

文章编号 1004-924X(2006)03-0515-05

基于相位相关的深空光通信扩展信标跟踪技术研究

马晶,徐科华,谭立英

(哈尔滨工业大学 可调谐激光技术国家重点实验室,黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:提出了一种深空光通信扩展信标的跟踪方法。该方法的原理是在航天器上存储一幅信标图像作为参考,把实际信标图像看成参考信标图像和附加高斯白噪声和的形式,基于离散傅里叶变换和相位相关技术对信标的旋转因子和平移因子进行计算。理论分析与仿真结果都表明,该方法可以把跟踪误差控制在0.5个像素以内。针对不同的信噪比对该方法进行仿真,计算误差并没有显著的变化,表明该方法具有良好的抗干扰性,能满足光通信链路实时运行的要求,是一种可行的方案。

关键词:深空光通信;扩展信标;离散傅里叶变换;相位相关

中图分类号: TN929.13; TP391.4 **文献标识码:** A

Extend-beacon tracking for deep space optical communication based on phase-correlation

MA Jing, XU Ke-hua, TAN Li-ying

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

Abstract: A extend-beacon tracking method for deep space optical communication was proposed, and the operational principle of the method was given. By storing a beacon image in aircraft as reference and regarding actual beacon image as the sum of reference image and additive Gaussian white noise, the values of rotation and translation for beacon image were calculated according to phase correlation and DFT (Discrete Fourier Transfer). The theory analysis and computer simulation show that the tracking error can be constrained below 0.5 pixels. The computer simulation based on different SNR (signal noise rate) indicates that the change of a calculation error is little, it shows that the method has the advantage of rejecting noise and it is a feasible strategy for deep space optical communication.

Key words: deep space optical communication; extend-beacon; Discrete Fourier Transfer (DFT); phase-correlation

1 引言

用激光进行深空探测科学数据的回传,相对

于微波通信系统,具有体积小,质量轻,功耗小的优点,这有利于降低深空探测的成本,同时为飞行器其他子系统的设计提供更大的灵活性。但是在深空距离下进行激光通信,要求两通信终端实现

收稿日期:2005-07-20;修订日期:2006-06-18.

精确的对准,因此,如何设计有效的跟瞄子系统将成为光通信链路建立和保持的关键。

在深空距离下,上行信标光因衰减严重而不能提供足够高的跟踪速率,因此,跟瞄子系统可采用自然天体图像作为信标。采用自然天体图像作为信标,不但可以使航天器跟瞄子系统免受大气的影响和天气的制约,保持下行链路相对于上行链路的独立性,满足深空光通信全天候运行的要求,而且可以提供较高的跟踪速率^[1]。因此,是一种较理想的方案。

采用扩展天体图像作为信标,需要精确地确定图像中心,根据地面站相对于图像中心的位置来确定天线的对准方向。采用地球图像作为信标,通常需要在飞行器上存储一幅信标图像作为参考图像,用以完成深空光通信链路建立过程中信标的捕获。当捕获完成后,跟瞄子系统需要把天线的指向精度控制在 0.5 个像素以内,链路进入跟踪模式,在跟踪过程中需要根据信标图像在信标探测器视场中的运动来动态地更新天线的指向。在这个过程中需要精确地计算信标图像的平移量及转动量,根据初始的图像中心位置和平移转动因子来精确地确定该时刻图像的中心位置,更新天线的指向。因此如何抑制跟踪误差,提高系统的抗噪能力是关系到链路成功运行的关键。

2 理论分析

任何一幅图像都可以用一个二维 $M \times N$ 矩阵来表示,设探测到的信标图像 $r(m, n)$, 该图像平移 (m_0, n_0) 后可表示为

$$\begin{aligned} r_1(m, n) &= r(m - m_0, n - n_0) \\ m &= 0, 1, \dots, M - 1 \\ n &= 0, 1, \dots, N - 1, \end{aligned} \quad (1)$$

上式中, $r_1(m, n)$ 表示平移后的图像。

对平移后的图像进行离散傅里叶变换,则

$$R_1(k_1, k_2) = R(k_1, k_2) \exp[-j2\pi(k_1 m_0 + k_2 n_0)], \quad (2)$$

平移前后的图像在空频域内的相位关系可表示为

$$\frac{R_1(k_1, k_2) \cdot R_1^*(k_1, k_2)}{|R(k_1, k_2) \cdot R_1^*(k_1, k_2)|} = \exp[j2\pi(k_1 m_0 + k_2 n_0)], \quad (3)$$

对上式进行傅里叶逆变换,可得到一个脉冲函数 $(m - m_0, n - n_0)$, 从而可以确定其平移量。

图像的实际运动通常包括平动和转动两部

分,设平移量为 (m_0, n_0) , 转动的角度为 θ , 则运动后的参考信标图像可用初始图像表示为

$$R_2(m, n) = R(m \cos \theta + n \sin \theta - m_0 - m \sin \theta + n \cos \theta - n_0), \quad (4)$$

对运动后图像进行离散傅里叶变换,可得到

$$R_2(k_1, k_2) = R(k_1 \cos \theta + k_2 \sin \theta - k_1 \sin \theta + k_2 \cos \theta) \cdot \exp[-j2\pi(k_1 m_0 + k_2 n_0)], \quad (5)$$

显然,运动后图像傅里叶变换的幅度谱只是运动前图像傅里叶变换幅度谱旋转后的副本,即

$$I_2(k_1, k_2) = I(k_1 \cos \theta + k_2 \sin \theta - k_1 \sin \theta + k_2 \cos \theta), \quad (6)$$

上式在极坐标系内可表示为

$$I_2(\rho, \phi) = I(\rho, \phi - \theta), \quad (7)$$

设 ρ_m 是 ρ 的最大值,把 ρ_m 等分为 M 段, ϕ 等分为 N 段,利用线性插值技术把 $I_2(\rho, \phi)$ 变换成二维的 $M \times N$ 矩阵 $I_2(m \times n)$ 。角度的平移可变为

$$\theta_0 = \frac{N \cdot \theta}{2}, \quad (8)$$

对 $I_2(m \times n)$ 进行离散傅里叶变换,根据相位相关技术及式(8)可得图像的旋转角度^[2-3]。

在计算图像平移和旋转量的过程中,通常由于各种噪声的影响而导致误差的产生。当采用地球图像作为信标时,最显著的噪声是由于地球表面云层覆盖及反射率的不同而导致的图像各像素点光强的不同。因此通常可把地球图像看成是一标准图像和附加高斯白噪声和的形式。则式(7)可写为

$$I_2(m, n) = I(m, n - n_0) + g(m, n), \quad (9)$$

上式中 $g(m, n)$ 是各像素上的附加高斯白噪声,各像素点上噪声独立同分布,其均值为 0。

设求得的 n_0 值为 \hat{n}_0 , 则得到的平移参考图像可表示为 $I(m, n - \hat{n}_0)$, 对实际图像和计算得到的图像进行快速傅里叶变换,则

$$I_2(k_1, k_2) = I(k_1, k_2) \exp(i\theta) + G(k_1, k_2), \quad (10)$$

$$\mathcal{T}_2(k_1, k_2) = I(k_1, k_2) \exp(i\theta). \quad (11)$$

上式中,

$$(k_1, k_2) = -\frac{2 \cdot k_2}{N} \cdot n_0 = -k_2 \theta_0, \quad (12)$$

$$\hat{\theta}^{\wedge}(k_1, k_2) = -\frac{2 \cdot k_2}{N} \cdot \hat{n}_0 = -k_2 \theta_0. \quad (13)$$

要使 $\mathcal{T}_2(k_1, k_2)$ 最大地近似于 $I_2(k_1, k_2)$ 则

$$C(k_1, k_2) = I_2(k_1, k_2) \cdot I_2^*(k_1, k_2) = |I(k_1, k_2)|^2 \exp(i\theta) + G(k_1, k_2) \cdot I^*(k_1, k_2) \exp(-i\theta), \quad (14)$$

上式中

$$\phi(k_1, k_2) = \theta(k_1, k_2) - \theta(k_1, k_2) = \theta(k_1 - k_0) - \theta(k_2 - k_0), \quad (15)$$

使 θ_0 最大可能的接近 θ_0 , 只需下式取得最大值^[4]

$$\frac{\partial}{\partial \theta_0} \text{Re}\{C(k_1, k_2)\} = 0, \quad (16)$$

上式对 θ_0 求导, 则

$$\frac{\partial}{\partial \theta_0} \text{Re}\{C(k_1, k_2)\} = -\sum_{k_1=0}^{M-1} \sum_{k_2=0}^{N-1} \frac{\partial}{\partial \theta_0} \left[\frac{k_2}{|I(k_1, k_2)|^2} \sin \theta_0 + H_0(k_1, k_2) \right], \quad (17)$$

上式中,

$$H_0(k_1, k_2) = \frac{\partial}{\partial \theta_0} \text{Re}\{G(k_1, k_2) \cdot I^*(k_1, k_2) \exp(-i\theta)\}, \quad (18)$$

由于 θ_0 通常非常小, 因此, $\sin \theta_0 \approx \theta_0$, 则式(17)可变为

$$\frac{\partial}{\partial \theta_0} \text{Re}\{C(k_1, k_2)\} = \sum_{k_1=0}^{M-1} \sum_{k_2=0}^{N-1} \left[\frac{k_2^2}{|I(k_1, k_2)|^2} + H_0(k_1, k_2) \right], \quad (19)$$

因 $G(k_1, k_2)$ 是均值为 0 的附加高斯白噪声的离散傅里叶变换, 把式(18)代入式(19), 求 θ_0 的均值, 则

$$E = C_k = 0, \quad (20)$$

上式中 E 是 θ_0 的均值, C_k 为

$$C_k = \sum_{k_1=0}^{M-1} \sum_{k_2=0}^{N-1} \frac{k_2^2}{|I(k_1, k_2)|^2}, \quad (21)$$

解方程可得

$$\theta_0 = \frac{E}{C_k}, \quad (22)$$

则信标图像的旋转角度可表示为

$$\theta = \theta_0 + \theta_0', \quad (23)$$

求出图像旋转角度, 对图像消旋后, 可用式(3)求出图像的平移量。设求得的 X 方向、 Y 方向的平移量分别为 \hat{x} 、 \hat{y} , 设实际图像为原始图像 $r(m, n)$ 和附加高斯白噪声之和, 按 θ_0 的求解过

程, 可求得 x, y ^[4]

$$x = \hat{x} = \frac{C_y E_x - C_{xy} E_y}{C_x C_y - C_{xy}^2}, \quad (24)$$

$$y = \hat{y} = \frac{C_{xy} E_x - C_x E_y}{C_{xy}^2 - C_x C_y}. \quad (25)$$

E_x, E_y 是下面两式的均值

$$E_x = \frac{\partial}{\partial x} R_1(m, n) R_1^*(m, n) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} \frac{m^2}{|R(m, n)|^2} x + \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} \frac{mn}{|R(m, n)|^2} y + H_x(m, n), \quad (26)$$

$$E_y = \frac{\partial}{\partial y} R_1(m, n) R_1^*(m, n) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} \frac{mn}{|R(m, n)|^2} x + \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} \frac{n^2}{|R(m, n)|^2} y + H_y(m, n). \quad (27)$$

式中

$$H_x(m, n) = \frac{\partial}{\partial x} [G(m, n) \cdot R_1^*(m, n)], \quad (28)$$

$$H_y(m, n) = \frac{\partial}{\partial y} [G(m, n) \cdot R_1^*(m, n)]. \quad (29)$$

式(24)、(25)中 C_x, C_y, C_{xy} 值如下

$$C_x = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} \frac{m^2}{|R(m, n)|^2}, \quad (30)$$

$$C_y = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} \frac{n^2}{|R(m, n)|^2}, \quad (31)$$

$$C_{xy} = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} \frac{mn}{|R(m, n)|^2}. \quad (32)$$

解出 x, y , 则

$$x = \hat{x} + x', \quad (33)$$

$$y = \hat{y} + y'. \quad (34)$$

3 跟踪模型的数值仿真

把实际信标图像看成是参考信标图像与一附加高斯白噪声和的形式, 设其信噪比为 1, 对跟踪模型进行计算机仿真。参考信标图像如图 1(a) 所示, 初始的实际信标图像如图 1(b) 所示, 该图像在探测器视场内变化后的图像如图 1(c) 和 (d) 所示。



(a) 参考信标图像

(a) Reference beacon image



(b) 初始信标图像

(b) Initialized beacon image



(c) 第一次变化后的信标图像

(c) The first changed beacon image



(d) 第二次变化后的信标图像

(d) The second changed beacon image

图 1 跟踪模型仿真结果

Fig. 1 Simulation results of tracking model

根据信标跟踪的理论模型,进行计算机仿真,得到的仿真结果如表 1 所示。

表 1 跟踪仿真结果

Tab. 1 Simulation results of tracking model

旋转量 ($^{\circ}$)		X 方向平移量 (像素)		Y 方向平移量 (像素)	
实际值	计算值	实际值	计算值	实际值	计算值
15	15.26	4.0	4.00	3.0	3.00
18	18.28	5.0	5.00	4.0	4.00

计算结果表明,计算的图像平移因子和实际值几乎没有误差,而旋转因子有一定的误差。在深空光通信中,需要精确地确定图像的中心位置,误差应控制在 0.5 个像素以内。在仿真过程中,可把极坐标系中的角度等分为 250 等分,因此,实际的因旋转量而引进的误差均小于 0.5 个像素,因此,可满足深空光通信对跟踪精度要求。

通常信噪比的不同会对系统的性能造成影响^[5],设信标图像的信噪比为 0.5,进行数值仿真,仿真结果如下。

表 2 跟踪仿真结果

Tab. 2 Simulation results of tracking model

旋转量 ($^{\circ}$)		X 方向平移量 (像素)		Y 方向平移量 (像素)	
实际值	计算值	实际值	计算值	实际值	计算值
15	15.38	4.0	4.0	4.00	3.0
18	18.41	5.0	5.0	5.00	4.0

表 1 和表 2 的仿真结果对比可以发现,信噪比降低了一倍,旋转误差有所增加,平移结果几乎不变,整体误差仍可控制在 0.5 个像素以内。设链路距离为火星到地球的距离,则地球图像对航天器所成的张角大约为 0.1 mrad,设光束的发散角为 10 μ rad,则对准精度要求大约为 2 μ rad。当信标图像被捕获以后,可缩小信标探测器视场,设此时视场大小为 0.5 mrad,如采用的 CCD 信标探测器为 500 \times 500 的面阵,则每个像素对应的精度为 1 μ rad,采用该算法可以把精度控制在 0.5 个像素以内,因此,能满足在深空距离下进行激光通信的跟踪精度要求,同时表明该方案具有较好的抗干扰性。

4 结 论

理论分析和仿真结果都表明,利用扩展天体

图像作为信标,基于DFT变换,结合相位相关技术对扩展信标进行精确跟踪是可行的,该方法可把跟踪误差控制在0.5个像素以内。能够满足深空光通信的要求,同时,针对不同的信噪比对该方法进行仿真,仿真结果表明该方法具有较好的抗干扰性,在信噪比非常低的情况下,仍可以达到很高的跟踪精度。采用地球图像作为信标,通常因

其表面云层覆盖及不同的地面覆盖而导致其反射率不均匀,给扩展信标的捕获跟踪带来误差,导致深空光通信性能下降,严重时使得链路中断,采用该方法,可以有效的抑制该噪声,实现光通信链路运行过程中两终端的精确跟踪,保持链路的实时运行。因此,是一种可行的方法。

参考文献:

- [1] ALEXANDER J W, LEE S, CHEN C C. Pointing and tracking concepts for deep space missions[J]. *SPIE*, 1999, 3615:230-249.
- [2] REDDY B S, CHATTERJIB N. An FFT-based technique for translation, rotation, and scale-invariant image registration[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1996, 5(8):1266-1271.
- [3] 罗诗途, 王艳玲, 张玘, 等. 车载图像跟踪系统中电子稳像算法的研究[J]. *光学精密工程*, 2005, 13(1):95-103. LUO SH T, WANG Y L, ZHANG Q, et al. Electronic image stabilizing algorithm for image tracking system on vehicle[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2005, 13(1):95-103. (in Chinese)
- [4] TSOU H, YAN T Y. Maximum likelihood based extended source spatial acquisition and tracking for planetary optical communications[J]. *SPIE*, 1999, 3615:214-221.
- [5] 达争尚, 何俊华, 陈良益. 信噪比对高速视频系统作用距离制约的分析[J]. *光学精密工程*, 2004, 12(2):165-168. DA ZH SH, HEJ H, CHEN L Y. SNR limitation of high-speed visual image system detection distance [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2004, 12(2):165-168. (in Chinese)

作者简介:马晶(1956-),男,哈尔滨工业大学光电子技术研究所教授,博士,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向的研究;

徐科华(1979-),男,哈尔滨工业大学光电子技术研究所博士研究生,主要从事自由空间光通信和光学信息处理的研究。Email:xukehua2001@163.com