

## 无人机数据链射频前端高强辐射场干扰效应研究

马振洋<sup>a</sup>, 李慕凡<sup>b</sup>, 李斌<sup>c</sup>

(中国民航大学 a. 民航航空器适航审定技术重点实验室; b. 中欧航空工程师学院; c. 安全科学与工程学院, 天津 300300)

**摘要:** 针对四旋翼无人机(UAV, unmanned aerial vehicle)数据链在低空飞行时易受高强辐射场(HIRF, high intensity radiated field)干扰的问题, 本文采用场-路联合仿真的方法对其进行干扰效应的研究。首先, 利用电磁仿真软件探究 UAV 整机模型在 HIRF 下的天线耦合效应, 并对不同辐照方向、信号类型和脉宽系数下的耦合电压进行分析; 其次, 通过电路设计分析软件对数据链射频(RF, radio frequency)前端电路进行注入仿真并分析干扰效应。结果表明, 脉宽系数越小, 高斯脉冲造成的干扰越强, 相同脉宽系数下的调制高斯脉冲造成的干扰强于高斯脉冲; 干扰信号的加入会导致射频前端中频(IF, intermediate frequency)输出信号的峰值显著增大, 峰值频率发生偏移以及信噪比降低。

**关键词:** 高强辐射场(HIRF); 无人机数据链; 场-路联合仿真; 干扰效应

中图分类号: V279 文献标志码: A 文章编号: 1674-5590(2024)05-0014-08

### Research on interference effect of high intensity radiated field in RF front-end of UAV datalink

MA Zhenyang<sup>a</sup>, LI Mufan<sup>b</sup>, LI Bin<sup>c</sup>

(a. Key Laboratory of Civil Aircraft Airworthiness Certification Technology; b. Sino-European Institute of Aviation Engineering; c. College of Safety Science and Engineering, CAUC, Tianjin 300300, China)

**Abstract:** Aiming at the datalink of quadrotor unmanned aerial vehicle (UAV) is susceptible to be interfered by high intensity radiated field (HIRF) in low altitude airspace, this paper proposes a method of field-circuit joint simulation to investigate the interference effect. Firstly the antenna coupling effect of UAV model under HIRF is investigated with electromagnetic simulation software, and the coupling voltages under different irradiation directions, different signal types and different pulse width coefficients are analyzed. Secondly, the radio frequency (RF) front-end circuits of the datalink are integrated into the simulation with circuit design and analysis software to assess the interference effect. The results demonstrate that the smaller the pulse width coefficient, the stronger the interference caused by Gaussian pulses. Additionally, under identical pulse width coefficients, modulated Gaussian pulses induce stronger interference than Gaussian pulses. Moreover, the addition of the interference signal leads to a significant increase in the peak value of the intermediate frequency (IF) output signal of the RF front-end, the shift of the peak frequency and a decrease in signal-to-noise ratio.

**Key words:** high intensity radiated field (HIRF); unmanned aerial vehicle (UAV) datalink; field-circuit joint simulation; interference effect

由雷达、广播站、无线电和各种船舶/飞机产生的高强辐射场(HIRF, high intensity radiated field)在低空电磁环境中很常见,其威胁范围为 10 kHz~40 GHz。由于具有高机动性、低损耗和灵活性等优点,近年来消费型无人机(UAV, unmanned aerial vehicle)在许多领域得到了广泛应用,包括农业植保<sup>[1]</sup>、电力检查<sup>[2]</sup>和航

拍摄影<sup>[3]</sup>等。UAV 内部的数据链系统是一个关键子系统,是 UAV 与地面控制站之间互动的传输通道。然而,随着应用场景的不断扩大,UAV 数据链也面临着HIRF环境的威胁。

目前,针对电磁干扰(EMI, electromagnetic interference)影响 UAV 的研究主要涉及效应机理、试验探

究和防护设计等方面。文献[4]研究了电磁脉冲干扰对 UAV 结构、通信和布线电路的影响,得到了 UAV 在不同电磁脉冲干扰条件下的敏感特性以及 UAV 电路布局中的电磁分布;文献[5]阐述并总结了 EMI 影响下数据链系统、飞行控制和导航系统以及电源系统的现状和趋势;文献[6]使用电磁拓扑模型分析 UAV 定位系统的干扰耦合方式,通过辐照干扰效应实验发现,UAV 机载天线的耦合干扰主要发生在定位系统最大接收带宽内;文献[7-8]建立了高功率微波对 UAV 数据的干扰模型,并通过试验确定了干扰耦合路径及电磁敏感度在数据链带内外的变化规律;文献[9-12]研究了高功率微波对射频前端电路的前门耦合效应,发现高功率微波容易对射频前端的敏感元器件造成非线性效应,甚至损坏;文献[13-14]通过仿真和试验的方法研究了强电磁脉冲对 UAV 的影响,结果表明强电磁脉冲会引起高压耦合脉冲,从而影响电机系统、图传系统和飞控系统,造成 UAV 无法起飞和失控等现象;文献[15]通过试验的方法发现了 EMI 场强阈值与自动增益控制电压和数据链失锁之间的关系;文献[16]研究了覆盖 2 MHz~3 GHz 频率范围的多个干扰电平的射频干扰对小型 UAV 系统的影响,发现射频干扰信号主要通过天线耦合进入系统内部来降低信息传输准确度。

综上,上述研究成果为 HIRF 对 UAV 数据链射频前端干扰效应的研究方法提供了借鉴和参考。然而,上述研究均未考虑多辐照情况下的 HIRF 对 UAV 数据链射频前端中频(IF, intermediate frequency)输出信号的影响情况,研究结果对 UAV 数据链的普适性还需进行进一步的研究。首先,本文在 3D 建模软件中建立某型号 UAV 的 3D 模型,并将模型导入三维电磁仿真软件中进行多方向辐照仿真;其次,设计场-路联合仿真方案来探究多辐照情况下 HIRF 对 UAV 数据链射频前端中频信号的干扰效应。研究所得结论有利于完善 UAV 的 HIRF 耦合效应分析,并为数据链射频前端防护提供参考。

## 1 UAV 联合仿真方案设计

### 1.1 辐照信号模型

前人针对 HIRF 的研究中采用的波形主要是高斯脉冲或其微分形式<sup>[17-19]</sup>,本文使用高斯脉冲和调制高斯脉冲两种波形。高斯脉冲的时域和频域表达式分别为

$$H(t) = \lambda \exp\left(-\frac{4\pi(t-t_d)^2}{t_w}\right) \quad (1)$$

$$F(f) = -\lambda \frac{t_w}{8} \exp(\pi f^2 t_w^2 + 8\pi j f t_d) \quad (2)$$

式中: $t$  为时间(ns); $\lambda$  为脉冲峰值(V/m); $t_d$  为时延系数(ns); $t_w$  为脉宽系数(ns); $f$  为频率(GHz); $j$  表示虚数单位。

参考 SAE ARP5583A—2010 相关标准<sup>[20]</sup>,设置  $\lambda = 100$  V/m,  $t_d = 5$  ns, 改变信号脉宽系数以分析其时频特性,其时域和频域波形如图 1 和图 2 所示。

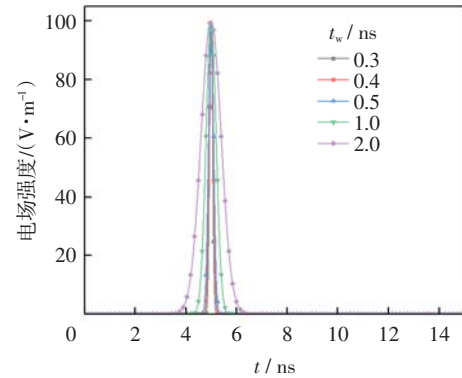


图 1 高斯脉冲时域波形

Fig.1 Time-domain waveform of Gaussian pulse

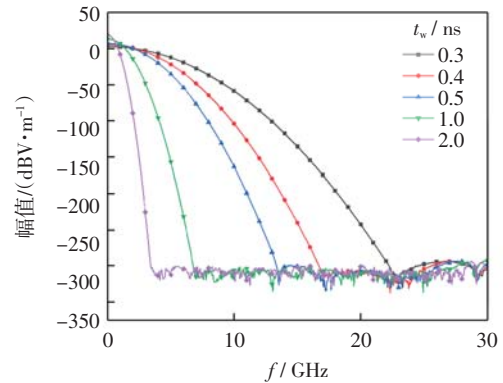


图 2 高斯脉冲频域波形

Fig.2 Frequency-domain waveform of Gaussian pulse

由于 HIRF 对 UAV 的干扰以天线耦合为主,因此在辐照仿真中还采用了调制高斯脉冲,并将调制频率  $f_m$  设置为机载天线工作频率 2.4 GHz,模拟 HIRF 作用实现更强的干扰,其时域和频域波形如图 3 和图 4 所示,表达式为

$$H(t) = \lambda \cos(2\pi f_m t) \exp\left(-\frac{4\pi(t-t_d)^2}{t_w}\right) \quad (3)$$

$$F(f) = -\frac{t_d}{4} \exp\left(\frac{-\pi(f-f_m)^2 t_w^2}{4}\right) \times \exp(-2\pi j(f-f_m)t_d) - \frac{t_d}{4} \exp\left(\frac{-\pi(f+f_m)^2 t_w^2}{4}\right) \times \exp(-2\pi j(f+f_m)t_d) \quad (4)$$

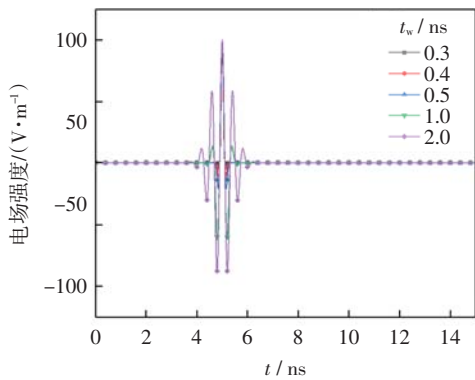


图 3 调制高斯脉冲时域波形

Fig.3 Time-domain waveform of modulated Gaussian pulse

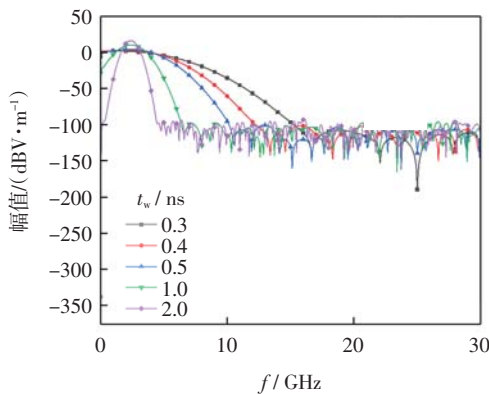


图 4 调制高斯脉冲频域波形

Fig.4 Frequency-domain waveform of modulated Gaussian pulse

### 1.2 联合仿真方案设计

针对 UAV 数据链电路, 采取先辐照后注入的联合仿真方案开展 UAV 在 HIRF 辐照下的场-路耦合效应研究, 联合仿真示意图如图 5 所示, 其中: F1 为滤波器、U1 为放大器、M1 为混频器、OSC1 为本地振荡器。

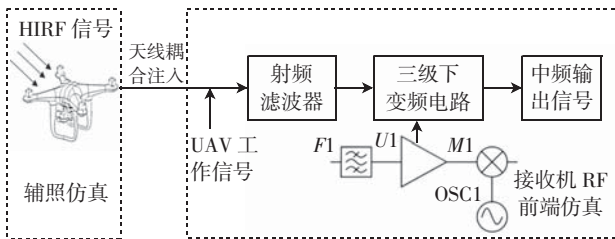


图 5 场-路联合仿真示意图

Fig.5 Schematic diagram of field-circuit joint simulation

首先, 在 3D 建模软件中搭建 UAV 的整机模型, 并导入到电磁仿真软件中进行整机级辐照仿真, 使用高斯脉冲和调制高斯脉冲作为平面波辐照信号源; 在电路设计软件中搭建 UAV 接收机射频前端行为级模型, 将辐照仿真中的天线耦合电压信号以 ASCII 码的形式导出, 并转换成 TIM 格式, 使用 VtDataset 模块和正常数据链的工作信号同时注入到射频前端。仿真使用瞬态仿真器和谐波平衡仿真器, 并在多处设置电路

节点用来监测输出信号。

#### 1.2.1 辐照仿真设计

利用三维建模软件建立某型 UAV 的 3D 几何模型, 并导入三维电磁仿真软件中进行辐照仿真。为贴合实际情况, 机身底部金属材料设置为导电率为  $2.27 \times 10^7$  S/m 的镁合金, 机身其他部分设置为复合材料, 底部悬挂的操作设备材料设置为理想导体; 天线贴片材料为纯铜, 介质基板为 FR-4, 天线结构如图 6 所示, 其中心频率为 2.43 GHz, 工作频段覆盖民用 UAV 与地面控制器的常用通信频段 2.400~2.483 GHz。仿真条件设置如下: 尺寸单位为 mm, 时间单位为 ns, 频率单位为 GHz, 边界条件设为开放边界, 填充介质设为空气, 仿真求解器选用时域有限差分求解器。

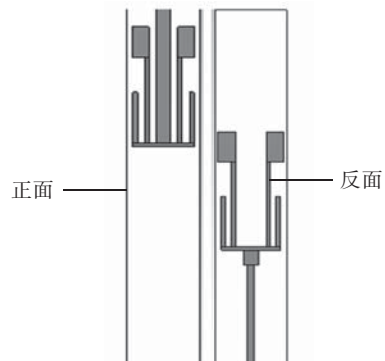


图 6 UAV 机载天线双面结构图

Fig.6 Double-sided structure of UAV airborne antenna

为模拟 UAV 在飞行过程中受到的来自不同方向的 HIRF 的情形, 在电磁仿真软件中完成了针对机载天线 3 个方向的平面波辐照仿真, 如图 7 所示。其中上方③的 HIRF 干扰主要来自于 UAV 上方正在飞行的航空器的机载发射机, ①和②的 HIRF 干扰主要来自于地面无线电、雷达等。在天线处设置了一个  $50 \Omega$  的离散端口, 以输出天线耦合信号。

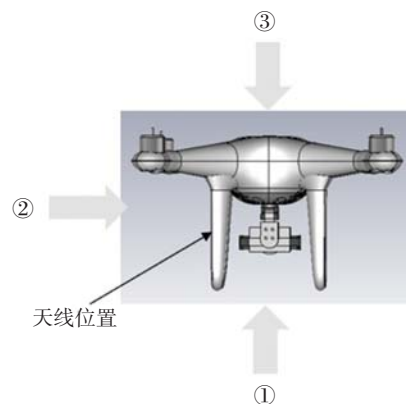


图 7 辐照仿真示意图

Fig.7 Schematic diagram of irradiation simulation

### 1.2.2 注入仿真设计

基于 UAV 的实际设计情况, 根据整机仿真的结果, 数据链的受扰效应并不能直接体现, 因此在电路

设计中搭建数据链射频前端行为级仿真模型, 主要包括带通滤波器、低噪声放大器和混频器等元器件, 原理图如图 8 所示。

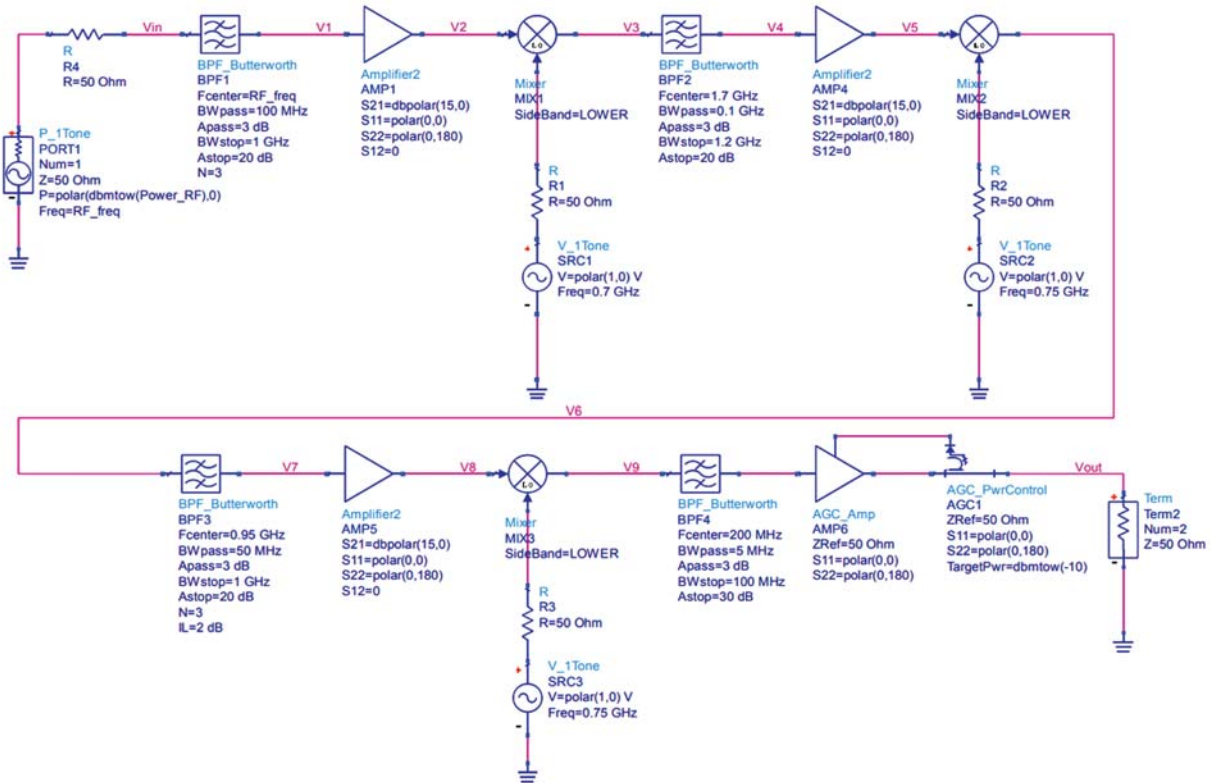


图 8 接收机射频前端行为级仿真原理图

Fig.8 Behavioral simulation schematic of receiver RF front-end

## 2 结果分析

### 2.1 天线耦合曲线分析

仿真结果如图 9 和图 10 所示。由图 9 和图 10 可以看出, 相同脉冲辐照下, 不同位置入射下的天线耦合电压波形均表现为振荡衰减波, 主要区别在于电压峰值。由侧面入射(位置②)的辐照信号造成的干扰最强,

这是因为此时的辐照方向处于机载天线最大增益方向, 电磁波中的磁场能更直接地影响天线, 且电场更容易散布到天线周围的空间中, 因此耦合电压相对较大, 其他两个辐照方向与最大增益方向偏离, 所以耦合电压较小。在电磁波辐照能量相同的情况下, 对于高斯脉冲信号, 其脉宽系数越小, 天线耦合电压幅值越大, 且波形振荡越剧烈, 波形拖尾时间越长; 当脉宽系数增大时, 脉冲信号的上升和下降更平缓; 而对于调

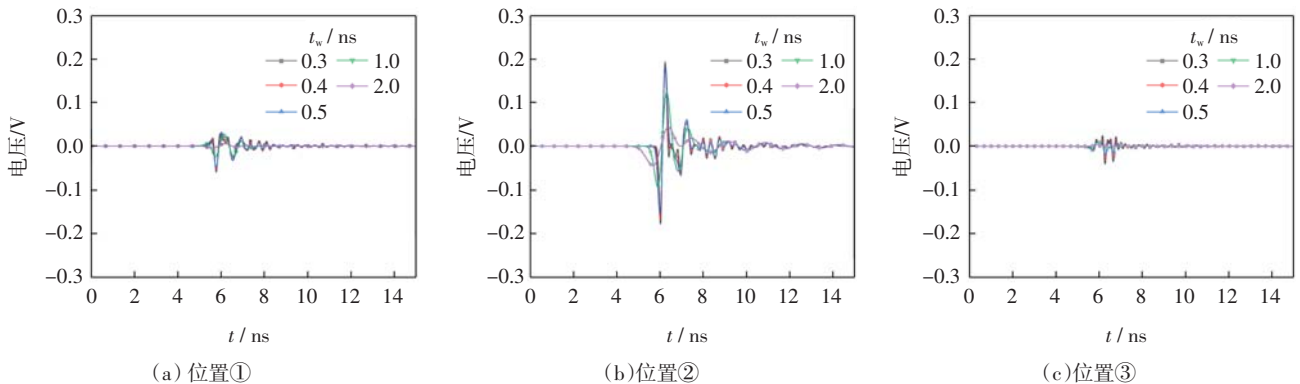
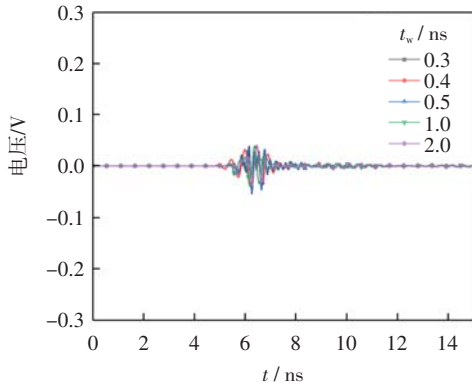


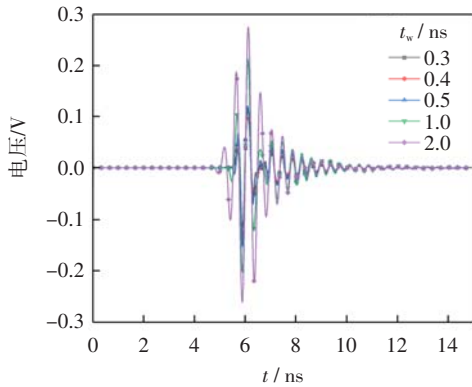
图 9 高斯脉冲辐照下的耦合电压波形

Fig.9 The waveforms of coupled voltage under Gaussian pulse irradiation

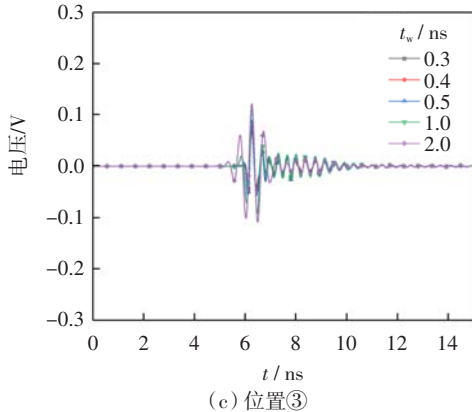
制高斯脉冲信号,脉宽系数越大,天线耦合电压幅值越大,高频段电压值衰减越迅速。理论与仿真结果一致。



(a) 位置①



(b) 位置②



(c) 位置③

图 10 调制高斯脉冲辐照下的耦合电压波形

Fig.10 The waveforms of coupled voltage under modulated Gaussian pulse irradiation

### 2.2 天线耦合电场分析

通过分析所有辐照方向下的仿真结果可知,当电磁平面波从位置②辐照时,在天线端口产生的耦合电场最强,因此通过电场监视器,选取位置②辐照下激励信号分别为  $t_w = 0.3$  ns 的高斯脉冲和  $t_w = 2.0$  ns 的调制高斯脉冲,得到天线表面电场分布,如图 11 和图 12 所示,其中  $f = 500$  MHz 为天线频带外的频点,2.40、2.43、2.46 GHz 均为天线频带内的频点。根据对比可知,

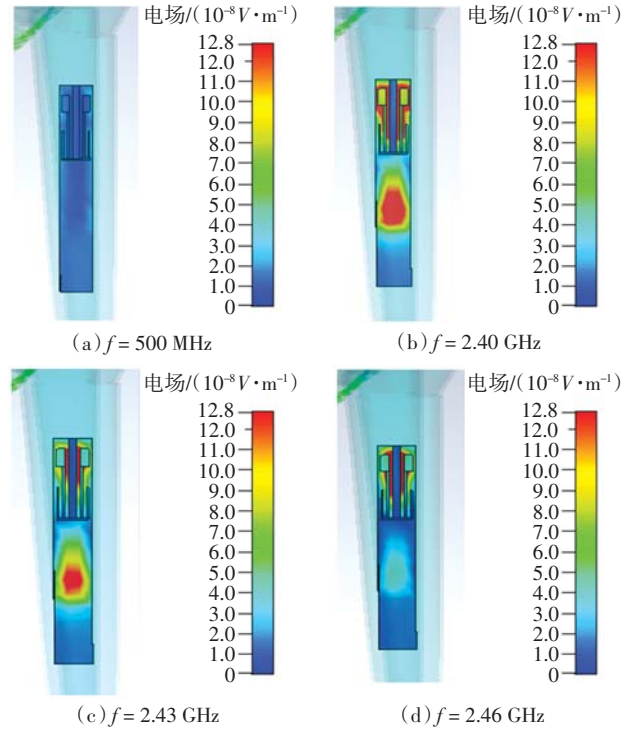


图 11 高斯脉冲辐照下的天线表面电场

Fig.11 Electric field of antenna surface under Gaussian pulse irradiation

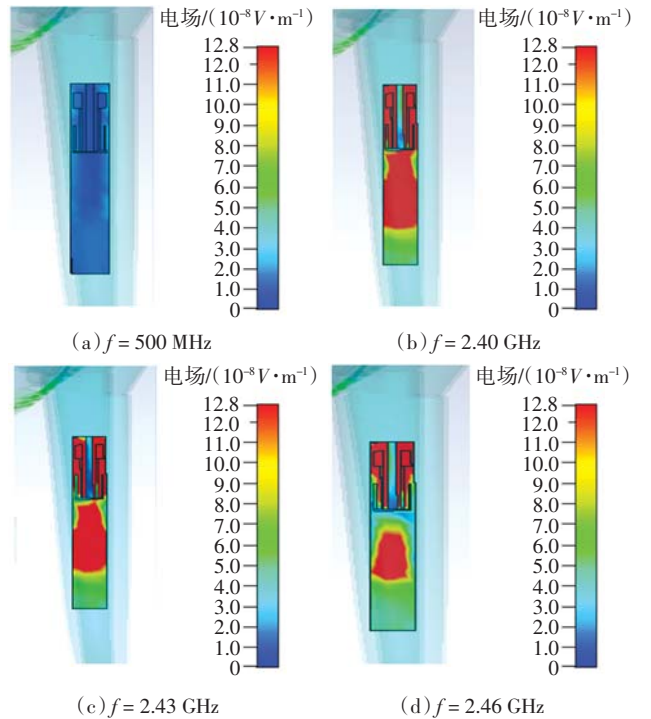


图 12 调制高斯脉冲辐照下的天线表面电场

Fig.12 Electric field of antenna surface under modulated Gaussian pulse irradiation

在  $f = 500$  MHz 处,电场分布较为均匀且场强较小,此时耦合产生的电压值较小。在  $f = 2.40$ 、2.43、2.46 GHz 时,天线表面电场在贴片导体层出现不同程度的集中

增强效应,场强峰值主要分布在天线正反两面的贴片导体层。当电磁波频率达到天线的共振频率时,共振会导致天线吸收和辐射能量的效率变高,天线的电场响应将被放大,从而增强表面电场的响应。由于调制高斯脉冲信号在天线工作频段处能量分量要强于高斯脉冲,因此调制高斯脉冲辐照下天线表面电场的增强效应要强于高斯脉冲辐照下的天线表面电场响应。仿真结果与理论吻合。

### 2.3 注入仿真结果分析

UAV 整机仿真中,仅分析电压的时频响应和电场

分布并不能完全反映 HIRF 对 UAV 数据链接收机射频前端的影响规律。为进一步探究场-路耦合效应,以  $-60$  dBm 的  $2.40$  GHz 正弦信号模拟 UAV 数据链正常工作信号,采用控制变量法,改变注入干扰信号,观察中频输出信号的变化。

根据天线耦合电压时域曲线可以明显看出,由于其峰值电压较大,UAV 数据链的射频信号会受到较大影响。在节点  $V_{out}$  观察正常中频输出信号和不同干扰信号注入下的中频输出信号,得到的结果如图 13 和图 14 所示。

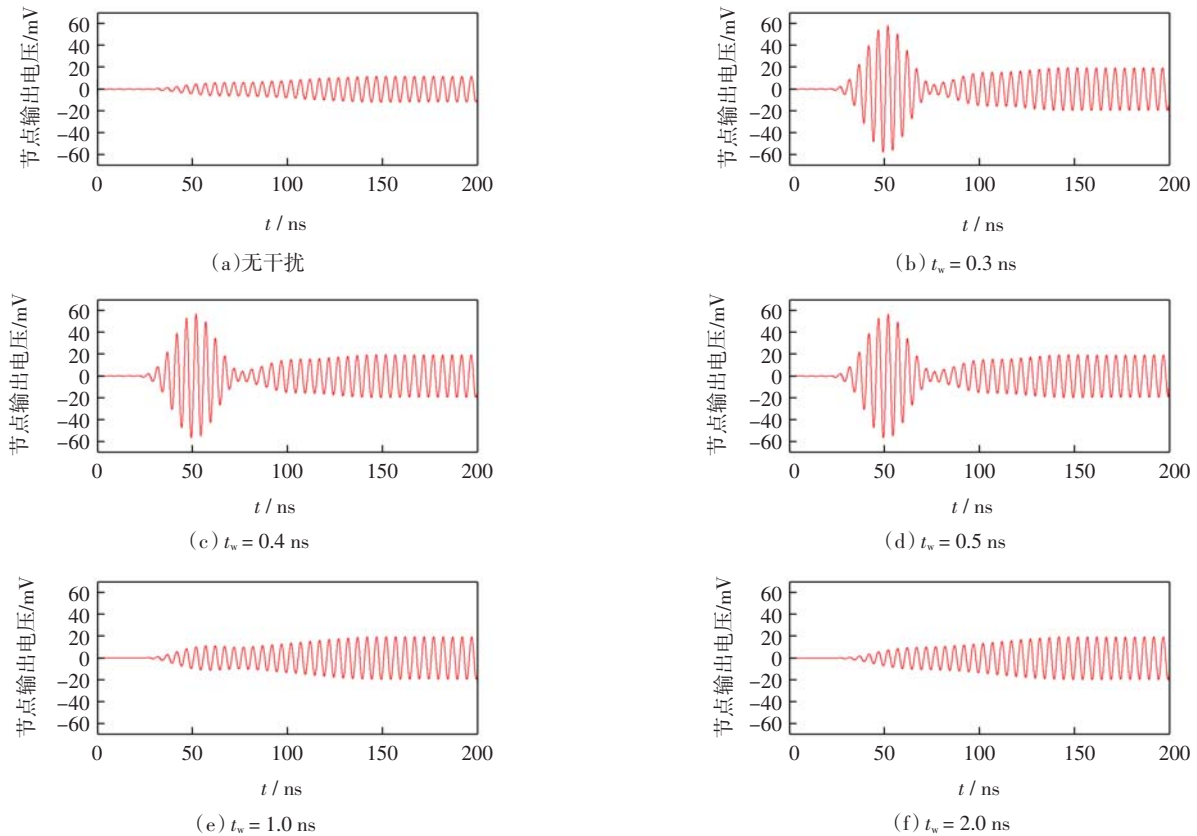


图 13 不同脉宽高斯脉冲干扰下和无干扰下的中频输出波形对比

Fig.13 Comparison of IF output waveforms under different pulse width of Gaussian pulse interference and without interference

从图 13 可以看出,当高斯脉冲信号的脉宽系数为  $0.3$  ns 时,中频输出信号的峰值电压约为  $58$  mV,正常中频输出信号完全淹没,这可能会造成后级电路处理数据时产生错误;随着脉宽系数增大,中频信号受到的影响减小,且当脉宽系数为  $2.0$  ns 时,中频输出信号与正常信号不存在波形上的差别,输出信号幅值增加近  $5$  mV,干扰信号的加入对其造成了近似噪声干扰,数据链正常工作信号受到影响。从图 14 可以看出,调制高斯脉冲干扰影响下的中频输出波形相似,只存在信号峰值的区别,最大峰值近  $140$  mV,远超正常中频输出信号,数据链的正常工作受到影响。

为将干扰信号对数据链射频前端中频输出信号的影响情况具象化,根据前文的中频输出结果,分别选取了高斯脉冲和调制高斯脉冲信号下最严重受扰情况和无干扰情况进行对比分析。图 15 描述了在不同干扰条件下的中频输出频谱,从图 15 中可以看出,受扰现象主要体现在中频信号的噪声抬升,导致信噪比降低,调制高斯脉冲耦合信号还改变了中频信号的峰值频率和信号带宽,说明此时数据链的信息传输已经受到了影响。

由于低噪放(LNA, low noise amplifier)具有将弱信号放大的功能,但同时又容易受到干扰信号的影响,

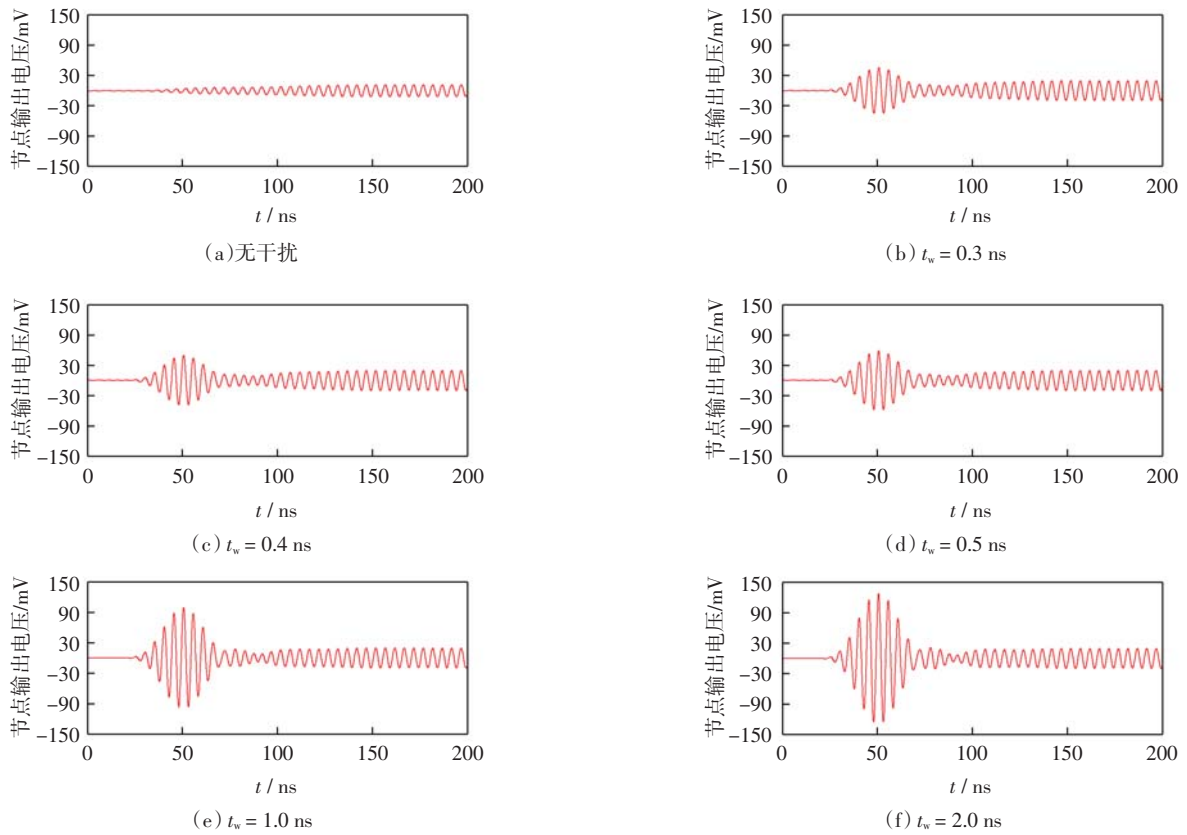


图 14 不同脉宽调制高斯脉冲干扰下和无干扰下的中频输出波形对比

Fig.14 Comparison of IF output waveforms under different pulse width of modulated Gaussian pulse interference and without interference

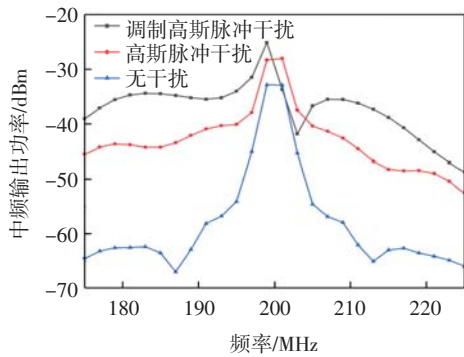


图 15 不同干扰条件下的中频输出频谱

Fig.15 IF output spectrum under different interferences

为进一步分析 HIRF 天线耦合信号在 UAV 数据链射频前端中频输出信号的干扰机制,研究了 HIRF 天线耦合信号通过 UAV 数据链射频前端接收通道过程中关键元件低噪放的响应情况,如图 16 所示。从图 16 可以看出,在不考虑群时延的情况下,干扰信号经过天线端耦合后,信号持续时间达到辐照激励信号持续时间的 170%,之后依次经过三级低噪放后对正常工作信号的压制时间增加超过 10 倍。

为了更清晰地看出干扰信号的加入对低噪放输出造成的影响,观察在节点 V2(图 8)处的输出频谱,

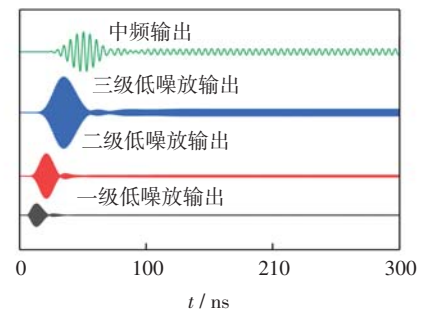


图 16 低噪放和中频输出波形对比

Fig.16 Comparison of LNA and IF output waveforms

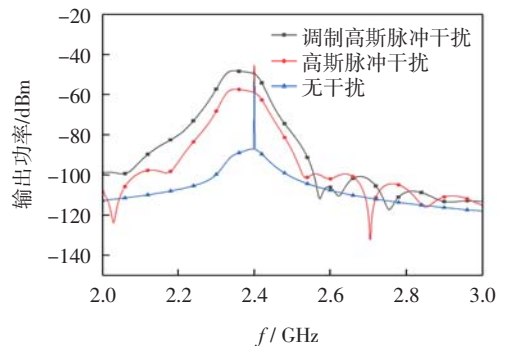


图 17 不同干扰条件下的低噪放输出频谱

Fig.17 Output spectrum of LNA under different interferences

如图 17 所示。从图 17 可以看出,由于低噪放的 1 dB 压缩点较大,干扰信号未导致其产生非线性效应,干扰信号和正常工作信号同时被放大,此时干扰信号对射频前端造成阻塞效应,因此导致了干扰信号对正常工作信号压制时间的增加和信噪比的恶化。

### 3 结语

以 UAV 数据链在低空飞行中面临的 HIRF 环境为背景,利用仿真软件进行场-路联合仿真,分情况讨论了不同辐照方向、信号类型和脉宽系数对数据链射频前端的干扰效应。经过一系列仿真研究,总结得到如下结论。

(1)在电磁波辐照能量相同的情况下,小脉宽系数下的高斯脉冲信号造成的天线耦合效应更强,波形也更复杂;对于调制高斯脉冲信号则相反,在天线工作频段内电场呈现能量聚集现象,理论与仿真结果一致。

(2)将天线耦合信号和正常 UAV 工作信号同时注入到 UAV 数据链射频前端,发现干扰信号会对射频前端造成阻塞效应,造成中频输出信号的功率升高,峰值频率偏移和信噪比降低。其中在调制高斯脉冲干扰影响下的中频输出波形的最大峰值达到 140 mV,远超正常中频输出信号峰值。

(3)进一步分析中频信号异常的原因,发现由于低噪放的线性增益特性会导致干扰信号的压制时间增大超过 10 倍,并同时放大干扰信号和工作信号,造成信噪比的降低。

### 参考文献:

- [1] 兰玉彬,成胜南,漆海霞,等.植保无人机抗电磁干扰技术探讨[J].农业机械化研究,2020,42(11):1-8,28.
- [2] 仲林林,胡霞,刘柯好.基于改进生成对抗网络的无人机电力杆塔巡检图像异常检测[J].电工技术学报,2022,37(9):2230-2240,2262.
- [3] 王鼎山,贾世杰.基于目标感知增强的无人机航拍目标检测[J].计算机工程与设计,2022,43(7):2071-2077.
- [4] IBEOBI S, PAN X C. Study of electromagnetic pulse(EMP) effect on surveillance unmanned aerial vehicles (UAVs)[J]. Journal of Mechanical

Engineering, Automation and Control Systems, 2021, 2(1): 44-53.

- [5] ZHANG Z, ZHOU Y, ZHANG Y, et al. Strong electromagnetic interference and protection in UAVs[J]. Electronics, 2024, 13(2): 393.
- [6] 余道杰,贺凯,郭柏森,等.无人机定位系统辐射干扰失效全过程与机理分析[J].强激光与粒子束,2023,35(2):46-54.
- [7] ZHANG D X, ZHOU X, CHENG E W, et al. Investigation on effects of HPM pulse on UAV's datalink[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2020, 62(3): 829-839.
- [8] ZHANG D X, CHENG E W, WAN H J, et al. Prediction of electromagnetic compatibility for dynamic datalink of UAV[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2019, 61(5): 1474-1482.
- [9] 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(S1):253-257.
- [10] 陈凯柏,周晓东,高敏,等.毫米波引信射频前端 UWB-HPM 效应研究[J].系统工程与电子技术,2020,42(2):284-291.
- [11] LI F X, CHAI C C, WU H, et al. Study on high power microwave non-linear effects and degradation characteristics of C-band low noise amplifier[J]. Microelectronics Reliability, 2022, 128: 114427.
- [12] 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.
- [13] 赵铜城,余道杰,周东方,等.无人机 GPS 接收机超宽谱电磁脉冲效应与试验分析[J].强激光与粒子束,2019,31(2):49-53.
- [14] MAO Q D, XIANG Z W, HUANG L Y, et al. High-power microwave pulse-induced failure on unmanned aerial vehicle system[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2023, 51(7): 1885-1893.
- [15] 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.
- [16] HE K, YU D J, ZHANG X, et al. Detection and identification of system level soft failure induced by radio frequency interference in small UAV system[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2022, 64(3): 661-673.
- [17] 胡静,朱慧惠,刘勇,等.基于 HIRF 的航空器机体屏蔽效能仿真研究[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2021,44(3):322-326,369.
- [18] 鲍献丰,李瀚宇,伍月千,等.JEMS-FDTD 软件在飞机 HIRF 仿真中的应用[J].强激光与粒子束,2017,29(10):71-74.
- [19] 杜萌,陈延军,罗洋,等.栅格式排气孔 HIRF 效应响应机理分析[J].计算机仿真,2023,40(5):94-99.
- [20] SAE AEROSPACE GROUP. Guide to certification of aircraft in a high-intensity radiated field(HIRF) environment: SAE ARP5583A-2010[S]. Washington DC: SAE Aerospace Group, 2010.

(责任编辑:明月)