

文章编号: 1672-2892(2010)03-0318-06

近地面 1553B 通信系统 HEMP 效应试验

邓建红, 周启明, 赵 刚, 李小伟, 周开明, 王 艳

(中国工程物理研究院 电子工程研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 为了考察地面设备抗高空电磁脉冲(HEMP)性能, 确定关键耦合节点, 寻求有效的加固方法, 进行了带 1553B 通信电缆的某地面监控系统的功能演示设备 HEMP 效应试验。通过分析电磁脉冲主要耦合通道, 针对耦合通道设计实验方案, 测试了 1553B 通信线缆及变压耦合器端口的 HEMP 耦合信号, 分析了系统中变压耦合器及隔离变压器对耦合干扰信号的影响, 同时对低通滤波器降低 HEMP 耦合的加固方法进行了验证。实验结果显示 1553B 通信系统具有较好的抗 HEMP 性能, 变压耦合器对端口耦合信号有较大影响, 采用低通滤波器可以简单有效地降低 HEMP 耦合强度。

关键词: 1553B 通信线缆; HEMP 耦合; 模拟试验; 加固方法

中图分类号: TN911.7; O441.4

文献标识码: A

HEMP effect experiment for surface 1553B communication system

DENG Jian-hong, ZHOU Qi-ming, ZHAO Gang, LI Xiao-wei, ZHOU Kai-ming, WANG Yan
(Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621900, China)

Abstract: High altitude Electro Magnetic Pulse(HEMP) effect experiments were prosecuted for a surface supervisory control system with a 1553B communication system in order to study the HEMP-resisting capability of surface facility, to explore the key coupling points, and to find a effective hardening method. The electromagnetic coupling ports of entry were analyzed, then examination project according to the coupling ports was designed. The coupling signals on the ports of cable, coupling transformer, and isolation transformer, were tested. The influence of coupling transformer and isolation transformer having on the interference signals were analyzed, the hardening method to reduce HEMP coupling by low-pass filters was validated. The experiment results showed the 1553B communication system was of a better HEMP-resisting capability, the coupling transformer had a strong impact on the coupling signals on the ports of cable, and the low-pass filters would reduce the HEMP coupling level effectively and simply.

Key words: 1553B communication system; High altitude Electro Magnetic Pulse coupling; simulation experiment; hardening method

MIL-STD-1553B 总线(以下简称 1553B 总线)是美国定义的一种军用串行总线标准, 与之对应的国内标准为 GJB 289A-97。1553B 总线在现代飞机航空电子系统, 尤其是军事领域有着广泛的应用。近年来, 我国各种新的大型设备中也大量采用了该总线以取代老式的设备通信协议。在高空电磁脉冲(HEMP)袭击时, 各种线缆是耦合 HEMP 能量的重要途径, 因此国内外对通信线缆的 HEMP 耦合的研究都非常重视, 既有理论计算和数值模拟^[1-4], 又有辐射法和电流注入法的模拟试验^[5-7]。模拟设备及试验手段也在不断进步, 但研究 1553B 通信系统 HEMP 效应的论文很少。近几年, 随着 1553B 总线在各类军用设施中的大量应用, 其对 HEMP 耦合效应及加固技术研究的需求也越来越迫切。虽然 1553B 总线协议本身具有较强的抗干扰能力和容错能力, 这主要是因为其较高的工作电压及容错协议, 但近地面铺设的 1553B 通信线缆耦合的 HEMP 干扰, 夹杂在工作信号中进入地面监测设备, 有可能造成核心敏感电路的扰动甚至失效。本文利用大型水平极化辐射波模拟器产生的 HEMP 模拟环境, 对带 1553B 总线通信电缆的某地面监控系统的功能演示设备进行 HEMP 效应试验, 以了解关键部件(变压耦合器和隔离变压器)对 HEMP 耦合信号的影响, 观察信号通道和电源通道中滤波器件的插入对降低 HEMP 耦合的效果, 考察在强耦合信号干扰下 1553B 系统的抗干扰能力。通过对地面监控系统在 HEMP 环境下耦合环节的分析 and 前期

模拟试验可知, 仪器舱和功能终端屏蔽壳体都对电磁波有较好的屏蔽效能, 故 HEMP 通过孔缝耦合直接对地面监控设备的干扰可以忽略, 只需考虑通过数据线和电源线的传导耦合的干扰信号影响。

1 试验对象

试验对象为带 1553B 通信电缆的某地面监控系统的功能演示设备。该演示设备的一端为监控设备, 另一端为功能终端, 它们由 1 组 20 m 长瑞肯 1553B 通信电缆和 1 根 20 m 长电源线组成的电缆束相连接, 同时由监控设备为功能终端提供直流电源。监控设备含 1 台监控计算机、1 块 1553B 通信板和 1 块供电板, 放置于屏蔽笼(代替仪器舱)内。终端设备含 1 块 1553B 转换电路板、1 个电源转换模块和 1 块核心功能电路板, 放置于金属屏蔽箱(代替终端设备壳体)内。电缆束外面带屏蔽网, 屏蔽网两端与屏蔽笼(箱)电接触良好。图 1 为 1553B 通信系统 HEMP 试验测点布局图。

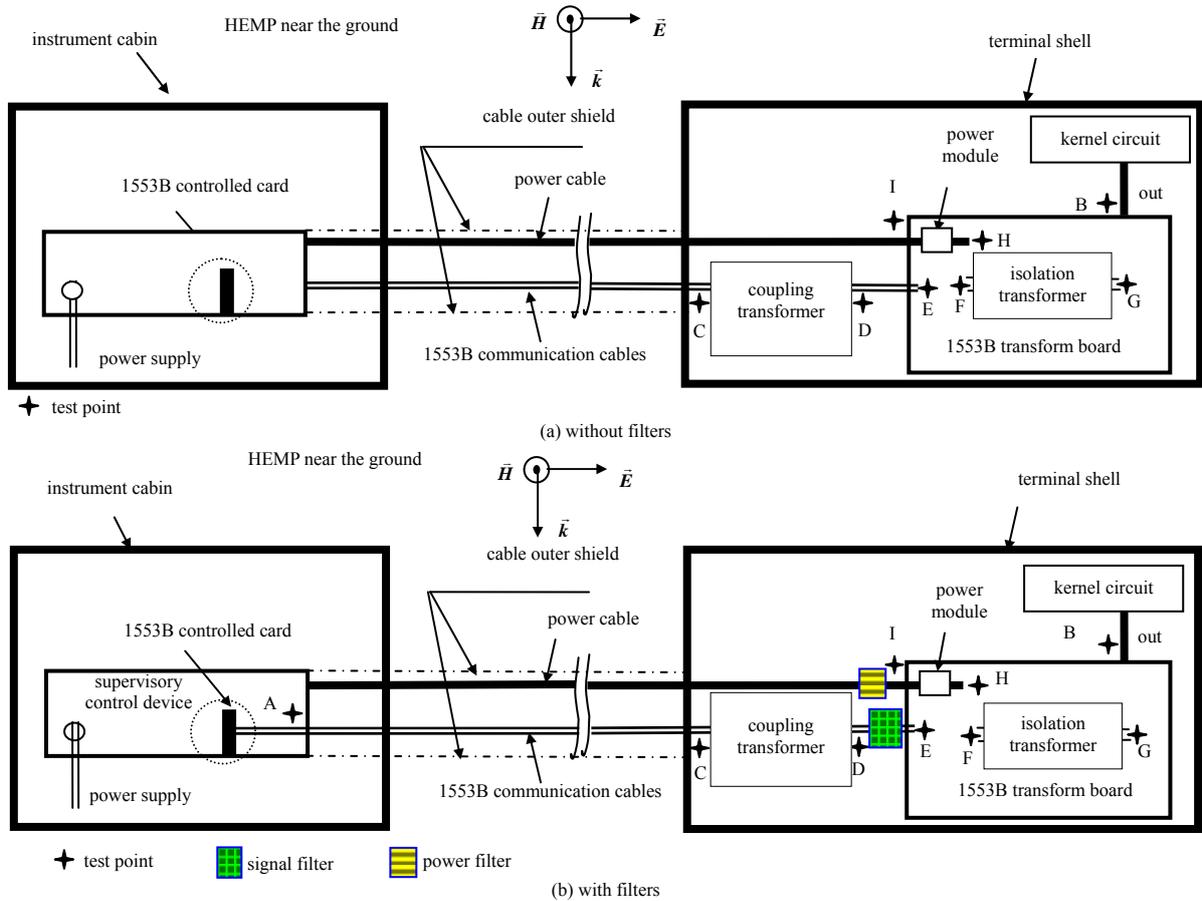


Fig.1 Diagram of test points in HEMP experiment for 1553B communication system without/with filters

图 1 1553B 通信系统插入滤波器件前/后 HEMP 试验测点布局图

1553B 通信系统中的变压耦合器(见图 1), 用于节点长距离时提高工作信号电压, 其频率特性对耦合信号影响较大。特别是前期同样的辐射法试验研究中发现, 某厂家生产的变压耦合器在工作信号电压放大 1.4 倍的情况下, 对耦合干扰信号的放大倍数达到 5 倍, 故本次试验选用了另一家生产的变压耦合器以考察效应异同。隔离变压器为 1553B 转换电路中的常用器件, 用于干扰隔离; 在注入法试验研究大量电源滤波器的基础上, 选取了 2 种型号电源滤波器(FLC10 和 FLC202)进行辐射法试验验证。根据 1553B 通信系统工作信号频率较低而 HEMP 耦合干扰信号频率较高的特点, 用低通滤波器 XP901 来抑制信号通道的耦合干扰, 并进行过电流注入试验, 辐射法试验进一步验证其降低干扰的有效性并考察其对工作信号的影响。

2 试验技术状态与测试内容

HEMP 模拟设备为 DMF-1000 水平极化辐射波模拟器, 它是 DMF-600 的升级型^[5]。近地面 1553B 通信电缆 HEMP 耦合试验布局与文献[5]的相同, 见图 2。电场波形前沿约为 5 ns, 脉冲宽度约为 20 ns, 在距离模拟器投

影点 30 m,20 m 处的场强分别约为 10 kV/m 和 12 kV/m。

试验设备摆放有 4 种状态,其主要区别是所处位置空间辐射场场强不同。每个状态运行 10 炮,在 10 炮数据中去掉最大值和最小值后取中间 8 个数据的平均值作为试验结果。试验时,1553B 通信系统处于工作状态,模拟监控计算机向终端输出数据,终端接收到数据后向计算机返回信号数据。试验的 4 种技术状态和测试内容见表 1。

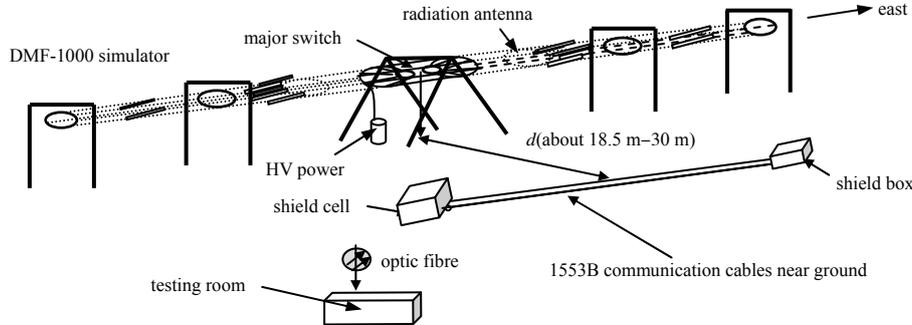


Fig.2 Diagram of HEMP coupling test for 1553B communication cables near the ground
图 2 近地面 1553B 通信电缆 HEMP 耦合试验现场布局示意图

表 1 试验的技术状态与测试内容

Table1 Testing status and testing details

	cable height/m	distance from simulator/m	testing point and testing details	objective
testing status 1: without signal filter ,cable center field intensity $E=4.3$ kV/m	0.8	30	working signals and interference signals on point A,B,D, interference signals on point C,F,G	Space electric field is minimum. Observe the interference signals on different points, find out the influence of coupling, transformer and isolation transformer on interference signals.
testing status 2: with signal filter ,cable center field intensity $E=7.2$ kV/m	0.8	18.5	working signals and interference signals on point E	Space electric field is higher. Observe the effect with signal filter, find out the change of working signal with signal filter.
testing status 3: with power filter, cable center field intensity $E=7.2$ kV/m	0.8	18.5	interference signals on point I and H	Space electric field is higher. Observe the effect with power filter.
testing status 4: without signal filter, cable center field intensity $E=11$ kV/m	3.0	18.5	working signals and interference signals on point A,B,D, interference signals on point C,F,G	Space electric field is maximum, then interference signals are maximum, observe the working status of system.

3 试验结果与分析

3.1 变压耦合器、隔离变压器对干扰信号的影响

图 3 是监控计算机板卡 1553B 端口(A 点)和变压耦合器输入、输出端(C 和 D 点)HEMP 耦合的典型干扰波形,图 4 是隔离变压器初次级(F 和 G 点)和 1553B 数据转换板输出端(B 点)HEMP 耦合的典型干扰波形。表 2 是对应图 3 和图 4 各监测点 HEMP 耦合干扰峰值的试验数据。

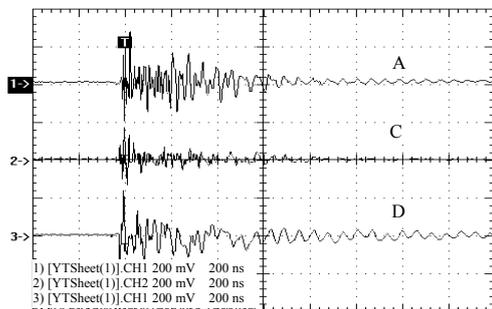


Fig.3 Typical interference signals on point A,C,D
图 3 A,C,D 点干扰典型波形

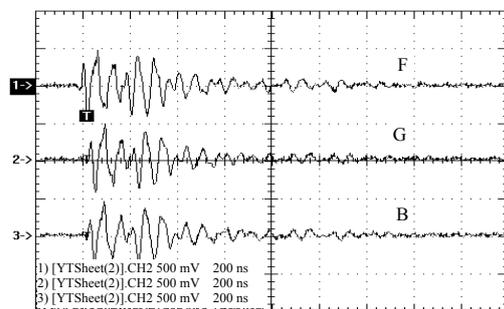


Fig.4 Typical interference signals on point F,G,B
图 4 F,G,B 点干扰典型波形

从波形对比和幅度对比,可以看出:

- 1) 变压耦合器对于干扰信号的放大倍数约为 1.5 倍,与变压耦合器对工作信号的放大倍数 1.4 接近。这个结果与前期的辐射法试验变压耦合器的结果相比要好很多,说明不同生产厂家的变压耦合器虽然对工作信号的放大倍数相同,但对 HEMP 耦合干扰信号的放大作用差别很大。
- 2) F,G,B 这 3 点的波形基本相同,其振荡频率明显低于 A,C,D 各点,其原因可能是变压耦合器滤除了高频。

3) F,G,B 这 3 点干扰幅度明显高于 A,C,D 各点,其原因除了从通信线路引入的干扰外,从供电线路也引入了干扰。

4) G 点的干扰信号比 F 点的略小,说明隔离变压器对于干扰只有很小的抑制作用;

5) B 点的干扰信号比 G 点的大约小了 1/4。

3.2 同时记录的工作信号和干扰信号

图 5 是 A,C,D,G,B 各点同时记录的干扰信号和工作信号波形。

因为干扰信号脉宽只有数十纳秒,而工作信号每秒发送几十组,每组的持续时间大约 200 μs ,所以干扰信号叠加在工作信号上(尤其是工作信号高电平上)的情况是小概率事件,在瞬时记录时很难在示波器屏幕上同时捕捉到干扰信号和工作信号,图 5 就是在上百炮的重复中唯一的 1 次由辐射场单次触发同时记录到的干扰信号和工作信号波形。由于扫描速率为 200 $\mu\text{s}/\text{div}$,所以图中只能看到触发点干扰信号出现的位置,而无法看到干扰信号的清晰波形。

图 6 是试验中外电场的典型波形,其脉冲半高宽大约 10 ns,脉冲持续时间大约 100 ns。

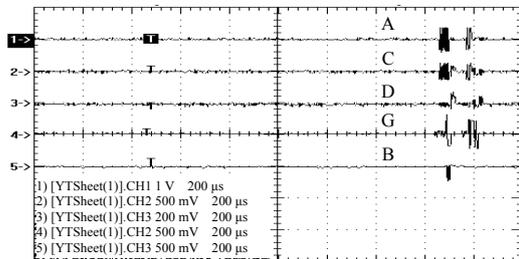


Fig.5 Interference signals and working signals on point A,C,D,G,B
图 5 A,C,D,G,B 点同时记录的干扰信号和工作信号波形

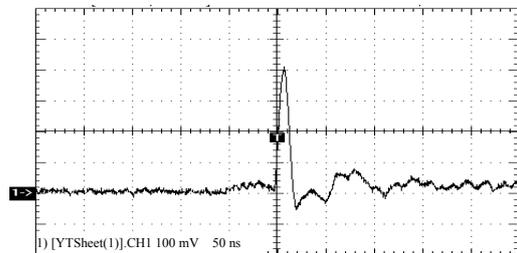


Fig.6 Typical waveform of space electric field
图 6 空间电场典型波形

3.3 信号通道低通滤波器对工作信号和干扰信号的影响

图 7 和图 8 分别为插入低通滤波器 XP901 前和后的情况下, E 和 D 点监测的工作终端向监控设备反馈的数据信号。图 9 是插入滤波器前后 1553B 端口处(E 点)的干扰信号波形,其峰值对比见表 3。

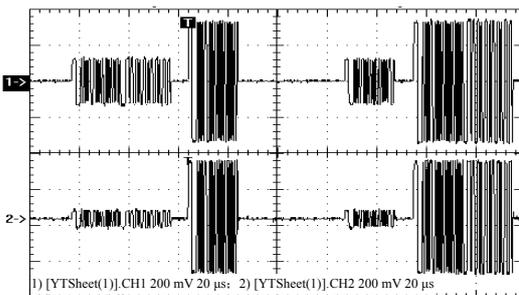


Fig.7 Data signals back from terminal without filter XP901 on point E(up),D(down)
图 7 插入滤波器 XP901 前 E 点(上)、D 点(下)监测的工作终端返回的数据信号

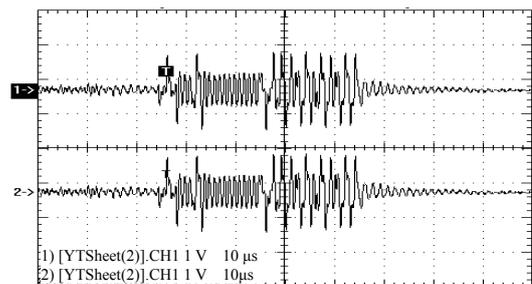


Fig.8 Data signals back from terminal with filter XP901 on point E(up),D(down)
图 8 插入滤波器 XP901 后 E 点(上)、D 点(下)监测的工作终端返回的数据信号

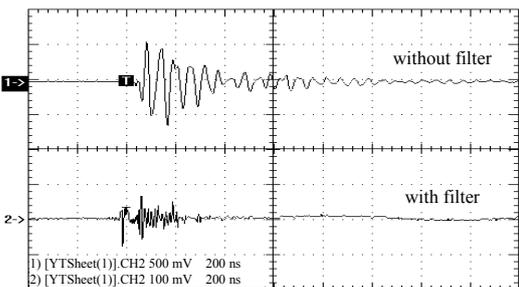


Fig.9 Interference signals with filter XP901 and without filter XP901($E=7.2 \text{ kV/m}$)
图 9 信号通道插入低通滤波器 XP901 前后 E 点的干扰波形(场强 7.2 kV/m)

表 2 状态 1 各监测点干扰峰值数据
(线缆处环境场强 4.3 kV/m)

testing point	average of interference signals peak value/V
A	3.67
B	3.66
C	2.46
D	3.66
F	5.04
G	4.76

表 3 信号通道插入低通滤波器 XP901 前后 E 点的干扰峰值
(线缆处环境场强 7.2 kV/m)

test status	peak value of interference signals /V	ratio
without filter	5.72	5.72/0.88=6.5
with filter	0.88	

对比图7和图8可以看到,信号通道插入低通滤波器后功能终端反馈的数据信号畸变较严重,说明滤波器截止下限过低。此时监控设备尚能识别发回的数据,说明畸变还未导致通信数据出错。

表3的试验结果表明,插入低通滤波器XP901后,滤波器将HEMP干扰信号抑制到1/6以下。

3.4 电源滤波器对干扰信号的影响

图10和图11分别是插入不同电源滤波器前和后的情况下,场强为7.2 kV/m时I点和H点的干扰信号波形,表4是与之对应的干扰峰值对比。

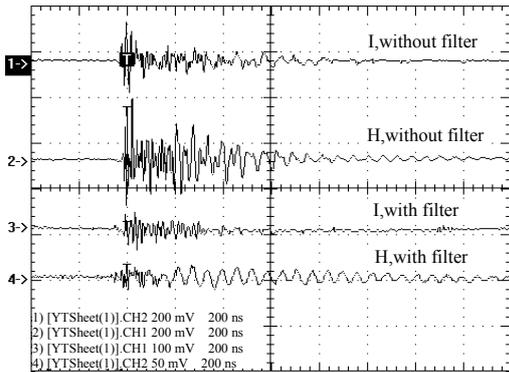


Fig.10 Interference signals on point I,H with and without filter FLC10 ($E=7.2$ kV/m)

图10 插入滤波器 FLC10 前后 I 点、H 点干扰信号波形 (场强 7.2 kV/m)

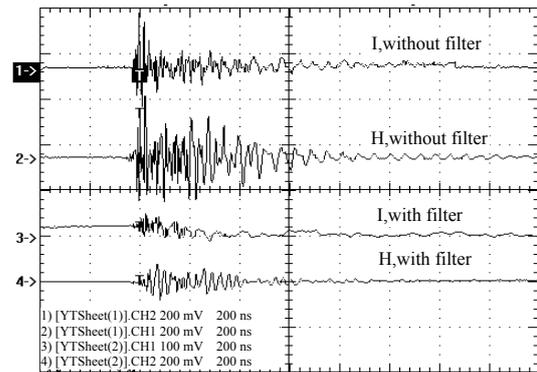


Fig.11 Interference signals on point I,H with and without filter FLC202 ($E=7.2$ kV/m)

图11 插入滤波器 FLC202 前后 I 点、H 点干扰信号波形 (场强 7.2 kV/m)

表4 插入电源滤波器前后干扰峰值(线缆处环境场强 7.2 kV/m)

Table 4 Peak values of interference signals with and without power filter (cable center field intensity $E=7.2$ kV/m)

test point	test status	peak values of interference signals/V	ratio
point I(power supply in)	without filter	6.08	1
	with filter FLC10	0.60	$\approx 1/10$
	with filter FLC202	0.75	$\approx 1/8$
point H(power supply out)	without filter	6.65	1
	with filter FLC10	0.64	$\approx 1/10$
	with filter FLC202	0.83	$\approx 1/8$

从表4可以看出:插入滤波器 FLC10 后,滤波器将干扰抑制到原来的 1/10 左右;插入滤波器 FLC202 后,滤波器将干扰抑制到原来的 1/8 左右。插入滤波器前后干扰信号变化明显,与采用电流注入法测试的滤波器性能指标一致。

3.5 1553B 通信系统在强干扰状态下的工作情况

图12和表5分别是场强为11 kV/m时各点干扰信号波形图和峰值数据表。此时,所有测量系统均进入非线性区,有的已经饱和,有的接近饱和,各点的干扰信号峰值均在8 V以上。此时1553B通信系统仍能正常工作,重复10炮均未出现误码。

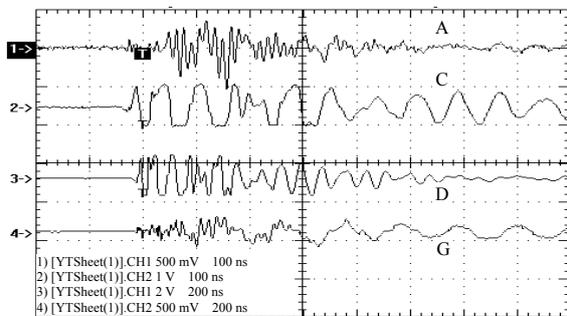


Fig.12 Interference signals on point A,C,D,G while $E=11.4$ kV/m

图12 场强 11.4 kV/m 时, A,C,D,G 点的干扰信号

表5 状态4各监测点干扰峰值(线缆处环境场强 11 kV/m)
Table5 Peak values of interference signals on test points in test status 4($E=11.4$ kV/m near cable)

test point	average peak values of interference signals/V
A	>8
C	>8
D	>8
G	>8

4 结论

根据试验结果,可以得出:

- 1) 不同厂家的变压耦合器虽然对工作信号的放大倍数相同,但对 HEMP 耦合干扰信号的放大作用差别很大,故采用的变压耦合器必须经过 HEMP 耦合试验考核;
- 2) 接收终端电路中的隔离变压器基本没有隔离 HEMP 干扰信号的能力,电路设计时应考核后选用;
- 3) 信号通道插入低通滤波器能有效抑制 HEMP 干扰信号,但需要根据工作信号带宽设计专用的低通滤波器;
- 4) 合理选取商用电源滤波器,即可有效抑制电源通道 HEMP 干扰信号;
- 5) 1553B 数据转换电路输出端的 HEMP 干扰信号与其输入接口处的相差不大;
- 6) 在外场场强为 11 kV/m 强干扰情况下,所有各监测点的 HEMP 耦合干扰信号幅度均超过 8 V,其干扰信号幅度足以使一般数字电路产生工作异常,如果不进行有效抑制,将直接影响后续核心电路。

特别值得指出的是:辐射法试验中,之所以在 11 kV/m 场强下 1553B 通信系统依然能正常工作,连续 10 炮均未出现误码,除了 1553B 通信系统有较强抗 HEMP 干扰能力外,还有就是场强并没有达到 50 kV/m^[8],而且 HEMP 干扰信号正好叠加在工作信号上的小概率事件在上百炮的测量中都没有出现。要真正确认这样的小概率事件出现时,1553B 通信系统是否会出现异常或者损坏,只能用电流注入法做实验,并解决 2 个关键技术:

- 1) 模拟辐射法的 HEMP 干扰信号波形且幅度可调,使之与 10 kV/m~50 kV/m 场强范围内相对应;
- 2) 精确控制注入的时间,以实现 2 个信号的叠加,才能得到明确的答案。

参考文献:

- [1] Tesche F M. Comparison of the transmission line and scattering models for computing the HEMP response of overhead cables[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1992,34(2):93-99.
- [2] 孟庆翔,朱守正,赵姚同. 外部电磁场对屏蔽多导体电缆系统耦合影响的分析[J]. 微波学报, 1998,14(2):96-101.
- [3] 黄聪顺,周启明. 高空电磁脉冲作用下地面电缆屏蔽层感应电流的数值模拟[J]. 强激光与粒子束, 2003,15(9):905-908.
- [4] 陈海林,陈彬,李正东,等. 不同电磁脉冲作用下地面有限长电缆外导体感应电流的数值计算[J]. 强激光与粒子束, 2004,16(10):1286-1290.
- [5] 周启明,罗学金,许献国,等. 近地九芯电缆高空电磁脉冲耦合模拟试验[J]. 强激光与粒子束, 2004,16(1):63-67.
- [6] 周启明,杨蓉,黄聪顺. 九芯电缆 EMP 耦合的电流注入法实验[J]. 信息与电子工程, 2004,2(1):49-53.
- [7] 邓建红,李小伟,周开明. 电子设备电磁脉冲失效概率分布试验方法[C]// 第九届全国抗辐射电子学与电磁脉冲学术年会论文集, 重庆:[s.n.], 2007:405-408.
- [8] Department of defense interface standard. MIL-STD-461E:Requirements for the control of electromagnetic interference characteristics of subsystems and equipment[S]. 1999.

作者简介:



邓建红(1970-),男,湖北省天门市人,2001年毕业于中国工程物理研究院研究生部核技术及应用专业,工学硕士,高级工程师,主要研究方向为电子学系统电磁脉冲效应、数值模拟与加固技术.email:fuzzydog@163.com.

赵刚(1976-),男,四川省南充市人,工程师,2001年毕业于重庆大学自动化学院,主要研究方向为电子学系统抗辐射效应及加固技术研究。

周开明(1967-),男,重庆市合川县人,工程师,1994年毕业于电子科技大学,主要研究方向为电子学系统电磁脉冲效应与测试技术。

周启明(1944-),男,湖北省松滋市人,研究员,1967年毕业于武汉大学核物理专业,研究方向为电磁脉冲耦合效应与模拟技术。

李小伟(1975-),男,江西省九江市人,工程师,1999年毕业于华中理工大学应用物理学专业,主要研究方向为电子学系统电磁脉冲效应、加固与评估技术。

王艳(1990-),女,陕西省咸阳市人,助理研究员,2007年毕业于西北工业大学通信与信息专业,硕士,主要研究方向为电子学系统电磁脉冲效应与数值模拟。