

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2013.04.002

基于感知的航空通信系统试飞频率管理^{*}

刘满堂^{**}

(中国西南电子技术研究所,成都 610036)

摘 要:信息技术的快速发展以及频谱用户大增致使无线电频谱成为非常紧缺的资源。航空电子系统设备量大,功能多,工作频段宽,电磁环境复杂,共址电磁干扰不可避免。科学规划试飞频率,规避干扰是试飞成功的关键。在分析航空通信系统技术特征的基础上,提出了基于频谱感知技术的航空通信系统试飞频率管理方法。该方法能够有效提高系统频谱利用率,并能支持试飞数据相容性分析及重建,提升航空通信系统试飞评估准确性。

关键词:航空通信系统;试飞;频谱感知;频谱检测;频率管理

中图分类号:TN919.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2013)04-0377-06

System Spectrum Sensing Based Spectrum Management of Avionic Communication in Flight-test

LIU Man-tang

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

Abstract: With the fast development of information technology and the increase of spectrum user, spectrum has become a very rare resource. Due to large amount, multiple functions, wide operation band and complex electromagnetic environment of avionics equipment, co-site interference is inevitable. It is a key point for a good plan of frequency in the flight-test. Based on the analysis of the avionic communication system, a frequency management method is introduced which uses the spectrum sensing technology. This method can improve the spectrum usage and support the analysis and rebuilding of the flight-test data, and improve the evaluation veracity of the avionic communication system's flight-test.

Key words: avionic communication system; flight-test; spectrum sensing; spectrum detection; spectrum management

1 引 言

信息技术发展使得航空电子系统能够提供给用户更多功能,与此同时,设备量剧增,电磁环境日趋复杂,电磁频谱空间、时间分布变化更加剧烈,传统的静态集中式频率管理方法已经无法保障复杂电磁环境下通信实时性、有效性。航空通信试飞频率规划需要同时兼顾飞机之间、飞机与地面站之间、飞机与舰船之间通信需求,且试验频率必须覆盖通信频段高端、中段、低端。在很宽的通信频率范围内,共

址电磁干扰(EMI)几乎不可避免,采用传统的频率管理方法已经无法适应航空电子系统试飞。在常用的 HF、VHF/UHF 通信频段内电磁信号密集,且很多电磁信号电平超过了航空通信接收机基准灵敏电平。显然,EMI 信号的存在破坏了信道原有的满足兼容准则^[1]的特性,在进行试飞规划时,需要从频率数据库中剔除不兼容的频率。如果没有预先频谱信息、静态规划的试飞频率,通信可通率和通信质量很难保障。所以,研究复杂电磁环境条件下,有效的航空通信系统试飞频率管理方法是试飞成功的基础。本文从航空通信系统试飞频率管理目标、频谱检测、

^{*} 收稿日期:2013-02-07;修回日期:2013-04-17 Received date:2013-02-07;Revised date:2013-04-17

^{**} 通讯作者:lmt19602004@126.com Corresponding author:lmt19602004@126.com

动态管理等方面论述了基于感知的航空通信系统试飞频率管理方法。

2 关键技术

(1)实时频谱监测

实时检测多系统、多设备共址条件下电磁环境和频谱变化,在通信频段内根据频谱变化,动态更新频率数据库。

(2)频率指配技术

当 EMI 导致通信能力下降或通信中断时,系统依据管理规则,从频率数据库中选择指配新的频率,启动通信建立通信链接。

(3)频率管理软件技术

试飞频率管理软件技术包括频谱动态检测分析软件、数据库管理软件。

3 频率管理层次和管理目标

3.1 电磁频谱特性

频率管理就是利用技术手段使各种无线设备有效工作,互不干扰,最终达到合理利用频谱资源的目的。频率管理系统的职能包括频谱监测和管理两部分。电磁频谱主要具有以下特征^[2]:

(1)三维性,电磁频谱具有频率、空间和时间的三维性,在不同频率,或不同空间,或不同时间可以共同使用无线电频谱;

(2)有限性,任意频率只存在于一定区域及一定时间内,是有限资源;

(3)共享性,无线电波传播不受行政区域的限制,若不加管理的无序使用,可能同频干扰,因此,必须实施有规则的管理;

(4)非消耗易受污染性,可反复利用,易受噪声和 EMI。

显然,全面掌握电磁频谱特征,才能实现科学频率管理。

3.2 频率管理层次

频谱特征决定实施有效的频率管理,需实施频率、空间、时间三维管理方式,根据系统技术特点,航空通信系统试飞频率管理分成以下三个层次比较合适。

(1)静态管理

根据试飞前场站及空域电磁频谱测试及其他预先信息,依据准则规划设计试飞频率表,加载至频谱数据库。

(2)频率可用性验证

通过试飞任务地面模拟试验,静态规划频率可用性,剔除不用频点并重新规划,反复迭代,直至所以规划频率可用。

(3)空中试飞过程中频率管理

试飞过程中,专用频谱监测设备实时检测通信频段电磁环境,更新试飞频率数据库,为频率管理提供可用频率源。无线场景分析、信道识别、动态频率指配功能模块通过与外部电磁环境的交互就形成空中试飞过程中电磁频谱感知和改变频率循环,如图 1 所示。

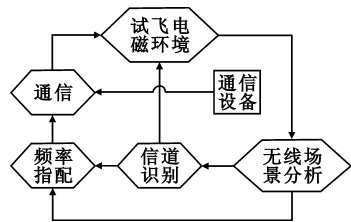


图 1 感知循环图
Fig. 1 Figure of perception cycle

3.3 频率管理目标

电磁频谱是实现无线电通信的基础,频率管理以提高频谱利用率、实现电磁共存和保障试飞任务持续性为目的。

航空通信系统频率管理的目标:

(1)依据频率管理规则和预先频谱信息,完成通信试飞频率规划,规划频率满足系统电磁兼容性要求;

(2)静态频率规划和动态频率管理相结合的方式,使各 VHF/UHF 等视距通信信链路工作于相对干扰小、噪声电平低的信道;

(3)HF 超视距通信,依靠电离层反射传输的信道频率特性,窗口效应决定了在给定距离和方向的路径上,只能用有限的频段^[3]。利用短波频率预测软件 W6ELprop 确定频率,测试比较各信道噪声电平,选取噪声分别小于限定值的频点,并经地面通信验证后加载于频率表中使用。

4 频谱检测与频率管理

4.1 频谱监测

实时检测并记录通信频段内通信信号和 EMI 频谱变化,是实现航空通信系统试飞频率动态管理的关键。比较典型的频谱检测方法有:匹配滤波器检测法^[4]、能量检测法、循环平稳特性检测法、干扰

温度检测法等。分析比较各频谱检测方法的优势和不足,从中选择适合频谱检测方法应用于航空通信系统试飞频率管理。

(1)匹配滤波器检测

当应用于区域频率管理,匹配滤波器频谱检测是一种最优的方法。但是,使用匹配滤波器检测需有检测信号先验知识(如调制方式、脉冲波形、数据包格式等),显然,这种方法比较适于检测特定信号。

(2)能量检测

能量检测属于非相干检测,现对于其他检测法,能量检测更简单。根据基本假设模型,在高斯加性白噪声(AWGN)信道情况下,采用能量检测法进行主用户信号检测的性能。在 AWGN 信道非衰落的环境中,可知信道增益 h 是确定的。在 H_1 下,当接收到的信号超过判决门限 λ 时,判断主用户信号存在。在 H_0 下,当接收信号超过判决门限时,则会作出错误的判断。分别用 P_d 和 P_f 来表示检测到主用户的概率(检测概率)和错误判断警报的(虚警)概率,对 H. Urkowitz 的研究结果进行简化,可以得到通过无衰落的 AWGN 信道检测的概率和虚警概率的近似表达式为

$$P_d = P_r(>\lambda | H_1) = Q_m\left(\sqrt{\frac{a\gamma}{\sigma^2}}, \sqrt{\frac{\gamma}{\sigma^2}}\right) \tag{1}$$

$$P_f = P_r(>\lambda | H_0) = \frac{\Gamma\left(m, \frac{\lambda}{2\sigma^2}\right)}{\Gamma(m)} \tag{2}$$

$$Q_m(a, b) = \int_b^\infty \frac{x^m}{a^{m-1}} e^{\frac{x^2+a^2}{2}} I_{m-1}(ax) dx \tag{3}$$

式中, $I_{m-1}(g)$ 是第 $m-1$ 阶修正贝塞尔函数。

利用公式(1)推算,当 P_d 很低时,不能检测主用户信号的概率会较大,这样反过来就增加了对主用户的干扰。如果 P_f 过高,则错误警报会使认知无线电用户错过许多频谱利用的机会,导致频谱利用效率低下。这两者是一对矛盾。

航空通信系统试飞任务中规划使用的通信频率,一定是在划定的航空通信频段内,属于授权用户,频谱检测的对象由主用户变成了频段内可能出现的无用 EMI 信号。检测分析中,将超过判决门限的 EMI 信号作为主用户信号处理。避开干扰规划新的工作频点进行通信可以理解成感知用户为降低对授权用户的影响而采取的避让措施。

(3)循环平稳特征检测

经过数字调制后的信号存在周期性,这种周期性表现为信号的均值函数和自相关函数随着时间周

期性变化,因此称这种内在周期性为循环平稳特性。循环平稳特征检测特点是能够区分主用户信号、噪声和干扰信号的能量。此外,循环特征检测在低信噪比下仍然具有良好的检测性能。但是,循环平稳特征检测之不足则是计算复杂,检测时间相对较长。

(4)基于干扰温度的检测

干扰温度是美国联邦通信委员会(FCC)提出的概念。这种方法的特殊性体现在,感知用户在检测出频带内已有通信的基础上,能够预测自己的传输将对主用户接收机产生的干扰。干扰温度模型被定义为每单位带宽里未经授权的发射机 RF 功率与接收机系统噪声功率之和,是建立在实际的 RF 环境中以及发射机和接收机交互的基础之上的,充分考虑了所有干扰的累积效应。

干扰温度准确测量需要感知用户对主用户系统进行准确定位。只要感知用户造成的干扰温度不超过干扰温度限,感知用户通过调整自己的参数(如发射功率、调制方式等)就可以使用这个频段中的频谱空洞。但是,基于干扰温度的检查方法不能确保对主用户系统无干扰。

各频谱检测方法性能比较如表 1 所示。

表 1 感知算法功能比较		
Table 1 Advantage and disadvantage of spectrum sensing arithmetics		
算法	优点	不足
匹配滤波器检测	能使信噪比最大化,达到较高处理增益 所需时间比较少	对相位同步要求很高
能量检测	无需知道信号先验知识,实现简单	判决门限难确定;低信噪比时,信号淹没在噪声中,局限性大;无法判断出检测到的是噪声还是其他用户
循环平稳特征检测	精度高,能区分信号和噪声	计算复杂,计算量大
基于干扰温度检测	通过设置干扰温度门限,寻找频谱接入机会,但减少了主用户系统覆盖范围	当主用户系统频率利用率较高时,以共享频谱的方式很难接入,有效性不高

表 1 对比结果说明,能量检测法、循环平稳特征检测法普性较强,适合应用于航空通信系统频率管理。

4.2 频率检测系统组成

航空通信对实时性和有效性要求高,飞机电磁环境复杂多变,作者认为,采用文献[4]提出的能量和循环谱特征联合检测的频谱感知方法的思路,开

展航空通信系统试飞频率管理方法研究比较可行。适应航空通信系统试飞频率管理的能量和循环谱特征联合检测感知架构如图 2 所示。

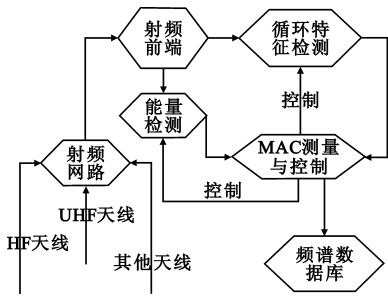


图 2 频谱感知功能组成
Fig.2 Spectrum sensing function

频率系统由频率管理、试飞频率使用情况数据库、频谱监测 3 部分组成，主要设备包括天线、射频网路、射频前端、能量检测、循环谱特征检测、MAC 等，接收检测天线与通信系统共用。

4.3 频谱检测流程

能量和循环谱特征联合检测的频谱感知方法如下：

(1)频率检测系统通过能量检测的方法，快速扫描规划加载的信道，经初步感知，提取低能量频段。根据能量判决排序并送入 MAC 层，依据准则依次送循环谱特征检测模块进行精细感知；

(2)通过循环谱特征检测法进行精细感知，再次判决是否有 EMI：无干扰时，送频谱数据库排队；有干扰时，选数据库中相邻后一频率进行精确感知，直至完成所有规划频率感知评估，对规划频点按照兼容准则进行优先排序，根据分析结果更新频率数据库频率排序。

能量和循环谱特征联合检测流程如图 3 所示。

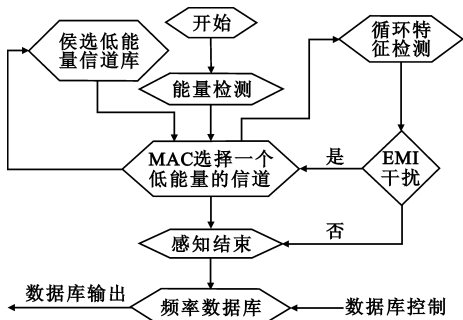


图 3 频谱检测流程
Fig.3 Spectrum sensing flow chart

4.4 频率管理硬件架构

基于频谱感知的动态频率管理技术研究，实现航空通信的实时性、有效性是基本目标；在完成静态频率规划的基础上，应用频谱感知所特有的对环境的感知能力、对环境变化的学习能力、对环境变化的自适应等技术优势，实时检测各预先规划的所有频率，并实时根据感知分析结果更新频率数据库，实现动态试飞频率管理是最终目标。上述频率管理目标是设计管理方法的依据，能量和循环谱特征联合检测的方法是设计频率管理系统硬件和软件架构的基础。基于频谱感知的航空通信系统试飞频率管理系统如图 4 所。

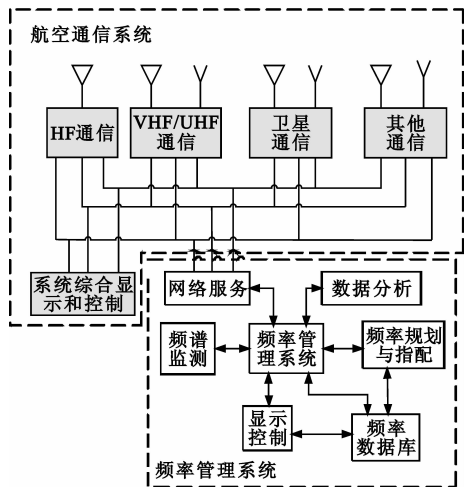


图 4 频率管理功能
Fig.4 Frequency management function of avionic communication system

(1)频谱检测

频谱监测数据分析之基础，是动态频率指配的依据。只要功能是实时检测相关频段频谱特征变化，执行固定频率监测、频段扫描监测、频率表监测等指令任务，对频谱数据库进行更新，通过网络与频率管理系统进行信息交互。

(2)网络服务

在频率管理系统中，网络服务的主要内容是通过网络实现数据传输，为频率管理系统内部各功能模块之间、与通信系统之间提供交互的平台。

(3)数据分析

频率管理数据包括环境数据库、配试通信站数据库、频谱监测数据库、设备性能数据库等；数据分析结果为静态频率规划和动态频率指配提供各通信链路间频率、空间和时间的三维电磁隔离度；分析产

生干扰的大小及影响范围,评价干扰的危害程度。

(4)频率指配

频谱指配是指试飞过程中,当通信系统质量下降并转入修改频率状态时,频率管理系统进行可行性分析和相关 EMC 评估。将新的满足系统 EMC 要求且可用频率指配给该通信链路,继续通信。

(5)试飞频率数据库

频率数据库是试飞频率管理的重要组成,为实现频率管理提供基础支撑。频率数据库架构合理与否是基于感知的试飞频率管理成功的关键。频率数据库功能有:一是数据库需包含频率使用情况分析所需的多个子库;二是数据库受频率管理系统控制,对数据库内容可以实时更新,也可以根据需要进行修改;三是数据库内容可以查询。

4.5 动态频率管理

航空通信具有 HF、VHF/UHF 等多种通信方式,试飞科目设置时,通常多种方式同时兼容工作。分析航空电子系统试飞技术现状,可以预见预先频率规划-仿真和试验验证-实时频谱监测+频率调整的管理方法将是航空通信系统试飞频率管理的发展方向,采用这种方法,能够有效缓解 EMI 对航空通信系统试飞的影响,提高在复杂电磁环境下试飞效率。

5 试飞频率管理流程

由于篇幅所限,仅以航空通信系统 VHF/UHF 通信为例说明试飞频率管理流程如下。

(1)试飞任务之前,根据通信系统 EMC 判决准则,参考频谱预测信息、实测电磁环境数据等,按照静态频率管理规则设计试飞频率表,加载试飞任务参数后,进入仿真分析过程。

(2)进行计算机仿真,验证静态规划频率可用性,如果规划频率通过仿真验证,表明频率符合频率管理规则,可以进入地面试验验证过程,否则,重新规划,通过仿真验证再进行地面试验验证。

(3)进行机上地面试验,验证静态规划频率可用性。参数平台以有利位置在试验场展开,模拟空中试飞流程,完整进行各试飞科目通信试验。模拟试验中,VHF/UHF 通信等通信功能正常,通信系统与机上航空电子系统兼容,表明静态规划试飞频率可用,实施空中试飞,否则,剔除不可用频率,重新规划试飞频率,再次进行计算机仿真分析。

(4)空中试飞过程中,频谱感知设备实时检测飞机平台和空域电磁环境,并根据感知结果更新数据库。当 EMI 导致通信降级或中断且超过时间窗口,机载通信系统和配试通信台(地面、目标机、舰船等)自动进入频率调整状态,频率管理系统从频率数据库中选择合适的频率加载,为受到干扰而无法通信的链路重新配置信道参数^[5]。之后,机载通信系统按照频率管理动态调整中的新频率重新建链呼叫协议,在新的波道开始呼叫协同台;在此过程中,当进入频率动态调整状态后,配试通信台开始在预先规划的多个频率点等间隔循环方式扫描接收机载通信系统呼叫,直至再次建立通信链接,继续进行试飞试验。试飞任务完成后,系统断电飞机返航。航空通信系统试飞频率管理流程如图 5 所示。管理流程中静态频率规划、计算机仿真、机上地面模拟试验方法已在工程试飞中应用,但试飞频率管理系统控制及分析软件、数据库软件等有待研制开发。

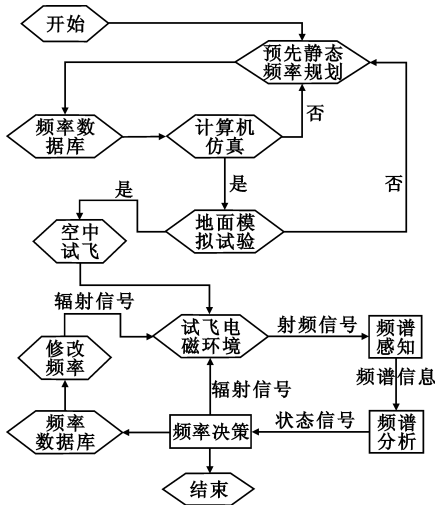


图 5 航空通信系统试飞频率管理流程
Fig.5 Spectrum management flow chart of avionics communication system

6 结束语

随着电磁环境日益复杂,使得现代航空通信系统试飞实施难度增加,各种不确定因素如 EMI、飞机平台姿态、飞行速度、气象条件等变化也可能影响通信质量,从而使试飞数据不能真实反映航空通信系统技术状态,影响试飞评估结论的准确性和客观性。为使试飞效能评估更客观准确,需要进行数据相容性分析

和重建。基于频谱感知试飞频率管理技术的成功应用,将使航空通信系统试飞数据相容性分析及重建成为可能。所以,开展基于频谱感知的航空通信系统试飞频率管理技术研究,有助于在复杂电磁环境条件下,选择可用的试飞频率,保障航空通信系统试飞成功率,提高试飞评估准确性。

参考文献:

- [1] 刘满堂,周向阳,熊林庆.基于试飞的航空通信系统效能评估[J].电讯技术,2012,52(10):1561-1565.
LIU Man-tang, ZHOU Xiang-yang, XIONG Lin-qing. Effectiveness Evaluation of Aviation Communication System Based on Test Flight[J]. Telecommunication Engineering, 2012, 52(10):1561-1565. (in Chinese)
- [2] 乔晓强,赵杭生,陈勇.认知无线电与频谱管理[J].军事通信技术,2009,30(1):37-40.
QIAO Xiao-qiang, ZHAO Hang-sheng, CHEN Yong. Cognitive Radio and Spectrum Management[J]. Journal of Military Communication Technology, 2009, 30(1):37-40. (in Chinese)
- [3] 刘满堂.基于信道特性分析的短波远距离地空通信[J].电讯技术,2012,52(9):1508-1512.

LIU Man-tang. HF channel characteristic analysis and long range air-ground communication test[J]. Telecommunication Engineering, 2012, 52(9):1508-1512. (in Chinese)

- [4] 高海涛,程云鹏.频谱感知技术在短波通信中的应用[J].电讯技术,2009,49(4):49-53.
GAO Hai-tao, CHENG Yun-peng. Spectrum Sensing Technology for HF Communication Systems[J]. Telecommunication Engineering, 2009, 49(4):49-53. (in Chinese)
- [5] Mitola J, Maguire G. Cognitive radio: making softw are radio sm o re personal[J]. IEEE Personal Communications, 1999, 6(4):13-18.

作者简介:



刘满堂(1962—),男,陕西扶风人,1982年毕业于西安电子科技大学获学士学位,现为高级工程师,主要从事航空通信系统总体技术研究。

LIU Man-tang was born in Fufeng, Shaanxi Province, in 1962. He received the B. S. degree from Xidian University in 1982. He is now a senior engineer. His research concerns avionic communication system technology.

Email: lmt19602004@126.com