

## 技术专论

## 战场电磁兼容预测中的接收机建模研究

徐英, 李修和

(电子工程学院, 合肥 230037)

**摘要:** 目的 建立战场电磁兼容预测分析的接收机数学模型, 包括接收机频率选择性模型、敏感度门限模型、互调模型及与接收机有关的修正系数计算模型等。方法 在分析接收机干扰类型的基础上, 建立上述数学模型, 并探讨模型中的参数获取方法。结果 给出了频率选择性模型分段折线斜率常数的获取方法, 并对相关的互调系数、保护比等重要参数的实验测量方法进行了分析。结论 建模结果可支持战场电磁接收装备仿真, 为战场电磁兼容预测分析奠定基础。

**关键词:** 接收机; 电磁兼容; 模型; 预测; 测量

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2015.01.016

**中图分类号:** TJ06; TN83 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2015)01-0082-05

## Research on the Receiver Modeling in Forecast Simulation of Electromagnetic Compatibility

XU Ying, LI Xiu-he

(Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

**ABSTRACT: Objective** To build receiver mathematical model for forecast simulation of electromagnetic compatibility, including receiver frequency selective model, susceptibility threshold model, inter-modulation model, and correction factor calculation model related with the receiver, etc. **Methods** Based on the analysis of the interference types of receiver, the aforementioned mathematical models were built, and the measure methods of correlative parameters were discussed. **Results** The methods for obtaining the piecewise polyline slope constant of the frequency selective model were presented, and the experimental measurement methods for important parameters such as inter-modulation factor and frequency protection ratio were analyzed. **Conclusion** The result of receiver modeling could support electromagnetic receiver simulation in battlefield, and lay a basis for predictive analysis of electromagnetic compatibility in battlefield.

**KEY WORDS:** receiver; electromagnetic compatibility; model; forecast; measurement

随着信息化武器装备在战场上的大量使用, 在有限的战场空间中各种电磁辐射源密集分布, 对电磁装备间的电磁兼容性提出了更高的要求。复杂电磁环境下己方武器装备间电磁兼容性差所造成的自

收稿日期: 2014-10-28; 修订日期: 2014-11-25

Received: 2014-10-28; Revised: 2014-11-25

基金项目: 重点预研基金项目(9140A33020112JB39085)

Fund: Supported by Major Project of the Weapon and Equipment Pre-Research Foundation(9140A33020112JB39085)

作者简介: 徐英(1979—), 女, 博士后, 讲师, 主要研究方向为战场电磁兼容。

Biography: XU Ying(1979—), Female, Post doctor, Lecturer, Research focus: battlefield electromagnetic compatibility.

扰和互扰是影响武器装备效能发挥的重要因素。战场电磁兼容分析是检验装备间电磁兼容性和论证装备作战运用的重要手段,基于电磁干扰预测方程<sup>[1]</sup>的系统间电磁兼容预测<sup>[2]</sup>是进行战场电磁兼容分析的前提,而建立接收机模型是进行战场电磁兼容预测<sup>[3]</sup>的基础。

接收机对干扰信号是否产生响应,即是否会受到电磁干扰,取决于接收机收到的干扰功率与其敏感电平阈值<sup>[4]</sup>(敏感度门限)的关系,受到接收机频率选择性、非线性<sup>[5-6]</sup>和极化方式等多方面因素的影响,通常采用分级筛选法<sup>[7-8]</sup>或DNA<sup>[9]</sup>技术进行预测。秦森<sup>[10]</sup>等针对电磁兼容效能评估的四级筛选,建立了各评估步骤中的接收机模型,但没有考虑接收机极化和带宽的影响。文中在此基础上,给出了包括接收机频率选择性模型、敏感度门限模型、互调和交调模型,以及极化失配因子和带宽修正因子在内的接收机模型,介绍了模型中相关常数的确定方法,并对涉及的互调系数、保护比等接收机参数的实验测量方法进行了探讨。

## 1 接收机干扰类型分析

接收机干扰主要有同频干扰、邻频干扰及带外干扰等3种干扰类型。对于超外差接收机,还应考虑镜频干扰,以及落到中频滤波器带内的干扰。

通过干扰信号与接收机的频率、带宽关系可以判断干扰的类型,见表1。其中 $f_i$ 为接收机接收频率, $B_r$ 为接收机接收带宽, $f_c$ 为干扰信号中心频率, $B_c$ 为干扰信号频带宽度, $f_c$ 为接收机的第一中频, $B_c$ 为接收机的第一中频带宽。

表1 干扰类型判断条件

Table 1 Criteria of interference types

干扰类型	干扰信号与接收机频率和带宽的关系
同频干扰	$ f_i - f_c  < (B_r + B_c)/2$
邻频干扰	$B_r >  f_i - f_c  - (B_r + B_c)/2 > 0$
镜频干扰	$\ f_i - f_c  - 2f_c(B_r + B_c)/2$

## 2 接收机建模研究

### 2.1 频率选择性模型

接收机受干扰影响的程度取决于其频率选择特性,通常接收机的基频和最窄带宽由设备规格说明

书给出。接收机的频率选择性 $S(\Delta f)$ 可以用频率间隔 $\Delta f$ 的分段线性函数来表示<sup>[7]</sup>:

$$S(\Delta f) = S(\Delta f_i) + S_i \lg(\Delta f / \Delta f_i) \quad (\Delta f_i < \Delta f \leq \Delta f_{i+1}) \quad (1)$$

式中: $\Delta f = |f - f_{on}|$ ;  $S(\Delta f)$ 为 $\Delta f$ 处的接收机频率选择性, dB;  $S_i$ 为第 $i$ 段选择性曲线的斜率;  $\Delta f_i$ 为第 $i$ 段折线起点对应的频率与中心频率的差值, Hz, 各 $\Delta f_i$ 的取值取决于近似法要求的准确度。

当有现成的测量数据时,斜率常数可由统计数据得到,由下式决定:

$$S_i = [S(\Delta f_{i+1}) - S(\Delta f_i)] / [\lg(\Delta f_{i+1}) - \lg(\Delta f_i)] \quad (2)$$

可以取各折线线段的起止频率范围为频率变化一个倍频程,根据其衰减特性确定模型中的斜率常数。为了分析工作频率相近的设备间的电磁兼容情况,仿真实验发现,更为合适的方法是利用3, 6, 10, 20, 60和100 dB等带宽处的衰减特性来计算模型中的各斜率值。

当无法获得具体测量数据时,文献[11]提出可由频谱特征数据建立统计综合模型,见表2。其中 $B_R$ 为接收机的3 dB带宽,但该模型难以反映出不同类型滤波器之间的差异。

表2 频率选择性模型常数<sup>[11]</sup>

Table 2 Slope constant of the frequency selectivity model

调制类型	$i$	$\Delta f_i$	$S(\Delta f_i)$	$S_i$
任意	0	0	0	0
	1	$0.5B_R$	0	-100

此时,可由接收机的滤波器因数 $\lambda$ (又称矩形参数,60 dB带宽与3 dB带宽的比值)建立简化折线模型,模型常数见表3。

表3 已知滤波器矩形系数计算频率选择性模型常数

Table 3 Slope constant of the frequency selectivity model calculated with the known rectangle coefficient of the filter

$i$	$\Delta f_i$	$S(\Delta f_i)$	$S_i$
0	0	0	0
1	$0.5B_R$	0	$-60/\lg \lambda$
2	$0.5 \lambda B_R$	-60	0

此外,也可以根据滤波器类型和参数来仿真滤波器频率选择性曲线<sup>[12-13]</sup>,根据需要设定各折线段的起止频点(如3, 6, 10, 20, 60和100 dB等带宽处),由各点带宽和衰减特性计算模型中的斜率常数 $S_i$ 。以巴特沃斯滤波器为例,设带通滤波器的通带截止频率 $\omega_p = [20, 30]$  MHz, 阻带截止频率 $\omega_s = [15, 35]$  MHz,

$R_p=3, R_s=40$ , 采样频率 $f_s=100\text{MHz}$ , 实际频率选择性曲线如图1所示, 考虑3, 6, 10, 20, 40, 60, 100和200 dB等带宽处的衰减特性建立的频率选择性折线如图2所示, 对应的各折线段斜率常数见表4。

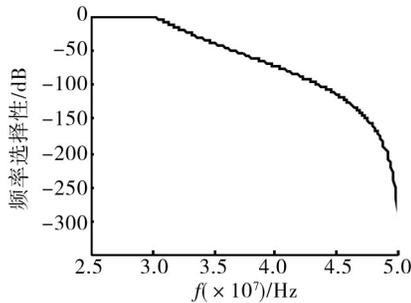


图1 实际频率选择性曲线

Fig.1 Actual frequency selectivity curve

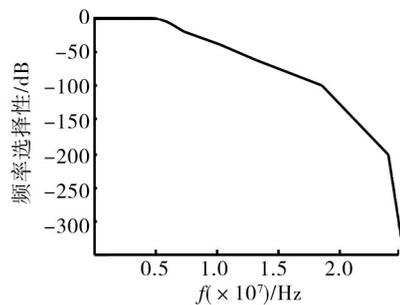


图2 考虑x dB带宽建立的频率选择性分段折线拟合

Fig.2 Piecewise polyline approximation of frequency selectivity considering x dB band

表4 考虑x dB带宽建立的频率选择性折线斜率常数

Table 4 Piecewise polyline slope constant of the frequency selectivity model considering x dB band

$i$	$\Delta f_i/\text{MHz}$	$M(\Delta f_i)/\text{dB}$	$M_i$
0	0	0	0
1	5.273	0	-156.0
2	5.762	-6	-113.2
3	6.250	-10	-134.0
4	7.422	-20	-146.8
5	10.156	-40	-176.5
6	13.184	-60	-265.4
7	18.652	-100	-895.5
8	24.121	-200	-7856.5

## 2.2 敏感度门限模型

通过实验或理论分析可以获得接收机性能度量(信噪比、误码率等)与敏感度之间的关系, 对于战场电磁兼容性预测分析, 只关心敏感度门限, 而不在意

接收系统具体的内部结构。

1) 同频敏感度门限。同频敏感度门限可由实验确定, 由测量数据统计得到其均值和标准偏差。当无法获得实验数据时, 同频敏感度门限均值取为需考虑的最小干扰信号电平, 即接收机噪声电平, 标准偏差取为2 dB。如果没有现成的接收机噪声电平数据, 同频敏感度门限可由接收机带宽 $B_R$ 和噪声系数 $F$ 计算得到:

$$P_R(f_{OR})=10 \lg(FkTB_R)=256.07+10 \lg(FB_R) \quad (3)$$

式中: $P_R(f_{OR})$ 为同频敏感度, dB; $k$ 为玻尔兹曼常数,  $k=1.38 \times 10^{-23}$  J/K; $T$ 为温度, K, 通常取293 K。同频敏感度门限模型同时也用于邻频干扰预测。

2) 带外敏感度门限。超外差接收机中, 带外信号可能被混频并转换成中频通带频率, 使接收机产生响应。对单次变频超外差接收机, 产生乱真响应的频率为<sup>[10]</sup>:

$$f_{SR}=\left| \frac{pf_{LO} \pm f_{IF}}{q} \right| \quad (4)$$

式中: $p$ 为本振谐波数; $q$ 为干扰信号谐波数; $f_{LO}$ 为本振频率; $f_{IF}$ 为中频。

接收机的带外敏感度门限可以表示为:

$$P_R(f_{SR})=P_R(f_{OR})+I \lg(f_{SR}/f_{OR})+J \quad (5)$$

式中: $P_R(f_{SR})$ 为接收机带外敏感度门限; $P_R(f_{OR})$ 为同频敏感度门限; $I$ (dB/10倍频)和 $J$ (dB)是与接收机有关的常数, 可由接收机规格说明书或测量数据综合统计得到。当没有现成的测量数据时,  $I$ 和 $J$ 的取值见表5<sup>[14]</sup>。

表5 综合统计得出的接收机乱真响应模型常数

Table 5 Constants of the spurious response model based on the statistic data

$f_{SR}$ 范围/ MHz	$f_{SR} > f_{OR}$			$f_{SR} < f_{OR}$		
	$I$	$J$	$\sigma_R(f_{SR})$	$I$	$J$	$\sigma_R(f_{SR})$
$f_{SR} < 30$	25	85	15	-20	80	10
$30 \leq f_{SR} \leq 300$	35	85	15	-20	80	10
$f_{SR} > 300$	40	60	15	-20	80	10

## 2.3 互调模型

互调干扰产生的根本原因是器件的非线性, 特别是三阶互调干扰危害最大。由于接收机的输入电路对频率靠近其工作频率的干扰信号不会有很大的抑制作用, 因此可能对接收机形成三阶互调干扰的信号应满足下述关系:

$$P_{sr}-P_{imo} < A \quad (6)$$

对两信号三阶互调(三阶-1型互调):

$$f_0 - \frac{B_R}{2} \leq 2f_1 - f_2 \leq f_0 + \frac{B_R}{2} \quad (7)$$

对三信号三阶互调(三阶-2型互调):

$$f_0 - \frac{B_R}{2} \leq f_1 + f_2 - f_3 \leq f_0 + \frac{B_R}{2} \quad (8)$$

式中: $P_{sr}$ 为有用信号的功率; $P_{imo}$ 为接收机输入端的等效互调干扰功率; $A$ 为同频保护比; $f_1, f_2, f_3$ 为输入干扰信号频率, $f_0$ 为接收机频率,且满足条件 $|f_1 - f_0| < |f_2 - f_0| < |f_3 - f_0|$ ;  $B_R$ 为中频带宽或(在没有中频级时的)基带滤波器带宽。

以两信号三阶互调(三阶-1型互调)为例,考虑频率选择性,互调干扰功率可表示为:

$$P_{imo} = 2(P_1 - \beta_1) + (P_2 - \beta_2) - K_{2,1} \quad (9)$$

式中: $P_1, P_2$ 分别为频率 $f_1$ 和 $f_2$ 上的干扰信号功率; $P_{imo}$ 为频率 $f_0$ 附近中频带宽内的三阶互调产物功率; $\beta_1$ 和 $\beta_2$ 分别为相对工作频率 $f_0$ 频偏为 $\Delta f_1$ 和 $\Delta f_2$ 处的频率选择性参数; $K_{2,1}$ 为三阶互调系数,可以从设备参数获得或根据三阶互调测量结果计算得到(见3.1节)。

### 2.4 修正因子计算模型

1) 极化失配因子。收发天线极化匹配系数定义为实际收到的功率与极化匹配时收到的功率之比。电波的极化有3种形式:线极化、圆极化和椭圆极化。线极化与圆极化天线间的匹配系数为 $v=1/2$ ,线极化天线之间的极化匹配系数是发射平面和接收平面所构成的二面角的余弦平方<sup>[15]</sup>。定义极化失配因子 $L_p$ 与极化匹配系数 $v$ 的关系为:

$$L_p = 10 \lg v \quad (10)$$

2) 带宽和频率间隔修正因子。在调谐( $\Delta f \leq \frac{B_T + B_R}{2}$ )情况下,当接收机带宽大于等于干扰发射机带宽时,发射机的输出功率都被接收机接收,此时接收机对干扰信号没有抑制。反之,当接收机带宽小于干扰发射机带宽时,接收机只能接收到干扰发射机的部分输出功率。此时需要考虑发射机带宽 $B_T$ 和调制特性、接收机带宽 $B_R$ 和选择性,以及发射机输出与接收机响应之间的频率间隔 $\Delta f$ ,即考虑发射机调制包络和接收机选择性曲线。由发射机带宽、接收机带宽和 $\Delta f$ ,对干扰模型进行修正,修正因子可取为:

$$CF = K \lg \left( \frac{B_R}{B_T} \right) \quad (11)$$

式中: $K$ 为常数,当采用均方根电平类似噪声的信号时 $K$ 取为10,当采用峰值电平的脉冲信号时 $K$ 取为20。

在失谐( $\Delta f > \frac{B_T + B_R}{2}$ )情况下,若发射机发射调制边带在主响应频率进入接收机:

$$CF_R(\Delta f) = \left[ K \lg \left( \frac{B_R}{B_T} \right) + M(\Delta f) \right] \quad (12)$$

式中: $M(\Delta f)$ 为发射机调制包络表示的功率谱。若发射机主输入频率的功率进入接收机失谐响应:

$$CF_T(\Delta f) = -S(\Delta f) \quad (13)$$

式中: $S(\Delta f)$ 为接收机频率选择性。

由于失谐情况下发射机输出和接收机响应不是完全对准的,因此最终的带宽和频率间隔修正因子是 $CF_R(\Delta f)$ 和 $CF_T(\Delta f)$ 中的较大者。

## 3 接收机相关参数的测量

### 3.1 接收机互调系数的测量

接收机三阶互调系数 $K_{2,1}$ 的测量如图3所示。有用信号发生器发射的信号(幅度为 $P_{sr}$ ),和两个干扰信号发生器分别发射的具有相同幅度的两个干扰信号,都输入到接收机,此时,两个干扰信号发生互调。使第一个干扰信号频率失谐为 $\Delta f_0$ ,第二个干扰信号的失谐近似等于 $2\Delta f_0$ 。逐步增加两个干扰信号幅度,直到有用信号接收质量降低到设定的最低阈值,此时干扰信号幅度达到 $P_1(IM)$ 。

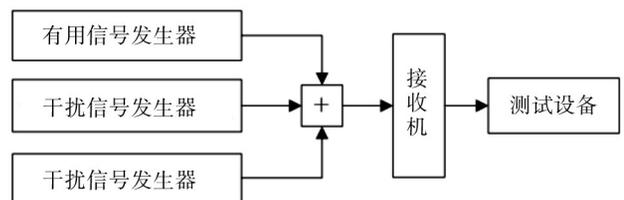


图3 接收机互调测试

Fig.3 Scheme of receiver inter-modulation test

由三阶互调干扰功率计算公式(式(9))可得:

$$P_{imo} = 3P_1(IM) - 2\beta(\Delta f_0) - \beta(2\Delta f_0) - P_{sr} + A \quad (14)$$

此时,三阶互调产物功率 $P_{imo}$ 与 $P_{sr}$ 的关系有:

$$P_{sr} - A = P_{imo} \quad (15)$$

式中: $A$ 为接收机射频保护比,测量方法见3.2节。因此,接收机互调系数为:

$$K_{2,1} = 3P_1(IM) - 2\beta(\Delta f_0) - \beta(2\Delta f_0) - P_{sr} + A \quad (16)$$

### 3.2 接收机射频保护比的测量

接收机射频保护比是指保证一定接收质量时,接收机输入端有用信号与无用信号之比。射频保护比测量系统包括电波暗室和(屏蔽)控制室两部分,如图4所示<sup>[6]</sup>。其中,控制计算机与矢量信号源组成干扰信号产生分系统;测量接收机、可调衰减器和测量天线组成信号功率监测分系统,用于测试信号功率;发射机、衰减器、接收机和误码仪组成信号测试分系统,利用误码仪监视接收机输出端误码率,即接收信号的质量。

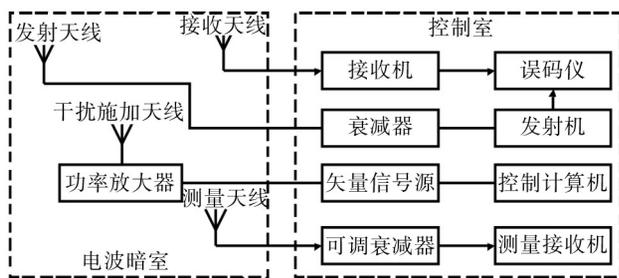


图4 射频保护比测试

Fig.4 Scheme of radio frequency protection ratio test

实验时,发射、接收天线以及干扰施加天线的布置应满足远场条件。首先,在没有干扰时记录测量天线端测得的信号功率 $S$ ;由计算机控制矢量信号源产生干扰信号,并使干扰信号中心频率与接收机工作频率频偏为 $\Delta f$ ;慢慢增加干扰信号功率,直到观察到接收机输出端误码率下降到设定值;然后关闭发射机,并记录此时测量天线端测得的干扰信号功率 $N$ ;计算得到该 $\Delta f$ 处的射频保护比 $A(\Delta f)=10 \lg(S/N)$ ;改变 $\Delta f$ ,重复上述实验步骤,即可获得接收机射频保护比曲线。

## 4 结论

建立接收机模型是进行战场电磁兼容预测分析的基础,主要包括对接收机频率选择性、敏感度门限和互调干扰建模,同时考虑到天线极化失配及收发系统带宽和频率间隔的影响,需要进行相应的修正。文中给出了详细的接收机数学模型,探讨了频率选择性模型分段折线斜率常数的获取方法,并分析了对互调系数和射频保护比的实验测量方法。研究结果对战场电磁兼容预测中的接收机建模具有指导意义,可直接用于战场电磁干扰计算与电磁兼容预测分析。

### 参考文献:

[1] 何新亮,赵兴录,盛松林,等. 电磁兼容预测中雷达发射机模型研究[J]. 现代雷达,2010,32(12):83—87.  
HE Xin-liang, ZHAO Xing-lu, SHENG Song-lin, et al. A Study on Radar Transmitter Models for EMC Prediction[J]. Modern Radar, 2010, 32(12): 83—87.

[2] DONGLIN S, WENQING C, YAN L, et al. A Novel Method of Top-level EMC Design Technology for Large and Complex Electronic Information Systems[C]// Antennas, Propagation and EM Theory, 2008 ISAPE 2008 8th International Symposium on IEEE, 2008.

[3] 曾国奇,李思吟,熊小军. 复杂电磁环境下电子系统抗干扰性能仿真平台设计[J]. 计算机测量与控制, 2013, 21(4): 1077—1080.  
ZENG Guo-qi, LI Si-yin, XIONG Xiao-jun. Design of Electronic System Anti-interference Performance Simulation Platform under Complex Electromagnetic Environment [J]. Computer Measurement & Control, 2013, 21(4): 1077—1080.

[4] 马玉林,张文一,孟冲. 复杂电磁环境对装备保障活动的干扰机理研究[J]. 河北科技大学学报, 2011(S1): 31—33.  
MA Yu-lin, ZHANG Wen-yi, MENG Chong. Mechanism of Complex Electromagnetic Environment Interfere Equipment Support[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2011(S1): 31—33.

[5] 陈重. 复杂电磁环境下接收机的非线性研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2011.  
CHEN Zhong. Research on Receiver Non-linearity under Complex Electromagnetic Environment[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2011.

[6] 成伟兰,刘坚强,谌丽. 干扰条件下接收机减敏机理分析[J]. 舰船科学技术, 2012, 34(3): 122—125.  
CHENG Wei-lan, LIU Jian-qiang, CHEN-Li. Analysis of Receiver Desensitization Mechanism in the Presence of Interference[J]. Ship Science and Technology, 2012, 34(3): 122—125.

[7] 徐扬,谭辉,方重华,等. 系统EMI预测分级筛选方法研究[J]. 装备环境工程, 2009, 6(5): 39—41.  
XU Yang, TAN Hui, FANG Chong-hua, et al. Research on Classified Filtration Method for EMI Prediction of System[J]. Equipment Environmental Engineering, 2009, 6(5): 39—41.

[8] 孙鹏才,刘远耀,陈庆,等. 系统电磁兼容层次化预测方法研究[J]. 舰船科学技术, 2008, 30(4): 89—92.  
SUN Peng-cai, LIU Yuan-yao, CHEN Qing, et al. Research on Multilevel Prediction Method for Systematic Electromag  
(下转第101页)

- [10] 付桂翠,王香芬,姜同敏.高可靠性航空电子设备热分析中的有限体积法[J].北京航空航天大学学报,2006,32(6):716—720.  
FU Gui-cui, WANG Xiang-fen, JIANG Tong-min. Finite Volume Method in Thermal Analysis of Avionics[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(6):716—720.
- [11] 赵悼爻.电子设备热设计[M].北京:电子工业出版社,2009.  
ZHAO Dun-shu. Thermal Design of Electronic Equipment

[M]. Peking: Electronic Industry Press, 2009.

- [12] GJB/Z 27—92, 电子设备可靠性热设计手册[S].  
GJB/Z 27—92, Electronic Equipment Reliability Thermal Design Guide[S].
- [13] 刘家磊,蔡琦,张杨伟,等.稳压器在船用核反应堆舱室散热的模拟研究[J].四川兵工学报,2013(11):48—51.  
LIU Jia-lei, CAI Qi, ZHANG Yang-wei, et al. Simulation of Heat Transfer of Pressurizer in Ship Nuclear Power Plant Cabin[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2013(11):48—51.

(上接第96页)

及使用要求。

综上所述,正样机功能及主要性能满足战术技术指标要求。

#### 参考文献:

- [1] MICHAEL G P, KAILASH C K. 可靠性工程基础[M]. 康锐,张叔农,译.北京:电子工业出版社,2011.  
MICHAEL G P, KAILASH C K. Reliability Engineering Foundation[M]. KANG Rui, ZHANG Shu-nong, Translate. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011.

- [2] 中国兵器工业集团公司.质量检验人员培训教材光电[M].北京,国防工业出版社,2007.  
Norinco Groups. Quality Examine Staff Teaching Material (Light and Electricity) [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007.
- [3] GJB 74A—1998, 军用地面雷达通用规范[S].  
GJB 74A—1998, Military Ground Radar Common Criterion [S].
- [4] GJB 899—90, 可靠性鉴定和验收试验[S].  
GJB 899—90, Reliability Qualification and Acceptance Test [S].

(上接第86页)

netic Compatibility Technology[J]. Ship Science and Technology, 2008, 30(4): 89—92.

- [9] 达拉基米尔.系统级电磁兼容分析的离散技术及应用综述[J].宇航计测技术,2007(z1):39—44.  
MORDACHEV V. Discrete Technology of Electromagnetic Compatibility Analysis at the System Level and Applications Overview[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2007(z1):39—44.
- [10] 秦森,杨澄清,赵家升,等.接收机电磁兼容效能评估模型研究[C]//2007年全国微波毫米波会议论文集.2007:1506—1562.  
QIN Miao, YANG Xian-qing, ZHAO Jia-sheng, et al. Research on the Electromagnetic Compatibility Problem of Receiver[C]// Proceedings of the 2007 microwave & millimeter wave convention. 2007:1506—1562.
- [11] 陈鸿.系统间电磁兼容性预测分析与仿真[D].成都:电子科技大学,2006.  
CHEN Hong. Analysis and Simulation of Intersystem Electromagnetic Compatibility Prediction[D]. Chengdu: University of electronic science and technology, 2006
- [12] DAVID M Pozar. 微波工程[M].北京:电子工业出版社,2010.  
DAVID M Pozar. Microwave Engineering[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2010.
- [13] 贾传钊.通信系统间电磁兼容性预测分析技术[D].成都:

电子科技大学.2009.

- JIA Chuan-zhao. Intersystem Electromagnetic Compatibility Prediction and Analysis Technique about Communication [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology. 2009
- [14] 王海波.系统间电磁兼容性预测分析软件的开发与研究[D].成都:电子科技大学,2008.  
WANG Hai-bo. Research and Development of Intersystem Electromagnetic Compatibility Prediction and Analysis[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2008.
- [15] 张建华,周晓辉,蒋鹏.机载天线极化失配及方向性的分析计算[J].电波科学学报,2007,22(3):497—501.  
ZHANG Jian-hua, ZHOU Xiao-hui, JIANG Peng. Analysis of Polarization Mismatching and Radiation Pattern of Aircraft Antenna[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2007, 22(3):497—501.
- [16] 卢西义,应鲁曲,肖凯宁.基于射频保护比实测数据的无线通信系统兼容性分析方法研究[C]//2011年青年通信国际会议论文集.2011:39—42.  
LU Xi-yi, YING Lu-qu, XIAO Kai-ning. Research on Compatibility Analysis Approach of Radio Communication Systems Based on measured radio Frequency Protection Ratio[C]// The 2011 International Conference of Youth Communication. 2011:39—42.