

无人机载 SAR 高功率微波效应仿真方法

沈 衍, 王玉明, 陈亚洲*

(陆军工程大学石家庄校区 电磁环境效应国家重点实验室, 河北 石家庄 050003)

摘要:针对无人机载合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)在战场复杂电磁环境下易受到高功率微波(high-power microwave, HPM)武器攻击的问题,对无人机载 SAR 进行高功率微波前门耦合场路联合仿真。在 CST(computer simulation technology)电磁仿真软件中建立了无人机载 SAR 天线模型,以脉冲调制的正弦波信号模拟 HPM 信号对天线进行辐照并采集天线端口耦合电压波形。将 CST 软件中得到的天线端口耦合电压信号注入 SAR 射频前端电路模型,完整模拟了高功率微波信号从场到路的耦合过程。仿真结果表明, SAR 射频前端电路中的低噪声放大器是 HPM 致损的主要对象,限幅器的尖峰泄露功率会对后级电路的低噪声放大器产生威胁。通过仿真得到了无人机载 SAR 高功率微波前门耦合效应评估图。

关键词:高功率微波;合成孔径雷达;前门耦合;联合仿真

中图分类号:TN972+.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2024)06-131-10



论
文
拓
展

Simulation method of high-power microwave effect for UAV's SAR

SHEN Yan, WANG Yuming, CHEN Yazhou*

(National Key Laboratory of Electromagnetic Environment Effects, Shijiazhuang Campus of Army Engineering University, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: In terms of the problem that SAR(synthetic aperture radar) in UAV(unmanned aerial vehicle) is easy to be attacked by HPM(high-power microwave) weapons in the complex electromagnetic environment of the battlefield, the field-circuit joint simulation of high-power microwave front-gate coupling of UAV's SAR was carried out. Model of the SAR's antenna was established in the CST(computer simulation technology) software. Model of antenna was irradiated with a pulse-modulated sinusoidal signal to simulate the HPM signal, and the antenna port coupling voltage waveform was collected. Antenna port coupling voltage signal obtained in the CST software was injected into the RF(radio frequency) front-end circuit model of SAR, which fully simulated the coupling process of high-power microwave signal from field to circuit. Simulation results show that the low noise amplifier in the RF front-end circuit of SAR is the main target of HPM signal damage, and the spike leakage power of the limiter will threaten the low-noise amplifier of the post-stage circuit. Through simulation, the evaluation diagram of the coupling effect of high-power microwave front door of UAV on-board SAR is obtained.

Keywords: high-power microwave; synthetic aperture radar; front-gate coupling; joint simulation

无人机载合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)整合了无人飞行平台和合成孔径成像的优势,使无人机装备具备了全天候主动探测的能力,成为目标识别、战场侦察的重要手段^[1-3]。

然而,作为一种宽带雷达系统, SAR 在工作频段内易受到高功率微波(high-power microwave, HPM)武器^[4]、干扰机和其他雷达信号等多种电磁干扰信号的影响,虽然 SAR 能够通过二维匹配

滤波获得较高的能量积累,但强电磁干扰能量仍然制约 SAR 高分辨率成像效果^[5-6]。

目前,国内外 SAR 抗干扰技术都是基于 SAR 处于正常工作状态的前提,着眼信号处理层面运用抗干扰算法来应对不同的 SAR 干扰手段^[7-12],没有考虑到 HPM 能量对 SAR 系统硬件造成的降级、损伤和烧毁效应,在现有抗干扰技术的前提下,一旦 SAR 面临 HPM 武器攻击,极易丧失信息获取能力,无法完成既定侦察观测任务,影响

收稿日期:2022-08-04

基金项目:国家部委基金资助项目(LJ20212C031157)

第一作者:沈衍(1997—),男,江西九江人,博士研究生,E-mail:lgd_sy@163.com

*通信作者:陈亚洲(1975—),男,江苏滨海人,教授,博士,博士生导师,E-mail:chen_yazhou@sina.com

引用格式:沈衍,王玉明,陈亚洲.无人机载 SAR 高功率微波效应仿真方法[J].国防科技大学学报,2024,46(6):131-140.

Citation: SHEN Y, WANG Y M, CHEN Y Z. Simulation method of high-power microwave effect for UAV's SAR[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2024, 46(6): 131-140.

战场态势。

基于此,本文使用场路联合仿真的方法对无人机电载 SAR 的 HPM 耦合规律进行研究,分析了 HPM 效应机理,可为无人机电载 SAR 的 HPM 防护加固提供相关依据及思路。

1 SAR 成像原理及前门耦合理论

1.1 SAR 成像原理

SAR 是一种二维高分辨率雷达,通过发射大时宽带宽信号并使用匹配滤波技术获得距离向的高分辨率,方位向则是通过小孔径天线在若干位置平移且发射信号,接收相应位置的雷达回波信号并储存起来,采用信号处理的方法产生一个等效的大孔径阵列天线获得高分辨率^[13]。

1.2 SAR 前门耦合理论分析

前门耦合是指 HPM 能量通过 SAR 天线等途径进入 SAR 接收机射频(radio frequency, RF)前端,其干扰能量与 HPM 干扰源、传播路径以及 SAR 天线等相关,当前门耦合能量达到某个量级时,SAR 接收机射频前端电路会出现饱和、阻塞甚至毁伤的情况^[14-15]。因此,需要结合无人机电载 SAR 工作场景示意图以及高功率微波传输特性进行干扰场景建模。

无人机电载 SAR 成像场景示意图如图 1 所示,无人机沿 x 轴正方向匀速飞行,采用正侧视条带成像模式,阴影部分为成像场景。

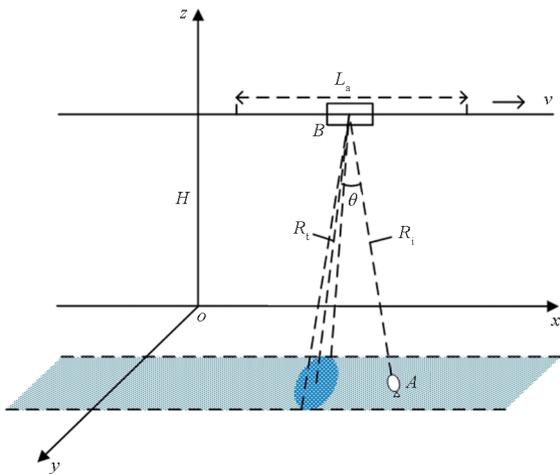


图 1 无人机电载 SAR 成像场景示意图

Fig. 1 UAV SAR imaging scene diagram

其中, A 为 HPM 干扰源位置, B 为 SAR 天线相位中心位置, R_i 为成像场景中心点到 SAR 天线相位中心的距离, R_j 为干扰源到 SAR 天线相位中心的距离, θ 为干扰源相对天线相位中心的干扰进入角。

设成像场景内分辨单元的平均散射截面积为 σ ,则根据雷达方程可计算雷达回波功率^[16],即:

$$P_r = \frac{P_t G_t^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R_t^4} \quad (1)$$

式中: P_t 为雷达平均发射功率; G_t 为雷达发射天线增益; λ 为雷达工作波长。

SAR 前门耦合 HPM 功率的计算需要从两个方面考虑:一是计算 HPM 大气传输衰减模型,二是定量计算 SAR 天线耦合能量。HPM 在大气中传输主要考虑大气击穿与衰减两种损耗^[17]。文献^[17]中指出,25 km 以下空气中自由电子数量相当稀少,且存在时间亦较短,在此条件下,HPM 导致大气击穿产生的非线性衰减可忽略不计,无人机一般飞行高度处于 25 km 以下,因此可忽略 HPM 的大气击穿效应。HPM 在大气传输中的衰减主要考虑大气沉降物(雨、云、雾)对电磁波的散射和吸收效应^[18],无人机电载 SAR 一般工作在 X 或 Ku 波段,参考文献^[18]可知,X 或 Ku 波段电磁波大气衰减率在 10^{-2} dB/km 量级,令 HPM 信号在大气传输中的衰减因子为:

$$L = 10^{-2} \times R_j \quad (2)$$

SAR 接收到的 HPM 功率为:

$$P_{rj} = e^{-\frac{L}{10}} \times \frac{P_j G_j G_t(\theta) \lambda^2}{(4\pi)^2 R_j^2} \quad (3)$$

式中: P_j 为 HPM 源发射功率; G_j 为 HPM 源天线增益; $G_t(\theta)$ 为 SAR 在 HPM 干扰进入方向的天线增益。

在此基础上,利用 CST(computer simulation technology)软件开展无人机电载 SAR 天线高功率微波辐照过程建模,可以得到天线接收的干扰信号功率,并进一步开展联合仿真。

2 SAR 的 HPM 前门耦合联合仿真方法

2.1 仿真方法设计

为了真实模拟 HPM 电磁脉冲对无人机电载 SAR 的前门耦合效应,采用场-路联合仿真方法,即先辐照、后注入的方案^[19]。先利用 CST 软件建立天线模型,在软件中自定义激励源,以平面波的激励形式辐照天线,得到天线模型馈电端口的耦合电压。

在先进设计系统(advanced design system, ADS)软件中建立 SAR 接收机射频前端电路模型进行注入实验仿真。总体联合仿真方案设计如图 2 所示,将 CST 软件中天线的耦合电压导出并按 TIM 格式处理后导入 ADS 软件,作为 SAR 射频前端电路的输入信号,完成 HPM 信号

场-路变换,在 SAR 接收机射频前端电路中设置节点以便观测节点信号响应特性。

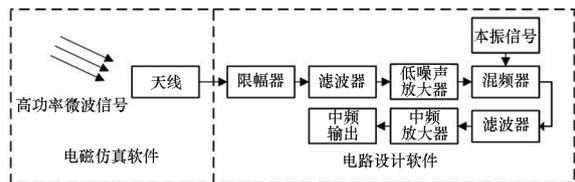


图 2 联合仿真方案示意图

Fig. 2 Schematic diagram of joint simulation

2.2 HPM 信号模拟与 SAR 天线仿真

在 CST 软件中通过相应的 VBA 宏语言命令自定义激励信号,模拟的 HPM 信号函数^[20]表达式为:

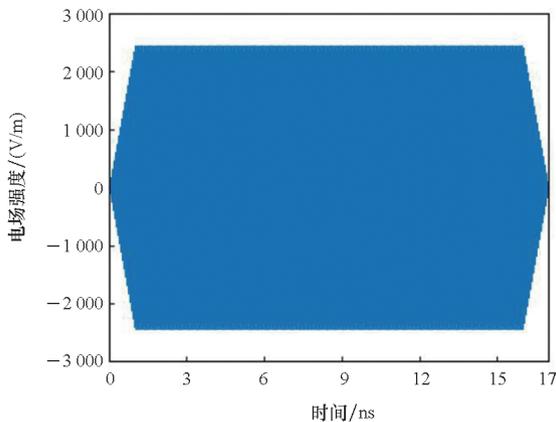
$$E(t) = \begin{cases} E_0 \frac{t}{t_r} \sin(2\pi f_0 t) & 0 < t \leq t_r \\ E_0 \sin(2\pi f_0 t) & t_r < t \leq t_r + \tau \\ E_0 \left(\frac{\tau + 2t_r}{t_r} - \frac{t}{t_r} \right) \sin(2\pi f_0 t) & t_r + \tau < t \leq T \end{cases} \quad (4)$$

式中, E_0 为峰值电场强度, f_0 为中心频率, τ 为脉冲平顶宽度, t_r 为上升时间, T 为脉冲宽度。由式(3)可知, SAR 接收到的 HPM 功率与 HPM 干扰源发射功率之间存在距离平方反比关系,而 CST 软件无法模拟 HPM 脉冲传播距离产生的损耗,仿真时 HPM 脉冲信号直接以平面波的形式辐射天线模型,因此需要考虑 HPM 干扰源发射功率以及干扰源与天线之间距离的影响。在不考虑大气击穿以及大气衰减的情况下,可用下式表示 SAR 天线处 HPM 脉冲的场强^[20]:

$$E_0 = \frac{\sqrt{60P_j G_j}}{R_j} \quad (5)$$

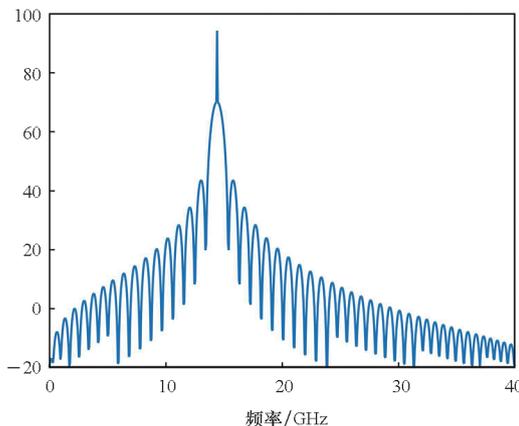
假设 P_j 取 1 GW, G_j 取 20 dB, R_j 取 1 km, 则根据式(5)可以计算出 $E_0 \approx 2450$ V/m, 中心频率设为 f_0 , t_r 取 1 ns, τ 取 15 ns, 则 HPM 脉冲信号时域图和功率谱图如图 3 所示, 由图 3 可知, HPM 脉冲信号能量主要集中在 f_0 处。

波导缝隙阵列天线具有主瓣宽度窄、低副瓣、可共形以及质量轻的优点, 广泛应用于对体积、质量和集成度要求较高的机载雷达系统^[21-22]。波导缝隙阵列天线是指以波导结构为主体, 在波导宽边或窄边壁上以一定的规律开凿多个缝隙形成阵列, 通过切断波导壁中的传导电流, 从而向外辐射电磁波的天线形式。在 CST 软件中建立了如图 4 所示的无人机载 SAR 波导缝隙阵列天线模型, 天线背面采用单根



(a) HPM 脉冲信号时域图

(a) Time-domain of HPM pulse signal



(b) HPM 脉冲信号功率谱图

(b) Power spectrum of HPM pulse signal

图 3 HPM 脉冲信号时域图与功率谱图

Fig. 3 Time-domain and power spectrum of HPM pulse signal

宽边倾斜开缝波导作为耦合波导, 辐射面采用五根波导宽边纵缝形成阵列, 辐射面整体尺寸为 $64.5 \text{ mm} \times 63.5 \text{ mm} \times 3.5 \text{ mm}$ 。

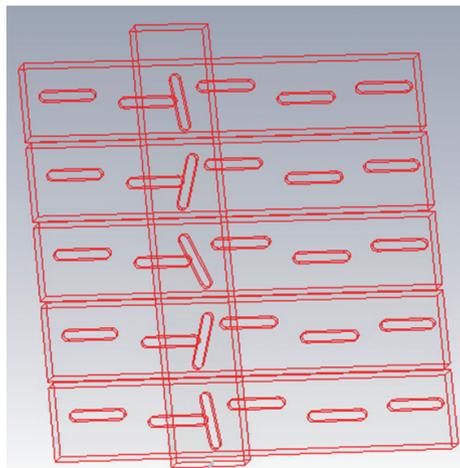


图 4 波导缝隙阵列天线模型

Fig. 4 Simulation model of waveguide slot array antenna

在 CST 软件中,使用时域求解器对天线进行求解,得到天线远场方向图和反射系数 S_{11} 分别如图 5 和图 6 所示。天线是 HPM 脉冲信号前门耦合的主要通道,由于无人机载 SAR 工作频率较高,且对天线增益要求较高,因此在设计天线时主要考虑天线的增益指标。

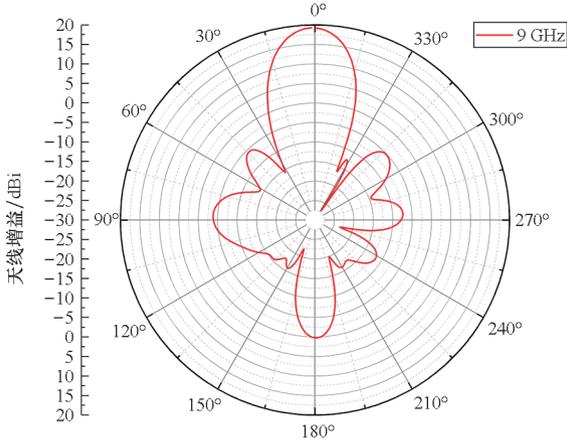


图 5 天线远场方向图

Fig. 5 Far-field diagram of antenna

由图 5 和图 6 可知,天线最大增益可达到约 20 dBi,工作带宽超过 400 MHz,并且天线副瓣较

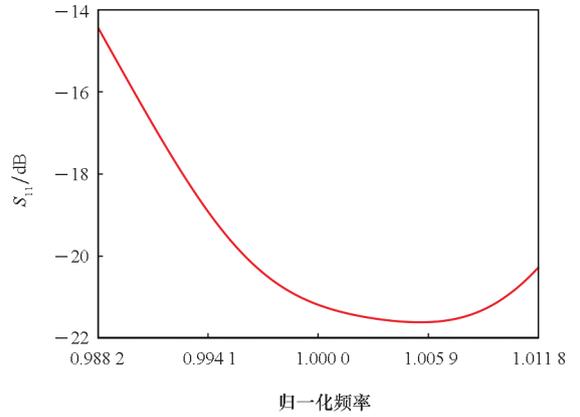


图 6 天线 S_{11} 参数图

Fig. 6 S_{11} parameter diagram of the antenna

低,满足无人机载 SAR 天线设计需求,可以用于 HPM 前门耦合效应分析。

2.3 SAR 射频前端建模与仿真

在 ADS 中建立无人机载 SAR 接收机射频前端电路模型,接收机采用超外差结构,射频前端电路包括 PIN (positive-intrinsic-negative diode) 限幅器、低噪声放大器、滤波器、混频器和中频电路,其截图如图 7 所示。

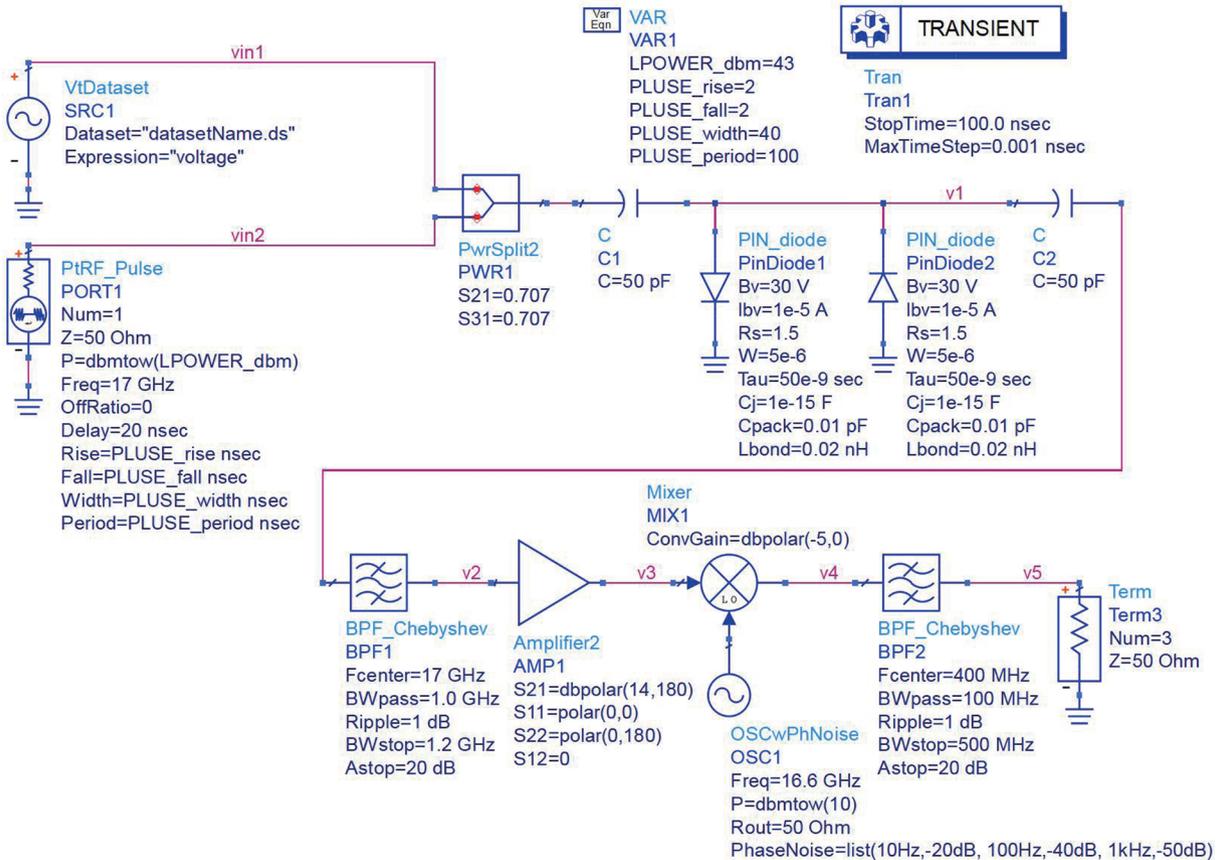


图 7 射频前端电路模型截图

Fig. 7 Screenshot of RF front-end circuit simulation model

PIN 限幅器作为接收机射频前端通道重要的保护器,其工作原理是通过 PIN 二极管的电导调制特性来防止大信号或强电磁脉冲对接收通道内敏感器件造成毁伤。在大信号注入的情况下, PIN 二极管内 I 层载流子分布符合双极扩散方程,通过拉普拉斯变换得到 I 层的电荷储存关系,根据帕德逼近理论可以得到 I 层的等效电路网络,在此基础上建立的 PIN 限幅器时域等效电路模型可用于 PIN 限幅器高功率微波效应仿真研究^[23-27]。

射频前端模型中的 PIN 限幅器由两个反向的 PIN 二极管构成,可以省略 RF 扼流电感,从而简化仿真计算^[28]。在 ADS 软件中采用谐波平衡仿真计算限幅器输入输出特性,结果如图 8 所示。由图 8 中的特性曲线可知,限幅器起限电平值约为 8 dBm,输入功率小于 8 dBm 时,限幅器无限幅作用,插损很小;输入功率大于 8 dBm 时,由于限幅器限幅作用,插损变大,输出功率随输入功率缓慢增加;输入功率大于 30 dBm 时,限幅器限幅能力趋于饱和,此后输出功率随输入功率增加斜率增大。

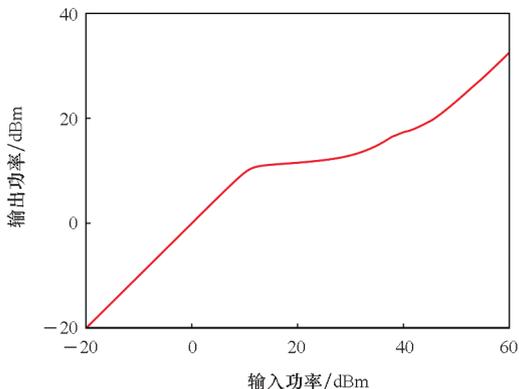


图 8 PIN 限幅器输入输出特性曲线

Fig. 8 Input and output characteristics of PIN limiter

限幅器后级器件为滤波器和低噪声放大器,低噪声放大器作为射频前端最敏感的器件之一,耦合进入接收机射频前端电路的 HPM 信号会导致其增益、噪声系数等性能下降,甚至烧毁内部半导体器件^[28]。

选取日本电气股份有限公司生产的高电子迁移率场效应管 (high electron mobility transistor, HEMT) NE3210S01 作为低噪声放大器的放大晶体管,并在 ADS 软件中搭建了低噪声放大器电路并进行仿真计算,得到输入输出特性曲线和增益变化曲线,如图 9 和图 10 所示。

由图 9 和图 10 可以看出,当低噪声放大器的输入功率小于 -5 dBm 时,器件工作在线性放大

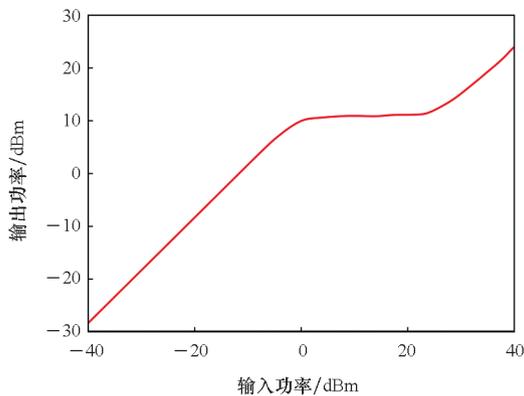


图 9 低噪声放大器输入输出特性曲线

Fig. 9 Input and output characteristics of low noise amplifier

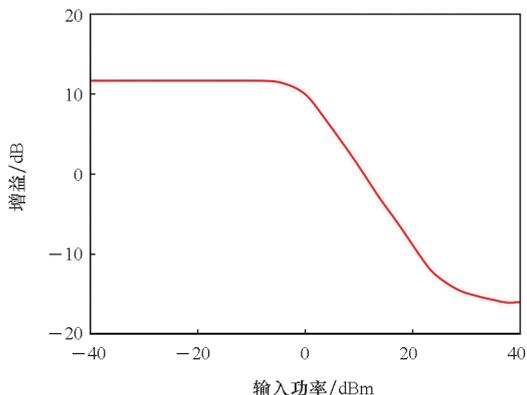


图 10 低噪声放大器增益变化曲线

Fig. 10 Gain variation graph of low noise amplifier

区,增益保持在 11.6 dB 左右;随着输入功率进一步增大,低噪声放大器进入非线性工作区,增益逐渐下降;若输入功率再次增大且超过临界阈值时,低噪声放大器位于饱和区,此时输出端功率基本保持不变;当输入功率达到 23 dBm 时,输出功率随着输入功率增大而继续增大,此时可以认为低噪声放大器已经被 HPM 脉冲烧毁。

3 联合仿真结果分析

无人机载 SAR 接收机是一个包含多个模块的系统,其射频前端电路的 HPM 效应主要体现在限幅器与第一级低噪声放大器的非线性效应和毁伤效应。国内外对于接收机 HPM 效应的研究也多集中于射频前端电路中器件的 HPM 效应,包括限幅器的平顶泄露和尖峰泄露特性以及低噪声放大器的非线性压制效应等^[29-31]。针对器件 HPM 效应的计算机仿真研究,主要分为两种:一种是从器件真实工作原理出发,建立器件的物理级模型,可以还原器件物理上的工作过程,精度较高,但是物理模型结构复杂,仿真计算数据量巨大,无法应

用在系统级仿真中;另一种是从器件的半导体物理方程出发,得到器件的等效参数,从而建立器件的时域等效电路,可以还原器件在 HPM 作用时的工作状态,与 ADS 软件兼容性较好,可以应用于系统仿真。

高功率微波对接收机的前门耦合效应研究较为复杂,学科交叉性、系统性和层次性都极强,需要结合接收机本身的系统结构以及内部器件特性综合考量^[32]。考虑到 HPM 对无人机载 SAR 前门耦合效应的复杂性和层次性,采用场路联合仿真的方式,将天线端口的感应电压注入 SAR 接收机射频前端电路中,观察电路节点中的信号波形,计算信号功率大小,以器件厂商数据手册中给出的 1 dB 压缩点以及击穿阈值为考核指标,考量 HPM 脉冲对无人机载 SAR 接收机前门耦合效应,并给出基于 HPM 信号场强的效应评估图。

3.1 天线辐照仿真结果分析

在 CST 软件中将天线激励端口设置为离散端口,以 HPM 信号为激励源,通过平面波的形式辐照天线,获得天线在水平极化 HPM 辐照下的感应电压波形如图 11 所示。

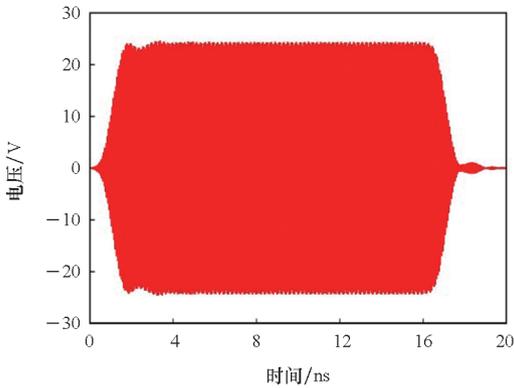


图 11 天线在水平极化 HPM 辐照下的感应电压波形
Fig. 11 Induced voltage waveform of antenna irradiated by horizontal polarized HPM

天线的耦合响应特性与带通滤波器相似,因此可以看出天线端口的耦合电压信号幅值开始上升的时间以及到达峰值幅值的时间均有所延后,耦合电压信号上升沿时间与激励信号基本一致,但是信号上升趋势变缓。

对于接收天线而言,天线与电磁波的极化关系关系到电磁干扰源的发射天线与接收天线之间的极化匹配问题,为了研究天线与辐照 HPM 信号之间的极化关系对天线耦合电压值的影响,在 CST 软件中改变平面波的极化方向,分别以水平极化方向和垂直极化方向辐射天线,监测天线端

口感应电压值,如图 11 和图 12 所示。

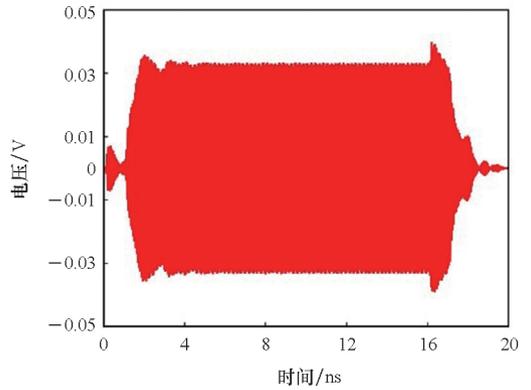


图 12 天线在垂直极化 HPM 辐照下的感应电压波形
Fig. 12 Induced voltage waveform of antenna irradiated by vertically polarized HPM

由图 11 和图 12 可以看出,在辐照波场强一致的情况下极化匹配情况对天线感应电压的影响较大,天线感应电压峰值在极化匹配与极化失配的条件下相差约 28 dB,并且极化失配会导致耦合电压波形与 HPM 辐照波形差别较大,尤其是在脉冲上升沿和下降沿附近产生失真以及波形震荡。

为了研究 HPM 不同攻击方向天线耦合的响应电压值,在 CST 软件中分别仿真 HPM 信号从不同角度 θ 辐照天线,天线端口的耦合电压值随角度 θ 变化如图 13 所示, θ 为 1.2 节建模场景中 HPM 源相对天线相位中心的干扰进入角。

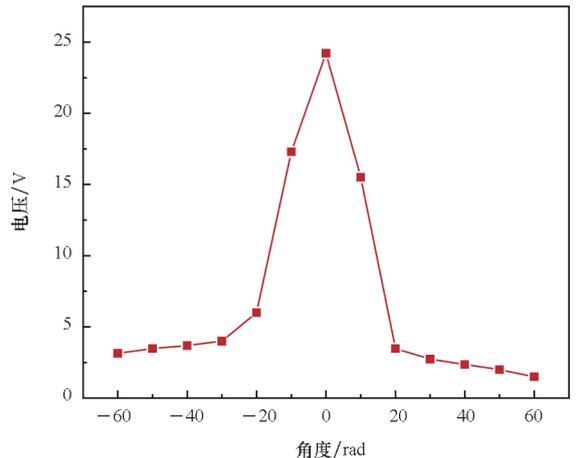


图 13 不同角度下的天线耦合电压值
Fig. 13 Antenna coupling voltage values at different angles

由图 13 可以看出,HPM 信号在 ± 20 rad 辐照天线时,天线耦合的电压值较大,其中垂直入射时天线耦合电压值最大。

对于频率不同的电磁波,接收天线的阻抗特性也会随着频率变化,因此天线端口的感应电压也会随着辐照波的频率变化。改变 CST 软件中

平面波激励源的频率,观察天线端口响应电压值,得到响应电压值随平面波频率变化曲线如图 14 所示。

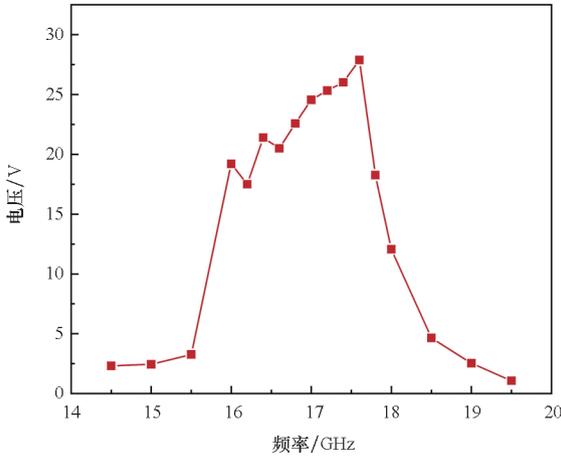


图 14 不同频率下的天线耦合电压值
Fig. 14 Antenna coupling voltage values at different frequency

相比其他用频设备, SAR 天线频带较宽,可达几百 MHz 甚至 1 GHz,由图 14 可知,当 HPM 载波信号频率落在天线工作频带内时,会在天线端口产生较大的感应电压,对接收机射频前端器件产生较大威胁。

3.2 注入仿真结果分析

将 CST 软件中的天线端口感应电压导出并处理后注入 ADS 软件中的射频前端电路中,进行瞬态仿真,观察电路各个节点的电压波形。

限幅器输出电压波形及输出功率分别如图 15 和图 16 所示,由图 15 和图 11 对比可计算出限幅后电路输出电压幅值衰减了约 10.6 dB,由图 16 可知,PIN 限幅器存在明显的尖峰泄露现象,尖峰泄露功率达到 29.74 dBm,平坦泄露功率约为 26.55 dBm。

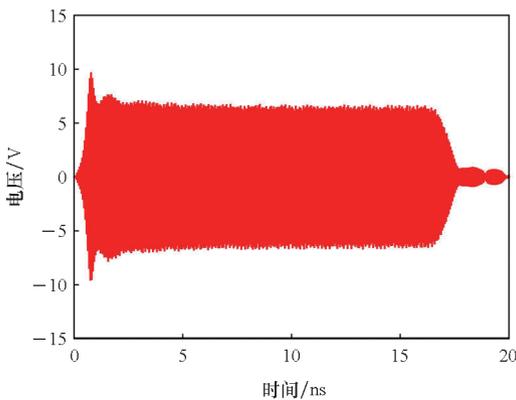


图 15 PIN 限幅器输出电压波形
Fig. 15 Output voltage waveform of PIN limiter

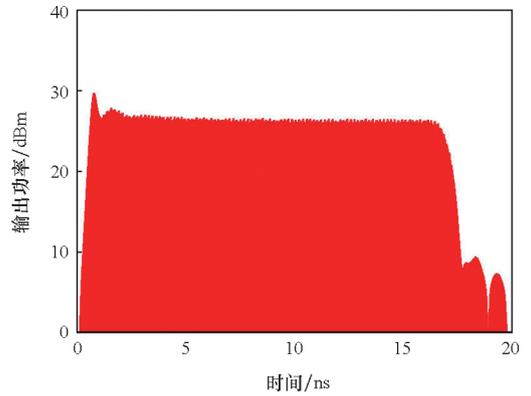


图 16 PIN 限幅器输出功率
Fig. 16 Output power of PIN limiter

通过调整 R_i 改变 CST 软件中的平面波峰值场强,通过注入仿真得到限幅器在不同输入功率情况下的功率泄露,如图 17 所示。

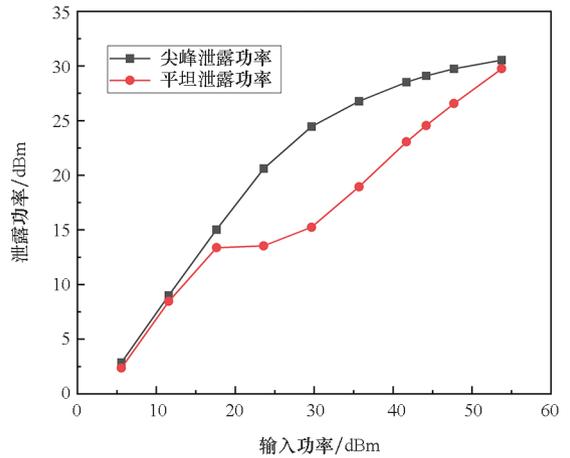


图 17 不同输入功率下的 PIN 功率泄露
Fig. 17 PIN power leakage under different input power

由图 17 可知,当注入天线感应电压信号功率小于 13 dBm 或大于 53 dBm 时,尖峰泄露现象并不明显,当注入信号功率在 13 ~ 53 dBm 时,限幅器的尖峰泄露现象较为明显,尖峰泄露功率与平坦泄露功率最大差值出现在输入功率为 30 dBm 时,达到 10 dBm。

带通滤波器输出电压波形如图 18 所示,可以看出限幅器尖峰泄露脉冲幅值在通过滤波器后有所衰减,但是由于信号频率处于滤波器通带内,所以衰减并不明显。同时,限幅器平顶泄露脉冲信号经过滤波器后产生了不规则震荡,震荡波峰值相比平坦泄露幅值并未明显衰减,会对滤波器后的低噪声放大器产生威胁。

改变 HPM 信号场强,并通过注入式仿真得到滤波器在不同输入功率下的输入输出特性,如图 19 所示,可以看出滤波器在输入功率小于

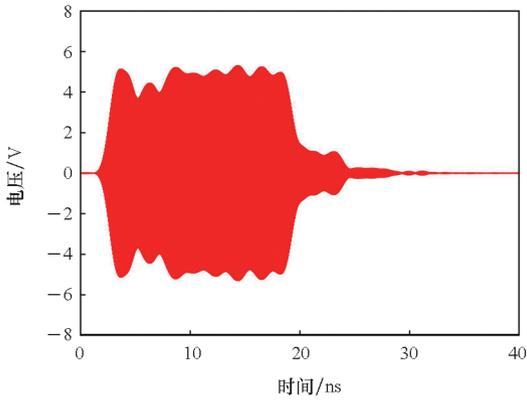


图 18 带通滤波器输出电压波形

Fig. 18 Output voltage waveform of bandpass filter

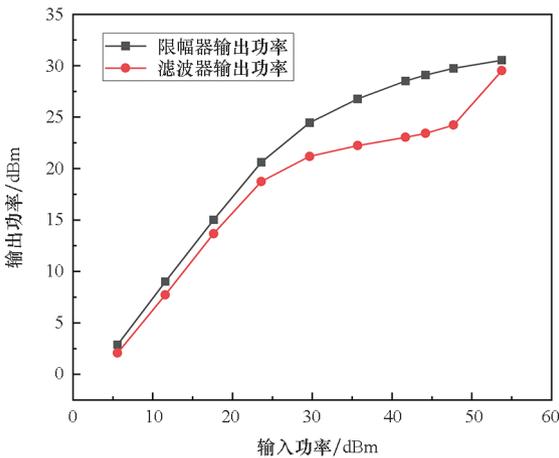


图 19 不同输入功率下的限幅器和滤波器输出功率

Fig. 19 Output power of limiter and filter under different input power

24 dBm时对于限幅器尖峰泄露抑制效果并不明显,在输入功率为 24 ~ 53 dBm 时能够一定程度抑制限幅器尖峰泄露现象。

3.3 无人机电 SAR 射频前端电路 HPM 效应评估

SAR 接收机射频前端电路中通常采用限幅器后连接一级或多级低噪声放大器的结构,确保在放大微弱雷达回波信号的同时降低接收机噪声系数。根据 2.3 节中低噪声放大器模拟仿真的结果可知,当低噪声放大器输入功率超过 10.9 dBm 时,增益变为负数,此时可以认为低噪声放大器已经受到损伤,继续增大输入功率至 23 dBm 时,增益达到 -10 dB,并且输出功率随着输入功率增大而增大,此时可以认为低噪声放大器已经被击穿烧毁。

PIN 限幅器的烧毁功率阈值无法通过仿真得到,通过调研多款雷达限幅器器件手册,可设定限幅器击穿烧毁阈值为 50 dBm,在此基础上,结合雷达射频前端各个器件的功率输入输出曲

线,可以倒推出限幅器和低噪声放大器损伤或烧毁时对应的 HPM 信号场强幅值,画出无人机电 SAR 高功率微波前门耦合效应评估图如图 20 所示。

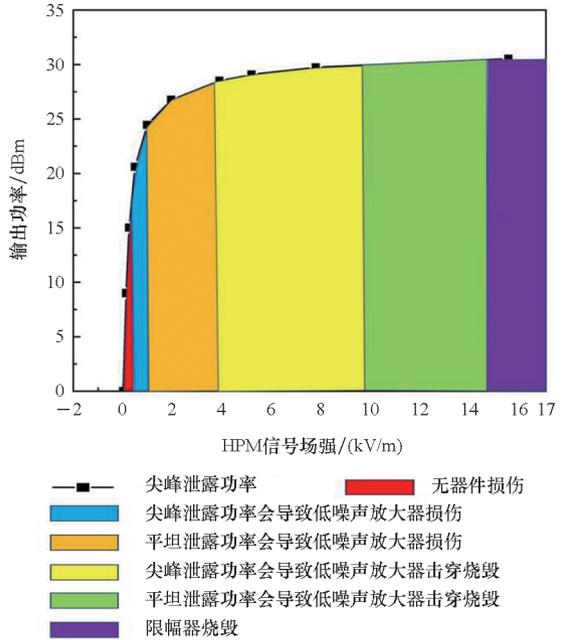


图 20 SAR 高功率微波前门耦合效应评估

Fig. 20 Evaluation diagram of coupling effect of high-power microwave front-gate in SAR

评估图中不同颜色的区域代表射频前端器件不同工作状态。红色区域表示当 HPM 场强在 0 ~ 0.24 kV/m 时,HPM 信号对射频前端电路无明显影响,器件都能正常工作;蓝色区域表示当 HPM 场强在 0.24 ~ 0.97 kV/m 时,限幅器尖峰泄露的功率会导致低噪声放大器受到损伤;橙色区域表示当 HPM 场强在 0.97 ~ 3.87 kV/m 时,限幅器平坦泄露的功率会导致低噪声放大器受到损伤;黄色区域表示当 HPM 场强在 3.87 ~ 10 kV/m 时,限幅器尖峰泄露的功率会导致低噪声放大器击穿烧毁,这种击穿效应主要是因为尖峰泄露峰值电压超过低噪声放大器栅极电压最大耐受值;绿色区域表示当 HPM 场强在 10 ~ 15 kV/m 时,限幅器平坦泄露的功率会导致低噪声放大器击穿烧毁;紫色区域表示当 HPM 场强大于 15 kV/m 时,限幅器的输入功率已经超过限幅器所能承受的最大功率容量,限幅器中的 PIN 二极管被击穿,无法实现限幅功能。无人机电 SAR 高功率微波前门耦合效应评估图可以为无人机电 SAR 在战场复杂电磁环境下的安全性评估提供参考和保障,尤其适用于无人机电 SAR 面临 HPM 武器威胁的干扰对抗场景。

4 结论

本文使用场路联合仿真的方法研究了无人机载 SAR 高功率微波前门耦合效应,根据联合仿真的结果给出了无人机载 SAR 高功率微波前门耦合效应评估图,可得到如下结论:

1)前门耦合是 HPM 电磁脉冲对 SAR 接收机产生影响的主要途径。根据无人机载 SAR 成像场景参数以及 HPM 干扰源的功率等参数可以计算出 SAR 接收到的 HPM 信号场强,不同量级的场强会导致 SAR 射频前端器件产生损伤或烧毁效应,HPM 信号峰值场强超过 0.24 kV/m 时,低噪声放大器便有可能受到损伤,信号场强超过 15 kV/m 时,限幅器会烧毁失效。

2)PIN 限幅器是接收机射频前端通道中起保护作用的第一级器件,在 HPM 信号作用下,PIN 限幅器会出现尖峰泄露现象,尖峰泄露功率过大会导致接收机射频通道中后级低噪声放大器损伤甚至烧毁。当 HPM 信号超过 15 kV/m 时,输入功率超过了限幅器的功率容限,PIN 限幅器中的 PIN 二极管会击穿,导致限幅器烧毁失效。

3)低噪声放大器是接收机射频前端中对电磁干扰能量最敏感的器件之一,低噪声放大器前端的滤波器能在一定程度上抑制限幅器的尖峰泄露现象,但是当限幅器尖峰泄露功率和平坦泄露功率增大,滤波器输出的信号功率仍然能够使低噪声放大器中的场效应管损伤或击穿烧毁。

4)对 SAR 开展 HPM 效应防护应着眼以下几个方面:一是设计天线时采用新型电磁防护材料,如能量选择表面等,降低天线 HPM 能量耦合效率;二是在射频前端电路中采用多级 PIN 限幅器,抵抗 HPM 对后级电路器件的毁伤;三是采用电磁屏蔽材料增加 SAR 外壳屏蔽性能,降低 HPM 后门耦合的概率。

参考文献 (References)

[1] 张冬晓,陈亚洲,程二威,等. 无人机动态数据链路电磁辐射效应试验[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2020, 18(4): 643-649.
ZHANG D X, CHEN Y Z, CHENG E W, et al. Electromagnetic radiation effects on dynamic datalink of UAV[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2020, 18(4): 643-649. (in Chinese)

[2] 刘正堂,程彦杰,周文,等. 小型无人机载 SAR 在 SAR 干扰系统试验中的应用[J]. 火力与指挥控制, 2019, 44(1): 172-176.
LIU Z T, CHENG Y J, ZHOU W, et al. Application of micro UAV SAR in training of SAR jamming system[J]. Fire

Control & Command Control, 2019, 44(1): 172-176. (in Chinese)

[3] 任开锋,邱坤滨. 一种无人机载 SAR 的结构与分析[J]. 电子机械工程, 2018, 34(1): 28-31.
REN K F, QIU K B. Structure and analysis of a UAV-borne SAR[J]. Electro-Mechanical Engineering, 2018, 34(1): 28-31. (in Chinese)

[4] MIN S H, JUNG H, KWON O, et al. Analysis of electromagnetic pulse effects under high-power microwave sources[J]. IEEE Access, 2021, 9: 136775-136791.

[5] 黄岩,赵博,陶明亮,等. 合成孔径雷达抗干扰技术综述[J]. 雷达学报, 2020, 9(1): 86-106.
HUANG Y, ZHAO B, TAO M L, et al. Review of synthetic aperture radar interference suppression [J]. Journal of Radars, 2020, 9(1): 86-106. (in Chinese)

[6] SEDEHI M, CRISTALLINI D, MARINI J, et al. Impact of an electromagnetic interference on imaging capability of a synthetic aperture radar [C]//Proceedings of the IEEE Aerospace Conference, 2007: 1-8.

[7] NATSUAKI R, MOTOHKA T, WATANABE M, et al. An autocorrelation-based radio frequency interference detection and removal method in azimuth-frequency domain for SAR image[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2017, 10(12): 5736-5751.

[8] HUANG Y, ZHANG L, YANG X, et al. An efficient graph-based algorithm for time-varying narrowband interference suppression on SAR system [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2021, 59(10): 8418-8432.

[9] 陈筠力,陶明亮,李劭爽,等. 合成孔径雷达射频干扰抑制技术进展及展望[J]. 上海航天(中英文), 2021, 38(2): 1-13.
CHEN J L, TAO M L, LI J S, et al. Progress and prospects of radio frequency interference suppression technology for synthetic aperture radar[J]. Aerospace Shanghai (Chinese & English), 2021, 38(2): 1-13. (in Chinese)

[10] HUANG Y, WEN C, CHEN Z Y, et al. HRWS SAR narrowband interference mitigation using low-rank recovery and image-domain sparse regularization [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2022, 60: 5217914.

[11] TAO M L, LAI S Q, LI J S, et al. Extraction and mitigation of radio frequency interference artifacts based on time-series sentinel-1 SAR data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2022, 60: 5217211.

[12] 纪朋徽,代大海,吴昊,等. SAR 成像电子对抗技术综述[J]. 无线电工程, 2019, 49(6): 508-513.
JI P H, DAI D H, WU H, et al. Review of SAR imaging electronic countermeasures [J]. Radio Engineering, 2019, 49(6): 508-513. (in Chinese)

[13] 魏青. 合成孔径雷达成像方法与对合成孔径雷达干扰方法的研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2007.
WEI Q. Study of imaging methods of SAR and jamming methods against SAR[D]. Xi'an: Xidian University, 2007. (in Chinese)

[14] 陈凯柏,高敏,周晓东,等. 调频连续波引信高功率微波前门耦合效应研究[J]. 兵工学报, 2020, 41(5): 881-889.
CHEN K B, GAO M, ZHOU X D, et al. Research on

- coupling effect of high-power microwave front-gate in FMCW fuze[J]. *Acta Armamentarii*, 2020, 41(5): 881–889. (in Chinese)
- [15] 赵宏泽, 魏光辉, 杜雪, 等. 卫星导航接收机三阶互调阻塞效应分析[J]. *系统工程与电子技术*, 2022, 44(4): 1336–1342.
ZHAO H Z, WEI G H, DU X, et al. Analysis of third-order intermodulation blocking effect for satellite navigation receiver[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2022, 44(4): 1336–1342. (in Chinese)
- [16] 戴荣涛, 王青春. 对合成孔径雷达压制干扰效果分析[J]. *现代电子技术*, 2008, 31(21): 72–74.
DAI R T, WANG Q C. Analysis of barrage jamming on synthetic aperture radar[J]. *Modern Electronics Technique*, 2008, 31(21): 72–74. (in Chinese)
- [17] 余道杰, 张长峰, 彭平, 等. 高功率微波大气传输折射指数和衰减系数计算统一模型[J]. *微波学报*, 2008, 24(5): 74–77.
YU D J, ZHANG C F, PENG P, et al. Unified calculation model of the refractive index and attenuation coefficient for high power microwave propagation in the atmosphere [J]. *Journal of Microwaves*, 2008, 24(5): 74–77. (in Chinese)
- [18] 毛天鹏, 周东方, 牛忠霞, 等. 微波大气吸收衰减特性分析及分层数值算法[J]. *强激光与粒子束*, 2004, 16(10): 1321–1324.
MAO T P, ZHOU D F, NIU Z X, et al. Absorption and attenuation characteristic of microwave in atmosphere and delaminating algorithm [J]. *High Power Laser & Particle Beams*, 2004, 16(10): 1321–1324. (in Chinese)
- [19] 范宇清, 程二威, 魏明, 等. 高功率微波弹对 GNSS 接收机毁伤效果分析[J]. *系统工程与电子技术*, 2020, 42(1): 37–44.
FAN Y Q, CHENG E W, WEI M, et al. Analysis of damage effect of high-power microwave bomb on GNSS receiver[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2020, 42(1): 37–44. (in Chinese)
- [20] 胡锐. 卫星导航接收机强电磁脉冲耦合机理研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
HU R. Research on the coupling mechanism of strong electromagnetic pulse for satellite navigation receiver [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018. (in Chinese)
- [21] 杨诚, 冯文文, 张洪涛. Ku 波段低剖面平板缝隙阵列天线[C]//2018 年全国微波毫米波会议论文集(下册), 2018: 754–757.
YANG C, FENG W W, ZHANG H T. Low profile planar slot array antenna at Ku band[C]//Proceedings of 2018 National Microwave and Millimeter Wave Conference (Volume II), 2018: 754–757. (in Chinese)
- [22] 赵嘉伟. 波导缝隙阵列天线快速建模和低副瓣设计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.
ZHAO J W. High-speed modeling and low sidelobe design of waveguide slot array antenna [D]. Xi'an: Xidian University, 2019. (in Chinese)
- [23] STROLLO A G M. A new SPICE model of power P-I-N diode based on asymptotic waveform evaluation [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 1997, 12(1): 12–20.
- [24] CAVERLY R H, QUINN M J. Time domain modeling of PIN control and limiter diodes [C]//Proceedings of the IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2002: 719–722.
- [25] CAVERLY R H, DROZDOVSKI N V, DROZDOVSKAIA L M, et al. SPICE modeling of microwave and RF control diodes[C]// Proceedings of the 43rd IEEE Midwest Symposium on Circuits and Systems, 2002: 28–31.
- [26] YANG S S, KIM T Y, KONG D K, et al. A novel analysis of a Ku-band planar p-i-n diode limiter[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2009, 57(6): 1447–1460.
- [27] CAVERLY R H, HILLER G. Understanding and modeling the non-monotonic attenuation behavior of PIN limiter diodes[C]//Proceedings of the IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 1998: 849–852.
- [28] 汪海洋. 高功率微波效应机理理论与实验研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2010.
WANG H Y. Theoretical and experimental study on the mechanism of high power microwave effect [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2010. (in Chinese)
- [29] 李赞. 具有 PIN 限幅器的低噪声放大器的 HPM 扰乱效应研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.
LI Y. Interference effect of HPM on a low noise amplifier with a PIN limiter [D]. Xi'an: Xidian University, 2020. (in Chinese)
- [30] 陈自东, 秦风, 赵景涛, 等. 高功率微波作用下限幅器尖峰泄漏特性[J]. *强激光与粒子束*, 2020, 32(10): 103014.
CHEN Z D, QIN F, ZHAO J T, et al. Spike leakage characteristic of limiter irradiated by high power microwave[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32(10): 103014. (in Chinese)
- [31] ZHANG C B, ZHANG J D, WANG H G, et al. Damage effects on low noise amplifiers with microwave pulses [J]. *Microelectronics Reliability*, 2016, 60: 41–47.
- [32] 袁月乾. 雷达接收机的高功率微波非线性效应研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2019.
YUAN Y Q. Research on nonlinear effect of high power microwave in radar receiver [D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2019. (in Chinese)