

文章编号 : 1002-0853(2004)03-0088-04

TDRSS 中用户星的星-星天线跟踪规律深入研究

翟 坤, 杨 涂, 孙小松

(哈尔滨工业大学 航天工程与力学系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 应用坐标转换, 得到用户星的星-星天线基本跟踪规律。针对几种情况, 并考虑地球的隔断影响和天线的自身限制, 对星-星天线的方位角和俯仰角表达式进行了修正和补充。最后, 针对某用户星, 应用 Matlab 进行数学仿真。结果表明, 根据得出的跟踪规律, 可以使用户星的星-星天线最大范围地跟踪中继卫星。

关键词: TDRSS; 用户星; 星-星天线; 方位角; 俯仰角; 隔断

中图分类号: V474.22 文献标识码: A

引言

关于 TDRSS 中用户星的星-星天线跟踪规律, 很多人都做了相当的工作^[1]。一般的方法是通过坐标转换或者几何图形分析得到用户星的星-星天线方位角和俯仰角的表达式。本文在得到星-星天线的基本跟踪规律后, 考虑了在实际应用中会遇到地球的隔断影响和天线的自身限制, 对跟踪规律进行了相应的修正和补充, 得到了实用的跟踪规律。

1 跟踪规律的推导

用户星的星-星天线跟踪规律推导, 主要是推导出星-星天线绕方位轴和俯仰轴的转角, 即方位角和俯仰角的表达式。

中继卫星运行在地球同步轨道上, 其轨道半径为 $R=42\,164\text{ km}$, 中继卫星与惯性坐标系 x 轴夹角为 Ω_M 。用户星运行在椭圆轨道上, 轨道六要素为: a , e , Ω , ω , i , f 。其中, a 为轨道半长轴; e 为偏心率; Ω 为升交点赤经; ω 为近地点角距; i 为轨道倾角; f 为用户星的真近点角。则有:

$$r = \frac{a(1 - e^2)}{1 + e \cos f}$$

式中, r 为用户星到地心的距离。

则通过坐标转换可得^[1]:

$$\begin{aligned} d &= \begin{bmatrix} -R \sin \beta \cos v \cos i - R \sin v \cos \beta \\ -R \sin i \sin \beta \\ r - R \cos v \cos \beta + R \sin v \cos i \sin \beta \end{bmatrix} \\ &= [d_x \ d_y \ d_z]^T \\ d &= \sqrt{d_x^2 + d_y^2 + d_z^2} \end{aligned}$$

式中, $v=f+\omega$, $\beta=\Omega-\Omega_M$; d 为中继卫星相对用户星的相对位置矢量在用户星轨道坐标系中的表示。

如果用 φ_1 表示用户星的星-星天线绕俯仰轴 x 的转角, 用 φ_2 表示星-星天线绕方位轴 z 的转角。则有:

$$\begin{aligned} d_y > 0, \quad \varphi_1 &= \arctan\left(\frac{d_z}{d_y}\right), \quad \varphi_2 = -\arcsin\left(\frac{d_x}{d}\right) \\ d_y = 0, \quad \varphi_1 &= \operatorname{sign}(d_z)\frac{\pi}{2}, \quad \varphi_2 = -\arcsin\left(\frac{d_x}{d}\right) \\ d_y < 0, \quad \varphi_1 &= \arctan\left(\frac{d_z}{d_y}\right), \\ \varphi_2 &= -\operatorname{sign}(d_x)\pi + \arcsin\left(\frac{d_x}{d}\right) \end{aligned}$$

2 考虑地球的隔断影响

在上面的跟踪规律推导过程中, 是把地球当作一个质点来考虑的。如果考虑到地球的实际大小, 就会出现当用户星对中继卫星进行跟踪时, 被地球隔

断的情况。这时中继卫星和用户星不能进行相互通信,跟踪规律也就不存在了。

TDRSS 包括三颗中继卫星,其中两颗参与跟踪用户星和传送数据,第三颗是备份星。如果假定 TDRSS 的两颗工作中继卫星中的东星分布在地球同步轨道的东经 51°处,西星分布在地球同步轨道的西经 179°的位置上,如图 1 所示。

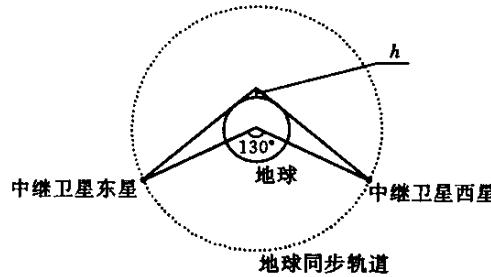


图 1 TDRSS 示意图

地球半径 $R_e = 6\ 378\text{ km}$, 中继卫星的轨道半径 $R = 42\ 164\text{ km}$, 则可以求出:

$$h = \frac{R_e}{\cos[\pi - 65\pi/180 - a \cos(R_e/R)]} - R_e \\ = 1\ 288.3\text{ km}$$

由此可以得出如下结论:如果用户星的轨道高度大于 1 288.3 km,则在任何位置、任何时刻用户星都可以与中继卫星系统进行通信,不会因为地球的影响而隔断其通信,即中继卫星系统对轨道高度大于 1 288.3 km 的用户星有 100% 的覆盖率。但是当用户星的轨道高度小于 1 288.3 km 时,就要考虑地球的隔断影响。

为了得出判断中继卫星和用户星被地球隔断的准则,取最简单的情况(即当用户星运行在赤道面内圆轨道上)来研究隔断条件。令 $d_1 = \sqrt{R^2 - R_e^2}$ 。

下面分三种情况讨论被地球隔断的条件:

(1) 情况 1 如图 2 所示,其中 OA 是地心到 d 的垂线。可以看出 $OA < R_e$, $d < d_1$, 在这种情况下,用户星可以跟踪中继卫星。

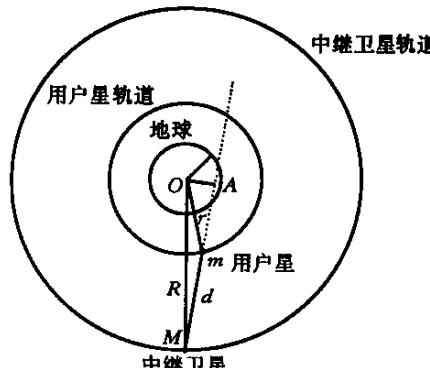


图 2 情况 1 示意图

(2) 情况 2 如图 3 所示。由图 3 可以看出, $OA \geq R_e$, $d \geq d_1$ 。此时用户星也可以跟踪中继卫星。

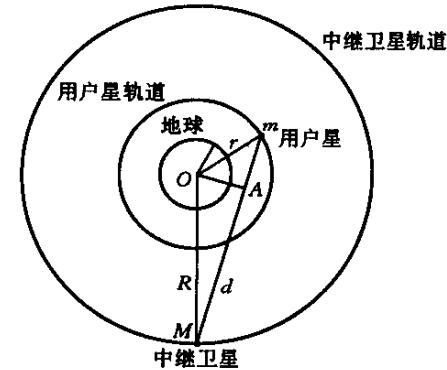


图 3 情况 2 示意图

(3) 情况 3 如图 4 所示。由图 4 可以看出,此时 $OA < R_e$, $d > d_1$ 。在这种情况下,用户星与中继卫星的联系被地球隔断,这时用户星不能跟踪中继卫星。

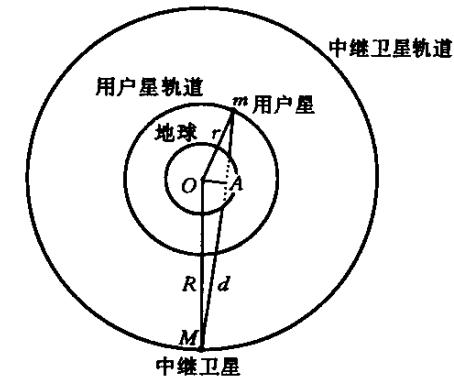


图 4 情况 3 示意图

总结以上三种情况,可以看出,只有当 $OA < R_e$, $d > d_1$ 时,用户星与中继卫星的联系才被地球隔断。

3 考虑天线的自身限制

由于天线指向驱动机构的限制,天线并不能绕两个转轴(方位轴和俯仰轴)转动任意的角度。本文中假设用户星的星-星天线绕俯仰轴的转角范围为 $[-92^\circ, 92^\circ]$, 绕方位轴的转角范围为 $[-200^\circ, 200^\circ]$ 。在对跟踪规律进行仿真时,要考虑到天线自身的转角限制。

4 考虑 TDRSS 的任务交替

在 TDRSS 的实际工作中,两颗中继卫星,即东星和西星之间存在着任务交替。假设开始时用户星跟踪 TDRSS 的东星,当用户星不能跟踪东星时,考虑此时用户星能不能跟踪西星,如果能,则跟踪西星。当用户星不能跟踪西星时,再考虑是否能跟踪东

星,这样达到用户星对 TDRSS 的最大范围的跟踪。

5 仿真结果及分析

假设某用户星星体姿态无偏差, 用户星轨道的长半轴 $a = 6978 \text{ km}$, 轨道倾角 $i = 97.5^\circ$, 其他几个参数 $e = 0.01$, $\Omega = 20^\circ$, $\omega = 10^\circ$, 用户星的初始真近点角为 10° , TDRSS 的东星 Ω_M 初始值为 108.3° , 西星 Ω_M 初始值为 238.3° , 仿真时间取 20000 s 。考虑地球的隔断影响和天线自身的转动限制, 对某用户星的跟踪进行了数值仿真, 其结果如图 5~图 7 所示。

在图 5~图 7 中, 细线表示用户星跟踪东星, 粗线表示用户星跟踪西星。由图可知, 用户星对东星的跟踪时间段为: $0 \text{ s} \sim 5085 \text{ s}$, $18325 \text{ s} \sim 20000 \text{ s}$; 对西星的跟踪时间段为: $6175 \text{ s} \sim 18170 \text{ s}$ 。而在 $5086 \text{ s} \sim 6174 \text{ s}$ 和 $18171 \text{ s} \sim 18324 \text{ s}$ 这两个时间段内用户星是不能跟踪中继卫星的, 这主要是由于地球的隔断影响和天线自身的限制造成的。这样可以在能够跟踪的时间段中选取一段合适的时间作为用户星向中继卫星发送数据的时间段。

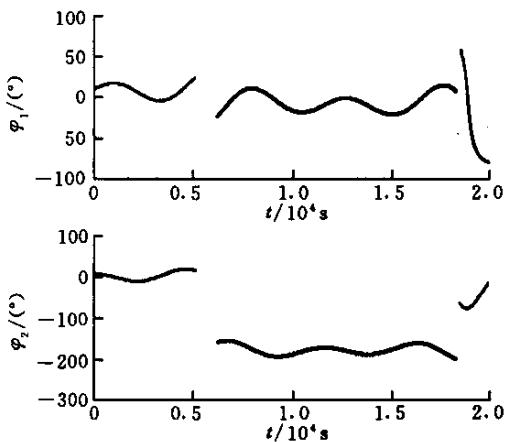


图 5 跟踪角度变化时间历程曲线

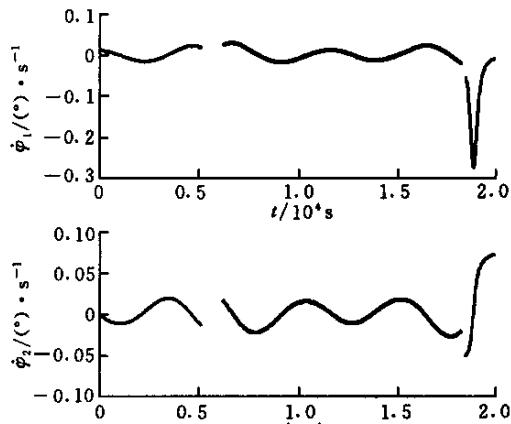


图 6 跟踪角速度变化时间历程曲线

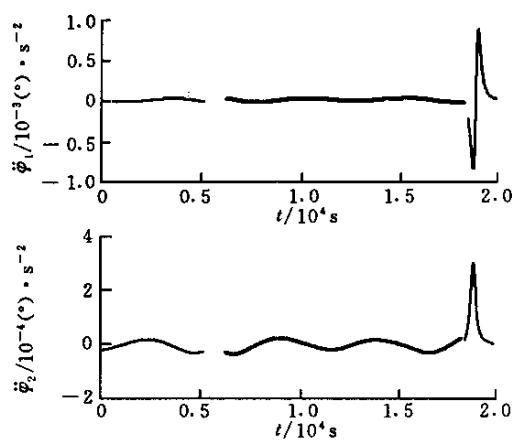


图 7 跟踪角加速度变化时间历程曲线

根据图 6 和图 7, 可以看出在跟踪过程中天线转动速度和加速度的大致范围, 从而可分析出天线的转动对星体的影响是否可以忽略。如果可以, 则在对用户星的星体整体建模时, 可以简化模型; 如果不可以, 则应考虑采用控制方法抑制或抵消天线对星体转动的影响。

用户星跟踪中继卫星的跟踪极值为:

$$\varphi_1 = 80.32^\circ, \dot{\varphi}_1 = 0.26(\text{°}/\text{s}), \ddot{\varphi}_1 = 0.0008(\text{°}/\text{s}^2)$$

$$\varphi_2 = 200^\circ, \dot{\varphi}_2 = 0.073(\text{°}/\text{s}), \ddot{\varphi}_2 = 0.0003(\text{°}/\text{s}^2)$$

下面通过多次仿真, 找出用户星天线跟踪的一般性规律, 仿真时间取为 6000 s 。跟踪规律与轨道高度和倾角间的关系分别如表 1 和表 2 所示。

表 1 跟踪规律与轨道高度间的关系

h /km	$\varphi_{1\max}$ /(°)	$\dot{\varphi}_{1\max}$ /(°·s ⁻¹)	$\varphi_{2\max}$ /(°)	$\dot{\varphi}_{2\max}$ /(°·s ⁻¹)
400	31.307 9	0.023 30	18.131 9	0.026 54
800	30.321 2	0.023 00	19.473 7	0.023 61
1200	28.802 3	0.022 70	20.858 1	0.018 14
1600	22.218 4	0.022 44	22.281 4	0.017 87

由表 1 可以发现, 随着轨道高度的增加, 用户星天线跟踪的俯仰角逐渐减小, 方位角逐渐增大, 而俯仰角和方位角的角速度逐渐减小。

表 2 跟踪规律与轨道倾角间的关系

i /(°)	$\varphi_{1\max}$ /(°)	$\dot{\varphi}_{1\max}$ /(°·s ⁻¹)	$\varphi_{2\max}$ /(°)	$\dot{\varphi}_{2\max}$ /(°·s ⁻¹)
10	81.872 3	0.309 30	80.017 9	0.065 49
30	65.659 4	0.094 89	60.189 3	0.055 43
50	49.789 1	0.044 67	40.834 6	0.038 10
70	36.024 8	0.021 04	23.181 3	0.024 08

由表 2 可以发现, 随着轨道倾角的增加, 用户星天线跟踪的俯仰角和方位角逐渐减小, 俯仰角和方位角的角速度也逐渐减小。

6 结束语

通过对用户星的星-星天线跟踪规律的深入研究,得到了跟踪规律的实用形式。根据该跟踪规律,可得出用户星跟踪中继卫星的大致情况,然后在每一圈中选择一段合适的时间(对于大多数用户星来

说,在每一圈中只需要 15~30 min 与中继卫星通信的时间)作为用户星和中继卫星通信的时间段。

参考文献:

- [1] 聂润兔,荆武兴,徐世杰,等. 中继卫星对目标的跟踪规律研究[J]. 哈尔滨工业大学学报,1999,31(5):5-7.

The In-Depth Research on the Tracking Laws of the User Satellite's Satellite-Satellite Antenna in TDRSS

ZHAI Kun, YANG Di, SUN Xiao-song

(Department of Astronautics and Mechanics, Harbin Institute of Technology,
Harbin 150001, China)

Abstract: First, the basic tracking laws of the user satellite's satellite-satellite antenna are deduced and according to several different conditions, the expressions for the azimuth angle and elevation angle of the satellite-satellite antenna are revised. Then, considering the separate influence of the Earth, the azimuth angle and elevation angle's expressions are complemented. Finally, the simulating figures are displayed aiming at some user satellite. The results indicate that the user satellite's satellite-satellite antenna can track the TDRSS in the largest range based on the tracking laws.

Key words: TDRSS(tracking and data relay satellite system); user satellite; satellite-satellite antenna; azimuth angle; elevation angle; separate

(编辑:姚妙慧)

(上接第 87 页)

UAV Direct Side Force Control Law Design with Robust Eigenstructure Assignment

PAN Chang-chun, CHEN Xin

(College of Automatic Engineering, Nanjing University of Aeronautics
and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: A systematic optimization approach to robust eigenstructure assignment applied to UAV direct side force control (DSFC) with output feedback is presented. By this method, the dutch roll mode and roll subsidence mode was decoupled, and the (DSF) control law was designed. In the end of the paper, an example is given. The simulation results indicate that the approach is excellent.

Key words: flight control; direct side force control; eigenstructure assignment; output decoupling; robust control

(编辑:姚妙慧)

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com)，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>