

文章编号:1001-5078(2012)02-0138-05

· 激光应用技术 ·

空间目标激光回波光斑中心位置推算及分析

康文运, 宋小全, 黄惠明
(北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094)

摘要: 针对空间目标激光回波信号测量需求, 本文从速差效应入手, 以激光跟踪测量设备的回转中心为坐标原点, 建立了垂线测量坐标系, 推算出了激光回波光斑中心位置坐标公式, 给出了激光回波光斑中心位置的计算方法, 并进行了实例计算及计算结果分析。该组公式及计算方法可用于激光回波位置预估、激光跟瞄能力评价等方面。

关键词: 空间目标; 速差效应; 激光回波位置

中图分类号: TN249 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2012.02.005

Calculation and analysis on the laser echo spot center location of space target

KANG Wen-yun, SONG Xiao-quan, HUANG Hui-ming
(Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: In allusion to the laser echo signal measurement requirement of space target, this paper analyzes velocity aberration, sets up vertical measurement coordinate system on laser tracking and measurement equipment, calculates coordinate formula of the laser echo spot center location, presents the calculation method of the laser echo spot center location. A calculation example has been presented, its calculation result has been analyzed. This formula and calculation method can be used for estimating the laser echo spot center location, evaluating the laser tracking and collimation ability for space target.

Key words: space target; velocity aberration; laser echo spot location

1 引言

随着激光技术和光电探测技术的快速发展, 激光在空间目标测量方面的应用受到国内外广泛关注, 并且取得了很大进展^[1-2], 其核心技术是如何实现激光对空间目标的高精度跟瞄, 提高到达空间目标表面的激光功率密度, 以便实现对遥远空间目标的探测。

照射到空间目标表面的激光功率密度是激光跟踪测量设备的一项重要技术指标, 测量空间目标激光回波光斑中心信号强度是评估到达空间目标表面激光功率密度大小的重要技术途径, 也是评价激光跟踪测量设备跟瞄能力的一种有效方法。但是由于空间目标是高速运动的目标, 激光回波光斑中心位置要受到速差效应的影响, 激光回波光斑中心位置

与发射位置存在一定偏差^[3-4], 因此, 要准确测量空间目标激光回波光斑中心信号强度, 找到空间目标激光回波光斑中心位置十分必要。

本文针对空间目标激光回波光斑中心信号强度测量需求, 研究了空间目标激光回波的技术特点, 对空间目标激光回波光斑中心位置进行了推算, 提出了空间目标激光回波光斑中心位置的计算方法, 并进行了实例计算及计算结果分析。

2 速差效应

当角反射器装在空间目标等高速运动的物体上时, 由于空间目标以很高的线速度相对地球运动, 根

作者简介: 康文运(1965-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事光电对抗试验总体技术研究。E-mail: cts_kangwenyun@sina.com

收稿日期: 2011-11-22

据相对论原理,即使对一完善的(没有任何误差)角反射器,返回光束方向也将偏离入射方向某一角度,这种现象称为速差效应。返回光束方向与入射光束方向的偏离角度 φ 由下式计算^[5]:

$$\varphi = 2 \frac{V_N}{C} \quad (1)$$

式中, V_N 是垂直于激光跟踪测量设备与空间目标连线的空间目标线速度分量; C 是自由空间中的光束。

这表明由于速差效应的影响,空间目标激光回波光斑的中心与激光跟踪测量设备站址位置存在一定偏离。

3 回波光斑中心位置公式推导

为了推出空间目标激光回波光斑中心位置计算公式,首先需建立坐标系,然后依据速差效应引起的偏离角度公式,以及空间目标飞行轨迹相对激光跟踪测量设备的各种位置关系,推导出回波光斑中心位置在该坐标系内的位置坐标。

3.1 坐标系建立

由于速差效应使返回光束方向与入射光束方向存在一个偏离角度,在激光跟踪测量设备跟踪照射空间目标过程中,回波光斑中心没有按照原路返回,而是围绕激光跟踪测量设备站址移动,因此,采用垂线测量坐标系推算空间目标激光回波光斑中心位置最为合适^[6]。

以激光跟踪测量设备的回转中心为坐标原点 O ,建立垂线测量坐标系, X 轴指向天文北(即 O 点的天文子午面与水平面的交线), Y 轴与过 O 点的铅垂线一致, Z 轴与 X, Y 轴构成右手坐标系,尺度采用国际米制,如图 1 所示。其中, R 表示空间目标的斜距, A 表示空间目标的方位角, E 表示空间目标的俯仰角, V_T 表示空间目标相对于地球运动的线速度。

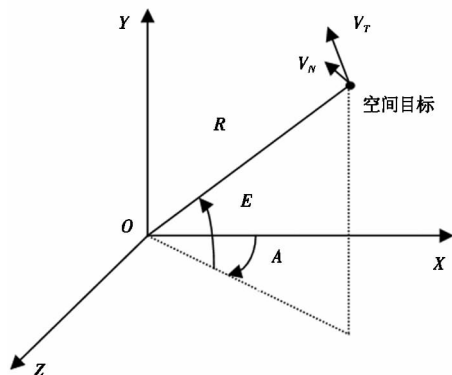


图1 垂线测量坐标系示意图

Fig.1 diagram of vertical measurement coordinate system

3.2 速差偏离距离坐标推算

由公式(1)知:与激光跟踪测量设备和空间目标连线一致的速度分量($\dot{R}$)不引起速差偏离。速差偏离由垂直于激光跟踪测量设备与空间目标连线的空间目标线速度分量引起。将 V_N 沿着方位线速度和俯仰线速度方向分解,俯仰方向线速度分量 V_{NE} 为 $R \dot{E}$, 方位方向线速度分量 V_{NA} 为 $R \cos E \dot{A}$ 。其中, $\dot{A}$ 表示空间目标的方位角速度, $\dot{E}$ 表示空间目标的俯仰角速度。

俯仰方向线速度引起的速差偏离距离如图 2 所示,由于速差偏离角 φ 是个小角(约 $10''$)^[5],因此,依据公式(1)该方向速差偏离距离坐标坐标为:

$$R_E = 2 \frac{R^2 \dot{E}}{C} \frac{1}{\sin E}.$$

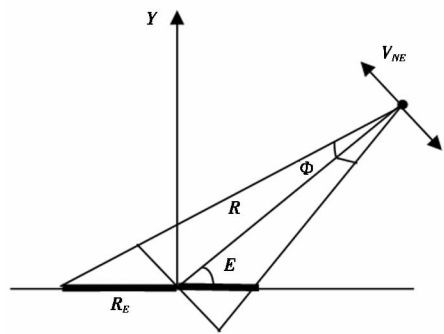


图2 俯仰方向速差偏离距离示意图

Fig.2 diagram of velocity aberration departure distance at pitching direction

方位方向线速度引起的速差偏离距离如图 3 所示,由于速差偏离角 φ 是个小角(约 $10''$),因此,依据公式(1)该方向速差偏离距离坐标为: $R_A =$

$$2 \frac{R^2 \cos E \dot{A}}{C}.$$

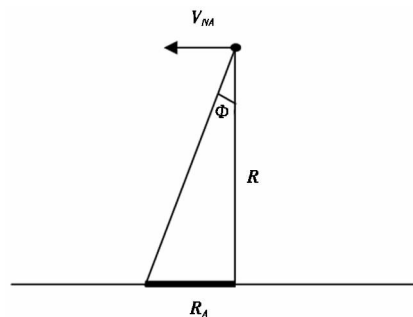


图3 方位方向速差偏离距离示意图

Fig.3 diagram of velocity aberration departure distance at azimuth direction

速差引起的偏离总距离是方位方向线速度引起的速差偏离距离与俯仰方向线速度引起的速差偏离距离的合成,速差偏离距离 R_0 (光斑中心偏离激光发射点的距离)的大小是:

$$R_0 = \sqrt{R_A^2 + R_E^2}$$

$$R_0 = 2R^2 \sqrt{\left(\frac{\dot{E}}{\sin E}\right)^2 + (\cos E \dot{A})^2}$$

3.3 速差偏离方位角坐标推算

在空间目标处于降轨段飞行时,当处于跟瞄上升段时,俯仰角速度 $\dot{E}$ 为正值,速差偏离量的位置如图4所示。在这种情况下由于 $\dot{A}$ 为负,因此, R_A 为负 R_E 为正, $\theta = \arctan\left(\frac{R_E}{R_A}\right)$ 为负,速差偏离量的方位角为:

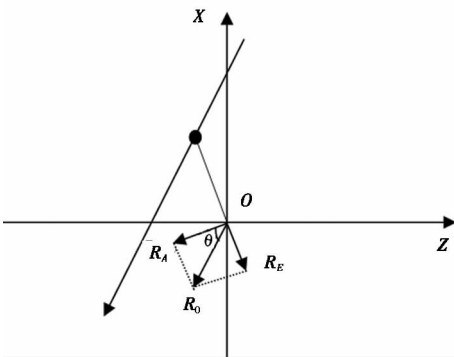
$$A_0 = A - 90^\circ + \arctan\left(\frac{\dot{E}}{\dot{A} \cos E \sin E}\right)$$


图4 降轨速差偏离量位置示意图($\dot{E}$ 为正)

Fig. 4 diagram of velocity aberration departure

at descending arc($\dot{E}$ is positive)

在空间目标处于降轨段飞行时,当处于跟瞄下落段时,俯仰角速度为 $\dot{E}$ 负值,速差偏离量的位置如图5所示。在这种情况下由于 $\dot{A}$ 为负,因此, R_A 为负 R_E 为负, $\theta = \arctan\left(\frac{R_E}{R_A}\right)$ 为正,速差偏离量的方位角为:

$$A_0 = A - 90^\circ + \arctan\left(\frac{\dot{E}}{\dot{A} \cos E \sin E}\right)$$

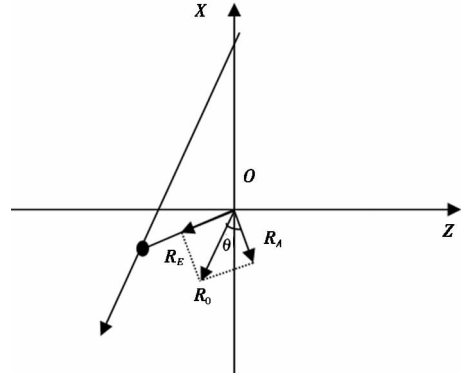


图5 降轨速差偏离量位置示意图($\dot{E}$ 为负)

Fig. 5 diagram of velocity aberration departure at

descending arc($\dot{E}$ is negative)

在空间目标处于升轨段飞行时,当处于跟瞄上升段时,俯仰角速度 $\dot{E}$ 为正值,速差偏离量的位置如图6所示。在这种情况下由于 $\dot{A}$ 为负,因此, R_A 为负 R_E 为正, $\theta = \arctan\left(\frac{R_E}{R_A}\right)$ 为负,速差偏离量的方位角为:

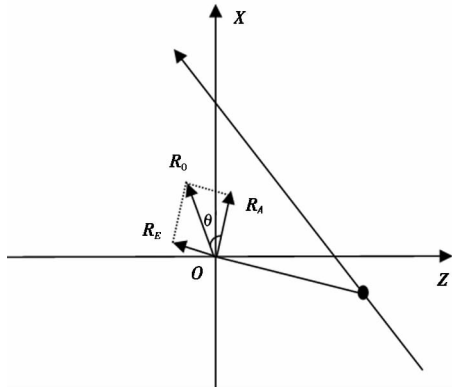
$$A_0 = A - 90^\circ + \arctan\left(\frac{\dot{E}}{\dot{A} \cos E \sin E}\right)$$


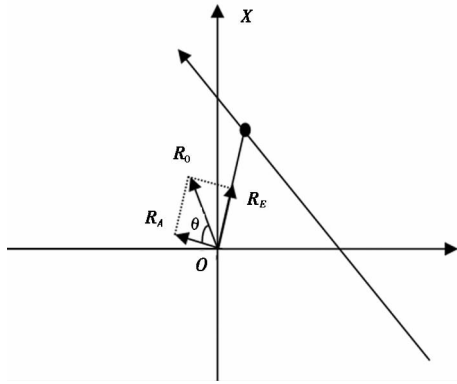
图6 升轨速差偏离量位置示意图($\dot{E}$ 为正)

Fig. 6 diagram of velocity aberration departure at

ascending arc($\dot{E}$ is positive)

在空间目标处于升轨段飞行时,当处于跟瞄下落段时,俯仰角速度 $\dot{E}$ 为负值,速差偏离量的位置如图7所示。在这种情况下由于 $\dot{A}$ 为负,因此, R_A 为负 R_E 为负, $\theta = \arctan\left(\frac{R_E}{R_A}\right)$ 为正,速差偏离量的方位角为:

$$A_0 = A - 90^\circ + \arctan\left(\frac{\dot{E}}{\dot{A} \cos E \sin E}\right)$$

图7 升轨速差偏离量位置示意图($\dot{E}$ 为负)Fig.7 diagram of velocity aberration departure at ascending arc($\dot{E}$ is negative)

3.4 位置坐标公式

根据上述分析推算知:无论空间目标处于降轨段还是升轨段飞行,也不管处于跟瞄上升段还是跟瞄下落段,在激光跟踪测量设备跟踪照射空间目标过程中,在地面上,激光回波光斑中心位置在垂线测量坐标系的坐标都可由如下公式表述:

$$R_0 = 2R^2 \sqrt{\left(\frac{\dot{E}}{\sin E}\right)^2 + (\cos E \dot{A})^2} \quad (2)$$

$$A_0 = A - 90^\circ + \arctan\left(\frac{\dot{E}}{\dot{A} \cos E \sin E}\right) \quad (3)$$

其中, R_0, A_0 是激光回波光斑中心位置在垂线测量坐标系中的坐标(这时 E_0 近视为0); $\dot{A}$ 表示卫星

的方位角速度; $\dot{E}$ 表示卫星的俯仰角速度。

4 计算方法及实例计算

4.1 位置坐标计算方法

空间目标激光回波光斑中心位置计算方法如下:

首先选择激光跟瞄弧段,建立以激光跟踪测量设备为中心的垂线测量坐标系,将该弧段空间目标轨道预报数据转化成垂线测量坐标系中的坐标数据(T, R, A, E),其中, T 为该帧数据的绝对时。

其次利用如下公式计算空间目标的 $\dot{A}, \dot{E}$ 。

$$\dot{A}(T) = \frac{A(T + \Delta T) - A(T - \Delta T)}{2\Delta T} \quad (4)$$

$$\dot{E}(T) = \frac{E(T + \Delta T) - E(T - \Delta T)}{2\Delta T} \quad (5)$$

式中, ΔT 为相邻两帧空间目标轨道坐标数据(T, R, A, E)的时间间隔。

最后将空间目标轨道预报坐标数据或轨道实测坐标数据及对应时刻的 $\dot{A}, \dot{E}$ 带入公式(3)和(4)就可得到该弧段激光回波光斑中心位置坐标。

4.2 实例计算及结果分析

利用某空间目标的一段轨道数据、上述公式和计算方法,对其激光回波光斑中心位置进行仿真计算。在空间目标处于降轨段飞行时,激光回波光斑中心位置坐标数据计算结果如表1所示;在空间目标处于升轨段飞行时,激光回波光斑中心位置坐标数据的计算结果如表2所示。

表1 激光回波光斑中心位置计算结果(降轨段)

Tab.1 calculation result of the laser echo spot center location(descending arc)

$E/^\circ$	62.1	65.0	68.1	74.2	79.5	81.1	80.0	77.7	74.9	71.9	68.8	65.7	62.8
R_0/m	33.8	32.9	32.1	30.9	29.9	28.7	30.0	30.4	30.8	31.3	31.9	32.7	33.5
$A_0/^\circ$	193.5	193.6	193.9	194.6	195.2	194.3	192.5	192.4	192.8	193.2	193.6	193.9	194.0

表2 激光回波光斑中心位置计算结果(升轨段)

Tab.2 calculation result of the laser echo spot center location(ascending arc)

$E/^\circ$	60.1	63.4	66.2	69.0	71.8	74.3	76.3	78.0	77.2	75.5	73.3	70.7	67.9	65.1	62.3
R_0/m	34.5	33.3	32.5	31.8	31.5	30.7	30.2	29.4	29.8	30.4	30.9	31.5	32.1	32.8	33.7
$A_0/^\circ$	-14.5	-14.3	-14.0	-13.8	-13.6	-13.4	-13.5	-14.0	-14.4	-14.7	-14.7	-14.4	-14.1	-13.9	-13.7

通过分析表1和表2的数据知:在空间目标降轨段激光回波光斑中心集中于 $O_1(R_0 = 31 \text{ m}, A_0 = 194^\circ)$ 点附近,与 O_1 点距离小于3 m;在空间目标升

轨段激光回波光斑中心集中于 $O_2(R_0 = 32 \text{ m}, A_0 = -14^\circ)$ 点附近,与 O_2 点距离小于3 m。激光回波光斑中心位置分布示意图如图8所示。

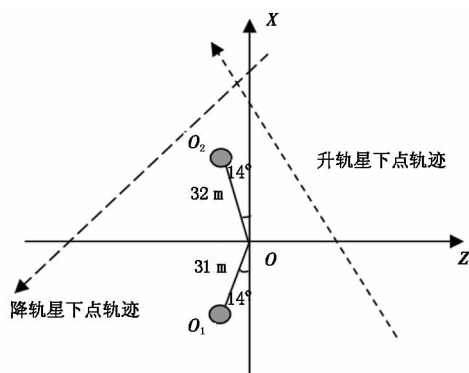


图8 激光回波光斑中心位置分布示意图

Fig.8 distributing diagram of the laser echo spot center location

由此可见,空间目标降轨段和升轨段的激光回波光斑中心分布在不同的区域内,测量时不能兼顾,另外,在较短的空间目标飞行弧段内,其激光回波光斑中心位置分布比较集中,这对激光回波测量设备布站有利。

该实例计算表明,利用上述公式和计算方法能够计算激光回波光斑中心散布的区域,这为定量分析激光回波光斑中心位置分布情况提供了一条有效的技术手段。

5 结 论

通过上述理论推算和实例计算分析可以得出如下结论:

(1)激光回波光斑中心位置在垂线测量坐标系中的坐标是空间目标位置和角速度的函数。

(2)在垂线测量坐标系中,同一空间目标降轨段和升轨段的激光回波光斑中心分布在不同的区域内。但在较短的空间目标飞行弧段内,其激光回波光斑中心位置散布较集中。

(3)在激光回波测量设备布站选址时,针对关注的激光跟瞄弧段,可利用空间目标轨道预报数据和上述公式预估激光回波光斑中心位置。

(4)在对激光回波测量数据进行事后处理时,可利用空间目标轨道实测数据和上述公式计算出激光回波光斑中心的实际位置。

该组公式和计算方法能为激光回波测量设备布站选址、激光回波测量数据事后处理、激光跟踪测量

设备跟瞄能力评价及到达空间目标表面激光功率密度大小评估提供技术支持。

参考文献:

- [1] M Kovacs, G Dryden, R Pohle, et al. Hi-Class on aeos: a large aperture laser radar for space surveillance/situational awareness investigations [C]. Proceedings of SPIE, 2001, 4490: 298 - 305.
- [2] Yang Fumin, Xiao Chikun, Chen Wanzhen, et al. Design and test result of satellite laser ranging at the daytime [J]. China Science: A part, 1998, 28(11): 1048 - 1056. (in Chinese)
杨福民, 肖炽琨, 陈婉珍, 等. 白天卫星激光测距系统的设计和实测结果 [J]. 中国科学: A 辑, 1998, 28(11): 1048 - 1056.
- [3] Li Changzhen, Chen Nianjiang, Zhong Shengyuan. Experiment study on variety of optical characteristics of corner cubes reflectors on different conditions [J]. Laser & Infrared, 2009, 39(5): 483 - 492. (in Chinese)
李长桢, 陈念江, 钟声远. 角反射器在不同条件下光学性能变化实验研究 [J]. 激光与红外, 2009, 39(5): 483 - 492.
- [4] Zhong Shengyuan, Li Changzhen, Chen Nianjiang, et al. Study of the laser retro-reflector on navigation satellites [J]. Laser & Infrared, 2011, 41(8): 834 - 839. (in Chinese)
钟声远, 李长桢, 陈念江. 导航卫星激光后向反射器研究 [J]. 激光与红外, 2011, 41(8): 834 - 839.
- [5] Yang Chenhua, Mei Suisheng, Lin Juntong. The laser & infrared technology handbook [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1990: 228 - 229. (in Chinese)
杨臣华, 梅遂生, 林钧挺. 激光与红外技术手册 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1990: 228 - 229.
- [6] Liu Lisheng, Wu Bin, Yang Ping. Orbit precision determination & self-calibration technique of spacecraft [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005: 17 - 22. (in Chinese)
刘利生, 吴斌, 杨萍. 航天器精密定轨与自校准技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2005: 17 - 22.