

⑦ 277-282

# 红外探测系统三重相关峰值检测技术研究

陈汝物

(华中理工大学光电子工程系, 湖北, 武汉, 430074)

TN215

**摘要** 将三重相关峰值检测技术用于对红外探测系统亚像元或点目标图像的信号处理, 研究表明, 该技术在峰值信噪比为 0.8、功率信噪比为 -9.73dB 时可获得的信噪比改善约为 23dB. 提出了一种可供实用的三重相关的二维图形表示法, 该方法在峰值信噪比低至 0.48、功率信噪比低至 -14.2dB 时仍可以从噪声中有效地提取点目标信号的幅度信息.

**关键词** 三重相关, 信号处理, 点目标探测, 红外探测系统.

峰值探测

## 引言

在红外探测系统的信号处理中, 通常可采用匹配滤波技术来获得最大的输出信噪比<sup>[1,2]</sup>, 这是二阶相关意义上的匹配滤波, 得到的最大输出信噪比受限于噪声的功率谱密度<sup>[2,3]</sup>. 对于红外探测系统, 二阶自相关检测是实现匹配滤波的一种常用的方法, 但是, 无论匹配滤波器设计得多么精细<sup>[4]</sup>, 要抑制信号频带内的噪声仍然是无能为力的<sup>[5]</sup>, 因此, 当输入信噪比很小时(例如小于 1), 二阶自相关检测(匹配滤波)的效果是不理想的.

为了提高红外探测系统的性能, 增加系统的作用距离, 在信号处理中突破二阶匹配滤波的“最大输出信噪比”的限制, 是一个需要解决的问题, 特别是如何从低信噪比的图像序列中检测和识别亚像元目标和点目标, 是目前理论和实际应用中的一个关键问题, 也是当前国内外研究的一个热点<sup>[6]</sup>. 利用高阶矩是解决这个问题的一种途径<sup>[7,8]</sup>. 本文以红外搜索系统为例, 研究了三种用三重相关峰值检测从噪声中提取单次目标信息的方法. 经过分析比较, 确定了一种可供实用的方法, 并指出实际应用时应该注意的问题.

## 1 三重相关峰值检测

当搜索视场内存在目标时, 红外搜索系统的前置放大器在探测器的驻留时间内输出一个与该目标对应的随机脉冲信号, 通常为钟型脉冲. 我们以钟型脉冲为例, 研究如何用三重相关从噪声中提取单个脉冲的幅度信息.

通常, 函数  $I(t)$  的三重相关函数定义为<sup>[7]</sup>:

$$I^{(3)}(t_1, t_2) = (1/T) \cdot \int_0^T I(t)I(t+t_1)I(t+t_2)dt. \quad (1)$$

\* 现在通讯地址: 华中理工大学图像技术公司技术部, 湖北, 武汉, 430074

稿件收到日期 1997-11-24, 修改稿收到日期 1998-04-18

三重自相关函数的傅里叶变换称为双谱<sup>[8]</sup>,并记为:

$$I^{(3)}(f_1, f_2) = \iint I^{(3)}(t_1, t_2) \exp[-2\pi i(f_1 t_1 + f_2 t_2)] dt_1 dt_2. \quad (2)$$

我们对信号加噪声三重自相关进行分析. 设噪声独立于信号, 且为加性平稳噪声过程(这对于达到背景噪声限探测的红外探测系统是适合的), 即

$$J(t) = I(t) + N(t). \quad (3)$$

式(3)中,  $I(t)$  为信号,  $N(t)$  为白噪声. 对  $J(t)$  进行三重自相关操作, 并求其平均值可得<sup>[8]</sup>

$$\begin{aligned} \langle J^{(3)}(t_1, t_2) \rangle &= I^{(3)}(t_1, t_2) + \langle N^{(3)}(t_1, t_2) \rangle + \langle N \rangle [I^{(2)}(t_1) + I^{(2)}(t_2) + I^{(2)} \\ &\quad (t_2 - t_1)] + \overline{I(t)} [\langle N^{(2)}(t_1) \rangle + \langle N^{(2)}(t_2) \rangle + \langle N^{(2)}(t_2 - t_1) \rangle], \end{aligned} \quad (4)$$

式(4)中,  $I^{(2)}(\cdot)$  为信号的二阶自相关函数;  $N^{(2)}(\cdot)$  为噪声的二阶自相关函数. 式(4)右边第1项为信号的重三重自相关函数; 第2项为噪声的重三重自相关函数的集平均; 第3项与噪声的均值和信号的自相关函数有关; 第4项与噪声的自相关函数和信号的均值有关.

由于平稳的零均值的高斯随机过程的奇数阶相关函数的集平均等于零, 因此, 若  $N(t)$  为白噪声, 则式(4)右边的第2项和第3项都为零, 而第1项和第4项均包含有信号携带的信息. 这就是三重相关峰值检测的基本依据.

### 1.1 三重自相关集平均法

根据式(4), 三重自相关集平均使白噪声几乎被完全抑制. 在噪声中含有信号的情况下, 式(4)右边的第1项和第4项突出出来, 使有信号时的三重自相关集平均值明显地区别于没有信号时的三重自相关集平均值, 以此可判断信号的存在与否.

在计算机模拟时, 我们取  $t_1 = t_2 = 0$ . 表1给出的是10次模拟实验的统计平均. 其中,  $SM$  为白噪声的方差;  $R_{3N}$  为仅有白噪声时的三重自相关值;  $R_{3SN}$  为白噪声中含有钟型脉冲时的三重自相关值;  $SNRPI$  为输入的功率信噪比, 即钟型脉冲的平均功率与白噪声的方差之比;  $SNRFI$  为输入的峰值信噪比, 即钟型脉冲的峰值除以白噪声的标准差. 表1中的“均值”是对10次实验结果的统计平均, 而“统计方差”和“统计标准差”指的是对10次实验结果的涨落进行的统计分析, 其中“统计标准差”就是“统计方差”的平方根. 当集平均的样本数为10, 白噪声序列的取样点数为128, 钟型脉冲的峰值为1.4, 且钟型脉冲的主脉冲采样点数为16时, 10次模拟实验的统计分析结果如表1.1所示. 由表1.1可见, 白噪声的方差(均值)为2.074279时, 经10次三重自相关运算并求集平均得三重相关值  $R_{3SN}$  (均值)为2.240999. 而无信号时的三重相关值  $R_{3N}$  (均值)为-0.039469. 系统的输入峰值信噪比(均值)为0.972161, 系统的输出三重相关  $R_{3SN}$  的信噪比可视为其均值除以它的统计标准差, 结果为  $2.240999/0.145629 = 15.388412$ . 因此, 系统的信噪比改善为23.989112dB.

对于平稳的各态经历的随机过程, 时间平均等于集平均. 因此, 适当增加三重相关的积分时间, 可以减少集平均的样本数. 例如, 白噪声序列的取样点数增至256, 则只要取3个样本求它们的三重相关集平均值的就基本上为零. 在这种情况下, 在噪声中加入信号, 三重相关的峰值也是很明显的, 计算结果见表1.2. 在表1.2中, 输入的峰值信噪比(均值)为0.837373, 输出的三重相关峰值  $R_{3SN}$  获得的信噪比改善为23.403938(dB).

以上研究表明, 在输入峰值信噪比约为0.84(输入功率信噪比约为-9.73dB)的情况

下,用三重相关集平均算法得到的三重相关峰值可以获得的信噪比改善约为 23dB.

表 1 被白噪声淹没的钟型脉冲信号的三重自相关集平均

Table 1 Triple correlation set average of a bell-shaped pulse signal drowned by white noise

表 1.1

试验参数	$SM$	$R_{3N}$	$SNRPI$	$SNRFI$	$R_{3SN}$
均值	2.074279	-0.039469	0.1408056	0.972161	2.240999
统计方差	0.001145	0.014077	0.000006	0.000063	0.021208
统计标准差	0.033837	0.118647	0.002421	0.007943	0.145629

表 1.2

试验参数	$SM$	$R_{3N}$	$SNRPI$	$SNRFI$	$R_{3SN}$
均值	2.054803	0.004461	0.106293	0.837373	1.776549
统计方差	0.003089	0.004006	0.000009	0.000135	0.020555
统计标准差	0.055581	0.063290	0.002978	0.011626	0.143371

## 1.2 三重相关的似三维图形表示法

由于信号的三重相关峰值在  $t_1=t_2=0$  时取得,而白噪声的三重相关函数值与  $t_1, t_2$  没有这种明确的关系,因此信号加噪声的三重相关通常亦在  $t_1=t_2=0$  时取得峰值.将信号加噪声的  $J(t)$  一次采样得到的时间序列按式(1)进行三重相关运算,得到  $J^{(3)}(t_1, t_2)$ ,以  $t_1$  和  $t_2$  为坐标轴作出  $J^{(3)}(t_1, t_2)$  的似三维图形,可以明显地观察到存在信号时的三重相关峰值(见图 1).在图 1(a)中,信号加噪声的序列的采样点数为 64;信号为单个钟型脉冲,主脉冲的采样点数为 16;输入峰值信噪比  $SNRFI$  为 0.8702313;输入功率信噪比  $SNRPI$  为 -9.257607dB.作为比较,图 1(b)是只有噪声没有信号时的三重相关似三维图形,此时,三重相关峰值是不存在的.图 1(c)是输入峰值信噪比较大( $SNRFI$  为 1.450385)时的三重相关似三维图形,可以看出,此时三重相关的峰值更高一些.

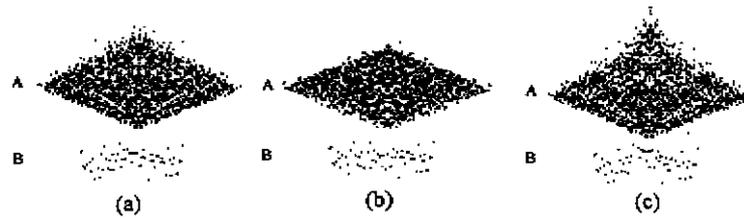


图 1 三重相关的似三维图形

Fig. 1 Pseudo-3D graphics of triple correlation

在图 1(a)~(c)中,A 的平面坐标为  $t_1$  和  $t_2$ ,垂直方向的坐标为  $J^{(3)}(t_1, t_2)$  的数值;B 的横坐标为时间  $t$ ,纵坐标为  $J(t) = s(t) + N(t)$  的数值,其中  $N(t)$  为零均值的白噪声.

### 1.3 三重相关的二维图形表示法

从三重相关函数定义式(1)可以看出,  $I^{(3)}(t_1, t_2) = I^{(3)}(t_2, t_1)$ . 因此, 在  $I^{(3)}(t_1, t_2)$  中含有大量的信息冗余<sup>[8]</sup>. 另一方面, 信号的三重相关峰值只在  $t_1 = t_2 = 0$  时出现. 这样, 对于信号加噪声的  $J(t)$  函数, 只要作出  $J(t)(0, t_2)$  或  $J^{(3)}(t_1, 0)$  的图形, 就可以观察到信号的三重相关峰值. 图 2 给出了这样的例子, 其中序列采样点数为 128, 主脉冲采样点数为 32. 图 2(a) 是输入峰值信噪比为 0.796072、输入功率信噪比为 -10.03125dB 时的情况, 其中 B 是信号加噪声的采样序列, A 是对 B 进行三重相关操作后得到的二维图形, 图中  $t_1 = 0$  (或  $t_2 = 0$ ) 时的三重相关峰值是非常明显的. 图 2(b) 是输入峰值信噪比更小时的情况, 此时的输入峰值信噪比只有 0.4898905, 输入功率信噪比只有 -14.24832dB, 但三重相关峰值仍然清晰可见. 作为比较, 图 2(c) 给出了没有信号只有噪声时的三重相关的二维图形, 在这种情况下,  $t_1 = 0$  (或  $t_2 = 0$ ) 时的三重相关的峰值是不存在的.

在图 2(a)~(c) 中, A 的横坐标为  $t_1$  (或  $t_2$ ), 纵坐标为  $J^{(3)}(t_1, 0)$  (或  $J^{(3)}(0, t_2)$ ) 的数值; B 的横坐标为时间  $t$ , 纵坐标为  $J(t) = S(t) + N(t)$  的数值, 其中  $N(t)$  为零均值的白噪声.

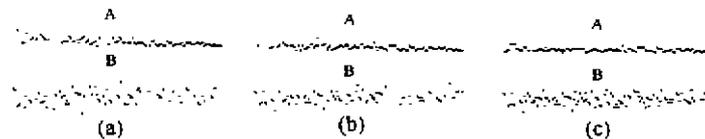


图 2 三重相关的二维图形  
Fig. 2 2D graphics of triple correlation

## 2 分析与讨论

上述三种实现三重相关峰值检测的方法, 第一种“三重相关集平均法”需要采集多个信号加噪声的时间序列, 这对于实际应用中用计算机进行处理不大方便, 但它可能适于用模拟电路直接求取三重相关的时间平均(等效于集平均)值. 在第二种“三重相关似三维图形表示法”的实际操作中, 可以只取一次信号加噪声时间序列的采样来实现, 三重相关的峰值是明显的. 第三种“三重相关的二维图形表示法”是“三重相关的似三维图形表示法”的简化, 可节省计算机的运算量, 提高运算速度, 是一种便于快速实时处理实现三重相关峰值检测的方法.

图 2(b) 表明, 当输入峰值信噪比小至 0.4898905 (此时的输入功率信噪比小至 -14.24832dB) 时, 用三重相关峰值检测的方法仍可以从噪声中检测到单个目标信号脉冲的幅度信息. 这对于提高红外探测系统探测远距离目标的性能, 增大系统的作用距离有着重要的实际意义.

必须指出, 以三重相关函数的定义式(1)为基础的三重相关峰值检测, 实际上是对信号进行“三乘积积分”. 这就要求待检测的单个脉冲的采样点数应足够地多. 例如图 2(b) 中单个钟型脉冲的主脉冲采样点数为 32. 因此, 采用三重相关峰值检测方法的信号处理系统应具有足够高的采样速率. 例如, 对于一个驻留时间约为  $19\mu\text{s}$  的红外搜索系统<sup>[9]</sup>, 当信号处理

的采样频率约为 1.7MHz 时,对单个信号脉冲的采样点数可达 32 个.以目前现有的技术,要达到这样高的采样频率是不难实现的<sup>[10]</sup>.当然,只要增加信号脉冲的采样点数,三重相关峰值检测可以获得进一步提高的信噪比.另外,当处理对象不是钟型脉冲而是其它形状的脉冲时,这种三重相关峰值检测的方法仍然是适用的.

实际上,三重相关的“三乘积积分”本质上仍是有用信号的积累.如果用模拟电路来完成“三乘积积分”,就不需要对信号进行采样.当红外探测器输出的目标信号无法被采样时(例如系统采用多元凝视探测器阵列),直接用模拟电路来实现三重相关峰值检测就是一种可能的解决方案.

对于有色非高斯噪声,其三重相关的集平均值通常不等于零,但有信号与没有信号时的三重相关值仍是不相同的.此时,可以采用类似光子计数技术的“恒定背景扣除测量法”<sup>[11]</sup>,设法从有信号时的三重相关峰值中扣除噪声的三重相关值;而对于非平稳的噪声过程,如有可能,亦可采用类似的“适时背景扣除法”<sup>[11]</sup>予以消除.我们正在研究三重相关峰值检测技术用于有色非高斯噪声过程的其他的方法.

本文研究了用三重相关峰值检测的方法从噪声中探测信号幅度的信息,用以判断目标信号的存在与否.关于用三重相关的方法从噪声中恢复信号波形的研究,将另文讨论.

**致谢** 本文作图使用的绘图软件得益于骆清铭教授的帮助,特此致谢.

#### REFERENCES

- 1 TIE Niu. *Infrared Technology*(铁牛. 红外技术), 1989, 11(3): 22~26
- 2 CHEN Ru-Jun. *Infrared Technology*(陈汝钧. 红外技术), 1992, 14(3): 8~12
- 3 Stein S, Jones J J. *Modern Communication Principles: With Application to Digital Signaling*, London: McGraw Hill, 1967, 285~295(陆建勋等译. 现代通信原理及其在数字信号传输中的应用, 北京: 科学出版社)
- 4 CHEN R J, et al. *Infrared Phys. Technol.* 1995, 36(3): 715~721
- 5 LIU Jia-Xiang, ZHANG Jin-Long. *Signal Processing*, Beijing: National Defence Industry Press(刘家祥、张晋龙. 信号处理, 北京: 国防工业出版社), 1989, p131
- 6 LI Jin-Zong, LI Ning-Ning. *Acta Electronica Sinica*(李金宗, 李宁宁. 电子学报), 1997, 25(1): 77~79
- 7 Lohmann A W, Weigelt G, Wirnitzer B. *Applied Optics*, 1983, 22(24): 4028~4037
- 8 Lohmann A W, Wirnitzer B. *IEEE*, 1984, 72(7): 889~901
- 9 CHEN Bo-Ruo. *Infrared Systems*, Beijing: National Defence Industry Press(陈波若. 红外系统, 北京: 国防工业出版社), 1988, p311
- 10 LIN Mao-Liu. *Guide of Electronic Sci. & Tech.*(林茂六. 电子科技导报), 1997, 9: 24~28
- 11 YE Jia-Xiong, et al. *Optoelectronic Systems and Signal Processing*, Beijing: Science Press(叶嘉雄等. 光电系统与信号处理, 北京: 科学出版社), 1997, pp334~335

## TRIPLE CORRELATION PEAK INSPECTING TECHNIQUE IN IR DETECTION SYSTEMS

CHEN Ru-Jun

(Department of Optoelectronic Engineering, Huazhong University of Science  
and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

**Abstract** Triple correlation peak inspecting technique (TCPIT) was adopted for the signal processing of IR systems in detecting sub-pixels or point targets. Investigations show that the signal-to-noise ratio (SNR) can be improved by about 23dB with the input peak SNR of 0.84 and the input power SNR of  $-9.73\text{dB}$ . The 2-D graphics method for implementation of TCPIT was recommended. Using this approach, the amplitude information of point targets can be still effectively extracted from noises with the input peak SNR lowered to 0.48 and the input power SNR lowered to  $-14.24\text{dB}$ .

**Key words** triple correlation, signal processing, detection of point targets, IR detecting systems.