

文章编号: 1672-2892(2012)01-0001-06

下一代无线通信关键技术及其在遥测中的应用

赵海龙, 张健, 周劼

(中国工程物理研究院 电子工程研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 围绕下一代无线通信中正交频分复用(OFDM)、带频域均衡的单载波(SC/FDE)与多输入多输出(MIMO)技术, 首先综述了这些技术的工作原理、发展历程以及关键问题, 重点对 OFDM 的研究热点进行了分析。接下来探讨了这几项技术在遥测领域的应用。最后得出结论, 认为: OFDM 在航空遥测有着广泛的应用前景; MIMO 在很多遥测领域的应用都有很大潜力; 单载波频域均衡(SC-FDE)技术可以适应发射功率受限, 多径干扰严重的环境, 在航空遥测与导弹遥测中是一种新的鲁棒的遥测体制。

关键词: 正交频分复用; 多入多出; 单载波频域均衡; 遥测; 无线通信; 综述

中图分类号: TN951

文献标识码: A

Key techniques of next generation wireless communication and their applications in telemetry

ZHAO Hai-long, ZHANG Jian, ZHOU Jie

(Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621900, China)

Abstract: Orthogonal Frequency Division Multiplexing(OFDM), Single Carrier with Frequency Domain Equalization(SC/FDE) and Multiple-Input Multiple-Output(MIMO) are the key techniques of next generation wireless communication. In this paper, the principles, research history and key issues of the above techniques are summarized, and OFDM research hotspots are analyzed in detail. Their applications in telemetry are discussed. Finally, it is concluded that OFDM should be widely used for aeronautical telemetry, and MIMO shows an enormous application potential for many telemetry systems, and Single Carrier Frequency Domain Equalization(SC-FDE) will be a new robust scheme for aeronautical and missile telemetry because it is very suitable to the environments of power-limited and severe multipath interference.

Key words: Orthogonal Frequency Division Multiplexing; Multiple-Input Multiple-Output; Single Carrier Frequency Domain Equalization; telemetry; wireless communication; overview

不论是民用移动通信, 还是无线电遥测, 有限的频谱资源与日益增长的频谱资源需求已经成为了亟待解决的矛盾。这可以从两个方面开展工作。一方面是开发使用更高的频段, 如毫米波、太赫兹、激光通信等。毫米波一般指波长介于 1 mm~10 mm 的一段电磁波, 其频率范围为 30 GHz~300 GHz, 研究相对比较成熟, 已得到了较为广泛的应用。太赫兹(THz)是指频率在 0.1 THz~10 THz(波长为 0.03 mm~3 mm)的电磁波, 它的长波段与毫米波(亚毫米波)相重合, 而它的短波段与红外线相重合, 可见太赫兹波是宏观电子学向微观光子学过渡的频段, 在电磁波频谱中占有特殊的位置^[1-2]。由于 THz 所处的特殊电磁波谱的位置, 它有很多优越的特性, 有非常重要的学术和应用价值, 使得 THz 受到世界各国的极大关注。激光具有高度的时间和空间相关性, 其振荡频率很高, 激光频率比微波频率高约 4 个数量级以上, 所以它具有带宽大、数据传输速率高、天线尺寸小、抗干扰保密性好等优点。专家预计自由空间激光通信能够实现高达数百 Gbit/s 的传输速率^[3]。开发使用高频段可以有效地解决频谱资源紧张的问题, 但是要想使 THz、自由空间激光通信得到广泛应用, 除了需要解决大量关键技术外, 成本也是一个需要考虑的重要问题, 用于 THz 与激光通信器件成本都远远高于用于基带处理的数字器件成本; 另外一方面就是从提高频谱利用率考虑, 充分利用现有的频谱资源, 如 OFDM、MIMO、认知无线电(Cognitive Radio, CR)等。OFDM 的子载波在频域上是重叠的, 所以理论上它的频谱利用率是一般频分复用频谱利用率的 2 倍, 此外,

收稿日期: 2011-05-09; 修回日期: 2011-06-06

它还具有优良的抗多径性能。MIMO 是指在发射端和接收端分别使用多个发射天线和接收天线,它实质上是为系统提供空间复用增益和空间分集增益,空间复用技术可以大大提高信道容量,而空间分集则可以提高信道的可靠性,降低信道误码率。CR 不会提高信道容量,它是从频谱管理角度考虑,合理地分配现有频谱资源,解决频谱稀缺与频谱浪费的问题。

1 下一代无线通信关键技术

1.1 OFDM 技术

OFDM 是一种多载波调制技术,它把一个宽带的频率选择性信道划分为 N 个窄带平坦衰落信道,从而具有很强的抗多径衰落和抗脉冲干扰的能力。另外,OFDM 子载波间相互重叠并保持正交,所以频谱利用率高。

在 20 世纪五十年代,美国军方创建了第 1 个多载波系统,它是 OFDM 的雏形。由于受到技术和器件的制约,在接下来的十几年中,OFDM 的实践之路走得比较艰难。1971 年,Weinstein 和 Ebert 提出采用离散傅里叶变换(Discrete Fourier Transform, DFT)和离散傅里叶逆变换(Inverse DFT, IDFT)对 OFDM 进行调制解调^[4],1980 年 Peled 和 Ruiz 提出采用循环保护前缀消除符号间干扰的思路^[5],随着数字器件的飞速发展,快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)的实现已变得非常容易,其他一些在实现中难以克服的困难也得到了相应的解决,至此,OFDM 走上无线通信的舞台。到 20 世纪 90 年代,OFDM 开始被欧洲和澳大利亚应用于数字音频广播(Digital Audio Broadcasting, DAB)、高清晰度数字电视(High-Definition TV, HDTV)和无线局域网(Wireless Local Area Network, WLAN)。目前,OFDM 已广泛应用于 WiFi, WiMAX, 并作为第 4 代无线宽带多媒体通信系统的主流技术。

OFDM 由于其子载波的正交性,导致对于频偏非常敏感^[6]。所以频偏估计成为 OFDM 的一个关键技术,针对这一问题,研究人员进行了大量的研究,提出了许多解决方案。从文献中可以看出,已有的频偏估计算法可以分为两大类,一类是数据辅助的估计算法^[7-11],利用导频或单独的训练符号估计频偏,这类估计算法性能良好且计算量较小,但是会浪费宝贵的带宽资源。这类算法的研究已经比较完善,不论是算法性能,还是计算复杂度,都足以满足工程应用的要求。目前关于这类算法的研究大多属于锦上添花或者只追求学术价值;另一类是盲估计算法^[12-13],这类算法一般性能较差且计算量大,但是它们具有带宽利用率高,信号不容易被截获的优点。这类算法的研究还不是很完善,寻找可以与数据辅助类算法相比拟的盲估计算法是研究人员奋斗的目标。

另外,由于 OFDM 信号是由许多独立调制的子载波叠加而成,这就有可能在某个时刻出现一个很大的峰值功率,导致峰均功率比问题,即 PAPR(Peak-to-Average Power Ratio)^[14],这是 OFDM 的另一个关键问题。由于峰值功率过高,对功率放大器动态范围要求很高,提高了整个系统的成本。若峰值功率超过功放的线性放大范围,就会引起线性失真。目前,已有大量 PAPR 抑制算法,具有代表性的方法有剪波法^[14-17],压扩变换法^[18-21],加扰方法^[22-23]以及编码的方法^[24-27]。剪波法实现简单,能将 PAPR 压得很低,但是会带来非线性失真,导致性能恶化;压扩变换法抑制效果好,且实现简单,但也会带来非线性失真,导致性能恶化;加扰是一种无失真 PAPR 抑制方法,但是计算量大, PAPR 改善有限;编码的方法可以很好地抑制 PARR,但是随着子载波个数的增加,计算量呈指数增长,所以只适合于子载波数较小的情况。总之,目前还没有一个既简单而且性能良好的 PAPR 算法,为了解决这一问题,研究人员把注意力集中到功放的线性化——数字预失真技术(Digital Pre-Distortion, DPD)上来,将 PAPR 抑制与 DPD 综合考虑,这一思路应该是解决 PAPR 问题的最好途径。

1.2 SC/FDE 技术

为了解决 OFDM 的 PAPR 以及频偏敏感的问题,研究人员提出 SC/FDE 技术,然而开始并未受到重视。直到 1995 年, Sari 等人^[28]对 SC/FDE 技术进行研究,发现 OFDM 与 SC/FDE 之间具有惊人的相似性,从此 SC/FDE 技术渐渐受到关注。它的原理框图如图 1 所示,在发射端,它省去了 IFFT 处理,简化了发射端结构,也避免了产生大 PAPR 的问题;在接收端,通过 FFT 将信号变换到频域,进行简单的频域均衡(因为频域均衡可以省去卷积运算,实现简单),然后再通过 IFFT 变换到时域。与 OFDM 系统相比,它不但降低了 PAPR 和功放的线性要求,而且其对频率偏移和相位噪声的敏感程度远远小于 OFDM 系统。此外,它依然具有和 OFDM 系统相同的频域均衡性能,而且它也可以与 MIMO 技术结合,组成 MIMO-SC/FDE 系统。由于它具有优良的性能,而且处理方式和 OFDM 非常相似,2003 年 4 月出台的 IEEE 802.16a 标准规定了 OFDM 系统

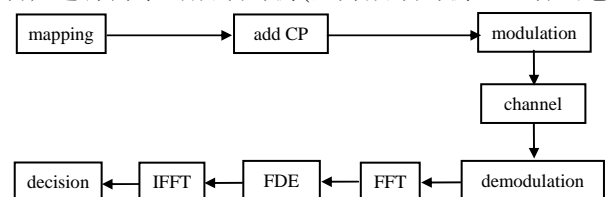


Fig.1 Single carrier frequency domain equalization
图 1 单载波频域均衡(SC/FDE)

和 SC/FDE 系统两种传输模式。

在 B3G/4G 的上行链路中,也准备采用此项技术。对于 SC/FDE 的研究,主要集中在 MIMO-SC/FDE 上^[29-31]。

1.3 MIMO 技术

MIMO 技术是指使用多个相关或者不相关的发送天线或者接收天线的技术,通常有单发多收(SIMO)、多发单收(MISO)和多发多收(MIMO)等几种形式,它是继时域、频域之后,人们从空域开发的一项新技术。MIMO 最早是由 Marconi 于 1908 年提出。到 20 世纪 90 年代中后期, Bell 实验室取得了一系列的研究成果,主要包括: Foshinia 与 Telatar 等人^[32-33]从理论上证明了收发两端均使用多个天线,可以使通信链路容量成倍增加。即在 N_t 发射天线, N_r 接收天线的 MIMO 系统中,信道容量随 $\min[N_t, N_r]$ 线性增加。Foshinia^[34]于 1996 年首先提出了分层空时编码技术,频谱效率可达到 40 bps/Hz 以上。1998 年, Tarokh 等人^[35-37]提出了空时分组编码技术。这些研究成果对 MIMO 的研究起了很大的推动作用,开创了无线通信的一场新的技术革命。之后,全世界许多学术机构、大公司对 MIMO 都给予了极大的关注,并投入大量人力财力去研究,使得 MIMO 得到了飞速发展。目前, 3GPP 在标准中已经加入了 MIMO 技术,在无线宽带接入领域,如 802.16e,802.11n,802.20 等都采用了 MIMO 技术。人们普遍认为,在 4G 中 MIMO 是一项必选技术。对于 MIMO 的研究,主要集中在发射分集和空间复用、数字波束形成(Digital Beam Forming, DBF)、空时编码(Space-Time Coding, STC)、信道估计、自适应编码调制(Adaptive Modulation and Coding, AMC)以及多用户 MIMO 系统等方面。

2 遥测领域应用

无线通信新技术的不断涌现,推动了遥测技术的发展。在国际遥测会议(ITC)中,关于 OFDM,MIMO, MIMO-OFDM 的论文逐年增多^[38-52]。2003 年,加拿大太平洋微波研究中心 Durso^[38]报告了他们实验室的研究成果,他们将 OFDM 技术应用于战术无人机遥测链路,采用编码 OFDM(COOFDM)技术,子载波采用 QPSK 或者 16-QAM,信号带宽 8 MHz,根据不同的编码效率与子载波调制方式,传输速率为 5 Mbps~20 Mbps,该系统可以有效地对抗多径干扰,而且可以进行非视距通信。2005 年,国际遥测会议专门设立一个议题讨论提高遥测频谱效率(T&E/S&T Spectrum Efficient Technology),在这个议题中,美国喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)Darden^[39]认为在遥测链路中,OFDM 是一种先进的技术。Tian 等人^[40]将 OFDM 技术用于飞行器电力线高速数据传输,可以节约飞行器仪器之间电缆的数量。2008 年, Lu 与 Roach 等人^[41-42]分析了物理层采用 OFDM 的 iNET (增强遥测综合网)性能,并对系统进行了实验室的测试,测试场景如图 2 所示。2009 年, Ehichioya 与 Kamirah^[43-44]研究 OFDM 在航空遥测信道的性能,说明 OFDM 在航空遥测中具有优势。

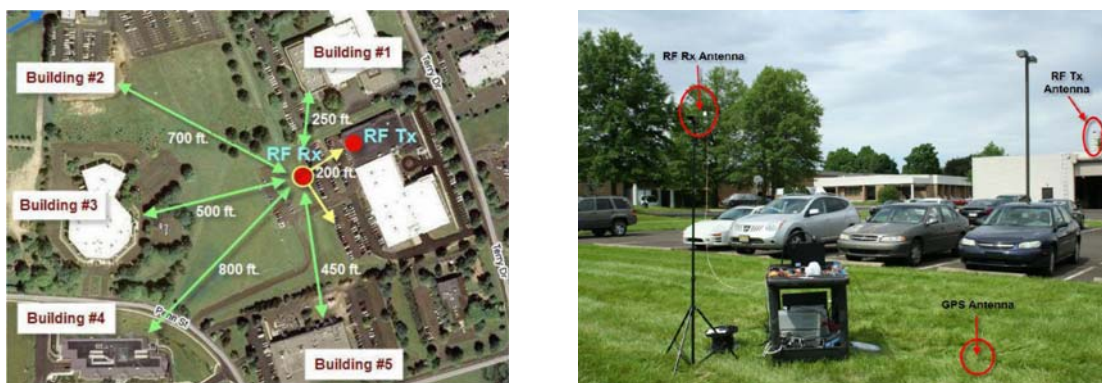


Fig.2 iNET test scene
图 2 iNET 测试场景

对于 MIMO 技术的关注,是从 2002 年开始, Jensen 等人^[45]研究了空时编码,并针对航空遥测信道进行了分析。在后面的几年里,越来越多的遥测研究人员开始关注 MIMO。在 2006 年遥测会议上,组委会专门设计一个议题,交流 MIMO 技术,在 2007 年、2009 年都专门设置分会场讨论 MIMO 技术。在 2006 年,美国密苏里州科技大学遥测学术中心 Chris Potter 等人^[46]就开始研究 MIMO 技术,在随后的几年中,他与自己导师 Kosbar 每年都在遥测会议上展示他们的研究成果。到 2009 年,他们成功地将 MIMO 应用于航空遥测中,开发了 1 套 2×2 的 MIMO 系统,机上 2 个天线,地面 2 个天线,如图 3 所示。对于 MIMO,就技术而言,主要集中在信道估计、空时编码^[47-52]。

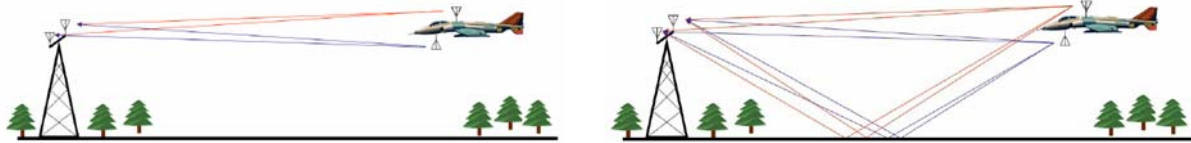


Fig.3 Sketch map of MIMO aeronautical telemetry

图3 MIMO 航空遥测示意图

从已有的报道来看,目前 OFDM,MIMO 技术在遥测领域的研究和应用主要集中在航空遥测。在航空信道下,当飞行器距离较远时,受到地球曲率半径的影响,导致天线仰角很低,此时,地面与山体等反射都进入天线的主波束内,形成多径干扰,而且飞行器需要传输大量视频数据,数据率高。另外航空信道下的飞行器能源是可以补给的,可采用功率较大的发射功率。所以在航空遥测领域,OFDM 技术有着广泛的应用前景。在卫星、飞船等遥测中,OFDM,MIMO 的研究和应用还未见报道。这些飞行器能量由电池提供,发射功率非常有限,功率放大器为非线性,况且卫星、飞船基本上不存在多径干扰,是一个理想的加性高斯白噪声(Additive White Gaussian Noise, AWGN)信道,就目前而言,不宜采用 OFDM 技术。但是不论是航空遥测,还是卫星遥测,使用 MIMO 技术都可以提高信道容量,节约功率,提高传输的可靠性,所以 MIMO 在遥测领域的应用具有很大潜力。对于 SC-FDE 技术,在遥测会议中未见报道,但是根据它的特点以及优异的抗多径性能,在航空遥测、导弹遥测[53-54]等存在严重多径干扰的信道下,是一种鲁棒的遥测体制,很有必要深入研究。

3 结论

OFDM,SC/FDE 与 MIMO 是下一代无线通信的几个关键技术,本文从两个方面对这几项技术进行了综述与探讨。第一部分综述了这些技术的基本原理,发展历程以及关键问题。重点对 OFDM 的研究热点进行了分析,认为:数据辅助类同步算法研究已比较完善,不论算法性能,还是计算复杂度,都足以满足工程应用的要求,后面的研究重点是寻找可以与数据辅助类算法相比拟的盲估计算法,尤其在遥测抗截获方面,它的研究显得尤为重要;PAPR 抑制仍然是研究人员努力的方向,将 PAPR 抑制与 DPD 综合考虑,应该是解决 PAPR 问题的最好途径。第二部分探讨了这些技术在遥测领域的应用,认为:OFDM 在航空遥测有着广泛的应用前景;MIMO 在很多遥测领域的应用都有很大潜力;SC-FDE 技术可以适应发射功率受限,多径干扰严重的环境,在航空遥测与导弹遥测中是一种新的鲁棒的遥测体制,有必要深入研究。

参考文献:

- [1] 姚建铨. 太赫兹技术及其应用[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2010,22(6):703-707. (YAO Jianquan. Introduction of THz-wave and its applications[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2010,22(6):703-707.)
- [2] 林华. 无人机载太赫兹合成孔径雷达成像分析与仿真[J]. 信息与电子工程, 2010,8(4):373-382. (LIN Hua. Analysis and simulation of UAV terahertz wave synthetic aperture radar imaging[J]. Information and Electronic Engineering, 2010,8(4):373-382.)
- [3] 刘立人. 卫星激光通信 I 链路和终端技术[J]. 中国激光, 2007,34(1):1-18. (LIU Liren. Laser Communications in Space I Optical Link and Terminal Technology[J]. Chinese Journal of Lasers, 2007,34(1):1-18.)
- [4] Weinstein S B, Ebert P M. Data transmission by frequency-division multiplexing using the discrete Fourier transform[J]. IEEE Transactions on Communications, 1971,19(5):628-634.
- [5] Peled A, Ruiz A. Frequency domain data transmission using reduced computational complexity algorithms[C]// Proc. IEEE Int. Conf. Acoust., Speech, Signal Processing. Denver, CO:[s.n.], 1980:964-967.
- [6] Pollet T, Van Bladel M, Moeneclaey M. BER sensitivity of OFDM systems to carrier frequency offset and Wiener phase noise[J]. IEEE Transaction on communications, 1995,43(234):191-193.
- [7] Schmidl T M, Cox D C. Robust frequency and timing synchronization for OFDM[J]. IEEE Transactions on Communications, 1997,45(12):1613-1621.
- [8] Moose P A. A technique for orthogonal frequency division multiplexing frequency offset correction[J]. IEEE Transactions on Communications, 1994,42(10):2908-2914.
- [9] 郭黎利,梁治国,孙志国,等. 基于循环移位前导序列的 OFDM 载波同步方法[J]. 信息与电子工程, 2006,4(5):326-330. (GUO Lili, LIANG Zhiguo, SUN Zhiguo, et al. Carrier frequency synchronization scheme of OFDM based on cyclic-shifted preamble sequences[J]. Information and Electronic Engineering, 2006,4(5):326-330.)

- [10] REN Guangliang, CHANG Yilin, ZHANG Hui, et al. Synchronization method based on a new constant envelope preamble for OFDM systems[J]. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 2005, 54(1):139–143.
- [11] Awoseyila A B, Kasparis C, Evans B G. Robust time-domain timing and frequency synchronization for OFDM systems[J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2009, 55(2):391–399.
- [12] 胡梅霞, 张海林. 基于循环平稳特性的 OFDM 盲同步算法[J]. *西安电子科技大学学报(自然科学版)*, 2005, 32(2):264–267. (HU Meixia, ZHANG Hailin. A blind synchronization method based on cyclostationarity[J]. *Journal of Xidian University*, 2005, 32(2):264–267.)
- [13] Chen B, Wang H. Blind estimation of OFDM carrier frequency offset via oversampling[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2004, 52(7):2047–2057.
- [14] Li X, Cimini L J. Effects of clipping and filtering on the performance of OFDM[J]. *IEEE Communications Letters*, 1998, 2(5):131–133.
- [15] Bahai A R, Singh M, Goldsmith A J, et al. A new approach for evaluating clipping distortion in multicarrier systems[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2002, 20(5):1037–1046.
- [16] Armstrong J. Peak-to-average power reduction for OFDM by repeated clipping and frequency domain filtering[J]. *Electronics Letters*, 2002, 38(5):246–247.
- [17] Deng Shang-Kang, Lin Mao-Chao. Recursive clipping and filtering with bounded distortion for PAPR reduction[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2007, 55(1):227–230.
- [18] 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 Transactions on Broadcasting*, 1999, 45(3):303–307.
- [19] Jiang T, Zhu G X. Nonlinear companding transform for reducing peak-to-average power ratio of OFDM signals[J]. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 2004, 50(3):342–346.
- [20] Jiang Tao, Yang Yang, Song Yong-Hua. Exponential companding technique for PAPR reduction in OFDM systems[J]. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 2005, 51(2):244–248.
- [21] Huang Xiao, Lu Jianhua, Zheng Junli, et al. Companding transform for reduction in Peak-to-Average power ratio of OFDM signals[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2004, 3(6):2030–2039.
- [22] Bauml R W, Fischer R H, Huber J B. Reducing the peak-to-average power ratio of multicarrier modulation by selective mapping[J]. *Electronics Letters*, 1996, 32(22):2056–2057.
- [23] Lim D W, No Jong-Seon, Lim Chi-Woo, et al. A new SLM OFDM Scheme with Low complexity for PAPR reduction[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2005, 12(2):93–96.
- [24] Jones A E, Wilkinson T A, Barton S K. Block coding scheme for reduction of peak to mean envelope power ratio of multicarrier transmission schemes[J]. *IEE Electronics Letters*, 1994, 30(22):2098–2099.
- [25] Jiang Tao, Zhu Guangxi. Complement block coding for reduction in peak-to-average power ratio of OFDM signals[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2005, 43(9):S17–S22.
- [26] Davis J A, Jedwab J. Peak-to-mean power control and error correction for OFDM transmission using Golay sequences and Reed-Muller codes[J]. *IEE Electronics Letters*, 1997, 33(4):267–268.
- [27] Davis J A, Jedwab J. Peak-to-mean power control in OFDM, Golay complementary sequences, and Reed-Muller Codes[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1999, 45(7):2397–2417.
- [28] Sari H, Karam G, Jeanclaude I. Transmission techniques for digital terrestrial TV broadcasting[J]. *IEEE Communications Magazine*, 1995, 33(2):100–109.
- [29] 李国才. 宽带 MIMO 系统若干关键技术研究[D]. 成都:电子科技大学, 2009. (LI Guocai. A study of key techniques for broadband MIMO systems[D]. Chengdu:University of Electronic Science and Technology of China, 2009.)
- [30] 车小林. MIMO 无线通信系统的预处理和频域均衡技术研究[D]. 上海:上海交通大学, 2009. (CHE Xiaolin. Research of pre-processing and frequency domain equalization for MIMO wireless systems[D]. Shanghai:Shanghai Jiao Tong University, 2009.)
- [31] 王杰令. 无线通信中抗多径衰落新技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2009. (WANG Jieling. Research on new techniques of anti-multipath-fading in wireless communications[D]. Xi'an:Xidian University, 2009.)
- [32] Foschini G J, Gans M J. On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas[J]. *Wireless Personal Communications*, 1998, 6(3):311–335.
- [33] Telatar I E. Capacity of multi-antenna Gaussian channels[J]. *European Transactions on Telecommunication*, 1999, 10:585–595.

- [34] Foschini G J. Layered space-time architecture for wireless communication in fading environment when using multiple antennas[J]. Bell Labs Technical Journal, 1996:41–59.
- [35] Tarokh V, Jafarkhani H, Calderbank A R. Space-time block coding for wireless communications: performance results[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1999, 17(3):451–460.
- [36] Tarokh V, Jafarkhani H, Calderbank A R. Space-time block codes from orthogonal designs[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1999, 45(5):1456–1467.
- [37] Tarokh V, Jafarkhani H, Calderbank A R. Space-time codes for high data rate wireless communications: performance criterion and code construction[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1998, 44(2):744–765.
- [38] Durso C M. A robust digital wireless link for tactical UAV's[C]// Proceedings of the 39th annual international telemetering conference. Las Vegas: International Foundational for Telemetering, 2003.
- [39] Darden S. A Robust Telemetry Link – Advanced OFDM[C]// Proceedings of the 41st International Telemetering Conference. Las Vegas: International Foundational for Telemetering, 2005.
- [40] Tian H, Trojak T, Jones C. Data communications over aircraft power lines[C]// Proceedings of the 41st International Telemetering Conference. Las Vegas: International Foundational for Telemetering, 2005.
- [41] Lu C, Roach J. The performance evaluation an OFDM-based iNET transceiver[C]// Proceedings of the 45th International Telemetering Conference. Las Vegas: International Foundational for Telemetering, 2009.
- [42] Lu C, Cook P, Roach J. The design of a highperformance network transceiver for iNET[C]// Proceedings of the 44th International Telemetering Conference. San Diego: International Foundational for Telemetering, 2008.
- [43] Ehichioya D, Golriz A, Cole-Rhodes A, et al. Performance comparison of OFDM and DSSS over an aeronautical channel[C]// Proceedings of the 45th International Telemetering Conference. Las Vegas: International Foundational for Telemetering, 2009.
- [44] Kamirah D K, Dean R. OFDM Performance on Aeronautical Channel[C]// Proceedings of the 45th International Telemetering Conference. Las Vegas: International Foundational for Telemetering, 2009.
- [45] Jensen M A, Rice M D. Space-time coding for wireless communications[C]// Proceedings of International telemetering conference 2002. San Diego: International Foundational for Telemetering, 2002.
- [46] Potter C, Kosbar K. Single bounce air to ground communication channel capacity for MIMO applications[C]// Proceedings of the 42nd International Telemetering Conference. San Diego: International Foundational for Telemetering, 2006.
- [47] Potter C, Kosbar K. Modeling channel estimation error in continuously varying MIMO channels[C]// Proceedings of the 43rd International Telemetering Conference. Las Vegas: International Foundational for Telemetering, 2007.
- [48] Potter C, Kosbar K. MIMO channel prediction using recurrent neural networks[C]// Proceedings of the 44th International Telemetering Conference. San Diego: International Foundational for Telemetering, 2008.
- [49] Potter C, Kosbar K. Hardware discussion of a MIMO wireless communication system using orthogonal space time block codes[C]// Proceedings of the 44th International Telemetering Conference. San Diego: International Foundational for Telemetering, 2008.
- [50] Panagos A, Potter C, Kosbar K. Results in unitary space-time code construction and comparison to upper bounds[C]// Proceedings of the 44th International Telemetering Conference. San Diego: International Foundational for Telemetering, 2008.
- [51] Seaber J, Barkley J, Ngo T, et al. A programmable dual modulator test bed for MIMO applications[C]// Proceedings of the 45th International Telemetering Conference. Las Vegas: International Foundational for Telemetering, 2009.
- [52] Gupte A, Kosbar K. A method for tracking the accuracy of channel estimates in MIMO receivers[C]// Proceedings of the 45th International Telemetering Conference. Las Vegas: International Foundational for Telemetering, 2009.
- [53] Bracht R, Rich D, Smith F. Radio Frequency Overview of the High Explosive Radio Telemetry Project[C]// Proceedings of International telemetering conference 1998. San Diego: International Foundational for Telemetering, 1998.
- [54] Crawford T, Bracht R, Johnson R, et al. High Explosive Radio Telemetry System[C]// Proceedings of International telemetering conference 1998. San Diego: International Foundational for Telemetering, 1998.

作者简介:



赵海龙(1978–), 男, 内蒙古呼和浩特人, 在读博士研究生, 主要研究方向为 OFDM 技术、无线电遥测。email: zhaohailong_029@126.com.

张健(1968–), 男, 重庆市人, 博士, 研究员, 主要研究领域为电子学、无线电测控与复杂系统。

周劼(1972–), 男, 郑州市人, 博士, 研究员, 主要研究领域为信号处理、测控技术等。