



·效应、试验与评估·

## 典型后门耦合目标回波信号特性分析\*

冯溪溪, 赵景涛, 曹 垒

(中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘 要:** 构建了典型后门耦合目标, 从时域和频域两个维度对目标进行了回波特性仿真, 发现目标的孔缝-腔体结构出现强耦合时回波频域波形可观察到幅度凹坑, 且强耦合频率时的回波时域波形呈双峰状, 与非强耦合回波存在明显差异。通过改变后门耦合目标尺寸和形态仿真验证了所发现的回波信号特征规律, 利用发现的回波信号特征规律可从回波信号中提取出未知目标腔体后门强耦合微波参数。

**关键词:** 后门; 强耦合; 回波信号; 特征; 仿真

中图分类号: TM931

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202436.230272

## Characteristic analysis of echo signal of typical backdoor coupling target

Feng Xixi, Zhao Jingtao, Cao Lei

(Institute of Applied Electronics, CAEP, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** In this paper, a typical backdoor coupled target is constructed, and the echo characteristics of the target are simulated from two dimensions of time domain and frequency domain. It is found that amplitude pits can be observed in the echo frequency domain waveform when the aperture-cavity structure of the target is strongly coupled, and the echo time domain waveform when the aperture-cavity structure is strongly coupled is bimodal, which is obviously different from the non-strongly coupled echo. By changing the size and shape of the backdoor coupled target, the characteristic law of the echo signal is verified by simulation.

**Key words:** backdoor, strong coupling, echo signal, characteristics, simulation

在日益复杂的电磁环境下, 现代电子设备不可避免地会受到外部电磁场的干扰<sup>[1]</sup>。外部电磁场通过设备外接线缆和非理想屏蔽壳及孔缝结构进入目标腔体内部, 与内部设备发生耦合称为后门耦合<sup>[2-5]</sup>。当前后门耦合研究大都通过对已知目标开展效应试验等评估手段获取目标后门强耦合参数<sup>[6-10]</sup>, 不同目标后门耦合特征千差万别, 对应未知目标难以确定有针对性的高效强耦合参数。为探索从回波信号中提取出目标腔体后门强耦合微波参数, 本文开展了典型后门耦合目标的回波信号特征分析, 从时域和频域两个维度开展了目标回波特性仿真, 分析了与目标后门强耦合相关的回波信号特征规律。

### 1 典型后门耦合目标构建

为开展典型后门耦合目标的回波信号特征分析, 首先需要构建具有典型代表性的后门耦合目标用于分析研究, 其应具备的特征有: 对电磁脉冲敏感易损; 耦合途径以后门耦合为主, 具有典型腔体结构且孔缝特征明显; 目标具有代表性, 应用场景广泛且具备研究价值。基于上述特征, 选择计算机机箱作为典型后门耦合目标。同时, 为减小仿真运算量, 对真实计算机机箱做特征提取与简化缩比, 构建了具有金属壳体和耦合孔缝的理想计算机机箱作为本文的典型后门耦合目标, 用于开展回波信号特征分析。

在电磁仿真软件中构建简化的理想机箱模型如图 1 所示, 机箱长宽高尺寸为 40 mm×20 mm×50 mm, 机箱正面开孔缝长宽尺寸为 15 mm×5 mm, 三个孔缝垂直排布, 孔缝两两中心间距为 15 mm。

\* 收稿日期: 2023-08-16; 修订日期: 2023-12-30

基金项目: 高功率微波技术重点实验室基金项目(61426050401; JCKYS2021212017)

联系方式: 冯溪溪, fxxbit@126.com。

通信作者: 曹 垒, 1362991722@qq.com。

## 2 目标频域耦合及回波信号特性分析

### 2.1 典型后门耦合目标频域耦合及回波信号仿真

选用单位强度即 1 V/m 的平面波从正对机箱孔缝方向对构建的简化机箱模型进行辐照, 构建主动信号对目标进行探测时的远场电磁环境, 信号极化方向为垂直线极化, 在机箱四周利用吸收边界截断计算域, 模拟电磁波自由空间传导过程。仿真模型设置如图 2 所示。

添加电场求解器, 使用时域求解器对理想机箱的腔体内耦合情况进行求解, 得到的不同频率  $f$  下机箱腔体内耦合场分布如图 3 所示, 在  $f=9$  GHz 时可以观察到机箱腔体内部耦合明显强于其他频率。

通过添加远场探针机箱回波进行计算, 得到 8~10 GHz

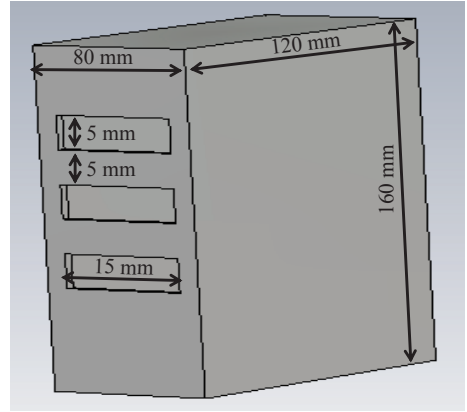


Fig. 1 Diagram of the ideal chassis model

图 1 理想机箱模型图

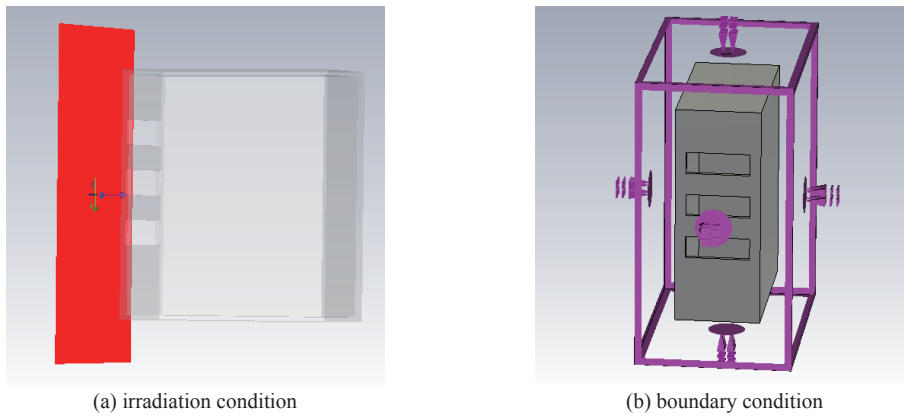


Fig. 2 Model simulation settings for the simplified chassis

图 2 简化机箱模型仿真平面波辐照和边界条件设置

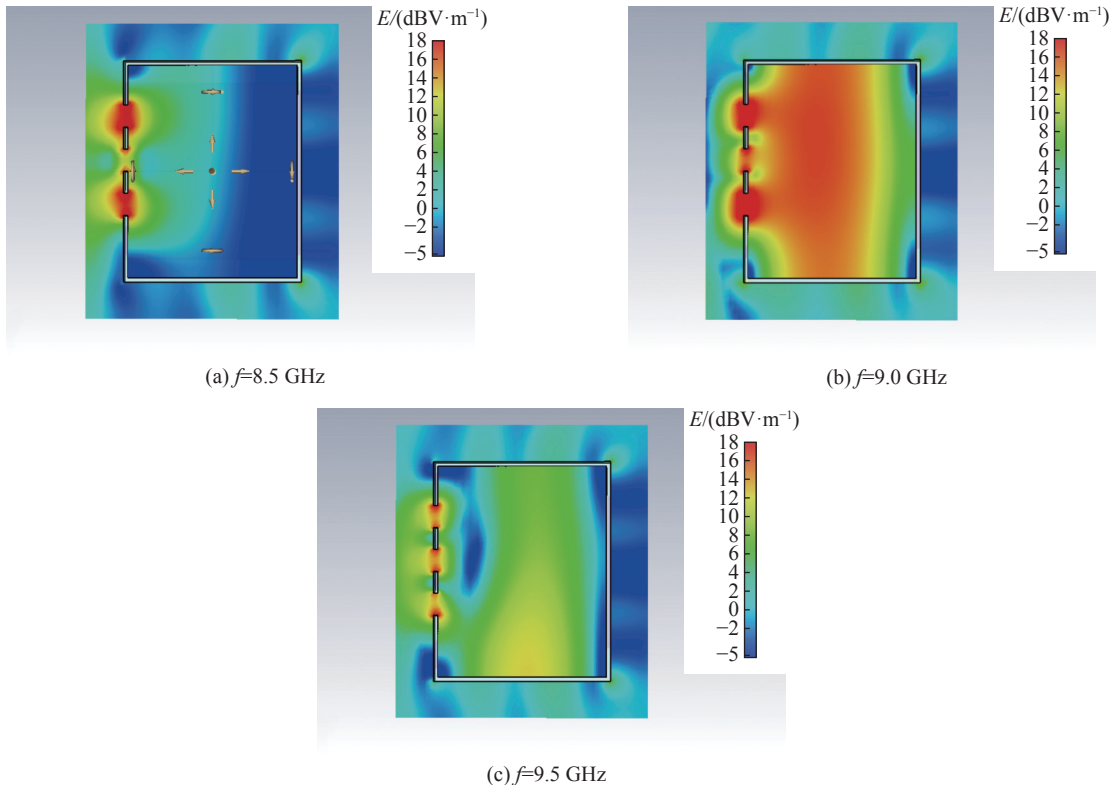


Fig. 3 Coupling field distribution in chassis cavity

图 3 机箱腔体内耦合场分布

频域上回波信号场强波形如图 4 所示, 可以发现, 机箱回波信号在 9 GHz 附近有一个波谷。

对比同尺寸完全密封长方体机箱和简化理想开缝机箱的回波信号和机箱内耦合场, 如图 5 所示, 可以发现: 使用相同的探测信号进行辐照时, 机箱的孔缝-腔体耦合会导致回波信号场强波形在频域上某频点有超过 20 dBV/m 的凹坑, 且此机箱内部耦合场强波形在频域对应位置附近可以观察到超过 15 dBV/m 的耦合场强波峰。

## 2.2 不同后门耦合目标的频域回波信号特性分析

为进一步验证目标回波信号特征, 在典型后门耦合目标基础上构建了多种不同后门耦合目标, 通过频域仿真求解其目标内耦合场及回波信号。

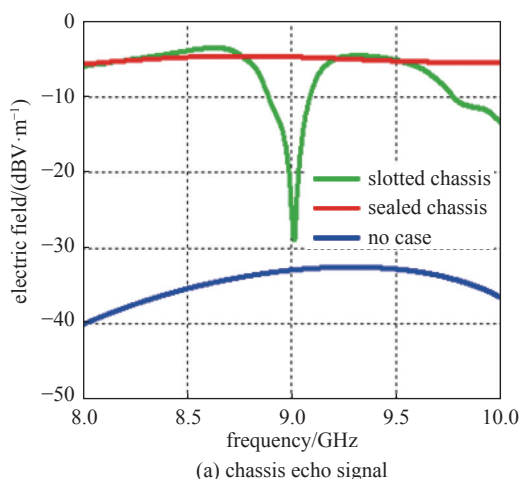


Fig. 5 Frequency domain simulation diagram of chassis echo signal and coupling field strength

图 5 机箱回波信号及耦合场强频域仿真图

对理想机箱尺寸非等比放大至长宽高尺寸为 120 mm×80 mm×160 mm, 此时机箱正面开孔缝长宽尺寸为 64 mm×21.3 mm, 三个孔缝垂直排布, 孔缝两两中心间距为 42.6 mm。构建的放大机箱模型如图 6 所示。

在 1.5~2.5GHz 频率范围内求解得到的机箱内部中心位置耦合场强和回波的频域波形与图 7 所示。可见, 在频率约为 2.2 GHz 时机箱内部耦合场强达到峰值, 与其对应的, 回波在约 2.2 GHz 位置同样存在明显凹坑。

改变目标模型形态, 将机箱改为方形, 长宽高尺寸为 40 mm×40 mm×50 mm, 孔缝依旧位于机箱中心垂直排布, 孔缝尺寸及间距不变, 如图 8 所示。

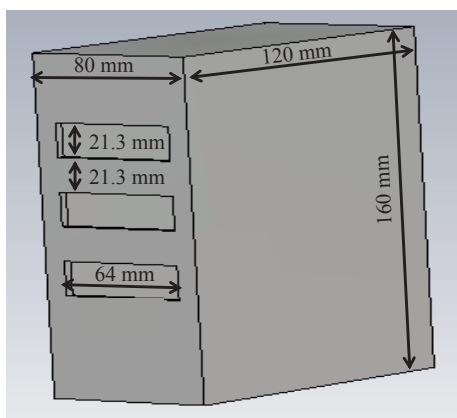


Fig. 6 Enlarged chassis model

图 6 放大机箱模型

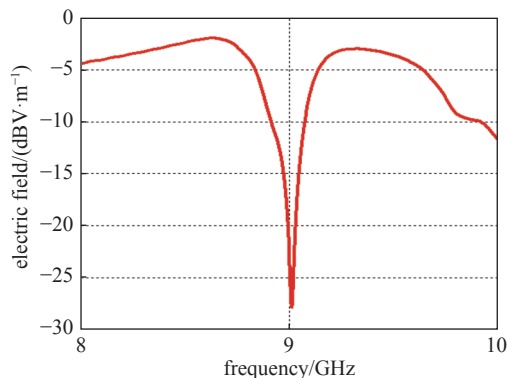


Fig. 4 Frequency domain simulation diagram of chassis echo signal

图 4 机箱回波信号频域仿真图

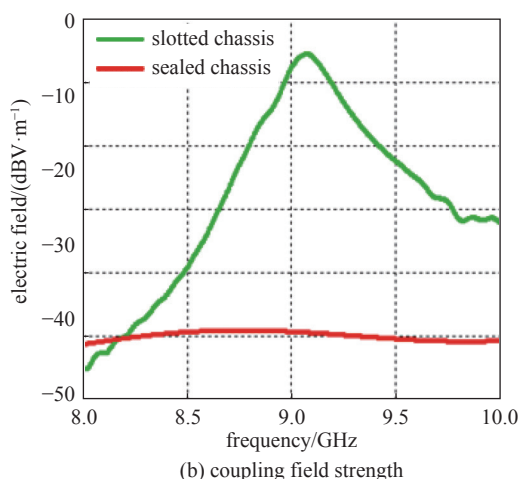


Fig. 5 Frequency domain simulation diagram of chassis echo signal and coupling field strength

图 5 机箱回波信号及耦合场强频域仿真图

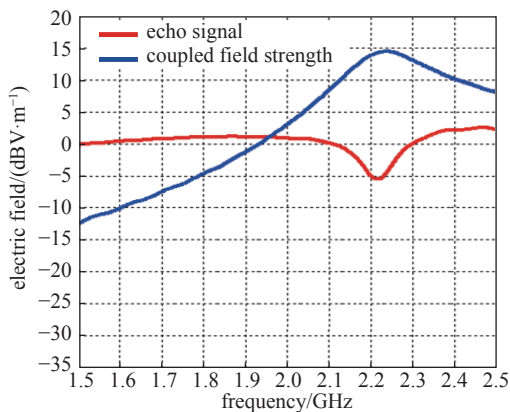


Fig. 7 Frequency domain simulation results amplified chassis echo signal and coupled field strength

图 7 放大机箱回波信号及耦合场强频域仿真波形

在 5.1~5.9 GHz 频率范围内求解得到的机箱内部中心位置耦合场强和回波的频域波形与图 9 所示。可见频率约为 5.5 GHz 时机箱内部耦合场强达到峰值, 与其对应的, 回波在约 5.5 GHz 位置同样存在明显凹坑。

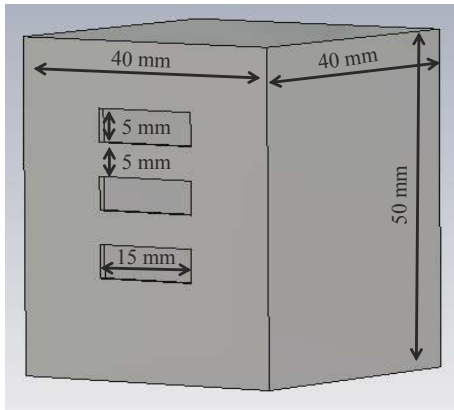


Fig. 8 Square chassis model  
图 8 方形机箱模型图

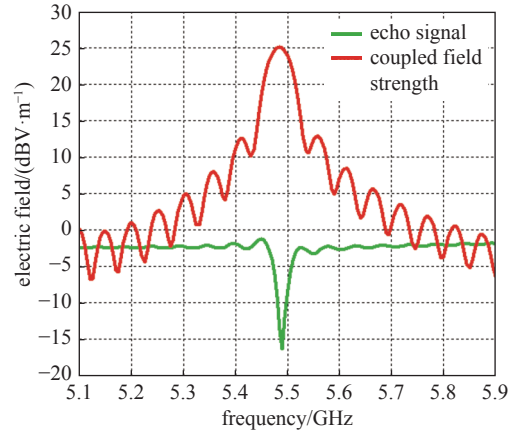


Fig. 9 Frequency domain simulation results of the square chassis signal and coupled field strength  
图 9 方形机箱回波信号及耦合场强频域仿真波形

通过对理想机箱这一典型后门耦合目标的频域耦合及回波信号耦合仿真, 发现回波信号频域的幅度特征(幅度极值位置频率)与目标后门强耦合频率具有较好的相关性。

### 3 目标时域耦合及回波信号特性分析

#### 3.1 典型后门耦合目标时域耦合及回波信号仿真

基于频域仿真结果, 设置脉宽 20 ns、中心频率为 9 GHz 的方波调制的正弦波形为平面波辐照激励波形, 求解后门强耦合频率下的理想机箱时域耦合及回波信号。得到的理想机箱内部中心位置耦合场波形如图 10(a)所示。可见此时, 机箱内部发生了强耦合谐振, 机箱内部耦合场强最大值约为激励值的 6.5 倍。辐照开始后, 机箱内部耦合场强从 0 逐步增长至最大并保持平稳, 直至 20 ns 激励脉冲结束, 机箱内耦合场强又逐渐回落至 0。求解得到的强耦合回波波形如图 10(b)所示, 回波波形呈双峰状, 两个尖峰的间隔与激励脉宽一致。

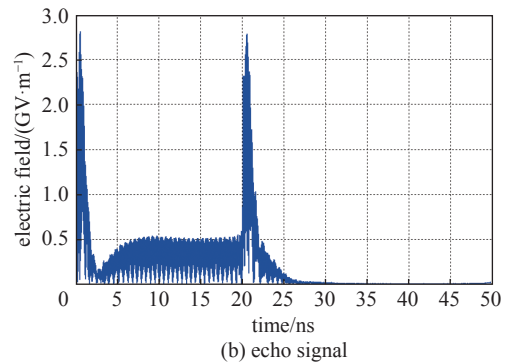
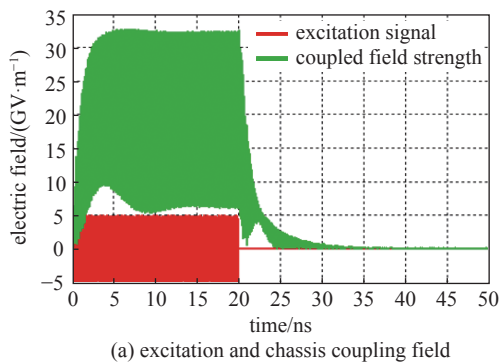


Fig. 10 Time domain strong coupling waveform at 9 GHz  
图 10 9 GHz 强耦合时域波形

对比非强耦合频率下的时域波形特征, 分别设置脉宽 20 ns、中心频率为 8 GHz 和 8.5 GHz 的方波调制的正弦波形为平面波辐照激励波形, 求解得到 8 GHz 和 8.5 GHz 时的理想机箱内部中心位置耦合场时域波形如图 11 所示。可见此时, 机箱内部未能发生强耦合谐振, 机箱内部耦合场强仅在辐照发生后瞬间达到峰值, 随后趋与平稳, 直至脉冲结束前再上升至一较大值, 再逐渐衰减, 机箱内耦合场强值略大于或小于激励值。

在 8 GHz 和 8.5 GHz 时求解得到的回波波形如图 12 所示, 回波波形包络近似呈方波状, 与强耦合频率时的回波形状有明显差异。

#### 3.2 不同后门耦合目标的时域回波信号特性分析

对理想机箱尺寸非等比放大至长宽高尺寸为 120 mm×80 mm×160 mm 的放大机箱模型, 基于频域仿真结果在 2.2 GHz 出现的强耦合, 设置脉宽 20 ns、中心频率为 2.2 GHz 的方波调制的正弦波形为平面波辐照激励波形, 求解

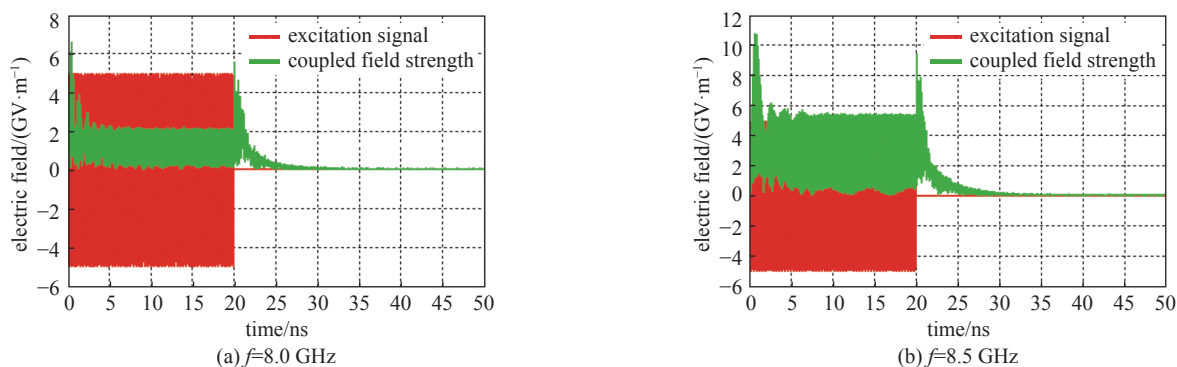


Fig. 11 Excitation and chassis coupling field time domain waveform (weak coupling)

图 11 激励及机箱耦合场时域波形(弱耦合)

后门强耦合频率下的理想机箱时域耦合及回波信号。得到的理想机箱内部中心位置耦合场波形如图 13(a)所示。可见此时机箱内部发生了强耦合谐振, 机箱内部耦合场强最大值约为激励值的 6 倍。辐照开始后, 机箱内部耦合场强从 0 逐步增长至最大并保持平稳, 直至 20 ns 激励脉冲结束, 机箱内耦合场强又逐渐回落至 0。求解得到的强耦合回波波形如图 13(b)所示, 回波波形同样呈双峰状, 两个尖峰的间隔与激励脉宽一致。

对比放大机箱非强耦合频率下的时域波形特征, 设置脉宽 20 ns、中心频率为 1.8 GHz 的方波调制的正弦波形为平面波辐照激励波形, 求解得到 1.8 GHz 时的理想机箱内部中心位置耦合场时域波形如图 14(a)所示。可见此时机箱内部未能发生强耦合谐振, 机箱内部耦合场强仅在辐照发生后瞬间达到峰值, 随后趋与平稳, 直至脉冲结束前再上升至一较大值, 再逐渐衰减, 机箱内耦合场强值略大于激励值。此时求解得到的回波波形如图 14(b)所示, 回波波形包络近似呈方波状, 与强耦合频率时的回波形状有明显差异。

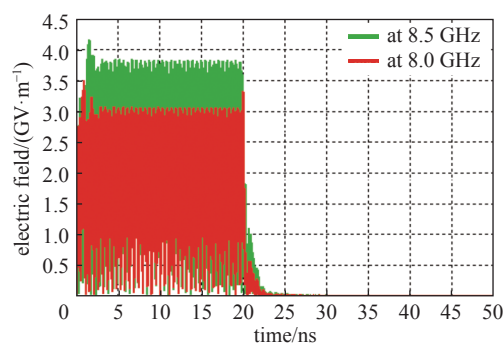


Fig. 12 8 GHz vs. 8.5 GHz chassis echo time domain waveform (weak coupling)

图 12 8 GHz 与 8.5 GHz 机箱回波时域波形(弱耦合)

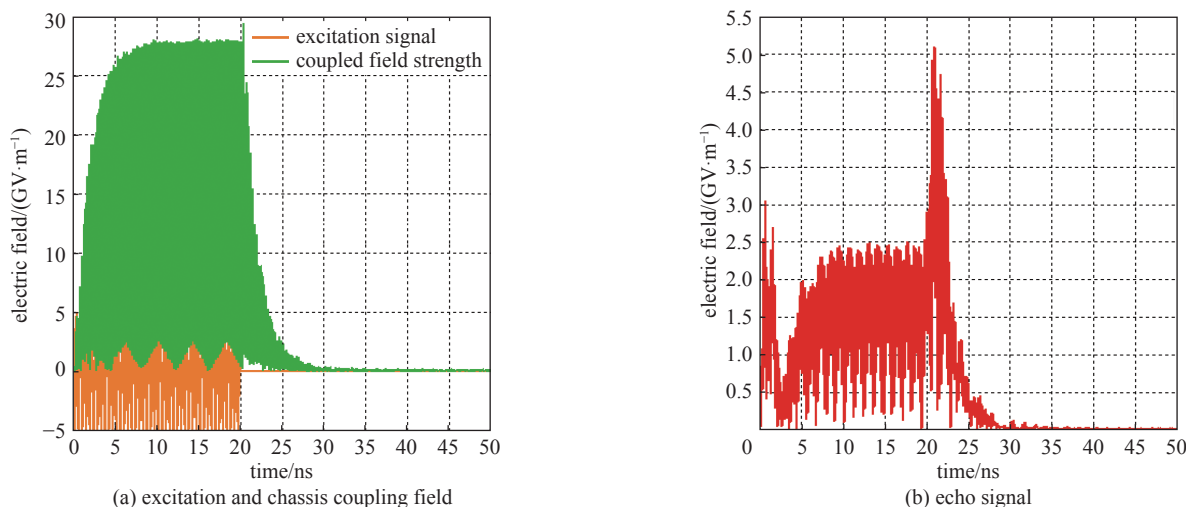


Fig. 13 Time domain strong coupling waveform of enlarged chassis at 9 GHz

图 13 放大机箱 2.2 GHz 强耦合时域波形

对改变形态的方形机箱模型, 基于频域仿真结果在 5.5 GHz 出现的强耦合, 设置脉宽 20 ns、中心频率为 5.5 GHz 的方波调制的正弦波形为平面波辐照激励波形, 求解后门强耦合频率下的理想机箱时域耦合及回波信号。得到的理想机箱内部中心位置耦合场波形如图 15(a)所示。可见, 此时机箱内部发生了强耦合谐振, 机箱内部耦合场强最大值约为激励值的 16 倍。辐照开始后, 机箱内部耦合场强从 0 逐步增长至最大, 此时恰好 20 ns 激励脉冲已结

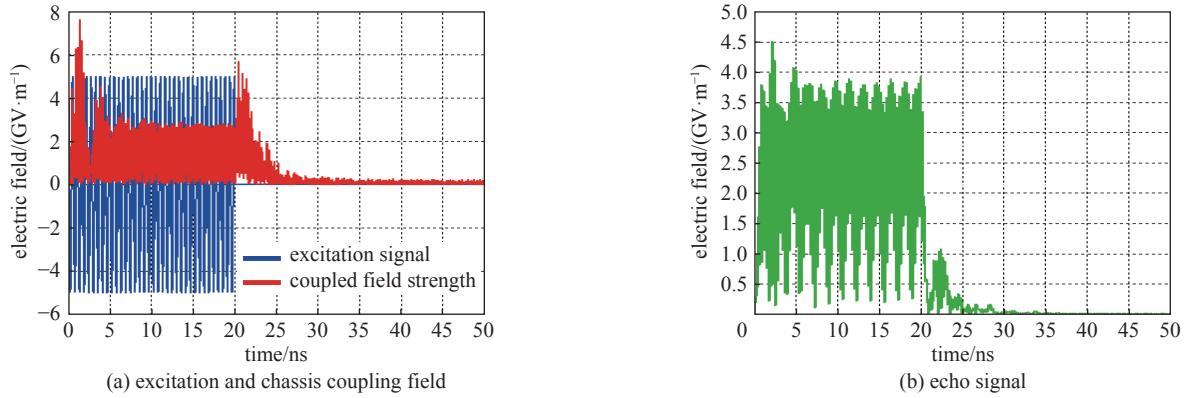


Fig. 14 Time domain weak coupling waveform of enlarged chassis at 1.8 GHz

图 14 放大机箱 1.8 GHz 弱耦合时域波形

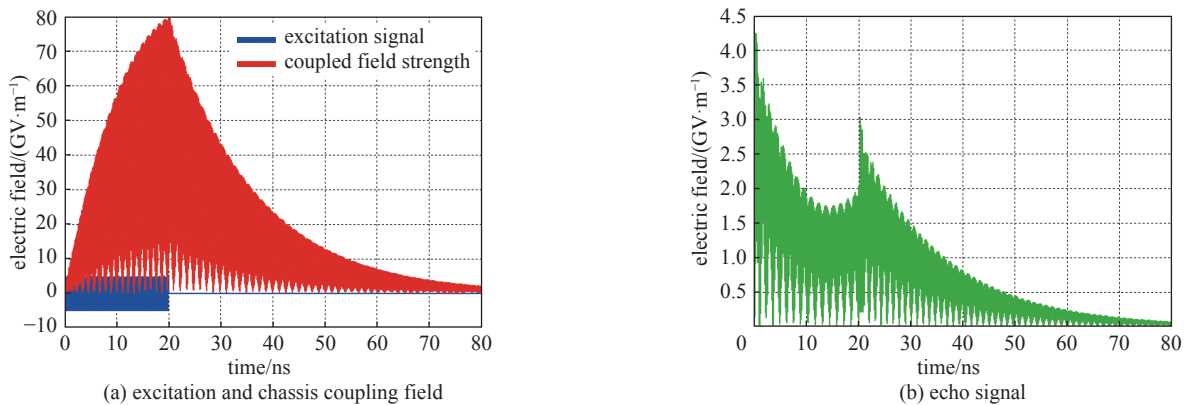


Fig. 15 Time domain strong coupling waveform of square chassis at 5.5 GHz

图 15 方形机箱 5.5 GHz 强耦合时域波形

束, 随后机箱内耦合场强又逐渐回落至 0。此时求解得到的回波波形如图 15(b) 所示, 回波波形同样呈双峰状, 两个尖峰的间隔与激励脉宽一致。

对比方形机箱非强耦合频率下的时域波形特征, 设置脉宽 20 ns、中心频率为 5.1 GHz 的方波调制的正弦波形为平面波辐照激励波形, 求解得到 5.1 GHz 时的理想机箱内部中心位置耦合场时域波形如图 16(a) 所示。可见此时机箱内部未能发生强耦合谐振, 机箱内部耦合场强仅在辐照发生后瞬间达到峰值, 随后逐渐震荡衰减直至 0, 机箱内耦合场强最大值略大于激励值。此时求解得到的回波波形如图 16(b) 所示, 回波波形包络近似呈方波状, 与强耦合频率时的回波形状有明显差异。

通过对理想机箱这一典型后门耦合目标的时域耦合及回波信号波形仿真, 发现在强耦合频率时回波信号的波形呈现双峰状, 两个尖峰的间隔与激励脉冲宽度一致, 而在非强耦合频率时的回波信号包络呈方波状, 二者有明显

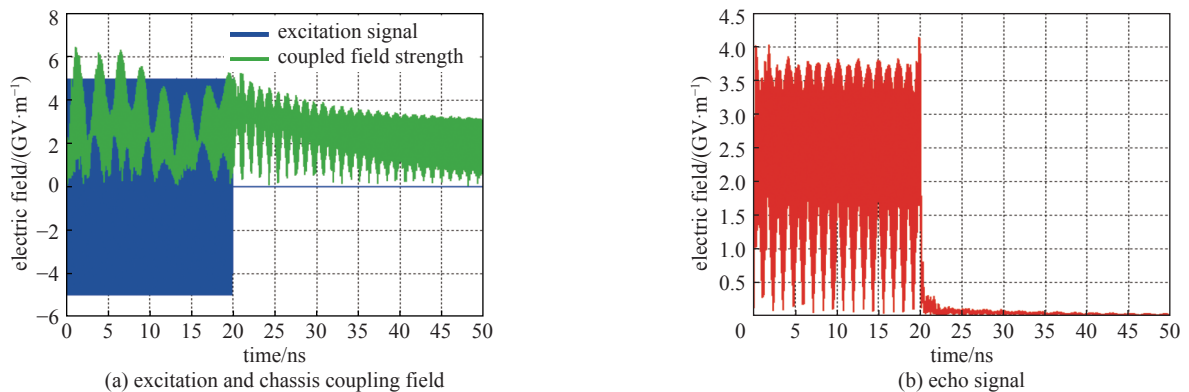


Fig. 16 Time domain weak coupling waveform of square chassis at 5.1 GHz

图 16 方形机箱 5.1 GHz 弱耦合时域波形

差异,可用于区分强弱耦合。通过改变理想机箱目标尺寸和形状,进一步验证了所发现的回波信号规律特性。

## 4 结 论

本文通过开展典型后门耦合目标的回波信号特征分析与仿真研究,从时域和频域两个维度,对构建的典型后门耦合目标的回波信号特征进行了仿真与分析,从中发现了一定的回波信号特征规律,并通过改变后门耦合目标尺寸和形态对发现的特征规律进行了验证。验证规律表明:频域强耦合频率点附近存在回波波形凹坑;时域强耦合和非强耦合频率点的回波波形有明显差异(强耦合频率回波信号包络呈双峰状而在非强耦合频率时的回波信号包络呈方波状)。利用此时域和频域特征规律可从回波信号中辨识出未知目标的强耦合频率,研究内容及结果可为基于回波探测的目标后门强耦合特征提取提供一种新的思路和方法。

## 参考文献:

- [1] 刘峰. 基于电磁拓扑的后门耦合特性建模方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014: 1. (Liu Feng. Research on modeling method of backdoor coupling characteristics based on electromagnetic topology[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014: 1)
- [2] 张少波. 电子设备的高功率微波武器防护探索[J]. 科学技术创新, 2019(14): 41-42. (Zhang Shaobo. Exploration of high-power microwave weapon protection for electronic equipment[J]. Scientific and Technological Innovation, 2019(14): 41-42)
- [3] 谢鹏浩, 谭志良, 张荣奇. 对某电子设备典型后门耦合效应的仿真分析[J]. 河北师范大学学报(自然科学版), 2008, 32(1): 42-48. (Xie Penghao, Tan Zhiliang, Zhang Rongqi. Simulation analysis on typical back-door coupling effect of one electronic equipment[J]. Journal of Hebei Normal University (Natural Science Edition), 2008, 32(1): 42-48)
- [4] 傅军团, 温云鹏, 许建军, 等. 军用电子系统面临的 HPM 环境威胁分析[J]. 电子信息对抗技术, 2020, 35(1): 60-63,79. (Fu Juntuan, Wen Yunpeng, Xu Jianjun, et al. HPM environmental threat analysis faced by military electronic systems[J]. Electronic Information Warfare Technology, 2020, 35(1): 60-63,79)
- [5] 闫二艳, 马弘舸, 林江川, 等. 计算机机箱/电路板耦合及效应机理实验研究[J]. 微波学报, 2014, 30(S2): 144-146. (Yan Eryan, Ma Hongge, Lin Jiangchuan, et al. Experiment study of effect mechanism and coupling of box/circuit of computer[J]. Journal of Microwaves, 2014, 30(S2): 144-146)
- [6] 马世川, 蒋丹, 张帆, 等. 线缆耦合对地雷 WB-HPM 辐照效应试验影响分析[J]. 火控雷达技术, 2021, 50(1): 113-118,127. (Ma Shichuan, Jiang Dan, Zhang Fan, et al. Analysis on the influence of external wire coupling on WB-HPM irradiation effect test of mine[J]. Fire Control Radar Technology, 2021, 50(1): 113-118,127)
- [7] 高畅, 任远楨, 张厚强, 等. HPM 对无人机数据链干扰效应研究[J]. 无线电工程, 2022, 52(9): 1649-1654. (Gao Chang, Ren Yuanzhen, Zhang Houqiang, et al. Research on interference effect of HPM on UAV data link[J]. Radio Engineering, 2022, 52(9): 1649-1654)
- [8] 许明明, 刘畅, 侯其坤. 有源相控阵雷达 TRM 高功率微波在线测试系统[J]. 安全与电磁兼容, 2023(2): 30-33,37. (Xu Mingming, Liu Chang, Hou Qikun. High power microwave on-line test system for TRM of active phased array radar[J]. Safety & EMC, 2023(2): 30-33,37)
- [9] 许一, 孟藏珍, 项建涛, 等. 某型雷达低噪声放大器的 HPM 毁伤效应研究[J]. 舰船电子对抗, 2023, 46(5): 98-102. (Xu Yi, Meng Cangzhen, Xiang Jiantao, et al. Research into the high power microwave damage effect of low noise amplifier for a certain radar[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2023, 46(5): 98-102)
- [10] 潘征, 刘其中, 李跃波, 等. 高功率微波缝隙耦合效应的试验研究[J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(11): 1879-1882. (Pan Zheng, Liu Qizhong, Li Yuebo, et al. Test of high power microwave coupling to slot[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2007, 19(11): 1879-1882)