

飞行器 GNSS 接收机静电放电干扰效应分析*

范宇清, 程二威, 魏明, 张庆龙, 陈亚洲

(陆军工程大学 石家庄校区 强电磁场环境模拟与防护技术国防科技重点实验室, 石家庄 050005)

摘要: 针对飞行器全球卫星导航系统接收机易受静电放电干扰的问题, 研究了机体表面电晕放电与机务维修火花放电对接收机的干扰效应。分析了静电放电的时频域特征, 使用针球电极与高压源组成的模拟器开展了电晕放电对接收机的前门耦合实验, 证明了电晕脉冲产生的辐射场对接收机无明显干扰效应。基于人体金属 ESD 模型开展了火花放电对接收机的干扰效应实验, 发现浪涌电流易导致接收机串口转换芯片电位波动, 读写程序主循环卡死, 应针对串口端进行静电阻抗器防护。

关键词: GNSS 接收机; 静电放电; 干扰效应; 人体金属模型; 电晕放电

中图分类号: TN96

文献标志码: A **doi:** 10.11884/HPLPB201931.190268

Analysis on the interference effect of electrostatic discharge of GNSS receiver on aircraft

Fan Yuqing, Cheng Erwei, Wei Ming, Zhang Qinglong, Chen Yazhou

(National Key Laboratory of Defense Science and Technology on EM Environment Simulation & Protection, Army Engineering University (Shijiazhuang Campus), Shijiazhuang 050005, China)

Abstract: Aiming at the problem that the Global Navigation Satellite System (GNSS) receiver is susceptible to ESD, the interference effect of the corona discharge on the surface of the aircraft and ESD generated by maintenance on the receiver are studied. The time-frequency domain characteristics of the ESD is analyzed. The front door coupling experiment of corona discharge to the receiver was carried out using a simulator composed of a needle ball electrode and a high voltage source. It is proved that the radiation field generated by the corona pulse has no obvious interference effect on the receiver. Based on the human body metal ESD model, the experiment of the interference effect of spark discharge on the receiver was carried out. It was found that the surge current easily caused potential fluctuation of the serial port conversion chip of the receiver, and the main loop of the read/write program was stuck. ESD protection should be performed for the serial port.

Key words: GNSS receiver; electrostatic discharge; interference effect; human metal model; corona discharge

PACS: 41.20.Jb; 41.20.-q

随着全球卫星导航系统(GNSS)的应用与发展, 卫星导航系统已经成为重要的、不可或缺的空间基础设施。导航终端作为用户与卫星系统间的传输节点, 其稳定性、可靠性以及抗干扰能力决定了能否为用户提供良好的使用体验^[1]。随着电子器件集成度大幅提高, 设备电磁敏感度也相应增加, 对半导体器件来说, 瞬态的高电压、大电流以及电磁干扰源辐射的强电磁脉冲均会造成其性能降级甚至损坏。

静电阻抗器(ESD)对于电子设备是一种常见的近场干扰源。静电放电过程形成的高电压、强电场、以及上升沿小于 1 ns 的瞬态大电流, 伴随宽频带的近场强电磁辐射, 对电火工品, 电子装备存在巨大威胁^[2]。静电放电曾造成卫星失控偏离轨道, 火箭、导弹发射失败等严重事故^[3]。

本文针对静电放电对飞行器 GNSS 接收机的危害, 分析了 ESD 干扰信号的时频域特性, 推导了电晕放电辐射场的构成。通过对接收机天线、机壳等进行 ESD 干扰效应实验, 得到了接收机受干扰的原因与机理, 可为导航接收机开展 ESD 针对性防护提供参考。

* 收稿日期: 2019-07-19; 修订日期: 2019-10-19

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51677191)

作者简介: 范宇清(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电磁环境模拟与电磁防护; 120705947@qq.com。

1 ESD 类型与模型选择

考虑发生静电放电时带电体形态及放电条件的不同,可将放电类型分为电晕放电、静电火花放电、刷形放电、雷状放电等。其中,对机载导航接收机产生威胁的主要为电晕放电与火花放电,下面具体讨论两种放电方式的拟合表达式与时频域特性。

1.1 电晕放电

电晕放电是在不均匀场中空气局部自持放电的一种常见放电形式。由于卫星播发的导航信号较弱,信号到达地面强度低(约-130 dBm)。GNSS 接收机装备于飞机、导弹等飞行器时,天线通常安装在机舱外,飞行器表面不断与大气中空间粒子发生撞击,粒子与飞机接触带电的同时在飞机上产生等量异种电荷。对于运动速度较高的飞行器(喷气式飞机、巡航导弹)此现象更为明显。即使装备了静电消除器的飞机,机体表面残存静电电量仍然很大:喷气式飞机的带电量可达 10^{-3} C,巡航导弹带电量可达 10^{-6} C,对地电位高达 $10\sim 300$ kV^[4-6]。静电累积到一定程度后主要通过电晕放电的形式释放电荷,产生的宽带电磁辐射会对机载天线、敏感电子设备等造成干扰。

电晕放电是在不均匀场中空气局部自持放电的一种常见放电形式。研究其辐射场的时频特性是分析干扰机理的基础。电晕放电辐射场可用拟合的电流表达式作为模型。印度 Nayak 教授团队拟合了电晕电流的双指数函数表达式,被广泛用于电晕辐射场的计算中^[7],如式(1)所示。

$$i(t) = KI_{\max}[\exp(-mt) - \exp(-nt)] \quad (1)$$

式中: k, m, n 为规范取值的常数, m, n 决定脉冲电流上升、下降时间, I_{\max} (mA) 为脉冲电流峰值。该拟合表达式得到的正负电晕时频域特征分别如图 1~2 所示。由图可知,正电晕脉冲电流的波头时间、脉冲上升、下降沿及视在放电持续时间均比负电晕脉冲电流大 20%~30%。频域特性显示电晕放电能量主要集中在 $0\sim 200$ MHz 内,在 $0\sim 50$ MHz 内幅值衰减较快。

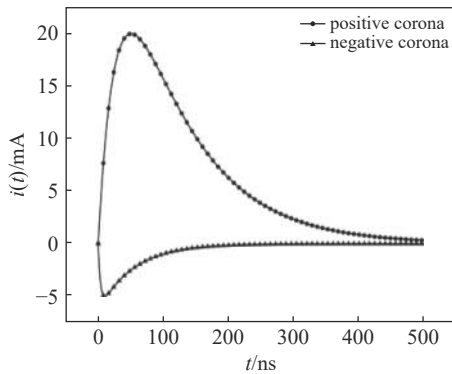


Fig. 1 Time domain characteristics of the current of the corona pulse

图 1 电晕脉冲电流时域特征

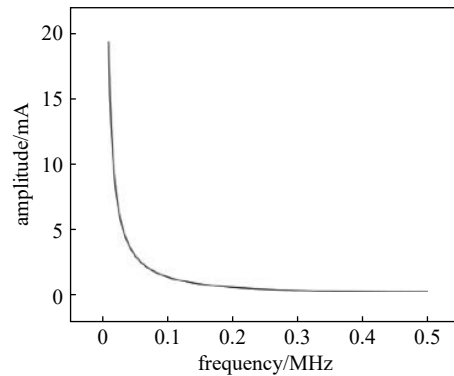


Fig. 2 Frequency domain characteristics of the current of the corona pulse

图 2 电晕脉冲电流频域特征

1.2 火花放电

因火花放电受静电源、气候、环境等多种因素影响,不利于实验重复性,建立不同的 ESD 模型可有效解决这一问题。人体金属模型主要用来模拟人手持螺丝刀,镊子等金属工具与导体间发生火花放电时对电子设备产生的危害^[8]。

本文使用该模型主要模拟机务维修人员对机载 GNSS 接收机进行检修过程中可能产生的 ESD 现象。接收机射频前端电路电磁敏感度高,人体-金属模型放电速度快,能量高,持续时间短,在 ESD 保护装置还未作用之前可能对接收机造成干扰甚至损伤^[9]。

IEC61000-4-2 对人体金属 ESD 模型电流波形与特征参数作出了规范,用于 ESD 抗扰度实验的放电模拟器应符合该标准。Berghe、盛松林等学者基于此标准在 4 kV 放电电压下对此波形进行拟合,见式(2)~(3)^[10-11],IEC61000-4-2 在 4 kV 电压的拟合表达式,见式(4)。

$$i(t) = 13 \exp\left[-\left(\frac{t-5.0}{1.414}\right)^2\right] + 0.4t \exp\left[-\left(\frac{t-1.0}{35.35}\right)^2\right] \quad (2)$$

$$i(t) = 106.5\left(1 - e^{-\frac{t}{0.02}}\right)^8 e^{-\frac{t}{0.1}} + 60.5\left(1 - e^{-\frac{t}{0.1}}\right) e^{-\frac{t}{0.5}} \quad (3)$$

$$i(t) = 16.6e^{0.55 \times (3.6/1.1)^{0.556}} \frac{\left(\frac{t}{1.1}\right)^{1.8} e^{-\frac{t}{1.1}}}{1 + \left(\frac{t}{1.1}\right)^{1.8}} + 9.3e^{\frac{11}{37} \times 1.8} \frac{\left(\frac{t}{12}\right)^{1.8} e^{-\frac{t}{12}}}{1 + \left(\frac{t}{12}\right)^{1.8}} \quad (4)$$

上述三式时频域特征如图3~4所示。由图3知该模型具有一个上升、下降快，峰值高的初始尖脉冲，在放电电压为4 kV时，峰值电流可达15 A。初始尖脉冲产生的原因为放电人体的手、小臂及手持金属体对自由空间存在3~10 pF的无感电容^[12-13]。这一电容容值小且无感，能产生上升快，幅值大的放电脉冲。后续放电的第二个电流峰值为人体的体电容放电，该电容值较大且放电回路电阻和电感大，因此上升时间长，峰值小。由频域特性可知，ESD人体金属模型放电能量主要集中在低频段，随着频率的升高，其幅值衰减很快。

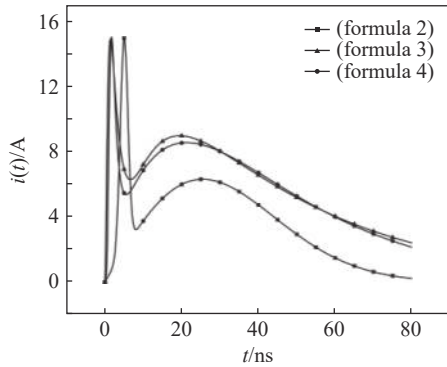


Fig. 3 Time domain characteristics of current in ESD HBM

图3 ESD人体金属模型电流时域特征

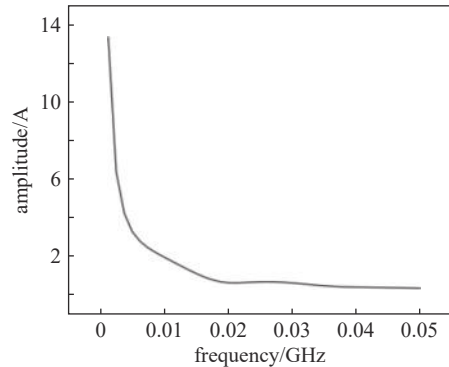


Fig. 4 Frequency domain characteristics of current in ESD HBM

图4 ESD人体金属模型频域特征

2 宽带天线测试时火花、电晕放电辐射场特性比较

为研究电晕放电和火花放电辐射场的原始信号特征，搭建了实验室环境下放电信号宽带测试平台，测试平台主要包括测试系统与放电发生器。测试系统包括高灵敏度宽带测试天线(工作频率为0~1 GHz)及其接收机、Agilent DSO-X 3034A示波器。放电发生器包括放电针、高压静电源和高压塔。为最大限度地保证所探测的信号为未发生畸变的原始信号，测试平台未施加滤波措施。

因放电辐射信号，尤其是强度较大的火花放电辐射信号可能对高灵敏接收机造成损伤，为避免该情况发生，将放电发生器置于屏蔽室外，宽带天线接收机和示波器置于屏蔽室内。宽带天线通过屏蔽室上的同轴线接口，置于屏蔽室外，距离放电发生器12 m，实验温度为26℃，湿度为43%。

分别采用正、负高压源进行了电晕、火花放电试验，充电电压为±40 kV。图5~6分别为正、负电晕放电辐射信号时域及频域波形图。图7~8分别为充电电压为正和为负时火花放电辐射信号时域及频域波形图。

由上述四个波形时域图可知，电晕放电与火花放电的信号时域特征类似，均为衰减振荡的脉冲。由图5~6可知，电晕放电辐射信号时域波形峰值约为15 mV，持续时间约为100 ns。其频谱分布较广，可达1 GHz，主要能量集中在200 MHz以下，在100 MHz附近达到峰值。负电晕放电频谱成分比正电晕放电频谱成分复杂。

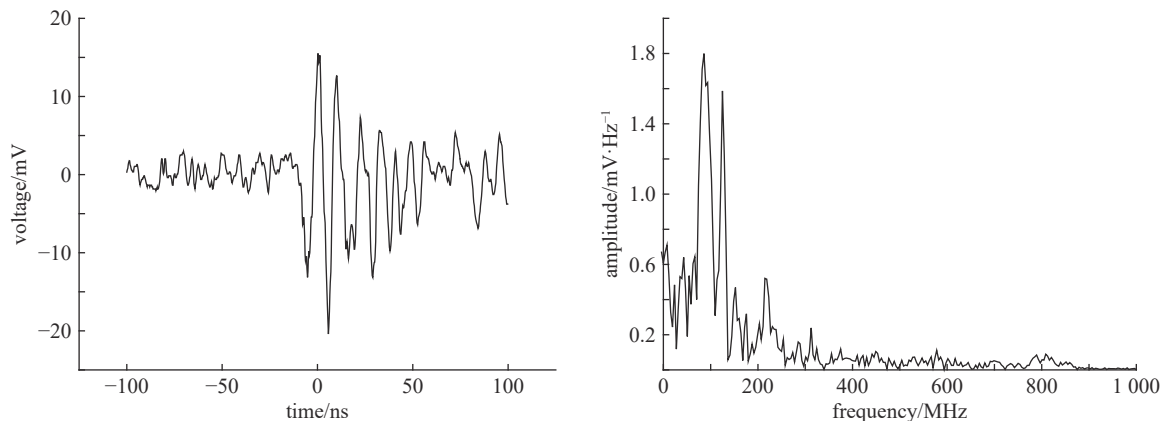


Fig. 5 Time domain waveform and spectrum of corona discharge when the charging voltage is positive

图5 充电电压为正时，电晕放电时域波形及频谱

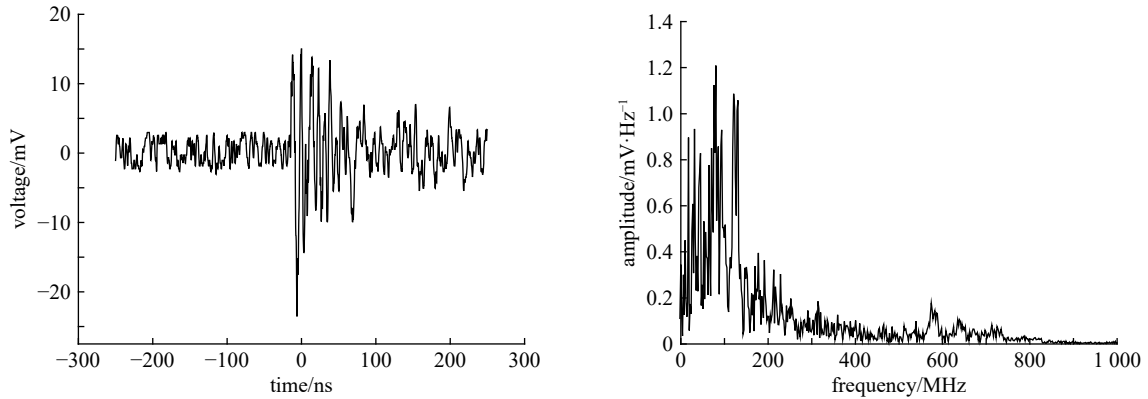


Fig. 6 Time domain waveform and spectrum of corona discharge when the charging voltage is negative

图 6 充电电压为负时,电晕放电时域波形及频谱

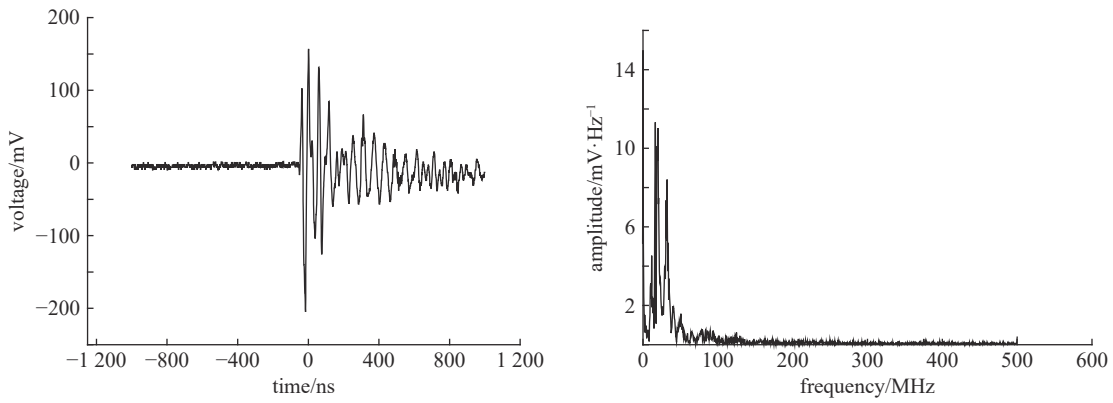


Fig. 7 Time domain waveform and spectrum of spark discharge when the charging voltage is positive

图 7 充电电压为正时,火花放电时域波形及频谱

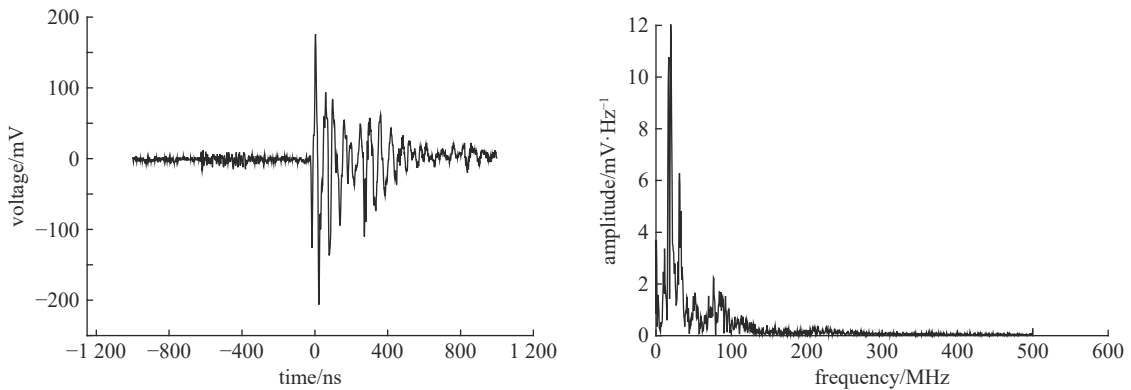


Fig. 8 Time domain waveform and spectrum of spark discharge when the charging voltage is negative

图 8 充电电压为负时,火花放电时域波形及频谱

由图 7~8 可知,火花放电辐射信号时域波形峰值约为 170 mV,持续时间约为 800 ns,较电晕放电辐射信号大很多。频谱成分相对于电晕放电较少,与电晕放电辐射信号频谱有明显的区别,主要能量集中在 50 MHz 以下,在 140 MHz 以上几乎衰减为零。充电电压的正负对其频谱分布没有影响。

3 电晕放电对接收机干扰效应实验

使用电晕放电模拟装置产生电晕辐射场,对天线进行辐照法实验。如图 9 所示,该装置由金属球、绝缘环和放电针组成,放电针固定安装在绝缘环上,连接高压电源,金属球接地使用。装置能够满足多种情形中的静电放电模拟,同时可以直观、方便地观察实验中的放电现象^[4]。

3.1 实验设备与方法

实验配置主要由电晕放电模拟装置,某型 GNSS 接收机、圆极化贴片天线及监测计算机组成。电晕放电模拟

器位于接收机圆极化贴片天线旁,距离天线距离可调。天线接收卫星实时播发的导航信号,实验框如图 10 所示。为避免电晕放电干扰接收机及监测计算机,将二者均置于屏蔽室内。实验中通过高压直流源在针上加直流高压,使得针对板发生电晕放电,放电极性正负可调。实验温度 26.2 °C,相对湿度 43%。



Fig. 9 Corona discharge simulator
图 9 电晕放电模拟器

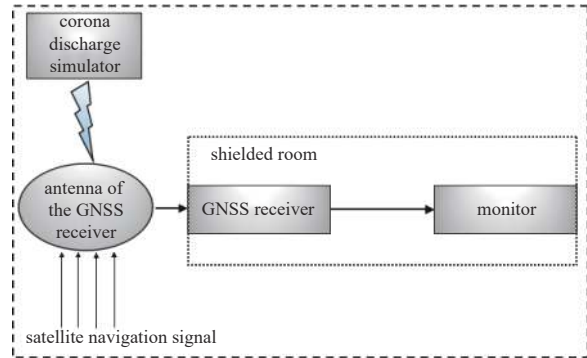


Fig. 10 Block diagram of experimental study of effects of corona discharge
图 10 电晕放电干扰效应实验框图

3.2 实验结果与分析

实验中正负电晕放电发生时能听到“滋滋”声,闻到臭氧味。实验过程中接收机正常定位、跟踪,解算数据不受影响,分析原因一是电晕放电能量主要集中在 0~200 MHz 内,其幅值在 0~50 MHz 内衰减很快,而导航接收机工作频率为 1.5 GHz 左右,电晕放电产生的电磁干扰无法通过前门耦合进入接收机内,封闭性较好的接收机机身也没有太多孔缝,后门耦合的能量无法在电路上形成干扰;二是电晕放电产生的干扰需要经空气传播,传播一定距离时干扰信号本身衰减较大,无法达到干扰阈值。

4 火花放电对 GNSS 接收机干扰实验

4.1 实验设备与方法

放电方式采用直接接触式放电与空气式放电(非接触式),实验方法参考 IEC6100-4-2(EMC) Part4 与 GB/T 17626.2-2006 中规定的静电放电抗扰度试验有关要求与程序实施^[15-17]。实验设备包括 SANKI-NS61000-2A 型 ESD 模拟器、标准配置实验台,水平耦合板与垂直耦合板等,因第二章对火花放电的测试结果显示:幅值一定时充电电压的正负对其频谱分布没有影响,所以实验中放电极性选择正极即可,放电参数 $C=500\text{ pF}$, $R=500\ \Omega$ 。

直接接触式放电实验中导航接收机通过 RS232 串口通信线与计算机相连接,接收天线置于室外空旷处。实验温度 26.6 °C,相对湿度 45%,使用静电放电枪对导航接收机的 4 个面中心位置与天线罩(1)、天线输出端口(2)、接收机电源端口(3),串口连接处(4)及天线输入端口(5)进行单次直接放电,见图 11(a), (b), 试验电压由 +0 kV 按步长 1 kV 逐渐增加,每个电压单次放电 10 次。若接收机出现可观测的干扰效应,如失去定位信息、输出数据卡死等,此时记录该观测电压值。

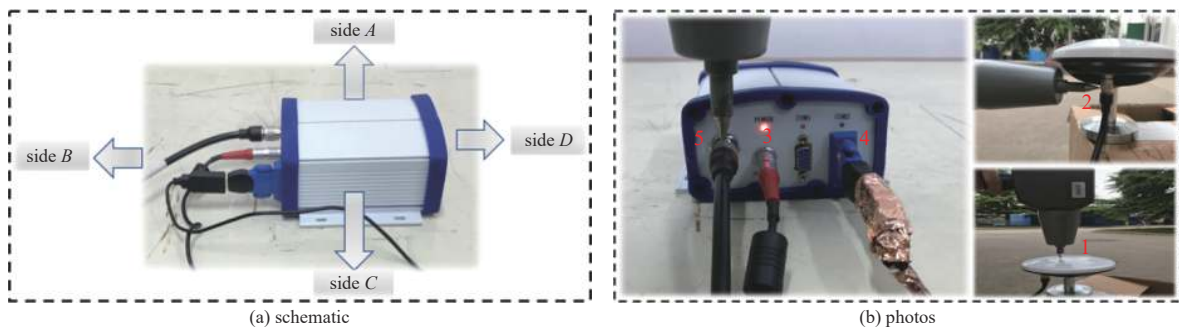


Fig. 11 Location of the receiver discharge
图 11 接收机放电位置图

空气式放电(非接触式)耦合方式为水平耦合板与垂直耦合板,实验温度 26.6 °C,相对湿度 45%。水平耦合板放电位置位于板侧边中心点,接收机 4 个受试面中心点分别距中心点 0.1 m,板侧边中心点与受试面中心点连线垂直于水平耦合板侧边。对垂直耦合板放电位置位于板侧边中心处,接收机 4 个受试面分别与垂直耦合板平行,距

离耦合板 0.1 m。试验放电方法及干扰效应判据同直接放电。

4.2 实验结果与分析

直接接触式放电与空气式放电实验均在放电电压达到某一临界值时导致接收机监测软件停止更新导航数据,但开关串口后恢复正常。两种放电方式下接收机各部位的干扰电压临界值见表 1~2。

表 1 A、B、C、D 四个面干扰电压临界值

Table 1 Thresholds of four face-interference-voltages of the receiver

discharge position	air discharge voltage (horizontal coupling plate)/kV	air discharge voltage (vertical coupling plate)/kV	direct contact discharge voltage/kV
side A	26	28	6
side B	19	7	6
side C	15	22	5
side D	10	21	26

表 2 接收机各部位干扰电压临界值

Table 2 Intercept voltage threshold for each part of the receiver

discharge position as shown in fig. 11(b)	direct contact discharge voltage/kV
1	no effect
2	19
3	8
4	4
5	11

初步分析接收机监测软件停止更新数据原因可能为 RS232 转 USB 的串口芯片受 ESD 放电产生的初始尖脉冲干扰,造成电位波动导致的读写程序卡死^[18]。直接接触式放电时放电枪在机壳、天线壳及连接端口处产生干扰电流,D 面由于距离串口端最远,干扰电压临界值最高,电源线端口由于距串口较近,干扰电压临界值相对较低。而天线壳由于屏蔽性能较好,在干扰电压最大时仍无效应,与分析相一致。

空气式放电为耦合板产生的感应场在垂直和水平方向对接收机形成干扰。由实验结果知,水平耦合板较垂直耦合板更容易引起串口卡死,原因在于放电电流的分布情况。水平耦合板置于接收机下方,上面均分布有电流。而在垂直耦合板的情况下,板位于接收机一侧,放电电流相对于天线的影晌弱于水平耦合板的影响。接收机四个侧面抗静电干扰能力基本服从 A 面>C 面>D 面,对水平耦合板,串口芯片离放电点最远的 D 面却最容易受到干扰,其原因可解释如下:当放电枪在水平耦合板放电时,会在板上产生沿板边缘传播的边缘波和沿板上下表面传播的表面波。其中,沿上表面和下表面传播的表面波幅值相等,这种波以平面波的形式沿表面传播至边缘产生反射,而反射的表面波与入射的边缘波相互叠加造成场强的增大,D 面串口处刚好靠近板边缘,因此易受干扰。

进一步分析串口卡死原因,一般程序停止更新数据应为 STM32 作为主控时受到干扰导致的主循环卡死。具体现象为:串口程序 USART2 正常接收并处理串口数据(波特率 115 200),程序 USART1 及 TIM2 的中断响应函数运行正常。根据具体原因进行相应排查,可能的原因可分为四种:(1)程序 USART2 接收中断标志受干扰未清除;(2)堆栈数据受干扰溢出,导致程序异常;(3)程序 USART2 中断函数被异常响应;(4)USART2 中断函数错误。对应的排查结果为(1)调取 USART2 中断响应函数发现与中断标志 RXNE 无关;(2)使用不同栈空间时,错误仍存在;(3)通过标志法确定中断响应函数没有重入;(4)关闭 USART2 中断函数时,主循环恢复正常,启动 USART2 中断函数,主循环卡死。经查阅产品手册发现错误原因为干扰引起的瞬态电位紊乱使寄存器读取发生错误,RXNE 参量未清零,下一帧数据进入时出现溢出错误,引起主循环卡死。

5 结 论

(1)电晕放电频谱分布较广,可达 1 GHz,主要能量集中在 200 MHz 以下,负电晕放电频谱成分比正电晕放电频谱成分复杂。火花放电辐射信号较电晕放电大,频谱成分比电晕放电少,其能量主要集中在 50 MHz 以下,频谱分布与充电电压的正负无关。在偶极子模型下,电晕辐射场表达式与偶极子间时变电流及其积分、微分项有关。

(2)飞行器与空气中粒子摩擦表面易带电并发生电晕放电,其主要能量所在频段与机载 GNSS 接收机工作频段不重合,实验证明电晕脉冲产生的辐射场经前门耦合对接收机无明显干扰效应。

(3)火花放电主要导致导航接收机死机。使用人体金属 ESD 模型进行实验时,水平耦合板和垂直耦合板上的电流分布不同导致接收机死机时各面的放电电压也不同。火花放电对接收机干扰机理为浪涌电流导致接收机串口转换芯片电位波动,读写程序主循环卡死。干扰引起的瞬态电位紊乱对串口 TTL-232 电平芯片影响值得重视,下一步应优化接收机设计或针对串口进行 ESD 防护。

参考文献:

- [1] 李琳,刘淳,谭述森. 导航终端复杂电磁环境适应性指标体系探讨[J]. 导航定位学报, 2018, 6(1): 1-4. (Li Lin, Liu Chun, Tan Shusen. Discussion on the

- adaptability index system of complex electromagnetic environment in navigation terminals. *Journal of Navigation and Positioning*, 2018, 6(1): 1-4)
- [2] 汪项伟, 万发雨, 冯超超, 等. 静电放电辐射场模拟及干扰预测[J]. *高电压技术*, 2017, 43(10): 3396-3402. (Wang Xiangwei, Wan Fayu, Feng Chaochao, et al. Electrostatic radiation field simulation and interference prediction. *High Voltage Engineering*, 2017, 43(10): 3396-3402)
- [3] 刘尚合, 魏光辉, 刘直承. 静电理论与防护[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1999: 2-20. (Liu Shanghe, Wei Guanghui, Liu Zhicheng. *Electrostatic theory and protection*. Beijing: Ordnance Industry Press, 1999: 2-20)
- [4] 杜照恒, 刘尚合, 魏明, 等. 飞行器静电起电与放电模型及仿真分析[J]. *高电压技术*, 2014, 40(9): 2806-2812. (Du Zhaoheng, Liu Shanghe, Wei Ming, et al. Model and simulation analysis of electrostatic electrification and discharge of aircraft. *High Voltage Engineering*, 2014, 40(9): 2806-2812)
- [5] 刘尚合, 杜照恒, 胡小锋, 等. 航空发动机尾气静电带电机理分析与试验研究[J]. *高电压技术*, 2014, 40(9): 2678-2684. (Liu Shanghe, Du Zhaoheng, Hu Xiaofeng, et al. Analysis and experimental research on electrostatic performance of aero engine exhaust gas. *High Voltage Engineering*, 2014, 40(9): 2678-2684)
- [6] 陆家榆, 何堃, 马晓倩, 等. 空中颗粒物对直流电晕放电影响研究现状: 颗粒物空间电荷效应[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(23): 6222-6234. (Lu Jiayu, He Kun, Ma Xiaoqian, et al. Research status of effects of airborne particles on dc corona discharge: space charge effect of particulate matter. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(23): 6222-6234)
- [7] Nayak S K, Thomas M J. An integro-differential equation technique for the computation of radiated EMI due to corona on HV power transmission lines[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2005, 20(1): 488-493.
- [8] Lee J H, Iyer N M, Maloney T J. Physical model for ESD human body model to transmission line pulse[C]//2019 IEEE International Reliability Physics Symposium (IRPS). 2019: 1-7.
- [9] 徐晓英, 甘瑛洁, 浦实, 等. ESD防护器件HMM和TLP测试方法及性能评价[J]. *高电压技术*, 2017, 43(4): 1348-1353. (Xu Xiaoying, Gan Yingjie, Pu Shi, et al. Test methods and performance evaluation of ESD protection devices HMM and TLP. *High Voltage Engineering*, 2017, 43(4): 1348-1353)
- [10] Berghe S V D, Zutter D. Study of ESD signal entry through coaxial cable shields[J]. *Journal of Electrostatic*, 1998, 44: 135-148.
- [11] 盛松林, 毕增军, 田明宏, 等. 一个新的IEC61000-4-2标准ESD电流解析表达式[J]. *强激光与粒子束*, 2003, 15(5): 464-466. (Sheng Songlin, Bi Zengjun, Tian Minghong, et al. A new analytical expression of current waveform in standard IEC61000-4-2. *High Power Laser and Partice Beams*, 2003, 15(5): 464-466)
- [12] Liou J J. *Electrostatic discharge protection*[M]. London: CRC Press: 2017-12-21.
- [13] 王俊涛. 人体ESD模拟器的研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2008. (Wang Juntao. Research on human body ESD simulator. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2008)
- [14] 谢喜宁, 胡小锋. 一种静电放电模拟装置的设计[J]. *强激光与粒子束*, 2019, 31: 063205. (Xie Xining, Hu Xiaofeng. Design of an electrostatic discharge simulator. *High Power Laser and Particle Beams*, 2019, 31: 063205)
- [15] Lai H W, Chow M W K, Chan K Y. Calibration of electrostatic discharge (ESD) generator in accordance with IEC61000-4-2: 2008 at SCL[J]. *NCSLI Measure*, 2019: 1-9.
- [16] Rachmildha T D, Hamdani D, Mandaris D, et al. Implementation of IEC 61000-4-2 Standard Testing Under Tropical Humidity for Recommendation to Amendment of International Standards[C]//2018 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE). 2018: 1018-1023.
- [17] Shichao L, Xiaobing C, Fangming R, et al. Experiment and simulation analysis of BMM electrostatic discharge simulator[C]//2017 IEEE 5th International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC-Beijing). 2017: 1-4.
- [18] 孙凤杰, 邓建红. 电子学系统强电磁脉冲干扰场路结合仿真[J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27: 124003. (Sun Fengjie, Deng Jianhong. Synthesis of strong electromagnetic pulse interference fields in electronics system. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27: 124003)