

一种小型漂浮式天线横滚角动态处理方法

曹海青¹, 王渝¹, 姚志英², 杜明芳^{1,3}

(1. 北京理工大学 自动化学院, 北京 100081; 2. 北京物资学院 物流学院, 北京 101149;
3. 北京联合大学 自动化学院, 北京 100101)

摘要: 研究了一种用于我国近海海域隐蔽式军事侦察的小型漂浮式卫星天线横滚角的动态处理方法。从理论上研究横滚角对天线与卫星通信的影响, 以及横滚角变化与方位角和极化角变化的关系; 研究通过方位角和极化角的补偿来隔离横滚角变化对通信影响的横滚角动态处理方法; 以4级海况下漂浮式天线系统的横滚角度变化情况为测试样例, 比较横滚角动态补偿方法和4轴伺服补偿过程中自动增益控制(AGC)的变化情况, 证实了横滚角动态处理方法切实可行。

关键词: 控制科学与技术; 卫星通信; 小型漂浮式天线; 横滚角; 方位角; 极化角

中图分类号: TN828.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1093(2014)08-1251-07

DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2014.08.018

A Dynamic Processing Method of Roll Angle of Small Floating Antenna

CAO Hai-qing¹, WANG Yu¹, YAO Zhi-ying², DU Ming-fang^{1,3}

(1. School of Automation, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
2. School of Logistics, Beijing Wuzi University, Beijing 101149, China;
3. School of Automation, Beijing Union University, Beijing 100101, China)

Abstract: A dynamic processing method of roll angle of small floating maritime satellite antenna, which is applied in military concealed reconnaissance, is studied. The influence of roll angle on the quality of communication, the relation between azimuth and roll angles as well as the relation between elevation and roll angles are studied in theory. A dynamic processing method of that the compensations of the azimuth and elevation angles are applied to isolate the influence of the roll angle on communication is proposed. The relational expression among AGC, azimuth and elevation is fitted by the least square method based on the sampling data. The proposed method for roll angel of the small floating antenna is feasible by comparing the changes of AGC in the process of dynamic processing to the changes of AGC in the process of 4-axis servo compensation.

Key words: control science and technology; satellite communication; small floating antenna; roll angle; azimuth; polarization angle

0 引言

目前动载天线主要包括机载天线、舰载天线、星载天线和弹载天线, 这些动载天线系统的体积和

质量均为其承载载体的体积和质量的百分之几。在天线随载体的漂浮过程中, 要保证天线和目标卫星之间的通信质量, 就必须使天线对卫星的指向不能偏离最佳通信区域, 为此在天线跟踪卫星过程中, 天

收稿日期: 2013-10-08

作者简介: 曹海青(1976—), 男, 博士研究生。E-mail: cxy8888@bit.edu.cn;

王渝(1951—), 男, 教授, 博士生导师。E-mail: wanyu@bit.edu.cn

线系统必须能及时补偿因载体运动所造成天线指向的偏离;动载天线精确指向卫星是通过调整天线系统的姿态角(方位角、俯仰角、极化角和横滚角)来实现的;目前有关动载天线姿态角的调整一般采用 4 轴伺服机构来实现,即分别用方位伺服机构、俯仰伺服机构、极化伺服机构和横滚伺服机构来补偿对应姿态角的偏差^[1-4],尽管这种方法已经被广泛应用于机载天线和船舰载天线的自动跟踪卫星中,但该方法对天线调节系统的伺服结构要求较高,故其成本较高。事实上横滚角度对天线通信质量的影响,主要是由于横滚角度的变化会引起天线其他姿态角度(方位角、俯仰角和极化角)的变化而导致天线指向偏离卫星通信的最佳区域,为此本文重点研究一种通过方位角和极化角的补偿来隔离横滚角对天线通信影响的横滚角动态处理方法。

本文研究一种可漂浮于海面、在一定范围内随流淌航、体积较小、质量较轻、隐蔽性较好的新型海事卫星通信天线系统的横滚角度动态处理方法。这种天线系统由漂浮式基座载体和天线通信子系统组成,基座载体的体积和质量比车、船舰、飞机和星弹等载体小得多,与天线通信子系统相当。本文所研究的天线系统主要用于我国近海海域隐蔽式军事侦察,天线系统的姿态角时刻受到海浪扰动的影响,为保证天线与卫星之间的通信质量,必须及时进行姿态角偏差的调整,当然采用 4 轴伺服机械系统进行姿态角度的调整也可以保证天线与卫星之间的通信质量,但会增加天线系统的成本、体积和质量,降低天线系统的隐蔽性。本文采用传统的 3 轴伺服系统进行天线方位角、俯仰角和极化角调整,而对横滚角的调整则研究了一种实时动态补偿方法,即首先计算出横滚角度变化所造成其他姿态角度的变化量,接着通过调整其他姿态角度来实现对横滚角度变化的补偿。

1 横滚角对天线跟踪卫星的影响

1.1 横滚角

为研究小型漂浮式天线的横滚角动态补偿方法,定义小型漂浮式天线的基座坐标系如图 1 所示,原点 O 为基座的质心, x 轴为基座首尾方向的对称轴, y 轴为基座前后方向的对称轴, z 轴垂直于平面 Oxy ,横滚角是指基座底面 Oxy 绕 y 所转过的角度。

1.2 天线姿态角对通信的影响

天线姿态角包括方位角、俯仰角、极化角和横滚角;由于中国处于北半球,方位角以正北方为 0° ,正

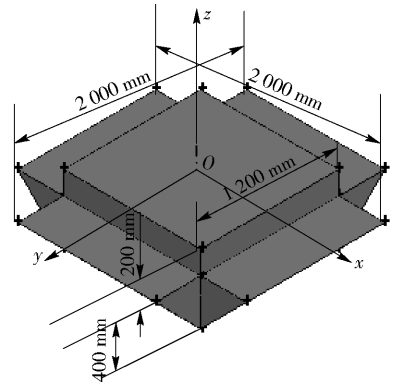


图 1 基座的坐标示意图

Fig. 1 Schematic diagram of base

南方为 180° ,顺时针方向增加;俯仰角以接收地水平面为 0° ,向上垂直于水平面为 90° ;极化角是指接收地的地平面与天线馈源矩形波导口窄边的夹角,当馈源矩形波导口窄边平行于地平面时其水平极化角为 0° ,垂直极化角为 90° 或 -90° ,当波导口窄边垂直于地平面时,水平极化角为 90° 或 -90° ,垂直极化角为 0° 。已知卫星星历数据和天线系统接收地的地理位置信息,可分别计算出天线的方位角 α 、俯仰角 β 和极化角 ψ ^[5],即

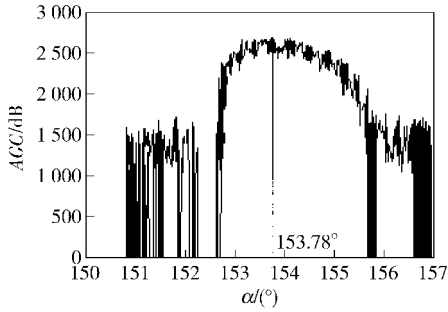
$$\alpha = \arctan \frac{\tan |\Delta\varphi|}{\sin \theta}, \quad (1)$$

$$\beta = \arctan \frac{\cos \theta \times \cos \Delta\varphi - R/M}{\sqrt{1 - \cos^2 \theta \times \cos^2 \Delta\varphi}}, \quad (2)$$

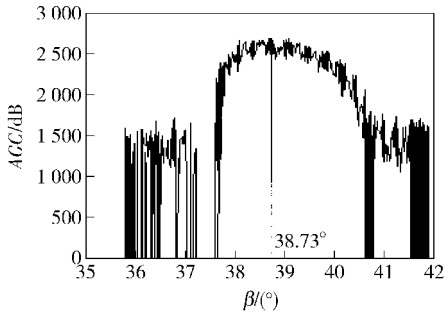
$$\psi = \arctan \left(\frac{\sin(\Delta\varphi)}{\tan \theta} \right), \quad (3)$$

式中: $\Delta\varphi$ 为卫星与天线所在位置的经度差; θ 为天线所在位置的纬度; R 为地球半径; M 为卫星距离地心的高度,即 $M = R + h$, h 为卫星距离地球表面的距离。通过实际测试以亚太 VI 号卫星为例来说明天线姿态调整角对通信的影响,具体如图 2 所示。其中图 2(a) 是当俯仰角度等于理论俯仰角度,极化角等于理论水平极化角时,信标信号自动增益控制 (AGC) 随天线方位角的变化情况,由图可知方位角等于理论方位角 153.78° 时,AGC 达到最大值,天线和卫星通信的最佳方位角区域为 $[152.2^\circ, 155.6^\circ]$;图 2(b) 是当方位角等于理论方位角,极化角等于理论水平极化角时,AGC 随俯仰角度的变化情况,由图可知俯仰角度等于理论俯仰角 38.73° 时,AGC 值最大,天线与卫星通信的最佳俯仰角区域为 $[37.7^\circ, 40.8^\circ]$;图 2(c) 是在俯仰角等于理论俯仰角,方位角等于理论方位角,极化角等于理论水平极化角 -19.8° 后,极化角开始以 10° 为间隔连续变化 180°

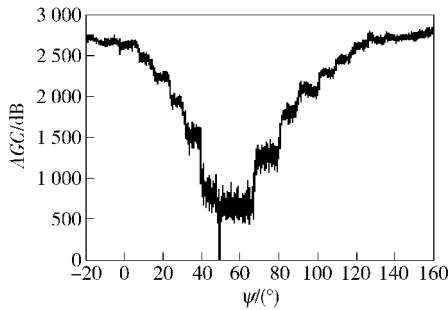
的过程中 AGC 的变化情况。综上所述可知:天线方位角和俯仰角分别以理论值为中心在某一邻域内变化,才能保证天线和卫星的通信质量,且方位角和俯仰角的邻域范围较小;而极化角的变化对 AGC 的影响呈周期性变化。



(a) AGC随方位角变化曲线
(a) AGC vs. azimuth angle



(b) AGC随俯仰角变化曲线
(b) AGC vs. elevation angle



(c) AGC随极化角变化曲线
(c) AGC vs. polarization angle

图 2 AGC 随天线姿态角的变化曲线
Fig. 2 AGC vs. antenna attitude angle

1.3 横滚角对天线姿态角的影响

横滚角对天线通信的影响主要是横滚角变化会引起天线的方位角、俯仰角和极化角的变化,进而影响天线与卫星之间的通信。设漂浮式天线的基座沿 y 轴的横滚角度变化了 $\Delta\gamma$, 则其引起天线方位角和俯仰角的变化情况如图 3 所示,方位角的变化量 $\Delta\alpha = \angle N_0OO_1$, 俯仰角的变化量 $\Delta\beta = \angle GOO_1 - \angle M_0OO_1$;引起天线极化角的变化情况如图 4 所示, S 为卫星位置且在 Oyz 平面内, Oz 轴上的一点 A 绕轴 Oy 旋转 $\Delta\gamma$ 到 B 点, A 点在 OS 线上投影为 C 点,

B 点在 OS 线上的投影为 F 点,基座的横滚角度变化了 $\Delta\gamma$,则极化角度变化 $\Delta\psi$ 为线段 AC 和线段 BF 的夹角,即 $\Delta\psi = \angle EFB$ 。

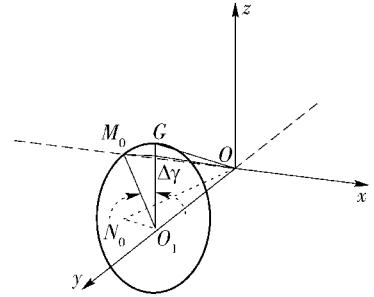


图 3 横滚角对方位角和俯仰角影响示意图

Fig. 3 Effect of roll angle on azimuth and elevation angles

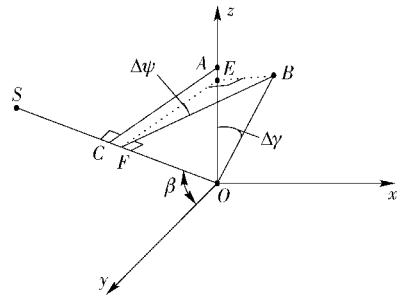


图 4 横滚角对极化角影响示意图

Fig. 4 Effect of roll angle on polarization angle

1.3.1 横滚角对方位角的影响

由图 3 可得

$$\tan \Delta\alpha = \tan \angle N_0OO_1 = \frac{O_1N_0}{O_1O} = \frac{O_1G \sin \Delta\gamma}{O_1G \cot \beta} = \tan \beta \sin \Delta\gamma. \quad (4)$$

当 $\Delta\gamma \rightarrow 0, \Delta\alpha \rightarrow 0$ 时,有

$$\sin \Delta\gamma \rightarrow \Delta\gamma, \tan \Delta\alpha \rightarrow \Delta\alpha, \quad (5)$$

即有 $\Delta\alpha = \Delta\gamma \tan \beta$, 则

$$\Delta\alpha = \Delta\gamma \tan \beta, \quad (6)$$

由此可知横滚角变化与方位角变化是一个线性关系,其比例系数为 $\tan \beta$,以天线在北京地区接收亚太 VI 号卫星为例,横滚角变化对方位角变化的影响情况如图 5(a) 所示。

1.3.2 横滚角对俯仰角的影响

由图 3 可得

$$\tan \Delta\beta = \tan(\beta - \beta') = \frac{\sin \beta \cos \beta (1 - \cos \Delta\gamma)}{1 - \sin^2 \beta (1 - \cos \Delta\gamma)}. \quad (7)$$

当 $\Delta\gamma \rightarrow 0$ 时, $\Delta\beta = 0$, 由此可知横滚角的变化对俯仰角的变化影响不大,以天线在北京地区接收亚

太 VI 号卫星为例,横滚角变化对俯仰角变化的影响情况如图 5(b) 所示。

1.3.3 横滚角对极化角的影响

由图 4 可得

$$\tan \Delta\psi = \tan \angle EFB = \frac{|BE|}{|FE|} = \frac{|OB| \sin \Delta\gamma}{|OB| \cos \Delta\gamma \cos \beta} = \frac{\tan \Delta\gamma}{\cos \beta}. \quad (8)$$

当 $\Delta\gamma \rightarrow 0, \Delta\psi \rightarrow 0$ 时,

$$\tan \Delta\psi \rightarrow \Delta\psi, \tan \Delta\gamma \rightarrow \Delta\gamma, \quad (9)$$

则

$$\Delta\psi = \frac{\Delta\gamma}{\cos \beta}, \Delta\dot{\psi} = \frac{\Delta\dot{\gamma}}{\cos \beta}. \quad (10)$$

以天线在北京地区接收亚太 VI 号卫星为例,横滚角变化对极化角变化的影响情况如图 5(c) 所示。

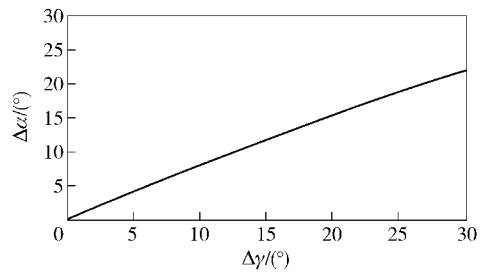
由上述研究可得横滚角变化引起天线方位角和极化角的变化较大,使得天线指向偏离天线与卫星的最佳通信区域;而横滚角的变化对俯仰角的影响较小;又由于

$$\frac{\Delta\alpha}{\Delta\psi} = \frac{\tan \beta \Delta\gamma}{\Delta\gamma / \cos \beta} = \sin \beta \leq 1, \quad (11)$$

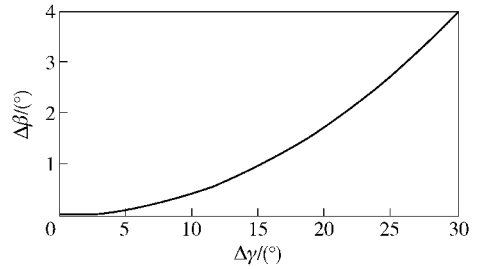
故横滚角变化对极化角的影响对方位角的影响大。

2 横滚角的动态补偿

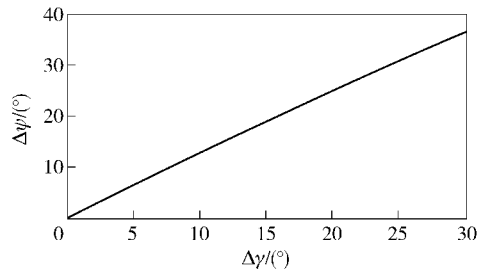
漂浮于海面小型天线系统的运动包括垂荡、横荡、纵荡 3 个互相垂直方向的直线运动和首摇、横摇、纵摇 3 个绕 3 个互相垂直坐标轴的旋转运动,是一个运动间相互耦合的 6 自由度运动,其中横荡、横摇和首摇会引起天线系统横滚角的变化;又由于海浪扰动的复杂性,使得海浪对漂浮于海面的小型天线系统运动的影响呈现时变、非线性的特点^[6-7];此外所研究的天线系统体积小、质量轻,天线系统对涌浪扰动较为敏感,若采用横滚伺服系统进行横滚角度的补偿,必将因伺服执行机构的惯性和阻尼影响横滚角的补偿效果,为此本文研究一种横滚角动态补偿的处理方法。天线系统横滚角变化等于横摇运动的横摇角变化;横滚角的变化改变天线的方位角和极化角,使得天线指向偏离卫星,为了保证在海浪扰动下天线与卫星的通信质量,需补偿横滚角变化的影响;本文对天线横滚角的补偿是通过调整由横滚角变化所引起的方位角和极化角的变化量来实现的,本文先研究在 4 级海况下天线系统的横摇角变化,求出天线系统的横滚角,然后根据 1.3 节中研究



(a) 横滚角变化与方位角变化关系
(a) The relation between the changes of roll angle and azimuth angles



(b) 横滚角变化与俯仰角变化关系
(b) The relation between the changes of roll angle and elevation angle



(c) 横滚角变化与极化角变化关系
(c) The relation between the changes of roll angle and polarization angles

图 5 横滚角与姿态角的变化曲线

Fig. 5 Roll angle vs. attitude angle

内容求出因横滚角变化所引起的方位角和极化角的变化量,最后对方位角和极化角进行动态补偿。

2.1 横滚角动态处理方法

设天线系统横滚角在当前采样时刻的变化量为 $\Delta\gamma$, 则引起方位角的变化量为

$$\Delta\alpha_1 = \arctan(\tan\beta \sin\Delta\gamma), \quad (12)$$

引起极化角的变化量为

$$\Delta\psi_1 = \arctan \frac{\tan \Delta\gamma}{\cos \beta}. \quad (13)$$

为此方位角的总调整量为 $\Delta\alpha = \Delta\alpha_1 + \Delta\alpha_2$, $\Delta\alpha_2$ 为非横摇运动所引起天线方位角的变化量;极化角的总调整量为 $\Delta\psi = \Delta\psi_1 + \Delta\psi_2$, $\Delta\psi_2$ 为非横摇运动引起的极化角的变化量。这样通过方位和极化的调整来补偿横滚角的变化,隔离横滚角对天线通信影响,消除横滚角变化对天线指向卫星的影响,这就是本文所提出的横滚角的动态处理方法。

2.2 小型漂浮式天线系统横滚角的变化情况

本文根据 Conolly 理论中线性横摇理论分析天线系统的横摇运动,确定天线系统的横滚角变化情况^[8]。根据国际船模试验水池会议(ITTC)推荐的单参数海浪谱公式为

$$S(\omega) = \frac{0.87}{\omega^5} \exp\left(-\frac{3.11}{h_{1/3}^2 \omega^4}\right), \quad (14)$$

式中: ω 为波浪圆频率(rad/s); $h_{1/3}$ 为有义波高(m); $S(\omega)$ 为海浪谱密度($\text{m}^2 \cdot \text{s}$)。

根据波浪谱密度可计算出波倾角谱密度

$$S_\alpha(\omega) = \frac{\omega^4}{g^2} S(\omega), \quad (15)$$

式中: g 为重力加速度(m/s^2)。则随机海浪作用于漂浮体的横摇遭遇波倾角为

$$\alpha_{\gamma t} = \sum_{i=1}^N \alpha_{\gamma \text{et}}(t) = \left(\sum_{i=1}^N \frac{\omega_i}{g} \sqrt{2S(\omega_i) \Delta\omega \cos(\omega_{\text{et}} t + \varepsilon_i)} \right) \sin\chi, \quad (16)$$

式中: χ 为航向角(rad); ε_i 为波相角(rad), 本研究中 $\varepsilon_i = 0^\circ$ 。假设漂浮式天线系统漂浮于海面的横摇运动为线性运动,其输入量为波倾角 $\alpha_\gamma(s)$,输出量为天线系统的横滚角 $\gamma(s)$,则其传递函数为

$$G(s) = \frac{\gamma(s)}{\alpha_\gamma(s)} = \frac{\omega_\gamma^2}{s^2 + 2\xi_\gamma \omega_\gamma s + \omega_\gamma^2}, \quad (17)$$

式中: ω_γ 为漂浮式天线横摇固有角频率,

$$\omega_\gamma^2 = \frac{Dh}{J + DJ}, \quad (18)$$

D 为设计排水量, h 为稳心高, J 为转动惯量; ξ_γ 为横摇阻尼因子,取值范围为 0.08 ~ 0.12,本研究中取

表 1 小型漂浮式天线相关参数

Tab. 1 The parameters of small floating antenna

参数	l/m	m/kg	D/m^3	$\omega_\gamma/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	w/m	Z/m	h/m	α_γ/rad	H/m	$v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$J/(\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2)$	ξ_γ
数值	2	100	290	0.238	2	0.16	2.77	$\pi/6$	0.6	≤ 5	11.6	0.12

注: l 为天线系统的长度; w 为天线系统的宽度; H 为天线系统的高度; m 为天线系统的质量; Z 为天线系统的吃水; v 为天线系统漂浮于海面时的平均漂流速度。

由以上研究可知,当漂浮式小型天线系统在 4 级以下的海况进行工作,航向角小于 30° 时,其横摇角的绝对值小于 10° 。

2.3 天线姿态角与 AGC 的关系

毫无疑问天线姿态角会影响到天线信标 AGC 的强弱,而且天线姿态角之间存在一定耦合因素,但由于方位角和极化角之间耦合程度较低,因此为了

$\xi_\gamma = 0.12$ 。

设状态变量为 $x_1(t) = \gamma(t)$, $x_2(t) = \dot{\gamma}(t)$, 输入信号 $u = \alpha_\gamma(t)$, 输出信号 $y(t) = \gamma(t)$, 则系统的状态空间方程为

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_\gamma^2 & -2\xi_\gamma \omega_\gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_\gamma^2 \end{bmatrix} u, \\ y(t) = [1 \quad 0] \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix}. \end{cases} \quad (19)$$

漂浮式天线系统的相关参数如表 1 所示,可知: $\omega_\gamma = 0.238 \text{ rad/s}$, $\xi_\gamma = 0.12$; 4 级海况的性能参数为 $h_{1/3} = 2 \text{ m}$, 风速为 19 kn, 约为 9.7 m/s, 海浪波长 $\lambda = 60 \text{ m}$, 波浪周期为 $T = 6.1 \text{ s}$, 研究频段范围为 0.3 ~ 3 rad/s, 频率增量为 $\Delta\omega = 0.01 \text{ rad/s}$, 取航向角 $\chi = 30^\circ$, 则 4 级海况下海浪的波能谱如图 6 所示,波倾角变化曲线如图 7 所示。将系统的状态空间方程离散化为

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.5976 & 0.2943 \\ -0.024 & 0.985 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.024 \\ 0.034 \end{bmatrix} \alpha_\gamma(k), \\ y(k) = [1 \quad 0] \begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \end{bmatrix}, \end{cases} \quad (20)$$

式中: k 为正整数; $x_1(k)$ 为状态变量 $x_1(t)$ 的离散形式; $x_2(k)$ 为状态变量 $x_2(t)$ 的离散形式; $y(k)$ 为系统输出 $y(t)$ 的离散形式; $\alpha_\gamma(k)$ 为输入信号的离散形式。其横摇角度的变化情况如图 8 所示。

研究天线姿态角与 AGC 的关系,忽略了天线方位角与极化角之间的耦合关系,利用方位角在最佳区域内变化时 AGC 采样数据和极化角变化时 AGC 采样数据进行非线性拟合,求解出 AGC 随天线方位角和极化角变化的关系。

2.3.1 AGC 与天线方位角的关系

对图 2(a) 的源数据抽取区间为 $[152.2^\circ,$

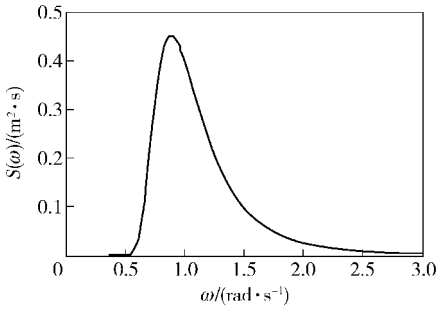


图 6 4 级海况的波能谱曲线

Fig. 6 The curve of wave energy spectrum in level four sea state

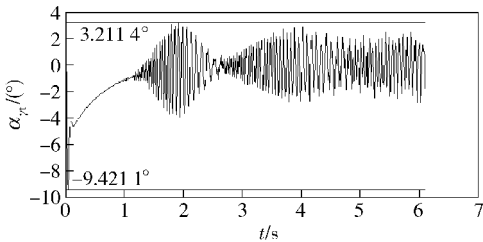


图 7 4 级海况的波倾角变化曲线

Fig. 7 The curve of wave dip angle variation in level four sea state

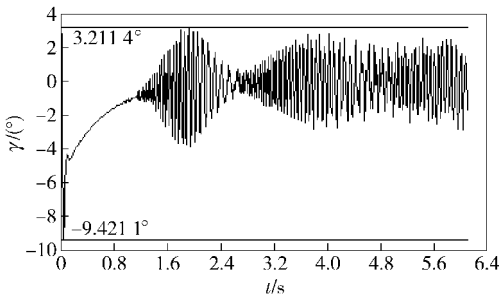


图 8 4 级海况的横摇角变化曲线

Fig. 8 The curve of roll angle variation in level four sea state

155.8°] 内方位角数据和对应的 AGC 数据作为数据源,进行滤波处理,剔除由于方位伺服机构的执行过程和系统指令时延的影响后,对这些数据利用 Matlab 进行多项式拟合,根据拟合实验发现当拟合次数大于 3 次时,其拟合多项式中高于 2 次项的系数为 0,因此 AGC 随天线方位角在理论方位角邻域内的变化关系为二次函数。设 AGC 随天线方位角变化的函数为

$$agc_1(\alpha) = a\alpha^2 + b\alpha + c. \quad (21)$$

利用最小二乘法可求出 $a = -0.1065, b = 32.76, c = 36.54$, 即

$$agc_1(\alpha) = -0.1065\alpha^2 + 32.76\alpha + 36.54. \quad (22)$$

2.3.2 AGC 与天线极化角的关系

天线在某一方向(垂直或水平)的 AGC 随着极化角呈周期性变化,即当极化角变化了 90°,当前方向上的 AGC 由最大变到最小,则另一方向的 AGC 必然由最小变到最大,如果极化角再变化 90°,则当前方向上的 AGC 由最小变到最大,另一方向的 AGC 必然由最大变到最小。结合图 2(c)的实际测量结果,则可设 AGC 与极化角之间的函数为 $agc_2(\psi) = d\cos(k\psi + \theta_0)$, 其中 d 为某一方位角所对应的 AGC 值, θ_0 为初相角;图 2(c)的源数据是极化角以 10°为间隔改变时的 AGC 值,利用中值滤波处理降低极化伺服机构和指令等时延因素的影响,通过最小二乘法可求出 $k = 2, \theta_0 = 39.62^\circ$ 。

通过实验测试,发现天线方位角和极化角之间的耦合程度较低,为此忽略了方位角和极化角相互间的影响,同时假设天线方位角和极化角的变化过程中,天线的俯仰角恒等于理论俯仰角,则 AGC 与天线方位角和极化角之间的关系可表示为

$$agc_3(\alpha, \psi) = f(\alpha, \psi) = agc_1(\alpha) agc_2(\psi) = (-0.1065\alpha^2 + 32.76\alpha + 36.54) \cos(2\psi + 39.62). \quad (21)$$

2.4 算法的仿真实证

以漂浮于 4 级海况的天线系统为研究对象,根据海浪谱分析推算出天线系统遭遇的波面倾角,利用 2.2 节中研究计算出天线系统在 4 级海况下的横摇角,将横摇角的变化量作为输入,利用 1.3 节中的研究内容计算出天线系统方位角和极化角的变化量,再根据 2.1 节中内容计算出最终方位角和极化角的补偿量,利用 2.3 节中 AGC 和方位角与极化角的关系,计算出角度补偿后的 AGC 变化情况。在补偿过程中 AGC 变化情况如图 9 所示,其中点画线为 4 轴伺服补偿方法所测量的 AGC 值,实线为横滚角动态处理方法补偿后根据 (21) 式计算的 AGC

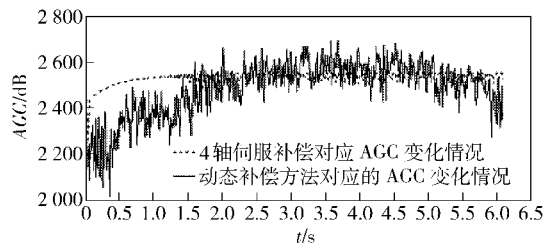


图 9 4 级海况下横滚角动态补偿过程中 AGC 的变化曲线

Fig. 9 The curve of AGC during dynamic compensation of roll angle in level four sea state

值。在天线与目标卫星的通信过程中发现只要 AGC 值大于 2 000 dB, 就可以实现天线与目标卫星的高质量通信。由图 9 可得, 在通过动态补偿进行横滚角的处理中, AGC 值均大于 2 000 dB, 因此在 4 级海况下天线系统的横滚角变化, 完全可以通过方位角和极化角的补偿来保证天线和卫星之间的通信质量, 无需通过专门的横滚伺服执行机构进行补偿, 这样采用动态补偿方法既降低了天线系统的成本、体积和质量, 又保证了天线系统的隐蔽性。

3 结论

本文通过理论分析、测试实验和仿真研究了横滚角的变化对天线姿态角以及天线与卫星间通信的影响, 提出了横滚角动态补偿方法; 通过实验测试分析出天线与卫星间通信的最佳方位区间和极化区间; 从理论上研究了横滚角变化对方位角、俯仰角和极化角变化的影响, 分析出横滚角对通信的影响主要是改变了天线的方位角和极化角; 从理论上验证了可通过方位角和极化角的补偿来隔离横滚角对天线通信的影响。

以漂浮于 4 级海况海面的小型天线系统的扰动为研究对象, 通过仿真验证了可通过方位角和极化角的补偿来隔离横滚角对天线通信的影响。首先以 Conolly 理论为基础, 应用线性横摇理论研究了 4 级海况波倾角变化情况; 将漂浮式天线系统作为一个 2 阶系统, 以波倾角为输入, 横滚(横摇)角为输出, 根据天线系统基座的结构参数, 求解出 4 级海况下天线系统横摇角的变化情况; 以方位角、极化角和 AGC 的采样数据为基础, 应用最小二乘法拟合出方位角与 AGC、极化角和 AGC 的数学表达式, 在忽略方位角和极化角之间耦合性的基础上, 求出 AGC 随方位角和极化角变化的表达式; 应用 4 级海况扰动下天线系统横摇角的变化情况, 对比动态补偿方法和 4 轴伺服补偿方法的 AGC, 证实本文提出的动态

补偿方法完全可以隔离横滚角变化对天线与卫星间通信的影响, 可保证天线与卫星间稳定的高质量通信。

参考文献 (References)

- [1] Ce L, Huang Y C, Lai Y H, Ye Y L. Airborne antenna tracking for sky-net mobile communication [C] // 2011 Fifth International Conference on Digital Object Identifier. New Zealand: IEEE, 2011: 569 - 574.
- [2] Pan X J, Wu Y H, Jia X. Research on design of antenna tracking-pointing control system for airborne platform [C] // 2nd International Congress on Image and Signal Processing. Tianjin: IEEE, 2009: 978 - 981.
- [3] Tseng H C, Teo D W. Ship-mounted satellite tracking antenna with fuzzy logic control [C] // IEEE Conference on Control Applications. Albany, NY: IEEE, 1995: 549 - 553.
- [4] Choi J, Kasprzak J A. Dynamic analysis of shipboard-mounted tracking antennas [C] // Proceedings of the 1984 American Control Conference. San Diego, CA: IEEE, 1984: 1391 - 1397.
- [5] 武伟良, 刘晓丽, 任娟. 车载空中通伺服系统关键技术的研究 [J]. 河北省科学院学报, 2010, 27(1): 31 - 34.
WU Wei-liang, LIU Xiao-li, REN Juan. The studies on critical technologies of servo system of vehicle satellite communication in motion [J]. Journal of the Hebei Academy of Sciences, 2010, 27(1): 31 - 34. (in Chinese)
- [6] Cao H Q, Wang Y, Yao Zh Y. The location prediction of a floating small-sized antenna based on nonlinear time series [C] // 2013 32nd Chinese Control Conference. Xi'an: IEEE, 2013: 4057 - 4061.
- [7] 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.
CAO Hai-qing, WANG Yu, DU Ming-fang, 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. (in Chinese)
- [8] 李积德. 船舶耐波性 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2007.
LI Ji-de. Ship seakeeping [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2007. (in Chinese)