

综述·评论

甚高频语音通信系统抗干扰技术及其发展趋势

王倩莹

(中国民用航空飞行学院, 四川 广汉 618307)

摘要: 当今, 随着航班数量的大幅增加, 电台数量越来越多, 电磁干扰现象日益严重。为了提升民航地空通信质量, 更好地保障飞行安全, 需要对甚高频语音通信系统的抗干扰技术进行深入研究。文章概述了甚高频语音通信系统的构成及其存在的干扰种类和相应的缓解措施, 介绍了新型抗干扰技术的研究领域和甚高频语音通信系统发展的新趋势, 包括直接序列扩频技术、跳频技术、空闲信道扫描技术以及软件无线电技术等。

关键词: 甚高频; 干扰; 同频; 直序扩频; 跳频

中图分类号: TN911

文献标识码: A

文章编号: 2096-5427(2019)02-0007-06

doi:10.13889/j.issn.2096-5427.2019.02.002

Anti-interference Technology of VHF Voice Communication System and Its Development Trend

WANG Qianying

(Civil Aviation Flight University of China, Guanghan, Sichuan 618307, China)

Abstract: Nowadays, with the increase in the number of flights, the number of stations is increasing, and electromagnetic interferences is becoming more and more serious. In order to improve the quality of civil aviation ground-to-air communication and better guarantee flight safety, the anti-interference technology of VHF voice communication system needs to be thoroughly studied. The composition of VHF voice communication system, the types of interferences and the mitigation measures were introduced in this paper, the new research fields of anti-interference technology were described and the development trends of the VHF voice communication system were presented, including direct sequence spread spectrum technology, frequency hopping technology, free channel scanning technology and software radio technology.

Keywords: very high frequency (VHF); interference; same frequency; direct sequence spread spectrum (DSSS); frequency-hopping spread spectrum (FHSS)

0 引言

近年来, 随着飞行流量的不断增加, 对民航地空通信技术提出了更高的要求。甚高频 (very high frequency, VHF) 语音通信是民航地空通信的主要手段, 无线电波对于 VHF 通信系统的干扰, 降低了通信的质量水平, 甚至严重影响飞机的安全飞行。国内外关于 VHF 通信系统的抗干扰研究主要集中在以下两个方面:

一方面是利用相应的器件和技术手段对无线电干扰进行抑制, 从发射端控制干扰的产生和发射, 从传导和辐射途径加以衰减, 在接收端抑制和屏蔽无线电干扰; 另一方面是将新型通信技术应用到 VHF 通信系统, 例如跳频技术和软件无线电技术在国内外尤其是军用领域都已开展了广泛的研究。提升 VHF 语音通信系统的可靠性和稳定性、降低 VHF 系统的干扰对保障飞行安全有着重要意义。因此需要分析 VHF 语音通信系统的构成以及存在的干扰种类, 进而寻求抑制干扰的方法。

1 VHF 语音通信系统

VHF 通信又称超短波通信, 其使用的无线电波频

收稿日期: 2018-12-04

作者简介: 王倩莹 (1989—), 女, 硕士, 主要研究方向为电力电子与电力传动、民航通导新技术。

基金项目: 中国民用航空飞行学院自然科学基金面上项目 (J2018-37);

中国民用航空飞行学院青年基金项目 (Q2018-100)

段范围为 30~300 MHz，波长范围为 1~10 m，在空气中沿直线传播，不能被电离层反射，不易受天气因素的影响，但易受地面障碍物遮挡影响^[1]。分配给民航使用的 VHF 频段为 118~136.975 MHz；信道频率间隔为 25 kHz 或 8.33 kHz，目前我国使用的信道频率间隔为 25 kHz。VHF 无线电波的通信距离受地面 VHF 电台的天线高度和飞机飞行高度的制约，同时也受限于地形、发射机的输出功率以及接收机的灵敏度等因素，且需满足国际民用航空组织 (international civil aviation organization, ICAO) 相关规定要求。民航地空通信要求 VHF 语音信号稳定、话音清晰，传输距离通常在 463 km 之内^[2]。

VHF 地空语音通信的工作方式如图 1 所示，其中 VHF 本地台用于机场、进近（终端）管制区通信和管理，远端遥控台用于区域管制。

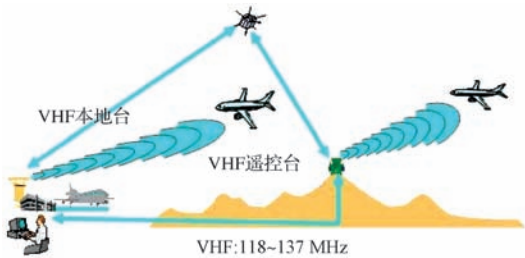


图 1 VHF 地空语音通信的工作方式
Fig. 1 Operation mode of VHF ground-to-air voice communication

地面管制人员和飞行员通过控制 PTT（push to talk）键控按钮来控制信号的收发：按下时，处于发射状态，可以说话；松开时，处于接收状态。在一个管制区域内，管制人员和飞行员使用一个指定的频率进行通信，该区域内其他飞机的飞行员也可以听到他们的通话，这有利于飞行员熟悉周边飞机的飞行动态^[2]。VHF 语音通信网络示意如图 2 所示。

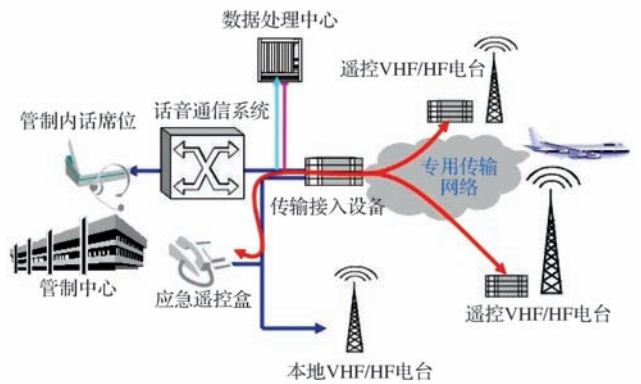


图 2 VHF 语音通信网络
Fig. 2 VHF voice communication network

VHF 地空通信采用双边带调幅的调制模式、半双工的工作方式，使用全向天线采用垂直极化的发射方式，设备的主要性能指标要求如表 1 所示^[3]。

表 1 VHF 电台主要性能指标
Tab. 1 Requirements of main performance indicators for VHF radio

电压 /V		发射功率 /W			发射机 调制度	调制失真 (测试信号频率=1 kHz, 调制度=90%)	接收机灵敏度 (测试信号频率=1 kHz, 调制度=30%, 信纳比=12 dB)	天线特性 阻抗 /Ω
交流	直流	塔台	进近	航路				
220±10%	24±10%	≤ 10	≤ 25	≤ 50	≥ 85%	≤ 50%	≤ -103.5 dBm	50

2 VHF 语音系统的干扰和相应措施

受复杂大气环境、电磁环境、设备、天气状况及人员操作不当等因素的影响，无线电波在传播过程中会耦合部分无用的电磁能量，形成干扰信号，使所接收的有用无线电信号质量下降，造成信息误差和丢失，甚至通信中断，极大地影响飞行安全。VHF 通信电台的干扰主要包括同频干扰、互调干扰、邻道干扰、带外干扰和阻塞干扰^[4]。下面将简要介绍这几种干扰对地空通信系统的影响，以及减弱或消除干扰应采取的对应措施。

2.1 同频干扰

VHF 无线电波的传播特性限制了其工作范围。为了充分利用通信频率，民航业会在不同的区域使用同一频率，即“频率复用”。当飞机的飞行高度较高时，若覆盖在其通信区域的 2 个或多个 VHF 电台具有相同的工作频率，则其发出的信号都将被飞机接收。当工作在同一频率的多个地面电台同时发射信号时，信号进入机

载接收机并会产生严重的差拍干扰，该干扰信号一旦落入接收机的音频带宽中，将无法被滤除，从而形成类似“哨叫”的干扰音频。由于无用信号和有用信号的载频相同，这种现象被称为同频干扰，其在甚高频通信中较为常见。

目前减弱或消除同频干扰的技术和措施主要有^[5]：

(1) 设置电台的偏频载波，即给使用相同频率的多个甚高频电台的发射载波设置不同的微小频率偏差，扩大频率间隔，从而使各个电台发射信号的载波频率有所差异。研究表明，2 个电台的载波频率偏差超过 4 kHz 时，接收机才可以滤除同频干扰。根据民航规定，信道间隔为 25 kHz 的 VHF 电台，6 dB 带宽不窄于 ± 8.5 kHz，60 dB 带宽不宽于 ± 18 kHz；载波频偏量有 0 Hz，± 2.5 kHz，± 5 kHz，± 7.5 kHz。载波频偏设置之后，通过相关测试确定两个电台无论是同时工作还是单独工作，静噪电路均正常，且频偏设置不会引起邻道干扰。

需注意的是,使用 8.33 kHz 频率间隔的 VHF 电台,由于频率间隔较小,带宽较窄,故而不能设置频偏,以免对邻近频率造成干扰。

(2) 严格控制电台的最大发射功率。根据 ICAO 规定,塔台管制区电台发射功率不超过 10 W,进近管制区电台发射功率不超过 25 W,航路管制区电台发射功率不超过 50 W(表 1)。

(3) 合理分配 VHF 电台频率。

(4) 控制天线的高度。天线不能过高,调整天线俯仰角,从而减小干扰方向的增益。

2.2 互调干扰

各个频段的无线电波在人类生产、生活过程中被广泛应用,当它们经过非线性设备后,可能会形成多种谐波以及组合频率信号,有部分信号的频率甚至会与 VHF 电台的频率接近或相同,从而顺利进入接收机的通带内形成干扰。这种干扰被称为互调干扰,其中三阶互调干扰最为严重^[6]。根据成因,互调干扰大致可分为 3 类:发射机互调、接收机互调以及外部环境引起的互调。解决互调干扰的有效措施包括合理分配频率和增大发射机与接收机之间的距离两种。

目前减弱或消除互调干扰的方法主要有以下几方面:

(1) 针对发射机互调,如果系统使用分用天线,则在允许的范围内适度增大发射天线之间的间隔来防止信号相互耦合;如果系统使用共用天线,则增加单向隔离器来阻止干扰信号的进入;另外可加强发射机输出端的滤波功能,并改善发射机与天馈线的匹配性能。

(2) 针对接收机互调,一方面可加入衰减器以降低干扰信号能量,或加入滤波器以提升接收机前端电路的选择性;另一方面可使用多级调谐回路以增强接收机输入回路的选择性,或使用有平方律特性的器件(如场效应管)来减小线路的非线性。

(3) 针对外部环境引起的互调,做好日常防潮、防锈等维护工作,加强设备的检测以避免接触不良等现象的发生,并增加监测系统以识别干扰的来源。

2.3 邻道干扰

邻道干扰是指接收到相邻或相近频道的部分信号而引起的干扰。严格来讲,电台发射的并不是某一个频率的信号,而是具有一定频谱宽度的调频信号,包含了无穷多个边频分量,如果有边频分量恰好在邻道接收机的通带内,而邻道接收机的滤波性能不够好时,则可能产生邻道干扰。其原因有两个方面,其一是由紧邻的若干波道的寄生辐射造成,包括发射边带扩展、边带噪声和杂散辐射等;再者是由一组空间离散的邻近工作频道引

入干扰。

目前减弱或消除邻道干扰的技术方法和措施主要有以下几个方面^[7]:

(1) 扩大邻频电台天线之间的距离。研究表明,当频率间隔为 50 kHz 时,50 m 的天线距离就可消除邻频干扰;当频率间隔为 25 kHz 时,70 m 的天线距离可消除邻频干扰。

(2) 使用双腔体滤波器或晶体滤波器以增加滤波效果;同时在允许范围内适当增大发射功率并适当下调静噪门限,来弥补较强的滤波效果对有用接收信号的削弱。

(3) 干扰需立刻解除时,设置频偏可迅速缓解或消除邻道干扰。

2.4 带外干扰

带外干扰主要是由发射机的杂散辐射所引起,与接收机的杂散响应也有密切关系。发射机的倍频器和倍频放大器会产生大量谐波,若杂散辐射值较高而倍频回路的滤波特性不够好时,带宽之外的谐波就会被发送出去,落入接收机中^[1]。接收机对其他无用信号的响应能力称为杂散响应,与接收机本振的频率纯度有关。超外差式接收机的杂散响应包括镜像响应和中频响应。当干扰信号为中频信号而接收机输入回路和高放回路的选择性不足时,中频信号可进入中频回路产生中频干扰。镜像频率与本振频率的差拍也可产生中频从而进入中频回路引起干扰,称为镜像干扰。

目前针对带外干扰的减弱或消除的技术方法和措施主要有以下几个方面:

(1) 针对发射机,尽量减少倍频器级联的次数,提升倍频器屏蔽和隔离水平,减少相位检测器泄露;安装杂散抑制滤波器,提高倍频器的滤波特性,增强输出回路的选择性。

(2) 针对接收机,改善其邻道选择性。

2.5 阻塞干扰

阻塞干扰是由于周围的高功率强干扰信号引起接收机非线性器件的饱和效应而造成的,与接收机的性能相关。接收设备的低噪声放大倍数是由放大微弱信号的所需增益来确定的,强干扰信号可能将放大器推入到非线性区,从而抑制了微弱信号的放大效果^[1],情况严重时会造成阻塞、中断通信,长时间的阻塞会使接收机质量永久性下降。

主要从以下两个方面缓解和消除阻塞干扰:

(1) 在被干扰系统上安装阻塞抑制滤波器。

(2) 与周围其他通信系统综合设计,必须确保进入接收机的干扰信号功率低于系统设计时规定的阻塞电平

对应的功率。

3 VHF 通信的抗干扰技术发展趋势

目前在 VHF 通信领域应用到的新技术主要有跳频技术、直接序列扩频技术、软件无线电技术及空闲信道扫描技术等。跳频技术和直接序列扩频技术是两种最常见的扩频方式,实际应用中两种技术经常被综合使用。

扩频是指信息的传递并不是在一个固定频率上,而是在一个相当宽的有特定规律的频谱范围内进行,且载波的频带宽度远远大于原始信息的带宽。扩频技术的优点主要体现在以下几个方面:首先,发射端编码扩频和接收端编码解扩的过程使得扩频技术有很强的抗干扰性能,频谱扩展后,干扰信号的谱密度大幅下降,而且在接收端,干扰信号与扩频码若不相关,则无法被检测出;其次,频带扩展使得信息不容易被敌方截获,增强了保密性;再者,频带扩展使得单位频带内的能量密度大幅降低,不容易造成空间电磁干扰;最后,收发两端的编码对应控制,使得接收机的接收范围并不是按照频率来确定的,因此同一频率可以利用不同的扩频编码承担不同的通信业务,有利于频率的复用^[8]。

3.1 直接序列扩频技术

直序扩频的核心是在发射机端增加伪噪声生成器用以生成高码率的伪噪声序列,基带信号脉冲与之相乘得以扩展频谱;在接收机端,通过相同的序列编码进行接收信号的解扩和还原。直序扩频对干扰的抑制主要依靠接收端来完成,接收端利用伪码同步捕获电路获得接收信号的伪码相位,并依此生成与发端伪码相位完全相同的解扩信号来还原扩频信息,而干扰信号由于与伪噪声序列不相关而被捕获电路所抑制。美国 SICOM 公司开发的短波直扩电台的带宽为 1.5 MHz,数据速率可以达到 57.6 kbps。

直接序列扩频技术的优点是:优点带宽较大,频谱是 Sinc 函数,功率密度峰值较低,精度高,不易被截获,在多路径环境中具有鲁棒性,对窄带同频接收机的影响最小,适合异步多址应用;其缺点在于带宽受功率放大的限制,同步的获得和实现较为困难,伪随机序列相关电路工作量较大,易受信道色散失真影响且信号获取慢^[9]。

直接序列扩频通信发展于第二次世界大战期间,其目的在于提高军事领域通信的安全性、保密性。近些年来通信技术蓬勃发展,民航通信、导航等领域也广泛发展和应用直序扩频技术^[10]。针对直接序列扩频通信,信号的参数估计是近年来的研究热点。2010 年,彭艳华对最大似然估计的目标函数进行了优化改进,依据自

适应迭代法,实现了对同步点以及扩频码序列更为精确的估计,减少了计算量^[11]。2014 年,沈斌等联合使用奇异值分解算法和最大范数法,提升了估计的准确度,缩短了观测时间并减少了运算工作量^[12]。Mehboodi S 于 2016 年分析了扩频码序列的最大似然估计方法,以降低扩频码估计的运算量并提升其可靠性^[13-15]。

3.2 跳频技术

跳频技术也是一种常见的扩频方式,其载波频率并未固定于一个频率值,而是受到伪随机变化码的控制进行离散变化,在一个很宽的频谱范围内随机跳变,接收方也按照此规律进行解跳还原,是一种码控载频跳变的通信模式。实现跳频技术的核心部件是跳频控制器,其用于生成跳频图案并进行同步和自适应控制等。由于频率的扩展和跳变,即使干扰能量较大且落入部分频带内,也只会引起瞬时的影响,而干扰在其他时间段则被排斥在接收频带之外,故跳频技术有很强的抗干扰性能。在军事领域中,频率的跳变也使得信息不容易被敌方施加干扰或者截获,因此跳频技术具有很强的保密性和安全性。跳频技术性能的好坏由频率跳变速度决定,跳变越快,系统的保密性能和抗干扰性能则越强^[9]。

跳频技术的优点是:带宽较大,频率不连续,信号传输在时域上连续,信道失真容限高于直序扩频技术的,非相干检测具有鲁棒性,在多路径环境中采用前向纠错时具有一定的鲁棒性,对窄带同频接收机的影响适中,适合异步多址应用且同步的获得和实现较为容易;其缺点表现在占用离散频率,合成器稳定引起时间延迟,瞬时功率密度高,易受检测和连续波的干扰,多址系统中需网络定时,数字合成器的成本较高。

跳频通信技术日趋成熟,提升跳频系统的抗干扰性是近年来的研究热点。Kui Ren 教授综合使用非协同式跳频和功率控制方法以实现信道的快速切换^[16];美国密歇根州立大学的研究团队使用加密的信息流而非伪随机码来控制载波频率,即消息驱动跳频,该方法具有较好的抗干扰特性^[17]。军用跳频通信技术的发展始于 20 世纪 50 年代^[18]。美军的三军联合战术信息分布系统(JTIDS)是该领域的成功案例,其跳频系统由 3 个频段共计 51 个跳频点构成,频率范围为 960~1 215 MHz,邻频间隔大于 30 MHz。美国的 CHESS 系统是著名的跳频宽带系统,可实现每秒 5 000 跳,跳频带宽为 2.6 MHz,信息流的传输速度为 9.6 kbps^[19]。美军的卫星通信系统(MILSTAR)的跳频速率高达每秒 10 000 跳,带宽为 2 GHz,具备自适应调零天线和自动纠错等优势^[20]。

国内关于跳频通信方面的研究相对较晚。2005 年,

罗勇等利用现场可编程门阵列 (field programmable gate array, FPGA) 和直接数字式频率合成器 (direct digital synthesizer, DDS) 实现了以快速傅里叶变换 - 信道化侦察测频方案为基础的跳频合成模块^[21]。2013年, 王胜涛等着重研究了差分跳频的抗干扰特点^[22]。2016年, 朱文杰等通过喷泉码实现差分跳频并提升其抗干扰性能^[23]。2017年, 包志强等在频率转移函数中融入了加密算法, 隐蔽性得到显著的提高^[24]。

3.3 空闲信道检测技术

空闲信道检测是指在多信道通信系统中自动搜索检测并选用空闲信道, 从而避开被干扰的信道。空闲信道检测与跳频技术相结合是一个重要的研究领域, 可以提高扩频技术中频带的利用率, 显著提升通信质量, 尤其是针对阻塞干扰和点频干扰情况。

文献[25]设计了一种用以匹配滤波器的检测算法, 该算法具有较好的稳定性。文献[26]设计了一种能量检测法, 能量可随数据包的丢包率而改变, 检测的准确性得以提升。文献[27]针对信号干扰的情况, 设计了一种针对空闲信道的评估算法用以提升传输的可靠性和有效性。文献[28]中, 空闲信道检测算法的判决条件包括了能量检测和滤波器匹配两个方面。

3.4 软件无线电技术

软件无线电技术的核心是利用编程软件来控制硬件设备实现多频段多模式的通信功能。理想的无线电软件架构是模数转换器直接与天线耦合。在射频天线附近建立开放性的“A/D-DSP-D/A”模式的通用硬件平台, 依赖数字信号处理技术尽量通过软件实现电台的各个功能, 例如滤波、频段选择、信息的抽样量化和编码/解码运算、调制、保密和网络协议、信号控制和数据交换等。数字信号处理过程需要进行大量的采样工作以剔除不需要的信号并提取有用信号。从现有标准可得出对数字信号处理器的技术要求: 取样速率应达到 230 MS/s, 具有 14 位分辨率, 最大抖动为 1 ps^[29]。一方面, 软件无线电技术对数字信号处理器的速度和功耗等性能指标有较高的要求; 另一方面, 在满足硬件性能的约束下相应功能的数字信号处理软件也是研发重点领域, 收发机的各个功能模块应尽可能在较大的频带范围内实现重新配置^[30]。

在软件无线电研究方面, 国外的研发较早, 世界上第一台软件无线电收发机于 1995 年被研发成功。该收发机是通过 CMOS (互补金属氧化物半导体) 技术而实现, 其工作频率范围为 174 MHz~6 GHz, 信道带宽为 20 MHz^[30], 主要包括所有振荡频率的合成模块、

接收机模块、发射机模块及校准模块等。2011年, 美国摩托罗拉实验室开发设计的软件无线电收发机芯片集成了射频集成电路、数据转换器、Xilinx FPGA 和 PowerPC 微处理器, 造价仅为 6 000 美元, 频率范围为 100 MHz~2.5 GHz, 振荡器频率分辨率为 15 Hz。开发团队使用该收发机演示了 GSM 全球通系统、UMTS 通用移动通信系统、Tetra 陆上集群无线电系统、IEEE802.11 无线局域网通用标准以及专有波形通信^[31]。美军的易通话计划由各种类型的可编程功能模块构成, 实现了不同频率、不同功能的各类电台的彼此兼容, 为各个军种提供了一个互通公用的软件无线电平台, 大大提升了作战效率^[31]。近些年来, 易通话电台也从军用扩展到商用方面, 逐步应用于卫星通信、蜂窝技术等方面。随着软件无线电技术需求的不断发展, DSP, ADC 以及 FPGA 等数字信号处理芯片也得到了极大的发展。

国内, 软件无线电技术的研发相对较晚, 但是目前也得到了广泛的重视和研发支持并取得了一定成果。清华大学于 2014 年研发了具有抑制带外干扰和谐波干扰的接收机芯片, 其工作频段为 0.1~5 GHz^[32]。2015年, 张拥军等设计出应用于软件无线电平台的并行多输入多输出 (MIMO) 均衡处理器, 提高了 3GPP-LTE 网络协议中 MIMO 均衡算法的计算精度, 降低了延迟和功耗^[33]。2017年, 张云等设计了一套软件无线电系统, 主要用于监测四大导航系统频带内及邻近频率的干扰以提升导航的精确度和可靠性^[34]。2018年, 尹志伟等设计出软件无线电平台以满足通信网络中低功耗的设计要求^[35]。当前软件无线电器件的组装是科研人员面临的一个难题, 需要较高的成本投入和专业知识; 此外, 在当前的网络环境下, 如何使平台适应多个频率以及多个通信协议也是软件无线电技术研发的一个重要方向。

软件无线电技术的优点主要有以下几个方面: 首先, 当需要实现新功能时, 只需更新或添加软件模块, 具有很强的灵活性并节约了成本; 其次, 有较好的兼容性, 可以与传统电台通信, 也可作为其射频中继, 延长了旧体制电台的使用寿命; 再次, 标准化、模块化的结构使得软件无线电平台具有很强的开放性, 随着技术的发展硬件模块和软件模块均可以不断升级更新, 有利于新业务的增加和各种电台的互联。

4 结语

新时期民航业务量的急剧增加和飞行安全保障的严峻形势对通信质量提出了更高的要求, 新型通信抗干扰技术的研发和应用正在各个国家迅猛发展。本文概述了

VHF 通信系统的构成、存在的干扰种类和相应的缓解措施,介绍了新型抗干扰技术的研发方向。展望未来,VHF 通信抗干扰研究需要从以下几个方面开展工作:无线电频谱的科学管理和合理分配;遵循相关规定,从发射端严格控制干扰的产生;接收端通过合适的器件和技术手段消除或降低干扰的影响;研究新型通信技术并应用于民航通信领域。

参考文献:

- [1] 孙博峰. 同频异址甚高频电台相互干扰监测与控制方法研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2015.
- [2] 李其国. 民用航空通信导航监视人员岗前基础教程 [M]. 北京: 中国民航出版社, 2015.
- [3] MH/T 4001. 1-2016 甚高频地空通信地面系统第 1 部分: 话音通信系统技术规范 [S]. 北京: 中国民用航空局, 2016.
- [4] 李超. 民用航空器 VHF 通信干扰分析 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.
- [5] GRAHAM A. Communications, radar, and electronic warfare[M]. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2010.
- [6] 郭耀江, 孟茁. 民用航空甚高频通信系统互调干扰分析与建模研究 [J]. 现代导航, 2014, 5(4): 245-249.
- [7] XU Z, WEI B, CAO B, et al. A miniature wideband VHF superconducting filter using double-surface quasi-CPW spiral structures[J]. IEEE Microwave & Wireless Components Letters, 2013, 23(7): 329-331.
- [8] PARET D. RFID at ultra and super high frequencies: theory and application[M]. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2009.
- [9] MIDDLESTEAD R W. Digital communications with emphasis on data modems: theory, analysis, design, simulation, testing, and applications[M]. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2017.
- [10] 曾兴雯. 扩展频谱通信及其多址技术 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004.
- [11] 彭艳华. DSSS 信号参数及扩频序列盲估计算法研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2010.
- [12] 沈斌, 王建新. 基于奇异值分解的直扩信号伪码序列及信息序列盲估计方法 [J]. 电子与信息学报, 2014, 36(9): 2098-2103.
- [13] MEHBOODI S, FARHANG M, JAMSHIDI A. Maximum likelihood estimation of pseudo-noise sequences in non-cooperative direct-sequence spread-spectrum communication systems [C]// 24th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE). Shiraz, Iran, 2016: 119-123.
- [14] MEHBOODI S, JAMSHIDI A, FARHANG M. Two algorithms for spread-spectrum sequence estimation for DSSS signals in non-cooperative communication systems [C]// 24th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE). Shiraz, Iran, 2016: 72-76.
- [15] MEHBOODI S, JAMSHIDI A, FARHANG M. A low-complexity near-optimal algorithm for blind estimation of pseudo-noise sequences in DSSS communication systems [C]// 8th International Symposium on Telecommunications (IST). Tehran, Iran, 2017: 218-221.
- [16] XU K H, WANG Q, REN K. Joint UFH and power control for effective wireless anti-jamming communication [C]// Proceedings—IEEE INFOCOM, 2012. Orlando, USA, 2012: 738-746.
- [17] ZHANG L, WANG H H, LI T T. Anti-Jamming Message-Driven Frequency Hopping-Part I: System Design[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(1): 70-79.
- [18] MILLS D G, EDCLSON G S, EGNOR D E. A multiple access differential frequency hopping system[C]// IEEE Military Communications Conference. Boston, USA, 2003.
- [19] BASH B A, GOECKEL D, TOWSLEY D, et al. Hiding information in noise: Fundamental limits of covert wireless communication[J]. IEEE Commun Mag, 2015, 53(12): 26-31.
- [20] 贺超, 吕智勇, 韩福春. 美国军事战略中继卫星 MILSTAR[J]. 数字通信世界, 2008(8): 84-86.
- [21] HANAWAL M K, ABDEL-RAHMAN M J, KRUNZ M. Game theoretic anti jamming dynamic frequency hopping and rate adaptation in wireless systems[C]// International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile and Wireless Networks. [S. l.]: IEEE, 2014: 247-254.
- [22] 王胜涛, 黄文晶, 张劲心, 等. 差分跳频信号抗多音干扰性能仿真分析 [J]. 无线电工程, 2013, 43(12): 29-31.
- [23] ZHU W J, YI B S, GAN L C. Performance research of Fountain-DFH concatenated coding systems over AWGN with partial-band noise jamming[J]. Systems Engineering and Electronics, 2016, 38(3): 665-671.
- [24] BAO Z Q, WANG B, GAO F. A New Differential Frequency Hopping Scheme based on Encryption Algorithm[J]. Study on Optical Communications, 2017, 43(4): 74-78.
- [25] FUCHS J J. A Robust Matched Detector[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2007, 55(11): 5133-5142.
- [26] YUAN W, LINNARTZ J, NIEMEGEREERS I. Adaptive CCA for IEEE 802.15.4 Wireless Sensor Networks to Mitigate Interference[C]// 2010 IEEE Wireless Communications and Networking. Sydney, Australia, 2010.
- [27] TANG Y, WANG Z, MAKRAKIS D. Interference Aware Adaptive Clear Channel Assessment for Improving Zigbee Packet Transmission under Wi-Fi Interference[C] // IEEE International Conference on Sensing, Communications and Networking (SECON). New Orleans, USA, 2013: 336-343.
- [28] TRIWICAKSONO D, YOUNG-SHIN S. Energy Detector and Matched Filter as Cascaded Clear Channel Assessment in Wireless Network[C] // IET International Conference on Information and Communications Technologies (IETICT). Beijing, China, 2013: 551-556.
- [29] RODRIGUEZ-PARERA S, BOURDOUX A, HORLIN F, et al. Front-End ADC requirements for uniform bandpass sampling in SDR[C]// Vehicular Technology Conference, 2007: 2170-2174.
- [30] HUEBER G, STASZEWSKI R B. Multi-mode/multi-band RF transceivers for wireless communications: advanced techniques, architectures, and trends[M]. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2011.
- [31] 刘佳. 谈软件无线电技术在移动通信测试领域的应用 [J]. 中国新通信, 2018, 20(2): 2-3.
- [32] 袁良晨. 基于 AD9361 软件无线电收发机设计与实现 [D]. 西安: 西安科技大学, 2018.
- [33] 张拥军, 陈艇. 基于软件无线电的并行多输入多输出均衡技术 [J]. 计算机应用, 2015, 35(4): 1179-1184.
- [34] 张云, 崔晓伟, 笪腾飞, 等. 基于软件无线电的 GNSS 干扰和多径监测系统 [J]. 电讯技术, 2017, 57(3): 288-295.
- [35] 尹志伟, 程亮亮. 基于 ZYNQ7000 的低功耗软件无线电平台设计 [J]. 无线互联科技, 2018(3): 31-32, 37.