

Technical Note

レーザー強度ノイズ測定

Laser Intensity Noise Measurement

レーザー強度ノイズは実験の性能限界を決定します。よい結果を得るには、この特性を明確にすることが重要です。この種の測定を行なう場合には、低ノイズ、高感度のフォトレシーバが不可欠です。NewFocus™のフォトレシーバは、こういった用途に最適です。ショットノイズ限界までの高い性能、高い変換利得、広いバンド幅で、よりシンプルかつ容易にノイズ測定できます。

図は強度ノイズ測定のセットアップ例です。レーザー出力はディテクタを飽和させないために減衰され、フォトレシーバ上に集光されます。この際光がディテクタ上にはみ出さないようにすることが重要です。このようなオーバフィルは、不要なノイズと機械的振動のカップリングを招き、ディテクタ上の光量の変動を引き起こします。そしてこれらの音響的な周波数が振幅ノイズスペクトルに間違っただけのピークを誘起します。

フォトディテクタ出力はスペクトラムアナライザに送られます。通常スペクトラムアナライザの等価入力ノイズは、フォトレシーバのショットノイズより大きくなっています。この場合には低ノイズプリアンプの追加が有効です。フォトディテクタの電源を切り、スペクトラムアナライザのノイズが測定を妨げていないかテストします。通常ノイズレベルは最低でも約10dB低下します。測定されたノイズがレーザーノイズである（ディテクタノイズではない）ことをテストするため、ディテクタへの入射光をブロックします。この際もノイズレベルは、少なくとも約10dB減少します。

このようにしてスペクトラムアナライザで容易に強度ノイズを測定できます。レーザー強度ノイズは、直線的なスペクトル密度として表示するのが最良の方法です。この測定では、任意の測定バンド幅で発生するノイズの量を測定し、バンド幅の二乗根で正規化します。一部のスペクトラムアナライザは自動的にスペクトル密度の単位（ $\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$ ）に変換しますが、多くの高周波モデルはこの機能をもちません。スペクトル密度をスペクトラムアナライザで直接測定できない場合は、得られたスペクトルを測定の等価ノイズバンド幅の二乗根で割らなければなりません。なお多くの場合、分解能バンド幅の関数であるノイズ等価バンド幅は、スペクトラムアナライザのユーザマニュアルに記載されています。

測定されたノイズスペクトル密度 $S_V(\omega)$ （ $\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$ ）は、パワー変動（ $\text{W}/\sqrt{\text{Hz}}$ ）、または一般的な相対的強度ノイズ（ $1/\sqrt{\text{Hz}}$ ） $RIN(\omega)$ に変換されます。パワー変動は、スペクトラムアナライザで測定される電圧ノイズのスペクトル密度と以下のような相関関係にあります。

$$S_I(\omega) = \frac{S_V(\omega)}{G \cdot A_V}$$

ここで G は測定レーザー波長におけるフォトレシーバの変換利得（ V/W ）、 A_V はプリアンプの利得（ V/V ）です。レーザー強度ノイズを正確に測定するためには、これらのパラメータを独立に測定する必要があります。

$$RIN(\omega) = \frac{S_V(\omega)}{V_{DC}}$$

RIN は電圧ノイズのスペクトル密度との関係式で表されます。ここで V_{DC} はスペクトラムアナライザの入力電圧です。 RIN はレーザーノイズの有効な尺度ですが、量子制限ノイズ（例：ショットノイズ）には不向きです。この理由は以下の通りです。レーザー出力には固体レーザーの緩和振動のようなパワー変動が内在するため、レーザーパワー変動の測定は光減衰された後、正確に行うことができます。これに対してショットノイズリミット RIN （式を入れて $\sqrt{2q}/IDC$ に等しい。 q ：電子の電荷、 IDC ：DCフォトカレント）は、測定の行われるフォトカレントに依存します。従って検出電流を規定しない場合、光信号を特定周波数のショットノイズリミットとみなすことはできません。

特性の定義

3dB帯域幅

ディテクタの電気出力が低周波数参照値から3dBだけ低下する周波数幅。New Focus™では光学的3 dBよりも値が小さい電気的3dB（光学的3dBは電気的な6 dB周波数と等価）を規定しています。

コモンモード除去比 (CMRR)

New FocusのバランスフォトレシーバにおいてCMRRは、そのフォトレシーバを使用したときに除去されるノイズの程度を示します。CMRRの

$$\text{CMRR} = 20 \log_{10} \left(\frac{V_{\text{CM}}}{V_{\text{BAL}}} \right)$$

定義は、ここで V_{CM} は規定周波数におけるフォトディテクタの出力電圧（リファレンスとシグナルダイオードのレーザーパワーに比例する）、 V_{BAL} は、これと同じ周波数におけるバランスフォトレシーバの出力電圧です。

cw飽和出力

ディテクタ出力が非線形化するパワー地点です。New Focusの ≤ 1 GHzフォトディテクタで、この値は最初のステージにあるアンプで制約されます。なおこの値は最大応答性をもつ波長において規定されています。

ゲインフラットネス

New Focusアンプにおいて、全周波数範囲でのゲイン変動を示します。例えばModel 1421のゲインは、7~10 dBの間で変動します。これを電圧ゲインに換算すると、2.2~3.2 dBの変動に相当します。

インパルス応答

高速の光学パルスに対するディテクタ出力の応答幅で、半値幅（FWHM）で表されます。

最大変換利得

フォトディテクタやフォトレシーバの伝達関数です。V/W単位で、規定の光入力パワーからどの程度の電圧が出力されるかを示します。フォトレシーバの変換利得は、フォトディテクタの応答性（R）、アンプのゲイン（ A_g ）、入力インピーダンス（ R_{in} ）から得られます。アンプの内蔵されていないフォトディテクタの変換利得は、フォトディテクタの応答性と負荷のインピーダンス（ R_l ）から求められます。

$$\begin{aligned} \text{Conversion Gain (G)} &= R A_g R_{in} \text{ (receivers)} \\ &= R \cdot R_l \text{ (detectors),} \end{aligned}$$

出力電圧の測定値は、変換利得と光入力パワー（ P_{in} ）から求められます。フォトレシーバの場合、

$$\begin{aligned} \text{Output Voltage} &= G P_{in} \\ &= R A_g R_{in} P_{in} \end{aligned}$$

最大光パワー

フォトディテクタのダメージ閾値で、ピーク応答時の波長で規定されません。

最大出力パワー

50Ωシステムでは、10 dBmが1.0V ピークとなります（New Focusアンプ）。

最小NEP（ノイズ等価パワー）

検出可能な最小光シグナルです。ノイズ等価パワー（NEP）は、1Hzバンド幅でシグナル対ノイズの比が“1”になる光パワーです。この最小光パワーは以下の式から導かれます。

$$\text{Minimum Optical Power} = \text{NEP} \times \sqrt{B}$$

ここでBは全体の測定バンド幅です。フォトディテクタにゲインがない場合、フォトディテクタ後続のアンプなどの装置がフォトディテクタ以上のノイズを発生するため、NEPの有効性は低くなります。なおこの値は最大応答性をもつ波長において規定されています。

ノイズ指数

温度が290 Kで1Hzバンド幅において、-174 dBmを超えるノイズの超過量です。50 Ωシステムで、8 dBは入力ノイズ電流 $pA\sqrt{Hz}$ に相当します。

光学入射

ほとんどのフォトディテクタ/フォトレシーバで、ファイバ入力型 (FC) とフリースペース型 (FS) の2種類のバージョンをご用意しています。FCモデルはファイバコネクタをもち、ファイバからの光が光活性部位に確実にあたるようアライメントされています。

ファイバのフォトディテクタ側の端面は斜め研磨されており、反射による戻り光を-35dB未満に抑えられています。標準はシングルモードファイバです。マルチモードモデルでは、GRINレンズで光をフォトダイオードへ集光します。

注：マルチモードファイバからの光をシングルモードの入力にカップリングすると結合効率が悪くなります (逆の場合は問題ありません)。そのためフォトディテクタではファイバとコネクタを正しくカップリングさせるのが重要です。

出力インピーダンス

負荷インピーダンスを指します。高速フォトディテクタの出力インピーダンスは50 Ωで、ほとんどの高速オシロスコープ及びスペクトルアナライザと正確に整合をとることができます。Model 1001、1004の出力インピーダンスはこれより大きいため、バンド幅は狭くなりますが、より高感度です。

フォトディテクタ直径

フォトディテクタの活性領域の直径です。ビーム径が活性領域よりも大きいとデバイスのバンド幅が劣化します。

ディテクタ・レシーバ用の電源

New Focus™のフォトディテクタのほとんどが±15V電源仕様です。特にModel 0901電流保護回路付き電源を強くお勧めいたします。

立ち上がり時間

測定可能な最速の立ち上がり時間で、通常10-90%の遷移時間で定義されます。New Focusの周波数ドメインフォトディテクタでは、3 dB周波数 (f_{3dB}) による近似式で表されます。フォトレシーバに内蔵されているアンプの伝達関数です。単位はV/Aで、規定のフォトカレントから得られる出力電圧を示します。

$$\text{Rise Time} \approx \frac{0.35}{f_{3dB}}$$

トランスインピーダンスゲイン

フォトレシーバに内蔵されているアンプの伝達関数です。単位はV/Aで、既定のフォトカレントから得られる出力電圧を示します。

最大応答速度 (代表値)

応答性 (R) は1Wの光入力から得られるフォトカレント量 (I_{photo}) です。この値を用いて、測定の入力パワー (P_{in}) から得られるフォトカレントを算出できます。

$$I_{photo} = R P_{in}$$

応答性は波長に依存し、量子効率 (1入射光子あたりの放出電子数) と以下の式で関連付けられます。

$$\text{Quantum Efficiency} = R \cdot h\nu / e,$$

ここでhはプランク定数、 ν は入射光の周波数、eは電子の電荷です。New Focusの高速フォトディテクタの量子効率は、波長532 nmで47%となります。この値は金属-半導体-金属 (MSM) 型フォトディテクタの約2倍です。New Focusでは波長に対する最大応答性の平均値を規定しています。各フォトディテクタは応答性が少しずつ異なるため、絶対値としては規定できません。

VSWR (電圧定在波比)

電圧定在波比です。すなわち伝送線端部でのインピーダンスのミスマッチを原因として発生する定在波振幅の最大値と最小値の比です。VSWRが1:1である場合は、終端が完全に整合されていることになります。VSWRは反射係数Rの式で表されます。

$$VSWR = \frac{1 + |R|}{1 - |R|}$$

波長範囲

フォトディテクタを使用できる波長範囲です。短波長カットオフ未満の短波長域では、光子はフォトディテクタの活性領域の外で吸収され、フォトディテクタのバンド幅が狭くなります。長波長カットオフより長い波長域では光子のエネルギーが半導体のバンドギャップより小さく、フォトディテクタは光子を吸収しません。