

偏振光学编码及解码研究

冯显杰^{1), 3)} 鲍振武¹⁾ 李湘银²⁾

1), 天津大学电信学院, 天津 300072

2), 南京理工大学理学院, 南京 210014

3), 东南大学电子工程系, 南京 210096

摘 要 提出了用 LiNbO_3 晶体制作的光耦合双泡克耳斯楔编码器的设计方法, 分析了在远场空间的偏振编码原理, 并对其用琼斯矩阵法作了解码分析。

关键词 相位延迟, 泡克耳斯效应, 偏振光, 编码器。

1 引 言

在现代战争中的某些场合需要有轻便、准确率高的制导武器。激光制导武器正是由此应运而生。海湾战争中美国的小牛(亦称幼畜、海尔法)激光制导导弹已显示了巨大威力, 其射程为 4~10 km; 另外, 俄罗斯安装于米-28 浩劫直升机 Hot/Tow 的激光制导技术已相当成熟, 且具有很高的自适应能力; 南非 4 km 射程的 ZT-3/35 雨燕制导武器也采用了光学精密制导。激光制导技术在战争舞台上已越来越显示出它的潜在能力, 而我国在这方面的研究刚刚起步。本文介绍的利用偏振光学的方法实现制导的技术可用于地对空、空对地武器的制导系统, 是军事科研中热点技术之一。该项技术的关键是对偏振信号的编码与解码。

2 工作原理简述

为了实现远场空间的编码^[1~3], 须在沿光的传输轴上正交放置两个双泡克耳斯楔, 并交替加以脉冲电压, 当光通过已被加了脉冲电压的双泡克耳斯楔时, 偏振光则会产生相位延迟, 从而在远场空间形成不同形状的椭圆偏振信号。

发射透镜将平行光以一定的发散角发散出去, 形成具有交替信号的制导光场。这样, 就在远场空间形成具有偏振梯度的脉冲编码的锥体光束信号, 导弹即在这个锥体光束信号中飞向目标。

在远场空间飞行的导弹的尾部具有一个解码装置, 其主要部件是一个四分之一波片(其快轴方向与泡克耳斯盒内快光的振动方向 z' 平行) 及两个等同放大倍数的电流放大器。解码后, 经棱镜分速, 形成 o 光(电流)和 e 光(电流), 通过对连续两个脉冲 I_{e1}/I_{o1} 及 I_{e2}/I_{o2} 的分析即可确定导弹在远场空间的方位。

3 光偏振信号的调制编码原理^[1, 2]

3.1 编码过程框图及原理

由图 1 可见, 偏振光学编码器中垂直放置的双泡克耳斯楔、水平放置的双泡克耳斯楔在编码过程中起着重要作用。垂直放置的双泡克耳斯楔在脉冲电压作用下对偏振方向平行于 z 轴入射的线偏振光进行偏振调制, 上半部 a 引起的相位差 δ_a 产生右旋光, 下半部 b 产生左旋光, 中线为 m, 即:

$$0 < \delta_a = Q - Q' \leq \frac{\pi}{2} \quad (\text{顶部为 } \frac{\pi}{2}, \text{ 即右旋圆偏振光}), \tag{1}$$

$$0 < \delta_m = Q - Q' = 0 \quad (\text{线偏振光}), \tag{2}$$

$$0 > \delta_b = Q - Q' \geq \frac{\pi}{2} \quad (\text{底部为 } -\frac{\pi}{2}, \text{ 即左旋圆偏振光}). \tag{3}$$

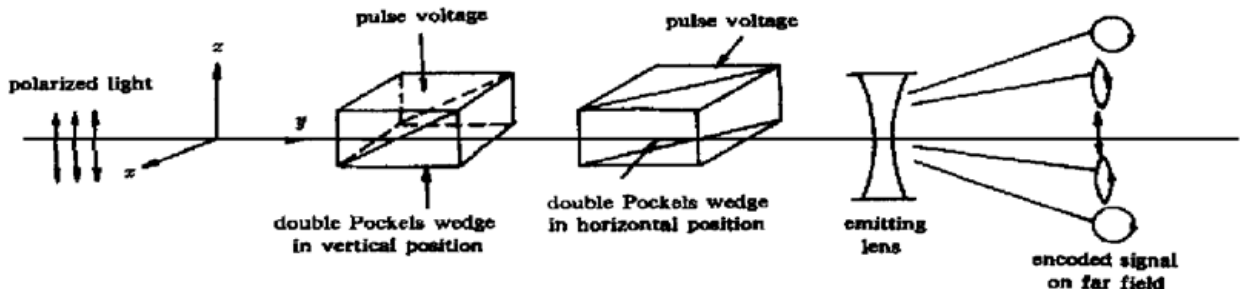


Fig. 1 Encoding process

同理可以推论, 对水平放置的双泡克耳斯楔(入射偏振光仍然平行于 z 轴), 当在脉冲电压作用时, 在轴线左右两边分别产生左旋、右旋偏振光。再经发射透镜将平行光以一定的发散角发散出去, 形成具有交替信号的制导光场, 如图 2、图 3 所示。

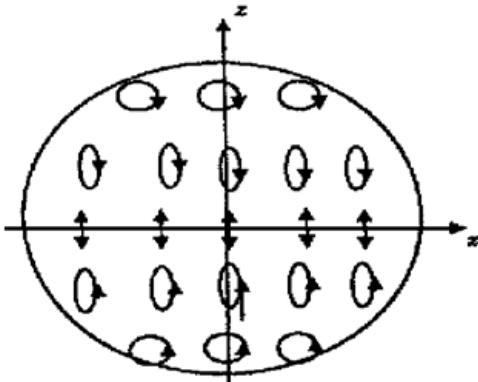


Fig. 2 Encoding signal on the case of vertical position

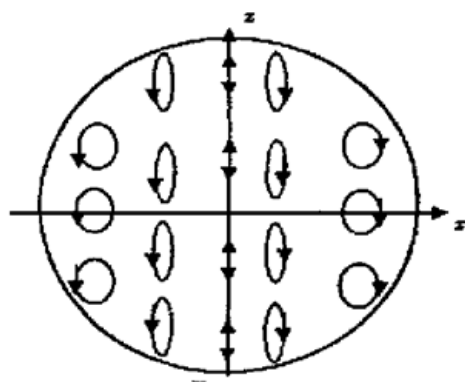


Fig. 3 Encoding signal on the case of horizontal position

3.2 双泡克耳斯楔的设计

泡克耳斯楔效应存在于非中心对称的单轴晶体中, 这种效应在晶体内部引起的相位延迟与外加电场强度成正比。另外, 还必须考虑自然双折射情况及由此引起的严重的温漂现象, 而温漂现象是必须清除的。

在横向加压情况下, 采用 $1.06 \mu\text{m}$ 波长的 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 激光器作光源, 考虑清除自然双折射, 这时泡克耳斯楔的制作材料采用 LiNbO_3 晶体较为合适, 且只能取主折射率的轴向与通光方向一致、电场方向沿主折射率 n_0 的方向一致的状态。当电场沿 z 轴向下时, 折射率椭球的感应主轴的取向发生了变化, 如图 4 所示。

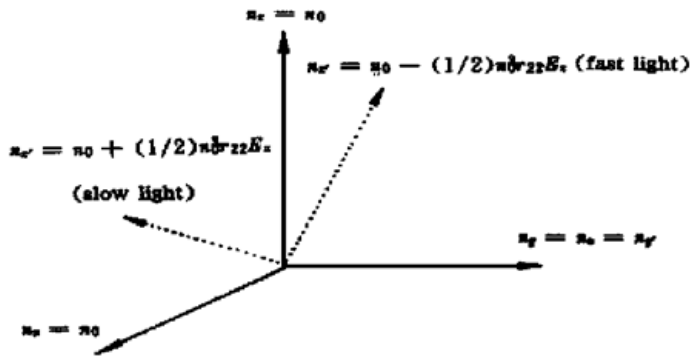


Fig. 4 Major refraction axes

有:

$$n_x' = n_0 + \frac{1}{2} n_0^3 r_{22} E_z, \quad (4)$$

$$n_z' = n_0 - \frac{1}{2} n_0^3 r_{22} E_z, \quad (5)$$

$$n_y' = n_e = n_y. \quad (6)$$

则:

$$\begin{aligned} \delta &= \varphi_z' - \varphi_x' = \frac{2\pi}{\lambda} (n_z' - n_x') L \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} 2 \left(-\frac{1}{2} n_0^3 r_{22} E_z \right) L < 0. \end{aligned} \quad (7)$$

故这种情况制作的泡克耳斯楔只能放在如图 5 所示的下面的那一个三棱柱形的单泡克耳斯楔。为了能使整个双泡克耳斯楔在中线部分有: $\delta_m = 0$, 及上半部 $\pi/2 \geq \delta_a > 0$, 则应使上、下两个单泡克耳斯楔中的在电场作用下的快光、慢光方向有相反取向, 三棱柱形状的单泡克耳斯楔应有

$$n_x' = n_0 - \frac{1}{2} n_0^3 r_{22} E_z, \quad (8)$$

$$n_z' = n_0 + \frac{1}{2} n_0^3 r_{22} E_z, \quad (9)$$

$$n_y' = n_e = n_y. \quad (10)$$

3.3 双泡克耳斯楔的光程差公式及半波电压

图 5 是垂直放置的双泡克耳斯楔的外形, 并建立坐标系如图 6 所示, 以便计算光程差。

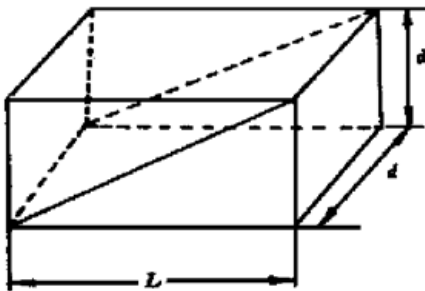


Fig. 5 Double Pockels wedge

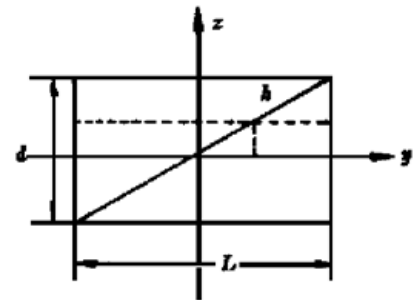


Fig. 6 Coordinate system for calculating phase delay

对于长为 L 、高为 d 的双泡克耳斯楔, 在高度 h 位置处通过的偏振光所产生的相位延迟为

$$\delta_h = \frac{4\pi n_0^3 r_{22} E_z L h}{\lambda d}, \quad (11)$$

由此可得半波电压公式为

$$\begin{aligned} \delta_\pi &= \delta_{\pi/2} - \delta_{-\pi/2} = \pi = \frac{4\pi n_0^3 r_{22} V_\pi}{\lambda d} \left[\frac{d}{2} - \left(-\frac{d}{2} \right) \right] \frac{L}{d} \\ &= \frac{4\pi n_0^3 r_{22} V_\pi}{\lambda} \cdot \frac{L}{d} = \text{const} \cdot V_\pi K \end{aligned} \quad (12)$$

其中 $K = L/d$, 为长与高(宽)之比, 可见 V_π 与 K 成反比关系, K 值较大时 V_π 较小。假设双泡克耳斯楔的大小为: $2 \text{ cm} \times 2 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$, 查文献[4]可知, $n_0^3 r_{22} = 29 \times 10^{-12}$, $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$, 代入(12)式, 得: $V_\pi = 3654 \text{ V}$ 。

4 琼斯矩阵分析及解码^[3,4]

由图 1、图 2 得出图 7 中的 xoz 坐标系和 $x'oz'$ 坐标系, 椭圆代表远场空间偏振编码信号的一般形式, 并注意到图 8 所示的解码系统中 $\lambda/4$ 波片的快轴方向与 z' 轴向一致。利用琼斯矩阵, 得:

$$E_2 = G_3 G_2 G_1 E_1 \tag{13}$$

E_1 、 E_2 分别代表入射光矢量和出射光矢量, G_1 、 G_2 、 G_3 分别代表起偏器、双泡克耳斯楔及四分之一波片的琼斯矩阵, 设双泡克耳斯楔中线引起的相位差为 δ_c , 由于

$$G_3 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{bmatrix}, \quad G_2 = \cos \frac{\delta_c}{2} \begin{bmatrix} 1 & i \tan(\delta_c/2) \\ i \tan(\delta_c/2) & 1 \end{bmatrix}, \quad G_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix},$$

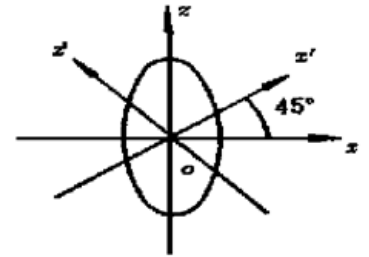


Fig. 7 Coordinate transforming between xoz and $x'oz'$

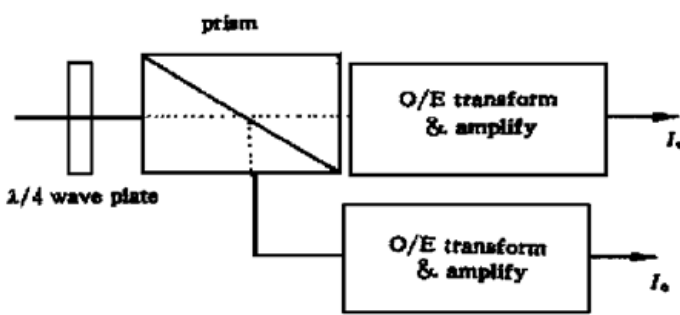


Fig. 8 The schematic drawing of decoding system

而 $E_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$, 表示沿 z 轴方向振动的偏振光, 代入(13) 式计算得:

$$E_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} i [\sin(\delta_c/2) + \cos(\delta_c/2)] \\ i [\cos(\delta_c/2) - \sin(\delta_c/2)] \end{bmatrix}, \tag{14}$$

这是椭圆偏振光的一般形式。

对(14) 式利用分束棱镜理论:

$$I_e = E_{2x}^2 = K \left(\sin \frac{\delta_c}{2} + \cos \frac{\delta_c}{2} \right)^2, \quad I_o = E_{2z}^2 = K \left(\sin \frac{\delta_c}{2} - \cos \frac{\delta_c}{2} \right)^2$$

则
$$\frac{I_e}{I_o} = \left[\frac{\sin(\delta_c/2) + \cos(\delta_c/2)}{\sin(\delta_c/2) - \cos(\delta_c/2)} \right]^2 = \tan^2 \left(\frac{\delta_c + \pi/2}{2} \right) = \tan^2 \left(\frac{\delta_c + \delta_{\lambda/4}}{2} \right), \tag{15}$$

式中 K 为常数, (15) 式中 $(\delta_c + \pi/2)$ 说明双泡克耳斯楔的延迟效应与四分之一波片的延迟效应起到了相加的作用。应该注意的是: 在这里四分之一波片的快轴方向与 z' 轴方向平行, 则从四分之一波片出来的光是椭圆偏振光; 如果波片的快轴方向平行于 x 轴或 z 轴, 则从四分之一波片出射后的只能是线偏振光。由(15) 式, 对垂直放置的双泡克耳斯楔, 有下列几种情况:

- 1) 当 $\delta_c = \pi/2$, 即偏振光从双泡克耳斯楔顶部通过时, 有: $I_{e1}/I_{o1} = + \infty$, 即 $I_{e1} = I_{max}$, $I_{o1} = 0$ 。
- 2) 当 $0 < \delta_c \leq \pi/2$, 从上半部通过, 有: $I_{e1}/I_{o1} > 1$ 。
- 3) 当 $\delta_c = 0$, 即从中线位置通过时, 有: $I_{e1} = I_{o1}$ 。
- 4) 当 $\pi/2 < \delta_c < \pi$ 时, 有: $I_{e1} < I_{o1}$ 。
- 5) 当 $\delta_c = -\pi/2$, $I_{e1} = 0$, $I_{o1} = I_{max}$ 。

同理可分析, 当脉冲电压加水平放置的双泡克耳斯楔的情况, 只是由 I_{e2}/I_{o2} 确定是左右相对位置, 而 I_{e1}/I_{o1} 确定的是远场空间中的上、下位置。综合 I_{e1}/I_{o1} 及 I_{e2}/I_{o2} , 再通过计算机编程, 即可达到控制制导的目的。

结束语 脉冲线偏振光经过双泡克耳斯楔光学编码器后, 在远场空间生存具有偏振梯度的脉冲编码的锥体光束信号。当导弹在这个锥体信号中飞行时, 一方面通过其尾部的解码及控制装置不断地改变它在锥光中的相对位置, 使之向中心靠拢; 另一方面由于弹体处的截面积一般较

小,且在飞行过程中这个截面保持不变。由于这两方面原因,使得导弹具有很高的命中率。

参 考 文 献

- [1] Udd E. *Fiber Optic Sensors*. New York: Wiley, 1993. 204~ 210
 [2] 邓仁亮. 光学制导技术. 北京: 国防工业出版社, 1992. 73~ 88
 [3] Zaloga S. Russian Anti-Radiation Missiles. *Janes Intelligence Review*. 1993, (8): 348~ 351
 [4] 龙槐生. 光的偏振及应用. 北京: 机械工业出版社, 1991. 255~ 256

Study of Special Encoder Using Polarized Light

Feng Xianjie^{1),3)} Bao Zhenwu²⁾ Li Xiangyin²⁾

1), *College of Electronics and Information, Tianjin University, Tianjin 300072*

2), *Institute of Physics, Nanjin University of Science and Technology, Nanjin 210014*

3), *Department of Electronic and Engineering, Southeast University, Nanjin 210096*

(Received 10 March 1999; revised 4 November 1999)

Abstract The design method of optical coupling double Pockels wedge encoder LiNbO₃ crystal is proposed. The polarized light encoding theory in the far space field is analyzed. Its decoding process is realized by means of Jones matrix.

Key words phase lag, Pockels effect, polarized light, encoder.

激光器问世和中国激光创业四十周年纪念大会 在北京科技会堂召开

为纪念激光器问世和中国激光创业四十周年,由中国光学学会、中国电子学会、中国物理学会、中国通信学会、中国兵工学会、中国仪器仪表学会主办,中国光学学会激光专业委员会、中国电子学会量子电子学与光电子学分会承办的纪念大会于2000年9月26日在中国科技会堂召开。在京参加“中国光学学会第五届会员代表大会”的全体代表也应邀参加了会议。

开幕式上,中国科协主席周光召作了重要讲话。中国光学学会名誉理事长、85岁高龄的两院院士王大珩先生作了鼓舞人心的讲话。他在回顾了我国激光事业的创业史和发展史以后,对年轻一代科技工作者提出了殷切的希望,勉励他们兢兢业业,承前启后,为我国的激光事业多作贡献。

之后宣读的8篇学术报告回顾了我国早期的激光研究,对激光及其相关领域的现状和发展动态进行了综述。这8篇报告是:徐至展院士的“强激光科学技术的研究与发展——上海光机所早期‘两大’研究重要进展回顾”;范滇元院士的“大型激光系统的研究与应用”;简水生院士的“中国光纤通信技术的发展”;陈良惠院士的“半导体激光器的发展”;李峻亨教授的“激光医学现状”;周济院士的“试述中国光电子产业发展的对策”;邓树森研究员的“中国激光加工产业正在兴起”以及徐端颐教授的“我国光存储技术发展现状”。