高分辨率多模式星载 SAR系统设计方法

李 威 李春升 陈 杰 于 泽

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100191)

摘 要: 针对当前星载合成孔径雷达 (SAR, Synthetic Aperture Radar)朝高分辨率、多模式方向快速发展的趋势,兼顾星载 SAR系统多种工作模式的特点,总结星载 SAR系统的星地一体化指标体系;在此基础上提出了高分辨率、多模式星载 SAR系统星地一体化设计方法,给出了系统星地一体化设计流程,对雷达天线参数设计、雷达系统参数设计、雷达发射功率选择进行重点分析;以国外高分辨率、多模式星载 SAR系统为例,以其总体技术指标及轨道参数为依据,设计了系统的中央电子设备参数、天线参数及波位参数,并分析了系统的性能,从而对所提出的设计方法进行了验证. 该方法克服了现有方法的局限性,为高分辨率、多模式星载 SAR系统研制提供了技术支撑.

关 键 词: 合成孔径雷达; 总体设计; 指标体系

中图分类号: TN 958. 7

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2010)01-0104-06

High-resolution multi-mode SAR system designing method

Li Wei Li Chunsheng Chen Jie Yu Ze

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: In view of the current trend of space-borne synthetic aperture radar (SAR) developed toward to the high-resolution, multi-mode direction, considering the characteristics of space-borne SAR system in various modes. The integration indicator system of space-borne SAR system was sumd up. Based on the indicator system, a designing method of high-resolution, multi-mode SAR system was proposed, and the integration system designing flow was given. The analysis was focused on radar antenna design parameters, radar system design parameters, radar transmitter power selection. The method was validated by taking an example for a foreign high-resolution, multi-mode SAR system. Based on overall technical indicators and orbital parameters of the example system, the central electronics equipment parameters, antenna parameters and beam position parameters were designed, and the system performance was analyzed. The designing method overcomes the limitations of current methods and provides technical support in the development of high-resolution, multi-mode space-borne SAR system.

Key words: synthetic aperture radar; system design; indicator system

1 问题提出

合成孔径雷达 (SAR, Synthetic Aperture Radar)作为有源微波遥感成像系统,具有全天候、全天时、反伪装等光学成像系统所不具备的特点,已成为当今世界高速发展的热点技术之一. 星载 SAR作为 SAR的重要应用分支,目前已成为世界各军事强国竞相发展的焦点之一. 图 1给出了至 2008年 5月,国外已发射的合成孔径雷达卫星列表. 据 2008年 4月美国忧思科学家联盟 (Union of Concerned Scientists)发布的数据,当前在轨运行的 874颗卫星中有 22颗为合成孔径雷达卫星,它

收稿日期: 2008-12-24

作者简介: 李 威 (1982 -),男,辽宁本溪人,博士生, liwei20rth@sina.com.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

们已广泛应用于灾害监视、环境监测、资源勘察和军事应用等方面.在我国 2008年 2月冰雪灾害和 2008年 5月四川地震等重大灾情中,雷达卫星在灾害损失评估、地形勘测等方面发挥了积极有效的作用.

先进的 SAR卫星必然以先进的总体设计方法作为理论基础和前提,目前国内在该方面已取得一些理论成果,文献[1]针对 SAR系统星地一体化设计关键技术展开了深入研究,文献[2]针对高分辨率星载 SAR的总体参数进行了分析,文献[3]在详细分析模糊度与系统参数关系的基础上,提出了波位自适应设计方法.文献[4]针对 SAR卫星系统分析方法进行了研究,并给出了 SAR卫星系统星地一体化任务分析方法的系统构架和设计流程.

本文在对星载 SAR系统设计国内外研究成果[1-9]充分认识和理解的基础上提出了可适用于高分辨率、多模式的星载 SAR总体设计方法,设计过程以航天任务作为最基本的设计输入,对系统中的各大块参数进行综合考量,从而进行优化设计.该方法可普遍适用于一般分辨率星载 SAR及高分辨率星载 SAR系统,同时为了解决高分辨率与宽观测带的矛盾,还可对一发多收模式进行有效设计.本文对各指标进行层层分解,并详细讨论了各相关指标之间的制约关系,给出了总体设计方法流程,最后设计了一组适用于高分辨率星载 SAR系统的星地一体化参数,从而证明了该总体设计方法的可行性及重要的工程应用价值.

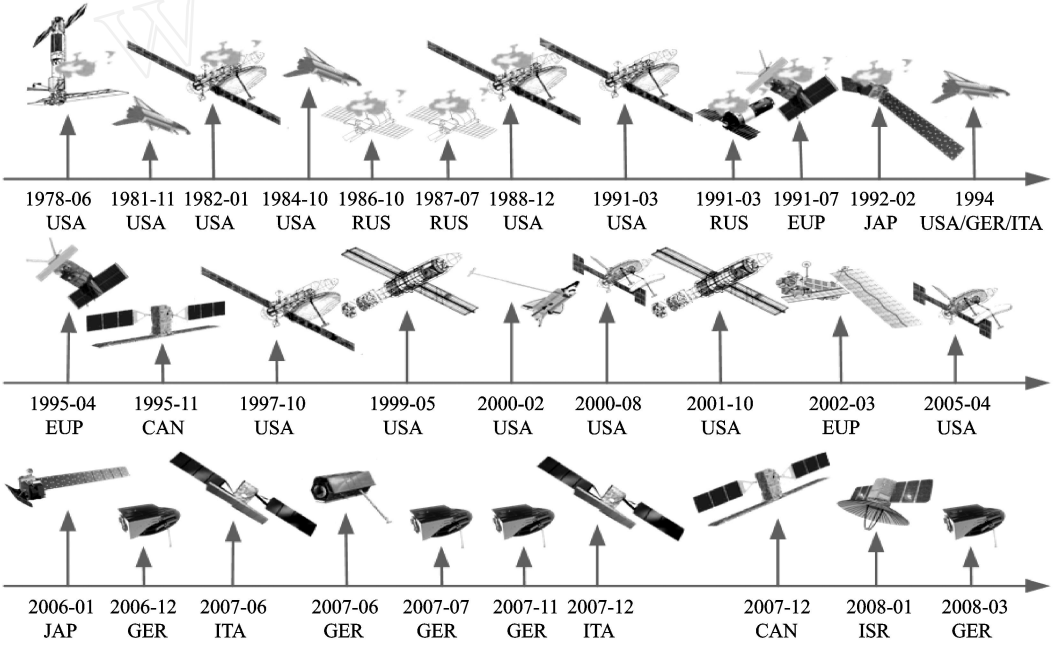


图 1　国外 SAR卫星发展历程汇总

2　星载 SAR系统指标体系

航天任务可分解为航天器(卫星平台)、轨道、运载工具和有效载荷 4个部分,各部分参数相互耦合、互相影响,因此在讨论 SAR卫星总体设计流程之前,有必要建立该航天任务的指标体系结构,只有这样才能顺利完成星载 SAR的星地一体化设计.

星载 SAR航天任务的星地一体化指标体系(见图 2)由总体技术指标、轨道参数、中央电子设备参数、天线参数、波位参数、地面处理指标 6个部分组成.

总体技术指标可分为星载 SAR航天任务的需求牵引指标和复核指标.其中需求牵引指标由星载 SAR的用户方根据实际应用需求提出,一般该部分指标为分辨率及观测带宽度;复核指标指的是为了实现星载 SAR的基本功能,对 SAR图像质量的基本要求,该部分主要可分为模糊度、等效噪声系数等.

轨道参数设计可分为粗略轨道参数设计及详细轨道参数设计 2个阶段,对于总体设计的初期,只需使用粗略轨道参数(轨道高度和地球半径)设计即可;对于总体设计的后期,就需要详细分析星载 SAR在轨工作运行情况,这时轨道详细参数(轨道 6要素)是必要的.

中央电子设备参数包括雷达的工作波长,与系统噪声密切相关的接收机工作温度,体现系统距离向分辨率的信号带宽,以及脉冲宽度、采样率、数据压缩比等相关参数.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

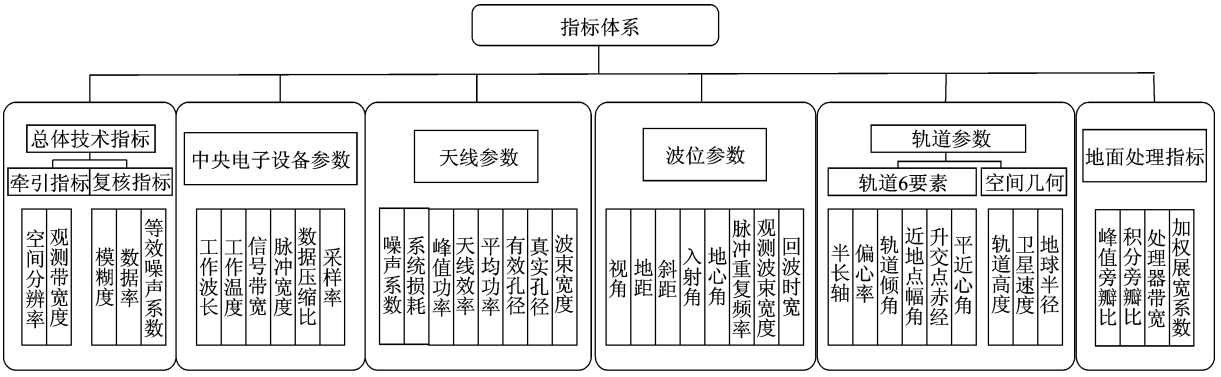


图 2 星地一体化指标体系

天线参数包括与卫星电源供电密切相关的峰值功率、平均功率和天线效率,体现雷达系统接收机性能的系统噪声系数和系统损耗,此外天线的孔径和波束宽度这对耦合参数又直接决定了天线的尺寸(进而决定天线的运载方式)、天线的重量,因此该部分参数的设计结果直接体现了系统大部分的设计需求,是 SAR 卫星总体设计流程中的重要一环.

波位参数包括多组可以互相转换的参数,与技术指标要求中的观测带宽度相对应,由于该部分的设计分析本身就较为复杂,同时该部分的设计结果又是多个参数分析模块的入口参数,因此该部分的设计分析是 SAR 卫星总体设计中的重点和难点.

地面处理指标包括峰值旁瓣比、积分旁瓣比、处理器带宽、加权展宽系数. 其中峰值旁瓣比和积分旁瓣比直接影响加权展宽系数的选取,处理器带宽直接约束了系统的方位向分辨率.

3 星地一体化设计流程

SAR 卫星总体设计的核心问题是其指标体系的建立,并在该指标体系上对各相关参数关系的深刻理解和把握. 各相关参数关系指的是参数间的相互耦合关系,及上级与下级参数间的制约关系. 为了更清晰明了地说明合成孔径雷达卫星的设计思路及各参数间的相互关系,图 3给出了星载 SAR 系统星地一体化设计数据流图.

通过对图 3的分析可知,星载 SAR 系统在设计之初应先综合考虑执行任务目标、运载能力、可实现的系统功耗等方面内容,从而确定星载 SAR 系统的星地几何关系及入射角范围,天线参数的确定与波位设计应同步进行,此过程需要多次迭代,以使设计结果更为合理,便于工程可实现化. 基于已设计好的波位结果可设计系统的峰值功率,进而对模糊度、等效噪声系数进行复核,同时验算系统的数传数据率,以决定星载 SAR 系统的数传方案. 在复算模糊、等效噪声系数、数传数据率时,一旦出现无法容忍的情况,则必须返回天线参数和波位设计环节进行重新设计,以使整个系统的参数合理,工程可实现. 整个系统设计是一个不断迭代、优化的过程. 该过程的核心和关键为雷达天线参数设计、雷达系统参数设计、雷达发射功率选择部分. 下面将对这 3个部分依次展开讨论.

3.1 雷达天线参数设计

雷达天线参数设计中,天线的尺寸影响天线的功率、天线的重量,并与波位参数相互制约,反映星载 SAR 的工作模式. 其中方位向长度受技术指标中的方位向分辨率的制约[10]:

$$\rho_a = \frac{K_a K_2 K_3}{2K_4} L_a \tag{1}$$

式中,ρ_a 为方位向分辨率; K_a 为方位向成像处理加权展宽系数; K_2 为方位向场强分布特性带来的幅度加权展宽系数; K_3 为地速对方位向空间分辨率的改善系数; K_4 为方位向天线波束宽度的展宽系数; L_a 为方位向天线长度.

距离向长度受雷达一发多收的工作模式、技术指标中的观测带宽度及波位设计结果中的波束宽度等参数的制约[10]:

$$\beta = \frac{\lambda}{L_r} \tag{2}$$

式中,β 为雷达天线的波束宽度; λ 为发射信号的载波波长; L_r 为距离向天线长度.

天线面积又影响平均功率的最终确定,并影响系统的等效噪声系数的分析结果.

$$\sigma^0_{eq} = \frac{16\pi\lambda KT_0 F_n R^3 L V_s B_r \sin\eta}{P_{av}\rho^2 A^2 c k_r k_a k_{wa} k_{wr}} \tag{3}$$

式中,σ^0_{eq} 为系统等效噪声系数; K 为波尔兹曼常数; T_0 为接收机温度; F_n 为接收机噪声系数; R 为雷达与目标之间的距离; L 为系统损耗; V_s 为卫星空间速度; B_r 为信号带宽; η 为波束入射角; P_{av} 为

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

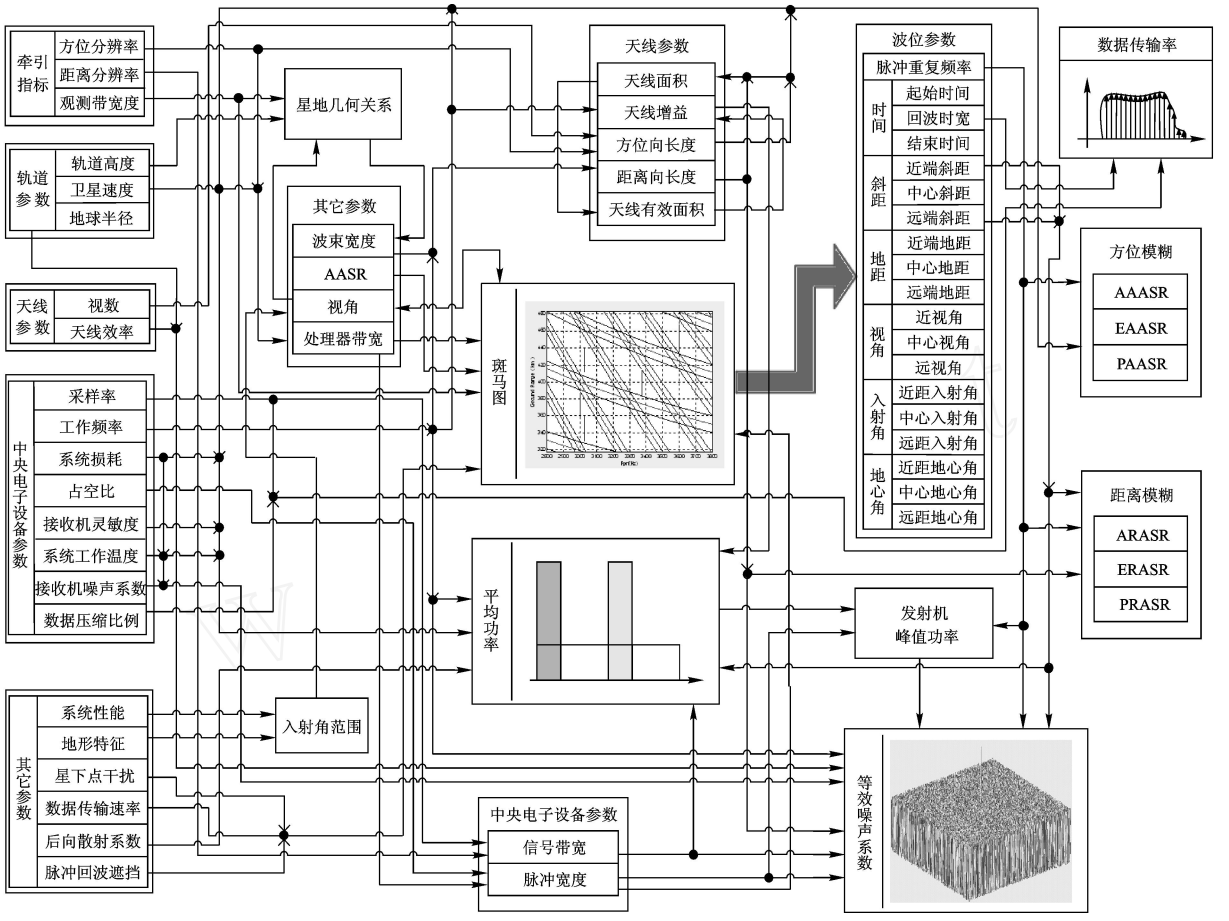


图 3　星载 SAR系统星地一体化设计数据流图

发射信号平均功率;ρ表示天线的孔径效率;A 为天线真实的物理孔径;c为光速;k_r为距离加权及其它因素而引入的一个小于 1的系数;k_a 为方位加权及其它因素而引入的一个小于 1的系数;k_{wa} 为天线方位向加权信号处理主瓣展宽系数;k_{wr}为天线距离向加权信号处理主瓣展宽系数.

3.2　雷达系统参数设计

该部分主要内容为波位设计,同时包含对系统性能的计算分析. 文献[3]在详细分析波位设计结果与模糊度相互关系的基础上提出了波位的自适应设计方法,该方法在仅考虑模糊性能的情况下是确实有效的,但是在总体设计过程中不但要考虑模糊度指标还要考虑数据率、平均功率、分辨率、等效噪声系数等一系列相关性能指标. 这一系列指标中分辨率可在最初设计时留有足够的余量,等效噪声系数可通过调整峰值功率使其满足指标要求. 由于目前 SAR正朝向高分辨率、宽观测带的方向发展,使其对数传数据率的要求不断提高,当 SAR卫星以分布式干涉进行工作时,数据率将进一步提高. 由于数据率受信号带宽、回波时宽及脉冲重复频率等多个参数影响[10],因此在波位设计过程中除了应考虑模糊度对波位设计的制约还要合理权衡数据率与波位设计结果之间的相互关系.

$$D_r = 2K_{os}B_r n_b T_w f_{prf} \tag{4}$$

式中,K_{os}为过采样系数,通常取值为 1.1～1.2; n_b 为数据的量化位数; T_w 为回波时宽; f_{prf}为脉冲重复频率.

3.3　雷达发射功率选择

平均功率设计的主要依据是雷达方程,由于其涉及参数较多,且部分参数同时为有些设计模块的入口和出口参数,因此设计时应十分注意,其设计结果与波位设计结果可计算等效噪声系数. 可以说,等效噪声系数是否符合指标要求是由斑马图波位设计与平均功率设计共同决定的.

4　设计实例

为验证文中论述的 SAR卫星总体设计方法的有效性,下文给出了一个高分辨率星载 SAR系统的设计实例. 本设计实例参考相关文献已公开的某型高分辨率、多模式星载 SAR系统的相关参数给出了一套总体设计方案,相信该设计实例具有一定的理论及实际意义.

目前通过相关文献[11-14]获取的该型号 SAR

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

卫星的相关参数及指标见表 1.

表 1 已知参数汇总表

参数/指标名称	数 值
发射日期	2005-4-30
运载工具	大力神-4B(Titan Ⅳ-B)
发射场	卡纳维拉尔角(Cape Canaveral)
轨道 远地点/近地点/倾角	718×712 km @ 57.0°
卫星重量/kg	16 000
卫星代号	28646 (USA 182) 2005-016A
分辨率/m	0.3(精细),1.0(标准),3.0(宽扫)
使用频率/MHz	9.6,5.3,1.25
成像带宽	4 倾斜角
观测带宽度/km	详查:20～40 普查:100～200
抛物面天线直径/m	9.14(带有相控阵馈电系统)
其它相关描述	该星轨道、颜色与其余4颗略有不同,可能具有隐身能力

基于上述已知的相关参数进行系统总体设计结果见表 2～表 4. 卫星工作模式选定为单发双收,设计完成的波位结果见图 4.

表 2 技术指标要求

指标参数		数 值
观测带宽度	条带模式/km	20
分辨率	距离分辨率/m	1
	方位分辨率/m	1
图像质量指标	方位模糊度/dB	-17
	距离模糊度/dB	-24
	等效噪声系数/dB	-24

本设计实例是在分辨率 1 m、观测带宽度大于 20 km的情况下进行系统总体设计的. 通过对斑马图、距离分辨率、方位分辨率、数据率、平均功率、模糊度、等效噪声系数等内容的分析,证明该设计实例能够达到预期指标要求,从而证明本文提出的设计方法是科学合理的.

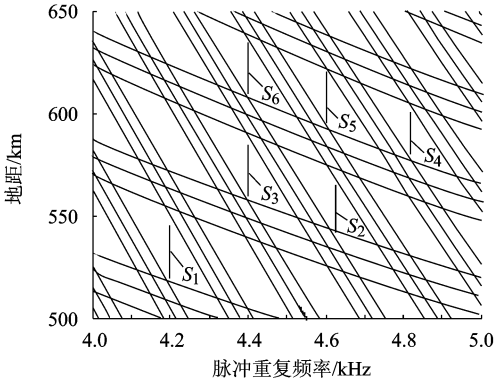


图 4 斑马图

表 3 设计参数结果

设计参数		数 值
卫星轨道参数	轨道高度/km	716
	地球半径/km	6 371
	飞行速度/(km·s^{-1})	7.5
中央电子设备参数	信号带宽/MHz	290
	脉冲宽度/μs	40
	工作温度/K	293
	处理器带宽/Hz	6 741.9
	数据压缩比	8∶4
天线参数	抛物面天线直径/m	9.14
	天线效率/%	80
	占空比/%	15
	峰值功率/W	20 000
	雷达系统噪声系数/dB	2.5
	系统损耗/dB	1.5

表 4 雷达波位设计及参数计算

波位	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6
中心视角/(°)	35.77	36.76	37.62	38.40	39.15	39.78
波束宽度/(°)	1.20	1.06	1.12	0.87	1.06	1.04
近端地距/km	520.00	542.00	560.00	580.00	595.00	610.00
远端地距/km	545.00	565.00	585.00	600.00	620.00	635.00
重叠区域/km	3.00	5.00	5.00	5.00	10.00	
脉冲重复频率/Hz	4 200.00	4 625.00	4 400.00	4 820.00	4 600.00	4 400.00
距离向分辨率/m	0.91	0.89	0.87	0.86	0.84	0.83
方位向分辨率/m	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
数据率/(Mbit·s^{-1})	3 180.46	3 353.73	3 440.09	3 250.51	3 687.46	3 562.43
雷达平均功率/W	3 360.00	3 700.00	3 520.00	3 856.00	3 680.00	3 520.00
等效噪声系数(平均)/dB	-24.60	-25.74	-24.80	-27.14	-25.02	-24.84
等效噪声系数(最差)/dB	-20.83	-21.98	-21.04	-23.42	-21.28	-21.11
方位模糊度/dB	-17.38	-22.41	-19.89	-23.96	-22.16	-19.89
距离模糊度/dB	-29.27	-27.97	-26.60	-30.39	-25.65	-25.90

5 结束语

本文构建了可普遍适用于高分辨率、多模式星载 SAR系统的星地一体化指标体系,并深入研究了各技术指标的相互制约关系,给出了一种具有普适性的星载 SAR系统总体设计方法. 最后采用某高分辨率星载 SAR系统作为设计实例,证明了该方法的有效性及其重要的工程应用价值.

星载 SAR系统总体设计应该深入地讨论卫星平台与有效载荷的相互关系,该方面的讨论将

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

在后续文章中进行;干涉 SAR卫星系统作为星载 SAR的新的应用方向,其总体设计方法十分重要,因此作者将在后续的论文中详细讨论该系统的总体设计方法.

参考文献 (References)

[1] 陈杰. 合成孔径雷达系统星地一体化关键技术研究 [D]. 北京航空航天大学电子信息工程学院, 2001: 59 - 78
Chen Jie[D]. Beijing: School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2001: 59 - 78 (in Chinese)

[2] 黄岩,陈杰,李春升,等. 高分辨率星载 SAR总体参数分析 [J]. 宇航学报, 1999, 20: 26 - 30
Huang Yan, Chen Jie, Li Chunsheng. Analyse parameters of high resolution spaceborne SAR [J]. Journal of Astronautics, 1999, 20: 26 - 30 (in Chinese)

[3] 于泽,周荫清,陈杰,等. 星载相控阵合成孔径雷达波位设计方法 [J]. 系统工程与电子技术, 2006, 28(5): 661 - 664
Yu Ze, Zhou Yinqing, Chen Jie, et al. Beam position design for spaceborne phased array SAR system [J]. Systems Engineering and Electronics, 2006, 28(5): 661 - 664 (in Chinese)

[4] 吴炜琪,张育林. 合成孔径雷达卫星系统任务分析方法研究 [J]. 电子与信息学报, 2006, 28(4): 619 - 623 (in Chinese)
Wu Weiqi, Zhang Yulin. Mission analysis for synthetic aperture radar satellite system [J]. Journal of Electronics & Information Technolog, 2006, 28(4): 619 - 623 (in Chinese)

[5] Currie A, Brown M A. Wide-swath SAR [J]. IEE Proceedin EGS-F, 1992, 39(2): 122 - 135

[6] Moreira Alberto. Suppressing the azimuth ambiguities in synthetic aperture radar images[J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 1993, 31(4): 885 - 895

[7] Wang W Q. Errors analysis of transponder-based radiometric calibration for high-resolution imaging radars[J]. IET Microw Antennas Propag, 2008, 2(5): 451 - 458

[8] Linnehan R, Brady D, Schindler J, et al. On the design of SAR apertures using the cramer-rao bound [J]. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic System, 2007, 43(1): 344 - 355

[9] Cantalloube H, Dubois-Fernandez P. Airborne X-band SAR imaging with 10 cm resolution: technical challenge and preliminary results[J]. IEE Proceedings Radar Sonar and Navigation, 2006, 153(2): 163 - 176

[10] 魏钟铨. 合成孔径雷达卫星 [M]. 北京:科学出版社, 2001
Wei Zhongquan. Synthetic aperture radar satellite [M]. Beijing: Science Press, 2001 (in Chinese)

[11] Adam J A. Peaceful watchdogs [J]. IEEE Spectrum, 1989, 26(11): 28 - 33

[12] 赵秋艳. 美国成像侦查卫星的发展 [J]. 光机电信息, 2001(10): 15 - 23
Zhao Qiuyan. The United States the development of satellite imaging detection? [J]. Ome Information, 2001(10): 15 - 23 (in Chinese)

[13] Lacrosse [EB/OL]. [2008 - 12 - 24]. http://www.zen32156.zen.co.uk/lacrosse.htm

[14] Lacrosse satellite [EB/OL]. [2008 - 12 - 24]. http://en.wikipedia.org/wiki/Lacrosse_(satellite)

(编　辑:娄　嘉)

(上接第 99页)

控制律. 文中采用指数趋近律的方法,可以通过调节参数 ε_i 和 k_i 来削弱抖振,增加动态响应速度. 仿真算例表明,提出的方法是有效的. 对于同时存在时延和数据丢包时 NCS的变结构控制以及离散时间 NCS的变结构控制是以后需要进一步研究课题.

参考文献 (References)

[1] Hespanha J P, Naghshtabrizi P, Xu Y G. A survey of recent results in networked control systems [J]. Proceedings of the IEEE, 2007, 95(1): 138 - 162

[2] Tipsuwan Y, Chow M. Control methodologies in networked control systems [J]. Control Engineering Practice, 2003, 11: 1099 - 1111

[3] 高为炳. 变结构控制的理论及设计方法 [M]. 北京:科学出版社, 1996
Gao Weibing. Theory and design method of variable structure control [M]. Beijing: Science Press, 1996 (in Chinese)

[4] 高存臣,袁付顺,肖会敏. 时滞变结构控制系统 [M]. 北京:科学出版社, 2004
Gao Cunchen, Yuan Fushun, Xiao Huimin. Time-delay variable structure control systems[M]. Beijing: Science Press, 2004 (in Chinese)

[5] Xu J, Wang L, Li Y. Networked control based on sliding mode for a class of state-delay system [C]//Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation. Piscataway, NJ: IEEE, 2006: 4539 - 4542

[6] Fang L, Wu Z, Liu J, et al. Sliding mode variable structure control of networked control system [C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Automation and Logistics. Piscataway, NJ: IEEE, 2007: 2660 - 2664

[7] Montestruque L, Antsaklis P. On the model-based control of networked systems[J]. Automatica, 2003, 39: 1837 - 1843

[8] Mu S, Chu T, Hao F, et al. Output feedback control of networked control systems [C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man & Cybernetics. Piscataway, NJ: IEEE, 2003: 211 - 216

[9] Gu K. An integral inequality in the stability problem of time-delay systems [C]//Proceedings of the 39th IEEE Conference on Decision and Control. Piscataway, NJ: IEEE, 2000: 2805 - 2810

[10] Mao X, Koroleva N, Rodkina A. Robust stability of uncertain stochastic differential delay equations [J]. Systems & Control Letters, 1998, 35: 325 - 336

(编　辑:文丽芳)

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net