

光レシーバ性能の評価

光通信システムの必要電力を求める際の基本的なパラメータに、レシーバ感度がある。レシーバ感度の定義は、あるビットエラーレート(BER)に対する平均光出力の最小値である。光レシーバの設計では、総合レシーバ感度を低下させるさまざまなパラメータを十分に理解する必要がある。本稿では、レシーバの光感度について詳細に検討する。また、ランダムノイズの蓄積や、振幅・タイミングの両面におけるISI(符号間干渉)によって発生する電力的なマイナス面も検討する。検討では、通常のレシーバ感度において、ISI立上り/立下り時間やジッタ、トランスミッタのノイズ特性(RIN : relative intensity noise)などの影響が無視できる理想的な入力信号を仮定する。

ISI存在下におけるQファクタ

光レシーバは、通常、光検出器とトランスインピーダンスアンプ、リミティングアンプ、クロックデータリカバリブロックで構成される。シンプルな光レシーバの例を図1に示す。

受信した光信号は光電流に変換し、トランスインピーダンスアンプ(TIA)で増幅する。リミティングアンプが「識別」回路として、サンプリングされた電圧 $v(t)$ を識別スレッショルド V_{TH} と比較する。データ復号が行われるこの段階で、ランダムノイズの蓄積やISIがあると、信号が大幅に劣化し、アイが閉じてデータ復号にエラーが発生する。

データ復号時のアイの開きとBERの関係を知るためには、振幅ノイズの統計的特性を把握する必要がある。通常は、信号Qファクタによって信号品質を測定し、BERを求める。ISI歪みがなく、支配的な振幅ノイズがガウス分布に従う場合、Qファクタは次式で求めることができる。

$$Q = \frac{V_1 - V_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (\text{式 1})$$

ここで、 V_1 、 V_0 は $v(t)$ 振幅高低の平均値(ISIを除く)であり、 σ_1 、 σ_0 はガウス分布にのっているホワイトノイズのRMS(二乗平均)である。詳細はアプリケーションノート、HFAN-09.0.2 *Optical Signal-to-Noise Ratio and the Q-factor in Fiber-Optic Communications Systems* (japan.maxim-ic.com/AN985) を参照してください。

現実のレシーバでは、帯域幅の限界やベースラインの振れ、能動素子の非線形性などにより、ISIをなくすることができない。データ復号前の信号についてアイダイアグラムを確認すれば、ランダムノイズだけでなく、ISIによる振幅の揺れ(パターン依存性が高い)もある程度存在することがわかる。ISIによる光感度の低下幅を知るシンプルな手法としては、ワーストケースの振幅ノイズ分布を検討するという方法がある。具体的には、ガウス分布の平均値を V_1 、 V_0 から $(V_1 - V_{ISI})$ 、 $(V_0 + V_{ISI})$ へと低振幅境界にシフトさせる。ここで、 V_{ISI} はISIによる垂直方向のアイの閉じである(図2)。

このような条件における信号Qファクタは、ワーストケースの条件におけるノイズ分布からBERを算出して求める。BERが最小になるように判定スレッショルドが最適化されていると仮定すると、Qファクタは垂直方向のアイの閉じ(V_{ISI})と次式の関係を持つ。

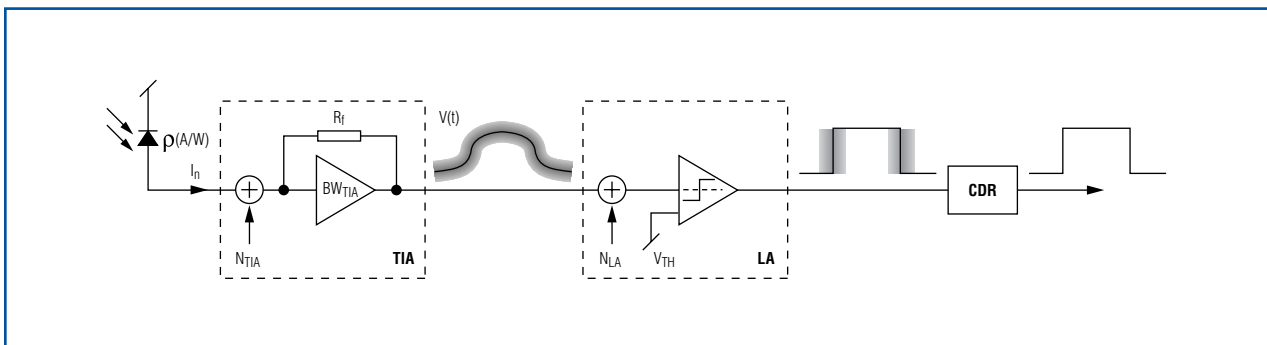


図1. シンプルな光レシーバの例

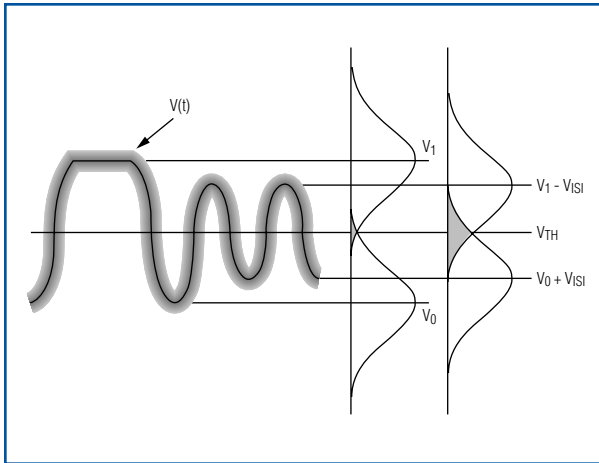


図2. ISI存在下におけるワーストケースにおける振幅-ノイズ分布から、ISIによる光感度の低下を見積もることができる。

$$Q = \frac{V_1 - V_0 - 2 \times V_{ISI}}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (\text{式 2})$$

$$\text{BER} = \frac{1}{2} \text{erfc} \left(\frac{Q_{\text{BER}}}{\sqrt{2}} \right) \quad (\text{式 3})$$

ただし、
$$\text{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} e^{-v^2} dv$$

Q_{BER} は、あるBERに対して必要な最小Qファクタである。式3から、 Q_{BER} とBERの関係をプロットすると、図3のようになる。

通常、ピークツーピークの信号スイング($V_{P-P} = V_1 - V_0$)を実験室で測定し、 $\sigma_1 = \sigma_0 = N_{\text{RMS}}$ を仮定して、次式によりQファクタを算出する。

$$Q = \frac{V_{P-P} - 2 \times V_{ISI}}{2 \times N_{\text{RMS}}} \quad (\text{式 4})$$

ここで N_{RMS} はリミティングアンプ入力に換算したRMSノイズである。式4から、Qファクタは、ISI存在下におけるRMSノイズ比に対する垂直アイ開口率を表すことができる。ISIによってQファクタが低下すると、光レーザで、光出力に問題が発生したりエラーフロアが発生する。

光感度の評価

可能な限り高い光感度を得るためには、データ復号前の信号Qファクタをできる限り大きくする必要がある。以下のセクションでは、総体的なレーザランダムノイズとISI、CDRジッタも考慮して、実際のデバイスでレーザ光感度を正確に評価する方法を紹介する。例としては、MAXIMのデバイスを使用した10Gbit/sレーザと2.5Gbit/sレーザを使用する。

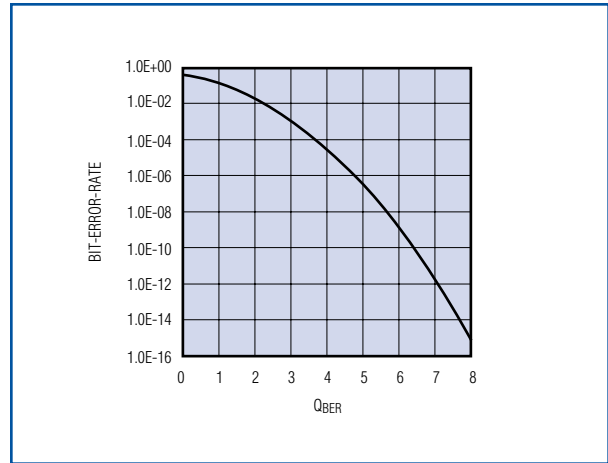


図3. 式3からプロットしたBERと Q_{BER} の関係

レーザRMSノイズによる総合損失

レーザにおけるトータルのRMSノイズがどの程度、光感度に影響するかを評価するためには、あるBERを得るためTIAにおいて必要となる最小ピークツーピーク電流(I_{P-P})を知る必要がある。これはランダムノイズ解析で、 $V_{\text{ISI}} = 0$ を仮定し、 $V_{P-P} = I_{P-P} \times R_f$ と $N_{\text{RMS}} = N_{\text{TOTAL}}$ を式4に代入すれば、 I_{P-P} が求められることができる。

$$I_{P-P} = 2 \times Q_{\text{BER}} \times N_{\text{TOTAL}} (\mu\text{A}_{\text{RMS}}) \quad (\text{式 5})$$

N_{TOTAL} は、TIA入力換算のトータルRMSノイズで、TIA入力換算ノイズ、 $N_{\text{TIA}}(\mu\text{A}_{\text{RMS}})$ とリミティングアンプ入力換算ノイズ、 $N_{\text{LA}}(\text{mV}_{\text{RMS}})$ 、TIA小信号トランスインピーダンス利得、 $R_f(\text{k}\Omega)$ から求めることができる。その関係は、次式のとおりである。

$$N_{\text{TOTAL}} = \sqrt{N_{\text{TIA}}^2 + \left(\frac{N_{\text{LA}}}{R_f} \right)^2} \quad (\text{式 6})$$

実際の回路では、リミティングアンプ(LA)入力換算ノイズを直接知ることはできないかもしれないが、そのような場合でも、リミティングアンプの入力感度 V_{LA} (あるBERを得るために必要な最小ピークツーピーク信号スイング)から N_{LA} を評価することが可能である。一般に、リミティングアンプの感度は入力換算ノイズ、 N_{LA} やDCオフセット、帯域制限によるISIによって決まる。しかし、ほとんどのリミティングアンプは高感度とするためにDCオフセットキャンセルループを持ち、TIAより十分に高い小信号帯域幅を持つ。つまり、リミティングアンプの感度を支配するのはランダムノイズだと考えることができるのである。このような条件では、 N_{LA} は次式により求めることができる。

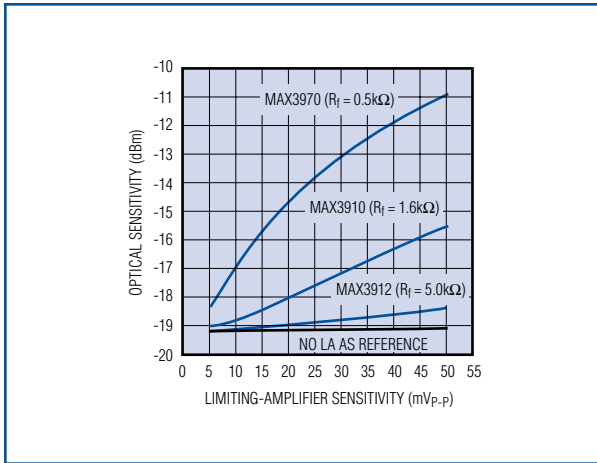


図4. 10Gbps TIA ICのレーザ光感度。SONET最小消光比を仮定

$$N_{LA} = \frac{V_{LA}}{2 \times Q_{BER}} \quad (\text{式 7})$$

図3から、BER = 10⁻¹²に対しQ_{BER} = 7であることがわかる。ρを光検出器の応答性(A/W)、r_eを受信した光信号の消光比とすると、OMA(光変調振幅)は次式で表される。

$$OMA = \frac{I_{P-P}}{\rho} \quad (\mu W) \quad (\text{式 8})$$

また光受信感度は次式で表される。

$$P_{ave} \text{ (dBm)} = 10 \log \left(\frac{OMA}{2 \times 1000} \times \frac{r_e + 1}{r_e - 1} \right) \quad (\text{式 9})$$

たとえば、入力換算ノイズが1.1μA_{RMS}と等しい10Gbit/s TIA ICのMAX3970、MAX3910、MAX3912も、トランスインピーダンス利得は異なる。このため、感度の異なるリミティングアンプと組みあわせて使用すると、最終的なレーザは異なった光感度を持つ。ρ = 0.85A/W、r_e = 6.6(SONET最小消光比基準)を仮定して光感度を算出すると、図4のようになる。

TIA入力換算ノイズから得た光感度をLAなしのリファレンスとすると、TIAとリミティングアンプの組みあわせとこのリファレンスとの差がレーザの総合ランダムノイズによる電力ペナルティとなる。MAX3971は、10Gbit/sのリミティングアンプで、BER ≤ 10⁻¹²に対する入力感度は9.5mV_{p-p}である。MAX3971にMAX3970 TIAを組みあわせると光電力ペナルティが約2.1dBとなるが、MAX3912 TIAを組みあわせると0.03dBにしかならない。もう一つ、2.5Gbit/s SFPLレーザモジュールを例に取り上げてみる。これは、光検出器と2.5Gbit/s TIAの次段に

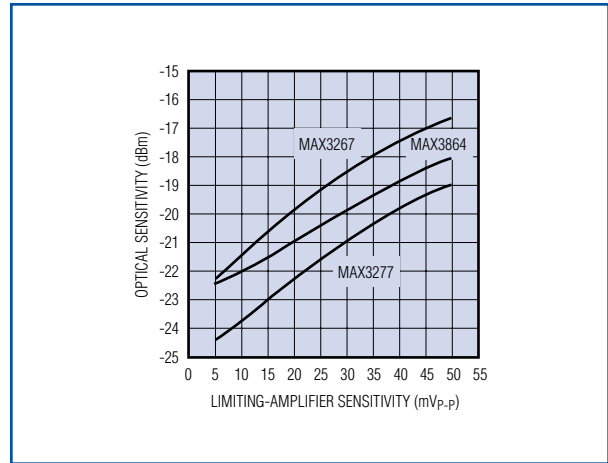


図5. 感度の異なるリミティングアンプの感度と組みあわせたときの2.5Gbps TIA ICのレーザ光感度

リミティングアンプを組みあわせた構成になっている。このようなアプリケーションで使用するTIA ICとしては、MAX3267、MAX3271、MAX3275、MAX3277、MAX3864がある。図5は、MAX3267(N_{TIA} = 0.495μA_{RMS}、R_f = 1.9kΩ)、MAX3864(N_{TIA} = 0.49μA_{RMS}、R_f = 2.75kΩ)、MAX3277(N_{TIA} = 0.3μA_{RMS}、R_f = 3.3kΩ)を感度の異なるリミティングアンプと組みあわせたときの光感度である。

2.5Gbit/sのリミティングアンプとしては、MAX3265、MAX3269、MAX3272、MAX3765、MAX3861、MAX3748がある。性能とコスト、パッケージといった条件に合ったTIAとリミティングアンプの組み合わせにより、さまざまなSFPモジュールを構成することが可能である。

符号間干渉の影響

光レーザでISIが発生する要因には、高周波帯域幅の制限、ACカップリングやDCオフセットキャンセルループにより発生する不十分な低周波数カットオフ、帯域内利得のフラットネス、TIAとリミティングアンプの内部接続で発生する多重反射などがある。受信するデータのパターン(PRBS 2³¹-1、K28.5、8B/10Bエンコーディングなど)によっても、さまざまなISI歪みが発生する。ISIが発生すると、振幅とタイミングの両方においてアイが閉じてしまう。

垂直なアイの閉じによるISIを次式で定義する。

$$ISI = \frac{2 \times V_{ISI}}{V_{P-P}} \quad (\text{式 10})$$

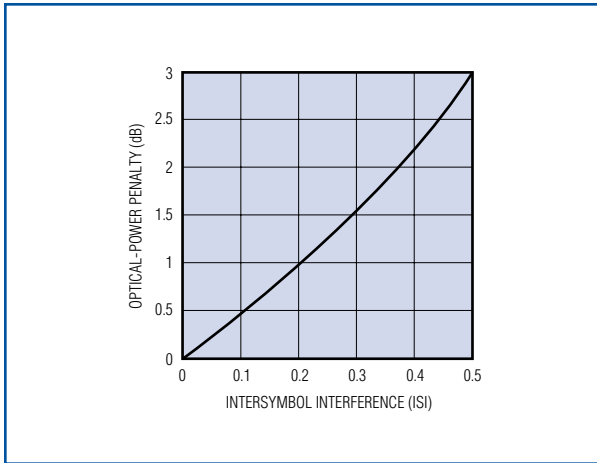


図6. 理想状態におけるISIと光電力ペナルティの関係

必要最小TIA入力電流は、次式でISIと関係づけられる。

$$I_{p-p} = \frac{2 \times Q_{BER} \times N_{TOTAL}}{(1 - ISI)} \quad (式 11)$$

ISIの影響は、ISI = 0という理想的状態と比較して、ISIが発生すると光感度がどの程度低下するかという形で求める。このような結果を図6に示す。この図では、10%のISI歪みによる光電力ペナルティが、0.46dBとなる。

ISIの影響と総体的なランダムノイズの影響を合計し、dB単位としたものが総合光電力ペナルティとなる。

CDRジッタ許容値の影響

信号がレーザーアンプチェーンを通過してリミテイングアンプに到達するまでの間に、振幅ノイズはデータ中央交点におけるタイミングジッタに変換される。ランダムノイズや帯域幅制限、通過帯域リップル、群遅延変動、ACカップリング、非対称の立上り/立下り時間などがあると、ランダムジッタと確定ジッタが発生する。このようなジッタがあるとアイ開口率が低下し、エラーなしのデータの復号に使える部分が小さくなる。このため、CDRジッタ許容能力も光感度を求める場合の重要なファクターとなる。

CDRジッタ許容能力は、データ不整合やリカバリークロックによるエラーが発生しない範囲で、入力データに乗ることのできるピークトゥピークジッタの量を示す。PLLを使ったCDRでは、クロックトゥデータのサンプリングポジションとリタイミングフリップフロップのセットアップ/ホールド時間、位相検出器特性によって決定される最小データ開口率が必要になる。ランダムジッタがRJ_{RMS}、トータルの確定ジッタがDJ_{p-p}、ある

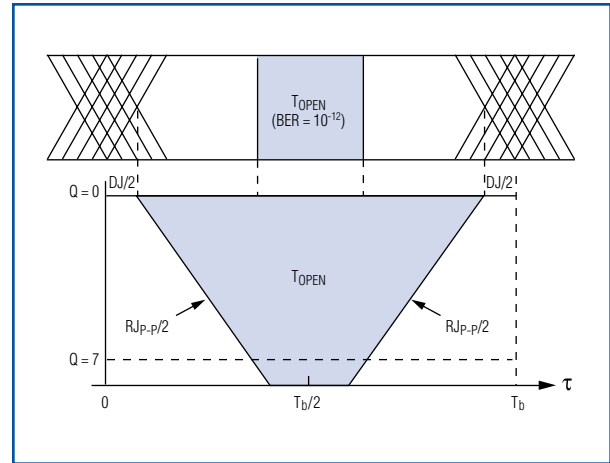


図7. CDR最小アイ開口率とQファクタの関係

BERに対するCDRの必要最小開口率がT_{OPEN}だとすると、タイミングQファクタは次式で定義される。

$$Q = \frac{T_b - T_{OPEN} - DJ_{p-p}}{2 \times RJ_{RMS}} \quad (式 12)$$

$$RJ_{p-p} = 2Q_{BER} \times RJ_{RMS} \quad (式 13)$$

詳細はアプリケーションノート、HFAN-04.0.2 *Converting between RMS and Peak-to-Peak Jitter at a Specified BER* (japan.maxim-ic.com/AN337)を参照してください。

必要なCDR最小開口率とQファクタの関係を図7に示す。あるBERを得るために必要な最小Q_{BER}は、図3から求めることができる。

CDR入力におけるジッタ周波数がPLL帯域よりも高い場合は、CDRジッタ許容値(JT_{p-p})とT_{OPEN}の関係は次式のようになる。

$$JT_{p-p} = (T_b - T_{OPEN}) \quad (式 14)$$

光感度が低下しないためには、CDR高周波数ジッタは以下の条件を満足しなければならない。

$$JT_{p-p} \geq 2 \times Q_{BER} \times RJ_{RMS} + DJ_{p-p} \quad (式 15)$$

エッジ遷移のスロープによっては、信号遷移のホワイトノイズによってランダムジッタ、RJ_{RMS}が発生する。リミテイングアンプまでは信号の立上り/立下り時間(20%から80%)が対称、かつt_rに等しいと仮定すると、ランダムジッタは次式で求めることができる。

$$RJ_{RMS} = \frac{t_r}{(V_{p-p}/N_{RMS}) \times 0.6} \quad (式 16)$$

ここで t_r はレシーバ全体における小信号帯域幅、 BW_{TOTAL} に依存する。1次のローパスフィルタを仮定すると、

$$t_r \approx \frac{0.22}{BW_{TOTAL}} \quad (\text{式 } 17)$$

光レシーバ入力では、リミティングアンプ前のTIAは線形と考えられる。つまり、ランダムジッタは、TIA入力における総合RMSノイズ比に対するピークトゥーピーク電流の関数として表すことができる。

$$RJ_{RMS} = \frac{t_r}{(I_{p-p}/N_{TOTAL}) \times 0.6} \quad (\text{式 } 18)$$

式18を使って、リミティングアンプ出力におけるランダムジッタをノイズ比に対するTIA入力電流の関数としてプロットしたものが図8である。

光感度に対するCDRジッタ許容値の影響は、式15と式18を I_{p-p} について解くことで求めることができる。

$$I_{p-p} = \frac{2 \times Q_{BER} \times t_r}{(JT_{p-p} - DJ_{p-p}) \times 0.6 / N_{TOTAL}} \quad (\text{式 } 19)$$

ここでもOC-192レシーバを例にとる。 $\rho = 0.85A/W$ 、 $r_e = 6.6$ とすると、レシーバ全体の小信号帯域幅は7.0GHz、 $N_{TOTAL} = 1.1\mu A_{RMS}$ 、 $ISI = 0$ となる。図9は、得ることが可能な光感度がCDRジッタ許容値によってどのように変化するかを示したものである($BER = 10^{-12}$)。

一般に、あるBERを得るためには、振幅とタイミングの両面において、最小TIA入力電流が Q_{BER} を満足する必要がある。

まとめ

光レシーバ感度を評価するためには、振幅とタイミングの両方に関するエラーソースを検討する必要がある。本稿では、実際のデバイスにおいてレシーバ全体のBERに対し、振幅ソースとタイミングソースが独立した影響を与えることを示した。ここに示したガイドラインを用いれば、光レシーバの性能を正確に評価し、適切なTIAとリミティングアンプ、CDRを選ぶことができる。実際のデバイスでは光入力理想的な信号となることはなく、トランスミッタのランダムノイズや光ファイバの分散によるISIなどの問題を抱えている。変形した光信号を受信したときも、このアーティクルで示した手法を用い、信号Qファクタを評価してBERを求めることができる。

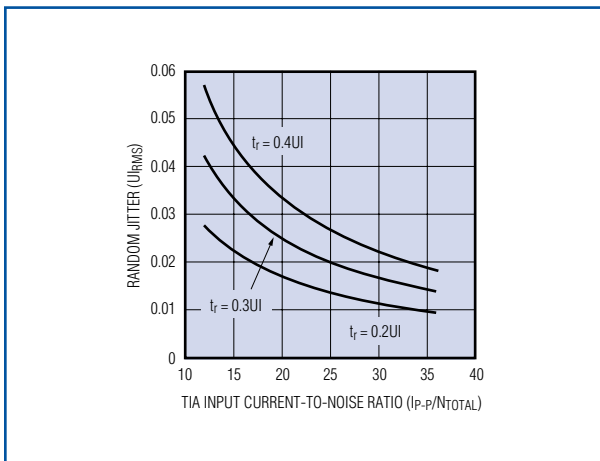


図8. 入力電流/ノイズ比に対するランダムジッタの立ち上がり時間(0.2UI、0.3UI、0.4UI)による変化

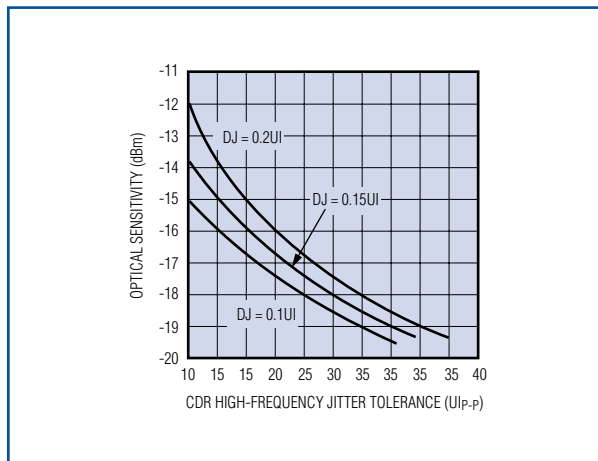


図9. 光感度とCDRジッタ許容値の関係の確定ジッタ許容値(0.1UI、0.15UI、0.2UI)による変化