

运载火箭天基测控天线覆盖性能分析

刘 靖¹, 宋岳鹏²

(1 西北工业大学 西安 710072)

2 北京系统工程研究所 北京 100076)

摘 要:相控阵天线是运载火箭天基测控系统的重要组成部分,天线波束指向的正确性决定了天基测控系统工作的有效性。文中对造成天线波束指向偏差的影响因素进行简述,并以某型号飞行弹道为例,重点分析运载火箭姿态角误差对天线波束覆盖性能的影响。分析方法可作为运载火箭天基测控系统设计和工程研制的参考。

关键词:运载火箭; 天基测控; 相控阵天线

中图分类号:V566.8

文献标识码:A

文章编号:CN-1780(2012)05-0051-05

引 言

航天测控体制的发展历经了分离测控阶段、统一载波测控阶段和天基测控阶段三个阶段。天基测控是基于跟踪与中继卫星系统(TDRSS)的航天器测控技术,具有全球覆盖、信号实时传送、更经济可靠的优点,是测控系统发展的必然趋势。美国、俄罗斯、欧洲诸国和日本等国的空间应用组织自上世纪七十年代已经开始了对天基测控技术的研究,并相继建立起天基测控网,使天基测控技术得到成功应用^[1,2]。如美国从1995年开始应用中继卫星系统支持运载火箭的飞行测控任务,成功实现了火箭的全程测控,并迅速推广^[3]。目前,美国主要采用S频段实现运载火箭的遥测数据传输,上行飞行控制指令传输仍然依靠地面系统在UHF频段实现,但改进后通过S或Ka频段传输遥控信息已成为今后的发展目标^[4]。

我国的中继卫星系统将在近几年建成使用,目前天链一号(01、02星)中继卫星系统分别于2008年4月和2011年7月成功发射并获得应用,可以为运载火箭提供S频段测控服务功能,这使运载火箭采用天基测控作为测量方式有了坚实的基础。此外,我国目前也正在加快推进运载火箭天基测控系统的研制和应用进程。

为满足运载火箭返向遥测数据的传输容量需求,目前均采用相控阵天线来提高星箭链路的传输能力。相控阵天线依靠波束控制器控制天线阵元相位的变化实现波束扫描,波束指向的正确性和准确性主要取决于输入波束控制器的指向角度信息,同时也受到天线安装位置精度及波束控制器内数字移相器位数的影响。通过对各类影响因素的分析,能够更准确地把握相控阵天线在运载火箭飞行过程中的覆盖性能,确保星箭链路的正确建立,并验证天基测控系统设计的可行性及实际工作的有效性。

1 运载火箭中继测控原理

在运载火箭上加装天基测控系统箭载用户终端和相控阵天线,即可实现卫星中继测控,其系统构成示意图如图1所示。

运载火箭利用中继星进行数据传输的过程一般为:测量数据的基带信号,经过调制器对中频载波进行调制,然后经过上变频器变换为频率为 f_1 的射频信号,再经过相控阵天线发向中继卫星。这一信号经过大气层和宇宙空间,信号强度将受到很大衰减,并且会引入一定的噪声。信号到达中继卫星后,在中继卫星转发器中,载波频率为 f_1 的接收信号经低噪声放大器放大,并变频为载波频率为 f_2 的信号,再经功率放大后,由天线发向地面站。这一通信过程是双工的,遥控指令等信号可以通过地面站—中继卫星—

运载火箭的通路传输。

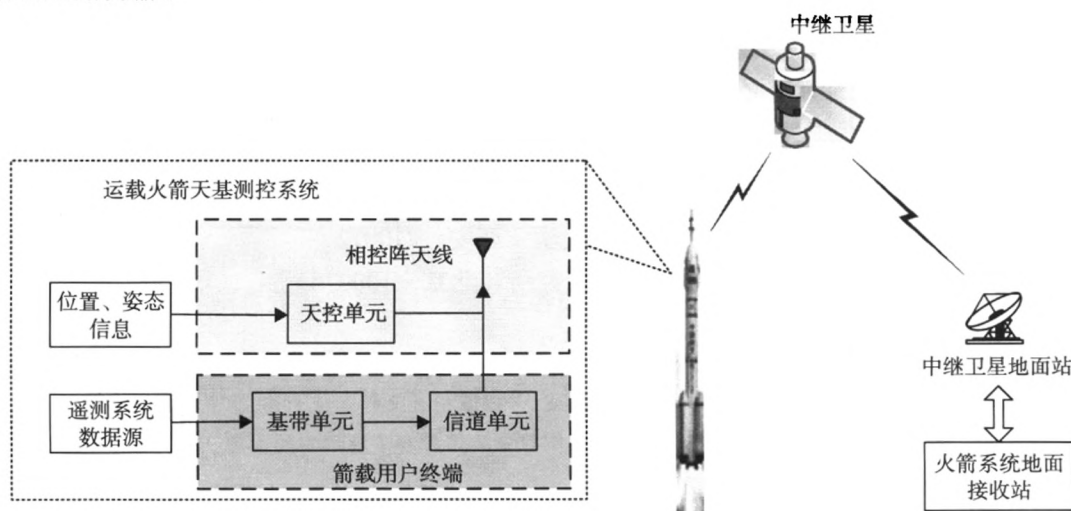


图 1 运载火箭天基测控示意图

2 天线波束指向偏差影响因素

相控阵天线波束正确指向中继卫星是运载火箭天基测控系统有效工作的前提,造成相控阵天线波束指向偏差的影响因素主要有天线安装精度、波束跃度及输入的火箭姿态角偏差等。

2.1 天线安装精度

相控阵天线采用共形结构安装于运载火箭舱体上,其安装精度对波束指向造成一定的影响,其影响效果与火箭姿态角偏差相似。天线安装完毕后,需要精确测量其安装角度(即箭体坐标系下的 α, β 角^[5])和天线法线方向与箭体法线方向的夹角(即共形的精度),用于相控阵天线系统波束控制器内初始角度的计算。在测量精度较高的情况下,通过相位补偿,该项误差对天线波束指向的影响可以忽略,必要时,可通过获得其均方根误差,计入波束指向总偏差内。

2.2 波束跃度

波束跃度即波束角度步进步长,指波束在两个相邻指向之间的增量。波束跃度决定于数字移相器的位数,相控阵天线波束跃度的计算公式为^[6]:

$$\Delta\theta = \frac{\lambda}{2^m d} \cdot \frac{1}{\cos\theta_p} \quad (1)$$

式中, λ 为工作波长, m 为移相器位数, d 为阵元间距, θ_p 为第 p 号波束的指向角(以天线法线方向为初始位置)。如在某运载火箭天基测控系统相控阵天线设计时,阵元间距取0.7倍波长,移相器位数为6,系统工作在S频段,根据式(1)计算,波束在天线法向位置处($\theta_p = 0^\circ$)的波束跃度为 1.28° , $\theta_p = 20^\circ$ 时波束跃度为 1.36° , $\theta_p = 45^\circ$ 时波束跃度为 1.67° , $\theta_p = 60^\circ$ 时波束跃度为 2.56° 。一般情况下,波束跃度引起的天线指向角偏差不会超过波束跃度自身,且随着天线指向角的增大而增大,因此在天线波束覆盖性能分析时需要将其考虑在内,留出足够裕量。

2.3 运载火箭姿态角偏差

火箭姿态角偏差是输入计算的角度采样值与火箭实际飞行姿态真值之间的偏差,它具有不确定性,也是造成天线波束指向偏差的主要原因。在系统设计及飞行实验之前,需要通过计算仿真分析其对天线波束覆盖性能的影响,确保在飞行过程中中继卫星始终处于箭载相控阵天线波束覆盖范围内,这也是星箭链路建立的首要前提。下面对姿态角偏差的影响进行重点分析。

设运载火箭在发射坐标系位置为 (X, Y, Z) ,中继星在发射坐标系位置为 (X_t, Y_t, Z_t) ,根据坐标系转换公式,可以得出中继星在弹体坐标系位置 (X_d, Y_d, Z_d) 为

$$(X_d, Y_d, Z_d) = M_1 \cdot M_2 \cdot M_3 \cdot (X_f - X, Y_f - Y, Z_f - Z) \quad (2)$$

式中, $M_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\gamma & \sin\gamma \\ 0 & -\sin\gamma & \cos\gamma \end{bmatrix}$, $M_2 = \begin{bmatrix} \cos\varphi & 0 & -\sin\varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\varphi & 0 & \cos\varphi \end{bmatrix}$, $M_3 = \begin{bmatrix} \cos\phi & \sin\phi & 0 \\ \sin\phi & \cos\phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ 为坐标转换矩阵,

ϕ, φ, γ 分别为运载火箭飞行姿态俯仰角、偏航角、滚动角。由此得到运载火箭天线指向角 α, β 角分别为

$$\alpha = \begin{cases} \alpha', & Y_d > 0, Z_d > 0 \\ 180^\circ - \alpha', & Y_d < 0, Z_d > 0 \\ 180^\circ + \alpha', & Y_d < 0, Z_d < 0 \\ 360^\circ - \alpha', & Y_d > 0, Z_d < 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$\beta = \arccos X_d / R_d, \quad (0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ) \quad (4)$$

式中, $\alpha' = \arctan |Z_d / Y_d|$, $R_d = \sqrt{X_d^2 + Y_d^2 + Z_d^2}$ 为星箭距离。

3 天线覆盖性能分析

目前,我国天链一号中继卫星01星和02星分别定轨于东经77°和176°的地球同步轨道。本文分别考虑两颗卫星的应用,并以长征系列某型运载火箭(海南发射场)飞行弹道数据为例进行天线覆盖性能的仿真分析。

3.1 天线指向角仿真分析

根据弹道数据中提供的位置、姿态角度等信息,按照式(3)、式(4)进行仿真计算,结果如图2所示。

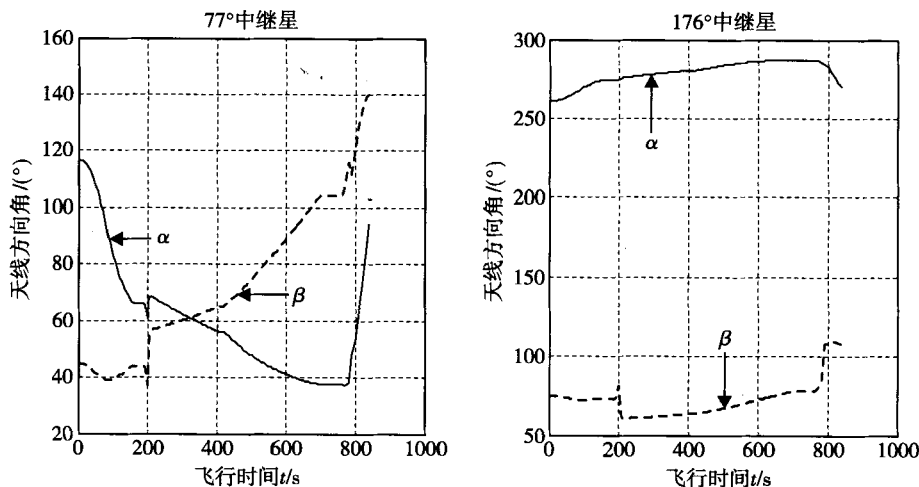


图2 飞行过程中天线指向角变化示意图

从图2中可以得到,选择77°中继星时, α 角变化范围为37.31°~116.35°,变化79.04°, β 角变化范围为37.11°~140.05°,变化102.94°;选择176°中继星时, α 角变化范围为260.98°~286.89°,变化25.91°, β 角变化范围为60.68°~109.42°,变化48.74°。依据此结果,首先考虑应用不同中继星时 α, β 角的变化量,结合相控阵天线的波束扫描能力,选择适应本次飞行任务的中继星,如选择东经176°中继星, α, β 角的变化量均较小,天线波束能够完全覆盖;然后根据 α 角中值,选择天线在箭体上的安装位置,具体安装角度需要根据实际情况(如设备分布、箭体结构要求等)进行确定。本例中考虑的是全程采用天基测控,对于有测控时段要求的情况可进行类似分析。

3.2 天线指向角偏差分析

根据经验统计数据,运载火箭在正常飞行过程中控制系统惯性器件所测到的姿态角与实际飞行姿态角最大偏差不超过2°(3 σ)。以此值为参考,分别对运载火箭飞行过程中姿态角(俯仰角、偏航角、滚动角)在不同的正负偏差值组合情况下引起的天线波束指向角偏差(取极值)进行分析,仿真结果如

图 3 所示。

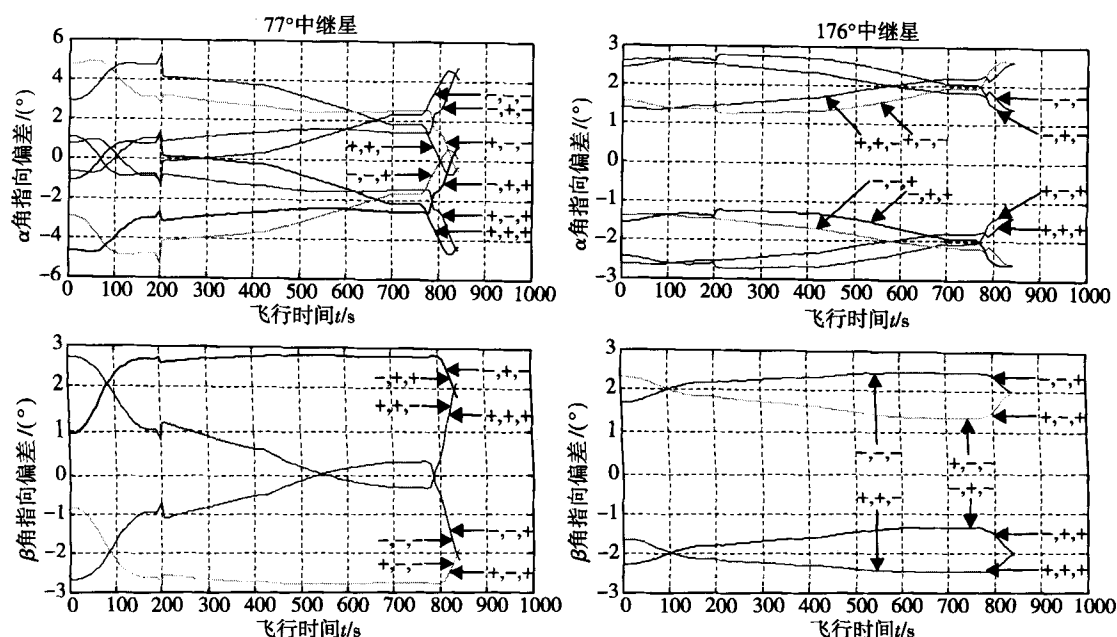


图 3 运载火箭姿态角偏差对天线指向角的影响

从图 3 中可以得到, 在应用 77° 中继星时, 天线方向角 α 角的最大偏差值为 5.33°, β 角的最大偏差值为 2.81°; 应用 176° 中继星时, 天线方向角 α 角的最大偏差值为 2.76°, β 角的最大偏差值为 2.48°。采用最大偏差值进行分析, 结合天线半功率波束宽度, 并考虑其它因素引起的波束指向偏差, 可以得出相控阵天线的波束覆盖性能是否满足任务要求。如目前工程研制中运载火箭天基测控系统相控阵天线半功率波束宽度在 10° 以上, 综合考虑扫描范围内的最大波束跃度、天线安装精度及姿态角偏差等因素, 其引起的天线指向偏差不超过 10°, 并有一定的裕量, 因此能够满足飞行过程中的测控覆盖要求。另外, 从图 3 中可以看出, 俯仰角、偏航角、滚动角的八种偏差组合模式对 β 角指向产生了四种类型的影响结果, 这是因为 β 角的计算与箭体的滚动角无关。

为进一步说明运载火箭姿态角偏差与天线指向角偏差的关系, 分别考虑俯仰角、偏航角、滚动角的偏差对天线指向角的影响, 如图 4 所示。可以看出, 天线指向角偏差随着姿态角变化量(绝对值)的增大而增大(滚

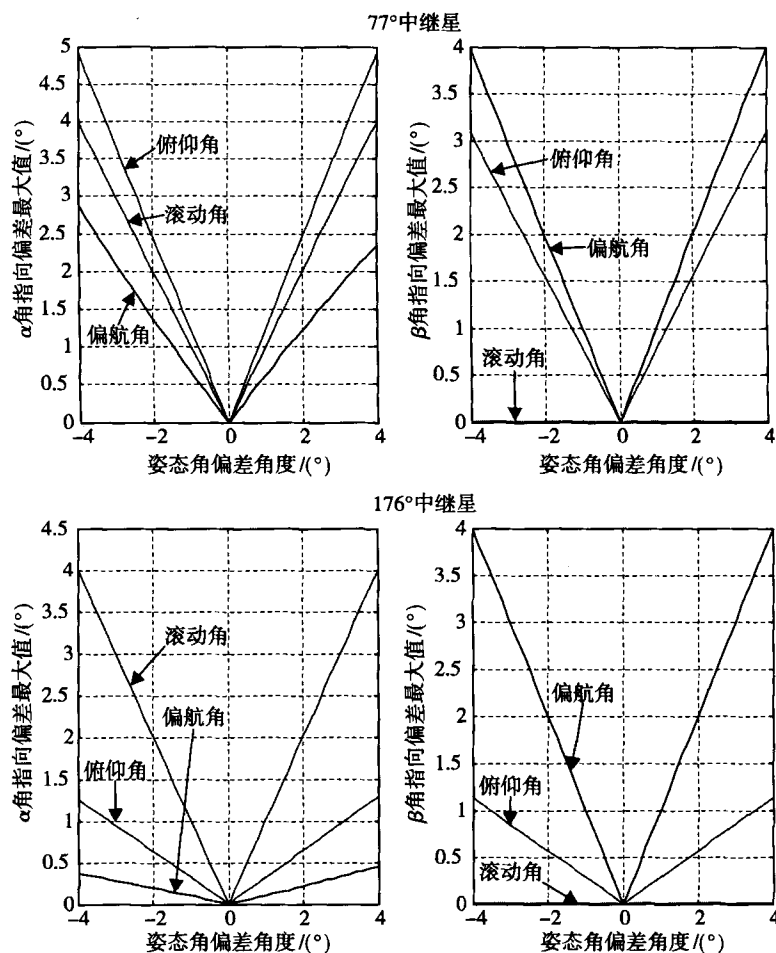


图 4 姿态角偏差与天线指向角变化关系

动角对 β 角的影响除外),因此减小箭体姿态角偏差能够降低天线指向角偏差,此结论具有普遍性。

在系统设计过程中,按照采用最大姿态角偏差值来分析天线覆盖性能的方法能够正确判定系统工作的可行性和有效性,这是基本的分析方法。通常情况下,按照这样的分析思路能够对系统进行充分验证,但为了更清晰地了解天线的覆盖性能,特别是在天线指向角对姿态角变化比较敏感时,可以利用相逆的过程对天线性能要求下允许的箭体姿态角偏差范围进行分析,这对综合评价相控阵天线的覆盖性能是有帮助的,甚至是必要的。采用本例弹道数据,对箭体姿态角全部组合模式下其偏差与天线指向角偏差的关系进行仿真分析,结果如图5所示。

从图5可以看出,在本例中,姿态角偏差为 2° 时引起的天线指向角 α 、 β 角的偏差与前面仿真结果相同。根据天线半功率波束宽度,同时将天线安装偏差、波束跃度等因素考虑在内,从图5中能够估计出满足波束覆盖要求时允许的最大姿态角偏差。如本例中,天线半功率波束宽度为 10° ,其它因素引起的指向偏差不大于 3° ,则有 7° 左右的天线指向角偏差裕量(考虑 α 角),此时允许姿态角偏差为

2.6° (77° 中继星)或更大(176° 中继星)。必要时,根据天线指向角 α 、 β 对姿态角偏差的敏感性及箭体姿态角偏差统计值,可以对天线在 α 、 β 角方向的波束宽度提出要求,指导相控阵天线的设计。

3.3 补充说明

针对上面的分析,需要说明的是:运载火箭的飞行弹道不同,箭体姿态角对天线指向角的影响程度也不相同,特别是与射向密切相关,某些弹道会出现天线指向偏差过大而无法覆盖中继卫星的情况,造成链路中断、数据丢失,因此天线覆盖性能需要根据不同的弹道进行分析。

一般情况下,运载火箭飞行过程中天线指向角偏差较大或天线覆盖性能较差的情况只发生在某个飞行时段上,且相对于两颗中继卫星(77° 和 176°)的时段不同,有一定的时间间隔,该分析结果可以作为天基测控系统选星工作(只有一副相控阵天线且波束覆盖满足两颗中继星要求时)或天线安装位置计算与工作切换(安装两副相控阵天线时)的参考依据。

4 结束语

我国运载火箭天基测控系统在今后几年内将实现工程应用,并逐步成为未来测控任务的主要方式。对相控阵天线覆盖性能的分析是系统设计与工程研制的重要依据,本文以某型运载火箭飞行弹道为例,对影响天线覆盖性能的因素及其影响结果进行分析说明,其分析方法及思路可以作为今后天基测控系统设计和工程研制的参考与借鉴,有助于运载火箭天基测控系统的发展及测控任务的有效完成。

参考文献

- [1] 刘嘉兴. 航天测控技术的过去、现在和未来[J]. 电讯技术, 1999, 39(2): 1~8.
- [2] 星 闻. 世界中继卫星家族又添新成员——中国首颗中继卫星入轨[J]. 国际太空, 2008, (6): 13~16.
- [3] Margery Bacon, Richard A. NASA Tracking and Data Relay Satellite System(TDRSS) Support of Expendable Launch Vehicles [C]. AIAA Defense and Space Programs Conference, September, 25, 1997.

(下转第69页)

- [3] Frost V S, Stiles J A, Shanmugan K S, et al. A model for Radar Images and Its Application to Adaptive Digital Filtering of Multiplicative Noise [J]. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1982, PAMI-4(2): 157 ~ 166.
- [4] Yu Yongjian, Acton S T. Speckle Reducing Anisotropic Diffusion [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2002, 11(11): 1260 ~ 1270.
- [5] 苗 慧, 宋光磊, 张春红等. 一种自适应各向异性的SAR图像去噪算法[J]. 遥测遥控, 2011, 32(1): 28 ~ 32.
- [6] Crouse Matthew S, Nowak Robert D, Baraniuk Richard G. Wavelet-based Statistical Signal Processing Using Hidden Markov Models [J]. IEEE Transaction on Signal Processing, 1998, 46(4): 886 ~ 902.
- [7] Xie Hua, Pierce Leland E, Ulaby Fawwaz T. SAR Speckle Reduction Using Wavelet Denoising and Markov Random Field Modeling [J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 2002, 40(10): 2196 ~ 2212.
- [8] Li S Z. Markov Random Field Modeling in Computer Vision [M]. Tokyo, Japan: Springer-Verlag, 1995.
- [9] Min Dai, Cheng Peng, Chan Andrew K, et al. Bayesian Wavelet Shrinkage with Edge Detection for SAR Image Despeckling [J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 2004, 42(8): 992 ~ 1000.

SAR Image Despeckling Based on Joint Hidden Markov Model

Ni Dong, Li Qiaoliang, Chen Xin

Abstract: In this paper, we propose a joint hidden Markov Tree (HMT) model by fusing the wavelet Bayesian denoising technique with an image regularization procedure based on HMT and Markov random field (MRF). The expectation-Maximization algorithm is used to estimate hyperparameters and specify the mixture model. The noise-free wavelet coefficients are finally estimated by a shrinkage function based on local weighted averaging of the Bayesian estimator. Experimental results show that our proposed method outperforms Lee filter and traditional HMT techniques, in terms of both the equivalent number of looks (ENL) and Pratt's figure of merit (FOM).

Key words: SAR; Speckle; Bayesian estimation; Markov random field; Hidden Markov tree; Wavelet

[作者简介]

倪 东 1977年生,博士。主要研究方向为图像处理与分析。

李乔亮 1982年生,博士。主要研究方向为图像处理与分析。

陈 昕 1976年生,副教授。主要研究方向为信号处理与分析。

(上接第55页)

- [4] Jack Kreng, Sieu Do and Ashok Mathur. USB Command Link via TDRSS to Satellites and Possibly Space Launch Vehicles [C]. 26th International Communications Satellite Systems Conference(ICSSC), June 2008, San Diego.
- [5] 龙乐豪. 总体设计(上)[M]. 北京:中国宇航出版社,1996.
- [6] 张光义. 相控阵雷达系统[M]. 北京:国防工业出版社,1994.

Antenna Cover Performance Analysis for Space-based Launch Vehicle TT&C System

Liu Jing, Song Yuepeng

Abstract: The phased-array antenna is an important part of space-based launch vehicle TT&C system, while the system efficiency, to a great extent, depends on the pointing accuracy of the antenna beam. The influencing factors that cause the beam direction deviation are briefly discussed, and the influence of the attitude angle error on the performance of beam cover is analyzed. The analysis method can be used as a reference to the system design and engineering development of space-based launch vehicle TT&C system.

Key words: Launch vehicle; Space-based TT&C; Phased-array antenna

[作者简介]

刘 靖 1972年生,博士在读,高级工程师。主要从事运载火箭测控系统设计研究。

宋岳鹏 1979年生,博士,工程师。主要从事运载火箭测控系统设计研究。

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，一直致力和专注于微波、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>