

中华人民共和国国家标准

GB/T 16850.3—201X

代替 GB/T 16850.3-1999

光放大器试验方法
第3部分：噪声参数

Optical amplifiers - Test methods

Part 3: noise figure parameters

(征求意见稿)

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局
中国国家标准化管理委员会

发布

目 次

前言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 缩略语	1
4 术语和定义	2
5 噪声参数测量方法概述	4
6 光谱分析仪测量方法	5
6.1 试验装置	5
6.2 试样	7
6.3 测量程序	7
6.4 计算	11
6.5 测量结果	11
7 电谱分析仪测量方法	11
7.1 试验装置	11
7.2 试样	13
7.3 测量程序	13
7.4 计算	16
7.5 测量结果	18
8 Sig_ASE 测量方法	18
8.1 试验装置	18
8.2 试样	21
8.3 测量程序	21
8.4 计算	23
8.5 测量结果	23
附录 A (资料性附录) 光谱仪分析法和电谱仪分析法测量噪声因子的适用性	24
附录 B (资料性附录) Sig_ASE 参数的应用范围及与自发辐射—自发辐射差拍噪声的关系	25

前 言

GB/T 16850《光放大器试验方法》已经或计划发布以下部分：

- 第 1 部分：功率和增益参数
- 第 2 部分：增益瞬态参数；
- 第 3 部分：噪声参数；
- 第 5 部分：反射参数；
- 第 6 部分：泵浦泄漏参数；
- 第 7 部分：带外插入损耗参数；
- 第 10 部分：多通道参数；
- 第 11 部分：偏振模色散参数；

本部分为 GB/T 16850 的第 3 部分。

本部分按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本部分代替 GB/T 16850.3—1999《光纤放大器试验方法基本规范 第 3 部分：噪声参数的试验方法》。

本部分与 GB/T 16850.3—1999 相比，除编辑性修改外，主要技术变化如下：

- 本部分名称改为《光放大器试验方法 第 3 部分：噪声参数》；
- 修改了本部分的适用范围，从适用于稀土元素掺杂的有源光纤光放大器，扩展到了包括拉曼光放大器、半导体光放大器模块和掺杂波导光放大器在内的光放大器；（见 1，见 1999 版 1）
- 修改了本部分的适用范围，限定本部分只适用于单波道光放大器噪声参数的测量，多波道光放大器噪声参数的测量将在 GB/T 16850《光放大器试验方法》的其它部分规定；（见 1，见 1999 版 1）
- 增加了信号散弹噪声因子、放大的自发辐射（ASE）散弹噪声因子、信号-自发辐射噪声因子、自发辐射-自发辐射噪声因子、多径干扰（MPI）噪声因子、MPI 品质因数和信号—总放大的自发辐射（ASE）功率比等术语的定义（见 4）；
- 增加了总噪声因子和各个噪声因子关系的说明（见 5）；
- 增加了窄带光源校准法中扫描范围参量 δ 取值范围的说明（见 6.3.2.1）；
- 增加了信号—总 ASE 功率比（*Sig_ASE*）测量方法的说明（见 5）；
- 增加了电谱分析法测量噪声系数的方法（见 7）；
- 增加了信号—总 ASE 功率比的两种测量方法（见 8）；
- 增加了附录 A 光谱分析法和电谱分析法测量噪声系数的适用性（见附录 A）；
- 增加了附录 B *Sig_ASE* 参数的应用范围及与自发辐射—自发辐射差拍噪声的关系（见附录 B）。

本部分使用重新起草法参考 IEC 61290-3：2008《光放大器测试方法 第 3 部分：噪声参数》、IEC

61290-3-1: 2003《光放大器测试方法 第 3-1 部分: 噪声参数—光谱仪法》、IEC 61290-3-2: 2008《光放大器测试方法 第 3-2 部分: 噪声参数—电谱仪法》和 IEC 61290-3-3: 2013《光放大器测试方法 第 3-3 部分: 噪声系数参数—信号与总 ASE 功率比》编制。与上述几个标准的一致性程度为非等效。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本部分由中华人民共和国工业和信息化部提出。

本部分由全国通信标准化技术委员会 (SAC/TC 485) 归口。

本部分起草单位: 中国信科集团有限公司、中兴通讯股份有限公司、中国信息通信研究院、武汉华工正源光子技术有限公司。

本部分主要起草人: 陈俊, 付成鹏, 江毅, XXX

本部分所代替标准的历次版本发布情况为:

—— GB/T 16850.3—1999

光放大器试验方法基本规范 第3部分:噪声参数

1 范围

GB/T 16850 的本部分规定了单波道光放大器(OA)噪声参数的光谱分析仪、电谱分析仪测量方法,以及信号—总受激放大的自发辐射(ASE)功率比(Sig_{ASE})的测量方法,确定了对OA噪声参数进行准确、可靠测量的统一要求。

本部分适用于单波道OA,包括基于稀土元素掺杂或者基于拉曼效应的光泵浦光纤放大器、半导体光放大器(SOA)模块和平面光波导放大器噪声参数的测量。

注:多波道OA噪声参数的测量方法预计在本标准第10部分发布。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB/T 16849 光纤放大器总规范

IEC 61291-1:2018 光放大器 – 第1部分:通用规范 (Optical amplifiers - Part 1: Generic specification)

IEC 61290-1-2014 光放大器—试验方法—第1部分:功率和增益参数 (Optical amplifiers - Test methods - Part 1: Power and gain parameters)

IEC 60728-6-2011 电视信号和声音信号及交互服务用电缆网络.第6部分:光学设备 (Cabled distribution systems for television and sound signals - Part 6: Optical equipment)

3 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

ASE 放大的自发辐射 (Amplified Spontaneous Emission)

DBR 分布布拉格反射激光器 (Distributed Bragg Reflector)

DFB 分布反馈 (Distributed Feedback)

DI 直接内插法 (Direct Interpolation)

ECL 外腔激光器 (ECL External cavity laser)

ESA 电谱分析仪 (Electrical Spectrum Analyzer)

F 噪声因子 (Noise Factor)

FWHM 半高全宽 (Full Width Half Maximum)

LED 发光二极管 (Light emitting diode)

MPI 多径干涉 (Multiple Path Interference)

NF 噪声系数 (Noise Figure)

OA 光放大器 (Optical Amplifiers)

OSA 光谱分析仪 (Optical Spectrum Analyzer)

PDG 偏振相关增益 (Polarization Dependent Gain)

PN 偏振消除法 (Polarization Nulling With Interpolation)

RBW 分辨率带宽 (Resolution Band Width)

RIN 相对强度噪声 (Relative Intensity Noise)

RMS 均方根值 (Root Mean Square)

Sig_ASE 信号—总受激的放大自发辐射功率比 (Signal power to total ASE power ratio)

VOA 可变衰减器 (Variable Optical Attenuator)

4 术语和定义

GB/T 16849 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

4.1

噪声因子 **noise factor**

噪声因子定义为散弹噪声受限的光信号通过 OA 放大后, 经探测量子效率为 1、且无额外噪声的理想光探测器进行接收, 输入端和输出端电信噪比之比。

$$F = \frac{SNR_{input}}{SNR_{output}} \dots\dots\dots (1)$$

式中 F —— 噪声系数;

SNR_{input} —— 散弹噪声受限的输入光信号的(电)信噪比;

SNR_{output} —— 输出光信号的(电)信噪比。

注: OA 的噪声来自多个不同方面的贡献, 例如: 信号—自发辐射差拍噪声、自发辐射—自发辐射差拍噪声、多径干扰噪声、信号散弹噪声, 放大的自发辐射(ASE)散弹噪声等, 相应的, 噪声因子也可分解为多个噪声因子的贡献。

4.2

噪声系数 **noise figure**

噪声因子的对数形式, 以 dB 为单位。

$$NF = 10 \lg F \dots\dots\dots (2)$$

4.3

信号散弹噪声因子 **signal shot noise factor**

输入光信号的散弹噪声经过 OA 放大后, 对 OA 噪声因子的贡献:

$$F_{shot,sig} = 1/G \dots\dots\dots (3)$$

式中 G 是信号波长处的增益。

4.4

放大的自发辐射(ASE)散弹噪声因子 **ASE shot noise factor**

OA 的 ASE 产生的散弹噪声对 OA 噪声因子的贡献:

$$F_{shot,ASE} = P_{ASE} / (G^2 P_{in}) \dots\dots\dots (4)$$

式中 P_{in} —— 输入信号光功率, 单位为 W;

P_{ASE} —— 波长积分 ASE 光功率, 单位为 W。

4.5

信号-自发辐射噪声因子 **signal-spontaneous noise factor**

由放大后的信号光和 ASE 差拍产生的噪声对 OA 噪声因子的贡献:

$$F_{\text{sig-sp}} = 2\rho_{\text{ASE,P}} / (Gh\nu_{\text{sig}}) \dots\dots\dots (5)$$

式中 $\rho_{\text{ASE,P}}$ —— 在信号波长处与输出光信号偏振方向相同的 ASE 光功率谱密度，单位为 W/Hz；

- h —— 普朗克常数；
- ν_{sig} —— 信号光的频率，单位为 Hz；

4.6

自发辐射-自发辐射噪声因子 spontaneous-spontaneous noise factor

在ASE带宽内，由ASE-ASE光差拍产生的噪声对OA噪声因子的贡献：

$$F_{\text{sp-sp}} = \frac{\rho_{\text{ASE}}^2 B_{\text{sp-sp}}}{2h\nu_{\text{sig}} G^2 P_{\text{in}}} \dots\dots\dots (6)$$

式中 ρ_{ASE} —— 信号波长处总的（非偏振的）ASE 光功率谱密度，单位为 W/Hz；

$B_{\text{sp-sp}}$ —— 在 GB/T 16849 中定义的等效自发辐射-自发辐射光谱带宽，单位为 Hz。

注：如果 $B_{\text{sp-sp}}$ 已知， $F_{\text{sp-sp}}$ 无需进行测量即可根据信号—自发辐射噪声因子和输入功率计算得到。由于任何偏振态的ASE对 $B_{\text{sp-sp}}$ 均有贡献，如果ASE不是偏振无关的，那么计算时还需要知道ASE的偏振度，SOA就是一个典型的例子。

4.7

多径干扰 (MPI) 噪声因子 multiple path interference (MPI) noise factor

OA内部或外部的两个或两个以上反射点将对输出光产生双程反射，该双程反射光与输出信号光之间发生差拍干涉时所产生的噪声称为MPI噪声。

当所有反射点之间的距离大于光源的相干长度时，MPI噪声因子为（洛伦兹模型）：

$$F_{\text{mpi}} = \frac{2P_{\text{in}}}{h\nu\pi} \frac{\Delta\nu}{f^2 + \Delta\nu^2} \sum_i (p_i G_{\text{cav},i}) \dots\dots\dots (7)$$

式中 $G_{\text{cav},i}$ —— OA 中第 i 个寄生腔的增益，其值=前向增益×前向反射率×后向增益×后向反射率；

p_i —— 偏振对准因子，表示第 i 个寄生腔中前向信号光和双程反射信号光之间偏振态的匹配程度（ p_i 在 0 和 1 之间， $p_i=1$ 表示完全匹配）；

$\Delta\nu$ —— 光源线宽的半高全宽（FWHM）；

f —— 基带频率；

当两个或多个反射点之间的距离小于光源的相干长度时，信号光与两个或多个双程反射光之间是相干的，MPI不能被认为是噪声，而是一种缓慢的功率起伏。这种情况下，MPI对噪声因子无贡献。

注：在拉曼光放大器中，众所周知的双瑞利散射（double-Rayleigh scattering）是MPI的一种特殊形式。当长段光纤可对小信号光提供增益时，光纤中的瑞利散射相当于一系列离散的反射点，可产生显著的MPI噪声。

4.8

MPI 品质因数 MPI figure of merit

MPI对噪声因子的贡献与光源的线宽 $\Delta\nu$ 相关（参见（7）式）， $\Delta\nu$ 与传输系统或者测量装置有关，而不仅仅取决于OA本身。为从OA噪声因子中消除光源线宽这个参量，对 F_{mpi} 在频域进行积分：

$$I_{mpi} = \int_{f=0}^{\infty} F_{mpi} df = \frac{P_{in}}{h\nu} \sum_i (p_i G_{cav,i}) \quad [\text{Hz}] \quad \dots\dots\dots (8)$$

式中 I_{mpi} 为MPI品质因数，单位为Hz，它不依赖于光源的线宽和基带频率，用于表征OA的MPI特性。从 I_{mpi} 也可计算出MPI噪声因子：

$$F_{mpi} = \frac{2I_{mpi}P_{in}}{\pi} \frac{\Delta\nu}{f^2 + \nu^2} \quad \dots\dots\dots (9)$$

4.9

信号与总 ASE 功率比 (Sig_ASE) signal to total ASE power ratio (Sig_ASE)

在 OA 输出端，信号光功率与总 ASE 功率之比：

$$Sig_ASE = P_{out}/P_{ASE} \quad \dots\dots\dots (10)$$

式中 P_{out} —— OA 输出功率；

P_{ASE} —— OA 输出 ASE 总功率。

$$P_{ASE} = \int_{B_{ASE}} \rho_{ASE}(\lambda) d\lambda \quad \dots\dots\dots (11)$$

式中 $\rho_{ASE}(\lambda)$ —— ASE 的谱密度；

B_{ASE} —— OA 的 ASE 谱宽。

B_{ASE} 定义为至少包含 99% 的 ASE 功率在内的带宽。

5 噪声参数测量方法概述

OA的噪声参数包括以下项目：

- a) (总) 噪声系数 NF 或 (总) 噪声因子 F ；
- b) 信号自发辐射差拍噪声系数或噪声因子；
- c) 散弹噪声系数或噪声因子；
- d) 自发辐射差拍噪声系数或噪声因子，
- e) MPI噪声系数或噪声因子，MPI品质因数；
- f) 等效自发辐射-自发辐射光谱带宽 B_{sp-sp} ；
- g) 前向ASE功率；
- h) 反向ASE功率；
- i) ASE谱宽；
- j) 信号与总ASE功率比 (Sig_ASE)。

其中，噪声系数 NF 或噪声因子 F 是OA噪声特性的核心参数，总噪声因子可分解为几个噪声因子之和：

$$F_{total} = F_{shot,sig} + F_{shot,ASE} + F_{sig-sp} + F_{sp-sp} + F_{mpi} \quad \dots\dots\dots (12)$$

对噪声因子的测量有两类广泛采用但本质上完全不同的方法：光谱分析仪(OSA)法和电谱分析仪(ESA)法。对这两种方法基本原理和适用性的分析参见附录 A。第 6 章和第 7 章分别对这两种试验方法进行了描述。两种方法对噪声参数可测性的对比如表 1 所示。与自发辐射—自发辐射差拍噪声因子不同， Sig_ASE 是另外一种表征自发辐射—自发辐射差拍噪声强度的参量，其应用范围及与自发辐射—自发辐射差拍噪声因子的关系参见附录 B。

表 1 光谱分析仪和电谱分析仪两种方法对噪声参数的可测性

参数	光谱分析仪方法	电谱分析仪方法
总的 NF 或 F	×	√
信号—自发辐射差拍 NF 或 F	√	(√)
散弹 NF 或 F	(√)	(√)
自发辐射—自发辐射差拍 NF 或 F	(√)	×
MPI NF 或 F	×	√
等效自发辐射—自发辐射光谱带宽 B_{sp-sp}	(√)	×
前向 ASE 功率	√	(√)
后向 ASE 功率	(√)	×
ASE 谱宽	(√)	(√)
Sig_ASE	√	×

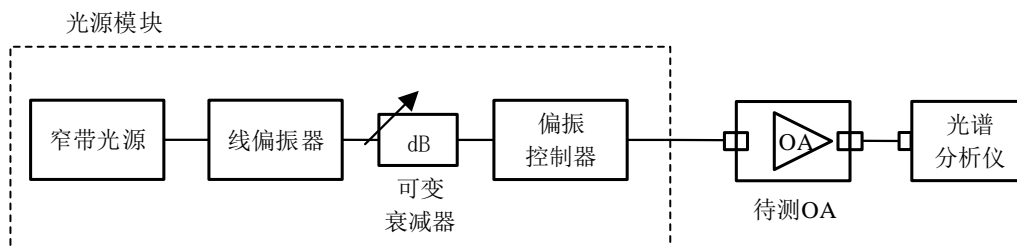
注 1：√表示本方法可测参数；(√)表示本方法具有测量该参数的可能性；×表示本方法不能测量。
注 2：除光谱仪法外， Sig_ASE 参量还可使用带通滤波器和光功率计法测量，见第 8 章。

6 光谱分析仪测量方法

6.1 试验装置

6.1.1 试验装置框图

光谱分析仪法测量 OA 噪声参数常用的试验方法可分为两种，ASE 直接内插法 (DI) 和偏振消除法 (PN)，其系统框图分别如图 1a 和图 1b 所示。



a) ASE 直接内插法 (DI)

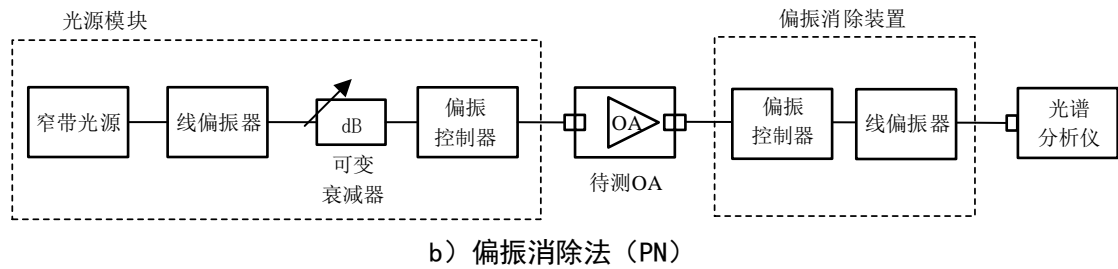


图 1 光谱分析仪法测量 OA 噪声参数的两种典型试验装置框图

6.1.2 窄带光源

试验使用的窄带光源可分为固定波长光源和可调波长光源两类。

a) 固定波长光源

光源应满足待测样品相关指标对波长和功率的要求。除非另有规定，应使用连续光源，其光谱宽度（半高宽 FWHM）小于 1 nm。分布反馈激光器（DFB）、分布布拉格反射激光器（DBR）和外腔激光器（ECL）等单谱线激光器均可作为光源。光源的自发辐射和光谱底部的谱展宽应尽可能小，边模抑制比应大于 30 dB，输出功率波动应小于 0.05 dB。

注：在光源输出端使用光隔离器可避免反馈光对光源边模抑制比和输出功率波动的影响。

b) 可调波长光源

除光源的波长调谐范围和输出功率应满足待测样品相关指标的要求，其它性能指标要求与固定波长光源相同。

6.1.3 偏振控制器

该器件应能把任意偏振态的信号光转变为任何其它可能的偏振状态（例如：各种方向的线偏振、椭圆偏振、圆偏振）。偏振控制器可以是全光纤型或者由晶体器件型，在各种偏振态下，其插入损耗变化应小于 0.2 dB，每一端的光回波损耗应大于 50 dB。

6.1.4 线偏振器

线偏振器的消光比应至少为 30 dB，在每一端的光回波损耗应大于 50 dB。为使输入信号功率最大，宜优先选用可旋转的线偏振器。

6.1.5 可变光衰减器

衰减可变范围应大于 40 dB，稳定性应优于 ± 0.1 dB，每一端的光回波损耗应大于 50 dB。

6.1.6 OSA

在 OA 工作波长带宽内，OSA 测量的偏振相关性应优于 ± 0.1 dB，稳定性应优于 ± 0.1 dB，测量波长准确度应优于 ± 0.05 nm，在动态范围内的线性度应优于 ± 0.2 dB，在输入端口的光回波损耗应大于 50 dB。

6.1.7 光功率计

在 OA 工作波长带宽和 -40 dBm 至 $+20$ dBm 的功率范围内，光功率计的测量准确度应优于 ± 0.2 dB，且与偏振状态无关。

注：光功率计仅用于校准。

6.1.8 宽带光源

光源应能在 OA 工作波长带宽内（例如：1530~1565 nm）提供宽带光功率，在测量带宽范围内（取决于 OSA 最大分辨率带宽(RBW)，通常不超过 10nm）输出功率谱平坦度应优于 ± 0.1 dB。

注：无输入光信号的 OA 所产生的 ASE 可作为宽带光源。

6.1.9 光连接器

光连接器应与待测 OA 的输入和输出端口兼容，连接损耗的重复性应优于 ± 0.1 dB，光回波损耗应大于 50 dB。

6.1.10 光纤跳线

光纤跳线应尽可能与 OA 输入和输出端口所用尾纤型号相同。如跳线与 OA 尾纤型号不同，两者应尽可能具有相同的模场直径，使连接损耗小于 0.2dB。跳线每一端的光回波损耗应大于 50 dB，长度应短于 2 m。

6.2 试样

OA 应工作在标称工作条件下。为避免不希望的反射可能引起 OA 激射振荡，应使用光隔离器将试验下的 OA 与外部隔离。这样将减小信号不稳定性和测量的不准确度。

在测量期间内，应注意保持输入光的偏振状态。输入光偏振状态的变化，将因为所有使用光部件的微小偏振相关性而导致输入光功率变化，从而产生测量误差。

6.3 测量程序

6.3.1 测量程序概述

光谱分析法测量噪声因子基于下列参量的测量（参见（5）式）：

- 输入和输出信号光功率；
- 待测 OA 输出端 ASE 功率；
- OSA 的光带宽。

在信号波长处的 ASE 功率可采用 DI 或者 PN 法测量。OSA 光带宽的校准用于准确计算 ASE 光功率谱密度

6.3.2 校准

6.3.2.1 OSA 光带宽的校准

OSA 的频域光带宽 B_o 可用它的 RBW 确定。光带宽的校准可用一个窄带光源或一个宽带光源实现。两种校准方法均适于 DI 测量方法或 PN 测量方法。

a) 用窄带光源校准

校准步骤如下：

- 1) 将可调谐窄带光源（ECL 或 DFB）的输出端与 OSA 直接连起来；
- 2) 置 OSA 中心波长至被校信号波长 λ_s ；
- 3) 置 OSA 波长间隔为零；
- 4) 置 OSA 分辨率带宽（RBW）至所需值；
- 5) 置窄带光源波长至 λ_i ，使得 $\lambda_s - RBW - \delta \leq \lambda_i \leq \lambda_s + RBW + \delta$ ， δ 应根据 OSA 滤波器带宽确定，以使得两端波长落在 OSA 滤波器通带之外；
- 6) 记录 OSA 信号功率 $P(\lambda_i)$ 和 $P(\lambda_s)$ （线性单位）。
- 7) 重复步骤 5) 和 6)，在 $\lambda_s - RBW - \delta \leq \lambda_i \leq \lambda_s + RBW + \delta$ 波长范围内调窄带光源

波长;

8) 按照下式确定 OSA 的波长光带宽:

$$\Delta\lambda_{\text{BW}}(\lambda_s) = \int [P(\lambda_i)/P(\lambda_s)]d\lambda_i \dots\dots\dots (13)$$

式中:

$P(\lambda_s)$ —— 被校信号波长 λ_s 上测得的光功率, mW;

$P(\lambda_i)$ —— 窄带光源某一波长 λ_i 测得的光功率, mW;

9) 对不同的信号波长重复以上程序。

注 1: OSA 滤波器带宽可通过可调谐窄带光源在 λ_s 附近扫描的结果来确定。通常把在 λ_s 两侧, 可调谐光源波长功率下降为 λ_s 处功率的 1/10 时, 两波长间隔看作 OSA 滤波器带宽。

注 2: 测量精度与窄带光源调谐间隔 $\Delta\lambda_i$ 和整个波长范围内的功率平坦度有关。调谐间隔宜小于 0.1 nm, 在整个波长范围内光功率变化应不大于 0.4 dB。

b) 用宽带光源校准

本方法要求当分辨率带宽为最大值时, OSA 具有一个矩形带宽限制滤波器。校准步骤如下:

- 1) 首先将一窄带光源 (ECL 或 DFB) 的输出端与 OSA 直接连起来, 如果光源波长可调的话 (如 ECL), 置窄带光源波长至一个规定的光源波长 λ_s ;
- 2) 置 OSA 分辨率带宽至最大值, 但不宜大于 10nm;
- 3) 用 OSA 测量窄带信号的 FWHM 谱宽, $\Delta\lambda_{\text{RBW max}}$;
- 4) 将宽带光源输出直接连到 OSA;
- 5) 保持 OSA 分辨率带宽在最大值;
- 6) 用 OSA 测量在给定波长 λ_s 上的输出功率 $P_{\text{RBW max}}$ (线性单位);
- 7) 置 OSA 分辨率带宽至所需值;
- 8) 用 OSA 测量在给定波长 λ_s 上的输出功率 P_{RBW} (线性单位);
- 9) 按照下式确定 OSA 的波长光带宽

$$\Delta\lambda_{\text{BW}}(\lambda_s) = [P_{\text{RBW}}/P_{\text{RBW max}}] \Delta\lambda_{\text{RBW}}(\lambda_s) \dots\dots\dots (14)$$

式中:

P_{RBW} —— 在给定波长 λ_s 上, 置 OSA 分辨率带宽为所需值时测得的输出功率, mW;

$P_{\text{RBW max}}$ —— 在给定波长 λ_s 上, 最 OSA 分辨率带宽为最大值时测得的输出功率, mW;

$\Delta\lambda_{\text{RBW max}}(\lambda_s)$ —— 置 OSA 分辨率带宽为最大值时, 测得的窄带信号的 FWHM 谱宽, nm。

10) 对不同的信号波长重复以上步骤。

对以上两种方法确定的波长光带宽 $\Delta\lambda_{\text{RBW max}}(\lambda_s)$, 可用下面的近似方程式转换为频域光带宽 $B_o(\lambda_s)$ (单位为 nm):

$$B_o(\lambda_s) = c[(\lambda_s - \Delta\lambda_{\text{BW}}(\lambda_s)/2)^{-1} - (\lambda_s + \Delta\lambda_{\text{BW}}(\lambda_s)/2)^{-1}] \dots\dots\dots (15)$$

式中:

c —— 自由空间中的光速, 3×10^8 m/s;

λ_s —— 给定的光源波长, nm;

$\Delta\lambda_{\text{BW}}(\lambda_s)$ —— OSA 的波长光带宽, nm。

注 1: 一旦光带宽值确定下来, 用 OSA 进行的全部测量都应采用校准时设定的 RBW。

注 2: 如果 OA 中包括一个窄带光滤波器, 当校准 $B_o(\lambda_s)$ 时, OA 应置于光源和 OSA 之间。设定的分辨

率带宽必须小于光滤波器带宽。

6.3.2.2 偏振消除装置插入损耗的校准

采用 PN 方法时，需要对偏振消除装置插入损耗校准，插入损耗校准既可在 ASE 噪声功率测量之前进行，也可在 ASE 噪声功率测量之后进行。校准步骤如下：

- 1) 将光源模块的光输出直接连到 OSA，调光源模块至待测 OA 相关指标所规定的信号波长 λ_s ，调可变光衰减器使输入信号功率达到所需值，调光源模块偏振控制器以获得所需的输入信号偏振状态。用 OSA 测量光源模块功率 $P_s(\text{dBm})$ ；
- 2) 将光源模块光输出与偏振消除装置的输入连接，再将偏振消除装置的输出与 OSA 直接连起；
- 3) 调偏振消除装置的偏振控制器和线偏振器，使输出信号最小；
- 4) 使偏振消除装置的线偏振器处于步骤 3) 确定的状态，调节偏振控制器使输出信号最大；
- 5) 用 OSA 测量此时的输出信号功率 $P_{pol}(\text{dBm})$ ；
- 6) 用下式确定偏振消除装置的插入损耗 $L_{pol}(\text{dB})$ ：

$$L_{pol}(\lambda_s) = P_s - P_{pol} \quad \dots\dots\dots (16)$$

式中：

P_s —— 光源模块输出功率，单位为 dBm；

P_{pol} —— 偏振消除装置输出功率，单位为 dBm。

6.3.2.3 OSA 功率校正因子的校准

OSA 功率校正因子 (PCF) 把 OSA 测得的功率校准到绝对功率。本校准程序对 DI 和 PN 测量方法均适用。校准步骤如下。

- 1) 调光源模块至信号波长 λ_s ，将光源模块输出直接与光功率计连接起来，测量功率 $P_{PWRMTR}(\text{dBm})$ 。
- 2) 将光源模块输出与光功率计断开，将光源模块输出直接与 OSA 连接起来，测量光功率 $P_{OSA}(\text{dBm})$ 。
- 3) 按照下式确定 OSA 的功率校正因子 PCF(dB)：

$$\text{PCF}(\lambda_s) = P_{PWRMTR} - P_{OSA} \quad \dots\dots\dots (17)$$

式中： P_{PWRMTR} —— 用光功率计测量的信号波长上光源功率，dBm；

P_{OSA} —— 用 OSA 测量的信号波长上光源功率，dBm。

测量所用的仪器仪表应在规定的有效校准期内，如无特殊说明，其精度应高于所测参数精度至少一个数量级。

6.3.3 测量

6.3.3.1 单波道内插法

测量步骤如下：

- 1) 置 OSA 分辨率带宽至校准值。在噪声功率测量的整个过程中不要改变该设定值；
- 2) 置光信号波长至待测 OA 相关指标所规定的波长；
- 3) 调光源模块的线偏振器，使光信号功率最大；
- 4) 调光源模块的偏振控制器，选择待测 OA 相关指标所指明的一個输入信号偏振状

态；

- 5) 调光源模块的可变光衰减器使光信号功率至待测 OA 相关指标所规定的功率值；
- 6) 将光源模块输出直接连接到 OSA 输入；
- 7) 测量光源的自发辐射功率谱 $P_{SSE}(\lambda)$ (dBm)。用下式确定光源的总自发辐射功率谱 $P_{SSE}^{total}(\lambda)$ (dBm):

$$P_{SSE}^{total}(\lambda) = P_{SSE}(\lambda) + PCF \quad \dots\dots\dots (18)$$

式中: $P_{SSE}(\lambda)$ ——光源的自发辐射功率谱, dBm;

PCF —— OSA 的功率校正因子, dB。

- 8) 将光源模块与 OSA 分开, 在二者之间接入 OA, 如图 1a 所示。
- 9) 测量放大的光源信号波长附近的前向 ASE 功率。根据这些测量波长上的前向 ASE 功率值, 用一合适的多项拟合式进行内插, 计算出未校正的以信号波长为中心的前向 ASE 功率 (dBm)。
- 10) 按照下式确定总的来校正的前向 ASE 功率谱 $P_{SE}^{total}(\lambda)$ (dBm):

$$P_{SE}^{total}(\lambda) = P_{SE}(\lambda) + PCF \quad \dots\dots\dots(19)$$

式中: $P_{SE}(\lambda)$ ——未校正的 OA 前向 ASE 功率谱, dBm;

PCF —— OSA 的功率校正因子, dB。

- 11) 用 GB/T 16850.1 规定的试验方法测量 OA 的增益 G(线性单位)。
- 12) 从未校正的前向 ASE 功率谱中减去光源的自发辐射功率, 就可确定 OA 在信号波长上的前向 ASE 功率值, 如式 (20) 所示:

$$P_{ASE}^{amp}(\lambda_s) = 10 \lg \left[10^{\frac{P_{SE}^{total}(\lambda_s)}{10}} - G \times 10^{\frac{P_{SSE}(\lambda_s)}{10}} \right] \quad \dots\dots\dots(20)$$

式中: $P_{SE}^{total}(\lambda_s)$ —— 信号波长上未校正的 OA 的前向 ASE 功率谱, dBm;

$P_{SSE}(\lambda_s)$ —— 信号波长上光源的自发辐射功率谱, dBm;

G —— OA 的增益 (线性单位) 。

6.3.3.2 偏振消除法

测量步骤如下:

- 1) 将被测 OA 接入测量装置, 如图 1b 所示;
- 2) 置 OSA 分辨率带宽至校准值。在噪声功率测量的整个过程中不要改变该设定值;
- 3) 置光信号波长至被测 OA 相关指标所规定的波长;
- 4) 调光源模块的线偏振器, 使光信号功率最大;
- 5) 调光源模块的偏振控制器, 选择待测 OA 相关指标所指明的一个输入信号偏振态;
- 6) 调光源模块的可变光衰减器, 使光信号功率至待测 OA 相关指标所规定的功率;
- 7) 调输出偏振控制器和偏振消除装置的线偏振器使输出信号最大;
- 8) 使偏振器处于步骤 7) 确定的状态, 调偏振控制器使 OA 输出信号最小;
- 9) 测量放大的光源信号波长附近的自发辐射功率。采用一合适的内插技术确定信号波长上未校正的自发辐射功率谱 $P_{SE}(\lambda_s)$ (dBm) ；
- 10) 按照下式确定 OA 的总前向 ASE 功率 $P_{ASE}^{amp}(\lambda_s)$ (dBm):

$$P_{ASE}^{amp}(\lambda_s) = P_{SE}(\lambda_s) + L_{p01} + PCF + 3 \quad \dots\dots\dots (21)$$

式中: $P_{SE}(\lambda_s)$ —— 信号波长上, OA 的未校正的总自发辐射功率谱, dBm;

L_{P01} —— 偏振消除装置的插入损耗, dB;

PCF —— OSA 功率校正因子, dB。

11) 用 IEC 61290-1 规定的试验方法测量 OA 的增益 G (线性单位)。

6.4 计算

信号自发辐射差拍噪声系数用下面公式计算:

$$NF_{sig-sp}(P_{in}, \lambda_s) = P_{ASE}^{amp}(\lambda_s) - 10 \lg[Gh\nu B_o(\lambda_s)] \quad \dots\dots\dots (22)$$

式中: $P_{ASE}^{amp}(\lambda_s)$ —— OA 的总前向 ASE 功率, dBm;

G —— OA 的增益 (线性单位);

h —— 普朗克常数, $6.626 \times 10^{-34} \text{Ws}^2$;

ν —— 光信号频率, Hz;

$B_o(\lambda_s)$ —— OSA 的光带宽, Hz。

6.5 测量结果

测量结果报告应包括

- a) 试验方法标准编号;
- b) 试验方法和试验装置框图;
- c) 光源类型及 FWHM 谱宽;
- d) 泵浦光功率 (采用时);
- e) 环境温度和相对湿度;
- f) 输入信号光功率 P_{in} ;
- g) 光谱分析仪波长分辨率和光带宽 B_o ;
- h) 输入信号波长 λ_s 和测量波长范围;
- i) OA 的线性增益 G ;
- j) 总的前向 ASE 功率;
- k) 信号自发辐射差拍噪声系数 NF_{sig-sp} ;

7 电谱分析仪测量方法

7.1 试验装置

7.1.1 试验装置框图

电谱分析仪方法的试验装置如图2所示

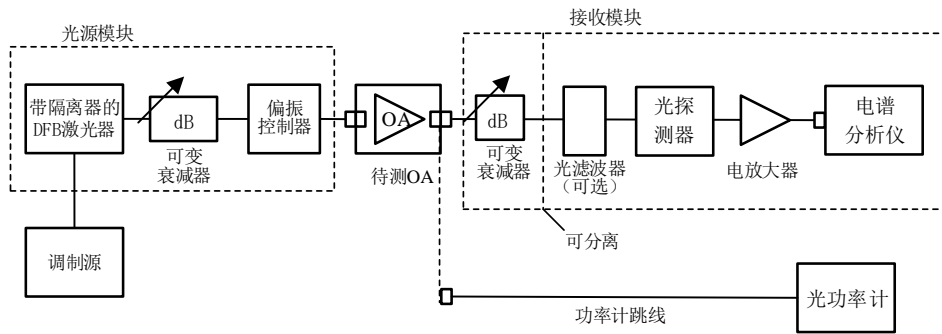


图2 电谱分析仪测量OA噪声参数的典型试验装置框图

7.1.2 光源模块

光源模块包含下列组件：

- a) 单谱线型激光源：单谱线的DFB，DBR或者ECL激光器均可作为光源。激光源应采用直接或外调制方式进行单频正弦波幅度调制，调制频率应远大于其线宽。建议调制频率至少是线宽的3倍。相对调制幅度 m （光功率调制幅度的均方差值与平均光功率值之比）应足够小，以保证工作在线性区域，通常 m 合适的取值在2%到10%之间。

光源的平均输出光功率 $P_{in,0}$ 应大于待测OA的最大输入光功率。

调制后光源的半高全宽(FWHM)应在20 MHz到100 MHz之间。此范围为精确测量MPI噪声贡献的最佳范围，因为它密切反映了在系统中与OA共同使用的DFB激光器的典型线宽。对掺杂光纤型OA，20 MHz的线宽已足够反映OA内部最短距离为7.5 m的反射点之间产生的MPI噪声。使用更窄的线宽将使OA内部反射点以相干的方式干涉，导致噪声系数测量产生严重的误差。而大于100 MHz的线宽有可能导致OA在ESA带宽的高频端之外产生噪声。

在所关心的MPI噪声测试频率范围内（例如10 MHz至2 GHz），激光源的相对强度噪声(RIN)应小于-150 dB/Hz。

光源自发辐射功率与信号功率之比应小于-40 dB，以避免光源的自发辐射光产生过大的自发辐射-自发辐射差拍噪声。

- b) 内建或外置的隔离器：以避免外部反射影响激光源的谱型和RIN。隔离器的隔离度应优于60 dB，隔离器输出端的反射应小于-50 dB。
- c) 可变光衰减器：其衰减范围大于40 dB，线性度优于 ± 0.05 dB，内部/外部反射率小于-50 dB。衰减器用于改变激光源的输出功率而不改变其谱型、RIN和偏振态，其目的是控制OA的输入功率以及在校正过程中把散弹噪声从其它噪声成分中区分出来。

注：如果使用ESA测量衰减量的变化，那么也可使用对线性度无要求的简单衰减器。

- d) 偏振控制器。该器件应从任意偏振态的输入光产生所有可能的输出偏振态（例如：各种方向的线偏振、椭圆偏振、圆偏振），输出各偏振态之间的功率偏差应小于 ± 0.01 dB，回波损耗大于50 dB。

7.1.3 调制源（信号发生器）

产生正弦调制信号，其频率和幅度应满足上述光源模块的要求。

7.1.4 光功率计

在OA工作波长带宽内，光功率计的测量准确度应优于 ± 0.2 dB，且与偏振状态无关。当光源模块中的可变衰减器的衰减值设置为0 dB时，光功率计所能测量的最小功率应低于此时光源的输出功率。如果在最大输入功率时OA的输出功率超过了光功率计的量程，建议在待测OA的输出端接入输出衰减器，校正衰减量后，即可测量OA的输出功率，减小高功率测量的需求。

7.1.5 接收模块

在光源模块的可变输入衰减器设置为0 dB时，接收模块的等效噪声功率(在光域W/Hz)应不大于光源模块与RIN相关的噪声水平。接收模块包含下列组件：

- a) 可变输出衰减器，其衰减范围大于40 dB，线性度优于 ± 0.05 dB，峰—峰偏振相关性优于0.05 dB，基本平坦的波长响应，内部/外部反射率小于-50 dB，最大允许输入功率大于OA的最大输出功率。此衰减器用于探测器输入前进行精确的功率衰减；
- b) 光电接收机，由光电探测器和高输入阻抗（降低热噪声）的电放大器组成。光电探测器的反射率应小于-30 dB，峰—峰偏振相关性优于0.05 dB；
- c) ESA: 在其测试频率范围应任何MPI对NF的贡献都衰减到可忽略不计的程度。通常，10 M至2 GHz的频率范围可满足需求。当光源模块的可变输入衰减器设置为0 dB，并直接连接到光电接收机时，ESA的噪声门限应低于电放大器输出的噪声门限。(在此情形下，电放大器的噪声中包含了来自源的RIN、探测器散弹噪声和电放大器的热噪声)

7.1.6 光纤跳线

与 6.1.10 要求相同。

7.1.7 光连接器

光连接器连接损耗的重复性应优于 ± 0.1 dB，该器件的光回波损耗应大于 50 dB。光纤熔接也可用于 OA 和试验装置连接（被认为是最准确的方法）

7.1.8 光滤波器（可选）

光滤波器用于减小自发辐射—自发辐射差拍噪声对测量结果的影响。光滤波器的带宽需要足够小以得到预期的自发辐射—自发辐射差拍噪声减少量，其光回波损耗应大于 50 dB，峰—峰偏振相关性优于 0.05 dB，阻带衰减量大于 30 dB。

7.2 试样

与 6.2 中要求相同。

7.3 测量程序

7.3.1 概述

使用电谱分析法测量的信号和噪声功率均在电域并以 W 作为单位。所有的噪声测量结果应看作是频率的函数，并且是去除热噪声(可能也是频率相关的)后的结果。

电谱分析法可分为两种互相替代的测量方法：频率扫描法和选频法。频率扫描法适用于OA产生的噪声谱频率特性未知或是一个非单调的函数。而当总的噪声功率 $N_1(f)$ (接入OA并且不包含热噪声)是一个与频率无关的函数（来自MPI的噪声基本可忽略的情形）或者是频率的单调递减函数（来自MPI的噪声基本是非相干的情形）时，可采用选频法。

7.3.2 频率扫描法的校准

校准过程中，需分别确定频率相关的散弹噪声和激光器的RIN。为区分此两类噪声，需要在不同的功率下进行测量。此过程无需直接测量光电流或输出衰减器后的输出功率。假定衰减器是线性的，通过改变衰减值来推算功率，也就是说设置3 dB衰减就相应减少了3 dB的功率。

偏振控制器的设置对校准结果的影响可忽略。

在样品相关详细指标所要求的频率范围内，下列所有噪声的测量均是基带频率的函数。在调制频率处的噪声值通过插值法进行估计。

校准过程如下：

- a) 对ESA，选择合适基带频率范围和测试步长（例如：以5 MHz的步长在10 MHz到2 GHz的范围内测试）；
注：基带频率范围至少应大于调制后光源线宽的30倍。
- b) 选择合适的激光器偏置条件，在校准过程中不应变动；
- c) 设置输入和输出衰减器都为0 dB，以得到最大的精确度；
- d) 设置光源的调制频率和调制幅度（例如：200 MHz和5%）。调制频率应选择在RIN和MPI噪声较小的区域。建议选取的调制频率至少是源线宽的3倍以上。设置好调制源后，在整个校准和测试过程中必须保持稳定；
- e) 使用功率计测量OA输入功率的平均值 $P_{in,0}$ ；
- f) 尽可能准确的测量调制指数 m 。根据接收模块的传递函数 $H(f)$ 是否已知，调制指数有两种可能的测量方法。如果 $H(f)$ 已知，使用ESA测量输入功率的平均值 $P_{in,0}$ 、信号功率 S_0 。根据下式计算 m ：

$$m = \frac{1}{P_{in,0}} \sqrt{\frac{S_0}{H(f)}} \dots\dots\dots (23)$$

这里 $H(f) = S_0 / \Delta P_{in,rms}^2$

式中：

$\Delta P_{in,rms}^2$ —— 接收模块光功率调制幅度的均方根值(RMS)。

如果 $H(f)$ 未知， m 可通过示波器进行测量。连接调制的激光源和宽带光探测器、负载电阻和带宽足够的示波器，假定示波器和光探测器直到调制频率为止都有平坦的频率响应特性，使用示波器测量光功率调制幅度和平均光功率，根据下式计算 m ：

$$m = \Delta P_{in,rms} / P_{in,0} \dots\dots\dots (24)$$

式中：

$\Delta P_{in,rms}$ —— 光功率调制幅度的均方根值；

$P_{in,0}$ —— 在OA输入端光功率的时间平均值；

注：光电探测器无需在整个给定的频率范围内有平坦的频率响应。一些光电探测器在远低于给定的频率下由于寄生的阻抗出现了频响的快速下降。

- g) 测量光源的线宽 $\Delta\nu$ ，通常使用两种方法测量线宽：
 - 外差法：光源和一个可调谐激光器的光一起叠加到一个光电探测器上，以产生差拍信号，使用ESA分析差拍信号得到线宽；
 - 自外差法：光源的光通过两臂长度差足够长大的Mach-Zehnder干涉仪，在光电探测器上光源和自身经过延迟的光产生差拍信号。使用ESA分析差拍信号得到线宽。

关于自外差法更详细的内容可参考IEC 60728-6。

- h) 记录ESA的(校准后的、等效噪声)电带宽 B_e , 获取/校准电带宽的方法可参考仪器使用手册;
- i) 在无输入光的情况下, 测量ESA的热噪声 $N_{\text{thermal}}(f)$, 从下面测量的噪声功率中减去 $N_{\text{thermal}}(f)$ 。注意确保足够低的热噪声以避免去除热噪声过程中出现不确定性。
- j) 测量调制信号 S_0 的电功率;
- k) 测试频率相关的噪声 $N_0(f)$, 此量包含了散弹噪声和激光器的RIN, 热噪声已经去除;
- l) 使用输入衰减器减小50%(3 dB)的输入光功率, 这相当于减少了6 dB的电信号功率。测量频率相关的噪声 $N_0'(f)$ 。

或者也可使用不同的衰减因子降低输入功率。此方法建议在3 dB衰减后, ESA的热噪声与待测噪声功率相比过高时使用。记录光功率衰减因子 k (默认 $k = 0.5$)。测量频率相关的噪声 $N_0'(f)$ 。

如果接收模块可对光电流直接进行探测, 那么步骤k)和i)可用下列步骤替代:

- k') 在接收模块的输入光功率为 $P_{\text{in},0}$ 时测量光电流 $I_{\text{in},0}$;
- l') 测试频率相关的噪声 $N_0(f)$ (热噪声已经去除)。

7.3.3 频率扫描法的测量

测量步骤如下:

- a) 设置输入衰减以得到所需的输入功率, 不要改变前面校准时激光器和调制信号的工作状态。记录线性衰减因子 T_{in} , 或者使用功率计直接测量实际的输入功率 P_{in} 。
- b) 接入OA;
- c) 用光功率计测量OA总的输出光功率 P_{out} 。如果OA的输出端不能直接和功率计连接, 可使用光纤跳线, 在此情况下, 必须估计光纤跳线的连接损耗, 并把连接损耗加到测量光功率上, 以得到OA真实的输出光功率;
如果可接入输出端口的输出衰减器, 可更方便的通过衰减器测量输出功率。
- d) 调节输出衰减器的衰减量, 以便ESA能以最高的精确度测量信号功率。记录输出衰减因子 T_{out} ;
- e) 改变输入偏振态以使得总的噪声功率 $N_1(f)$ 达到最大, 用ESA记录和测量总噪声功率 $N_1(f)$ 。注意使用校准过程中同样的基带频率。
- f) 记录信号功率 S_1 。

7.3.4 选频法校准和测量

如果 $N_1(f)$ 基本是频率无关的, 采用下列步骤a)到c)进行测量:

- a) 选择合适的频率 f_1 (例如 100 MHz);
- b) 按照 7.3.2 中步骤 b)到 i)在频率 f_1 处进行频率相关的噪声测量;
- c) 按照 7.3.3 中步骤 a)到 f)在频率 f_1 处进行频率相关的噪声测量。

如果 $N_1(f)$ 是频率的单调递减函数, 采用下列步骤a)到d)进行测量:

- a') 选择第一个频率 f_1 , 此频率处总的噪声功率 $N_1(f)$ 与频率范围上限处的值相比足够大, 该值被认为只受非相干MPI的影响;
- b') 选择第二个频率 f_2 , 在此频率处总的噪声功率 $N_1(f)$ 已趋于一个稳态值, 该值被认为不受非MPI噪声的影响;
- c') 按照 7.3.2 中步骤 b)到 i)在频率 f_1 处进行频率相关的噪声测量;
- d') 按照 7.3.3 中步骤 a)到 f)在频率 f_1 处进行频率相关的噪声测量;

7.3.5 测量精确度的限制

在校准过程中,当无光功率输入时,接收模块的热噪声至少比光接收机的散粒子噪声低3dB才可能得到良好的测量精度。

$$N_{\text{thermal}} \leq N_{\text{shot},0} - 3\text{dB} \quad \dots\dots\dots (25)$$

OA试样噪声测试中,最大的限制来自于光源RIN引起的噪声,因为这种噪声功率与信号输出功率呈平方关系,而散弹噪声以及与OA相关的噪声通常与信号功率的相关性要小得多。

在OA最大输入功率时,源的RIN对噪声的贡献至少小于光电探测器的散弹噪声的贡献才能保证OA试样良好的测试精度。这基于增加OA输入功率时,需增加输出衰减以匹配OA输出的更高功率的假定。

$$N_{\text{in},0} \leq N_{\text{shot},0} \quad \dots\dots\dots (26)$$

建议验证测试条件满足关系式(25)和(26)。

7.4 计算

注:所有的噪声测量结果应理解为频率的函数。本节中所有的公式都是线性形式,而不是对数形式。

7.4.1 校准结果的计算

使用7.3.2中已测得的两个ESA噪声功率以区分散弹噪声和RIN的贡献。

a) 计算散弹噪声对 ESA 噪声功率的贡献 (该量值不应当与频率相关)

$$N_{\text{shot},0} = 4N_0'(f) - N_0(f) \quad \dots\dots\dots (27)$$

如果选择的功率衰减因子 k 不是 0.5, 那么使用下面的公式

$$N_{\text{shot},0} = \frac{N_0'(f) - k^2 N_0(f)}{k(1-k)} \quad \dots\dots\dots (28)$$

b) 计算来自源的 (频率相关的) RIN 对 ESA 噪声功率的贡献

$$N_{\text{in},0}(f) = 2N_0(f) - 4N_0'(f) \quad \dots\dots\dots (29)$$

如果选择的功率衰减因子 k 不是 0.5, 那么使用下面的公式

$$N_{\text{in},0}(f) = \frac{kN_0(f) - N_0'(f)}{k(1-k)} \quad \dots\dots\dots (30)$$

b') 如果选择光电流进行测量,那么按下式计算光电探测器的有效响应度 (包含输出衰减器在设置为 0 dB 时的损耗)

$$r_0 = I_{\text{pd},0} / P_{\text{in},0} \quad \dots\dots\dots (31)$$

按下面的公式计算散弹噪声和 RIN 的贡献

$$N_{\text{shot},0} = \frac{2e \times B_e S_0}{r_0 \times m^2 P_{\text{in},0}} \quad \dots\dots\dots (32)$$

$$N_{\text{in},0}(f) = N_0(f) - N_{\text{shot},0} \quad \dots\dots\dots (33)$$

c) 计算 (频率相关的) 源的 PIN, 并验证是否小于 -150dB/Hz,

$$RIN_{\text{source}}(f) = \frac{2e \times N_{\text{in},e}(f)}{r_0 P_{\text{in},0} \times N_{\text{shot},0}} \quad (1/\text{Hz}) \quad \dots\dots\dots (34)$$

$$RIN_{\text{source}}^{\log}(f) = 10 RIN_{\text{source}}(f) \text{ (dB/Hz)} \dots\dots\dots (35)$$

得到 RIN 的近似值对校准过程已足够，计算最终测量结果时不需要这个量。因此也可使用 r_0 的估算值。

7.4.2 计算频率扫描法的测试结果

下面的公式中使用了前述校准计算和测量的结果

—— 从校准过程中得到的结果： $P_{\text{in},0}$ 、 m 、 Δv 、 $N_{\text{thermal}}(f)$ 、 S_0 、 $N_{\text{shot},0}$ 、 $N_{\text{rin},0}(f)$ 、 B_e ；

—— 从校准过程中得到的结果： T_{in} 、 T_{out} 、 P_{out} 、 S_1 、 $N_1(f)$ 。

a) 按下式计算频率相关的噪声因子和噪声系数

$$F(f) = \frac{P_{\text{out}}}{G^2 P_{\text{in}}} + \frac{m^2 P_{\text{in}}}{2h\nu B_e} \times \frac{N_{\text{OA},1}(f)}{S_1} \dots\dots\dots (36)$$

$$NF(f) = 10 \log F(f) \dots\dots\dots (37)$$

这里

$$\frac{N_{\text{OA},1}(f)}{S_1} = \frac{N_1(f)}{S_1} - \frac{N_{\text{rin},1}(f)}{S_0} - \frac{N_{\text{shot},0}}{S_1} \times \frac{T_{\text{out}} P_{\text{out}}}{P_{\text{in},0}} \dots\dots\dots (38)$$

$$G = \frac{1}{T_{\text{in}} T_{\text{out}}} \sqrt{\frac{S_1}{S_0}} \dots\dots\dots (39)$$

$$P_{\text{in}} = T_{\text{in}} P_{\text{in},0} \dots\dots\dots (40)$$

- b) 如果噪声系数不随频率而递减，那么使用频率平均的噪声因子计算噪声系数；
- c) 如果 OA 产生 MPI 噪声，那么噪声因子将随频率增加而递减，并最终在高频端达到一个稳定的值，因此应在足够大的基带频率中计算噪声系数。
- d) 可选的，如果噪声系数随基带频率单调递减，可通过最小二乘法对计算出的噪声因子和测量出的光源线宽进行拟合，根据下面的噪声系数公式出计算 MPI 品质因数 I_{mpi} 以及总噪声因子中频率无关的分量 $F_{\text{non-mpi}}$ 。

$$NF(f) = 10 \log \left(F_{\text{non-mpi}} + \frac{2I_{\text{mpi}}}{\pi} \times \frac{\Delta v}{f^2 + \Delta v^2} \right) \dots\dots\dots (41)$$

注：在高频端当MPI对总噪声的贡献已衰减到可忽略的程度时， $F_{\text{non-mpi}}$ 也可从噪声因子计算得到。

- e) 可选的，如果自发辐射—自发辐射差拍噪声的贡献被光滤波器消除或者已知可忽略，可从上面确定的 $F_{\text{non-mpi}}$ 和 G 计算出信号—自发辐射噪声系数：

$$NF_{\text{sig-sp}} = 10 \log (F_{\text{non-mpi}} - 1/G) \dots\dots\dots (42)$$

7.4.3 计算频率扫描法的测试结果

如果噪声指数基本是频率无关的，按7.3.6.2中的方法计算噪声因子和噪声系数。

如果噪声系数随基带频率单调递减，那么仅需按7.3.6.2中的方法计算频率 f_1 和 f_2 处的噪声因子 F_1 和 F_2 。MPI品质因数 I_{mpi} 以及总噪声因子中频率无关的分量 $F_{\text{non-mpi}}$ 根据下列公式计算：

$$F_{\text{non-mpi}} = F_2 \dots\dots\dots (43)$$

$$I_{\text{mpi}} = (F_1 - F_2) \frac{\pi}{2} \left(\frac{f^2 + \Delta\nu^2}{\Delta\nu} \right) \dots\dots\dots (44)$$

最终计算出基带频率 f 处的噪声系数

$$NF(f) = 10 \log \left(F_{\text{non-mpi}} + \frac{2I_{\text{mpi}}}{\pi} \times \frac{\Delta\nu}{f^2 + \Delta\nu^2} \right) \dots\dots\dots (45)$$

7.5 测量结果

测量结果报告应包括

- a) 试验装置框图和试验方法；
- b) 测量的波长；
- c) 光源类型及FWHM谱宽；
- d) 光源的RIN；
- e) 光源的调制频率和幅度；
- f) 泵浦光源的功率（如采用并要求时）；
- g) 环境温度（如要求时）；
- h) 输入信号光功率 P_{in} ；
- i) 电谱分析仪的分辨率带宽；
- j) 噪声系数 NF 和相应的基带频率，或者频率相关的噪声系数；
- k) 总噪声因子中频率无关的分量 $F_{\text{non-mpi}}$ 以及MPI品质因数 I_{mpi} （如要求时）
- l) 信号自发辐射差拍噪声系数 $NF_{\text{sig-sp}}$ （如果要求）；

8 Sig_ASE 测量方法

8.1 试验装置

8.1.1 使用 OSA 测试的试验装置

使用OSA测量Sig_ASE的实验装置如图3和图4所示。图3为OSA校准和测量输入信号功率的试验框图。图4为测量信号输出功率和ASE功率的试验框图。

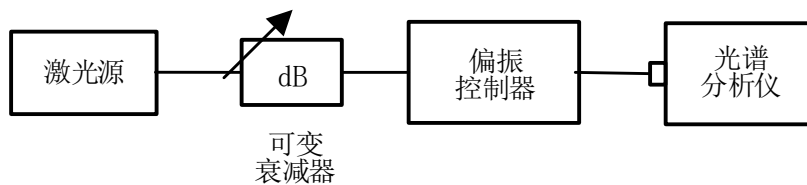


图3 校准OSA、测量信号输入功率和光源自发辐射功率试验装置框图

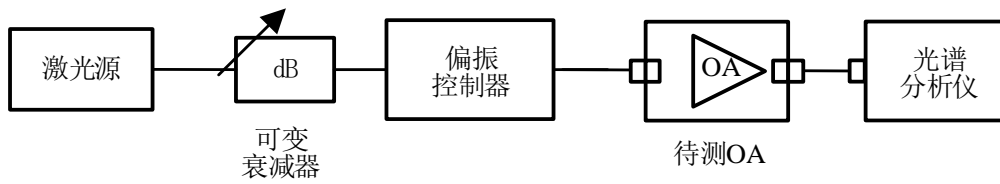


图4 使用OSA测量输出信号功率和ASE功率试验装置框图

试验装置的要求如下：

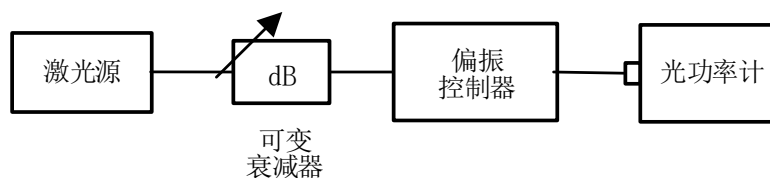
- a) 激光源：
 - 1) 能支持待测OA测试波长范围的可调谐激光器和一组分立激光器均可采用；
 - 2) 输出功率大于待测OA的最大输入功率；
 - 3) 单线输出的边模抑制比应大于40 dB；
 - 4) FWHM 谱宽应小于0.01 nm；
 - 5) 输出功率稳定度小于0.05 dB。
- b) 可变衰减器（VOA）：衰减可变范围应大于待测OA输入功率的变化范围。每一端的光回波损耗应大于50 dB；

注：如果激光源输出功率可在所需的动态范围内变化，可以不需要VOA。
- c) 偏振控制器：该器件应从任意偏振态的输入光产生所有可能的输出偏振态（例如：各种方向的线偏振、椭圆偏振、圆偏振），每端口的回波损耗大于50 dB；

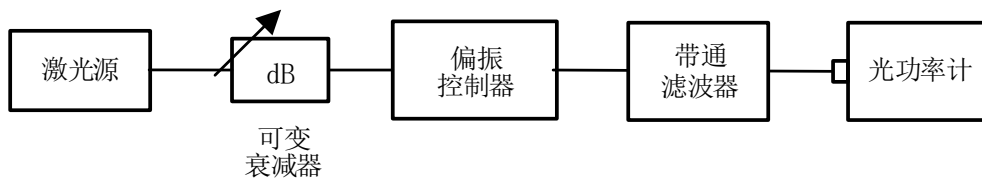
注：如果待测OA的偏振相关增益(PDG)小于0.3 dB，可以不需要偏振控制器。
- d) OSA：
 - 1) 偏振相关性应优于 ± 0.1 dB；
 - 2) 稳定性应优于 ± 0.1 dB；
 - 3) 测量波长准确度应优于 ± 0.05 nm；
 - 4) OSA 的 RBW 应设置在 0.2 nm 至 1 nm 之间，推荐 0.5nm；
 - 5) 在输入端口的光回波损耗应大于 50 dB。

8.1.2 使用带通滤波器和光功率计测试的试验装置

使用带通滤波器和光功率计测量 Sig_ASE 的实验装置如图5和图6所示。图5为滤波器插损校准和测量输入信号功率的试验框图。图6为测量信号输出功率和ASE功率的试验框图。

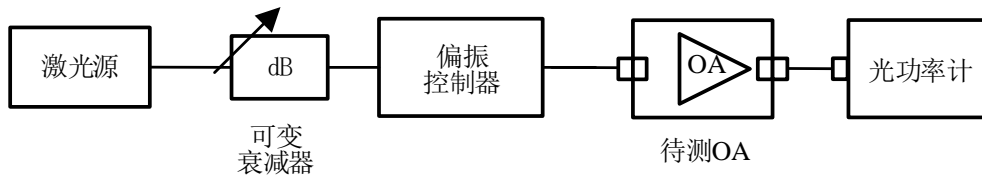


a) 无滤波器时的试验框图

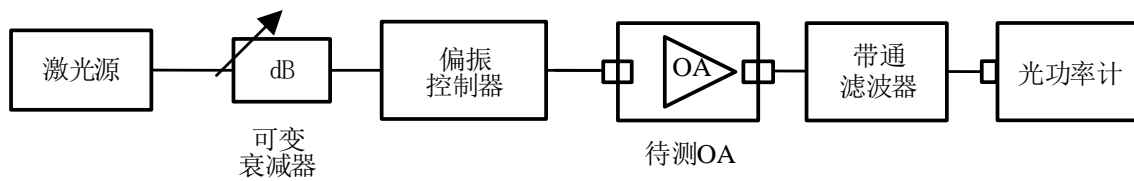


b) 有滤波器时的试验框图

图5 滤波器插损校准和测量输入信号功率的试验框图



a) 无滤波器时的试验框图



b) 有滤波器时的试验框图

图6 测量信号输出功率和ASE功率的试验框图

试验设备的要求如下：

- a) 激光源：
 - 1) 能支持待测OA测试波长范围的可调谐激光器和一组分立激光器均可采用；
 - 2) 输出功率大于待测OA的最大输入功率；
 - 3) 单线输出的边模抑制比应大于40 dB；
 - 4) 在OA的ASE带宽 B_{ASE} 内，激光源总的自发辐射功率小于其总功率 $X+20$ dB，这里 X 是OA要求的最小 Sig_ASE ；
 - 5) FWHM 谱宽应小于0.01 nm；
 - 6) 输出功率稳定度小于0.05 dB。
- b) 可变衰减器（VOA）：衰减可变范围应大于待测OA输入功率的变化范围。每一端的光回波损耗应大于50 dB；

注：如果激光源输出功率可在所需的动态范围内变化，可以不需要VOA。
- c) 偏振控制器：该器件应从任意偏振态的输入光产生所有可能的输出偏振态（例如：各种方向的线偏振、椭圆偏振、圆偏振），每端口的回波损耗大于50 dB；

注：如果待测OA的偏振相关增益(PDG)小于0.3 dB，可以不需要偏振控制器。
- d) 带通滤波器：
 - 1) 在待测 OA 测试波长范围内，中心波长与信号波长一致的可调谐滤波器和一组

分立滤波器均可采用；

- 2) 在中心波长附近 1 dB 带宽至少为±20 GHz;
 - 3) 在 OA 的 ASE 带宽 B_{ASE} 内, 除中心波长附近±100 GHz 范围外, 其衰减量比中心波长的插损至少大 20 dB。
 - 4) 如果 OA 在 ASE 带宽 B_{ASE} 外还有其它波长成分的光功率(例如, 使用 1480nm 泵浦激光器在掺铒光纤放大器中产生的泵浦泄漏), 那么在图 5 和图 6 中光功率计前应放置一个额外的滤波器以滤除不期望出现的波长成分。该滤波器在 B_{ASE} 内插入损耗的起伏应小于 0.5 dB, 对不期望出现的波长成分消光比大于 30 dB (相对于 B_{ASE} 内的插入损耗)。
- e) 光功率计: 无论信号是何种偏振态, 测量功率的准确度应优于±0.2 dB。

8.2 待测试样

待测试样的要求与6.2中相同

8.3 测量程序

8.3.1 概述

测量程序中包括对下列参数的测量:

- 输出功率, P_{out}
- ASE 功率, P_{ASE}

为测量 P_{ASE} , 需要测量光源的自发辐射功率 P_{SSE} 和 OA 的增益 G , 在 OA 输出端测量的噪声总功率减去 GP_{SSE} 即可得到 P_{ASE} 。但只要注意 P_{SSE} 足够小, 满足 8.1.2 a) 4) 中的要求时, P_{SSE} 无需进行测量。

8.3.2 OSA 测量法

8.3.2.1 校准

8.3.2.1.1 校准 OSA 的光带宽

对测试所用的RBW, 应进行准确的OSA光带宽校准。这是测量每个波长光功率谱密度, 并在期望的波段进行积分所必需的。

注: 有的OSA具有自动测量任意所需波段积分功率的功能, 在此情况下, 无需实施校准过程。

校准OSA光带宽的步骤如下:

- a) 如图_所示连接试验装置;
- b) 设置激光源波长为ASE带的中心波长 λ_c ;
- c) 设置OSA的中心波长为 λ_c ;
- d) 设置OSA的带宽(span)为0;
- e) 测量光功率 $P(\lambda_c)$;
- f) 在 $[\lambda_c - 5 \cdot RBW, \lambda_c + 5 \cdot RBW]$ 的波长范围内, 以小于 $RBW/5$ 的步长调整激光源的波长, 在每一个波长 λ_i 处测量光功率 $P(\lambda_i)$;
- g) 根据下式确定OSA的光带宽:

$$B_{OSA} = \frac{1}{P(\lambda_c)} \sum_i P(\lambda_i) \Delta\lambda_i \quad \dots\dots\dots (46)$$

8.3.2.1.2 校准 OSA 的功率校正因子

按下述步骤校准OSA的功率校准因子 P_{Cal} :

- a) 按图_连接试验装置;
- b) 置激光源的波长为ASE带的中心波长 λ_c ;
- c) 置OSA的中心波长为 λ_c ;
- d) 测量 λ_c 处的光功率 P_{OSA} ;
- e) 断开与OSA的连接, 连接上已校准的光功率计;
- f) 测量光功率 P_{PM} ;
- g) 按照下式确定OSA的功率校正因子

$$P_{Cal} = P_{PM}/P_{OSA} \dots\dots\dots (47)$$

8.3.2.2 测量

按下列步骤进行测量:

- a) 按图_连接试验装置;
- b) 置激光源波长为所需的信号波长 λ_s ;
- c) 调整VOA使信号功率达到所需值;
- d) 设置OSA的带宽 (span) 覆盖ASE带宽;
- e) 测量信号波长处OSA的功率 $P(\lambda_s)$, 得到输入信号功率 $P_{in} = P(\lambda_s) \times P_{Cal}$;
- f) 在ASE带宽内以至少RBW/5的分辨率对所有波长 λ_i 测量光功率, 对每个波长计算光功率谱密度 $\rho(\lambda_i) = P(\lambda_i)/B_{OSA}$;
- g) 按下式计算ASE带宽内的总光功率

$$P_{Tot} = \sum_i \rho(\lambda_i) \Delta\lambda_i$$

- h) 按 $P_{SSE} = P_{Tot} \times P_{Cal} - P_{in}$ 确定源的自发辐射功率;
- i) 按图_连接试验装置;
- j) 置OA为所需的工作条件;
- k) 测量信号波长处OSA的功率 $P(\lambda_s)$, 得到输出信号功率 $P_{out} = P(\lambda_s) \times P_{Cal}$;
- l) 确定信号增益 $G = P_{out}/P_{in}$;
- m) 在ASE带宽内以至少RBW/5的分辨率对所有波长 λ_i 测量光功率, 对每个波长计算光功率谱密度 $\rho(\lambda_i) = P(\lambda_i)/B_{OSA}$;
- n) 按下式计算ASE带宽内的总光功率

$$P_{Tot} = \sum_i \rho(\lambda_i) \Delta\lambda_i \dots\dots\dots (48)$$

- o) 确定ASE功率

$$P_{ASE} = P_{Tot} \times P_{Cal} - P_{out} - GP_{SSE} \dots\dots\dots (49)$$

注1: 有的OSA具有自动测量任意所需波段积分功率的功能, 在此情况下, 步骤(f,g,m,n)可使用OSA的自动功能完成。

注2: 使用信号增益G计算放大器输出端被放大的光源的自发辐射并不完全准确, 因为光放大器的增益可能是波长相关的。然而, 有两个因素有利于此近似: 1) 当OA以减小 Sig_{ASE} 为设计目标时, 在工作波段ASE通常比较平坦, 并且对ASE的贡献最大; 2) 当 Sig_{ASE} 为最差值时, 意味着G比波段内对 P_{ASE} 贡献最大的点

要小。因此，被放大的光源的自发辐射被轻微地低估了，而 P_{ASE} 被轻微地高估了。这意味着测量得到的最差 Sig_ASE 可看做是OA所有的工作条件下真正 Sig_ASE 值的下限。

8.3.3 带通滤波器和光功率计测试法

8.3.3.1 校准

按以下步骤校准滤波器的插入损耗：

- a) 按图_连接试验装置；
- b) 置激光源波长为所需的信号波长 λ_s ；
- c) 使用光功率计测量无滤波器带宽时的光功率 P_0 ；
- d) 按图_所示接入中心波长为 λ_s 的带通滤波器；
- e) 使用光功率计测量接入滤波器后的功率 P_1 ；
- f) 确定给定波长处的插入损耗

$$IL_F(\lambda_s) = P_1/P_0 \quad \dots\dots\dots (50)$$

8.3.3.2 测量

测量步骤如下：

- a) 按图_连接试验装置；
- b) 置激光源波长为所需的信号波长 λ_s ；
- c) 调整VOA使信号功率达到所需值；
- d) 使用光功率计测量信号输入功率 P_{in} ；
- e) 按图_接入OA；
- f) 置OA为所需的工作条件；
- g) 使用光功率计测量信号输入功率 P_{Tot} ；
- h) 按图_接入中心波长为 λ_s 的光滤波器；
- i) 使用光功率计测量信号接入滤波器后的功率 P_2 ；
- j) 确定信号输出功率 $P_{out} = P_2/IL_F(\lambda_s)$ ；
- k) 确定ASE功率 $P_{ASE} = P_{Tot} - P_{out}$ 。

8.4 计算

从 P_{out} 和 P_{ASE} 按公式()计算 Sig_ASE 。注意 Sig_ASE 试验方法部分中，所有的量均为线性单位，如有需求，可转换为dB单位。

8.5 测量结果

Sig_ASE 应该在所有信号波长、输入功率和OA增益的组合下进行测量，以充分覆盖OA指标要求设定的工作范围。如果OA的PDG大于0.3 dB，那么在每个工作点，应调整偏振控制器得到最低的 Sig_ASE 值。

测量结果至少要提供最差情况下的 Sig_ASE 值，并随同提供得到此结果时的信号波长，输入功率水平和OA的增益。

附录 A

(资料性附录)

光谱仪分析法和电谱仪分析法测量噪声因子的适用性

光谱分析法主要用于确定 OA 的信号—自发辐射差拍噪声因子 $F_{\text{sig-sp}}$ 。该方法通过 OSA 测量增益和 ASE 的谱密度,使用 (5) 式可直接计算出信号—自发辐射差拍噪声因子 $F_{\text{sig-sp}}$,除了来自 MPI 的贡献,其余噪声项对总噪声因子 F 的贡献也可由光谱分析法的测量数据,通过 (3) — (6) 式计算得到。

电谱分析法主要用于确定 OA 的总的噪声因子 F 。按照噪声因子的定义 (式 (1)):

$$F = \frac{SNR_{\text{input}}}{SNR_{\text{output}}} = \frac{\langle i_{\text{signal}}^2 \rangle_{\text{in}} \langle i_{\text{noise}}^2 \rangle_{\text{out}}}{\langle i_{\text{noise}}^2 \rangle_{\text{in}} \langle i_{\text{signal}}^2 \rangle_{\text{out}}}$$

$$F = \frac{1}{G^2} \frac{\langle i_{\text{noise}}^2 \rangle_{\text{out}}}{\langle i_{\text{noise}}^2 \rangle_{\text{in}}} \dots\dots\dots (51)$$

- 式中: SNR —— (电)信噪比;
- i —— 使用量子效率为 1 的理想光电探测器测量的光电流;
- G —— 光信号的增益

通过 ESA 测量 OA“黑盒子”的增益和电噪声,根据噪声因子 F 的定义式 (51) 可直接计算出噪声因子。电谱分析法无需单独区分各个噪声项对总噪声因子的贡献,测量结果中包含了 MPI 噪声。注意, MPI 噪声因子强烈依赖于基带频率、测试激光源的线宽和各个反射点之间偏振对准度 (参见 (7) 式)。从电谱仪得到的噪声指数包含了所有相关的噪声源,因此被认为更接近于 OA 在系统中的实际表现,在模拟传输系统中常被用于描述 OA 的适用性。电谱分析法的缺点在于测试过程比较繁琐,因此不如光谱分析法使用广泛。

附录 B

(资料性附录)

Sig_ASE 参数的应用范围及与自发辐射—自发辐射差拍噪声的关系

绝大部分 OA 设计时都力图使噪声系数最小,使用光谱分析法直接测量得到信号—自发辐射噪声因子只与信号波长附近的 ASE 有关。然而,当单波道 OA 放置在不带光滤波器的接收机前时,所有的宽带 ASE 光功率均到达了接收机,此时自发辐射—自发辐射差拍噪声对接收机性能有显著的影响。这就意味着不仅要求信号波长附近的 ASE 尽可能小,还要求 Sig_ASE 参数尽可能大,以提升接收机性能。

虽然自发辐射—自发辐射噪声因子 F_{sp-sp} 可用于衡量自发辐射—自发辐射差拍噪声对接收机的影响,但使用光谱分析法测量 F_{sp-sp} 十分繁琐,电谱分析法则无法单独测量 F_{sp-sp} 。相对而言, Sig_ASE 参数的测量比较容易,在无前置光滤波器时,可很好的衡量 OA 自发辐射—自发辐射差拍噪声对接收机性能的影响。尽管 Sig_ASE 和 F_{sp-sp} 并无直接的换算关系,但它们之间是相关的, Sig_ASE 越高, F_{sp-sp} 越小,反之亦然。
