

采用声光技术的信号处理

李 宁

(成都科技大学工程力学系)

提 要

介绍了一种采用高频宽带声光器件的模拟信号处理实验装置, 该装置可产生微秒级固定载频和线性调频矩脉冲(串)输出。归纳和推导了处理器输出的数学表示。用直接和外差探测方式对矩形脉冲模拟信号作了空间积分和时间积分卷积(相关)运算, 实验结果与计算值基本吻合。

关键词: 声光技术, 信号处理。

一、引 言

在当今信号处理技术, 常常出现各种具有超快瞬时宽频带的复杂信号, 采用电子学信号处理将会遇到不少困难。而光学信号处理技术对这种复杂信号的处理却有许多独特的优越性, 七十年代中期以后, 声光器件的理论和制造工艺不断完善, 为光学信号处理走向实时提供了可能。声光信号处理技术不仅适于雷达信号、声纳信号和通讯等方面, 而且适于各种宽带敏捷信号。它采用非扫描方式并行处理多个通道的信号, 具有100%的截获概率, 且可进行实时处理。研究证明, 可制备各种专用的声光信号处理机^[1], Demetri Psaltis系统地总结了各种处理器输出的数学公式^[2]。在本实验装置中, 由于采用了自己设计制作的高频宽带声光器件, 使系统带宽增加。适当调整实验装置可组成空间积分和时间积分两种信号处理结构, 并可对信号做直接或外差探测。

二、声光信号处理的数学模型

声光信号处理有两种基本型式, 即由透镜完成积分的空间积分型和由探测器完成积分的时间积分型。

1. 空间积分型结构

采用两个声光偏转器 D_1 和 D_2 的空间积分型声光相关(卷积)结构如图1所示^[3], 光电倍增管 PMT 以直接探测方式将接收到的强度信号经转换后送入示波器。 L_s 为积分透镜, 它将信号光空间积分于平方律探测器 PMT 上^[4]。从探测器输出的光电流为

$$I_{\text{out}}(t) \propto \left| \int_D S(\tau) R(2t - \tau) d\tau \right|^2, \quad (1)$$

式中 $S(t)$ 和 $R(t)$ 分别为信号和参考信号, D 为 D_s 孔径。由(1)式可见, 采用直接探测方式得到的信号与参考信号卷积的模方。要得到相关输出必须对二信号之一做时间反演。在

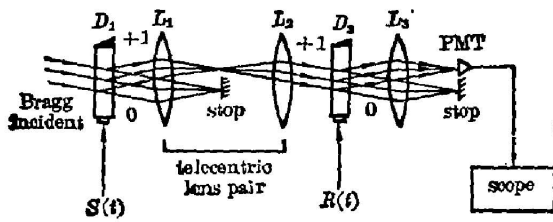


Fig. 1 Space integrating A-O correlation

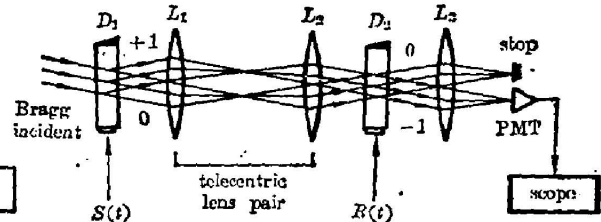


Fig. 2 Space integrating A-O correlation using heterodyne detector

信号具有时间对称轴时卷积和相关等价。

如果将 $S(t)$ 和 $R(t)$ 分别调制在一个线性调频上, 并把它分别送入图 2 所示的两个声光偏转器中, 则图 2 所示装置可完成对信号 $S(t)$ 的傅里叶变换, 故图 2 为空间积分型声光傅里叶变换的一般结构。但我们发现, 如果将调制在固定载频上的 $S(t)$ 和 $R(t)$ 分别送入图 2 中两个声光偏转器的超声换能器, 则可得到调制在某一载频上的信号的卷积(而不是卷积的模方)。因此, 图 2 也可看成是外差探测空间积分型声光相关结构。下面导出这种结构的探测器输出。

图 2 与图 1 不同之处就是同时利用声光偏转器的衍射光与非衍射光进行外差探测。频率为 ω_0 , 振幅为 E_0 的光 $E_i (= E_0 \exp(i\omega t))$ 以布拉格(Bragg)角入射 D_1 , D_1 压电换能器由 $S(t) \cos(\omega_1 t)$ 驱动(ω_1 为载波圆频率), 适当调整 D_1 得 +1 级布拉格衍射光 E_1 为

$$E_1(t-\tau) = \eta_1(\omega_1) E_0 S(t-\tau) \exp\{i[\omega_0 t + \omega_1(t-\tau)]\}, \quad (2)$$

式中 $\tau (= z/V_0)$ (z 为沿超声传播方向的坐标, V_0 为超声声速) 为延迟时间, $\eta_1(\omega_1)$ 为 D_1 在频率 $f_1 (= \omega_1/2\pi)$ 处的衍射效率(设布拉格衍射, 只有 0 级和 +1 级光)。使 D_1 的 0 级光和 +1 级 E_1 均通过透镜 L_1 和 L_2 到达 D_2 。调整 D_2 使 0 级光刚好以布拉格角入射并产生 -1 级衍射, 其 0 级在 L_3 的后焦面上滤掉, 而 D_1 的 +1 级光 E_1 无衍射直接通过 D_2 。由于 D_1 和 D_2 成物像关系, 在 D_1 中的 τ 将变为 D_2 中的 $-\tau$ 。即 $E_1(t-\tau) \rightarrow E_1(t+\tau)$ 。在 D_2 的换能器上施加参考信号 $R(t) \cos(\omega_2 t)$ (ω_2 为载波圆频率) 后, 得到 D_2 的 -1 级衍射光

$$E_2(t-\tau) = E_0 \eta_2(\omega_2) [1 - \eta_1(\omega_1)] R(t-\tau) \exp\{i[\omega_0 t - \omega_2(t-\tau)]\}, \quad (3)$$

式中 $\eta_2(\omega_2)$ 为 D_2 在频率 $f_2 (= \omega_2/2\pi)$ 处的衍射效率。经透镜 L_3 积分后 $E_1(t+\tau)$ 和 $E_2(t-\tau)$ 一起聚集在探测器上, 由探测器输出的光电流

$$I_{out} = \int_D |E_1(t+\tau) + E_2(t-\tau)|^2 d\tau = I_1 + I_2 + I_3, \quad (4)$$

式中 I_1 和 I_2 为直流项, 影响输出的动态范围。 I_3 为所需要的交叉项, 其形式为

$$I_3 = K \cos [(\omega_1 + \omega_2)t] \operatorname{Re} \left\{ \int_D S(\tau) R^*(2t-\tau) \exp[i(\omega_1 - \omega_2)\tau] d\tau \right\}, \quad (5)$$

$$K = 2E_0^2 \eta_1(\omega_1) \eta_2(\omega_2) [1 - \eta_1(\omega_1)],$$

式中 * 表示复共轭。当 R 为实数且 $\omega_1 = \omega_2$ 时, (5) 式退化为

$$I_3 = K \cos(2\omega_1 t) \int_D S(\tau) R(2t-\tau) d\tau, \quad (6)$$

于是得到了 S 与 R 的卷积。由于该卷积是调制在载频 $2\omega_1$ 上的, 故需对探测器输出做低通滤波解调。

2. 时间积分型结构

通常的时间积分型声光相关器是由一个声光调制器和一个声光偏转器组成^[3], 但我们会看到, 如果对图 1 做适当调整, 也可得到由两个声光偏转器组成的时间积分型声光相关器。在图 1 中去掉探测器, 增加透镜 L_4 与 L_5 组成另一个 $4f$ 系统, 加入线阵探测器于 D_2 的像面上便组成了这种相关器。由 D_1 产生的 $+1$ 级衍射光仍由 (2) 式表示, 零级光在 L_1 的后焦面被滤掉。 $E_1(t-\tau)$ 到达 D_2 时变为 $E_1(t+\tau)$ (理由如前述), 它以布拉格角入射 D_2 , 产生 $+1$ 级衍射

$$\left. \begin{aligned} E_{12}(t-\tau, t+\tau) &= AS(t+\tau)R(t-\tau)\exp\{i[\omega_0 t + \omega_1(t+\tau) + \omega_2(t-\tau)]\}, \\ A &= E_0\eta_1(\omega_1)\eta_2(\omega_2). \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

在探测平面上 E_{12} 中的 $\tau \rightarrow -\tau$ 探测器对光强度积分, 其输出

$$I_{\text{out}} = \int_0^T |E_{12}(t+\tau, t-\tau)|^2 dt = A^2 \int_0^T |S(t-2\tau)R(t)|^2 dt, \quad (8)$$

式中 T 为探测阵列的积分时间。因为 T 可以达到 ms 级, 时间积分型声光处理器有很大的时间带宽积, 从而提高输出的信噪比。

由 (8) 式可见, 这种有两个声光偏转器的时间积分型声光相关器的输出为 S 与 R 模方的卷积, 并且卷积输出的信号宽度为 S 和 R 宽度的代数平均。作者认为, 由于探测器只能对光振幅平方积分, 因此无论什么型式的时间积分相关器都只能得到信号模方的卷积 (相关), 这一点与 Sprague^[3] 的结论不同。

三、声光信号处理实验装置

实验装置由 He-Ne 激光器、声光偏转器、模拟信号发生装置、光电探测器及若干透镜和调整架构成。核心部分是声光偏转器及模拟信号发生装置, 分别介绍如下:

1. 声光偏转器

声光偏转器采用 TeO_2 慢切变波修正型器件^[5], 中心频率 250 MHz, 带宽大于 100 MHz, 峰值衍射效率大于 30%, 延迟线长 $17 \mu\text{s}$ 。压电换能器用 x 切 LiNbO_3 制作, 增透膜系由 Au-Ag-In-Ag 构成。

2. 模拟信号发生装置

自行设计的模拟信号发生装置由完全相同的两部分组成, 但两路输出信号相对延时可调。图 3 给出了该装置的一半的框图。其连续信号输出功率可达 1 W。选择不同开关位置可分别得占空比为 0.5 的固定载频或线性调频脉冲 (串) 输出。

四、实验结果及讨论

图 4 为声光信号处理实际装置照片。由于本文所采用的信号均为矩形脉冲, 故不用对其作时间反演即可得到相关输出。

N 个宽为 1 间距为 z 的矩孔函数的自相关可以写为

$$C = \int \left[\sum_{n=0}^{N-1} \text{rect}(\tau - 2n) \right] \left[\sum_{n=0}^{N-1} \text{rect}(\tau + x - 2n) \right] d\tau, \quad (9)$$

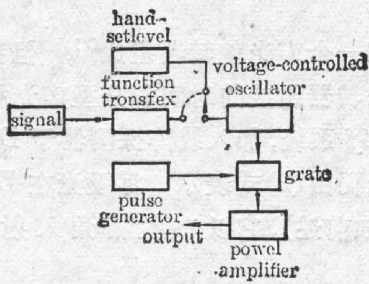


Fig. 3 Scheme of analog signals generator

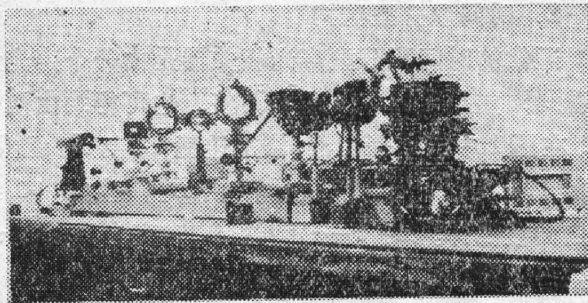


Fig. 4 Experimental system for acousto-optical signal processing

式中 rect 表示矩孔函数, 每一矩孔具有单位面积。计算可得 N 个占空比为 0.5 的矩孔脉冲的自相关结果为 $2N-1$ 个三角脉冲, 并以第 N 个三角脉冲为轴对称分布, 相邻两脉冲的幅度差为第一个(或第 $2N-1$ 个)脉冲的幅度, 每个三角脉冲的宽度为矩孔脉冲宽度的二倍。图 5 给出了四矩孔自相关的计算值。图 6 为外差探测固定载频单矩孔空间积分互相关输出, 下两线为二待相关信号, 上线为调制在二倍于声光偏转器工作频率的载波上的互相关输出(三角波)。由图 6 可见相关输出信号宽度与待相关信号宽度相同, 这是因为(8)式中 R 的宗量为 $(2t-\tau)$ 的缘故。对(4)式和(10)式亦有此结果。

图 7 是从示波器上观察到的采用直接探测方式得到的 9 个固定载频矩脉冲空间积分自相关结果, 它与计算值吻合较好。图 7 中每个三角波的底部没有回到零位的原因是, 脉冲串

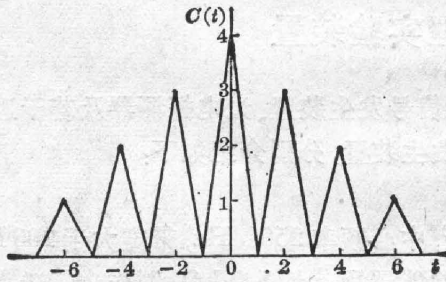


Fig. 5 Calculating result of auto-correlation for four rect pulses

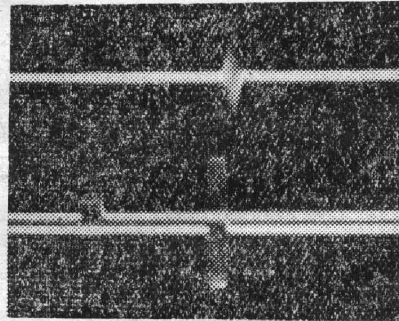


Fig. 6 Cross correlation of single rect pulse using heterodyne detection. Horizontal scale is in units of $1 \mu\text{s}/\text{cm}$. (SI)

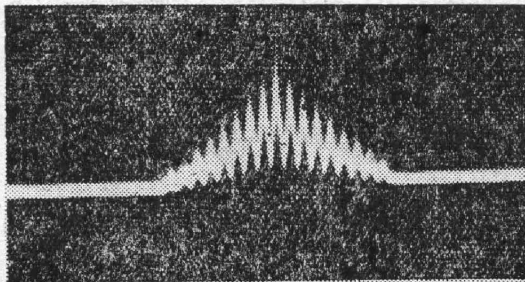


Fig. 7 Auto-correlation output of nine rect pulses obtained with direct detection Horizontal scale is in units of $2 \mu\text{s}/\text{cm}$. (SI)

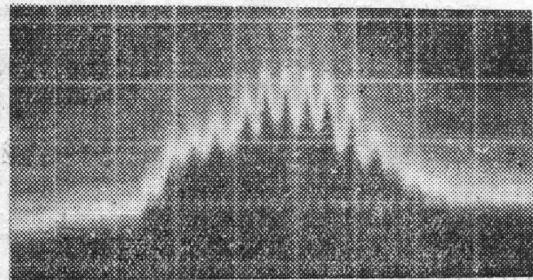


Fig. 8 TI auto-correlation output of nine rect pulses modulated on LFM obtained with direct detection

的占空比略大于 0.5 及探测量拖尾。图 8 为直接探测得到的 9 个调制在线性调频 (LEF) 载波上的矩脉冲串时间积分自相关结果, 所用 2048 位线阵电荷耦合 (CCD) 器件积分时间可达 10 ms。图 8 所示的相关输出存在两个问题: 波形失真和三角形脉冲底部没有回到零位。造成后者的原因如上所述, 而前者我们从 (10) 式可知, 由于采用线性调频信号, $\eta_1(\omega_1)$ 和 $\eta_2(\omega_2)$ 将不再为常数, 它们作为权因子加到相关输出上, 从而改变输出波形。此外, 声场的均匀性也会影响信号波形。平滑衍射效率-频率曲线是解决问题的可能途径之一。

应该指出, 图 2 所示声光相关结构亦可完成对信号的傅里叶变换, 但这需要把信号与一个基带线性调频混频后再送入声光调制器, 对信号的变换输出将调制在一个四倍于基带线性调频斜率上, 这种处理的困难在于对信号的解调。一种近似的解调技术已有报道^[6], 并可分别得到信号傅里叶谱的实、虚部分量。

五、结 束 语

作为一种新的信号处理技术, 声光技术的特点在本文的实验中得以体现。对几种模拟信号分别采用直接探测和外差探测方式进行的空积分和时间积分型声光卷积(相关)实验的结果虽然是初步的, 但比较令人满意。外差探测方法的引入有助于输出信噪比的提高。由于采用了一种新型高频宽带声光器件, 大大增加了系统的空间(时间)带宽积, 提高了处理增益。这种优点在采用时间积分型结构时将更加突出。进一步完善实验系统, 增加声光信号处理的功能(如傅里叶变换)无疑是很有意义的, 也是我们今后的工作。

最后, 作者对实验中与深圳先科激光电视公司梁月西同志广泛讨论所得到的有益启发, 中科院光电所王富元同志在实验电路上的有力技术指导, 黎俊杰、徐家仁、杨淑兰和张春华等同志为实验加工了声光器件, 在此一并表示谢意。

参 考 文 献

- [1] L. N. Florsess, D. L. Hetch; *Proc. SPIE*, 1977, **118**, 182~192.
- [2] D. Psaltis; *Opt. Engng*, 1980, **19**, No. 2 (Mar-Apr), 193~199.
- [3] R. A. Sprague; *Opt. Engng*, 1977, **16**, No. 5 (Sep-Oct), 467~474.
- [4] A. Korpel; *«Optical Information Processing»*, (Plenum Press, New York, 1976), 171~175.
- [5] 李宁; *«中国激光»*, 1986, **13**, No. 8 (Aug), 493~497.
- [6] D. F. Hotz; *Appl. Opt.*, 1984, **23**, No. 10 (May), 1613~1619.

Signal processing using acousto-optical technology

LI NING

(Department of Engineering Mechanics, Chengdu University of Science and Technology)

(Received 3 April 1987, revised 15 May 1987)

Abstract

An experimental system for simulative signal processing using high frequency wideband acousto-optical device is proposed and mathematical expressions of output of the system are derived. The experimental results of both space and time integreting convolution (correlation) for the simulative signals composed of rect impulses are in agreement with caloulation on the whole.

Key words: signal processing; acousto-optical technology.