

文章编号: 1002-2082(2006)01-0043-03

一种提高激光告警器性能的自适应方法

胥 杰, 蒙 文, 李玉江, 杨庆华

(空军工程大学 电讯工程学院, 陕西 西安 710077)

摘 要: 激光告警是激光对抗的重要前提和基本手段, 如何在复杂背景噪声下识别来袭激光信号, 进而准确报警是激光告警面临的首要问题。该文分析了激光告警设备检测概率与信噪比的关系, 从关系式可以看出, 为了提高激光告警设备的检测概率, 需要增加激光信号的信噪比。提出了一种最大信噪比的自适应算法, 进行了算法分析, 并利用矩阵变换作出了算法简化, 从而保证了系统信噪比的最佳化。最后对最佳权向量的求解这个问题, 给出了适用于工程化的最佳权向量求解的简单迭代算法。

关键词: 激光告警; 最大信噪比算法; 迭代法; 最佳权向量

中图分类号: TH744.5; TB115

文献标识码: A

An adaptive method to improve the performance of laser warning equipment

XU Jie, MENG Wen, LI Yu-jiang, YANG Qing-hua

(Telecommunication Engineering Institute, AFEU, Xi'an 710077, China)

Abstract: The laser warning is the important precondition and basic measure in laser countermeasure. The first technical problem for the laser warning is how to recognize a targeting laser signal from complex background noise and accurately raise the alarm. The relationship between detection probability of laser warning equipment and signal-to-noise ratio is analyzed. It can be seen from the relational expression that, the increase of the signal-to-noise ratio of laser signal is a precondition for improving the detection probability. In order to ensure the optimization of the system signal-to-noise ratio, an adaptive method was proposed to ensure maximum signal-to-noise ratio. The algorithm analysis was carried out and the algorithm simplification was made with the matrix transformation. Finally, a simple iterative algorithm suitable for the optimum weight vector solution is given.

Key words: laser warning; maximum signal-to-noise ratio algorithm; iterative algorithm; optimum weight vector

引言

现代战争中, 激光武器的威胁日益严峻, 激光告警设备能对来袭激光武器预先报警, 因而成为激光对抗的重要前提和基本手段。然而如何在众多的背景噪声下判断来袭激光信号的存在, 继而做出准

确的报警是激光告警面临的首要问题^[1]。根据信号检测理论可知, 信号的检测概率依赖于信噪比, 故而信噪比的增加可大大提高告警设备的检测性能。本文给出一种自适应算法, 以保证告警设备的最大信噪比。

收稿日期: 2004-09-27; 修回日期: 2005-09-21

作者简介: 胥杰(1980—), 男, 汉, 四川雅安人, 空军工程大学电讯工程学院博士研究生, 主要从事光通信与激光技术的研究。

1 激光告警检测概率同信噪比的关系

假定激光告警系统采用匹配滤波器,要在白噪声信号中检测出脉宽为 τ 的激光脉冲信号,信号与噪声一起通过带宽 $B=1/2\tau$ 的匹配滤波器。滤波器输出噪声电流为 i_n ,则:

$$i_n = [1/\sqrt{2\pi}I_{rms}] \exp(-i_n^2/2i_{rms}^2) \quad (1)$$

其均方差由下式给出:

$$i_{rms} = \langle i_n^2 \rangle^{\frac{1}{2}} = (WB)^{\frac{1}{2}} = (W/2\tau)^{\frac{1}{2}}$$

式中, W 为白噪声功率谱强度; B 为匹配滤波器白噪声带宽。

当有激光信号时,设输出端的信号电流分量为 i_s ,则告警器的检测概率 P_D 就是在信号达到峰值时信号加噪声超过阈值 I_t 的概率,表达式^[2]如下:

$$P_D = \frac{1}{2} \{1 + \operatorname{erf}[(I_s - I_t)/\sqrt{2}I_{rms}]\} \quad (2)$$

式中, $\operatorname{erf}(x)$ 为误差函数,且为单调增函数。可见信噪比的增加将导致检测概率的提高。

2 最大信噪比(MSN)算法

2.1 算法分析

假定激光告警器具有 $L+1$ 个探测平面,每个探测器接收信号分别为 $x_{0k}, x_{1k}, \dots, x_{Lk}$,用矢量表示为 $X_k = [x_{0k}, x_{1k}, \dots, x_{Lk}]^T$,其中包含激光信号 S_k 及加性背景信号 N_k 。故

$$\begin{aligned} S_k &= [s_{0k}, s_{1k}, \dots, s_{Lk}]^T \\ N_k &= [n_{0k}, n_{1k}, \dots, n_{Lk}]^T \\ X_k &= S_k + N_k \end{aligned}$$

其输出信号 $y_k = W^T X_k$ 。于是,系统输出信噪比(SNR)可写为

$$SNR = \frac{E[|W^T S_k|^2]}{E[|W^T N_k|^2]} = \frac{W^H E[S_k^* S_k^T] W}{W^H E[N_k^* N_k^T] W} = \frac{W^H R_s W}{W^H R_n W} \quad (3)$$

式中, T 表示转置; H 表示共轭转置; S^* 表示共轭; R 为相关矩阵。

将上式右边瑞利商相比较发现,若将噪声相关矩阵 R_n 变换为单位阵,即可大大简化算法的运算量。

2.2 算法简化

简化算法的等效系统如图1所示。为了将噪声相关矩阵 R_n 变换为单位阵,需要在输入端首先进

行矩阵变换,即

$$S'_k = A S_k, \quad N'_k = A N_k$$

其中矩阵 A 的选择满足:

$$E[N'^*_k N'^T_k] = E[(A N_k)^* (A N_k)^T] = I$$

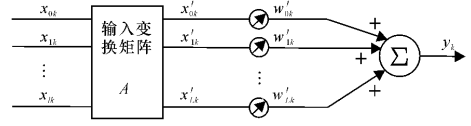


图1 简化算法的等效系统图

Fig. 1 Equivalent system figure of simplified algorithm

此时系统输出信号和噪声分量分别为

$$y_{sk} = W'^T S'_k = W'^T A S_k$$

$$y_{nk} = W'^T N'_k = W'^T A N_k$$

等效权向量为

$$W = A^T W' \quad (4)$$

系统的噪声功率可表示为

$$\begin{aligned} E[|y_{nk}|^2] &= E[|W'^T N'_k|^2] = \\ &= W'^H E[N'^*_k N'^T_k] W' = \\ &= W'^H W' \end{aligned} \quad (5)$$

将它和原算法相比较,可得:

$$W^H R_n W = W'^H A^* R_n A^T W' = W'^H W'$$

所以 $A^* R_n A^T = I$,也即

$$R_n = [A^T A^*]^{-1} \quad (6)$$

系统的信号功率可表示为

$$\begin{aligned} E[|y_{sk}|^2] &= E[|W'^T S'_k|^2] = \\ &= W'^H E[S'^*_k S'^T_k] W' = \\ &= W'^H R'_s W' \end{aligned} \quad (7)$$

其中

$$R'_s = E[S'^*_k S'^T_k] = A^* R_s A^T \quad (8)$$

系统的信噪比为

$$SNR = \frac{W'^H R'_s W'}{W'^H W'} \quad (9)$$

由瑞利商定理可知,使(9)式达到最大值的向量 W' 是相关矩阵 R'_s 的最大特征值 λ'_{\max} 所对应的特征向量,且该最大值就是 λ'_{\max} ^[3]。于是,对于上图所示的自适应系统,其输出信噪比达到最大时的最佳权向量 W'_{opt} 必然满足:

$$R'_s W'_{\text{opt}} = \lambda'_{\max} W'_{\text{opt}}$$

利用(4)式及(8)式,上式可改写为

$$A^* R_s A^T W'_{\text{opt}} = A^* R_s W_{\text{opt}} = \lambda'_{\max} W'_{\text{opt}}$$

再在等式两边乘矩阵 A^T ,可得

$$A^T A^* R_s W_{\text{opt}} = \lambda'_{\text{max}} A^T W'_{\text{opt}} = \lambda'_{\text{max}} W_{\text{opt}}$$

联系(6)式,可得

$$R_n^{-1} R_s W_{\text{opt}} = \lambda'_{\text{max}} W_{\text{opt}} \quad (10)$$

其中 λ'_{max} 可通过 $\det[R_n^{-1} R_s - \lambda I] = 0$ 来求得。所以,对应于原自适应系统的最佳权向量 W_{opt} 应为矩阵 $R_n^{-1} R_s$ 的最大特征值 λ'_{max} 所对应的特征向量。若设该特征向量为 Q_0 ,则最大信噪比权向量为

$$W_{\text{MSN}} = \mu Q_0 \quad (11)$$

式中, μ 为常数。

2.3 最佳权向量 Q_0 的计算

对最佳权向量 Q_0 的计算也即解线性方程组:

$$R_0^{-1} R_s Q_0 = \lambda'_{\text{max}} Q_0$$

移项得: $[R_n^{-1} R_s - \lambda'_{\text{max}} I] Q_0 = \vec{0}$

令 $R_n^{-1} R_s - \lambda'_{\text{max}} I = B$,则所解方程组为

$$\begin{bmatrix} b_{00} & b_{01} & \cdots & b_{0L} \\ b_{10} & b_{11} & \cdots & b_{1L} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ b_{L0} & b_{L1} & \cdots & b_{LL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_{00} \\ q_{01} \\ \vdots \\ q_{0L} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}$$

展开上式得:

$$b_{00}q_{00} + b_{01}q_{01} + \cdots + b_{0L}q_{0L} = 0$$

$$b_{10}q_{00} + b_{11}q_{01} + \cdots + b_{1L}q_{0L} = 0$$

\vdots

$$b_{L0}q_{00} + b_{L1}q_{01} + \cdots + b_{LL}q_{0L} = 0$$

利用高斯塞德尔简单迭代法^[4],取 Q_0 的初值

为 $[q_{00}^0, q_{01}^0, \cdots, q_{0L}^0]^T$,按照下面的递推算法:

$$q_{00}^{i+1} = -\frac{1}{b_{00}}(b_{01}q_{01}^i + b_{02}q_{02}^i + \cdots + b_{0L}q_{0L}^i)$$

$$q_{01}^{i+1} = -\frac{1}{b_{11}}(b_{10}q_{00}^{i+1} + b_{12}q_{02}^i + \cdots + b_{1L}q_{0L}^i)$$

\vdots

$$q_{0L}^{i+1} = -\frac{1}{b_{LL}}(b_{L0}q_{00}^{i+1} + b_{L1}q_{01}^{i+1} + \cdots + b_{LL-1}q_{0L-1}^{i+1})$$

经过若干次迭代后, Q_0 必然趋近于最佳权向量。

3 结论

由于激光告警设备的检测概率同激光信号信噪比密切相关,为了得到最佳的信噪比,本文给出一种最大信噪比自适应算法,同时给出了适用于工程化的迭代算法,这就保证了激光告警设备的检测概率。

参考文献:

- [1] 李世祥. 光电对抗技术[M]. 长沙:国防科技大学出版社,2000.
- [2] 侯振宁. 激光告警中的信号探测研究[J]. 应用光学, 2002, 23(5): 14-18.
- [3] 沈福明. 自适应信号处理[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2001.
- [4] 王世儒,王金金. 计算方法[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,1996.

武器升级的内外2大因素

“代”的划分实际上是对武器装备技术、战术性能水平的一种反映。目前,世界上对武器装备划代的方法还没有统一标准,基本上是以技术水平和战术性能来区分。

一般来说,每种武器装备的升级换代都需要经过型号论证、预研生产、定型生产、装备部队等过程,这就是武器装备升级换代的周期。随着科学技术的发展,武器装备升级换代的周期不断缩短,一般常规武器的更新换代周期由20世纪初的二三十年缩短到现在的10年以内。如美军F-117A隐身战斗机从1973年签订研制合同,到1983年该机正式装备部队,正好10年时间。

武器装备升级换代有2个因素。一个是技术推动,即任何武器装备升级换代的直接原因是科学技术发展。比如,喷气式飞机的出现是航空动力技术飞速发展产生的结果。始于20世纪80年代的信息技术革命,使传统的机械化武器升级为信息化武器。就海湾战争来说,以美国为首的多国部队使用了500多项80年代以来的高新技术,对传统武器装备进行改造和研制,形成了新的信息化武器系统,作战效能明显提高。另一个是需求。“9·11”事件后,美国调整了武器装备发展规划,停止了一些武器装备的研制,如“十字军火炮”和“科曼奇”武装直升机等,同时研制了一些针对恐怖分子的新武器,如温压弹、无人攻击机等。由此可见,科技推动作用和需求的拉动作用,是武器装备升级换代必不可少的内外2个条件。(耕耘 供稿)