

车载集群通信系统“自顶向下”电磁兼容设计

刘莹^{1,2}, 谢拥军^{1,3}, 张勇²

(1. 西安电子科技大学天线与微波技术国家重点实验室 西安 710071; 2. Ansoft(中国)公司 北京 海淀区 100190;
3. 北京航空航天大学电磁兼容实验室 北京 海淀区 100083)

【摘要】介绍了基于电子设计自动化(EDA)仿真的“自顶向下”的电子系统电磁兼容(EMC)设计流程,并将其应用于车载集群通信系统电磁兼容设计中。以某4辆装甲车构成的实际车载集群为例,针对其中的天线互扰、机箱泄漏和印刷电路板(PCB)辐射等各种电磁兼容问题,建立从系统级、设备级到PCB板级的分析流程,给出了相应的EDA分析和设计方法。工程实例表明,“自顶而下”的EMC设计能够有效地预测系统电磁干扰,提高系统电磁兼容水平。

关键词 天线布局; 电磁兼容; 屏蔽效能; 自顶向下

中图分类号 TN823

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2010.05.016

“Top-Down” Design Flow and Its Applications in Multi-Vehicle Communication System’s EMC Design

LIU Ying^{1,2}, XIE Yong-jun^{1,3}, and ZHANG Yong²

(1. National Key Lab of Antenna and Microwave Technology, Xidian University Xi’an 710071; 2. Ansoft Corporation in China Haidian Beijing 100190;
3. EMC Lab, Beihang University of Aeronautics and Astronautics Haidian Beijing 100083)

Abstract The top-down electromagnetic compatibility (EMC) design flow and its applications in multi-vehicle communication system, which is based on EDA software, are introduced. For the EMC problems such as antenna interaction, enclosure leakage and radiation of printed circuit board (PCB) in a four-vehicle communication system, the design flow from system level and device level to PCB level is present with simulation procedure. The results show that this design flow can obviously improve the electromagnetic immunity of the system and make the design first pass success.

Key words antenna integration; electromagnetic compatibility; shielding effect; top-down

在现代飞机、汽车、舰艇等各种平台上,狭小的空间集中了大量的电子设备,这些电子设备在工作时会产生电磁辐射干扰或传导干扰等,影响其他设备的正常工作。另一方面,电子设备中发射机的发射功率越来越大、接收机的灵敏度越来越高、设备的尺寸越来越小型化等苛刻的因素,使得平台上系统级电磁兼容(EMC)的设计具有很大的复杂度和难度。因此,对各种平台上的电磁兼容研究越来越成为关注的热点,如电子设备中电路板级的信号完整性(SI)分析^[1-2]、大型电子系统中设备级电磁兼容和系统级电磁兼容的关系^[3]、车载或机载平台的系统级电磁兼容问题^[4-7]等。以上文献的研究方法或偏重于电路分析方法,或只采用场分析。实际上,随着电子设计自动化技术(EDA)的发展,进行电磁兼容所需的系统级、设备级、电路板级的仿真技术发

展非常迅速。

目前,针对开关电源^[8]、单个电路板或小型电子设备^[9]的电磁兼容设计需求,已经形成了一些成熟的基于EDA仿真的设计流程。而对于系统级电磁兼容性的评估和设计,长期以来主要依靠系统实测和调试为主,还没有成熟的仿真设计流程。这是因为系统级电磁兼容的仿真设计需要全面的设备级、电路板级甚至半导体管级的电磁兼容模型,进行自下而上的逐级仿真,每一级电磁干扰的仿真结果是上一级仿真设计的干扰源。但是在实际设计中,板级或部件级的仿真模型很难得到,自下而上的设计流程在机载、车载等复杂平台的系统级电磁兼容性设计中缺乏可操作性。

为了克服上述传统电磁兼容分析和设计方法的不足,在飞机全机电磁兼容预设计中运用了“自顶

收稿日期: 2009-06-30; 修回日期: 2009-11-18

基金项目: 国家自然科学基金(60771040)

作者简介: 刘莹(1980-),女,博士生,主要从事电磁兼容、天线与微波技术及电磁场数值算法等方面的研究。

向下”的EMC预设计流程^[10]。本文介绍了一种基于EDA仿真与实测相结合的“自顶向下”的EMC设计方法,主要依赖于EDA仿真技术,在系统级提出指标要求,与下一层无缝的交互仿真信息,是专门面向系统总体设计人员、在实际工程中摸索而生的逐步求精的设计方法。

1 基于仿真的“自顶向下”EMC设计流程

基于EDA仿真的“自顶向下”EMC设计流程是在顶层制定并分解设计指标,利用EDA仿真工具量化评估、预测分系统EMC特性对于系统性能的影响,设计系统集成方案,并提出改进措施。

本文通过一个具有实际背景的系统电磁兼容设计给出“自顶向下”的设计流程^[11]。由A、B、C、D共4辆车构成的复杂系统的电磁兼容设计如图1所示。每辆车仓内装载多种电子设备,车外布置多种频段的天线。对该系统完整的系统电磁兼容设计包括4车系统电子设备工作造成的系统电磁环境的评

估,以及系统内各个电子设备的电磁兼容性分析和设计。因此,本文将仿真其中B、C、D车的短波电台工作造成的电磁环境,及其电磁干扰对于A车内电子设备电磁兼容性的影响,“自顶向下”地进行由系统级到设备级、最终到器件级的电磁兼容性分析和设计。

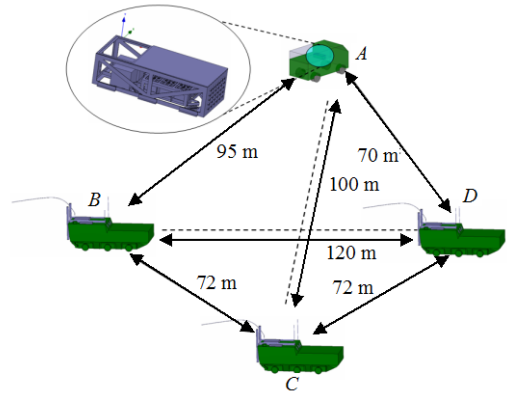


图1 4车构成的复杂电磁兼容系统

各级的EMC仿真问题均可以利用EDA软件解决,如图2所示。

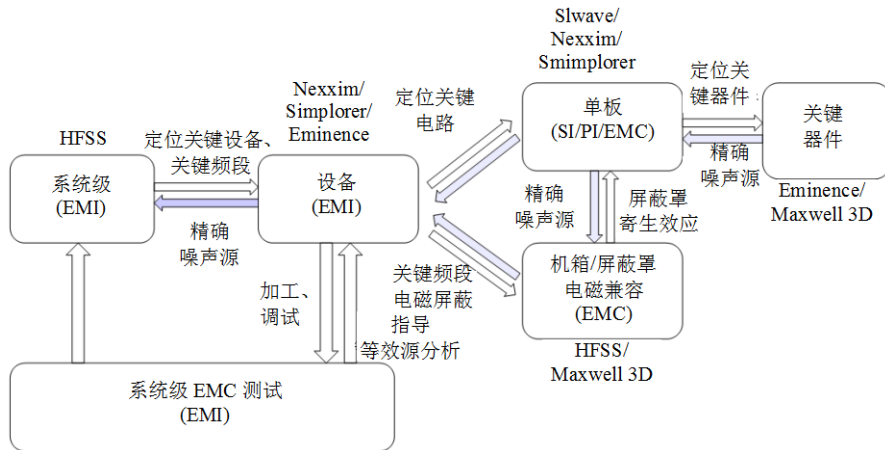


图2 EMC分析中的EDA仿真方法

2 设计实例

2.1 系统级EMC分析和设计

在复杂系统的电磁兼容分析中,干扰源的结构复杂,如系统中车载电台与装甲车构成了一个复杂的干扰源。仿真中可以采用“场到场链接”(data link)方法,将电磁兼容系统中的干扰源与传播空间分解,有效地降低数值求解对于计算机内存的需求。如图3所示,对右侧的装甲车D的电台天线和车体进行一体化数值仿真,然后将仿真结果作为场源以链接的方式加入多车系统构成的空间中。以该方法可以得到4车系统中的电磁环境分布的仿真结果。进一步地,利用场链接得到车厢子系统的电磁环境分布,如图4所示。

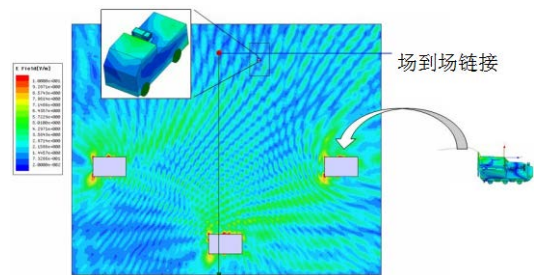


图3 4车系统电磁场环境仿真

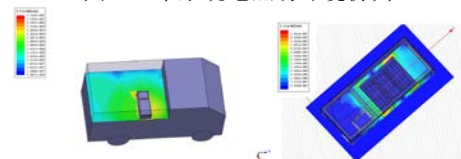


图4 4车系统的子系统电磁场环境仿真结果

车载天线布局是系统级EMC关心的另外一个重

要问题,主要包括天线间隔离度、平台造成的天线方向图畸变以及发射天线对车内电子设备的辐射干扰。在车顶上有限的空间对天线实施单纯的距离隔离有很大的局限性,必须合理地优化天线及线缆线束布局最大限度地提高EMC整体性能。

车顶装载有4副天线的装甲车如图5所示。首先对车体和地面造成的天线方向图畸变进行仿真,结果如图6所示。

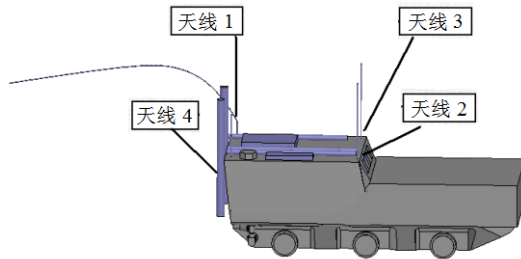


图5 装甲车上的天线布局

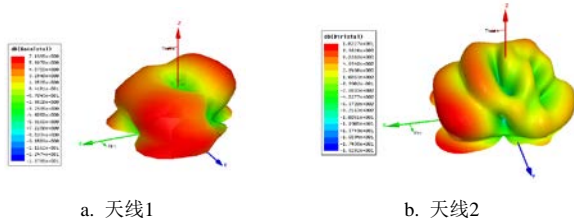


图6 考虑车体影响的天线1和天线2的方向图

其次进行天线布局优化研究。如对天线3的位置坐标变化情况,观察天线3与天线4之间隔离度的变化,确定可以实现与天线4最佳隔离的天线3的最优位置。

同时,当电子设备工作时,大功率射频电缆上的微波能量可以耦合到临近的设备电缆上,从而造成对车内多个电子设备的干扰,如图7所示。本文对受扰设备较大的连接电缆在Q3D和HFSS软件中进行仿真分析,得到受扰最小的电缆布局方案。

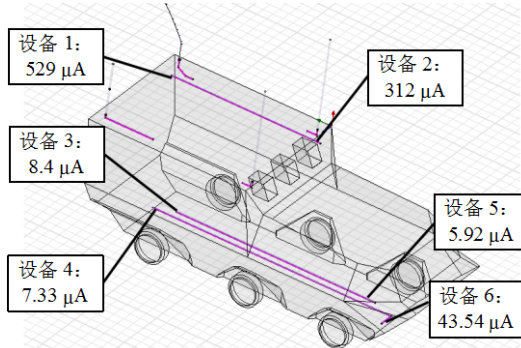


图7 大功率射频电缆对装甲车内关键设备电缆的干扰

2.2 设备级EMC设计

设备级电磁兼容问题首先解决的是设备机柜的

屏蔽效能问题。从电磁分析方法的角度,机柜的屏蔽效能分析可分为两类:

(1) 机柜的本振分析;

(2) 外部干扰照射下机柜内的屏蔽效能和场分布计算。

对应这两类分析,可以分别采用HFSS软件对应的本征模式和驱动模式两种求解方法求解。

2.2.1 机柜的本征模式分析

设备机柜的外壳形成一个电磁谐振腔。空的矩形谐振腔的谐振频率为^[12]:

$$f = 150[(k/l)^2 + (m/h)^2 + (n/w)^2]^{1/2}$$

式中 l 、 w 和 h 分别为矩形谐振腔的长、宽、高; k 、 m 和 n 均为正整数。

谐振腔具有选频特点,即只有谐振频率的电磁场可以在机柜内形成驻波。因此,在对干扰源照射下的机柜屏蔽性能进行分析之前,应首先进行机柜的本征模式研究。

如对发控单元机柜进行400 MHz以下的本征模式计算,可以得到如图8所示的20个谐振频率。图9给出了141 MHz、280 MHz两个谐振频率点对应的谐振模式场图。由图可知,141 MHz谐振频率对应的场图中减震器及机柜边缘部分电磁场较强,因此其电路板等重要部件基本不分布于场强最强处。而在280 MHz谐振频率本征谐振场图中,集线盒和电路板处场强较强,这些敏感位置的电路需要对280 MHz谐振频率做抗干扰设计。

Eigenmode	Frequency (GHz)	Q	Eigenmode	Frequency (GHz)	Q
Mode 1	0.140686 + j 1.71660e...	4097.78	Mode 11	0.308025 + j 2.29491e...	6711.03
Mode 2	0.154792 + j 1.51719e...	5101.30	Mode 12	0.319784 + j 1.70175e...	9395.74
Mode 3	0.189426 + j 4.00728e...	2363.52	Mode 13	0.367943 + j 1.96578e...	9358.71
Mode 4	0.192687 + j 3.85678e...	2498.03	Mode 14	0.372347 + j 2.74799e...	6774.90
Mode 5	0.198929 + j 1.74387e...	5703.66	Mode 15	0.376278 + j 4.57468e...	4112.61
Mode 6	0.205483 + j 1.97114e...	5211.52	Mode 16	0.379005 + j 3.45382e...	5486.74
Mode 7	0.229633 + j 4.49333e...	2555.26	Mode 17	0.381424 + j 3.10343e...	6145.19
Mode 8	0.240243 + j 1.33242e...	9015.28	Mode 18	0.394390 + j 4.94763e...	3985.65
Mode 9	0.279979 + j 2.27471e...	6154.17	Mode 19	0.400450 + j 3.50719e...	5708.98
Mode 10	0.287246 + j 3.05704e...	4698.11	Mode 20	0.414770 + j 3.57094e...	5807.59

图8 机柜本征谐振点

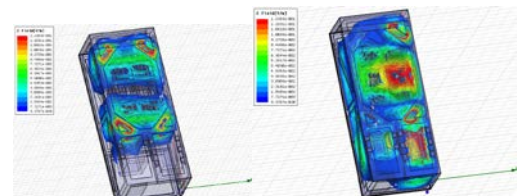


图9 两个谐振频率点的机柜内本征场分布

2.2.2 驱动模式分析

对有干扰源照射情况下的机柜屏蔽效能的计算采用驱动模式求解^[13-14]。屏蔽效能定义为:未加屏蔽前某一位置的场强 E_0 与同一位置加屏蔽时的场强

E_s 之比。当取dB为单位时,屏蔽效能为 $20\lg(E_0/E_s)$ 。

对控制机柜进行建模,其电磁波主要通道为散热孔。本文设置平面波激励,通过仿真得到机柜内部的电磁场强,如图10所示。由图可知,280 MHz的电磁波在机柜内形成驻波,导致机柜内驻波波腹点的场强大于入射波场强。

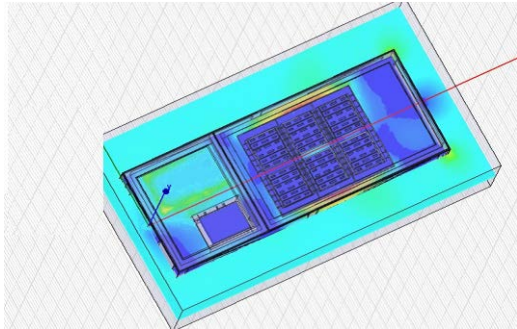
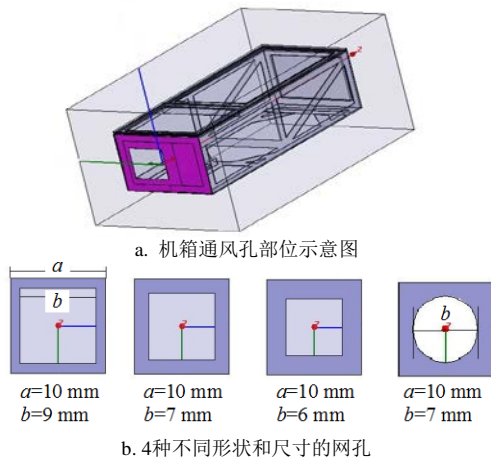
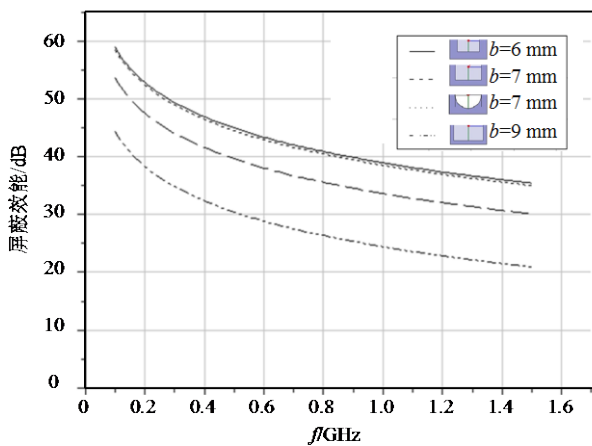


图10 无屏蔽网孔情况下的电场分布

仿真对散热孔施加金属丝屏蔽的情况,加入沿z轴正方向、大小为1 V/m的平面波,对图11中给出的4种散热网孔情况分别进行仿真^[15]。



b. 4种不同形状和尺寸的网孔



c. 4种网孔的屏蔽效能仿真结果
图11 各种网孔的屏蔽效能

屏蔽效能的计算结果如图11所示,可以根据其结果选择最优的网孔形状。由图可知,网孔边长为6 mm的网格比边长为7 mm的网格屏蔽效能提高了6 dB,因此,对于同样形状的网孔,孔径越小,屏蔽性能越佳。对于不同形状的网络,圆孔的屏蔽特性比方孔的屏蔽特性好。通过分析,优化选择直径为7 mm的圆孔作为网孔图形。

2.2.3 真实PCB场源的机柜辐射

本文分析设备中真实PCB场源对系统电磁兼容特性的影响。利用三维电磁场仿真方法将PCB的辐射场等效为一个电磁环境中的激励源,分析其电磁辐射特性^[16]。在分析对象里作为激励源的PCB有12块板子。首先定义PCB上的各种干扰源(或称噪声源),主要分为:

- (1) 集成电路(IC)芯片工作时产生的噪声;
- (2) 互连信号产生的辐射噪声;
- (3) 供电系统产生的噪声。

分析电路板的结构,采用SIwave软件仿真PCB的辐射特性,得到PCB电场场强分布的仿真,结果如图12所示,将该结果导入HFSS软件,就可以仿真PCB产生的电磁干扰。图13给出了对应上述干扰的三米法实验的数值仿真结果。

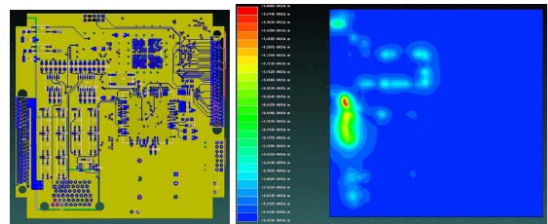


图12 PCB上方1 mm处的电场分布

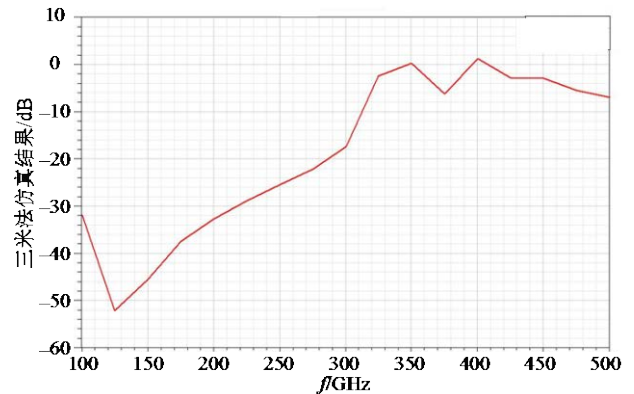


图13 PCB的三米法仿真结果

3 结论

本文通过工程实例,介绍了“自顶向下”的系统电磁兼容设计在车载集群通信系统电磁兼容设计中的应用。运用该设计流程,结合EDA仿真工具进

行电磁兼容设计,能有效地分析各种电磁干扰影响,提高系统的电磁兼容性水平,确保车载集群通信系统的正常工作。

参 考 文 献

- [1] 张燕燕. PCB级的电磁兼容性设计研究[J]. 西安邮电学院学报, 2007, 12(03): 86-89.
ZHANG Yan-yan. PCB level EMC design[J]. Journal of Xi'an University of Post and Telecommunications, 2007, 12(03): 86-89.
- [2] 靳松, 何军. 武器装备中电子设备的板级电磁兼容技术[J]. 国防技术基础, 2004, (6): 26-27.
JI Song, HE Jun. PCB level EMC design in the weaponry electronics[J]. Technology Foundation of National Defence, 2004, (6): 26-27.
- [3] OSBURN J D M. The role of systems EMC analysis in large system EMC management by equipment EMC assurance[C]//Electromagnetic Compatibility of IEEE, 1991 International Symposium. [S.l.]: IEEE, 1991.
- [4] ZHOU Qi, XIE Yong-jun, CHEN zheng. Prediction of equipment-to-equipment coupling through antennas mounted on an aircraft[J]. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 2007, 21(5): 653-663.
- [5] 仓艳, 胡磊. 军用车辆电磁兼容性设计方法研究[J]. 专用汽车, 2008, (6): 44-46.
CANG Yan, HU Lei. EMC design to the military vehicles[J]. Special Vehicle, 2008, (6): 44-46.
- [6] 苏东林, 雷军, 王冰切. 系统电磁兼容技术综述与展望[J]. 宇航计测技术, 2007, (21): 34-38.
SU Dong-lin, LEI Jun, WANG Bing-qie. Review and perspective of system-level EMC technologies[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2007, (21): 34-38.
- [7] 邱扬, 俞智敏, 袁军, 等. 车载通信系统无线设备间谐波干扰量仿真分析[J]. 舰船电子工程, 2004, 24(21): 152-154.
QIU Yang, YU Zhi-min, YUAN Jun, et al. Simulation to the harmonics interference among vehicle-carried wireless equipments[J]. Ship Electronics Engineering, 2004, 24(21): 152-154.
- [8] CARSON B, RANGA T, GARY S. EMI modeling and Characterization of the rhino SMPS[C]//Ansoft Boston EMI Seminar. [S.l.]: [s.n.], 2006.
- [9] 唐星海, 虞学犬. 系统级EMC设计应用探索[C]//2006 Ansoft年会. [S.l.]: [s.n.], 2006.
TANG Xing-hai, YU Xue-quan. Research on the system level EMC design[C]//2006 Ansoft Roadshow. [S.l.]: [s.n.], 2006.
- [10] 苏东林, 王冰切, 金德琨, 等. 电子战特种飞机电磁兼容预设计技术[J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(10): 1241-1245.
SU Dong-lin, WANG Bing-qie, Jin De-kun, et al. EMC pre-design technologies on EW special aircraft[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(10): 1241-1245.
- [11] 刘莹. 基于软件仿真的系统级EMC设计[J]. 地球资源, 2009, 1: 45-48.
LIU Ying. System level EMC design using EDA tools[J]. Global Sources, 2009, 1: 45-48.
- [12] DAVID M P. Microwave engineering[M]. [S.l.]: John Wiley & Sons Inc, 2005: 313-315.
- [13] DAVID A. Weston, electromagnetic compatibility, principle and applications[M]. New York: Marcel Dekker Inc, 1991: 236-240.
- [14] 谢拥军. HFSS原理与工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 58-59.
XIE Yong-jun. HFSS foundations and applications[M]. Beijing: Science Press, 2009: 58-59.
- [15] BARDI I V M, CENDES Z J. Modeling large screens via homogenization with the finite element method[C]//Microwave Symposium Digest, IEEE MTT-S International. [S.l.]: IEEE, 2006: 1315-1318.
- [16] 汪剑鸣, 许镇琳. 利用混沌提高dc/dc变换器的EMC性能[J]. 电子科技大学学报, 2004, 33(10): 586-589.
WANG Jian-ming, XU Zhen-lin. Improve EMC of dc/dc converter by chaos[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2004, 33(10): 586-589.

编辑 税红

(上接第710页)

- [8] MITTERMAYER J, WENDLER M. Data processing of an innovative forward looking SAR system for enhanced vision [C]//EUSAR 2000. Munich, Germany: VDE VERLAG, 2000.
- [9] 曹建蜀, 汪学刚. 机载前向阵雷达近程杂波频移补偿[J]. 电子科技大学学报, 2006, 35(3): 320-323.
CAO Jian-shu, WANG Xue-gang. Doppler compensation in airborne forward-looking radar for ground short range clutter[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2006, 35(3): 320-323.
- [10] 陈琦, 杨汝良. 机载前视合成孔径雷达Chirp Scaling成像算法研究[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(1): 228-232.
CHEN Qi, YANG Ru-liang. Research of chirp scaling imaging algorithm for air-borne forward-looking SAR[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2008, 30(1): 228-232.
- [11] 陈琦. 机载斜视及前视合成孔径雷达系统研究[D]. 北京: 中国科学院电子学研究所, 2006.
CHEN Qi. Study on systems of airborne squint mode and forward looking mode synthetic aperture radar[D]. Beijing: Institute of Electronics, of Chinese Academy of Sciences, 2006.
- [12] ISHIMARU A, CHAN T K, KUGA Y. An imaging technique using confocal circular synthetic aperture radar [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1998, 36(5): 1524-1530.

编辑 税红