

脉冲激光偏振特性用于目标的探测识别*

王海晏^{1,2}, 隋永华², 黄伟^{1,2}, 魏贤智²

(1 西安电子科技大学 技术物理学院, 西安 710071)

(2 空军工程大学 工程学院, 西安 710038)

摘要:针对光电探测时仅用强度来处理信息的局限性,通过理论分析,提出一种利用脉冲激光反射、散射偏振态时间、空间相关检测的方法,可以克服由于强度差过小带来的目标检测上的困难.利用分析结论,通过计算偏振分布密度函数(Stokes 矢量的概率密度函数),进一步讨论了偏振传递函数的特性,用于识别目标,并给出了计算实例.

关键词:激光偏振;时间相关;空间相关;Stokes 参数;偏振态传递函数

中图分类号: TN249

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2009)11-2958-5

0 引言

由于光在散射和反射时其偏振态会发生改变,光在大气中传播时,将会能见度降低,对比度下降,从而丢失大量的信息.在复杂的背景中检测出感兴趣的目标,是情报侦察、战场监视和自动目标识别领域的一个重要方向.偏振探测能在杂乱背景下提高目标的识别率,恢复丢失的信息,对于人造假目标和伪装具有独特的辨别能力,同时能提高图像的对比度和清晰度^[1-2].

目前利用偏振信息识别目标的方法主要有以下几种:采用自然光作为光源,用 CCD 相机作为成像器材^[1],分别采集目标、背景的偏振信息和强度信息加以对比识别;利用线偏振态对目标的不变性对目标进行测量和识别^[1-2];利用偏振成像的方法探测、识别目标^[3-6];采用激光光源获得目标、背景的偏振信息和强度信息加以对比识别^[2];利用大气散射具有显著的偏振特性,采用偏振相机直接获得景物之间偏振信息差异^[6-7]等方法.这些方法的共同点都是利用光强度和偏振光的 Stokes 矢量测量,计算偏振度差异来区分目标和背景的.

但由于实际目标并非理想反射体,因此并不能完全保持入射光的偏振状态;再者,偏振态在传输过程中的改变会因为传输路径的随机变化而变得捉摸不定,无法解析描述.本文提出一种利用多脉冲激光场相关性检测的方法,解决偏振态探测的实际问题.

利用脉冲激光测量空中目标的过程中,目标被看作是理想反射体,因此被认为不改变入射激光的偏振状态.但实际目标并非镜面,而是不规则的几何

形状.虽然不规则反射(散射)导体比起镜面反射体不能很好地满足斯涅尔定律和菲涅尔定律,但在一定的时间段内,其反射的电磁场之间还是有比较强的相关性.因此,可以利用单脉冲的时间相关和多脉冲之间的空间相关性,对待探测的目标及其所处的背景进行更深入的探测和刻画.

1 偏振信息相关性探测的原理

在激光探测的方法中,经常采用脉冲探测的方式进行.脉冲探测分连续多脉冲和单脉冲探测两种方式.

设一平面入射光波为 $e_i(t)$, 目标散射波记为 $e_s(t)$, 则有^[8]

$$e_s(t) = \int_T s(\tau) e_i(t-\tau) d\tau = s(t) \otimes e_i(t) \quad (1)$$

式中 $s(t)$ 是 Sinclair 偏振散射矩阵^[9], 表示入射波与散射波之间的关系

$$e_s(t) = S e_i(t) \quad (2)$$

$$S = \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix}$$

式中:设散射波的偏振态在传输过程中的演化为一个随机过程,两个不同的入射光脉冲与其散射脉冲之间的关系可分别表示为

$$e_{s1}(t) = \int_T s(\tau) e_{i1}(t-\tau) d\tau = s(t) \otimes e_{i1}(t) \quad (3)$$

$$e_{s2}(t) = \int_T s(\tau) e_{i2}(t-\tau) d\tau = s(t) \otimes e_{i2}(t)$$

1.1 空间相关性

根据式(3)求出表示两次脉冲偏振态的 Stokes 矢量的概率密度函数 f_{s1} 和 f_{s2} .

一般情况下光波是具有一定带宽 $\Delta\omega$ 的复色波,这时波的振幅和相位差都在 $\Delta\omega$ 范围内以某一速率连续变化,因此一般情况下,Stokes 参数应该用对时间的平均值来表示.用一个在两正交偏振基(水平、垂直,用 H/V 表示)下矢量 g_{HV} 表示,并且用

* 空军预研基金(402050301)资助

Tel: 029-84787556-207 Email: whh_shx@yahoo.com.cn

收稿日期:2007-09-29

修回日期:2008-07-03

带宽 $\Delta\omega$ 进行归一化处理,则有

$$\mathbf{g}_{HV} = \begin{bmatrix} g_{HV_0} \\ g_{HV_1} \\ g_{HV_2} \\ g_{HV_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\langle a_H^2 \rangle + \langle a_V^2 \rangle}{\Delta\omega} \\ \frac{\langle a_H^2 \rangle - \langle a_V^2 \rangle}{\Delta\omega} \\ \frac{2\langle a_1 a_2 \cos \delta \rangle}{\Delta\omega} \\ \frac{2\langle a_1 a_2 \sin \delta \rangle}{\Delta\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\langle |E_H|^2 \rangle + \langle |E_V|^2 \rangle}{\Delta\omega} \\ \frac{\langle |E_H|^2 \rangle - \langle |E_V|^2 \rangle}{\Delta\omega} \\ \frac{2\text{Re}\langle E_H E_V^* \rangle}{\Delta\omega} \\ \frac{2\text{Im}\langle E_H E_V^* \rangle}{\Delta\omega} \end{bmatrix} \quad (4)$$

每次脉冲散射的空间各个位置处偏振态的情况均可以由矢量 \mathbf{g}_{HV} 表示出来。

设偏振波服从零均值正态分布,可以求出其在两个正交偏振基下矢量 \mathbf{g}_{HV} 的各分量 g_{HV_0} 、 g_{HV_1} 、 g_{HV_2} 、 g_{HV_3} 的概率密度函数^[10]为(以 g_{HV_0} 为例)

$$f_{G_0}(g_{HV_0}) = f(A, \Sigma_{HV}, sh(A, g_{HV_0})) \quad (5)$$

式中, $\Sigma_{HV} = \begin{bmatrix} \sigma_{HH} & \sigma_{HV} \\ \sigma_{VH} & \sigma_{VV} \end{bmatrix}$ 是协方差矩阵, $A = \sqrt{(\sigma_{VV} - \sigma_{HH}) + 4|\sigma_{HV}|^2}$, $sh = \frac{1}{2}(e^x - e^{-x})$. 类似地可以写出矢量 \mathbf{g}_{HV} 的其他分量的概率密度函数 $f_{G_0}(g_{HV_0})$ 、 $f_{G_1}(g_{HV_1})$ 、 $f_{G_2}(g_{HV_2})$ 和 $f_{G_3}(g_{HV_3})$.

定义 Stokes 矢量的概率密度函数

$$\mathbf{f}_s = \begin{bmatrix} f_{G_0}(g_{HV_0}) \\ f_{G_1}(g_{HV_1}) \\ f_{G_2}(g_{HV_2}) \\ f_{G_3}(g_{HV_3}) \end{bmatrix} \quad (6)$$

是散射波在传输过程当中表示偏振态的各个分量的概率分布情况。

在两次脉冲探测过程当中,分别求出 \mathbf{f}_{s_i} 、 $\mathbf{f}_{s_{i+1}}$. 这两者是第 i 和第 $i+1$ 个探测脉冲的偏振态分布的概率密度函数,用两个随机过程 F_{S_i} 和 $F_{S_{i+1}}$ 表示. 考察这两个过程的相似程度,可以揭示这两次探测过程中偏振态演化的内在联系. 多次脉冲探测可以依据此过程进行运算。

定义 Stokes 参数相关矢量 $\boldsymbol{\tau}$, 是第 i 次与第 $i+1$ 次探测脉冲散射过程中的描述偏振态分布的各个量之间的互相关函数. 有

$$\begin{aligned} \tau_0 &= R_{0i,i+1} = E\{F_{S_i}, F_{S_{i+1}}\} = \\ &\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} g_{HV_0}(i) g_{HV_0}(i+1) f_{G_0}[g_{HV_0}(i), \\ &g_{HV_0}(i+1); t_1, t_2] dg_{HV_0}(i) g_{HV_0}(i+1) \end{aligned}$$

根据式(5)、(6)的结果,可以求出 τ_0 、 τ_1 、 τ_2 、 τ_3 . 则

$$\boldsymbol{\tau} = E\{(\mathbf{f}_{s_i}^T \cdot \mathbf{f}_{s_{i+1}})^T\} = \begin{bmatrix} \tau_0 \\ \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{0i,i+1} \\ R_{1i,i+1} \\ R_{2i,i+1} \\ R_{3i,i+1} \end{bmatrix} \quad (7)$$

是 Stokes 参数的互相关函数矢量。

利用式(7),可以计算任意两次或多次脉冲探测过程中偏振态演化过程的相关性,从而可以据此考察目标散射对脉冲偏振状态的改变,进而对区分和识别目标。

1.2 时间相关性

寻找单脉冲不同时刻散射电场偏振态之间的相关性,用以描述探测波在传输过程中偏振态的演化过程。

以公式(4)为基础,把时间 t 作为其自变量,可以描述矢量 \mathbf{g}_{HV} 在不同时刻的情况,也就是观察一次激光脉冲散射过程中偏振态在不同时刻的变化. 通过计算矢量 \mathbf{g}_{HV} 的各个分量(在一次传输过程中是一个随机过程,用 F_s 表示)的自相关函数,可以描述该脉冲的偏振态在不同时刻的相关程度,即描述其在传输过程中的偏振态改变的相似程度的情况。

利用式(4),有

$$\mathbf{g}_{HV(t)} = \begin{bmatrix} g_{HV_0}(t) \\ g_{HV_1}(t) \\ g_{HV_2}(t) \\ g_{HV_3}(t) \end{bmatrix} \quad (8)$$

则 Stokes 矢量的概率密度函数

$$\mathbf{f}_s(t) = \begin{bmatrix} f_{G_0}(g_{HV_0}(t)) \\ f_{G_1}(g_{HV_1}(t)) \\ f_{G_2}(g_{HV_2}(t)) \\ f_{G_3}(g_{HV_3}(t)) \end{bmatrix} \quad (9)$$

Stokes 参数相关矢量 $\boldsymbol{\tau}(t)$, 是一次探测脉冲散射过程中的描述偏振态分布的各个量之间的自相关函数. 有

$$\begin{aligned} \tau_0(t) &= R_0(t_1, t_2) = E\{F_S(t_1)F_S(t_2)\} = \\ &\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} g_{HV_0}(t_1) g_{HV_0}(t_2) \cdot f_{G_0}[g_{HV_0}(t_1), \\ &g_{HV_0}(t_2); t_1, t_2] dg_{HV_0}(t_1) g_{HV_0}(t_2) \end{aligned} \quad (10)$$

同 1.1, 则 Stokes 参数自相关函数矢量为

$$\boldsymbol{\tau}(t) = \begin{bmatrix} \tau_0(t) \\ \tau_1(t) \\ \tau_2(t) \\ \tau_3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_0(t_1, t_2) \\ R_1(t_1, t_2) \\ R_2(t_1, t_2) \\ R_3(t_1, t_2) \end{bmatrix} \quad (11)$$

2 数值计算

根据中心极限定理,可以假设两个探测脉冲的偏振态服从不同参数的正态分布.由于探测过程中的传输以及诸如目标与探测器相对位置的变化等引起了偏振态的改变,通过偏振态空间相关、时间相关性的计算,来辨别陷于背景杂波中的目标,甚至通过分析偏振态相关的特征来达到识别目标的目的.

设入射光脉冲单脉冲能量 $E = 1000 \text{ J}$; 脉冲宽度 $t_p = 10^{-6} \text{ s}$, 间隔 $t_r = 0.25 \text{ s}$, 波长 $\lambda = 1.064 \mu\text{m}$, 椭圆偏振. 入射和反射的脉冲偏振矢量端点在归一化传输距离上的(只给出一个 Stokes 参数 I 的分布情况, Q、U、V 分布类似, 分布中心和幅度不同, 不具体给出)变化的分布如图 1.

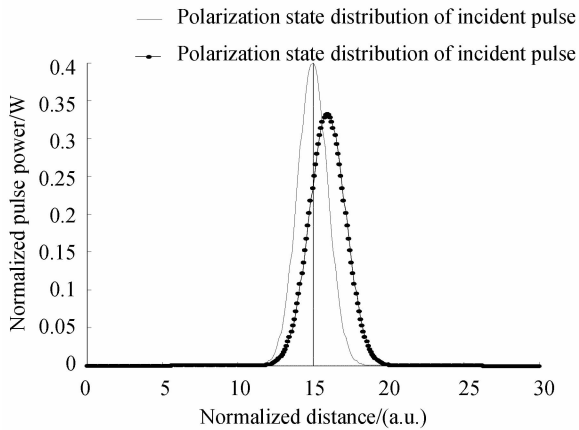


图 1 入射和反射的脉冲的偏振态分布
Fig. 1 Polarization state distribution of incident and reflect pulse

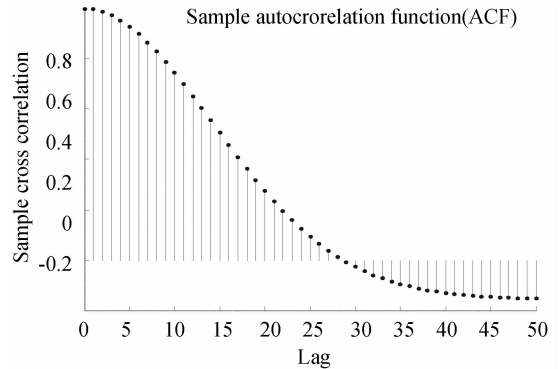
2.1 时间相关性计算

目标对不同偏振的信号有不同的响应,这种现象称为“变偏振现象”,即形状复杂的目标产生的散射波中,其偏振方向与原入射波的偏振方向不同^[11].

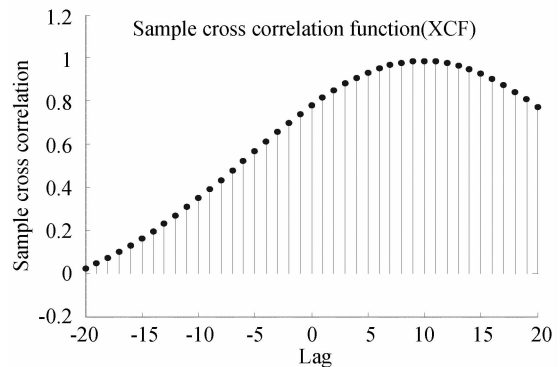
时间相关性的计算可以表示出脉冲在空间传输过程中不同时刻偏振状态的改变情况.由于空中目标与大气相比对于探测脉冲偏振态的改变程度要大得多,所以通过对该时刻的确定也就可以用于对目标出现时刻的确定.

从图 1 可以看出,反射前后偏振态分布中心有变化,能量大小有损失,但偏振状态变化并不剧烈,分布也不是很宽.

以光脉冲遇到目标时刻为界,分别计算脉冲在遇到目标前、后的偏振状态的时间相关特性.即计算光脉冲遇到目标前的偏振状态的时间相关特性 $\tau(t)_{\text{BEFORE}}$ 和遇到目标后的偏振状态的时间相关特性 $\tau(t)_{\text{AFTER}}$, 结果见图 2.



(a) Time correlation coefficient of incident pulse



(b) Cross correlation coefficient of incident and reflect pulse

图 2 入射和反射脉冲的偏振态时间相关特性
Fig. 2 Temporal correlative character of incident and reflect pulse on polarization state

通过计算可以看出,两种情况下偏振态的变化并不大,可以认为入射的脉冲在传输过程中偏振态改变不大.偏振态的改变主要是目标的散射引起的,而这种偏振状态改变的程度与目标的散射特性有直接的关系.通过计算 $\tau(t)_{\text{BEFORE_AFTER}}$ 则可以确认目标的存在情况和出现时机,而进一步的 $\tau(t)_{\text{BEFORE_AFTER}}$ 研究,建立相应的数据库,则还可以达到辨识目标的目的.

2.2 空间相关性计算

前后两次(第 i 次和第 $i+1$ 次)入射和反射脉冲的偏振态变化分布如图 3.两者之间相关度计算结果如图 4.

这是利用 1.1 中介绍的理论和公式(7)计算得出的.空间相关性计算的现实意义是可以表示两个脉冲传输的过程当中,利用偏振态的改变程度反映路程上的物质的相似程度.例如,大气散射辐射的偏振状态(或退偏振状态)对散射体的形状和尺度十分敏感.因而,可以根据偏振态随散射角等的变化,反演大气的光学和物理参数,即在分析测得的偏振特性的基础上,求得气溶胶的尺度谱、数密度、形状和折射率数据等^[11].而空间相关性的计算更能够定量描述偏振态的改变随距离变化的状态,为此类反演测量提供更详细的数据参考.

图 4 是一定距离上前后两次偏振态空间相关特

性. 如果再次用两个脉冲在同样距离上进行相关性计算的结果与图 4 的结果相同或接近, 则可以说明此距离上物质对脉冲偏振特性的影响没变, 即可以认为是同一种物质(或同一状态); 如果相差较大, 则物质的状态(组分、密度等)发生了改变, 改变程度甚至也可以根据其前后两次脉冲偏振态空间相关性来定量计算.

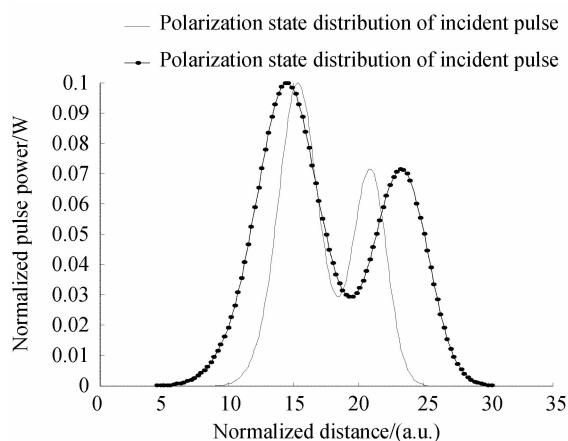


图 3 第 i 次入射和反射脉冲与第 $i+1$ 次脉冲的偏振态分布
Fig. 3 Polarization state distribution of former and post incident and reflect pulse

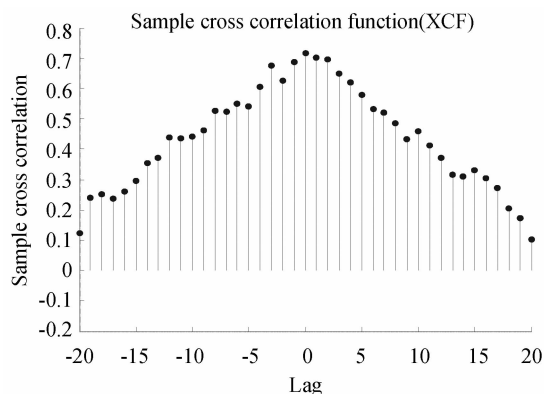


图 4 前后两次偏振态空间相关性
Fig. 4 Space correlative character of former and post incident and reflect pulse on polarization state

2.3 结果分析和利用

以上计算结果示出的分别是利用公式(10)、(11)计算单脉冲入射和反射波的 Stokes 参数之一的 I 的相关特性; 利用公式(6)、(7)计算多脉冲入射和反射波的 Stokes 参数之一的 I 的相关特性. 其余参数 Q 、 U 、 V 可以仿此进行计算.

定义偏振特性的传递函数为 Stokes 矢量的概率密度函数之比, 即(以空间相关为例)两次脉冲在空间上的 Stokes 矢量的概率密度函数之比, 还可以计算出目标对单脉冲、多脉冲偏振特性的传递函数, 以此表示目标对入射脉冲偏振特性的作用. 图 5 是利用多脉冲偏振特性相关性计算出该目标的偏振传递函数特性曲线.

根据 Stokes 参数的定义, 对每个目标描述其偏振特性曲线传递函数曲线一共有四条. 对于不同目标, 这些曲线是不同的; 对于同一个目标, 由于其对入射探测波的反射和散射所产生的偏振特性有比较大的相关程度, 因此曲线变化不大, 即能够反映目标的偏振特性. 故而可以利用以资辨识目标.

2.4 散射波偏振态叠加的考虑

就波在随机介质中的传播这个问题来说, Stokes 参数的

最重要的应用是独立波的 Stokes 参数的“可加性”. 为了简化模型, 本文只考虑大气瑞利一次散射偏振, 对于其他情形, 可以利用下述方法加以考察.

若在一个体积中的粒子是随机分布的, 这些粒子所散射的各光强之间互不相关, 这样在随机介质中的散射波看作是“独立的”或“非相干的”. 当几个独立波组合在一起时, 合成波的 Stokes 参数是各独立波的 Stokes 参数相应的和.

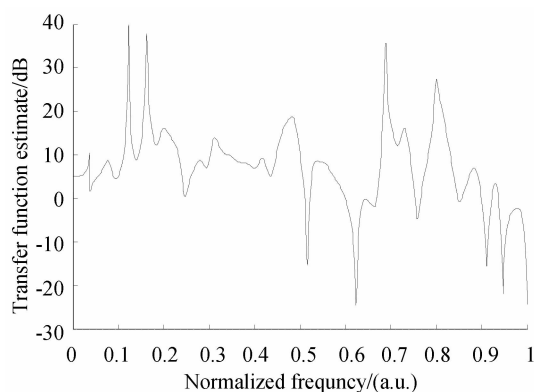


图 5 目标的偏振传递函数特性曲线
Fig. 5 Transfer function character of polarization state of target

文中仅用大气的瑞利一次散射情形对偏振态的影响作为介绍计算方法的过程, 其他的影响(诸如大气多次散射等的影响)可以仿此过程进行单独计算, 然后根据 Stokes 参数的“可加性”原则进行综合考虑即可, 限于篇幅, 不详细介绍.

2.5 适用性和局限性

文中的理论和计算都是激光脉冲在大气中传输的情形, 而且要求大气的稳定性相对高, 不能有剧烈的参数变化, 如强对流天气, 这也是激光大气传输的弱点.

3 结论

本文对光的偏振特征相关性计算进行了详细的描述, 为利用偏振特性进行目标检测打下了基础. 针对目标对探测激光脉冲反射、散射的偏振特性的改变与目标性质相关的特点, 利用偏振态的相关程度进行计算, 进而求得目标偏振特性的传递函数, 利用

该函数可以增大目标信号与背景杂乱信号的差别, 这样对目标检测和识别提供了极大的方便. 另一方面, 由于提取了偏振特征, 为目标识别提供了关于目标的更多信息, 这将有利于提高目标识别的效果, 同时也为目标的探测和识别提供了一种新的方法.

参考文献

- [1] ZHAO Yong-qiang, ZHANG Hong-cai, PAN Quan, *et al.* Object detection through polarization characteristics [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2003, **20**(12): 685-688.
赵永强, 张洪才, 潘泉, 等. 基于偏振特征的目标检测[J]. 量子电子学报, 2003, **20**(12): 685-688.
- [2] WANG Hai-yan, YANG Ting-wu, AN Yu-ying, *et al.* The usage of polarity character of underwater laser beam in target image detection[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(1): 9-13.
王海晏, 杨廷梧, 安毓英, 等. 激光水下偏振特性用于目标图象探测[J]. 光子学报, 2003, **32**(1): 9-13.
- [3] PIIROLA V, VILHU O. Polarimetric observations of HD 1991178-an FK comae type star[J]. *Astronomy and Astrophysics*, 1982, **110**(6): 351-354.
- [4] XÜ Can-jun. A Summary of Mechanism infrared polarization imaging[J]. *Infrared Technology*, 2007, **29**(7): 381-385.
徐参军. 红外偏振成像机理概述[J]. 红外技术, 2007, **29**(7): 381-385.
- [5] NIE Jin-song, WANG Zhen. Summary of infrared polarization imaging detection[J]. *Infrared Technology*, 2006, **28**(2): 63-67.
聂劲松, 汪震. 红外偏振成像探测技术综述[J]. 红外技术, 2006, **28**(2): 63-67.
- [6] YE Song. Polarization method for atmospheric scattering correction of remote sensing image[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(6): 999-1003.
叶松. 基于偏振信息的遥感图像大气散射校正[J]. 光学学报, 2007, **27**(6): 999-1003.
- [7] SUN Xiao-bing, HONG Jin, QIAO Yan-li, *et al.* Analysis of characteristic of muldband aerial polarization image[C]. *SPIE*, 2005, **5832**: 219-227.
- [8] 王雪松. 宽带极化信息处理的研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 1999.
- [9] SINCLAIR G. The transmission and reception of elliptically polarized radar waves[J]. *Proc IRE*, 1950, **38**(2): 148-151.
- [10] ZHUANG Zhao-wen. Statistical characteristic and processing of instantaneous polarization[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2005: 122.
庄钊文. 瞬态极化的统计特性及处理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005: 122.
- [11] SUN Xiao-bing. Investigation of measurements of polarized properties of atmospheric scattering radiation[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2005, **22**(1): 111-115.
孙晓兵. 大气散射辐射偏振特性测量研究[J]. 量子电子学报, 2005, **22**(1): 111-115.

Target Detection Using Pulse Laser's Character of Ploarization

WANG Hai-yan^{1,2}, SUI Yong-hua², HUANG Wei^{1,2}, WEI Xian-zhi²

(1 Physics Technique College of XiDian University, Xi'an 710071, China)

(2 Air Force College of Engineer, Xi'an 710038, China)

Abstract: A novel method to calculate temporal and spatial correlation by using the state of polarized pulse laser is presented, which can overcome the deficiency of the way only using amplitude of light in detecting target. More work can be done to deal with the polar state transfer function in order to identify target according to the consequent, computation examples are given.

Key words: Polarization of laser; Temporal correlation; Spatial correlation; Stokes parameter; Polar state transfer function



WANG Hai-yan was born in 1968, He is an associatae professor at Air Force Engineering University, and received the M. S. degree from Aero-Electronics from AFEU in 1995. Now he is a Ph. D. degree candidate at Xidian University, and his research interests focus on space photoelectric detection and communication as well as fiber-optics, especially using polarization character of laser pulse.