

北斗机载接收机传导敏感度测试*

刘瑞华 商鹏 梁欣萌

(中国民航大学 电子信息与自动化学院 天津 300300)

摘要: RTCA/DO-160G 第 20 章中的射频敏感度测试方法广泛用于民用航空航空部门进行系统级或单元级电子设备的敏感度验证。基于 RTCA/DO-160G 第 20 章中传导敏感度测试的测试程序,首先利用散射参数建立了校准阶段的理论模型,并通过测试结果验证其有效性,同时表明注入探头的性能在传导敏感度测试中的重要作用。其次根据所需的两种测试信号建立了相应的敏感度评估模型,实际得到的敏感度阈值最小值分别为 26、26.1 dBm,与理论模型一致性良好。最后基于蒙特卡洛方法对测试进行了不确定度评定测试所得的扩展不确定度为 2.60 dB,小于 CISPR 规定值,可为传导敏感度测试中出现的敏感现象提供判定依据,为民用北斗机载接收机的传导敏感度测试提供理论参考和实践依据。

关键词: 传导敏感度;敏感度评估;不确定度评定;机载设备

中图分类号: TN98; **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1099

Conducted susceptibility test of Beidou airborne receiver

Liu Ruihua Shang Peng Liang Xinmeng

(College of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: The testing method of RTCA/DO-160G section 20 has been widely utilized in civil aviation sector to verify the susceptibility of electronic equipments both at the system and at the unit level. Based on the procedure of section 20 originated from RTCA/DO-160G, a theoretical model of calibration phase was proposed by means of scattering parameter and validated its effectiveness through measurements, besides, the performance of injection probe also play a major role in conducted susceptibility test. Secondly, the corresponding susceptibility evaluation model was proposed based on the test signal test method, the obtained minimum susceptibility thresholds are 26 and 26.1 dBm, which indicates good agreement with theory. Finally, a measurement uncertainty evaluation based on monte carlo method is conducted. The expanded uncertainty is 2.60 dB lower than the value specified by CISPR, which indicates it can be an evaluation criteria for the susceptibility phenomenon occurring during the conductive susceptibility test. This paper is aimed to provided theoretical reference and practical foundations for conductive susceptibility of Beidou airborne receiver.

Keywords: conductive susceptibility; susceptibility evaluation; measurement uncertainty evaluation; airborne equipment

0 引言

随着北斗卫星导航系统在各个领域的深入应用,针对卫星导航终端的测试规范和标准也在不断成熟和完善中,然而目前对于民用航空领域的北斗机载接收机的电磁兼容标准并未制定。RTCA/DO-160《机载设备环境条件与测试程序》section 20 是广泛采用的射频敏感度测试程序,RTCA 已于 2010 年 12 月 8 日公布了其最新版本 RTCA/DO-160G。

目前,对于传导敏感度测试的研究多通过电路模型或电磁仿真软件对关键测试设备进行性能仿真^[1-4],并未按照标准规定的测试程序进行相应的模型分析,国内对于北斗导航终端的传导敏感度测试研究多集中在按照标准进行符合性测试给出定性结果^[5-7],缺乏相应的理论分析并未就敏感度阈值给出定量结果,实际意义不大。本文根据标准规定的传导敏感度测试程序进行了相应的理论建模与分析,并通过实际测试结果,验证了其有效性,并以某型 GPS/BDS 接收机为测试对象,得到了其抗扰度曲线。

1 传导敏感度测试概述

大电流注入法(bulk current injection,BCI)是 RTCA/DO-160G 中规定的传导敏感度测试方法。

BCI 测试的基本原理为使用注入探头在 10 kHz~400 MHz 频率范围内将预校准的大电流注入与待测设备相连的所有互连线缆上,在此过程中待测设备不应出现任何故障或性能降级。

2 大电流注入法测试程序

RTCA/DO-160G 中的 BCI 测试程序分为校准和正式测试两部分。校准程序获取的正向功率用于为正式测试选择相应的测试等级。

2.1 校准程序分析

典型的校准程序的测试布置如图 1 所示^[8]。电压源的开路电压 V_{RF} 及其内阻 $R_0 = 50 \Omega$ 用于模拟射频信号发生器和放大器, $R_0 = 50 \Omega$ 用于模拟频谱分析仪。这一布置可以看做一个二端口网络, P_{for} 表示进入端口 1 的正向功率, P_{tran} 为 2 端口上产生的功率。

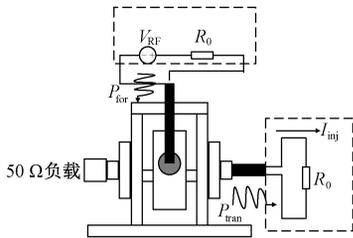


图 1 BCI 校准布置

图 1 中的校准模型可用图 2 所示的二端口网络的散射参数(S 参数)进行描述。以 $R_0 = 50 \Omega$ 作为参考阻抗,由于端口阻抗匹配,端口 2 没有反射波,即 $a_2 = 0$ 。

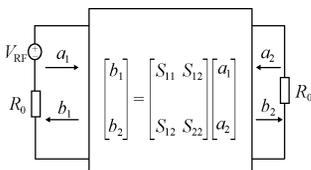


图 2 校准程序二端口网络

根据图 1 和 2 易得式(1)。

$$P_{for} = R_0 \frac{I_{inj}^2}{S_{12}^2} \tag{1}$$

对式(1)取对数可得式(2)。

$$P_{for} |_{dBm} = I_{inj} |_{dBmA} - S_{12} |_{dB} - 13 \tag{2}$$

$S_{12} = -IL$, S_{12} 可以通过矢量网络分析仪测量得到, IL 为注入探头的插入损耗, I_{inj} 为标准规定的测试电平限值,不同测试类型 I_{inj} 的要求如图 3 所示^[9]。

校准程序是以连续波为测试信号进行校准获得的正向

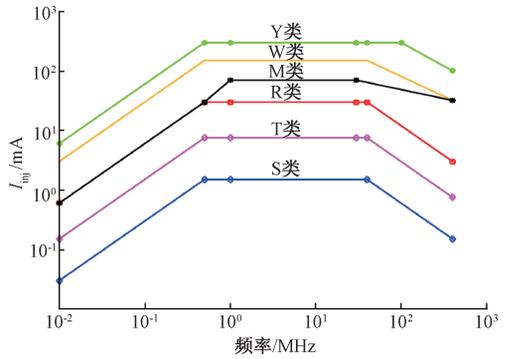


图 3 不同类型测试电平要求

功率。RTCA/DO-160G 同时还规定了在测试中使用 1 kHz 调制深度大于 90% 的 AM 调制,峰值检波,此时需要增加正式测试所需的正向功率,所需的正向功率 P 可以按式(3)估算^[10]。

$$P |_{dBm} = P_{for} |_{dBm} + 10 \log_{10}(1 + 0.9)^2 \tag{3}$$

图 4 所示为实际测试得到的正向功率和通过式(2)理论计算得到的正向功率的对比。

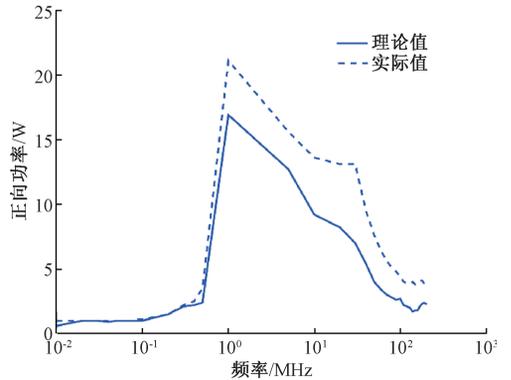


图 4 所需正向功率对比

仿真结果表明理论计算所需的正向功率和实际值属于同一数量级,且变化趋势一致。同时由式(2)可知满足标准规定插入损耗的注入探头的选择比高功率放大器的选择更为重要。

2.2 测试程序分析

BCI 的典型测试布置如图 5 所示。

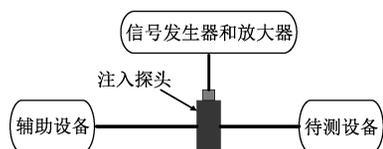


图 5 BCI 典型测试布置

测试过程中线缆上产生的感应电流的大小将作为选择相应测试等级的依据。下面将利用传输线理论,分析对测试结果产生影响的相关因素。

多导体传输线模型如图 6 所示。 Z_0 、 Z_L 分别表示 $x=0$ 、 $x=L$ 处的阻抗矩阵; x_c 、 x_m 分别为注入探头和检测探头的位置,实际的测试过程中是以检测探头处的电流大小确定相应的测试等级。

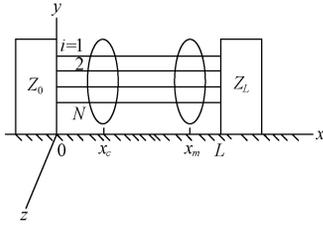


图 6 BCI 多导体传输线模型

文献[11]给出了利用电路模型求解 BCI 测试中传输线终端感应电流的解析方法,将此推广,可得到多导体传输线上感应电流的分布如式(4)和(5)所示。

$$I(x) = [\cos(kx)I_N + j\sin(kx)Z_c^{-1}Z_0]I(0) - j\sin[k(x-x_c)]V_c U(x-x_c) \quad (4)$$

$$I(0) = [\cos(kL)(Z_0 + Z_L) + j\sin(kL)(Z_c + Z_L Z_c^{-1}Z_0)]^{-1} \{ \cos[k(L-x_c)]V_c + j\sin[k(L-x_c)]Z_L Z_c^{-1}V_c \} \quad (5)$$

式中: k 为波数; Z_c 为传输线特性阻; I_N 为 $N \times N$ 的单位矩阵;单导体产生的有效激励电压为 V_c , $U(x-x_c)$ 为阶跃函数。

BCI 电流为各单导体传输线电流之和,如式(6)所示。

$$I_{BCI}(x) = \sum_{i=1}^N I_i(x) \quad (6)$$

注入探头位置影响的中仿真参数如下:线缆半径 $r=0.5$ mm,离地高度 $h=5$ cm,检测探头位置 $x_m=1.8$ m,线缆长度 $L=2$ m。注入探头位置影响的仿真结果如图 7 所示。

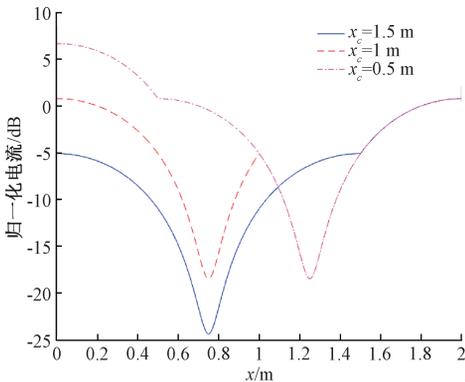


图 7 注入探头位置影响

图 7 中仿真结果表明,注入探头位置对测试结果影响显著。例如 $x=0.75$ m,电流差值高达 24 dB。同时 $x_c=1.5$ m 时的归一化电流最小,表明注入探头离检测探头的位置应尽可能近,RTCA/DO-160G 中给定的注入探头和

检测探头距离为 5 cm。

检测探头位置影响的仿真结果如图 8 所示。图 8 中实线、虚线,点划线分别表示检测探头在 1.8、1.6、1.4 m 处时传输线上电流的分布。仿真结果表明检测探头位置不会对 BCI 电流分布产生较大影响。同时检测探头的最佳位置应尽可能靠近待测设备,RTCA/DO-160G 中给定的检测探头和待测设备上端面的距离为 5 cm。

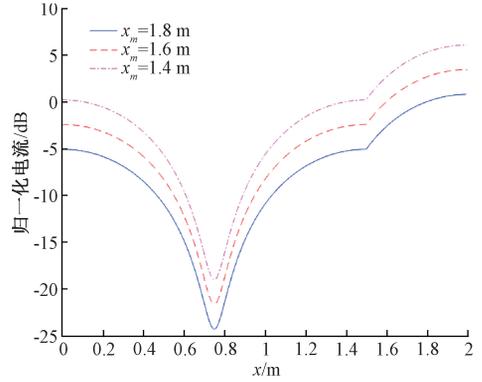


图 8 检测探头位置影响

线缆离地高度影响的仿真结果如图 9 所示。

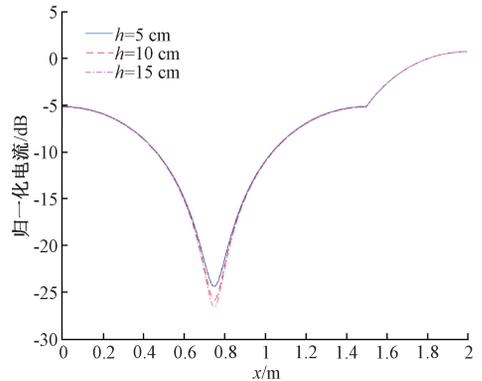


图 9 线缆离地高度影响

图 9 中实线、虚线,点划线分别表示 $h=5$ 、 10 、 15 cm 处时传输线上电流的分布。仿真结果表明 3 种不同高度下电流分布几乎一致,不会对测试结果产生较大影响。RTCA/DO-160G 中给定的线缆离接地平面的距离为 5 cm。

线缆长度影响的仿真结果如图 10 所示。仿真结果表明线缆长度对感应电流的分布影响显著,当线缆长度在 2~3 m 变化时,进入左右两端负载的电流差多达 25 dB,在 $x=0.75$ m 差值接近 26 dB。RTCA/DO-160G 中规定在无特殊说明时,互连线缆线的长度为至少为 3.3 m。

为了简洁未给出对称负载阻抗的仿真结果。理论上 BCI 电流较单导体电流高 6 dB,实际的仿真结果与理论一致。RTCA/DO-160G 端接输入阻抗为 50Ω 的对称阻抗。

负载阻抗非对称影响的仿真结果如图 11 所示。

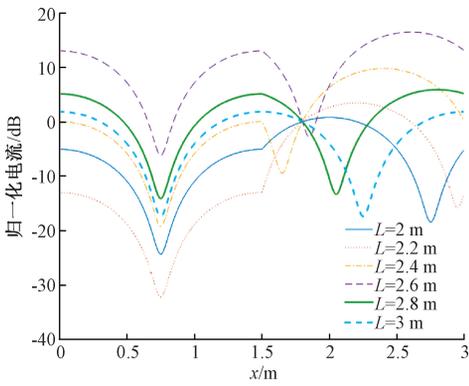


图10 线缆长度影响

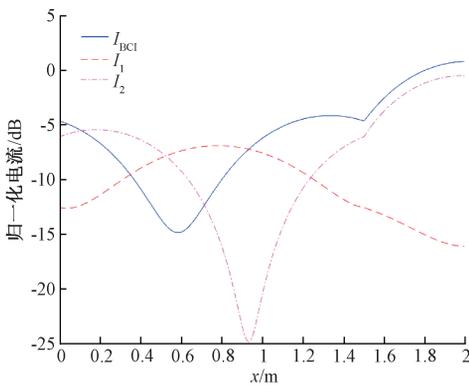


图11 非对称负载影响

图11中实线表示整个线缆的电流,即 I_{BCI} ,虚线、点划线分别代表线电流 I_1 、 I_2 , I_1 、 I_2 分别为传输线1、2上的电流,仿真结果表明 I_1 较 I_2 差别较大,同时出现了BCI电流小于线电流的情形。

通过以上分析表明对传输线上的电流分布影响较大的因素包括注入探头的位置、线缆长度、终端阻抗对称性;影响较小的因素为线缆离接地平面的高度,检测探头的位置。

3 敏感度评估

RTCA/DO-160G中的BCI测试仪做出了定性评价,即测试通过/不通过,为了使测试结果有一定的实践指导意义,需要获得北斗接收机的敏感度阈值,即接收机能够正常工作不受外界电磁环境干扰的最高电平。

3.1 敏感信号

北斗接收机传导敏感度所需的测试信号分为有用信号和敏感信号两类。有用信号为北斗卫星信号,敏感信号为传导干扰信号,包括连续波和调幅连续波两种。

连续波干扰信号表达式如(7)所示。

$$I_{sin}(t) = I_{sinp} \cos(2\pi ft) \quad (7)$$

式中: I_{sinp} 为信号峰值; f 为频率。

调幅连续波表达式如式(8)所示。

$$I_{am}(t) = I_{am}(1 + m \cos(2\pi f_0 t)) \cos(2\pi ft) \quad (8)$$

式中: $f_0 = 1 \text{ kHz}$, $m \geq 0.9$,取 $m = 1$,信号峰值 $I_{amp} = 2I_{am}$ 。

由于测试频率范围为 $10 \text{ kHz} \sim 400 \text{ MHz}$,北斗接收机工作频率为 1561.098 MHz ,对于接收机的影响主要是强干扰信号造成接收机射频前端饱和所致。

3.2 敏感现象及敏感度阈值

实际测试过程中,通过改变馈入定向耦合器的正向功率,当接收机出现敏感现象时的正向功率即为此频点下的敏感度电平。

可能出现的便于监测的敏感现象可以通过与接收机配套的软件观察是否出现失锁,信噪比下降,定位信息是否出现乱码或丢失等现象^[12]。

敏感度阈值的确定方式如下:1)接收机出现敏感现象时,降低干扰信号功率,直到接收机恢复正常工作;2)将干扰功率降低 6 dB ;3)逐渐增加干扰信号功率直至接收机再次出现敏感现象。此时的正向功率即为相应的敏感度门限。

由于采用峰值检波方式,当式(7)中 $I_{sinp} = I_{amp} = 2I_{am}$,连续波和调幅连续波将会达到相同的敏感度阈值,此时连续波和调幅波的峰值阈值比为 $1^{[13]}$ 。

3.3 敏感度测试

测试布置如图12所示。

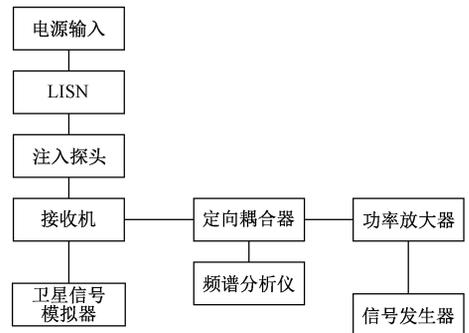


图12 测试布置

由于采用手动方式测量,工作量大,仅在有限频点上进行,测试流程如图13所示^[14]。

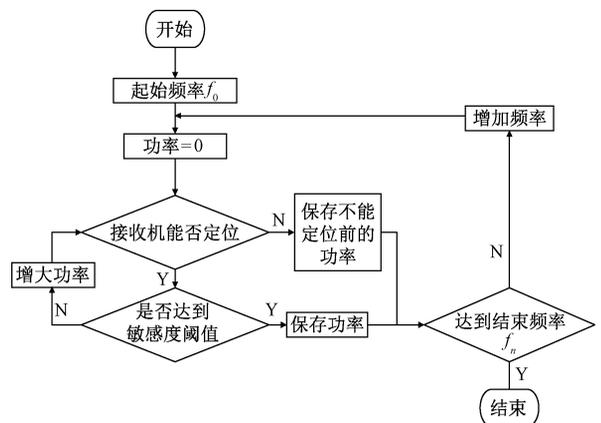


图13 测试流程

连续波和方波调幅连续波的测试结果如表 1 所示。

表 1 北斗接收机的正向功率阈值

频率/MHz	CW/dBm	AM/dBm	比值
0.01	26	26.1	0.98
0.05	44	44.2	0.95
0.1	47	47.4	0.92
1	46	46.3	0.93
10	45	45.4	0.92
20	51	51.6	0.87
50	33	33.6	0.88

表 1 中 CW 表示连续波, AM 为调幅连续波, 两种敏感信号正向功率阈值的比值的平均值为 0.92, 对接收机的影响基本一致, 接近峰值检波方式下, 两种敏感信号阈值为 1 的理论结果。

3.4 不确定度评定

为了保证测试结果的可重复性和可靠性必须对大电流注入法进行不确定度评定, 不确定度的估计结果可用于对测试结果进行修正。

传统使用测量不确定度评定导则 (guide to the expression uncertainty in measurement, GUM) 进行不确定度评定, 以下将采用基于统计理论的蒙特卡洛方法 (monte carlo method, MCM) 进行不确定度评定。

测量模型如式(9)所示^[15]。

$$I = P + K_a + K_b + K_c + VL_{av} + P_d + P_{ah} + M_{ac} + R_s \quad (9)$$

式中: I 为实际注入受试线缆的电流, 单位为 $\text{dB}\mu\text{A}$; P 为测量的功率值, 单位为 dBm ; K_a 为线缆损耗, 单位为 dB ; K_b 为注入探头误差, 单位为 dB ; K_c 为定向耦合器耦合度, 单位为 dB ; VL_{av} 为功率电平可接受窗口, 单位为 dB ; P_d 为信号发生器漂移, 单位为 dB ; P_{ah} 为功率放大器谐波, 单位为 dB ; M_{ac} 失配系数, 单位为 dB ; R_s 为测量系统重复性, 单位为 dB 。

不确定度预算如表 2 所示^[16]。

表 2 大电流注入法不确定度预算

不确定度源	a	概率分布	c_i	k	u_i
P	0.035	矩形	1	1.732	0.02
K_a	0.5	正态	1	2	0.25
	1	正态	1	2	0.5
K_b	0.25	矩形	1	1.732	0.14
	0.5	矩形	1	1.732	0.29
K_c	0.5	矩形	1	1.732	0.29
VL_{av}	0.5	矩形	1	1.732	0.29
P_d	0.2	矩形	1	1.732	0.12
P_{ah}	0.7	矩形	1	1.732	0.4
M_{ac}	-1.16	U 型	1	1.414	-0.82
R_s	0.5	正态	1	1	0.5

表 2 中 c_i, k, u_i 为各个不确定度分量的灵敏度系数, 包含因子, 标准不确定度, 单位为 dB 。

根据不确定度传播律可得理论上的合成标准不确定度为 1.30 dB , 95% 包含概率下 $k=2$ 时的扩展不确定度为 2.60 dB 。GUM 和 MCM 的仿真结果如图 14 所示。

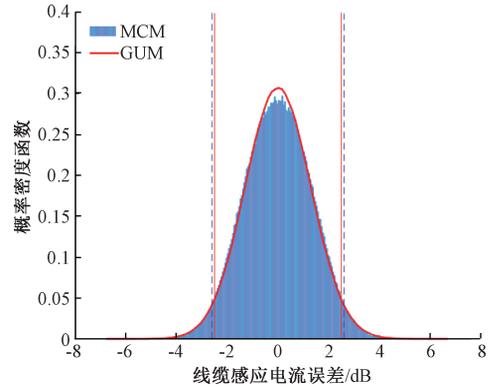


图 14 GUM 与 MCM 对比测试

图 14 中直方图代表 MCM 的仿真结果, 曲线代表 GUM, 仿真结果表明, MCM 与 GUM 线缆感应电流的标准不确定度均为 1.30 dB , 95% 包含概率下的包含区间为 $[-2.59, 2.59]$ dB , $[-2.50, 2.49]$ dB , 仿真结果与理论值基本一致, 同时 MCM 更接近。由于 GUM 方法的局限性, 以及实际测量过程的复杂性, 推荐使用蒙特卡洛法进行不确定度评定能够获得预期结果。

同时此处得到的扩展不确定度为 2.6 dB , 小于 CISPR 标准^[17]规定的 3.6 dB , 验证了此测量模型的有效性。

4 结 论

本文基于 RTCA/DO-160G 第 20 章中传导敏感度测试程序, 基于测试程序的建模解决了文献[1-4]中只关注关键测试设备建模的理论不足, 根据所需的测试信号建立了相应的敏感度评估模型, 并获得了不同敏感信号下北斗接收机的敏感度曲线, 解决了文献[5-7]基于标准进行符合性测试给出定性结果的不足, 同时扩展了文献[14]中仅使用连续波信号仅使用连续波进行测试的方法, 最后与传统的 GUM 法不同, 基于 MCM 对测试进行了不确定度评定, 验证了 MCM 法的优势, 所得的扩展不确定度小于 CISPR 规定值, 可以为北斗接收机传导敏感度测试中出现的敏感现象提供判定依据。不足之处在于, 由于测试时间和成本的限制, 未能就整个频段影响测试结果的影响因素做更为详细的测试和分析。

参考文献

- [1] GRASSI F, PIGNARI S A. Characterization of the bulk current injection calibration-jig for probe model extraction [C]. IEEE International Symposium on EMC, 2010:344-347.

- [2] GRASSI F, MARLINANI F, PIGNARI S A. Circuit modelling of injection probes for bulk Current injection[J]. IEEE Transactions on EMC, 2007, 50(7): 563-576.
- [3] LIANG T, XIE Y ZH, LI ZH Y. Coupling efficiency analysis of current injection probe for bulk current injection[C]. APEMC, 2016:1184-1187.
- [4] DIOP M S, CLAVEL E, CHEAITO H, et al. 2D modelling of bulk current injection probe and validation with measurements[C]. URSI GASS, 2017:1-4.
- [5] 王书平, 刘存礼, 任练勇. 北斗卫星导航接收机电磁兼容性测试研究[C]. 第六届全国信号和智能信息处理与应用学术会议, 2012:143-146.
- [6] 李武钢, 朱方来, 李正国. 北斗车载导航系统的电磁兼容试验与实践[J]. 深圳职业技术学院学报, 2014, 13(5):30-36.
- [7] 李正国, 朱方来, 李武钢. 北斗车载导航终端电磁兼容传导干扰测试数据分析与研究[C]. 第三届中国卫星导航学术年会电子文集——S06 北斗/GNSS 测试评估技术, 2012:170-174.
- [8] GRASSI F, ROSTAMZADEH C, KOLBE P, et al. Assessing linearity of injection probes used in BCI test setups for automotive applications [C]. IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2013: 128-133.
- [9] Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment[S]. Section20: Radio frequency Susceptibility (Radiated and Conducted), RTCA/DO-160G, 2010.
- [10] GRASSI F, ROSTAMZADEH C, BELLAN D, et al. Assessment of the bulk current injection test procedure based on the substitution method[C]. APEMC, 2013: 1-4.
- [11] MURANO K, TAKATA N, HOSHINO M, et al. Theoretical analysis of BCI test system using circuit concept approach[C]. IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2016:600-603.
- [12] 安苏生. 北斗卫星导航终端电磁抗扰度特性分析与研究[D]. 南京:南京信息工程大学, 2016.
- [13] WEI L, WEI G H, PAN X D, et al. Electromagnetic compatibility prediction method under the multifrequency in-band interference environment [J]. IEEE transactions on electromagnetic compatibility, 2018, 60(2):520-528.
- [14] 安苏生, 万发雨, 冯超超. 某导航终端芯片传导敏感度测试研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(11):189-193.
- [15] 王丽, 凤卫锋, 孙昊. CS114 电缆束注入传导敏感度测量不确定度评定[J]. 国外电子测量技术, 2011, 30(6): 37-39.
- [16] AZPURUA M, TREMOLA C, PAEZ E. Comparison of the GUM and monte carlo methods for the uncertainty estimation in electromagnetic compatibility testing[J]. Progress In Electromagnetics Research B, 2011, 34: 125-144.
- [17] 中国合格评定国家认可委员会. CNAS-GL07. 电磁干扰中不确定度的评估指南[S]. 2006.

作者简介

刘瑞华, 1965 年出生, 博士、教授, 主要研究方向为卫星导航在民航中的应用、组合导航。

E-mail: rhliu_cauc@163.com

商鹏, 1991 年出生, 硕士研究生, 主要研究方向为机载设备电磁兼容测试技术。

E-mail: 1498760420@qq.com

梁欣萌, 1994 年出生, 硕士研究生, 主要研究方向为北斗民用信号干扰监测技术。

E-mail: 63277175@qq.com