

曹海青, 王 渝, 杜明芳, 等. 基于局域预测的动载天线伺服控制策略研究[J]. 电波科学学报, 2014, 29(1):106-113+134. doi: 10.13443/j. cjors. 2013041001.

CAO Haiqing, WANG Yu, DU Mingfang, et al. Control policy of the moving antenna servo system based on local prediction[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2014, 29(1): 106-113+134. (in Chinese). doi: 10.13443/j. cjors. 2013041001.

基于局域预测的动载天线伺服控制策略研究

曹海青¹ 王 渝¹ 杜明芳^{1,2} 方建军²

(1. 北京理工大学自动化学院, 北京 100081; 2. 北京联合大学自动化学院, 北京 100101)

摘 要 针对中小涌浪的扰动, 研究了一种基于少量数据的局域预测方法, 应用于海面小型漂浮式动载天线跟踪卫星的方位和俯仰伺服控制中. 以天线系统的少量位置数据为基础, 采用局域预测算法预测天线的位置, 计算天线指向将偏离卫星的偏差值, 进行天线指向偏离卫星的补偿控制; 基于天线位置间相关性, 研究了局域预测算法并进行仿真验证; 根据天线系统的组成设计了天线方位伺服控制器, 并通过 matlab 仿真和半实物仿真验证了局域预测伺服控制策略的可行性、可靠性和鲁棒性.

关键词 伺服控制; 动载天线; 局域预测; 跟踪

中图分类号 TP273 **文献标志码** A **文章编号** 1005-0388(2014)01-0106-09

Control policy of the moving antenna servo system based on local prediction

CAO Haiqing¹ WANG Yu¹ DU Mingfang^{1,2} FANG Jianjun²

(1. School of Automation, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. College of Automation, Beijing Union University, Beijing 100101, China)

Abstract A local predictive method based on few data is applied in the azimuth and elevation servo control of the small moving antenna floating on sea under disturbances from medium and small surges in the process of automatic tracking satellite. The positions of the antenna are predicted by the local predictive method on the basis of the few data of the antenna positions, the calculation error between the antenna direction and the satellite will be input to the controller to control the antenna to track satellite. The local predictive algorithm is designed and verified by simulation based on the correlation among the antenna positions. The azimuth controller is designed on the basis of the antenna servo system construction and verified by matlab and hardware-in-loop simulation. Experimental results validate its feasibility, reliability and robustness.

Key words servo control; moving antenna; local prediction; track

引 言

目前动载式卫星接收天线系统主要包括车载卫星接收天线系统、机载卫星接收天线系统和舰载

卫星接收天线系统^[1], 他们的特点是将天线部件安装在超过天线质量好几个数量级的载体上进行工作的; 动载式天线的功能就是在载体运动过程中实现天线实时稳定连续地跟踪卫星, 保证天线与卫星之

收稿日期: 2013-04-10

资助项目: 北京市学术创新资助项目(No. 201106149)

联系人: 曹海青 E-mail: cxy8888@bit. edu. cn

间的通信质量;因此如何很好地隔离载体运动、实现实时跟踪卫星是动载式天线的关键技术。

本文研究一种漂浮于海面的小型动载式卫星接收天线系统的伺服控制策略,所研究的天线系统将漂浮于我国近海海域,在一定的范围内随流淌航,天线系统将受到风浪扰动的影响;本文重点研究在中小涌浪作用下漂浮式小型动载天线跟踪卫星的伺服控制策略。由于所研究的动载天线系统的基座与天线通信系统的质量相当,体积较小,海浪对其状态的影响较大,因此目前所使用的比例-积分-微分(Proportional-Integral-Derivative, PID)控制算法跟踪卫星的效果不太理想。本文研究一种基于局域预测的动载天线伺服控制策略,该策略以历史邻域内少量的天线位置信息为基础,设计一种局域预测算法预测出天线系统下一时刻的位置信息,利用预测信息和星历数据计算出天线系统和卫星之间即将产生的偏差值,以此偏差值为PID算法的控制量控制天线伺服系统运动以消除可能产生的偏差值,实现天线实时精确地跟踪卫星;另外由于是以预测值为依据计算控制偏差量,因此该算法可及时实现通信中断恢复后的重连。

1 中小涌浪的扰动下漂浮式天线系统的运动分析

1.1 涌浪

漂浮于海面的小型动载天线时刻受到海洋风浪扰动的影响,风浪按其特征分为风波和涌浪,其中风波紊乱而不规则,持续时间短;涌浪波长较长、波高较小,比较规则,持续时间长。从统计意义上讲,不规则的风波可用无数个不同波幅和波长的单元规则波叠加组成,因此可根据漂浮体在规则波上的运动特性来研究风浪的扰动效果。众所周知涌浪属于长峰波,可以用平面波表示为

$$\zeta = \zeta_a \cos(k\xi + \omega t). \quad (1)$$

式中: ζ_a 为波幅; ξ 为波面偏离静水面的高度; k 为波数; $k = 2\pi/\lambda = \omega^2/g$, ω 为圆频率, λ 为波长,波周期 $T_B = 2\pi/\omega$ 。根据我国国家海洋局发布的浪级标准可知,中小涌浪的有义波高 $h_{1/3}$ 小于 2 m, 波长小于 60 m, 周期小于 6.2 s, 风速小于 19 节, 约为 9.7 m/s^[2]。

1.2 小型漂浮式天线系统的运动

为了实现中小涌浪扰动下漂浮式天线自动跟踪卫星的策略,须先研究小型漂浮式天线在中小涌浪扰动下的运动情况,其运动为六自由度的摇荡运动,

包括垂荡、横荡、纵荡三个互相垂直方向的直线运动和首摇、横摇、纵摇三个绕三个互相垂直坐标轴的旋转运动^[2],这些运动相互间存在耦合作用,根据相互间耦合程度的高低,通常将六自由度的摇荡运动分解成纵向运动(垂荡、纵摇和纵荡)和横向运动(横荡、横摇和首摇),又由于纵荡对垂荡和纵摇的耦合作用较小,通常可以忽略。故小型漂浮式天线系统在中小涌浪扰动下的运动方程可表示为:

$$\begin{aligned} F_z &= (m + A_{11})\ddot{z} + A_{12}\dot{z} + A_{13}z + A_{14}\ddot{\theta} + \\ &\quad A_{15}\dot{\theta} + A_{16}\theta; \\ M_\theta &= (J_\theta + A_{21})\ddot{\theta} + A_{22}\dot{\theta} + A_{23}\theta + A_{24}\ddot{z} + \\ &\quad A_{25}\dot{z} + A_{26}z; \\ F_y &= (m + A_{31})\ddot{y} + A_{32}\dot{y} + A_{33}y + A_{34}\ddot{\phi} + \\ &\quad A_{35}\dot{\phi} + A_{36}\phi + A_{37}\ddot{\psi} + A_{38}\dot{\psi} + A_{39}\psi; \\ M_\phi &= (J_\phi + A_{41})\ddot{\phi} + A_{42}\dot{\phi} + A_{43}\phi + A_{44}\ddot{y} + \\ &\quad A_{45}\dot{y} + A_{46}y + A_{47}\ddot{\psi} + A_{48}\dot{\psi} + A_{49}\psi; \\ M_\psi &= (J_\psi + A_{51})\ddot{\psi} + A_{52}\dot{\psi} + A_{53}\psi + A_{54}\ddot{y} + \\ &\quad A_{55}\dot{y} + A_{56}y + A_{57}\ddot{\phi} + A_{58}\dot{\phi} + A_{59}\phi. \quad (2) \end{aligned}$$

式中: z 为垂荡运动的线位移; θ 为纵摇运动的角位移; y 为横荡运动的线位移; ϕ 为横摇运动的角位移; ψ 为首摇运动的角位移; m 为小型漂浮式天线系统的质量; J_θ 为漂浮式天线系统的纵向转动惯量; J_ϕ 为漂浮式天线系统横向转动惯量; J_ψ 为首摇方向的转动惯量; F_z 为垂荡运动的波浪扰动力; F_y 为横荡运动波浪扰动力,扰动力包括运动恢复力、波浪阻尼力和波浪惯性阻力,与波浪的频率、波长、波幅、波数以及波倾角相关; M_θ 为纵摇运动的波浪扰动力矩; M_ϕ 为横摇运动波浪的扰动力矩; M_ψ 为首摇运动波浪的扰动力矩,波浪扰动力矩随着波浪的频率、波长、波幅、波数和波倾角的变化而变化; A_{ij} ($i = 1, \dots, 5; j = 1, \dots, 9$) 是漂浮式天线系统的流体动力系数,是波浪频率的函数。事实上漂浮式小型天线系统在海面上所受到扰动的涌浪频率是在不断变化的,涌浪的幅值也会随时间衰减到零,故扰动力、扰动力矩、水动力系数是一些持续变化的量,此外由于各种运动间的耦合作用,使得小型漂浮式天线系统在中小涌浪扰动作用下的运动是一个复杂时变的非线性运动。

1.3 漂浮式天线运动的控制方法

目前对海面小型漂浮体的非线性运动的控制方法主要有以下两种:1) 通过分析漂浮体的受力情况,推导出 1.2 中的非线性耦合运动方程,通过解非

线性方程的方法求出漂浮体的位置坐标、首摇角(方位角)、横摇角(横滚角)和纵摇角(俯仰角),进而计算出需要补偿的姿态角度(方位角、横滚角和俯仰角)偏差,然后以此偏差进行天线跟踪卫星的控制,这种方法的空间复杂度和时间复杂度都很大,目前理论研究较多,较为实用和可用于实时控制的算法几乎没有;2) 利用线性解耦的方法对 1.2 节中非线性耦合运动方程进行解耦和线性化,通过求解线性方程来确定漂浮体的姿态角度和补偿角度,这种方法简单,但由于本文所研究的漂浮式天线系统体积小、质量轻,中小涌浪的低阶非线性扰动对漂浮式天线系统姿态的影响较大,不可忽略,故将这种解耦线性化的方法应用于小型漂浮天线跟踪卫星的控制中,必然降低控制精度,影响天线与卫星间的通信质量。

由于漂浮式小型天线系统在中小涌浪扰动下运动情况及其复杂,故本文将不采用上述两种方法,拟采用一种新的基于局域预测的方法求解天线跟踪卫星的姿态角度偏差,以此偏差作为天线跟踪卫星的控制量来控制天线实时跟踪卫星,即以全球定位系统(Global Positioning System, GPS)实测的中小涌浪扰动下漂浮式天线系统的运动轨迹数据为基础,研究微小邻域内轨迹的变化规律,预测出下一采样时刻的漂浮式天线位置信息,利用预测的位置信息和星历数据计算出在中小涌浪扰动下天线姿态角即将偏离天线指向最佳区域的偏差,以此偏差为控制量进行天线跟踪卫星的超前控制,实现天线精确跟踪卫星;这样通过以少量数据为基础的方法,避开处理非线性耦合运动方程的复杂性,降低了算法空间复杂度和时间复杂度,提高了控制效率。

2 漂浮式动载天线伺服控制系统

2.1 漂浮式动载天线系统

所研究的漂浮式小型动载天线接收系统是一种新的小型海事卫星天线,由漂浮式的基座和通信系统组成。在充分考虑基座的力学特性和使用便捷性的基础上设计了如图 1 所示的类双体船的漂浮式基座,基座沿 x 和 y 方向对称,且 x 和 y 方向形状完全相同,保证了天线系统在 x 和 y 方向上的力学特性完全相同,基座的设计吃水为 16 cm,经理论和仿真研究证实该基座体积小质量轻,具有较好的浮性、稳性、抗沉性和耐波性。天线通信系统主要由通信元器件、天线伺服控制部件和天线转动平台组成,其中天线伺服控制部件由直流无刷电机、低压无刷伺服

驱动器和基于控制器局域网络(Controller Area Network, CAN)总线自主开发的控制器等组成;由于海洋涌浪的影响可引起天线系统的首摇、纵摇和横摇,使得天线与卫星之间的方位角、俯仰角、横滚角和极化角发生变化,为了使天线系统更好地适应海洋环境,设计了如图 2 所示的可在三个自由度上转动的机械转动平台,通过三个轴向的转动来补偿涌浪对天线系统稳定跟踪卫星所造成的偏差。

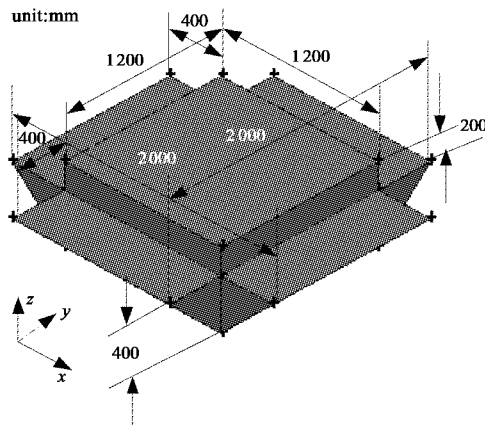


图 1 基座结构示意图

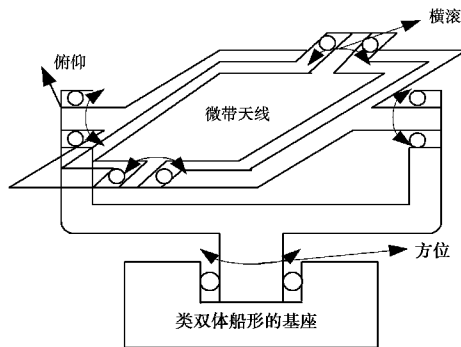


图 2 机械转动平台的结构

2.2 天线伺服系统

海洋涌浪对天线的扰动,造成天线指向偏离卫星,使得天线的方位角、俯仰角、横滚角和极化角发生变化;由于天线的横滚角和极化角之间的耦合效应,本文不研究天线极化和横滚调整的伺服控制,重点研究天线方位角偏差补偿和俯仰角偏差补偿伺服系统,其伺服系统的结构如图 3 所示;以 GPS 所测量的天线位置信息为基础,利用局域算法预测出天线下一时刻的位置信息,结合星历数据计算出即将产生的偏差值,接着根据所接收到信标自动增益控制(Auto Gain Control, AGC)信号的变化情况,确定电机转动的方向;偏差值和方向值作为位置控制

器的输入,将位置控制器的输出、用于消除不稳定扰动的前馈补偿器的输出和电机转速反馈值作为电机控制器的输入控制电机进行转动,实现天线实时准确地跟踪卫星;前馈控制器用于补偿漂浮式动载天

线因各种不可定量求解的扰动所引起的偏差,以保证天线伺服控制系统的控制精度和鲁棒性.方位伺服控制系统和俯仰伺服控制系统的差别仅在于所选用的减速器不同.

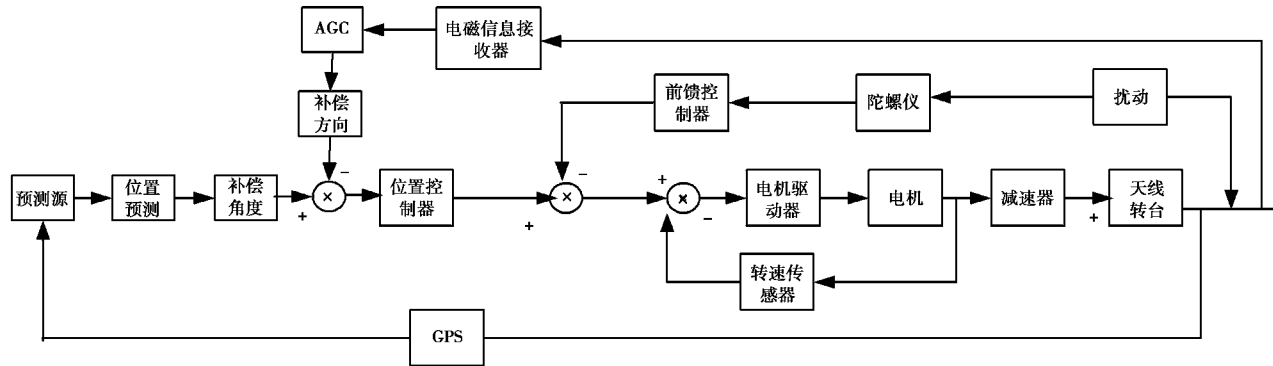


图 3 天线伺服系统结构

2.2.1 电机模型

天线伺服控制系统使用的电机为直流无刷电机,根据文献[3]直流无刷电机的传递函数可简化为

$$G(s) = \frac{k_m}{(L_a s + R_a)Js + k_e k_m}. \quad (3)$$

式中: k_m 是电机的转矩系数; R_a 和 L_a 分别是电枢电路的电阻和电感; J 是电机和负载折算到电机轴上的转动惯量; k_e 是反电动势参数. 当 L_a 比较小时,其传递函数可近似为

$$G(s) \approx \frac{k_m}{R_a Js + k_e k_m} = \frac{K}{T_m s + 1}. \quad (4)$$

式中: 电机的机电常数 $T_m = R_a J / (k_e k_m)$; $K = 1/k_e$. 根据电机手册和综合考虑实际的使用环境计算可得,方位电机的传递函数为

$$G_m(s) = \frac{8.696}{0.0017s + 1}; \quad (5)$$

俯仰电机的传递函数为

$$G_m(s) = \frac{8.696}{0.0016s + 1}. \quad (6)$$

2.2.2 其他元件的模型

减速器、转速传感器、陀螺仪和 GPS 的输出是一个与输入成比例的信号,又由于陀螺仪和 GPS 的响应频率远大于电机响应频率,故可将减速器、转速传感器、陀螺仪和 GPS 简化为一个比例环节;根据技术手册可知方位电机的减速比 $n_1 = 115$,其传递函数为 $G_{AZ}(s) = 1/n_1 = 1/115$. 俯仰电机的减速比 $n_2 = 40$,其传递函数为 $G_{EL}(s) = 1/n_2 = 1/40$. 速度传感器的比例系数为 0.9,其传递函数为 $G_s(s) = K_s =$

0.9,陀螺仪的比例系数为 1,其传递函数为 $G_t(s) = K_t = 1$,GPS 的比例系数为 1,其传递函数为 $G_h(s) = K_h = 1$;根据电机驱动器的技术手册,可将电机驱动器简化为一阶惯性环节,其传递函数为 $G_c = k_c / (T_c s + 1)$,根据电机控制器的阶跃响应曲线拟合可得 $k_c = 0.6$, $T_c = 0.3$,则传递函数

$$G_c = 0.6 / (0.3s + 1). \quad (7)$$

2.2.3 前馈控制器模型

为了很好地消除涌浪所引起的随机扰动,设计了前馈控制器抑制涌浪对天线跟踪卫星的影响.将陀螺仪所监测的天线系统运动速度扰动作为前馈控制器的输入;所设计的伺服系统的电机驱动器、电机和速度传感器总的传递函数为

$$G_{dm}(s) = \frac{G_c(s)G_m(s)}{1 + k_s G_c(s)G_m(s)}. \quad (8)$$

式中: $G_c(s)$ 为电机控制器的传递函数; $G_m(s)$ 为电机的传递函数; K_s 为速度传感器的传递函数. 根据前馈控制器的设计原则^[4],要消除干扰的影响前馈控制的传递函数需满足

$$\begin{aligned} D(s) - D(s)G_p(s)G_{dm}(s) \frac{k_i}{K} \\ = D(s) \left(1 - \frac{k_i G_p(s)G_{dm}(s)}{K} \right) \\ = 0, \end{aligned} \quad (9)$$

$$\text{则可得 } G_p(s) = \frac{K}{k_i G_{dm}(s)}. \quad (10)$$

式中 K 为比例系数,需根据实际的控制系统来确定. 方位电机总的传递函数为

$$\begin{aligned}
 G_{dmw}(s) &= \frac{G_c(s)G_m(s)}{1+k_s G_c(s)G_m(s)} \\
 &\approx \frac{\frac{0.6 \times 8.696}{0.3s+1}}{1+\frac{0.9 \times 0.6 \times 8.696}{0.3s+1}} \\
 &= \frac{5.214}{0.3s+5.693}.
 \end{aligned} \quad (11)$$

同理,俯仰电机总的传递函数为

$$\begin{aligned}
 G_{dmy}(s) &= \frac{G_c(s)G_m(s)}{1+k_s G_c(s)G_m(s)} \\
 &\approx \frac{\frac{0.6 \times 8.696}{0.3s+1}}{1+\frac{0.9 \times 0.6 \times 8.696}{0.3s+1}} \\
 &= \frac{5.214}{0.3s+5.693}.
 \end{aligned} \quad (12)$$

故方位前馈控制器的传递函数和俯仰前馈控制器的传递函数均为

$$\begin{aligned}
 G_p(s) &= \frac{K}{k_t G_{dm}(s)} \\
 &= \frac{K(0.3s+5.692)}{5.214} \\
 &= 1.092(1+0.0527s)K.
 \end{aligned} \quad (13)$$

由此可将前馈控制器设计为含有比例和微分的 PID 控制器,在本研究中 $K=1$.

2.2.4 位置控制器模型

海洋涌浪对天线系统的扰动具有非线性特点,而传统的 PID 控制策略对非线性扰动的抑制能力不好,为了改善这种局面,本研究的位置控制器采用了分区 PID 控制器,即将系统误差分为不同区域,在不同的区域使用不同的 PID 控制参数,通过分区 PID 控制器来适应海洋涌浪的非线性,实现快速消除跟踪误差,使天线及时准确地跟踪卫星. 所设计的分区 PID 的参数情况如表 1 所示.

表 1 分区 PID 控制参数表

误差 $ e $	方位 k_p	俯仰 k_p	方位 k_i	俯仰 k_i	方位 k_d	俯仰 k_d
$(1, +\infty)$	450	550				
$(0.8, 1]$	400	420			4	6
$(0.6, 0.8]$	400	350	0.02	0.01	4	10
$(0.4, 0.6]$	350	300	0.05	0.06	10	4
$(0.2, 0.4]$	300	280	0.01	0.1	10	2
$(0, 0.2]$	200	200	0.02	0.05	10	2

3 动载天线位置的局域预测

3.1 位置信息间的关联关系

漂浮于海面的动载式小型天线位置信息可用拉

格朗日追踪法进行表示^[5], 设 S_t 为第 t 时刻天线系统的位置信息, S_0 为天线系统初始位置信息, v_t 为 t 时刻天线系统的漂流速度, 则有

$$S_t = S_0 + \int_{t_0}^t v_t dt + \Delta\alpha. \quad (14)$$

式中: $\Delta\alpha$ 为不可测的扰动所引起的漂移变化; S_t 对 t 求导可得天线系统的漂移速度,

$$dS_t/dt = v_t + d(\Delta\alpha)/dt. \quad (15)$$

由于 v_t 为由波浪所引起的漂流速度, 其大小与波浪的波长密切相关, 故 dS_t/dt 不是一个常量, 因此动载天线位置间存在严格的非线性关联关系. 本研究将充分利用位置间的非线性关系设计一种局域预测方法实现对天线位置的预测, 利用预测信息和星历数据实现对卫星的跟踪.

3.2 局域预测方法

为了实现天线位置的预测, 首先必须确定预测源, 由运动理论可知: 与天线系统的即时速度 v_t 和加速度 a_t 密切相关的位置信息为 S_t 、 S_{t-1} 和 S_{t-2} , 因此在预测第 $t+1$ 时刻的位置信息 S'_{t+1} 时, 只需将 S_t 、 S_{t-1} 和 S_{t-2} 作为预测源信息即可实现, 故每次预测时只需将当前历史领域内的 3 个采样数据作为预测源即可预测出下一时刻天线的位置, 这样在每次预测时可实时更新预测源, 保证了少量预测源信息参与预测的科学性和合理性; 同时充分考虑到每个预测源信息对预测结果的影响程度不一样, 采取了自适应系数的预测方式进行预测, 可更好地反应涌浪变化对天线位置影响的快速响应性. 在算法实现时预测空间嵌入维数 $m=3$, 预测步长 $\eta=1$, 所设计的预测表达式为

$$\begin{aligned}
 S'_{t+1} &= F(S_t, S_{t-1}, S_{t-2}) \\
 &= a_1 S_t + a_2 S_{t-1} + a_3 S_{t-2}, \\
 &t = 3, \dots, N.
 \end{aligned} \quad (16)$$

式中 a_1 、 a_2 和 a_3 是预测系数, 可通过方程组 (17) 得到.

$$\begin{aligned}
 S_t &= F(S_{t-1}, S_{t-2}, S_{t-3}) = \sum a_i S_k, \\
 i &= 1, 2, 3; k = t-2, t-1, t;
 \end{aligned} \quad (17)$$

式中 S_t 和 S_k 为实际测量的天线位置. 所设计的算法有以下特点:

1) 本算法是一种基于少量数据源的实时预测算法.

算法中预测源信息的选择是根据当前时刻某一时间邻域内的位置信息而不是根据位置信息向量的范数邻域来选择的; 而且预测源信息量较少, 其长度仅为 3, 有别于普通预测方法对海量数据的依赖性;

同时在预测过程中及时更新信息源,保证预测结果的准确性和科学性。

2) 本算法是一种自适应变系数的预测算法。

预测中预测系数是根据历史数据实时求解方程组所计算的结果,是一组动态变化的量,这种自适应变系数预测方法可很好地反应涌浪的变化及其对天线运动的影响,保证预测结果的科学性和天线系统对涌浪环境的适应性。

3) 预测值的确定方式。

本算法直接通过数学解析式求出预测值,这有别于传统的方法通过对每一个预测源信息单独预测后,从预测值集合中确定最后的预测值,很显然所采用的预测方法耗时短效率高。

4) 预测算法的鲁棒性更强。

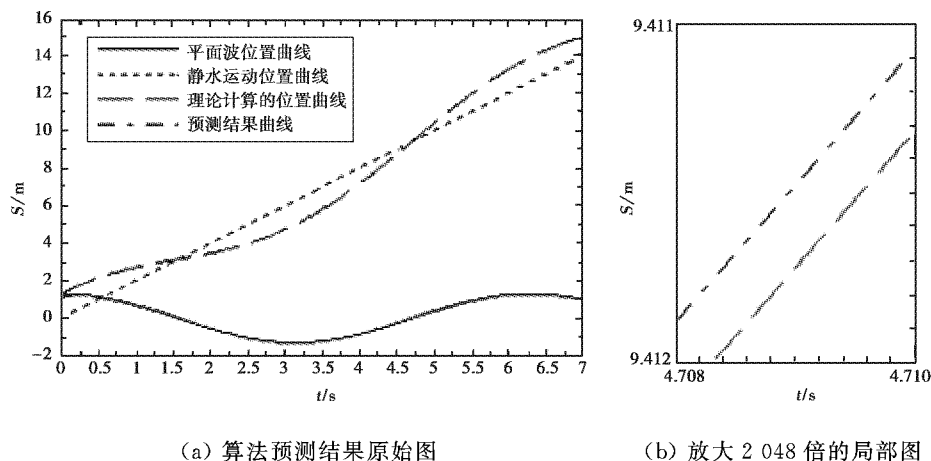
在本方法的预测过程中,如果 GPS 正常工作可获得天线系统的实时位置信息时,就将实测的位置信息作为预测源信息;一旦 GPS 无法及时测量到位置信息时(通信中断、设备故障等),就将预测值作为

预测源参与预测。这种方法可很好地适应动载式天线因剧烈扰动、遮挡、GPS 故障等原因暂时丢星过程中的预测跟踪,有利于通信恢复后重新及时跟踪卫星。

3.3 局域预测算法的仿真研究

海洋涌浪的研究是以平面波理论为基础的,为此本研究根据我国近海海域的实际情况,针对中小涌浪对漂浮体的影响进行局域预测算法的仿真研究。设涌浪的波面方程为 $\xi \approx 1.3 \cos t$,海水的静水流速为 2 m/s,仿真采样周期为 0.2 s,则通过 matlab 编程进行天线位置的预测及其理论计算,并绘制曲线如图 4 所示,通过比较发现预测的最大绝对误差小于 0.000 5 m。仿真结果证实所设计的局域预测算法误差小、精度高,实用性强。

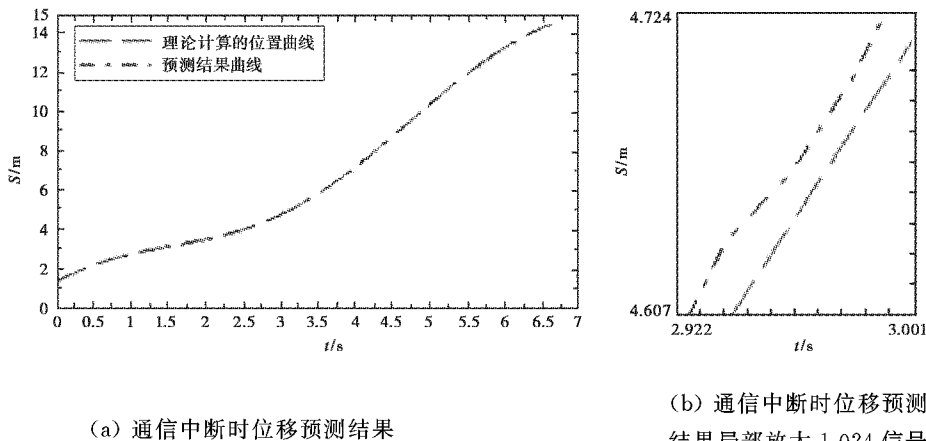
为了验证算法对天线与卫星间通信中断的适应性,在仿真过程中,把 2 s 到 4 s 这段时间设定为通信中断过程,模拟无法实测天线的位置信息,即在这段时间内将预测值作为预测源信息进行预测,将整



(a) 算法预测结果原始图

(b) 放大 2 048 倍的局部图

图 4 局域预测算法仿真结果



(a) 通信中断时位移预测结果

(b) 通信中断时位移预测
结果局部放大 1 024 信号

图 5 模拟通信中断过程的天线位置预测结果

个仿真中预测结果与理论计算的位置信息相比,发现二者之间的相对误差小于 0.004,其仿真结果如图 5 所示. 仿真结果可证明在动载天线跟踪卫星过程中因某种原因无法实际测量天线的位置信息时,可将预测值信息作为预测源进行预测,其预测精度较高,可以作为伺服控制的依据,这样就可以实现通信中断期间天线指向的控制以便于通信恢复后的重连.

4 局域预测的伺服控制策略的仿真研究

本文通过 matlab 算法仿真和半实物仿真平台对所研究的控制策略的控制效果进行研究. 由于天线的方位伺服控制系统和俯仰伺服控制系统相似,故文章中只给出了方位控制的仿真研究结果.

4.1 matlab 算法仿真研究

根据研究内容建立了如图 6 所示的控制策略算法模型,其中 $f(u)$ 函数实现分区 PID 的功能. 在仿真过程中考虑到漂浮式动载天线的扰动信号主要来源于涌浪,故将平面波所表示的涌浪信号作为扰动信号,同时考虑到涌浪的扰动相比天线系统随流淌航所引起的位置变化相对较小,故采用平面波 $\xi \approx 0.3 \cos t$ 来模拟涌浪的扰动;采用系统对阶跃信号的控制效果验证前馈控制器的滤波效果,分析图 7 中的结果可知所设计的前馈控制器可以很好地隔离涌浪对天线的扰动. 同时利用阶跃信号和正弦函数 ($y = \sin t$) 分别测试方位伺服控制系统的响应情况,其响应结果如图 8 所示;通过计算可得方位伺服控制系统的性能参数为:系统超调量 $\sigma = 0.0013\%$,上升时间为 $t_r = 0.15$ s,峰值时间为 $t_p = 0.2$ s.

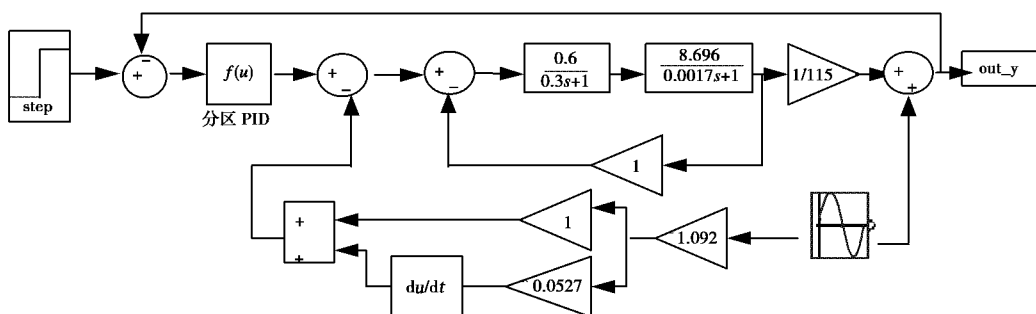


图 6 控制算法模型

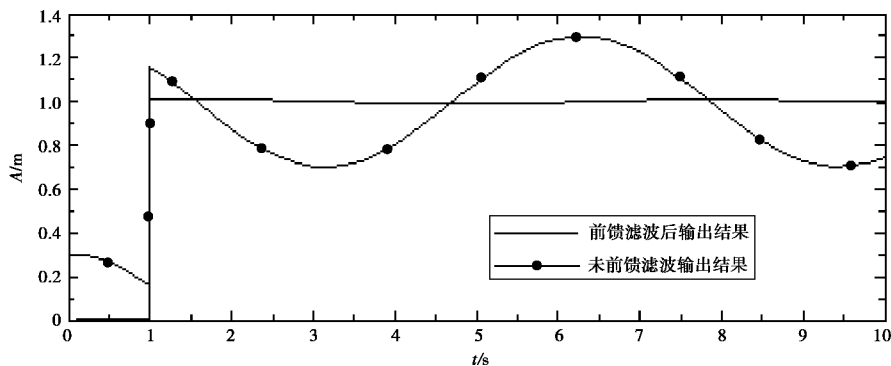


图 7 前馈控制器的滤波效果

4.2 控制策略的半实物仿真验证

将所设计的动载天线放在一个六自由度的摇摆台上,六自由度的摇摆台放置于平板小车上,通过平板小车的平动来模拟海水的静水流动,通过六自由度摇摆台的摇摆来模拟涌浪的扰动,采用半实物仿真平台进行实况模拟测试;在测试前利用手动跟踪

的方式在平板小车静止情况下使天线系统对准中星 10 号卫星,然后使平板小车以 2 m/s 的速度行驶,六自由度摇摆台按照 $\xi \approx 0.3 \cos t$ 规律在天线纵向方向上进行摇摆,在测试过程通过采集软件实时采集单脉冲接收机所接收到的信标信号 AGC,连续测试一小时,所检测到的 AGC 的结果如图 9 所示,

AGC 的幅值在区间 $[2\ 400, 2\ 570]$ 中变化时,可以实现天线连续稳定跟踪卫星;在测试中,从 20 min 到 30 min 时段内人工将 GPS 断开,模拟无法实际测量天线的位置信息,而将预测信息作为预测源进行预测控制,到 30 min 及时开启 GPS,使其正常工作.图

9 的结果表明基于局域预测的动载天线伺服控制策略可以实现天线实时跟踪卫星,而在 GPS 短时故障解除后,可实现天线与卫星之间的及时重连,故控制策略具有有较的实用性和鲁棒性.

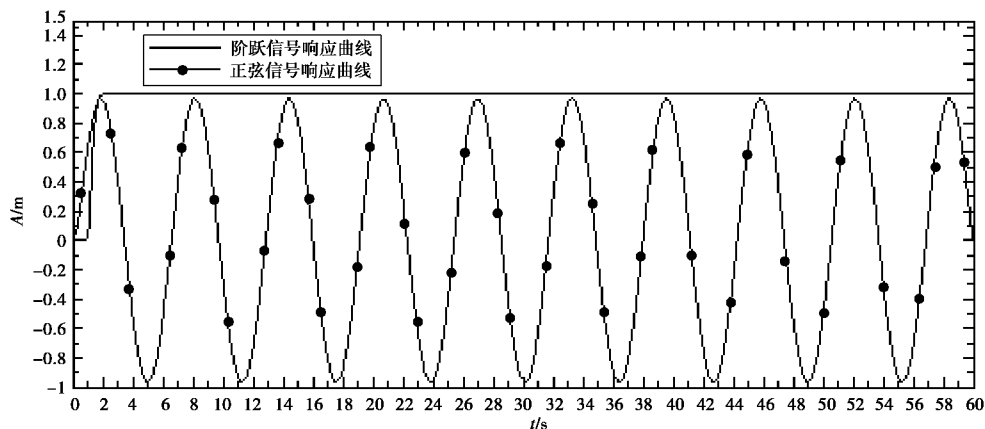


图 8 控制策略的仿真结果

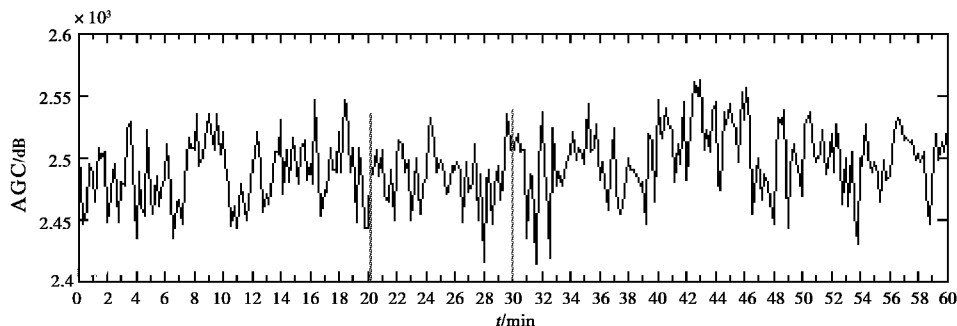


图 9 控制策略的半实物仿真测试结果

5 结 论

本文研究了在中小涌浪扰动下,漂浮式小型天线系统的伺服控制策略.以少量历史邻域内的天线位置信息为基础,通过局域预测算法预测出天线下一采样时刻的位置信息,结合卫星星历数据计算出天线指向将偏离卫星的偏差,以此偏差为输入量控制天线准确及时地跟踪卫星.

基于天线位置间的相关性,设计了以少量天线位置数据为预测源的自适应变系数局域预测算法,预测天线位置信息;通过仿真验证,表明该位置预测算法在 GPS 正常工作时其预测结果的绝对误差小于 0.000 5 m,在 GPS 故障期间,其预测结果的相对误差小于 0.004,其预测结果可作为 GPS 故障期间天线跟踪卫星的依据.

为抑制中小涌浪扰动对天线跟踪卫星的干扰,设计了前馈控制器对中小涌浪扰动进行滤波处理,

通过比较滤波前后的输出发现所设计的前馈控制器可以很好地消除中小涌浪扰动对天线跟踪卫星的影响.

基于天线伺服系统的组成设计了天线方位伺服控制器,通过半实物仿真实验,验证所研究控制策略的可行性、可靠性和鲁棒性.此外由于横滚跟踪和天线极化调整之间存在着严重的耦合效应,故本文并未对此进行研究,将在后续的工作中进一步研究横滚跟踪和天线极化调整,保证天线跟踪卫星的质量.

参考文献

- [1] 赵来定,曹 伟.动载体天线稳定系统[J].现代电子技术,2006,220(5):33-36.
ZHAO Laiding, CAO Wei. Antenna stabilization system on moving vehicles[J]. Modern Electronics Technique, 2006, 220(5): 33-36.

(下转第 134 页)

CAI Mingjuan, YIN Jiaxian, LIU Kecheng. New dual-frequency and new dual-polarization coplanar microstrip antenna[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2006, 21(1): 121-125. (in Chinese).

作者简介



宋长宏 (1980—), 男, 辽宁人, 哈尔滨工业大学电子科学与技术专业在读博士生, 中国电子科技集团公司第五十四研究所工程师, 主要研究方向为宽带阵列天线、相控阵天线、共形天线设计与计算。



吴 群 (1955—), 男, 黑龙江人, 教授, 哈尔滨工业大学博士生导师. 主要研究方向为射频/微波/毫米波器件与电路、射频/微波集成电路 CAD、天线与电磁兼容性、微波应用系统与测量技术。

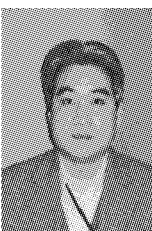


张文静 (1962—), 男, 山东人, 中国电子科技集团公司第五十四研究所高级工程师(教授级). 主要从事微波技术卫星天线馈源系统研究。

(上接第 105 页)

- [14] 龚 琦, 张 帅, 龚书喜, 等. 利用高阻抗表面缩减天线雷达截面的新方法[J]. 西安电子科技大学学报, 2012, 39(3): 120-125.

GONG Qi, ZHUANG Shuai, GONG Shuxi, et al. Application of the high impedance surface for RCS reduction of the antenna[J]. Journal of Xidian University, 2012, 39(3): 120-125. (in Chinese)



焦永昌 (1964—), 男, 山西人, 西安电子科技大学教授, 博士生导师, 研究方向为天线优化设计及天线理论等。

作者简介



龚 琦 (1985—), 男, 河北人, 西安电子科技大学博士生, 从事电磁辐射、散射理论及天线隐身技术方面的研究。



龚书喜 (1957—), 男, 河北人, 西安电子科技大学教授, 博士生导师, 研究方向为电磁理论、电磁散射与隐身技术等。

(上接第 113 页)

- [2] 李积德. 船舶耐波性[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2007: 1-29.

- [3] 刘 煜, 张 科, 李言俊. 一种位置随动控制系统的建模与仿真研究[J]. 弹箭与制导学报, 2005, 25(2): 4-6.
LIU Yu, ZHANG Ke, LI Yanjun. Modeling and Simulation research of control system of a random position [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2005, 25(2): 4-6.

- [4] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 4 版. 北京: 科学出版社, 2001: 558-566.

- [5] 翁怡婵, 杨金湘. 台湾海峡漂移物运动轨迹的数值模拟[J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 2009, 48(3): 446-449.

WENG Yichan, YANG Jinxiang. Simulation of floater trajectory in Taiwan Strait[J]. Journal of Xiamen University: Natural Science, 2009, 48(3): 446-449.

作者简介



曹海青 (1976—), 男, 山西人, 北京理工大学自动化学院博士研究生, 主要从事漂浮式小型卫星天线系统的研究。