010.
- [18] N. Cheng, Z. Liao, S. Liu, and F. Effenberger, "Gain-clamped semiconductor optical amplifiers for reach extension of coexisted GPON and XG-PON," OFC/NFOEC'2011, NTuD7, 2011.
- [19] K.-I. Suzuki, M. Fujiwara, K. Taguchi, T. Imai, H. Ishii, N. Yoshimoto, and H. Hadama, "128 x 8 and 80 km long-reach dual-rate 10G-EPON transmission using ALC hybrid burst-mode optical fiber amplifier and SOA pre-amplifier," ECOC'2011, Mo.1.C.3, 2011.
- [20] M. Fujiwara, K.-I. Suzuki, T. Imai, K. Taguchi, H. Ishii, and N. Yoshimoto, "ALC burst-mode optical fiber amplifiers for 10 Gb/s-class long-reach PONs," IEEE/OSA J. Opt. Comm. Netw., Vol. 4, No. 8, pp. 614-621, 2012.
- [21] M. Fujiwara, K.-I. Suzuki, K. Taguchi, T. Imai, H. Ishii, and N. Yoshimoto, "1G / 10G coexistence long-reach PON system using ALC burst-mode SOAs," IEICE Electron. Expr., Vol. 9, No. 5, pp. 371-377, 2012.
- [22] M. Fujiwara, T. Imai, K. Taguchi, K.-I. Suzuki, H. Ishii, and N. Yoshimoto, "Field trial of 79.5-dB loss budget, 100-km reach 10G-EPON system using ALC burst-mode SOAs and EDC," OFC/NFOEC'2012, PDP5D.8, 2012.
- [23] M. Fujiwara, T. Imai, K. Taguchi, K.-I. Suzuki, H. Ishii, and N. Yoshimoto, "Field trial of 100-km reach symmetric-rate 10G-EPON system using automatic level controlled burst-mode SOAs," IEEE/OSA J. Lightw. Technol., Vol. 31, No. 4, pp. 634-640, 2013.

第3章 TDM-PONにおける光増幅器を用いた加入者の高効率収容

3-1 はじめに

通信会社が、FTTH (Fiber to the home) による光ブロードバンドサービスを経済的に提供するためには、収容局に配置される単一の伝送装置 (OLT : Optical line terminal) により、加入者宅に配置される複数の伝送装置 (ONU : Optical network unit) を収容することが効果的である。現在、これを実現する最も有力な光アクセス方式が、時分割多重 (TDM : Time division multiplexing) 技術を用いた TDM-PON (Passive optical network) であり、Gb/s 級の光アクセスサービスを提供可能な GE (Gigabit Ethernet)-PON、および G (Gigabit capable)-PON が広く用いられている。これらシステムが導入された後、暫くは、需要の多い都市部への展開が主であるため、順調に加入者数を伸ばすことが期待できる。しかしながら、従来のメタルケーブルを用いた加入電話と同様のユニバーサルサービスの実現を目指すには、人口密度が低く加入者が点在する都市部郊外や農村部 (ルーラルエリア) へのサービス展開を避けることができない。TDM-PON システムのサービス提供エリアは、OLT、および ONU に搭載される光トランシーバの信号伝送距離の限界により 20 km 以下に制限されるため、この要請に応えるためには、技術的なブレークスルーが求められる。これを実現するため、TDM-PON システムに光増幅器を適用することにより、システムが収容可能な加入者数 (分岐数) を維持した上で伝送距離を長延化し、効率的にサービスエリアを拡張する手法が検討されている [1-6]。しかしながら、光増幅器は電源供給を必要とするアクティブ装置であるため、設置位置は電源供給が可能な場所に限られるというデメリットがある。また、検討されているシステム構成は、収容局から遠距離に位置するが、ある程度固まって居住する加入者、すなわち、ルーラルエリアの集落に居住する加入者を収容することを想定しており、その中間に位置する加入者、例えば、都市部郊外に居住する加入者を効率的に収容することに着目した検討はなされていない。

一方、次世代システムとして期待されているのが、10 Gb/s 級の光サービスを提供可能な 10G-EPON、および XG-PON である。しかしながら、これらのシステムは、現行システムよりもさらに高速の電気回路を用いて伝送装置を構成することから、部品価格の上昇による装置コストの増加、および消費電力の上昇による運用コストの増加が避けられず、結果的にその増加分をサービス価格に転嫁する必要に迫られることが予想される。従って、次世代 TDM-PON システムの装置、および運用コストを削減するため、需要の多い都市部では、次世代システムの高速性を活用して、システムの多分岐化により、単一 OLT により可能な限り多くの加入者を収容することが期待されている。

本章では、次世代システムが導入される時期を想定し、電源供給の容易な収容局に

光増幅器を設置することにより、加入者を効率的に收容するシステム構成を提案する。提案システムでは、局外と局内に配置したスプリッタでシステムの分岐数を按分する多段スプリッタ型の **TDM-PON** システム構成を想定し、局内スプリッタ直下に光増幅器を設置する構成を用いる。具体的な提案システムは、

- 単一 **OLT** により局内スプリッタの一分岐に光増幅器を設置して遠距離に位置する加入者を收容する一方、他の分岐には光増幅器を設置することなく近距離に位置する加入者を收容する遠近混在システム
- 局内スプリッタの全分岐に光増幅器を設置することで多分岐スプリッタの損失を補償し、単一 **OLT** により多数の近距離に位置する加入者を收容する多分岐システムである。第二章で提案した高速自動レベル制御 (**ALC : Automatic level control**) 機構を備えたバースト信号対応光増幅器の広入力ダイナミックレンジ特性、および自然放出光 (**Amplified spontaneous emission**) 雑音抑圧特性が、提案システム実現に有用であることを計算、および実験により示す。また、提案システム構成による加入者收容範囲を実験により明らかにする。

3-2 加入者を効率的に収容する TDM-PON システム構成

図 3-1 (a) に、収容局から 20 km 以下の距離に位置する加入者を収容する通常の TDM-PON システムの構成を示す。本システムは、ポイント・ツー・マルチポイント (P2MP : Point-to-multipoint) 型のトポロジを有し、OLT と複数の ONU が局外、および局内に配置されるスプリッタを介して接続される。TDM-PON システムの構成を表す際には、局外に配置されるスプリッタのみが描かれることが多いが、ここでは局内にもスプリッタを配置し、システムの分岐数を二つのスプリッタで按分する [7]。本システム構成によれば、OLT、および OLT と局外スプリッタを接続する幹線光ファイバが、複数の加入者で共有されるため、高速の光アクセスサービスを経済的に提供することができる。さらに、多段スプリッタ構成の採用により、広範囲に点在する加入者を単一の OLT により収容可能となることから、システム導入時の初期投資を抑える効果をもたらす。ここでは、局外 8 分岐 (第一のスプリッタ)、および局内 4 分岐 (第二のスプリッタ) を用いた 32 分岐の TDM-PON システムを基準として、以下の議論を行う。

図 3-1 (b)、および 図 3-1 (c) は、図 3-1 (a) に示す通常システムよりも、さらに効率的に加入者を収容することを目指した TDM-PON システムの構成を示す。図 3-1 (b) は、収容局から 20 km 以下の距離に位置する加入者、および 20 km 以上の距離に位置する加入者を、単一の OLT により同時収容する TDM-PON システムの構成である [8-10]。20 km 以上の距離に位置する加入者を収容するために、双方向光増幅器が、局内に配置される第二のスプリッタの一分岐に設置される。ここでシステムの分岐数は、通常システムと同じ 32 分岐である。一方、図 3-1 (c) は、収容局から 20 km 以下の距離に位置する 32 以上の加入者を、単一の OLT により収容するためのシステムの構成である。より多数の加入者を収容するために、収容局に配置される第二のスプリッタの各分岐に、第三のスプリッタを配置し、その第三のスプリッタの損失を補償するために、双方向光増幅器が、第二、および第三のスプリッタ間に設置される。両提案構成では、光増幅器への電源供給の容易さ、作業員の移動負担の軽減、光増幅器の監視のし易さ等、システムの保守運用性を考慮し、双方向光増幅器を収容局内に設置する。また、双方向光増幅器を、OLT の直下ではなく、第二のスプリッタの各分岐に設置することにより、以下の効果が得られる。図 3-2 (a)、および (b) に、上り信号を増幅するための光増幅器 (OA : Optical amplifier) を、それぞれ、OLT の直下に設置した場合、および局内スプリッタの各分岐に設置した場合のシステム構成を示す。一般的には、(a) の光増幅形態を前置光増幅、(b) の光増幅形態を中継光増幅と呼ぶ。また、(a) における ONU と光増幅器間の損失: (1)、(b) における ONU と光増幅器間の損失: (2)、局内スプリッタの損失: (3) と定義する。これらシステムに許容される伝送線路損失を比較するために、図 3-3 (a) に示されるように、伝送線路損失を一般化して表すのが簡便である。図 3-3 (b) は、システムが許容

する ONU と光増幅器間の損失 (Loss A)、および光増幅器と OLT 間の損失 (Loss B) の関係を表した概略図である。光増幅器の利得を一定値とすると、理想的には図の点線に示されるように、許容伝送線路損失は右下がりの直線として表される。しかしながら、図示の通り、許容伝送線路損失は、Loss A の値が大きい場合、すなわち、より遠距離の ONU から送信された上り信号が光増幅器に入力される場合、理想直線と乖離する。この要因は、光増幅器が放出する ASE 雑音である。ASE 雑音は入力される光信号の強度に依らずほぼ一定値で放出されるため、弱信号が入力されると相対的に ASE 雑音の影響が大きくなり、信号対雑音比 (SNR : Signal-to-noise ratio) が劣化する。ONU と光増幅器間の距離が長いと、光増幅器に強度が弱まった光信号が入力されることからこの乖離が生じる。図 3-3 (b) に示されるように、この ASE 雑音の影響が大きいため、上記 (1) ~ (3) で定義した損失の間には、 $(2) + (3) > (1)$ の関係があることが分かる。すなわち、局内スプリッタを活用して中継光増幅することにより、前置光増幅と比較して許容伝送線路損失を拡大する効果が得られる。

上述の通り、図 3-1 (b)、および (c) のシステム構成によれば、図 3-1 (a) のシステム構成と比較して、より効率的に加入者を収容することが期待できる。しかしながら、許容伝送線路損失に関する上記の効果にも係らず、依然として ASE 雑音がシステムの伝送性能に大きな影響を及ぼす。その要因は二つある。

第一の要因は、ASE 間ビート雑音である。標準の TDM-PON システムでは ONU のコスト削減のため、上り信号の光源を無温調動作させることを前提としている。そのため、上り信号を伝送するために広い波長帯域が必要となり、ASE を除去するための光バンドパスフィルタ (BPF : Band pass filter) の通過帯域幅もそれに合わせる必要がある。20 nm の波長間隔に対応し 15 nm 程度の通過帯域幅を有する疎密度波長多重 (CWDM : Course wavelength division multiplexing) フィルタを用いれば、光源から出力された光信号を減衰することなく通過させることができるが、それを用いて ASE 雑音を除去すると、ASE 間ビート雑音が支配的となり SNR が著しく劣化する。上述の光増幅器の設置位置の工夫による許容伝送線路損失の拡大は、設置位置の比較により結論付けられる相対的な効果であり、その絶対値を十分に得るためには、この ASE 間ビート雑音の影響をさらに低減する必要がある。一方、アクセスシステムで用いられる装置と同様、コスト要件の厳しい装置として、ローカルエリアネットワーク (LAN : Local area network) で用いられる LAN 機器を挙げることができる。近年、データセンタ間の通信や、企業向けのサービスのために、100 Gb/s 級のデータ通信を可能とする 100GbE が標準化されている。拠点間のデータ通信をサポートする規格として、10 km 伝送用の 100GBASE-LR4、および 40 km 伝送用の 100GBASE-ER4 がある。各規格の末尾に付けられている「4」は、4 波長のパラレル伝送を行うことを意味し、1.3 μm 帯に 5 nm 間隔で配置する LAN-WDM と

呼ばれる規格が採用されている。この LAN-WDM の規格を満たすためには、100GbE の光トランシーバに温度調節機構 (TC : Temperature control) を取り付ける必要がある。この技術的な流れを考慮し、上り信号の光源に温度調節機構を取り付けると同時に、ASE 雑音を除去するために受信側に配置する BPF の通過帯域幅を、LAN-WDM と同等の 3 nm に狭窄化することを提案する。本構成によれば、ASE 間ビート雑音の影響を大幅に低減し、システムの許容伝送線路損失を、信号と ASE 間ビート雑音により定まる限界値に近づくまで拡大することが期待できる。

図 3-4 に、上り光増幅器の利得変化に対する受信感度の計算結果を示す。ここで光増幅器は、局内 4 分岐スプリッタの一分岐に設置し、受信感度は、光増幅器への入力光強度により規定する。また、光増幅器の利得以外の計算パラメータは、次節の実験で用いるパラメータと同じである。図示の通り、システムの損失限界を規定する受信感度は、光増幅器の利得が増加すると共に改善され、利得が約 17 dB を超えた辺りで -34.0 dBm に収束する。参考データとして、10G-EPON システムの OLT の受信光強度範囲 (-28.0 dBm ~ -6.0 dBm) を併せて図示する。この結果は、10G-EPON の最小受信感度 -28.0 dBm と比較して、6.0 dB の受信感度の改善が達成可能であることを意味している。さらに、局内 4 分岐スプリッタの損失 6.9 dB を考慮すると、許容伝送線路損失の拡大効果は、計 12.9 dB となる。一方、OLT に搭載されるバースト光受信器 (B-Rx) の過負荷限界を規定する最大受信感度は、光増幅器の利得が増加するに伴い減少している。例えば、光増幅器の利得を 17.0 dB に設定した際の光増幅器の入力ダイナミックレンジは 17.7 dB であり、B-Rx の入力ダイナミックレンジの規定値 22.0 dB よりも 4.3 dB 劣化することになる。

第二の要因は、局内スプリッタを利用するシステム構成に特有の ASE の重畳である。図 3-1 (b) のシステム構成では、局内スプリッタにより上り信号が合流される際に、光増幅器により増幅された上り信号に ASE が重畳される。この ASE は、光増幅器が設置されない分岐を経由した上り信号に重畳され受信 SNR を劣化させる。光増幅器が設置されない近距離 ONU から送信された上り信号は増幅されないため、光増幅器により増幅される遠距離 ONU から送信された上り信号よりも受信光強度が弱くなる。そのため、近距離 ONU から送信された上り信号の受信感度は、この ASE の影響を受けて著しく劣化する。一方、図 3-1 (c) のシステム構成では、局内スプリッタにおいて合流する上り信号はすべて増幅されているため、(b) の場合と比較して状況は良いように思われる。しかしながら、4 分岐スプリッタのすべての分岐に光増幅器が設置されるため、各上り信号に 4 倍の ASE が重畳される点に留意する必要がある。

図 3-5 に、光増幅器と OLT 間の損失値に対する受信感度のパワーペナルティを計算した結果を示す。図の (a)、および (b) は、それぞれ、図 3-1 (b)、および図 3-1 (c) のシステム構成に対する結果を示す。(b) については、局内 4 分岐スプリッタの

2 分岐に光増幅器を設置した場合と、すべての分岐に光増幅器を設置した場合の計算結果を示す。計算パラメータは、次節の実験で用いるパラメータと同じである。図示の通り、局内 4 分岐スプリッタの損失 6.9 dB を考慮すると、図 3-1 (b) の構成では 5.2 dB のパワーペナルティが生じることが予測される。一方、図 3-1(c) の構成では、光増幅器を 2 台設置した場合、および 4 台設置した場合について、それぞれ、2.8 dB、5.6 dB のパワーペナルティが生じることが予測される。

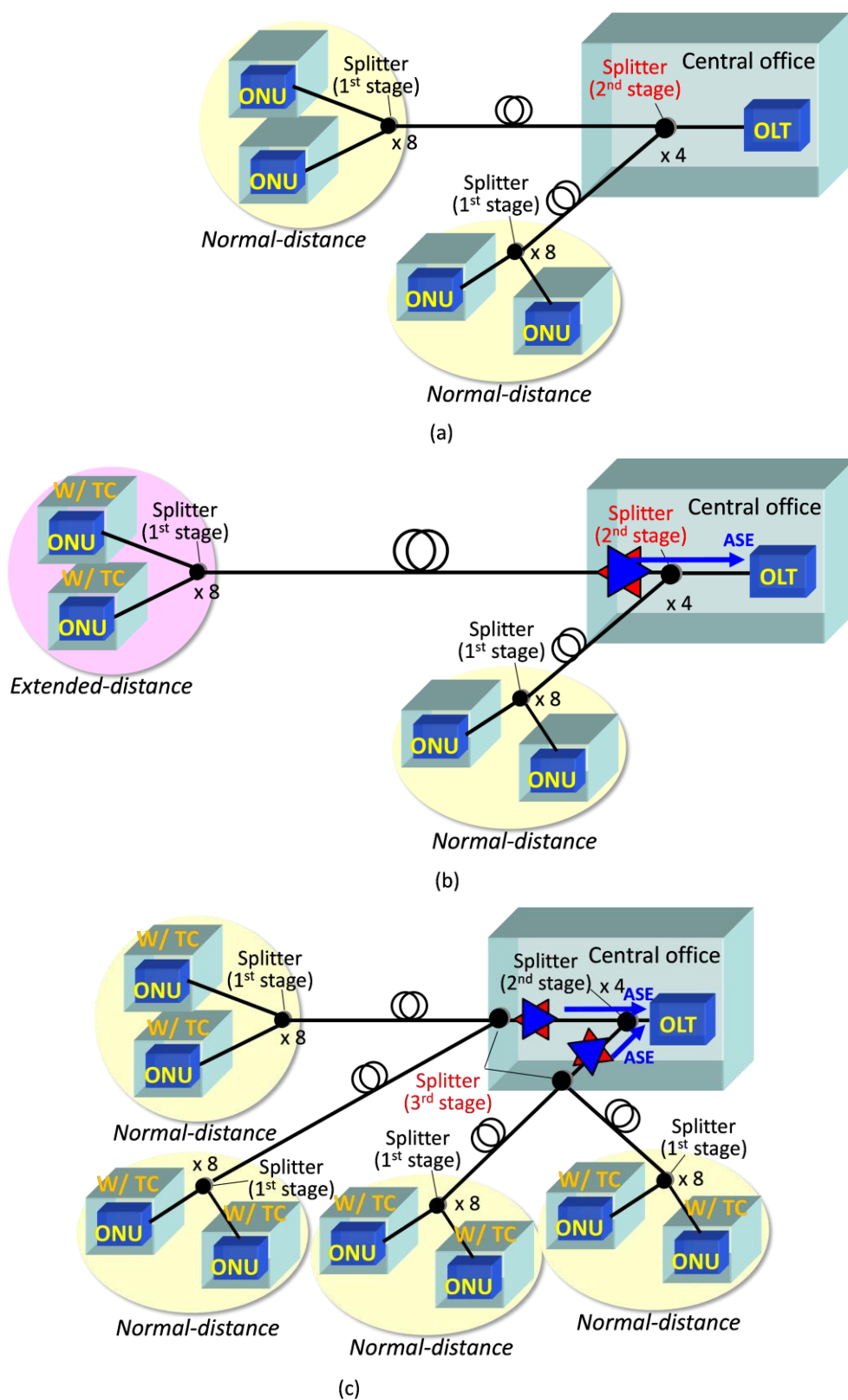


図 3-1 多段スプリッタを利用した PON システム構成. (a)通常の PON システム. (b)遠近混在システム. (c)多分岐システム.

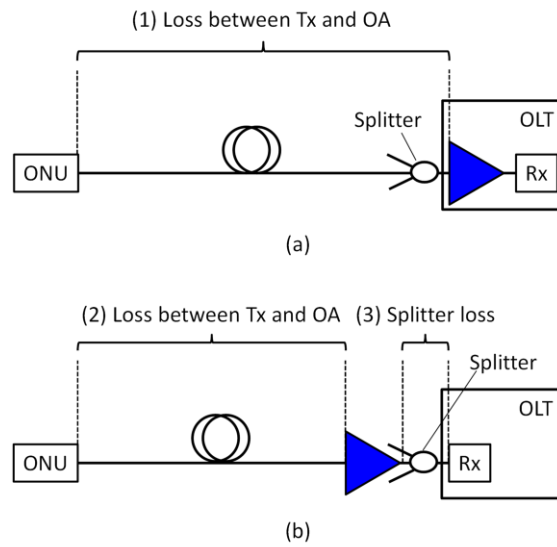


図 3-2 光増幅器を収容局に設置した場合における上り信号の増幅形態. (a)前置光増幅. (b)中継光増幅

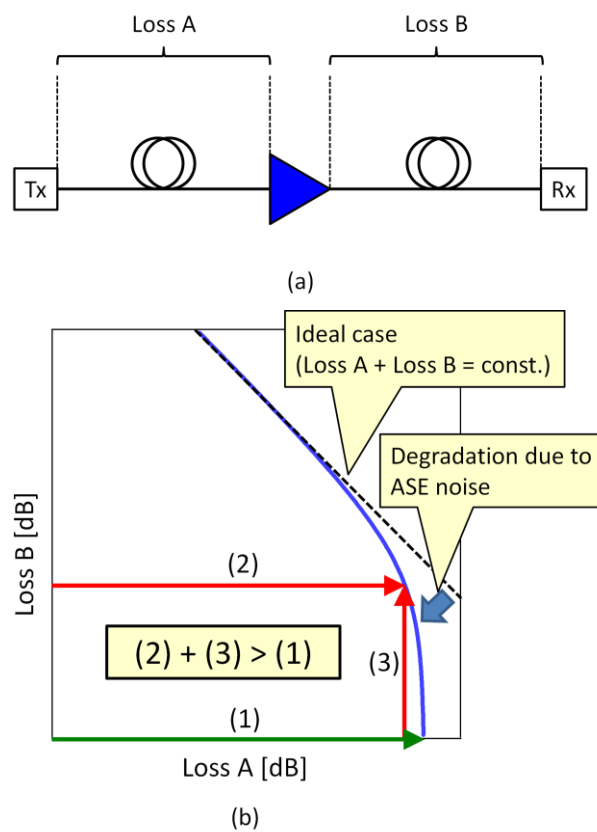


図 3-3 前置光増幅, および中継光増幅時における許容伝送線路損失の比較. (a)伝送線路損失の定義. (b)許容伝送線路損失の概略図.

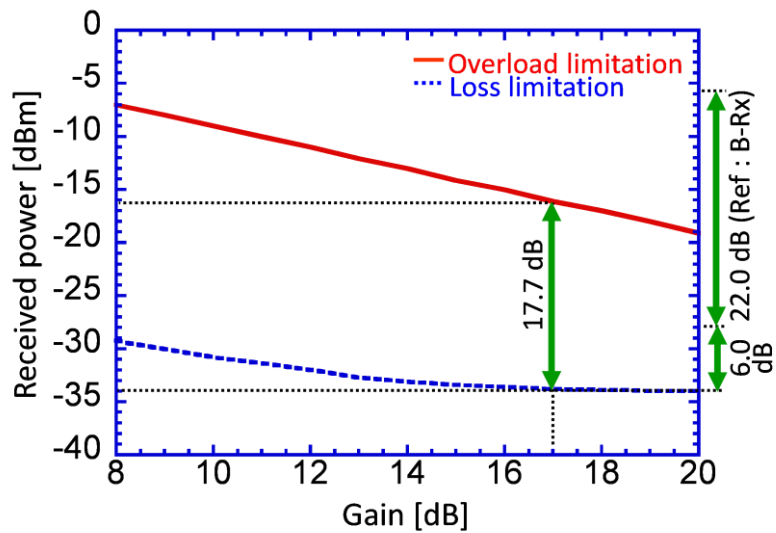


図 3-4 光増幅器の利得と受信感度の関係.

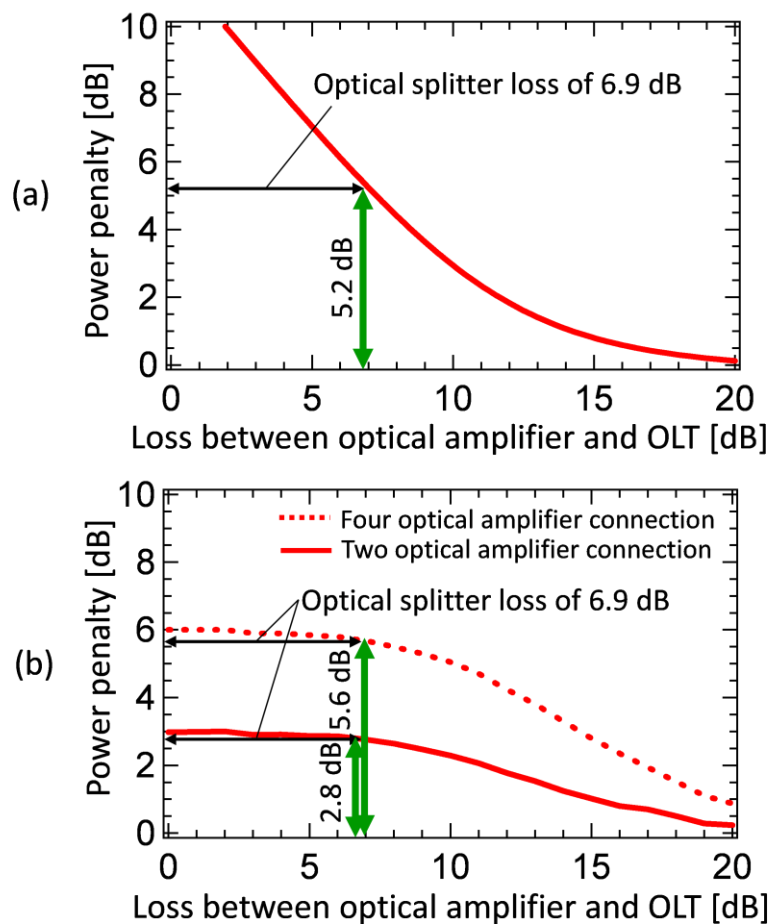


図 3-5 受信感度のパワーペナルティと光増幅器-OLT間損失の関係. (a)図 3-1(b)に示す遠近混在システムの場合. (b)図 3-1(c)に示す多分岐システムの場合.

3-3 高速自動レベル制御機構を備えたバースト信号対応光増幅器の適用

前節に記載の通り、光増幅器を用いて上り信号を増幅し、通過帯域幅の狭い BPF により ASE を除去することにより、多段スプリッタ型 TDM-PON システムの許容伝送線路損失を大幅に拡大することが期待できる。しかしながら、光増幅器の入力ダイナミックレンジが B-Rx の入力ダイナミックレンジと比較して狭まると同時に、局内スプリッタにおける ASE の重畳により受信信号の SNR が著しく劣化する。これらを解決するために、高速の ALC 機構を備えた光増幅器を上り信号増幅に適用することを提案する。図 3-6 に、その構成を示す。本光増幅器は、半導体光増幅器 (SOA: Semiconductor optical amplifier)、高速の ALC 回路、および狭帯域の BPF により構成され、狭帯域の BPF が配置される以外は、第二章で提案した光増幅器の構成の一部と同様である。光増幅媒体として SOA を用いるのは、10G-EPON で規定される上り信号波長 (1270 nm) に対応するためである。SOA の利得、および雑音指数 (NF: Noise figure) は、それぞれ、24.1 dB、および 6.5 dB である。SOA は、高速 ALC 回路の動作範囲にまで入力光信号を増幅する。高速 ALC 回路は、フィードフォワード (FF: Feed forward) 制御機構により、入力光信号強度に応じて高速の可変光減衰器 (VOA: Variable optical attenuator) の減衰量を制御し、最終的な出力光レベルを一定値に制御する。FF 制御の時定数は約 50 ns である。長期的な出力光レベルの変動を抑えるために、FF 制御回路の時定数よりも遙かに遅い時定数を有するフィードバック (FB: Feedback) 制御回路を同時に備える。本 ALC 機構により、強信号入力時の B-Rx の過負荷を防ぐことができる。図 3-7 (a) に、入力光強度に対する本光増幅器 (ALC-SOA) の利得、および出力光強度の関係を示す。図示の通り、-30.0 dBm 以上の入力光強度に対して、約 -11 dBm の一定値に制御された光強度が出力される。この出力光強度の値は、B-Rx の最大受信感度の規定値である -6.0 dBm 以下であり、B-Rx の過負荷を防ぎ得ることが分かる。一方、利得については、-30.0 dBm 以下の入力光強度に対して、約 17.5 dB のほぼ一定値が得られている。この値は、図 3-4 において最小の受信感度を達成すると予測される光増幅器の利得値を満たしている。図 3-7 (b) に、ALC-SOA の入出力波形の測定結果を示す。ここで、弱信号フレームと強信号フレームの入力光強度を、それぞれ、-30.0 dBm、および -10.0 dBm に設定した。図示の通り、ALC-SOA は、20 dB のレベル差を有するバースト信号入力に対して、ほぼ一定レベルのバースト信号を出力することに成功している。また本 ALC 回路には、出力レベル一定動作を行うために設定した閾値を下回る強度の光信号が入力された場合、その出力を遮断する機能を備えている。すなわち、接続されるすべての ONU が上り信号を送信しない時間 (非動作時間) において SOA が放出した ASE を遮断し、局内スプリッタの他の分岐に接続される ONU が上り信号を送信する時間 (動作時間) における ASE の重畳を防ぐ効果が期待できる。BPF の通過帯域幅は 3 nm である。図 3-8 (a) に、本 ALC-SOA によ

る ASE の抑圧効果を示す。弱信号フレームと強信号フレームの入力光強度は、図 3-6 (c) の測定と同様である。また上図の通り、非動作時間を両信号フレームの間に設けている。中央図に ALC-SOA から出力される ASE の光レベルを示す。本光レベルは、実際に ALC-SOA から出力される ASE を用いて測定したものでなく、別に用意した模擬 ASE を用いて測定したものである。図 3-7 (a) によると、ALC-SOA の利得が、 -30.0 dBm を下回る入力光強度に対してほぼ一定となることから、ALC-SOA に搭載される高速 VOA の減衰量は、 -30.0 dBm を下回る入力光強度に対して最小化されることが読み取れる。ALC-SOA から出力される ASE 量を最大化した状況を作り出すため、上述の模擬 ASE の光レベルを、 -30.0 dBm の光強度を有する連続した弱信号フレームが入力した場合に重畳される ASE レベルに設定した。この時の ASE レベル設定の様子を、図 3-8 (b) に示す。図 3-8 (a) の下図に、ALC-SOA の出力波形を示す。図示の通り、中央図の ASE レベルと比較して、非動作時間における ASE レベルが十分に抑圧されていることが分かる。

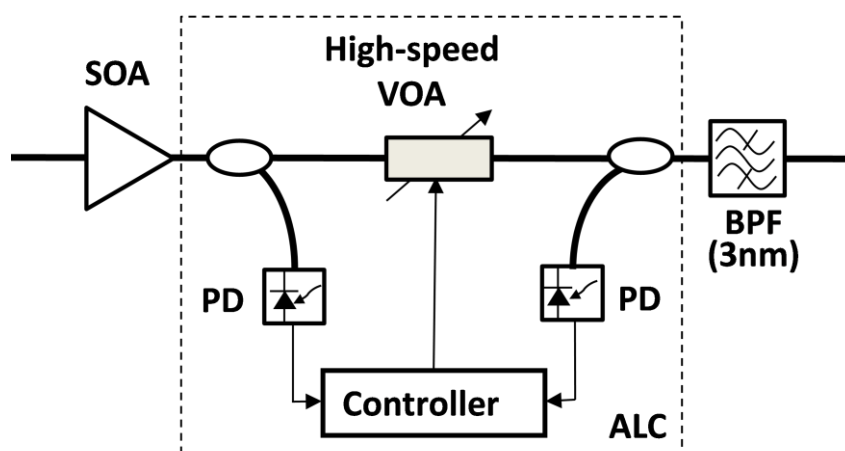


図 3-6 ALC-SOA の構成

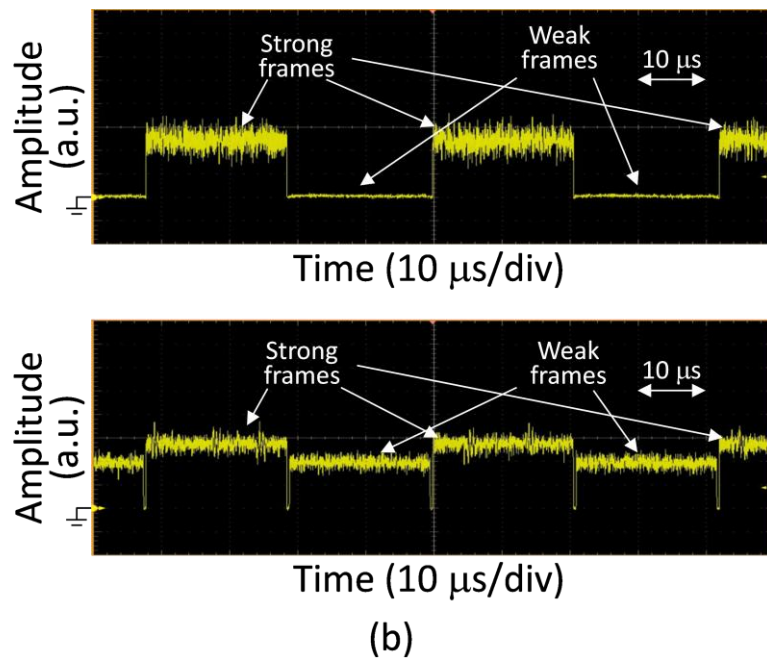
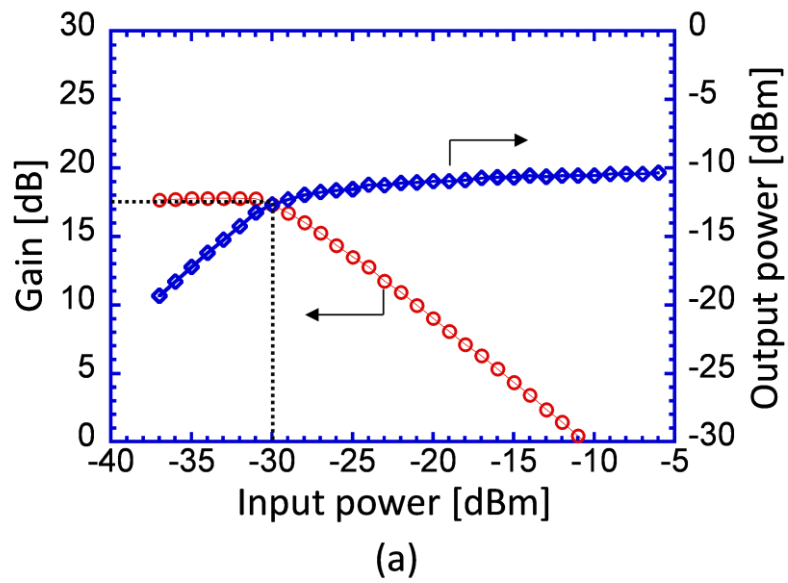


図 3-7 ALC-SOA の出力光レベル特性. (a)入力光強度に対する利得, および出力光強度の測定結果. (b)入出力波形の測定結果. (上)入力波形. 弱信号フレーム, および強信号フレームの光強度を, それぞれ, -30.0dBm , および -10.0dBm に設定. (下)出力波形.

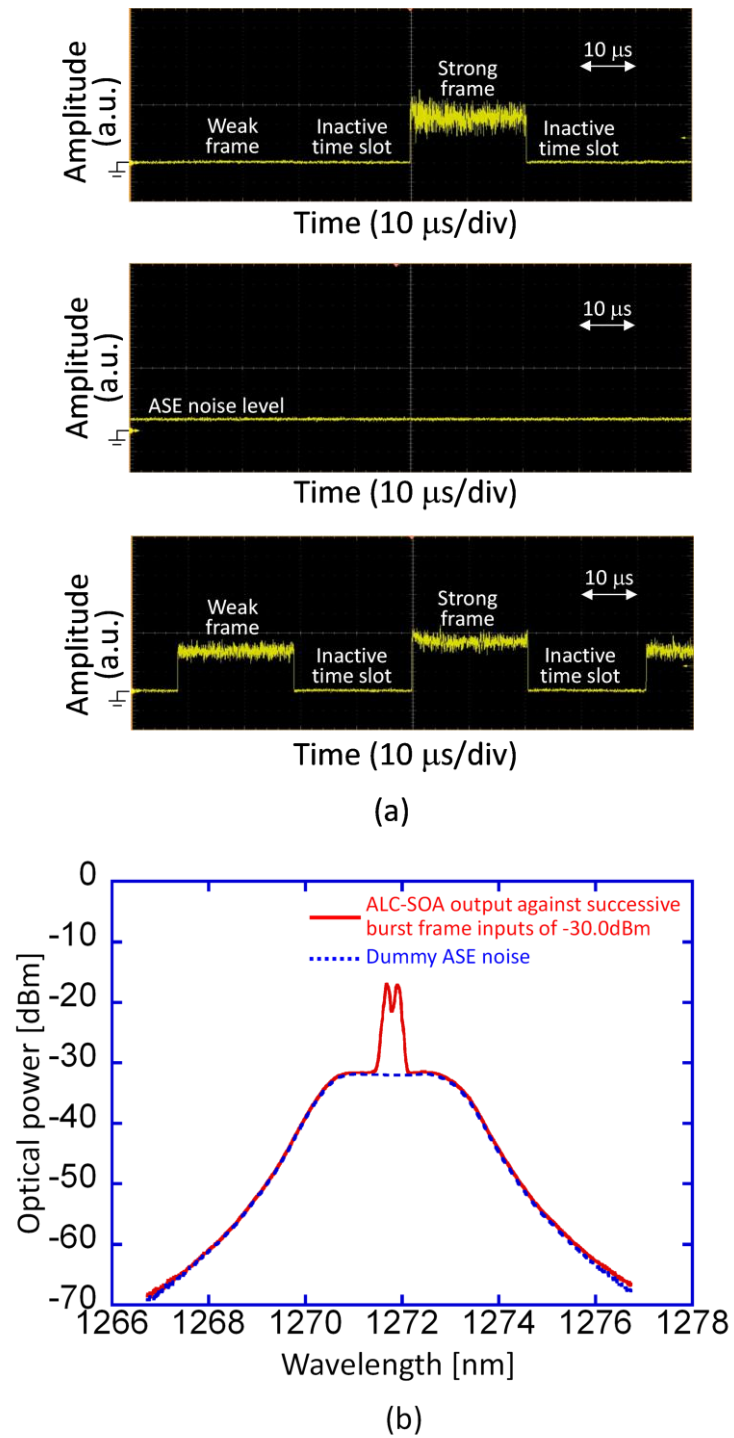


図 3-8 ALC-SOA の ASE 雑音抑圧特性. (a)ALC-SOA の入出力波形. (上)入力波形. (中)模擬 ASE レベル. (下)出力波形. (b)模擬 ASE レベルの設定.

3-4 システム動作範囲

3-4-1 遠近混在システム

ALC-SOA を適用することにより、収容局から遠距離、および近距離に位置する加入者を、単一 OLT により同時収容可能であることを確認するために、10 Gb/s 級のバースト信号を用いたビットエラーレート (BER: Bit error rate) 測定を行った。図 3-9 に、実験系を示す。Case(A) ~ Case(D) は、それぞれ、2 台の ONU が収容局から遠距離に位置する場合: (A)、2 台の ONU が収容局から近距離に位置する場合: (B)、Case(B) に光増幅器の ASE を模擬した雑音光を負荷した場合: (C)、2 台の ONU が、それぞれ、収容局から遠距離、および近距離に位置する場合: (D)、を模擬した実験系である。ここで、Case(C) の模擬 ASE のレベル設定は、図 3-8 (b) と同様の方法で行った。また受信感度は、図の収容局への入力光信号強度で規定する。実験系の詳細は、Case(A) のみに記載している。実験系は、B-Rx、2 台のバースト光送信器 (B-Tx)、および ALC-SOA から構成される。B-Rx は、トランスインピーダンス増幅器付きのアバランシェフォトダイオード (APD-TIA: Avalanche photo diode with trans-impedance amplifier)、および振幅制限増幅器 (LA: Limiting amplifier) から構成される。B-Tx は、高速のバースト信号対応 LD (Laser diode) ドライバ付きの分布帰還型 (DFB: Distributed-feedback)-LD であり、パルスパターン発生器 (PPG: Pulse pattern generator) により生成された 10.3125 Gb/s のバースト信号により駆動電流を直接変調される。ここでバースト信号フレームは、バースト信号同期パターン (0x BF 40 18 E5 C5 49 BB 59) が格納された 794.4 ns のプリアンブル、および $2^{31}-1$ の疑似ランダム (PRBS: Pseudo random bit sequence) パターンが格納されたペイロードから構成される。ペイロード長として、19.9 μ s、および 49.6 ns を用いた。794.4 ns のプリアンブル、および 19.9 μ s のペイロードから構成される長フレームは、平均的なデータスループットを模擬する。一方、794.4 ns のプリアンブル、および 49.6 ns のペイロードから構成される短フレームは、10G-EPON で用いられるシステム制御信号 (Report) を模擬する。2 台の B-Tx から送信されるバースト信号フレームの送信タイミングは、PPG と BER テスタに同期したタイミングパルス発生器から出力されるイネーブル信号 (Enable signal) によって設定される。バースト信号フレーム間のガードタイムは、397.2 ns に設定した。本バースト信号フレームを用いて測定した B-Rx の受信感度は -28.9 dBm である。この受信感度は、B-Rx の入力で規定した場合の値であり、収容局の入力で規定した場合は、局内 4 分岐スプリッタの損失 6.9 dB を減じた -22.0 dB となる。ここでエラーフリーに相当する $BER=10^{-12}$ を規定し、誤り符号訂正 (FEC: Forward error correction) 技術の適用を前提として、 $BER=10^{-3}$ においてエラーフリー動作を達成するものとした。B-Tx #1 (測定信号生成用)、および B-Tx #2 (バースト信号生成

用) の出力光強度、および消光比は、それぞれ、2.5 dBm / 6.6 dB、および 2.6 dBm / 6.9 dB である。受信光強度は VOA 1、および VOA 2 により調整し、VOA 2 の減衰量を固定し VOA 1 の減衰量を可変することにより BER 測定を行った。

図 3-10 に、Case(A) ~ Case(D) に対して得られた BER の測定結果を示す。(a)、および (b) は、それぞれ、上記の長フレーム、および短フレームを用いた場合の測定結果である。図 3-9 (a) に示される通り、Case(A) の受信感度 -32.9 dBm は、ALC-SOA による信号増幅効果により、Case(B) と比較して 10.9dB 改善されている。実験に使用した B-Rx の受信感度が、10G-EPON の規定値 (-28.0 dBm) より 0.9 dB 上回っていることを考慮すると、この改善効果は、図 3-4 を用いて予測される改善値 (12.9 dB) と 1.1 dB 相違するに留まる。一方、Case(C) の受信感度は、模擬 ASE を負荷した影響により、Case(B) と比較して 5.0 dB 劣化している。この劣化量は、図 3-5 (a) により予測される値 (5.2 dB) とほぼ一致している。これに対し、Case(D) に示されるように、劣化した受信感度は、ALC 回路の ASE 抑圧効果により Case(B) の値にまで回復している。また、Case(A) において得られた光増幅器の入力ダイナミックレンジ 22.9 dB は、Case(D) の入力ダイナミックレンジ 22.5 dB とほぼ同等であり、いずれの値も 10G-EPON において B-Rx に要求される規定値 (22.0 dB) を満たす。

一方、短フレームの測定結果を見ると、ALC 回路の ASE 抑圧効果により、Case(D) の受信感度は Case(B) とほぼ一致している。また、Case(B) に対する Case(A) の受信感度の改善効果は 10.0 dB であり、図 3-10 (a) と比較して、0.9 dB 劣化しているが、これは短フレームの測定における Case(B) の受信感度が長フレームに対して 0.9 dB 改善しているためである。実際、短フレームを用いて Case(A) において得られる受信感度 -32.9 dBm、および入力ダイナミックレンジ 22.9 dB は、長フレームの測定において得られる値と同等である。

上記の通り、光増幅器を設置した分岐における受信感度の改善効果は 10 dB 以上である。マージンを見込み 0 帯における光ファイバの損失を 0.5 dB/km とすると、この改善効果により、20 km 以上の伝送距離の拡大効果が得られるものと考えられる。光増幅器を配置しない近距離エリアの伝送距離を 20 km とすると、光増幅器を配置した遠距離エリアの伝送距離は、40 km 以上となる。つまり、本提案システムにより、0 ~ 40 km に点在する 32 世帯の加入者を、単一の OLT により効率的に収容することが可能となる。

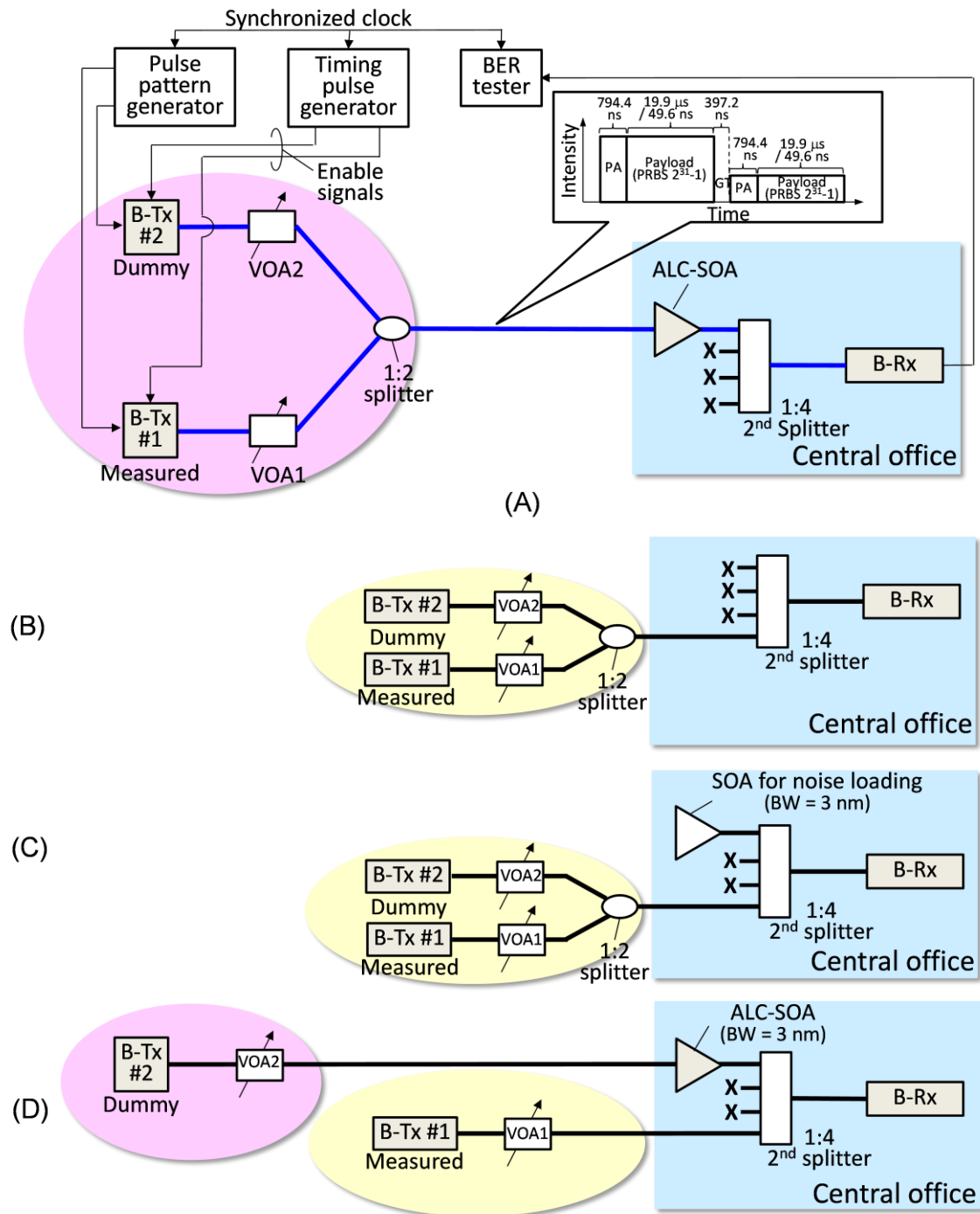
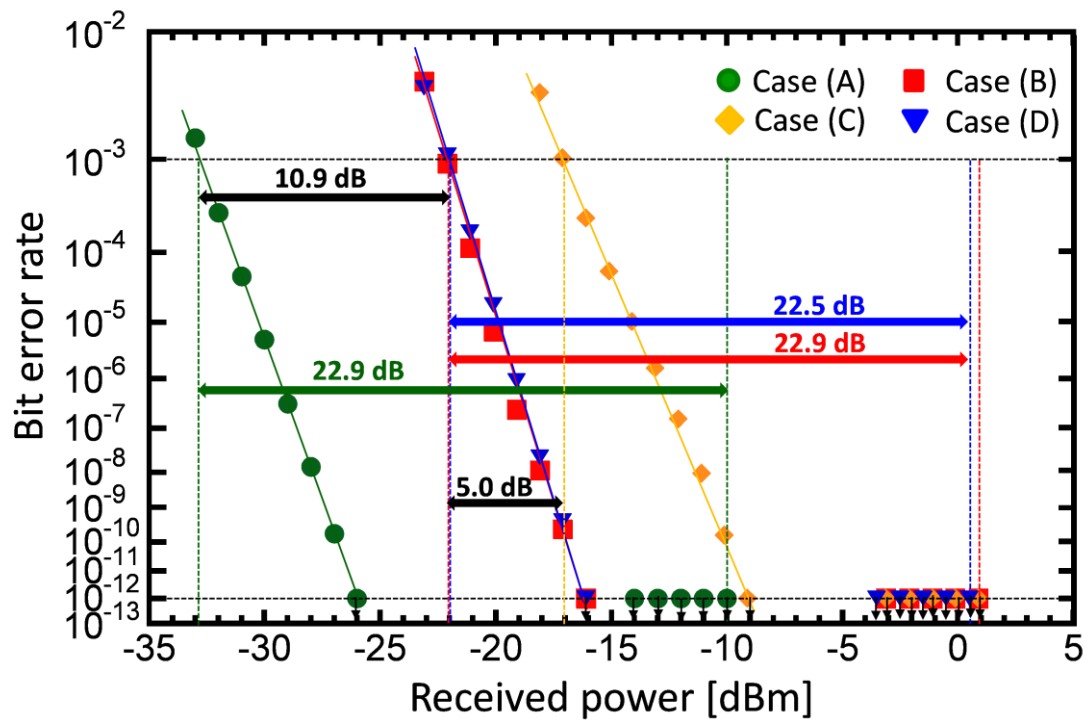
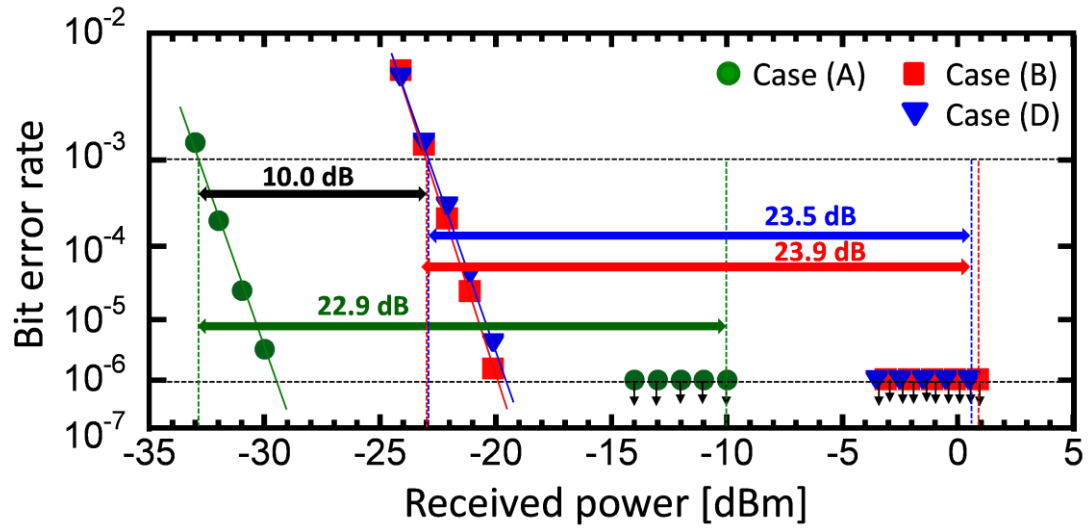


図 3-9 BER 測定実験系. (A)2 台の ONU が収容局から遠距離に位置する場合. (B)2 台の ONU が収容局から近距離に位置する場合. (C)模擬 ASE が(B)の構成に負荷される場合. (D)2 台の ONU が収容局から遠距離, および近距離に位置する場合.



(a)



(b)

図 3-10 遠近混在システムにおける BER 測定結果. (a)長フレームを用いた場合. (b)短フレームを用いた場合.

3-4-2 多分岐システム

ALC-SOA を適用することにより、収容局から近距離に位置する多数の加入者を、単一 OLT により収容可能であることを確認するために、前項と同様、10 Gb/s 級のバースト信号を用いた BER 測定を行った。図 3-11 に、実験系を示す。Case(I) ~ Case(III) は、それぞれ、2 台の ONU が局内スプリッタの同じ分岐に接続される場合: (I)、Case(I) に光増幅器の ASE を模擬した雑音光を負荷した場合: (II)、2 台の ONU が、それぞれ、局内スプリッタの異なる分岐に接続される場合: (III)、を模擬した実験系である。実験パラメータは、前項とほぼ同様である。相違は、ダミー信号の ASE 除去光フィルタとして CWDM フィルタを使用した点である。これは、ダミー信号を増幅する ALC-SOA から出力される ASE が、局内スプリッタの 3 つの分岐に配置される ALC-SOA から出力される ASE の総和以上となるようにするためである。これにより、2 台の ALC-SOA を用いて、4 台の ALC-SOA が設置された場合を模擬する。図 3-12 (a) に、ダミー信号の増幅に用いた ALC-SOA の ASE レベル設定の様子を示す。図 3-8 (b) と同様、ALC-SOA に -30.0 dBm の光強度を有する連続した 2 つの弱信号を入力する。図示の通り、CWDM フィルタは、約 16 nm の十分な透過帯域幅を持つ。この透過帯域幅は、測定に使用する BPF の透過幅 (3 nm) の 5 倍以上であり、3 分岐に設置される ALC-SOA が出力する ASE を模擬するのに十分である。図 3-12 (b) に、この条件下における ALC-SOA の入出力フレーム波形の測定結果を示す。図示の通り、透過帯域幅の広い CWDM フィルタにより ASE を除去しているため、ダミー信号フレームの出力光レベルは、測定信号フレームの出力光レベルよりも大きい。

図 3-13 に、Case(I) ~ Case(III) に対する BER の測定結果を示す。(a)、および (b) は、それぞれ、長フレーム、および短フレームを用いた場合の測定結果である。(a) には、比較のため、B-Rx の受信特性を併せて示している。(a) に示される通り、Case(I) の受信感度は、ALC-SOA による信号増幅効果により、B-Rx の受信感度に対して 4.0 dB 改善している。言い換えれば、ONU と ALC-SOA 間の許容伝送線路損失が 4.0 dB 拡大され、システムの分岐数を 2 倍に増加させることが可能であることを意味する。一方、Case(II) の弱信号フレームに対する受信感度の測定結果は、ASE を負荷することにより、Case(I) に対し 2.4 dB 劣化している。この結果は、図 3-5 (b) の予測値 (2.8 dB) に近似する。さらに、強信号フレームに対する BER の測定結果は、ASE の負荷、および SOA のパターン効果の影響により劣化している。図 3-12 (c) に示される通り、劣化した BER は、ALC 回路の ASE 抑圧効果により、Case(I) の BER とほぼ同等にまで回復している。また、Case(III) で得られた入力ダイナミックレンジ 22.9 dB は、10G-EPON で規定される B-Rx の入力ダイナミックレンジ 22.0 dB を満たしている。

一方、図 3-13 (b) に示される BER 測定結果においても、Case(III) の受信感度

は、ALC 回路の ASE 抑圧効果により、Case(I) の受信感度にほぼ一致している。
 図 3-9 (b) の結果と同様、B-Rx に対する Case(I) の受信感度の改善効果 3.1 dB は、
 (a) と比較して 0.9dB 劣化しているが、短フレームを用いて Case(III) において得
 られる受信感度 -32.9 dBm、および入力ダイナミックレンジ 22.9 dB は、長フレー
 ムの測定において得られる値と同じである。

収容局に入力される光信号強度の最小値が -32.9 dBm であることは、局内 4 分岐
 スプリッタの各分岐の下にさらに 64 分岐の接続が可能であることを意味し、結果的
 として計 256 分岐の TDM-PON システムの実現が可能となる。

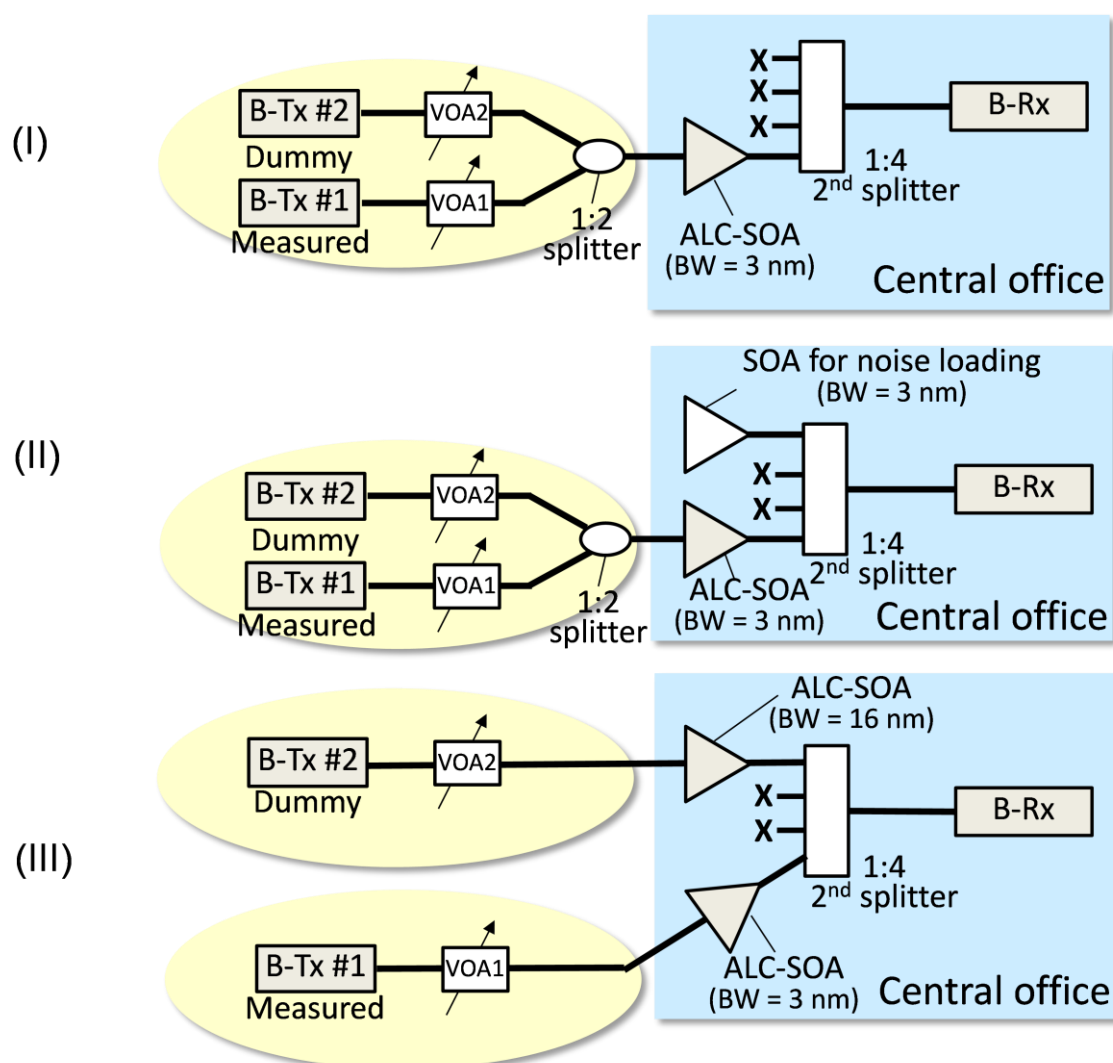
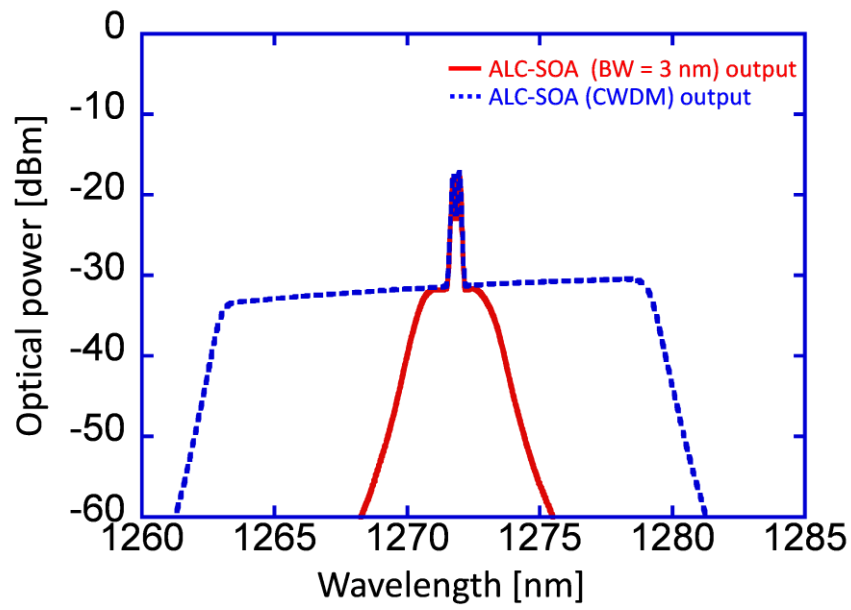
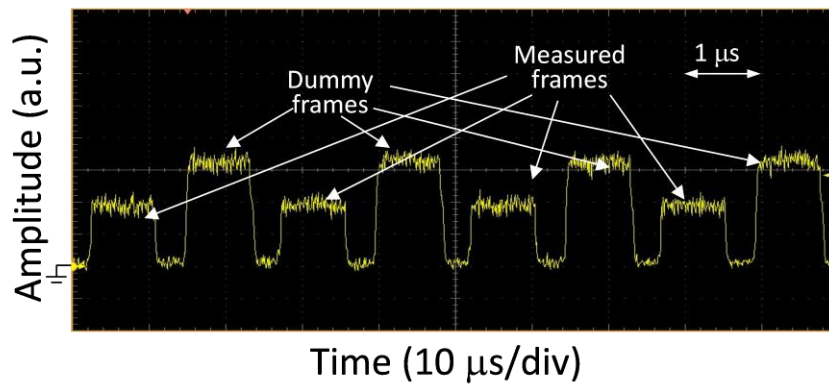
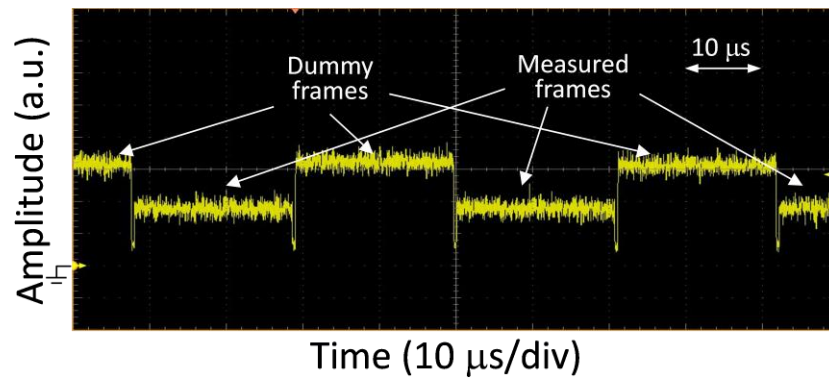


図 3-11 BER 測定実験系. (I)2 台の ONU が局内スプリッタの同じ分岐に接続される場合. (II) 模擬 ASE が(I)の構成に負荷される場合. (III)2 台の ONU が局内スプリッタの異なる分岐に接続される場合.

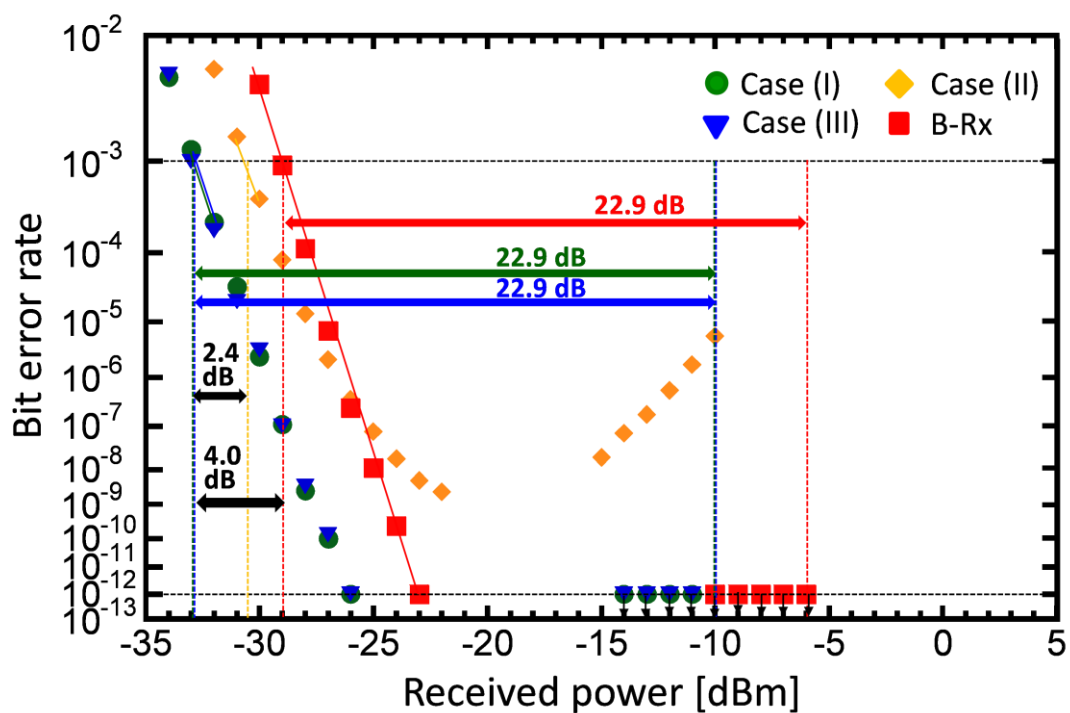


(a)

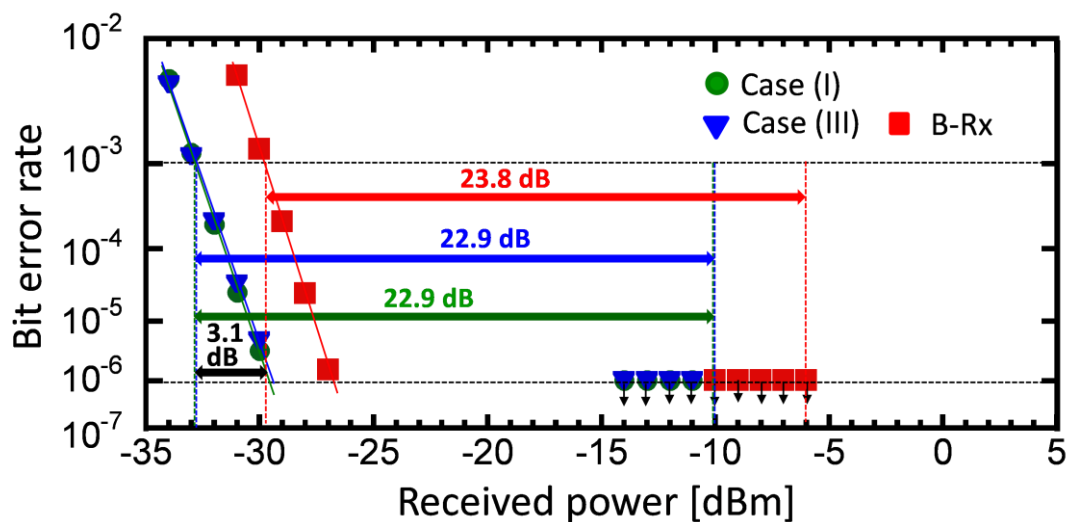


(b)

図 3-12 ALC-SOA により増幅されたダミー信号. (a)模擬 ASE レベルの設定. (b)出力波形の測定結果. (上)長フレームの場合. (下)短フレームの場合.



(a)



(b)

図 3-13 多分岐システムにおける BER 測定結果. (a)長フレームの場合. (b)短フレームの場合.

3-5 まとめ

電源供給の容易な収容局に光増幅器を設置することにより、単一の OLT により複数の加入者をより効率的に収容するシステム構成を提案した。具体的な提案システムは、

- 単一 OLT により局内スプリッタの一分岐に光増幅器を設置して遠距離に位置する加入者を収容する一方、他の分岐には光増幅器を設置することなく近距離に位置する加入者を収容する遠近混在システム
- 局内スプリッタの全分岐に光増幅器を設置することで多分岐スプリッタの損失を補償し、単一 OLT により多数の近距離に位置する加入者を収容する多分岐システムである。光増幅器の許容伝送線路損失拡大効果は、光増幅器を伝送線路の中ほどに設置することで増す。そのため、局外と局内に配置したスプリッタでシステムの分岐数を按分する多段スプリッタ型の TDM-PON システム構成を利用し、光増幅器を局内スプリッタ直下に設置する。本システムに適用する光増幅器には、OLT に搭載する B-Rx の過負荷を防ぐため、広入力ダイナミックレンジ特性が求められるのと同時に、局内スプリッタにおける上り信号の合流時に生じる ASE 雑音の重畳を回避する機能が必要である。これらを実現するために、第 2 章で提案した高速自動レベル制御 ALC 機構を備えたバースト信号対応光増幅器を適用する。ただし、後段の SOA は使用せず、前段の SOA、および 高速 ALC 回路から成る部分 (ALC-SOA) を用いる。本 ALC-SOA は、入力バースト信号の光強度に依らず、出力光レベルを一定値に制御することにより、B-Rx の過負荷を防ぎ広入力ダイナミックレンジ化を可能とするだけでなく、入力信号が予め設定した閾値を下回る場合、出力を遮断する機能を有する。すなわち、上りバースト信号が入力されない時間において SOA 出力を遮断し、他の分岐を経由する上り信号への ASE の重畳を防ぐ。ALC-SOA の広入力ダイナミックレンジ特性、および ASE 雑音抑圧機能の効果を確認するため、遠近混在システム、および多分岐システムを想定し、10 Gb/s 級のバースト信号を用いて BER 測定を行った。結果、遠近混在システムでは、近距離の加入者に影響を与えることなく、光増幅器を設置した分岐の許容伝送線路損失を 10.9 dB 改善可能であることが示された。O 帯における光ファイバの損失を 0.5 dB/km とすると、相当する伝送距離の拡大効果は 20 km 以上である。光増幅器を設置しない分岐の伝送距離 20 km を考慮すると、収容局から 40 km を超える加入者を収容し得ることになる。一方、多分岐システムでは、局内スプリッタの他の分岐に接続される加入者に影響を与えることなく、許容伝送線路損失を 4.0 dB 改善可能であることが示された。この改善値は、過剰損失を含めた 2 分岐スプリッタの損失に等しく、局内スプリッタの分岐ごとに 64 分岐を接続可能であることを意味する。局内スプリッタの 4 分岐を含めると、計 256 分岐が達成され得ることになる。

3-6 参考文献

- [1] K.-I. Suzuki, Y. Fukada, K. Saito, Y. Maeda, and Y. Okumura, "Gain-clamped Prasedodymium-doped fiber amplifier for burst-mode amplification," OAA'2005, WC2, 2005.
- [2] N. Suzuki, S. Yoshima, and J. Nakagawa, "Extended reach bidirectional optical amplified GE-PON with a high 46 dB span-budget for 64 far-end user ONUs," COIN/ACOFT'2007, 2007.
- [3] D. Nasset, T. Kelly, S. Appathurai, and R. Davey, "High gain semiconductor optical amplifiers for extended reach GPON systems," ECOC'2007, PD 3.5, 2007.
- [4] P. Iannoe and K. Reichmann, "Hybrid SOA-Raman amplifiers for fiber-to-the-home and metro networks," OFC/NFOEC'2008, NTuC1, 2008.
- [5] F. Saliou, P. Chanclo, F. Laurent, B. Lnadousies, N. Genay, and Z. Belfqih, "Class B+ GPON extended to 44dB while maintaining 15dB optical budget difference," ECOE'2008, P.6.10, 2008.
- [6] S. Hui, Y. Fitzgerald, and D. Grossman, "Operating contours and loss-budget partitioning of SOA-based GPON reach extension," OFC/NFOEC'2009, NWC1, 2009.
- [7] J. Kani, F. Bourgart, A. Cui, A. Rafel, M. Campbell, R. Davey, and S. Rodrigues, "Next generation PON—part I: technology roadmap and general requirements," IEEE Commun. Mag., Vol. 47, Iss. 11, pp. 43-49, 2009.
- [8] M. Fujiwara, K.-I. Suzuki, K. Taguchi, T. Imai, H. Ishii, N. Yoshimoto, and H. Hadama, "Effective accommodation for users located in long / short distance areas through PONs with dual stage splitter configuration ALC burst-mode optical amplifier," OFC/NFOEC'2011, NThF3, 2011.
- [9] M. Fujiwara, K.-I. Suzuki, K. Taguchi, T. Imai, H. Ishii, and N. Yoshimoto, "Effective coexistence between normal- and extended-distance PON areas using ALC-SOA," IEICE Commun. Expr., Vol. 2, No. 6, pp. 233-238, 2013.
- [10] M. Fujiwara, K.-I. Suzuki, and N. Yoshimoto, "Effective ONU accommodation through PON systems with multi-stage splitter configuration using ALC burst-mode SOAs," IEICE Trans. Commun., Vol. E97-B, No. 2, pp. 432-440, Feb 2014.

第4章 SOAを用いた WDM/TDM-PON の多分岐/長延化

4-1 はじめに

現在、Gb/s を超える光ブロードバンドサービスを経済的に提供するために、時分割多重 (TDM : Time division multiplexing) 技術を用いた TDM-PON (Passive optical network) システムが、アジアや北米を中心に広く導入されている。また、今後の増え続ける帯域要求に応えるため、10 Gb/s 級の TDM-PON が、次世代の光アクセスシステムとして標準化されている。さらに、将来の光アクセスシステムが標準化や国際会議の場で議論され始めている。その候補として、更なる高速化を推し進めた TDM-PON、波長多重 (WDM : Wavelength division multiplexing) 技術を用いた WDM-PON、TDM 技術の経済性、および WDM 技術の帯域/サービスの拡張性を利用した WDM/TDM-PON、現在の無線技術の主流である直交周波数分割多重 (OFDM : Orthogonal frequency division multiplexing) 技術を用いた OFDM-PON 等が議論の俎上に載せられた。最終的に、経済性を含めたシステムの実現性を考慮の上、WDM/TDM-PON が採択され、現在、システムの具体的な詳細が議論されている [1]。ポスト 10 Gb/s 級 TDM-PON の世代ともなると、高速化に加えて更なる付加価値がシステムに求められるものと予想されている。それに対して、波長の拡張機能を利用した複数サービスの収容や、波長可変性を利用した様々な機能追加が提案されている。前者は、これまで主にマスをユーザを対象として提供されてきた TDM-PON の適用先を、ビジネスユーザや、近年増え続ける無線アクセスサービスの帯域を集約するモバイルバックホウル等にまで拡張することを意図している。また後者の具体例として、システムの冗長機能や、システムを共有するユーザによって生じる割り当て帯域の不公平性を解消する機能等が提案されている [2-4]。

一方、TDM-PON は信頼性が高く、順調に加入者数を伸ばしているが、システムを高速化した際の経済性の担保や、更なるサービス提供エリアの拡大が求められるものと予想されている。これに対し、TDM-PON に光増幅器を適用してシステムが許容する伝送線路損失の拡大を図る研究がなされている [5,6]。許容伝送路損失を拡大することができれば、多分岐化によるシステムコストの削減や、長延化によるサービスエリアの拡大が実現できる。これらを経済的に達成する上で最も期待の高い光増幅媒体が、半導体光増幅器 (SOA : Semiconductor optical amplifier) である。しかしながら、WDM/TDM-PON への適用を考えると、上り信号は波長ごとに間欠的に送信されるバースト信号であるため、単一の SOA により複数波長を一括して増幅することは極めて困難である。そのため、各波長のバースト信号を個別に増幅することになり使用台数を要することから、TDM-PON で使用するバースト信号対応光増幅器よりも経済化が求められる。

本章では、将来光アクセスシステムが導入される時期を想定し、SOA を用いて

WDM/TDM-PON システムの多分岐/長延化を経済的に実現する技術について述べる。SOA の利得の高速応答特性を利用して、上りバースト信号に対応した広入力ダイナミックレンジ化を達成することのできる制御機構を提案する。また、提案構成によるバースト信号対応光増幅器を製作し、その性能を評価する。さらに、システムを多分岐化、および長延化した際の加入者収容範囲を実験により明らかにする。

4-2 SOA を用いた多分岐/長延化 WDM/TDM-PON システム構成

図 4-1 (a)、および (b) に、光増幅媒体として SOA を用いた WDM/TDM-PON システムの構成を示す。(a) は、収容局に配置する伝送装置 (OLT : Optical line terminal) に送受分離型の多波長光トランシーバを利用する構成であるのに対し [7]、(b) は、OLT に送受一体型の単一波長光トランシーバを利用する構成である [8]。まず、(a) によると、収容局に配置される OLT と、加入者宅に配置される複数の伝送装置 (ONU : Optical network unit) が、収容局外に配置されるスプリッタを介して光ファイバで結合される構成である。WDM-PON と同様、複数波長を使用するシステムであるため、アレイ導波路回折格子 (AWG : Arrayed waveguide grating) 等の波長合分波器を伝送線路上に配置した網構成も考えられるが、ここでは既存の TDM-PON システムで用いられているスプリッタ網を活用し設備投資の抑制を図る。また使用波長は、既存システムとの共存を可能とするため、上り波長には、既存システムで使用されている O 帯 (1.26 – 1.36 μm 帯) ではなく C 帯 (1524 – 1544 nm) を割り当てることが予定されている。一方、下り波長には L 帯 (1596 – 1603 nm) が割り当てられる予定である。既存システムと比較して、狭い波長帯域に複数の波長を配置する必要があるため、50 GHz ~ 200 GHz 間隔の高密度 WDM (DWDM) 技術が必要となるものと考えられている。OLT には多波長に対応した伝送装置 (LC : Line card) を配置し、LC は、AWG 等の波長合分波器の透過中心波長に一致する固定波長の光信号を送受信する。一方、ONU には、波長可変光源を搭載したバースト光送信器 (B-Tx)、および受信波長を可変できる光受信器 (Rx) を配置する。ここで波長可変型の Rx を用いるのは、ノードに波長合分波器ではなくスプリッタを配置することにより、ONU に到達した WDM 信号のうち必要な一波長を抜き出して受信する必要があるためである。一方、B-Tx が任意の波長で送信した上り信号は、LC の波長分波器により分波されて、いずれかのバースト信号光受信器 (B-Rx) で受信される。本 ONU 構成により、すべての ONU が波長依存特性のないスプリッタを介して任意の光トランシーバペア (図中、同一番号の Tx、B-Rx ペア) と通信することができる。これにより、既存の TDM-PON システムでは提供されない以下の付加機能がもたらされる。

- 光トランシーバペア故障時の冗長機能
- 光トランシーバペアのスリープ動作による低消費電力機能
- 光トランシーバペアごとのトラヒックの負荷分散

一方、(b) の構成においても、すべての ONU が波長依存特性のないスプリッタを介して任意の LC (Tx、B-Rx ペア) と通信することができ、ONU の波長可変性を利用して (a) と同様の機能を実現することができる。さらに、送受一体型の光トランシーバが一つの LC を構成していることから、上記の付加機能に加えて、トラヒックの増加に合わせて LC を追加することにより、段階的な帯域のアップグレード機

能が実現される。またスプリッタ構成は、局外と局内で分岐を按分する構成であり、より広範囲に点在する加入者を単一 OLT により収容することができる。

上り信号伝送における SOA の配置に着目すると、伝送線路上に光増幅中継器として配置する構成、および OLT 内に前置光増幅器として配置する構成を考えることができる [9]。標準仕様に準拠した TDM-PON システムでは、ONU を無温調動作させることを前提としており、上り信号伝送に広い波長帯域を要するため、光増幅器が放出する自然放出光 (ASE : Amplified spontaneous emission) を、光フィルタにより十分に除去することができない。そのため、これまで前置光増幅の検討はほとんどなされてこなかった [6,10]。これに対し、WDM/TDM-PON では、DWDM 技術の適用が確実視されており、ASE を十分に除去し得ることから、前置光増幅実現の可能性が高まってきている。ここでは、光増幅器による損失補償効果は、光増幅器を伝送線路の中ほどに配置するほど増すことから、光増幅中継により、システムを長延化して収容局から遠距離に位置する加入者を収容し、前置光増幅により、システムを多分岐化して収容局から近距離に位置する加入者を収容することを考える。WDM/TDM-PON では、上り信号伝送に光ファイバの損失が少ない C 帯を用いることから、従来の TDM-PON と比較して、長延化システムの伝送距離を飛躍的に拡大することが期待できる。また、前置光増幅の実現により、アクティブ装置である光増幅器への電源供給の問題を意識することなく、システムを多分岐化することが期待できる。

TDM 技術を利用した PON システムに光増幅器を適用する際の最大の課題は、上りバースト信号に対応した光増幅器の実現である。このバースト信号は、時間軸方向に間欠的に伝送されるだけでなく、ONU からスプリッタまでの距離の相違や、B-Tx 出力の個体差により、バースト信号フレームごとに強度が大きく変化する。このため、上り光増幅器には、B-Rx と同様、広い入力ダイナミックレンジが求められる。WDM 技術を用いた光中継伝送システムでは、波長ごとの光信号は連続信号であるため、WDM 信号を単一の光増幅器により一括して増幅することは比較的容易である。しかしながら、次節に述べる通り、広入力ダイナミックレンジ化を実現するためには、入力バースト信号に応じて光増幅器の利得を制御する必要があり、一括増幅の実現は極めて困難である。そのため、図示の通り、波長ごとに信号増幅を行うことになり、使用する光増幅器の台数が嵩むことから、TDM-PON に比べてより経済化が求められることになる。図 4-1 の (a)、および (b) の光増幅中継システム構成を比較すると、(a) では、OLT とスプリッタを接続する幹線光ファイバが一本であるのに対し、(b) では、局内スプリッタの分岐数に相当する幹線光ファイバが必要である。そのため (b) は、上述の通り、帯域を段階的にアップグレードする上で利点を有する一方、必要となる光増幅中継器の台数が (a) より多く必要となる。従って、長延化システムに限っては、(a) の構成が適していると言える。

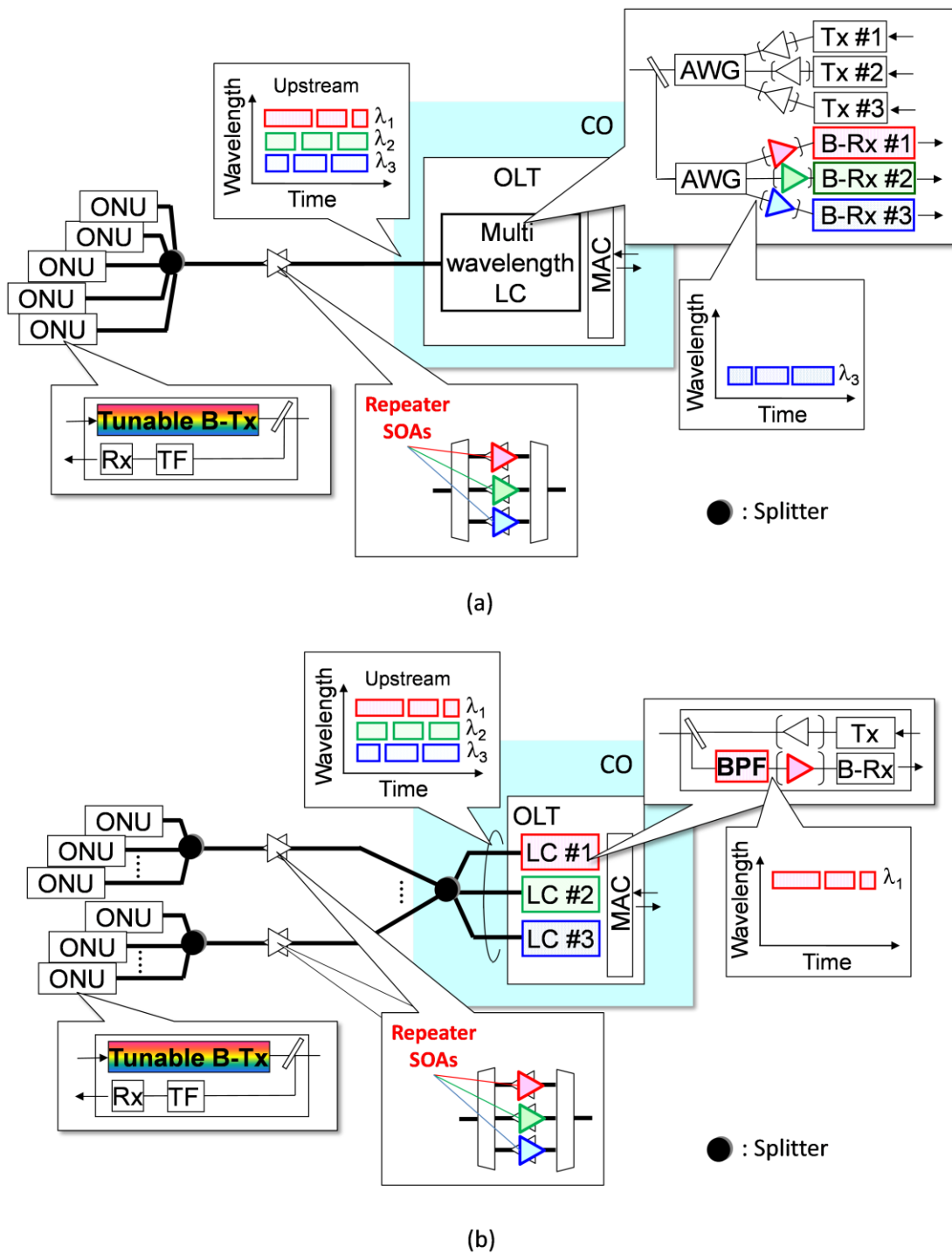


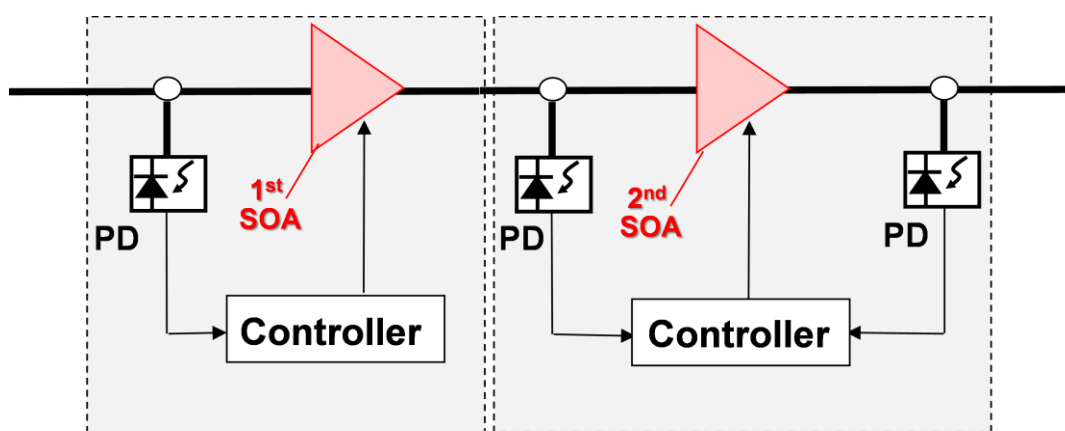
図 4-1 SOA を用いた多分岐/長延化 WDM/TDM-PON システム構成. (a)送受分離型光トランシーバを利用した場合. (b)送受一体型光トランシーバを利用した場合.

4-3 SOA の高速応答特性を利用した自動レベル制御機構

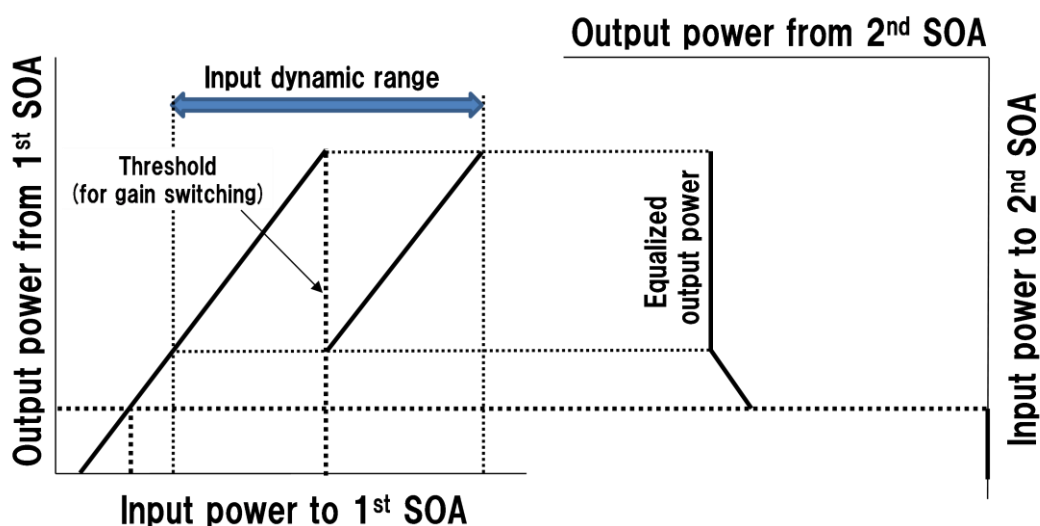
上りバースト信号増幅に SOA を適用した際に、SOA の入力ダイナミックレンジを制限する要因が二つある。第一の要因は、OLT に搭載される B-Rx の過負荷である。SOA に強バースト信号が入力されると、SOA の出力が過剰となり、SOA と OLT の距離が十分ではない場合、B-Rx の受信感度の上限を超える光信号が入力されて信号が受信できなくなる。第二の要因は、SOA のパターン効果である。同じく SOA に強信号が入力されると、SOA の過渡応答特性により出力波形が著しく劣化し（パターン効果）、信号が受信できなくなる。いずれも、SOA への入力光信号強度の上限を制限し、結果として入力ダイナミックレンジを狭めることになる。これらを回避するために、SOA の利得の高速応答特性を利用して、その出力光レベルを高速に切り替える自動レベル制御（ALC：Automatic level control）機構が必要である [6,9,10]。光増幅中継の場合は、その出力光レベルを入力光レベルに依らず一定値に制御することにより B-Rx の過負荷を回避することができる。一方、前置光増幅の場合は、出力光レベルを一定値に制御する必要はなく、強信号入力時における SOA の利得を低減するだけでよい。図 4-2 (a)、および (b) に、提案する SOA を用いた上り光増幅器の構成、およびその制御機構を示す。光増幅中継器には、広入力ダイナミックレンジ化に加えて、伝送距離を拡大するために高出力化が求められる。これらを実現するために、SOA をカスケード接続する構成とする。従来、光中継伝送システムにおいて光パケット伝送を行うために、一台の SOA を用いて、その利得を高速に制御することにより、出力光レベルを一定値に制御する技術が報告されているが [11]、ここでは、二台の SOA を用いて各々の利得を制御する。前段の SOA では、高速のフィードフォワード（FF：Feed forward）制御回路を用いて、その利得を二段階で制御する。すなわち、予め設定した閾値を下回る光強度を有する弱バースト信号フレームが入力された場合、高利得に設定し、閾値を上回る光強度を有する強バースト信号フレームが入力された場合、低利得に設定する。このような利得制御を行うことの利点は二つある。第一の利点は、前段の SOA におけるパターン効果の抑圧である。パターン効果は、SOA の利得が飽和する領域で発生するが、強信号入力に対して利得を下げることで、SOA の利得飽和を避け、パターン効果を抑圧することができる。第二の利点は、光増幅中継器の出力光レベルの精度向上である。(b) に示されるように、前段の SOA において後段の SOA への入力光レベル範囲を一旦狭めることにより、より広い入力範囲の光信号入力に対して、均一な出力光レベルを達成することができる。後段の SOA は、高速の FF 回路、およびサブ秒オーダの時定数で動作するフィードバック（FB：Feedback）回路により、一定レベルのバースト信号を出力する。また、前段の SOA に適用した利得の制御機構は、前置光増幅器として用いることにより、B-Rx の過負荷を防ぎ、入力ダイナミックレンジを拡大する効果をもたらす。従って、SOA をカスケード構成により光増幅中継器として用い、前段

の SOA 単体で前置光増幅器として用いる。

図 4-3 に、提案する制御機構を用いて製作した光増幅器の入出力光強度の関係を示す。(a)、および (b) は、それぞれ、光増幅中継器として用いた場合、および前置光増幅器として用いた場合である。(a) に示される通り、前段の SOA は、 -28.0 dBm $\sim$ -6.0 dBm の入力光レベルに対して、適切に利得の切り替えを行うことに成功している。一方、(b) においても、 -38.0 dBm $\sim$ -13.0 dBm の入力光レベルに対して同様に、適切に利得の切り替えを行うことに成功している。(a)、および (b) における利得の切り替え時の入力光レベルは、それぞれ、約 -17 dBm 、および約 -25 dBm である。また、(a) では、約 -4.5 dBm の高値に一定制御された出力を得ている。



(a)



(b)

図 4-2 SOA の利得の高速応答特性を利用したパースト信号対応光増幅器. (a)構成. (b)動作原理.

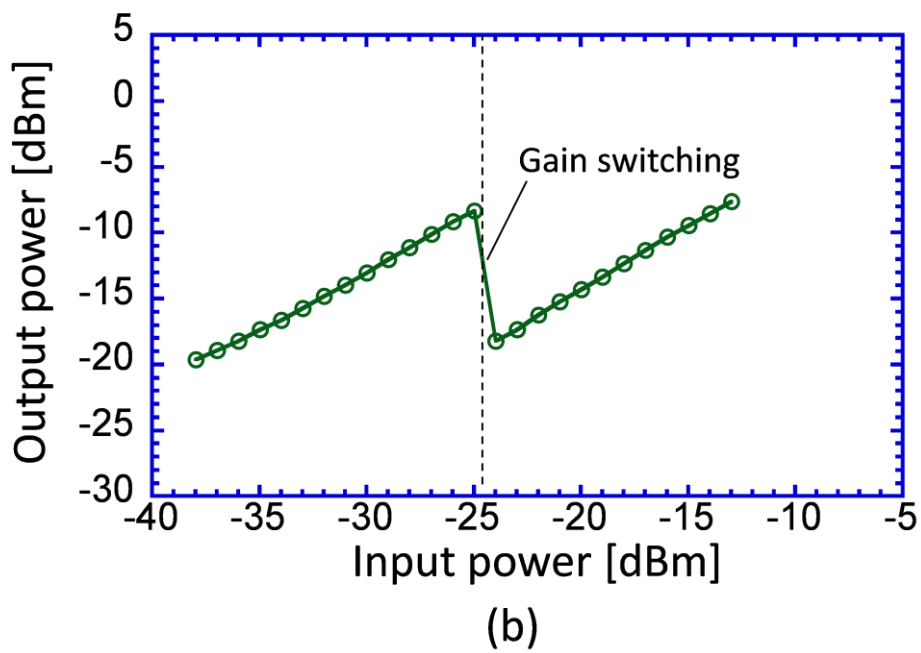
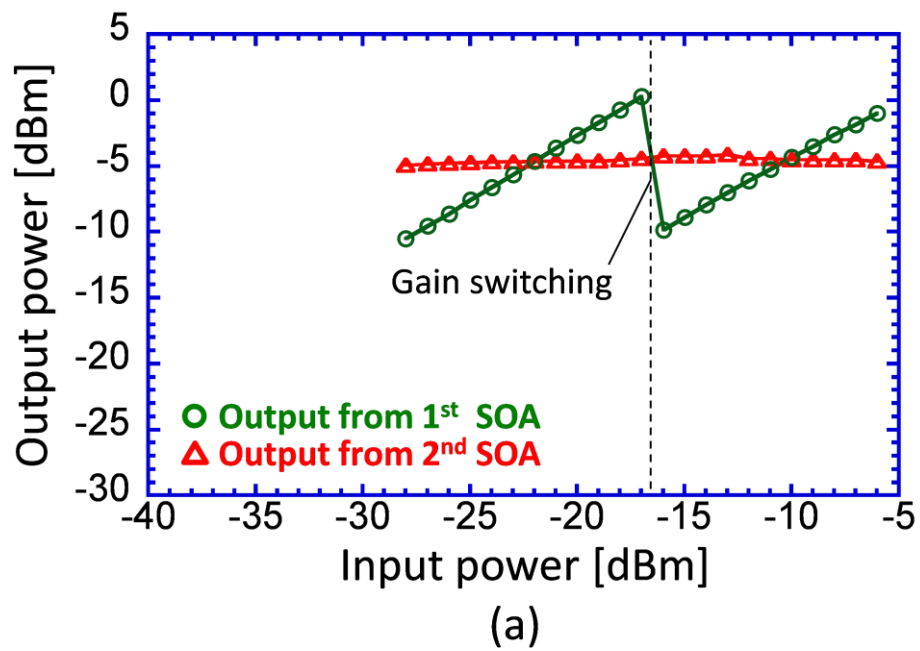


図 4-3 入力光強度に対する出力光強度の測定結果. (a)中継光増幅器の場合. (b)前置光増幅器の場合.

4-4 システム動作範囲

提案構成を用いた上り光増幅器による高出力、かつ広入力ダイナミックレンジ特性の効果を確認するため、10 Gb/s 級のバースト信号を用いてビットエラーレート (BER : Bit error rate) 測定を行った。図 4-4 に、実験系を示す。本実験系は、1 台の B-Rx、2 台の B-Tx、および製作した上り光増幅器から構成される。B-Rx は、トランスインピーダンス増幅器付きのアバランシェフォトダイオード (APD-TIA : Avalanche photo diode)、および振幅制限増幅器 (LA : Limiting amplifier) から構成される。B-Tx は、外部共振器型の波長可変型 LD (Laser diode)、データ変調用のニオブ酸リチウム (LiNbO_3) マッハツェンダー型変調器 (LN-MZ)、およびバーストフレーム生成用の音響光学変調器 (AOM : Acousto-optic modulator) から構成される。LD から出力された連続光は、LN-MZ においてパルスパターン発生器 (PPG : Pulse pattern generator) により生成された 10.3125 Gb/s のバースト信号により変調される。ここで、バースト信号フレームは、バースト信号同期パターン (0x BF 40 18 E5 C5 49 BB 59) が格納された 794.4 ns のプリアンプル、および $2^{31}-1$ 段の疑似ランダム (PRBS : Pseudo random bit sequence) パターンが格納された 19.9 μs のプリアンプルから構成される。2 台の B-Tx から送信されるバースト信号フレームのタイミングは、PPG と BER テスタに同期したタイミングパルス発生器から出力されるイネーブル信号 (Enable signal) によって制御される。バースト信号間のガードタイムは、397.2 ns に設定する。本バーストフレームパターンを用いて測定した B-Rx の最小受信感度は、-28.8 dBm である。ここで、エラーフリーに相当する $\text{BER} = 10^{-12}$ を規定し、誤り符号訂正 (FEC : Forward error correction) 技術の適用を前提として、 $\text{BER} = 10^{-3}$ においてエラーフリー動作を達成するものとした。ONU と光増幅器の区間に相当するアクセス区間の損失を、2 台の可変光減衰器 (VOA : Variable optical attenuator) (VOA1、VOA2) により調整し、光増幅と OLT の区間に相当するトランク区間の損失を、VOA3 により調整する。ただし、光増幅器を前置光増幅器として用いる場合は、VOA3 は使用しない。使用した光源の波長は、1532.68 nm であり、光信号の消光比 (ER : Extinction ratio) は、測定ごとに約 9 dB に設定する。また、B-Rx の前段に、0.5 nm の 1 dB 通過帯域幅を有する 100 GHz 間隔用の光バンドパスフィルタ (BPF : Band pass filter) を配置し、光増幅器が放出する ASE を除去する。

図 4-5 に、提案構成による上り光増幅器を光増幅中継器として用いた際の入出力波形の測定結果を示す。本測定において、弱信号フレーム、および強信号フレームの光強度を、それぞれ、-25.0 dBm、および -6.0 dBm に設定した。図示の通り、提案構成による光増幅中継器を用いることにより、19.0 dB の光強度差を有する入力バースト信号フレームを、出力において 1.2 dB の差に抑圧して出力することに成功している。

図 4-6 に、提案構成による光増幅中継器を WDM/TDM-PON システムに適用した際のシステム動作範囲の測定結果を示す。図の上部にプロットされたデータ、および下部にプロットされたデータは、それぞれ、伝送損失限界、および B-Rx の過負荷限界を示す。また図において色付けされた領域が、システムの動作範囲である。図示の通り、光増幅器の入力ダイナミックレンジは、19.0 dB (-6.0 dBm ~ -25.0 dBm) である。またこの入力ダイナミックレンジに対して、トランク区間の最大許容伝送線路損失 22.8 dB を達成している。光増幅中継器に弱信号が入力された場合に許容されるトランク区間損失が、0 dB に一致しないデータ点が存在する。しかしながら、図 4-1 (a) の多波長光トランシーバには、B-Rx の前段に上り信号と下り信号を合分波する WDM フィルタ、および波長合分波器が配置されており、これらの挿入損失を考慮する必要がある。WDM フィルタの損失は約 1 dB、また波長合分波器として AWG ではなく、挿入損失の少ない誘電体多層膜フィルタを用いれば、4 波長対応のもので損失は約 2 dB である。計 3 dB の挿入損失を考慮すると、この損失ギャップは無視することができる。つまり、トランク区間の伝送距離は 0 km から対応可能である。また、3 dB の挿入損失を考慮しても、トランク区間の損失マージンとして 19.8 dB が得られる。

WDM/TDM-PON の標準仕様は未定であるが、上記の光増幅器への入力ダイナミックレンジ (19.0 dB) は、次世代システムとして標準化されている 10G-E (gigabit Ethernet) PON において B-Rx に実際に光信号が入力される範囲に相当する。また、WDM/TDM-PON の上り波長は光ファイバの損失が少ない C 帯である。これらを考慮すると、アクセス区間は、64 分岐、20 km に相当するものと考えられる。さらに、C 帯における光ファイバの損失を 0.275 dB/km とすると、上記のトランク区間の許容損失マージン (19.8 dB) は、72 km の伝送距離に相当する。アクセス区間の伝送距離 20 km を考慮すると、本光増幅中継器を用いることにより、64 分岐システムを 90 km 超まで長延化し得ることになる。

図 4-7 に、提案構成による前置光増幅器を WDM/TDM-PON に適用した際の BER の測定結果を示す。図示の通り、最小受信感度、および入力ダイナミックレンジとして、それぞれ、-36.8 dBm、および 23.8 dB が達成されている。得られた最小受信感度は、使用した B-Rx の最小受信感度を 8.0 dB 改善している。また、得られた入力ダイナミックレンジは、使用した B-Rx の入力ダイナミックレンジ 22.8 dB を上回る。8.0 dB の受信感度の改善効果は、過剰損失を見込んだ 4 分岐スプリッタの損失と同等である。従って、本前置光増幅器を用いることにより、通常の 64 分岐、20 km のシステムを 256 分岐まで多分岐化し得ることになる。

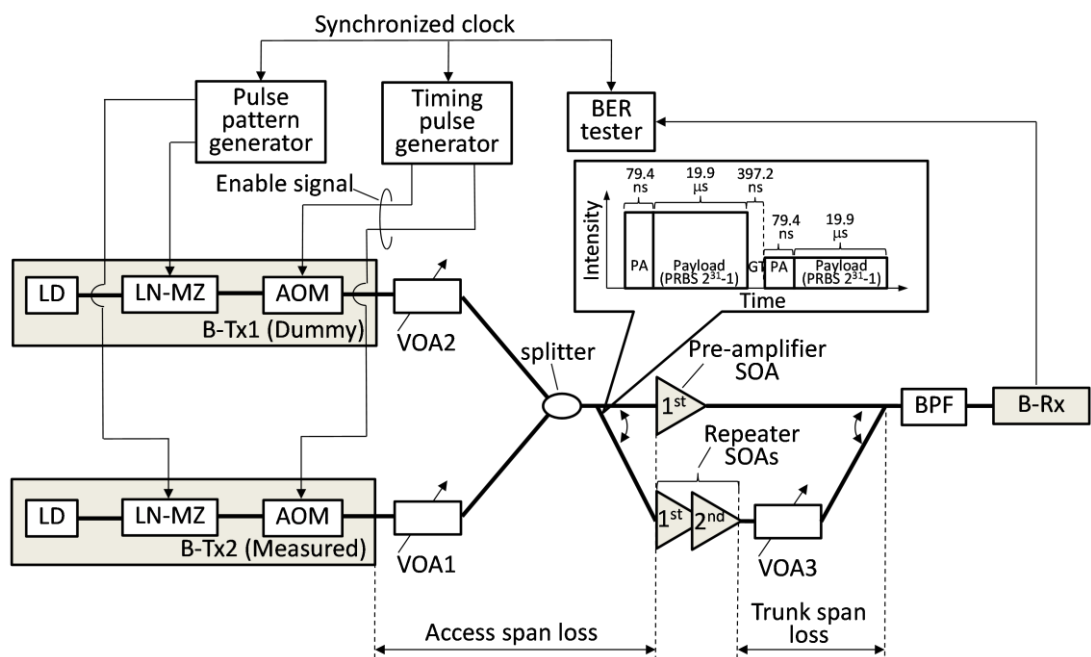


図 4-4 BER 測定実験系.

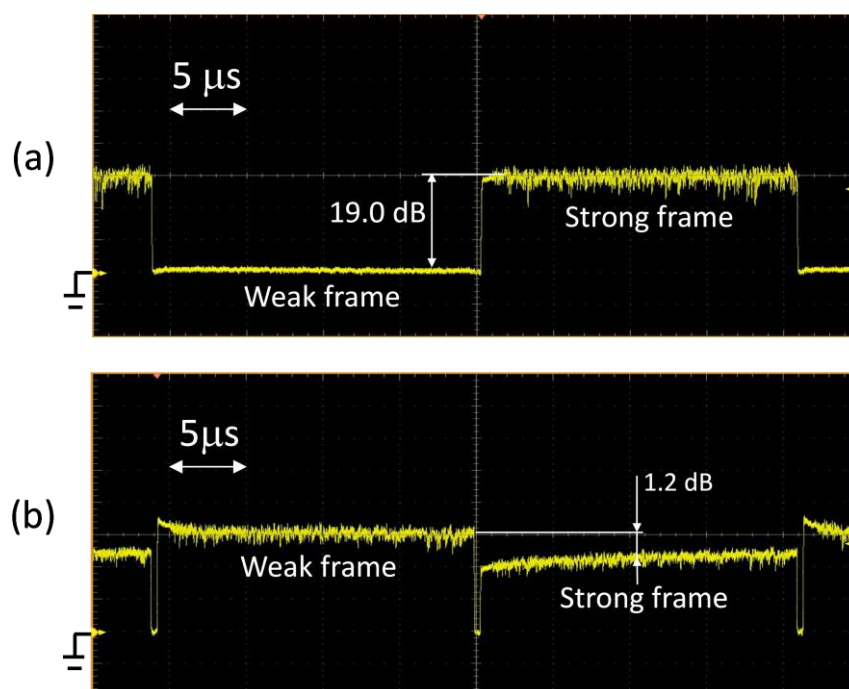


図 4-5 提案するバースト信号対応 SOA の入出力波形. (a)入力波形. 弱信号フレーム, および強信号フレームの光強度を, それぞれ, -25.0 dBm, および -6.0 dBm に設定. (b)出力波形.

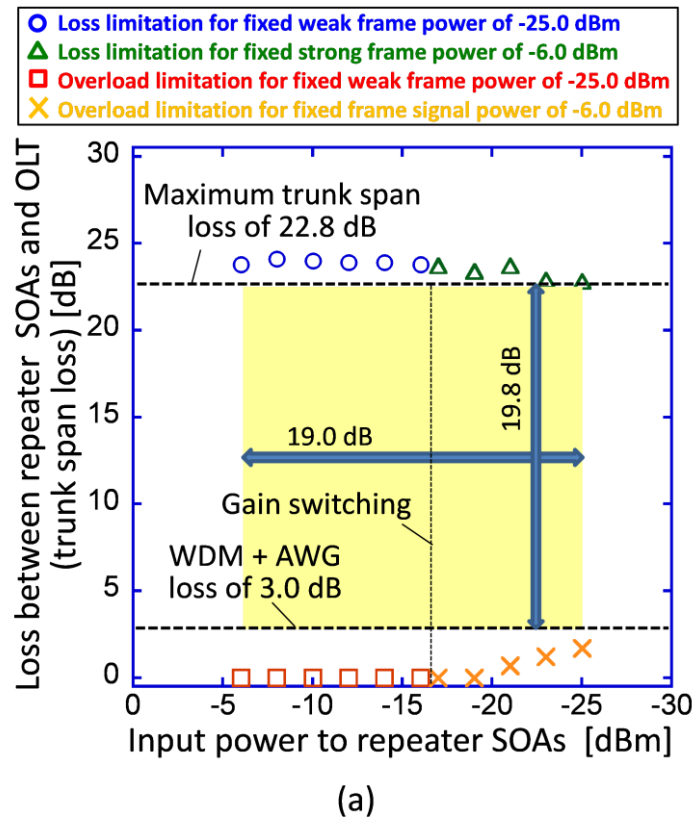


図 4-6 光増幅中継器として用いた場合のシステム動作範囲.

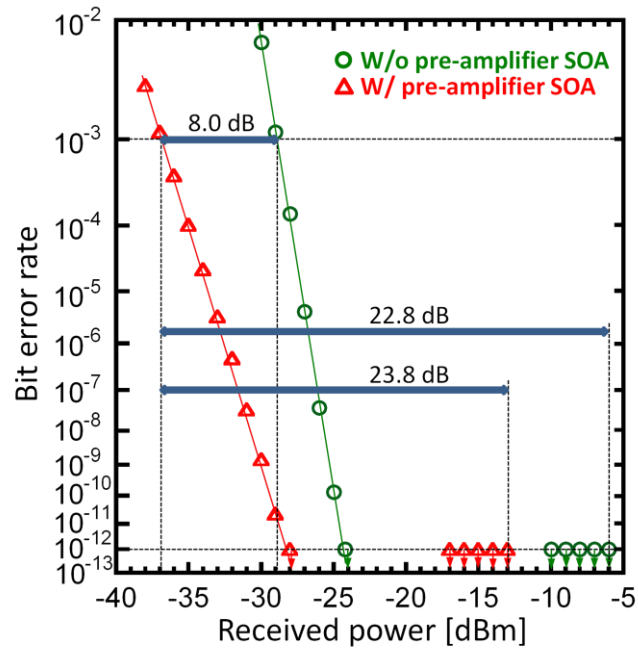


図 4-7 前置光増幅器として用いた場合の BER 測定結果.

4-5 まとめ

多分岐/長延化 WDM/TDM-PON システムにおいて使用する上り光増幅器の経済化を実現するために、SOA の利得の高速応答特性を利用したバースト信号対応光増幅器を提案した。本システムの上り信号は波長ごとに間欠的に送信されるバースト信号であるため、単一の光増幅器により複数波長を一括して増幅することは極めて困難である。そのため、各波長のバースト信号を個別に増幅することになり使用台数を要することから、光増幅媒体として最も経済化が期待できる SOA を用いる。光増幅中継システムの伝送距離を飛躍的に拡大するために、SOA をカスケード接続し高出力化を図る。また、OLT に搭載される B-Rx の過負荷を防ぐため、SOA の駆動電流を変化させることにより利得を制御し、入力光信号強度に依らず一定レベルの光信号を出力する。前段の SOA は、高速のフィードフォワード FF 制御回路を用いて、その利得を二段階で制御する。すなわち、予め設定した閾値を下回る光強度を有する弱信号フレームが入力された場合、高利得に設定し、閾値を上回る光強度を有する強信号フレームが入力された場合、低利得に設定する。本利得制御により、前段、および後段の SOA におけるパターン効果の発生を抑圧すると同時に、前段の SOA において後段の SOA への入力光レベル範囲を制限することにより、より広い入力範囲の光信号入力に対して、高精度かつ均一な出力光レベルを得る。また、前段の SOA に適用した利得の制御機構は、前置光増幅器として用いることにより、B-Rx の過負荷を防ぎ、入力ダイナミックレンジを拡大する効果をもたらす。従って、カスケード構成の SOA を光増幅中継器として用いてシステムを長延化し、前段の SOA 単体を前置光増幅器として用いてシステムを多分岐化する。提案する制御機構を用いた光増幅器を製作し、その特性を評価した。結果、光増幅中継器として動作させる場合、前段の SOA は、 $-28.0\text{ dBm} \sim -6.0\text{ dBm}$ の入力範囲に対して、約 -4.5 dBm の高値、かつ一定レベルの光信号を出力することに成功した。一方、前置光増幅器として動作させる場合、 $-38.0\text{ dBm} \sim -13.0\text{ dBm}$ の入力範囲に対して、約 -25 dBm の入力光強度において利得の切り替えに成功した。また、提案構成による光増幅器の高出力、および広入力ダイナミックレンジ特性の効果を確認するため、 10 Gb/s 級のバースト信号を用いて BER 測定を行った。光増幅中継の場合、光増幅器に入力される入力光強度範囲 19 dB に対して、トランク区間の許容伝送線路損失マージン 19.8 dB を達成した。本損失マージンは、C 帯における光ファイバの損失を 0.275 dB/km とすると、トランク区間の伝送距離 72 km に相当する。 20 km のアクセス区間を含めると、 64 分岐システムの伝送距離を、 $20 \sim 90\text{ km}$ 超まで長延化することができる。一方、前置光増幅の場合、最小受信感度 -36.8 dBm 、および入力ダイナミックレンジ 23.8 dB を達成した。最小受信感度の改善効果は 8.0 dB であり、過剰損失を見込んだ 4 分岐スプリッタの損失と同等である。従って、通常の 64 分岐、 20 km のシステムを、 256 分岐まで多分岐化することができる。

4-6 参考文献

- [1] F. Effenberger, "XG-PON1 versus NG-PON2: which one will win?," ECOC'2012, Tu.4.B.1, 2012.
- [2] K. Hara, H. Nakamura, S. Kimura, M. Yoshino, S. Nishihara, S. Tamaki, J. Kani, N. Yoshimoti, and H. Hadama, "Flexible load balancing technique using dynamic wavelength bandwidth allocation (DWBA) toward 100Gbit/s-class-WDM/TDM-PON," ECOC'2010, Tu.3.B.2, 2010.
- [3] H. Nakamura, S. Takamki, K. Hara, S. Kimura, and H. Hadama, "40Gbit/s λ -tunable stacked-WDM/TDM-PON using dynamic wavelength and bandwidth allocation," OFC/NFOEC'2011, OThT4, 2011.
- [4] H. Nakamura, K. Taguchi, S. Tamaki, T. Mizuno, Y. Hashizume, T. Yamada, M. Ito, H. Takahashi, S. Kimura, and N. Yoshimoto, "40Gbit/s 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] Y. Kai, S. Yoshida, K. Sone, G. Nakagawa, and S. Kinoshita, "MSA compatible package size, dual-channel fast automatic level controlled SOA subsystems for optical packet and PON signals," ECOC'2011, Mo.2.A.2, 2011.
- [6] J. Sugawa and H. Ikeda, "Development of OLT using semiconductor optical amplifiers as booster and preamplifier for loss-budget extension in 10.3-Gb/s PON system," OFC/NFOEC'2012, OTh4G.4, 2012.
- [7] D. Veen, W. Pohlmann, J. Galaro, B. Deppisch, A. Duque, M. Lau, B. Farah, T. Pfeiffer, and P. Vetter, "System demonstration of a time and wavelength-set division multiplexing PON," ECOC'2013, We.3.F.2, 2013.
- [8] 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," ECOC'2013, Mo.4.F.5, 2013.
- [9] M. Fujiwara, R. Koma, and N. Yoshimoto, "Burst frame power equalizer that controlling gains of cascaded SOAs for long-reach WDM/TDM PON systems," ECOC'2013, Tu.3.F.2, 2013.
- [10] N. Cheng, S. Yen, J. Cho, Z. Xu, T. Yang, Y. Tang, and L. Kazovsky, "Long-reach passive optical networks with adaptive power equalization using semiconductor optical amplifiers," ACP'2009, FS4, 2009.
- [11] E. AW, T. Lin, A. Wonfor, M. Glick, K. Williams, R. Pentty, and I. White, "Layerd control enable large scale SOA switch fabric," ECOC'2006, Th1.2.5, 2006.

第 5 章 結論

本論文は、次世代~将来の光アクセスシステムとして期待されている 10 Gb/s 級の TDM-PON (Time division multiplexing passive optical network) システム、および WDM (Wavelength division multiplexing)/TDM-PON システムを、光増幅器を用いて多分岐/長延化し、加入者を効率的に収容する技術についてまとめたものである。

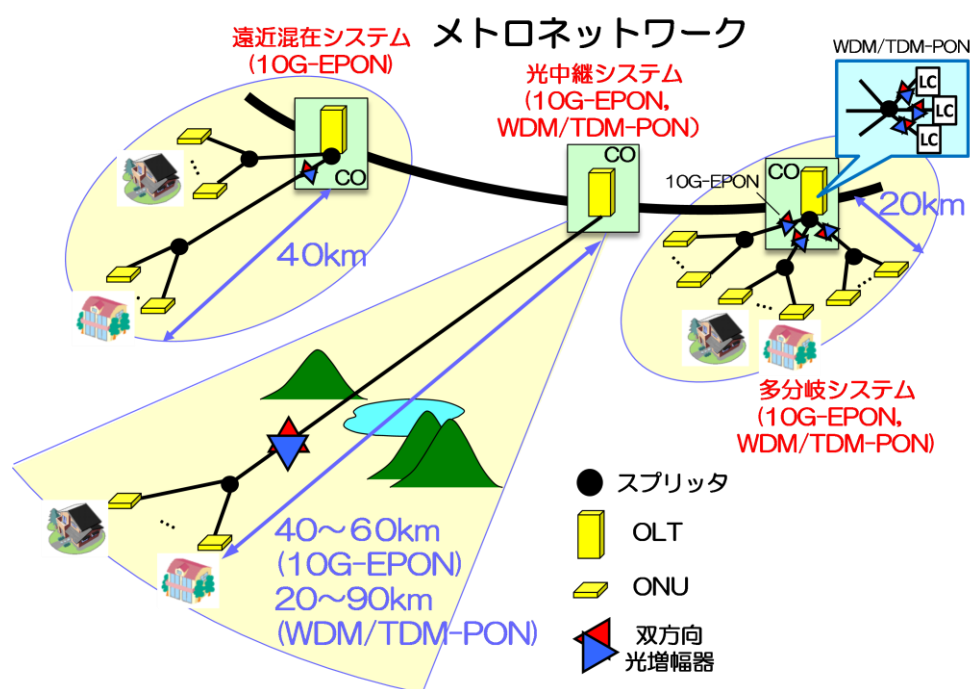
第 2 章では、10 Gb/s 級の長延化 TDM-PON システムにおいて、上り光増幅器の高出力化、および広入力ダイナミックレンジ化を実現するために、高速 ALC (Automatic level control) 機構を備えたバースト信号対応光増幅器を提案した。20 dB 以上の高利得を得るため、PDFA (Praseodymium-doped fiber amplifier) をカスケード接続する構成とした。前段の PDFA は AGC (Automatic level control) 機構を備え、入力バースト信号の光強度に依らず利得を一定値に保ち、強信号入力時の光サージの発生を抑える。一方、後段の PDFA は、利得の制御は行わず前方励起により増幅する。カスケード接続した PDFA の間に高速 ALC 回路を配置し、FF (Feed forward) 制御により出力光強度を一定値に保つ。これにより、後段の PDFA を利得の未飽和領域で動作させ光サージの発生を抑える。同時に、後段の PDFA の出力光強度が一定値に保たれることから、光増幅器と OLT (Optical line terminal) の距離に依らずバースト光受信器 (B-Rx) の過負荷を防ぐ。これらの効果により、光増幅器の広入力ダイナミックレンジ化が実現される。提案構成による ALC-PDFA を製作し、その性能を評価した。結果、 -28.0 dBm ~ -6.5 dBm の光強度を有するバースト信号入力に対して、約 -5 dBm の一定値に保たれた高出力を得ることに成功した。また、製作した ALC-PDFA の高出力、かつ広入力ダイナミックレンジ特性により得られる効果を確認するため、10 Gb/s 級のバースト信号を用いて BER (Bit error rate) 測定を行った。結果、ALC-PDFA に入力される光信号強度範囲 -29.0 dBm ~ -6.5 dBm (22.5 dB) に対して、トランク区間の最大許容伝送線路損失は 22.0 dB であった。この入力ダイナミックレンジは、B-Rx の入力ダイナミックレンジ相当であるため、本 ALC-PDFA を用いることにより、20 km のアクセス区間を円滑にトランク区間に接続し、ONU のプラグアンドプレイ機能を担保することができる。また損失値は、アクセス区間も含めると 60 km 超の伝送距離に相当する。さらに、トランク区間の最小許容伝送線路損失は約 8 dB であり、16 km の伝送距離に相当する。従って、本 ALC-PDFA を適用することにより、収容局から 40 ~ 60 km に位置する加入者を収容することができる。

さらに、光増幅媒体を SOA (Semiconductor optical amplifier) に変更した提案構成によるバースト信号対応光増幅器を用いて 100 km 伝送フィールドトライアルを行い、双方向のリアルタイム HDTV (High definition television) 映像伝送を 8 時間に渡り安定的に行うことに成功した。

第 3 章では、電源供給の容易な収容局に光増幅器を設置することにより、単一の OLT により複数の加入者をより効率的に収容するシステム構成を提案した。具体的な提案システムは、「単一 OLT により局内スプリッタの一分岐に光増幅器を設置して遠距離に位置する加入者を収容する一方、他の分岐には光増幅器を設置することなく近距離に位置する加入者を収容する遠近混在システム」、および「局内スプリッタの全分岐に光増幅器を設置して多分岐スプリッタの損失を補償し、単一 OLT により近距離に位置する多数の加入者を収容する多分岐システム」である。本システムに適用する光増幅器には、B-Rx の過負荷を防ぐため、広入力ダイナミックレンジ特性が求められると同時に、局内スプリッタにおける上り信号の合流時に生じる ASE (Amplified spontaneous emission) 雑音の重畳を回避する機能が必要である。これらを実現するために、第 2 章で提案した ALC 機構を備えたバースト信号対応光増幅器を適用する。本光増幅器は、出力光強度を一定値に制御することにより、B-Rx の過負荷を防ぎ広入力ダイナミックレンジ化を達成するだけでなく、入力信号が予め設定した閾値を下回る場合、出力を遮断する機能を有する。すなわち、上りバースト信号が入力されない時間において ASE を遮断し、他の分岐から合流する上り信号への ASE の重畳を防ぐ。本光増幅器の広入力ダイナミックレンジ特性、および ASE 雑音の抑圧特性による効果を確認するため、遠近混在システム、および多分岐システムを想定し、10 Gb/s 級のバースト信号を用いて BER 測定を行った。結果、遠近混在システムでは、近距離の加入者に影響を与えることなく、光増幅器を設置した分岐の許容伝送線路損失が 10.9 dB 改善されることが示された。この効果により、収容局から 0 ~ 40 km の距離に位置する加入者を、単一 OLT により収容可能である。一方、多分岐システムでは、局内スプリッタの他の分岐に接続される加入者に影響を与えることなく、分岐ごとの許容伝送路損失が 4.0 dB 改善されることが示された。この効果により、単一 OLT で計 256 分岐が実現できる。

第 4 章では、多分岐/長延化 WDM/TDM-PON システムにおける上り光増幅器の経済化を実現するために、SOA の利得の高速応答特性を利用したバースト信号対応光増幅器を提案した。本システムでは、バースト信号を波長ごとに個別に増幅する必要があることから、最も経済化が見込める SOA を用いる。光増幅中継システムの伝送距離を飛躍的に拡大するために、SOA をカスケード接続して高出力化を図る。また、B-Rx の過負荷を防ぐため、SOA の駆動電流を変化させて利得を制御し、入力光信号強度に依らず一定レベルの光信号を出力する。前段の SOA は、高速のフィードフォワード FF 制御回路を用いて、その利得を二段階で制御する。すなわち、予め設定した閾値を下回る光強度の弱バースト信号が入力されると高利得に設定し、閾値を上回る光強度の強バースト信号が入力されると低利得に設定する。本利得制御により、前段、および後段の SOA におけるパターン効果の発生を抑えると同時に、前段の SOA において後段の SOA への入力光レベル範囲を制限することにより、広い入

力範囲の光信号入力に対して、高精度かつ一定値の出力光レベルを得る。前段の SOA に適用した利得の制御機構は、前置光増幅器として用いることにより、B-Rx の過負荷を防ぎ、入力ダイナミックレンジを拡大する効果をもたらす。従って、カスケード構成の SOA を光増幅中継器として用いて長延化し、前段の SOA を前置光増幅器として用いて多分岐化する。提案する制御機構を用いた光増幅器を製作し、その特性を評価した。結果、光増幅中継の場合、 $-28.0\text{ dBm} \sim -6.0\text{ dBm}$ の入力範囲に対して、約 -4.5 dBm の高値、かつ一定レベルの出力を得ることに成功した。一方、前置光増幅の場合、 $-38.0\text{ dBm} \sim -13.0\text{ dBm}$ の入力範囲に対して、約 -25 dBm の入力光強度において利得の切り替えに成功した。また、提案構成による光増幅器の高出力、および広入力ダイナミックレンジ特性による効果を確認するため、 10 Gb/s 級のバースト信号を用いて BER 測定を行った。光増幅中継の場合、光増幅器への入力光強度範囲 $-25.0\text{ dBm} \sim -6.0\text{ dBm}$ (19 dB) に対して、トランク区間の許容伝送線路損失マージン 19.8 dB を達成した。この損失マージンは、 20 km のアクセス区間を含めると $20 \sim 90\text{ km}$ 超の伝送距離に相当する。一方、前置光増幅器の場合、 8.0 dB の最小受信感度の改善効果を達成し、**256** 分岐の多分岐化が実現できる。



謝辞

本論文を作成するにあたり、懇切なる御指導、および御鞭撻を賜りました 北海道大学大学院情報科学研究科 吉本直人客員教授（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 光アクセスシステムプロジェクト プロジェクトマネージャ）に謹んで深謝の意を表します。また、有益な御指導、および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、野島俊雄教授、齊藤晋聖教授 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 2009 年から取り組んでいる PON システムの多分岐/長延化技術に関する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 光アクセスシステムプロジェクト フルサービスアクセスグループ 鈴木謙一グループリーダー、ならびに、同プロジェクト 次世代アクセス方式グループ 木村俊二グループリーダーに深謝いたします。さらに、早稲田大学大学院 坪川信教授（元、光多重システムプロジェクト プロジェクトマネージャ）、三菱電機株式会社 雲崎清美統括（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）、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）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、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。

本論文の第 2 章、および第 3 章で述べた 10 Gb/s 級 TDM-PON システムの多分岐/長延化技術の研究は、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「広域加入者系光ネットワーク技術の研究開発」を受託する形で行いました。2009 年から 2011 年までの 3 年間、鈴木謙一グループリーダー、石井比呂志主幹研究員には、多くの御指導、御助言をいただき、今井健之研究主任、田口勝久研究員には、研究業務を具体的に進めていく上で多くのご協力をいただきました。ここに感謝申し上げます。また、フィールドトライアルにおいて、快く実験場所をご提供いただきました NTT 東日本株式会社 北海道支店 の関係者の皆様、ならびに、本研究の委託元である NICT の関係者の皆様に厚く御礼申し上げます。

本論文の第 4 章で述べた WDM/TDM-PON システムの多分岐/長延化技術の研究は、その一部を、総務省の委託研究「加入者ネットワーク長延化・多分岐化」を受託する形で行っています。2012 年から現在まで、石井比呂志主幹研究員には、引き続き多くの御指導、御助言をいただき、胡間遼研究員には、研究業務を具体的に進めていく上で多くのご協力をいただきました。ここに感謝申し上げます。また、本研究の委託元である 総務省 の関係者の皆様に厚く御礼申し上げます。

最後に、上記受託研究の立ち上げ時に、プロジェクト補佐として御尽力された、

NTT コミュニケーションズ株式会社 鈴木裕生課長、ならびに、可児淳一主幹研究員に御礼申し上げるとともに、北海道大学大学院での学生生活をサポートいただいた、NTT 知的財産センタ 吉野學課長、ならびに NTT エレクトロニクス株式会社 中村浩崇主事 に感謝いたします。

発表論文

(i) 関連論文

(i-i) 主著論文

【論文】

- [1] M. Fujiwara, K.-I. Suzuki, K. Taguchi, T. Imai, H. Ishii, and N. Yoshimoto, “1G / 10G coexistence long-reach PON system using ALC burst-mode SOAs,” *IEICE Electron. Expr.*, Vol. 9, No. 5, pp. 371-377, Mar. 2012.
- [2] M. Fujiwara, K.-I. Suzuki, T. Imai, K. Taguchi, H. Ishii, and N. Yoshimoto, “ALC burst-mode optical fiber amplifiers for 10 Gb/s-class long-reach PONs,” *IEEE/OSA J. Opt. Commun. Netw.*, Vol. 4, No. 8, pp. 614-621, Aug. 2012.
- [3] M. Fujiwara, T. Imai, K. Taguchi, K.-I. Suzuki, H. Ishii, and N. Yoshimoto, “Field trial of 100-km reach symmetric-rate 10G-EPON system using automatic level controlled burst-mode SOAs,” *IEEE/OSA J. Lightw. Technol.*, Vol. 31, No. 4, pp. 634-640, Feb. 2013.
- [4] M. Fujiwara, K.-I. Suzuki, K. Taguchi, T. Imai, H. Ishii, and N. Yoshimoto, “Effective coexistence between normal- and extended-distance PON areas by using ALC-SOA,” *IEICE Commun. Expr.*, Vol. 2, No. 6, pp. 233-238, Jun. 2013.
- [5] M. Fujiwara, K.-I. Suzuki, and N. Yoshimoto, “Effective ONU accommodation through PON systems with multi-stage splitter configuration using ALC burst-mode SOAs,” *IEICE Trans. Commun.*, Vol. E97-B, No. 2, pp. 432-440, Feb 2014.

【国際会議(査読付)】

- [1] M. Fujiwara, K.-I. Suzuki, K. Hara, T. Imai, K. Taguchi, H. Ishii, N. Yoshimoto, and H. Hadama, “Burst-mode compound optical amplifier with automatic level control circuit that offers enhanced setting flexibility in a 10 Gb/s-Class PON”, *ECOC'2010*, PD3.2, Sep. 2010.
- [2] M. Fujiwara, K.-I. Suzuki, K. Taguchi, T. Imai, H. Ishii, N. Yoshimoto, and H. Hadama, “Effective accommodation for users located long / short distance area through PONs with dual stage splitter configuration using ALC burst-mode optical amplifier”, *OFC/NFOEC'2011*, NThF3, Mar. 2011.
- [3] M. Fujiwara, T. Imai, K. Taguchi, K.-I. Suzuki, H. Ishii, and N. Yoshimoto, “Field trial of 79.5-dB loss budget, 100-km reach 10G-EPON system using ALC burst-mode SOAs and EDC,” *OFC/NFOEC'2012*, PDP5D8, Mar. 2012.

[4] M. Fujiwara, R. Koma, and N. Yoshimoto, "Burst frame power equalizer that controlling gains of cascaded SOAs for long-reach WDM/TDM PON systems", ECOC'2013, Tu.3.F.2, Sep. 2013.

[5] M. Fujiwara, "Gain-controlled optical amplifier technologies for long-reach and high-splitting-ratio PON systems", OFC'2014, Tu2C.3, Mar. 2014.

【国内講演】

[1] 藤原正満, 田口勝久, 今井健之, 鈴木謙一, "高速 AGC/ALC 技術の適用による光増幅 PON 中継システムの動作領域拡大," 2011 年電子情報通信学会総合大会, B-8-10, 2011 年 3 月.

(i-ii) 共著論文

【論文】

[1] K. Taguchi, M. Fujiwara, T. Imai, K.-I. Suzuki, H. Ishii, and N. Yoshimoto, "Optically-amplified PON system using XGM-based ALC technique," IEICE Electron. Expr. Vol. 8, No. 21, pp. 1836-1841, Nov. 2011.

[2] K. Taguchi, M. Fujiwara, T. Imai, K.-I. Suzuki, H. Ishii, and N. Yoshimoto, "Pattern effect suppression by injecting directly modulated synchronized gain-clamping light using inverted signal for PON application of SOA," IEEE/OSA J. Lightw. Technol., in press.

【国際会議(査読付)】

[1] K.-I. Suzuki, M. Fujiwara, T. Imai, N. Yoshimoto, and H. Hadama, "128 x 8 and 60 km long-reach PON transmission using 27 dB-gain hybrid burst-mode optical fiber amplifier and commercial giga-bit PON system, OFC/NFOEC'2010, NWB3, Mar. 2010.

[2] K. Taguchi, M. Fujiwara, T. Imai, K.-I. Suzuki, H. Ishii, N. Yoshimoto, and H. Hadama, "Applicable area estimation of bidirectional optical amplifiers to 10-Gb/s Class long-reach PON systems", COIN'2010, MoA1-4, Jul. 2010.

[3] K.-I. Suzuki, M. Fujiwara, K. Taguchi, T. Imai, H. Ishii, N. Yoshimoto, and H. Hadama, "128 x 8 and 80 km long-reach dual-rate 10G-EPON transmission using ALC-hybrid burst-mode optical fiber amplifier and SOA pre-amplifier," ECOC'2011, Mo.1.C.3, Sep. 2011.

[4] K. Taguchi, M. Fujiwara, T. Imai, K.-I. Suzuki, H. Ishii, and N. Yoshimoto, "Pattern effect suppression technique of synchronized gain-clamping light injection

for downstream SOA in optically-amplified PON systems”, OFC/NFOEC’2012, OTh4G.5, Mar. 2012.

【国内講演】

- [1] 田口勝久, 藤原正満, 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研究,” 電子情報通信学会技術研究報告, 通信方式, CS2009-68, pp. 7-12, 2010 年 1 月.
- [2] 田口勝久, 藤原正満, 今井健之, 鈴木謙一, 吉本直人, 葉玉寿弥, “4×8 分岐長延化 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,” 2010 年電子情報通信学会総合大会, B-8-5, 2010 年 3 月.
- [3] 鈴木謙一, 田口勝久, 藤原正満, 今井健之, 吉本直人, 葉玉寿弥, “10G-EPON システムの広域化における課題と要求条件,” 電子情報通信学会, 通信方式, CS2010-70, pp. 29-33, 2011 年 1 月.
- [4] 今井健之, 藤原正満, 田口勝久, 鈴木謙一, “柱上設置型光増幅 PON 中継器,” 2011 年電子情報通信学会総合大会, B-10-71, 2011 年 3 月.
- [5] 今井健之, 藤原正満, 田口勝久, 鈴木謙一, “屋外設置型 PON 光増幅器,” 電子情報通信学会技術研究報告, 通信方式, CS2011-14, pp. 23-27, 2011 年 7 月.
- [6] 田口勝久, 藤原正満, 今井健之, 鈴木謙一, 石井比呂志, 吉本直人, “GE-PON システムにおける半導体光増幅器の適用領域,” 2011 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-8-25, 2011 年 9 月.
- [7] 田口勝久, 藤原正満, 今井健之, 鈴木謙一, 石井比呂志, 吉本直人, “同期ゲインクランプ光を用いた SOA のパターン効果抑圧,” 2012 年電子情報通信学会総合大会, B-8-56, 2012 年 3 月.
- [8] 田口勝久, 藤原正満, 今井健之, 鈴木謙一, 石井比呂志, 吉本直人, “10-Gb/s 級光増幅 PON システムへの XGM-ALC 技術の適用,” 2012 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-8-23, 2012 年 9 月.
- [9] 胡間遼, 藤原正満, 木村俊二, 吉本直人, “長延化 WDM/TDM-PON における光増幅器の配置に関する一検討,” 2013 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-8-25, 2013 年 9 月.

(ii) その他の論文

【論文】

- [1] N. Takachio, H. Suzuki, M. Fujiwara, J. Kani, K. Iwatsuki, H. Yamada, T. Shibata, and T. Kitoh, “Wide area gigabit access network based on 12.5GHz spaced 256 channel super-dense WDM technologies,” IEE Electron. Lett., Vol. 37, No. 5, pp.

309-311, Mar. 2001.

[2] M. Fujiwara, J. Kani, H. Suzuki, K. Araya, and M. Teshima, "Flattened optical multicarrier generation of 12.5 GHz spaced 256 channels based on sinusoidal amplitude and phase hybrid modulation," *IEE Electron. Lett.*, Vol. 37. No. 15, pp. 967-968, Jul. 2001.

[3] H. Suzuki, M. Fujiwara, N. Takachio, K. Iwatsuki, T. Kitoh, and T. Shibata, "12.5-GHz spaced 1.28-Tb/s (512-Channel $\times$ 2.5Gb/s) super-dense WDM transmission over 320-km SMF using multiwavelength generation technique," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, pp. 405-407, Mar. 2002.

[4] J. Kani, K. Akimoto, M. Fukui, M. Teshima, M. Fujiwara, and K. Iwatsuki, "Asymmetric bandwidth wide-area access network based on super-dense WDM-technologies," *IEICE Trans. Commun.*, Vol. E85-B, No. 8, pp. 1426-1433, Jun. 2002.

[5] J. Kani, M. Teshima, M. Fujiwara, and K. Iwatsuki, "1000-channel SD-WDM light source employing optical multicarrier generation scheme using sinusoidal amplitude-phase hybrid modulation," *IEE Electron. Lett.*, Vol. 38. No. 12, pp. 575-576, Aug. 2002.

[6] M. Fujiwara, M. Teshima, and K. Iwatsuki, "Narrow bandwidth polarisation scrambler using delay-coupled binary phase pulse for super-dense WDM networks," *IEE Electron. Lett.*, Vol. 39. No. 5, pp. 452-453, Mar. 2003.

[7] M. Fujiwara, M. Teshima, J. Kani, H. Suzuki, N. Takachio, and K. Iwatsuki, "Optical carrier supply module using flattened optical multicarrier generation based on sinusoidal amplitude and phase hybrid modulation," *IEEE/OSA J. Lightw. Technol.*, Vol. 21, No. 11, pp. 2705-2714, Nov. 2003.

[8] K. Iwatsuki, J. Kani, H. Suzuki, and M. Fujiwara, "Access and metro networks based on WDM technologies," *IEEE/OSA J. Lightw. Technol.*, Vol. 22, No. 11, pp. 2623-2630, Nov. 2004.

[9] H. Suzuki, M. Fujiwara, K. Iwatsuki, A. Hirata, and T. Nagatsuma, "Photonic millimeter-wave generator using intensity and phase modulators for 10 Gbit/s wireless link," *IEE Electron. Lett.*, Vol. 41, No. 6, pp. 355-366, Mar. 2005.

[10] M. Fujiwara, H. Suzuki, K. Iwatsuki, and M. Sugo, "Noise characteristics of signal reflected from ASE-injected FP-LD in loopback access networks," *IEE Electron. Lett.*, Vol. 42. No. 2, pp. 111-112, Jan. 2006.

[11] M. Fujiwara, J. Kani, H. Suzuki, and K. Iwatsuki, "Impact of backreflection on upstream transmission in WDM single-biber loopback access networks," *IEEE/OSA J. Lightw. Technol.*, Vol. 24, No. 2, pp. 740-746, Feb. 2006.

- [12] H. Suzuki, M. Fujiwara, and K. Iwatsuki, "Application of super-DWDM technologies to terrestrial terabit transmission systems," *IEEE/OSA J. Lightw. Technol.*, Vol. 24, No. 5, pp. 1998-2005, May. 2006.
- [13] M. Fujiwara, H. Suzuki, N. Yoshimoto, K. Iwatsuki, and T. Imai, "Multiwavelength monitoring by dithering temperature of directly-modulated laser diodes," *IEE Electron. Lett.*, Vol. 42, No. 13, pp. 770-771, Jun. 2006.
- [14] M. Fujiwara, H. Suzuki, and K. Iwatsuki, "Narrow-bandwidth polarization-scrambling technique using delay-coupled binary phase pulse for carrier-distributed WDM networks," *IEEE/OSA J. Lightw. Technol.*, Vol. 24, No. 7, pp. 2798-2805, Jul. 2006.
- [15] M. Fujiwara, H. Suzuki, N. Yoshimoto, and K. Iwatsuki, "Loss budget expansion technique using gain-saturated SOA in WDM single-fiber loopback access networks," *Elsevier Opt. Fiber Technol.*, Vol. 13, pp. 72-77, Oct. 2006.
- [16] M. Fujiwara, H. Suzuki, and N. Yoshimoto, "Quantitative loss budget estimation in WDM single-fibre loopback access networks with ASE light sources," *IEE Electron. Lett.*, Vol. 42, No. 22, pp. 1301-1302, Oct. 2006.
- [17] H. Suzuki, M. Fujiwara, and K. Iwatsuki, "Design and performance of a superdense WDM ring network using multiwavelength generations and tapped-type optical add/drop multiplexers," *OSA J. Opt. Netw.*, Vol. 6, No. 6, pp. 631-641, Jun. 2007.
- [18] H. Suzuki, M. Fujiwara, T. Suzuki, N. Yoshimoto, K. Iwatsuki, and T. Imai, "Colorless and plug-and-play technologies for WDM access over existing power-splitter-based infrastructure," *OSA J. Opt. Netw.*, No. 6, No. 7, pp. 830-839, Jul. 2007.
- [19] T. Tanaka, N. Ooba, S. Kamei, M. Fujiwara, H. Suzuki, T. Shibata, and Y. Inoue, "Silica-based PLC demultiplexer with spectral modulation function for monitoring signal wavelengths," *IET Electron. Lett.*, Vol. 43, No. 24, pp. 1377-1379, Nov. 2007.
- [20] M. Fujiwara, H. Suzuki, H. Kimura, and M. Tsubokawa, "Precise frequency stabilization by dithering bias current of directly modulated laser-diode," *IET Electron. Lett.*, Vol. 44, No. 1, pp. 47-49, Jan. 2008.
- [21] T. Suzuki, H. Suzuki, M. Fujiwara, H. Nakamura, K. Iwatsuki, H. Kimura, M. Tsubokawa, Y. Shibata, and A. Ohki, "Loss budget of 12.5 GHz-spaced wide-area carrier-distributed WDM-PON considering excess spectral broadening caused by SOA modulation," *IET Electron. Lett.*, Vol. 44, No. 3, pp. 226-228, Jan. 2008.
- [22] H. Suzuki, M. Fujiwara, T. Suzuki, N. Yoshimoto, H. Kimura, and M. Tsubokawa, "Demonstration and performance of colorless ONU for coexistence-type

WDM-PON using a wavelength-tunable L-Band DWDM-SFP transceiver,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 22, No. 19, pp. 1603-1605, Oct. 2008.

[23] M. Fujiwara, T. Suzuki, H. Suzuki, T. Tanaka, N. Ooba, H. Kimura, and M. Tsubokawa, “Centralized frequency stabilization with wide capture range in DWDM-PON using MZI-AWG,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 20, No. 19, pp. 1612-1614, Oct. 2008.

[24] M. Fujiwara, H. Suzuki, H. Kimura, and K. Kumozaki, “Loss budget in single-fiber loopback access networks with ASE light source considering gain compression effect of GS-SOA,” *IEICE Electron. Expr.*, Vol. 6, No. 2, pp. 65-70, Jan. 2009.

[25] M. Fujiwara, H. Suzuki, H. Kimura, and K. Kumozaki, “Frequency stabilization by dithering bias current of laser diodes for carrier-distributed WDM-based access networks,” *OSA J. Opt. Netw.*, Vol. 8, Iss. 3, pp. 295-305, Mar. 2009.

[26] M. Fujiwara, S. Kaneko, H. Kimura, N. Yoshimoto, and K. Kumozaki, “Reducing the backreflection impact using homodyne detection in WDM single-fiber loopback access networks,” *IEICE Electron. Expr.*, Vol. 6, No. 12, pp. 851-856, Jun. 2009.

[27] M. Fujiwara, T. Suzuki, H. Suzuki, T. Tanaka, N. Ooba, H. Kimura, and K. Kumozaki, “Remote frequency stabilization technique by using MZI-AWG and supervisory frame transfer in coexistence-type WDM-PON,” *IEEE/OSA J. Opt. Commun. Netw.*, Vol. 1, Iss. 6, pp. 571-579, Nov. 2009.

[28] A. Sano, H. Masuda, T. Kobayashi, M. Fujiwara, K. Horikoshi, E. Yoshida, Y. Miyamoto, M. Matsui, M. Mizoguchi, H. Yamazaki, Y. Sakamaki, and H. Ishii, “Ultra-high capacity WDM transmission using spectrally-efficient PDM 16-QAM modulation and C- and extended L-band wideband optical amplification,” *IEEE/OSA J. Lightw. Technol.*, Vol. 29, No. 4, pp. 578-586, Feb. 2011.

[29] T. Mitsui, K. Hara, M. Fujiwara, J. Kani, T. Tadokoro, and N. Yoshimoto, “Effect of forward error correction on spectral sliced WDM/TDMA-PON system,” *IEICE Electron. Expr.* Vol. 9, No. 8, pp. 739-744, Aug. 2012.

【国際会議(査読付)】

[1] K.-I. Suzuki, Y. Katagiri, M. Fujiwara, and N. Takachio, “Suppression of four wave mixing near zero dispersion wavelength utilizing novel intensity-stabilized incoherent monochromatic light source,” *ECOC’99*, Vol. 1, pp. 202-203, Sep. 1999.

[2] H. Suzuki, M. Fujiwara, N. Takachio, and K. Iwatsuki, “12.5 Ghz-spaced,

- 1.28-Tb/s (512-channel x 2.5 Gb/s) super-dense WDM transmission over 320-Km SMF using multi-wavelength generation technique, OECC'2001, PD2, Jul. 2001.
- [3] M. Teshima, M. Fujiwara, J. Kani, H. Suzuki, M. Amemiya, N. Takachio, and K. Iwatsuki, "Optical carrier supply module applicable to over 100 super-dense WDM systems of 1000 channels," ECOC'2001, Mo.L.3.7, Sep. 2001.
- [4] J. Kani, K. Akimoto, M. Fukui, M. Teshima, M. Fujiwara, and K. Iwatsuki, "100 Mbps / 1Gbps asymmetric bandwidth wide-area access network based on super-dense WDM technologies," APCC'2001, T63-3, Sep. 2001.
- [5] N. Takachio, H. Suzuki, M. Fujiwara, J. Kani, M. Teshima, and K. Iwatsuki, "12.5-GHz-spaced super-dense WDM ring network handling 256 wavelength with tapped-type OADMs", OFC'2002, WW2, Mar. 2002.
- [6] M. Fujiwara, H. Suzuki, M. Teshima, and K. Iwatsuki, "Novel polarization scrambling technique for carrier-distributed WDM networks", ECOC'2002, 10.6.4, Sep. 2002.
- [7] H. Suzuki, M. Fujiwara, M. Teshima, and K. Iwatsuki, "Prototype of 12.5-GHz-spaced tapped-type OADM for DWDM metro ring networks," ECOC'2003, Th1.4.5, Sep. 2003.
- [8] H. Sanjoh, Y. Suzaki, H. Mawatari, E. Yamada, M. Fujiwara, H. Yasaka, and Y. Yoshikuni, "Multichannel transmitter using multiwavelength light source and integrated WDM modulator," ECOC'2003, Th1.6.4, Sep. 2003.
- [9] M. Fujiwara, J. Kani, H. Suzuki, and K. Iwatsuki, "Impact of backreflection on carrier-distributed WDM single-fiber access networks", OECC'2004, 13B2-1, Jul. 2004.
- [10] K. Iwatsuki, H. Suzuki, M. Fujiwara, and J. Kani, "Optical frequency comb generation technology and its application to WDM access networks," CLEO'2004, TuF3, May. 2004.
- [11] H. Suzuki, H. Nakamura, M. Fujiwara, and K. Iwatsuki, "Wide-area WDM-based passive optical networks", ECOC'2005, M4.3.1, Sep. 2005.
- [12] M. Fujiwara, H. Suzuki, and K. Iwatsuki, "Reducing the backreflection impact by using gain-saturated SOA in WDM single-fiber loopback networks", OFC/NFOEC'2006, OTuC2, Mar. 2006.
- [13] H. Suzuki, M. Fujiwara, T. Suzuki, N. Yoshimoto, K. Iwatsuki, and T. Imai, "A remote wavelength setting procedure based on wavelength sense random access (λ -RA) for power-splitter-based WDM-PON", ECOC'2006, We3.P.157, Sep. 2006.
- [14] M. Fujiwara, H. Suzuki, N. Yoshimoto, and T. Imai, "Centralized wavelength monitoring / stabilization technique in power-splitter-based WDM-PON",

OFC/NFOEC'2007, JWA84, Sep. 2007.

[15] T. Suzuki, H. Suzuki, M. Fujiwara, N. Yoshimoto, K. Iwatsuki, and T. Imai, "Simple multi-wavelength stabilization technique using a periodic optical filter for WDM access networks", OECC'2007, 11A2-3, Jul. 2007.

[16] T. Tanaka, N. Ooba, S. Kamei, M. Fujiwara, H. Suzuki, and Y. Inoue, "PLC-type demultiplexer with a spectral modulation function", ECOC'2007, 2.5.2, Sep. 2007.

[17] M. Fujiwara, H. Suzuki, T. Tanaka, N. Ooba, N. Yoshimoto, and M. Tsubokawa, "Centralized frequency stabilization by dithering transmission spectra of MZI-AWG for DWDM-PON", ECOC'2007, 7.6.2, Sep. 2007.

[18] H. Suzuki, M. Fujiwara, T. Suzuki, N. Yoshimoto, H. Kimura, and M. Tsubokawa, "Wavelength-tunable DWDM-SFP transceiver with a signal monitoring interface and its application to coexistence-type colorless WDM-PON", ECOC'2007, PD3.4, Sep. 2007.

[19] H. Suzuki, M. Fujiwara, T. Suzuki, H. Kimura, and M. Tsubokawa, "Demonstration of plug-and play function by automatically controlling tunable DWDM-SFP transceiver for coexistence-type colorless WDM-PONs", OFC/NFOEC'2008, OTuH1, Feb. 2008.

[20] M. Fujiwara, T. Suzuki, H. Suzuki, T. Tanaka, N. Ooba, H. Kimura, and M. Tsubokawa, "Remote frequency stabilization in DWDM-PON using supervisory frame transfer with fixed time interval", OECC'2008, ThL-5, Jul. 2008.

[21] T. Suzuki, H. Suzuki, M. Fujiwara, N. Yoshimoto, H. Kimura, M. Tsubokawa, "A multi-wavelength stabilization technique based on a local minimum search using a shared reflective etalon filter for coexistence-type WDM-PON", ECOC'2008, Tu.1.F.5, Sep. 2008.

[22] H. Suzuki, M. Fujiwara, T. Suzuki, H. Kimura, and K. Kumozaki, "Plug-and-play WDM-PON technologies for future flexible optical access networks", OFC/NFOEC'2009, OThA1, Mar. 2009.

[23] H. Suzuki, M. Fujiwara, N. Yoshimoto, H. Kimura, and K. Kumozaki, "Simplified wavelength-tunable DWDM selector using removal driving circuit for coexistence-type WDM-PON", ECOC'2009, 9.5.6, Sep. 2009.

[24] A. Sano, H. Masuda, T. Kobayashi, M. Fujiwara, K. Horikoshi, E. Yoshida, Y. Miyamoto, M. Matsui, M. Mizoguchi, H. Yamazaki, Y. Sakamaki, and H. Ishii, "69.1-Tb/s (432 x 171-Gb/s) C- and extended L-band transmission over 240 km using PDM-16-QAM modulation and digital coherent detection", OFC/NFOEC'2010 PDPB7, Mar. 2010.

- [25] T. Mitsui, K. Hara, M. Fujiwara, J. Kani, M. Tadokoro, N. Yoshimoto, and H. Hadama, “Simple and scalable WDM/TDMA-PON using spectral slicing and forward error correction”, OFC/NFOEC’2011, OTuB5, Mar. 2011.
- [26] M. Fujiwara, K.-I. Suzuki, N. Yoshimoto, M. Oguma, and S. Soma, “Increasing splitting ratio of 10Gb/s-class PONs by using FW-DMF that acts as low loss splitter for upstream and conventional splitter for downstream”, OFC’2014, Tu2C.5, Mar. 2014.

【国内講演】

- [1] 藤原正満, 大輝晶子, 鈴木謙一, 高知尾昇, “光 SSB 信号を用いた 10Gb/s 高密度 WDM 伝送技術の検討,” 1999 年電子情報通信学会総合大会, B-10-60, 1999 年 3 月.
- [2] 藤原正満, 鈴木裕生, 高知尾昇, “一括多波長発生光源(光 CSM)を用いた超高密度 WDM 伝送実験,” 2001 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-10-117, 2001 年 9 月.
- [3] 鈴木裕生, 高知尾昇, 藤原正満, 可児淳一, 鬼頭勤, 手島光啓, 岩月勝美, “一括多波長発生光源(光 CSM)を用いた超高密度 WDM リングネットワーク,” 2002 年電子情報通信学会総合大会, B-10-60, 2002 年 3 月.
- [4] 可児淳一, 手島光啓, 藤原正満, 岩月勝美, “超広帯域 SD-WDM 伝送用 1000 チャネル光 CSM,” 2002 年電子情報通信学会総合大会, B-10-60, 2002 年 3 月.
- [5] 藤原正満, 鈴木裕生, 手島光啓, “光キャリア分配型 WDM ネットワークに適した偏波スクランブル技術,” 2002 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-10-35, 2002 年 9 月.
- [6] 金子慎, 可児淳一, 藤原正満, 岩月勝美, “FEC 適用による 10G スペクトルスライス WDM 伝送方式の検討,” 2005 年電子情報通信学会総合大会, B-10-94, 2005 年 3 月.
- [7] 鈴木裕生, 中村浩崇, 藤原正満, 岩月勝美, “広域 WDM-PON 技術,” 電子情報通信学会技術研究報告, 通信方式, CS2005-39, pp. 13-18, 2005 年 11 月.
- [8] 鈴木徹也, 鈴木裕生, 藤原正満, 吉本直人, 岩月勝美, “WDM 伝送システムのための周期光フィルタ共用化による簡易な波長制御法の提案,” 2007 年電子情報通信学会総合大会, B-10-90, 2007 年 3 月.
- [9] 田中拓也, 大庭直樹, 亀井新, 藤原正満, 鈴木裕生, 柴田知尋, 井上靖之, “波長監視機能付き PLC 型分波フィルタ” 電子情報通信学会技術研究報告, 光エレクトロニクス, OPE2007-117, pp. 109-113, 2007 年 11 月.
- [10] 田中拓也, 大庭直樹, 亀井新, 藤原正満, 鈴木裕生, 柴田知尋, 井上靖之, “波長監視機能付き PLC 型分波フィルタ,” 2008 年電子情報通信学会総合大会, C-3-15, 2008 年 3 月.
- [11] 藤原正満, 鈴木裕生, 木村秀明, 坪川信, 田中拓也, 大庭直樹, “DWDM-PON の

ための MZI-AWG を用いた一括波長安定化技術,” 2008 年電子情報通信学会総合大会, B-10-59 2008 年 3 月.

[12] 鈴木徹也, 鈴木裕生, 藤原正満, 木村秀明, 雲崎清美, “DWDM-SFP と共用エタロンフィルタを用いた極大値探索による複数波長制御法,” 2008 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-10-48, 2008 年 9 月.

[13] 藤原正満, 鈴木徹也, 鈴木裕生, 木村秀明, 雲崎清美, 田中拓也, 大庭直樹, “DWDM-PON における監視フレーム転送を用いた遠隔周波数安定化技術,” 2009 年電子情報通信学会総合大会, B-10-106, 2009 年 3 月.

[14] 藤原正満, 金子慎, 吉本直人, 雲崎清美, “WDM-PON におけるホモダイン検波を用いた干渉強度雑音の低減,” 2009 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-10-33, 2009 年 9 月.

[15] 光井隆, 原一貴, 藤原正満, 可児淳一, 田所将志, 吉本直人, “スペクトルスライスを用いた WDM/TDMA-PON における FEC 効果の検証,” 2011 年電子情報通信学会総合大会, B-8-8, 2011 年 3 月.

[16] 光井隆, 原一貴, 藤原正満, 可児淳一, 田所将志, 吉本直人, “スペクトルスライスおよび FEC を用いた WDM/TDMA-PON の検討,” 2011 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-8-24, 2011 年 9 月.