

# 星地激光通信相对运动研究与仿真

吴延徽, 吴毅, 侯再红, 李菲

(中国科学院安徽光学精密机械研究所 安徽 合肥 230031)

**摘要:** 星地激光通信系统中, 为了确定激光链路的传输方向, 确定卫星相对于地面站的位置参数。采用两行星历数据的轨道六要素, 根据坐标变换原理, 依次计算卫星在地心轨道坐标系、地心惯性坐标系和地心地固坐标系中的位置, 再由地面站的经纬度和海拔计算在地心地固坐标系中的位置分量, 最后计算在观测坐标系中卫星相对于地面站的位置参数, 包括方位角、仰角和斜距。在 MATLAB 上进行仿真, 输出与卫星工具箱仿真的二体模型时空分布相一致, 证明了方法的正确性, 可为星地激光通信系统的研究提供参考。

**关键词:** 星地激光通信; 位置参数; 坐标变换; 卫星; 地面站

中图分类号: TP391.9 文献标识码: B

## Study and Simulation of Relative Motion in Satellite and Ground Station Laser Communication

WU Yan-hui, WU Yi, HOU Zai-hong, LI Fei

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Hefei Anhui 230031, China)

**ABSTRACT:** In satellite and ground station laser communication system, to get the direction of laser link, it is necessary to know the position parameters of satellite against with ground station. According to the six orbit elements of two lines planet calendar data and principle of coordinate conversion, the method calculates satellite position component in geocentre orbit coordinate system, Earth Centered Inertial coordinate system and Earth Centered Earth Fixed coordinate system. Then it calculates ground station position component from ground station's longitude, latitude and altitude. At last, it calculates the position parameters of satellite against with ground station, including azimuth, elevation and range. Using MATLAB to simulate the whole calculating process, the results are consistent with two body model's reports in STK, which proves the correctness of the method.

**KEYWORDS:** Satellite and ground station laser communication; Position parameters; Coordinate conversion; Satellite; Ground station

### 1 引言

在星地激光通信系统中, 捕获、瞄准和跟踪关系到通信链路的建立和保持。在光束扩散角小、传输距离长的情况下, 卫星相对于地面站的位置参数的计算显得尤为重要。目前研究星地激光通信处于领先地位的有美国喷气推进实验室(JPL)、日本通信综合研究所(CRL)和欧洲航天局(ESA)等<sup>[1]</sup>。在实际中, 捕获、瞄准和跟踪方案的基本思路是首先利用一个较宽的信标光束进行开始阶段的大范围探测、跟踪与瞄准, 称为粗跟踪; 待对方捕获后, 再利用高带宽的精瞄控制系统对粗跟踪误差进行补偿, 进行进一步的瞄准, 进而实现闭环跟踪<sup>[2]</sup>。本文主要研究粗跟踪中确定卫星相对于地面站位置参数的问题, 减小开始阶段的探测范围。根据两行

星历数据, 得到了与 STK 二体模型相一致的结果。

### 2 问题的提出

#### 2.1 坐标系

地心轨道坐标系  $S_o'$ : 原点  $O$  在地球中心,  $x_o'$  轴从地心指向航天器, 也就是沿地心距矢量  $r$ ,  $y_o'$  轴在轨道平面内, 垂直于矢量  $r$ , 指向前方,  $z_o'$  轴垂直于轨道平面, 满足右手坐标系法则。

地心惯性( ECI) 坐标系  $S_i$ : 坐标原点  $O$  在地球中心,  $x_i$  轴在赤道面内指向春分点方向,  $y_i$  轴指向北极,  $y_i$  轴与  $z_i$  轴和  $x_i$  轴成右手坐标系。

地心地固( ECF) 坐标系  $S_e$ : 地心  $O$  是坐标原点,  $x_e$  轴指向  $0^\circ$  经线方向, 而  $y_e$  轴指向东经  $90^\circ$  的方向,  $z_e$  轴指向地理北极, 三者形成右手坐标系。

收稿日期: 2012-01-05 修回日期: 2012-02-24

观测坐标系  $S_p$ : 以观测点  $P$  为原点, 建立观测坐标系  $Px_p y_p z_p$ , 其  $x_p$  轴水平向北,  $y_p$  轴水平向东,  $z_p$  轴铅垂向下。

## 2.2 地球的参考椭球模型

在此模型中考虑大地的扁率, 把大地看成一个以地轴为轴线的有扁率的旋转椭球体, 地球赤道半径  $R_E = 6378.140 \text{ km}$ , 极半径  $R_p = 6356.755 \text{ km}$ , 地球平均半径  $R = 6371.004 \text{ km}$ , 地球的扁率  $c = 0.0033528$ 。

地心纬度  $\varphi$  与大地纬度  $\Phi$  的关系为

$$\tan\varphi = (1 - c)^2 \tan\Phi \quad (1)$$

当地地球半径可表示为

$$R_l = R_E \frac{1 - c}{\sqrt{1 - c(2 - c) \cos^2\varphi}} \quad (2)$$

已知某点(地面站)  $L$  的大地纬度  $\Phi_L$ 、经度  $\lambda_L$ 、海拔  $h_L$ , 首先按式(1) 计算  $\varphi_L$ , 按式(2) 计算  $R_{LL}$ , 然后按下面公式计算地面站在  $ECF$  坐标系中的坐标(图1):

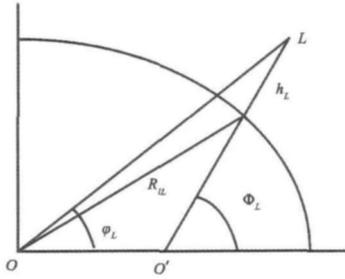


图1 地面站  $L$  的坐标

$$\begin{pmatrix} x_L \\ y_L \\ z_L \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (h_L \cos\Phi_L + R_{LL} \cos\varphi_L) \cos\lambda_L \\ (h_L \cos\Phi_L + R_{LL} \cos\varphi_L) \sin\lambda_L \\ h_L \sin\Phi_L + R_{LL} \sin\varphi_L \end{pmatrix} \quad (3)$$

## 2.3 Greenwich 赤经的计算

在天文学中采用连贯的计算时间尺度, 称为 Julian 日, 符号  $jd$ <sup>[4]</sup>。

从日历日期和时间到 Julian 日  $jd$  的换算。给定时刻: yr(年) mh(月) dy(日) hr(时) mn(分) sec(秒), 其中前五个都是整数, sec 是浮点数。首先把时、分、秒折算成日, 与  $dy$  相加, 成为浮点的日:

$$dayf = dy + (hr + mn/60 + sec/3600) / 24 \quad (4)$$

然后计算 Julian 日:

$$jd = 367 * yr - fix(7 * (yr + fix((mh + 9) / 12) / 4) + fix(275 * mh / 9)) + dayf + 1721013.5 \quad (5)$$

此公式适用于 1900 至 2099 年。

目前常用的是以 J2000.0(即 2000 年 1 月 1 日 12 时) 为起点的简约 Julian 日, 它与  $jd$  的关系是:

$$mjd = jd - 2451545.0 \quad (6)$$

Greenwich 赤经  $\alpha_G$  是随时间变化的。给定时刻: yr, mh, dy, hr, mn, sec, 按式(6) 计算  $mjd$ , 然后计算 Greenwich 赤经

$\alpha_G$ (单位为 deg):

$$\alpha_G = GST = [280.46061837 + 360.98564736629 * mjd + \dots + 0.000388 * (mjd/36525)^2] \text{mod} 360 \quad (7)$$

以上涉及的时间都是世界时(Universal Time UT 或 Greenwich Mean Time GMT), 它与北京时间 BT 的关系是:  $BT = UT + 8h$ 。

## 3 计算方法

下面推导如何由两行星历数据和地面站信息计算出在  $S_p$  中的方位角、仰角和斜距的时空变化:

### 3.1 由已知两行星历数据到地心轨道坐标系的计算

从两行星历数据中得到: 历元参数(历元时刻)  $t_0$ 、平动(每天转动的圈数)  $n$ 、扁率  $e$ 、倾角  $i$ 、升交点赤经  $\Omega$ 、平均近点角  $M$  和近地点幅角  $\omega$ 。

轨道半径  $a$  为

$$a = \left(\frac{\mu}{n^2}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (8)$$

任意时刻  $t$  的平均近点角为

$$M = M(t_0) + n(t - t_0) \quad (9)$$

根据 Kepler 方程:

$$M = E - e \sin E \quad (10)$$

用简单迭代法, 可以得到  $E$ 。

地心距  $r$  为

$$r = a(1 - e \cos E) \quad (11)$$

真近点角  $f$  为:

$$f = 2 \cdot \arctan\left(\sqrt{\frac{1+e}{1-e}} \cdot \tan \frac{E}{2}\right) \quad (12)$$

### 3.2 $S_o$ 到 $S_i$ 的计算

$S_o$  与  $S_i$  是通过  $\Omega$ ,  $i$  和  $f$  来联系的, 因而有坐标变化矩阵<sup>[4]</sup>:

$$L_{oi} = L_z(u) L_x(i) L_z(\Omega) = \begin{pmatrix} \cos\Omega \cos\omega - \sin\Omega \sin\omega \cos i & \cos\Omega \sin\omega + \sin\Omega \cos\omega \cos i & \sin\Omega \sin i \\ -\sin\Omega \cos\omega - \cos\Omega \sin\omega \cos i & -\sin\Omega \sin\omega + \cos\Omega \cos\omega \cos i & \cos\Omega \sin i \\ \sin\Omega \sin\omega & -\sin\Omega \cos\omega & \cos i \end{pmatrix} \quad (13)$$

上式中  $u = \omega + f$  称为纬度幅角,  $q_{ij}$  为上式中第  $i$  行第  $j$  列元素。

在  $S_i$  中卫星位置矢量为

$$r = \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{pmatrix} = L_{oi}(u, i, \Omega) \begin{pmatrix} r \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} q_{11}r \\ q_{12}r \\ q_{13}r \end{pmatrix} \quad (14)$$

### 3.3 $S_i$ 到 $S_e$ 的计算

$S_i$  和  $S_e$ , 它们的  $z_i$  和  $z_e$  轴是一致的, 而  $x_i$  与  $x_e$  之间(同  $y_i$  与  $y_e$  之间) 有一个角度, 以  $\alpha_G$  表示。 $\alpha_G$  称为 Greenwich 赤经, 在不太长的时间内可以表示成:

$$\alpha_G = \alpha_{G0} + w_E(t - t_0) \quad (15)$$

其中  $\alpha_{00}$  是  $t_0$  时刻的  $\alpha_C$  值  $\mu_E$  为地球自转角速度, 由此得到坐标变换矩阵:

$$L_{ei} = L_z(\alpha_C) = \begin{pmatrix} \cos\alpha_C & \sin\alpha_C & 0 \\ -\sin\alpha_C & \cos\alpha_C & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (16)$$

将  $S_i$  中的  $S$  点的位置矢量转化到  $S_e$  中:

$$\begin{pmatrix} x_e \\ y_e \\ z_e \end{pmatrix} = L_{ei} \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{pmatrix} \quad (17)$$

### 3.4 $S_e$ 到 $S_p$ 的计算

$S_e$  与  $S_p$  的坐标变换矩阵为

$$L_{pe} = L_y(-\Phi_L - \pi/2) L_z(\lambda_L) = \begin{pmatrix} -\sin\Phi_L \cos\lambda_L & -\sin\Phi_L \sin\lambda_L & \cos\Phi_L \\ -\sin\lambda_L & \cos\lambda_L & 0 \\ -\cos\Phi_L \cos\lambda_L & -\cos\Phi_L \sin\lambda_L & -\sin\Phi_L \end{pmatrix} \quad (18)$$

由式(18) 将  $S_e$  中的位置矢量转化到  $S_p$  中:

$$\begin{pmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{pmatrix} = L_{pe} \begin{pmatrix} x_e \\ y_e \\ z_e \end{pmatrix} \quad (19)$$

求出矢量  $q$  在  $S_p$  中的分量:

$$\begin{pmatrix} q_{xp} \\ q_{yp} \\ q_{zp} \end{pmatrix} = L_{pe} \begin{pmatrix} q_{xe} \\ q_{ye} \\ q_{ze} \end{pmatrix} = L_{pe} \begin{pmatrix} x_e - x_L \\ y_e - y_L \\ z_e - z_L \end{pmatrix} \quad (20)$$

于是可求出斜距为

$$|(q)_p| = \sqrt{q_{xp}^2 + q_{yp}^2 + q_{zp}^2} \quad (21)$$

方位角为

$$\mu = \arctan \frac{q_{yp}}{q_{xp}} \quad (22)$$

仰角为

$$\varepsilon = \arcsin\left(-\frac{q_{zp}}{|(q)_p|}\right) \quad (23)$$

从而可以得到在  $S_p$  中  $S$  点位置矢量为  $(r_s)_p = (x_p, y_p, z_p)$  速度矢量为  $(v_s)_p = (v_{xp}, v_{yp}, v_{zp})$  进而可以根据仰角的限制, 求出方位角, 仰角和斜距的时空分布, 进行仿真的结果证明了正确性。

## 4 仿真结果及比较

为了证明算法的准确性, 从 STK(卫星工具箱) 中得到 QUICKBIRD-2 两行轨道元素<sup>[4]</sup>, 其中  $t_0 = 09047.14451822$ 、 $n = 15.39893453$ 、 $e = 0.00015950$ 、 $i = 97.1570^\circ$ 、 $\Omega = 126.5279^\circ$ 、 $M(t_0) = 23.7824^\circ$ 、 $\omega = 62.6685^\circ$ 。

开发 MATLAB 图形用户界面(GUI), 仿真计算过程, 输入上述卫星星历数据, 地面站取合肥坐标信息, 经度  $\lambda_L = 117.17^\circ$ , 纬度  $\Phi_L = 31.52^\circ$ , 海拔  $h_L = 29.8$  m, MATLAB GUI 如图 2 所示。

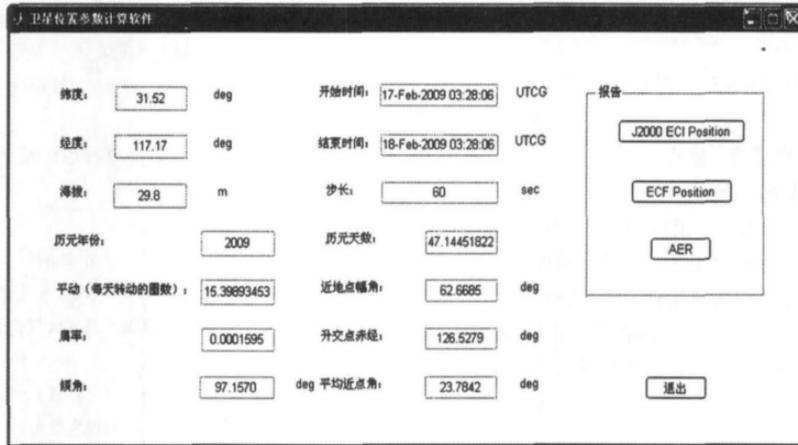


图 2 卫星位置参数计算软件界面

为了与 STK 进行比较, J2000 ECI 和 ECF Position 报告, 步长为 3600 sec; AER(方位角、仰角和斜距)报告, 步长为 60 sec; 三个报告的起始时间为 1 Jun 2009 12:00:00.00 UTCG, 结束时间为 2 Jun 2009 12:00:00.00 UTCG。由于仿真的起始时间和 STK 时间不是完全一致, 故不进行偏差统计。

1) J2000 ECI 坐标系位置分量的比较, 如图 3 所示。

由图 3 可以看出, 在 J2000 ECI 坐标系中, 计算的卫星的位置坐标与 STK 计算的位置坐标是很接近的。

2) ECF 坐标系位置分量的比较, 如图 4 所示。

由图 4 可以看出, 在 ECF 坐标系中, 计算的卫星位置坐

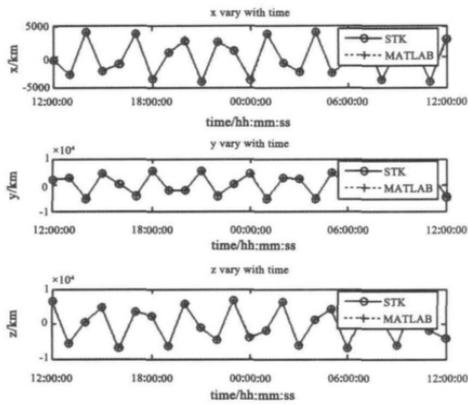


图3 J2000 ECI 坐标系中位置随时间的变化曲线

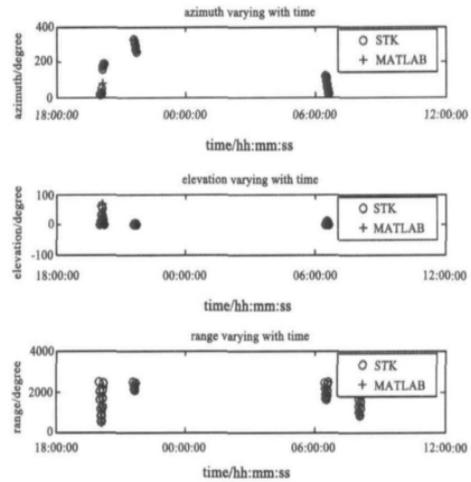


图5 方位角仰角和斜距随时间的变化曲线

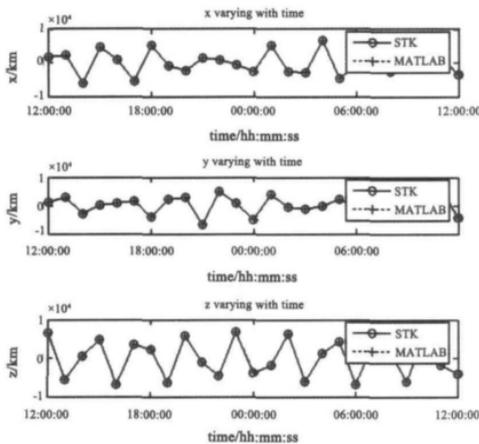


图4 ECF 坐标系中位置随时间的变化曲线

标与 STK 的结果也是非常一致的。

### 3) AER 比较 如图 5 所示。

从图 5 看出,在可见性范围内,方位角、仰角和斜距与 STK 的结果是比较一致的,可以对卫星进行预报。三个报告 的比较,验证了算法的准确性。对于更复杂的模型,考虑地球 扁率的长期和周期性影响、太阳月亮的引力作用、重力场谐 振影响和阻力模型下的轨道衰减,需要代入两行星历数据中 的其它数据,算法也需要做修正,有待进一步研究。

## 5 结论

本文考虑的是二体模型,由两行星历数据中的六要素, 依次计算地心轨道坐标系、J2000 ECI 坐标系、ECF 坐标系中 的位置坐标,再根据地面站的位置坐标,联合计算卫星在观

测坐标系中相对于地面站的位置,进而可以求出方位角、仰 角和斜距。

与 STK 仿真结果比较,数据呈现一定的一致性,此方法 计算卫星在各个坐标系中的位置,进而求方位角、仰角和斜 距,是可行的。这对卫星捕获、粗跟踪和星地激光通信有一 定的参考价值,可以实现卫星的初步定位。

### 参考文献:

- [1] 李晓峰. 星地激光通信链路原理与技术[M]. 北京:国防工业 出版社,2007:12-14.
- [2] 宋申明,等. 卫星光通信粗瞄系统非线性摩擦的神经网络补偿 [J]. 航空学报,2007,28(2):358-364.
- [3] 郝小宁,王威,高玉东. 近地航天器轨道基础[M]. 长沙:国防 科技大学出版社,2003:54-56.
- [4] 付兆萍. 卫星轨道运动方程数值算法研究[D]. 武汉:华中科 技大学,2006.
- [5] 杨颖,王琦. STK 在计算机仿真中的应用[M]. 北京:国防工业 出版社,2005:51-52.

### [作者简介]



吴延徽(1987-),男(汉族),安徽芜湖人,硕士研 究生,主要研究领域为激光大气传输光电测试技术 研究;

吴毅(1960-),男(汉族),江苏人,研究员,博士 生导师,主要研究领域为激光大气传输与探测;

侯再红(1968-),男(汉族),山西人,研究员,博士 生导师,主要研究领域为测控仪器;

李菲(1981-),男(汉族),安徽人,博士生,主要 研究领域为大气光通信。