

红外系统中积累检测技术的 理论推算与实施

门 雷

(天津光电技术研究所)

摘要——本文从理论推算和具体实施两个方面讨论了积累检测技术, 给出了用非线性规划的方法计算积累检测各参数的框图。

一、引 言

积累检测技术是运用信息论的原理, 通过小量值的信息进行积累, 满足大信息量的需求。将这种技术应用于红外系统中能够大大地降低捕获要求的信噪比^[1,2,7], 从而提高系统的作用距离。

目前, 积累检测技术正在得到广泛应用, 但由于获取积累检测参数的计算量极大, 设计中靠试探选取有关参数, 带有很大的盲目性。本文试图给出依靠精确的计算选取积累检测各参数的算法, 为系统设计提供一个较为可靠的依据。

另一方面, 能否在系统中实施积累检测技术也是需要研究的实际问题。将积累检测技术应用于旋转调制盘情况比较简单; 对于圆锥扫描调制方式, 由于有信号频谱分散、脉冲间隔及宽度变化无规律等问题, 实施就比较困难。本文试图从解决这个问题入手, 探讨积累检测技术的实施。

二、基 本 原 理

文献[1, 3]详细地叙述了积累检测技术的原理, 是本文提出的算法的依据。

零均值的高斯白噪声

$$p_n = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{V^2}{2}\right), \quad (1)$$

通过窄带滤波器后将变为瑞利分布

$$p'_n = V \exp\left(-\frac{V^2}{2}\right); \quad (2)$$

于是,对于给定的捕获门限 V_0 , 系统单次检测时的虚警概率为

$$P_{fa} = \int_{V_0}^{\infty} p'_n dV = \exp\left(-\frac{V_0^2}{2}\right); \quad (3)$$

设信号的幅度为 A ; 信号加噪声的幅度为 R ; 则, 信号加噪声通过窄带滤波器后, 输出的包络的概率密度为

$$p(r, a) = r \exp\left(-\frac{r^2 + a^2}{2}\right) I_0(ra), \quad (r > 0); \quad (4)$$

其中, $r = R/\sigma$ 为信号加噪声幅度的相对值; $a = A/\sigma$ 为信号幅度的相对值; σ 为噪声的均方根值; $I_0(ra)$ 为以 ra 为宗量的虚幅角零阶贝塞尔函数。

于是, 单次检测的探测概率为

$$P_d = \int_{V_0}^{\infty} p(r, a) dr \\ = \exp\left(-\frac{V_0^2 + a^2}{2}\right) \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{V_0}{a}\right)^n I_n(V_0 a); \quad (5)$$

其中, $I_n(ra)$ 为以 ra 为宗量的虚幅角的 n 阶贝塞尔函数。

设系统在 t_s 时间间隔内最多能产生 m 个脉冲, 如果探测到 n ($n \leq m$) 个, 便认为已发现了目标。这样的系统暂称为 $\binom{m}{n}$ 积累器, 在某种意义上, 可以说 $\binom{m}{n}$ 积累器是一种概率变换器。为表述方便, 引入“积累算子” \hat{I} , 并满足:

$$X = \hat{I}x = \sum_{i=n}^m C_m^i x^i (1-x)^{m-i}; \quad (6)$$

其中, X 为经积累变换后的概率; x 为经积累变换前的概率; 用 $\binom{m}{n}$ 积累器在单次检测的基础上进行积累变换, 便完成了积累检测。

三、算法分析

设计积累检测器的主要工作是选取两个门限, 即单次检测门限 V_0 和积累检测门限 n (第二门限)。通过 V_0 和 n 的恰当选取, 达到准最佳检测的目的。选取 V_0 和 n 的依据是式 (3) 和式 (6)。虚警概率为

$$P_{FA} = \hat{I}P_{fa} = \sum_{i=n}^m C_m^i P_{fa}^i (1-P_{fa})^{m-i}; \quad (7)$$

探测概率为

$$P_D = \hat{I}P_d = \sum_{i=n}^m C_m^i P_d^i (1-P_d)^{m-i}; \quad (8)$$

系统设计中经常遇到的问题是计算逆积累变换, 即根据给出的系统的性能指标 P_{FA} 和 P_D , 计算 P_{fa} 和 P_d 用以确定 V_0 和 n , 写成数学表达式就是进行如下计算:

$$P_o = \hat{I}^{-1}P_A; \quad (9)$$

这里假设 \hat{I} 有逆算子, 事实上, 这个假设在实际中总是成立的。

针对虚警概率和探测概率的特点, 在算法上应采用不同的方法。

1. 虚警概率

虽然变换前的虚警概率 P_{fa} 是未知的, 但是根据总体指标给出的虚警概率 P_{FA} , 可以估

计算出 P_{f_0} 的数量级,从而简化计算,节省机时。由于 P_{FA} 一般很小,以致于使

$$P_{f_0} \ll 1 \quad (10)$$

总能成立,于是式(7)可以简化为

$$P_{FA} = \sum_{i=1}^m C_m^i P_{f_0}^i (1 - P_{f_0})^{m-i} \approx \sum_{i=1}^m C_m^i P_{f_0}^i \approx C_m^n P_{f_0}^n$$

故有,

$$P_{f_0} = \hat{I}^{-1} P_{FA} \approx (P_{FA} / C_m^n)^{1/n} \quad (11)$$

2. 探测概率

由于 P_D 通常接近于 1, 故不再有类似式(10)的不等式成立, 因此必须用较为复杂的方法才能达到欲求的精度。

文献[3]给出了用式(8)计算 P_d 的流程图, 必须注意的是, 应该在试探 P_d 值的过程中采用变步长的方法; 否则, 用等步长方法, 不仅运算速度极低, 而且在 m 值较大时, 还会在计算的后期产生大于 1 的 P_D 值, 以致不能进行实际计算。

采用变步长的积累检测算法包括主程序、子程序 1 和子程序 2 三个部分。

主程序。根据 P_D 及精度 E , 计算出 P_d , 其框图见图 1。

将 I 值做为第二门限; 即若最多出现 M 个脉冲, 探测到 I 个就认为有目标存在; 将 I 从 1 到 M 循环, 便完成了 $\binom{M}{1} \dots \binom{M}{M}$ 积累器的模拟。

该程序的停止是由人工操作, 这样做便于对任意大的 M 值进行逆积累变换。

子程序 1。用非线性规划中的 0.618 法^[4] 计算不同 n 值下的 P_d , 其框图见图 2。

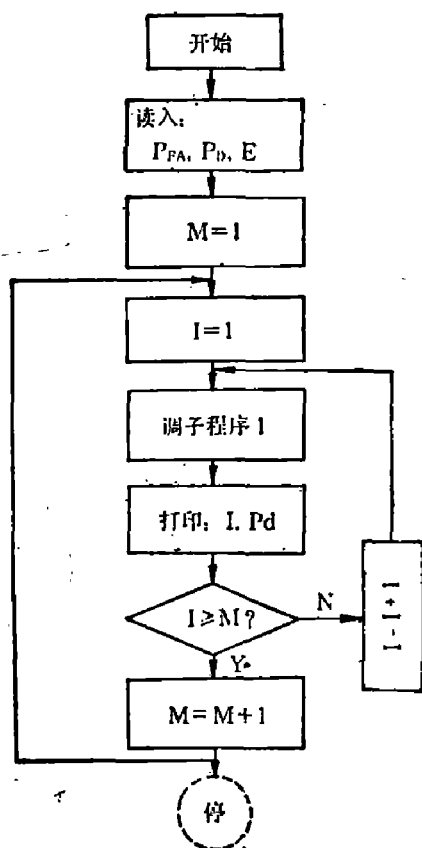


图 1 主程序框图

Fig. 1 Main program

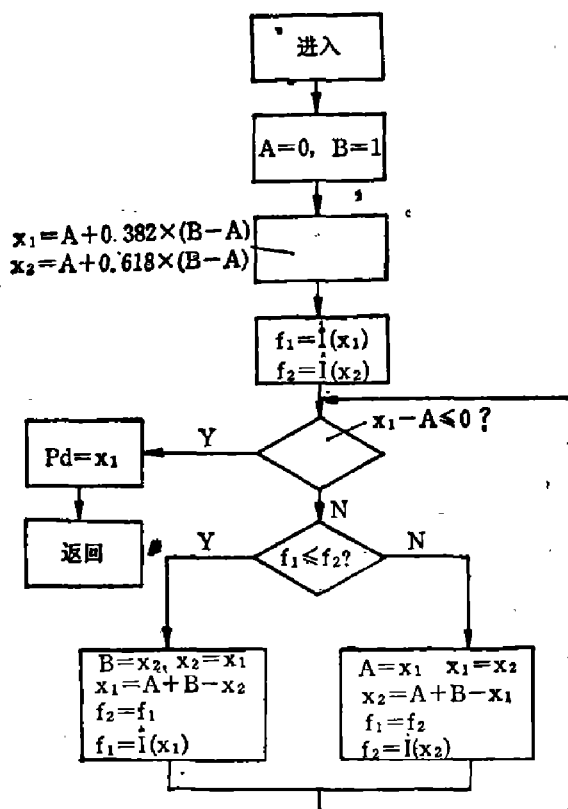


图 2 子程序 1 框图

Fig. 2 Subprogram 1.

使用该方法之前,须将我们的问题做一些必要的变换。

0.618 法是求某个函数的极小值,即做无约束的非线性规划

$$\min_{x \in R} f(x); \quad (12)$$

其中, $f(x)$ 为目标函数, 即欲求极值的函数; R 为 x 的取值范围。

我们的问题是求一个 P_d , 使得 $\hat{I}P_d$ 尽可能地接近 P_D (满足精度 E)。无疑 P_d 的取值应该是

$$0 \leq P_d \leq 1; \quad (13)$$

这样, 我们的问题可以表述为

$$\min_{P_d \in [0,1]} \left| P_D - \sum_{i=1}^m O_m^i P_d^i (1-P_d)^{m-i} \right|. \quad (14)$$

与式(12)不同的是, 我们已经知道式(14)的极小值是 E (精度) 了, 这样将给编程带来一些方便。

子程序 2。计算试探值 P_d 的积累变换 $\hat{I}P_d$, 其框图见图 3。

对 K 从 I 到 M 循环, 完成对 I 到 M 的求和。

对 J 从 1 到 K 循环, 完成对组合系数 O_m^K 的计算。

上述框图是一个较为全面地求解积累检测问题的

算法, 打印出的计算结果可以对各种参数有一个通观的了解, 因此该算法有一定的实用价值。

四、对运行结果的分析

对 $P_D = 90\%$ 和 $P_{FA} = 4 \times 10^{-8}$ 的系统参数运行程序, 给出了 P_d 、 P_{fo} 和门限值 V_0 。文献[3, 5, 6]根据式(5)做出的曲线得到了不同 m , n 值对应的信噪比 α (见图 4)。

分析这些曲线, 初步得到以下结论:

1. 随着 m 的增加, 最佳第二门限值 n 所对应的信噪比单调减小, 即总有:

$$\min a_{m+1} \leq \min a_m; \quad (15)$$

式中, a_l 为经 l 选 k ($k \leq l$) 积累器, 系统能检测到目标的工作信噪比。这恰恰是积累检测的必然结果。事实上, 积累检测就是通过延长判决时间, 对小量值的信息进行积累; 积累的时间愈长, 积累得出的总信息量就愈大, 从而起到降低最小工作信噪比的目的。

2. 文献[1]曾提到, 对于相同的 m , 最佳第二门限值 n 的范围是很宽的, 从

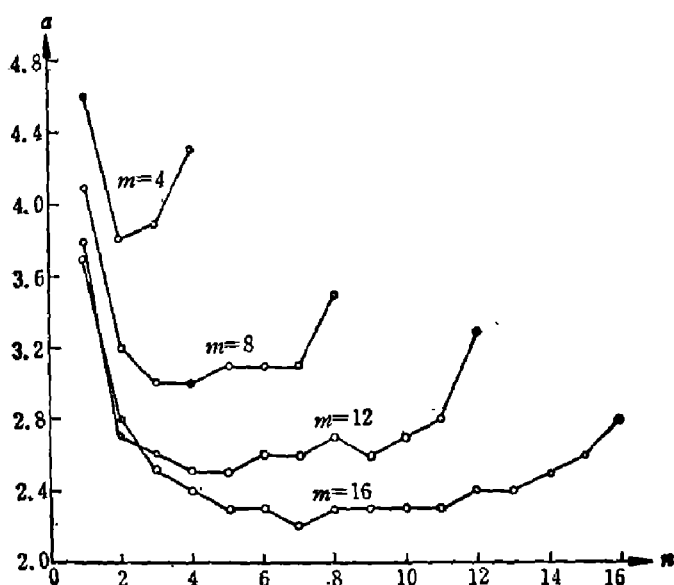


图 4 信噪比 α 与第二门限 n 的关系
Fig. 4 Signal-to-noise ratio α vs the second threshold n .

图 4 看出, 每条等 m 线都是“船”形的, 它们的底部都是很平坦的, 说明 n 可以在一个区间范围内取值, 这个性质给系统设计带来许多方便, 在本文实施部分将利用这一特性。

3. 等 m 线的“船”形还告诉我们, 第二门限值 n 既不可太接近 1, 也不可太接近 m , 前者将带来过大的虚警, 后者会极大地降低探测概率。

通过上述分析, 我们看到了判决时间同积累效果之间的矛盾。一个捕获系统对短的捕获时间和低的捕获信噪比两个特性不可兼得, 低的捕获信噪比是通过延长捕获时间得到的。

五、计数型积累检测技术的实施

1. 类型的选取

文献 [3] 已经指出, 积累检测有模拟积分型和计数型两种: 考虑到目前数字逻辑元件的广泛使用及有利于今后同计算机的连接, 选择了计数型; 更重要的是选取计数型可以解决圆锥扫描系统脉冲数目不确定、脉冲宽度及间隔无规律的问题。计数型积累检测的原理框图如图 5 所示。

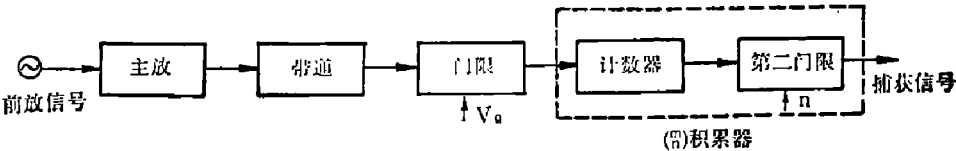


图 5 计数型积累检测原理框图

Fig. 5 Principle of counting-type accumulating detection.

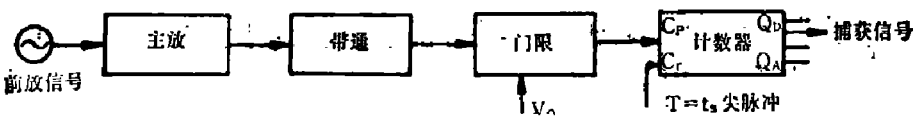


图 6 8 选 4 计数型积累检测实施框图

Fig. 6 Practice of 4-from-8 counting-type accumulating detection.

2. 第二门限值 n 的选取

由于在 m 值相同的情况下, 对应于最小工作信噪比的第二门限值 n 有较大的选择裕度, 这就使减少元件的数量成为可能, 甚至可设置隐形的第二门限, 即仅用一只计数器来完成一个积累器的全部功能。

图 6 给出了 8 选 4 计数型积累检测实施框图。

3. 实测结果及分析

按照图 6 的框图装调捕获电路, 并对它进行了测试。

采用 16 选 8 积累检测, 分别用信号发生器和实际系统对其满足系统性能指标的工作信噪比进行测试, 发现两者的结果是一致的。

该捕获电路的性能指标为: 在探测概率为 90%, 虚警概率为 4×10^{-6} (对应系统的虚警时间为 20 分钟) 时, 最低均方根值工作信噪比为 2.3。这个结果和理论计算值有一定的差距 (计算值相当于均方根工作信噪比为 1.6)。即使如此, 这时系统的工作信噪比只有使用单次检测时的几分之一。分析实际性能与理论计算的差异, 我们认为, 根本原因是我们在计算中忽略了噪声的相关性。文献 [8] 中讨论了这个问题。

六、结 语

在红外系统中使用积累检测技术,必将提高系统的性能。由于红外系统一般是被动系统,目标特性比较稳定,因而,积累检测技术应用于红外系统中几乎没有什么特殊的困难。

本文提出的算法带有通用性,但需人工查曲线以得到信噪比。

致谢——本文是在杨宜禾同志的支持下写出的,工作中得到李恒高,金侗乐等同志的指导,李金铎同志在算法上提出了有益的建议,在此一并致谢。

参 考 文 献

- [1] 杨宜禾、岳敏,红外应用文选,兵工部科学研究院,1979, 281~289.
- [2] 胡功衍、施文先,红外应用文选,兵工部科学研究院,1979, 66~76.
- [3] 杨宜禾、岳敏,红外系统(上册),西北电讯工程学院,1984, 3-33~3-36.
- [4] 南京大学数学系,最优化方法,科学出版社,1978, 57~62.
- [5] 杨宜禾,激光与红外, (1980)3: 61~64.
- [9] 刘贤德,红外系统设计,华中工学院出版社, (1985), 64~67.
- [6] 史斯伍锁,电光学手册,国防工业出版社, 1978, 89.
- [7] 符文龙,红外应用文选,兵工部科学研究院,1979, 77~92.
- [8] 陈光余,天津电子学会年会资料 1980.

ACCUMULATING DETECTION TECHNIQUE IN INFRARED SYSTEM—CALCULATION AND PRACTICE

MEN LIEI

(*Tianjin Institute of Electro-Optics Technique*)

ABSTRACT

Accumulating detection technique is discussed in aspects of both theory and practice. Block diagrams showing the calculation of the parameters of accumulating detection by using nonlinear programming method are given.