

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2017.01.010

引用格式:王轶,王建平,陈昊,等. 机动测控单元定姿定位及目标捕获技术[J]. 电讯技术,2017,57(1):59-63. [WANG Yi, CHEN Jianping, CHEN Hao, et al. Attitude determining, positioning and target capturing technology for a mobile TT&C unit[J]. Telecommunication Engineering, 2017, 57(1): 59-63.]

机动测控单元定姿定位及目标捕获技术*

王 轶**¹, 王建平¹, 陈 昊², 马 强¹

(1. 西安卫星测控中心, 西安 710043; 2. 中国电子科技集团公司第二十七研究所, 郑州 450005)

摘 要:为满足动中测控的机动测控设备建设需求,根据天线姿态误差对角精度误差的影响分析,提出了运动中天线姿态误差的定量计算方法,采用一种合理的天线稳定和目標捕获方法,对运动中目标捕获跟踪的影响因素进行了定量分析。通过机动测控单元样机对在轨卫星试验动态跟踪的数据研究,验证了姿态误差计算方法的可行性,为动中测控建设提供了有效的技术途径。

关键词:测控系统;机动测控;定姿定位;捕获跟踪

中图分类号:V556;TN911.7 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2017)01-0059-05

Attitude Determining, Positioning and Target Capturing Technology for a Mobile TT&C Unit

WANG Yi¹, WANG Jianping¹, CHEN Hao², MA Qiang¹

(1. Xi'an Satellite Control Center, Xi'an 710043, China;

2. The 27th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation (CETC), Zhengzhou 450005, China)

Abstract: To satisfy the mobile TT&C construction requirement of maneuvering station distribution, according to the research on the effect of attitude error on angle accuracy, the quantitative calculation method of antenna attitude error in moving condition is proposed. A reasonable and effective antenna stabilitate and target capturing method is adopted, and the influencing factor of target capturing and tracking in moving condition is quantificationally estimated. With the research on mobile tracking satellite data by experiment of a prototype, the feasibility of attitude error calculation method is verified, which provides an effective technology way of mobile TT&C construction.

Key words: TT&C system; mobile TT&C; attitude determination and positioning; capturing and tracking

1 引 言

目前我国陆基测控网主要由测控中心、固定测控站和活动测控站组成。其中,活动测控站担负着机动测控、灵活补网的重要任务。在采用数字化综合基带等技术后,一套车载式机动测控设备已由测控网建设初期的十多辆设备车减少至数辆,但由于采用传统的反射面天线结构,且工作时仍需配备通信、油机车,系统运输单元多的问题始终没有得到根

本解决,系统的机动性能受到载运方式等条件制约,无法实现机动测控设备真正的运动中测控。

随着近年来小型化、机动性研究的不断深入,在解决共形相控阵天线结构、天线载车精确定姿定位等关键技术问题后,配以车载卫星通信等辅助设施,可以实现运动中目标捕获跟踪^[1]。采用一体化、共形阵列天线设计的机动测控单元,目的是在同一机动测控平台上实现运动中同时接收多个目标遥测信

* 收稿日期:2016-07-22;修回日期:2016-09-20 Received date:2016-07-22;Revised date:2016-09-20

** 通信作者:xsec_wangyi@163.com Corresponding author:xsec_wangyi@163.com

号 and 发送遥控指令,完成对多个目标的遥控、遥测、外测及定轨,实施任务组织、卫星轨道测定与预报、姿态及轨道控制等,并可利用车载卫星通信完成与测控中心的远程信息交互。

由于天线载体姿态及位置测量误差的存在,运动中测控时,机动测控设备的测角精度一般会低于非机动测控设备。本文在分析机动测控需求的基础上,对机动测控单元姿态误差进行了定量计算,对运动中目标捕获跟踪的影响因素进行了量化,通过原理样机试验,验证了运动中目标捕获跟踪方法的可行性。

2 机动测控单元定位与定姿设计

2.1 机动测控单元系统组成

为具备运动中执行卫星测控任务的能力,机动测控单元的天线采用共形相控阵形式,与其他软硬件设备全部装载在一台载车和方舱内,采用一车一站式的工作和运输方式。机动测控单元在集成传统的波束控制、信道、多功能数字基带、系统监控等设备的基础上,增加了载车定位定姿单元,保证了在载车运动中对目标的捕获和稳定跟踪^[2]。

机动测控单元系统工作模型如图 1 所示。

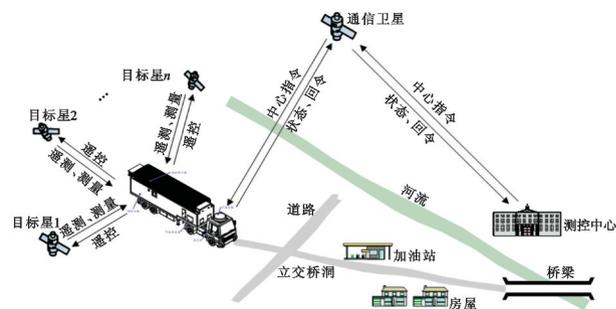


图 1 机动测控单元系统工作模型

Fig. 1 The working model of a mobile TT&C unit system

2.2 定位定姿单元工作原理

载车定位定姿单元主要由惯性导航系统(Inertial Navigation System,INS)和卫星导航系统(GNSS/“北斗”接收机)组成,其中,INS 可以输出姿态和位置信息,由于惯性器件陀螺的漂移,其位置误差随着时间的增加而积累,工程上一般采用 INS 姿态数据与 GNSS/“北斗”接收机位置数据的结合。INS 平台正常工作需要外来的附加信息,除 GNSS/“北斗”的位置信息外,还有经纬仪的航向信息、计程仪的测速信息等^[3]。

定姿定位单元实际上是一个组合测量系统,INS、GNSS/“北斗”接收机、经纬仪、计程仪和数据处理计算机通过网络交换机连接。在天线载车运动时,计程仪将车速信息送给 INS,用于 INS 平台的水平阻尼;GNSS/“北斗”的车位信息作用,一是与 INS 的姿态信息组合后送数据处理计算机,二是与 INS 测得的位置比较而获得 INS 位置误差,用 INS 的位置误差解算陀螺漂移,达到对陀螺进行精确校准;经纬仪从 INS 获得姿态信息,从 GNSS/“北斗”接收机获得位置信息,通过解算 INS 平台 3 个姿态角的测量误差,对水平误差进行检验,对航向误差进行校准^[4]。

2.3 姿态误差计算

定姿定位单元测量得到的姿态、位置信息可以用于计算天线指向角,发送至波束控制系统引导天线捕获跟踪目标卫星。为了引导天线波束指向卫星,需要将卫星在地平坐标系的坐标 (x_{sd}, y_{sd}, z_{sd}) 转换为车载测量坐标系的坐标 (x_b, y_b, z_b) ^[5]。设定天线载车的俯仰角 θ 、航向角 ψ 、滚动角 r ,卫星对载车在地平坐标系中的方位、俯仰角为 A, E ,则

$$\begin{bmatrix} x_b \\ y_b \\ z_b \end{bmatrix} = R_x(r) R_y(-\theta) R_z(-\Psi) \begin{bmatrix} x_{sd} \\ y_{sd} \\ z_{sd} \end{bmatrix} = T_1 \begin{bmatrix} x_{sd} \\ y_{sd} \\ z_{sd} \end{bmatrix} = T_1 \begin{bmatrix} R \cos E \cos A \\ R \cos E \sin A \\ R \sin E \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中,

$$\begin{aligned} R_x(r) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos r & \sin r \\ 0 & -\sin r & \cos r \end{bmatrix}, \\ R_y(-\theta) &= \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix}, \\ R_z(-\psi) &= \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (2)$$

可以得到

$$T_1 = \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \theta & -\sin \psi \cos \theta & \sin \theta \\ \sin \psi \cos r - \sin r \sin \theta \cos \psi & \cos \psi \cos r + \sin r \sin \theta \sin \psi & \sin r \cos \theta \\ -\sin r \sin \psi - \cos r \sin \theta \cos \psi & -\sin r \cos \psi + \cos r \sin \theta \sin \psi & \cos r \cos \theta \end{bmatrix} \quad (3)$$

则引导天线指向目标的方位角 A_b 、俯仰角 E_b 分别为

$$\begin{cases} A_b = \arctg \frac{y_b}{x_b} \\ E_b = \arcsin u, \\ u = \frac{z_b}{R} = \cos E \cos A (-\sin r \sin \psi - \cos r \sin \theta \cos \psi) + \\ \cos E \sin A (-\sin r \cos \psi + \cos r \sin \theta \sin \psi) + \sin E \cos r \cos \theta \end{cases} \quad (4)$$

对姿态角求偏导:

$$\begin{cases} \frac{\partial A_b}{\partial r} = \frac{1}{x_b^2 + y_b^2} (x_b \cdot \frac{\partial y_b}{\partial r} - y_b \cdot \frac{\partial x_b}{\partial r}) \\ \frac{\partial A_b}{\partial \psi} = \frac{1}{x_b^2 + y_b^2} (x_b \cdot \frac{\partial y_b}{\partial \psi} - y_b \cdot \frac{\partial x_b}{\partial \psi}) \\ \frac{\partial A_b}{\partial \theta} = \frac{1}{x_b^2 + y_b^2} (x_b \cdot \frac{\partial y_b}{\partial \theta} - y_b \cdot \frac{\partial x_b}{\partial \theta}) \\ \frac{\partial E_b}{\partial r} = \frac{1}{\sqrt{1 - (z_b/R)^2}} \cdot \frac{\partial u}{\partial r} \\ \frac{\partial E_b}{\partial \psi} = \frac{1}{\sqrt{1 - (z_b/R)^2}} \cdot \frac{\partial u}{\partial \psi} \\ \frac{\partial E_b}{\partial \theta} = \frac{1}{\sqrt{1 - (z_b/R)^2}} \cdot \frac{\partial u}{\partial \theta} \end{cases} \quad (5)$$

由于各系数最大值并不同时出现, 同时计算引导方位角和俯仰角误差系数为

$$\sqrt{\left(\frac{\partial A_b}{\partial \psi}\right)^2 + \left(\frac{\partial A_b}{\partial \theta}\right)^2 + \left(\frac{\partial A_b}{\partial r}\right)^2} \text{ 和 } \sqrt{\left(\frac{\partial E_b}{\partial \psi}\right)^2 + \left(\frac{\partial E_b}{\partial \theta}\right)^2 + \left(\frac{\partial E_b}{\partial r}\right)^2}$$

2.4 姿态误差对角精度误差影响分析

由于姿态误差中每个误差因子都与 A 、 E 、 ψ 、 θ 和 r 有关, 直接计算比较困难, 试验中在 $0^\circ \leq A < 360^\circ$ 和 $0^\circ \leq \psi < 360^\circ$ 范围内进行计算分析, 对以上的各系数通过实际测量搜索最大值。试验结果如表 1 所示。

表 1 姿态角误差对角引导影响分析
Tab. 1 The influence of attitude errors on guide

误差因子			方位角 精度系数	误差因子			俯仰角 精度系数	条件
$\frac{\partial A_b}{\partial \psi}$	$\frac{\partial A_b}{\partial \theta}$	$\frac{\partial A_b}{\partial r}$		$\frac{\partial E_b}{\partial \psi}$	$\frac{\partial E_b}{\partial \theta}$	$\frac{\partial E_b}{\partial r}$		
1.2	1.85	2.15	2.48	0.09	1	1	1	$15^\circ \leq E \leq 60^\circ$ $-5^\circ \leq \theta \leq 5^\circ$ $-2^\circ \leq r \leq 2^\circ$
1.35	3.25	3.73	4.05	0.09	1	1	1	$15^\circ \leq E \leq 70^\circ$ $-5^\circ \leq \theta \leq 5^\circ$ $-2^\circ \leq r \leq 2^\circ$
1.04	2.82	2.83	3.03	0.01	1	1	1	$15^\circ \leq E \leq 70^\circ$ $-0.5^\circ \leq \theta \leq 0.5^\circ$ $-0.5^\circ \leq r \leq 0.5^\circ$

3 运动中的目标捕获实现设计

运动中测控要求机动测控单元在载车以一定速

在只考虑姿态角误差影响的情况下, 按照 $15^\circ \leq E \leq 70^\circ$ 、 $-5^\circ \leq \theta \leq 5^\circ$ 和 $-2^\circ \leq r \leq 2^\circ$ 计算分析, 可以得出: 如果姿态角每个方向均为 0.1° 的误差, 其影响方位角误差 0.405° , 俯仰角 0.1° 。

如天线载车处于静止状态, 并已进行调平, 即 θ 和 r 近似为 0, 则有

$$\begin{cases} \frac{\partial A_b}{\partial \psi} \approx 1 \\ \frac{\partial A_b}{\partial \theta} \approx -\sin(\psi + A) \operatorname{tg} E \\ \frac{\partial A_b}{\partial r} \approx \cos(\psi + A) \operatorname{tg} E \\ \frac{\partial E_b}{\partial \psi} \approx 0 \\ \frac{\partial E_b}{\partial \theta} \approx -\cos(\psi + A) \\ \frac{\partial E_b}{\partial r} = -\sin(\psi + A) \\ \sqrt{\left(\frac{\partial A_b}{\partial \psi}\right)^2 + \left(\frac{\partial A_b}{\partial \theta}\right)^2 + \left(\frac{\partial A_b}{\partial r}\right)^2} = \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 E} \\ \sqrt{\left(\frac{\partial E_b}{\partial \psi}\right)^2 + \left(\frac{\partial E_b}{\partial \theta}\right)^2 + \left(\frac{\partial E_b}{\partial r}\right)^2} = 1 \end{cases} \quad (6)$$

即在载车静止状态, 姿态引起的方位角引导误差是姿态角误差的 $\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 E}$ 倍, 俯仰角精度等于姿态角误差。由此可见, 姿态角误差引起的指向误差较大, 尤其是方位角精度, 会随着仰角的增大而变差。结合本项目天线阵列的波束宽度, 为保证引导精度, 姿态测量误差应不大于 0.05° , 此时姿态测量误差引入的方位角精度约为 0.2° , 可以保证波束指向引导至波束宽度内。

度运行中仍然保持有效的测量与通信功能。由于车辆行驶路面和路况的复杂性, 导致载车的姿态不断

发生变化,车载天线因此需要不断地调整指向。车载天线伺服系统必须克服车姿变化的影响,以解决天线稳定问题才能实现对目标的捕获跟踪。与船载天线伺服系统不同的是,车辆的姿态变化频率快、周期短,同时经常伴有冲击,需要机动测控单元的伺服系统具有更快的响应能力和更强的稳定能力^[6]。

3.1 运动中的天线稳定方法

车载天线稳定的实现方法有内部自身稳定和外部稳定两种方式。内部自身稳定即不依赖外部信息,靠系统自身的惯性器件敏感载体在各个方向的摇摆信息,从而克服摇摆的影响保持天线相对于大地的静止;外部稳定则是利用载体上的导航设备实时提供载体的姿态参数,由伺服计算机进行坐标转换后控制天线,保持其相对大地不动。比较两种稳定方式,内部自身稳定独立性强,控制精度高,设备总体成本小,但控制设备较复杂;外部稳定控制设备简单,控制方式和控制精度主要依赖导航设备性能,整套设备的造价较高。

对于波束相对较窄的车载天线,伺服控制主要解决两个问题,一是捕得上,二是跟得准。为了保证天线伺服控制系统稳定可靠地工作,在系统自稳定以克服车体颠簸的基础上,把常规精度姿态引导捕获与高精度自动跟踪结合在一起,可以成功地实现天线对目标的快速捕获和精确跟踪。

3.2 运动中的目标捕获方法

天线的目标捕获依靠指向来完成,指向精度直接影响到对目标的捕获概率,而指向的难点主要表现在方位指向上。根据自控系统闭环负反馈原理,方位指向的实现,其实质就是航向数据的获得,且航向数据的精度直接影响天线指向精度。

采用两种方法可以解决机动测控单元运动状态的目标引导捕获问题:一是在捕获阶段车载平台处于静止或慢速运动状态,待完成目标捕获跟踪后,再进入正常行驶状态;二是根据目标轨道和机动测控单元的位置和姿态信息实时解算引导信息,引导天线捕获。这两种方法均可以与常规的设置多个等待点、天线小范围扫描等引导捕获方法结合使用,提高天线引导捕获概率。两种引导捕获方法对多目标同时捕获同样适用。

在轨道预报精度较高、引导误差较小时,上述方法的引导捕获成功率较高,但当引导误差偏大时,引导捕获成功率会降低。此时,可以采取同时形成多个邻接的接收波束的方法,空域覆盖与单个波束相

比可以提高几倍,从而提高引导捕获概率。当需要捕获的目标达到最多波束数时,这种捕获策略无法实现,只能采取分时捕获方式来完成所有目标的捕获^[7]。

3.3 运动中的目标失锁重捕

由于在载车行驶的区域经常会有树木、电线杆、涵洞等遮挡物致使跟踪丢失,在遮挡消失后,如何快速准确地重新捕获目标是运动中测控需要解决的另一难点。

设计机动测控单元的目标丢失再捕获过程完全自动化,采用记忆跟踪加扫描的方式。在天线完成目标跟踪后,实时记忆大地角度;当由于天线遮挡或载车剧烈颠簸等原因导致跟踪条件不满足,程序退出跟踪而转入指向方式时,可根据记忆角度,在遮挡或颠簸消失后,迅速引导天线波束到目标记忆位置,不需人工操作直接转入天线自跟踪;如程序在数秒记忆重捕后天线仍未能跟踪目标,将自动依据载车位置信息重新计算进行捕获;如在数秒后仍未能跟踪,则在计算的当前大地角度自动叠加扫描角度,控制天线在一定角度范围内按一定规律扫描,通过搜索一个范围内的空域来发现和捕获目标,扫描速度依接收机频率锁定的时间而定。

4 运动中目标跟踪验证

为了验证运动中测控及相关技术研究的正确性与技术性能,我们研制了一套机动测控单元原理样机,并进行了外场试验验证。原理样机由波束形成与控制、数字基带、定位定姿单元等设备组成。试验结合对载车定位定姿和目标捕获的研究成果,进行了运动中对在轨卫星的捕获跟踪。试验中载车不间断做直行加速、匀速、减速、掉头行驶,运动时速保持在40~80 km/h,验证不同条件下的目标捕获性能。运动中的目标跟踪试验典型数据如图2和图3所示。

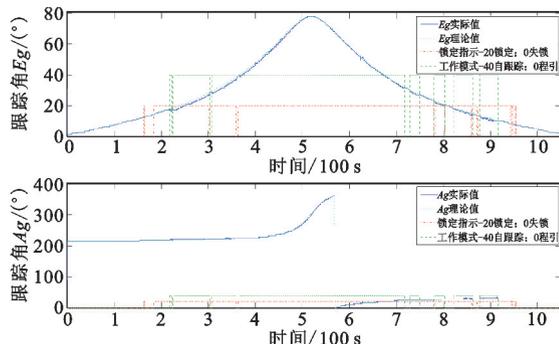


图2 运动中跟踪的角度变化

Fig. 2 Azimuth & elevation in moving tracking

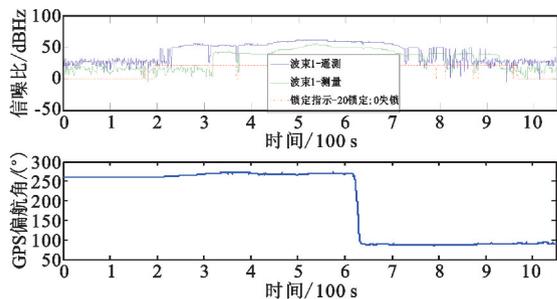


图 3 运动中跟踪的信噪比及航向角变化
Fig. 3 SNR & course angle in moving tracking

在试验中, 动态目标捕获由程序跟踪开始, 锁定后直接转入自跟踪模式, 全程跟踪角度平稳, 遥测数据帧同步显示锁定正常、连续。在运行期间进行的穿越桥洞试验过程中, 由于天线波束被桥面遮挡, 运动跟踪会出现短时间的链路失锁, 一旦载车驶出桥洞, 遥测数据迅速锁定。经过十余次试验验证, 表明机动测控单元原理样机运动中目标捕获和失锁重捕设计方法可行, 性能可靠。

5 结 论

运动中测控及管理是当前活动测控系统建设的目标, 机动测控单元的研究应用可有效提升测控网的安全防护和机动测控能力, 是测控中心的重要支撑和补充。本文提出了一种运动中目标的捕获跟踪方法, 依据机动测控单元原理样机的试验结果, 验证了运动中测控目标跟踪技术是可行的, 为小型化机动测控单元运动中测控的工程化奠定了基础。本文成果可普遍适用于天线在一般运动中对目标捕获跟踪的应用场景。在课题下一步工作中, 将着重于机动测控单元在复杂环境条件下的目标跟踪技术研究。

参考文献:

- [1] 刘嘉兴. 相控阵测控系统概论[J]. 电讯技术, 2005, 45(3): 1-6.
LIU Jiaying. Phased array TT&C systems[J]. Telecommunication Engineering, 2005, 45(3): 1-6. (in Chinese)

- [2] 俄广西, 柴霖, 刘云阁. 全空域多目标测控天线技术研究[J]. 电讯技术, 2015, 55(10): 1112-1117.
E Guangxi, CHAI Lin, LIU Yunge. Study on TT&C antenna for multi-target in hemispherical coverage [J]. Telecommunication Engineering, 2015, 55(10): 1112-1117. (in Chinese)
- [3] TITTERTON D H, WESTON J L. 捷联惯性导航技术[M]. 张天光, 译. 2 版. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- [4] 刘晓健, 李名祺. 机动定位平台间时间同步系统的误差分析与控制[J]. 电讯技术, 2014, 54(12): 1694-1699.
LIU Xiaojian, LI Mingqi. Accuracy analysis and improvement of time synchronization technique for mobile location systems [J]. Telecommunication Engineering, 2014, 54(12): 1694-1699. (in Chinese)
- [5] 王新龙, 李亚峰, 纪新春. SINS/GPS 组合导航技术[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2014.
- [6] SHIPLEY C, WOODS D. Mutual coupling-based calibration of phased array antennas [C]//Proceedings of 2000 IEEE International Conference on Phased Array Systems & Technology. Dana Point, California: IEEE, 2000: 529-532.
- [7] 任燕飞, 张云. 新型宽带数字多波束相控阵天线设计[J]. 电讯技术, 2013, 53(7): 932-937.
REN Yanfei, ZHANG Yun. Design of a novel wideband digital multi-beam phased array antenna [J]. Telecommunication Engineering, 2013, 53(7): 932-937. (in Chinese)

作者简介:



王 轶 (1970—), 男, 陕西宝鸡人, 2004 年于国防科技大学获硕士学位, 现为高级工程师, 主要从事航天测控总体技术研究;
Email: xscc_wangyi@163.com

王建平 (1972—), 男, 陕西咸阳市人, 2006 年于西北工业大学获硕士学位, 现为高级工程师, 主要从事航天测控应用方面的研究;

陈 昊 (1979—), 男, 湖北孝感人, 2009 年于西安电子科技大学获硕士学位, 现为高级工程师, 主要从事数字相控阵天线技术研究;

马 强 (1986—), 男, 陕西西安人, 2013 年于清华大学获硕士学位, 现为工程师, 主要从事航天测控总体技术研究。