

光收发模块灵敏度测试方法探讨

邓维川 程木海 高峰

(河北华美光电子有限公司 怀来 075400)

摘要:针对光收发模块接收端灵敏度测试时间较长的问题,提出了先通过最小二乘法拟合出接收光功率与误码率的关系曲线,再利用该曲线通过外推法来近似估算基于PIN的光接收器灵敏度的方法。介绍了基于该方法的自动测试系统的架构,测试程序的执行流程和算法实现以及测试步骤。测试过程及结果表明,该测试系统在控制测试误差的基础上大大提高了测试效率。

关键词:二分法;最小二乘法;曲线拟合;外推法;灵敏度;自动测试系统

中图分类号: TP274 **文献标识码:** A

Sensitivity test method for optical transceiver modules

Deng Weichuan Cheng Muhai Gao Feng

(Hymax Optoelectronics Co., Huailai 075400)

Abstract: As the test time of optical receiver sensitivity is too long to be used in mass production, an optimized method that through fitting a received optical power-BER curve using least-squares method, extrapolate the approximate sensitivity value of PIN-based optical receiver is proposed. This paper described the auto test system working principle and architecture, the methods used to test sensitivity, software implementation of the testing algorithm, and the test procedures. The testing process and results show that the test system has greatly enhanced test efficiency while the testing precise of the sensitivity is acceptable.

Key words: dichotomy method; least-squares method; curve fitting; extrapolation; sensitivity; ATS

0 引言

光收发模块最重要的性能指标之一是接收灵敏度,它定义为达到一定误码率的条件下光接收端所需接收的最小平均光功率。灵敏度测试的一般方法是在光接收端之前加入可变光衰减器,调整光衰减器的衰减量并观察误码率,当误码率刚好达到指定值时的接收平均光功率即可认为是该模块的接收灵敏度。但是低误码率情况下的误码测试时间比较长,如需要测试 1×10^{-10} 的误码率^[1],测试速率为 155 Mb/s 的情况下,测试时间至少需要 64 s; 1.25 Gb/s 测试速率下,要达到 1×10^{-12} 的误码率^[2],测试时间至少需要 800 s。如此长的测试时间在大规模生产中显然无法接受。故针对这种情况,提出了利用在高误码率下的测试值通过最小二乘法拟合出接收光功率-误码率曲线,并据此外推出低误码率下对应的平均光功率的方法。

基于 PC 控制的自动测试系统^[3-5](ATS, automatic test system)能自动完成测试,数据的分析和保存,对提高生产效率有极大改善。在此前的自动测试方案中,采用小步进调整光衰减器的方式来测试完整接收光功率-误码率曲线。该方法测试精度高,但是测试时间太长,效率低。

针对该缺点,在对测试硬件设备不做较大修改的情况下,通过修改测试软件实现了对光接收器件的快速测试。

1 测试系统架构

该测试系统主要由基于 VSC8228 芯片自制的误码测试仪、可调光衰减器、光功率计及 PC 构成。可调光衰减器和光功率计通过 GPIB 卡和 PC 连接,误码测试仪通过 PC 串口或 USB 接口和 PC 连接。自动测试系统架构如图 1 所示。

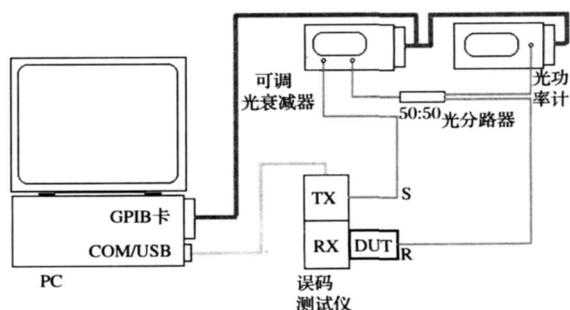


图1 自动测试系统架构

误码测试仪为自制,主要使用了VSC8228芯片的测试

功能,测试速率可以选取为 125 Mb/s、155 Mb/s、200 Mb/s、622 Mb/s、1.06 Gb/s、1.25 Gb/s、2.125 Gb/s、2.488 Gb/s、2.50 Gb/s 和 4.25 Gb/s。其测试光信号由一块光发送模块发出,接入可调光衰减器的输入端。根据测试信号光波长的不同,需选用不同的可调光衰减器,目前选用的是安捷伦 8156/8158。光信号经可调光衰减器衰减后接入 1 只 50/50 的光分路器输入端,分路器输出端一只接入光功率计,另一只接入待测试模块的接收端。光功率计使用安捷伦 8163,用来检测经过衰减器后信号的平均光功率。待测模块接收端将光信号转换为电信号后由误码测试仪记录产生的误码。PC 中测试软件在测试中自动调节可调光衰减器的衰减量,并且读取误码测试仪测试出的误码和光功率计接收到的平均光功率进行分析。

2 测试流程和算法

PC 中的测试软件首先通过调节光衰减器利用二分法查找误码率介于 1×10^{-7} 和 1×10^{-2} 之间的接收光功率,再在此基础上通过调节光衰减器设置多个接收光功率值,并且这几个功率值对应的误码率应介于拟合曲线所需误码率值范围内(如介于 1×10^{-8} 和 1×10^{-5} 之间),然后通过最小二乘法拟合直线外推出灵敏度。测试程序流程图如图 2 所示。

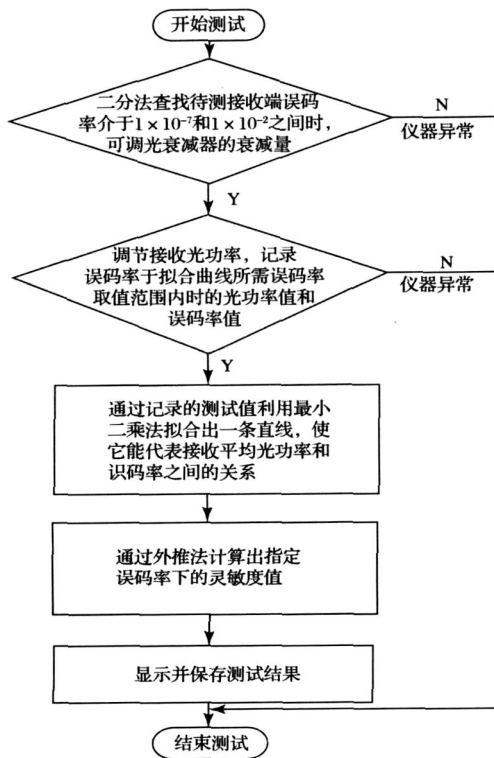


图 2 测试程序执行流程图

要外推出灵敏度,首先要找到多个误码率较高(如 $BER > 1 \times 10^{-8}$) 时的光功率值。设定这几个值的方法是先二分法查找再按一定步长设置。二分法是一种每次把搜索区间收缩一半的快速搜索算法^[6]。大量测试结果显示,光接收端误码率从 1×10^{-2} 下降到 1×10^{-7} 时光功率变化大于 3 dB,那么如果设置的搜索范围为 -20 ~ -50 dBm,通过二分法最多查找 4 次,便可找到一个光功率值,使得待测接收端在该功率值时误码率介于 1×10^{-7} 和 1×10^{-2} 之间。这时再按一定步长(如 0.4 dB)通过衰减器设置多个光功率值,并在此过程中记录下误码率于拟合曲线所需误码率取值范围(此范围可以在测试软件中设置)内时的光功率值和误码率值。

根据光接收器件的测试原理和方法^[7],将光接收平均功率和接收误码率的对数值描绘在直角坐标系中,其主要分布在一条直线附近。因此,接收光功率与误码率的关系曲线可以用一个线性方程表示,并且可以通过多个测量值拟合出该直线方程。

最小二乘法^[8]是由高斯(Gauss)和勒让德(Legendre)于 19 世纪发现的用于研究两个变量 (x, y) 之间相互关系的数学方法。

设 x 和 y 之间的函数关系由直线方程

$$y = a_0 + a_1 x \quad (1)$$

式中:有两个待定参数, a_0 代表截距, a_1 代表斜率。对于等精度测量所得到的 N 组数据 $(x_i, y_i), i = 1, 2, \dots, N, x_i$ 值被认为是准确的,所有的误差只联系着 y_i 。

用最小二乘法估计参数时,要求观测值 y_i 的偏差的加权平方和为最小。对于等精度观测值的直线拟合来说,使

$$R = \sum_{i=1}^N [y_i - (a_0 + a_1 x_i)]^2 / a = \min \quad (2)$$

最小即对参数 a (代表 a_0, a_1) 最佳估计,要求观测值 y_i 的偏差的平方和为最小。

根据式(2)的要求,应有

$$\frac{\partial}{\partial a_0} \sum_{i=1}^N [y_i - (a_0 + a_1 x_i)]^2 / a = \min = -2 \sum_{i=1}^N (y_i - a_0 - a_1 x_i) = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial a_1} \sum_{i=1}^N [y_i - (a_0 + a_1 x_i)]^2 / a = \min = -2 \sum_{i=1}^N (y_i - a_0 - a_1 x_i) x_i = 0$$

整理后得到正规方程组

$$\begin{cases} a_0 N + a_1 \sum x_i = \sum y_i \\ a_0 \sum x_i + a_1 \sum x_i^2 = \sum x_i y_i \end{cases}$$

解正规方程组便可求得直线参数 a_0 和 a_1 的最佳估计值 \hat{a}_0 和 \hat{a}_1 。即

$$\hat{a}_0 = \frac{(\sum x_i^2)(\sum y_i) - (\sum x_i)(\sum x_i y_i)}{N(\sum x_i^2) - (\sum x_i)^2} \quad (3)$$

$$\hat{a}_1 = \frac{N(\sum x_i y_i) - (\sum x_i)(\sum y_i)}{N(\sum x_i^2) - (\sum x_i)^2} \quad (4)$$

在自动测试软件中,程序通过记录下的多个光功率值(X_i)和误码率值(Y_i)利用最小二乘法自动拟合出接收光功率-误码率关系曲线方程。在同时考虑测试时间和准确度的情况下,测试程序中拟合曲线所用的样本数量(N)选取为4个。

外推法是指根据一组观测值,计算观测范围以外同一对象近似值的方法,在这里指的是用高误码率下的接收光功率计算出低误码率下对应的接收光功率。在已知接收光功率-误码率关系曲线方程的情况下,只需要将目标误码率(Y_g)带回式(1)中便可通过式(5)求出其对应的平均光功率(X_g),即该误码率下的接收灵敏度。

$$X_g = (Y_g - a_0) / a_1 \quad (5)$$

3 测试程序的实现

测试程序由C++语言编写。在程序中实现了对测试参数的设置,对仪器的控制及读取和测试算法。测试程序中除了有测试灵敏度功能外,还保留了单独测试误码率的功能。灵敏度测试过程由一个测试线程实现,在测试过程中,所记录的测试值中用于拟合曲线的部分和拟合出的直线将会在测试软件界面中的坐标图中即时显示出来。使用拟合曲线法求灵敏度前通过二分法查找的代码如下:

```
// * * * *二分法查找,最多4次
for(int i=0;i<4;i++){
// 当前光功率设为查找光功率范围中值
dOptPwrCurrent = (dOptPwrHigh + dOptPwrLow)/2;
// 控制衰减器设置当前光功率
nErrStatus = pInfo -> pMainView -> testCtrl.
setOptPwr(dOptPwrCurrent);
if(nErrStatus>0){// 检查设置光功率结果
AfxMessageBox("设置光功率出错,测试终止!");
// 错误提示
goto LabelSTestEnd;// 通过衰减器设置光功率失败,
终止测试
}
Sleep(400);// 仪器响应时间
nErrStatus = pInfo -> pMainView -> testCtrl.
getErrRatio(dErrRatio);
if(nErrStatus>0){// 检查读取误码率结果
AfxMessageBox("读取误码率出错,测试终止!");
// 错误提示
goto LabelSTestEnd;// 读取误码率失败,终止测试
}
if(dErrRatio > 1e-2){// 误码率大于1E-2,调高光功率查找
dOptPwrLow = dOptPwrCurrent;
}else if(dErrRatio < 1e-7){// 误码率小于1E-7,调低光功率查找
```

```
dOptPwrHigh = dOptPwrCurrent;
}else{// 误码率介于1E-7和1E-2之间,停止查找
break;
}
}
// * * * * *
然后在设定的高误码率区间内取4个测试值用于拟合直线。程序先将误码率调低,然后再按一定步长逐渐增大光功率,同时记录下此过程中的实际接收光功率和误码率。保存数据所用的数据结构为一链表。部分代码如下:
// * * * *取4个测试值用于拟合直线
for(int i=0;i<4;i++){
dOptPwrCurrent = pInfo -> pMainView -> testCtrl.
settings.dLeastSquaresOptStep;
nErrStatus = pInfo -> pMainView -> testCtrl.
setOptPwr(dOptPwrCurrent);// 控制衰减器设置当前光功率
if(nErrStatus>0){// 检查设置光功率结果
AfxMessageBox("设置光功率出错,测试终止!");
// 错误提示
goto LabelSTestEnd;// 通过衰减器设置光功率失败,
终止测试
}
Sleep(400);// 仪器响应时间
nErrStatus = pInfo -> pMainView -> testCtrl.
getErrRatio(dErrRatio,nCycleTime);
if(nErrStatus>0){// 检查读取误码率结果
AfxMessageBox("读取误码率出错,测试终止!");
// 错误提示
goto LabelSTestEnd;// 读取误码率失败,终止测试
}
if(pInfo -> pMainView -> testCtrl.getOptPwr(actualPwr) == FALSE){
AfxMessageBox("读取实际率出错,测试终止!");
// 错误提示
goto LabelSTestEnd;// 终止测试
}
pInfo -> pMainView -> testCtrl.saveRawData(actualPwr + pInfo -> pMainView -> testCtrl.data.dReference,dErrRatio);
// 保存数据
pInfo -> pMainView -> testCtrl.drawGraph(pInfo -> pMainView -> testCtrl.data.listRawData);
// 绘图
}
// * * * * *
外推出灵敏度的方法是首先从记录测试数据的链表
```

中读出4次测试数据到两个数组中(Y[4],X[4]),然后通过式(3)和式(4)求出直线方程,最后通过式(5)算出灵敏度。代码如下:

```
// * * * * 利用最小二乘法推算出灵敏度
double Y[4],X[4],a0,a1;
list<ListNodeData>:iterator itr;
itr=pInfo->pMainView->testCtrl.data.listRawData.
begin();
// 读出数据到数组中
for(i=0;i<4;i++,itr++){
    Y[i]=log10(itr->dBER);
    X[i]=itr->dOptPwr;
}
// 计算出回归方程的参数
a1=((X[0]*Y[0]+X[1]*Y[1]+X[2]*Y[2]+X[3]*
    Y[3])-(X[0]+X[1]+X[2]+X[3])*(Y[0]+Y
    [1]+Y[2]+Y[3])/4)/((X[0]*X[0]+X[1]*X
    [1]+X[2]*X[2]+X[3]*X[3])-(X[0]+X[1]+
    X[2]+X[3])*(X[0]+X[1]+X[2]+X[3])/4);
a0=(Y[0]+Y[1]+Y[2]+Y[3])/4-a1*(X[0]+
    X[1]+X[2]+X[3])/4;
// 计算出灵敏度
```

```
dMinX=(0-a0)/a1;
dMaxX=(log10(pInfo->pMainView->testCtrl.
    settings.dSGBER)-a0)/a1;
pInfo->pMainView->testCtrl.data.dSensitivity=
    dMaxX;
// 设置绘制出拟合出的曲线
pInfo->pMainView->testCtrl.bIsPlotLine=TRUE;
// 绘图
pInfo->pMainView->testCtrl.drawGraph(pInfo->
    pInfo->pMainView->testCtrl.data.listRawData,
    dMinY,dMaxY,dMaxX,dMinX);
// * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
```

测试程序的主界面如图3所示。测试之前,先确定程序中的设置。通过点击编辑菜单下的设置菜单项打开设置对话框。在对话框中确定仪器的 GPIB 地址,仪器的波长设置和其他测试参数都已经正确设置。在主界面中点击需测试的速率和测试的码型,然后点击测试主界面左上方的“开启”按钮,开启并初始化误码测试仪,这时该按钮上显示变成了“关闭”。点击“连接仪器”按钮连接光功率计和可衰减器并初始化仪器,成功后该按钮显示变为“断开仪器”。

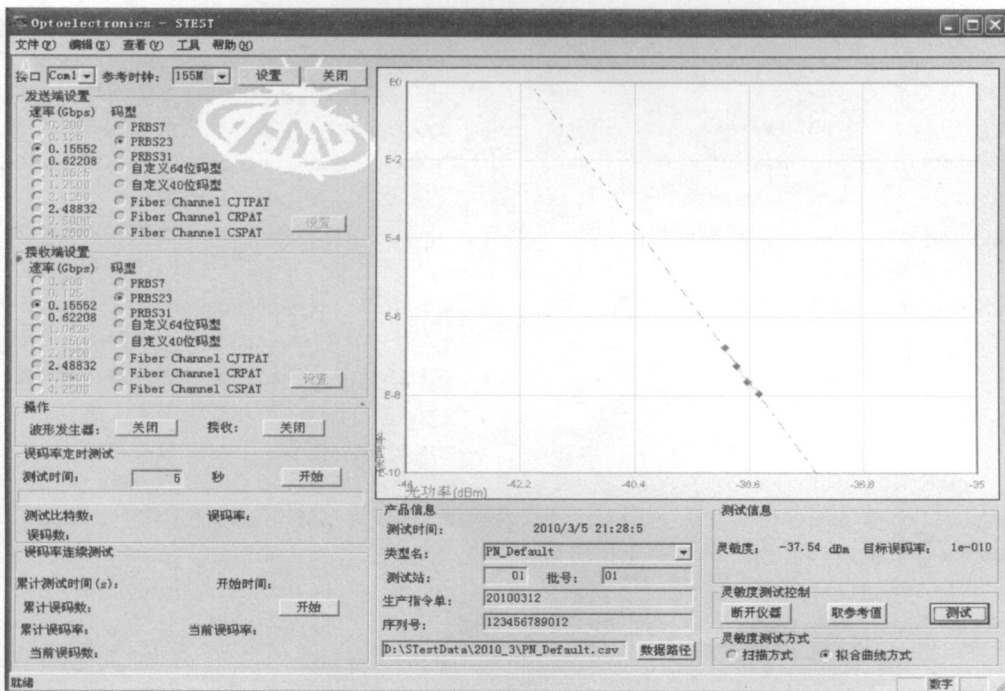


图3 自动测试软件的界面

点击“取参考值”按钮取参考值。取参考值的步骤根据程序提示完成,其作用是去掉分路器分光不均和光纤连

接器差异性造成的误差,确保光功率计接收到的光功率值能准确代表被测测试接收端接收到的光功率。

完成取参考值后,在产品信息输入栏输入正确的产品信息便可以点击“测试”按钮开始测试。每次测试完成后程序自动记录测试结果并将测试信息其保存到本地文件和网络服务器数据库中。

目前该测试系统已用于 1 ×9 类型和 SFP 类型光收发模块的测试。如表 1 所示为多个模块通过最小二乘拟合曲线法和扫描法两种方式测试结果的对比,被用于测试的光收发模块类型为 1 ×9,速率为 155 Mb/s,接收光波长为 1310 nm。

表 1 测试结果对比

扫描法/dBm	- 38.52 - 38.40 - 35.10 - 37.50 - 37.67
最小二乘拟合	- 38.55 - 38.25 - 35.01 - 37.32 - 37.66
曲线法/dBm	

从测试结果来看,采用两种不同方法测试出的灵敏度值基本一致,但是用扫描法的测试时间大约需要数十分钟,而用最小二乘拟合曲线法的测试时间小于半分钟。

4 结 论

自动测试程序通过拟合曲线法完成灵敏度测试的时间大大缩短。用该方法测试时,拟合直线所选取的样本点误码率越小测试时间越长,测试速率越快测试时间越短。由于所拟合的曲线采用直线,测试系统的测试误差主要由待测接收端实际的接收光功率与误码率关系曲线的线性度决定,线性度越好,测量误差越小。通过对基于 PIN 的光接收器件灵敏度大量测试显示,在设置合适的拟合曲线所需误码率取值范围的情况下,其测试误差可以控制在 0.3 dB 以内。

参 考 文 献

[1] ITU-T G.957, Optical interfaces for equipments and

systems relating to the synchronous digital hierarchy [S]. Geneva: International Telecommunications Union, 1999.

- [2] ITU-T G.826, Error performance parameters and objectives for international, constant bit rate digital path at or above the primary rate [S]. Geneva: International Telecommunications Union, 1999.
- [3] ELMORE T D. Case study: Modular ATE system design [C]. 2000 IEEE Autotestcon Proceedings, 2000:576-583.
- [4] TAYLOR R G. Incorporating ATML interface standards within an ATE software architecture [C]. 2003 IEEE Autotestcon Proceedings, 2003:48-51.
- [5] 崔强,徐春荣,彭刚锋.基于 PXI 及 GPIB 总线的自动测试系统设计[J].航空计算技术,2008,38(5):85-87.
- [6] 王伟斌,路辉,郎荣玲.基于二分法的雷达高度表灵敏度测试方法优化研究[J].电子测量与仪器学报,2009,23(4):28-31.
- [7] Dennis Derickson. Fiber Optic Test and Measurement [M]. New Jersey: Prentice Hall PTR, Oct 8 1997: 288-297.
- [8] 李惕碛.一般情况下的最小二乘法[J].自然杂志,1979(9):534

作 者 简 介

邓维川,男,1982年3月出生,2005年毕业于成都信息工程学院光电技术系,获学士学位,目前为华美光电子有限公司研发部工程师,主要研究方向为自动化测试。

E-mail:dengweichuan@163.com

(上接第6页)

- [5] 李春菊,廖毅,彭磊.基于 SA4828 的三相 SPWM 变频电源设计[J].机电产品开发与创新,2009,22(1):45-47.
- [6] 张涛. MAX274/275 有源滤波器的应用研究[J]. 微计算机信息(嵌入式与 SOC),2005,21(7):145-146.
- [7] 徐志跃. SA4828 组成的变频器的软件设计[J]. 微计算机信息(测控自动化),2008,22(7-1):145-147.
- [8] 研华 USB4751 使用说明书(软件部分).2009.
- [9] 于庆广,张晓明,王浩.基于智能功率模块的 SPWM 信号发生器[J].仪器仪表学报,2004,25(4):

441-443.

作 者 简 介

陈伟元,男,1986年出生,福建漳州人,硕士研究生。研究方向为发射控制系统检测与故障诊断。

谷宏强,男,1964年出生,河南郑州人,教授,研究生导师。研究方向为武器系统仿真、发射控制系统检测。

郭利,女,1971年出生,重庆人,副教授,研究生导师。研究方向为发射控制系统检测与故障诊断。