

デジタル光伝送技術

西江光昭

Digital Optical Transmission Technology — by Mitsuaki Nishie — As the transition to information society has been accelerated in industrialized countries and other nations around the world, a so-called ubiquitous society has become a reality. To support such information-oriented society, optical communication technologies will play the key role in building the communication infrastructure.

Optical communications are enabled by a fiber optic communication sub-system, which consists of optical data links (used as optical transmitters/receivers) and optical fiber (as transmission line).

For the development and practical use of the optical data links, performance specifications, such as transmission bandwidth, loss budgets, jitter characteristics and system margins, need to be set and designed according to required transmission speed and distance.

This paper provides a basic insight into these specification settings and design.

Keywords: fiber optic communication, optical data link, optical transceiver, digital data transmission

1. 緒言

先進国をはじめ世界中の多くの国地域が情報化社会に突入し、何時でもどこでも誰とでも通信ができることが当たり前になってきたが、その情報化社会を支える通信インフラは光通信技術に依存している。海底光ファイバケーブルシステムによる国際通信の大容量化、各地方に張り巡らされた公衆通信網は元より、携帯電話サービスにおいても基地局間は光通信が使われており、今や光通信技術を使わずに日々を過ごすことは出来ない状況になっていると言っても過言では無い。このように社会のあり方を変革したとも言える光通信は、現在では大半がデジタル方式になっているが、筆者等はその技術開発黎明期から、光通信システムの普及を目指して光データリンクの開発を行ってきた。

光データリンクは光通信を行う際に使われる最も基本的な部品の一つである^{(1)、(2)}。図1に示すように光送信モジュールと光受信モジュールで構成され、伝送路として光

ファイバを用いる。この3部品でいわゆる光ファイバ通信サブシステム (Fiber Optic Communication Sub-System) が構成される⁽³⁾。

光データリンクを開発、実用化するためには、伝送速度、伝送距離等種々の要求仕様に応じて、伝送帯域、ロスバジェット、ジッタ特性、システムマージン等の性能仕様設定、設計が必要であるが、その基本的知見を紹介することを目的に本稿をしたためた。

近年では、より高速の通信を行うために、複雑な変調方式の研究/実用化、伝送路の非線形性補償/応用、伝送帯域補償技術も進んでいるが、ここでは基本的な光出力の点滅 (ON/OFF) による通信方式、基本的な帯域設計の記述に限定している。

2. デジタル光伝送技術はアナログ信号伝送技術

光データリンクでは、光送信モジュールに入力されたデジタル信号は ON/OFF の 2 値の光信号に変換されるが、本質的に光信号が持つ出力量や信号波形等はアナログ量である (例えば、光 OFF 時にもわずかに光出力は漏れている。光信号の ON/OFF 比を消光比と言う。)。この光信号は、次に伝送ロスがあり有限の周波数帯域を持つ光伝送路 (光ファイバ、光コネクタ、光分岐器等) を伝播し、アナログ光受信部で光/電気信号変換され、“1” “0” へのデジタル化を行う識別器に入力されることによって、信号伝送される。つまり、デジタル光通信は情報としてはディ

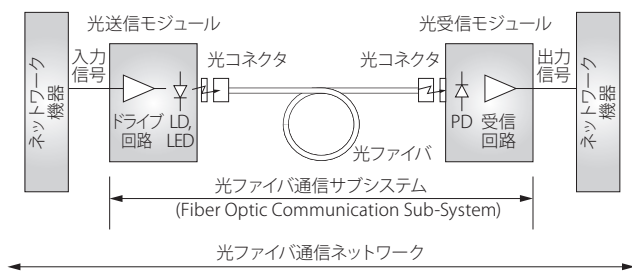


図1 光データリンク

デジタルであるが、信号レベルの低下や波形劣化を伴うアナログ伝送であり、その品質を決めるのは、光送信モジュール、光伝送路、光受信モジュールのトータルのアナログ信号特性である。すなわち本来の目的である伝送誤り率の少ない信号伝送は、光受信モジュール識別器に到達するアナログ波形を良好なものにすることによって実現される。無線や導電線を使う有線方式は伝送路への外来ノイズを考慮する必要があるが、光ファイバ通信の場合、伝送路への外来ノイズがほぼ無視できることが大きな特長である。但し、伝送路中に光ファイバンプを使用する場合は自然放出光 (Amplified Spontaneous Emission: ASE) が雑音成分として信号光に重畳されるので注意が必要である。また、伝送路への外来ノイズが少ないことから、光通信では非常に高品質伝送、すなわち低い伝送誤り率規格を適用されることが多い。

光ファイバ通信サブシステムにおいて、目的は所要の伝送速度の信号を所要の距離だけ伝送することであるが、それを律則するアナログ信号特性は図2に示すようになる。主要なアナログ特性は、周波数帯域設計、伝送ロス、ノイズ特性、伝送ロス、ジッタ (パルスの時間軸上の揺らぎ) を含む信号歪み等になる。

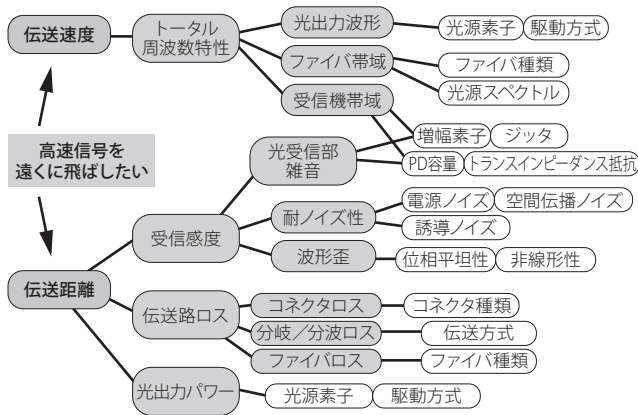


図2 光伝送特性

3. 伝送誤り率について

良好な伝送を行うには、光受信モジュール識別器への入力信号がノイズの少ない良好な波形であることが必要である。波形が良好か否かはトータルの伝送系の特性によるが、ノイズ特性は前述の通り主に光受信モジュールの性能による。受信感度は“1”“0”へのデジタル化を行う識別器に入力される信号の信号電力 (S) 対雑音電力 (N) 比で決まる。例えば、要求誤り率 10^{-9} 以下で、雑音電力がランダム性であるならば、S/N比は21.6dB以上が必要である。受信感度を上げるということは小さい信号パワーでも良好

なS/N比を確保するということであり雑音を小さくするという他にない^{(4),(5)}。

一般的に使われるトランスインピーダンス型光受信機の雑音は図3のようになる。受信した光信号はフォトダイオード (PD) によって電流信号 (i_p) に変換される。ノイズ (ここでは電流で表記) の発生要因の大半は受信部の光電気変換部アンプ (トランスインピーダンスアンプ) にある。そして、その本質的原因是は電流/電圧変換抵抗の熱雑音、電流ショットノイズ、外部的な要因としては電源回路ノイズ、電磁雑音等である。

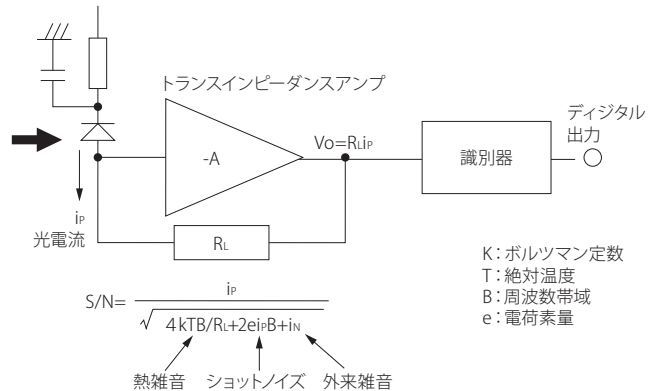


図3 光受信部 S/N比

いずれのノイズもその大きさは受信部の周波数帯域と関係があり、帯域は広いとノイズも大きくなり、受信感度は低下する。通常、電流ショットノイズは熱雑音に比べて小さく、受信感度を上げるためには熱雑音を小さくすることが必要であり、できるだけトランスインピーダンス (R_L) を大きくしたい。また、詳細は省略するがPD容量、IC入力容量、配線容量等の合計容量が大きくなると、図4に示すように熱雑音の高周波領域のノイズが増加し、周波数帯域比例以上にノイズは増加する。従って、受信感度を上げるためにはPD容量を低減するために受光部径を小さくする設計が行われる⁽⁵⁾。

また、一般的に受信信号電流がマイクロアンペア近辺と

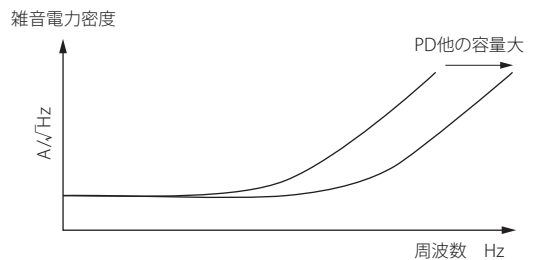


図4 光受信部 雑音特性

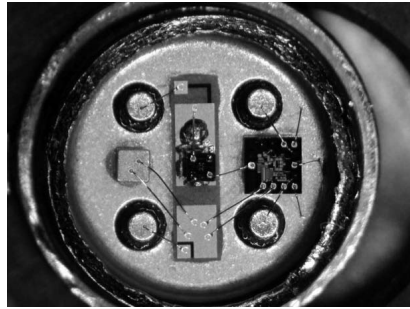
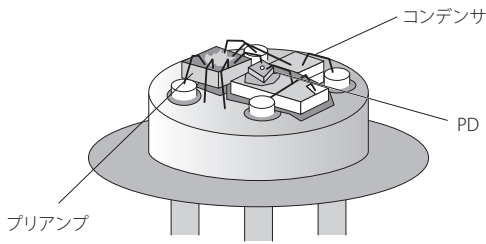


図5 光受信部 (PIN-AMPモジュール) の構造

微小信号なので外来雑音、電源からの雑音で感度低下を起す場合もあり、ノイズ対策が必要である。特にノイズを拾いやすい部分は受光素子とそのバイアス電源部、アンプ入力部であり、この部分は入念な設計を要する。物理的サイズも極力小さくし、電磁シールドすることが望ましい。図5にその様子を示す。PD、IC、ノイズ低減用のコンデンサ類をコンパクトに実装している。特にPDをバイアス電源コンデンサ上に直接ダイボンドすることによって極限的にノイズを抑える方式は当社特許である。

4. 周波数帯域設計について

伝送速度を決める周波数帯域設計については、送信部、伝送路、受信部のトータルでの帯域設計が必要である。その中でも、受信した微小信号を増幅する受信部の帯域を可能な限り絞ることで受信感度を確保するために、送信部、伝送路はできるだけ広帯域であることが望ましい。一般に送信部帯域は発光素子の特性によると言って良く、発光素子としてはLED (発光ダイオード)、LD (半導体レーザダイオード) が多く使われる。LEDは高速性においてはLDに劣るものの、簡便な駆動回路で動作できるので、200Mb/s、伝送距離2km程度までの比較的低速/短距離の用途で多く使われている。一般的に光パルスの立ち上がり時間 (T_r) より立ち下がり時間 (T_f) が遅く、伝送速度は T_f で制限される。そのため、図6に示すようなスピードアップ回路を用いて T_f を速めてより高速伝送を行う場合もある。LDは10Gb/s程度までの通信で使用出来るパルス応答特性を持っており、幅広く使われている。LDは温度特性が大きく温度補償回路が必要である。パルス立ち上がりは光子密

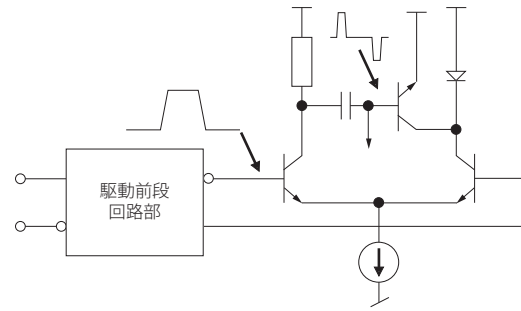
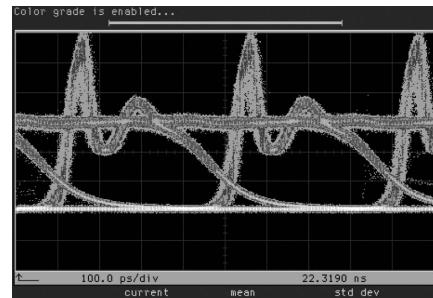
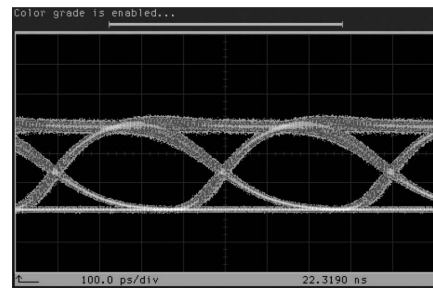


図6 スピードアップ回路付きLED駆動回路例
LEDに並列に入れたトランジスタを微分パルスで駆動



(a) ベッセルトムソンフィルタ無し



(b) ベッセルトムソンフィルタ有り

図7 LD光送信波形

度とキャリア密度相互の過渡応答特性に起因する緩和振動による鋭いピークを持つリング波形になる場合が多く、送信波形品質評価には、典型的(理想的)な受信部帯域特性を模擬したベッセルトムソンフィルタが使われる場合が多い(図7参照)。

光伝送路は光ファイバの種類によって、大きく伝送帯域が異なる(表1)。ステップインデックスファイバは光が通るパス(モード)が沢山あり(マルチモード)パス毎に伝播時間が異なるので、アナログTVでの電波障害のゴースト画面のような状態が起り、伝送帯域は制限される。グレーデッドインデックスファイバではマルチモードではあるもののモード間の伝播時間差異は小さく抑えられ、高速伝送が可能である。シングルモードファイバにおいては、

表1 光ファイバ比較

ファイバタイプ	屈折率分布	光の伝わり方	特長／問題点
ステップインデックス型			伝送帯域小 光源との結合容易 ファイバ軸ずれ耐性大
伝送パルス波形			
グレーデッドインデックス型			伝送帯域大 光源との結合容易 ファイバ軸ずれ耐性大
伝送パルス波形			
シングルモード型			伝送帯域最大 光源との結合難 ファイバ軸ずれ耐性小
伝送パルス波形			

名前の通り一つのモードのみであり、伝播時間差の問題は本質的に無い。

しかし、光伝送路帯域を制限する要素はもう一つあり、光ファイバの屈折率の波長分散特性である。発光素子の発光波長幅（発光半値幅）が広い場合、ファイバ中を伝播していくうちに色がにじむように伝播するパルス幅が広がっていく。つまり、伝送路帯域はファイバの種類と発光素子の発光波長幅の双方の特性の積で決まる。例えば、ステップインデックス型ファイバと比較的幅広い発光波長分布を持つLEDの組み合わせが最も伝送帯域が狭く、シングルモードファイバと波長分布が比較的狭いLDの組み合わせが最も伝送速度が速い。LDでも、ファブリ・ペロ型は複数の発光スペクトルを持つが、分布帰還型LD (Distributed Feedback-LD: DFB-LD) では発光波長分布が極めて狭く、特に高速通信で使用される。更に、DFB-LDでも直接ON/OFF変調させると波長揺らぎが起これるので、更なる高速化には、DFB-LDを連続発光させ、外部光変調器で光信号のON/OFF

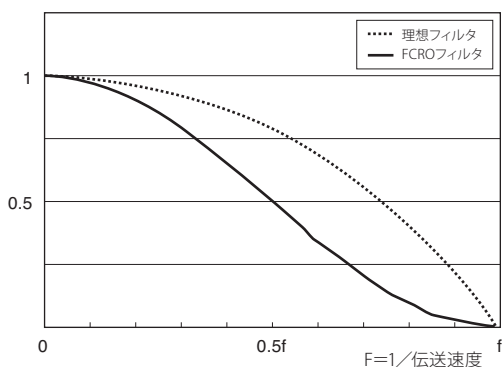


図8 波形フィルタ特性

を行う場合もある。所要の伝送速度、伝送距離に応じて、適切な光ファイバ、適切な光源の選択が必要である。

帯域設計を行う場合に最も重要なのは光受信モジュール帯域である。前述のように、雑音電力は周波数帯域が広いと比例的以上に増加するので、受信感度を上げるためには受信帯域を可能な限り絞りたい。

信号振幅が減少すること無く帯域制限が可能なインパルス波形伝送用の理想的なフィルタとして知られる Full Cosine roll Off (FCRO) フィルタは図8に示すような特性のものである⁽⁶⁾。6dB低下の周波数は伝送速度の50%となる。このフィルタの入力信号はインパルスを想定しているが、通常のデジタル伝送で使われる Non Return to Zero (NRZ) 信号は矩形波であり、インパルス波が無限の高周波成分を持っているのに対して高周波成分が減少しているので、その効果を加味してFCROフィルタを補正すると図8中の点線の周波数特性となり、6dB低下の周波数は伝送速度の75%、3dB低下の周波数は約58%になる。光伝送系はトータルとしての周波数特性がこの特性に近いことが望ましい。比較的低速のシステムでは、理想的な帯域設計は容易であるが、高速伝送システムでは、この理想的帯域設計は困難である場合が多々あり、帯域不足によるペナルティを考慮に入れた伝送システム設計を行う場合が多い。

5. ロスバジェットについて

ロスバジェットは、光送信モジュール出力光パワーと光受信モジュールの受信感度の差で決まる光伝送路に許容される伝送損失値である。また、光伝送路が規定のロスバジェットを満たせば、良好な光通信が出来ることを保証するものである。そのためには、光送信モジュールは動作温度等の環境条件を含めて、最小光出力パワーを保証し、光受信モジュールは最悪受信感度を保証する必要がある。要求される伝送距離、伝送速度、使用環境、通信信号方式等によって、光送信モジュール、光受信モジュールの可能な性能が決定され、ロスバジェットが決まる。光LAN、公衆通信網では、システムの互換性を重視し、ITU、光通信機器メーカーと光データリンクメーカーによるコンソーシアム等様々な機関がデジュール／デファクトスタンダードの策定を行っている^{(7)~(9)}。また、ISO/IECでは光通信サブシステムとそのシステム性能／部品性能の測定法の標準化を進めている⁽¹⁰⁾。

公衆通信網用のSDH／ソネットのロスバジェットの例を表2に示す^{(9)、(11)、(12)}。

光送信パワーは、基本的には最小出力の規格を決めれば良いが、短距離用途では伝送路ロスが極端に小さい場合に光受信モジュールが光入力過多による動作不良／破壊を避けるために最大出力を規定している。また、長距離用途でも安全性の観点から、最大出力を規定している。

伝送路ロス、ファイバロス、光コネクタロス、光分岐、波長多重通信等の場合の光分波ロス等による。敷設状況、温度特性等によるロス変動を考慮して、ロス見積もりを行う必要がある。また、前述の通り、光伝送路は無限に広帯域ではなく、伝送パルス波形は伝送距離に応じてなる。このため、受信感度が劣化するが、その劣化分をパスパネルティとして、加算する必要がある。加算する量は伝送距離、伝送速度により異なることになる。パスパネルティは高速、長距離になると多めに見積もる必要がある。

受信感度は前述の通り、伝送速度が速くなると広い周波数帯域が必要になり、受信感度は低下するので、ロスバジェットは小さくなりがちである。一般的に長距離伝送の場合は高速伝送をしたい場合が多いので、送信出力は可能な限り高くし、受光素子としては素子自体に電流増幅能力があり、高感度化が可能な Avalanche Photo Diode (APD) が使われる。また、Fiber to the Home (FTTH) で一般的に使われる光分岐を使ったシステムでは、光伝送路での分岐ロスが大きくなり、APD が使われる場合がある。

表2 代表的なSDH/ソネットの伝送仕様

	STM-1 (155Mb/s)	STM-4 (622Mb/s)	STM-16 (2.4Gb/s)	STM-64 (10Gb/s)
短距離 (Intra office)	1.3μm帯 2km -8/-15dBm -8/-23dBm (FP-LD) (PIN-PD) 1dB	1.3μm帯 2km -8/-15dBm -8/-23dBm (FP-LD) (PIN-PD) 1dB	1.3μm帯 2km -3/-10dBm -3/-18dBm (FP-LD) (PIN-PD) 1dB	1.55μm帯 2km -1/-5dBm -1/-14dBm (DFB-LD) (PIN-PD) 2dB
中距離 (Short Haul)	1.3μm帯 15km -8/-15dBm -8/-28dBm (FP-LD) (PIN-PD) 1dB	1.3μm帯 15km -8/-15dBm -8/-28dBm (FP-LD) (PIN-PD) 1dB	1.3/1.55μm帯 15km 0/-5dBm 0/-18dBm (DFB-LD) (PIN-PD) 1dB	1.55μm帯 40km +2/-1dBm -1/-14dBm (EA-LD) (PIN-PD) 2dB
長距離 (Long Haul)	1.55μm帯 80km 0/-5dBm -10/-34dBm (FP-LD) (PIN-PD) 1dB	1.55μm帯 80km +2/-3dBm -8/-28dBm (FP-LD) (PIN-PD) 1dB	1.55μm帯 80km +3/-2dBm -9/-27dBm (DFB-LD) (APD) 1dB	1.55μm帯 80km +4/0dBm -7/-24dBm (EA-LD) (APD) 2dB

上から順に、波長、伝送距離、光送信出力範囲、許容入力/受信感度、推奨発光素子、推奨受光素子、パスパネルティ
上記は仕様の一部を示しており、これ以外の仕様もある^{(9)、(11)、(12)}。

6. ジッタについて

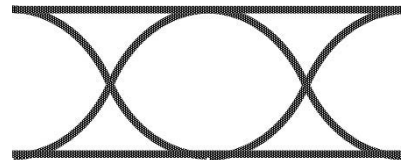
ジッタは、伝送波形の立ち上がり/下がりの時間軸上の揺らぎであり、図9に示すようにパルス立上り/立下りのクロスポイントで最も顕著に現れる。原因は入力信号に含まれるもの、光送信モジュール内で発生するもの、伝送路での周波数特性に起因するもの、光受信モジュールに起因

するものがある。ジッタは光伝送系各部で加算されていくので、トータルで管理する必要がある。

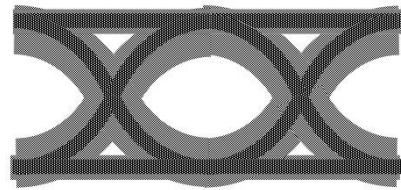
ジッタには大まかにシステムティックジッタ、ランダムジッタに分類される。システムティックジッタは、信号成分に含まれる周波数範囲内に伝送系各部分の周波数特性(伝送特性)不整がある場合に発生する。

例えば、光送信部の発光素子は発光波長に温度特性があるが、伝送信号パターンにより、“1”の密度が高く発光状態が密な部分と“0”の密度が高く発光状態が疎な部分があると、その平均LD駆動電流が変動し、発光素子の温度が変動し、波長が揺らぐことになる。そして、光ファイバは光伝播速度の波長依存性があることから、波長が長い部分の信号波形と短い部分の信号波形の到達時間が異なることになり、光送信部では均等な時間軸を持っていたパルス波形が光受信部ではパルス幅が広がったり狭まったりしたパルス波形を受信することになる。つまり時間軸の揺らぎ(ジッタ)が起こってしまうことになる。このようなジッタは信号パターン依存性があることから、システムティックジッタと呼ばれる。このジッタはファイバ伝送距離に比例して増大する。システムティックジッタは上記の事例以外にも伝送システム各部で発生し、このジッタは単純に加算されていくので全体として、許容値以下に管理することが必要である。

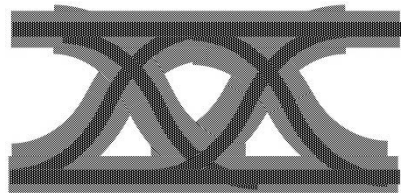
ランダムジッタは雑音成分によって信号パルス幅揺らぎを起こすものであり、主な要因は受信部フロントエンドで



(a) 良好な波形



(b) ノイズの多い波形



(c) ノイズ/パルス幅歪みの大きい波形

図9 光/電気変換信号出力波形

のランダムノイズに起因する。特に光受信レベルが低く信号S/N比が悪い場合に大きくなる。また、前述の光ファイバアンプのASE光も受信部ではランダムジッタとして検出される。このような伝送系各部で発生するランダムジッタは電力和で加算されていく。

ジッタのような揺らぎ成分ではないが、良好な光通信を行うために必要な特性として、パルス幅歪みも注意が必要である。受信クロックで信号の“1”“0”を判定する時に、タイミングマージンを減少させ、実用的な受信感度の低下に繋がり、注意が必要である。パルス幅歪みは発光素子の立ち上がり／下がり時間のアンバランスにより起こる場合が多い。

このように様々なジッタ成分を持つ信号を受信する場合には、クロック再生回路部では、大きな揺らぎがあるジッタに追従出来る機能が必要となる。光伝送系で発生／伝播するジッタ量としてジッタジェネレーション特性／ジッタトランスファ特性、ジッタ追従特性はジッタトレランス特性として各種光伝送規格で規定されている⁽³⁾。

7. システムマージンについて

長期的に安定に光伝送システムを稼働されるためには、伝送系各部分の劣化を想定したマージンを持つ必要がある。要求するシステムの信頼度、使用する部品の信頼性、想定使用時間 (End of Life) 等を考慮してマージンを設定することになるが、図10に示すように、光送信部では主に発光素子の劣化による光出力劣化、伝送路では光ファイバ、光コネクタ、光部品等のロス増による伝送路ロス増加、受信部では受信感度低下がマージン設定の要因となる。特に光信号にノイズ光を入れて、受信モジュールの感度劣化特性を評価する手法がITU規格では推奨されている⁽⁴⁾。通常の光伝送システムでは3dB程度のマージンを見込む場合が多い。

また、光データリンクには、受信信号レベルを常時監視して、正常な受信が不可能な一定レベル以下の受信信号レ

ベルになった場合にはアラームを発出する機能を備えている。通常のシステムではアラームが発出された場合、自動的にバックアップシステムに伝送経路が切り替わる方式を取っており、一部品の故障だけではシステムダウンは起こらないようにしている。

8. 結 言

光伝送技術の基本的知見を概説した。簡略化したため、正確性を欠く部分も多々あることはお許し頂きたい。ここに述べたように、光に限らず高速通信技術を開発していくためにはアナログ技術が不可欠である。様々な要求仕様に対して、伝送路を含む各種のデバイスを使いこなし、互いに相反したり、あるいは相関が有ったりなかったりするアナログ諸特性を正にアナログ的に最適化していくことが必要であり、知恵と経験を持つ技術者が求められている。

光通信は特に高速伝送の場合には、伝送ビット当りのエネルギーは非常に小さい。例えば、10Gb/s、40kmの伝送が出来る光データリンクの消費電力は送信／受信合わせてもわずかに3.5Wである。伝送速度と距離の積 (Bit・km) という単位を想定すると、データ伝送に使うエネルギーはわずかに 0.88×10^{-12} J/bit・kmということになる。おそらく、他の通信方式と比較しても非常に小さい値だろう。この特長を活かして、大容量／長距離通信には光通信、比較的短距離では利便性から光通信に加えて、無線、PLC (Power Line Communication) 等が併用されて通信ネットワークが構成されてきている。

インターネットの普及と共に動画配信等により、情報通信網は更なる大容量化が進んでいる。光伝送技術も時々刻々と進化しており、高速化と同時に小型化、省エネ化も進んでいる。個々の光データリンクの消費電力は少ないものの、今後グリーンIT化の進展動向も見据えながら通信インフラの大規模化に連動して通信電力の爆発的増大にならないよう、抜本的な省エネ技術開発が求められるであろう。

参 考 文 献

- (1) 西江光昭、「学生のページ／光データリンクモジュール」、電子情報通信学会誌、p.1267 (1998)
- (2) 御神村泰樹、「学生のページ／光リンクモジュールの最近の技術動向」、電子情報通信学会誌、p.133 (2003)
- (3) ITU-T Recommendation G.958: Digital line systems based on the synchronous digital hierarchy for use on optical fibre cables
- (4) Joseph C. Palais: FIBER OPTIC COMMUNICATIONS Prentice Hall International, Inc.
- (5) Personick S.D.: Receiver design for digital fiber optic communication systems. I
- (6) ウィリアム・R・ベネット他、「データ伝送」、ラティス社
- (7) XFP Promoters: (10 Gigabit Small Form Factor Pluggable Module) XFP Revision 4.1 (2005)
- (8) X2 Promoters: (A Cooperation Agreement for a Small Versatile 10 Gigabit Transceiver) X2 Issue 2.0b (2005)

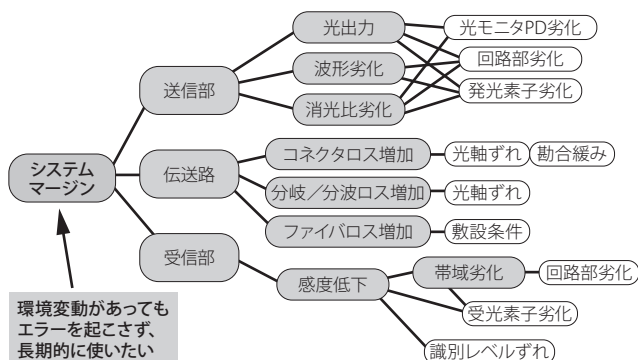


図10 システムマージン

- (9) Telcordia® Technologies Generic Requirements GR-253-CORE: Synchronous Optical Network (SONET) Transport Systems: Common Generic Criteria
 - (10) IEC61281-1: Fibre optic communication subsystems - Part 1: Generic specification
 - (11) ITU-T Recommendation G.957: Optical interfaces for equipments and systems relating to the synchronous digital hierarchy
 - (12) ITU-T Recommendation G.959-1: Optical transport network physical layer interfaces
-

執筆者

西江 光昭 : フェロー

材料技術研究開発本部 技師長 兼
解析技術研究センター長
光データリンクの開発に従事、
06年から解析技術研究センター

