* 1. 低轨卫星天线伺服跟踪控制技术

### 概述

低轨卫星天线的伺服跟踪控制相比较于传统的同步轨道卫星天线有较大区别，主要体现在三个方面：1、低轨卫星相对于地面位置不断发生变化，且星历参数描述较为复杂，需要不断解算并更新其位置信息，同时还需要将其从WGS84坐标系转换为地理坐标系，和自身定位信息在同一坐标系下进行解算。2、低轨卫星天线具有波束宽度窄、跟踪精度要求高、适用程序跟踪和自动跟踪两种模式等特点，在无卫星信号强度信息可用的情况下，天线仍能够保证对低轨卫星的精确搜星和稳定跟踪指向，普通的测姿定位定向设备难以满足需要，天线自身必须具备姿态及航向的高精度组合导航测量能力，以此保证系统的可用性。3、在具备高精度导航测量能力的同时，伺服跟踪控制算法也是其中的关键环节，采用三级闭环反馈技术可同时兼容程序跟踪和自动跟踪两种模式，巧妙利用组合导航系统的惯性角速度测量能力，形成三级闭环+圆锥扫描的闭环跟踪策略，实现对天线的精确控制及跟踪。

### 空间直角坐标系与地理坐标系互相转换技术

天线收到卫星位置信息为WGS84坐标系下的坐标值，天线单元中导引解算所用的卫星位置信息是地理坐标系下的，二者之间要进行转换。WGS84 空间直角坐标（X,Y,Z）和地理坐标系（B、L、H）的相互换算公式如下

其中：

三维直角坐标系和地理坐标系转换公式

其中：

N为卯酉圈的半径，

a为地球椭球的长半径

b为地球椭球的短半径

如果是二维平面坐标系的转换，涉及到WGS84 平面直角坐标（X，Y）和地理坐标（B、L）的相互换算，即高斯投影正算和反算公式。

高斯投影反算公式：此公式换算的精度为0.0001″计算公式如下：

高斯投影正算公式：此公式换算的精度为0.001m

### 高精度组合定位定向测姿技术

卫星导航系统和惯性导航系统是常用的定位定向测姿设备，二者都有着各自的应用环境和优缺点，单独使用都难以保证长时间高精度姿态及航向角的稳定输出，因此，将二者的姿态测量技术相结合，对每个测姿系统进行优势互补，以实现低成本、高精度、高稳定性的姿态测量，是目前最佳的定位定向测姿方案。

组合测姿系统的原始数据来源为两个部分，卫星导航系统的速度位置测量值和惯性仪表的测量值。惯性仪表的原始数据频率高，也包含了随机噪声，通常为高频部分，可利用小波降噪的方法将其减小。将惯性输出的原始信号小波变换后得到不同尺度下的小波系数，在通过选择合适的阈值，筛选出原始信号对应的小波系数，同时将噪声对应的系数减小，这样原始信号就得到了保留而噪声信号就得到了消除。最后通过小波逆变换得到降噪后的信号。

搭建低成本惯性和卫星组合的高精度测量系统需设计状态误差模型。考虑到工程实践中容易实现且适合产品的大批量生产，选用速度组合模式，此模式结构较简单，且运算量要求低，还可提高系统的可靠性，增强了系统冗余度，当北斗和惯导系统中的任何一种失效时，组合系统仍然可以继续提供姿态信息，从而保证了系统姿态测量的连续性。因此选择5维状态变量的误差方程和2维速度的观测方程。具体如下所示：

1)选择速度误差和姿态误差作为状态变量，如下所示：



2)选择速度北斗和惯性的速度值作为观测变量，如下所示：



3)组合导航系统状态方程如下：





（1）

（2）

 （3）

 （4）

 （5）

4)观测方程如下：



 （6）

其中，L为纬度，为地球自转角速率，分别为东、北向速度，分别为东、北、天向比力，为经度，为纬度，为高度误差，分别为东、北、天方向速度误差，分别为东、北、天方向平台失准角，分别为陀螺测量误差和加速度计测量误差在东、北、天方向的投影分量, 为北斗与惯组的东向速度差，为北斗与惯组的北向速度差。

选用卡尔曼滤波算法将二者的测量信息进行数据融合，解算出姿态误差值。Kalman计算过程包括滤波计算和增益计算两个回路，如下图所示：



图 95卡尔曼滤波的两个计算回路

滤波选择合适的估计误差方差阵P、观测误差方差阵R及状态误差方差阵Q，组合周期选取为1s，估计出姿态误差的大小。

对惯性解算出的姿态进行误差补偿校正，一般可选择开环校正（输出校正）和闭环校正（反馈校正），如下图所示，获得高精度的姿态值。选择输出校正应依据设计的系统而定，根据本系统的特点，选择反馈校正方式。

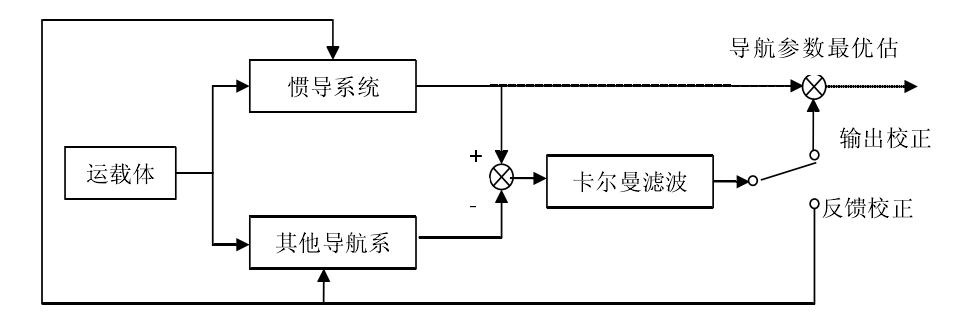


图 96卡尔曼滤波的两个计算回路

卡尔曼滤波算法解算过程中，误差方差阵的参数调节大大影响着误差值的估计效果。误差方差阵包括估计误差方差阵P、观测误差方差阵R及状态误差方差阵Q，P阵是随系统实时变化的，Q阵属于系统误差阵，因设计的系统模型而定，R阵取决于观测量的统计误差即北斗系统的速度观测量误差。一般情况下，R阵可选用定值用于整个系统，考虑到北斗的量测误差在不同的路况如上下坡、转弯、遮挡等环境下的误差值是变化的，因此可根据实时测量值来估计此阵，达到自适应调节的目的，进而可提高系统的估计精度。



图 97 惯性卫星组合导航系统框图

### 三轴三级反馈稳定跟踪技术

抛物面天线的卫星指向跟踪是典型的随动控制系统，单一依靠角度PID闭环难以实现准确稳定的跟踪效果，伺服控制算法**采用速率环、角度环、跟踪环**三级闭环反馈跟踪方式来实现系统的高精度跟踪。

1. 卫星指令角经过坐标系转换解算出天线坐标系的转台方位角、俯仰角和横滚角，通过控制电机执行到相应的角度，由编码器和和霍尔传感器定位相应的位置，形成典型的随动控制回路，在此基础上，巧妙利用组合导航系统输出的惯性角速度，用于补偿系统在运动载体上的角速度耦合信息，形成内部的**速率环**。
2. 利用组合导航系统输出的姿态和航向信息，引入角度控制回路，补偿系统在运动载体上的角度耦合信息，形成**角度环**，实现高精度的稳定程序跟踪。
3. 如果基带单元反馈的卫星信号强度信息可用，则可在伺服控制回路中加入圆锥运动，使天馈系统在空间中进行圆锥运动，通过卫星信号反馈得到上下左右方向上的信号强弱差异，从而得到空间中方位及俯仰方向的角度偏差，将偏差反馈补偿到控制回路当中，实现卫星信号的**跟踪环**，**三级闭环结合来实现抛物面的自动跟踪功能。**

角度及角速度控制器分别采用经典抗积分饱和的数字PID控制器。PID控制器内部的参数整定可通过平台的实际参数设计控制系统的数学模型进行仿真计算，而后结合实际系统进行联试调整。

为了应对天线的过顶跟踪问题，通过方位、横滚、俯仰（又称方位、交叉、俯仰）ACE三轴架构的设计来避免过顶奇点跟踪的问题。具体实施方案如下：



图 98稳定跟踪控制系统框图