

文章编号: 2095-4980(2025)04-0385-08

高功率微波对雷达电缆“后门”耦合特性分析

胡 欣^{1,2}, 杨江平¹, 孟藏珍¹, 许 一^{1,3}, 项建涛¹

(1.空军预警学院, 湖北 武汉 430019; 2.中国人民解放军 93498 部队, 河北 石家庄 050000;

3.中国人民解放军 95969 部队, 湖北 武汉 430019)

摘 要: 为研究高功率微波武器通过雷达外露电缆后门攻击雷达系统可能造成的毁伤问题, 建立了雷达单元间电缆模型。对比分析不同电缆类型、架设高度、电场方向、电缆长度对耦合信号的影响; 通过辐照实验测量耦合信号特征, 分析耦合信号对雷达的影响; 设计相应的防护电路, 并讨论其他的防护措施。理论分析和实验结果表明, 耦合信号峰值电压和波形受电缆型号、架设高度、电场方向等因素影响较大; 耦合信号谐振频率受电缆长度影响较大。通过技术防护措施和合理布设电缆的方法可降低耦合信号威胁。

关键词: 高功率微波; 雷达; 电缆; 后门耦合; 防护

中图分类号: TN95

文献标志码: A

DOI: 10.11805/TKYDA2023363

Analysis of back-door coupling characteristics of High Power Microwave on radar cable

HU Xin^{1,2}, YANG Jiangping¹, MENG Cangzhen¹, XU Yi^{1,3}, XIANG Jiantao¹

(1.Air Force Early Warning Academy, Wuhan Hubei 430019, China; 2.Unit 93498 of PLA, Shijiazhuang Hebei 050000, China;

3.Unit 95969 of PLA, Wuhan Hubei 430019, China)

Abstract: To investigate the potential damage caused by High-Power Microwave Weapons(HPMW) attacking radar systems through exposed cable backdoors, a cable model between radar units is established. The effects of different cable types, installation heights, electric field directions, and cable lengths on coupling signals are compared and analyzed. The characteristics of coupling signals are measured through irradiation experiments, and the impact of coupling signals on radar is analyzed. Corresponding protective circuits are designed, and other protective measures are discussed. Theoretical analysis and experimental results indicate that the peak voltage and waveform of the coupled signal are greatly affected by factors such as cable type, installation height, and electric field direction, while the resonant frequency of the coupled signal is greatly affected by cable length. The threat of coupling signals can be reduced through technical protection measures and reasonable cable layout.

Keywords: high power microwave; radar; cable; back-door coupling; protection

雷达作为空中目标预警探测的主要手段, 在民用领域和未来信息化战争中发挥着不可或缺的作用。当前针对雷达的主要毁伤方式包括反辐射导弹和低慢小无人机的硬毁伤攻击, 以及电子干扰和高功率微波武器(HPMW)的软-硬杀伤攻击。反辐射导弹和无人机需要抵近进行攻击, 易被诱偏, 搭载平台也有暴露被击落的风险^[1-2]。随着雷达硬件水平和雷达信号处理技术的发展^[3-5], 电子干扰已难以保证取得良好的效果。随着近些年高功率微波技术^[6-8]的迅速发展, 国际上已研发出多款具备攻击能力的 HPMW^[9-10]。

雷达耦合 HPM 主要途径有“前门”耦合和“后门”耦合。雷达“前门”是指 HPM 通过天线进入雷达电路系统; “后门”是指电磁波直接或透过方舱孔缝间接照射电缆、传输线或电子器件进入雷达的电路系统。“前门”毁伤以接收前端的接收机限幅器为主, “后门”主要通过孔缝、线缆耦合后产生干扰、误触、毁伤效应, 两者均会造成停机甚至可使雷达硬件损毁。现有研究中针对雷达的“前门”耦合^[11-12]、毁伤^[13-15]和防护^[16-17]研究较多,

收稿日期: 2023-11-13; 修回日期: 2023-12-20

基金项目: 全军科研基金资助项目(KJ202211A030220); 空军预警学院科研基金资助项目(PGGC-001)

针对“后门”耦合效应的研究较少^[18-19]。

本文对雷达“后门”耦合效应进行研究,分析雷达方舱间电缆的主要特点,利用电报方程^[20]分析电缆耦合信号特性,建立方舱间雷达传输电缆 CST 模型。对比分析不同电缆类型、架设高度、电场方向和电缆长度对耦合信号的影响;分析 HPMW 通过电缆耦合对雷达可能的影响,通过辐照实验对比验证耦合信号形式。针对雷达电缆耦合特点,提出了可行的防护措施,设计了电缆转接口限幅滤波电路,为户外裸露雷达装备针对 HPMW 攻击进行“后门”防护打好基础。

1 HPM 辐照下电缆耦合信号特征分析

雷达在阵地架设时,如缺少电磁防护,会为 HPMW 攻击提供便利条件。地面雷达在工作状态时主要由 3 部分组成:工作方舱、电站方舱和天线座车。雷达电站方舱和工作方舱之间主要通过供电电缆连接,两者间距一般不超过 100 m;工作方舱和天线座车之间连接电缆种类较多,如供电的单线电缆、传输控制信号的双绞线、传输射频信号的同轴线等。受限于信号在电缆中的传输衰减,各电缆长度不超过 100 m。以某雷达为例,工作方舱到天线座车电缆长 30 m,到电站方舱电缆长 100 m。

在雷达装备阵地架设时,为保护电缆,经常将电缆用电缆支架支离地面,与地面之间存在一定的间距。由于天线座车和工作方舱均就近接地,电缆与大地之间间接形成了回路。在分析 HPM 辐照影响时,可通过场方法或传输线理论方法求取数值解。

对于电磁波辐照下的电缆耦合信号,可参考电报方程进行分析。根据电报方程,单导体传输线两端负载处的全电压为:

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1+\rho_1 & 0 \\ 0 & 1+\rho_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\rho_1 & e^{\gamma L} \\ e^{\gamma L} & -\rho_2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: U_1 和 U_2 分别为传输线两端的电压; ρ_1 和 ρ_2 为传输线两端的反射系数; γ 为传输线的传播常数; L 为传输线长度; S_1 和 S_2 为传输线产生的激励源:

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\left\{ \begin{aligned} & jkU_0h[\cos\theta\cos\phi(1+R_v) + \sin\theta\sin\psi\sin\phi(1-R_h)] + \\ & U_0[\cos\theta\sin\psi\cos\phi(1-R_v) + \sin\theta\sin\phi(1+R_h)] - \\ & \gamma U_0h\cos\theta\cos\psi(1+R_v) \end{aligned} \right\}}{2(\gamma - jk\cos\psi\cos\phi)} \times [e^{(\gamma - jk\cos\psi\cos\phi)L} - 1] \\ \frac{\left\{ \begin{aligned} & jkU_0h[\cos\theta\cos\phi(1+R_v) + \sin\theta\sin\psi\sin\phi(1-R_h)] + \\ & U_0[\cos\theta\sin\psi\cos\phi(1-R_v) + \sin\theta\sin\phi(1+R_h)] + \\ & \gamma U_0h\cos\theta\cos\psi(1+R_v) \end{aligned} \right\}}{2(\gamma + jk\cos\psi\cos\phi)} e^{\gamma L} \times [e^{-(\gamma + jk\cos\psi\cos\phi)L} - 1] \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: k 为电磁波在空气中的相位常数; U_0 为辐照源电压; θ 、 ϕ 和 ψ 分别为电磁波的水平方位角、极化角、与地面的倾角; R_v 和 R_h 分别为垂直极化波和水平极化波的反射系数。可以看出,端电压与辐照方向、极化角、地面反射系数、导线长度、架空高度、传输线两端匹配系数等有关。

根据雷达装备电缆实际连接建立方舱间电缆模型,采用 CST 软件对雷达电缆耦合信号进行分析,研究雷达电缆的防护方法。基于上文的传输线理论, CST 电缆工作室采用传输矩阵法(Transmission Line Matrix, TLM)计算电缆耦合信号,该方法采用非常高效的基于八叉树的网格算法,有效减少了整体单元数,可快速计算电缆的电磁响应。本文主要讨论天线座车到工作方舱的电缆在 HPM 照射下耦合信号的影响,各分系统电缆汇总至天线转接板,所有电缆一起连接到工作方舱舱壁的接线端口。

建立的电缆和方舱模型如图 1 所示,图中左侧深红色长方体为雷达设备方舱,右侧深红色矩形为雷达天线座车,后边红色矩形为辐照的平面波,中间蓝色为信号电缆。雷达天线座车和方舱采用 CST 自带 Iron 材质,地面用 PEC 材质作为大地。图中天线车和设备舱之间的距离为 30 m,为避免磨损,在中间部分通过支架将电缆支离地面,故呈波浪形。为简化建模,采用直线连接各拐点的方式建

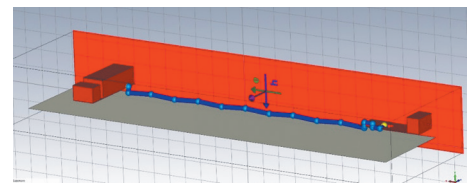


Fig.1 System model
图 1 系统模型图

模，电缆低点距离地面 10 cm，电缆高点距离地面 30 cm。在架设雷达时，可改变电缆铺设方向和架设高度。本文主要从这两方面进行分析。

为进行对比，对 3 种形式电缆进行仿真，分别为传输电源的单线、传输控制信号的双绞线和传输射频信号同轴线，电缆参数如表 1 所示。

表 1 电缆参数
Table1 Cable parameters

cable type	cable specification	wire material	wire diameter/mm	cover material	shielding material	shielding thickness/mm	outside diameter/mm
single line	LIFY_1qmm00	copper	1.20	PVC(Poly Vinyl Chloride)	—	—	2.5
twisted cables	UTP_LIFY_1qmm	copper	1.20	PE(Poly Ethylen)	—	—	2.5
coaxial cable	RG58	copper	0.47	PE(Poly Ethylen)	copper	0.122	4.0

在设计工作室中将各电缆端点连接 50 Ω 匹配负载并接地，在各电缆两端各接一个电压监视器，监测电缆耦合电压。如图 2 所示，P1、P2 为同轴线和单线在设备舱端的电压监视器，P4、P5 为双绞线的电压监视器。

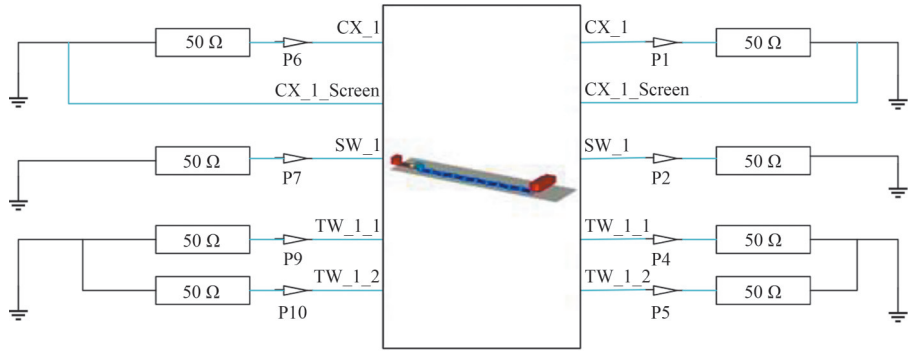


Fig.2 Connection diagram of design studio
图 2 设计工作室连接图

考虑 HPM 后门耦合效应随机性较大，若采用窄带进行攻击，只能对一些特定的器件产生干扰或毁伤效果。为使攻击在各点均有效果，一般采用超宽谱信号进行攻击。本文仿真中采用 IEC61000-2-9 标准中定义的峰值电压 50 kV 的指数波形，其主要信号能量集中在 100 MHz 以下，波长覆盖电缆长度范围，可形成良好的谐振效果。

2 雷达方舱间电缆仿真分析

2.1 电缆耦合信号时频域分析

经过仿真，各型传输线端电压响应如图 3 所示。由于 P4 和 P5 两端短接负载电阻相同，两端电压波形也相同，仅展示 P4 点电压。从图 3 中可以看出，各传输线电压波形基本相似，均为正负的振荡脉冲，且电压随着时间慢慢降低。其中单线的耦合电压极值最大，峰值可达-617 V；其次是双绞线，极值可达-438 V；同轴线耦合电压最小，但极值也可达-19.5 V。

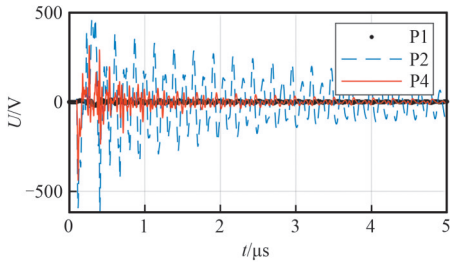


Fig.3 Time domain waveform of coupling signals of each transmission line
图 3 各传输线耦合信号时域波形

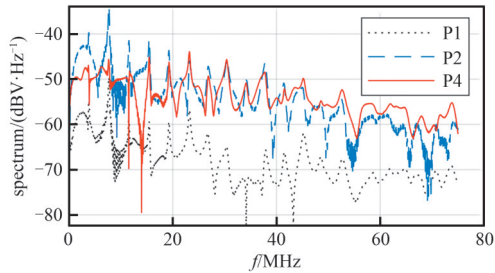


Fig.4 Coupling signal spectrum of each transmission line
图 4 各传输线耦合信号频谱

对 3 种电缆耦合信号进行傅里叶变换，可得到信号的频域响应，如图 4 所示。从图 4 中可以看出，3 种传输线的频谱特征也比较相像。传输线耦合信号能量主要分布在 40 MHz 以下的频段，且集中在几个特殊频点，各个峰值近似呈倍频关系。

双绞线通常用来传输差分信号,通过比较两线的电压差翻译信号,可有效降低共模干扰。本算例中,双绞线的电压差如图 5 所示。

本文的模拟仿真中采用理想的双绞线,即各段传输线的绞距均匀,电阻率均匀,长度相等,但两线间仍不可避免地存在一定的电压差,且电压差值的极值大于 5 V。实际使用中,存在更多不可控因素,两线间电压差会进一步放大,因此必定会引入更大的干扰。两线端电压极值可达 400 V,远大于普通器件能够耐受的电压,造成通信器件不可逆的损伤。由于 3 种传输线信号耦合特征基本相似,主要区别是耦合信号幅度差别较大,在后文中,为使信号变化表现明显,主要通过 P2 点电压进行对比,寻找耦合规律。

2.2 电缆不同离地高度对耦合信号的影响

考虑电缆基本在地面沿水平方向布设,在电磁波照射下,会因电缆两端分别接地,与大地形成环路,故调节电缆铺设高度,观察耦合电压波形变化,如图 6 所示。从图 6 可以看出,高度变化后耦合信号强度有所变化,但整体波形变化较小,均呈振荡衰减形式。

不同高度下耦合电压的极值如表 2 所示。从表 2 可以看出,除部分噪点(高度 100 mm)外,耦合电压峰值随高度的增加而增加,峰值时间虽然不固定,但基本集中在 0.5 μs 以内,且均为负值。这是因为电缆两端通过匹配电阻接地,与大地形成回路,根据电磁感应定律,当电缆高度增高时,电缆和地围成的面积发生变化,导致耦合信号峰值电压增大。

对不同高度耦合信号进行傅里叶变换,如图 7 所示。

从图 7 可以看出,电缆高度变化并没有对信号的频谱产生太大的影响,耦合信号的频谱仍集中在几个特殊的频点附近。

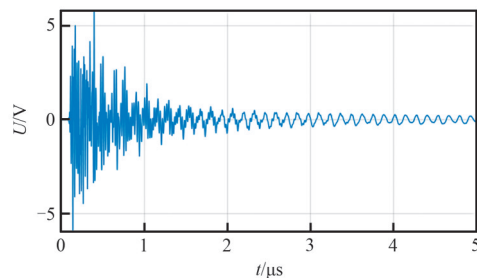


Fig.5 Voltage difference between twisted pairs
图 5 双绞线之间电压差

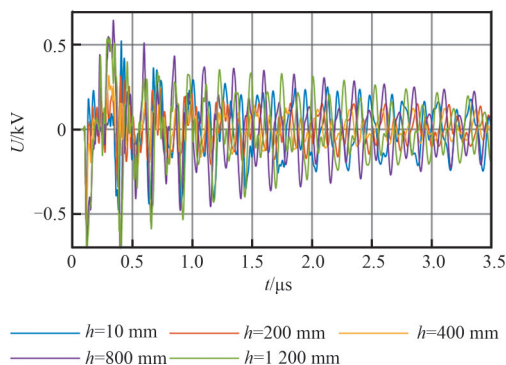


Fig.6 Voltage waveform of signals with different heights of coupling
图 6 不同高度耦合信号电压波形

表 2 不同高度时 P2 点耦合信号极值

Table 2 Extreme values of P2 point coupling signals at different heights

item	lowest height/mm										
	10	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1 000
maximum voltage/V	-534	-617	-533	-548	-551	-558	-594	-638	-775	-826	-898
time of peak/ μs	0.11	0.40	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.40	0.40	0.40

2.3 不同电场方向对耦合信号的影响

改变平面波的入射方向以改变电场方向,观察电缆高度为 200 mm 时的耦合信号,如图 8 所示。图 8 中“from x-”表示从天线座车侧入射,电场方向平行于地面,“from y+”表示从顶面照射,电场方向垂直于电缆方向,“from z+”表示从电缆侧面照射,电场沿电缆方向。可以看出,当电场方向垂直于电缆与大地组成的平面时,峰值电压最大;当电场沿电缆方向分布时,峰值电压最小。这是因为当电场垂直于电缆时,电缆与大地之间环路截面最大,耦合电压峰值最大。对电缆高度为 200 mm 的耦合信号进行傅里叶变换,得到频谱分布如图 9 所示。

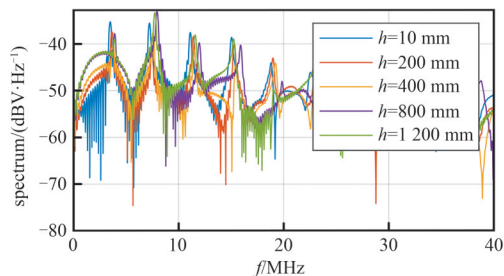


Fig.7 Spectra of coupling signals with different heights
图 7 不同高度耦合信号频谱

从图9可以看出, 不管电场方向如何变化, 对耦合信号基本频谱影响不大, 仍是这几个频点耦合较强。改变电场方向和改变电缆高度, 耦合频率分布基本不变, 此即为本电缆的谐振频率。

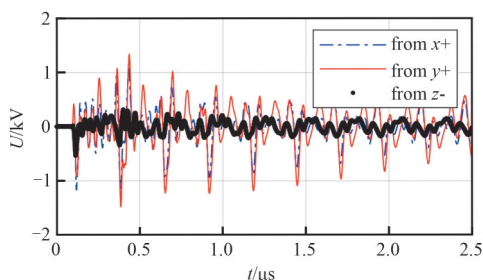


Fig.8 Voltage waveform of coupling signals with different heights
图8 不同高度耦合信号电压波形

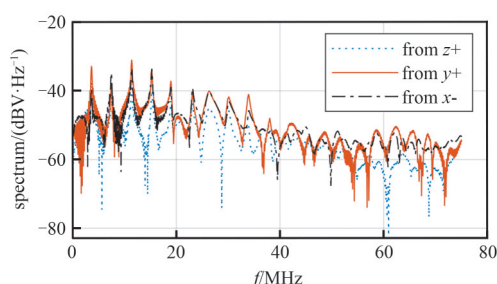


Fig.9 Spectral distribution of different electric field directions
图9 不同电场方向频谱分布

2.4 不同电缆长度对耦合信号的影响

电缆最低点仍为 200 mm 高度, 改变电缆长度, 使工作方舱与天线座车间电缆长度分别为 1 m、7.5 m、15 m、22.5 m 和 30 m, 耦合电压变化情况如图 10 所示。从图 10 可以看出, 耦合电压峰值变化不大, 但波形变化较大, 即使电缆长度降到 1 m, 仍有高达上百伏的耦合信号, 足够将电路中部分电子器件损坏。对各个信号进行傅里叶变换, 如图 11 所示。从图 11 可以看出, 电缆耦合信号频谱整体波形与辐照信号相仿, 但存在很多的谐振点, 且电缆越长, 谐振频率越低; 电缆越短, 谐振频率越高, 即谐振频率与电缆长度呈反比, 与文献[20]吻合。不同长度电缆第一谐振频率点如表 3 所示。

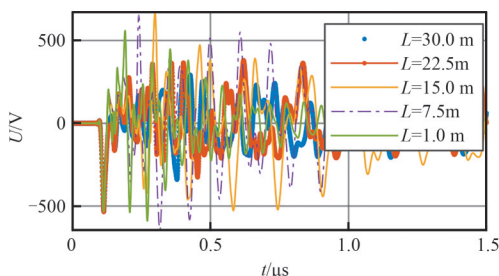


Fig.10 Coupling signal waveforms of cables with different lengths
图10 不同长度电缆耦合信号波形

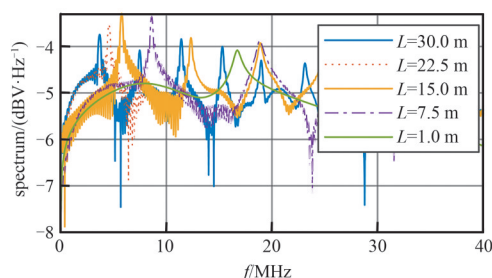


Fig.11 Coupling signal spectrum of cables with different lengths
图11 不同长度电缆耦合信号频谱

表3 不同长度电缆第一谐振频率

Table3 First resonant frequency of cables with different lengths

cable length/m	30.0	22.5	15.0	7.5	1.0
first resonant frequency/MHz	3.678	4.562	5.764	8.602	16.714

将电缆谐振频率与电缆长度进行数据拟合, 所得结果如式(3)所示:

$$f = \frac{125N}{L + 6.51} \quad (3)$$

式中: f 为第一谐振频率; L 为电缆长度。式中数值与文献[21]中略有差异, 是因为在建模时大地采用的是理想电导体(Perfect Electric Conductor, PEC), 且在电缆两端有转接线到各个分机的电缆。

2.5 电缆耦合对雷达影响分析

通过以上仿真可知, 装备中工作方舱和天线座车之间电缆信号最高耦合电压可达到几百伏, 远超了常规半导体器件的承受能力, 能够对半导体器件产生不可恢复的损伤, 导致雷达停机。即使过滤掉双绞线的共模干扰或采用普通同轴线, 输出电压极值也可达到 10 V 以上, 对正常的差分传输信号产生干扰, 如图 12 所示。

3 UWB-HPM 辐照电缆实验实测

采用水平极化超宽带(Ultra Wide Band, UWB)信号对工作方舱与天线座车之间的电缆进行辐照, 峰值场强约为 44 kV/m, 电磁波沿电缆走向进行传播。受辐照条件限制, 只对部分长度电缆进行辐照(长度约 6 m)。通过示

波器观察方舱内同步机电缆接口的耦合电压和频谱信号,如图13所示。从图13可以看出,耦合信号为振荡衰减形式,与仿真结果(图3)相仿;电缆耦合频谱出现一系列较突出的峰值,第一谐振频率约为19.9 MHz(图13(b)中红圈位置),为电缆耦合谐振产生。此峰值与电缆长度有关,与式(3)计算结果对比,偏差较大。判断原因为辐照时有部分电缆被遮挡,导致实际有效辐照长度变短;且采样周期较长,导致频谱分辨率较低,只能采集到各个倍频程。耦合电压峰峰值达279.76 V,脉宽拓展至约80 ns,对同步机足以产生干扰,对晶体管电路可以产生误触或毁伤效果。由于本机所用自整角机为110 V/400 Hz信号,难以直接造成毁伤,但可形成干扰。观察雷达平面位置显示器画面,发现天线基线闪烁,可判定为UWB-HPM干扰引起。

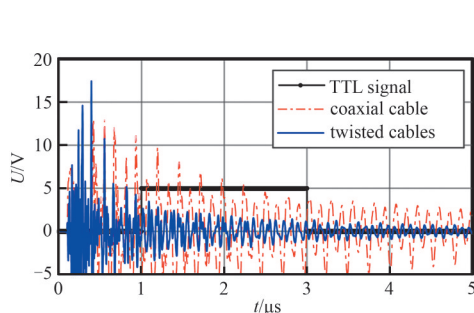


Fig.12 Coupling signal and TTL signal
图12 耦合信号和TTL信号

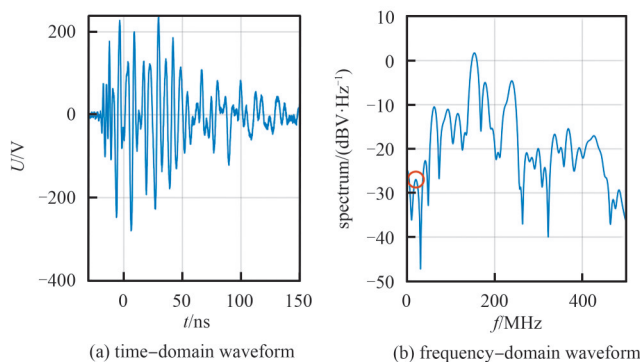


Fig.13 Waveform of coupling signal of exposed cable
图13 外露电缆耦合信号波形

4 强电磁脉冲对雷达同步系统干扰毁伤应对措施分析

鉴于HPMW具有频谱分量丰富、瞬时峰值功率非常大等特点,需对外接电缆进行防护,防止电缆耦合信号进入方舱内部后,造成传导辐射或直接毁伤电路。针对可能存在的场-线耦合,可通过添加瞬态抑制模块进行削峰,然后采用稳态滤波电路对削峰后的残余分量进行抑制。建立的瞬态防护和稳态滤波结合电路如图14所示。

对于瞬态抑制模块,考虑到各种瞬态防护器件的特点与不足:气体放电管(Gas Discharge Tube, GDT)存在续流,金属氧化物压敏电阻器(Metal Oxide Varistor, MOV)会有较大漏电流产生,而瞬态抑制二极管(Transient Voltage Suppressors, TVS)因通流量较小易发生失效。采用GDT与MOV串联的方式,既可减小MOV的电容量,从而减小漏电流,也可解决GDT的续流问题。瞬态抑制模块电路如图15所示。

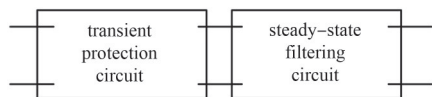


Fig.14 Circuit combining transient protection and steady-state filtering
图14 瞬态防护和稳态滤波结合的电路

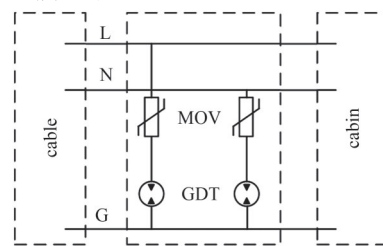


Fig.15 Circuit diagram of transient suppression module
图15 瞬态抑制模块电路图

此电路可适用于电源、低压信号线、网线等多种电路接口。对于稳态滤波电路,需在保证信号正常传输的情况下,过滤HPM耦合信号,实现低衰减防护。由于电源线和信号线(主要为TTL脉冲、485等控制检测信号)信号频段较低,且对相位不敏感,因此“电源线和信号线滤波”可采用低通滤波器。以电源线滤波电路仿真为例,根据滤波电路原理,采用巴特沃斯滤波函数滤波电路,结合温升、压降等参数的约束,设计各器件的电路参数。采用ADS软件对滤波电路进行仿真,观察其在0.01~2 GHz的插入损耗,如图16所示。从图16可以看出,常用工频电源处插入损耗较大,对于耦合的高频信号,插入损耗都在100 dB以上。观察某电源电路输入输出信号,仿真结果如图17所示,图中红色为正常输入单相电压时域波形,蓝色为滤波后的时域波形。可以看出,在正常情况下插入损耗较小。

对于差分信号传输线,可采用三极GDT,电路连接如图18所示。当入射功率过大时,造成一对电极导通的任何条件都会使3个电极之间导通,这样能在HPM攻击时保持一个差分线对的平衡,确保安全。

除此之外,还可采取以下措施降低耦合信号对雷达的影响:

1) 采用屏蔽较好的同轴线进行信号传输,或在双绞线外部敷设良好屏蔽,保证双绞线的耦合信号足够小,降低信号电压。

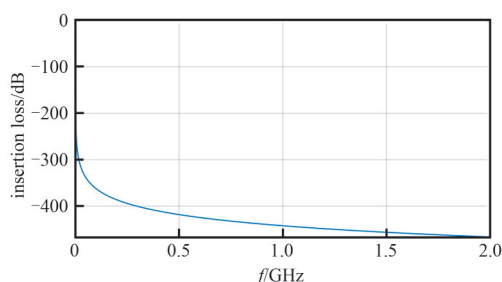


Fig.16 Insertion loss of power filter circuit

图16 电源滤波电路插入损耗

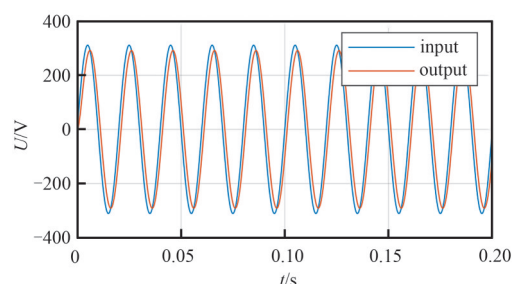


Fig.17 Power filter effect

图17 电源滤波效果

2) 在电缆布设时, 尽量降低电缆高度, 同时尽量使电缆垂直于进攻武器来袭方向, 不管HPM是水平还是垂直极化, 都可以避免电缆与大地的环路垂直于电场方向, 使电缆和大地之间的有效磁通量减小, 降低耦合信号峰值电压。

3) 合理设计两车之间电缆长度, 使电缆耦合信号频率避开有用信号频率, 便于滤除耦合信号。

4) 在天线座车和工作方舱之间尽量采用光纤传输技术, 以良好地抑制电缆耦合信号。

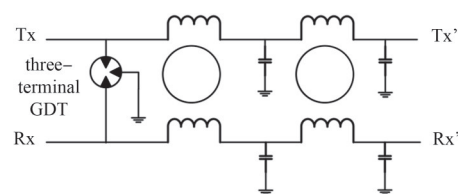


Fig.18 Diagram of 485 interface protection circuit

图18 485接口防护电路图

5 结论

本文对雷达传输电缆耦合HPM信号进行了仿真, 并通过对比不同的电缆形式、高度、电场方向和电缆长度, 寻找电缆的耦合规律。发现电缆形式对信号幅度影响较大; 电缆高度对耦合波形影响较小; 电场方向主要影响信号的大小, 对耦合信号波形影响较小; 电缆长度对耦合信号频率和波形影响较大。通过辐照实验观察了耦合信号形式, 分析了降低耦合信号强度的办法: 最好采用光纤传播, 其次是同轴线或屏蔽双绞线。可通过在接收端设计相应的限幅滤波电路, 采取有效的干扰遏制设计和合理的电缆布设手段, 防止因“后门”耦合造成毁伤和干扰。

参考文献:

- [1] 刘万祥,张永刚,肉孜麦麦提·阿布都嘎依提. 机动雷达抗反辐射导弹研究[J]. 舰船电子对抗, 2022,45(6):28-30,40. (LIU Wanxiang,ZHANG Yonggang,ABUDUGAYITI Rouzimaimaiti. Study of mobile radar against anti-radiation missile[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2022,45(6):28-30,40.) DOI:10.16426/j.cnki.jcdzdk.2022.06.007.
- [2] GONALVES A P, RICHTER R M, IVO F S, et al. Proposal of anti-radiation missile decoy assisted by microwave photonics[J]. Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo, 2020,39(3):218-223. DOI:10.17563/rbav.v39i3.1178.
- [3] AZIZ M M, MAUD A R M, HABIB A. Reinforcement learning based techniques for radar anti-jamming[C]// 2021 International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technologies(IBCASC). Islamabad, Pakistan:IEEE, 2021:1021-1025. DOI:10.1109/IBCASC51254.2021.9393209.
- [4] LI Huayue, HAN ZhaoWei, PU Wenqiang, et al. Counterfactual regret minimization for anti-jamming game of frequency agile radar[C]// 2022 IEEE the 12th Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop(SAM). Trondheim, Norway:IEEE, 2022:111-115. DOI:10.1109/SAM53842.2022.9827883.
- [5] 段燕辉. 雷达智能抗干扰决策方法研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2021. (DUAN Yanhui. Research on radar intelligent anti interference decision method[D]. Xi'an, China:Xidian University, 2021.) DOI:10.27389/d.cnki.gxadu.2021.001639.
- [6] ZHAO Chenyu, CHI Hang, GE Xingjun, et al. A high-efficiency cross-band Cerenkov microwave generator with a resonant reflector[J]. AIP Advances, 2021,11(1):015018. DOI:10.1063/5.0033150.
- [7] ZHANG Haoran, SHU Ting, LI Zhiqiang, et al. A compact 4 GW pulse generator based on pulse forming network-Marx for high-power microwave application[J]. Review of Scientific Instruments, 2021,92(6):064707. DOI:10.1063/5.0040111.
- [8] LI Mingjia, KANG Qiang, TAN Jie, et al. A high-power pulse generator based on pulse forming network and linear transformer[J]. Laser and Particle Beams, 2021:e19. DOI:10.1155/2021/6686530.
- [9] 牛卉,伍洋,李明. 国外高功率微波武器发展情况研究[J]. 空天技术, 2021,44(8):12-16,23. (NIU Hui,WU Yang,LI Ming.

- Development of high power microwave weapons abroad[J]. Aerospace Technology, 2021,440(8):12–16,23.) DOI:10.16338/j.issn.1009–1319.20210093.
- [10] BANJAC G M,OREVI V D,IVKOVI M Z,et al. High energy microwave weapon: electromagnetic bomb[J]. Military Technical Courier, 2021,69(2):499–517.
- [11] 鲍献丰,陈晓洁,李瀚宇,等. 基于FDTD的时域混合方法及其在天线前门耦合数值模拟中的应用[J]. 强激光与粒子束, 2021,33(12):121–126. (BAO Xianfeng,CHEN Xiaojie,LI Hanyu,et al. FDTD-based time domain hybrid method and its application in numerical simulation of platform-antenna integrated coupling[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2021,33(12):117–122.) DOI:10.11884/HPLPB202133.210193.
- [12] CAUDRON F,OUSLIMANI A,VÉZINET R,et al. Study of the front door coupling into a complicated enclosure[C]// 2010 International Symposium on Signals, Systems and Electronics. Nanjing, China: IEEE, 2010:1–4. DOI:10.1109/ISSSE.2010.5607139.
- [13] REYMBAEVA S, ABDURAKHMANOV G, OREL A. Nonlinear properties of an inhomogeneous diode structure in a strong microwave field[J]. World Journal of Condensed Matter Physics, 2023,13(1):1–13. DOI:10.4236/wjcmp.2023.131001.
- [14] ZHANG Dongxiao, ZHOU Xing, CHENG Erwei, et al. Investigation on effects of HPM pulse on UAV's datalink[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2020,62(3):829–839. DOI:10.1109/TEMC.2019.2915285.
- [15] LI Qiwei, SUN Jing, LI Fuxing, et al. C band microwave damage characteristics of pseudomorphic high electron mobility transistor[J]. Chinese Physics B, 2021,30(9):098502.
- [16] 李明典,刘景萍,李巍. 调频引信对UWB-HPM的前门耦合效应及防护研究[J]. 微波学报, 2021,37(增刊1):253–257. (LI Mingdian, LIU Jingping, LI Wei. Research on the front door coupling effect and protection of UWB-HPM of FM fuze[J]. Journal of Microwaves, 2021,37(suppl.1):253–257.)
- [17] 周璐,刘恩凯. 电子设备的高功率微波防护技术[J]. 电子元器件与信息技术, 2022,6(4):14–17. (ZHOU Lu, LIU Enkai. High power microwave protection technology for electronic devices[J]. Electronic Component and Information Technology, 2022,6(4):14–17.) DOI:10.19772/j.cnki.2096–4455.2022.4.004.
- [18] 公延飞,郝建红,蒋璐行,等. 有损大地上传输线 HEMP 响应的研究[J]. 电工技术学报, 2018,33(21):4901–4908. (GONG Yanfei, HAO Jianhong, JIANG Luheng, et al. The research for the transient response of overhead transmission line on lossy ground excited by HEMP[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018,33(21):4901–4908.) DOI:10.19595/j.cnki.1000–6753.tces.171586.
- [19] 刘政,黑东炜. 架空线缆高空电磁脉冲传导环境参数的计算与分析[J]. 现代应用物理, 2021,12(2):62–68. (LIU Zheng, HEI Dongwei. Calculation and analysis of conducted parameters of elevated lines under high-altitude electromagnetic pulse[J]. Modern Applied Physics, 2021,12(2):62–68.) DOI:10.12061/j.issn.2095–6223.2021.020504.
- [20] 邱日强. 场线耦合的感应电流分布特性及抑制研究[D]. 成都:西南交通大学, 2018. (QIU Riqiang. Research on the distribution characteristics and suppression of induced current in field line coupling[D]. Chengdu, China: Southwest Jiaotong University, 2018.)
- [21] 邱日强,朱峰,苟江川,等. 架空屏蔽电缆-大地耦合的感应电流谐振分析[J]. 高电压技术, 2015,41(4):1243–1248. (QIU Riqiang, ZHU Feng, GOU Jiangchuan, et al. Resonance analysis on induced current of coupling between overhead shielded cables and ground[J]. High Voltage Engineering, 2015,41(4):1243–1248.) DOI:10.13336/j.1003–6520.hve.2015.04.022.

作者简介:

胡 欣(1985–), 男, 在读博士研究生, 主要研究方向为预警装备管理与保障. email:hxbrnat123@163.com.

杨江平(1963–), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为装备保障理论和装备测试技术等方面.

孟藏珍(1978–), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为预警装备技术与保障、预警装备战场防护及抢修、战略预警管理与指挥等方面.

许 一(1990–), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为预警装备管理和保障.

项建涛(1967–), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为预警装备技术与保障、预警装备战场防护及抢修等方面.