

空间积分双反向通道反常声光相关器

俞宽新 赵启大

(北京工业大学应用物理系, 北京 100022)

摘 要 介绍一种采用双反向通道 TeO₂ 反常声光器件构成的空间积分声光相关器(SIAOC)。使用直接探测法对矩形脉冲调制的模拟雷达信号进行了抗干扰实验, 当矩形脉冲宽度为 10 μm 时, 相关增益可达 16 dB。

关键词 空间积分, 声光, 相关器, 双通道。

1 引 言

传统的空间积分声光相关器使用二个分立的声光器件组成 4f 系统^[1], 整个装置光学元件多, 长度大, 调整复杂, 重复性差。本文介绍的双反向通道式反常声光相关器将二个器件合成一个, 使系统长度减小一半, 从而简化了系统的调整, 改善了系统各项技术指标的重复性。该系统可用来进行雷达信号处理, 经提高雷达信号的信噪比。

2 光路分析

双反向通道式反常声光相关器的光路如图 1 所示。声光器件是由二个相互平行的晶面上粘贴换能器而制成的, 它形成二个彼此分开、并沿相反方向传播超声波的通道。每个通道的声光相互作用都进入布拉格衍射区, 分别处于 +1 级和 -1 级的衍射状态。声光器件放在透镜 L 的前焦面上, 二个换能器加上同载频的待相关电信号

$$S_1 = a_1(t)\cos(2\pi ft), \quad S_2 = a_2(t)\cos(2\pi ft).$$

(1)

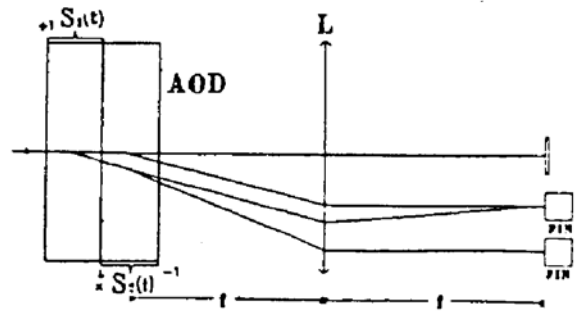


Fig. 1 Principle of SIAOC using one device with two channels

式中 $a_1(t)$ 与 $a_2(t)$ 为调制函数, f 为载频。这二个通道的复透过率分别为^[1]

$$t_1(x, t) = 1 + j\tilde{g}_1(t - x/v)/2 \quad t_2(x, t) = 1 + j\tilde{g}_2^*(t + x/v)/2 \quad (2)$$

$$\tilde{g}_1(t - x/v) = a_1(t - x/v)e^{j2\pi ft}e^{j2\pi\zeta x}, \quad \tilde{g}_2^*(t + x/v) = a_2^*(t + x/v)e^{-j2\pi ft}e^{j2\pi\zeta x} \quad (3)$$

式中 $\zeta = f/v = 1/\Lambda$, 称之为空频, v 为超声波速, Λ 为超声波长。 \tilde{g}_2 取复共轭是由于第二通道

处在 -1 级衍射状态, 其宗量取 $t + x/v$ 的形式是由于超声波传播方向沿 $-x$ 轴。整个声光器件的复透过率为

$$\begin{aligned} \bar{t}(x, t) &= \bar{t}(x, t)\bar{t}_2(x, t) \\ &= 1 + jg_1(t - x/v)/2 + j\bar{g}_2^*(t + x/v)/2 + \bar{g}_1(t - x/v)\bar{g}_2^*(t + x/v)/4 \end{aligned} \quad (4)$$

设入射光场为

$$\bar{u}_i(x, t) = e^{-j2\pi\nu t} \quad (5)$$

ν 为光的时频, 则出射光场将为

$$\bar{u}_{out}(x, t) = \bar{t}(x, t)\bar{u}_i(x, t) \quad (6)$$

将(3)~(5)各式分别代入(6)式, 输出光共四束分别称为(0,0)、(+1,0)、(0,-1)、(+1,-1)。每束光的光场在忽略了常系数及常位相因子后分别为

$$\begin{aligned} \bar{u}_{(0,0)}(x, t) &= e^{-j2\pi\nu t}, \\ \bar{u}_{(+1,0)}(x, t) &= a_1(t - x/v)e^{-j2\pi(\nu+f)t}e^{j2\pi\zeta x}, \\ \bar{u}_{(0,-1)}(x, t) &= a_2^*(t + x/v)e^{-j2\pi(\nu-f)t}e^{j2\pi\zeta x}, \\ \bar{u}_{(+1,-1)}(x, t) &= a_1(t - x/v)a_2^*(t + x/v)e^{-j2\pi\nu t}e^{j4\pi\zeta x}, \end{aligned} \quad (7)$$

显然, (0,0)光的时频为 ν , 空频为 0, 都与入射光相同, 故它们传播方向也与入射光相同, 经透射镜 L 聚焦后形成第一个光点, 因它不携带有用的信息故被挡掉。(+ 1, 0) 与 (0, - 1) 光的空频相同, 都比入射光大 ζ , 它们的传播方向一致, 偏离入射光的角度 α 与光波长 λ 、声波长 Λ 的关系为

$$\alpha = \lambda\zeta = \lambda/v \quad (8)$$

经 L 聚焦后, 这二束光形成第二个光点。它们的时频不相等, (+1,0) 光比入射光大 f , (0, - 1) 比入射光小 f , 光电接收器对此光点的接收属外差式探测, 输出电流为

$$\begin{aligned} i(t) &= \left| \int [u_{(+1,0)}(x, t) + u_{(0,-1)}(x, t)] dx \right|^2 \\ &= i_1 + i_2 + i_3 \end{aligned} \quad (9)$$

式中 i_1 与 i_2 为二个直流项, i_3 为交叉项。若电信号调制函数为对称实函数, i_3 的计算结果为

$$i_3(t) = \cos(4\pi ft) \int a_1(t - x/v)a_2(t + x/v)dx \quad (10)$$

这是二个电信号调制函数间的卷积或相关, 但调制在 $2f$ 载频上, 须对探测器的输出进行带通滤波解调。由于有直流分量的影响, 使光电接收的动态范围受到比较大的影响。(+ 1, - 1) 光的时频与入射光相同, 空频比入射光大 2ζ , 故它的传播方向偏离入射光的角度为 2α 。经 L 聚焦后形成第三个光点, 用光电接收器进行直接探测, 输出电流为

$$i(t) = \left| \int u_{(+1,-1)}(x, t) dx \right|^2 + \left| \int a_1(t - x/v) a_2(t + x/v) dx \right|^2 \quad (11)$$

这也是二个电信号调制函数的卷积或相关, 因没有载频, 故又称包络相关。由于该光束与其它光束是分开的, 又无直流分量, 因此对光电接收器的动态范围不产生影响。

3 器件设计

双反向通道反常声光相关器使用二氧化碲(TeO_2)作声光互作用介质, 为使器件工作频率避开凹陷频率, 超声波使用沿偏离[110]方向一定角度 θ 传播的切变波, 它属于反常声光互作用。第一通道为 e 光变 o 光, 第二通道为 o 光变 e 光。二个通道中的声波矢与光波矢之间的几何关系都可用图 2 表示。其中 k_1 为第一通道的入射光波矢或第二通道的衍射光波矢, k_2 为第

一通道的衍射光波矢或第二通道的入射光波矢, k 是超声波矢。为使器件获较大的带宽, 应使超声波矢与 0 光波陈面相切, 故超声频率(即器件工作频率)随 θ 角而变。对于 $\theta = 6^\circ$, 光波长

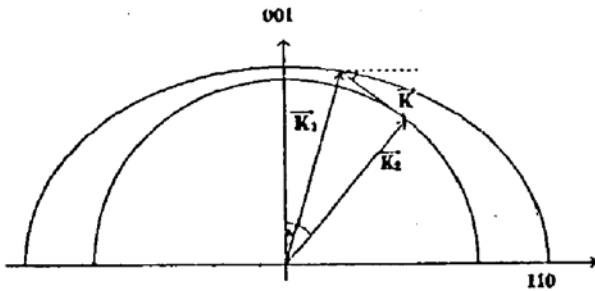


Fig. 2 AO interactive geometrical relation of TeO_2

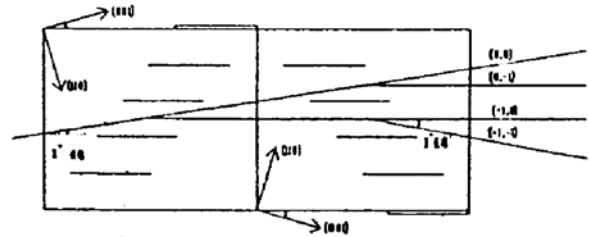


Fig. 3 The construction of TeO_2 with two channels

$\lambda = 632.8 \text{ nm}$, 通过解 Dixon 方程, 可求出超声频率 $f = 71 \text{ MHz}$, k_1 、 k_2 和 z 轴(即 $[001]$ 方向)之间的夹角分别为 $\theta_1 = 4^\circ 14'$, $\theta_2 = 6^\circ$ ^[4]。器件结构如图 3 所示, 通道 2 由通道 1 绕水平轴线翻转 180° 而成。实际制作器件时, 将定向好的晶体切成二块, 翻转后再粘在一起, 贴换能器的晶面与入射面垂直, 令入射光为在纸面内偏振的 e 光, 传播方向从器件水平轴线方向逆时针转过 $6^\circ - 4^\circ 14' = 1^\circ 46'$ 。经通道 1 中的声光互作用后, $+1$ 级衍射光变成垂直于纸面偏振的 o 光, 传播方向正好沿水平轴线。进入通道 2 后, 它的偏振方向和传播方向恰好满足该通道中声光互作用几何关系对入射光的要求。由通道 2 输出的 $(+1, -1)$ 光又变回成 e 光, 传播方向从水平轴线沿顺时针转过 $1^\circ 46'$ 。这样一来, $(+1, -1)$ 与 $(0, 0)$ 、 $(+1, 0)$ 光都分开了。因超声波矢传播方向与超声能量传播方向之间有一角度, 故每个通道的晶体长度都比换能器要长一些。

4 实 验

实验使用直接探测法, 对上述空间积分双反向通道 TeO_2 反常声光相关器进行了抗干扰实验。实验框图如图 4 所示, 激光器使用的是 He-Ne 激光, 光束扩到 7 mm , 由超声波传播速度 $v = 650 \mu\text{m}/\mu\text{s}$, 可求出该相关器的时间窗口, 即超声波穿过激光束的渡越时间 $\tau = 10.8 \mu\text{s}$ 。光电接收器使用 PIN 光电二极管, 光敏直径 0.5 mm , 负载电阻 $2 \text{ k}\Omega$ 。用矩形脉冲信号发生器产生的矩形脉冲去调制高频信号发生器, 将调制后的电信号分成二路, 其中一路混入无调制随机杂波干扰作为模拟雷达回波信号加到声光器件的一个通道上, 另一路作为参考信号, 直接加到声光器件的另一通道上。矩形脉冲的脉宽可调, 最大可调到相关器的时间窗口, 在实验中调至 $10 \mu\text{s}$ 。载频调至器件的中心频率 75 MHz 。矩形脉冲的重复频率为 $5 \text{ kHz} \sim 10 \text{ kHz}$ 。首先关闭干扰机, 此时相关输出实际上为矩形脉冲函数的自相关函数, 是三角形函数。相关峰的宽度, 即三角形底宽等于矩形脉冲的脉宽, 这是由于二个通道中的超声波同时反向传播, 相对速度为 $2v$ 的缘故。相关峰的高度, 即三角形底高随脉宽的加大而增高。其次打开干扰机, 通过衰减器调节干扰的强弱, 使得在示波器上同时显示干扰与脉冲调制信号时, 信

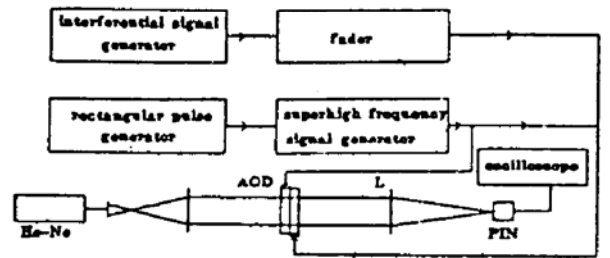


Fig. 4 The experimental block diagram of the SIAOC using one device with two oppositely directed channels

号刚好被干扰淹没；测出此时的信噪比 S/N 约为 -6 dB。但是将它与参考信号进行相关运算后，在示波器上仍可清晰看到相关峰，这说明此相关器可以起到提高雷达信号的信噪比的作用。继续加大干扰强度，直至相关峰消失时，测出信噪比 $S/N = -16$ dB，这说明此时相关器的相关增益可达到 16 dB。图 5 为实验结果的照片，其中 a) 是矩形脉冲调制的高频电信号。b) 为无干扰 ($S/N = \infty$ dB) 时的相关峰，c) 为干扰淹没信号 ($s/N = \infty$ dB) 时的相关峰。上述几种信噪比时相关峰的电压幅度测量结果列在表 1 中。

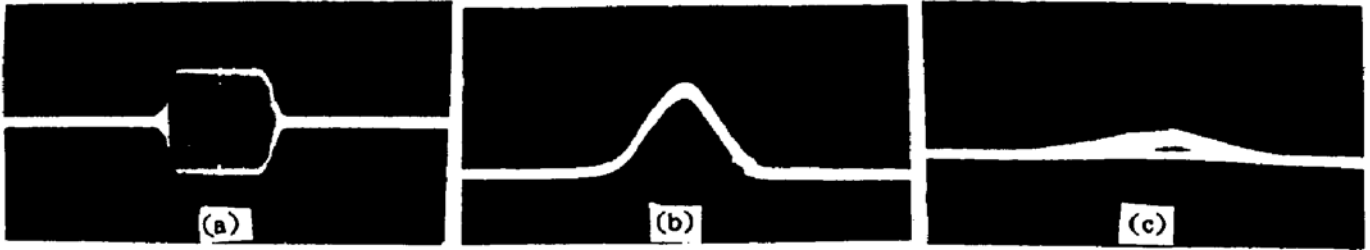


Fig. 5 Photographs of experiments

Table 1 Experimental data

signal-noise ratio (dB)	∞	-6	-16
peak voltage of correlation (mV)	240	80	0

结 论 空间积分双反向通道 TeO_2 反常声光相关器可以完成二个同载频电信号的调制函数之间的相关或卷积运算。抗干扰实验表明，这种相关器具有一定的相关增益，它可望制成雷达信号接收机，用以提高雷达信号的信噪比。并以其光路简单、光路长度短、易于调整等优点将为声光相关器实用样机的研制创造条件。

参 考 文 献

- [1] 徐介平, 俞宽新, 声光相关器在雷达信号处理中的应用. 应用声学, 1986, 5(1): 1~5
- [2] 李宁, 采用声光技术的信号处理. 光学学报, 1988, 8(5): 429~434
- [3] W. T. Rhodes, AO signal processing convolution and correlation. *Proc. IEEE*, 1981, 69(1): 65~79
- [4] 徐介平, 声光器件的原理、设计和应用. 第一版, 北京, 科学出版社, 1982, 117~134

Space Intergrating Acousto-optic Correlator Using an Extraordinary AO Device

Yu Kuanxin Zhao Qida

(Department of Applied Physics, Beijing Polytechnic University, Beijing 100022)

(Received 8 September 1993; revised 31 January 1994)

Abstract A space intergrating acousto-optic correlator (SIAOC) using one extraordinary acousto-optic device with two oppositely directed channels is proposed. Some interference-free experimental results for analog radar signal (high-frequency signal modulated by rectangular pulses) through directed detection are given. When the width of the rectangular pulses is $10 \mu\text{s}$, the correlative gain is 16 dB.

Key words space intergrating, acousto-optic correlator, two channels.