

# 窗口函数声光相关器及其在 雷达信号处理中的应用

俞宽新

李英方

(应用物理系)

(空军第五研究所)

【摘要】 介绍了一种只使用一个声光器件的窗口函数声光相关器，它可实现滤波片的窗口函数与电信号的震幅调制函数之间的相关运算。对由单载频矩形脉冲雷达信号与无调制随机杂波干扰组成的模拟回波信号进行了抗干扰实验。实验结果表明，当雷达信号脉宽为 $2\mu\text{s}$ 时，相关增益达到15 dB。

【关键词】 窗口函数，声光，相关器，雷达信号处理

【中图分类号】 TN65

## 0 引言

声光器件可以方便地将时间函数的电信号转变成空间函数的光信号，用它制成的声光相关器具有运算速度快、可进行实时处理、相关增益高等优点，特别适合进行雷达信号处理，以提高雷达回波信号的信噪比，增强抗干扰能力。传统的空间积分声光相关器使用二个分立的声光器件，组成一个 $4f$ 系统<sup>[1-3]</sup>，由于光学元件多，调整起来比较麻烦，不易实现实用化。本文介绍一种窗口函数声光相关器，只使用了一个声光器件，光路系统大为简化。实验结果表明，对于由单载频组成的矩形脉冲雷达信号和无调制随机杂波干扰组成的模拟回波信号有一定的抗干扰能力，当雷达信号的矩形脉冲宽度为 $2\mu\text{s}$ 时，相关增益为15 dB。国内外文献尚未见此种相关器的报道。

## 1 工作原理

窗口函数声光相关器的光路图如图1所示。

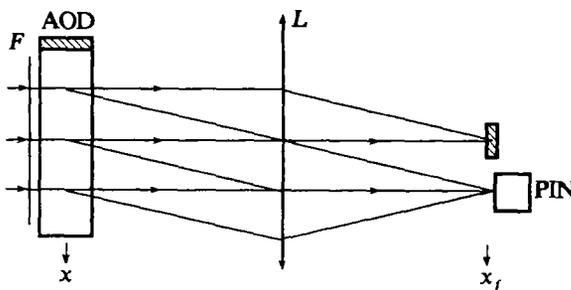


图1 窗口函数声光相关器原理图

$F$ 为振幅滤波器模片, 它的复透过率为空间坐标  $x$  的实函数, 称为窗口函数, 即

$$\tilde{t}_1(x) = a_1(x) \quad (1)$$

AOD为声光器件, 它工作在布拉格衍射的状态下, 加在器件上的电信号为振幅调制信号  $s(t)$ , 有

$$s(t) = a(t) \cos(2\pi f_0 t) \quad (2)$$

其中  $a(t)$  是振幅调制函数,  $f_0$  为载频. 电信号在声光器件中激发的超声波沿器件所在面的  $x$  轴正方向传播, 引起声光相互作用介质中的折射率分布函数为

$$g_2(x, t) = a_2\left(t - \frac{x}{v}\right) \cos\left[2\pi f_0\left(t - \frac{x}{v}\right)\right] \quad (3)$$

或者用复函数形式表示为

$$\tilde{g}_2(x, t) = a_2\left(t - \frac{x}{v}\right) e^{-j2\pi f_0 t} e^{j2\pi \xi_0 x} \quad (4)$$

式中  $\xi_0 = f_0/v = 1/\Lambda$ , 为超声光栅的空间频率,  $v$  为超声波速度,  $\Lambda$  为超声波波长. 由文献[4]可知, 声光器件的复透过率可表示为

$$\tilde{t}_2(x, t) = 1 + j\tilde{g}_2(x, t) \quad (5)$$

将(4)式代入(5)式, 忽略常位相因子后, 可得到

$$\tilde{t}_2(x, t) = 1 + a_2\left(t - \frac{x}{v}\right) e^{-j2\pi f_0 t} e^{j2\pi \xi_0 x} \quad (6)$$

设入射光为单位振幅的单色平面波, 且沿光轴方向传播, 其光场复振幅为

$$\tilde{u}_{in}(t) = e^{-j2\pi \nu t} \quad (7)$$

式中  $\nu$  为光频. 入射光依次通过滤波模片  $F$  和器件 AOD 后, 复振幅分布则可按下式计算

$$\tilde{u}_{out}(x, y) = \tilde{u}_{in}(t) \tilde{t}_1(x) \tilde{t}_2(x, t) \quad (8)$$

分别将(1)式、(6)式、(7)式代入(8)式, 有

$$\tilde{u}_{out}(x, t) = a_1(x) e^{-j2\pi \nu t} + a_1(x) a_2\left(t - \frac{x}{v}\right) e^{-j2\pi(\nu + \nu_0)t} e^{j2\pi \xi_0 x} \quad (9)$$

上式中第一项为零级光, 第二项为 +1 级衍射光. 由于声光器件放在富里叶变换透镜  $L$  的前焦面上, 则在  $L$  后焦面上便可得到函数  $\tilde{u}_{out}(x, t)$  的富里叶变换, 即

$$\tilde{u}_f(x_f, t) = \int \tilde{u}_{out}(x, t) e^{-j2\pi f_x x} dx \Big|_{f_x = \frac{x_f}{\lambda f}} \quad (10)$$

式中  $f$  是  $L$  的焦距,  $f_x$  为与空间坐标  $x$  相对应的空间频率,  $x_f$  是  $L$  后焦面的坐标. 将(9)式中第二项代入上式, 有

$$\tilde{u}_f(x_f, t) = e^{-j2\pi(\nu + \nu_0)t} \int a_1(x) a_2\left(t - \frac{x}{v}\right) e^{j2\pi(\xi_0 - f_x)x} dx \quad (11)$$

其中积分号外的指数因子表示光频由  $\nu$  增大到  $\nu + \nu_0$ . 为去掉积分号内的指数因子, 可将光电二极管 PIN 放在  $L$  后焦面坐标为  $x_f = \frac{\lambda}{\Lambda}$  处, 此时  $f_x$  正好等于  $\xi_0$ . 实际上, 光电二极管的位置就是 +1 级衍射光经  $L$  聚焦后的光学位置. 一般光电接收器都是平方律检波器, 故从

PIN 输出的电信号可写成

$$i(t) \propto \left| \int a_1(x) a_2\left(t - \frac{x}{v}\right) dx \right|^2 \quad (12)$$

注意到若将  $a_2\left(t - \frac{x}{v}\right)$  中的宗量提出一个常数比例因子  $1/v$ , 可将它改写为  $a_2(vt - x)$ ,

这样(12)式中的积分运算恰好就是  $a_1(x)$  与  $a_2(x)$  的卷积

$$R_{12}(vt) = \int a_1(x) a_2(vt - x) dx \quad (13)$$

这说明图 1 所示光路系统可实现窗口函数与电信号的调制函数之间的卷积运算. 如果电信号调制函数是对称的实函数, 卷积运算即是相关运算.

## 2 抗干扰实验

最简单的雷达信号为用矩形脉冲序列调制的单载频射频信号, 它的调制函数就是一个对称的实函数, 利用窗口函数声光相关器便可对它进行相关处理. 为提高相关峰高度, 令振幅滤波器模片  $F$  的窗口函数也为一矩形函数. 如果使用的雷达信号脉宽为  $T$ , 则窗口函数的矩形宽度应为  $T/v$ . 实际上该模片使用的是一个宽度可调的光栏. 我们用窗口函数声光相关器对由厘米波段(频率为 3 GHz)的矩形脉冲雷达信号和无调制的随机杂波干扰所组成的模拟回波信号进行了抗干扰实验. 实验框图见图 2. 雷达信号由 HL-11 型雷达测量仪产生, 载频可调, 实验时选在大于 3 GHz 约 110 MHz 处. 输出的信号脉宽、重复频率、幅度均可调, 我们选择了脉宽为  $2\mu\text{s}$ , 重复频率为 3 kHz, 故必须将雷达信号的射频变为中频. 为此, 使用

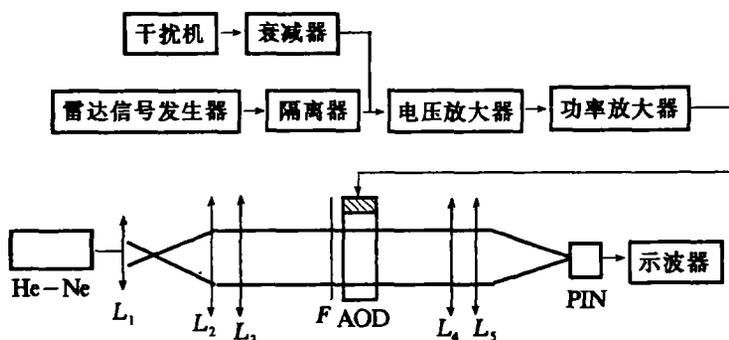


图 2 窗口函数声光相关器抗干扰实验框图

了 XFL-8 型厘米波信号发生器产生一个 3 GHz 的连续波为本振, 将二个信号发生器所产生的信号通过集成混频后, 得到载频为 110 MHz 的中频信号作为模拟回波信号中的有用雷达信号(为简单计, 图 2 中未画出混频部分). 这种雷达信号的频带范围很窄, 按富里叶分析理论, 矩形函数的富里叶变换为率克函数, 其主瓣宽度仅为矩形宽度倒数的 2 倍. 也就是说, 雷达信号的矩形脉冲宽  $2\mu\text{s}$ , 信号带仅为 1 MHz 左右. 干扰机产生的是无调制的随机杂波, 频谱范围远比雷达信号宽得多, 它的强弱通过衰减器连续控制. 将雷达信号和干扰混在一起, 通过宽带的电压放大器和功率放大器, 作为模拟回波信号加到声光器件上. 光路系统中

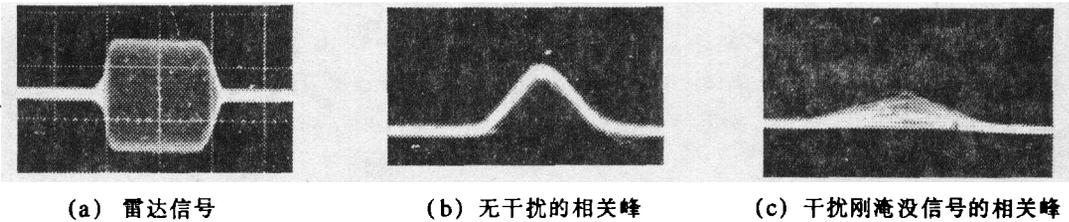
的  $L_1$  与  $L_2$  是扩束准直透镜,  $L_3$  与  $L_4$  是柱面透镜, 目的是将扩束后的圆形截面光束压缩成窄长条形, 以便通过 AOD 窗口. AOD 外钽酸铅声光器件, 超声波为沿 [001] 方向的纵波, 波速  $v=3\ 632\ \mu\text{m}/\mu\text{s}$ , 中心频率 110 MHz, 带宽约 40 MHz.  $F$  是光栏, 宽度为  $3\ 632\ \mu\text{m}/\mu\text{s} \times 2\ \mu\text{s}=7.3\ \text{mm}$ .  $L_5$  是富里叶变换透镜, 焦距  $f=250\ \text{mm}$ . PIN 为本征型光电二极管, 型号为 GT-101, 光敏直径  $d=0.5\ \text{mm}$ . 所用激光器为氩氖激光器, 功率 10 mW. 根据文献 [5], 钽酸铅声光器件扫描率为

$$\Delta\theta/\Delta f_0 = \lambda/v = 1.74 \times 10^{-4}\ \text{rad/MHz} \tag{14}$$

因此, 光电二极管可以接收的频率范围为

$$\Delta f = \frac{d/f}{\Delta\theta/\Delta f_0} = 10\ \text{MHz} \tag{15}$$

由声光器件的带宽与光电二极管的频率敏感宽度所决定的光路系统综合带宽小于电路系统. 这说明, 整个窗口函数声光相关器相当于一个窄的带通滤波器, 回波信号中有用的雷达信号可以全部通过, 干扰则被挡掉一部分, 故该相关器起到提高信噪比的作用. 分别测定当  $S/N = \infty\ \text{dB}$  (即关闭干扰机),  $S/N=0\ \text{dB}$  (即干扰信号与雷达信号的电压幅度相等),  $S/N=-8\ \text{dB}$  的相关峰高度, 以及相关峰刚好消失时的信噪比. 当  $S/N=0$  时, 若将回波信号在示波器上显示时, 仍可在噪声背景中辨认出雷达信号的位置. 当  $S/N=-8\ \text{dB}$  时, 雷达信号刚好被噪声淹没, 但相关峰却清晰可见. 相关峰消失时的信噪比就是相关器的相关增益. 实验表明, 雷达信号的矩形脉冲宽度是  $2\ \mu\text{s}$  时, 相关增益可达 15 dB. 图 3 照片是实验结果, 其中 (a) 是雷达信号, (b) 是  $S/N=\infty$ , 即无干扰时的相关峰. (c) 是  $S/N=-8\ \text{dB}$ , 即刚淹没雷达信号时的相关峰. 实验数据在附表中.



附表 实验数据 (雷达信号脉宽为  $2\ \mu\text{s}$ )

信噪比 /dB	$\infty$	0	-8	-15
相关峰高度 /mV	150	80	35	0

### 3 结论

- 1 本装置可以完成实时相送运算.
- 2 对于单载频矩形脉冲雷达信号, 可获一定的相关增益, 有抗干扰能力.
- 3 由于只用一个声光器件, 比起传统的二个器件的相关器长度可缩短一半, 有利于实用化.
- 4 由于用滤波片的窗口函数代替了传统相关器中的参考信号, 使雷达信号的接收检测更加方便.

## 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 俞宽新, 徐介平. 空间积分声光相关器及其在雷达信号处理中的应用. 北京工业大学学报, 1984, 10(3): 89~93
- 3 Rhodes W T. Ao Signal Processing Convolution and Correlation. Proc. IEEE, 1981, 69(1): 15~22
- 4 Xu J P. The Determination of the Complex Transmittance of AO Devices Used in AO Correlators. 北京工业大学学报, 1984, 10(3): 83~88
- 5 徐介平. 声光器件的原理、设计和应用. 北京: 北京科学技术出版社, 1982, 110~112

## Window Function Acousto-optic Correlator and Its Application in Radar Signal Processing

Yu Kuanxin

( Department of Applied Physics )

Li Yingfang

( The Fifth Institute of Chinese Air Force )

**【Abstract】** In this paper a window function acousto-optic correlator which includes one AOD is given. It can complete the correlation between the window function of a filter and the amplitude modulation function of a electric signal. We have done a interference-free experiment for a imitative back wave signal, which is composed of a rect pulsed radar signal with signal carrier-frequency and a radom interference signal without modulation. When the pulse width of the radar signal is  $2\mu\text{s}$ , the correlation gain is 15 dB.

**【Key words】** window function, acousto-optic, correlator, radar signal processing