

doi: 10.7690/bgzdh.2013.10.001

某地面遥测接收站过顶跟踪改进方法

陈建行, 邹杨, 谢轲, 封志方

(中国人民解放军 63898 部队, 河南 济源 459000)

摘要: 针对俯仰一方位型跟踪系统在飞机过顶情况下无法进行平稳跟踪甚至丢失这一问题, 根据俯仰一方位型测控通信设备的跟踪特点, 提出解决目标过顶跟踪的实用方案。深入分析俯仰一方位型跟踪系统天顶盲区的形成机理, 讨论当目标过顶时方位角速度的影响。对解决该问题所涉及的相关技术进行研究, 总结出跟踪解决天顶盲区的方案, 并对方案中程序引导方法对过顶目标跟踪进行仿真实验。结果表明: 该方法使系统过顶后能继续捕获跟踪目标, 对保持试验任务的顺利进行具有一定的现实意义。

关键词: 方位—俯仰; 天顶盲区; 过顶跟踪; 方位角速度; 方位轴; 次俯仰轴

中图分类号: TJ02 **文献标志码:** A

Improved Method of Passing Zenith Tracing for Certain Ground Tele-Metering Receive Station

Chen Jianxing, Zou Yang, Xie Ke, Feng Zhifang

(No. 63898 Unit of PLA, Jiyuan 459000, China)

Abstract: Aiming at the pitching and azimuth tracking system over the top case in aircraft cannot smooth tracking or even lost this problem, according to the characteristics of pitch and azimuth tracking control of communication equipment, put forward to solve the practical scheme for tracking target over the top. In-depth analysis of the formation mechanism of pitch and azimuth tracking system the zenith blind spot, discuss when the effect of target over the top when the azimuth velocity. Research the technology involved in solving the problem, summarizes the tracking solution zenith blind zone scheme, and the scheme of program guide methods over the top target tracking simulation experiment. The results show that, this method makes the system overhead can continue to capture and track the target, has the certain practical significance to keep the test task smoothly.

Key words: azimuth-pitching; zenith blind zone; passing zenith tracing; azimuth speed; azimuth axis; secondary pitching axis

0 引言

天线结构系统是测控与通信系统天伺馈分系统的重要组成部分。一般的天线结构系统由天线座支撑的天线反射体组成, 依靠伺服系统的控制, 实现对各种目标的跟踪, 完成测控通信任务。由于软硬件成熟度和工作可靠性高等原因, 俯仰一方位型跟踪结构一直是测控通信跟踪系统的首选结构。这种结构在低仰角跟踪目标时, 方位轴跟踪平稳。由于地面跟踪站方位角速度有限, 当飞机通过地面跟踪站天顶时就会出现过顶盲区, 天顶盲区的形成主要是因为飞行目标过顶时需要方位轴瞬时调转大约 180° , 这样会对方位轴有一个瞬间非常大的过载要求, 此时在数学意义上, 方位角速度和角加速度趋于无穷大, 会导致飞行目标丢失。

对于某一固定的地面遥测跟踪接收站(采用俯仰一方位型跟踪结构)来说, 经常会出现飞机通过地面站天顶的情况。当飞机过顶后, 地面跟踪站不能有效跟踪目标。为了在飞机过顶时不丢失目标并保

证通信的正常传输, 必须采取有效的手段和措施, 以避免目标越过天线顶空时的通信中断。提高方位角速度不能消除盲区, 但可以减小盲区范围。受诸多因素的限制, 如电机调速范围、天线座体积和重量等, 方位角速度也不能无限制地提高。过天顶目标跟踪问题实质是系统在高仰角极恶劣条件下的极限跟踪能力问题, 因而对高仰角区域跟踪而言, 能够在自动跟踪和数引跟踪 2 种方式之间进行平稳切换, 也是保证过天顶跟踪成功的关键。根据俯仰一方位型测控通信设备的跟踪特点, 提出了解决目标过顶跟踪的实用方案, 使系统能继续捕获跟踪。

1 遥测跟踪系统天顶盲区成因分析

如图 1 所示, 若在某一时间内可认为飞机在空中以一定速度飞行, 图中若目标位于 c 点, 定速沿水平直线朝 d 方向飞行, o 点为地面站跟踪系统所在的方位, 即观察点。 aob 为地水平面。 d 点靠近 c 点, a 、 b 两点分别为 c 、 d 点在地面上的垂直投影, 假如 $\angle aob=P$, $\angle cod=P_0$, $\angle dob=E$, $\angle coa=E_0$ 。当

收稿日期: 2013-04-24; 修回日期: 2013-05-15

作者简介: 陈建行(1982—), 男, 山东人, 学士, 工程师, 从事电子对抗、遥测遥控研究。

飞机飞到 d 点的时候, 则其实光轴实际指向 c 点, 伺服系统此时测出的角误差为 P_0 , 为了排除误差, 通过方位与俯仰这 2 个轴的转动, 使地面伺服跟踪系统的光轴从 oc 转到 od , 即在方位这个面上从 oa 转到 ob , 在俯仰这个面上从 E_0 转到 E_0 。当 P_0 很小时, 可认为 $E=E_0$, 此时俯仰角不变。而方位角度的误差为 P , 伺服系统测出的误差 P_0 即为所求, 二者分别位于 aob 和 cod 平面上, 因此需要把 P_0 转化为方位误差 P , 从而驱动天线转动。

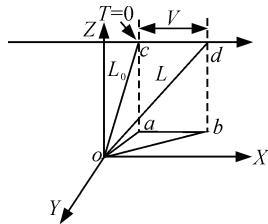


图 1 俯仰—方位型伺服系统跟踪飞机飞行示意图

由图 1 得, 当 P 和 P_0 都非常小时, 明显有^[1]:

$$\begin{cases} P = ab/oa \\ P_0 = cd/oc \end{cases} \quad (1)$$

又

$$\begin{cases} cd = ab \\ \sec E_0 = oc/oa \end{cases} \quad (2)$$

因此

$$P = P_0 \sec E_0 \quad (3)$$

由式 (3) 可见, 只要仰角 E_0 不等于零, 则方位误差 P 总是大于跟踪系统的误差 P_0 , 影响测角精度和伺服系统精度, 而且在误差 P_0 不变时, 方位误差 P 随着仰角 E_0 的增大而增大, 当仰角趋于 90° 时, 方位误差 P 趋于无穷大。通过对式 (3) 求导^[2], 可得方位角速度 \dot{P} 为

$$\dot{P} = dP/dt = (dP_0/dt) \sec E_0 \quad (4)$$

方位角加速度 \ddot{P} 为

$$\ddot{P} = d^2P/dt^2 = (d^2P_0/dt^2) \sec E_0 \quad (5)$$

由式 (4)、式 (5) 可见, 在跟踪系统的角速度及角加速度不变的情况下, 随着俯仰角的增大, 方位角速度也相应地增大, 当飞行目标即将进入接收站天线天顶附近时, 俯仰角 E_0 趋于 90° , 则 $\sec E_0$ 、方位角速度 \dot{P} 以及方位角加速度 \ddot{P} 趋于无穷大。但天线伺服系统的跟踪能力是有限的, 这样, 在天顶区域周围就会存在一个倒圆锥形的盲区, 当飞机进入盲区时, 天线跟踪飞机所需的方位角速度, 就会远大于伺服所能给出的最大方位角速度, 因此目标就会丢失。盲区的大小与天线座本身的跟踪能力与目标的速度都有关, 盲区是速度跟不上的区域, 而不是天线指向达不到的区域。

俯仰角越高, 其所要求的方位角速度及方位角加速度就越大, 滞后就越明显。当仰角趋于 90° 时,

方位轴和视轴几乎重合, 方位角速度与方位角加速度趋于无穷大, 如果跟踪系统的方位角速度最大值小于所需跟踪方位角速度, 当飞机经过天顶时, 跟踪系统就无法自动跟踪^[3-4]。其结果如图 2。在 $0^\circ \sim 60^\circ$ 区域内, 方位误差变化非常小, 因而把这一区域称为保精度跟踪的俯仰角变化的范围。随着仰角 E_0 升高, 在 $65^\circ \sim 80^\circ$ 区域已有较明显的上升趋势, 此后上升趋势逐渐增强, 约在 85° 就开始急剧上升, 这时方位误差的放大作用极其明显, 在之前的多次试验任务中, 也印证了上述分析, 仰角大于 80° 后, 系统在方位角方向有明显抖动, 随着俯仰角不断升高, 跟踪系统的方位角速度急剧增大, 直至趋于无穷大, 天线抖动也越来越剧烈, 直至丢失目标。因此影响天顶盲区的最主要因素是方位角速度。

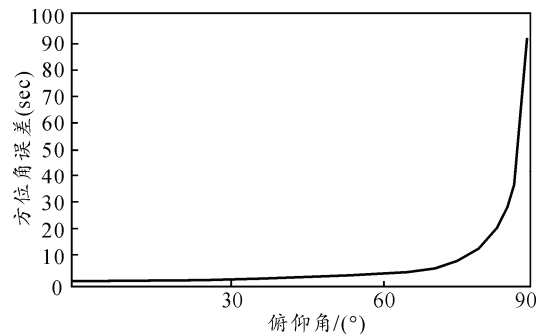


图 2 方位角误差变化曲线

2 过天顶目标的解决方案

对于俯仰—方位型跟踪结构来说, 过顶目标跟踪问题实质就是提高系统在高仰角情况下的跟踪能力。顺利通过天顶盲区的解决方案为:

1) 飞行目标过顶前, 由系统对飞行目标自动跟踪, 同时对采集的数据进行实时预处理。

2) 跟踪控制计算机不停地调用跟踪程序, 并判断跟踪结构的运动状态, 当判断出目标经过天顶时 (即判断出方位轴所能提供的最大角速度小于跟踪所需要的角速度时), 主控计算机发出自动中断对目标的跟踪命令, 此时方位轴以最快速度迅速通过天顶。当目标经过天顶后, 主控计算机中止调用跟踪程序, 同时系统继续自动跟踪。

3) 在执行 2) 的同时, 计算得到相应的目标位置矢量及跟踪需要的位置信息 (A, E) , 即为再次捕获目标的位置指向, 然后系统恢复自动跟踪。

解决过顶跟踪的方案可归纳为方位轴倾斜方法、增设次俯仰轴方法、程序引导方法 3 种。

2.1 方位轴倾斜方法

方位轴倾斜方法包括角度可调倾斜轴方法和角度固定倾斜轴方法。角度固定倾斜轴方法根据已知

被测飞机的飞行轨道,安装跟踪结构时,使方位轴与水平面之间的角度固定,以致有效通过盲区。此方法简便易行,但只能跟踪已知被测目标轨道的飞行目标。角度可调倾斜轴方法使观测范围有所增大,其倾斜机构安装在底座与跟踪结构之间,当飞机通过天顶盲区时,方位轴可以倾斜一个足够避开天顶盲区的角度,以保持跟踪天线平稳跟踪飞机,当飞机过顶后进入可以自动跟踪区域时,此时方位轴归位,恢复自跟踪。

基本做法是:建立空间坐标系如图3,假设 x 轴指向为正北, y 轴指向为正东, z 轴指向为方位轴,当该坐标系绕 y 轴旋转时可得到新的坐标系 $x'y'z'o$ 。

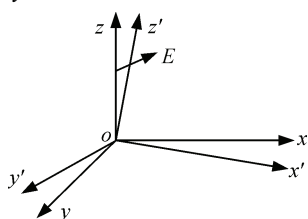


图3 坐标系变换示意图

原坐标系的单位向量 $A_1 = [0, 0, 1]$,在 $ox'y'z'o$ 坐标系中的坐标值就转换成 $A'_1 = [0, -\sin E, \cos E]^T$ 。让向量 A_1 绕 z' 轴逆时针旋转 α 角,就得到新向量^[5-6]:

$$A'_1 = EA'_0 \quad (6)$$

$$\text{其中: } \alpha = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{\circ}$$

这时 A'_1 在原坐标系中表示为

$$A_1 = EA'_1 \quad (7)$$

$$\text{其中: } E = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos E & \sin E \\ 0 & -\sin E & \cos E \end{bmatrix}, \quad A_1 = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix}^{\circ}$$

由式(6)、式(7)得:

$$A_1 = EA'_1 = E\alpha A'_0 \quad (8)$$

由矢量矩阵的正交特性知 $E^T = E^{-1}$,式(8)还可写为:

$$E^T A_1 = \alpha A'_0 \quad (9)$$

把式(9)整理得:

$$x_1 = \sin E \cdot \sin \alpha \quad (10)$$

$$y_1 = z_1 \tan E - \tan E \cos \alpha \quad (11)$$

$$y_1 = (1 - z_1) / \tan E \quad (12)$$

由式(11)、式(12)得:

$$\cos \alpha = z_1 - \frac{1 - z_1}{\tan^2 E} \quad (13)$$

由于 $z_1 = \cos \eta$,其中 η 为方位轴倾斜的角度。

倾斜之后跟踪结构坐标就有别于地理坐标,这样就必须进行坐标变换,将式(10)~式(12)整理可得出方位轴倾斜后的方位轴的坐标变换式^[7-8]:

$$\begin{cases} x_1 = \sin E \cdot \sin \alpha \\ y_1 = \sin E \cdot \cos E (1 - \cos \alpha) \\ z_1 = \cos^2 E + \sin^2 E \cdot \cos \alpha \end{cases} \quad (14)$$

方位轴倾斜的本质是使跟踪结构的天顶盲区“转移”,当俯仰角很高时,方位角速度、角加速度非常大,伺服系统的滞后也很大,因为是整个跟踪结构倾斜,倾斜角度不能太大,因此并不能明显提高系统的高仰角跟踪精度,其目的只是为了在飞机过顶时,顺利找到目标,保证跟踪系统不丢失目标。

2.2 增设次俯仰轴方法

这种方法在主俯仰轴上增加一个次俯仰轴,组成俯仰—方位—俯仰型三轴跟踪结构^[9]。当飞机在低仰角区域飞行时,系统正常跟踪。当飞机在高俯仰角飞行时,此时方位角速度逐渐增大,当达到一定值时,该方法使系统自动切换成主一次俯仰轴跟踪目标,而方位轴此时保持一定速度跟踪。当飞机通过天顶盲区后,系统再转换成正常的自跟踪模式。

俯仰—方位—俯仰轴工作时,主要还是俯仰—方位轴。转动次俯仰轴到一定角度,保证飞机在天顶附近区域可以正常跟踪。当俯仰角很高时,把高速的方位轴替换成低速的次俯仰轴来跟踪,明显提高了跟踪精度。跟踪系统在三轴间进行转换时,必须提前预测飞机飞行的轨迹,以确定三轴与两轴间何时进行转换,该方法增加了新的次俯仰轴,使天线座体积和设计成本增大。

2.3 程序引导方法

飞机在盲区外飞行时,系统可以稳定自跟踪;当飞机进入盲区后,系统方位轴的跟踪速度远远低于目标相对于地面站的角速度,从而会丢失目标。当目标穿过盲区时,不能保证系统能恢复自跟踪,所以当目标要穿过盲区时,在飞机即将进入盲区前那一刻开始,在程序的引导下跟踪结构快速越过地面接收站天顶盲区,通过天顶盲区后,系统减速到与自动跟踪所需方位角速度的数值相适应时,再恢复自跟踪。这样目标在天顶附近短时间丢失后,可以重新找到目标并进行自跟踪,这就是程序引导方法^[10-11],使用程序引导方法使跟踪结构轻便又有很高的跟踪精度。例如当飞机轨道已知时,系统参数设置菜单提供了输入理论弹道(T, A, E)的功能,保存下来,并把指令数据输入控制系统,一旦进入程控工作方式,天线将按理论弹道运行,直至目标穿过盲区,即可完成目标过顶的程序引导。(下转第7页)