

弹载卫星导航设备电磁干扰治理技术

石 现, 梁 旗, 蔡克荣, 杨昌达, 葛宇航, 张泽凯, 于 峰, 季 飏
(上海机电工程研究所, 上海 201109)

摘要: 随着弹载电子设备集成化发展趋势, 弹上计算机、卫星导航等设备在狭小空间内功能紧密耦合, 多源多频段信号传输发生干扰造成导航设备无法准确定位的现象时常发生, 针对这一问题, 系统研究了卫星导航设备电磁干扰治理方法; 研究了微机模块中开关电源与隔离器件的电磁辐射以及谐波干扰特性; 基于电磁波金属介质传播原理, 通过仿真软件建立了设备电磁屏蔽有限元模型, 深度剖析了屏蔽体电导率、厚度、开孔等关键因素对屏蔽效能的影响规律, 提出关键元器件设计、终端天线屏蔽等综合治理方法; 以弹载卫星导航产品进行试验, 干扰信号强度得到了抑制, 设备定位测速成功率提高了 85%。

关键词: 开关电源; 卫星导航设备; 有限元分析; 屏蔽效能; 定位成功率

Electromagnetic Interference Control Technology for Satellite Navigation Equipment on Missile

SHI Xian, LIANG Qi, CAI Kerong, YANG Changda, GE Yuhang,
ZHANG Zekai, YU Feng, JI Biao

(Shanghai Institute of Mechanical and Electrical Engineering, China Aerospace Science and Technology Corporation,
Shanghai 201109, China)

Abstract: With the development of integration of the electronic equipment on missile, due to the functions of microcomputer and satellite navigation module couples close in a small space, multi-source multi-frequency band signals interference with each other, which sometimes caused that the navigation equipment cannot be accurately positioned. To solve the problem, the electromagnetic interference (EMI) control methods for the integrated electronic equipment on missiles are studied systematically. The electromagnetic radiation and harmonic interference characteristics of switching power supply and isolation devices in the circuit is studied. Based on the electromagnetic wave propagation principle in metal media, electromagnetic shielding finite element model is established by software, the influence of shield's conductivity, thickness, openings and other key factors on the shielding effectiveness are analyzed. Comprehensive approaches to EMI management such as key component design and terminal antenna shielding are proposed. A set of integrated electronic equipment is test and the results show that the interference signal intensity is reduced, the equipment positioning speed success rate is increased by 85%.

Keywords: switching power supply; satellite navigation equipment; finite element analysis; shield efficiency; positioning success rate

0 引言

弹载卫星导航设备主要功能是通过导航卫星进行定位, 输出弹体实时位置、速度信息。新时期军事变革加速演进, 武器装备发展面临新的形势, 武器装备新形势和新要求, 迫切需要新型使能技术。武器装备向着小型化、综合化、轻量化、模块化、系列化的趋势发展。在弹上电子设备研制过程中, 随着电子设备呈现模块化、微型化、智能化发展趋势^[1-10], 弹上计算机、卫星导航设备、惯性测量组合等模块一体集成已是重要特征之一。这极大地提高了弹上数据融合处理能力, 同时有效减少了设备体积, 为整弹的轻质化提供了帮助。

然而, 由于弹上各个模块的功能紧密耦合且空间狭小, 工作过程中多源多频段信号互相干扰难以避免, 降低了信息处理的可靠性^[11-15]。其中, 弹上计算机控制模块与卫星导航设备终端天线之间的信号串扰导致设备丢星的问题日益突出, 对弹飞行期间卫星定位稳定性构成挑战, 文献[16]针对弹载卫星导航设备潜在的强电磁脉冲环境, 开发了一套三级防护电路模块, 提高了卫导设备抗大功率脉冲信号冲击能力和带外抑制度。文献[17]针对弹载计算机电磁兼容问题从元器件选型、PCB布局、机箱设计等方面提出了设计原则。文献[18]针对弹载电气系统提出了电磁兼容性设计方法。目前还缺乏弹载计算机、电缆网与卫星导航设备多模块间信号耦合串扰问题的研究, 因此, 开

收稿日期: 2024-07-29; 修回日期: 2024-08-23。

作者简介: 石 现(1995-), 男, 博士, 工程师。

通讯作者: 蔡克荣(1984-), 男, 博士, 研究员。

引用格式: 石 现, 梁 旗, 蔡克荣, 等. 弹载卫星导航设备电磁干扰治理技术[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(12): 216-222.

展弹载电子设备电磁兼容性研究很有必要。

本文基于电磁兼容原理, 深入研究了弹载卫星导航设备信号干扰治理方法。首先分析了开关电源与隔离器件对弹上微机电磁辐射的影响, 系统研究了计算机模块与卫星信号耦合传输特征, 建立了有限元分析模型, 深度剖析了屏蔽体电磁场传播能力关键制约因素, 在此基础上形成了电磁干扰治理的方法并进行试验, 验证了该治理思想的科学合理性。

1 卫星导航设备电磁干扰机理分析

1.1 卫星导航模块组成

卫星导航模块组成图 1 所示, 卫星模块本体在接收到卫星信号后, 射频单元对北斗卫星频点 (B1、B3) 射频信号进行预选滤波处理、信号放大处理以及下变频处理, 得到中频模拟信号 B3 频点, 然后 B3 中频模拟信号送至抗干扰处理部分完成抗干扰算法处理。完成抗干扰处理后的 B3 中频信号上变频后和 B1 射频模拟信号经过合路功放、机弹选择后送基带信号处理, 得到最终的定位、测速信息、伪距、伪距率及通道状态信息及导航电文等, 通过接口单元送至计算机模块完成信息交互。

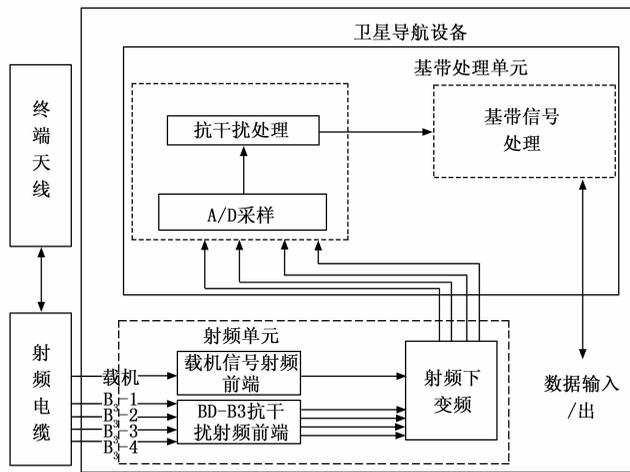


图 1 弹载卫星导航设备组成

1.2 信号耦合传输途径

电磁兼容性 (EMC) 是一个电子系统在预定的电磁环境下正常工作和不对电磁环境产生污染的能力^[19-20]。弹载电子设备通常包括导引头、微机、惯组、卫星导航等相关组件, 为导弹制导控制导航、通讯、供电和遥测等功能提供软硬件平台。其中, 卫星导航设备容易受到弹上其他电子系统泄漏的电磁信号干扰, 从而导致定位失效。

弹上电子设备众多, 包含导引头、弹上计算机、引信、惯性测量组合等, 其中弹上计算机与卫星导航设备交互最密切, 二者间信号易发生互相串扰。其中信号耦合途径如图 2 所示, 根据信号完整性分析可知, 当计算机模块在舱内对外辐射北斗频带内的宽带干扰信号时, 干扰源可通过天线底面安装缝隙, 对外连接器与电缆网、舱体定位结构

孔等路径传播至外部空间, 由卫导天线阵子接收后送至卫导模块射频通道, 从而形成近场干扰。

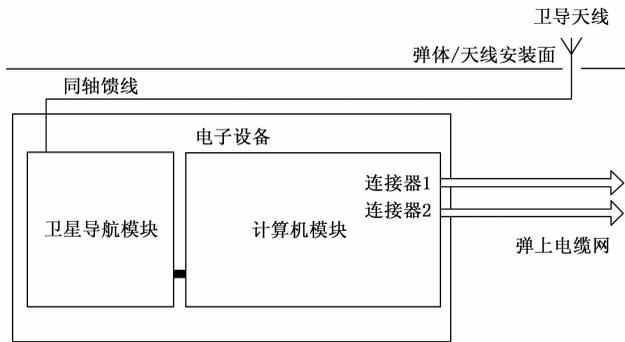


图 2 信号耦合传输途径

1.3 抗干扰软硬件组成

卫星导航设备的抗干扰处理硬件组成如图 3 所示, 抗干扰处理单元完成 B3 频点卫星导航信号抗干扰功能和载机 B1、B3 卫星导航信号接收处理功能。

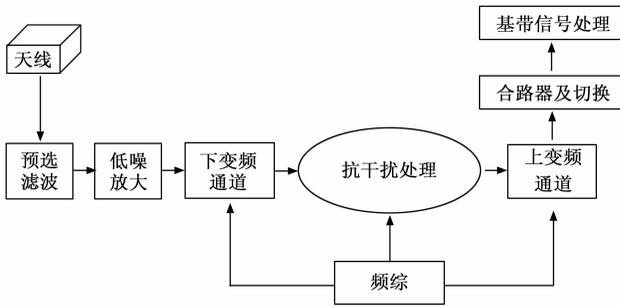


图 3 卫星导航设备抗干扰处理硬件组成

1.3.1 频综模块

频综模块使用本地温补晶振产生的 10 MHz 参考时钟, 产生下变频通道和上变频通道使用的本振时钟 (1 222 MHz)、抗干扰芯片驱动时钟 62 MHz、124 MHz 时钟信号及 ADC 采样时钟。

1.3.2 下变频及 AD 采样模块

下变频通道由预选滤波、低噪声放大、下变频及滤波处理等组成。其中预选滤波器采用中心频率为 B3 的 SAW 带通滤波器, 滤除天线阵子接收到的带外噪声。低噪声放大器将滤波后 B3 频点宽带信号放大固定增益倍数 (30/40 dB)。下变频通道使用专用的多通道射频芯片将 B3 频点射频信号下变频为模拟中频。AD 采样模块使用 4 通道高速 ADC 对下变频输出的 4 路模拟中频信号进行模数转换处理, 得到每路 16 比特宽度的数字信号。

1.3.3 抗干扰处理模块

B3 抗干扰处理模块接收四路 B3 频点中频信号, 对其进行数字下变频处理, 将其变为零中频数字信号, 之后通过频域窄带干扰抑制单元完成窄带干扰的有效抑制。在完成窄带干扰抑制后, 抗干扰处理模块对输入的中频信号进

行计算，使阵列输出达到最优值。处理模块可以调整各通道的权值控制天线方向图，在多个干扰方向上同时产生零陷，实现宽带干扰的有效抑制，进而提高输出信号的干噪比。在完成窄带干扰和宽带干扰有效抑制之后，经数字 AGC 处理，形成幅度恒定的数字复基带 (I/Q) 信号，送给接收机基带信号处理单元。

1.3.4 B3 抗干扰串口模块

B3 抗干扰串口模块负责 B3 抗干扰处理模块与外部进行数据交互，通信接口采用 RS232 接口。通过 B3 抗干扰串口模块，可更改 B3 抗干扰处理流程中可配置寄存器的值，可将 B3 抗干扰处理流程中特定寄存器的值输出以备外部监测。

抗干扰处理子系统核心为抗干扰处理软件 (如图 4)，抗干扰处理软件在抗干扰芯片中实现，完成窄带、宽带、脉冲、扫频等多种干扰类型的干扰抑制，最大抗干扰方向不少于 3 个。

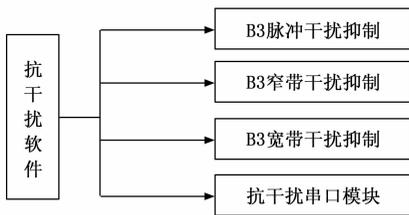


图 4 卫星导航设备抗干扰软件组成

1.4 抗干扰算法原理

真实应用环境中，卫星导航信号容易受到多方面噪声的干扰，导致自身信号被淹没，强度减弱。因此需要根据天线接受的信号进行自适应调零。抗干扰处理系统由接收天线阵列单元和自适应处理器等组成 (如图 5 所示)， M 指天线阵元数量， $x_m(n)$ 是指第 m 个天线输入的信号， w_m^* 代表复加权系数。天线接收信号经处理器确定复加权系数，通过选择匹配的自适应算法，根据多种条件情况来调整自适应调零的控制能力和反应速度，此外还能调节软件实现需要的硬件复杂性。

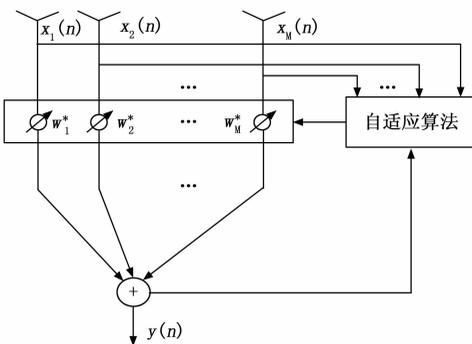


图 5 自适应调零抗干扰原理图

在时间 n 时 M 个天线阵元输出数据的线性组合 $y(n)$ 表示为：

$$y(n) = w^H x(n) \tag{1}$$

式中， $w = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_M]^T$ 是加权向量，表示对阵元信号的幅度加权和相位延迟。

抗干扰后的输出功率为：

$$P_{out} = E[|y(n)|^2] = w^H E[x(n)x^H(n)] w = w^H R_{xx} w \tag{2}$$

式中， $R_{xx} = E[x(n)x^H(n)]$ 是输入信号自相关矩阵。

抗干扰后输出 $y(n)$ 关键在于根据约束准则得到加权矢量 w 。在卫星导航抗干扰算法中，常用的两种自适应约束准则为线性约束最小方差准则 (LCMV) 和功率倒置准则 (PI)。

LCMV 是使滤波器输出功率最小为最优化的准则，即：

$$\begin{cases} \min P_{out} = \min E[|y(n)|^2] \\ s. t. w^H S = 1 \end{cases} \tag{3}$$

该准则使输出信噪比最大。

PI 准则没有明确的波束指向，只在约束条件下，使输出功率最小，特别适用于干扰大于噪底，且有效信号淹没在噪底以下的情况。由于卫星导航信号到达地面后淹没在热噪声以下，因此功率倒置准则约束特别适用于卫星导航抗干扰。

以常用的 SMI 算法为例，阵列加权矢量的具体求解过程如下：

- 1) 正交下变频得到正交的复信号 $\tilde{X}(n)$ ；
- 2) 估计协方差矩阵 $\hat{R} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \tilde{X}(k)\tilde{X}^H(k) + \sigma^2 I$ ；
- 3) 通过求逆运算得到 \hat{R}^{-1} ；
- 4) 计算权矢量 $w_{opt} = \hat{R}^{-1} a_0$ ，功率倒置时， $a_0 = [1, 0, \dots, 0]$ ，数字波束条件下， a_0 为指定方向的导向矢量；
- 5) 权矢量归一化，与信号相乘，输出 $y(n) = w_{opt}^H \tilde{X}(n)$ 。

抗干扰模块内部算法结构如图 6 所示，AD 采集数据经正交下变频后，计算协方差矩阵，对协方差矩阵求逆，得到逆矩阵，然后根据权值计算公式得到权值矢量，权值矢量与延时后的信号进行相乘，得到抗干扰后数据输出。

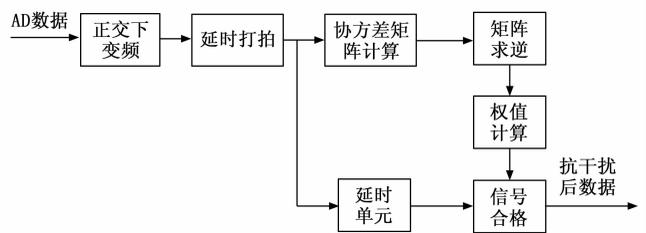


图 6 抗干扰算法内部结构图

1.5 天线近场干扰机制

卫星导航设备采用右旋圆极化微带天线对 B3 信号进行接收，4 个微带天线组成圆环阵列，通过抗干扰算法计算各通道的权值，进而控制天线方向图，在多个干扰方向上同时产生零陷，实现抗干扰的功能。

远场信号传输路径如图 7 (a) 所示，信号在天线阵面

一个到 3 个方向, 到达每个振子的信号具有很强的相关性, 抗干扰算法能够识别干扰方位并抑制这些干扰。如图 7 (b) 所示, 当变为近场干扰时, 舱内部干扰信号从天线阵面的不同方向进入天线阵子。

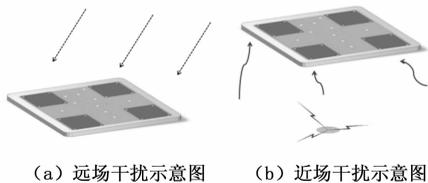


图 7 信号传输路径

由前述宽带抗干扰的基本原理, 算法解算过程中的关键步骤为估计协方差矩阵 $\hat{\mathbf{R}} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \tilde{\mathbf{X}}(k) \tilde{\mathbf{X}}^H(k) + \sigma^2 \mathbf{I}$ 。对远场干扰, 天线阵元对应正交下变频后的复信号中, 干扰信号入射角接近平行, 相位关系明确, 各路信号中的干扰分量具有显著的相关性, 可估计出准确的协方差矩阵, 得到准确的加权矢量系数, 滤波合并后可抵消干扰信号分量, 同时最大化保留有效的卫星导航信号分量。

对近场干扰, 下变频后得到的复信号中, 不同阵元各自包含的干扰信号分量因传播路径不同, 不再具有固定的人射角度和相位关系, 因而估算的估计协方差矩阵存在显著的失真, 且均有一定的随机性, 将直接导致解算得到的加权矢量错误, 既无法完全对消干扰信号, 还可能在干扰较强时对收到的正常卫导信号产生较大的畸变, 导致接收性能下降。

由此可知, 卫导设备的抗干扰处理方法无法处理舱体内部泄露的 B3 工作频段以内的宽带干扰。

2 电磁干扰治理方法

2.1 开关电源与隔离器件辐射特性分析

器件级辐射源可分为边缘辐射和输入至输出的偶极子辐射, 该两类辐射源能通过线间耦合和近场辐射耦合到信号线中, 进而通过线缆对外辐射。

在小型化和地隔离的需求背景下, 微机模块电气接口电路常采用磁隔离器件, 此外微机通常会使用较多的开关电源以及隔离电源等易产生电磁辐射噪声的器件^[4-7]。主要有磁隔离器包含开关电源和一组隔离收发器, 422 接口包含一个开关电源和一组隔离收发器, 隔离电源内置了高压隔离 DC/DC 电源, 这些是造成卫导 B3 频点超标的主要器件干扰源。

根据傅里叶变换分析, 时钟信号呈现的时域周期信号可通过傅里叶变换得到频域的功率电平 (纵轴) 分布。由图 8 可以看出: 频谱由主瓣和无数个副瓣组成, 每个副瓣功率最大值随着频率的增高而下降, 在转折频率 ($1/\pi t_r$) 之前以 -20 dB/10 倍频程下降, 经第二个转折频率以 -40 dB/10 倍频程下降。根据计算, 信号能量的 97% 分布在基波和 20 次谐波以内。

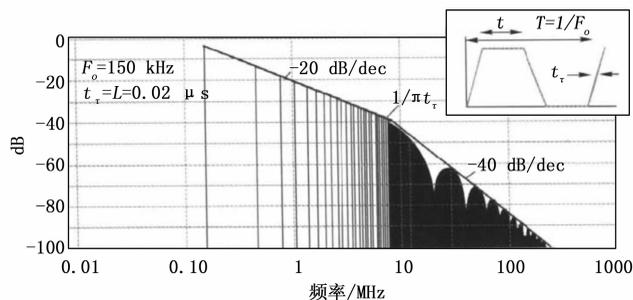


图 8 梯形波频谱分布

计算机模块中磁隔离器、隔离电源、422 接口芯片频率特性显示, 3 种器件在 B3 附近均存在谐波分量, 易对 B3 频点信号产生干扰。

为降低元器件级辐射发射, 减少单路串口接口的电源功率是手段之一, 对隔离地电进行滤波设计优化, 如在隔离地电之间增加磁珠以降低 EMI 对外辐射; 此外, 可以采用光耦加隔离电源的方式降低电磁辐射。为实现降低 EMI 最优化效果, 本文采用降低接口电源功率、增加磁珠、光耦隔离的方式进行综合治理。

2.2 电磁屏蔽效能研究

2.2.1 屏蔽机理

对电磁场采取屏蔽措施是解决电磁兼容问题的常见方法^[8], 可以有效抑制外部噪声干扰影响设备的正常稳定工作, 同时也能降低电子设备自身对外产生干扰。

在各向同性均匀导电介质中, 均匀平面电磁波 (x 轴传播方向) 的传播特性为:

$$E_y(x, t) = \sqrt{2} E_y^+ e^{-\alpha x} \cos(\omega t - \beta x + \varphi_E) \quad (4)$$

$$H_z(x, t) = \sqrt{2} H_z^+ e^{-\alpha x} \cos(\omega t - \beta x + \varphi_H)$$

E_y^+ 、 H_z^+ 是电场与磁场振幅, 由场源决定。

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu \epsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{\omega^2 \epsilon^2}} - 1 \right)} \quad (5)$$

$$\beta = \omega \sqrt{\frac{\mu \epsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{\omega^2 \epsilon^2}} + 1 \right)}$$

当介质为良导体时 ($\sigma \gg \omega \epsilon$), $\alpha = \beta = \sqrt{\frac{\omega \mu \sigma}{2}}$ 。

屏蔽机理如图 9 所示, 当电磁波经过屏蔽层表面时, 屏蔽体与空气界面阻抗突变使入射波发生反射衰减, 降

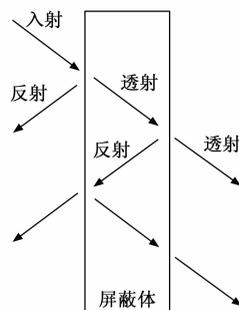


图 9 电磁场屏蔽机理

低电磁波能量。另外，还会有部分电磁波能够透射进入屏蔽材料体继续传播，其中部分透射波能量在屏蔽体中被吸收，呈指数级衰减，转换成热量消耗。未被吸收的部分能量传播至屏蔽体另一个表面时继续发生反射与透射现象。这其中只有少部分能量会穿透屏蔽材料和空气交界面传播至外部空间。剩余的电磁波能量会在屏蔽体内部两个侧壁之间循环地发生反射—透射—再反射，直至能量全部被衰减和透射消耗。

屏蔽体对磁场的屏蔽效能定义为：

$$SE = 20\log_{10} \left| \frac{H_1}{H_2} \right| \quad (6)$$

其中： H_1 、 H_2 分别为无屏蔽体和有屏蔽体时的磁场强度。

2.2.2 屏蔽性能仿真分析

采用有限元仿真方法进一步研究屏蔽体电磁屏蔽性能及其影响因素。基于有限元软件建立的二维仿真分析模型如图 10 (a) 所示，中间为金属导体铜材质，在导体外围放置圆环形屏蔽体，以给导体施加交流电激励的形式来模拟

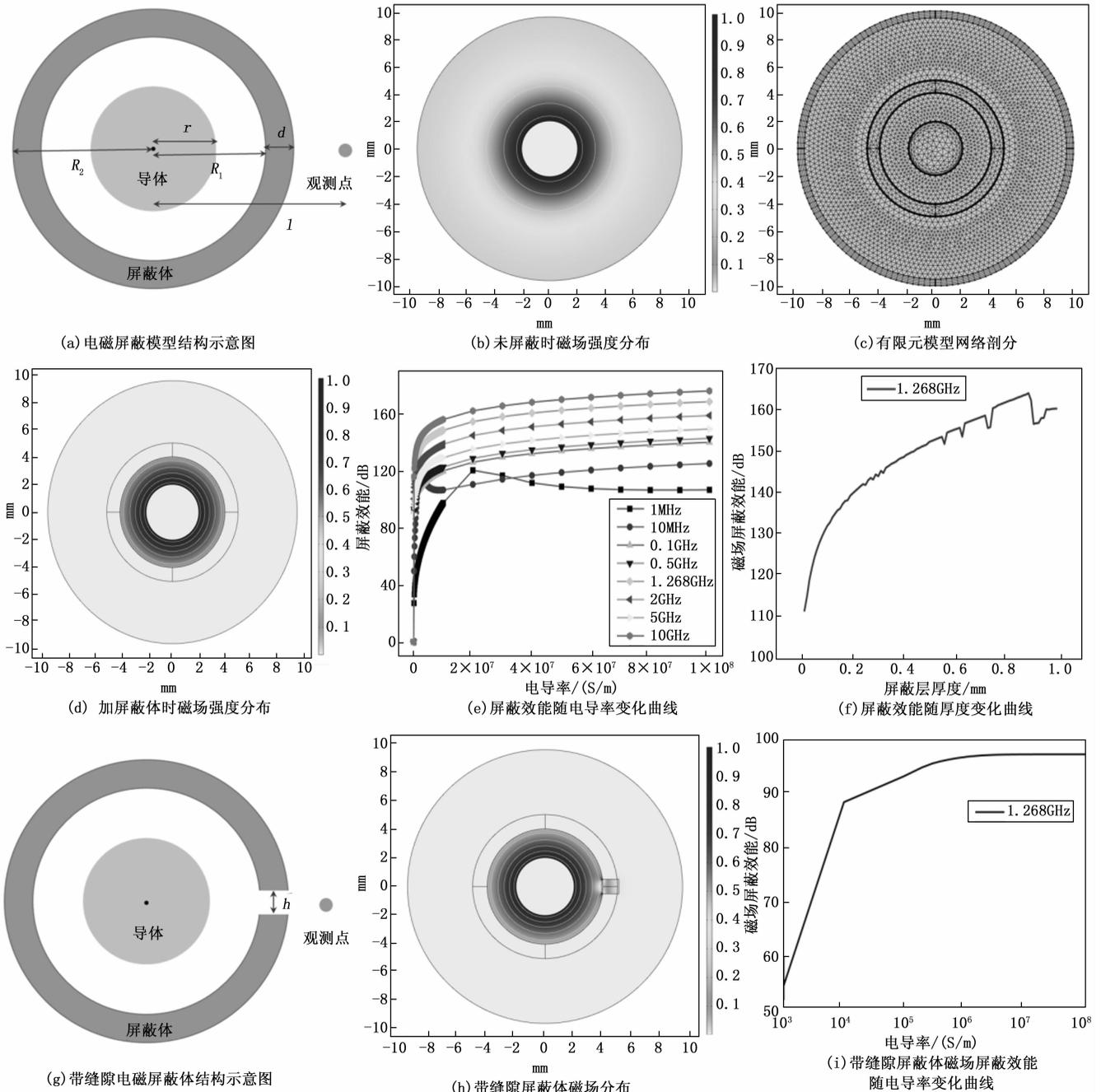


图 10 屏蔽效能仿真图

微机辐射的干扰信号。观测点位于圆心的正右方, 相关的结构和材料参数见表 1。

表 1 电磁屏蔽有限元分析模型相关参数

	参数	数值
导体	半径 r/mm	3
	电导率 $\sigma_1/\times 10^7 \text{ s/m}$	5,998
	相对磁导率 μ_1	1
	相对介电常数 ϵ_1	1
屏蔽体	内半径 R_1/mm	4
	外半径 R_2	变量
	电导率 σ_2	变量
	相对磁导率 μ_2	1
	相对介电常数 ϵ_2	1
	缝隙宽度 h/mm	1
	观测点	与圆心距离 l/mm

首先仿真分析了无屏蔽时磁场分布特征, 如图 10 (b) 所示 (图例归一化显示), 由于趋肤效应, 磁场集中于导体表面, 向周围空气介质快速衰减传播。施加屏蔽体后有限元模型的网格剖分效果如图 10 (c), 对屏蔽体区域进行细化处理, 以获取更精确的计算结果。图 10 (d) 绘制了仿真结果, 磁场集中在导体与屏蔽体之间的空气介质中, 观测点位置的磁场强度大大降低, 达到了隔离电磁信号目的。

接着, 为进一步定量研究屏蔽体屏蔽效能的影响因素, 研究在不同频率 (1、10、0.1、0.5、1.268、2、5、10 GHz) 下材料电导率对屏蔽效能的影响规律, 其中覆盖了卫导的工作频点。根据图 10 (e), 随电导率的增加, 屏蔽效能先快速增强, 在电导率大于 10^7 (S/m) 后增势逐渐放缓并趋于“饱和”。此外, 屏蔽效果随频率的增加呈现增强的趋势, 10 GHz 频率下的最大屏蔽效能比 1 MHz 时的最大屏蔽效能高达 70 dB, 比 0.1 GHz 是增强 40 dB。因此, 在屏蔽材料设计时需要针对特定频率进行, 电导率无需超常规的高。另一方面, 研究分析了屏蔽体厚度对屏蔽效能的影响, 结果如图 10 (f) 所示, 屏蔽效能随厚度增加先快速增长, 后逐渐放缓这与导体的趋肤深度相关, 1 mm 厚度时达到 160 dB。在电磁屏蔽设计中, 应综合考虑电导率与屏蔽体厚度参数。

其次, 电子设备的微小的孔缝通常会存在较大的电磁场泄漏, 通过仿真研究了屏蔽体缝隙对电磁屏蔽效果的影响。带缝隙结构模型如图 10 (g) 所示, 在圆环右侧与观测点同一水平线上设计开口宽 1 mm。通过对比磁场分布图 10 (c) (g), 可以明显看出磁场通过孔缝通道向外扩散, 缝隙处场强显著大于空气介质中的场强。进一步地图 10 (i) 绘制了在 1.268 GHz 频点下, 带缝隙屏蔽体的屏蔽效能随电导率的变化曲线, 与图 10 (e) 对比可得, 相比无缝隙情况效能降低了 70 dB, 极大地削弱了电磁屏蔽效果。因此, 在电磁屏蔽设计实践中, 应该坚决防止留下缝隙。

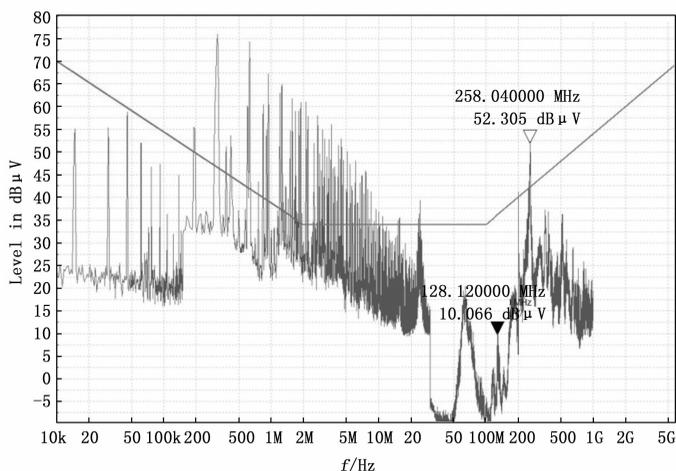
因此, 在干扰源传输途径治理方面, 控制各模块整机结构体的安装精度减小孔缝尺寸很有必要。针对存在信

号泄漏的区域施加屏蔽措施, 如信号线缆包裹, 各模块拼接界面、结构体开孔缝隙等都需要使用介质材料进行填充。此外, 针对终端天线与舱体的接触安装也需要进行施加屏蔽措施。

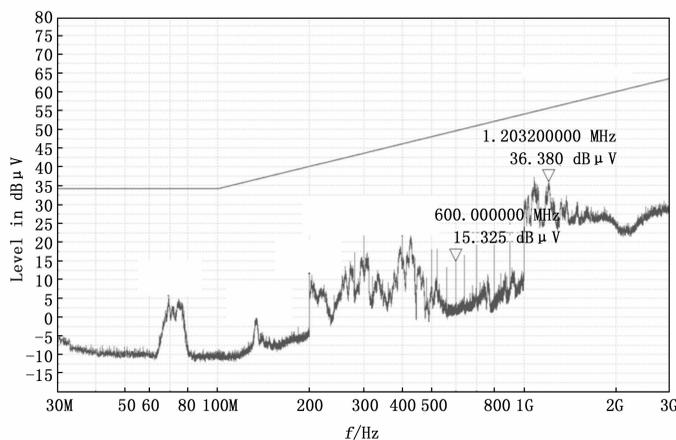
3 试验与分析

3.1 降低 EMI

基于以上研究结论, 选取某型弹载电子设备进行试验验证。首先将隔离收发器进行优化设计, 新款器件减少了原单路串口接口的电源功率, 封装为 BGA。在隔离地之间增加磁珠进行滤波设计优化, 磁珠在 80 MHz 频点的阻抗约 500 Ω , 优化设计后电气特性满足要求。此外, 数字隔离器优化采用光耦加隔离电源的方式实现。采用频谱仪近场探头对电子整机设备进行扫频测试, 优化前后整机对外辐射情况分别如图 11 所示, 在 80 MHz 基频处压制了 7.5 dB, 证明优化器件有效降低了 EMI 对外辐射。



(a) 优化前辐射特性



(b) 优化后辐射特性

图 11 器件优化前后计算机对外辐射频谱图

3.2 屏蔽

其次, 终端天线为敏感设备, 有必要对天线安装留下的微小缝隙施加屏蔽措施。搭建实验室测试环境, 测试方法是: 通过在工装内部放置辐射天线模拟干扰源, 使用矢

量网络分析仪测试 S21 参数。分别对天线安装面存在垫片以及去除垫片并安装铜箔屏蔽层后两种条件进行测试, 对比测试结果可得到屏蔽铜箔带来的增益提升效果。对比表 2 中的前后测试结果, 可明显得到屏蔽铜箔带来的增益提升效果, 综合考虑实际使用场景中填平缝隙的工艺水平, 屏蔽措施大概能够将隔离度提升 2.5 dB 左右。

表 2 天线施加屏蔽测试结果对比

测试项	频率/ MHz	未加屏蔽正常 安装/dB	天线加屏蔽/ dB	添加屏蔽后 提升量/dBc
插损	1 258	-49.920	-53.646	3.726
	1 268	-48.827	-52.828	4.001
	1 278	-49.634	-50.055	0.421
添加屏蔽后提升量均值				2.716

3.3 定位效果

最后, 将卫星导航设备装入弹载电子设备系统, 与弹上计算机、惯性测量组合级联, 施加以上降低 EMI、屏蔽的治理方法前后进行对天实收试验验证。通过抗干扰上位机监测干扰强度显示, 将电磁干扰降低了 13 dBm, 干扰信号强度得到有效压制。

进行多次室外收星试验, 测试结果见表 3, 治理前载噪比数值较小, 收星数量仅 6 颗, 定位成功率 25%, 定位测速达标率 15%。施加治理措施后, 收星数量达到 16 颗, 载噪比提高了 5 dB 左右, 定位成功率及测速达标率都达到 100%, 实现了卫星导航设备正常定位功能。

表 3 卫星导航设备收星及定位结果

	收星数	试验次数	定位成功次数	定位测速达标次数
治理后	16	20	20	20
治理前	6	20	5	3

4 结束语

本文针对弹载电子设备间多源多频段信号传输易发生干扰造成卫星导航设备无法准确定位问题, 系统开展了弹载电子设备的电磁兼容性研究。基于电子器件与电磁波传播原理, 深入研究了电路板上隔离器件产生的电磁辐射以及干扰信号耦合传输途径, 进一步通过有限元模型深度剖析了屏蔽体电导率、厚度、开孔等关键因素对电磁场屏蔽效能的影响规律, 进而提出了元器件设计、信号路径及终端天线屏蔽等电磁干扰治理方法准则, 最终以具体导航设备为案例进行试验。结果表明本文方法降低了弹舱内干扰强度, 提高了卫星导航设备的定位成功率, 为实现弹载电子设备间信号兼容传输奠定了基础。

参考文献:

[1] 唐磊, 赵元富, 吴道伟, 等. 航天电子微系统集成技术展望 [J]. 航天制造技术, 2022, 5: 69-73.
[2] 范晋祥, 刘益吉, 李宁, 等. 精确打击体系智能化的发展 [J]. 空天防御, 2023, 6 (4): 1-11.

[3] 石大山, 葛宇航, 孟光韦, 等. 弹载综合电子系统及其关键技术发展分析 [J]. 空天防御, 2023, 6 (3): 52-57.
[4] 卢科, 唐裕沛. 开关电源电磁兼容辐射骚扰的测试与研究 [J]. 计量与测试技术, 2021, 48 (11): 48-52.
[5] 槐泽鹏, 佟泽友, 梁雪超, 等. 智能导弹武器系统综述 [J]. 导航与控制, 2017 (16): 104-112.
[6] 袁义生, 兰梦罗. 电力电子电路 PCB 电场串扰及屏蔽研究 [J]. 电子器件, 2020, 43 (6): 1215-1221.
[7] KONG P J, LEE F C. Transformer structure and its effects on common mode EMI noise in isolated power converters [C] // Conference Proceedings-IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2010, 1: 1424-1429.
[8] YAO J, WANG S, LUO Z. Near field coupling's impact on radiated EMI and mitigation techniques for power converters in automotive applications [C] // Detroit, MI, USA: 2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2020: 5882-5889.
[9] 苏晓东, 苏峰, 宋蔚阳, 等. 基于 VNX 总线的航天飞行器综合控制系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (3): 117-120.
[10] 赵凯华, 陈熙谋. 电磁学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2011.
[11] BLIKSTAD M, KARLSSON E, LÖÖW T, et al. An optimisation approach for pre-runtime scheduling of tasks and communication in an integrated modular avionic system [J]. Optimization and Engineering, 2018, 19 (4): 977-1004.
[12] PADAYACHEE J, BRIGHT G. Modular machine tools: design and barriers to industrial implementation [J]. Journal of Manufacturing Systems, 2012, 31 (2): 92-102.
[13] ZHAO C X, WANG P, YAN F. Reliability analysis of the reconfigurable integrated modular avionics using the continuous-time Markov chains [J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2018: 1-8.
[14] SHIN C, LIM C, KIM J, et al. A software-based monitoring framework for time-space partitioned avionics systems [J]. IEEE Access, 2017, 5: 19132-19143.
[15] OBUKHOV A D, KRASNYSKIY M N. Automated organization of interaction between modules of information systems based on neural network data channels [J]. Neural Computing and Applications, 2021, 33 (12): 7249-7269.
[16] 郭艳辉, 周成龙, 李子森. 一种弹载卫星定位导航装置电磁脉冲防护设计技术 [J]. 新技术新工艺, 2017, 12 (1): 62-65.
[17] 王艺菲, 李天鹏. 弹载计算机的电磁兼容设计 [J]. 飞航导弹, 2011, 6 (1): 56-59.
[18] 邵云峰, 王臻. 弹上电气系统电磁兼容性设计 [J]. 现代防御技术, 2007, 35 (2): 34-37.
[19] GAO J, CHEN W Z, XIANG T, et al. Learning deformable tetrahedral meshes for 3D reconstruction [J]. Advances In Neural Information Processing Systems, 2020, 33: 9936-9947.
[20] PARK G, KIM C, LEE M, et al. Building geometry simplification for improving mesh quality of numerical analysis model [J]. Applied Sciences, 2020, 10 (16): 1-7.