

文章编号 : 0253-2239( 2001 )07-0861-05

# 原子滤光器多峰及可调谐特性在卫星光链路 捕捉系统中应用探讨\*

俞水清 汤俊雄

( 北京大学电子学系 , 量子信息与测量教育部重点实验室 , 北京 100871 )

摘要 : 从轨道方程出发 , 对影响卫星光链路接收机带宽的主要因素——多普勒频移进行了研究。在对法拉第反常色散滤光器( FADOF )透射及调谐特性进行理论和实验研究的基础上 , 提出利用法拉第反常色散滤光器的多峰及可调谐特性的多种新方案来适应不同轨道捕捉点的需要。滤光器带宽典型数据为 0.01 nm ~ 0.02 nm。

关键词 : 卫星光通信链路 ; 法拉第反常色散滤光器 ; 多峰 ; 调谐 ; 多普勒频移

中图分类号 : TN929.1 文献标识码 : A

## 1 引 言

卫星光链路的建立是卫星激光通信的前提条件 , 它是通过瞄准、捕捉和跟踪三个阶段来完成的。捕捉过程是光链路建立的难点 , 为减少捕捉时间 , 要求实现宽视场角接收。而视场角的展宽受到太阳背景辐射的限制 , 在接收系统中引入优质滤光器可以滤除背景辐射 , 从而展宽视场角。新型量子器件——法拉第反常色散滤光器<sup>[1]</sup>可以实现超窄带宽 , 是空间光通信的理想滤光器件。美国 Thermo Trex 研究所首次在卫星光通信链路中采用法拉第反常色散滤光器<sup>[2]</sup> , 为此成为美国 1996 年技术创新 发现奖航空航天类五项入围技术之一。

由于自由状态激光器频率的漂移使其容易逸出法拉第反常色散滤光器通带范围 , 因此需要将信标激光发射频率锁定在法拉第反常色散滤光器的某个透射峰上。而接收机滤光器的透射峰也调谐在该频率上 , 这样实现发、收系统频率匹配。但是卫星间相对运动的多普勒频移会使到达接收机的光频产生变化。文献 [2] 认为接收端法拉第反常色散滤光器必须适应多普勒频移 , 因而不可能采用较窄带宽值( 典型数据为 0.02 nm ~ 0.05 nm )。

本文与文献 [2] 的差别在于 , 不是一味地展宽法拉第反常色散滤光器带宽以适应多普勒频移 , 而是充分利用法拉第反常色散滤光器的可调谐及多峰特性 , 使之既能满足多普勒频移又能有效地使用较窄

的带宽值。本文特色在于 : 1) 从轨道方程出发 , 首次计算和分析了不同轨道倾角及高度下圆形低轨道卫星( LEO ) 和同步轨道卫星( GEO ) 的多普勒频移规律 ; 2) 研究了法拉第反常色散滤光器与建立光链路有关的特性 , 特别是磁场、温度调谐特性并给出了实验曲线 , 据悉 , 前者属于首次实验报道 , 此外 Rb 同位素法拉第反常色散滤光器透射谱的研究也属首次 ; 3) 以轨道半径 7000 km 不同倾角的圆形低轨道卫星和同步轨道卫星链路为例 , 提出了利用法拉第反常色散滤光器的多峰及可调谐特性的多种新方案来适应不同轨道捕捉点的需要。

## 2 卫星间多普勒频移随轨道倾角及高度变化的规律

多普勒频移量对接收机滤光器参数有较大影响 , 因此在捕捉系统设计中 , 必须充分考虑卫星间多普勒频移。计算卫星轨道 , 需要用轨道方程<sup>[3]</sup> , 在得出卫星轨道运动参数( 位置、速度 ) 的基础上 , 可以计算出信标光的多普勒频移。本文总结了轨道倾角及轨道高度对多普勒频移的影响。

1) 轨道倾角对多普勒频移的影响。图 1 所示为轨道半径为 7000 km、不同轨道倾角下圆形低轨道卫星与同步轨道卫星在一天内( 86400 s ) 的多普勒频移随时间变化曲线。

从图中可以看出以下几个规律 : ( i ) 多普勒频移随时间呈现周期性变化的规律 ; ( ii ) 频移最大值与倾角无关 ; ( iii ) 轨道倾角对周期性规律产生影响。

\* 国家自然科学基金( 69772011 ) 资助项目。

收稿日期 : 1999-11-02 ; 收到修改稿日期 : 2000-03-13

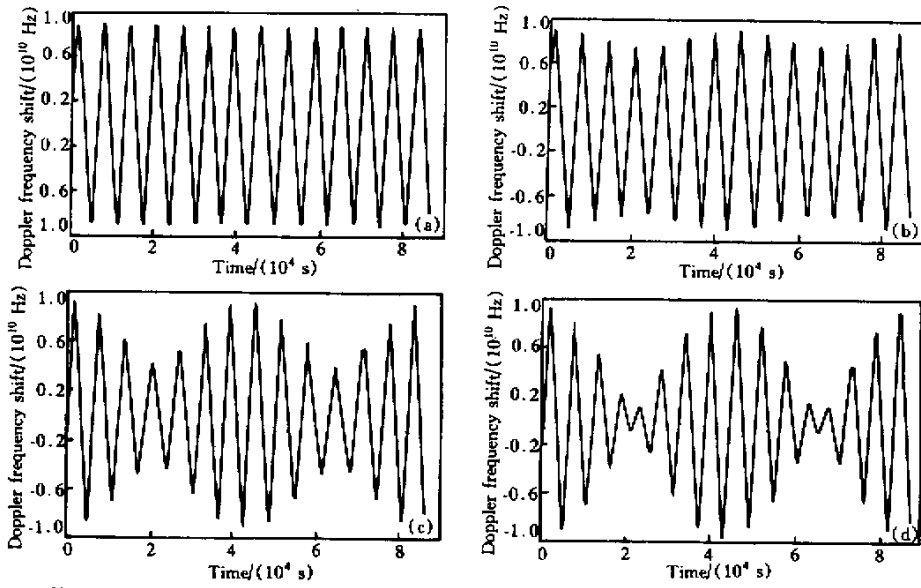


Fig.1 Doppler frequency shift in different orbit angles. (a)0°;(b)30°;(c)60°;(d)90°

2) 轨道半径对多普勒频移的影响。图 2 给出了多普勒频移的最大值随轨道半径变化的关系曲线。可以看出 随着轨道半径增加 ,两颗卫星之间的多普勒频移减小。

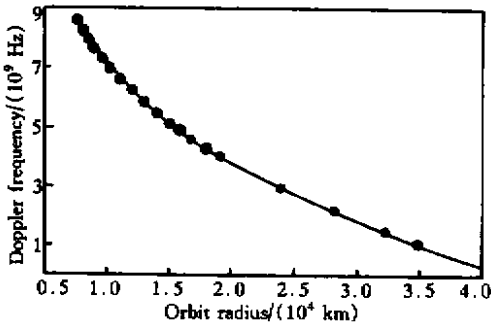


Fig.2 Maximal Doppler frequency shift vs orbit radius curve

### 3 法拉第反常色散滤光器特性的理论及实验研究

卫星光链路接收端中采用法拉第反常色散滤光器的方案有多次报道<sup>[2,4,5]</sup>,但这些方案中的法拉第反常色散滤光器带宽都受限于多普勒频移。为了充分发挥其优质滤光作用 ,必须对法拉第反常色散滤光器与卫星链路建立相关的一些特性有深入的了解。Rb-法拉第反常色散滤光器(780 nm),由于同位素效应 ,造成 Rb<sup>85</sup>、Rb<sup>87</sup>和天然 Rb 三种滤光器透射谱各不相同。而且改变法拉第反常色散滤光器的工作条件(温度、磁场),可以调谐其透射峰频率。

#### 3.1 Rb<sup>85</sup>、Rb<sup>87</sup>、天然 Rb 滤光器透射谱的多峰特性

图 3 给出了典型的三种法拉第反常色散滤光器

的透射谱理论曲线(汽室温度为 105°,磁场强度为  $300 \times 10^{-4}$  T,汽室长度为 5 cm,自上至下分别为: Rb<sup>85</sup>、Rb<sup>87</sup>、天然 Rb,图中工作频率的零点对应零磁场时的 Rb 的  $5S_{1/2}-5P_{3/2}$  跃迁)。从三种法拉第反常色散滤光器的透射谱可以看出它们在滤光特性上的共性与差异。

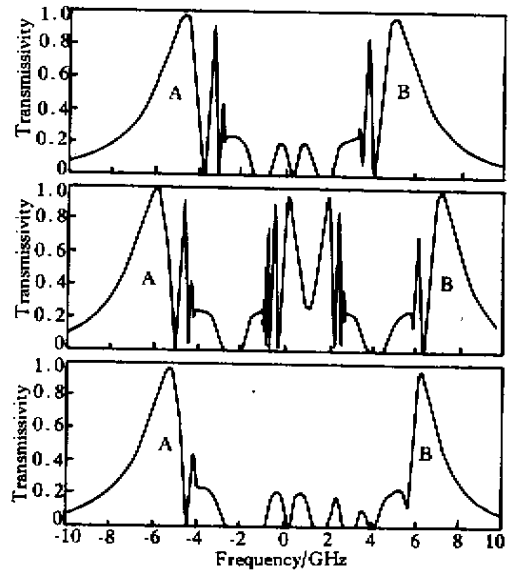


Fig.3 Theoretical transmission spectrum curve of FADOF

其共同点在于 :1)多峰性 :Rb 法拉反常色散波滤光器有两个明显的透射峰 ,分别称为 A 峰、B 峰 ;2)两个边峰透过率很高 (理论值约 100%)。

其差异为 :1)除两个边峰外 ,Rb<sup>87</sup> 法拉反常色散波滤光器在中心频率处还有一个带宽达到 4 GHz 的宽透射峰 ;2)在同样的工作温度和磁场下 ,三种滤光器边峰间距不同 ,同位素 Rb<sup>85</sup> 法拉反常色散波

光器的主峰间距较小,且它们透射峰的单峰带宽也各不相同。

### 3.2 法拉第反常色散滤光器透射峰调谐特性的实验研究

图 4 为测量原子滤光器透射谱的示意图,正交格兰棱镜  $P_1$ 、 $P_2$  与置于通电螺线管 A 内的原子汽室构成法拉第反常色散滤光器(磁场方向如图),特殊设计的螺线管磁场使得改变电流可以获得连续变化的磁场。汽室外部通过电热丝实现温度控制。

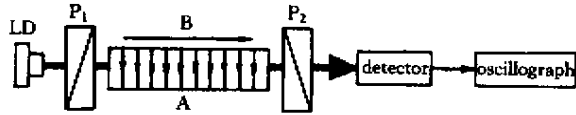


Fig.4 Experiment arrangement

#### 1) 磁场调谐特性

天然 Rb 法拉第反常色散滤光器的左右两个透射峰在工作磁场强度增大时分别向外侧移动,使两个透射峰的频率间距增大,同时每个透射峰的单峰带宽加宽。由图 5 可知,在 125 °C 的工作温度下,汽室长度为 5 cm,法拉第反常色散滤光器边峰随磁场调谐能力约为 1.23 GHz/(100 × 10<sup>-4</sup> T)。且汽室温度越高,磁场调谐能力越强。

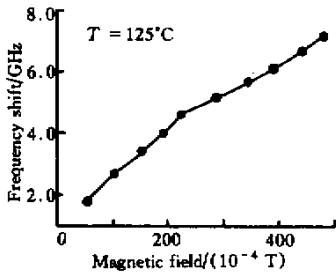


Fig.5 Frequency shift of transmission peak vs magnetic field experimental curve

#### 2) 温度调谐特性

图 6 给出了法拉第反常色散滤光器边峰随温度的调谐特性,调谐能力约为 0.13 GHz/°C。

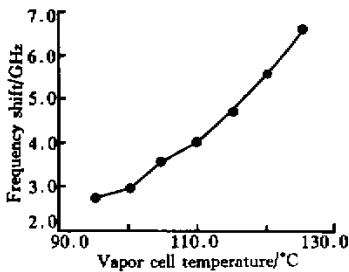


Fig.6 Frequency shift of transmission peak vs temperature experimental curve

## 4 合理利用法拉第反常色散滤光器特性的多样激光链路发射、接收方案

图 7 所示为圆形低轨道卫星和同步轨道卫星轨道运行示意图,圆形低轨道卫星轨道倾角为 0°,箭头为卫星运动方向。在圆形低轨道卫星和同步轨道卫星的所有可见轨道范围中,二者之间的运动参数有很大变化,同步轨道卫星到圆形低轨道卫星轨道的切点和最近距离点(轨道顶点)是两个极端,其他轨道区段参数均介于二者之间。顶点处具有最小的空间距离、最大的卫星间相对运动角速度、接近于零的多普勒频移、大的频移变化率,而切点处具有中等的空间距离和接近于 0 的相对运动角速度、最大的多普勒频移和极小频移变化。圆形低轨道卫星轨道上的捕捉点对应的时间点称为捕捉时间,由于捕捉有一个过程,上述应是一个时间段。卫星间的多普勒频移特性在不同捕捉点有很大的不同,在法拉第反常色散滤光器的设计中应保证接收端滤光器的高透过率、窄带宽,而且还应保证在捕捉预留时间内,即使考虑多普勒频移,信标激光频率仍应落在接收滤光器带宽内。因此在设计中,应当综合利用法拉第反常色散滤光器的多峰特性、可调谐性,甚至在发射、接收端采用不同的滤光器去适应在不同点进行捕捉的要求。下面以半径为 7000 km 的圆轨道为例讨论如何利用法拉第反常色散滤光器的多种特性来适应卫星多普勒频移。

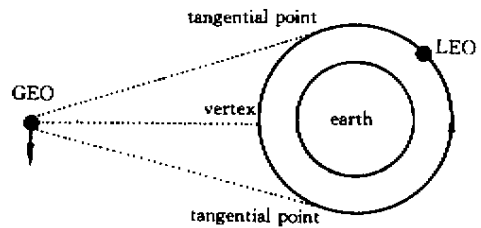


Fig.7 LEO-GEO movement sketch

### 4.1 双峰间距补偿频移方案(适应切点捕捉点)

图 1 显示,多普勒频移的最大值出现在切点处,但多普勒频移相对于时间的变化率最小。在切点前后还存在多普勒频移的变化方向颠倒,捕捉时间段如果覆盖倒向段,可以充分减小多普勒频移的变化范围。为满足多普勒频移要求,接收端法拉第反常色散滤光器透射峰带宽不必设计成比最大频移数值宽,而是充分利用法拉第反常色散滤光器的多峰特性,将信标发射频率和接收法拉第反常色散滤光器透射峰之间的频率差设置成与最大频移相等,切点处频移随时间变化又不大,只要接收端法拉第反常

色散滤光器单峰带宽大于频移变化量,就可以满足多普勒频移要求。

满足上述频率条件的法拉第反常色散滤光器的工作条件如图 8 所示(图 8(a)):发射端法拉第反常色散滤光器  $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $350 \times 10^{-4}\text{ T}$ , 汽室长度  $2\text{ cm}$ ; 图 8(b) 接收端法拉第反常色散滤光器  $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $250 \times 10^{-4}\text{ T}$ , 汽室长度  $5\text{ cm}$ 。以图 8(a) 的 A 峰作为圆形低轨道信标发射锁频, 图 8(b) 的 B 峰作为同步轨道卫星捕捉系统接收滤光, 可以满足上述的多普勒频移及其变化量要求。此方案中接收端法拉第反常色散滤光器的带宽为  $0.009\text{ nm}$ 。

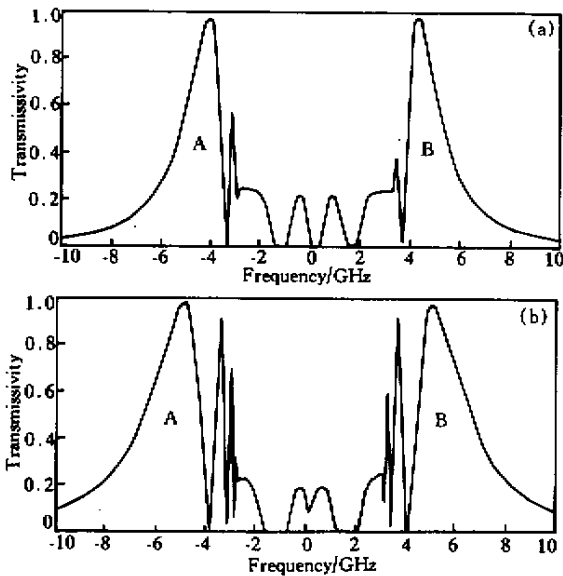


Fig. 8 FADOF transmission curve in transmitter and receiver

#### 4.2 可调谐方案(适应顶点捕捉点)

如选顶点为捕捉点, 其多普勒频移值小但变化大, 如按方案(1), 以接收法拉第反常色散滤光器单峰带宽来补偿频移变化量, 则会使滤光带宽增加, 为此提出可调谐设计。由于频移小, 可将信标光频率锁定在法拉第反常色散滤光器 A 峰, 而接收端也使用另一个法拉第反常色散滤光器的 A 峰, 顶点处频移变化大, 则需要实时调谐接收法拉第反常色散滤光器的频率, 以补偿多普勒频移的变化。采用  $\text{Rb}^{85}$  法拉第反常色散滤光器设计见表 1。表中给出了捕捉开始时发射、接收法拉第反常色散滤光器的参数设计, 随着卫星运动, 应实时调整法拉第反常色散滤光器工作条件以适应多普勒频移, 表中给出了捕捉结束时法拉第反常色散滤光器调整后的工作参数。采用这种可调谐方案, 最大好处是压缩了接收滤光器带宽, 由于法拉第反常色散滤光器单峰调谐能力可以大于  $10\text{ GHz}$ , 完全适应多普勒频率大范围的

变化。

Table 1. The designed parameters for FADOF (cell length  $4\text{ cm}$ )

	start point		end point	
	transmitter	receiver	transmitter	receiver
temperature/ $^{\circ}\text{C}$	115	95	95	115
magnetic field/ $10^{-4}\text{ T}$	350	220	220	350
frequency shift/GHz	-5.20	-2.95	-2.95	-5.20
receiver bandwidth/GHz	1.50		4.70	

#### 4.3 发射、接收采用不同种类法拉第反常色散滤光器方案(适应切点与顶点之间的捕捉点)

温度比较低的时候  $\text{Rb}^{87}$  法拉第反常色散滤光器在工作频率中心附近有一个通带达  $4\text{ GHz}$  的平坦透射峰, 峰值透射率约  $90\%$ , 如图 9 所示。因此利用  $\text{Rb}^{87}$  法拉第反常色散滤光器作为接收滤光器, 可以适应较大的频率变化;  $\text{Rb}^{85}$  法拉第反常色散滤光器由于在相同情况下, 单峰具有更大的调谐能力, 用于发射端锁频, 可以使激光波长在较大的范围内变动。

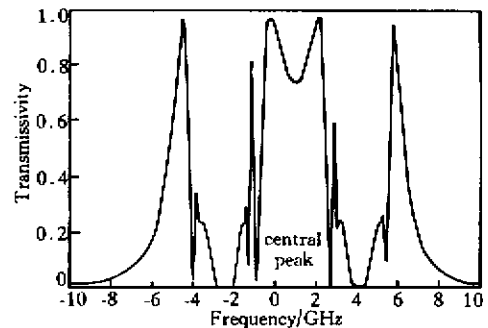


Fig. 9  $\text{Rb}^{87}$ -FADOF transmission curve in receiver (vapor cell length:  $3\text{ cm}$ , temperature:  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , magnetic field:  $200 \times 10^{-4}\text{ T}$ )

设计方案: 已知在开始捕捉时(圆形低轨道卫星轨道倾角为  $60^{\circ}$ , 捕捉点介于切点和顶点之间), 多普勒频移为  $7.00\text{ GHz}$ , 当捕捉结束时, 频移为  $2.50\text{ GHz}$ 。若以图 9 中央峰接收  $4\text{ GHz}$  带宽不足以补偿上述  $4.50\text{ GHz}$  频移, 但适当调谐发射信标频率, 仍能满足多普勒频移。即当捕捉开始时, 调谐滤光器工作参数, 使信标光频率落在接收滤波器中央峰的高频段, 而当捕捉结束时, 信标激光仍能落于中央峰的低频段。表 2 为发射端法拉第反常色散滤光器设计参数。

该方案由于利用了接收滤光器相对较宽的中央透射峰, 减小了发射端滤光器的调谐范围, 但接收端滤光器带宽仍限制在  $0.01\text{ nm}$ 。此方案发射端频率调谐不大, 在工程应用中较易实现, 且能适应较大

普勒频移,具有实际意义。

Table 2. The designed parameters for transmitting end of FADOF ( cell length 3 cm )

	temperature /°C	magnetic field / $10^{-4}$ T	frequency shift /GHz
start point	110	320	- 4.50
end point	95	200	- 2.90

结语 本文针对圆形低轨道卫星-同步轨道卫星激光链路多普勒频移的规律,利用原子滤光器多峰、可调谐的特点,提出了三种设计方案,以分别适应不同的捕捉点。与国外方案比,可以减少滤光器带宽。在给出的设计中,接收端滤光器典型带宽 0.01 nm,最大 0.02 nm,窄带宽有利于实现宽视场角接收并

减少捕捉时间。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] 陈怀林,彭玉峰,汤俊雄. 一种新型原子共振滤光器研究. 光学学报, 1992, **12**( 9 ) 841 ~ 869
- [ 2 ] Korevaar E, Bloom S, Slatnick K *et al.*. Status of SDIO/IS&T lasercom testbed program. *Proc. SPIE*, 1993, **1866** :116 ~ 127
- [ 3 ] 周忠谟,易杰军. GPS 卫星测量原理与应用. 北京:测绘出版社, 1992. 12
- [ 4 ] Biswas A, Williams G, Wilson K E. Result of the STRV-2 lasercom terminal evaluation tests. *Proc. SPIE*, 1998, **3266** 2 ~ 13
- [ 5 ] Arnold R, Woodbridge E, Smith G *et al.*. 500 kilometer 1 GBPS airborne laser link. *Proc. SPIE*, 1998, **3266** :178 ~ 197

## An Approach Using Multi-Peak and Tunable Characteristic of Atom Filter in Inter-Satellite Laser Link Acquisition System

Yu Shuiqing Tang Junxiong Xiao Haiqiao

( Department of Electronics , Local Fiber Optic Communication Networks and Advanced Optical Communication System Lab . , Peking University , Beijing 100871 )

( Received 2 November 1999 ; revised 13 March 2000 )

**Abstract :** The Doppler frequency shift , the main factor restricting the bandwidth of receiver in inter-satellite laser link , with orbit equations is calculated. On the base of theoretical and experimental study in transmission and tunable characteristic of Faraday anomalous dispersion optical filter ( FADOF ) , several novel schemes are proposed based on FADOF's multi-peak and tunable characteristic , to meet the acquisition requirements in different orbit positions. Typical bandwidth of filter is 0.01 nm ~ 0.02 nm.

**Key words :** inter-satellite laser communication link ; Faraday anomalous dispersion optical filter ; multi-peak ; tuning ; Doppler frequency shift