

文章编号: 2095-4980(2020)04-0643-07

## 无人机动态数据链路电磁辐射效应试验

张冬晓, 陈亚洲, 程二威, 张庆龙

(电磁环境效应重点实验室, 河北 石家庄 050003)

**摘要:** 数据链路的电磁安全性成为制约无人机发展的突出问题, 为提高无人机数据链路的电磁环境适应能力, 根据数据链路电磁敏感度随飞行状态变化的特点, 设计并开展了动态数据链路连续波电磁辐射效应试验。结果表明: 数据链工作信号强度影响系统的电磁敏感度。无人机常规工作状态下, 带内干扰辐射场强阈值低于1 V/m, 对应的自动增益控制(AGC)电压最大, 达到190 V; 此时, 带内干扰容错能力强, 误码随干扰功率增加而变大的趋势相对明显; 最大规定误码阈值条件下, 上行控制链路仍能正常工作。邻频干扰条件下, 电磁干扰场强阈值随频偏增加而变大, 对应的AGC电压相对减小; 误码随干扰功率增大过程被压缩, 数据链突发失锁效应。

**关键词:** 无人机; 数据链路; 电磁辐射效应; 自动增益控制(AGC)电压; 误码

中图分类号: TN972

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2019029

## Electromagnetic radiation effects on dynamic datalink of UAV

ZHANG Dongxiao, CHEN Yazhou, CHENG Erwei, ZHANG Qinglong

(Key Laboratory of Electromagnetic Environment Effects, Shijiazhuang Hebei 050003, China)

**Abstract:** The electromagnetic security of datalink becomes an outstanding issue for restricting the development of an Unmanned Aerial Vehicle(UAV). To improve the adaptability of the UAV's datalink in the electromagnetic environment, a test method of electromagnetic radiation effects on the dynamic datalink is designed due to variable electromagnetic susceptibility depending on the flight state. Then the test of continuous wave radiation effects on the datalink is conducted. The results show that the electromagnetic susceptibility depends on the operation signal power. The electric field thresholds of the in-band interference is lower than 1 V/m under normal operations for UAV, but the corresponding Automatic Gain Control(AGC) voltage is the largest, reaching 190 V. Although the anti-interference capability of the datalink is weak, but its error tolerance performance is good. The increasing trend of the number of bit errors with the increase of Electromagnetic Interference(EMI) signal power is obvious. When the amount of bit errors approaches the limited maximum, the uplink can still work properly. Besides, the frequency offset EMI may suppress the BER increasing process at the critical lost-link state resulting in the disruption of the datalink. The corresponding susceptibility threshold becomes larger as the frequency offset increases, but the corresponding AGC voltage is relatively reduced.

**Keywords:** Unmanned Aerial Vehicle; datalink; electromagnetic radiation effect; Automatic Gain Control(AGC) voltage; bit error

无人系统成为当前各国竞相发展的产业, 其应用领域广泛, 包括公共交通、医疗服务、应急抢险、国防建设等行业, 正在改变人类的传统生活方式<sup>[1-2]</sup>。其中, 无人机是无人系统的发展先锋, 各种新型无人机层出不穷, 人工智能、自组网等技术的日趋成熟推动了无人机向智能化、集群化方向发展。数据链是支持无人机与地面控制站之间信息交互的关键系统。随着用频设备增加与发射机功率提高, 无人机数据链面临的电磁环境日益复杂<sup>[3-4]</sup>。据媒体报道, 当前复杂电磁环境以及蓄意电磁干扰时常造成无人机不明失踪以及被恶意捕获。因此, 数据链正成为制约无人机发展的薄弱环节<sup>[5-7]</sup>。

收稿日期: 2019-01-24; 修回日期: 2019-04-02

基金项目: “十三五” 预先研究资助项目(41409010501)

作者简介: 张冬晓(1990-), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为强电磁场环境效应评估。email: zhangdongxiao@cc@sina.com

当前针对无人机数据链系统的研究主要侧重于电磁干扰环境构建、模拟仿真和电磁兼容性测试<sup>[8-12]</sup>。其中,电磁环境构建突出动态特性,仿真以构建信道模型、干扰类型和信号强度与误码率之间的关系为主;系统间电磁兼容性测试主要存在两方面问题:第一,试验标准无针对性,试验方法不够科学,通用性标准一般不考虑无人机的工作特性,同时又没有适合参考的专用标准,无法真实反映系统的应用场景;第二,测试条件不统一,试验数据无可比性,无人机一般开展通过性电磁兼容测试,将拉距后的无人机置于特定干扰环境中进行测试,环境的严酷程度、数据链的工作状态和系统的频率选择特性考虑不足。针对上述问题,本文根据数据链路的工作状态,提出了实验室模拟方法,设计了动态数据链路电磁辐射效应试验方法,测试得出了数据链电磁效应规律,为下一步开展数据链路电磁干扰预测奠定了基础。

## 1 数据链电磁辐射效应试验方法

传统电磁兼容性试验一般根据试验场地决定无人机的拉距长度,没有统一的数据链状态量化标准,测试数据无可比性;此外,电磁辐射场强一般控制在几十 V/m,会发生通过性测试合格的产品仍存在电磁安全隐患的情况。因此,有必要设计一种易于量化、重复性好的无人机数据链路电磁辐射效应试验方法,测试电磁辐射干扰效应规律,并验证上述理论分析。

### 1.1 数据链路工作原理

无人机数据链路包括上行数据链路和下行数据链路,本文特指上行数据链路,由地面、机载数据链系统和信道组成,通过时分或频分方式实现。以某型无人机频分数据链系统为例,其工作原理如图 1 所示。

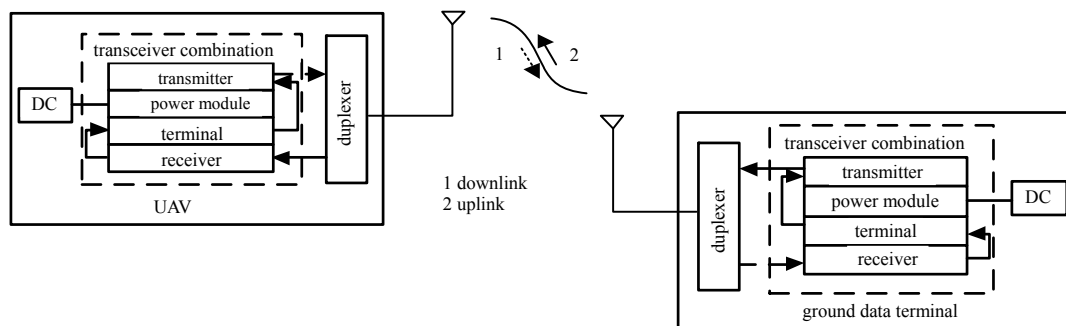


Fig.1 Principle of the datalink  
图 1 数据链工作原理

数据链系统通常包括收发组合、双工器和天线,其中收发组合主要由发射机、接收机、终端机和电源模块组成,长航时无人机还装载独立功率放大器。上行数据链用于地面控制站向无人机发送控制指令,下行数据链反馈机载遥测和载荷信息。

频分工作模式下,上行数据链和下行数据链的信号频段不一致,各链路一般划分多个频道,用于多机控制。单机工作模式下默认选择 1 频道,上行数据链和下行数据链的工作频率分别记为  $f_0$  和  $f_d$ 。无人机遭遇电磁干扰,若数据链仍能维持正常工作,此时数据链状态称为“锁定”;若数据链状态不稳定,则称为“临界状态”;若数据链发生中断,则称为“失锁”,临界状态下切换频道或能够恢复数据链稳定的工作状态。

### 1.2 飞行应用场景下实验室模拟方法

无人机飞离地面控制站过程中,接收信号强度逐渐减小,飞行速度和飞机姿态影响机载工作信号强度<sup>[13]</sup>:

$$P_s = 10 \lg P_g + 10 \lg G_g + 10 \lg G_u + 20 \lg \mu + 20 \lg F_g + 20 \lg F_u - 20 \lg R - 20 \lg f + 147.6 \quad (1)$$

式中:  $P_g$  为地面控制站发射功率;  $G_g$  和  $G_u$  分别为地面和机载天线增益;  $\mu$  为天线匹配系数;  $F_g$  和  $F_u$  分别为地面和机载天线的电场方向性函数;  $R$  为无人机飞行半径;  $f$  为上行工作信号频率。

假设某无人机俯仰角为零,以固定飞行速度在水平面做盘旋飞行,其工作信号强度随飞行位置的变化曲线如图 2 所示。动态工作信号影响电磁辐射敏感场强阈值,由于实验室场地有限,为了在实验室模拟无人机真实应用条件下数据链路的工作状态,不能通过拉距实现,只能根据链路状态,增加信号的衰减量,减小工作信号功率。工作信号调节器模拟空间信道传输衰落,衰减对象包括上行和下行数据链,因此信号调节器置于双工器和天线之间,根据试验场地条件下接收信号功率和应用场景下接收信号功率的差值确定衰减量。

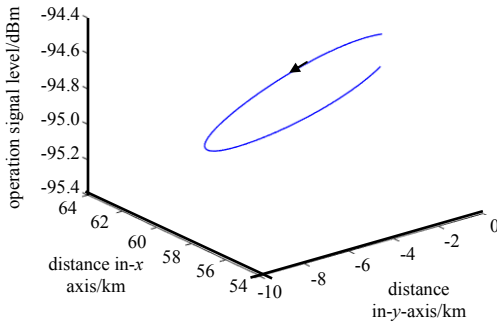


Fig.2 Relationship between the operation signal power and the flight location  
图 2 机载工作信号与飞行位置的关系

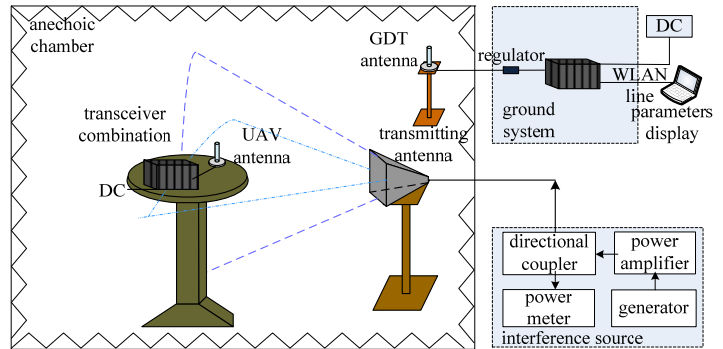


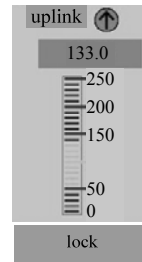
Fig.3 Schematic of electromagnetic radiation test on the datalink  
图 3 数据链路电磁辐射效应试验原理图

### 1.3 试验方法及步骤

构建无人机数据链路电磁辐射效应试验系统，包括数据链路工作系统、干扰源辐射发射系统和监测系统 3 部分，其中部分设备置于电波暗室中，减小空间电磁环境对试验的扰动，试验原理如图 3 所示。

图 3 中，机载数据链系统置于屏蔽室转台上，地面控制站数据链系统置于屏蔽室外，为了实现数据链路的畅通，将地面天线置于屏蔽室内，串接信号调节器后与地面控制端相连，利用直流电源为系统供电，保持数据链路正常工作。除去发射天线，干扰源辐射发射系统同样置于屏蔽室外，信号发生器产生的干扰信号，经过放大后利用天线向被试区发射电磁干扰。监测系统分为被试区辐射场强监测和上行数据链参数监测，其中，场强监测用于确定敏感辐射场强阈值，数据链参数监测用于判断电磁辐射效应，考核评价指标。监测计算机连接地面控制终端，基于机载遥测信息反馈上行数据链工作状态，如图 4 所示。

图 4 中，上行数据链监测参数主要包括“工作/失锁”、上行 AGC 电压、上行解扩 AGC 和误码。数据链接收系统内部包含自动增益控制电路。AGC 电压表示电路对信号的调节水平和恢复有用信息的能力；误码表示接收端输出信息相比于发送端出现错误，误码数客观反映了数据链路的质量。若数据链工作正常，上行显示“工作”，上行 AGC 电压和上行解扩 AGC 电压数值较高，误码率为零。无人机上行数据链受到电磁辐射干扰，需要通过试验得出相关指标的变化规律和内在联系。



parameter	value
uplink despreading AGC channel	255
uplink AGC	133
bit error	0

Fig.4 State monitoring of the datalink  
图 4 数据链状态监测

基于上述系统，调节工作信号衰减量，模拟无人机特定飞行状态下的数据链工作状态，开展无人机动态数据链路电磁辐射效应试验。

参照 GJB151B，在 0~18 GHz 范围内开展连续扫频，利用带通滤波器消除谐波对测试的影响。被试区辐射电场强度维持 200 V/m，步进 1 MHz，间隔 2 s，找出上行数据链的敏感频段；针对敏感频段，测试得出敏感频点的失锁效应场强阈值、上行 AGC 电压和上行解扩 AGC 电压，并测试误码。

## 2 数据链电磁辐射效应规律

### 2.1 步进变化工作状态

上行数据链工作信号强度随无人机飞行状态改变，对应的电磁辐射敏感阈值也随之变化，只有通过量化的工作状态对比试验，才能得到相关参数的定量关系，因此有必要调节工作信号强度，开展参数指标对比试验。数据链处于小功率工作状态下，施加连续波辐射干扰，在扫频测试基础上，找出敏感频率范围及对应的辐射场强阈值，此外，以 10 dB 为步进长度，逐步降低工作信号，得到相应的场强阈值和 AGC 电压，如图 5 所示。

图 5(a)中，辐射场强 200 V/m 以内的敏感频率主要集中在上行数据链工作频段及其邻频，上行数据链失锁的敏感频带能够达到 12 MHz。无人机常规工作状态下，容易受到周边电磁辐射场强低于 1 V/m 的带内干扰。不同工作信号强度对应的敏感场强阈值也不同，近距离通信模式下，邻频干扰敏感阈值较大，接收系统进入非线性工作区，不再满足线性变化规律。图 5(b)中，上行 AGC 电压即为接收机 AGC 增益控制电压，表征接收信号强度，而上行解扩 AGC 电压表征接收码元的同步锁定程度，该数值越大，系统出现错误码元的概率越小。带内干扰情

况下,上行 AGC 电压最高,能够达到 190 V,上行解扩 AGC 电压也比较大,但变化幅度剧烈;上行 AGC 电压随工作信号强度变化较大,工作信号越弱,上行 AGC 电压越小,上行解扩 AGC 电压波动越明显;邻频干扰条件下,引起上行数据链失锁的辐射场强相对较高,AGC 电压则相对较小,上行 AGC 电压和上行解扩 AGC 电压具有较好的一致性。

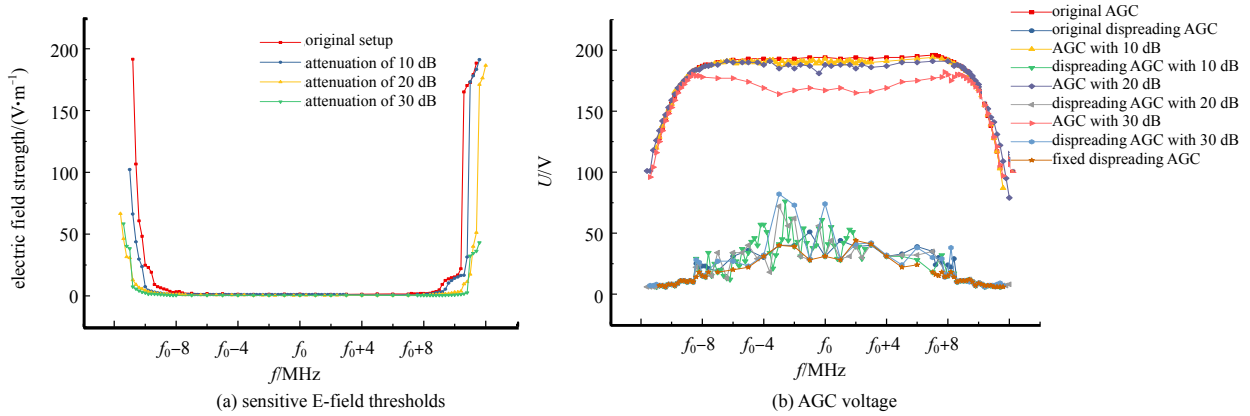


Fig.5 Comparison of effect parameters under different conditions  
图 5 不同工作条件下效应参数对比

通过上述测试发现,数据链发生带内干扰情况下的上行 AGC 电压最高,且数值大致相同;而邻频干扰条件下,上行 AGC 电压随频偏增大而逐渐减小,由于自动增益控制电路无法区分带内干扰和工作信号,导致上行 AGC 电压幅值较高,因此上行 AGC 电压反映了系统接收带内信号的强度。

2.2 误码测试

电磁干扰通过影响终端机恢复有用信息的准确度,即误码率,威胁数据链的正常工作。图 5 中,选择  $f_3, f_1, f_0, f_2, f_4$  作为典型敏感频点(其中  $f_3=f_0-8, f_1=f_0-4, f_2=f_0+4, f_4=f_0+8$ ),频点间隔大,且  $f_3 < f_1 < f_0 < f_2 < f_4$ ,开展误码测试,其中,干扰步进功率表示测试过程中逐渐增大功率的绝对值,结果如图 6 所示。

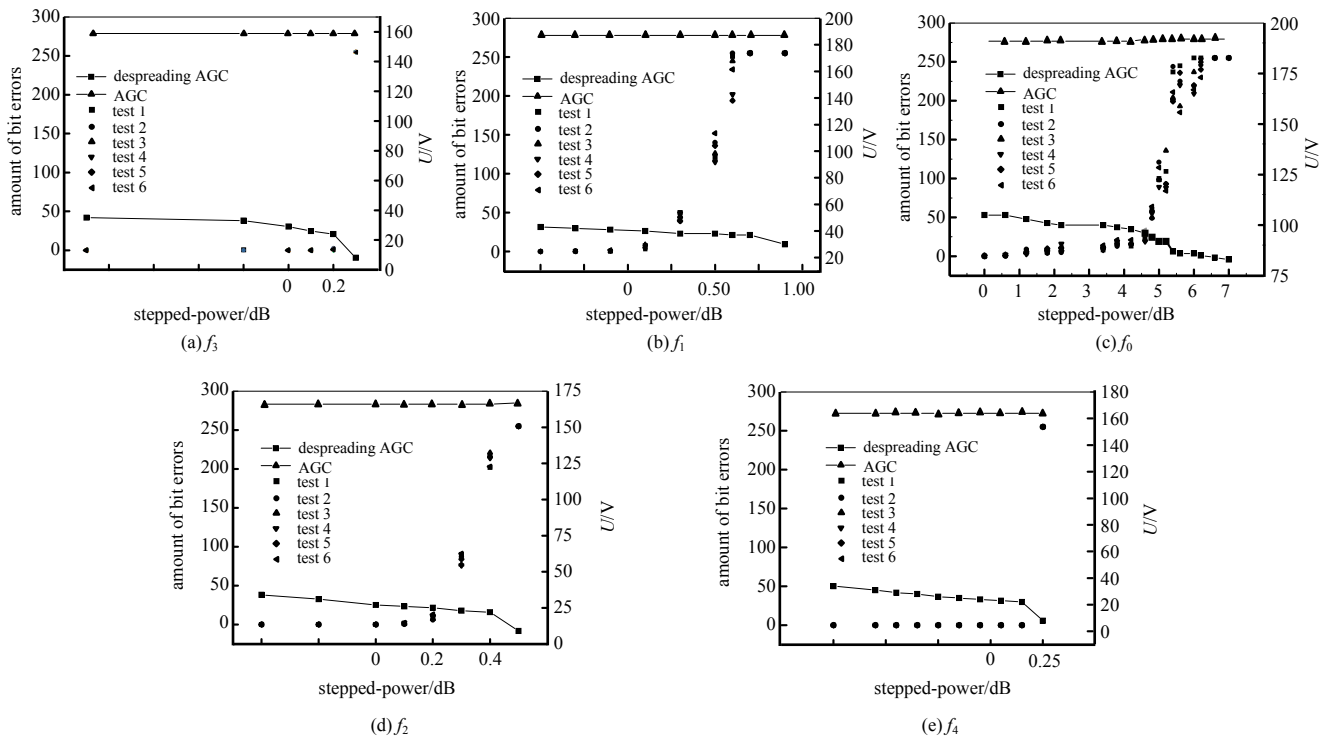


Fig.6 Comparison of bit errors under different interfering frequencies  
图 6 不同干扰频点误码测试结果比较

相同干扰条件下重复测试得到的 6 组数据一致性较好, 且分布紧凑, 但临界失锁条件下的误码数分布相对分散。通过分析得到如下结论:

1) 误码一般出现在数据链路受干扰的临界失锁状态下, 此时上行 AGC 电压趋于稳定, 误码率大小与上行 AGC 电压无明显联系, 但出现误码的时机与上行 AGC 电压相关; 误码数随上行解扩 AGC 电压减小而逐渐增大, 因此上行解扩 AGC 电压不仅反映接收机输出信噪比, 还与误码率相关联。

2) 带内干扰的误码变化趋势明显, 随干扰信号强度增加而变大, 但邻频干扰误码数变化过程逐渐压缩, 频偏越大, 误码数随干扰信号强度的变化过程逐渐消失, 直接由 0 变为 255, 因此, 通过监测误码来判别数据链质量不适用于邻频干扰。

### 3 数据链连续波电磁干扰机理分析

外界干扰信号通过场路耦合方式进入机载接收系统, 并经过多级处理得到误码率, 如图 7 所示。

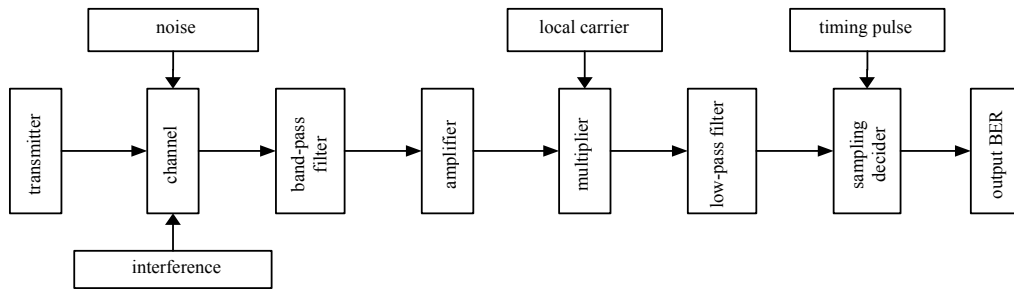


Fig.7 Processing flow of the receiving system  
图 7 接收系统信号处理流程

假设机载天线接收的工作信号  $V_{is}(t)=A\cos(\omega_c t+\varphi_n)$ , 同时接收的干扰信号  $V_{ij}(t)=B\cos(\omega_j t+\varphi_j)=B\cos[(\omega_c+\Delta\omega)t+\varphi_j]$ , 接收端引入高斯随机噪声  $n_i(t)=n_c(t)\cos\omega_c t-n_s(t)\sin\omega_c t$ , 其中,  $A, B$  分别为工作信号和干扰信号电压幅值;  $\omega_c, \omega_j$  分别为工作信号和干扰信号的角速率;  $\varphi_n, \varphi_j$  分别为工作信号和干扰信号的相位;  $n_c, n_s$  分别为噪声的正交分量。因此, 接收系统输入信号总和表示为:

$$y(t)=V_{is}(t)+V_{ij}(t)+n_i(t) \tag{1}$$

设带通滤波器的选频特性为  $L(\Delta f)$ , 该值与干扰信号频率偏离工作频点的数值有关, 其中,  $L(0)=1$ ,  $\Delta f$  越大,  $L(\Delta f)$  越小。放大器总的放大倍数记为  $k$ 。接收信号经过滤波、放大、检波等处理后变为:

$$y(t)=k[V_{is}(t)+n_i(t)]\times 2\cos\omega_c t+kL(\Delta f)V_{ij}(t)\times 2\cos\omega_c t=k_1[A\cos\varphi_n+n_c(t)]-k_1[A\cos(2\omega_c t+\varphi_n)+n_c(t)\times\cos 2\omega_c t-n_s(t)\times\sin 2\omega_c t]+k_1L(\Delta f)B\times\cos(\Delta\omega t+\varphi_j)+k_1L(\Delta f)B\times\cos(2\omega_c t+\Delta\omega t+\varphi_j) \tag{2}$$

由于低通滤波器具有选频特性,  $n_c(t)$  是均值为 0, 方差为  $\sigma_n^2$  的加性高斯白噪声, 因此

$$x(t)=k_1[A\cos\varphi_n+n_c(t)+L(\Delta f)B\times\cos(\Delta\omega t+\varphi_j)]=a\cos\varphi_n+n'_c(t)+b\cos(\Delta\omega t+\varphi_j) \tag{3}$$

式中:  $a=k_1A$ ;  $b=k_1BL(\Delta f)$ ;  $n'_c(t)=k_1n_c(t)$ 。已知所研究的数据链调制方式为二进制相移键控, 其调制传输的“1”, “0”码对应相位“0”, “ $\pi$ ”,  $\Delta\omega=2\pi\Delta f$ 。若数据链受到单音干扰,  $\varphi_j$  为常量, 假设  $\varphi_j=0$ , 因此

$$x(t)=\begin{cases} a+n'_c(t)+b\cos(2\pi\Delta f)t & \text{符号 1} \\ -a+n'_c(t)+b\cos(2\pi\Delta f)t & \text{符号 0} \end{cases} \tag{4}$$

1) 不加干扰情况下:

$$x_0(t)=\begin{cases} a+n'_c(t) & \text{符号 1} \\ -a+n'_c(t) & \text{符号 0} \end{cases}, \text{ 此时 } x_0(t) \text{ 的一维概率密度函数为:}$$

$$f(x)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_n}\exp\left(-\frac{(x\pm a)^2}{2\sigma_n^2}\right) \tag{5}$$

假定字符等概率出现, 即误码率表示为:

$$P_e=P(0)P(1/0)+P(1)P(0/1)=\frac{1}{2}\int_0^{+\infty} f_0(x)dx+\frac{1}{2}\int_{-\infty}^0 f_1(x)dx=\frac{1}{2}\operatorname{erfc}\left(\frac{a}{\sqrt{2}\sigma_n}\right) \tag{6}$$

2) 同频干扰情况下,  $\Delta f=0$ :

$$x(t) = \begin{cases} a + n'_c(t) + b & \text{符号 1} \\ -a + n'_c(t) + b & \text{符号 0} \end{cases} \quad (7)$$

误码率变为:

$$P_e = \frac{1}{4} \operatorname{erfc} \left( \frac{a+b}{\sqrt{2}\sigma_n} \right) + \frac{1}{4} \operatorname{erfc} \left( \frac{a-b}{\sqrt{2}\sigma_n} \right) \quad (8)$$

令  $\frac{a^2}{2\sigma_n^2} = r$ ,  $\frac{b^2}{2\sigma_n^2} = r_i$ , 代入式(8), 得

$$P_e = \frac{1}{4} \operatorname{erfc}(\sqrt{r} + \sqrt{r_i}) + \frac{1}{4} \operatorname{erfc}(\sqrt{r} - \sqrt{r_i}) \quad (9)$$

由于单音干扰作用, 一维概率密度函数曲线在横轴方向发生偏移, 如图 8 所示, 最佳判决门限已经发生变化, 但实际判决门限不变, 导致差错概率增大。

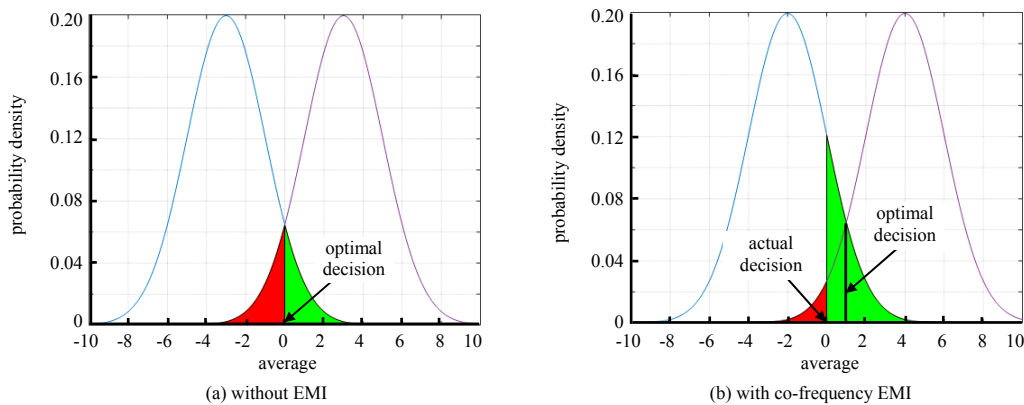


Fig.8 Comparison of probability density curves before and after interference

图 8 干扰前后概率密度曲线变化

3) 非同频干扰情况下,  $\Delta f \neq 0$ :

$$x(t) = \begin{cases} a + n'_c(t) + b \cos(2\pi\Delta f)t & \text{符号 1} \\ -a + n'_c(t) + b \cos(2\pi\Delta f)t & \text{符号 0} \end{cases} \quad (10)$$

令  $b' = b \cos(2\pi\Delta f)t$ , 则  $b' \in [-b, b]$ ,  $x(t)$  的一维概率密度函数为:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_n} \exp \left[ -\frac{(x \pm a - b')^2}{2\sigma_n^2} \right] \quad (11)$$

令  $\frac{b'^2}{2\sigma_n^2} = r'_i$ , 所以  $r'_i \in \left[ 0, \frac{b^2}{2\sigma_n^2} \right]$

$$P_e = P(0)P(1/0) + P(1)P(0/1) = \frac{1}{4} \operatorname{erfc}(\sqrt{r} + \sqrt{r'_i}) + \frac{1}{4} \operatorname{erfc}(\sqrt{r} - \sqrt{r'_i}) \quad (12)$$

由式(12)可知, 误码率随干噪比动态变化, 因此对动态误码率在  $[0, b^2/2\sigma_n^2]$  范围内取平均,  $P_e' = E[P_e(r'_i)]$ 。其中,  $b = kBL(\Delta f)$ , 与滤波器选频特性、放大器倍数以及干扰幅值有关。工作信号稳定情况下, 在系统线性区间内, 接收机输入的干扰信号增大过程中, 恢复信息的准确度由稳定值逐渐降低, 对应的数据链状态同样由锁定逐渐过渡到临界, 最终变为失锁。假定数据链恢复信息的准确度要求是误码率不大于  $p$ , 则要求  $P_e' = E[P_e(r'_i)] \leq p$ 。当  $P_e' \approx p$  时, 数据链路处于极端临界状态, 此时, 电磁干扰信号强度即为当前工作信号强度下的敏感阈值。

通过开展动态数据链路电磁辐射效应试验, 得到了敏感频率范围、辐射效应场强阈值, 分析并验证了数据链不同评价指标的变化规律和内在联系, 为下一步开展数据链电磁干扰预测提供了支撑。

## 4 结论

数据链路的电磁安全性对于保障无人机飞行安全至关重要, 而缺少统一的试验标准和明确的效应规律制约了无人机电磁安全性评价能力, 本文主要创新点和研究工作如下:

1) 提出了一种动态数据链实验室模拟和电磁辐射效应试验方法, 易于量化和比较;

2) 开展了机载数据链系统连续波电磁辐射效应试验, 得到了数据链不同工作状态下的敏感频率范围和效应阈值;

3) 探索并分析了上行 AGC 电压、上行解扩 AGC 电压以及误码等评价指标之间的影响规律和内在联系, 得出带内干扰和邻频干扰的最佳评价指标分别为上行解扩 AGC 电压/误码和上行 AGC 电压;

4) 理论上分析了无人机数据链电磁干扰作用机理和规律。

通过上述研究, 得到了无人机数据链电磁干扰敏感特性, 为下一步开展数据链电磁干扰预测奠定了基础。

#### 参考文献:

- [1] SAMAD A M, KAMARULZAMAN N, HAMDANI M A, et al. The potential of Unmanned Aerial Vehicle(UAV) for civilian and mapping application[C]// 2013 IEEE 3rd International Conference on System Engineering and Technology. Shah Alam, Malaysia:IEEE, 2013:313-318.
- [2] 郁一帆, 王磊. 无人机技术发展新动态[J]. 飞航导弹, 2019(2):34-42. (YU Yifan, WANG Lei. New developments in UAV technology[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2019(2):34-42.)
- [3] 刘尚合, 刘卫东. 电磁兼容与电磁防护相关研究进展[J]. 高电压技术, 2014, 40(6):1605-1613. (LIU Shanghe, LIU Weidong. Progress of research on electromagnetic compatibility and electromagnetic protection[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(6):1605-1613.)
- [4] MANDEEP K, SHIKHA K, DANVIR M. Electromagnetic interference[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2011, 3(11):1-5.
- [5] 丁文锐, 黄文乾. 无人机数据链抗干扰技术发展综述[J]. 电子技术应用, 2016, 42(10):6-10. (DING Wenrui, HUANG Wenqian. The survey of the development of anti-jamming technology for UAV data link[J]. Application of Electronic Technique, 2016, 42(10):6-10.)
- [6] 张冬晓, 陈亚洲, 田庆民, 等. 某型无人机系统雷电脉冲磁场效应[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(10):361-366. (ZHANG Dongxiao, CHEN Yazhou, TIAN Qingmin, et al. Lightning pulse magnetic field effects on UAV system[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27(10):361-366.)
- [7] 刘先虎, 范万水, 王备仓. 复杂电磁环境下无人机通信抗干扰问题研究[J]. 军事通信技术, 2010, 31(3):87-90. (LIU Xianhu, FAN Wanshui, WANG Beicang. Anti-jamming of unmanned aerial vehicle communication in complex electromagnetic environment[J]. Journal of Military Communications Technology, 2010, 31(3):87-90.)
- [8] GUO S X, DONG Z Y, HU Z T, et al. Simulation of dynamic electromagnetic interference environment for unmanned aerial vehicle data link[J]. China Communications, 2013, 10(7):19-28.
- [9] 张薇玮, 丁文锐, 刘春辉. 复杂环境中无人机数据链干扰效果预测方法[J]. 系统工程与电子技术, 2016, 38(4):760-766. (ZHANG Weiwei, DING Wenrui, LIU Chunhui. Prediction of interference effect on UAV data link in complex environment[J]. Systems Engineering and Electronics, 2016, 38(4):760-766.)
- [10] JIANG J M, SONG Q J, GAO Y G. The simulation of interference between the unmanned aerial vehicle(UAV) system and the CDMA system based on Simulink[C]// The 2006 4th Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics. Dalian, China:IEEE, 2006:750-754.
- [11] DIXON J, RAJAMANI V, BUNTING C. Performance test of unmanned aerial systems communication links in a severe multipath environment[C]// 2016 IEEE International Symposium on EMC. Ottawa, ON, Canada:IEEE, 2016:862-867.
- [12] 李勃, 黄大庆. 一种新的无人机系统级电磁兼容测试法[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2009, 48(2):31-35. (LI Bo, HUANG Daqing. An innovative EMC test method at the system level of UAV[J]. ACTA Scientiarum Naturalium Universitates Sunyatseni, 2009, 48(2):31-35.)
- [13] 张冬晓, 陈亚洲, 程二威, 等. 用于无人机信息链路电磁干扰预测的动态电磁敏感度测试研究[J]. 高电压技术, 2019, 45(2):665-672. (ZHANG Dongxiao, CHEN Yazhou, CHENG Erwei, et al. Research on dynamic electromagnetic susceptibility for electromagnetic interference prediction of UAV information link[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(2):665-672.)