

文章编号: 1001-893X(2012)08-1383-04

机载天线隔离度仿真与分析^{*}

王 立

(中国西南电子技术研究所, 成都 610036)

摘 要: 天线隔离度是机载电子系统实现电磁兼容预测的重要参数。根据反应积分原理, 提出采用孤立天线远场方向图来替代实际环境中天线的办法, 简化分析模型, 在保证分析精度的基础上, 提高计算效率, 从而高效完成电大尺寸环境中天线隔离度的仿真分析。通过在自由空间情况下进行测试, 验证了仿真结果的准确性。

关键词: 机载通信系统; 电磁干扰; 天线方向图; 电磁耦合; 隔离度; 电磁兼容

中图分类号: TN03; TN82 **文献标志码:** A doi: 10.3969/j.issn.1001-893x.2012.08.033

Analysis and Simulation of Airborne Antenna Isolation

WANG Li

(Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China)

Abstract: The coupling between antennas is an important parameter for describing the electromagnetic interference (EMI) of the airborne electronic systems. Based on the integration theory, the far field radiation pattern is replaced for the antenna model, and then the airborne model is considered at the same time. This method can be applied to simplify the model and improve the efficiency with proper precision for the analysis and prediction of airborne antenna isolation. Measurement results in free space are presented to validate the simulation results.

Key words: airborne communication system; electromagnetic interference; radiation pattern; electromagnetic coupling; isolation; electromagnetic compatibility

1 引 言

随着电子技术的高速发展, 电子、电气设备和系统的使用愈加频密, 特别是对于飞机这样的平台, 更是集中了多种的电子系统和设备, 这些系统和设备集中在飞机平台局部狭小的空间里, 工作频带可以从 20 MHz 到 40 GHz, 系统设备之间的相互耦合关系十分复杂, 其间的电磁兼容性是飞机航电设备综合设计中的一个重要课题^[1]。天线带来的电磁兼容问题更是不能忽视, 因此, 提高发射天线与敏感设备接收天线之间的隔离度是解决设备间电磁干扰的一个重要手段。但是在飞机这样的平台上, 设备以及天线一旦安装位置确定后便不能随意变动, 因此在整

个系统设计初期应对机载设备系统的电磁兼容性进行预测并进行合理的优化处理^[2-4], 指导飞机天线布局^[5], 最终使整个机载设备系统具有良好的电磁兼容性。

分析天线间耦合或隔离常规手段一般采用全波分析法, 将安放到飞机载体上的天线模型连同其工作环境进行全波仿真分析, 如果遇到电大尺寸环境, 即相对于分析波长, 需要进行分析的天线间的位置间距以及对天线耦合有影响的环境区域尺寸较大时, 直接导致求解未知量变大。为了保证计算精度, 求解所耗费的计算资源(计算内存和计算时间)将急剧增加^[3]。因此全波分析方法只适用于对天线数目较少、载体尺寸较小的情况进行仿真计算。随着飞

^{*} 收稿日期: 2012-01-20; 修回日期: 2012-07-19

机装载天线口径越来越多,如 F22 装载近 30 副天线,计算资源开销大,计算效率低。通过采用原始天线远场方向图来替代实际环境中天线,并且采用高频算法考虑飞机载体对天线的影响,可用在天线数目较多以及电大尺寸的情况下,保证了计算精度又可极大提高仿真速度。

2 理论分析

天线间电磁能量耦合的大小通常用天线间的隔离度来表示。天线间隔离度越大,天线相互耦合能量越小。天线隔离度常用符号 L 表示,定义为接收天线净输出功率与发射天线的净输入功率的比值(参见图 1),公式如下^[1]:

$$L = -10 \lg \frac{P_{out}}{P_{in}} \tag{1}$$

式中, P_{in} 为在发射天线端的净输入功率,单位为 W; P_{out} 为在接收天线端的净输出功率,单位为 W; L 为隔离度,单位为 dB。

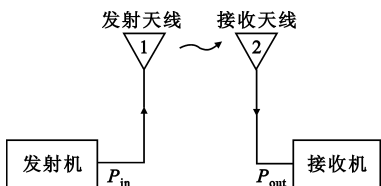


图 1 天线隔离度定义
Fig. 1 The definition of isolation

按照定义可知,隔离度越大表示天线间的耦合越小,相互间的干扰越小。

根据文献[2],将互易定理的电路形式

$$V_{12} I_{11} = V_{21} I_{22} \tag{2}$$

应用到一对天线对上。式(2)表示天线 1 自身电流 I_{11} 在天线 2 上感应的电压 V_{21} 以及天线 2 自身电流 I_{22} 在天线 1 上感应的电压 V_{12} 之间具有的约束关系。假设天线 1 端口的阻抗为 Z_1 ,其馈入的功率为

$$P_1 = \frac{1}{2} I_{11}^2 Z_1 \tag{3}$$

同理,对天线 2 有

$$P_{21} = \frac{1}{2} \frac{V_{21}^2}{Z_2} \tag{4}$$

考虑到天线之间互阻抗的定义:

$$\frac{V_{12}}{I_{22}} = \frac{V_{21}}{I_{11}} = Z_{12} = Z_{21} \tag{5}$$

可以得到天线 1 耦合到天线 2 的功率比值,也就是

耦合系数

$$C = \frac{P_{21}}{P_1} = \frac{V_{21}^2}{Z_1 Z_2 I_{11}^2} = \frac{Z_{12}^2}{Z_1 Z_2} \tag{6}$$

考虑到图 2 列出的情况,天线 1 发射产生了场 $(\mathbf{E}_1, \mathbf{H}_1)$ 并在接收天线(天线 2)开路终端产生一个电压 V_{21} 。由天线 1“看见”的环境可以用磁导率 μ 和介电常数 ϵ 进行描述,该环境包含了天线 2 的结构(带有开路终端)。

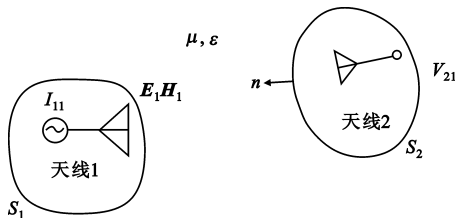


图 2 天线对间的反应
Fig. 2 The coupling between the antennas

根据文献[5],在图 2 说明的环境 (μ, ϵ) 中,天线 1 和天线 2 之间的互阻抗 Z_{12} 为

$$Z_{12} = V_{21}/I_{11} = \frac{-1}{I_{11} I'_{22}} \int_{S_2} (\mathbf{E}_2 \times \mathbf{H}_1 - \mathbf{E}_1 \times \mathbf{H}_2) \cdot d\mathbf{s} \tag{7}$$

式中, I_{11} 是当天线 1 发射时的终端电流, $(\mathbf{E}_1, \mathbf{H}_1)$ 代表天线 1 在该激励条件下发射的场, I'_{22} 是天线 2 发射时的终端电流, $(\mathbf{E}_2, \mathbf{H}_2)$ 代表天线 2 在该激励条件下发射的场。

将式(7)代入式(6)最终得出耦合计算如下:

$$C = \left| K \int \int (\mathbf{E}_2 \times \mathbf{H}_1 - \mathbf{E}_1 \times \mathbf{H}_2) \cdot d\mathbf{s} \right|^2 \tag{8}$$

式中, K 为归一化系数, $K = \frac{1}{I_{11}^2 Z_1 I_{22}^2 Z_2}$ 。根据天线间耦合度与隔离度之间关系,便可求得出天线间隔离度。

3 仿真分析计算

采用上述理论进行建模仿真,首先将孤立天线远场方向图安放在实际天线工作的位置,并对环境同方向图引起的畸变进行分析,得到真实工作环境下的方向图,在此基础上进行天线间隔离度分析。

飞机的外形如图 3 所示,其机身长度为 33 m,翼展为 32 m,高度为 4 m。天线工作在 L 频段, L 频段天线方向图安装位置如图 3 所示,共两副,分别为 L 频段上天线和 L 频段下天线,安装在机体前部上下位置,两安装点间直线距离约为 6 m。

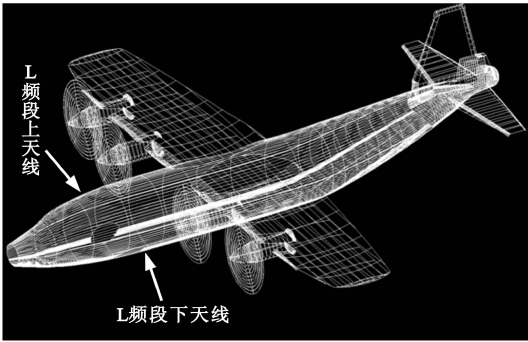


图 3 天线装机示意图
Fig.3 Antenna configuration

仿真计算了 4 个频点下的方向图畸变及隔离度值,频点分别为 960 MHz、1 030 MHz、1 100 MHz 和 1 224 MHz。由于篇幅限制,关于装机前后方向图畸变情况仅给出 L 频段上天线和 L 频段下天线工作在 960 MHz 时的情况,如图 4 和图 5 所示。从图中可以看出,由于天线安装环境附近无明显遮挡,因此实际环境中的方向图与孤立天线方向图基本吻合,但也有些起伏,这反映了实际天线环境对天线辐射特性的影响,特别是天线底部区域起伏更大,辐射电平与孤立情况相比,甚至达到 20 dB 以上,其原因是机体为有限尺寸,使天线能量绕射到底部区域。

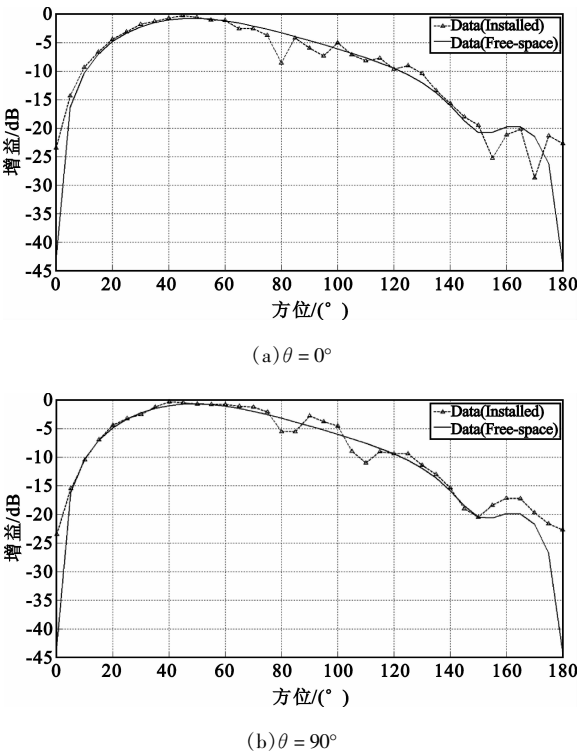


图 4 L 频段上天线方向图畸变
Fig.4 The distortion of the pattern of L - band - up antenna

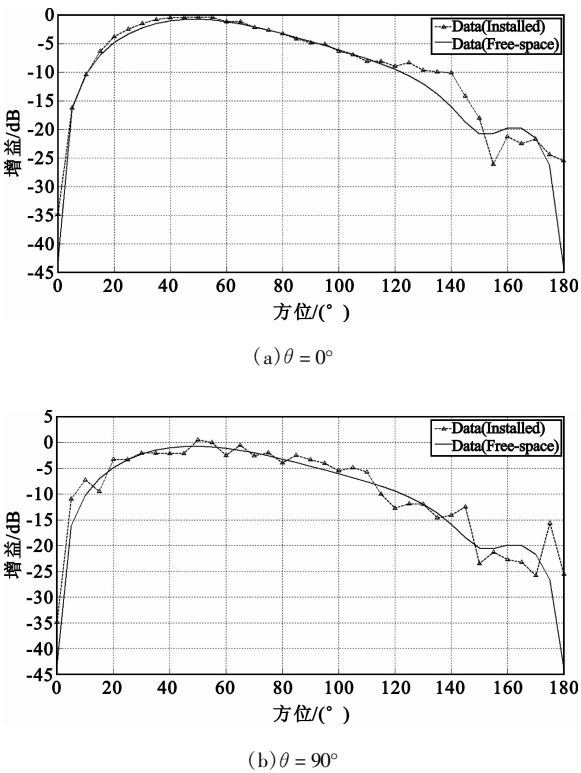


图 5 L 频段下天线方向图畸变
Fig.5 The distortion of the pattern of L - band - down antenna

根据仿真得到天线在装机后因机体影响畸变后的方向图,同时结合公式(8),通过设置天线有效孔径等大的积分区域,最终分析计算得出天线间隔离度值,如表 1 所示。

表 1 天线隔离度分析结果	
Table 1 The isolation between antennas	
频率/MHz	隔离度/dB
960	- 59.45
1 030	- 61.41
1 100	- 63.52
1 224	- 63.55

4 测试结果及分析

天线隔离度测试可以等效为测量一个二端口网络的功率传输系数,可以采用直接测试法,又因为 L 频段上天线与 L 频段下天线形式完全相同,且测试频率工作在带内,可以看作两天线完全匹配,可不必对反射功率进行测量。测试方法原理图如图 6 所示,频谱仪上接收到的功率值(单位 dBm)减去信号源发射功率(单位 dBm)即为两天线间隔离度值。

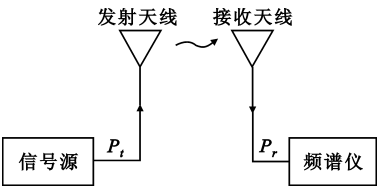


图 6 隔离度测试原理图

Fig.6 The principle of isolation measurement

本测试结果为飞机在高空 8 000 m 飞行时,忽略了天线辐射特性受地面影响,环境可以视为自由空间。信号源的发射功率为 0 dBm 时,接收端所测得的值(单位 dB)即为天线间隔离度值,测试值与仿真值对比情况如表 2 所示。

表 2 天线隔离度仿真与测试对比

Table 2 The comparison of the isolation results

频率/MHz	仿真值/dB	测试值/dB	误差/dB
960	59.45	65.57	6.12
1 030	61.41	69.35	7.94
1 100	63.52	68.70	5.18
1 224	63.55	71.12	7.57

由表 2 可以看出,仿真结果与实测结果有一定误差,测试值明显优于仿真值,其原因在于仿真飞机模型为理想纯金属的光滑表面,未考虑实际飞机蒙皮为电阻值有限,辐射电磁波在机体上激励起表面波、爬行波等在其传播过程中遭遇机体表面的不连续包括凹缝、凸钉以及形状变化等所带来的二次辐射所引起的损耗,而这些因素都将导致两天线之间的实际隔离增大。另外,两天线间存在多路耦合路径的影响,使得隔离度在不同频点下随机起伏。

5 结束语

通过将天线辐射方向图替代平台天线的方法对机载天线隔离度问题进行了分析和仿真,并在自由空间的情况下对隔离度进行了测试。通过仿真与实际测试结果的对比分析,验证了本方法在保证仿真

精度满足实际工程需要的同时,能够及时、准确地对机载天线间隔离度进行预测分析和评估,与采用全波仿真手段相比,不仅解决了实际工程中各种天线模型难以获得的问题,而且对软硬件的要求相对较低,资源消耗少,一定程度上缩短了研制周期,在工程设计上具有很好的实用价值。

参考文献:

[1] 陈穷.电磁兼容性工程设计手册[M]. 北京:国防工业出版社,1993.
CHEN Qiong. The handbook of electromagnetism compatibility [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1993. (in Chinese)

[2] Rumsey V H. Reaction Concept in Electromagnetic Theory [J]. Physical Review, 1954, 95(6): 1483 – 1491.

[3] 李世智.电磁辐射与散射问题的矩量法[M]. 北京:电子工业出版社,1985.
LI Shi - zhi. Electromagnetic radiation and scattering problems by the method of moments [M]. Beijing: Publishing House of Electronic Industry, 1985. (in Chinese)

[4] 雷继兆.复杂电大平台天线 EMC 问题的并行 FDTD 分析[J].应用科技,2009,36(3):1 – 4.
LEI Ji - zhao. Analysis of EMC of antennas mounted on electrically large platforms with parallel FDTD method[J]. Applied Science and Technology, 2009, 36(3): 1 – 4. (in Chinese)

[5] 梁福生,王广学.飞机天线工程手册[M]. 北京:中国民航出版社,1997.
LIANG Fu - sheng, WANG Guang - xue. The handbook of antennas on plane[M]. Beijing: Civil Aviation Press, 1997. (in Chinese)

作者简介:

王 立(1976—),男,四川万源人,2000 年于电子科技大学获学士学位,现为工程师,主要研究领域为系统电磁兼容。
WANG Li was born in Wanyuan, Sichuan Province, in 1976. He received the B. S. degree from University of Electronic Science and Technology of China in 2000. He is now an engineer. His research concerns electromagnetic compatibility.
Email: vq2001@sina.com