

定向棱镜激光腔模式模拟研究

石岩¹,金挺²,李松¹,周辉¹,翁兴涛¹

(1.武汉大学电子信息学院,湖北武汉430079;2.浙江省质量技术监督检测研究院,浙江杭州310013)

摘要:为了探究定向棱镜谐振腔激光模式分布情况,通过连续利用反射系统的光线矢量的反射定律,推导出具有二面角误差的角锥棱镜相位模型,首次创新性地建立了定向棱镜腔的光场数学模型,并运用FOX-LI的理论,研制了一套求解各种腔形的稳态模的场分布软件。用这套软件模拟出了定向棱镜谐振腔自再现模的分布。同时,针对免调试固体激光器(定向棱镜腔)进行实验,将模拟所得结果与实际激光器的输出近场、远场光斑,以及与光束质量分析仪检测分析结果进行了对比,取得了较好的效果。

关键词:激光模式; 角锥棱镜; 数值计算; 角度误差; 面形误差

中图分类号: TN24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2005)05-0521-05

Models simulation of oriented prism laser resonator

SHI Yan¹, JIN Ting², LI Song¹, ZHOU Hui¹, WENG Xing-tao¹

(1.School of Electronics Information, Wuhan University, Wuhan 430079, China;

2.Zhejiang Measurement and Test Institute for Quality and Technique Supervision, Hangzhou 310013, China)

Abstract: In order to develop a field distribution program that resolves the model of stable resonator any cavity, the phase model of the cube corner prism is established using continuously the law of reflection of ray vector. A mathematical model of the oriented prism laser field distribution is developed at first. A field distribution program that resolves the model of stable resonator in any cavity is developed. And the modes of stable resonator consisting of directional prism are investigated with FOX-LI iterative method. The amplitude and phase distributions of the output mirror are presented. In the experiment, the avoidance adjust solid state laser is used. Both the experimental results about the output near-field speckle of laser, far-field speckle of laser and the result from the laser beam quality analyzer are compared with 3-D numerical simulation. The simulation results are in agreement with experimental results. A good effect is obtained in practical application.

Key words: Laser mode; Cube-corner prism; Numerical computation; Dihedral angle offset; Flatness error

收稿日期:2004-11-10; 修订日期:2005-01-09

作者简介:石岩(1970-),女,辽宁大连人,工程师,硕士,主要从事固体激光器件、信息光学方面的研究。

0 引言

为了获得高抗失调能力,将角锥棱镜这一抗失调光学元件放入激光腔中构成激光器。定向棱镜腔的抗失调作用主要是由棱镜本身的特点决定的^[1],棱镜本身是一种位相变换元件。由于棱镜对光束的变换作用,将棱镜,特别是具有角度误差和面形误差的角锥棱镜用于谐振腔中,必将影响光束的输出质量。激光的特性是由于受激辐射的本性和谐振腔的选模作用才得以实现的。通过谐振腔的适当设计和采用特殊的选模措施,不仅可以有效地控制腔内实际振荡的模式数目,提高光子简并度,获得单色性好、方向性好的相干光,而且调节腔的几何参数,可以直接控制光束的横向分布特性,光斑大小,谐振频率和光束发散角,控制光束的输出功率。

本文根据基尔霍夫衍射理论,给出具有角度误差和面形误差的角锥棱镜的非涅耳衍射积分式。用数值计算和计算机模拟方法,给出激光棱镜腔两镜面光场的振幅分布和相位分布,并将计算结果用三维图形显示出来,使人们更清晰地了解角锥棱镜腔的激光模式分布,也可为优化设计腔参数提供可靠依据。

1 角锥棱镜相位模型的建立

将存在角度误差的角锥棱镜置于直角坐标系 XYZ 中,如图 1 所示^[2,3]。设第 I 面和第 II 面之间的两面直角误差为 δ_{12} ,第 II 面和第 III 面之间的两面直角误差为 δ_{23} ,第 III 面和第 I 面之间的两面直角误差为 δ_{31} 。选角锥棱镜三个直角为坐标系的 X, Y, Z 轴。

三直角面法线单位向量为 $\vec{N}_1, \vec{N}_2, \vec{N}_3$ 。

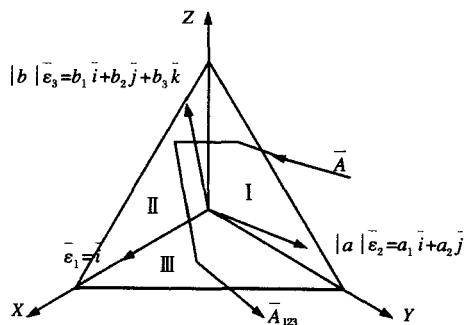


图 1 角锥棱镜的结构原理图

Fig.1 Structure principle of cube corner retroreflector

$$N_{1x}=1, N_{1y}=0, N_{1z}=0; N_{2x}=\sin\delta_{12}, N_{2y}=\cos\delta_{12}, N_{2z}=0 \quad (1)$$

$$N_{3x}=\sin\delta_{13}, N_{3y}=\frac{\sin\delta_{23}-\sin\delta_{12}\sin\delta_{13}}{\cos\delta_{12}},$$

$$N_{3z}=\sqrt{1-N_{3x}^2-N_{3y}^2}$$

一般情况下, $\delta_{12}, \delta_{23}, \delta_{31}$ 的角度非常小,因此,近似有:

$$\sin\delta_{12}=\delta_{12}, \sin\delta_{23}=\delta_{23}, \sin\delta_{31}=\delta_{31}$$

$$\cos\delta_{12}=\cos\delta_{23}=\cos\delta_{31}=1$$

$$\sin^2\delta_{12}=\sin^2\delta_{23}=\sin^2\delta_{31}=0$$

假设光线是垂直入射到角锥棱镜的大面上,则入射光线经过三个反射面后的反射矩阵分别为:

$$\mathbf{M}_{123}=\mathbf{M}_3\mathbf{M}_2\mathbf{M}_1=\begin{bmatrix} -1 & -2\delta_{12} & -2\delta_{13} \\ \delta_{12} & -1 & -2\delta_{23} \\ 2\delta_{13} & 2\delta_{23} & -1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{M}_{213}=\mathbf{M}_3\mathbf{M}_1\mathbf{M}_2=\begin{bmatrix} -1 & 2\delta_{12} & -2\delta_{23} \\ -2\delta_{12} & -1 & -2\delta_{23} \\ 2\delta_{13} & 2\delta_{23} & -1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{M}_{321}=\mathbf{M}_1\mathbf{M}_2\mathbf{M}_3=\begin{bmatrix} -1 & 2\delta_{12} & 2\delta_{13} \\ -2\delta_{12} & -1 & 2\delta_{23} \\ -2\delta_{13} & -2\delta_{23} & -1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{M}_{312}=\mathbf{M}_2\mathbf{M}_1\mathbf{M}_3=\begin{bmatrix} -1 & -2\delta_{12} & 2\delta_{13} \\ 2\delta_{12} & -1 & 2\delta_{23} \\ -2\delta_{13} & -2\delta_{23} & -1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{M}_{132}=\mathbf{M}_2\mathbf{M}_3\mathbf{M}_1=\begin{bmatrix} -1 & -2\delta_{12} & -2\delta_{13} \\ 2\delta_{12} & -1 & 2\delta_{23} \\ 2\delta_{13} & -2\delta_{23} & -1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{M}_{231}=\mathbf{M}_1\mathbf{M}_3\mathbf{M}_2=\begin{bmatrix} -1 & 2\delta_{12} & 2\delta_{13} \\ -2\delta_{12} & -1 & -2\delta_{23} \\ -2\delta_{13} & 2\delta_{23} & -1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

上述各个出射面的反射矩阵是在角锥棱镜所在的坐标系中建立的,为了转换到谐振腔中的坐标系中,必须进行坐标变换。当光线对称入射时,这种坐标变换可以通过一个变换矩阵进行,该变换矩阵为:

$$M = \begin{pmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} & 0 & -\frac{\sqrt{2}}{2} \\ -\frac{\sqrt{6}}{6} & \frac{\sqrt{6}}{3} & -\frac{\sqrt{6}}{6} \\ \frac{\sqrt{3}}{3} & \frac{\sqrt{3}}{3} & \frac{\sqrt{3}}{3} \end{pmatrix} \quad (3)$$

在图 1 所示的坐标系中的向量可以确定为:

$$\bar{A}' = M\bar{A}$$

式中 \bar{A}' 为图 1 所示坐标系中的出射波面的法向量;
 \bar{A} 为原来坐标系中的向量。

可以得到在 $o-xyz$ 坐标系中出射波面的法向量。由于角度误差的存在,导致出射波面有一定程度的偏离,这将引起相位的变化,根据出射波面的平面方程,可以得到出射波面的波差分布:

$$w_1(x,y) = \begin{cases} \frac{\sqrt{6}}{3}(\delta_{12} + \delta_{23} + 2\delta_{31})x - \sqrt{2}(\delta_{12} - \delta_{23})y, x \geq 0, -x \tan 30^\circ \leq y < x \tan 30^\circ \\ -\frac{\sqrt{6}}{3}(\delta_{12} - \delta_{23} + 2\delta_{31})x + \sqrt{2}(\delta_{12} + \delta_{23})y, x \geq 0, y \geq x \tan 30^\circ \\ \frac{\sqrt{6}}{3}(\delta_{12} - \delta_{23} - 2\delta_{31})x - \sqrt{2}(\delta_{12} + \delta_{23})y, x < 0, y \geq -x \tan 30^\circ \\ -\frac{\sqrt{6}}{3}(\delta_{12} + \delta_{23} + 2\delta_{31})x - \sqrt{2}(-\delta_{12} + \delta_{23})y, x < 0, x \tan 30^\circ \leq y < -x \tan 30^\circ \\ \frac{\sqrt{6}}{3}(\delta_{12} - \delta_{23} + 2\delta_{31})x - \sqrt{2}(\delta_{12} + \delta_{23})y, x < 0, y < -x \tan 30^\circ \\ \frac{\sqrt{6}}{3}(-\delta_{12} + \delta_{23} + 2\delta_{31})x + \sqrt{2}(\delta_{12} + \delta_{23})y, x \geq 0, y < -x \tan 30^\circ \end{cases} \quad (4)$$

由于波差是以波长为度量的,与相位相差一个系数 $2\pi/\lambda$;那么,出射波面的相位分布为 $W_1(x,y) = kw_1(x,y)$ 。其中,在光线由角锥棱镜出射时,还会发生一次折射。但这里的 k 值为 $\frac{n2\pi}{\lambda}$ 。 (x,y) 限制在角锥棱镜的口径范围之内。若为圆形切割, $x^2 + y^2 \leq (R)^2$, 其中 R 为半径。

面形误差常用光圈数 N 表示。由于直角面面形误差对出射光束的相位变化影响最大,所以这里主要讨论直角棱镜三个直角面的面形误差。而将底面面形误差对相位的影响忽略。因为底面一般近似看作平面,底面曲率非常大,产生的相位很小,可以忽略^[4]。为了简化问题,直接给出角锥棱镜各个区域的出射波面的波差分布^[5]。

$$w_2(x,y) = \begin{cases} \left[1 - 3 \frac{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2}{R^2} \right] \frac{8\sqrt{3}}{3} n\lambda_1 N, x \geq 0, -x \tan 30^\circ \leq y < x \tan 30^\circ \\ \left[1 - 3 \frac{(x-x_2)^2 + (y-y_2)^2}{R^2} \right] \frac{8\sqrt{3}}{3} n\lambda_1 N, x \geq 0, y \geq x \tan 30^\circ \\ \left[1 - 3 \frac{(x-x_3)^2 + (y-y_3)^2}{R^2} \right] \frac{8\sqrt{3}}{3} n\lambda_1 N, x < 0, y \geq -x \tan 30^\circ \\ \left[1 - 3 \frac{(x-x_4)^2 + (y-y_4)^2}{R^2} \right] \frac{8\sqrt{3}}{3} n\lambda_1 N, x < 0, x \tan 30^\circ \leq y < -x \tan 30^\circ \\ \left[1 - 3 \frac{(x-x_5)^2 + (y-y_5)^2}{R^2} \right] \frac{8\sqrt{3}}{3} n\lambda_1 N, x < 0, y < -x \tan 30^\circ \\ \left[1 - 3 \frac{(x-x_6)^2 + (y-y_6)^2}{R^2} \right] \frac{8\sqrt{3}}{3} n\lambda_1 N, x \geq 0, y < -x \tan 30^\circ \end{cases} \quad (5)$$

式中 N 为三个直角面的光圈数; n 为角锥棱镜的折射率; R 为角锥棱镜的底面半径; λ_1 为检验光圈时所用波长。由于波差是以波长为度量的,与相位相差一个系数 $2\pi/\lambda$,因此出射波面的相位分布为:

$$W_2(x,y) = 2\pi w_2(x,y)/\lambda \quad (6)$$

2 定向棱镜腔的数学模型

采用谐振腔的标量衍射理论来讨论定向棱镜腔的模式问题。定向棱镜腔与一般的平行平面腔不同,它由一个角锥棱镜和一个平面镜组成,其中角锥棱镜对光场具有相位变换作用。由于角锥棱镜具有角度误差和面向误差而引起光场的相位发生变化(不考虑角锥棱镜的偏振态特性)^[6]。在入射场与角锥棱镜大面近似垂直的情况下,当光场入射到角锥棱镜时,角锥棱镜对光场会产生一个固定的位相变化^[7],运用 FOX-LI 的理论^[8],研制了一套求解定向棱镜腔的稳态模的场分布软件。

假定在镜面上有一任意电磁场分布 $u_1(x_1, y_1)$, 当它在腔内由镜 M_1 传播到镜 M_2 时,便相当于在孔阑传输线上穿过孔阑,并通过一段距离 L ,这一过程称作光在传输线上传输了一次,传输的结果在第二个镜面上产生了一个场 $u_2(x_2, y_2)$,由菲涅耳-基尔霍夫衍射积分公式可得:

$$u_2(x_2, y_2) = \frac{ik}{4\pi} \iint_{\Sigma} u_1(x_1, y_1) \frac{e^{-ik\rho}}{\rho} (1 + \cos\theta) \times$$

$$W_1(x_1, y_1) ds_1 \quad (7)$$

式中 Σ 为谐振腔反射镜的面积; r 为源点 (x_1, y_1) 与观察点 (x_2, y_2) 之间连线的长度; θ 为 Σ 面上点 (x_1, y_1) 处法线 n 与 r 的夹角; $k=2\pi/\lambda=2\pi\nu/c$, 为波矢的模; $W(x_1, y_1)$ 为角锥棱镜对光场的附加相位变换, 在这里是角度误差和面形误差共同作用的结果; ds_1 为 Σ 面上点 (x_1, y_1) 处的小面元。当光场由镜 M_2 传播到镜 M_1 时, 即光场在腔中再经过一次传播时, 在镜 M_1 处产生场分布为 $u_3(x_3, y_3)$, 由菲涅耳-基尔霍夫衍射积分公式得:

$$u_3(x_3, y_3) = \frac{ik}{4\pi} \iint_{\Sigma} u_2(x_2, y_2) \frac{e^{-ik\rho}}{\rho} (1 + \cos\theta) \times W(x_2, y_2) ds_2 \quad (8)$$

式中 $W(x_2, y_2)$ 为平面镜对光场的附加相位变换, 在这里是 0。对于以后的各次传输过程也都用公式 (7) 和 (8) 计算, u_1, u_2, u_3 分别用 u_n, u_{n+1}, u_{n+2} 代替即可。

3 定向棱镜腔的模式

令 $E(x_1, y_1)=1$, 入射波长为 1064 nm, 角锥棱镜直径为 4 mm, 角锥棱镜折射率为 1.516, 腔长取 100 mm, 棱的取值为 0.02 mm。

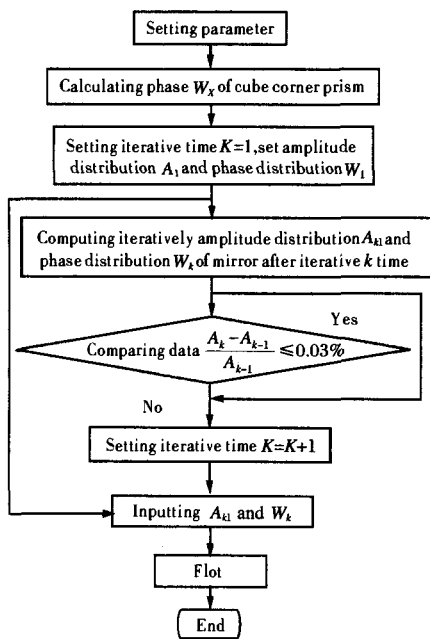


图 2 数值计算程序流程图

Fig.2 Flowchart of numerical computation program

下面给出按照实际参数进行运算后的定向棱镜腔的模式分布图。给出第一次迭代后的腔模式分布图。

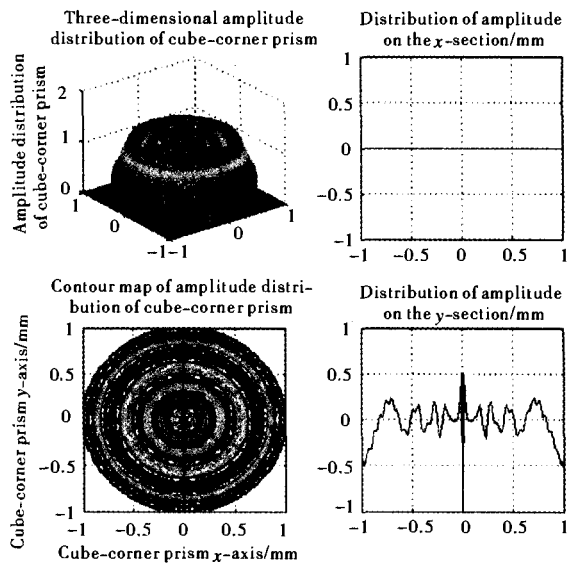


图 3 棱镜光场分布图

Fig.3 Field distribution of cube-corner prism

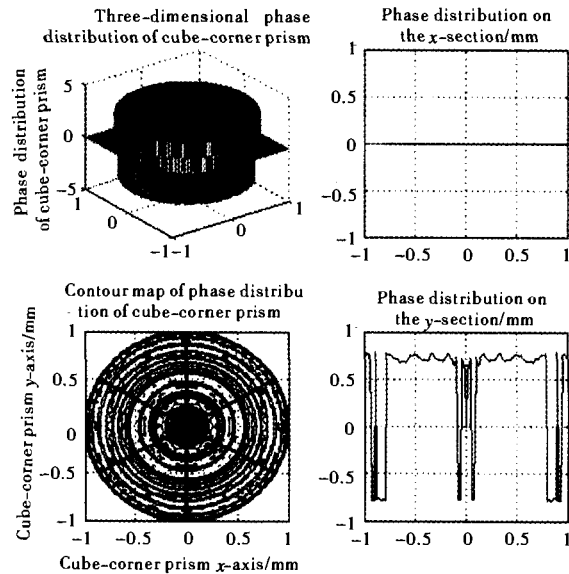


图 4 棱镜相位分布图

Fig.4 Phase distribution of cube-corner prism

从图 3、图 4 可以看出, 初始平面波场在腔内经过一次迭代后角锥棱镜镜面和平面镜镜面上的场分布发生很大的改变。在以后的迭代过程中, 每迭代一定的次数之后就存下数据, 然后加一次迭代, 将两次

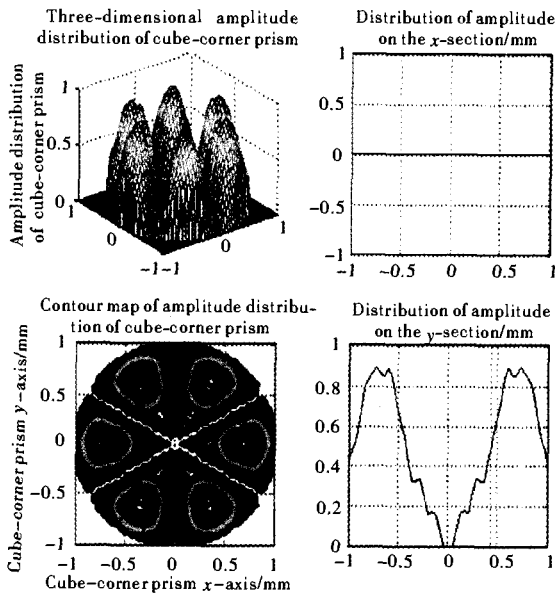


图5 角锥棱镜振幅分布

Fig.5 Amplitude distribution of cube-corner prism

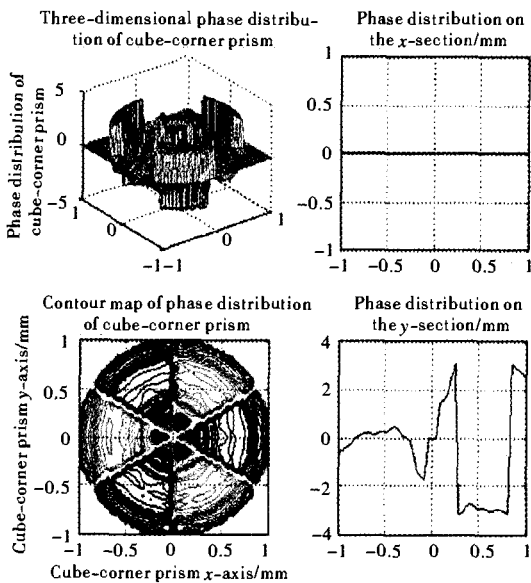


图6 角锥棱镜相位分布

Fig.6 Phase distribution of cube-corner prism

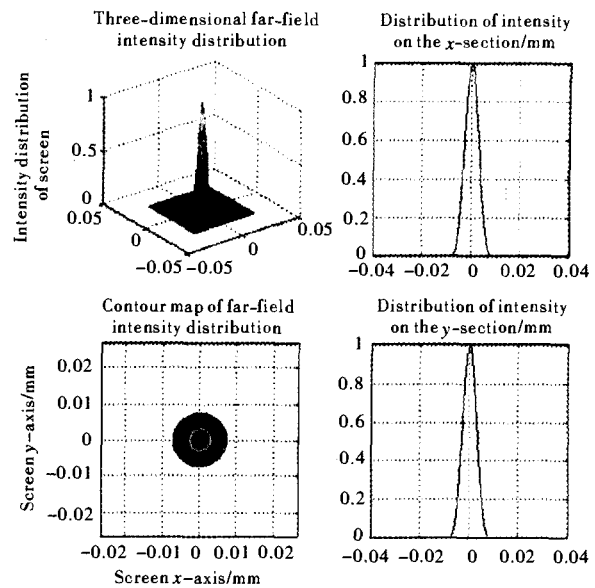


图7 远场光强

Fig.7 Intensity distribution of far-field

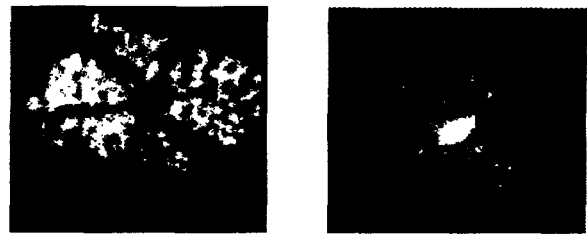


图8 感光纸记录的输出光斑和远场光斑

Fig.8 Photograph of out-put and far-field speckle by sensitive paper



图9 光束质量分析仪得出的近场/远场光强

Fig.9 Intensity distribution of near-field and far-field

迭代的结果相比较,如果相差较大,继续迭代,直至相邻两次迭代的结果相差 0.3% 以内,认为腔内的场稳定下来。如果将运行过程中每次计算结果都记录下来,就可以形象地给出在定向棱镜腔中自再现模的形成过程。图 5、6、7 分别为软件模拟得腔稳定后角锥棱镜镜面上的振幅分布、相位分布以及远场光强分布,图 8、9 为感光纸记录的输出近场光斑和光束质量分析仪得出的输出近场光斑。

4 结论

本文将具有角度误差和面型误差的角锥棱镜引起的相位改变引入菲涅耳衍射积分算式中,建立了定向棱镜腔的镜面场分布数学模型,并通过计算机进行迭代处理,得到的光场分布同实际激光器输出的光斑比较接近,因此可以说定向棱镜腔模型的建立和实现是比较成功的。
(下转第 539 页)

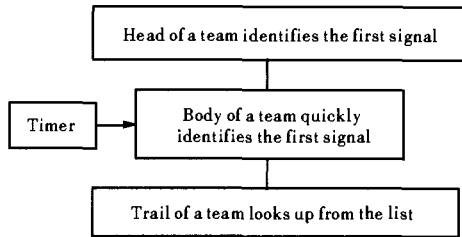


图4 快速锁定信号框图

Fig.4 Scheme of quickly locking signal

3 总结

脉冲间隔编码具有快速确定首脉冲及码间干扰信号易剔除的特点;有限位随机周期序列与脉冲间隔编码相比,具有无固定频率、间隔时间随机的特点。新型激光编码方案,不仅结合了上述两种编码的优点,而且采用了非周期性的编码规律,采用随机间隔,没有固定重频;能快速确定编码中的任意组的任意队,且确定的延迟时间很短;能快速锁定信号,避免制导脉冲串中途丢失造成的影响。该新型编码既能被我方方便识别,又能使敌方难以解码。该方案不仅适用激光末制导炮弹,也适用于其他许多激光制导武器系统。

参考文献:

[1] FANG Yan-yan, CHAI Jin-hua. Contract analysis of laser terminal

guided projectile in USA and Russia[J]. Guidance & Fuze(方艳艳,柴金华.美俄激光末制导炮弹的对比分析.制导与引信), 2004, 30(3):12-18.

[2] JIANG Yao-ting, YANG Jie, ZHOU Xiao-song. Laser jamming technique and present development[J]. Infrared and Laser Engineering(蒋耀庭,杨杰,周晓松.激光干扰技术及发展现状.红外与激光工程), 2001, 30(5): 386-389.

[3] NIU Yan-xiong, WANG Yue-feng, ZHANG Chu, et al. Counter-measure system of laser guidance weapons[J]. Infrared and Laser Engineering(牛燕雄,汪岳峰,张维,等.激光制导武器的对抗系统.红外与激光工程), 1998, 27(2):47-51.

[4] CHEN Hong-zhe. Summary of laser active jamming technique[J]. Electro-optic Countermeasure and Passive Jamming(陈宏哲.激光有源干扰技术综述.光电对抗与无源干扰), 1996, 11(3):31-36.

[5] WANG Ying, YANG Jun, ZHU Xiu-li, et al. The development of foreign electro-optic countermeasure equipments[J]. Foreign Electro-war(王莹,杨军,朱秀丽,等.国外光电对抗装备发展.外军电子战), 2003, (3):36-41.

[6] SUN Xiao-quan, LV Yue-guang. Principle and Technique of Laser Countermeasure[M]. Beijing: PLA Press(孙晓泉,吕跃广.激光对抗原理与技术.北京:解放军出版社), 2000.

[7] AN Hua-hai, YAN Xiu-sheng, ZHENG Rong-san. Code analysis and recognition treatment technique of laser guidance signal[J]. Electro-optic Countermeasure and Passive Jamming(安化海,闫秀生,郑荣山.激光制导信号的编码分析及识别处理技术.光电对抗与无源干扰), 1996, 11(3):26-30.

(上接第525页)

参考文献:

[1] CAI Yan-min, CHEN gang, CHEN Gao-ting, et al. On the effective reflection area of a cubic corner reflector[J]. Optical Technique(蔡燕民,陈刚,陈高庭,等.立方角锥棱镜的有效反射区.光学技术), 2000, 26(3):253-254.

[2] OU Jia-ming, WANG Rui-li, SHANG He-cen, et al. Three forms of expression about reflection law[J]. Journal of Yunnan Normal University(欧家鸣,王瑞丽,尚鹤岑,等.反射定律的三种表达形式.云南师范大学学报), 2000, 20(1):57-61.

[3] KUANG Cui-fang, FENG Qi-bo, LIU Xin. By vector analysis the rectangular angle error influence on characteristics of the beam of cube-corner retroreflector[J]. Optical Instruments(匡萃方,冯其波,刘欣.用矢量方法分析角锥棱镜直角误差对其光路反射特性的影响.光学仪器), 2003, 25(4):55-58.

[4] WENG Xing-tao, NIE-Hui, LI Song, et al. Planeness issues of reflecting surfaces on a cube corner retroreflector[J]. Optical Technique(翁兴涛,聂辉,李松,等.角锥棱镜的直角面形问题.光学技术), 2002, 28(1):71-73.

[5] WANG Zi-yu. Geometry Optics and Optical Design[M]. Zhejiang: Zhejiang University Press(王子余.光学和光学设计.浙江:浙江大学出版社), 1989, 67-70.

[6] ZHOU Hui, LI Song, SHI Yan. Effect of polarization on the far-field diffraction of ideal cube corner retroreflector[J]. Infrared and Laser Engineering(周辉,李松,石岩.偏振态对角锥棱镜远场衍射分布的影响.红外与激光工程), 2004, 33(4):418-422.

[7] SU Xian-yu, LI Ji-tao. Information Optics[M]. Beijing: Science Press(苏显渝,李继陶.信息光学.北京:科学出版社), 2000.

[8] Fox A G, Li. Odes in a maser interferometer with curved and tilted mirrors[J]. Proc IEEE, 1963, 51:80-89.