

文章编号:1000-1972(2006)03-0092-03

## 圆锥扫描自动跟踪体制在船载“动中通”中的应用

季鸿宇<sup>1</sup>, 胡正飞<sup>2</sup>

(1. 南京邮电大学 通信与信息工程学院, 江苏 南京 210003)  
(2. 南京邮电大学 数理学院, 江苏 南京 210003)

**摘要:**结合实际研究项目介绍了一种新型船载卫星通信系统的关键技术,该系统采用的是捷联式的有源稳定跟踪平台,特点在于利用圆锥扫描原理实现天线姿态稳定跟踪,从而降低了系统对天线稳定平台的精度要求,主要探讨了圆锥扫描技术在天线自动跟踪系统中的应用。阐述了圆锥扫描自动跟踪的原理、系统组成以及系统的具体实现方案,分析了扫描参数对系统性能的影响及选择原则。实验测试表明,该系统能够获得较高的跟踪精度和跟踪实时性,能够使天线稳定地对准卫星。

**关键词:**圆锥扫描;天线自动跟踪;波束偏角;扫描频率

**中图分类号:** TN927<sup>+</sup>.21 **文献标识码:** B

## Application of Conical-Scanning to the Shipborne “Communication in Moving” Antenna Tracking System

JI Hong-yu<sup>1</sup>, HU Zheng-fei<sup>2</sup>

(1. College of Communication and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)  
(2. College of Mathematics and Physics, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

**Abstract:** Based on the actual research project, this paper describes a new shipborne satellite communication system based on conical scan and strap-down stabilization flat and introduces its composition and principle. The system is characterized by completing antenna attitude stabilization tracking by the method of radar conical scanning and reducing the precision requirement of the antenna attitude stabilization. This paper mainly introduces the principle and composition of a new-type antenna automatic tracking system for mobile satellite communication, which is based on conical-scanning. It also analyses the impacts that different parameters have on the system and gives the choice principle. The experimental result shows that the system has a high tracking precision and operates in real time, and its antenna points to satellite quickly and stably, thus communication in moving is completed.

**Key words:** Conical-scanning; Antenna automatic tracking; Squint angle; Scan frequency

### 1 引言

船载“动中通”是一种能在移动中进行不间断卫星通信的船载站,系统工作于 Ku 频段,使用同步轨道(GEO)卫星,具有信息种类多、容量大、机动灵

活、覆盖面广等特点,可进行语音、数据、图像等多媒体信息的传输,适合军用和民用中应急移动通信和突发事件现场的指挥通信。

动中通天线跟踪系统如图1所示,系统通过GPS收到所要求对准卫星的星下点经度设为 $\phi_2$ ,  $\phi_1, \theta_1$ 为动中通天线所在位置的经度、纬度。 $\phi = \phi_2 - \phi_1$ 为星下点对所在位置的经度差。则此时天线应具有方位角 $A_z$ ,仰角 $El$ 分别为<sup>[1]</sup>

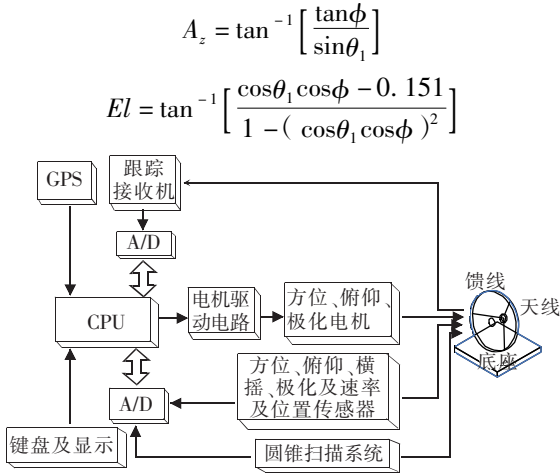


图1 “动中通”天线跟踪系统

天线在驱动器的控制下走到相应的位置,对准卫星。在移动过程中,由于姿态和位置发生变化,会引起原对准卫星的天线偏离卫星,使通信中断,而且由于天线的波束很窄(通常半功率波束宽度在 $0.6^{\circ}$ — $1^{\circ}$ 之间),因此天线必须保持对卫星的高精度跟踪才能保证与卫星的可靠通信<sup>[2]</sup>。

本系统采用圆锥扫描体制,构成了天线伺服位置闭环系统,实现天线姿态的稳定跟踪。

## 2 圆锥扫描自动跟踪系统

### 2.1 系统工作原理

圆锥扫描自动跟踪系统的原理框图如图2所示。它采用偏焦且高速旋转的馈源,使天线具有一个略为偏离轴线的旋转波束。若目标偏离轴线,反射信号强度受旋转频率调制,被调信号经归一化后,在解调器中进行正交解调,获得方位和俯仰角误差信息<sup>[3]</sup>。当天线的锥扫轴线对准目标时,回波信号为等幅信号,无误差信息。图3是描述圆锥扫描的几何关系图。通过目标 $T$ 做垂直于等信号轴的平面,它与等信号轴的交点为 $O$ , $B$ 点为 $t$ 时刻波束最大方向与平面的交点,圆周为波束中心 $B$ 点运动轨迹, $\varepsilon$ 为误差角, $\delta$ 为波束偏角, $\theta$ 为波束中心线与视线夹角, $R$ 为天线到卫星的距离。

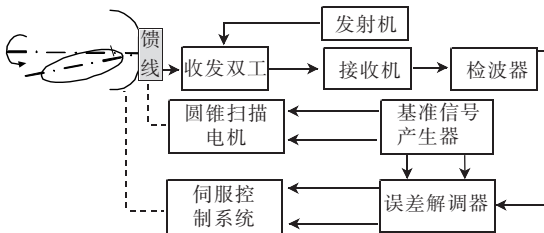


图2 圆锥扫描自动跟踪系统

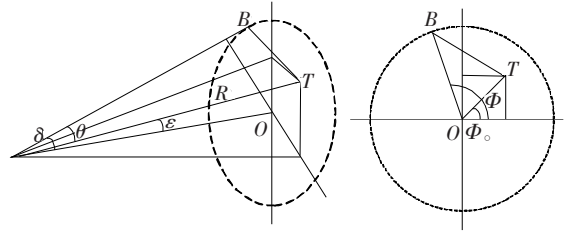


图3 圆锥扫描的几何关系图

在跟踪情况下, $\varepsilon$ 、 $\delta$ 、 $\theta$ 都很小,显然 $OT \approx R\varepsilon$ 、 $OB \approx R\delta$ 、 $TB \approx R\theta$ ,用余弦定理可得

$$\theta^2 = \delta^2 + \varepsilon^2 - 2\delta\varepsilon\cos(\phi - \phi_0)$$

通常 $\varepsilon \ll \delta$ ,且考虑 $\phi = 2\pi f_{\Omega}t$  ( $f_{\Omega}$ 为圆锥扫描频率),则有

$$\theta = \delta - \varepsilon\cos(2\pi f_{\Omega}t - \phi_0)$$

设天线方向性图为 $F(\theta)$ ,接收信号的电压振幅为

$$U = KF^2(\theta) = KF^2[\delta - \varepsilon\cos(2\pi f_{\Omega}t - \phi_0)]$$

式中, $K$ 为比例系数。

在 $\delta$ 处将上式展开泰勒级数,不计高阶项,则有

$$U = KF^2(\delta)[1 - 2\frac{F^{(1)}(\delta)}{F(\delta)}\varepsilon\cos(2\pi f_{\Omega}t - \phi_0)]$$

$$= U_0[1 + \frac{U_m}{U_0}\cos(2\pi f_{\Omega}t - \phi_0)]$$

$$= U_0[1 + m\cos(2\pi f_{\Omega}t - \phi_0)]$$

式中, $U_0$ 为误差为零( $\varepsilon = 0$ )时的信号电压振幅, $U_0 = KF^2(\delta)$ ;  $m$ 为误差信号调制指数, $m = U_m/U_0$ ;  $F^{(1)}(\delta)$ 为表示 $dF(\theta)/d\theta$ 在 $\theta = \delta$ 处的值。

接收信号振幅的交流分量为

$$u_{\varepsilon} = U_m\cos(2\pi f_{\Omega}t - \phi_0)$$

式中, $U_m$ 表示目标偏离等信号轴的大小。

$$U_m = U_0[-2\frac{F^{(1)}(\delta)}{F(\delta)}]\varepsilon = U_0\partial\varepsilon$$

$$\partial = -2\frac{F^{(1)}(\delta)}{F(\delta)} = \frac{U_m}{U_0\varepsilon} = \frac{m}{\varepsilon}$$

把误差信号 $u_{\varepsilon}$ 加到误差解调器,与正交基准信号 $\cos 2\pi f_{\Omega}t$ 和 $\sin 2\pi f_{\Omega}t$ 分别相乘,取差频分量,可得

$$U_{\alpha} = K_d U_m \cos \phi_0 = K_d U_0 \partial \varepsilon_{\alpha}$$

$$U_{\beta} = K_d U_m \sin \phi_0 = K_d U_0 \partial \varepsilon_{\beta}$$

式中, $K_d$ 为解调器的解调系数; $\varepsilon_{\alpha}$ 和 $\varepsilon_{\beta}$ 分别为目标的方位角误差和俯仰角误差。

$$\varepsilon_{\alpha} = \varepsilon \cos \phi_0$$

$$\varepsilon_{\beta} = \varepsilon \sin \phi_0$$

误差电压 $U_{\alpha}$ 和 $U_{\beta}$ 将控制马达驱动天线对准卫星,构成位置闭环系统,实现天线姿态的稳定跟踪<sup>[4]</sup>。

## 2.2 影响系统性能的有关问题及分析

### 2.2.1 波束偏角 $\delta$

设计圆锥扫描天线的一个关键参数就是波束偏角  $\delta$ , 即天线电轴与机械轴之间的夹角。因为  $\delta$  决定了  $K_s$  和  $L_k$ 。  $K_s$  为误差信号曲线的斜率,  $L_k$  为由于偏离天线电轴引起的信号功率损失。很显然,  $K_s$  越大, 跟踪的灵敏度就越高;  $L_k$  越小, 信噪比  $S/N$  越高, 跟踪的灵敏度也就越高。因此,  $K_s/L_k$  决定了系统性能的好坏。

在 MATLAB 中仿真得到如图 4 所示的一组性能曲线, 它们是  $\delta/\theta_b$  取不同值时误差信号随  $\varepsilon/\theta_b$  变化的曲线。  $\theta_b$  为天线半功率波束宽度,  $\delta/\theta_b$  为归一化波束偏角,  $\varepsilon/\theta_b$  为归一化目标偏角, 可见,  $\delta/\theta_b$  略大于 0.4 时,  $K_s$  最大,  $L_k$  而此时约为 2 dB。当  $\delta = 0$  时,  $L_k$  最小为 0, 显然这是不可行的。考虑  $K_s/L_k$ , 本系统取  $\delta/\theta_b$  为 0.28, 此时约为 1 dB<sup>[5]</sup>。

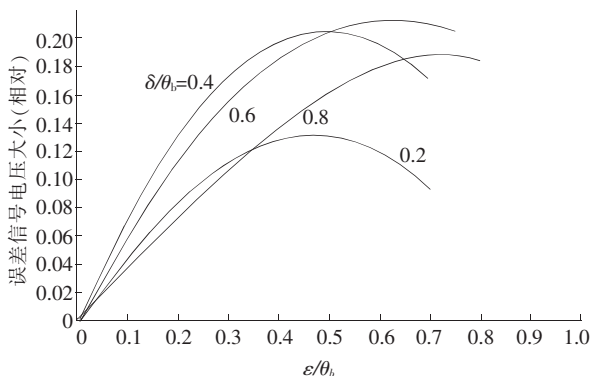


图 4 误差信号与波束偏角关系图

### 2.2.2 圆锥扫描频率 $f_\Omega$

为了实现系统对卫星的快速跟踪, 就必须提高误差信号电平的采样速率, 这样可以加快天线的调整速率, 相应就该提高  $f_\Omega$ 。然而, 由于馈源的安装是偏心的, 其旋转时导致整个天线出现震动, 这种震动给测姿传感器引入了附加误差, 提高  $f_\Omega$  可能导致震动加大甚至共振, 所以需要做一些实验来确定一个合适的  $f_\Omega$ 。与此同时, 接收机能否及时的解算出信号电平也是提高扫描  $f_\Omega$  一个必须考虑的问题,  $f_\Omega$  的选择也受到信标接收机反映速度的制约。

## 3 结 论

采用本系统的船载动中通于 2003 年在福州海

关试验运行状况良好, 具体测试条件如下:

工作频段	频率范围/GHz	速度/km/h	环境温度/℃	风力/级
Ku	12.25 - 12.75	80	10 - 25	5

测试结果表明: 天线的方位、俯仰跟踪精度均可以达到  $0.1^\circ$ , 初始对星时间  $\leq 1$  min, 目标丢失重捕时间  $\leq 1$  s。

实验表明, 基于圆锥扫描工作方式的船载动中通系统, 能够高性能稳定而可靠地工作, 满足船用条件下的各种性能要求。系统的性价比很高, 具有广阔的市场潜力。

### 参考文献:

- [1] EDDE B. Radar principles, technology, applications[M]. New Jersey: PTR Prentice Hall, 1993.
- [2] 汤 铭. 动中通伺服系统的设计[J]. 现代雷达, 2003(4): 52 - 54.
- [3] 李连升. 雷达伺服系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 1983.
- [4] ABRAMOWITZ M, STEGUN I A. Handbook of Mathematic Functions[M]. New York: Dover, 1964.
- [5] SKOLNIK M. Introduction to Radar Systems[M]. New York: McGraw Hill Kogakusha, 1980.
- [6] BARTON D. Modern Radar Systems Analysis[M]. Washington: Artech House, 1988.
- [7] DONALD R W. High resolution radar[M]. Washington: Artech House, 1987.

### 作者简介:



季鸿宇 (1983 - ), 男, 安徽明光人。南京邮电大学通信与信息工程学院通信与信息系统专业硕士研究生。2003 年毕业于南京邮电学院通信工程系。主要研究方向是移动通信与无线技术。



胡正飞 (1969 - ), 男, 江苏淮安人。南京邮电大学数理学院讲师。1997 年在东南大学机械工程系获硕士学位。目前主要从事天线设计和 CAx 开发应用研究。