

文章编号:1674-8190(2018)02-168-09

下一代航空宽带通信 B-VHF 系统

郜林^{1,2}, 王朕¹

(1. 天津财经大学 理工学院, 天津 300222)

(2. 天津大学 电子信息工程学院, 天津 300720)

摘要: 将宽带 VHF 技术应用于地空通信中, 可有效缓解当前民航通信中容量不足的问题。在介绍 B-VHF 的发展历程、系统和业务架构的基础上, 指出重叠覆盖是 B-VHF 的核心思想, 进而将干扰抑制和频谱感知作为 B-VHF 的两大关键技术。重点对射频干扰抑制中的时域和频域处理方法、对频谱感知中的能量检测法和联合检测法进行技术对比分析, 进而归纳两大关键技术的一般实现方法。并对 B-VHF 的发展前景作了展望。

关键词: 宽带甚高频; 多载波; 正交频分多址; 码分多址; 空中交通管理

中图分类号: V11; TN911.7

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2018.02.004

Research on B-VHF—the Next Generation System of Air-ground Broadband Communication

Gao Lin^{1,2}, Wang Zhen¹

(1. School of Science and Technology, Tianjin Economic and Financial University, Tianjin 300222, China)

(2. School of Electronic and Information, Tianjin University, Tianjin 300720, China)

Abstract: The application of broadband VHF technology to the air-ground communication can effectively alleviate the problem of insufficient capacity in the current civil aviation communication. Based on the introduction to the B-VHF development and the system business architecture, it is pointed out that the overlapping coverage is the core idea in B-VHF, and the interference suppression and spectrum perception are the two key technologies to realize it. Focus on the comparative analysis between the time domain and the frequency domain processing in the radio frequency(RF) interference suppression, and between the energy test and the joint test of spectrum sensing technology, the general implementation method of the two key technologies are summarized. The prospects of the B-VHF development is prospected.

Key words: broadband-very high frequency(B-VHF); multi-carrier(MC); orthogonal frequency division multiple access(OFDMA); code division multiple access(CDMA); air traffic management(ATM)

0 引言

随着世界范围内民航业务的迅猛增长及跨洋飞行的日益频繁, 原有航空通信体系结构已经不能满足民航发展对空中交通管理(Air Traffic Management, 简称 ATM)的新的要求, 暴露出通信频

段短缺、系统容量不足的严重问题。宽带甚高频(Broadband Very High Frequency, 简称 B-VHF)是在应对国际航空发展中 ATM 通信瓶颈所形成挑战的大背景下提出的, 作为宽带地空数据链主流技术方案之一, 被当今国际航空领域所广泛研究和关注。

B-VHF 是一种基于正交频分复用的多载波技术(Multiple Carrier, 简称 MC)。其可以通过对 AM、VDL2 等民航 VHF 信道的空闲频段分配子载波, 利用其他地空通信系统的工作间隙进行通

收稿日期: 2017-11-06; 修回日期: 2018-02-02

基金项目: 天津自然科学基金(16JCYBJC42000)

通信作者: 郜林, 1119374968@qq.com

信,从而达到提高频谱利用效率的目的。同时,B-VHF既可以与AM、VDL2等现有系统共享航空VHF频段,又可以独立分配新的频段——具有很强的技术兼容性,可实现现有与未来通信系统间的平滑过渡^[1-2]。

目前,国内外对B-VHF理论及其应用已经进行了比较充分的研究,但是缺乏系统的、综合的论述,特别是对关键技术缺乏技术层面的综合分析。本文首先对B-VHF的发展历程、系统架构进行介绍,然后重点从技术层面对B-VHF的关键技术进行比较分析,最后展望B-VHF的技术特点及其发展,以期对今后该领域的研究工作有所裨益。

1 航空 VHF 通信系统的发展过程

VHF航空频段(118~137 MHz)的电磁传播以直线传播为主,相对于移动通信的频率选择性衰落和快衰落而言,具有良好的传播性能;该频段受气候影响较小,具有传播性能稳定的特点。基于上述原因,VHF航空频段现实中被用来作为高质量业务通信频段而使用,主要应用于ATC话音通信。ATC话音通信历史最早可追溯到20世纪40年代,应用至今,其主要应于飞机的通讯和导航。ATC话音通信采用模拟DSB-AM方式,技术成熟、工作稳定,但频带利用率较低^[3]。

随着民航事业的迅猛发展,所要求的通信系统流量不断提高。自20世纪末期以来,VHF话音已不能满足欧美等航空发达地区业务的需要。在欧洲,8.33 kHz话音信道间隔在21世纪初期被提出,并投入使用。但该举措只能在较小程度上提高系统容量,暂时缓解通讯容限压力。在VHF数据通信方面,自20世纪后期以来,引入了面向字节的ACARS通信系统。由于ACARS系统效率低、容量小、能够支持的航空业务有限,因此该系统仅能够提供航空所需的小流量基本服务,并不能满足日益增长的飞行流量要求。为了解决上述问题,国际航空科研机构对新的通讯链路展开了研究和试验工作——VDL成为VHF通讯发展的主要方式^[4]。目前,欧洲已经局部应用了VDL2系统,美国也在积极部署相关工作。在VDL发展过程中,话音通信业务有向数据通信业务转化的趋势(由于

业务需要,不能完全代替)。航空数据链的发展,有利于在提高业务工作区域容量的同时,减少飞行员的工作量。

然而,由于飞机班次不断增加、航空业务不断丰富,即使采用VDL2/8.33 kHz话音方式,仍不能满足未来航空流量的要求^[5]。特别是下一代航空交通运输系统(NextGen)概念的提出和发展,对VHF通信链路形成了新的挑战。NextGen是对传统空中管理观念的完全意义上的变革。从功能层面分析,NextGen实现对空中管理三个核心功能(导航、通讯、监控)的变革;从概念层面分析,NextGen赋予了地空系统自动控制理念。NextGen成为ATC向ATM过渡的基础环节,实现从以人为操作为主的CNS向以卫星导航、数字通信、先进自动化技术和网络大容量为特征的新型系统的过渡。综上所述,航空事业的迅猛发展,对航空通讯提出了深刻挑战——EUROCONTROL组织预测,现有通信方式在2015~2020年达到系统容限^[6]。

综合上述分析,发展现有无线技术的替代技术已经成为当今航空发展的必然要求。以多载波为技术特征可实现频率重叠共用的B-VHF数据链应运而生。

B-VHF数据链源于欧洲委员会所资助的第六项框架行动,于2004年1月正式启动。其主要目标包括:形成B-VHF的可操作概念并部署实施方案、(通过试验测试和理论研究)分析可利用频段、开展基于多载波的设计研究、实施物理层、链路层以及高层的软件设计以及B-VHF系统仿真研究工作。B-VHF研究项目还建立了首个B-VHF与VDL2和模拟话音系统干扰研究实验室,并初步证实了两者在频域中共同存在的可行性。

在国际民航组织(ICAO)空中交通C工作组(ACP WG-C)的倡议下,美国FAA和欧洲EUROCONTROL组织于2005年共同发起了FCS项目。FCS项目开展了可应用于未来无线航空通信的技术研究,并分析了可支持长期航空移动地空通信运行概念的候选通讯技术。FCS采用了技术和非技术两类评判标准,其中技术标准包括ATS数据链路要求、AOC数据链路要求两项内容,非技术标准包括技术成熟度、标准化水平、设备成本、安全性、频带有效性以及是否可平滑过渡等八项内

容^[7]。FCS 将 B-VHF 作为一种宽带地空无线通信候选方案提出,为以后的 B-VHF 分析和评估工作准备了条件。

2 B-VHF 系统架构

作为陆地通信系统,B-VHF 在网络架构上采用了类似于地面通用移动系统的蜂窝结构,分为地面站侧和空中移动侧(飞机侧)设备。其中,地面站是网络的控制器,为 B-VHF 蜂窝提供多种业务服务。每个蜂窝占用一个指派的宽带信道,在物理上承载地空通信容量。B-VHF 系统可提供语音和数据链的广域业务,其可支持基于动态空中管理的未来 ATM 业务。

2.1 B-VHF 系统协议架构

B-VHF 支持前向链路广播通信和双向链路的点对点通信,采用基于 TDD 的时分双工方式,正向链路(Forward Link,简称 FL)和反向链路(Rreverse Link,简称 RL)采用不同时隙。数字化语音、用户数据和系统数据块在短帧中传输。短帧类型包括携带用户信息的 FL 和 RL 帧、携带系统信息的 FL 广播帧和 RL 随机接入帧等。短帧分为奇数帧和偶数帧两种,在随机接入帧格式上有所区别,由短帧可组合成多帧、超帧、巨帧等帧结构,如图 1 所示。短帧(无论奇数帧还是偶数帧)长为 54 ms,广播帧占用 24 ms,一个超帧由 1 个广播帧、2 个奇数帧和 2 个偶数帧所组成,故一个超帧帧长为 $24 + 2 \times 54 + 2 \times 54 = 240$ ms。一个巨帧由 8 个超帧组成,其帧长为 $240 \times 8 = 1\ 920$ ms。

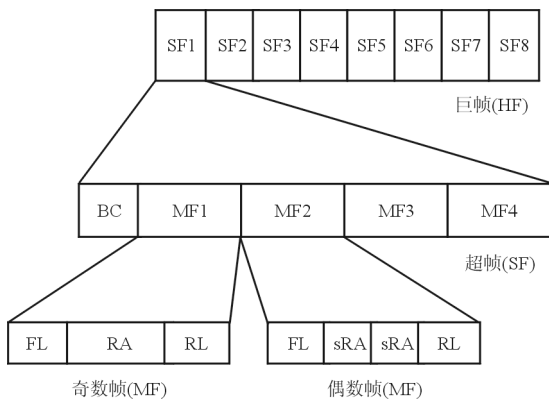


图 1 B-VHF 帧结构

Fig.1 B-VHF frame structure

B-VHF 协议栈包含物理层、数据链路层和网络层三层协议结构,如图 2 所示。

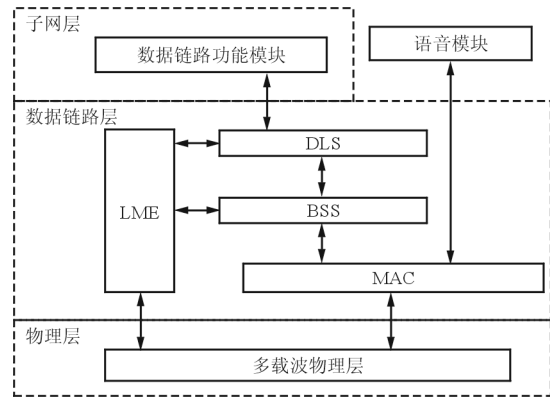


图 2 B-VHF 协议结构

Fig.2 B-VHF protocol stack

B-VHF 物理层采用基于 OFDM 的多载波技术,可与现存的窄带通信方式共用航空 VHF 频段。B-VHF 利用可分配的蜂窝的宽带信道 OFDM 载波集实现多载波通信,可利用的载波星座取决于在本蜂窝以及相邻蜂窝的宽带信道内窄带系统收、发信机的频谱结构。

B-VHF 物理信道是通过一组已调 OFDM 载波合并形成的,一个特定信道的载波可以从不相邻的 B-VHF 可用频段中选取。在 B-VHF 前向链路中,应用了码分多址技术,以增强在窄带干扰环境下通信系统的强壮性。在反向链路中,飞机与地面站使用相同的 OFDM 载波集,但不同飞机所使用的载波互不交叠。

B-VHF 数据链路层拥有多种类型的逻辑信道和传输信道,以便有效地实现用户信息的物理层映射。数链层包含多个 MAC 实体,在存放和提取物理帧信息时,完成本地媒体接入。数链层还包括 BSS、DLS、LME 等子层,主要完成逻辑层、传输层和物理层用户数据映射,实现流控制和数据完整性验证(前向纠错编码和循环冗余校验),提供对网络初始化和越区切换等系统功能的支持。

B-VHF 网络层为 ATN 提供接口,可有选择地提供 IP 支持。

2.2 B-VHF 系统业务架构

B-VHF 可支持广泛的通信业务,包括语音和数据链服务。具体业务可按照相似性划分集合,配

置服务标准(QoS)要求。未来出现的新业务通过集合映射,可映射到标准集合上,并自动得到 B-VHF 系统的支持。

B-VHF 系统业务集合类型包括集群语音服务、广播语音服务、可选择语音服务(系统可选)、确认性数据链路服务、广播数据链路服务、非确认性数据链路服务^[8]。

类似于目前的模拟话音系统,集群和广播两类语音信道固定分配给空中交通管制(Air Traffic Control,简称 ATC)部门使用,以便满足 ATC 在服务建立时间上的严格业务要求。其中,反向链路的集群语音信道由飞行员以 PTT 方式共享;前向链路固定分配给控制端,可打断反向链路正在进行的集群通话过程,具有高优先级。

与集群语音信道相反,可选择语音信道在地面用户或飞行员中任何一方发出的外部请求触发下,由地面站动态分配。尽管可选择语音服务不是系统必选的类型,但由于其是 AOC 语音通信的一种有效实施方案,因而在 B-VHF 系统设计中得到广泛应用。

确认性数据链路服务可满足 ATN 地空数据链路需要,即既可用于 AOC 应用,也可用于 ATM 应用。其可提供对目前以及未来的数字链路服务支持。

通过广播数据链路服务,B-VHF 数据链地面站可向飞机提供飞行信息,特别是空中交通信息。

非确认性数据链路服务主要应用于已约定飞行参数的情况,例如,在飞机已根据飞行线路与特定地面站进行了通信约定的情况下,可采用非确认性数据链路服务。

3 B-VHF 的关键技术

本质而言,B-VHF 的产生和发展是建立在重叠覆盖思想基础之上的。所谓重叠覆盖是指在 VHF 航空频段(118~137MHz)内的某一具体时间段内,并非所有的信道(VHF 航空频段现已被分割成以 25 kHz 为带宽的 760 个信道,分配给 ATC 与 VDL 等业务)都被目前的模拟话音和数据链系统所占用,而是经常存在空闲段。B-VHF 系统正是应用多载波技术,利用这些频率空隙进行信息传送,如图 3 所示。通过控制子载波的通断,B-VHF 系统可灵活地改变频率分配。

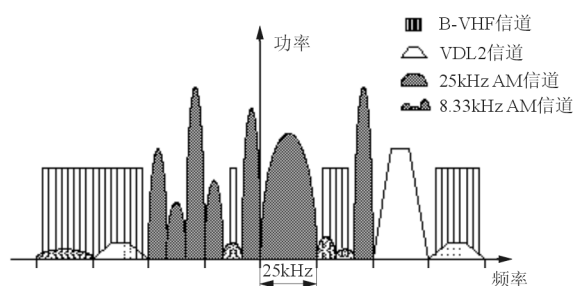


图 3 B-VHF 重叠覆盖

Fig. 3 B-VHF overlay

重叠覆盖的可行性已经被诸多研究所验证,其中 S. Brandes 等^[9]在考虑服务质量的前提下,引入话音和数据两种服务类型建立了 B-VHF 协议栈模型,通过对物理层和高层的仿真验证了重叠覆盖的可行性。

从频谱分配的灵活性和有效性考虑,OFDM 是最适合 B-VHF 系统的多载波技术,并成为其通信标准。B-VHF 通信系统正是基于 OFDM 技术的宽带全双工蜂窝通信系统,可通过 64 QAM 或 QPSK 数字调制方式实现。地面站发送端采用 CDMA 与 OFDM 相结合的 MC-CDMA 技术,飞机发送端采用 FDMA 与 OFDM 相结合的 OFDMA 技术^[10-11]。

为了实现重叠覆盖,必须实现对子载波动态、有效地分配。而实现子载波动态分配的前提条件是对 VHF 频谱作充分的估测、感知。同时,由于采用重叠覆盖,B-VHF 系统和现有 VHF 系统间可同时共存,不可避免地出现两种系统间的相互干扰。如何抑制系统间干扰不仅关系到 B-VHF 能否实现有效传输,也关系到加入子载波后的现有系统能否正常工作。

决定于重叠覆盖的技术思想,系统间干扰抑制和频谱感知成为 B-VHF 的两大关键技术,并且二者相互影响、互为制约。

3.1 干扰抑制技术

干扰抑制是通信系统中的一个基本性问题,其目标是通过对于干扰的抑制,提高系统接收端的信干比,从而提高信号的接收质量。通过干扰抑制可提高系统的可靠性。

由于以重叠覆盖为基础,B-VHF 的干扰抑制较之普通系统更为复杂。系统间干扰主要存在两

方面的问题:一方面,B-VHF对VDL2和模拟语音系统形成干扰;另一方面,VDL2和模拟语音系统对B-VHF形成干扰。B-VHF具有功率谱密度低的特点,对其它通信系统的信号干扰较小,因此应将重点放在抑制VDL2和模拟语音对B-VHF的干扰上。研究表明,射频干扰抑制技术是实施第二种干扰抑制的有效手段^[12-13]。

3.1.1 射频干扰抑制的主要方法

目前,射频干扰抑制主要有模拟和数字两种处理方法。模拟射频干扰抑制是在A/D转换前,在突出的NBI处进行阻带滤波,抑制强NBI通过。这种方法比较简单,但是阻带滤波会引起OFDM信号的载波间干扰(Inter-carrier Interference,简称ICI)和码元间干扰(Inter-symbol Interference,简称ISI),降低接收的可靠性。因此,数字处理是射频干扰抑制的主要方法,其又可分为时域和频域两种^[14]。

(1) 时域处理方法

在时域处理中,窄带干扰(Narrow Band Interference,简称NBI)可采用在接收机端加窗函数的方法加以抑制。窗加在DFT处理之前,其可降低NBI的旁瓣,从而减少由DFT处理所引起的OFDM子载波上NBI功率的不均匀,即降低所谓的“泄露效应”^[15]。

接收机窗函数设计的基本原则是利用循环前缀中的冗余抽样信息,使所设计的窗在不影响数据信号的前提下,达到抑制NBI信号的目的。

最常用的窗实现方案是采用固定窗方式,例如升余弦窗、汉明窗等。固定窗方式不需要采用自适应算法和训练序列,也不需要NBI估计,是一种简单易行的实现方式,然而其不能跟踪NBI的变化。与之相反,自适应窗函数可实现NBI最小化,然而相比于固定窗,运算量开销大,具有很大的复杂性。

对于干扰抑制系统,加窗位于模数转换之后和离散富氏变换(DFT)之前,如图4所示。在窗处理前,时域抽样被分组成为OFDM符号,并移除若干衰减信道所需要的循环前缀。假定移除后,保留了 μ 个循环前缀抽样。作适当保留是为了保证在接收机窗处理后,子载波具有正交性;否则,若全部移除,OFDM子载波将失去正交性,从而引起严重的载波间串扰,导致OFDM不能正常解调。

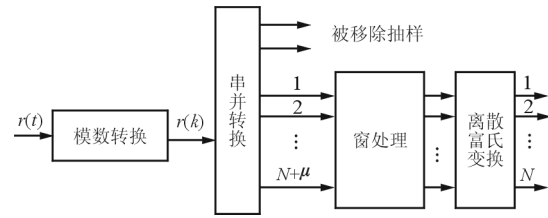


图4 B-VHF加窗接收机

Fig. 4 OFDM receiver with window

在保证不失去子载波正交性的前提下, μ 的选取存在下述矛盾关系:一方面,增加 μ ,可以加大窗口,使窗旁瓣快速衰落,提高接收机对NBI的抑制能力,提升系统的信噪比,从而实现提高系统可靠性的目的;另一方面,增加 μ ,将引起OFDM符号的抽样增加,从而增加了通讯开销,降低了频谱利用率,导致系统有效性下降。

(2) 频域处理方法

与时域处理不同,频域抑制主要是基于对未使用子载波作NBI测量来完成的。被测量的OFDM子载波称为估测子载波,其用来估算使用中子载波的NBI。频域NBI抑制单元如图5所示。

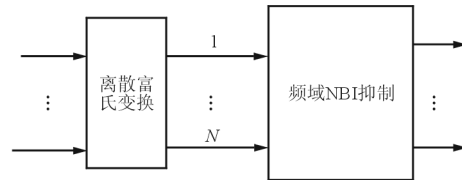


图5 频域NBI抑制单元

Fig. 5 The frequency domain NBI suppression unit

在DFT处理之后,在 N 个子载波上的接收信号 r 为: $r = x + n + i = (r_1, r_2, \dots, r_N)^T$ 。其中, x 为通过衰减信道后的B-VHF信号, n 为高斯白噪声(AWGN)信道噪声, i 为窄带干扰。

若以 \hat{i} 表示NBI估计,则可计算接收信号估计 \hat{r} : $\hat{r} = r - \hat{i} = x + n + i - \hat{i}$ 。

若第 k 个OFDM子载波为估测子载波,则 $x_k = 0, r_k = n_k + i_k$ 。当 $i_k < n_k$ 时,有 $i_k \approx r_k$,从而估算出窄带干扰,并以此估计值来计算OFDM使用子载波的NBI。

由于若 $\hat{i} = i$,则可得: $\hat{r} = x + n$;在理想情况下,窄带干扰可被完全估计。事实上,NBI估计是否一致主要决定于子载波频点与NBI的中心频率的临近程度,若二者完全一致则可实现理想估计。

3.1.2 干扰抑制的对比分析

模拟和数字两种方法可以同时应用于同一接收机中,前者用于消除强 NBI,后者用于对弱 NBI 的进一步消除。二者在系统中的位置和所发挥的作用是不同的:①模拟方法用于 A/D 之前,数字方法用于 A/D 之后;②模拟方法用于对有限的强干扰进行抑制,数字方法用于精细的干扰抑制。

在模拟干扰抑制的设计中,阻带不可过多,否则系统可靠性将会急剧下降。通常,强干扰强度在数量级上应高于 OFDM 信号。此外,不同于数字方法仅用于干扰抑制,模拟方法还具有减小 A/D 动态范围的作用,从而为模数转换准备条件。

对于以子载波为 NBI 中心频点的系统,宜优先采用数字频域干扰抑制,以提高频带利用率。而对于其他系统,宜采用数字时域干扰抑制方法,此时,正交性(通过保留的循环前缀抽样个数 μ 体现)和频带利用率的权衡是工程设计中的一个重要问题。

除了以上讨论的射频干扰抑制技术外,在调制、编码的过程中也可实现干扰抑制,例如采用基于多次迭代的窄带信号解调、基于编码的 OFDM 等方法^[16-17]。上述方法是通过对调制、编码的改进实现的,不属于独立的干扰抑制技术,由于篇幅所限,这里不再赘述。

3.2 频谱感知技术

对于无线通信系统而言,频率资源是有限而不可再生的,因此如何提高频率利用效率是系统设计的主要目标之一。对于以交通控制为主要业务的空中 VHF 频段而言,频率使用效率尤为重要。

通过对空中 VHF 频段的研究发现,某些频段在大多数时间内是空闲的,上述频段被称为“频谱洞”^[18]。频率洞可被定义为已分配给某特定用户(首用户),而在固定时间和地点没有被使用的闲置频率资源。频率洞的存在,为 B-VHF 利用频率空闲重新分配频率,实现重叠覆盖提供了可能。

基于认知无线电(Cognitive Radio,简称 CR),通过频谱感知技术可有效地对频率洞进行发现。在此方面,R. Fantacci 等^[19]基于非协同频谱感知(Noncooperative Spectrum Sensing)技术,提出了一种航空 VHF 实现方案,可以有效地检测空闲信道,实现信道分配。

目前,频谱感知技术有匹配滤波器法、能量检测法和联合检测法等方法。

(1) 匹配滤波器方法

匹配滤波器方法以最大信噪比为准则,可获得最佳接收效果,是频率感知的理想方法。但是匹配滤波需要对所有可能存在的系统具有脉冲成型的先验知识,通常难以实现,多用于理论分析。

(2) 能量检测方法

能量检测方案可通过比较所估算的能量谱密度(Power Spectral Density,简称 PSD)和功率门限来实现,如图 6 所示。

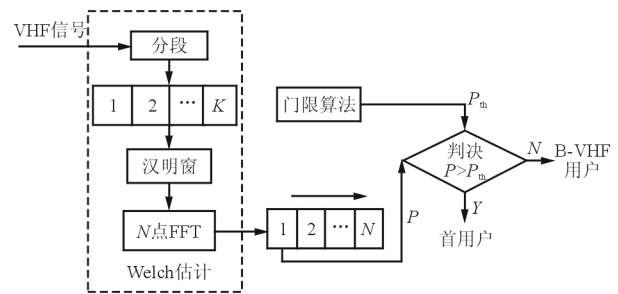


图 6 能量检测算法

Fig. 6 The algorithm based on energy detection

PSD 估算有经典谱估计和现代参数谱估计两种方式,图中采用了经典谱估计中的 Welch 平均周期图法构造检测器^[20]。

将接收到的长度为 N 的样本空间作分段,等分成 K 段,每段 M 个样本点数。通过分段,使周期图修正为 Bartlett 平均周期图,可对功率谱作渐进无偏一致估计,但对于固定长度样本序列不能同时获得小的偏倚(高分辨率)和小的方差(高可靠性)。为了在保持一定主瓣带宽的同时,加快旁瓣衰减速度,从而改善周期图偏倚,可在样本分段基础上,作加窗处理,形成 Welch 平均周期图,图 6 中采用了汉明窗。

在能量检测中,门限可分为动态和静态门限两种。其中动态门限可通过动态跟踪样本序列,依据相关动态算法形成,具有较高的运算量;静态门限是依据先验试验和仿真数据所计算出的经验值,具有开销小的优点,但不可动态跟踪。门限值的选取,是系统设计的关键点之一,存在着如下权衡关系:门限选择过高,有利于减少干扰,但会降低频谱利用效率;门限选择过低,可达到高频谱利用率,但会引入过多的干扰,降低系统的可靠性能。

虽然能量检测的实现较为简单,但是其门限易受到干扰、噪声的影响,从而使系统较为脆弱。即使采用自适应的门限方法,也可能由于带内干扰而使门限混乱。从本质上讲能量检测属于一维检测,不能对调制信号和干扰信号进行分离,故不能运用自适应处理消除干扰。

为了提高检测的鲁棒性,人们基于能量检测提出了一种循环平稳特征检测方法。通常情况下,已调制信号经常伴有调制载波、脉冲序列以及循环前缀。因此,调制信号在统计上经常表现为具有周期性特征^[21-22]。而码元序列一般可以视为平稳随机过程。由于调制信号的周期性,其频谱具有一定的冗余度,表现为谱线分离并且相关。而在相关谱线中,可提取特定调制信号的定时相位和频率信息。这意味着特定的调制方式(例如 QPSK)具有特定的频谱相关函数,而干扰和噪声表现为无频域相关性。利用上述特征可以在检测中将随机信号从干扰和噪声中分离,并能识别调制的类型。

循环平稳特征检测可以通过循环平稳特征检测框图实现(如图7所示)。同时,可将能量检测算法(如图6所示)简化为框图形式,如图8所示。经过对比发现,二者的根本区别是循环平稳特征检测加入了频域相关运算,相应地判决由能量判决转变为相关判决。若仅用于判决是否信号存在,相关判决门限可设定为0。



图7 循环平稳特征检测框图

Fig. 7 Implementation of a cyclostationary feature detector

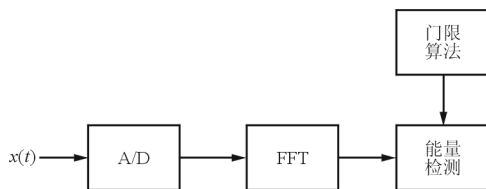


图8 能量检测框图

Fig. 8 Implementation of an energy detector

由于引入了频域相关,循环平稳特征检测在本质上已经是二维检测(事实上,能量检测可视为循环平稳特征检测的一维特例),可以克服能量检测中门限脆弱的缺陷,提升了抗噪性能。

无论是能量检测还是循环平稳特征检测,都不

能对抗多径效应和解决隐终端问题。因此,人们提出了多用户联合检测技术,即认知网络中的相邻节点通过彼此交换信息达到减少干扰影响、提高首用户识别概率的目的。由于联合检测不仅要求多个用户的自检测,还要求交换检测数据和进行联合判决,在提高检测性能的同时也不可避免地增加了带宽无线资源和运算、存储等软硬件的开销。

(3) 联合检测法

目前,联合检测判决算法主要有硬判决合作算法、加权合作算法、随机矩阵算法等。

①硬判决合作算法 该算法最为简单,可通过将相邻节点的判决概率相与获得;其可解决单用户频谱感知中的隐藏终端问题,但该方法易受到信道衰落的影响,仅适用于衰落特性好的信道。

②加权合作算法 为了提高抗衰落能力,人们在硬判决基础上提出了加权的思想。最为典型的就是信噪比加权,即利用各认知用户的信噪比构造其加权因子。此外,还有信任度、信噪比选择等加权算法。

③随机矩阵算法 基于RMT随机矩阵理论,该类算法最具代表性的三种频谱感知算法,分别是MED算法、MME算法和MMED算法,其不同之处就在于检测统计量的矩阵构造不同。MED算法克服了门限固定的缺点,但是受到噪声不确定性的影响。MME算法有效地克服了噪声不确定性的影响,但门限固定不变的。而MMED算法克服了上述两种算法的缺点,不仅具有感知性能更好以及对噪声不敏感等优点,而且在认知用户较少、样本较小的情况下,也可以获得较好的检测性能。

传统的随机矩阵算法一般将所有合作用户的全部数据进行融合。而在实际感知中,由于信道、速度等因素的影响,参与合作的多用户本地感知数据可能存在较大差异,存在不均衡性。通过等功率分配、用户集合势等方法,对具有较好感知能力的用户进行筛选,可以有效地提高合作频谱感知的检测性能^[23-24]。

4 B-VHF 地—空通信系统展望

在航空无线宽带通信领域,多种候选方案并存。相对于CDMA2000、SDLS等方案而言,基于MC的宽带B-VHF方案具有以下优势:首先,B-VHF系统以多载波技术为基础,可实现频率重叠

共用方案,可实现与现行系统的共存和向下一代平滑过渡;其次,多载波技术已被试验证实,是陆地宽带广播标准中数字语音广播(Digital Audio Broadcasting,简称 DAB)和陆地数字视频广播(Digital Video Broadcasting-Terrestrial,简称 DVB-T)的一种高效的宽带系统,因此可以满足未来空中业务发展和大网络容量需求的要求;最后,MC 技术是最有发展前景的 4G 宽带关键技术。目前,除了可应用的 DAB 和 DVB-T 部件外,4G 中 MC 的其他相关技术也正在研发过程中。因此,基于 MC 的未来航空通讯系统,有望得益于来自陆地无线通讯领域的软硬件研究成果。基于上述原因,B-VHF 极有可能发展成为未来国际航空领域的主流通信体制。

在我国,民用航空运输总周转量已跃入世界前列。从主要机场的飞机起降架次看,飞行流量也大幅度增加。为了适应我国民航发展的需要、促进民航事业的发展,顺应世界航空发展潮流,经国务院、中央军委批准,国务院、中央军委空中交通管制委员会于 1998 年制订并颁发了《我国发展新航行系统总体规划》,为我国军、民航未来空管设施建设指明了方向,确立了发展步骤和原则。通信方面重点发展甚高频/特高频(VHF/UHF)空空/空地数据链及其配套设备,适应传输 ADS 信息的需要,发展高频(HF)空空/空地数据链;导航系统要求在保留完善独立自主的导航体系,在有条件的飞机上加装支持 ADS 需要的 GNSS 设备;监视方面,根据军航自身的需要和特点发展 ADS,满足新一代空中交通管理的要求;空中交通管理方面,要求充分利用新的通信、导航、监视设备提供的先进手段和信息资源,改造和完善军航现有管制中心设备,最终建成与民航配套发展的、满足未来航空运输持续发展需要的空中交通管理与服务系统。

目前,我国民航所应用的主要数据链方式是 ACARS,正在积极进行 VDL2 过渡。B-VHF 作为 VDL2 的后一代宽带技术,可以有效提高通信网络容量,改善和扩展服务业务,并可以实现与我国现有 VHF 通信体制的共存,以及达到向全 B-VHF 体制的平滑过渡。因此,在发展 VDL2 的同时,有必要将目光瞄准下一代通信技术,开展 B-VHF 关键技术的研究和仿真实验,使我国在该领域紧跟世界发展方向。在实际应用中实现跨越式发展,走中

国特色的航空发展道路。

5 结束语

B-VHF 是在当今民航发展的大背景下,为了适应不断增长的 ATM 流量需要,在国际上提出的一种宽带解决方案。B-VHF 的核心思想是重叠覆盖,即以现行的固定信道航空通信体制为基础,利用空闲信道进行信息传送,从而达到在不增加 VHF 频段范围的条件下提高业务带宽的目的。

干扰抑制和频谱感知是 B-VHF 的两大关键技术。前者着重于解决系统有效性问题,后者着重于解决系统可靠性问题。两者互为联系,互为制约。射频干扰抑制是干扰抑制的主要技术,一般需要模拟和数字方法的配合使用;在 A/D 转换前应用模拟方法减小动态范围和抑制大幅干扰,在 A/D 转换后应用数字方法进行精细干扰抑制。能量检测法是频谱感知中简单易行的方法,但门限易受干扰。通过加入相关运算形成循环平稳特征检测,可提高检测的鲁棒性。在多径信道中,必须进行联合检测,才能达到良好的频谱感知效果。

由于 B-VHF 具有频谱利用率高、可与现行系统(AM-DSB、ACARS 以及 VDL2)共存并可实现平滑过渡的特点,其极有可能成为未来的民用航空通信体制。

参考文献

- [1] Schnell M, Haas E, Sajatovic M, et al. B-VHF-an overlay system concept for future ATC communications in the VHF band[C]//The 23rd Digital Avionics Systems Conference. Salt Lake City, UT, USA: IEEE, 2004: 1. E. 2-1-1. E. 2-9.
- [2] Sajatovic M, Rihacek C, Haindl B, et al. Broadband VHF project achievements and flow-on activities[C]//Integrated Communications, Navigation & Surveillance Conference. Herndon, VA, USA: IEEE, 2007: 1-8.
- [3] Malvern A. Improvements to VHF air-to-ground communication[C]//IEE Colloquium on Air-to-Ground Communications. London, UK: IET, 1997: 3/1-3/7.
- [4] Kitaori J. A performance comparison between VDL mode 2 and VHF ACARS by protocol simulator[C]//28th Digital Avionics Systems Conference. Orlando, FL, USA: IEEE, 2009: 4. B. 3-1-4. B. 3-8.
- [5] Stroup R L, Schaffer G, Whittaker J, et al. Nextgen air-ground integration challenges[C]//Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference. Herndon, VA, USA: IEEE, 2010: G1-1-G1-9.

- [6] Tu H D, Tsuda Y, Shimamoto S, et al. The next generation air to ground communication system for air traffic control[C]//IEEE/ACIS International Conference on Wireless Communications and Applied Computational Electromagnetics. Honolulu, HI, USA: IEEE, 2005: 1010-1013.
- [7] Gilbert T, Jin J, Berger J, et al. Future communication study technology investigations conclusions and recommendations[C]//Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference. Bethesda, MD, USA: IEEE, 2008: 1-13.
- [8] Zhang C, Han H. Broadband VHF communications via non-continuous OFDM[C]//The 28th Digital Avionics Systems Conference. Orlando, FL, USA: IEEE, 2009: 4. B. 5-1-4. B. 5-10.
- [9] Brandes S, Schnell M, Rokitansky C H, et al. B-VHF-selected simulation results and assessment[C]//The 25th Digital Avionics Systems Conference. Portland, OR, USA: IEEE, 2007: 1-12.
- [10] Bolas E, Carvalho N B D, Vieira J N, et al. Opportunistic usage of maritime VHF band-deployment challenges for a new regulatory framework[J]. *Wireless Engineering and Technology*, 2014, 5(1): 1-10.
- [11] Sajatovic M, Rihacek C, Haindl B. Operational concept for multi-carrier broadband VHF communications[J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2008, 23(2): 3-10.
- [12] Cosovic I, Brandes S, Schnell M, et al. Physical layer design for a broadband overlay system in the VHF band[C]//The 24th Digital Avionics Systems Conference. Washington, DC, USA: IEEE, 2005: 1. C. 1-1-1. C. 1-10.
- [13] Brandes S, Cosovic I, Schnell M. Techniques for ensuring co-existence between B-VHF and legacy VHF systems[C]//IEEE Aerospace Conference. Big Sky, MT, USA: IEEE, 2006: 1-9.
- [14] Bingham J A C. RFI suppression in multicarrier transmission systems[C]//Global Telecommunications Conference. London, UK: IEEE, 2002: 1026-1030.
- [15] Redfem A J. Receiver window design for multicarrier communication systems[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2002, 20(5): 1029-1036.
- [16] Sahin M E, Guvenc I, Arslan H. An iterative interference cancellation method for co-channel multicarrier and narrow-band systems[J]. *Physical Communication*, 2011(4): 13-25.
- [17] 刘伟伟, 刘春艳, 高芳芳. 基于COFDM系统的窄带干扰抑制方法研究[J]. *信息技术与信息化*, 2017(4): 140-143.
- Liu Weiwei, Liu Chunyan, Gao Fangfang. Research on narrow-band interference suppression method based on COFDM system[J]. *Information Technology and Informatization*, 2017(4): 140-143. (in Chinese)
- [18] Haykin S. Cognitive radio: brain-empowered wireless communications[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2005, 23(2): 201-220.
- [19] Fantacci R, Tani A. Performance evaluation of a spectrum-sensing technique for cognitive radio applications in B-VHF communication systems[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2009, 58(4): 1722-1730.
- [20] Cabric D, Tkachenko A, Brodersen R W. Experimental study of spectrum sensing based on energy detection and network cooperation[C]//TAPAS'06 Proceedings of the first international workshop on Technology and policy for accessing spectrum. New York, NY, USA: ACM, 2006: 527-533.
- [21] Shahnawazshaikh M, Gupta K. A review of spectrum sensing techniques for cognitive radio[J]. *International Journal of Computer Applications*, 2014, 94(8): 1-5.
- [22] 包志强, 史园园. 认知无线电合作频谱感知算法研究[J]. *无线电通信技术*, 2015(4): 24-30.
- Bao Zhiqiang, Shi Yuanyuan. Review of cooperative spectrum sensing algorithm for cognitive radio[J]. *Radio Communications Technology*, 2015(4): 24-30. (in Chinese)
- [23] Wang X Y, Jia M, Guo Q, et al. Detection performance analysis of spectrum sensing in cognitive radio networks with mobile secondary users[J]. *China Communication*, 2016(11): 214-225.
- [24] 申滨, 高凯, 黄晓舸, 等. 基于用户集合势估计的认知无线电合作频谱感知[J]. *重庆邮电大学学报: 自然科学版*, 2016, 28(5): 672-679.
- Shen Bin, Gao Kai, Huang Xiaoge, et al. User set cardinality estimation based cooperative spectrum sensing in cognitive radio[J]. *Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications: Natural Science Edition*, 2016, 28(5): 672-679. (in Chinese)

作者简介:

郜林(1971—),男,博士,讲师。主要研究方向:民航通信关键技术、通信网络仿真建模。

王朕(1981—),男,博士,讲师。主要研究方向:多维信息重建与可视化、通信信号处理。

(编辑:赵毓梅)