

超高速移动空-空宽带通信网及其物理层关键技术

丁志中 王定良 傅银玲 夏雪

(合肥工业大学计算机与信息学院, 合肥, 230009)

摘要: 随着航空事业的迅速发展和空中通信终端的日益增加, 构建支持超高速移动空中宽带通信网络已成为未来航空通信和军事通信发展的迫切需求。本文首先简要概述航空通信网络现状和发展趋势, 在此基础上指出实现超高速移动空-空宽带通信网络所面临的支持超高速移动、支持高数据传输速率、支持远距离单跳链接、支持大规模自组网和多用户访问机制等挑战性问题, 并分析其相互制约关系。最后重点讨论空-空宽带通信网物理层关键技术及其研究现状, 包括调制技术、正交频分复用的峰均功率比抑制、频偏估计、信道估计与信道建模等。

关键词: 超高速移动通信; 无线 Ad hoc 网络; OFDM 调制; 频偏估计; 信道估计

中图分类号: TN915 文献标志码: A

Air to Air Wideband Network with Ultra-High Node Velocity and Its Key Technology of Physical Layer

Ding Zhizhong, Wang Dingliang, Fu Yinling, Xia Xue

(School of Computer and Information, Hefei University of Technology, Hefei, 230009, China)

Abstract: With the rapid development of aviation communications and the increasing number of airborne terminals, it is highly demanded to build up air to air wideband ad hoc networks supporting ultra high-speed mobility both in civil and military aviation systems. Here, the present situation and the development trend of aviation communication networks are briefly outlined. On the basis of it, the challenging issues of constructing such networks are presented, including the support of ultra high speed mobility, high data transmission rate, long distance single-hop links, large-scale Ad hoc networking, multiple user access mechanism, as well as their restricted relationship. Finally, physical layer key technologies and the related research progress for wideband airborne Ad hoc networks are reviewed, including modulation technology, peak to average power ratio suppression in OFDM, frequency offset estimation, channel estimation and channel modeling.

Key words: ultra high speed mobile communication; wireless Ad hoc network; OFDM; frequency offset estimation; channel estimation

引言

飞机、导弹等飞行器之间直接构成宽带通信网是未来航空通信和军事通信的发展需求和发展方向

之一。这种不依赖地面基站和通信卫星等基础设施的自组通信网络在民航通信和军事通信中具有重要的应用前景。例如,民航客机黑匣子的数据可以通过飞机-飞机或飞机-卫星间的通信产生数据备份;接近机场上空的飞机可以通过相互间的直接通信实现调度协调,提高着陆的安全性。在军用领域,作战机群间的联网宽带通信对于把握战机有着重要的意义。因此,无论在民用还是军用领域,构建不依赖于基础设施的空-空宽带通信网络都有着迫切的需求。

空中通信网络一般可以分为3层:星载层、机载层、地面层,如图1所示。网络控制中心或交换中心等基础设施通常建立在地面层和星载层。本文所讨论的空-空宽带通信网是建立在机载层的自组通信网络(Ad hoc网络),它支持网络节点的超高速移动和宽带通信。

本文主要讨论3个方面内容。首先简要概述航空通信网络现状和发展趋势,在此基础上指出实现超高速移动空-空宽带通信网络所面临的超高速移动、高数据传输速率、远距离单跳链接、自组网和多用户访问机制等问题,并分析其相互制约关系。最后重点讨论空-空宽带通信网物理层关键技术及其研究现状,包括调制技术、正交频分复用的峰均功率比抑制、频偏估计、信道估计与信道建模等。

1 航空通信网络现状和发展趋势

现有航空通信网络可以实现空-地、空-星和空-空之间的通信,但其实现空-空通信的主要特征是通过地面设施或星载设施构成通信链路和网络,即为有基础设施的网络通信系统,或者通过机载无线电台构建点对点的窄带语音通信系统。因此无论是在民用领域还是在军用领域,虽然现有航空通信系统已经具有较强的功能,但是完全基于机载设备的空-空宽带通信网络目前仍然未能实现。

随着航空事业的迅猛发展,构建支持超高速移动的空中宽带通信网络是未来航空通信和军事通信的发展需求和发展规划,欧美国家的航空通信发展正朝着这一方向迈进。欧洲航空安全组织(EUROCONTROL)和美国联邦航空管理局(Federal aviation administration, FAA)联合启动了 AP17(Action Plan 17)行动计划^[1],该计划的主要目的是定义未来空中交通服务和航线操作控制,它将整个航空管理、服务和通信系统的演进过程分为两个阶段,一直持续到2035年以后。AP17定义未来空中交通管理的一个重要理念变化是从地面控制(地-空通信)转向空中控制(空-空通信),然而,AP17中所定义的概念都是假设已有地-空和空-空数据链路存在,事实上这样的数据链技术仍然在定义和考察中,如文献[2]在探讨协议层的实现问题。美国著名的军工企业 Rockwell Collins 最近推出的 TRUNET 地-空网络通信方案^[3],可以满足多重任务需求,其使用者同时可以完成地-空、空-空、单兵作战多种模式的多点通信。在空-空作战场景中,部分融入了 Ad hoc 网络功能。作为美军新一代的战术数据链系统,该公司推出 TTNT(Tactical targeting network technology)系统^[4]。TTNT采用安全的 Mesh 网络结构实现空-空语音和视频传输,其支持的最高移动速度可达8马赫。它丢弃了 Link16中的 TDMA(Time division multiple access)机制,消除单点卫星通信系统的脆弱性。上述计划和系统仍处在研究和研制阶段。在中国实现超高速移动空-空宽带通信网仍存在有待研究和解决的技术问题。

2 超高速移动空-空宽带通信网络所面临的问题

实现由飞机、导弹等空中飞行器直接构成的超高速移动空-空宽带移动通信网,还存在一些特殊的

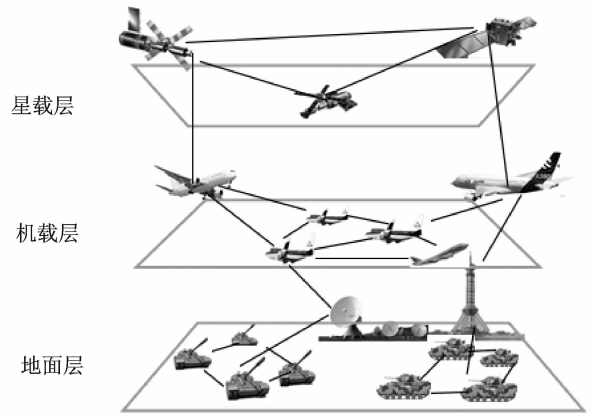


图1 空中通信网络的三层结构

Fig. 1 Three layers of air communication networks

需求问题。

(1) 支持超高速移动

在空中-空通信的一些特殊应用场合,网络节点的相对移动速度可能达到数个马赫,其多普勒频移及相关的通信技术问题是现有公网移动通信技术及其标准所不能支持的。例如 LTE(Long term evolution) 技术所支持的最佳移动速度为 15 km/h 以下,虽然系统可以工作的移动速度为 150~500 km/h。若干技术标准和相应芯片设计的“理论”极限值也在这个范围。GSM(Global system for mobile communication) 所能支持的最大移动速度约为 360 km/h, WCDMA(Wideband code division multiple access) 最大移动速度约为 1 000 km/h。美国高通公司的芯片理论上可以支持的移动速度是 1 000 km/h, 极限速度约在 1 200 km/h。

移动通信系统在什么样的速度下可以被称为“高速”或“超高速”移动通信系统,目前尚没有统一的定义。本文参照全球高速公路最高限速值 140 km/h, 将支持 160 km/h 速度的无线通信称为移动通信;参照高速轨道运行的运行速度,将支持 500 km/h 速度的无线通信称为高速移动通信;参照超音速飞机的飞行速度,并考虑两架飞机相对飞行的场景,将支持 2 马赫(2 448 km/h)以上速度的无线通信称为超高速移动通信。

(2) 支持高数据传输速率

从未来应用需求看,空-空通信网不仅需要传输小数据量的文本命令信息或语音信息,同时应该支持任意两节点间的实时视频传输。视频传输在移动公网中已经不是问题,但是在空-空宽带通信网中,支持高数据传输速率和支持超高速移动及支持远距离单跳链接之间是相互制约的。一方面,节点移动速度上升后数据速率将大大降低,例如 LTE 支持的最佳移动速度仅为 15 km/h;另一方面,虽然提升工作频段可以显著增加带宽和速率,但视距传播特征会更加明显,甚至是唯一的传播途径,这将导致单跳通信距离急剧下降。

美国联邦通信委员会在其最新的年度宽带发展报告中重新定义了宽带标准:将下载速度从原来的 4 Mbps 调整到 25 Mbps,将上传速度由原来的 1 Mbps 调整到 3 Mbps。考虑到本文的应用场景和典型视频压缩编码标准的输出码率,本文中的宽带通信是指具有 2 Mbps 以上传输速率的通信系统。

(3) 支持远距离单跳链接

目前获得广泛应用的地面无线网络,其单跳通信距离一般假定在几米至几千米范围,然而,空中飞行器之间的距离通常在数十公里以上。例如空战中定义的作战空间为不小于 300 km 的半球空间,这意味着空中通信网希望的单跳距离应达到 300 km。

(4) 支持宽带 Ad hoc 移动网络

无线 Ad hoc 网络研究的热点期至少持续了十多年,然而,目前能够较为完整地支持自组网和多跳通信的技术标准只有 ZigBee,其空中接口标准是 IEEE 802.15.4,最高速率只有 250 Kbps,难以实现宽带通信,同时 ZigBee 也不是面向移动通信的技术。面向智能交通系统,2013 年 IEEE 发布了空中接口标准 IEEE 802.11p。它是在 IEEE 802.11a 基础上的修改版,其主要改进是对 Ad hoc 的支持和对移动性的支持,设计的最高移动速度为 160 km/h。为了支持这一移动速度,IEEE 802.11p 采用了相对简单的解决方案:成倍加大子载波间隔,相应地最高数据传输速率也随之由 IEEE 802.11a 的 54Mbps 降为 27Mbps。可见,尽管 IEEE 802.11p 可以满足宽带通信的需求,但是对移动性的支持远不能满足空-空宽带通信网的需求。

(5) 多用户访问机制问题

无论是 IEEE 802.15.4 还是 IEEE 802.11a/b/g/n/p,其 MAC 层均采用 CSMA/CA(Carrier sense multiple access with collision avoidance)技术。实际应用表明,当同时需要传输信息的节点数稍多时,网络性能明显恶化,时常表现出“反应迟钝”,其主要原因是当网络节点数上升时,碰撞的概率迅速上升。

另一方面,CSMA/CA的随机访问机制在保障用户接入方面也存在不足。因此实现空-空宽带通信网需要寻求更合适的多用户访问机制。

实现空-空通信网(尤其是军事应用领域的通信网),还存在安全链接、安全通信、抗攻击和抗入侵等重要问题^[5]。从“地面层-机载层-星载层”的3层互通来说,还存在机载层与地面层和星载层的链路接口的设计问题。

3 物理层关键技术

3.1 调制技术

调制技术是超高速移动通信系统中最为关键的技术,它在很大程度上决定了其他技术的解决方案,如多普勒频偏估计和补偿、信道均衡、多址技术等,甚至影响到射频功放。

3.1.1 发展概况

2G/3G/4G公网移动通信系统采用的数字调制技术主要有BPSK, GMSK, QPSK, $\pi/4$ -QPSK, HPSK, OFDM等。在线性高功率放大器取得突破性进展的以前,具有恒包络特征的MSK/GMSK是能兼顾功率放大器的首选技术,但其实现较为复杂,频谱效率较低。1986年线性高功放取得突破性进展后,简单易行的BPSK和QPSK又重新受到重视,并在此基础上形成峰均功率比(Peak to average power ratio, PAPR)和频谱利用率更好的OQPSK和HPSK。

由于OFDM调制在频谱利用率、抗多径衰落等方面的突出优点,因此被众多通信技术标准所采纳,例如:数字音频广播(Digital audio broadcasting, DAB)、数字视频广播(Digital video broadcasting, DVB)、数字用户线路(Digital subscriber line DSL)、WLAN—Wireless local area networks(无线局域网 IEEE 802.11a/b/g/n)、移动WiMAX—Worldwide Interoperability for Microwave Access(IEEE 802.16e)、个域网(IEEE 802.15.3)及LTE和LTE-advanced(4G)。然而,OFDM也具有显著的缺点:对频偏较为敏感,PAPR较大。在移动公网的上行链路中,较高的PAPR会使得用户手机的功放效率降低。为此,3GPP LTE-Advanced中提出了SC-FDMA(Single carrier FDMA)。

OFDM将一个给定带宽频段划分为若干个相互正交的子载波,在此基础上形成的多用户技术,各用户信道之间缺乏独立性。为了能在未来的无线网络中使用新技术(尤其是认知无线电技术),有研究者开始考虑OFDM的演进,提出基于滤波器组的多载波技术(Filter bank multicarrier, FBMC),以期形成一个能兼容OFDM的未来无线网的物理层技术。

3.1.2 OFDM调制的PAPR

实践证明,OFDM是宽带通信系统较为理想的选择。如果在空-空宽带通信网中采用OFDM调制,则必须充分考虑如何降低PAPR,否则它将严重限制单挑通信距离的提升。为了改善PAPR性能,研究者提出了很多方法,其中5种方法具有一定的影响力。

(1)限幅滤波法^[6]。该方法的基本思想是对于超过限幅电平的信号进行剪切,然后再进行滤波。限幅滤波法是最简单、应用最广的方法,但缺点是引入带内失真和带外辐射,导致频谱利用率下降和误码率上升。文献[7,8]提出了相应的改进方法。最近,文献[9]从节省功放功率角度研究了最佳剪切问题,文献[10]提出了迭代-剪切-滤波的优化方法。

(2)编码法^[11]。编码法利用线性分组码的思想将3 bit信息位映射为4 bit码字(最后1位是简单的奇偶校验码),然后从中选择PAPR较小的码字进行调制。该方法的缺点是需要搜索适合的码字和存储较大的编译码表。该方法提出后,纠错码和其他编码被纷纷引入,例如文献[12,13]。

(3)部分发送序列法(Partial transmit sequence, PTS)和选择映射法(Selected mapping, SLM)。PTS方法^[14]的基本思路是将 N 个符号分成 M 个子块,每个子块的子载波用一个相位因子进行加权,相位因子的选择依据是使得组合后信号具有最小的PAPR。子块分块有3种方法:相邻、交织和伪随机。PTS

方法的缺点是寻找相位因子增加了计算的复杂性,同时需要发送相位因子信息,以便接收端进行序列解调。为了解决这两个问题,很多学者提出了改进方法,例如文献[15,16]。与PTS类似,SLM方法^[17]也是将一个输入数据序列分别乘以相位序列,产生多个可选序列,然后进行IFFT运算,最后在多个序列中选取具有最小PAPR值的序列进行传输。SLM方法也受到其他研究者的关注^[18,19]。PTS方法比SLM方法具有更好的性能,但是传输相位信息所需的比特数也更多一些。

(4)非线性压扩变换^[20]。其基本思想是利用 μ -律曲线对弱信号进行扩展,保持峰值功率不变,从而降低PAPR。虽然该方法在原理上仍需进一步考察,但它简单有效,且有较好的性能。基于这一思想,文献[21]提出了其他的压扩方法。

(5)单音保留法(Tone Reservation, TR)和单音注入法(Tone injection, TI)。2000年Tellado J在其博士论文中同时提出了两种降低PAPR的方法:TR和TI^[22]。TR和TI方法的基本思想都是根据待传输的数据块,在OFDM信号中增加时域单音信号,单音的选择依据是使得PAPR最小。TR是保留一部分频率专用于附加的单音信号,而TI是拓展星座图使得一个数据点对应于多个星座点。TR和TI是有效的方法,文献[23]对TI进行了改进。

3.1.3 SC-FDMA和FBMC

SC-FDMA和FBMC代表了未来公网无线通信系统中调制技术的发展趋势。从调制实现原理讲,SC-FDMA就是在OFDMA的前端增加一个DFT预处理,因此其另一名称为DFT-spread FDMA。对于SC-FDMA的研究主要集中在PAPR和吞吐量等性能的分析 and 对比。例如:相邻子载波分配方案和交织子载波分配方案两种情况下的PAPR性能比较、SC-FDMA和OFDMA之间的性能对比等^[24,25]。文献[26,27]分析了SC-FDMA对频移的敏感性。最近Wylie-Green等人提出了功率效率较高的连续相位调制CPM-SC-FDMA^[28]。

FBMC是2008年开始法、德、意等国13家研究机构和大学联合开展的项目^[29,30]。虽然目前FBMC尚未形成系统和成熟的技术方案,已有的研究表明它可以达到和CP-OFDM相同的性能,计算复杂度相当,且降低了发射功率^[31]。文献[32]对OFDM和FBMC的性能进行了较为系统的对比研究。

值得指出,移动通信对于多普勒频偏的容忍度主要取决于其物理层技术,尤其是调制解调技术。从理论分析角度讲,一种技术体制下的移动通信系统对多普勒频偏的容忍度究竟有多大,或者说给定误码率指标时其容忍度有多大,仍是有待分析和研究的问题。在工程实现上,可以通过指标计算而设计出支持某一移动速度的技术方案。但是如果缺乏相应的分析理论,则无法说明所采用的方案是否最佳,同时也很难比较各种调制与解调技术、频偏估计与补偿技术在同一频偏容忍度指标下的性能。更进一步,是否可以寻找到一种与多普勒频偏无关的调制解调方法(即它在理论上可以容忍任意大的多普勒频偏),这些问题的研究,对于实现超高速空-空宽带通信系统的研究有着重要的指导意义。

3.2 频偏估计

在接收端接收到的数据受多普勒频移影响时,存在失真现象,因此消除多普勒频移带来的影响也是目前空-空通信网络系统亟待解决的问题。事实表明,当移动速度从250 km/h变为8500 km/h(约7马赫)时,多普勒频移扩大34倍。这意味着在现有移动速度和技术体制下的频偏估计和补偿技术都可能不再适用。

频偏估计和调制技术密切相关,人们对各种调制方式下的频移估计算法也作了大量的研究。如果在空-空宽带通信网采用OFDM调制,则需重点关注OFDMA体制中上行链路的估计技术。Van de Beek等人进行了开创性的研究工作,首先针对上行链路频率和时间同步问题,提出了利用循环前缀的最大似然频率精估计方法(即假定已经完成频偏粗估计)^[33]。该方法对子载波数比较敏感,如果用户拥有较少的子载波,相邻样本的强相关性将导致算法性能明显下降。文献[34]提出了基于重复发送训练

符号的估计方法,但是该方法假定频偏远小于子载波间隔,且在时移估计时忽略了载波间干扰。文献[35]提出了一种比较有效的单符号频偏盲估计算法,该方法利用循环前缀和二倍过采样,将一个OFDM符号分成两个虚拟符号,通过比较简单的余弦代价函数,实现单符号内的频移估计。频偏估计器的性能可以用CRB指标进行评估,文献[36]给出了平均CRB的闭式形式。

应用于超高速移动空-空宽带通信网的频偏估计算法需要注意两个问题。移动公网上行链路的频偏估计算法是运行于基地站的,而机载设备的复杂度应该低于基站,因此空-空通信网中的频偏估计算法必须充分考虑其复杂度和算法效率。文献[37,38]给出了简化的频偏估计算法。另一方面,超高速移动的多普勒效应会产生严重的频偏,进而降低系统的误码率性能。文献[39]针对BPSK和OFDM调制在平坦衰落和频率选择性衰落两种信道情况下,给出了误码率的解析分析和闭式表达式。按照该文的理论分析和仿真结果,如果要求误码率降到约 3×10^{-5} ,相对频偏不得超过0.1,信噪比必须在40 dB以上。如果相对频偏达到0.35,即使在40 dB的信噪比下,误码率也会接近10%。由此可以看到,超高速移动给空-空通信网带来的挑战。

3.3 信道估计和信道建模

对于超高速移动宽带通信,信道估计不可省缺。采用什么样的信道估计与调制技术密切相关。目前人们对OFDM调制技术下的信道估计问题已经开展了大量的研究,估计方法基本可以归为两大类:盲估计和非盲估计。由于盲估计需要对大量接收数据进行统计分析,很难应用于超高速移动通信,更应关注的是非盲估计方法。已经开展的研究工作基本是针对每小时几百公里的移动速度^[40-43]。能够应用于2马赫以上移动速度的信道估计算法,仍是值得研究的问题。

信道估计算法在实际系统中的性能,在很大程度上取决于对信道特性的了解,或者说信道估计算法对信道模型的假设与实际信道的吻合度。随着手机通信的发展,地面无线移动信道建模已经获得广泛而持久的关注,并建立了相应的信道模型(地-地信道模型)。可以说地-地移动通信系统中的信道建模问题是最为复杂和困难的。由于遥感遥测、卫星定位、机场安全等领域的需求,空-地通信的信道模型也引起了人们的关注。针对飞机和地面的无线通信,文献[44]给出了一个简化的统计模型,主要考虑118-137 MHz航空交通管理VHF频段的通信信道模型。文献[45]则考虑同一波段飞机起飞、降落和途中等一系列场景时的信道模型,该文作者后来针对宽带通信系统,给出了相应场景的信道模型^[46]。文献[47]针对海面上空遥测问题提出了8 GHz波段的多径信道模型。文献[48]研究了机场表面VHF频段电波传播的损耗和测量问题。文献[49]考虑了定向天线下的信道建模问题,这对于含有智能天线的通信系统和军事应用中有着潜在的应用价值。

4 结束语

超高速移动空-空宽带通信网络在未来的航空通信和军事通信领域有着十分重要的应用前景,美国和欧洲已经针对民航管理和军事应用启动了相应的研究计划和系统研发。但是构建完全不依赖于基础设施的空-空宽带通信网,仍有很多问题和关键技术值得研究。本文主要聚焦于物理层的实现技术,回顾和分析了研究现状。目前和近期的研究目标是研制能够支持2马赫以上移动速度、速率达到2 Mbps以上的空-空宽带通信网机载终端。

参考文献:

- [1] Eurocontrol/F A A. Communications operating concept and requirements for the future radio system(COCR)[R]. ACP/1-WP/31, USA:1A1-1A171, Eurocontrol/FAA, 2007.
- [2] Graup T, Ehammer T, Zwettler S. L-DACS1 air to air data link protocol design and performance[C]//Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference(ICNS). [S. l.]: IEEE, 2011; B3-1-B3-14.
- [3] Network technology and connectivity[EB/OL]. <http://www.sldinfo.com/wp-content/uploads/2009/11/TTNTWhitePa->

perl.pdf, 2009-11-15.

- [4] Rockwell Collins. Tactical targeting network technology(TINI) communicating at the speed of battle[EB/OL]. <http://www.rockwellcollins.com/content/pdf/pdf.7501.pdf>. 2010-10-15.
- [5] 胡爱群, 李古月. 无线通信物理层安全方法综述[J]. 数据采集与处理, 2014, 29(3):341-349.
Hu Aiqun, Li Guyue. Physical layer security in wireless communication: Survey [J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2014, 29(3):341-349.
- [6] O'Neill R, Lopes L B. Envelope variations and spectral splatter in clipped multicarrier signals [C]//Wireless: Merging onto the Information Superhighway, Proc IEEE PIMRC '95. Toronto, Canada; IEEE, 1995:71-75.
- [7] Kim D, Stüber G L. Clipping noise mitigation for OFDM by decision-aided reconstruction [J]. IEEE Commun Lett, 1999, 3(1):4-6.
- [8] Armstrong J. Peak-to-average power reduction for OFDM by repeated clipping and frequency domain filtering [J]. Elect Lett, 2002, 38(8):246-247.
- [9] Kim H, Daneshrad B. Power optimized PA clipping for MIMO-OFDM systems [J]. IEEE Trans Wireless Commun, 2011, 10(9):2823-2828.
- [10] Wang Y, Luo Z. Optimized iterative clipping and filtering for PAPR reduction of OFDM signals [J]. IEEE Trans Commun, 2011, 59(1):33-37.
- [11] Jones A E, Wilkinson T A, Barton S K. Block coding scheme for reduction of peak-to-average envelope power ratio of multicarrier transmission systems [J]. IEEE Electronics Letters, 1994, 30(8):2098-2099.
- [12] Patterson K. Generalized reed-muller codes and power control in OFDM modulation [J]. IEEE Trans Info Theory, 2000, 46(1):104-120.
- [13] Paterson K G, Tarokh V. On the existence and construction of good codes with low peak-to-average power ratios [J]. IEEE Trans Info Theory, 2000, 46(6):1974-1987.
- [14] Müller S H, Huber J B. OFDM with reduced peak-to-average power ratio by optimum combination of partial transmit sequences [J]. Elect Lett, 1997, 33(5):368-469.
- [15] Lim D W, Heo S J, et al. A new PTS OFDM scheme with low complexity for PAPR reduction [J]. IEEE Trans Broadcasting, 2006, 52(1):77-82.
- [16] Jiang T, Xiang D W, et al. PAPR reduction of OFDM signals using partial transmit sequences with low computational complexity [J]. IEEE Trans Broadcasting, 2007, 53(3):719-724.
- [17] Bäuml R W, Fisher R F H, Huber J B. Reducing the peak-to-average power ratio of multicarrier modulation by selected mapping [J]. Elect Lett, 1996, 32(22):2056-2057.
- [18] Jeon H, No J, Shin D. A low-complexity SLM scheme using additive mapping sequences for PAPR reduction of OFDM signals [J]. IEEE Trans Broadcasting, 2011, 57(4):866-875.
- [19] Wang C, Ku S, Yang C. A low-complexity PAPR estimation scheme for OFDM signals and its application to SLM-based PAPR reduction [J]. IEEE J Selected Topics in Signal Processing, 2010, 4(3):637-645.
- [20] Wang X B, Tjhung T T, Ng C S. Reduction of peak-to-average power ratio of OFDM system using a companding technique [J]. IEEE Trans Broadcasting, 1999, 45(3):303-307.
- [21] Huang X, Lu J H, Zheng J L, et al. Companding transform for reduction in peak-to-average power ratio of OFDM signals [J]. IEEE Trans Wireless Communications, 2004, 3(6):2030-2039.
- [22] Tellado J. Peak to average power reduction for multicarrier modulation [D]. USA: Stanford University, 2000.
- [23] Krongold B S, Jones D L. PAR reduction in OFDM via active constellation extension [J]. IEEE Trans Broadcasting, 2003, 49(3):258-268.
- [24] Myung H G, Lim J, Goodman D. Single carrier FDMA for uplink wireless transmission [J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2006, 1(3):30-38.
- [25] Wilzeck A, Cail Q, Schiewer M, et al. Effect of multiple carrier frequency offsets in MIMO SC FDMA system [C]//Proceedings of the International ITG/IEEE Workshop on Smart Antennas. [S. l.]: IEEE, 2007.
- [26] Raghunath K, Chockalingam A. SC-FDMA versus OFDMA: Sensitivity to large carrier frequency and timing offsets on the uplink [C]//Global Telecommunications Conference. [S. l.]: IEEE, 2009:1-6.
- [27] Gul M M U, Lee S, Ma X. Which one is more sensitive to carrier frequency offsets-OFDMA or SC-FDMA? [C]//2011-MILCOM. [S. l.]: IEEE, 2011:2194-2199.
- [28] Wylie-Green M P, Perrins E, Svensson T. Introduction to CPM-SC-FDMA—A novel multiple-access power-efficient transmission scheme [J]. IEEE Trans Communication, 2011, 59(7):1904-1915.
- [29] Ihalainen T, Viholainen A, Stitz T H, et al. Generation of filter bank-based multicarrier waveform using partial synthesis and time domain interpolation [J]. IEEE Trans Circuits and Systems, 2010, 57(7):1767-1778.
- [30] Katselis D, Kofidis E, Rontogiannis A, et al. Preamble-based channel estimation for CP-OFDM and OFDM/OQAM sys-

- tems; A comparative study [J]. *IEEE Trans Signal Processing*, 2010, 58(5):2911-2916.
- [31] Baltar L G, Schaich M. Computational complexity analysis of advanced physical layers based on multicarrier modulation [C]//Future Network & Mobile Summit (FutureNetw). [S.l.]: IEEE, 2011:1-8.
- [32] Farhang-Boroujeny B. OFDM versus filter bank multicarrier [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2011, 29(3):92-112.
- [33] van de Beek J. A time and frequency synchronization scheme for multiuser OFDM [J]. *IEEE J Sel Areas Commun*, 1999, 17(11):1900-1914.
- [34] Morelli M. Timing and frequency synchronization for the uplink of an OFDMA system [J]. *IEEE Trans Commun*, 2004, 52:296-306.
- [35] Jeon H, Kim K, Serpedin E. An efficient blind deterministic frequency offset estimator for OFDM systems [J]. *IEEE Trans Commu*, 2011, 59(4):1133-1141.
- [36] Li Y, Minn H, Zeng J. An average Cramer-Rao bound for frequency offset estimation in frequency-selective fading channels [J]. *IEEE Trans Wireless Commu*, 2010, 9(3):871-875.
- [37] Zeng Y, Leyman A. Pilot-based simplified ML and fast algorithm for frequency offset estimation in OFDMA uplink [J]. *IEEE Trans Vehicular Technology*, 2008, 57(3):1723-1732.
- [38] Jiang Y, Minn H, You X, et al. Simplified frequency offset estimation for MIMO OFDM systems [J]. *IEEE Trans Vehicular Technology*, 2008, 57(5):3246-3251.
- [39] Mahesh R, Chaturvedi A. Closed form BER expressions for BPSK OFDM systems with frequency offset [J]. *IEEE Communications Letters*, 2010, 14(8):731-733.
- [40] Ku M L, Huang C C. A refined channel estimation method for STBC/OFDM systems in high-mobility wireless channels [J]. *IEEE Trans Wireless Commu*, 2008, 7(11):4312-4320.
- [41] Vilaipornsawai U, Leib H. Joint data detection and channel estimation for fading unknown time-varying Doppler environments [J]. *IEEE Trans Commun*, 2010, 58(8):2277-2291.
- [42] Zhao M, Shi Z, Reed M. Iterative turbo channel estimation for OFDM system over rapid dispersive fading channel [J]. *IEEE Trans Wireless Commu*, 2008, 7(8):3174-3184.
- [43] Zhang Z, Zhang W and Tellambura C. MIMO-OFDM channel estimation in the presence of frequency offsets [J]. *IEEE Trans Wireless Commu*, 2008, 7(6):2329-2339.
- [44] Elnoubi S M. A simplified stochastic model for the aeronautical mobile radio channel [C]//IEEE 42nd Vehicular Technology Conference. [S.l.]:IEEE, 1992:863-960.
- [45] Hoehner P, Haas E. Aeronautical channel modeling at VHF-band [C]//IEEE 50th Vehicular Technology Conference. [S.l.]:IEEE, 1999:1961-1966.
- [46] Hass E. Aeronautical channel modeling [J]. *IEEE Trans Vehicular Tech*, 2002, 51(2):254-264.
- [47] Lei Q, Rice M. Multipath channel model for over-water aeronautical telemetry [J]. *IEEE Trans, Aerospace and Electronic Sys*, 2009, 45(2):735-742.
- [48] Wu Q, Matolak D W, Apaza R D. Airport surface area propagation path loss in the VHF band [C]//Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference. [S.l.]:IEEE, 2011:B4-1-B4-6.
- [49] Molisch A F, Asplund H, Heddergott R, et al. The COST259 Directional channel model-Part I: Overview and methodology [J]. *IEEE Trans Wireless Commu*, 2006, 5(12):3421-3433.

作者简介:



丁志中 (1961-), 男, 博士, 教授, 研究方向:超高速移动通信系统、自组织移动通信网络、信息理论与编码、盲信号处理及应用等, E-mail: zzdng@hfut.edu.cn.



王定良 (1990-), 男, 硕士研究生, 研究方向:通信信号处理及无线资源管理, E-mail: wdlwshcjf@163.com.



傅银玲 (1992-), 女, 硕士研究生, 研究方向:超高速移动通信系统, E-mail: fuyinling0824@163.com.



夏雪 (1994-), 女, 硕士研究生, 研究方向:超高速移动通信系统, E-mail: xi-aqingqing0820@sina.com.

