

# 车载动中通天线多环路伺服的正割补偿

张 德

(中国电子科技集团公司第五十四研究所, 河北 石家庄 050081)

**摘要** 在车载动中通卫星通信系统中, 为了隔离天线载体姿态变化对天线指向的扰动, 天线伺服环路常采用陀螺稳定外套自跟踪环路和引导位置环路的多环路设计。对于采用 A-E 轴系座架卫星通信动中通天线, 天线座 A 轴的运动与天线指向在 H 面的运动之间存在一个正割关系, 因此在环路设计时需要进行正割补偿。通过传递函数结构图分析, 详细论述了在不同位置引入正割补偿对伺服环路的影响, 确定了正割补偿设置方案。

**关键词** 陀螺反馈; A-E 轴系座架; 伺服环路; 正割补偿

**中图分类号** TN82      **文献标识码** A      **文章编号** 1003-3106(2012)11-0034-03

## Secant Compensation for Multi-loop Servo Control of Vehicular SATCOM On-the-move System

ZHANG De

(The 54th Research Institute of CETC, Shijiazhuang Hebei 050081, China)

**Abstract** Position and direction changes are the main disturbance to the pointing of antenna in vehicular SATCOM on-the-move system. To isolate this disturbance and obtain better pointing accuracy, cascade control loops are designed for the control system, including gyro loop, auto-tracking loop and position guiding loop. For an azimuth-elevation type antenna mount, there is a secant relationship between the azimuth rotation and antenna pointing, so secant compensation is needed in the control loop design. The control performances of secant compensation in different positions are discussed by a transfer function structure analysis. A secant compensation scheme is concluded.

**Key words** gyrofeedback; A-E type mount; servo loop; secant compensation

## 0 引言

车载“动中通”卫星通信具有机动灵活、隐蔽性强等特点, 在应急通信和抗洪减灾等各个领域得到广泛应用。车载“动中通”天线是“动中通”卫星通信系统的关键设备之一。为了保证车辆的铁路运输以及公路行驶的可通过性, 必须降低天线装车高度。A-E 轴系天线座架<sup>[1]</sup>具有整体高度低、刚性高等特点, 能满足国内全空域指向要求, 被广泛应用于车载动中通天线中。由于 A-E 轴系天线座架方位轴(A 轴)的运动并不能完全反映天线波束在 H 面上的运动, 而是存在一个与俯仰角相关的正割关系<sup>[2]</sup>, 因此, 在天线伺服环路设计时需考虑补偿措施——正割补偿。详细论述了采用陀螺稳定内环外加跟踪环和引导位置环的伺服环路设计中, 在不同位置引入正割补偿对伺服环路的影响, 得出了正确引入正割补偿的方法, 并介绍了数字化正割补偿实现方案, 实现了伺服系统的小型化、集成化, 提高了

伺服系统的可靠性。

## 1 A 轴与波束 H 面的运动关系

天线波束方向由天线在 E 面和 H 面的运动确定, 天线座架在设计和装配时, 由天线的 E 轴和 C 轴对应天线 E 面和 H 面, 即天线在 E 轴和 C 轴的运动确定了天线的波束指向。对于 A-E 轴座架, C 轴不存在, 那么 C 轴的运动须由 A 轴来完成, 如图 1 所示, 图中,  $\Omega_A$  为 A 轴角速度,  $\Omega_C$  为 C 轴角速度,  $E_j$  为俯仰角。

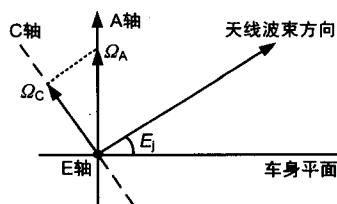


图 1 A 轴与波束 H 面运动投影关系

不难得出, A 轴与 C 轴的运动关系有:

收稿日期: 2012-08-27

$$\Omega_A = \Omega_c / \cos(E_j) \quad (1)$$

即天线 A 轴与 C 轴(天线 H 面)之间的运动存在正割关系。

## 2 伺服环路的正割补偿设计

为了保证在车辆运动状态下的卫星通信,动中通天线须隔离车体姿态变化,始终保持天线波束指向卫星目标,这就需要天线伺服控制系统具有波束指向稳定措施。陀螺稳定加自跟踪或引导跟踪是最常采用的波束稳定方案,该方案中,在天线座架上放置 2 个反馈陀螺分别敏感天线波束在 H 面、E 面的运动,并分别馈送到 A 轴和 E 轴控制环路,构成陀螺负反馈稳定环路——陀螺环,在陀螺环基础上外套自跟踪环,实现天线波束稳定和对卫星目标的高精度跟踪。当天线波束被遮挡时,自跟踪失效,此时在陀螺环基础上外套引导位置环保持天线指向,实现遮挡结束后的快速重捕卫星,由此构成了陀螺稳定加自跟踪环和位置引导环的多环路设计方案。由于天线在 C 轴(H 面)的运动须由 A 轴来完成,存在正割投影关系,如式(1)所示,因此在 A 轴环路设计时需考虑正割补偿设计,正割补偿本身是为了实现不同的俯仰角时,使陀螺稳定环的外环开环增益保持不变。下面就既有陀螺稳定又有自跟踪环和位引导置环的多环路方案如何实现方位环路的正割补偿进行讨论。

### 2.1 单纯的陀螺稳定环的正割补偿

对于单纯的陀螺稳定环,此时正割补偿可以加到反馈通道,也可以加到前向通道,都能保持在不同俯仰角时陀螺稳定环的开环增益保持不变。

### 2.2 陀螺稳定带自跟踪环的正割补偿

陀螺环外加自跟踪环的正割补偿分正割补偿加在陀螺环反馈通道和前向通道 2 种情况,其传递函数框图如图 2 所示,图中虚框为正割补偿,虚框 a 为正割补偿在陀螺环前向通道,虚框 b 为正割补偿在反馈通道。

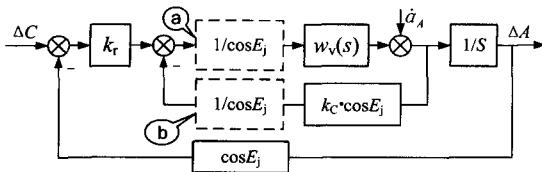


图 2 跟踪环传递函数

图 2 中,  $k_r$  为跟踪接收机灵敏度;  $E_j$  为天线俯仰角;  $1/\cos(E_j)$  为正割补偿;  $W_p(s)$  为速度环传递函数;  $k_c$  为 C 陀螺的传递系数;  $k_c \cdot \cos(E_j)$  为 C 陀螺的

敏感量;  $\alpha_A$  为在方位轴方向的扰动角速度。

当正割补偿在陀螺环反馈通道(位置 b)时,对于跟踪环来说,陀螺环是其内环,此时陀螺环的闭环传递函数只是  $1/k_c$ 。由图 3 可知,此时跟踪环开环增益为:

$$k_G = k_r \cdot (1/k_c) \cdot \cos(E_j) \quad (2)$$

式中,  $k_G$  为跟踪环开环增益;  $k_r$  为跟踪接收机灵敏度。

由式(2)可见,此时跟踪环的开环增益是俯仰角  $E_j$  的函数,是随俯仰角的变化而变化的。

当正割补偿在陀螺环前向通道(位置 a)时,跟踪环开环增益为:

$$k_G = k_r \cdot (1/k_c) \quad (3)$$

此时跟踪环的开环增益不随俯仰角的变化而变化。

比较式(2)和式(3)可知,对自跟踪环来说为了保证开环增益不随俯仰角变化,正割补偿应在陀螺环的前向通道。

### 2.3 陀螺稳定环带引导位置环的正割补偿

在捕获目标或记忆跟踪时,伺服系统处于引导位置环工作状态,陀螺环外加引导位置环的正割补偿也分为正割补偿加在陀螺环反馈通道和前向通道 2 种情况,其传递函数框图如图 3 所示。

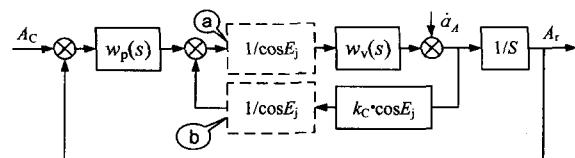


图 3 位置环传递函数

图中,  $W_p(s)$  为位置环调节器传递函数;  $A_C$  为位置指令;  $A_r$  为位置反馈。

当正割补偿在陀螺环前向通道(位置 a)时,引导位置环开环增益为:

$$k_p = 1/(k_c \cdot \cos(E_j)) \quad (4)$$

显然,此时引导位置环开环增益是俯仰角  $E_j$  的函数,即  $k_p$  随俯仰角的变化而变化。

当正割补偿在陀螺环反馈通道(位置 b)时,引导位置环增益为:

$$k_p = 1/k_c \quad (5)$$

式(5)表明,此时的引导位置环增益与俯仰角无关。

比较式(4)和式(5)可知,在陀螺稳定环外加引导位置环的设计时,为了保持位置环开环增益不随俯仰角变化,陀螺环正割补偿应在反馈通道中引入。

根据上述分析,对自跟踪环来说正割补偿应在

陀螺环的前向通道,而对引导位置环来说,正割补偿应在陀螺环的反馈通道,这显然是矛盾的。解决的方法是采用2个正割补偿,一个设置在陀螺环反馈通道,另一个在跟踪信号通道中,其传递函数框图如图4所示。

在跟踪状态,跟踪环的开环增益为: $k_c = k_r \cdot (1/k_c)$ 。在引导状态,引导位置环的开环增益为: $k_p = 1/k_c$ 。2个外环环路的开环增益与俯仰角无关,即在俯仰角变化时,2个外环环路的开环增益都保持不变。

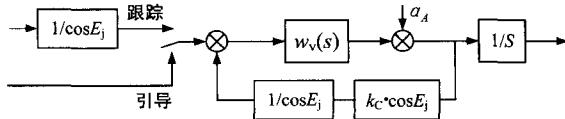


图4 兼顾自跟踪环和引导位置环的传递函数

## 2.4 正割补偿的数字化实现

### 2.4.1 传统的实现方法

传统的正割补偿常采用余弦电位器来实现,其工作原理如图5所示。

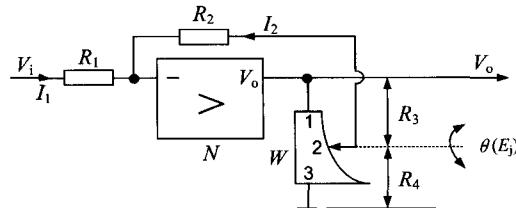


图5 余弦电位器实现正割补偿原理

图5中,W为余弦电位器,2端子为滑动引线端,端子1、2、3之间的阻值与滑动端转动角 $\theta$ 存在如下关系: $\rho = R_4 / (R_3 + R_4) = \cos\theta$ 。将余弦电位器的转轴与天线俯仰轴相连接,转角 $\theta$ 即为俯仰转角 $E_j$ ,电位器的端子1、2、3接入运放N中。因为, $I_1 = -I_2$ ,所以, $\frac{V_i}{R_1} = -\frac{\rho V_o}{R_2}$ 。取 $R_1 = R_2$ ,则有 $V_o = -\frac{1}{\rho} V_i = -\frac{1}{\cos(E_j)} V_i$ 。可见,运放的输出 $V_o$ 是输入 $V_i$ 经过正割补偿的信号。

如图4所示,为了兼顾跟踪环和引导位置环的增益不变,需要在天线座俯仰轴上设置2个余弦电位器作正割补偿用,电位器的转轴通过同步装置与俯仰轴连接,实现多环路伺服的正割补偿。

### 2.4.2 基于CAN总线的数字补偿方法

CAN总线<sup>[4,5]</sup>是一种现场总线,是一种高速、高可靠性的数据交换串行通讯总线。在CAN总线协议中,采用对通信数据块编码替代了传统站地址编码,可使总线上的所有节点共享各节点的数据,从而

将信号线减到最少减少布线,同时减少了共享数据的重复处理,大大节省硬件和软件成本。

CAN总线技术在天线的数字伺服系统<sup>[6]</sup>中已得到广泛的应用,因此基于CAN总线的数字化正割补偿得以实现,其设计思想是将陀螺和跟踪接收机作为CAN总线的节点接入伺服系统CAN总线,如图6所示。

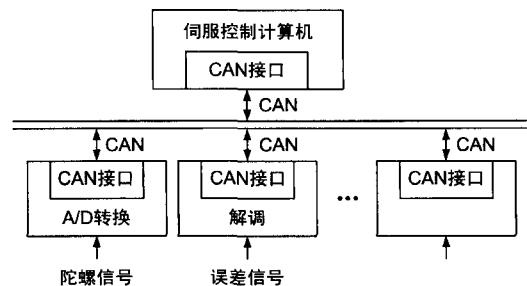


图6 CAN总线示意图

陀螺信号和跟踪信号原地数字化,并按CAN通讯协议传到总线上与其他节点共享,伺服控制计算机提取该数据后,通过软件算法实现正割补偿。

与传统实现方案比较,采用CAN总线技术数字化实现方案,省去了2个余弦电位器和同步装置,简化了设备布线,实现了总线数据共享,简化了软硬件设计。

## 3 结束语

通过传递函数结构框图分析方法,讨论了动中通天线A-E轴座架伺服环路的正割补偿切入点对伺服环路的影响,确定了同时兼顾自跟踪环和引导位置环的正割补偿设置方案,采用基于CAN总线数字化实现方案,简化了结构设计,节省了伺服软硬件成本。该方案在某机载卫通天线以及多项车载动中通卫通天线上使用,取得了理想的效果。

### 参考文献

- [1] 何荣学,蒋军.大型船载卫通伺服随动系统船摇隔离度[J].陕西工学院学报,2005,21(2):10-12.
- [2] 陶波.雷达伺服系统船摇隔离度的模拟测试方法[J].信息化研究,2009(3):23-25.
- [3] 陈伯时.自动控制系统[M].北京:机械工业出版社,1981.
- [4] 邬宽明.CAN总线原理和应用系统设计[M].北京:航空航天大学出版社,1999.
- [5] 阳宪惠.现场总线技术及其应用[M].北京:清华大学出版社,1998.
- [6] 郭昌东,姚舜才.基于C8051F040单片机的CAN总线系统设计[J].山西电子技术,2011(1):5-6.

### 作者简介

张德男,(1962—),高级工程师。主要研究方向:天线伺服及自动控制。

## 如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…

---



### HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

---

### CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>

---



### 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



## 关于易迪拓培训:

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com))，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

## 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

## 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>