

# 基于扰动前馈补偿的抗车摇窄波束 天线系统

游莎莎

(北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094)

**摘要:** 在车辆等机动平台中, 行驶过程中产生的车体摇动会严重影响天线的跟踪指向性能; 为有效抑制车摇扰动, 实现稳定跟踪, 提出一种基于扰动前馈补偿的抗车摇窄波束天线系统; 通过对车摇扰动信号进行测量与分析, 对抗车摇扰动机理进行研究, 采用扰动前馈复合控制作为抗车摇策略; 在此基础上, 开展了伺服系统的理论分析与半实物仿真验证; 试验结果表明, 引入扰动前馈补偿前后, 系统获得了比较理想的车摇隔离效果, 对车摇扰动的最大隔离误差由  $0.608^\circ$  降至  $0.043^\circ$ , 能确保天线稳定跟踪。

**关键词:** 天线伺服系统; 车摇隔离; 扰动前馈补偿; 残差

## Anti-sway Narrow-beam Antenna System Based on Disturbance Feedforward Compensation

YOU Shasha

(Beijing Institute of Tracking and Telecommunication Technology, Beijing 100094, China)

**Abstract:** In mobile platforms such as vehicles, the body sway caused by vehicle motion seriously affects the tracking and pointing performance of an antenna. To effectively suppress vehicle sway disturbance and achieve stable tracking, a anti-sway narrow-beam antenna system based on disturbance feedforward compensation is proposed. By measuring and analyzing the signals of vehicle sway disturbance, research on the mechanism of anti-vehicle sway is conducted, and a disturbance feedforward compound control is adopted as an anti-vehicle sway strategy. Based on this, through theoretical analysis and semi-physical simulation verification of the servo system, experimental results show that after introducing the disturbance feedforward compensation, the system achieves a relatively ideal isolation effect against anti-sway. The maximum isolation error of vehicle sway disturbance is reduced from  $0.608^\circ$  to  $0.043^\circ$ , which can ensure stable antenna tracking.

**Keywords:** antenna servo system; vehicle swaying isolation; disturbance feedforward compensation; residual

## 0 引言

车载窄波束测控天线系统在车辆运动中实时跟踪目标时, 需要克服车辆运动带来的姿态位置变化 (简称车摇), 才能稳定跟踪目标。

目前对抗车摇的研究多集中在车载卫星通信系统中, 其中天线伺服系统是实现稳定通信的关键核心部件<sup>[1-2]</sup>, 亦存在车摇隔离问题<sup>[3]</sup>。对于车载卫通天线, 通常口径  $\leq 1.2$  米<sup>[4]</sup>, 天线波束宽, 容易实现车摇隔离, 因为对于宽波束天线系统, 半波束宽度依然较宽, 天线跟踪误差只要小于半波束宽度就能确保不会偏离波束、丢失目标, 故伺服采用常规位置环就能满足抗车摇

要求。而对于 3.8 米窄波束测控天线, 车摇隔离困难, 当天线波束宽度为  $0.2^\circ$ <sup>[5-6]</sup> 时, 天线跟踪误差只有小于  $0.1^\circ$  时系统才能正常工作, 常规位置环隔离已无法满足抗车摇要求, 而且由于风负载与天线口径成立方关系<sup>[7]</sup>, 3.8 米天线风负载远大于 1.2 米天线, 转动惯量也远大于 1.2 米天线, 响应带宽低于 1.2 米天线, 使车摇的影响更加难以克服。

为解决车载窄波束测控天线系统抗车摇问题, 根据跑车试验车载车行驶中测量获得的扰动数据提出了一种基于扰动前馈复合控制方法的车摇隔离方法, 通过仿真分析得到加入扰动前馈补偿前后的车摇隔离情况, 结果表明抗车摇方法合理有效。

收稿日期:2025-09-20; 修回日期:2025-10-17。

作者简介:游莎莎(1983-), 女, 硕士, 助理研究员。

引用格式:游莎莎. 基于扰动前馈补偿的抗车摇窄波束天线系统[J]. 计算机测量与控制, 2026, 34(1):103-108.

## 1 天线伺服系统环路结构设计

通常天线伺服系统采用三环闭环控制，分别是位置环、速度环和电流环，环路结构设计如图 1 所示。设置电流环的目的主要是：改造速度环控制对象特性，为速度环校正创造了方便条件；提高系统快速性，及时抑制电流环内部干扰，限制最大电流，使系统具有足够大的加速转矩，并且保障系统安全运行。设置速度环的主要目的是：为位置环提供良好的控制对象，为位置环校正创造了方便条件；提高电机速度响应带宽；减小传动链摩擦造成的低速爬行和驱动死区，提高电机低速平稳性，扩大调速范围；提高伺服系统抗负载扰动能力，从而减小阵风造成的误差。设置位置环的主要目的是：实现伺服系统的位置闭环，保证系统对目标的位置跟踪能力，同时对位置环内的扰动信号起到良好的隔离作用。

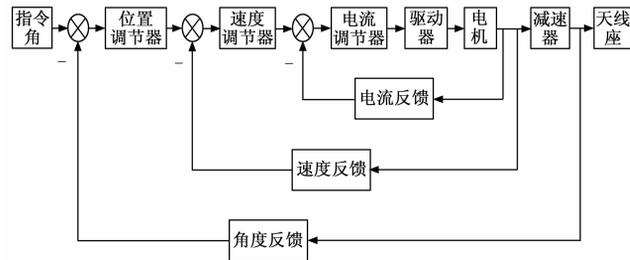


图 1 天线伺服系统环路结构图

在 3.8 米车载窄波束测控天线伺服系统中，由于天线座与车辆支撑平台属于刚性连接，平台自身的姿态变化将导致天线指向的变化。这个扰动在伺服环路中位于位置环内部，速度环外部。因此速度环、电流环这两个高带宽环路无法对这个外部扰动进行抑制隔离，只有位置环能够对其进行抑制隔离，但本系统的位置环带宽约为 2 Hz，只能对远低于 2 Hz 的低频扰动有比较好的隔离效果。当平台姿态变化频率高、幅度大时，譬如对于扰动频率成分复杂的车摇，伺服位置环的扰动隔离能力有限，会造成天线的指向及跟踪偏差较大，严重时甚至丢失目标，因此需要采取额外的隔离方法。

## 2 车摇隔离方法设计

### 2.1 车摇扰动机理分析

车摇隔离方法的设计与车摇扰动特性密切相关，因此先对车摇扰动机理进行分析。车载测控系统中车体本身与伺服系统的天线座刚性连接，车辆运动中的摇摆扰动会直接传递到天线座底部，进而转变成伺服方位、俯仰轴向扰动。车摇扰动包括横摇、纵摇和航向 3 个扰动量。建立车体三维直角坐标系，设 X 方向为车头方向，Y 方向为与车头方向垂直的车身方向，Z 方向为垂直于

水平面的朝天方向，则绕 X 轴的旋转运动称为横摇，绕 Y 轴的旋转运动称为纵摇，绕 Z 轴的旋转运动称为航向。通过光纤速率陀螺获取车摇扰动速度信息，在与天线座刚性连接的车载平台上安装 3 个正交陀螺，分别敏感车体运动中横摇、纵摇和航向的角速度信息，如图 2 所示。

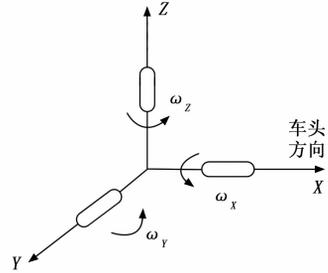


图 2 车摇扰动示意图

从图 2 可以看出， $\omega_x$  是陀螺敏感车体运动横摇角速度， $\omega_y$  是陀螺敏感车体运动纵摇角速度， $\omega_z$  是陀螺敏感车体运动航向角速度。通过坐标变换可以得到伺服方位、俯仰轴向扰动速度与车摇扰动速度的关系：

$$A_v = -\omega_z + (\omega_x \cos A + \omega_y \sin A) \tan E \quad (1)$$

$$E_v = \omega_y \cos A - \omega_x \sin A \quad (2)$$

由公式 (1) 和公式 (2) 可知，方位轴向扰动速度与横摇、纵摇、航向 3 个扰动速度相关，且航向扰动速度对方位轴向扰动速度影响，俯仰轴向速度只与横摇、纵摇两个扰动速度相关。伺服系统在车辆运动时跟踪目标，通常会保持车辆航向稳定不变，此时方位、俯仰轴向扰动速度只与横摇、纵摇速度相关，而且一般情况下，测控系统跟踪目标时天线指向与车辆首尾连接线基本垂直，此时方位角近似等于  $90^\circ$  或  $270^\circ$ ，俯仰轴向扰动速度近似等于横摇扰动速度，方位轴向扰动速度近似等于纵摇扰动速度与俯仰角正切值的乘积。此处简化将横摇与纵摇解耦，便于后续仿真分析，且不会影响抗车摇方法的实际应用效果。

根据车辆悬挂系统设计原理与日常经验可知，在车辆没有急刹车、匀速行驶过程中，横摇比纵摇更剧烈，而伺服系统的方位支路与俯仰支路跟踪环路控制算法相同，故可将横摇扰动速度等效为俯仰轴向扰动速度作为俯仰环路的扰动输入，进行抗车摇设计与仿真，得到与真实情况基本一致的结果。

### 2.2 车摇扰动特性研究

对于 3.8 米车载窄波束天线伺服系统，在行驶过程中扰动情况复杂，振动频率高，频率成分多，若遇到颠簸、振动冲击等意外情况，车体的振动更为剧烈<sup>[8]</sup>。

为深入研究载车机动时车辆的振动情况，专门进行了车辆跑车振动测试试验，试验中采用与实际相仿的天

线车，测量其在公路行驶过程中的振动数据。由于车载伺服系统在车辆运动中跟踪目标时，天线处于竖立工作状态，车辆与天线的整体高度远高于普通车辆，重心也随之变高，存在高度方向干涉与转向侧翻等安全隐患，因此会对行车条件提出比较高的要求，而车辆的行驶速度不可能快，且二级公路比一级公路条件苛刻，因此在二级公路 30 km/h 的行驶速度下进行目标跟踪是最接近使用场景的工作状态，下文选取了此工作状态进行车摇扰动特性的分析研究。

试验前将天线支撑托盘通过升降机构升至车体方舱顶部，在天线支撑平台处同时安装 3 台光纤速率陀螺测量车辆扰动速度，以车头方向为 X 轴正方向，光纤速率陀螺测量车辆运动时绕 X 轴的旋转速度信号，即横摇角速度。在二级公路 30 km/h 的行驶速度下测试后，通过测量结果的初步比对，发现 3 个测量点陀螺测得的横摇角速度一致性很好，角速度时域曲线和频谱曲线基本一致，故选取其中一组数据进行分析。定义 T1X 为车辆的横摇信息，T1X 角速度/时间测量数据如图 3 所示。

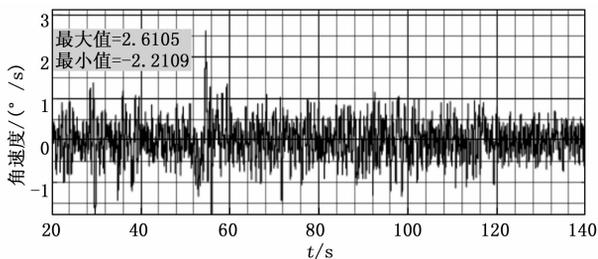


图 3 T1X 角速度时域曲线图

同时，对图 3 的 T1X 角速度时域测量数据进行 FFT 变换得到如图 4 的 T1X 角速度/频率测量数据。从图 4 可以看出，车辆振动频率范围很大包含多频率成分且主要集中在 5 Hz 以下区域内，当频率在 5 Hz 以上区域时，振动幅值急剧变小；单频点最高幅度约为 0.16°/s（对应 2 Hz 处），扰动较大的频率分量主要集中在 2.5 Hz 以下，此时仅靠自身的环路难以对高频成分进行有效抑制。

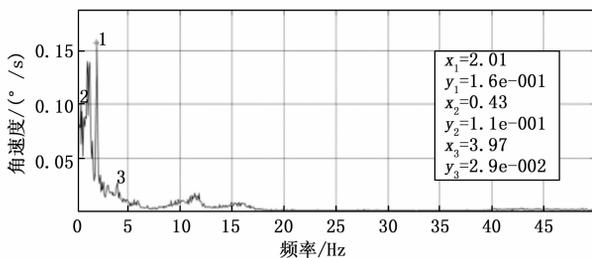


图 4 T1X 角速度频域曲线图

### 2.3 车摇隔离方法选择

通过车摇扰动测量与分析可知，扰动较大的频率主要集中在 2.5 Hz 以下的区域，天线系统自身的位置环对这种频率成分的扰动隔离能力不足。在船摇中常用的是增加空间速度闭环回路<sup>[9]</sup>即陀螺稳定环的方法以提高系统扰动隔离能力：使用安装在天线座俯仰臂上的双轴速率陀螺提供的方位俯仰空间速度信息作为反馈信号，在位置环与速度环之间设计增加陀螺稳定环路，使伺服系统变成四环控制系统，实现对船摇扰动的抑制。此方法在一定条件下可起到一定的扰动隔离作用，根据相关文献，对于低频扰动信号频率（一般为 0.1 Hz 左右）的船摇扰动信号，由于频率低、幅值大，是一种“大而慢”的摇摆，隔离度一般为 9 dB 左右。但对于频率高、频率成分复杂的车摇扰动信号，由于频带宽、幅值小，是一种“杂而快”的振动，这种陀螺稳定环的方法隔离效果不仅会变差，还会降低位置环带宽，破坏系统的动态跟踪性能<sup>[10]</sup>。由于本系统除了需要隔离车摇扰动外，对动态目标的快速跟踪要求也比较高，而陀螺稳定环不仅对频率更高的车摇扰动隔离作用小，还会在一定程度上破坏伺服系统结构，牺牲自跟踪环的跟踪性能，易造成跟踪不稳定和丢失目标的问题，因此车摇情况下不能采用陀螺稳定环法。

为了不影响天线伺服系统的稳定性且不降低动态性能，又能抑制多种频率成分叠加的车摇扰动，本文提出一种基于扰动前馈复合控制方法的车摇隔离方法。该方法是在天线系统的反馈控制回路中加入扰动前馈通路，组成一个由前馈控制和反馈控制共同作用的复合控制系统。通过选择合适参数，可以保持系统稳定，减小稳态误差，得到较好的扰动抑制效果<sup>[11]</sup>。

### 2.4 前馈复合控制方法设计

带有车摇扰动的伺服系统自跟踪环路如图 5 所示，其中  $\theta_i$  是输入角度， $\theta_o$  是输出角度， $\theta_f$  是车摇扰动角度， $K_1 W_1$  是位置环调节器， $K_1$  是放大倍数， $W_1$  是位置环其他环节， $K_2 W_2$  是速度环传递函数， $K_2$  是速度环闭环增益， $W_2$  是速度环其他环节， $N$  为电机轴至天线轴的减速比， $1/s$  为位置环积分环节。

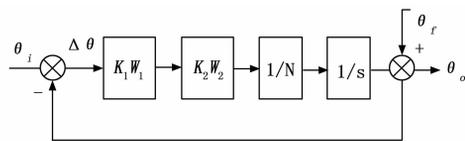


图 5 扰动条件下跟踪环路框图

将车摇扰动信号引入速度环输入端构成前馈复合控制的跟踪环路如图 6 所示， $K_b S$  为前馈补偿传递函数，此处采用扰动角速度量进行前馈补偿。

根据叠加定理<sup>[12]</sup>，加入前馈复合控制的跟踪环路

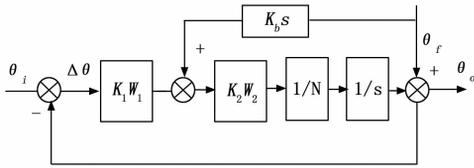


图 6 加入前馈复合控制跟踪环路框图

可以看做由  $\theta_i$ 、 $\theta_f$  两个输入分别对输出的作用再进行叠加。因此通过对图 6 环路框图进行等效变换，得到图 7 所示的跟踪环路框图。

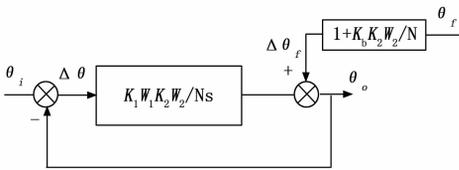


图 7 加入前馈复合控制跟踪环路框图的等效变换

图 7 中  $\Delta\theta_f$  就是车摇干扰  $\theta_f$  对系统输出的影响，当  $1 + \frac{K_b K_2 W_2}{N} = 0$  时，车摇扰动对伺服系统输出无影响，因此应设计  $K_b = -\frac{N}{K_2 W_2}$ 。

$K_2 W_2$  是速度环闭环传递函数，可近似等效为一阶惯性环节<sup>[9]</sup>： $K_2 W_2 = \frac{K_2}{\tau s + 1}$ ，其中  $K_2$  为速度环闭环增益， $\tau$  为速度环闭环时间常数。

$\tau$  可由公式  $\tau = \frac{1}{2\pi f}$  确定，其中  $f$  是速度环带宽，本系统中速度环带宽约为 6 Hz，此时  $\tau = 0.026$  s。

综上所述得到  $K_b = -\frac{N(\tau s + 1)}{K_2}$ 。但是由于前馈补偿不可能隔离全部干扰，有时甚至还会引入一些噪声<sup>[13]</sup>，故一般只采用速度前馈，而不采用加速度和更高阶信号的前馈，因此在分析计算  $K_b$  的过程中可忽略速度环时间常数的影响，近似为  $-\frac{N}{K_2}$ ， $K_b$  也可称为速度前馈系数。

若得到速度前馈系数  $K_b$  的取值，并获取天线轴（方位、俯仰）的车摇扰动角速度，便可进行车摇扰动隔离。

从图 6 可以看出，从速度环输入至天线轴转速之间的传递函数为  $\frac{K_2 W_2}{N} = \frac{K_2}{N(\tau s + 1)}$ ，其中  $\frac{K_2}{N}$  是从速度环输入至天线轴转速的闭环增益。根据速度环输入的电压指令和输出的转速范围，可以得到增益  $\frac{K_2}{N}$ <sup>[14]</sup> 的取值。

在本系统中，速度环输入为电压指令  $-5 \sim 5$  V，天线轴转速范围为  $-25^\circ \sim 25^\circ$ ，得到  $\frac{K_2}{N} = 5$ ，由此得到速度前馈系数  $K_b = -0.2$ 。

### 3 仿真试验与分析

#### 3.1 车摇隔离评估

我们知道，船摇隔离度的计算公式为  $L = 20 \lg \frac{\Delta\theta_f}{\theta_f}$ ，

$\Delta\theta_f$  为扰动隔离后剩余误差最大值， $\theta_f$  为与  $\Delta\theta_f$  对应的最大船摇角。船摇隔离度是扰动隔离度在固定频率下的隔离度，固定频率下扰动隔离度的值是固定的<sup>[15]</sup>，一般使用船摇隔离度作为船摇隔离的评估指标<sup>[16]</sup>。对于车摇隔离的评估，一方面，按照以往工程经验车摇隔离没有合适的评估指标可借鉴，若采用船摇隔离度作为评估指标并不合理，因为车摇扰动不是固定频率，其频率成分复杂，随着路况的变化扰动幅频也随之变化，只能用船摇隔离度的评估方法来评估系统在特定频率下的车摇隔离效果，因此在下文 3.3 节的扰动隔离度仿真分析中便是采用此法评估；另一方面，车摇扰动隔离的主要目的是为了扰动隔离后剩余误差的有效幅值尽量小，不影响天线主波束的跟踪效果，因此在下文 3.4 节的车摇实测数据仿真中采用扰动残差的标准差评估车摇隔离的效果，同时用扰动残差的最大值和最小值判断在车摇跟踪时天线指向是否会偏离天线波束范围。即采用扰动残差的最大值和最小值判断能否满足跟踪条件，用扰动残差的标准差判断能否实现良好的跟踪效果。

#### 3.2 天线伺服系统建模

天线伺服系统是三环系统，从内到外依次由电流环、速度环、位置环构成<sup>[17-18]</sup>，本系统设计电流环带宽约为 500 Hz，速度环空载带宽约为 25 Hz，带载带宽约为 6 Hz，位置环带宽约为 2 Hz。

对 3.8 米车载窄波束天线系统建模得到电流环模型如图 8 所示，速度环模型如图 9 所示，利用图 8 和图 9 以及 2.3 节前馈复合控制的设计，建立带有车摇扰动前馈补偿的位置环模型如图 10 所示。

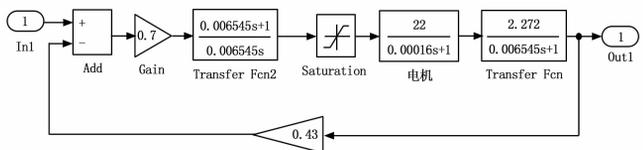


图 8 电流环模型

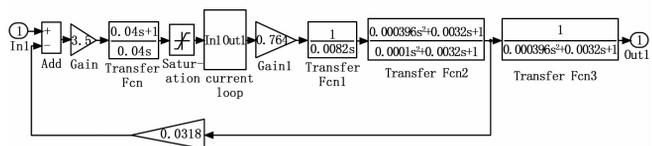


图 9 速度环模型

在图 10 所示的位置环模型中：

- 1) 给定天线伺服系统的目标指向角度，作为位置

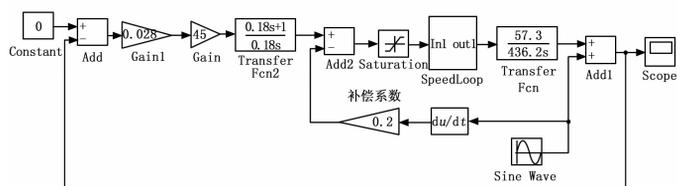


图 10 采用车摇扰动前馈补偿的位置环模型

环的输入信号；

2) 将给定目标指向角度与当前天线实时角度进行比较并计算出误差信号，该误差为后续控制器进行调节的基础；

3) 位置控制器是位置环的核心控制单元，采用自适应 PID 控制算法，它接收来自比较器的位置误差信号，经运算输出相应控制指令到速度环，目的在于消除误差使天线准确指向目标；

4) 速度环代表整个速度闭环伺服系统，接收位置控制器的输出作为其速度给定指令，并通过内部速度反馈和控制驱动电机转动，最终实现对速度的精确控制；

5) 扰动前馈补偿通道是抑制车摇扰动的关键路径，该通道直接检测车体的角振动信号，并经由一前馈补偿器处理，与前向通道中位置控制器的输出相加共同作为速度环的输入指令，其作用即在车摇扰动影响到系统输出前产生一个与之相反的补偿作用，从而抵消扰动影响。

该系统通过位置反馈闭环保证跟踪精度，同时引入扰动前馈开环通道主动抵消车摇干扰，两者结合共同实现高精度动中通稳定跟踪。

### 3.3 车摇扰动隔离理论仿真

车体振动时相当于在伺服系统位置环引入了角度扰动，针对窄波束天线伺服系统进行理论仿真时，采用正弦波作为扰动信号，通过调整正弦波的周期测试隔离效果。

在伺服系统结构不变的情况下，车摇扰动隔离度只和扰动频率相关，若扰动频率固定，伺服环路模型不变，则扰动隔离度是定值。故我们通过在天线伺服系统的位置环中加入各种不同频率的正弦扰动信号（幅值均设为 1°，频率如表 1 所示），测试“单位置环”和“位置环+扰动前馈”的隔离情况，测试结果如表 1 所示。从表 1 得到如下结论：

1) 采用“单位置环”方法对车摇扰动进行隔离可以隔离一定频率以下的车摇扰动，但是随着扰动信号频率的升高，隔离效果越来越差。当扰动信号频率为 0.1 Hz 时，隔离度是 37.1 dB；当扰动信号频率为 1 Hz 时，隔离度是 0.9 dB，隔离能力已经很弱；当扰动信号频率为 2 Hz 时，隔离度是 0.1 dB，已几乎没有隔离能力。因此若只使用“单位置环”进行扰动隔离，效果

较差，不能满足窄波束天线系统的跟踪要求。

2) 采用“位置环+扰动前馈”能进一步提升隔离效果，每个频率分量的扰动隔离度有显著提高，当扰动信号频率为 0.1 Hz 时，隔离度是 52.4 dB，比单位置环隔离高 15.3 dB；当扰动信号频率为 1 Hz 时，隔离度是 16.5 dB，比单位置环隔离高 15.6 dB；当扰动信号频率为 2 Hz 时，隔离度是 11.3 dB。

综上所述，在位置环基础上加入扰动前馈补偿后，每个频率分量的扰动隔离相对于单位置环均有显著的提升。在低频区域，扰动前馈补偿对扰动信号的隔离度比单位置环提高 15 dB 左右；当扰动信号频率与位置环带宽 2 Hz 相同时，有 11.3 dB 的隔离度，而对应的单位置环已没有隔离能力；但是当扰动信号频率达到 2.2 Hz 时，由于天线伺服系统的机械惯量大，带宽受限，无法对带宽外信号做出响应，即使采用扰动前馈补偿也没有隔离能力。

从 2.2 节我们看出车摇扰动频率成分复杂，是多个频率成分的叠加，简单来说隔离效果也可认为是多个频率扰动隔离效果的叠加。而通过本小节的理论仿真我们也可得到定性结论：如果存在频率成分复杂的车摇扰动时，伺服系统采用“位置环+扰动前馈”效果会比“单位置环”的效果好很多。

表 1 “单位置环”和“位置环+扰动前馈”隔离度仿真结果

频率 / Hz	扰动幅值 / (°)	“单位置环”		“位置环+扰动前馈”	
		最大扰动残差 / (°)	隔离度 / dB	最大扰动残差 / (°)	隔离度 / dB
0.1	1	0.0137	37.1	0.0024	52.4
0.2	1	0.0559	25.1	0.0096	40.8
0.3	1	0.129	17.8	0.0217	33.7
0.5	1	0.384	8.3	0.0604	24.9
1	1	0.899	0.9	0.149	16.5
2	1	0.984	0.1	0.273	11.3
2.1	1	—	0	0.306	10.3
2.2	1	—	0	0.999	0

### 3.4 车摇扰动隔离实测数据仿真

在 3.3 节中我们针对多种单一频率对系统的车摇隔离能力进行了仿真，然而车辆振动实际上是同一时刻包含了多种频率成分，上述方法无法评估实际系统的扰动隔离情况。为了得到更接近真实情况的车摇扰动隔离效果，我们把 2.2 节实际测得的车摇扰动数据（二级公路车速为 30 km/h）作为伺服模型的输入，分别采用“单位置环”和“位置环+扰动前馈”两种隔离方法进行半实物仿真，得到真实情况下多种频率成分同时叠加的实际车摇扰动下的隔离效果如图 11 所示，可以看出天线伺服系统采用“单位置环”后的扰动残差比采用“位置环+扰动前馈”的波动要大，虽然位置环的隔离起到了

一定效果,但是采用“位置环+扰动前馈”后的扰动残差趋于平坦,隔离能力提高,效果更好。

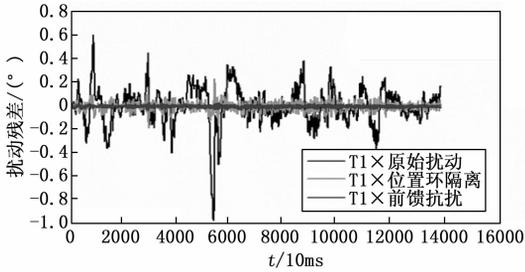


图 11 车摇实测数据仿真

根据半实物仿真得到车摇实测数据仿真的统计结果如表 2 所示。

表 2 车摇实测数据仿真统计结果

项目	标准差/(°)	最小值/(°)	最大值/(°)
原始扰动	0.162	-0.975	0.608
单位置环	0.037	-0.183	0.236
位置环+扰动前馈	0.009	-0.034	0.043

从表 2 可知:

1) 与单位置环相比,采用扰动前馈补偿后系统对多种频率成分叠加的车摇扰动隔离效果显著提升,标准差由原始扰动 ( $0.162^\circ$ ) 和单位置环 ( $0.037^\circ$ ) 降至为  $0.009^\circ$ ,最大值和最小值由原始扰动 ( $0.608^\circ$ ,  $-0.975^\circ$ ) 和单位置环 ( $0.236^\circ$ ,  $-0.183^\circ$ ) 提升至为 ( $0.043^\circ$ ,  $-0.034^\circ$ )。

2) 由于路况原因,在路面颠簸处原始扰动会出现尖峰,此时隔离后误差也会产生突然跳动,对应表 2 中的最大值与最小值。从表 2 可以看出,虽然伺服系统单位置环隔离车摇有一定效果,但是扰动残差最大值和最小值均大于本系统波束宽度的一半 ( $0.1^\circ$ ),无法保证天线在主波束内稳定跟踪,易丢失目标。而叠加扰动前馈隔离后,扰动残差最大值和最小值均小于波束宽度的一半 ( $0.1^\circ$ ),能保证天线在主波束内稳定跟踪,不会丢失目标。从不能稳定跟踪到可以稳定跟踪,隔离能力已产生质变。

3) 单位置环时扰动残差的标准差为  $0.037^\circ$ ,加入扰动前馈隔离后,扰动残差的标准差减小为  $0.009^\circ$ ,扰动残差的整体波动范围得到有效改善,能确保窄波束天线在车辆行驶过程中的高质量跟踪。

## 4 结束语

本文开展了车载窄波束测控天线系统抗车摇能力的研究,结合对车摇扰动信号进行的测量与分析,提出并设计了一种基于车摇扰动前馈复合控制方法,并通过理论仿真和半实物仿真验证了此方法能够有效提高天线伺

服系统的抗车摇能力,保证天线系统稳定跟踪效果,最终提高系统的跟踪能力和跟踪精度。由于该方法可不改变伺服环路结构特性与稳定性,因此在车载测控系统中具有很好的适用性和实用价值。

## 参考文献:

- [1] 崔浩华,郭森琪,段朝伟.小型化滤波天线设计[J].无线电工程,2025,55(3):596-602.
- [2] 彭力,南敬昌,杨清淞,等.具有五陷波的超宽带天线设计[J].无线电工程,2024,54(5):1270-1276.
- [3] 潘玲云,王庆林,张磊.车载“动中通”伺服控制系统研究与应用[J].微型机与应用,2016,35(15):38-41.
- [4] 汪洋.卫星移动通信车载站应用性能研究[J].无线电通信技术,2012,38(3):75-77.
- [5] 李勇,戴明,常立新.一种Ka频段多波束天线设计研究[J].无线电工程,2012,42(8):41-42.
- [6] 李勇,李文计.一种Ka频段多波束天线的工程实现[J].无线电通信技术,2012,38(4):45-47.
- [7] 陈浩,仙锦.某雷达天线方位驱动系统设计分析[J].现代制造技术与装备,2020,5:45,49.
- [8] 乔建江,霍克强,张冰,等.Ka频段车载遥感站天线伺服控制系统设计[J].无线电工程,2024,54(10):2393-2400.
- [9] 贾建辉,赵书阳.船载天线伺服系统稳定回路分析与设计[J].飞行器测控学报,2017,36(2):101-105.
- [10] 胡金辉,陈小刚,范祥祥,等.基于船载测控系统的多组隔离船摇技术应用研究[J].电子测量技术,2021,44(13):31-34.
- [11] 胡松涛.自动控制原理[M].北京:科学出版社,2013.
- [12] FARID GOLNARAGHI, BENJAMIN C. Kuo. 自动控制系统[M].李少远,邹媛媛译.北京:机械工业出版社,2020.
- [13] 李焱,冯强,张强.动基座光电跟踪系统速度建模与视轴复合校正[J].计算机测量与控制,2009,17(8):1531-1534.
- [14] 万胜辉,丁求启,蒋知彧.基于卡尔曼滤波的新型船摇前馈补偿方法[J].计算机测量与控制,2018,26(5):214-216.
- [15] 贾建辉,赵书阳,马纪军.船摇速度补偿算法在两轴天线伺服系统中的应用研究[J].遥测遥控,2017,38(2):62-66.
- [16] 瞿元新.航天测量船测控通信设备船摇稳定技术[M].北京:国防工业出版社,2009.
- [17] 鲍珊,姜素萍.舰载遥测设备伺服跟踪视轴稳定方法研究[J].飞行器测控学报,2009,28(3):26-29.
- [18] 黄烁,郭振超,吴东华,等.永磁同步电机伺服系统参数自整定策略[J].微电机,2021,54(1):51-56.