

微弱信号检测的新进展

陈佳圭

(中国科学院物理研究所, 北京 100080)

介绍微弱信号检测的最近进展. 锁相放大器一直是信号恢复仪器中最活跃的课题. 它旨在提高动态储备和频率范围. 因此, 引起模拟解调和数字解调的很多争论, 将给予客观的评述.

近年来, 光多道系统取得很大进展. 例如, 不断提高检测灵敏度, 增加列阵的象元数, 以及增强计算机的处理功能, 因此发展了弱图像的检测能力.

Abstract

In this paper new achievements in weak signal detection are introduced. Lock-in amplifier is still a popular subject in signal recovery instrumentation that attracts most activities of researchers. It aims at increasing the dynamic reserve and extending the frequency range, thus giving rise to much controversy about analog-multiplier demodulator (AMD) and digital-multiplier demodulator (DMD). So discussions will be limited to DMD and AMD, unless otherwise stated. In recent years, optical multichannel analyzer (OMA) has been in rapid progress, such as the improvement of the detecting sensitivity, the increase of the number of pixels, and the enhancement of processing functions of computer. These have brought about the development of weak image detection.

近几年来微弱信号检测的发展重点在于相干检测和弱光检测. 至于 Boxcar 积分器和多道平均, 由于高速取样头的应用和微机技术的发展, 在功能上日趋完善但无实质上的进步. 另外, 光子计数虽有产品但实际上已处于淘汰阶段. 这是因为多道探头的灵敏度已超过光电倍增管的缘故.

相干检测应用范围宽, 抑制噪声能力强, 光多道系统 (OMA) 的灵敏度高, 使用方便, 信息量大, 发展到弱图像的测定. 因此, 这两方面近年来有很大的进展. 新技术的涌现使人目不暇接.

本文将介绍这些新技术. 目前由于相干检测的进一步发展, 国际上形成一种模拟解调与数字解调优劣之争论, 本文将客观地予以评述, 其中涉及有关的基础知识, 请参考文献[1, 2].

一、模拟锁相和全数字锁相

利用相干检测的锁相放大器 (LIA), 至今物理

已能测量被噪声淹没的弱信号, 其信噪比 $S/N = 10^{-3} - 10^{-7}$, 也就是说可测定噪声比信号大 $10^3 - 10^7$ 的信号. 所以, 受到普遍的重视.

LIA 经历了若干个发展阶段. 目前出现了高速高位的模数转换器 (ADC) 和数字信号处理器 (DSP) 芯片. 数字乘法解调 (DMD) 有取代模拟相敏检波 (PSD) 的可能. 近年来两者都有所发展.

衡量一个 LIA 的性能有下列一些技术指标: 即测量的频率范围、对噪声的抑制能力 (动态储备)、谐波抑制水平. 这三项是最主要的性能表征. 其次还有: 带通滤波的斜率、漂移、增益误差、正交性、畸变、分辨率、时常数等. 这些次要指标不论是模拟 LIA 或数字 LIA 均已得到很好的解决. 因此, 我们重点讨论主要三项来加以比较.

1. 动态范围和动态储备

动态范围和动态储备表示 LIA 能检测到的最小信号电平、仪器的精度 (稳定度) 和对噪声的排除能力. 图 1 充分表示了它们之间的关

系。

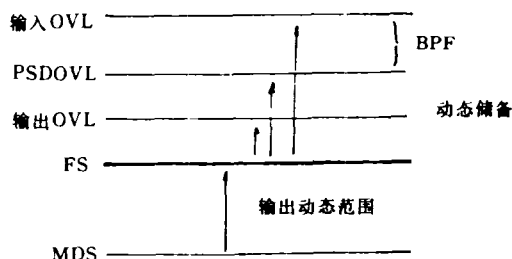


图1 LIA的动态范围(输入输出特性)

对比模拟LIA和数字LIA的主要结构如图2所示。模拟LIA的信号经过PSD,经LPF(积分器)转换成直流信号,通过ADC送入计算机处理。计算机是附加硬件,一般来说,PSD的动态储备很容易达到60dB(相当10bit的数字量)。若后续ADC的精度为16bit,则动态范围相当于26bit。而数字LIA是信号先经过ADC转换成数字量,将此数字量送到数字信号处理器(DSP)去解调,ADC采用16bit,则MDS和OVL之间的动态范围也只有16bit。如要求与模拟LIA具有相同的噪声抑制能力的话,则输出精度实际上只有6bit(±32个量化电平),显而易见,与模拟LIA相差10bit的输出精度。

当然,数字LIA必然要采用有效措施来扩大动态范围。目前最有效的办法是采用内插法。这种内插方法主要有:经大量的采样,并乘以权重系数(定标因子),藉以优化噪声的响应;采用平均提高信噪比或通过附加输入到ADC的另一输入端,输入伪随机噪声减少高斯噪声的影响等等。效果一般来说还很满意。但是若DMD输入的是一个方波信号,即使DMD有16bit的

精度,都利用不了高斯噪声的好处,因为这是需要用脉冲式噪声来内插逼近。另外若噪声很强,或存在差拍(采样频率与干扰频率的差拍、伪随机周期谐波与参考频率的差拍),就给内插法带来很大的问题。

以DMD为基础的LIA近20年来发表了大量文章。1985年Rubin出版了一个文集,归纳了两大类,即逐次逼近法和积分转换器(VFC或 σ - Δ 调制)。后者具有较好的噪声抑制性能,前者则有较好的频率特性。

综上所述,就目前16bit ADC的数字LIA其动态范围还不及模拟LIA。

2. 频率特性

模拟LIA由于积分器的时常数所限,不可能在超低频工作,一般限于0.5Hz或1Hz的频率下限。但数字LIA在这方面却独具优点,可以很好地工作在1mHz。但对频率上限而言,模拟LIA的高频响应好,可达1MHz。数字LIA采用逐次逼近法的高速ADC,根据采样定理,ADC的速度与工作频率上限之比为2.5:1,因此采用256kHz的ADC,其高频极限为100kHz。

3. 谐波响应

相干检测必须有一相干的参考信号作同步相检。一般参考信号是方波,具有丰富的谐波特性,使PSD变成梳状滤波。对奇次谐波有响应,这是不允许的。数字LIA的DSP由于采用时钟频率作参考输入,利用程控处理获得理想的正弦波,所以谐波响应被彻底消除。模拟LIA则要作技术上的处理。经过若干年的努力,在信号通道内插入四阶数字滤波,滤波器频率能自

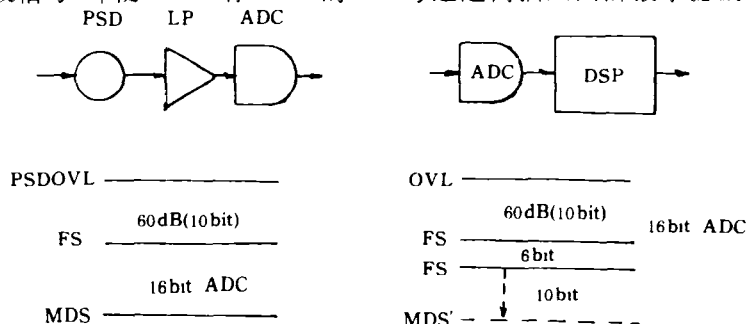


图2 模拟和数字LIA中信号处理方案的比较

动跟踪参考信号,更主要的是 DSP 利用 Wash 函数综合混频器,对三次、五次谐波无响应,而七次以上的谐波则被带通滤除,因此,整机仅有基波响应输出,所以,模拟和数字 LIA 都基本上解决了谐波响应的问题。

4. 数字和模拟结合是目前的方向

在讨论了这两者的特点以后,作为比较列出表 1。

表 1 模拟型与数字型解调的比较

	PSD	DMA	
		逐次逼近型	积分型
强噪声下的测量	很好	不很好	较好
频率特性	20Hz—1MHz	可达 100kHz	较低
输入分辨率	>16bit	依赖 SNR	
动态储备	>80dB	受 ADC 精度所限	
正交性	0.1°	理论上为零	
漂移	已达到实验需要	理论上为零	
最小时常数	1μs	100μs	
谐波抑制	已解决	理论上无响应	
模拟输出	1MHz	需 DAC	

从表 1 可知,至少是现阶段,还不能说是那一种代替另一种,但从发展的趋势看,当高速(2.5MHz)、高位(26bit)的 ADC 出现时,数字 LIA 才可能占一定的优势,目前明智的选择则是两者加以结合,设计出最好的 LIA。这一点,EG&G PARC 推出新一代 5302 型 LIA 就是这种体现,其简单的原理框图如图 3 所示。

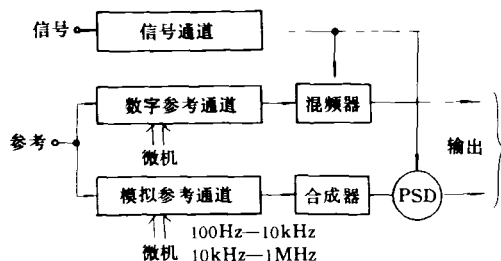


图 3 5302 型 LIA 的原理框图

信号通道基本上是 5209 的原型,参考通道则分成模拟型和数字型两路,分别送到 DSP 和 PSD,模拟参考通道的频率范围是 20Hz—1MHz,数字参考的频率为 1mHz—100Hz,因此覆盖了频率从 1mHz—1MHz 的范围,模拟参考分成两个环路滤波与 VCO,一为高速环,频

率为 10kHz—1MHz,另一低速环则是 100Hz—10kHz,两个环路通过频率合成器送到旋转滤波 PSD。

5302 LIA 具有优越的性能,除频率特性外,其灵敏度为 100nV FS 及 1nV FS(5215 变压器),动态存储可达 125dB,因此,这是目前世界上的最高标准。

二、微弱光检测

弱光检测的主流是光多道系统(OMA),表 2 说明了它的广泛应用领域。

表 2 OMA 应用范围与要求

领域	应用	灵敏度 (光子/计数)	探测器件*	波长(nm)
光谱学	分光光度计	1000	PDA	<100—1000
	弱光谱	15	I PDA	<100—950
时间分辨 (3D 显示)	激光光谱	10—20	G-I PDA	<100—950
	2D 光谱 图象	1	G-I CCD	<100—1000
图象		10—20	慢扫 CCD	<100—1000
波长扩展	紫外	1—10	Si PDA	60—620
	红外	1000—3000	I _n G _a A ₃ -PDA G _c -PDA	600—2500

* I 表示增强型,G 表示门控。

OMA 系统之所以能得到表 2 的结果,是经历了 20 多年的发展与完善,现将近年来的发展与技术进步作一简要的归纳:

1. 探测器件

OMA 的探测器经历了由电真空器件到半导体器件的四个阶段,即由 Vidicon → PDA → 增强 PDA → CCD 和增强 CCD,波长范围以可见光为主向紫外和红外扩展,灵敏度由 >1000 光子/计数增强到 1 光子/计数,超过了 PMT,同时由 1D 线列扩展到 2D 面矩阵。

2. 探测器

从 OMA3 到 OMA4 最突出的进展是在探测器的输出端全部转换成数字量,并可用光纤长距离传输而不引入附加噪声,探头内包括检测器件、前放、时钟、ADC 与控制板,因此输出噪声达到最低限度,图 4 和图 5 可以充分比较 OMA3 和 OMA4 的结构及其改进。

探测器还可加入增强系统, 增强部件除 MCP 外, 还有定时器和高压电源, 因此装配变得十分简单.

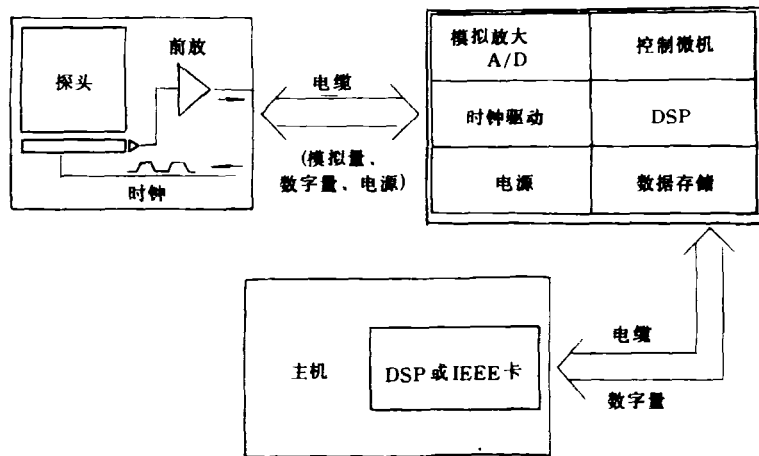


图4 OMA3 结构框图

1. 前放与后放大器用 3m 电缆连接, 因此引入噪声, 降低了灵敏度与动态范围;
2. 一根电缆同时传输信号(模拟量)、数字量和电源, 噪声影响了灵敏度与动态范围;
3. 用 DMA 或 IEEE-488 接口使数据和 PC 机存储器分离, 造成速度降低.

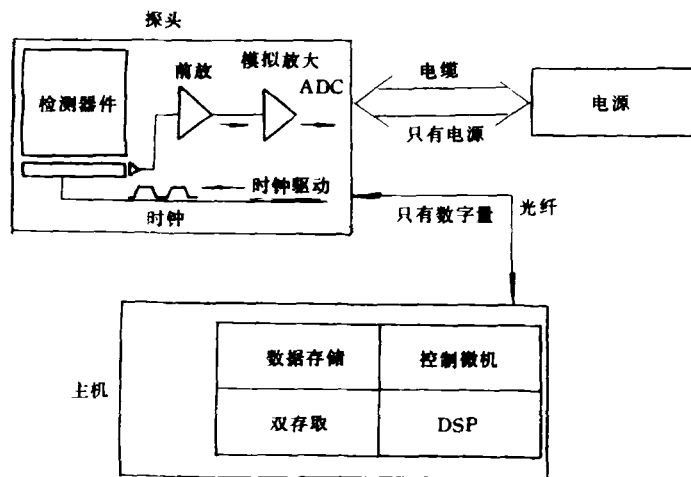


图5 OMA4 的结构框图

1. 所有模拟量+时钟+ADC 都在探头内;
2. DSP 采用特殊应用的 IC 模块(ASIC);
3. 数字卡有微处理器 ASIC, 具有 8M 的数据存储;
4. 数字卡在主机内是双端 RAM;
5. 探头和数字控制板之间用 G.A. 光纤连接.

3. 探测器的两个关键技术

探头的两个关键技术一是它提供了最快的读出速度, 有利于实际工作, 读出速度高达 $5 - 10\mu\text{s}/\text{移位}$. 这是因为将 512×512 的象元的矩阵上下各有一个移位寄存器, 实现了双向同时

读出, 使速度至少提高了一倍. 另一个是在数据采集方式中, 利用新的按波长(即对应的列阵象元)的强弱用不同的曝光时间, 即强光处曝光时间短, 弱光处曝光时间加长, 充分积累弱光, 有效地利用固有的动态范围而使实际的动态储备

大为增加(10^5-10^6). 例如图 6 所示, 当 A 和 C 波长范围为 1s 的曝光时间, B 范围的曝光时间为 0.1s. 若 A 和 C 的背景噪声为 1 计数, 而 C 的计数的 10 倍为 640000, 则内景动态范围为 640000 : 1.

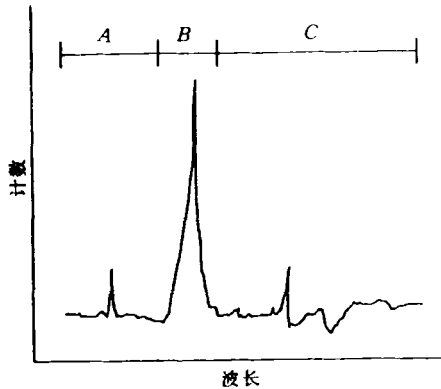


图 6 根据不同光强采用不同曝光时间的实例

4. 模糊现象

相邻象元由于电荷的泄漏造成信号的相互覆盖. CCD 器件的模糊较小, 这是由于其矩形响应所致. 一般来说, OMA 的 CCD 探头, 相邻象元的影响 $< 2.5\%$. 对角相邻象元的影响为 $< 0.6\%$. 从而, 具有很高的分辨率, 很小的交叉效应和很高的动态范围.

5. 透镜耦合增强器(LCI)

透镜耦合增强器是专门用于动态范围适配的增强器, 适用于 CCD 器件. LCI 的动态范围恰好与 CCD 的动态范围相适配, 这一点大大改善了光纤耦合的特性. LCI 具有可变增益、快速的脉冲 ($5\text{ns}-10\mu\text{s}$)、程控脉冲宽度和延迟 ($10\text{ns}-13\mu\text{s}$). 因此, 有助于图像和时间分辨光谱应用.

6. 图象检测

OMA4 系统可作弱光图象检测, 很方便构成高动态范围图象系统(HiDRIS), 只要在探头前加 LCI 和照相机镜头, 在计算机中输入 HiDRIS 软件即可. 其中 CCD 是 512×512 的矩阵, 这种 HiDRIS 是弱光图象检测的先驱.

EG&G PARC 推出的 OMA4 系统是近年来国际发展的最新成就, 它解决了弱光检测的一系列问题, 最有吸引力的是它同时满足: (1) 噪声 < 1 电子, (2) 读出率 $3\mu\text{s}/\text{象元}$, (3) 动态范围 22bit. 因此, 它执国际 OMA 系统的牛耳.

- [1] 陈佳圭, 微弱信号检测, 中央广播电视大学出版社, (1987).
- [2] 陈佳圭、金瑾华等, 微弱信号检测—仪器的使用与实践, 中央广播电视大学出版社, (1989).

用相位多普勒效应同时测量微粒的速度与尺寸

宋菲君

(中国科学院大恒公司, 北京 100080)

本文评述了测量微粒的尺寸和运动速度的意义以及各种方法的优缺点, 回顾了同时测量微粒速度和尺寸的相位多普勒测速(PDA)技术的发展历史, 并且在几何光学近似模型的基础上, 比较详细地介绍了 PDA 的原理及物理图像.

运动微粒对光波的散射是一个非常基本的物理效应, 它是光波电磁场与运动微粒互相作用的结果, 所以散射光波必然荷载了与微粒有

关的许多信息. 这些信息大致分为三类: 第一类是微粒的运动状态参数, 例如速度; 第二类是微粒的几何参数, 例如球形微粒的直径; 第三类则