

文章编号: 0253-2239(2004)12-1590-5

# 采用级联原子滤光器的新型卫星激光链路系统研究\*

刘 璐 王江波 俞水清 汤俊雄

(北京大学信息科学技术学院量子信息与测量教育部重点实验室, 北京 100871)

**摘要:** 提出级联佛克脱型原子滤光器(Linked VADOF)的新构想。从理论上分析并计算了级联佛克脱型原子滤光器的透射谱。结果表明,级联佛克脱型原子滤光器将佛克脱型原子滤光器的多峰改造为单峰结构,具有比佛克脱型原子滤光器更窄的线宽和更高的噪声抑制比。将这种新型结构应用于激光信标锁频。该锁频方案提高了信标光频率的稳定性。在此基础上,给出了发射端采用级联佛克脱型原子滤光器锁频,接收端采用法拉第型原子滤光器(FADOF)滤光的新型卫星激光链路系统。外场初步联调实验表明了该系统的可行性。

**关键词:** 应用光学; 级联佛克脱型原子滤光器; 激光信标锁频; 卫星激光链路

中图分类号: TN24 文献标识码: A

## A Novel Inter-Satellite Laser Link System with Linked Atomic Optical Filter

Liu Lu Wang Jiangbo Yu Shuiqing Tang Junxiong

(Quantum Information and Measurement Key Laboratory of Ministry of Education,  
School of Electronics Engineering and Computer Science, Peking University, Beijing 100871)

(Received 19 May 2003; revised 7 November 2003)

**Abstract:** A new idea of linked Voigt anomalous dispersion optical filter (VADOF) is presented. Its transmission spectrum is analyzed and calculated. The result shows that, compared with VADOF, the linked VADOF changes the multi-peak configuration of VADOF into single-peak one and has narrower bandwidth and higher noise rejection ratio. The linked VADOF is applied into a new laser frequency-locking scheme, which improves the stability of laser frequency. Consequently, a novel inter-satellite laser link system using linked VADOF for frequency locking in the transmitter and Faraday anomalous dispersion optical (FADOF) for radiation rejection in the receiver is given. The result of field test demonstrates that this novel system is feasible.

**Key words:** apply optics; linked Voigt anomalous dispersion optical filter (FADOF); laser beacon frequency locking; inter-satellite laser link

## 1 引 言

卫星激光通信技术是近年通信领域的研究热点。美国 ThermoTrex 研究所首次在卫星激光通信系统中采用法拉第型反常色散光子滤光器(Faraday anomalous dispersion optical filter, FADOF)滤出背景光辐射噪声,在接收机信噪比不下降的条件下可将接收视场角展宽到 $1^\circ$ <sup>[1]</sup>,此项技术作为“激光无线电装置”,成为 1996 年美国技术创新《发现》奖 5

项入围技术之一。其后,美国将原子滤光器应用于卫星激光通信 STRV2<sup>[2]</sup>工程系统的接收端,且其发射端也采用原子滤光器锁频,因此原子滤光器技术引人注目。但美国的方案及技术细节均未透露。

在探讨这一卫星光通信关键技术时,认为有两个问题必须解决,一是原子滤光器应该适应卫星间的多普勒频移,二是采用原子滤光器锁频时,由于其多峰结构,在温度等扰动因素下,激光信标频率容易出现跳模。因此,必须解决跳模干扰。佛克脱型反常色散原子滤光器(Voigt anomalous dispersion optical filter, VADOF)是本实验室近几年研制出的一种优质超窄带滤光器<sup>[3]</sup>。与常用的法拉第型原子滤光器相比,具

\* 国家自然科学基金(60077019)资助课题。

E-mail: lulu@ele.pku.edu.cn

收稿日期:2003-05-19;收到修改稿日期:2003-11-07

有更窄的线宽。为了克服锁频时的跳模干扰,我们采用级联佛克脱型原子滤光器的构思,将佛克脱型原子滤光器的多峰结构改造为单峰结构,且其单峰线宽窄于法拉第型原子滤光器的单峰线宽,适于锁频。为了适应卫星间的多普勒频移,可利用原子滤光器的可调谐特性,由于法拉第型原子滤光器比佛克脱型原子滤光器具有更强的可调谐能力,因此接收端采用法拉第型原子滤光器进行滤光。

## 2 级联佛克脱型原子滤光器的理论分析

佛克脱型原子滤光器与法拉第型原子滤光器类似,呈多峰结构。图 1 为  $B=0.01\text{T}$ ,  $T=100\text{ }^\circ\text{C}$  时佛克脱型原子滤光器的透射谱。

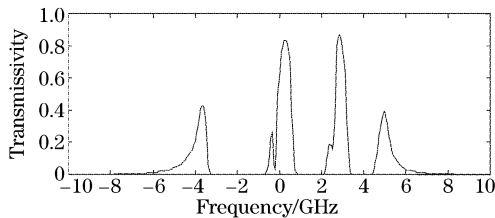


Fig.1 The transmission spectrum of VADOF

佛克脱型原子滤光器的透射谱具有温度和磁场调谐特性。当汽室温度或外加磁场强度增加时,透射边峰向远离中心频率的方向移动,而处于中间位置的透射峰也有高低和位置的变化。基于此特性,考虑采用两级佛克脱型原子滤光器串联的结构,并且汽室温度、磁场强度以及汽室长度等工作参量均可独立调节(图 2)。通过合理地调整两个佛克脱型原子滤光器的工作参量,可使前级佛克脱型原子滤光器的某个透射峰与后级佛克脱型原子滤光器的某个透射峰的中心频率重合,从而保留下来,而前级与后级其他透射峰之间有相对频移而被抑制掉。

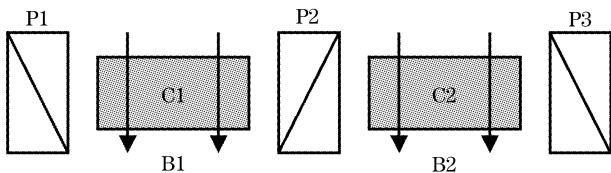


Fig.2 The configuration of linked VADOF

级联佛克脱型原子滤光器结构见图 2。其中  $P1, P2, P3$  是三个偏振方向依次转过  $\pi/2$  的格兰棱镜;  $C1, C2$  为两个分别能独立调节温度和磁场强度的铷汽室。  $P1, C1, P2$  构成前级原子滤光器;  $P2, C2, P3$  则构成后级原子滤光器。

下面对级联佛克脱型原子滤光器的理论进行分析。

设入射光和出射光的坐标系如图 3 所示。

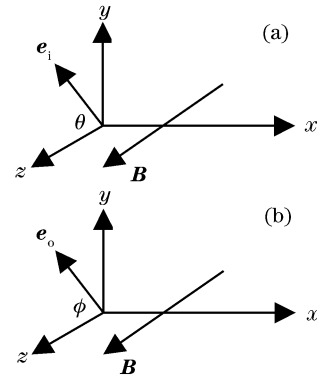


Fig.3 The Cartesian coordinates of input light (a) and output light (b) of VADOF

其中激光传输方向为  $x$  轴。磁场  $B$  垂直  $x$  轴,与  $z$  轴同向。

我们以磁场  $B$  为参考方向,选取激光光场的平行分量和垂直分量为基矢,利用琼斯矩阵来计算级联佛克脱型原子滤光器的透射谱。

于是,入射光场可以写成矩阵

$$E_i = \begin{bmatrix} E_{i//} \\ E_{i\perp} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中  $//$  对应于光场的平行分量,  $\perp$  对应于光场的垂直分量。偏振器  $P1$  的起偏方向为  $e_i, e_o$  为检偏器  $P2$  的偏振方向,且  $e_i \perp e_o$ 。半导体激光器出射光经过  $P1$  起偏后,可以看成是平行分量和垂直分量的叠加。  $e_i$  与平行方向的夹角为  $\theta$ ,见图 3。格兰棱镜  $P1$  和  $P3$  的偏振方向一致,其琼斯矩阵可写为

$$T_{P1} = T_{P3} = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \cos \theta \sin \theta \\ \cos \theta \sin \theta & \sin^2 \theta \end{bmatrix}. \quad (2)$$

格兰棱镜  $P2$  的偏振方向与  $P1$  和  $P3$  垂直,其琼斯矩阵可以表示为

$$T_{P2} = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & -\cos \theta \sin \theta \\ -\sin \theta \cos \theta & \sin^2 \theta \end{bmatrix}. \quad (3)$$

当起偏器  $P1$  的偏振方向与磁场方向成  $45^\circ$  角时,根据(2)式和(3)式,有

$$T_{P1} = T_{P3} = \begin{bmatrix} 1/2 & 1/2 \\ 1/2 & 1/2 \end{bmatrix}, T_{P2} = \begin{bmatrix} 1/2 & -1/2 \\ -1/2 & 1/2 \end{bmatrix}.$$

两个铷汽室的琼斯矩阵分别为

$$T_{C1} = \begin{bmatrix} \exp(-ikn_{1//} \cdot l_1) & 0 \\ 0 & \exp(-ikn_{1\perp} \cdot l_1) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$T_{C2} = \begin{bmatrix} \exp(-ikn_{2//} \cdot l_2) & 0 \\ 0 & \exp(-ikn_{2\perp} \cdot l_2) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

其中  $l_1$  和  $l_2$  分别为汽室 C1, C2 的长度,  $k = \omega/c$ 。根据文献[4], 可得

$$\begin{cases} n_{//} = 1 + \frac{1}{4} \{ (\chi_{xx} + \chi_{yy} + [(\chi_{xx} - \chi_{yy})^2 + 4\chi_{xy}\chi_{yx}]^{1/2}) \}, \\ n_{\perp} = 1 + \frac{1}{4} \{ (\chi_{xx} + \chi_{yy} - [(\chi_{xx} - \chi_{yy})^2 + 4\chi_{xy}\chi_{yx}]^{1/2}) \}, \end{cases} \quad (6)$$

(6) 式中  $\chi$  是佛克脱型原子滤光器在  $xyz$  坐标系下极化率张量矩阵。其中佛克脱型原子滤光器在  $xyz$  坐标系下极化率张量矩阵元如下:

$$\begin{cases} \chi_{xx} = \frac{Ne^2 f}{4m\omega_0 \epsilon_0} \frac{\sqrt{\ln 2}}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{i}{\Delta\nu_D} [W(\delta\nu - \nu_s + ia) + W(\delta\nu + \nu_s + ia)], \\ \chi_{yy} = \frac{Ne^2 f}{4m\omega_0 \epsilon_0} \frac{\sqrt{\ln 2}}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{i}{\Delta\nu_D} [W(\delta\nu - \nu_s + ia) + W(\delta\nu + \nu_s + ia)], \\ \chi_{zz} = \frac{Ne^2 f}{4m\omega_0 \epsilon_0} \frac{\sqrt{\ln 2}}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{i}{\Delta\nu_D} [W(\delta\nu - \nu_p + ia) + W(\delta\nu + \nu_p + ia)], \\ \chi_{xy} = \frac{Ne^2 f}{4m\omega_0 \epsilon_0} \frac{\sqrt{\ln 2}}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{-1}{\Delta\nu_D} [W(\delta\nu - \nu_s + ia) + W(\delta\nu + \nu_s + ia)], \\ \chi_{yx} = \frac{Ne^2 f}{4m\omega_0 \epsilon_0} \frac{\sqrt{\ln 2}}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{1}{\Delta\nu_D} [W(\delta\nu - \nu_s + ia) + W(\delta\nu + \nu_s + ia)], \\ \chi_{xz} = \chi_{zx} = \chi_{yz} = \chi_{zy} = 0, \end{cases} \quad (7)$$

其中  $W$  为等离子色散函数<sup>[5]</sup>, 其定义为

$$W(x + iy) = \frac{i}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\exp(t^2)}{x + iy - t} dt = W_{Re} + iW_{Im}, \quad (8)$$

将(7)式代入(6)式中可以得出  $n_{//}$  和  $n_{\perp}$  的表达式。

出射光场的矩阵表达形式为

$$\begin{bmatrix} E_{t//} \\ E_{t\perp} \end{bmatrix} = \mathbf{T}_{P3} \mathbf{T}_{C2} \mathbf{T}_{P2} \mathbf{T}_{C1} \mathbf{T}_{P1} \mathbf{E}_i. \quad (9)$$

故级联佛克脱型原子滤光器的总透过率为:

$$n_{tr} = \frac{\vec{E}_t^* \cdot \mathbf{E}_t}{\vec{E}_i^* \cdot \mathbf{E}_i}, \quad (10)$$

图 4 是对(10)式进行编程计算, 得到的级联佛克脱型原子滤光器的透射谱。两级佛克脱型原子滤光器的参量分别为: 汽室温度  $T_1 = 95^\circ\text{C}$ ,  $T_2 = 90^\circ\text{C}$ ; 外加磁场强度  $B_1 = 0.011\text{ T}$ ,  $B_2 = 0.025\text{ T}$ ; 汽室长度  $C_1 = 2.0\text{ cm}$ ,  $C_2 = 4.5\text{ cm}$ 。该透射谱的中间峰 T 透过率为 0.7204, 单峰宽度为 550 MHz。

从图 4 可以看出, 级联佛克脱型原子滤光器基本上是单峰结构, 比佛克脱型原子滤光器具有更强的滤光作用。同时, 级联佛克脱型原子滤光器采用两个正交偏振场串联。理论上, 级联佛克脱型原子滤光器的噪声抑制比是两个正交偏振场抑制比的乘积, 即  $10^{-5} \times 10^{-5} = 10^{-10}$ 。因此, 级联佛克脱型原子滤光器比单个佛克脱型原子滤光器具有更高的噪

声抑制比。

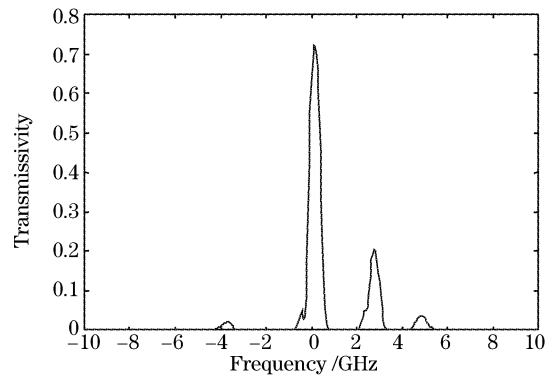


Fig. 4 The transmission spectrum of linked VADOF

### 3 采用级联佛克脱型原子滤光器的新型卫星激光链路系统

#### 3.1 采用级联佛克脱型原子滤光器的新型激光信标锁频方案

锁频方案的原理框图如图 5 所示。由光反馈系统(上虚线框)和电扫描系统(下虚线框)组成。在光反馈系统中, 由级联佛克脱型原子滤光器、单模半导体激光器、分束镜、以及全反射镜构成一个外腔半导体激光器, 稳定激光信标频率。电扫描系统由光电探测器、前置放大器、模数转换器、微控制器、数模转换器以及激光二极管驱动电源等构成。

电扫描系统采用单片机控制的数字反馈系统，能够精确反馈级联佛克脱型原子滤光器透过率的变化，并及时地作出相应的决策；同时可以实现加电后系统自动“寻找”并锁定在滤光器透射峰上，失锁后系统也能自动恢复锁定。另外，采用光反馈系统，降低了半导体激光器的电调率（即改变单位注入电流时，激光器输出频率的变化量），减小了电流波动等干扰因素的影响，提高了半导体激光器工作于级联佛克脱型原子滤光器透射峰的稳定性。

该信标方案的锁频元件为级联佛克脱型原子滤光器，其超窄带线宽不仅可以满足光反馈的要求，而且可以使信标激光的锁定更加稳定，避免了激光跳模这一不稳定因素；同时，级联佛克脱型原子滤光器工作所需的横向磁场可以从永久磁铁很容易地获得，因而该方案更易于实现小型化和一体化。

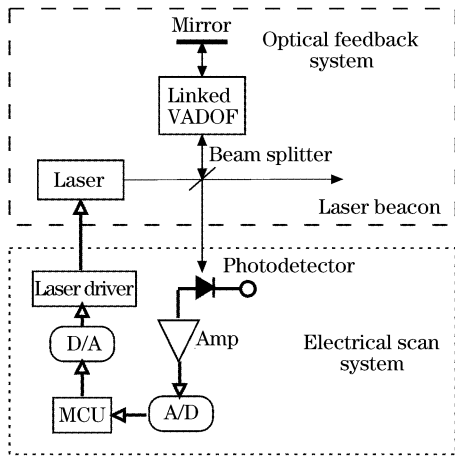


Fig. 5 The novel scheme of laser frequency locking with linked VADOF

### 3.2 采用级联佛克脱型原子滤光器锁频和法拉第型原子滤光器滤光的光链路系统

结合上述级联佛克脱型原子滤光器的锁频方案以及法拉第型原子滤光器的窄带滤光特性和多峰及可调谐特性，我们提出采用级联佛克脱型原子滤光器锁频和法拉第型原子滤光器滤光的新型光链路系统。

该方案的实施过程是：当卫星间激光通信系统进入信标捕捉阶段时，信标发射机将信标激光频率锁定在级联佛克脱型原子滤光器的透射峰上，而接收机根据轨道方程、捕捉起始时刻、卫星位置等参量计算出多普勒频移，利用法拉第型原子滤光器的某个单峰及可调谐特性，将其透射峰中心频率与发射机级联佛克脱型原子滤光器透射峰的间距调节至大致等于卫星间多普勒频移，然后进行滤光接收。由于卫星运动的速度不断变化，多普勒频移也随着发生变化。通过实时调节发射、接收滤光趋的温度和

磁场，使发射、接收透射峰间距的变化与多普勒频移的变化相匹配，则可以保证在整个捕捉过程中，信标光频率始终落在接收滤光器带宽内，从而补偿由于卫星间相对运动产生的多普勒频移<sup>[6]</sup>。

我们在室内实验的基础上，进行了室外50 m点对点的发射和接收对准实验。图6是新方案的实验系统框图。上虚线框是信标发射机，采用图5的级联佛克脱型原子滤光器锁频方案，信标输出激光用斩波器模拟调幅信号；下虚线框是信标接收机的原理图，接收原子滤光器采用法拉第型原子滤光器，放置在50 m外。利用室内实验所测量的数据，设置两个原子滤光器的温度，在接收端原子滤光器后可以很好地接收到信标调幅信号。

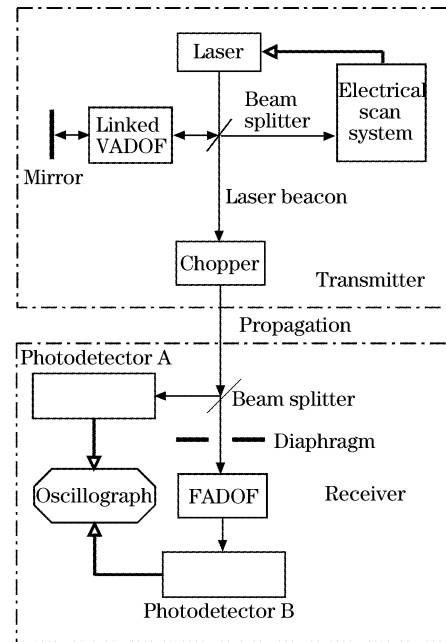


Fig. 6 The layout of experimental system for laser beam acquisition

图7为通过斩波器后的信标发射信号[图7(a)]

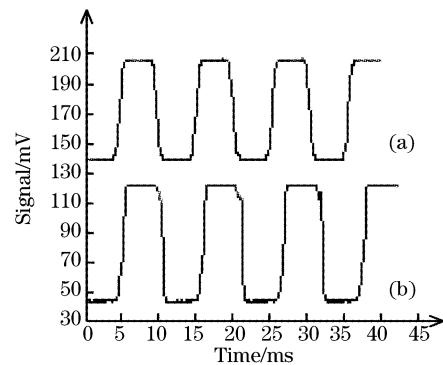


Fig. 7 Transmitted signal (a) and received signal (b) at the range of 50 m

和接收端原子滤光器后的接收信号[图 7(b)]。结果表明,外场实验联调成功。

**结束语** 利用级联佛克脱型原子滤光器的超窄带线宽以及高噪声抑制比等特性,提出信标发射端采用级联佛克脱型原子滤光器锁频,接收端采用法拉第型原子滤光器滤光的新型卫星激光链路系统。该方案避免了信标激光频率的跳模干扰,具有较高的频率稳定性,接收端利用法拉第型原子滤光器的多峰及可调谐特性适应卫星间多普勒频移效应,充分发挥了原子滤光器的超窄带滤光作用。并在外场完成了 50 m 的实验,实验结果表明了该系统的可行性。

#### 参 考 文 献

- 1 Bloom S, Chan V, Liu C S. High-elevation terrestrial validation of BMDO lasercom system at 1.1 Gbit/s. *Proc. SPIE*, 1995, **2381**: 113~128
- 2 Korevaar E, Hofmeister R J, Schuster J *et al.*. Design of satellite terminal for BMDO lasercom technology demonstration. *Proc. SPIE*, 1995, **2381**: 60~71
- 3 Wang Jiangbo, Tang Junxiong, Duan Minghao. Mechanism of Voigt anomalous dispersion optical filter. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **21**(3): 357~362 (in Chinese)
- 4 Wang Jiangbo, Tang Junxiong, Duan Minghao. Research on the mechanism and performances of anomalous dispersion atomic optical filter with off-axis incident beam. *Acta Electronica Sinica* (电子学报), 2000, **28**(12): 38~40 (in Chinese)
- 5 Corney A, Kibble B, Series G W. The forward scattering of resonance radiation, with special reference to double resonance and level-crossing experiments. *Proc. Roy. Soc. A, Mathematical and Physical Sciences*, 1966, **293**(1432): 70~93
- 6 Yu Shuiqing, Tang Junxiong, Xiao Haiqiao. An approach using multi-peak and tunable characteristic of atom filter in inter-satellite laser link acquisition system. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **21**(7): 861~865 (in Chinese)