文章编号：1673–1522（2011）06-0659–04

机载电子设备抗干扰阈值仿真计算

孙荣平[a]，何 亮[b]

（海军航空工程学院 a. 青岛分院，山东 青岛 266041；b. 研究生管理大队，山东 烟台 264001）

摘 要：以机载电子设备干扰阈值为研究对象，从干扰信号的仿真计算原理出发，开发设计出一种基于矩量法的干扰阈值计算软件，并通过与试验结果进行对比分析，验证了其精度满足工程应用的要求。最后给出了干扰阈值在机场电磁环境监测和报警系统中的应用。

关键词：机载电子设备；干扰阈值；电磁环境监测和报警

中图分类号：V243；TN973 **文献标志码**：A

在战时战场复杂电磁环境下如何最大限度的降低飞机机载电子设备受电磁干扰影响的程度，进而确保战斗任务的顺利完成，是信息化条件下海军航空兵战斗力建设的一个重要课题。机载电子设备的抗干扰阈值是指其天线处能够造成电子设备电磁易损性的场强临界值。本文提出了一种基于矩量法的机载电子设备抗干扰阈值仿真计算方法，应用此方法能够快速精确地求得机载电子设备在其典型频点上所抗外界干扰的阈值，对于开展电磁干扰预测分析，实现机场电磁环境监测预警，提高战时复杂电磁环境下航空装备技术保障电子防御能力具有重要意义。

1 干扰信号仿真计算原理

1.1 机载电子设备的典型干扰模式

机载电子设备的典型干扰模式主要有：同频干扰、谐波干扰、邻道干扰、互调干扰、中频干扰、镜频干扰。

1)同频干扰。

同频干扰是指干扰源占用的频率恰好和正常信号相同。对机载电子设备而言，指同类型设备或不同类型设备工作在相同频道时产生的干扰，这种干扰的强度最大。对同频干扰，受扰机工作频率 $f_{受扰机}$ 与外界磁场的干扰频率 $f_{干扰}$ 满足：$f_{受扰机} = f_{干扰}$。

2)谐波干扰。

谐波干扰指设备在发送有用信号的同时，也发送这些信号的谐波分量。尤其是对大功率设备，其谐波分量的能量也比较大，特别是二次谐波和三次谐波对系统间的其他设备产生的干扰强度很大。对于谐波干扰，受扰机工作频率 $f_{受扰机}$ 与外界磁场的干扰频率 $f_{干扰}$ 满足：$f_{受扰机} = mf_{干扰}$，其中，$m = 2,3,4,\cdots$。

3)互调干扰。

互调干扰是指由于设备中某些电路的非线性，使本不该进行调制的若干信号进行了相互调制而产生了新的频率，造成对某个正常工作机载设备的干扰。在互调干扰中，两信号所构成的三阶互调所产生的影响最为严重，两个干扰频率 $f_{干扰1}$ 和 $f_{干扰2}$ 与受扰机工作频率 $f_{受扰机}$ 满足：$f_{受扰机} = mf_{干扰} \pm nf_{干扰}$ 其中：$m = 2,3,4,\cdots$；$n = 1,2,3,\cdots$。[1]

4)中频干扰。

中频干扰是指一个已调的强干扰信号与有用信号作用于混频器，经非线性作用将干扰的调制信号转移到有用信号的载频上，从而对系统产生干扰。干扰工作频率 $f_{干扰}$ 与受扰机的中频频率 $f_{中频}$ 满足：$\pm mf_{本振} \pm nf_{干扰} \approx f_{中频}$。

5)镜频干扰。

镜频干扰是中频干扰的一种特例，当 $m = n = 1$ 时，$f_{干扰} = f_{本振} + f_{中频} = f_{受扰机} + 2f_{中频}$，可将 $f_{本振}$ 所在位置比作一面镜子，则 $f_{受扰机}$ 与 $f_{干扰}$ 分别位于 $f_{本振}$ 的两侧，且与 $f_{本振}$ 的间隔均为 $f_{中频}$，互为镜像，故称为镜频干扰[2-3]。

收稿日期：2011-07-26； **修回日期**：2011-10-19

作者简介：孙荣平（1956–），男，教授，硕士。

1.2 矩量法计算干扰阈值的基本原理

自从 1968 年美国人 R.F.Harrington 将矩量法应用到求解电磁问题中以来，已在电磁计算领域得到了广泛应用，成为求解无边界复杂反射体电磁问题的有效工具。[4]利用矩量法求解机载电子设备电磁干扰阈值的基本原理是通过将反射面和天线分别划分为“面元”和“线元”，进而将积分方程离散为代数方程，再借助计算机求解，即可求得机载电子设备天线上精确的感应电流分布，进而求得机载电子设备天线处的耦合量。在得到天线端口处功率的大小后，再由内部馈电网络计算出电子设备端口处的功率电平值，通过它与设备灵敏度的比较再反推得到设备的干扰阈值。应用矩量法计算干扰阈值的基本流程如图 1 所示[5-6]。

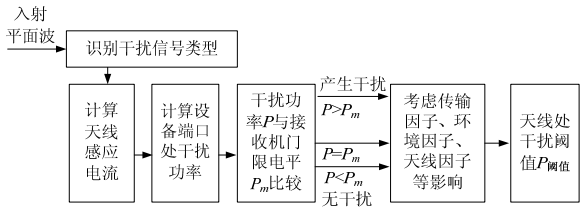


图 1 机载电子设备干扰阈值计算流程

2 典型干扰信号干扰阈值仿真计算方法

2.1 干扰阈值功率值计算方法

前面介绍了通过矩量法仿真计算机载电子设备接收天线的表面感应电流，进而求得该干扰电流通过馈电网络后，到达机载电子设备接收机端口处的干扰功率大小。见图 2，设 P_5 为接收机端口处干扰功率值。将 P_5 与接收机的门限值进行比较，若两者相等，则在综合考虑传输网络因子、环境影响因子和天线因子(包括机体对电磁波的散射作用)的基础上，即可通过仿真计算给出图 2 所示的监测天线处的机载电子设备电磁干扰阈值 $P_{阈值}$。对于不同模式的干扰，其干扰功率阈值计算方法也不尽相同[7]。

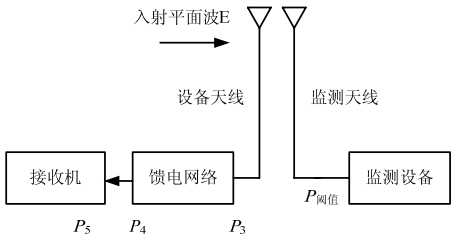


图 2 机载电子设备电磁干扰阈值仿真计算物理模型

1)同频干扰与谐波干扰。

对于同频干扰、谐波干扰这 2 种干扰模式，进入受扰接收机天线的外场电磁波频率 $f_{干扰}$ 与接收机的工作频率 $f_{受扰机}$，满足：$f_{受扰机}=mf_{干扰机}$，$m=1,2,3,\cdots$。故对于这 2 种模式，只要令 $P_5=P_m$，计算频点 $f_{干扰}$ 时的干扰阈值即可，其中，P_m 为接收机的干扰门限电平。实际工作中需通过监测设备对此干扰阈值进行监测。因此，在仿真计算干扰阈值 $P_{阈值}$ 时需要考虑监测天线与设备天线之间天线因子的不同。这里，引入 2 个天线的天线因子差值 δ_{AF}。此外还需考虑环境影响因子 δ_E 的作用，本文计算中假设监测天线和接收天线同处一处，故可令 $\delta_E=0$。

$$P_{阈值}=P_5+\delta_p+\delta_{AF}+\delta_E, \tag{1}$$

式中：δ_p 为传输网络因子；δ_E 为环境影响因子；δ_{AF} 为天线因子差值。[8]

2)接收机互调干扰。

对于接收机互调干扰，由于进入设备的载波信号经过接收机非线性器件的作用，使得这些载波信号互相作用而产生许多新的频率分量。因此需考虑在接收机工作频点能够形成互调干扰的各信号分量干扰阈值的大小。对于接收机互调干扰，两信号所构成的三阶互调干扰所产生的影响最为严重，对于这种干扰，2 个干扰机频率 $f_{干扰1}$ 和 $f_{干扰2}$ 与受扰机工作频率 $f_{受扰机}$ 满足

$$f_{受扰机}=mf_{干扰1}\pm nf_{干扰2}, \tag{2}$$

式中：$m=1,2,3,\cdots$；$n=1,2,3,\cdots$。

其合成功率 P_5 的大小等于 P_m，合成此互调信号的 2 个分量的功率 A、B 满足

$$P_5=2A+B+\delta_{互调系数}, \tag{3}$$

式中：A 指距接收机近的发射机的干扰量，按邻道计算；B 指距接收机远的发射机的干扰量，按邻道计算；$\delta_{互调系数}$ 为指互调干扰系数，与 2 个干扰机频率有关。

在式(3)中，由于 A、B 都未知，对于机场设备典型的工作频点，可通过选定一个机场中已有的典型信号，根据此信号及其强度求出 B 信号的干扰量，再根据上述公式得到 A：

$$A=(P_5-B-\delta_{互调系数})/2。 \tag{4}$$

在实际计算中，干扰阈值 $P_{阈值}$ 还需要考虑监测天线与设备天线之间的天线因子差值 δ_{AF}、环境影响因子 δ_E 和传输网络因子 δ_P 的作用(本文中设 $\delta_E=0$)[9]。

$$P_{B阈值}=B+\delta_P+\delta_{AF}+\delta_E, \tag{5}$$

$$P_{A阈值}=(P_5-B-\delta_{互调系数})/2+\delta_p+\delta_{AF}+\delta_E。\quad(6)$$

3)中频干扰和镜频干扰。

对于中频(镜频)干扰，其干扰阈值的计算方法为：

设 $P_5=P_m$，

$$P_{阈值}=P_5+\delta_p+\delta_{AF}+\delta_E+\delta_{中频因子}(\delta_{镜频因子}),\quad(7)$$

式中：$\delta_{中频因子}$ 为中频影响因子，包含中频抑制等；$\delta_{镜频因子}$ 为镜频影响因子，包含镜频抑制等。

2.2　功率值与场强值的互换

通过仿真计算得到天线端口处的功率阈值后，可以通过下列公式得出其电压阈值：

$$V=\sqrt{P_{阈值}Z_0}。\quad(8)$$

由电压阈值可求出场强阈值 E，其关系式如下所示：

$$E=\frac{V\sqrt{\frac{4\pi\eta_0}{Z_0G_R}}}{\lambda}。\quad(9)$$

式(9)中：Z_0 为馈线匹配阻抗，一般取 50 Ω；G_R 为接收天线增益；λ 为发射波波长；$\eta_0=120\pi\ \Omega$。[10]

3　仿真计算结果与试验结果对比分析

通过对飞机进行实测试验后，结合仿真计算的数据对比分析，可比较各机载设备在同频干扰模式下的干扰阈值，如表 1 所示。

表 1　仿真阈值与测试阈值比较

设备	工作频率/MHz	干扰频率/MHz	仿真阈值/(dBμV/m)	测试阈值/(dBμV/m)	干扰带宽/MHz	测试条件	仿真计算条件
DB	9.022	9.022	90	95~100	8.922~9.122	1．被测设备性能正常 2．环境噪声电平低于−90 dB，电台电视台等应予以分辨 3．入射波方向为 90°	阻抗：50 Ω 驻波比：1.8 馈电效率：0.8 入射波方向：90°
XBJS	75	75	109	100~105	74.6~75.05		
CDB	138.75	138.75	48	50~55	137.75~139.5		
BYY	1030	1030	52	50~55	1019~1041		
TK	1054	1054	54	60~65	1049~1058		

分析表 1 可得，仿真计算的阈值与实际测试的阈值的误差在 15%以内，基本能够符合工程应用的要求。

由于试验条件的限制，未开展对于其他干扰类型如谐波干扰、互调干扰、中频干扰和镜频干扰的测试试验，表 2 给出了 CDB 设备在不同频点、不同干扰类型的仿真计算阈值。

表 2　CDB 设备在不同干扰类型下的仿真阈值

典型工作频点/MHz		同频干扰	谐波干扰	发射机互调干扰	接收机互调干扰		中频干扰	镜频干扰	备注
					设备 1	设备 2			
110	监测频点/MHz	110	110	110	100	110.91	110.91	0.455	仿真计算条件和测试条件与表 1 中的条件相同
	干扰阈值/dBm	−109.26	−109.26	−109.26	41.40	−49.26	−49.26	−29.26	
275	监测频点/MHz	275	275	275	182.5	275.91	275.91	0.455	
	干扰阈值/dBm	−109.26	−109.26	−109.26	61.38	−49.26	−49.26	−29.26	
400	监测频点/MHz	400	400	400	245	400.91	400.91	0.455	
	干扰阈值/dBm	−109.26	−109.26	−109.26	77.13	−49.26	−49.26	−29.26	

结合上述分析，我们给出机场电磁环境监测与报警系统流程图，如图 3 所示。首先，使用监测设备分别监测机场周边无干扰源和有干扰辐射源 2 种状态下的环境电平，获取环境电平中各干扰源的峰值频率及其幅度。然后，计算这些干扰频率 f_i 与设备的正常工作频率 f_0(即待监测频率)之间是否存在同频干扰、谐波干扰、互调干扰、中频干扰和镜频干扰。若存在干扰，就将其干扰幅度与事先计算出的各设备不同频率的抗干扰阈值进行比较，如干扰幅度大于阈值，则判断为干扰，系统发出警报。反之则进入下一判断流程。如此循环，直至所有判断结束后退出。

机载电子设备抗干扰阈值用于机场电磁环境监测与报警系统，可快速判断机载电子设备受干扰的原因，采取积极主动的措施(如规避、静默)来应对电磁干扰带来的影响，对提高机载电子设备电磁防护能力和飞机保障水平起到积极的促进作用。

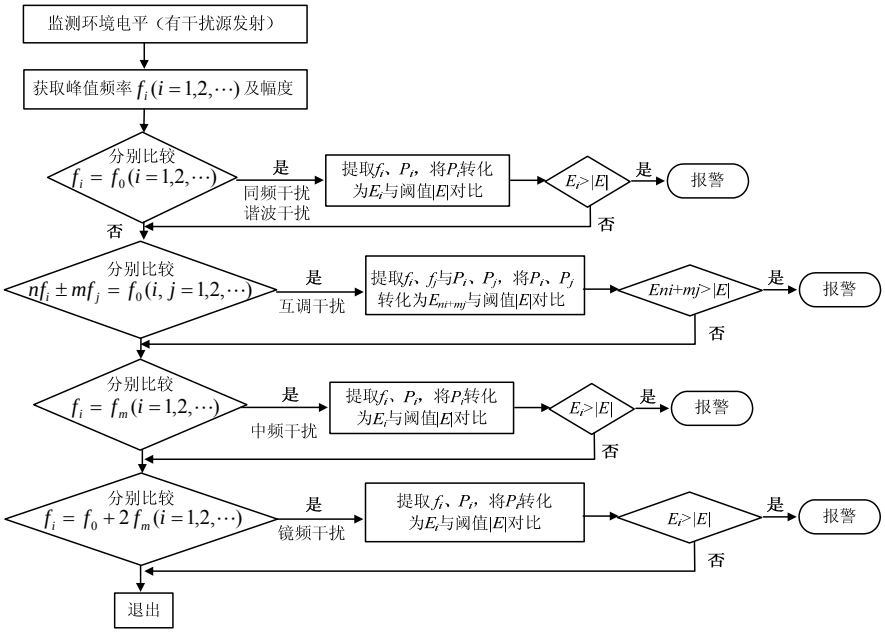


图 3　机场电磁环境监测与报警系统流程图

参考文献：

[1] 于潞, 唐金元, 王思臣. 航空超短波通信的互调干扰分析[J]. 科技信息, 2011(7):507.

[2] 徐明远, 陈德章, 冯云. 无线电信号频谱分析[M]. 北京: 科学出版社, 2008:231-248.

[3] 朱旭. 民航甚高频无线电干扰浅析[J]. 中国西部科技, 2011,10(15):33-34.

[4] 哈林登 R E, 著. 计算电磁场的矩阵法[M]. 王尔杰, 译. 北京: 国防工业出版社, 1981:6-15.

[5] 吕英华. 计算电磁学的数值方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006:265-268.

[6] 盛新庆. 计算电磁学要论[M]. 北京: 科学出版社, 2004:16-27.

[7] 郭胜祥. 车载无线设备间 EMI 预测研究[D]. 西安电子科技大学, 2008:14-16.

[8] 曹鹏, 齐伟. 宽带天线通信收发信机新技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009:94-95.

[9] 沈国连. EMC 测试中天线系数的误差分析[J]. 航空电子技术, 2001,32(2):1-5.

[10] MARTINGLOONG. 场强与功率的关系[DB/OL]. 2011.

Interference Mitigation Thresholdfor Airborne Electronic Equipment

SUN Rong-ping[a]，HE Liang[b]

（Naval Aeronautical and Astronautical University a. Qingdao Branch，Qingdao Shandong 266041，China；
b. Graduate Students' Brigade，Yantai Shandong 264001，China）

Abstract: The object of research is interference mitigation threshold for airborne electronic equipment. Based on the principle of the electromagnetic interference signal, the computation software of interference threshold was developed. Comparing with the experimental data, the simulation data was reliable. At last the interference threshold would be used on the electromagnetic environment monitoring and alarm system.

Key words: airborne electronic equipment; interference threshold; monitor and alarm of electromagnetic environment