

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2013.09.015

基于通信转发器的扩频测距技术^{*}

陈 勇^{1,2,**}, 陈 菊^{1,2}, 李广庆^{1,2}

(1. 宇航动力学国家重点实验室, 西安 710043; 2. 西安卫星测控中心, 西安 710043)

摘 要:针对航天器测控中利用卫星通信转发器实现多站测距进行可行性分析,在扩频测距帧测距原理的基础上,研究利用卫星转发器对上行测距信号变频转发来实现对星测距,同时对卫星工程测控与应用系统之间上下行链路功率分配、标校方法、地面测量设备组成原理等关键技术进行分析论述。该测距方案突破了传统多站测距时受卫星应答机配置数量的限制条件,实现多站同时测距后,可以提高测距精度和定轨精度,降低对设备测角精度的要求,减少测轨时间,有效缓解测控设备资源紧张的状况,同时该测距方式还可作为应答方式侧音测距的有效技术备份手段。

关键词:卫星测控;通信转发器;扩频测距;定轨

中图分类号:V556 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2013)09-1197-05

Spread Spectrum Ranging Technique Based on Communication Translator

CHEN Yong^{1,2}, CHEN Ju^{1,2}, LI Guang-qing^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Astronautic Dynamics, Xi'an 710043, China;
2. China Xi'an Satellite Control Center, Xi'an 710043, China)

Abstract: The feasibility of using satellite translator to realize multiple-station ranging in TT&C of spacecraft is analyzed. On basis of spread spectrum ranging principle, using communication translator that translates uplink ranging signals to downlink ranging signals to achieve distance-measuring for satellite is studied. Meanwhile, the key technology including communication link power allocation between engineering TT&C and application system of satellite, calibration method and the principle of satellite ground measuring equipment is described. The ranging scheme can break through traditional multiple-station ranging method that is limited by the number of satellite transponders. The achievement of new multiple-station ranging technique can improve ranging precision of equipment and orbit precision of satellite, reduce the requirement of equipment's goniometer precision and measuring time, and control equipment resources tension situation, while the ranging method is a backup means for side tone ranging using satellite transponder.

Key words: satellite TT&C; communication translator; spread spectrum ranging; orbit determination

1 引 言

卫星在轨运行过程中,除了受到地球的引力外,还受到各种摄动力的作用,包括月球和太阳引力、地球非均匀球体引力势、太阳辐射压力等,摄动力使卫星轨道的半长轴、倾角、偏心率等产生了线性或非线

性漂移^[1]。为了维持卫星轨道,需要定期对卫星进行精确控制,而轨道控制的前提是地面测控设备对卫星进行外弹道测量以获得准确的轨道根数。

轨道测量是利用无线电测量设备跟踪卫星,测量瞬时位置矢量和速度矢量,解算出卫星的轨道根数。不同的测轨方案对测量设备的测量时间和测量元素要求也不同。当采用单站测轨时,要求测站连

^{*} 收稿日期:2013-04-18;修回日期:2013-06-09 Received date:2013-04-18;Revised date:2013-06-09
^{**} 通讯作者:chenyong_xa@hotmail.com Corresponding author:chenyong_xa@hotmail.com

续跟踪卫星的一个轨道周期,测量元素必须同时包含距离和角度信息;当采用双站测轨时,可以在一个轨道周期内选择几个弧段分时测量,每次几十分钟就可以满足测轨时间要求,测量元素仅需要测距信息即可满足定轨条件,无测角数据要求,这将大大降低测控天线的研制成本;当采用三站测轨时,仍然在一个轨道周期内选择几个弧段分时测量,但每个弧段测量时间可以由几十分钟降到几分钟,且只要有测距信息就可以完成卫星定轨。

传统的侧音测距体制受到星载应答机配置数量的限制,一般只能采用单站或双站测轨方案,测轨会占用大量的测控设备资源,尤其在卫星寿命末期,一旦应答机出现故障后,将无法完成对卫星的轨道测量,进而影响应用系统的正常业务。扩频测距具有抗干扰、精度高等优点,航天测控中利用卫星的通信转发器,采用频分复用技术,在不影响卫星正常通信业务的前提下,可以实现对卫星的距离测量,采用多站测距可以实现对卫星的轨道确定。

2 扩频测距原理

系统采用非相干伪码扩频测距方式,上、下行信号采用测距帧结构,上行测距帧调制上行伪距信息,由基带自身形成的上行测距帧同步信息对上行测距帧和扩频伪码进行采样,将测量帧位计数、扩频伪码计数、码相位等信息调制在上行测距帧上,卫星转发器收到上行信号后只进行变频和功率放大,不对测距帧处理,故上下行测距帧完全相同。多站测距时,各站之间上下行信号和测距帧完全独立,相互之间不受影响。测距原理图如图 1 所示。

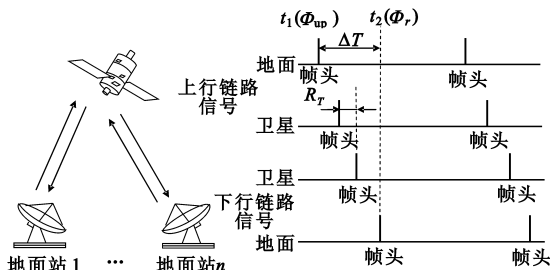


图 1 扩频测距原理图

Fig.1 Schematic diagram of spread spectrum ranging

测距信号流程如下:

基带生成上行测距帧 PCM 流,采用 $2^n - 1$ 位短码扩频后对载波进行 BPSK 调制输出 70 MHz 中频载波,上行信道对中频信号进行上变频、功率放大后经天馈系统辐射到卫星;

卫星天线收到上行信号后,经接收天线馈送到转发器入口,经过输入预选器滤除掉无用带外信号,有用信号输入到接收机进行低噪声放大、变频和高增益放大,下行信号经发射天线传回地面^[2];

地面设备接收到下行测距链路信号后进行解扩、解调、帧同步,利用收到的下行测距信息帧同步信息对上行测距帧采样,得到测距帧计数、位计数、扩频伪码计数、码相位,与下行测距帧获取的测距信息进行比较计算得到星地空间距离。

$$R = \frac{c \times \Delta T}{2} - R_T - R_{0g} = \frac{c \times (\Phi_{up} - \Phi_r)}{2R_{pn}} - R_T - R_{0g} \quad (1)$$

式中, c 为光速(单位 m/s); ΔT 为测距帧星地传输时延(单位 s); Φ_{up} 为上行测距帧头产生时刻扩频码相位; Φ_r 为下行测距帧同步码解调时刻上行扩频码相位; R_{pn} 为 PN 码码率(单位 MHz); R_T 为卫星零值(单位 m); R_{0g} 为地面设备距离零值(单位 m)。

3 测量精度比较

测量精度主要受随机的和系统时间测量误差所限制,这些误差在测量测距信号往返时以随机误差和系统误差形式表示。

3.1 测距随机误差

测距随机误差主要由地面热噪声、测距量化误差、主振器短稳、主振器长稳引入。

3.1.1 地面热噪声引入的随机误差 (σ_{R1})

非相干伪码测距通过测伪码整周数和伪码相位的方式得到距离信息,应答式侧音测距通过测量测距音相位得到距离信息,地面热噪声会对伪码码环相位或侧音环相位提取产生影响,从而导致距离误差。跟踪误差为

$$S_t = D \sqrt{\frac{B_n(1 + 2/(T(C/N_0)))}{2C/N_0}} \quad (2)$$

式中, D 为扩频码元宽度或测距主音波长, B_n 为码环宽度, T 为预检测积分时间, $T \leq 1/R_b$, R_b 为信息速率, C/N_0 为载噪比。

对于非相干伪码测距,热噪声引起的误差约为 0.45 m;对于应答式侧音测距,热噪声引起的误差约为 13.6 m。

3.1.2 测距量化误差 (σ_{R2})

相位提取是通过测量收发码钟 DCO 相位差,相位分辨率与 DCO 位数有关。如果 DCO 的相位为 32 位二进制码时,测距量化精度引起的量化误差可忽

略不计。

3.1.3 主振短稳引入的随机误差(σ_{R3})

主振采用直接倍频方式,其短稳与 10 MHz 频标短稳($2 \times 10^{-11}/20\text{ ms}$)在同一数量级上,引起的测距随机误差可以忽略。

3.1.4 主振长稳引入的随机误差(σ_{R4})

主振长稳同短稳一样,其长稳与 10 MHz 频标长稳($2 \times 10^{-11}/\text{日}$)在同一数量级上,引起的测距随机误差非常小。

总的测距随机误差

$$\sigma_R = \sqrt{\sigma_{R1}^2 + \sigma_{R2}^2 + \sigma_{R3}^2 + \sigma_{R4}^2} \tag{3}$$

根据以上计算结果,非相干伪码测距的系统随机差约为 0.45 m,应答式侧音测距的系统随机差约为 13.6 m。

3.2 测距系统误差

测距系统误差主要由基带中频滤波器时延变化、码环跟踪误差、AGC 放大器时延变化、信道时延变化和校零残差引入。

3.2.1 发射、接收中频滤波器随温度和时间变化而引入的时延变化($\Delta R1$ 、 $\Delta R2$)

基带中频滤波器带宽为 20 MHz,滤波器带内最大时延不超过 100 ns,随温度 and 时间的相对变化率为 10^{-3} ,在 45℃ 温度变化范围引入时延变化

$$\Delta \tau = 100 \times 10^{-3} \times 45 = 4.5\text{ ns}$$

相应距离误差 $\Delta R1 = \Delta R2 = 0.68\text{ m}$ 。

3.2.2 目标动态滞后码环跟踪误差($\Delta R3$)

扩频码跟踪环或侧音跟踪环一般采用二阶码环,目标加速度引起的动态误差可用下式计算:

$$\Delta R3 = a/2(3.56B_n^2)$$

式中, a 为目标加速度, B_n 为环路带宽。同步卫星在轨运行时,载波多普勒变化率按 6.25 kHz/s 计算,目标加速度 $a = 469\text{ m/s}^2$ 。对于非相干伪码测距, $\Delta R3 = 0.07\text{ m}$;对于应答式侧音测距, $\Delta R3 = 8.12\text{ m}$ 。

3.2.3 AGC 放大器时延变化($\Delta R4$)

接收信号电平变化引起 AGC 放大器时延变化取 5 ns,对应测距误差 $\Delta R4 = 0.8\text{ m}$ 。

3.2.4 校零残差($\Delta R5$)

校零残差包括设备零值变化、校零变频器时延测试误差及校零时空间测量误差等,非相干伪码测距方式下,校零残差约为 1.0 m;应答式侧音测距方式下,校零残差约为 6 m。

收发信道引起系统误差 $\Delta R6 = 0.7\text{ m}$;总的测距

系统误差

$$\Delta_R = \sqrt{\Delta_{R1}^2 + \Delta_{R2}^2 + \Delta_{R3}^2 + \Delta_{R4}^2 + \Delta_{R5}^2 + \Delta_{R6}^2} \tag{4}$$

根据以上计算结果,非相干伪码测距的系统随机差约为 1.75 m,应答式侧音测距的系统随机差约为 10.2 m。

经比较分析,采用非相干伪码测距,系统差和随机差均提高了一个数量级。

4 关键技术

4.1 电平分配设计

通信转发器工作时,上行电平已达到饱和处于转发态,工程测距链路电平设计时,主要考虑地面测站上行功率不会影响转发器安全和用户间的正常通信,同时接收到的下行测距信号功率满足测距门限。

地面设备天线口面有效辐射功率按照使转发器达到饱和电平的十分之一发射上行信号,三站同时测距使转发器接收到的信号功率增加约 1.14 dB,不会损害转发器及卫星用户的正常通信。上行链路电平计算如下式所示:

$$EIRP_E = E_s + L_e + B_l + B_c + L_o - 10 \tag{5}$$

式中, $EIRP_E$ 为地面设备天线辐射功率 (dBW); E_s 为转发器饱和通量密度 (dBW/m²); L_e 为发散损耗 (dB·m²); B_l 为转发器输入回退,取 6 dB; $B_c = 10\lg(BW_{\text{xpd}}/BW_c)$ 为载波回退; L_o 为指向误差、雨衰引起信号衰减,取 2 dB。

地面设备收到的下行信号与卫星 EIRP 值、空间损耗和地面设备 G/T 值有关,转发器工作在多载波情况下,还需考虑转发器回退和载波回退^[3]。下行链路电平如下式所示:

$$C/N_0 = EIRP_s - B_o - B_c - L_{sp} + G/T + K - L_o \tag{6}$$

式中, $EIRP_s$ 为卫星天线等效辐射功率 (dBW); B_o 为转发器输出回退; B_c 为载波回退; L_{sp} 为空间损耗; G/T 为地面设备品质因素; L_o 为指向误差、雨衰引起信号衰减,取 2 dB; K 为波尔兹曼常数,取 -228.6 dBW/Hz。

以赤道上空 110°E 位置通信卫星为例,假设卫星转发器饱和通量密度为 -90 dBW/m²,转发器带宽为 36 MHz,功放额定功率 20 W,天线发射增益按 23 dB 估算,对于不同口径天线的地面站上行功率设置和下行信噪比分别如表 1 所示。

表 1 地面设备上下行链路电平
Table 1 The uplink and downlink power level of ground equipment

天线口径/m	天线增益/dB	(G/T)/(dB/K)	测距门限/dBHz	EIRPE/dBW	功放功率/W	信噪比/dBHz
15	57	32.0			23	79.9
12	55	29.0	37	67.5	35	76.9
4.5	46	18.5			280	66.4

由计算结果可知,以上 3 种不同口径天线上下行电平平均能满足测距要求。

4.2 扩频码选择

扩频测距系统采用非相干伪码测距,具有码分多址的特点。扩频码选择要求伪随机序列的随机性好、周期长,有良好的自相关性、互相关性和部分相关性,同时具有足够数量的地址码可供选择,平衡 Gold 码是作为地址码的一种良好的码型^[4]。

如果卫星通信转发器的带宽为 B ,为充分利用其带宽以提高系统测距精度,选用扩频码率为 $\frac{B}{2}$ chip/s,码长为 $2^n - 1$ 位,由于卫星只对上行信号进行变频转发,不进行解扩处理,故同一测站上下行采用相同扩频码,且扩频码的选择灵活,不受星上状态的限制。

4.3 地面设备传输时延标定

地面设备传输时延标定采用偏馈振子无线校零方法,将偏馈振子安装在天线主反射面上,校零变频器的输入、输出端通过两根射频电缆连接到偏馈振子上。系统校零的信号流程是:测距信号经扩频、调制、上变频、功率放大后,通过馈源喇叭辐射到天线副面,反射进入天线主面,被偏馈振子接收,经校零变频器将上行信号变为下行信号;下行信号经偏馈振子辐射到主天线副面后被反射进入馈源喇叭,通过地面设备下行链路被接收解调,构成无线射频闭环^[5]。

组成标校环路的偏馈振子、射频电缆、校零变频器的传输时延可以准确标定,标校环路与对星测量环路的测量原理完全相同,标校环路测得的距离值扣除标校部分传输时延即可得到地面设备传输时延。

5 扩频测距系统组成

扩频测距利用星上转发器变频转发方式实现,测距上行信号为 f_u ,下行信号为 f_d ,地面设备组成原理框图如图 2 所示。由测距单元产生的上行测距帧信

息流 $a(t)$ 与上行伪随机序列 $c(t)$ 进行模 2 加运算,产生一速率与伪随机序列速率相同的扩频序列 $d(t)$,然后再用扩频序列对载波进行调制得到已调中频载波信号,经上变频和功率放大后向卫星辐射。

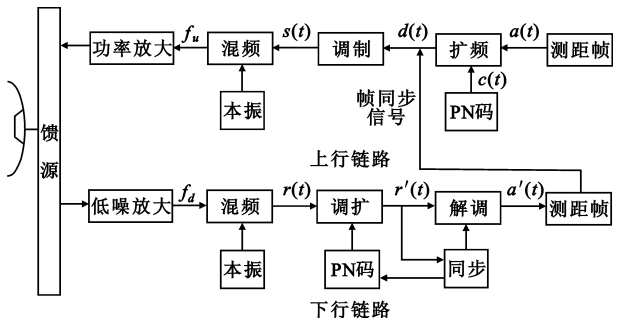


图 2 地面设备原理框图
Fig.2 The schematic diagram of ground equipment system composition

在接收端,接收到的扩频信号经低噪声放大和混频后,用与上行伪随机序列一致的伪随机序列对扩频信号进行相关处理,使有用的信号由宽带信号恢复为窄带信号。再对解扩后的载波信号进行解调,得到测距信息流,经搜索、校核、锁定后得到同步的测距数据帧,并用帧同步信息对上行扩频序列 $d(t)$ 采样,得到下行帧同步时刻对应上行扩频码相位 Φ_r ,同时根据下行测距帧调制信息内容可以得到上行测距帧头产生时刻扩频码相位 Φ_{up} ,从而计算得到星地距离。

6 结束语

扩频测距技术是一种具有优异性能的测距方式,自诞生之日就受到了广泛关注。本文对扩频测距原理、地面设备组成进行了详细阐述,分析比较了两种测距体制下的测量精度,并对基于通信转发器测距的关键技术进行了论述。

基于通信转发器的扩频测距技术的应用,将不再借助星载测控应答机就可实现对卫星的测距定轨,简化了星上设备。在不受星上应答机配置的限制的情况下,可轻松实现地面多站对卫星的测距,进而提高地面测控设备资源利用率,因此具有重要的现实意义。

参考文献:

[1] 郝岩. 航天测控网[M]. 北京:国防工业出版社,2004:57-72.
HAO Yan. Spaceflight TT&C Network[M]. Beijing: National

- Defense Industry Press, 2004: 57 – 72. (in Chinese)
- [2] 李志刚, 杨旭海, 冯初刚. 转发式卫星测轨方法[J]. 时间频率学报, 2006, 29(2): 81 – 84.
LI Zhi-gang, YANG Xu-hai, FENG Chu-gang. Method of Satellite Orbit Survey With Transfer[J]. Journal of Time and Frequency, 2006, 29(2): 81 – 84. (in Chinese)
- [3] 彭文标, 刘馨琼, 严朝军. 卫星传输系统链路计算与分析[J]. 三峡大学学报, 2011, 33(3): 40 – 41.
PENG Wen-biao, LIU Xin-qiong, YAN Chao-jun. Calculation and Analysis of Satellite Transmission System Link Budget [J]. Journal of China Three Gorges University, 2011, 33(3): 40 – 41. (in Chinese)
- [4] 曾兴雯, 刘乃安, 孙献璞. 扩展频谱通信及多址技术[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004: 58 – 59.
ZENG Xing-wen, LIU Nai-an, SUN Xian-pu. Spread Spectrum Communication and Multiple Access Technology[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2004: 58 – 59. (in Chinese)
- [5] 董建伟, 高长生, 熊伟. 脉冲测量雷达无塔标校准系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2013, 21(3): 685 – 686.
DONG Jian-wei, GAO Chang-sheng, XIONG Wei. Design of Tower-less Calibration System for Pulse Instrumentation Radar [J]. Computer Measurement & Control, 2013, 21(3): 685 – 686. (in Chinese)

作者简介:



陈 勇(1975—), 男, 山西临猗人, 1997 年于北京轻工业学院机电工程系获学士学位, 现为工程师, 主要研究方向为航天测控设备运行与管理;

CHEN Yong was born in Linyi, Shanxi Province, in 1975. He received the B. S. degree from Beijing Institute of Light Industry in 1997. He is now an engineer. His research concerns operation and management of aerospace TT&C equipment.

Email: chen Yong_xa@hotmail.com

陈 菊(1960—), 女, 福建福安人, 高级工程师, 主要研究方向为航天测控设备系统设计;

CHEN Ju was born in Fuan, Fujian Province, in 1960. She is now a senior engineer. Her research concerns aerospace TT&C equipment design.

Email: juchen@126.com

李广庆(1967—), 男, 陕西铜川人, 高级工程师, 主要研究方向为航天测控设备系统设计。

LI Guang-qing was born in Tongchuan, Shaanxi Province, in 1967. He is now a senior engineer. His research concerns aerospace TT&C equipment design.

Email: guangqingli@hotmail.com