

动中通波束指向偏差概率分布^①张峰干^② 贾维敏 姚敏立 金 伟

(第二炮兵工程学院 西安 710025)

摘 要 针对动中通卫星通信性能和邻星干扰的评估问题,研究了动中通天线波束的指向偏差。在坐标系关联的基础上,通过分析姿态测量误差和跟踪控制误差下的波束指向,得到了动中通波束指向偏差的概率分布模型。该模型从各种误差的综合作用效果方面来研究波束指向偏差的成因,无需考虑系统内部误差的作用机理且结构简单。研究结果表明,在假定条件下(对应实际中的平稳行车环境),动中通波束指向偏差服从瑞利分布。行车实验验证了论文模型的正确性。

关键词 卫星移动通信,指向偏差,跟踪误差,稳定平台,概率分布

0 引言

动中通卫星通信是以同步轨道卫星为中继实现的移动站与固定站、移动站与移动站之间的宽带、多媒体卫星移动通信(Satcom on-the-move, SOTM)^[1,2]。与传统的卫星移动通信相比,采用窄波束天线(半功率波束宽度小于 10°)的动中通中,除了电磁波会受到树木、建筑物或其他障碍物的反射、折射以及阻挡产生多径、阴影效应外^[3,4],动中通天线指向还必须克服载体运动的干扰,时刻对准卫星,才能实现可靠通信。但载体运动环境的不确定性(路面、海面以及空气气流变化)和测控系统的动态误差,使得波束指向总是存在随机偏差,进而影响天线的有效增益,产生误码,并干扰相邻卫星的通信过程。波束指向偏差是多种因素综合作用的结果,其对通信系统的影响也是多方面的,对波束指向偏差概率模型的研究可以为动中通的指向偏差控制、误码率抑制、链路预算、邻星干扰等问题提供参考依据^[5-9]。

文献[5]对不同尺寸天线下的指向误差造成的误码率进行了仿真分析,但对波束指向偏差的成因考虑较少,所得模型缺乏试验验证。文献[6]研究了波束指向误差对动中通天线方向图的设计要求,但文中只是在假定指向偏差服从对称 Levy 分布的

条件下,采用蒙特卡罗仿真得到了辐射功率的概率分布,对假定条件没有给出合理的说明和验证。文献[7]在文献[6]假定的指向误差概率分布条件下建立了动中通波束指向偏差对邻星用户干扰的模型,研究结果表明干扰的大小取决于波束指向偏差。因此,对动中通波束指向偏差概率分布模型的研究在上述动中通卫星通信的性能评估和优化设计方面具有重要的意义。然而,车载动中通系统受路况影响,载体姿态变化剧烈,导致天线波束指向偏差的内部和外部因素复杂,现有的方法能够有效地提高天线波束指向的设计精度^[10,11],但却由于各种误差复杂的作用机理,很难得到有效实用的指向偏差概率分布模型。为此,本文在分析影响波束指向偏差诸多因素的基础上,从动中通天线指向的运动机制和指向误差的综合作用方面,分析了指向偏差的主要成因,建立了姿态测量误差的传递模型;并依据稳定跟踪平台的闭环跟踪状态,研究了跟踪控制误差的概率分布,得到了动中通波束指向偏差概率分布的数学模型;最后,通过计算机仿真和行车实验对本文给出的概率分布模型进行了验证。

1 波束指向偏差来源

动中通测控系统利用惯性传感器或姿态航向参考设备测量载体行进过程中的姿态变化,并通过伺

① 国家自然科学基金(61179004)资助项目。

② 男,1985年生,博士生;研究方向:动中通卫星通信,阵列信号处理;联系人,E-mail:zfg417@163.com
(收稿日期:2012-09-07)

服系统隔离姿态变化对天线波束的影响,确保波束指向相对卫星静止。整个测控系统可分解为感知、决策、执行三个机构(图 1),系统通过传感器敏感外部扰动,利用相应的算法在控制器内做出决策,再通过伺服机构进行补偿,从而隔离干扰。

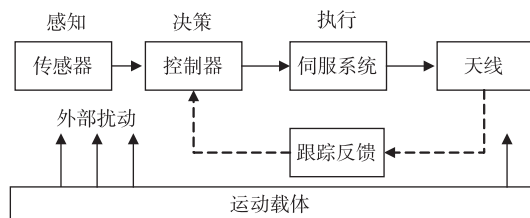


图 1 动中通测控系统示意图

对于采用闭环跟踪的动中通系统,跟踪过程(图 1 中虚线所示部分)可以看作是对执行结果的反馈感知。决策机构通常由高效的控制算法和高性能控制器来实现,误差可忽略不计,因此系统误差主要来源于感知和执行单元。

稳定跟踪平台的指向偏差是多种误差相互作用的结果,这些误差大致可分为静态误差和动态误差^[10,11]。在具体到某一动中通系统时,静态误差是固定的,可以利用仪器进行测量,并通过软件进行补偿,特别是采用闭环跟踪的动中通,这些静态误差在闭环反馈过程中很容易得到抑制。动态误差主要指系统工作过程中产生的测量、控制误差。根据前文分析,在动中通系统中,动态误差主要是载体姿态的测量误差和闭环跟踪控制误差。

(1)姿态测量误差:非惯性传感器的测量误差仅与测量精度有关,它对波束指向的影响有限,可通过一般的误差模型尽可能地消除;惯性传感器(如陀螺、加速度计等)测量的载体姿态中存在着大量的随机漂移,经过文献[10]的方法处理不可能完全消除,而且随机性很强,对波束指向影响较大,因此其处理后的残余误差就成为测控系统的主要感知误差。

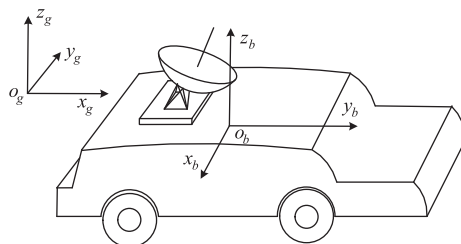
(2)闭环跟踪误差:闭环跟踪误差是伺服系统中多种因素综合作用的最终结果,对跟踪误差的研究可以避免分析系统内部误差的作用机理,直接获取执行机构对波束指向的最终影响,简化执行机构的误差模型。

系统工作过程中,一个跟踪周期可以包含几十个测量周期,跟踪对测量误差的修正总是存在滞后,无法彻底消除,本文将主要在上述误差下研究波束

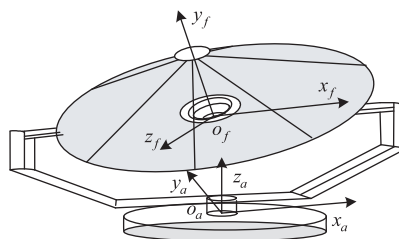
指向偏差的概率分布。

2 指向偏差概率分布模型

为便于后续研究,首先定义几个常用坐标系。定义地理坐标系 g ,也就是常用的东北天坐标系,如图 2(a)所示。载体坐标系 b 的原点 o_b 为车体旋转中心, $o_b x_b$ 与车体的横轴重合,指向车体前进方向的右侧, $o_b y_b$ 与车体的纵轴重合,指向车体前进方向, $o_b z_b$ 与 g 系的 $o_g z_g$ 平行。



(a) 地理坐标系 g 与车体载体坐标系 b



(b) 方位轴系 a 与俯仰轴系 f

图 2 动中通系统坐标定义

如图 2(b)所示的方位轴系 a 与天线方位转盘固联, $o_a z_a$ 为天线的方位转轴,与 g 系的 $o_g z_g$ 平行, $o_a x_a$ 与天线的俯仰转动轴平行。俯仰轴系 f 与天线固联, $o_f x_f$ 为天线的俯仰转动轴,与 a 系的 $o_a x_a$ 平行, $o_f y_f$ 为天线波束指向。

2.1 姿态测量误差下的指向偏差概率模型

地理坐标系 g 按照航向 H 、纵摇 P 、横滚 R 的顺序旋转,可以转换到载体坐标系 b , 伺服系统则通过方位、俯仰电机的转动(即方位角 α 、俯仰角 β)来隔离载体姿态变化对波束指向的影响。由于载体小范围内的平动对波束指向影响很小,可以认为同步轨道卫星在地理坐标系内是静止的,动中通测控系统则需要在对准卫星的前提下,将天线波束指向稳定在地理坐标系 g 内。

f 系相对于 g 系的齐次变换矩阵为

$$T_f^g(e) = T_b^g \cdot T_a^b \cdot T_f^a \quad (1)$$

其中, T_m^n 表示 m 系相对于 n 系的齐次变换矩阵, $T_b^g = Rot(z, -H) \cdot Rot(x, R) \cdot Rot(y, P)$, $T_a^b = Rot(z, \alpha)$, $T_f^g = Rot(x, \beta)$ ($Rot(\cdot)$ 表示齐次坐标旋转运算, 相关运算规则可参考文献[10]), e 表示各项误差。采用单位矢量 r 表示波束指向, 它在俯仰轴系 f 中用齐次坐标系可表示为 $r_f = [0 \ 1 \ 0 \ 0]^T$ 。波束指向偏差在地理坐标系 g 内进行计算, 采用单位矢量 r_g 表示在无误差情况下的波束理想指向, 采用单位矢量 r'_g 表示存在误差时的波束实际指向, 在 g 系中波束指向偏差矢量为

$$\begin{aligned} \Delta r_g &= r'_g - r_g \\ &= T_f^g(e) \cdot r_f - T_f^g(0) \cdot r_f = [T_f^g(e) - T_f^g(0)] \cdot r_f \\ &= [T_b^g(e) \cdot T_a^b \cdot T_f^a - T_b^g(0) \cdot T_a^b \cdot T_f^a] \cdot r_f \quad (2) \end{aligned}$$

假设 t_{kT} 时刻 (第 k 个采样时刻, T 为采样间隔) 的波束准确指向卫星, 载体姿态为 H_k 、 P_k 、 R_k ; 在 $t_{(k+1)T}$ 时刻, 由于载体姿态变化, 测控系统对天线波束指向进行补偿, 设方位、俯仰补偿量分别为 α 、 β , 补偿后因姿态测量误差会导致 $t_{(k+1)T}$ 时刻的波束指向与 t_{kT} 时刻的波束指向在地理坐标系内有偏差。设姿态测量误差分别为 ΔH 、 ΔP 、 ΔR , 则

$$T_b^g(e) = Rot(z, -\Delta H) \cdot Rot(x, \Delta R) \cdot Rot(y, \Delta P) \quad (3)$$

由于 ΔH 、 ΔP 、 ΔR 都很小, 忽略这些小角间的高阶小量, 则 b 系相对于 g 系的齐次变换矩阵为

$$T_b^g(e) = \begin{bmatrix} 1 & \Delta H & \Delta P & 0 \\ -\Delta H & 1 & -\Delta R & 0 \\ -\Delta P & \Delta R & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

将式(3)、(4)代入式(2)可得

$$\Delta r_g = \begin{bmatrix} \Delta H \cos \alpha \cos \beta + \Delta P \sin \beta \\ \Delta H \sin \alpha \cos \beta - \Delta R \sin \beta \\ (\Delta P \sin \alpha + \Delta R \cos \alpha) \cos \beta \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

因姿态测量误差导致的波束方位偏差和俯仰指向偏差分别为 $\Delta \theta_{zc}$ 和 $\Delta \theta_{xc}$:

$$\begin{cases} \Delta \theta_{zc} = \Delta P \sin \alpha \cos \beta + \Delta R \cos \alpha \cos \beta \\ \Delta \theta_{xc} = \Delta H \cos \alpha \cos \beta + \Delta P \sin \beta \end{cases} \quad (6)$$

两者的相关系数为

$$\rho = \frac{K_1 \text{cov}(\Delta H, \Delta P) + K_2 \text{cov}(\Delta H, \Delta R) + K_3 \text{cov}(\Delta P, \Delta R) + K_3 \sigma_{\Delta P}^2}{\sigma_{\Delta \theta_{xc}} \sigma_{\Delta \theta_{zc}}} \quad (7)$$

其中, $K_1 = \sin \alpha \cos \alpha \cos^2 \beta$, $K_2 = \cos^2 \alpha \cos^2 \beta$, $K_3 = \cos \alpha \sin \beta \cos \beta$, $K_4 = \sin \alpha \sin \beta \cos \beta$, $\text{cov}(\cdot)$ 表示两者

的相关系数。

若假设载体三轴姿态误差在统计意义上相互独立且服从正态分布^[8], 则 $\text{cov}(\Delta H, \Delta P)$ 、 $\text{cov}(\Delta H, \Delta R)$ 、 $\text{cov}(\Delta P, \Delta R)$ 均为零; 当载体行驶在平稳环境下, 或者说载体只有转弯和上下坡的运动, 而绕纵摇轴的运动很轻微时, 有 $\sigma_{\Delta P}^2 \approx 0$, 此时由式(6)、(7)可知 $\Delta \theta_{xc}$ 和 $\Delta \theta_{zc}$ 也相互独立且服从正态分布, 即 $\Delta \theta_{xc} \sim N(m_{\Delta \theta_{xc}}, \sigma_{\Delta \theta_{xc}}^2)$, $\Delta \theta_{zc} \sim N(m_{\Delta \theta_{zc}}, \sigma_{\Delta \theta_{zc}}^2)$ 。当 $\sigma_{\Delta \theta_{xc}} = \sigma_{\Delta \theta_{zc}} = \sigma$ 成立时, 可证明指向偏差 $\Delta \theta = \sqrt{\Delta \theta_{xc}^2 + \Delta \theta_{zc}^2}$ 服从瑞利分布^[8]。

2.2 跟踪控制误差下的指向偏差概率模型

步进跟踪实现容易, 控制算法简单, 因此许多小型的动中通卫星通信普遍采用这种跟踪方式^[12]。在步进跟踪过程中, 通常利用波束方位、俯仰上的抖动, 来调整波束向接收信号强度最大的方向移动。

当波束指向接近卫星时 (进入距离卫星半跟踪步长的范围, 如图3阴影区域), 根据步进跟踪搜索步与调整步的关系, 波束将会按照 $1 \rightarrow 2 \rightarrow 1 \rightarrow 3 \rightarrow 1 \rightarrow 4 \rightarrow 1 \rightarrow 5 \rightarrow 1$ 的顺序在卫星附近循环调整, 但却始终无法准确指向卫星。在图3中, 卫星位于原点 O , 波束指向只能到达位置1, 该指向偏差与步进跟踪步长和初始进入平衡状态的位置有关。设方位和俯仰跟踪步长分别为 s_a 、 s_e , 由于波束进入平衡状态的初始位置是随机的, 由此导致的波束指向偏差也是随机的, 因此方位、俯仰方向的跟踪指向偏差可分别假定为 $(-0.5s_a, 0.5s_a)$ 和 $(-0.5s_e, 0.5s_e)$ 上的均匀分布, 即 $\Delta \theta_{zt} \sim U(-0.5s_a, 0.5s_a)$ 、 $\Delta \theta_{xt} \sim U(-0.5s_e, 0.5s_e)$ 。

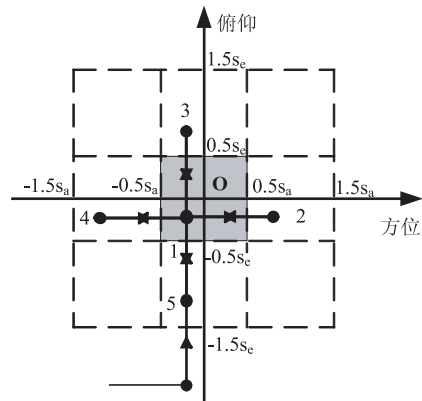


图3 步进跟踪平衡位置

2.3 波束指向偏差概率模型

综合姿态测量误差和跟踪控制误差,可得波束总的指向偏差

$$\begin{aligned}\Delta\theta &= (\Delta\theta_x^2 + \Delta\theta_z^2)^{\frac{1}{2}} \\ &= ((\Delta\theta_{xc} + \Delta\theta_{xt})^2 + (\Delta\theta_{zc} + \Delta\theta_{zt})^2)^{\frac{1}{2}} \\ &= ((\Delta\theta_{xc}^2 + \Delta\theta_{zc}^2) + (\Delta\theta_{xt}^2 + \Delta\theta_{zt}^2) \\ &\quad + 2(\Delta\theta_{xc}\Delta\theta_{xt} + \Delta\theta_{zc}\Delta\theta_{zt}))^{\frac{1}{2}} \quad (8)\end{aligned}$$

在系统工作过程中,跟踪误差的随机性主要体现在进入跟踪过程的初始位置是随机,而在某一跟踪过程中,则可以近似为常数。当系统进入跟踪状态后,波束只在卫星附近固定的几个位置调整,此时方位、俯仰跟踪误差 $\Delta\theta_{xt}$ 、 $\Delta\theta_{zt}$ 可认为是常数。当 $\Delta\theta_{xc}$ 和 $\Delta\theta_{zc}$ 相互独立且服从正态分布时,根据实验仿真结果,可认为波束指向偏差 $\Delta\theta$ 近似服从莱斯分布;当跟踪误差很小时, $\Delta\theta_{xt}$ 、 $\Delta\theta_{zt}$ 趋于零,波束指向偏差将由上述的莱斯分布退化为瑞利分布。

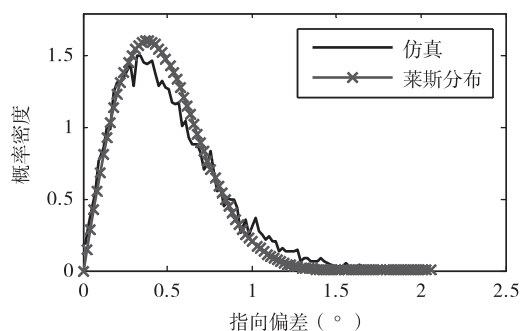
3 仿真及行车试验

本节分别通过计算机仿真和两种环境下的行车实验对上述模型进行验证。

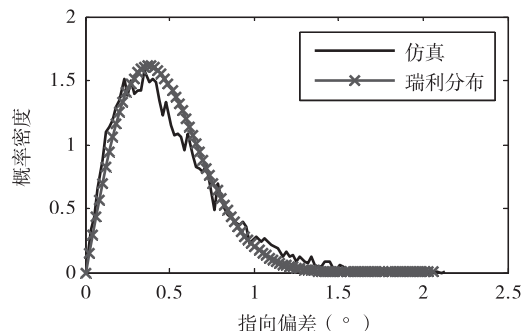
实验 1 计算机仿真实验

仿真条件:根据实验中的动中通系统技术参数,仿真参数设置如下:航向控制误差 $\Delta\theta_{xc} \sim N(0, 0.5^2)$, 纵摇控制误差 $\Delta\theta_{yc} \sim N(0, 0.2^2)$, 横摇控制误差 $\Delta\theta_{xc} \sim N(0, 0.1^2)$, 方位跟踪误差 $\Delta\theta_{xt} \sim U(-0.2, 0.2)$, 俯仰跟踪误差 $\Delta\theta_{zt} \sim U(-0.1, 0.1)$ 。

采用最小二乘法拟合莱斯分布参数,可得波束的综合指向偏差近似服从 $\mu = 0.21, \sigma = 0.347$ 的莱斯分布,如图 4(a)所示;当 $\Delta\theta_{xt}$ 和 $\Delta\theta_{zt}$ 等于零时,波束综合指向偏差近似服从瑞利分布 ($\sigma = 0.376$),如图 4(b)所示。



(a) 莱斯分布



(b) 瑞利分布

图 4 波束综合指向偏差概率分布

实验 2 行车实验

实验参数:采用 Ku 波段的动中通(如图 5 所示),目标卫星亚洲 3S(经度 105.5°E),下行频率

12355MHz,载体位于西安地区(34.27°N, 108.95°E),天线接收增益 32dB,半功率波束宽度小于 3.5°。



图 5 动中通及实验环境(乡间小路与一级公路)

行车过程中,目标卫星不可避免地会受到路边建筑物、树木、电线杆等障碍物的遮挡,甚至中断正常的接收过程,由此得到的接收信号很弱(相当于目标卫星偏离天线主波束范围,如图6、图7中接收信噪比小于4dB的情况)。为减小遮挡的影响,突

出波束指向偏差导致的接收信号功率下降,在数据的统计处理中剔除了信噪比小于4dB的数据(对应波束指向偏差大于 2°)。图5和图6分别给出了乡间小路和一级公路两种环境下的实验结果。

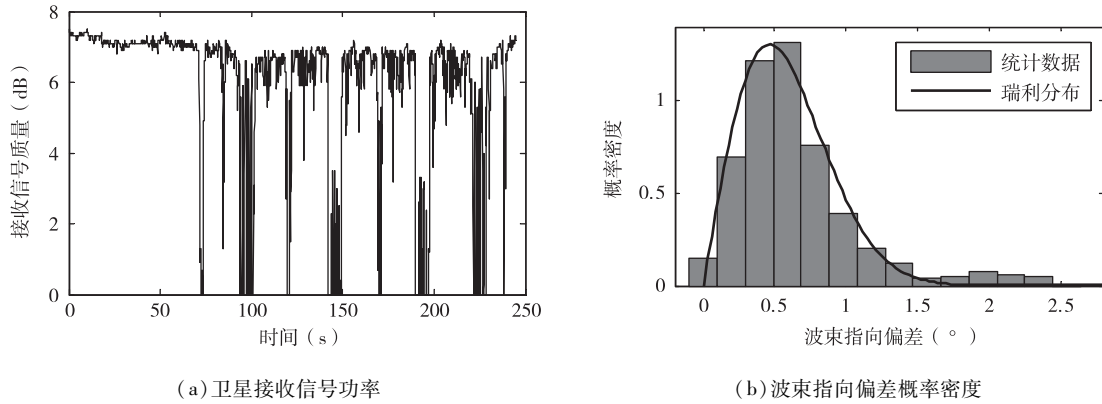


图6 乡间小路环境($\sigma = 0.45$)

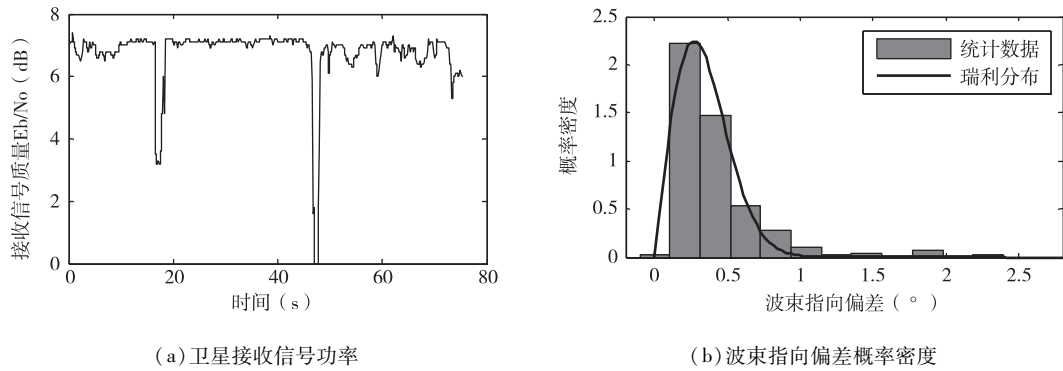


图7 一级公路环境($\sigma = 0.27$)

乡间小路路面不平整,波束指向更发散,其指向偏差概率分布的方差较一级公路环境下的更大,这与实验中的测量结果相符。由本文瑞利分布模型得到的指向偏差概率密度(图4)与行车实验的两种环境下测得的指向偏差分布直方图(图6和图7)相比,无论从变化趋势还是坐标刻度吻合都比较好,验证了2.1节中的独立正态分布假设。

在平整路面环境下,车辆运行平稳,测量误差中包含的姿态变化(行驶路面引起的)成分少,其分布接近于正态分布^[12];由于跟踪误差通常远小于姿态测量误差(跟踪的目的是为了进一步减小测量误差),式(8)中的 $\Delta\theta_{xt}$ 、 $\Delta\theta_{zt}$ 趋于零,这样实际测量下的波束指向偏差表现为瑞利分布,行车实验结果验证了2.3节中的结论。

4 结论

本文从动中通天线指向的运动机制和跟踪控制等方面,建立了波束指向偏差的概率分布模型。在各种误差服从假定的概率分布条件下,计算机仿真结果表明动中通波束指向偏差服从瑞利分布,两种行车环境下的实验结果也验证了动中通在平稳环境下波束指向偏差服从瑞利分布。论文研究的波束指向偏差概率模型适用于采用定向天线的动中通卫星通信系统。在当前已应用的动中通中,Ku波段卫星间隔小(最小间隔 2°),要求天线波束窄,动中通指向偏差不仅影响天线的有效增益和发射功率损耗,而且决定着邻星干扰的强弱;另外,接收信号中的高误码率是波束指向偏差导致的最直接后果,而对误

码率的分析是评估通信系统性能的重要内容,课题组将在本文的基础上对上述内容进行深入的研究。

参考文献

- [1] 林志强,秦丽平,姚敏立等. 多子阵平板天线波束指向频率响应分析与固定长度延迟线应用. 电子与信息学报,2011,33(4):987-991
- [2] Woodhead P. Field trials of mounted battle command Ka-band satcom ‘on-the-move’. *MilsatMagazine*,2011:38-50
- [3] Arapoglou P D, Liolis K, Bertinelli M, et al. . MIMO over satellite: a review. *Communications Surveys & Tutorials*, 2011,13(1):27-51
- [4] Scalise S, Ernst H, Harles G. Measurement and modeling of the land mobile satellite channel at Ku-band. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*,2008,57(2):693-703
- [5] Kasch W T, Burbank J L, Adnrusenko J. The effects of antenna pointing error on bit error rate performance in mobile directional antenna applications. In: Proceedings of Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, Ottawa, Canada,2006. 1652-1657
- [6] McInain C, Gonzalez L, Swenarton C. Pointing error requirements for small mobile terminals, In: Proceedings of Military Communications Conference, Boston, USA 2009. 1-7
- [7] Smida B, Efthymoglou G P, Ghassemzadeh S S, et al. On effects of antenna pointing accuracy for on-the-move satellite networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2011,60(4):1677-1686
- [8] C Loo. A statistical model for a land mobile satellite link. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 1985, 34(3):122-127
- [9] Lutz E, Cygan D, Dippold M, et al. The land mobile satellite communication channel-recording, statistics, and channel model. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 1991,40(2):375-386
- [10] 李岩. 光电稳定跟踪装置误差建模与评价问题研究: [博士学位论文]. 长沙:国防科技大学,2009. 19-22
- [11] Choukroun D, Weiss H, Bar-Itzhack I Y, et al. Direction cosine matrix estimation from vector observations using a matrix Kalman filter. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*,2010,46(1):61-79
- [12] Hao L Y, Yao M L. SPSA-based step tracking algorithm for mobile DBS reception. *Simulation Modelling Practice and Theory*,2011,19(2):837-846

Probabilistic distribution of the SOTM beam pointing deviation

Zhang Fenggan, Jia Weimin, Yao Minli, Jin Wei

(The Second Artillery Engineering College, Xi'an 710025)

Abstract

The beam pointing deviation in the Satcom On-The-Move(SOTM) was studied for the evaluations of the communication performance and the interferences from the adjacent satellites. Based on the coordinate transforms, a probabilistic distribution model of SOTM's beam pointing deviation was established according to the analyses of the errors of the carrier's gesture measurement and the antenna tracking. The model is based on the comprehensive actions of many factors that influence the beam pointing, but not related to the system inner mechanism. As a result, it is efficient and simple. The study shows that the beam pointing deviation in SOTM follows a Rayleigh distribution in the assumed condition that is corresponding to the stable movement environment. And the driving tests also validate the proposed statistical model, which would be also available to the future research.

Key words: mobile satellite communication, pointing deviation, tracking error, stabilization platform, probability distribution