



·高功率微波技术·

无人机定位系统电源分配网络电磁干扰行为级分析与预测*

余道杰¹, 雷顺天¹, 贺 凯¹, 张 霞¹, 郭柏森^{1,2}, 柴梦娟¹

(1. 战略支援部队信息工程大学 信息系统工程学院, 郑州 450000; 2. 郑州大学 网络空间安全学院, 郑州 450000)

摘 要: 电源分配网络是无人机定位系统工作的基础单元,也是电磁干扰薄弱环节,电源分配网络(PDN)传导耦合干扰效应是导致定位系统故障的主要原因。为了提高定位系统电磁干扰敏感度预测模型的精度,基于泰勒级数对非线性系统的描述方法,将泰勒级数行为级模型系数表征为与干扰频率相关的函数,建立无人机定位系统PDN电磁干扰响应预测模型,分析预测PDN在受干扰情况下的非线性直流偏置电压。研究表明:在250~400 MHz电磁干扰范围内,基于泰勒级数的PDN电磁干扰响应预测模型可以对PDN在电磁干扰作用下的非线性直流偏置进行准确预测,预测误差在3%以内。

关键词: 无人机;定位系统;电源分配网络;电磁干扰;敏感度;泰勒级数

中图分类号: TN972

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.220352

Analysis and prediction of electromagnetic interference behavior level in power distribution network of UAV positioning system

Yu Daojie¹, Lei Shuntian¹, He Kai¹, Zhang Xia¹, Guo Baisen^{1,2}, Chai Mengjuan¹

(1. School of Information System Engineering, Strategic Support Force Information Engineering University, Zhengzhou 450000, China;

2. School of Cyberspace Security, Zhengzhou University, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: Power distribution network is the basic unit of unmanned aerial vehicle (UAV) positioning system, but also the weak link of electromagnetic interference (EMI). The conduction coupling interference effect of power distribution network (PDN) is the main cause of positioning system failure. To improve the accuracy of positioning system sensitivity of electromagnetic interference prediction model, based on the Taylor series description method for nonlinear systems, the Taylor series behavior level model coefficient is characterized as interference frequency related function, thus a UAV positioning system PDN electromagnetic interference response prediction model is established, which analyzes and predicts PDN's nonlinear dc bias voltage under the circumstance of interference. The results show that the Taylor series based PDN EMI response prediction model can accurately predict the nonlinear DC bias of PDN under 250–400 MHz EMI, and the prediction error is within 3%.

Key words: unmanned aerial vehicle, positioning system, power distribution network, electromagnetic interference, susceptibility, Taylor's series

随着无人机技术的飞速发展,无人机已经从传统应用行业转向了市政、军事、救灾、电力、农业和通信等众多领域,其工作电磁环境和执行任务越来越复杂,对无人机系统抗干扰能力的要求越来越高^[1-3]。无人机定位系统在任务执行中起着至关重要的作用。为了接收复杂场景下的定位信号,定位系统的接收灵敏度通常较高。无人机系统存在接收天线等前门干扰耦合,同时存在线缆和PCB电路等后门干扰耦合,通过前后门干扰耦合路径进入系统内部的电磁干扰,均在一定程度上影响无人机系统性能。

国内外学者针对无人机电磁干扰机理与试验开展了多方面的研究,陆军工程大学研究团队^[4-6]利用连续波电磁辐照系统对无人机整机、通信链路和卫星导航定位系统进行电磁干扰效应实验,研究连续波干扰情况下数据链

* 收稿日期:2022-10-24; 修订日期:2023-02-24
基金项目:国家自然科学基金项目(61871405)
联系方式:余道杰, yudj2003@163.com。
通信作者:贺 凯, 1400062702@pku.edu.cn。

的失锁效应,得到了失锁效应的敏感频带以及干扰信号阈值,分析了数据链通信中断机理、带外电磁干扰的效应规律和双频干扰的预测模型。南京理工大学团队^[7]采用理论分析与外场试验相结合的测试方式对无人机飞行控制系统、GPS系统、电子调速器、数据链路系统和图像传输系统的辐照干扰效应进行分析。以上研究侧重于从无人机电系统级层面对其电磁效应进行分析。信息工程大学团队^[8-9]通过外场试验和电波暗室内试验,采用辐照的方式验证了无人机定位系统超宽谱电磁脉冲干扰效应,并测试评估了不同耦合路径对无人机定位系统的干扰效应类别,发现了电源分配网络为无人机定位系统的电磁敏感单元,但其效应机理和评估模型有待进一步研究。

针对无人机电子系统的EMI效应问题,文献^[10]将无人机通信系统分别简化为普通线缆和双绞线组成的回路,估算无人机通信系统在高压传输网络电磁干扰环境中的耦合电压;文献^[11]基于ICEM思想建立了集成电路传输总线的抗扰度模型;文献^[12]基于集成电路传导抗扰度模型建立了数模转换器的抗扰度模型,对数模转换器干扰机理进行了分析。以上文献侧重于对线缆、IC传输总线和电子器件的抗扰度的建模分析,而电源分配网络(PDN)是无人机定位系统中的电磁敏感环节,本文侧重于无人机电子系统的EMI效应分析中关于定位系统PDN的建模分析研究。

在线缆耦合路径和PCB电路耦合路径中,当干扰信号耦合到电源分配网络时,同样会导致GPS系统稳定性降低。本文针对无人机定位系统PCB耦合路径,基于泰勒级数对非线性系统的描述方法,建立无人机定位系统PDN网络响应预测模型,预测PDN网络在受干扰情况下的非线性响应直流偏置电压。构建定位系统电源分配网络EMI响应预测模型对无人机定位系统EMI效应进行评估预测,获得定位系统EMI效应特性,有助于提升无人机设备的抗干扰能力和对定位系统性能的预测评估能力。

1 电源分配网络EMI响应建模方法

1.1 电路系统响应行为建模方法

电路系统的响应行为模型主要分为三类:电路级模型、行为级模型和神经网络模型^[13]。电路级模型需要预先已知系统的电路结构,神经网络模型需要大量的训练数据,对计算资源要求较高,主要用于对系统非线性行为的描述^[14]和电磁干扰源建模^[15],对复杂电子系统敏感度神经网络建模方法的研究较少。行为级模型属于“黑盒模型”的一种,在电路或系统内部结构未知的情况下,通过输入信号与输出信号的映射来描述电路或系统内部的工作状态^[16],采用数学方法来描述输入与输出之间的关系,如图1所示。对于特定的系统,提供同样的输入信号,通过模型可以得到足够精度的与实际系统输出相拟合的模型输出。实际应用中,多数情况下不需要知道系统内部的实际结构,只需得到正确的输出信号。这种行为级模型可以在没有电路或系统内部结构等先验信息的条件下采用自顶而下的设计方法,在保证模拟精度的同时降低模型的复杂度。

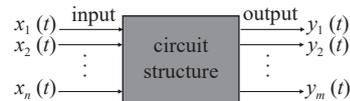


Fig. 1 Schematic diagram of behavior level model

图1 行为级模型原理图

无人机定位系统电源分配网络的功能结构复杂,其中包含电源管理芯片等非线性芯片,且芯片内部具体结构未知,因此本文采用行为级模型对定位系统电源分配网络进行描述。针对小信号干扰情况,在不造成电源分配网络发生硬故障的条件下,采用有限阶泰勒级数即可对系统的非线性行为进行满足精度要求的描述。因此采用行为级模型中的泰勒级数模型对定位系统电源分配网络受到干扰时的响应输出进行描述,建立定位系统电源分配网络EMI响应预测模型。

1.2 电源分配网络泰勒级数建模方法

由于无人机定位系统内部各个模块之间的工作电压需求不同,因此无人机定位系统采用多级电压分类管理技术,以满足不同功能模块的供电要求。无人机定位系统包括控制芯片、接收天线、射频前端、射频增强和信号通道等模块。如果直接采用辐照实验将无法测量耦合到PDN网络的能量,由于耦合关系与频率、辐照的极化方向、以及效应物的放置方向都有十分密切的关系,无法得到定量的实验结果。本文采用注入式实验是为了得到定位系统在不同频率不同干扰强度下的定量结果,从而建立相应的预测模型,试验采用的定位系统PDN网络及其结构如图2所示,辐照干扰信号在连接线缆上产生感应电压后进入电源管理芯片,电

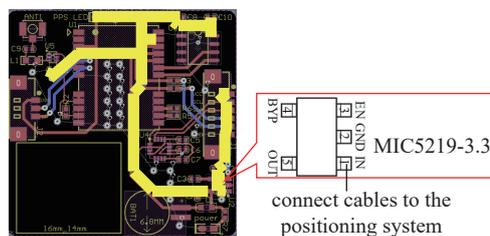


Fig. 2 Structure of the power distribution network of UAV positioning system

图2 定位系统电源分配网络结构实物图

源管理芯片在干扰电压作用下产生的非线性直流偏置是造成定位系统电源分配网络故障的主要原因^[17]。

泰勒级数模型对非线性系统的表示方法属于多项式展开法建模的一种特殊情况。泰勒级数模型可以利用如式(1)所示多项式表示电路或系统输入输出之间的关系。其中 V_o 为输出信号, V_{in} 为输入信号, 矩阵 \mathbf{V} 为输入信号不同次幂组成的输入矩阵, 而矩阵 \mathbf{A} 为泰勒级数模型的系数 $a_i (i = 0, 1, 2, \dots, n)$ 组成的系数矩阵, 与系统本身的性质相关且不会随着输入信号的改变而改变, 如式(2)所示。因此可以通过一系列的测量或仿真分析来求解矩阵 \mathbf{A} , 从而得到泰勒级数模型的系数。

$$V_o = a_0 + a_1 v_{in} + a_2 v_{in}^2 + \dots + a_n v_{in}^n + \dots = [a_0 \ a_1 \ \dots \ a_n]^T [1 \ v_{in} \ \dots \ v_{in}^n] = \mathbf{A}^T \mathbf{V} \quad (1)$$

$$a_0 = v_o, \quad a_1 = \left. \frac{dv_{out}}{dv_i} \right|_{v_i=v_0}, \quad a_2 = \left. \frac{d^2 v_{out}}{dv_i^2} \right|_{v_i=v_0}, \quad \dots \quad (2)$$

式中: a_0 表示非线性传输函数的直流分量; a_1 为非线性系统线性系数; a_2 为非线性系统平方系数。非线性系统的泰勒级数行为级模型的基本结构如图3所示, 由线性部分和非线性部分叠加而成。对EMI频率敏感的部分为线性部分, 用一般的线性系统模型就可以进行较好的描述。

当如式(3)所示的单频干扰信号通过定位系统连接线缆进入电源管理芯片后, 代入式(1)并降幂后可得到电源管理芯片的输出, 如式(4)所示, 即电源分配网络的非线性部分模型。

$$X_s(t) = \sigma \sin(\omega_s t) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} V_o &= a_0 + a_1 \sigma \sin(\omega_s t) + a_2 \sigma^2 \sin^2(\omega_s t) + \dots + a_n \sigma^n \sin^n(\omega_s t) + \dots = \\ &\left(a_0 + \frac{a_2 \sigma^2}{2} + \dots \right) + \left(a_1 \sigma + \frac{3a_3 \sigma^3}{4} + \dots \right) \sin(\omega_s t) + \left(-\frac{a_2 \sigma^2}{2} + \dots \right) \cos(2\omega_s t) + \\ &\left(-\frac{a_3 \sigma^3}{4} + \dots \right) \sin(3\omega_s t) + \dots \end{aligned} \quad (4)$$

式中: σ 为干扰信号的幅度; ω_s 为干扰信号的角频率。由式(4)可知谐波的幅度与非线性系统的参数有关。当干扰信号幅度达到一定值后, 产生的各次谐波分量将不能被忽略, 使得电源管理芯片的直流输出产生了偏移, 导致定位系统出现严重故障。对式(4)进行傅里叶变换可得电源管理芯片输出信号的频域表达式

$$\begin{aligned} V_o(j\omega) &= \left(a_0 + \frac{a_2 \sigma^2}{2} + \dots \right) + \left(a_1 \sigma + \frac{3a_3 \sigma^3}{4} + \dots \right) U_1[j(\omega - \omega_s)] + \\ &\left(-\frac{a_2 \sigma^2}{2} + \dots \right) U_2[j(\omega - \omega_s)] + \left(-\frac{a_3 \sigma^3}{4} + \dots \right) U_3[j(\omega - \omega_s)] + \dots = \mathbf{A} \mathbf{U}^T \end{aligned} \quad (5)$$

$$\mathbf{A} = \left[\left(a_0 + \frac{a_2 \sigma^2}{2} + \dots \right) \quad \left(a_1 \sigma + \frac{3a_3 \sigma^3}{4} + \dots \right) \quad \left(-\frac{a_3 \sigma^3}{4} + \dots \right) \quad \dots \right] \quad (6)$$

$$\mathbf{U}^T = [1 \quad U_1[j(\omega - \omega_s)] \quad U_2[j(\omega - \omega_s)] \quad U_3[j(\omega - \omega_s)] \quad \dots] \quad (7)$$

式中: \mathbf{A} 为电源管理芯片泰勒级数模型系数向量, \mathbf{U} 为各次谐波的傅里叶变换向量, 分别如式(6)和式(7)所示。然后通过有限次的测量或仿真就可以得到相应直流、基波和各次谐波分量的数值, 从而求解泰勒级数模型系数。为了减小误差可以采用多次测量的方法, 利用最小二乘法估算各阶系数。

基于以上分析, 电源管理芯片在干扰信号频率为 ω_s 时的非线性行为可以被表示出来。对于线性部分则可以用幅频特性进行描述, 即随着干扰信号频率 ω_s 的变化, 泰勒级数模型各阶系数也会发生改变, 因此式(4)可以变化为

$$\begin{aligned} V_o(j\omega) &= \left[a_0(f_s) + \frac{a_2(f_s) \sigma^2}{2} + \dots \right] + \left[a_1(f_s) \sigma + \frac{3a_3(f_s) \sigma^3}{4} + \dots \right] U_1[j(\omega - \omega_s)] + \\ &\left[-\frac{a_2(f_s) \sigma^2}{2} + \dots \right] U_2[j(\omega - \omega_s)] + \left[-\frac{a_3(f_s) \sigma^3}{4} + \dots \right] U_3[j(\omega - \omega_s)] + \dots \end{aligned} \quad (8)$$

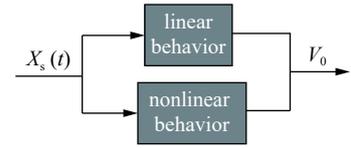


Fig. 3 Behavior level model of nonlinear system based on Taylor series

图3 基于泰勒级数的非线性系统行为级模型原理图

改变干扰信号的频率,然后测量相应直流、基波和各次谐波分量的数值,求出在不同干扰信号频率的情况下泰勒级数模型的各阶系数,从而构建完整的电源管理芯片基于泰勒级数的行为级模型,得到无人机定位系统电源分配网络 EMI 响应预测模型。

在无人机定位系统电源分配网络受到小信号干扰的条件下,采用 3 阶泰勒级数模型即可对其系统的响应行为进行较好的描述,因此式(8)可以简化为

$$V_o = \left[a_0(f_s) + \frac{a_2(f_s)\sigma^2}{2} \right] + \left[a_1(f_s)\sigma + \frac{3}{4}a_3(f_s)\sigma^3 \right] \sin(\omega_s t) - \frac{1}{2}a_2(f_s)\sigma^2 \cos(2\omega_s t) - \frac{a_3(f_s)\sigma^3}{4} \sin(3\omega_s t) \quad (9)$$

从上式可以看出:当对非线性系统输入一个单频的交流信号时,在系统的输出端,除了可以得到一个和输入相同频率的基波信号外,同时会叠加输入信号的二次谐波和三次谐波,谐波的幅度与非线性系统的参数有关,且系统的直流输出成分也发生了偏移。

2 定位系统电源分配网络 EMI 响应预测分析

2.1 电源分配网络 EMI 响应预测模型构建

当连接线缆受到电磁干扰时,产生的感应电压影响定位系统的工作电压,同时进入电源管理芯片,导致电源管理芯片出现非线性响应,影响 PDN 网络的直流偏置,从而造成定位系统故障。电源分配网络 EMI 响应预测模型的测试电路和测试原理分别如图 4 和图 5 所示。其中图 4 所示的电路结构符合 IEC 标准关于 DPI 测试方法的基本要求。为了避免注入端口处可能产生的辐照干扰对测试电路直接造成影响,将 SMA 接口设置在电路板的最底层,干扰信号通过 SMA 端口进入测试电路;为防止测试电路中产生的直流干扰反向串扰信号发生器,在干扰信号注入路径中串联隔直电容;同时在电源管理芯片的直流电源输入端和输出端设置去耦网络,防止干扰信号影响直流电源。

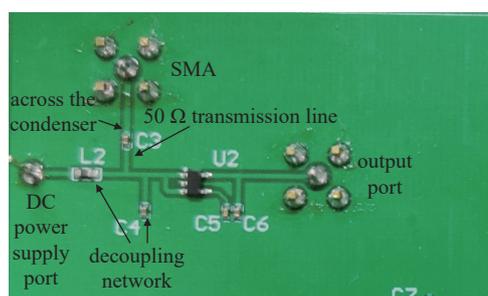


Fig. 4 Physical diagram of EMI response test circuit of PDN

图 4 电源分配网络 EMI 响应测试电路实物图

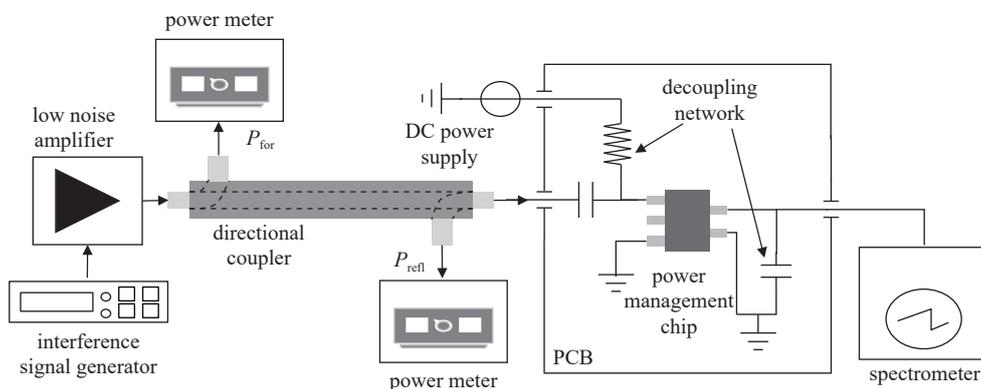


Fig. 5 Schematic diagram of EMI response test for PDN

图 5 电源分配网络 EMI 响应测试原理图

图 5 为电源分配网络 EMI 响应测试原理:当干扰信号产生单频干扰信号后经过低噪声放大器进入定向耦合器,然后直接注入定位系统电源管理芯片。记录定向耦合器的前向功率后,在输出端利用频谱仪测量芯片输出的各次谐波分量,并使用高精度万用表测量芯片的直流输出。在经过一系列的测量后,得到不同干扰频率下电源管理芯片的输出数据,从而构建出电源分配网络的敏感度预测模型。测试流程如图 6 所示,其中关键的测试参数有起始干扰频率 F_{\min} 、终止干扰频率 F_{\max} 、频率步进间隔 F_i 、干扰功率 P_{EMI} 和驻留时间 T_{dwell} ,测试的频率范围为 10 MHz~1 GHz。值得注意的是每个频点处于干扰信号功率 P_{EMI} 不能过大以防止损坏测试电路。

2.2 电源分配网络 EMI 响应预测分析

在 PDN 网络中造成定位系统故障的主要原因是电源管理芯片非线性响应,该非线性响应导致定位系统在受

到单频信号干扰时 PDN 网络中产生了直流偏移,当直流偏移超出定位系统正常工作允许的范围时,定位系统将停止工作。因此依据上述建模方法和测试平台,提取泰勒级数行为级模型的参数来建立定位系统电源分配网络 EMI 响应预测模型,对定位系统 PDN 网络在受到不同参数信号干扰条件下的直流偏移进行预测并判断模型的有效性。

由于 PDN 网络的非线性行为与干扰信号频率相关,试验过程中,干扰信号频率从小到大大步进调整,同时记录定向耦合器的前向功率,利用频谱仪测量电源芯片输出的各次谐波分量,并使用高精度万用表测量芯片的直流输出。经过多次试验测量,得到 $a_0(f_s)$ 、 $a_1(f_s)$ 、 $a_2(f_s)$ 和 $a_3(f_s)$ 的函数关系图,谐波系数与干扰频率的关系如图 7 所示。结果表明,所建立模型的系数与干扰信号频率有较大的相关性,且电源分配网络在受到不同频率 EMI 干扰时的响应特性差异较大,与理论分析的结果相符合。

为了验证模型的有效性,在测试频段内选择干扰频率以不同的前向功率值进行注入,然后比较实际测量值与模型预测值之间的误差。在相同干扰信号频率与干扰功率的条件下,实际测量的直流偏置和模型的预测结果如表 1 所示。

结果表明,在 250~400 MHz 范围内,定位系统电源分配网络 EMI 响应预测模型的输出与实际测试值具有较好的一致性,预测误差在 3% 以内,模型可以对定位系统电源分配网络在受到线缆耦合干扰情况下的直流偏置进行有效预测,然后根据定位系统中其他芯片电路的工作状态,即可对定位系统在受到 EMI 信号干扰情况下的整体行

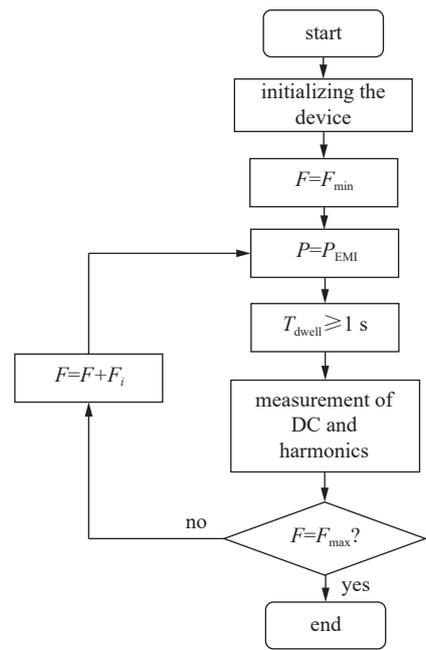


Fig. 6 Flow chart of EMI response test of PDN

图 6 电源分配网络 EMI 响应测试流程图

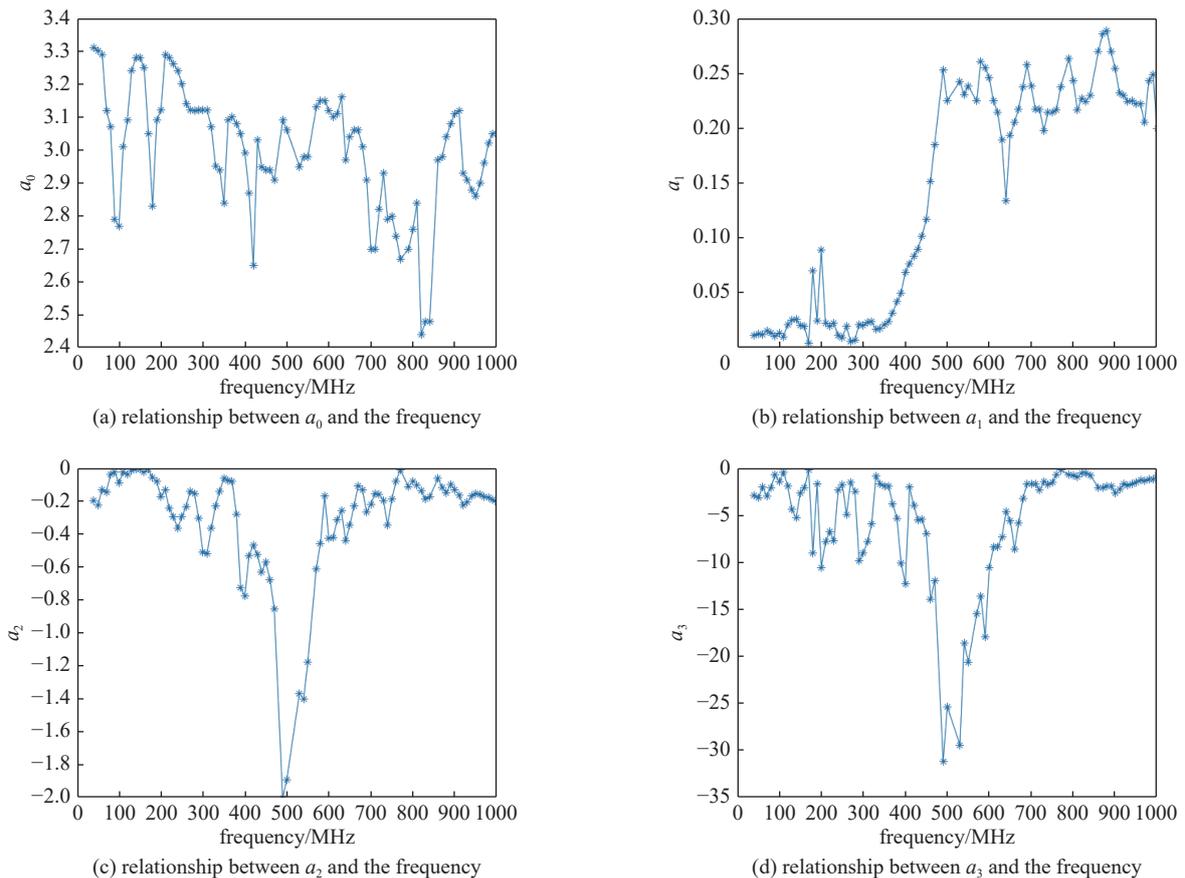


Fig. 7 Relationship between the coefficients of Taylor series behavior-level response prediction model and interference frequency

图 7 泰勒级数行为级响应预测模型系数与干扰频率关系图

表 1 电源分配网络 EMI 响应理论与实测误差对比表

forward power/dBm	interference frequency/MHz	DC component measurement value/V	DC component predicted value/V	error/%
-36.7	250	3.29	3.2005	2.72
-33.2	250	3.26	3.2003	1.83
-30.1	250	3.19	3.1999	0.31
-38.0	310	3.13	3.1205	0.30
-34.9	310	3.17	3.1200	1.57
-31.3	310	3.06	3.1200	1.96
-38.3	400	2.98	2.9899	0.33
-37.5	400	2.98	2.9898	0.33
-39.4	400	2.99	2.9900	5.2×10^{-4}

为级工作状态进行预测。

3 结 论

定位系统电源分配网络是 EMI 的敏感单元,也是造成定位系统故障的主要原因。论文提出了基于泰勒级数的无人机定位系统电源分配网络 EMI 响应预测模型,实现了电源分配网络非线性响应直流偏置电压的估算。基于行为级模型的基本思想与泰勒级数模型的基本原理,建立了无人机定位系统电源分配网络 EMI 响应预测模型,将泰勒级数行为级模型系数表征为与 EMI 频率相关的函数。并通过模型对定位系统电源分配网络在 EMI 作用下的非线性直流偏置预测误差分析,有效地验证了预测模型的精度。在 250~400 MHz 范围内,预测模型可以对定位系统电源分配网络在 EMI 作用下的非线性直流偏置电压进行准确预测,且预测误差在 3% 以内。本文所建立的预测模型能够对定位系统电源分配网络的响应输出进行估算,且模型精度达到要求,并且在干扰信号的强度和更高频段上仍有研究价值与空间,下一步将继续开展无人机复杂系统电磁干扰行为级方法与实验研究。

参考文献:

- [1] Greenwood W W, Lynch J P, Zekkos D. Applications of UAVs in civil infrastructure[J]. *Journal of Infrastructure Systems*, 2019, 25: 04019002.
- [2] Zhan Yilong, Chen Pengchao, Xu Weicheng, et al. Influence of the downwash airflow distribution characteristics of a plant protection UAV on spray deposit distribution[J]. *Biosystems Engineering*, 2022, 216: 32-45.
- [3] Sang Xuejia, Leng Xiaopeng, Ran Xiangjin, et al. A virtual 3D geological library based on UAV and SFM: application for promoting teaching and research on geological specimen and heritage online[J]. *Geoheritage*, 2022, 14: 43.
- [4] 张涛, 陈亚洲, 田庆民, 等. 某型无人机连续波电磁辐射效应研究[J]. *微波学报*, 2014, 30(3): 19-22. (Zhang Tao, Chen Yazhou, Tian Qingmin, et al. Continuous-wave electromagnetic radiation effects of UAV[J]. *Journal of Microwaves*, 2014, 30(3): 19-22)
- [5] 杜宝舟, 陈亚洲, 高万峰, 等. 基于注入法的某型无人机数据链电磁效应研究[J]. *高电压技术*, 2018, 44(10): 3322-3327. (Du Baozhou, Chen Yazhou, Gao Wanfeng, et al. Research on electromagnetic effect of unmanned aerial vehicle data link based on injection method[J]. *High Voltage Engineering*, 2018, 44(10): 3322-3327)
- [6] 张庆龙, 王玉明, 程二威, 等. 导航接收机带外电磁干扰的效应规律及预测方法研究[J]. *系统工程与电子技术*, 2021, 43(9): 2588-2593. (Zhang Qinglong, Wang Yuming, Cheng Erwei, et al. Investigation on the effect law and prediction method of out-of-band electromagnetic interference in navigation receiver[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2021, 43(9): 2588-2593)
- [7] 张江南, 何勇, 潘绪超, 等. 无人机宽带高功率电磁脉冲易损性分析[J]. *弹箭与制导学报*, 2020, 40(1): 110-115,120. (Zhang Jiangnan, He Yong, Pan Xuchao, et al. Vulnerability analysis of UAV against mesoband electromagnetic pulse[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2020, 40(1): 110-115,120)
- [8] 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: 023001. (Zhao Tongcheng, Yu Daojie, Zhou Dongfang et al. Ultra-wide spectrum electromagnetic pulse effect and experimental analysis of UAV GPS receiver[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2019, 31: 023001)
- [9] 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, 34: 023002. (Yu Daojie, He Kai, Guo Baisen, et al. Failure process and mechanism of irradiation interference in unmanned aerial vehicle positioning system[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2023, 34: 023002)
- [10] Nuriev M G, Gizatullin R M, Gizatullin Z M. Physical modeling of electromagnetic interference in unmanned aerial vehicle under action of the electric transport contact network[J]. *Russian Aeronautics*, 2018, 61(2): 293-298.

- [11] Lafon F, Maurice O, De-Daran F. ICEM – ICIM Modeling and exploitation for Bus transceivers applications[C]//EMC COMPO 2004. 2004.
- [12] Ayed A, Dubois T, Levant J L, et al. Immunity measurement and modeling of an ADC embedded in a microcontroller using RFIP technique[J]. [IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility](#), 2015, 57(5): 955-962.
- [13] 周长林, 王振义, 刘统, 等. 基于BP神经网络的低压差线性稳压器电磁干扰损伤模型[J]. [高电压技术](#), 2016, 42(3):973-979. (Zhou Changlin, Wang Zhenyi, Liu Tong, et al. Low dropout linear regulator's electromagnetic interference damage model based on BP neural network[J]. [High Voltage Engineering](#), 2016, 42(3): 973-979)
- [14] Ma Jitong, Liu Hao, Peng Chen, et al. Unauthorized broadcasting identification: A deep LSTM recurrent learning approach[J]. [IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement](#), 2020, 69(9): 5981-5983.
- [15] Wu Qimeng, Wei Ming. A mathematical expression for air ESD current waveform using BP neural network[J]. [Journal of Electrostatics](#), 2013, 71(2): 125-129.
- [16] 王伟. 开关电流电路行为级模型方法研究[D]. 上海: 复旦大学, 2003. (Wang Wei. Research on behavior level model method of switching current circuit[D]. Shanghai: Fudan University, 2003)
- [17] 蒋佳. 高速电路电源分配网络噪声抑制技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2021. (Jiang Jia. Research on noise suppression in power distribution network of high-speed circuit[D]. Xi'an: Xidian University, 2021)