

文章编号: 0253-2239(2006)10-1447-6

深空光通信中的图像信标捕获技术

马 晶 徐科华* 谭立英

(哈尔滨工业大学可调谐激光技术国家级重点实验室, 哈尔滨 150001)

摘要: 为实现深空光通信链路建立过程中精确的对准,提出了一种深空光通信系统扩展信标的捕获方案。该方案以可视地球图像作为信标,在航天器上存储一幅信标图像作为参考图像,采用天线扫描的方式在各点对所瞄准的区域成像,利用像素扫描的方式,使参考图像和实际探测图像进行相关,在天线扫描完成以后,找出相关性最大的位置,即可认为在该点捕获到地球图像。在计算两图像相关系数的过程中,由于傅里叶-梅林变换幅度谱具有伸缩及旋转不变性,因此利用傅里叶-梅林变换即可消除两图像相关系数因为旋转和伸缩的影响。利用蒙特卡罗方法随机产生 1000 个视场,仿真结果表明, 3σ 内正确捕获到信标图像的概率为 99.6%,表明这是一种可行的方法。

关键词: 深空光通信; 傅里叶-梅林变换; 最小二乘法; 捕获

中图分类号: TN929.13 文献标识码: A

Image Beacon Acquisition for Deep Space Optical Communication

Ma Jing Xu Kehua Tan Liying

(State Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

Abstract: In order to achieve the accurate pointing during the course of deep space optical communication link setting up, a scheme is proposed to acquire the extend-beacon for deep space optical communication system, which uses visual earth image as beacon, and stores a beacon image in aircraft as reference image. CCD is adopted to image the pointing area based on antenna scan pattern. The correlation coefficient of the detected image and reference image is calculated based on pixel scan pattern. The location where the correlation coefficient is maximum is found out after antenna scan, which can be regard as the location where the beacon image is acquired. Because of the rotation and scale invariance of Fourier-Mellin transform, the effect from rotation and scale of image will be eliminated based on Fourier-Mellin transform. 1000 random fields of view are created using Monte-Carlo method, to simulate the progress of acquisition, and the result shows that the successful acquisition probability is 99.6% within 3σ , validating its feasibility.

Key words: deep space optical communication; Fourier-Mellin transform; least square method; acquisition

1 引 言

用激光进行深空信息传输,通信系统具有体积小,质量轻,功耗小,数据率高的优势。但是用激光通信系统进行深空信息的传输也面临严峻的挑战,这就是精确的对准要求。因此需要设计一套精确的捕获跟踪方案。为了维持航天器上光通信终端相对于上行链路的独立性,因此,常采用自然天体图像作为信标^[1]。

在链路建立过程中,跟瞄子系统通常根据地球和航天器的星历表来确定光通信终端的初始对准方向。由于航天器星历表和地球星历表误差及航天器上微动力学环境的影响,总是存在一定的瞄准误差,这时需要航天器跟瞄子系统按照一定的扫描方式来搜索地球图像。扫描完成后,根据地面站和地球图像中心位置关系来确定航天器上光通信天线的指向,本文将对此进行具体分析。

作者简介: 马 晶(1956~),男,辽宁开原人,哈尔滨工业大学光电子技术研究所教授,博士生导师,主要从事卫星光通信、光学信息处理和激光干涉测量等方面的研究。

* 通信联系人。E-mail: xukehua2001@163.com

收稿日期: 2005-12-01; 收到修改稿日期: 2006-05-19

2 捕获原理

采用地球图像作为信标,通常在航天器星载系统中存储一幅标准地球图像,用该图像作为参考,用来识别视场中的实际图像。识别的依据通常是根据地地球图像的特征,或是采用参考图像与实际探测的图像进行相关,与参考图像相关性最大的探测图像可认为是探测的地球图像。

采用地球图像作为信标,可通过地球星历表和航天器的星历表确定光通信终端天线初始对准方向。由于地球和航天器星历表误差、航天器姿控误差、航天器上微动力学环境和热力学形变的影响,地球图像并不一定总是进入航天器上光通信终端视场所对准的区域,而是以一定的概率分布出现在天球上的某个区域内,把该区域称为不确定区域,该区域对航天器上光通信终端所成的立体角称为不确定立体角。由于信标图像并不总是出现在光通信终端视场内,该终端需要在该不确定区域内进行扫描来捕获地球图像。通常的捕获方式有天线扫描和焦平面阵列扫描^[2],天线扫描的方式可能对航天器的姿态控制带来一定的影响,而焦平面阵列扫描的方式要求信标探测器的视场覆盖整个不确定区域,这将给背景光的抑制带来困难。因此在深空光通信中采用天线扫描和焦平面阵列扫描(像素扫描)相结合的方式。

通常的天线扫描方式有分行扫描、螺旋扫描、分行式螺旋扫描^[3]。在天线扫描过程中,在扫描轨迹的每一个特定位置停留一段时间,该时间段内信标探测器对天线所瞄准的区域进行成像。此时可通过像素扫描的方式计算参考图像和实际探测图像的相关性。在扫描完成以后,可控制光通信终端天线对准天线扫描阶段相关性最大的位置,这时,可认为地球图像已被成功捕获。

当地球图像被成功捕获以后,需要计算地球图像的中心位置,根据地球图像中心位置和地面站位置的相对关系,可控制光通信终端天线对准地面站方向。这时,可缩小信标探测器的视场,提高测量精度,使得光通信终端天线的对准方向更为精确。

3 捕获理论分析

在深空激光通信链路建立和运行的过程中,由地球和航天器星历表确定的光通信终端的初始对准方向通常都是以惯性坐标系作为参考,光束的控制都是在航天器的星上坐标系中进行,因此惯性坐标系中瞄准方向矢量需要通过坐标变换到星上坐标系

中。该矢量在星上坐标系中的方向可用方位角 θ_h 和俯仰角 θ_v 来表示。由于星历表误差,姿控误差及热力学形变的影响, θ_h 和 θ_v 总是存在一定的误差 ϵ_h, ϵ_v 。设两误差服从高斯分布,其概率密度函数为

$$f(\epsilon) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{\epsilon^2}{2\sigma^2}\right), \quad (1)$$

式中 ϵ 为角度误差, σ^2 为其方差。 ϵ_h, ϵ_v 相互独立,则其联合概率密度为

$$f(\epsilon_h, \epsilon_v) = \frac{1}{2\pi\sigma_h\sigma_v} \exp\left(-\frac{\epsilon_h^2}{2\sigma_h^2} - \frac{\epsilon_v^2}{2\sigma_v^2}\right), \quad (2)$$

式中 σ_h, σ_v 分别为角度误差 ϵ_h, ϵ_v 的方差。通常可根据航天器的技术参量确定不确定立体角 Ω_u 的大小,对应的不确定平面角为

$$\theta_u = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\Omega_u}. \quad (3)$$

为了简化分析,在航天器上光通信终端采用最为简单的分行扫描方式。分行扫描方式最终扫出的是一个矩形区域。

采用分行扫描方式,扫描范围覆盖整个不确定区域,则在该区域内成功捕获到信标的概率为

$$P = \int_{-\theta_u/2}^{\theta_u/2} \int_{-\theta_u/2}^{\theta_u/2} f(\epsilon_h, \epsilon_v) d\epsilon_h d\epsilon_v. \quad (4)$$

在深空光通信捕获过程中,设信标探测器的曝光时间为 T_e ,对参考图像和探测图像的处理时间为 T_s ,则实际每个位置停留时间为

$$T = T_e + T_s. \quad (5)$$

在图像信标捕获过程中,天线扫描要求覆盖整个不确定区域,因此,相邻两个位置的角间隔必须满足

$$d \leq \theta_{fov} / \sqrt{2}, \quad (6)$$

θ_{fov} 是信标探测器的视场。

则单场扫描完成的时间可表示为

$$T_u = \frac{\theta_u^2}{d^2} \cdot T, \quad (7)$$

如需要进行多场扫描,设扫描的场数为 q ,则完成时间为

$$T_f = q \cdot T_u = \frac{\theta_u^2}{d^2} \cdot T \cdot q. \quad (8)$$

在捕获过程中,对于每个扫描位置,需要通过像素扫描的方式来识别地球图像,识别的依据是使参考图像和探测图像具有最大相似性。而参考图像和实际探测图像可能因链路距离和方向的不同在角度和大小上存在一定的差异,直接利用两图像的相关性来判断信标图像出现的位置^[4,5],可能得到错

误的结论,因此需要对两图像进行处理。

任何图像都可以用一个二维矩阵来表示,设 $s(m, n)$ 为参考图像,其行数为 M ,列数为 N ,设 $r(m, n)$ 为 $s(m, n)$ 进行尺度和旋转变换的图像,设伸缩因子为 a ,旋转角度为 θ_0 ,则 $r(m, n)$ 可表示为

$$r(m, n) = s\left(m \frac{\cos \theta_0}{a} + n \frac{\sin \theta_0}{a}, -m \frac{\sin \theta_0}{a} + n \frac{\cos \theta_0}{a}\right),$$

$$m = 0, 1, \dots, M-1, \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (9)$$

令

$$\rho = \sqrt{m^2 + n^2}, \quad (10)$$

$$\theta = \arctan(n/m), \quad (11)$$

则(9)式可用极坐标可表示为

$$r(\rho, \theta) = s(\rho/a, \theta - \theta_0), \quad (12)$$

令

$$\xi = \ln \rho, \quad (13)$$

$$\xi_0 = \ln a, \quad (14)$$

显然, $\theta \leq 2\pi$, 设 ξ_m 为 ξ 的最大值, 则(12)式在对数极坐标系中可表示为

$$r(\xi, \theta) = s(\xi - \xi_0, \theta - \theta_0), \quad (15)$$

$$\xi \leq \xi_m, \quad \theta \leq 2\pi.$$

在对数极坐标系中,图像的伸缩和旋转都可以看成是该坐标系中两个轴上的平移,对上式进行傅里叶变换,由傅里叶变换的性质,坐标的平移仅影响其相位的变化,因此,其幅度应具有不变性。因此对于信标参考图像和实际探测图像,不论其大小或是角度是否一致,在对数极坐标系中其傅里叶变换的幅度应具有最大相似性。把 ξ_m 分成 M 段, 2π 分成 N 段, 则每小段的大小为

$$\Delta\xi = \xi_m/M, \quad \Delta\theta = 2\pi/N, \quad (16)$$

令

$$h = \xi \cos \theta = m \cdot \Delta\rho \cdot \cos(n \cdot \Delta\theta), \quad (17)$$

$$g = \xi \sin \theta = m \cdot \Delta\rho \cdot \sin(n \cdot \Delta\theta),$$

基于(15)式 ~ (17)式,利用二次插值可把 $r(\xi, \theta)$ 变换为矩阵 $R(m, n)$, $m = 0, 1, \dots, M-1, n = 0, 1, \dots, N-1$ 。对 $R(m, n)$ 进行二维离散傅里叶变换,求其幅度即可求得其幅度矩阵 $M_R(m, n)$ 。

在对数极坐标系中进行离散傅里叶变换等效于进行离散傅里叶-梅林变换^[6,7], 即

$$F_M(m, n) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{2\pi} r(\xi, \theta) \exp[i(m\xi + n\theta)] d\xi d\theta. \quad (18)$$

设 $M_s(m, n)$ 为参考图像在对数极坐标中傅里叶变

换的幅度,则 $M_s(m, n)$ 和 $M_R(m, n)$ 应具有最大相似性,两个矩阵之差满足最小二乘法

$$L = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} [M_s(m, n) - M_R(m, n)]^2, \quad (19)$$

定义 L 为误差系数,则 L 取得最小值的位置可认为是探测到地球图像的位置。

控制光通信终端天线对准该位置,则地球图像应出现在光通信终端视场中,这时可缩小信标探测器的视场,提高信标探测器的测量精度。计算出信标图像的中心,其中心可表示为

$$x = \frac{\sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} m \cdot s(m, n)}{\left[\sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} s(m, n) \right]}, \quad (20)$$

$$y = \frac{\sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} n \cdot s(m, n)}{\left[\sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} s(m, n) \right]},$$

计算出地球图像的中心位置,可根据地面接收站和地球图像中心的位置关系来控制光通信终端天线的指向,使其精确对准地面接收站方向,这时可认为系统完成对信标的成功捕获。

4 计算机仿真

为了简化分析,采用分行扫描方式进行信标的捕获。设不确定区域的中心为原点,方位角和俯仰角方向分别为 X 轴和 Y 轴,建立平面直角坐标系。由(3)式,不确定平面角大小为 θ_u , 则方位角 θ_h 和俯仰角 θ_v 不确定范围都为 $(-\theta_u/2, \theta_u/2)$, 设从第三象限开始扫描,扫描的起点坐标为 $(\sqrt{2}\theta_{fov}/2 - \theta_u/2, \sqrt{2}\theta_{fov}/4 - \theta_u/2)$, 扫描过程中探测器视场中心位置坐标可用递推公式来表示

$$x_1 = \frac{\sqrt{2}\theta_{fov}}{4} - \frac{\theta_u}{2}, \quad (21)$$

$$x_{i+1} = x_i + d,$$

$$y_1 = \frac{\sqrt{2}\theta_{fov}}{4} - \frac{\theta_u}{2}, \quad (22)$$

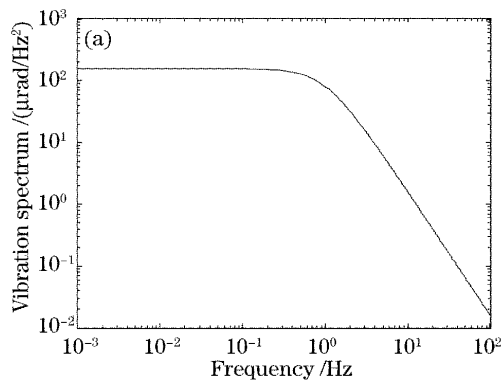
$$y_{i+1} = \begin{cases} y_i + (-1)^{i+1} \cdot d, & \theta_u/2 - |y_i| > d \\ y_i, & \theta_u/2 - |y_i| < d \end{cases}$$

根据当前航天器的发展现状,其指向精度可以达到 0.03° , 其姿态稳定度可以达到 $0.01^\circ/\text{s}^{[8]}$, 因此在大小为 10 mrad 的不确定视场角 θ_u 进行搜索,可以较高的概率捕获到信标图像,根据 θ_u 的大小可确定 3 倍方差的大小为 5 mrad 。直接让信标探测器的视场覆盖整个不确定区域,能保证较高的捕获概率,但是给背景的抑制带来了严重的挑战,设链路距离为火星到地球的平均距离,其大小为一亿公里 (10^8 km), 则地球对通信终端所成的张角为 0.1276 mrad , 因此选

信标探测器的视场为 1 mrad, 采用天线扫描结合像素扫描来捕获地球图像是一种更为理想的方式。为了防止地球图像出现在相邻位置的交界处, 导致误捕获, 保证扫描过程中相邻位置有一定的重叠, 设相邻两位置的间隔为 $2/3$ mrad, 则重叠区域为 $1/3$ mrad, 这样能确保肯定有一个位置能拍到完整的地球图像。设航天器上光通信终端为 20 cm, 通信光波长为 1064 nm, 光束的衍射极限为 $5.3 \mu\text{rad}$, 通常使光束角接近衍射极限是很困难的, 因此取光束束散角为 $10 \mu\text{rad}$, 则对准精度要求为 $5 \mu\text{rad}$, 显然, 选用像素阵列为 200×200 的 CCD, 在信标探测器为 1 mrad 时, 其一个像素对应的测量精度为 $5 \mu\text{rad}$, 即只要把信标中心误差控制在一个像素内即可满足要求。在搜索到信标图像以后, 可以采用缩小信标探测器视场或大面阵 CCD 的方法, 提高测量精度, 这样甚至允许信标中心误差达到几个像素, 完全可以满足对准跟踪精度要求^[9~12]。根据欧洲 Olympus 卫星平台振动频谱的实测结果^[13], 航天器卫星平台的振动功率谱密度函数为

$$S(f) = \frac{A}{1+f^2}, \quad (23)$$

其中 A 为振幅, f 为振动频率。据实测结果, 令 $A = 160$, 则航天器卫星平台的振动频谱如图 1(a) 所示,



由于航天器平台的振动集中在 100 Hz 以内, 因此, 采用蒙特卡罗方法产生均匀分布的随机数, 抽样生成满足 (23) 式所示的随机振动。随机振动如图 1(b) 所示。

设航天器上存储的参考图像如图 2(a) 所示, 这是一幅 $250 \text{ pixel} \times 250 \text{ pixel}$ 的图像, 设不确定区域内的图像如图 2(b) 所示, 这是一幅 $506 \text{ pixel} \times 506 \text{ pixel}$ 的图像, 则进入信标探测器对准的部分应为不确定区域内 $51 \text{ pixel} \times 51 \text{ pixel}$ 的一幅子图像, 不确定区域内的地球图像如图 2(c) 所示, 为 $26 \text{ pixel} \times 26 \text{ pixel}$ 。需要做的工作是利用参考图像在不确定区域内识别出实际信标图像。设信号处理时间为 100 ms, 天线在相邻两个位置的扫描时间间隔为 50 ms, 根据图 1(b) 所示的随机振动及 (2) 式所示的分布, 随机产生 1000 个不确定区域, 按图 3 原理进行计算机仿真, 仿真结果如表 1 所示。

表 1 仿真结果分析

Table 1 Result of simulation

Acquisition time / s	The least L value	Acquisition probability	Location of beacon image center / pixel	
T	L	P	x	y
29.4	1.8294×10^6	99.6%	236	236

计算机仿真结果表明, 采用分行(列)天线扫描结合像素扫描方式, 能在较短时间内成功捕获到信

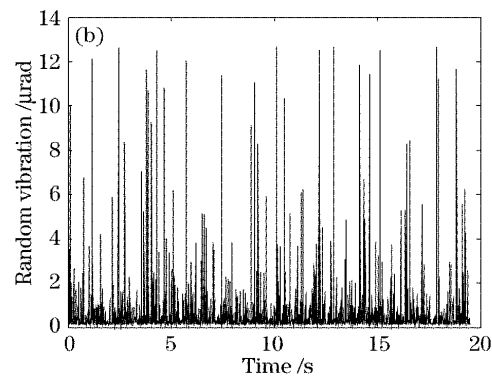


图 1 航天器星上随机振动

Fig. 1 Random vibration in aircraft

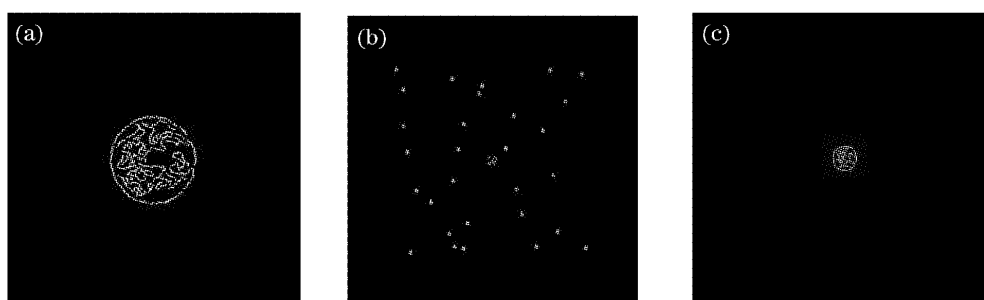


图 2 (a)参考图像, (b)不确定区域, (c)不确定区域内信标图像

Fig. 2 Reference image (a), uncertain area (b), large beacon image in uncertain area (c)

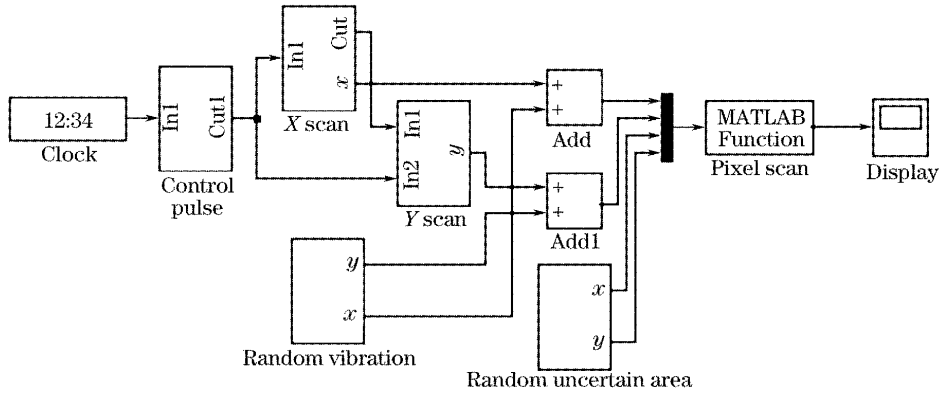


图 3 扩展信标捕获原理示意图

Fig. 3 Schematic for extend-beacon acquisition

标图像,在 1000 场随机实验中,成功捕获概率为 99.6%。在信标图像被捕获以后,就可以根据信标图像确定其中心位置,当系统中采用的 CCD 面阵为不小于 200×200 像素的探测器时,可以缩小信标探测器的视场,提高单个像素的测量精度,根据前面的分析,其中心位置误差在几个像素之内是完全可行的^[9]。因此在不考虑链路其他影响因素如大气影响等因素的情况下,对信标图像的成功捕获也就意味着可以成功建立。

改变 σ 的大小,按上述方法进行随机实验,在 10 mrad 范围内成功捕获到信标的概率如图 4(a)所

示,当 $\sigma_h \neq \sigma_v$, 设 $\sigma_h/\sigma_v = 0.5$, 在 10 mrad 范围内成功捕获到信标的概率如图 4(b)所示。

图 4 表明,随着方差的增大,成功捕获概率逐渐降低, $\sigma_h \neq \sigma_v$ 时呈现同样的变化趋势。即使 $3\sigma = 6$ mrad, 正确捕获概率仍在 96.8% 以上,表明该算法是有效可行的。

当 $\sigma_h = \sigma_v$ 时,改变 σ 的大小,按上述方法进行随机实验, 3σ 范围内的捕获时间变化如图 5(a)所示,当 $\sigma_h \neq \sigma_v$ 时,且 $\sigma_h/\sigma_v = 0.5$, 改变 σ 的大小,按上述方法进行随机实验, 3σ 范围内的捕获时间变化如图 5(b)所示。

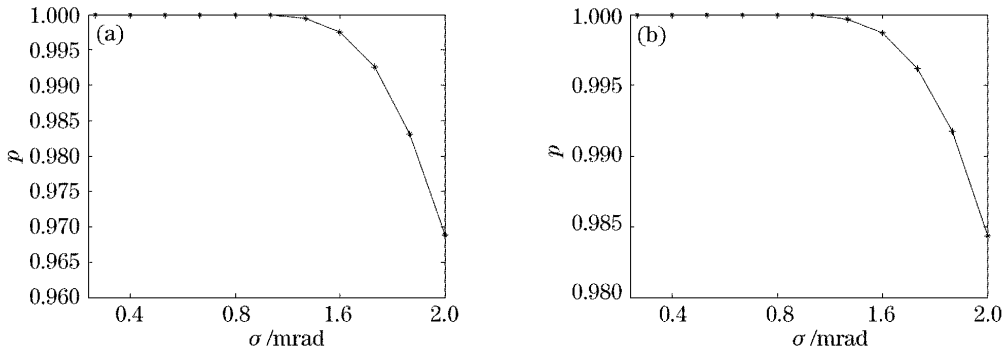


图 4 方差对称(a)与非对称(b)时信标成功捕获概率

Fig. 4 Acquisition probability for equal variance (a) and unequal variance (b)

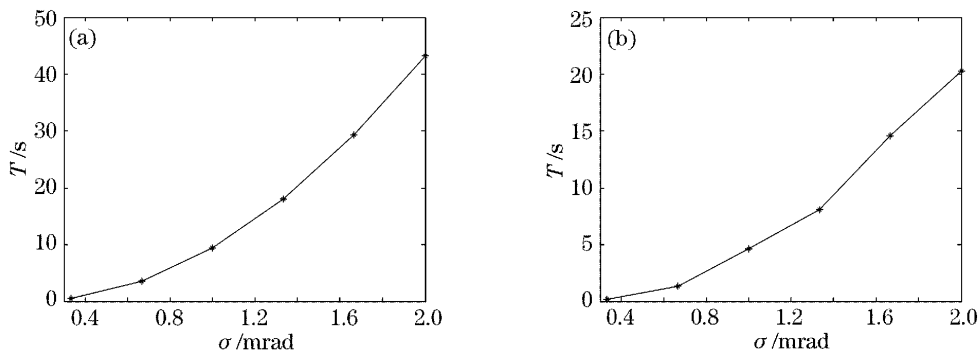


图 5 方差对称(a)与非对称(b)时信标捕获时间

Fig. 5 Acquisition time for equal variance (a) and unequal variance

图 5 表明,随着方差的增大,在 3σ 内完成扫描所需的时间增加, $\sigma_h \neq \sigma_v$ 时呈现同样的变化趋势,但是所需的时间略小于方差相等时所需的时间,两种情况下所需的时间在 1 min 以内,由于扫描的范围都是 3σ ,因此,其正确捕获概率应该是相等的,对照图 4,其正确捕获概率应在 99% 以上,这表明采用天线扫描结合像素扫描是深空光通信信标捕获的有效方案。

5 结 论

采用天体扩展图像作为信标,其关键是在众多的天体图像中识别出作为信标的天体。采用天线扫描的方式在某个不确定区域内对图像信标进行搜索,用像素扫描的方式对该信标图像进行识别,为消除参考图像和实际探测图像因大小和旋转角度不同而引起的误识别,引进傅里叶-梅林变换的方法。采用欧空局对卫星平台振动的实测结果模拟深空探测器平台的微振动^[8],采用蒙特-卡罗方法随机产生 1000 个视场进行仿真,结果表明该方法能在较短的时间内完成对扩展图像信标的捕获,成功概率为 99.6%,通过改变不同的方差值,发现其正确捕获概率会受到一定的影响,即使方差达到 2 mrad,正确捕获概率仍在 96.8% 以上。通过改变不同的方差值,在 3σ 内进行扫描,结果表明扫描时间在 1 min 内,这表明采用天线扫描结合像素扫描是一种可行的方案。

参 考 文 献

- 1 J. W. Alexander, S. Lee, C. Chen. Pointing and tracking concepts for deep space missions[C]. *Proc. SPIE*, 1999, **3615**: 230~249
- 2 R. M. Gagliardi, S. Karp. *Optical Telecommunications* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1998. 166~175 (in chinese)
- 3 M. Scheinfeild, N. S. Kopeika, R. Melamed. Acquisition system for microsattellites laser communication in space [C]. *Proc. SPIE*, 2000, **3932**: 166~175
- 4 Chen Tang, Ming Liu, Haiqing Yan *et al.*. The improved genetic algorithms for digital image correlation method[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(10): 574~577
- 5 Luo Yinlong, Lu Xiaoxu, Zhu Yue *et al.*. Real-time high accuracy phase-shifting calibrating method based on one-dimensional spatial digital correlation[J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, **32**(8): 1117~1122 (in chinese)
罗印龙,吕晓旭,朱越等. 基于一维空间数字相关的实时相位标定方法[J]. *中国激光*, 2005, **32**(8): 1117~1122
- 6 B. Srinivasa Reddy, B. N. Chatterji. An FFT-based technique for translation, rotation, and scale-invariant image registration [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1996, **5**(8): 1266~1271
- 7 Ren Haiping, Ping Ziliang, Bo Wurigen *et al.*. Image description with Jacobi-Fourier moments [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(1): 5~10 (in chinese)
任海平,平子良,博午日亘等. 用雅可比-傅里叶矩进行图像描述[J]. *光学学报*, 2004, **24**(1): 5~10
- 8 Zhang Zhenmin, Cui Hutao, Yang Di. High precision pointing control for small lunar explorer[J]. *High Technology Letters*, 2002, **12**(4): 80~82 (in chinese)
张振民,崔祐涛,杨涤. 小型月球探测器高精度姿态指向控制[J]. *高技术通讯*, 2002, **12**STBZ(4): 80~82
- 9 Xu Kehua, Ma Jing, Tan Liying. Acquisition and tracking of image beacon for deep space optical communication [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(2): 176~180 (in chinese)
徐科华,马晶,谭立英. 深空光通信中图像信标的捕获和跟踪[J]. *光学学报*, 2006, **26**(2): 176~180
- 10 Xu Kehua, Ma Jing, Tan Liying. Research on beam pointing in deep space optical communication [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, **14**(1): 16~21 (in chinese)
徐科华,马晶,谭立英. 深空光通信中光束瞄准技术研究[J]. *光学精密工程*, 2006, **14**(1): 16~21
- 11 Shao Bing, Sun Lining, Qu Dongsheng *et al.*. Design of fine pointing tip/tilt mirror of ATP system for free space optical communication [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, **14**(1): 43~47 (in chinese)
邵兵,孙立宁,曲东升等. 自由空间光通信 ATP 系统中精瞄偏转镜的设计[J]. *光学精密工程*, 2006, **14**(1): 43~47
- 12 Wang Yueyong, Guo Xiqing, Wu Keyong. Development trend of azimuth aiming system of basic missiles abroad [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, **10**(1): 31~35 (in Chinese)
王悦勇,郭喜庆,武克用. 国外弹道式导弹方位瞄准技术及其发展[J]. *光学精密工程*, 2002, **10**(1): 31~35
- 13 M. Wittig, L. V. Holtz, D. E. L. Tunbridge *et al.*. In-orbit measurements of microaccelerations of ESA's communication satellite OLYMPUS [C]. *Proc. SPIE*, 1990, **1218**: 205~214