

信号处理对红外搜索系统作用距离的影响

陈汝钧 刘贤德 石定河 何兆湘

(华中理工大学光电子系, 湖北, 武汉, 430074)

摘要: 将红外搜索系统的信号处理单元视为脉冲接收系统, 在考虑其带宽对输出信噪比的影响下, 推导了红外搜索系统的作用距离方程. 根据脉冲接收系统输出最大信噪比的条件, 确定了红外搜索系统信号处理单元的频带宽度与探测器驻留时间的关系, 并得到了相应的作用距离方程, 为红外搜索系统的设计和系统性能的评估提供了依据.

关键词: 信号处理, 红外搜索系统, 作用距离方程.

引言

文献 [1] 考虑了信号处理单元的频率函数对红外探测器输出信号的影响, 得到了红外探测系统在探测器噪声限下的作用距离方程为

$$R = \frac{1}{\sqrt[3]{2\pi}} (J_{\lambda_1 \sim \lambda_2} \bar{\tau}_a)^{\frac{1}{2}} \cdot (A_0 \tau_0)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{D_\lambda^*}{\sqrt{A_d}} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{V_s}{V_n} \right)^{-\frac{1}{2}} \frac{\left| \int_{-\infty}^{+\infty} F(\omega) H(\omega) \exp(j\omega t_d) d\omega \right|^{\frac{1}{2}}}{\left(\int_{-\infty}^{+\infty} |H(\omega)|^2 d\omega \right)^{\frac{1}{4}}}, \quad (1)$$

当信号处理单元采用匹配滤波技术时, 式 (1) 变为

$$R = (2\pi)^{-\frac{1}{4}} \cdot (J_{\lambda_1 \sim \lambda_2} \bar{\tau}_a)^{\frac{1}{2}} \cdot (A_0 \tau_0)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{D_\lambda^*}{\sqrt{A_d}} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{V_s}{V_n} \right)_m^{-\frac{1}{2}} \cdot \left(\int_{-\infty}^{+\infty} |F(\omega)|^2 d\omega \right)^{\frac{1}{4}}, \quad (2)$$

式 (2) 中, $F(\omega)$ 为调制系统的频率特性. 显然, 采用匹配滤波时, 红外探测系统的作用距离与信号处理单元的噪声等效带宽 Δf 没有直接关系. 在实际应用中, 可以根据式 (1) 或式 (2) 来评价红外探测系统的综合性能.

虽然式 (1) 和式 (2) 是红外探测系统作用距离的通用表达式, 但对于不同类型的红外

系统, 要针对各种系统的特点, 研究相应的具体的作用距离方程. 本文考虑红外搜索系统的特点, 分析对搜索系统信号处理单元的特殊要求, 得到适用于红外搜索系统的作用距离方程.

1 红外搜索系统作用距离方程

在一般情况下, 搜索系统是使用单元探测器或多元列阵探测器通过光机扫描的方法来扫描搜索视场^[2-5]. 当系统的瞬时视场扫过目标时, 目标的红外辐射经过光学系统将产生一个辐射脉冲, 它通过探测器和信号处理后就得到一个电脉冲信号. 因此, 搜索系统属于脉冲接收系统. 对此信号的保真度通常并不是最重要的, 因为畸变了脉冲信号也仍然能够反映出某个被探测的物理现象或信息的出现^[6].

脉冲接收系统的信号处理单元通常等效为一个频带为 $0 \sim \omega_h$ 的低通滤波器^[6]. 我们用图 1 表示红外搜索系统在探测器噪声限下的信号处理单元. 为讨论简便起见, 认为在 $0 \sim \omega_h$ 频带内信号处理单元的电压增益 A_v 为实常数. 图 1 中, Z_p 为探测器阻抗; E_{nd} 为探测器输出的噪声; $v_d(t)$ 为探测器输出的信号, $v_{so}(t)$ 和 E_{no} 分别为经过信号处理单元后输出的信号和噪声.

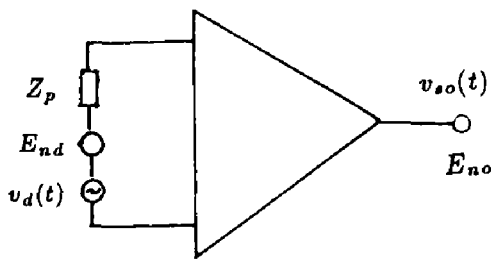


图 1 信号处理单元示意图

Fig. 1 Scheme of the signal processing unit

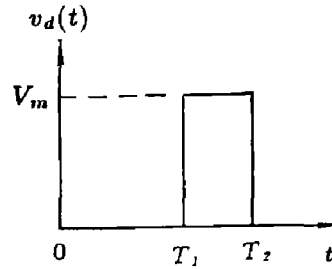


图 2 探测器输出信号

Fig. 2 Output signal from the detector

假设探测器输出的脉冲信号 $v_d(t)$ 如图 2 所示, 即

$$v_d(t) = \begin{cases} V_m, & T_1 \leq t \leq T_2 \\ 0; & T_1 > t > T_2 \end{cases} \quad (3)$$

式 (3) 中 $T_2 - T_1 = \tau_d$ 为探测器的驻留时间. 设探测器输出的噪声为白噪声, 其功率谱密度为 $N_0/2$, 则可以求得探测器输出信号脉冲的幅度 V_m 为

$$V_m = \frac{J_{\lambda_1 \sim \lambda_2} \bar{\tau}_a A_0 \tau_0 D_\lambda^* N_0^{\frac{1}{2}}}{\sqrt{2} A_d^{\frac{1}{2}} R^2}, \quad (4)$$

式 (4) 中, $J_{\lambda_1 \sim \lambda_2}$ 为被探测目标在系统工作波长范围 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 区间的辐射强度; $\bar{\tau}_a$ 为大气在 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 之间的平均透射比; A_0 为光学系统的有效入射孔径面积; τ_0 为光学系统的

透射比; D_{λ}^* 为探测器在工作波长范围内的平均比探测度; A_d 为探测器的响应元面积; R 为系统的作用距离.

由傅里叶分析可知, 探测器输出脉冲信号 $v_d(t)$ 的频谱为

$$V_d(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} v_d(t)e^{-j\omega t} dt = \frac{e^{-j\omega T_1} - e^{-j\omega T_2}}{j\omega} \cdot V_m; \quad (5)$$

因此, 信号处理单元输出信号 $v_{so}(t)$ 的频谱为

$$V_{so}(\omega) = A_v \cdot V_d(\omega); \quad (6)$$

因而输出信号 $v_{so}(t)$ 为

$$\begin{aligned} v_{so}(t) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} V_{so}(\omega)e^{j\omega t} d\omega \\ &= \frac{A_v V_m}{2\pi j} \int_{-\omega_h}^{\omega_h} \frac{1}{\omega} (e^{j\omega T_1} - e^{-j\omega T_2}) \cdot e^{j\omega t} d\omega \\ &= \frac{A_v V_m}{2\pi} \cdot \{\text{Si}[\omega_h(t - T_1)] - \text{Si}[\omega_h(t - T_2)]\}; \end{aligned} \quad (7)$$

式 (7) 中 $\text{Si}[\omega_h(t - T_1)] = \int_0^{\omega_h(t - T_1)} \frac{\sin x}{x} dx$, 和 $\text{Si}[\omega_h(t - T_2)] = \int_0^{\omega_h(t - T_2)} \frac{\sin x}{x} dx$ 为正弦积分函数.

令 $\omega_h \cdot (T_2 - T_1) = \omega_h \cdot \tau_d = 2n\pi (0 < n < \infty)$, 可以得到输出脉冲的幅度为^[6]

$$V_{so.m} = \frac{A_v V_m}{\pi} \cdot \text{Si}(n\pi). \quad (8)$$

另外, 由信号处理单元输出的噪声 E_{no} 为

$$E_{no}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\omega_h} A_v^2 \cdot \frac{N_0}{2} \cdot d\omega = \frac{N_0}{4\pi} \cdot A_v^2 \cdot \omega_h, \quad (9)$$

利用式 (8) 和式 (9) 可得到信号处理单元输出功率信噪比为

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{p.o} = \frac{V_{so.m}^2}{E_{no}^2} = \frac{4V_m^2 \text{Si}^2(n\pi)}{\pi N_0 \omega_h}, \quad (10)$$

进而得到电压信噪比为

$$\frac{V_s}{V_n} = \left(\frac{S}{N}\right)_{p.o}^{\frac{1}{2}} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \text{Si}(n\pi) \cdot J_{\lambda_1 \sim \lambda_2} \cdot \bar{\tau}_a \cdot A_0 \cdot \tau_0 \cdot D_{\lambda}^* \cdot A_d^{-\frac{1}{2}} \cdot R^{-2} \cdot \omega_h^{-\frac{1}{2}}; \quad (11)$$

根据式 (11) 可得到红外搜索系统的作用距离方程为

$$R = \sqrt[4]{\frac{2}{\pi}} \cdot \sqrt{\text{Si}(n\pi)} \cdot (J_{\lambda_1 \sim \lambda_2} \cdot \bar{\tau}_a)^{\frac{1}{2}} \cdot (A_0 \tau_0)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{D_\lambda^*}{\sqrt{A_d}}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{V_s}{V_n}\right)^{-\frac{1}{2}} \cdot \omega_h^{-\frac{1}{4}}, \quad (12)$$

当系统采用光学调制进行空间滤波和获取目标的方位信息时, 目标信号的频谱将在频域内平移到载波频率的两边, 需采用带通滤波器取出信号. 这时, 上述分析及结论仍然适用. 则 ω_h 为带通滤波器的带宽.

2 最大信噪比条件和相应作用距离方程

通常, 当信号处理单元采用匹配滤波器时, 可得到最大的输出信噪比. 在脉冲接收系统中, 因为不追求信号的保真度, 可以从式 (10) 出发求得最大输出信噪比的条件. 由式 (10) 可见:

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{p.o} \propto \frac{\text{Si}^2(n\pi)}{\omega_h} \propto \frac{\text{Si}^2(n\pi)}{n}, \quad (13)$$

式 (13) 具有极大值的条件为

$$\frac{d}{dn} \left(\frac{S}{N}\right)_{p.o} = 0, \quad (14)$$

将正弦积分函数用幂级数展开, 求解式 (14) 可得:

$$2 \sin n\pi = \text{Si}(n\pi), \quad (15)$$

用作图法求得满足式 (15) 的条件, 使 $\left(\frac{S}{N}\right)_{p.o}$ 为极大值的 $n \approx 0.68^{[6]}$, 则

$$f_h \cdot \tau_d \approx 0.68, \quad (16)$$

其中 $f_h = \omega_h/2\pi$, $f_h \cdot \tau_d$ 可称为搜索系统信号处理单元的带宽脉宽积. 这个关系式指出, 为了从信号处理单元获得最大的输出信噪比, 信号处理单元的带宽 f_h 与探测器得到的信号脉冲宽度 τ_d 的乘积应近似等于 0.68.

查表可得, 当 $n \approx 0.68$ 时, $\text{Si}(n\pi) \approx 1.65$, 则

$$\sqrt[4]{\frac{2}{\pi}} \cdot \sqrt{\text{Si}(n\pi)} \approx 1.15$$

这样, 当搜索系统信号处理单元的带宽满足最大信噪比条件式 (16) 时, 系统的作用距离方程应为

$$R = 0.8 (J_{\lambda_1 \sim \lambda_2} \bar{\tau}_a)^{\frac{1}{2}} \cdot (A_0 \tau_0)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{D_\lambda^*}{\sqrt{A_d}}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{V_s}{V_n}\right)_m^{-\frac{1}{2}} \cdot \tau_d^{\frac{1}{4}}; \quad (17)$$

式 (17) 中 $\left(\frac{V_s}{V_n}\right)_m$ 是在式 (16) 条件下系统输出的最大信噪电压比.

3 结语

考虑信号处理单元的带宽对脉冲信号幅度的影响, 同时假设探测器输出噪声为白噪声而推得的式 (12) 是工作于探测器噪声限的红外搜索系统作用距离方程的通用表达式. 其中 $\sqrt{\text{Si}(n\pi)} \cdot \omega_h^{\frac{1}{4}}$ 表明了信号处理单元的特性对系统性能的影响. 我们注意到式中不含有传统的红外搜索系统作用距离方程中的信号过程因子 $\delta^{[2-4]}$. 为了使系统输出最大信噪比, 在系统设计时应使信号处理单元的频带宽度 f_h 与待处理的脉冲信号宽度 τ_d 满足式 (16) 所提出的带宽脉宽积的要求, 这是设计信号处理单元的重要依据.

当信号处理单元的带宽脉宽积等于 0.68 时, 搜索系统的作用距离方程如式 (17) 所示, 这是设计红外搜索系统所追求的性能指标. 式 (17) 指出, 搜索系统的作用距离与探测器的驻留时间 τ_d 有关. τ_d 越大, 作用距离 R 也越大. 当然, τ_d 的大小又直接关系到系统的搜索速度 (扫描速度). 因此, 在满足系统扫描速度的要求下, 应尽可能地增大探测器的驻留时间. 在实际应用中, 可以将式 (12)、(16) 和 (17) 作为红外搜索系统设计和性能综合评价的依据.

参考文献

- 1 陈汝钧, 刘贤德. 红外技术, 1992;14(3):8~12
- 2 陈玻若. 红外系统, 北京: 国防工业出版社, 1988, p.292
- 3 Richatd D Hudson, Jr. *Infrared System Engineering*, Wiley: 1969
- 4 刘贤德. 红外系统设计基础, 武汉: 华中工学院出版社, 1985, p.114~116
- 5 杨宜禾, 岳敏. 红外系统, 北京: 国防工业出版社, 1985, p.172~176
- 6 方志豪. 晶体管低噪声电路, 北京: 科学出版社, 1984, p.228~231

THE EFFECT OF SIGNAL PROCESSING ON DETECTION DISTANCE OF IR SEARCHING SYSTEM

CHEN RUJUN, LIU XIANDE, SHI DINGHE, HE ZHAOXIANG

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

Abstract: Taking the signal processing unit of an IR searching system as a pulse receiver, and considering the effect of bandwidth of the pulse receiver on the output signal-to-noise ratio, the range equation of IR searching system is derived. According to the condition in which the pulse receiver will give the optimum output signal-to-noise ratio, the dependence of bandwidth of the signal processing unit on the dwell time of the detector is determined, and the corresponding range equation is obtained, thus providing the guidelines for designing and evaluating the performances of the IR searching system.

Key words: signal processing, IR searching system, range equation.