

# 超宽带射频接收机的研制

田 玲, 朱红兵, 洪 伟

(东南大学毫米波国家重点实验室, 江苏南京 210096)

**摘 要:** 超宽带(UWB)短距离无线通信技术是当前国内外研究的热点,直接序列超宽带(DS-UWB)方案和多带-正交频分复用(MB-OFDM-UWB)方案是两个主要候选方案,其中多带正交频分复用方案是较受重视的方案.本文针对 MB-OFDM-UWB 系统,提出了一种双载波正交频分复用(DG-OFDM-UWB)的射频解决方案.该方案采用了两个相邻的子载波实现宽带通信,两个子载波是在中频部分采用合路/分路的方式,以降低硬件实现难度和系统的复杂度.设计了 UWB 射频接收机中的低噪声放大器(LNA)、频率合成器和解调器等关键部件,并建立了 DG-OFDM-UWB 接收机实验演示平台.测试结果表明,研制的射频接收机满足 FCC 规定的射频指标要求,该方案也适用于其它的宽带通信系统中.

**关键词:** 超宽带; 低噪声放大器; 频率合成器; 解调器

**中图分类号:** TN919.72 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2007)10-1838-05

## Research on Ultra-Wideband RF Receiver

TIAN Ling, ZHU Hong-bing, HONG Wei

(State Key Laboratory of Millimeter Waves, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China)

**Abstract:** Ultra wideband is of particular interest worldwide in short range wireless communication with two major proposals: direct sequence ultra wideband (DS-UWB) and multi-band orthogonal frequency division multiplexing (MB-OFDM) ultra wideband. MB-OFDM is considered a mature proposal. A novel design of dual carrier orthogonal frequency division multiplexing (DG-OFDM) is presented for MB-OFDM UWB RF system, in which two adjacent sub carriers are adopted to realize ultra wideband communication. To cut down difficulties in hardware implementation and system complexity, combination/divider ways is used in the two sub carriers in intermediate frequency. Moreover, some key parts in UWB RF receiver are designed, including low noise amplifier, frequency synthesizer as well as RF demodulator. In the end, a DG-OFDM UWB receiver experiment demo test bed is set up. Test results show that the researched RF receiver had been developed with the measured results meeting FCC RF standard perfectly, and the design could be used in other wideband communication systems.

**Key words:** ultra wideband (UWB); low noise amplifier(LNA); synthesizer; demodulator

### 1 引言

近年来,超宽带短距离无线通信技术成为全球通信领域研究的热点技术,无线局域网(WLAN)和无线个域网(WPAN)等概念掀起了短距离无线通信的研究高潮<sup>[1]</sup>.超宽带(Ultra-Wideband, UWB)通信技术主要应用于无线个域网.由通信原理可知,当系统带宽很宽,信号平均功率很低,超宽带通信系统可以和现有的通信系统共存,提高频谱利用率,并具有保密性好、多径分辨能力强等优点,非常适合室内通信技术.美国联邦通信委员会(FCC)对超宽带进行了初步定义:带宽大于 500MHz 或者相对带宽(即 -10dB 带宽除以中心频率)大于 0.2<sup>[2]</sup>.由此定义可以看出,现在的 UWB 已不限于最初的冲击无线电技术,而是包括任何可以使用超宽带频谱的通信形式.

目前, UWB 系统的两个主要候选方案: Motorola、XtremeSpectrum 等公司提出的直接序列超宽带(DS-

UWB)和 Intel、TI 等公司提出的多带-正交频分复用超宽带(MB-OFDM-UWB)方案<sup>[3]</sup>.后者是将 UWB 信号搬移到合适的频段进行传输,从而可以更加灵活有效地利用频谱资源,调制载波系统的信号处理方法与一般通信系统的方法类似. MB-OFDM-UWB 方案的特点是:在 3.1~10.6GHz 共 7.5GHz 带宽范围内,分成 128 个子带,每个子带需用 528MHz 的带宽,其中 100 个子带用于用户传输数据,6 个为空子带,12 个用于承载导频信号,另 10 个子带为用户自定义<sup>[4]</sup>.在本实验系统中,射频的工作频率范围为 3.2~3.7GHz,由于基带模数/数模(ADC/DAC)芯片的限制,将子带带宽由 528MHz 降至 264MHz,其余特性做相应调整.尽管子带带宽为 264MHz,对射频部分的硬件如低噪声放大器、解调器等也提出了很高要求,现有器件很难实现.故作者之前提出了一种四载波的处理方案来解决 MB-OFDM-UWB 带宽问题<sup>[5]</sup>,每个子载波的处理带宽为 66MHz,但这种方案大大增加了射频电路的复杂度、成本和系统功耗.综上所述,本文提出了

一种针对 MB-OFDM UWB 系统的低复杂度射频接收机的实现方案: 双载波正交频分复用 (Dual-Carrier Orthogonal Frequency Division Multiplexing, DC-OFDM) UWB 实现方案。该方案是将系统的复杂度、系统功耗和硬件实现难度加以折衷, 每个子载波的处理带宽最高可达 132MHz, 为 UWB 系统设计提供了一个合理的解决方案。

## 2 DC-OFDM UWB 系统射频接收机方案设计

按照 FCC 的规定, 超宽带无线系统的辐射信号具有超宽频带和极低功率谱密度两大特点, 这对超宽带系统性能提出了较高的要求, 高性能接收机是实现超宽带通信的关键。基于现有硬件条件的限制, 提出了与 MB-OFDM UWB 方案兼容的 DC-OFDM UWB 方案, 为 UWB 系统提供了方案实现的硬件平台。该方案是在不改变 MB-OFDM UWB 方案的原理、结构的前提下, 将每个子频带的带宽变为原来带宽的一半, 其相关参数也按比例进行变化, 接收端的基带算法不变, 这样, 可以直接进入后续的 ASIC 设计。射频子系统的方案原理框图如图 1 所示。该方案采用了两个相邻的子载波实现宽带通信的目的, 两个子载波是在中频部分采用合路/分路的方式, 降低系统的复杂度, 提高系统的性能。

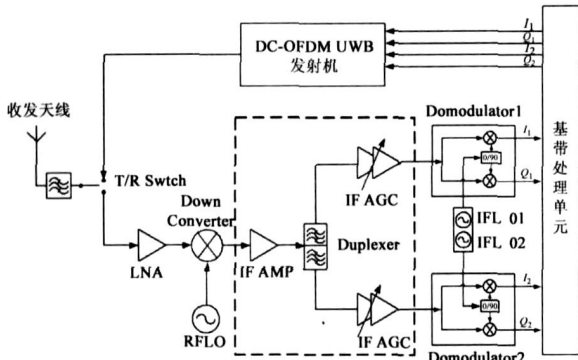


图 1 DC-OFDM UWB 射频子系统方案原理框图

DC-OFDM UWB 射频子系统是基于 TDD 工作方式, 系统的收发工作状态是由收发开关进行切换, 工作频率范围为 3.2~3.7GHz。本文主要是对射频接收机进行研究。接收机主要是由射频带通滤波器 (Band Pass Filter, BPF)、收发切换开关 (T/R Switch)、宽带低噪声放大器 (Low Noise Amplifier, LNA)、下变频器 (Down Converter)、射频频率合成器 (RF Synthesizer)、中频放大器 (IF AMP)、中频双工器 (Duplexer)、中频自动增益控制放大器 (IF AGC)、中频频率合成器 (IF Synthesizer) 和宽带正交解调器 (Demodulator) 等组成。

DC-OFDM UWB 采用的是正交频分多址 (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) 技术, 是一种特殊的多载波传输方案, 其主要优势在于较好的抗频率选择性衰落、较好的抗窄带干扰能力和较高的数据传输速率<sup>[6]</sup>。

## 3 射频接收机关键部件的设计与仿真

为了保证系统的性能, 需要对射频接收机的核心部件进行合理设计和详细仿真, 主要核心部件包括: 宽带低噪声放大器、频率合成器和宽带解调器。下面就这些部件具体说明。

### 3.1 低噪声放大器

射频接收机的主要任务是将发射机发射出的双载波射频信号变换为基带处理部分能处理的基带信号, 接收机的接收灵敏度是关键指标, 该指标主要是由接收机整机的噪声系数 (Noise Figure, NF) 决定。根据接收机噪声系数的公式, 通常接收机整机噪声系数主要由第一级低噪声放大器 (LNA) 的噪声系数决定, 如公式 (1) 所示。

$$F = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 \cdot G_2} + \dots + \frac{F_n - 1}{G_1 \cdot G_2 \cdot \dots \cdot G_{n-1}} \quad (1)$$

在本文设计的射频接收机中, 为了进一步降低接收机硬件实现的难度, 接收的双载波射频信号公用同一个低噪声放大器和下变频器 (Down Converter), 双载波信号的分路处理是在中频部分完成, 为宽带无线通信系统提供了一个很好的解决方案。依据 FCC 的 802.15.3a 关于 UWB 接收机灵敏度要求, 在误包率 (Packet Error Rate, PER) 不超过 8% 的情况下, 数据速率在 110Mbps 的最小接收灵敏度电平为 -79.7dBm。具体推导如下:

系统的信息数据速率  $R_b$ : 110Mb/s;

平均发射功率  $P_T$ : -10.3dBm;

发送天线增益  $G_T$ : 0dBi;

系统的几何中心频率 ( $f'_c$ ) 约为: 3.44GHz ( $f'_c = \sqrt{f_{\min} f_{\max}}$ ,  $f_{\min}$  和  $f_{\max}$  是频谱的 10dB 低端、高端频率);

距离为 10m 的路径损耗 ( $L$ ): 63.2dB ( $L = 20 \log_{10} (4\pi f'_c / c) + 20 \log_{10} d$ ,  $c = 3 \times 10^8$ m/s);

接收天线增益 ( $G_R$ ): 0dBi;

平均接收功率 ( $P_R$ ): -73.5dBm ( $P_R = P_T + G_T + G_R - L$ );

天线输出端每比特噪声平均功率 ( $N$ ): -93.6dBm ( $N = -174 + 10 \log_{10} R_b$ );

若接收机的噪声系数 ( $N_F$ ): 6.6dB;

射频接收机输出端每比特平均噪声功率 ( $P_N$ ): -87dBm ( $P_N = N + N_F$ );

射频子系统输出端信噪比 ( $E_b/N_0$ ): 13.5dB ( $S_o = P_R - P_N$ );

接收机需要的信噪比  $E_b/N_0(S)$ : 4dB;

实现损耗  $I$ : 3.3dB;

接收机链路裕量  $M$ : 6.2dB ( $M = P_R - P_N - S - I$ );

接收机的最小接收灵敏度 ( $SE = P_N + S + I$ ):

- 79.7dBm.

由上述推导可知,在满足 10m 的通信距离,通信速率为 110Mbps 时,当接收机的噪声系数为 6.6dB 时,接收机的最小接收灵敏度可达为 - 79.7dBm,若接收机的

噪声系数小于 6.6dB 时,接收机的灵敏度将更高.依据这个要求,我们选择合适的低噪声放大器,采用两级级联的形式,对低噪声放大器进行仿真,仿真原理图 and 结果如图 2 和图 3 所示.

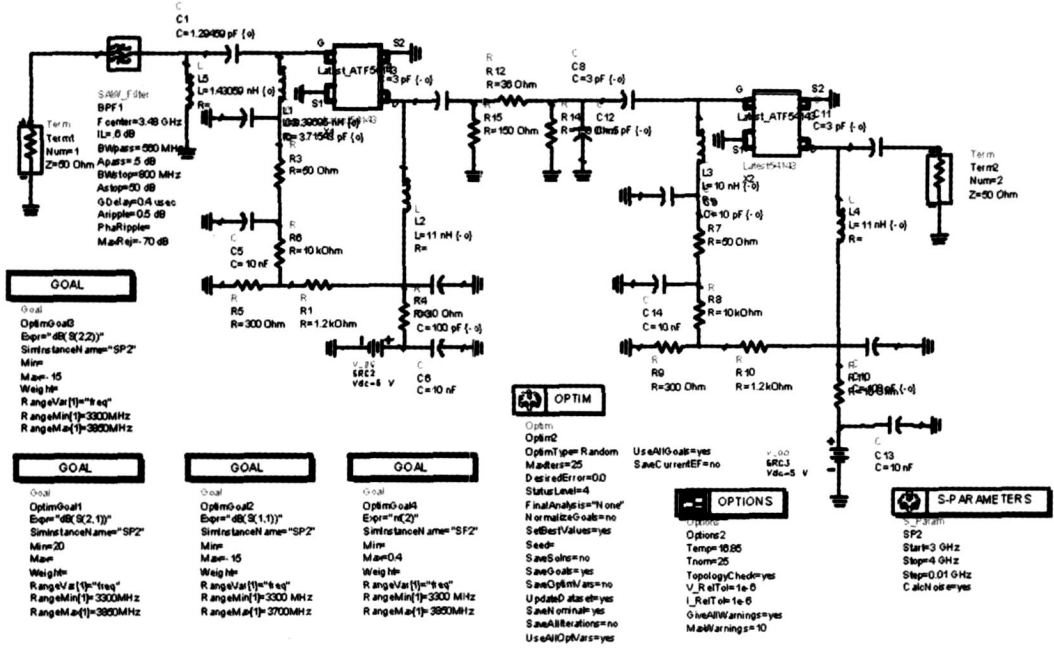


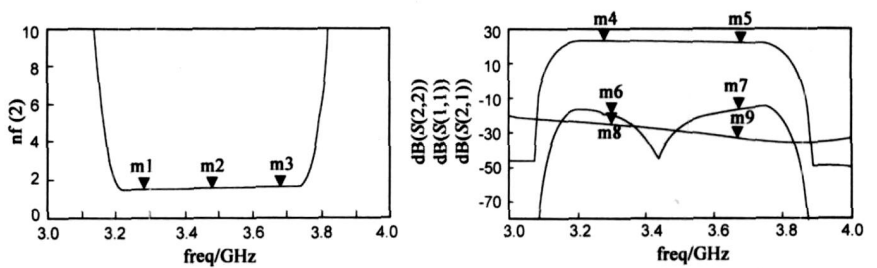
图 2 基于 ADS 仿真软件的两级级联低噪声放大器仿真原理图

对于 LNA 的设计主要从噪声系数、功率增益、线性范围和级间匹配四点考虑,而在 UWB 射频前端,级间匹配的设计最为复杂,所以本文主要讨论 LNA 的阻抗匹配网络设计.由仿真原理图可知,在低噪声放大器前加了一个射频带通滤波器,可以滤除带外的干扰和镜频干扰信号.级间不匹配易造成射频信号的反射与损耗,因此必须采用匹配网络来改善端口驻波.若采用集总参数元件构成的匹配网络很难实现宽带匹配.故在设计中在两级放

大器之间采用了  $\pi$  型衰减网络,使级间具有更好的宽带匹配特性.从图 3 的仿真结果中可以看出,由于采用了  $\pi$  型衰减网络,低噪声放大器的增益和噪声系数均得到了改善,该低噪声放大器的中心频率为 3.45GHz,带宽高达 500MHz,噪声系数  $N_F$  为 1.5dB,增益  $G$  为 22dB,具有较好的带内增益、噪声系数平坦特性,完全满足接收系统的性能要求.

### 3.2 频率合成器

由于 MB-OFDM UWB 系统是将信号的总带宽划分为若干较小的频带,每个子带采用 OFDM 技术,OFDM



(a) 低噪声放大器噪声系数仿真结果

(b) 低噪声放大器 S 参数仿真结果

m1 freq=3.280GHz nf(2)=1.478	m2 freq=3.480GHz nf(2)=1.522	m3 freq=3.680GHz nf(2)=1.614	m4 freq=3.280GHz dB(S(2,1))=-23.456	m9 freq=3.670GHz dB(S(2,2))=-33.359
m5 freq=3.680GHz dB(S(2,1))=22.036	m6 freq=3.300GHz dB(S(1,1))=-20.550	m7 freq=3.670GHz dB(S(1,1))=-16.748	m8 freq=3.300GHz dB(S(2,2))=-24.913	

图 3 低噪声放大器仿真结果

是一种无线环境下的高速传输技术,其主要思想是在频域内将信号分成若干正交子信道,每个子信道使用子载波进行调制,并将各个子载波并行传输.这样,尽管总的信道是非平坦的,但是每个子信道是相对平坦的,在每个子信道上进行窄带传输,信道带宽小于信号的相应带宽,可以大大消除信号波形间干扰(ISI).在 OFDM 系统中,各个子信道的载波相互正交,它们的频谱是相互重叠的,这样即减小了子载波的相互干扰,又提高了频谱利用率<sup>[7]</sup>.

但是 OFDM 也存在缺点,它对频偏和相位噪声非常敏感,这主要由频率合成器的特性决定的.由于 OFDM

系统区分各个子信道的方法是利用各个子载波之间的严格正交性,频偏和相位噪声使各个子载波间的正交特性恶化,仅 1% 的频偏就会使信噪比下降 30dB。所以,射频频率合成器和中频频率合成器设计成为接收机的关键技术。频率合成器主要由电压控制振荡器(Voltage Control Oscillator, VCO)、锁相环芯片,低通环路滤波器等组成。在 DG-OFDM-UWB 射频接收机中,电压控制振荡器采用了 Colpitts 振荡电路来实现。由于该电路结构简单,理论分析较为成熟,可参阅相关的参考文献<sup>[8,9]</sup>。

在仿真与实际测试中发现,射频频率合成器主要起了频谱搬移的作用,其特性对 OFDM 接收机影响有限。在研究中还发现,解调器的性能除了与解调器电路本身设计有关,还与中频频率合成器的特性密切相关,故需要指标好的中频频率合成器。利用 ADS 仿真软件,对中频频率合成器的关键部件-压控振荡器的相位噪声进行仿真,仿真出中频频率为 1GHz 的振荡器,在偏离中心频率 10kHz 的相位噪声为 -95dBc/Hz。经过实验验证,该指标满足解调器的性能指标要求。

### 3.3 解调器

在 DG-OFDM UWB 系统中,每个子载波采用 QPSK 调制方式。QPSK 是一种线性调制,具有较高的频谱利用率。信号轨迹经过零点,幅度变化范围大,包络波动大,对器件的线性要求高。

在通信系统中,衡量 OFDM 接收机性能的主要指标是误包率。当接收机具有较低的噪声系数、较好的频率源相位噪声特性时,该指标主要是由解调器的解调精度决定。

对于 QPSK 系统,接收机的解调精度用矢量调制误差(EVM)来表示。设接收机在一个时隙  $T$  内的输出波形为  $V(t)$ ,  $0 < t < T$ , 而理想输出波形应为  $S(t)$ ,  $0 < t < T$ , 则 EVM 可表示为

$$EVM^2 = \frac{\int_0^T |V(t) - S(t)|^2 dt}{\int_0^T |S(t)|^2 dt} \quad (2)$$

该指标主要由解调器的移相误差、幅度误差,中频滤波器的幅度特性、相位特性,本振相位噪声和器件的非线性特性等决定<sup>[10,11]</sup>。用 ADS 仿真软件对接收机的两个中频载波进行 QPSK EVM 仿真,仿真结果如图 4 所示。

## 4 DC-OFDM-UWB 射频接收机测试结果

依据上述接收机理论和仿真结果,设计电路,制作出 DG-OFDM UWB 射频接收机,并对射频指标进行详细测试,测试结果与仿真结果吻合的较好。具体测试如下。

射频接收机噪声系数的测试结果如图 5 所示,在中

心频率 3.45GHz 附近测得的最大噪声系数为 2.2dB,增益为 22dB,噪声系数和增益都有较好的带内平坦特性,与仿真结果吻合的较好,完全满足接收机链路计算中对噪声系数的要求,保证了接收机的接收灵敏度。

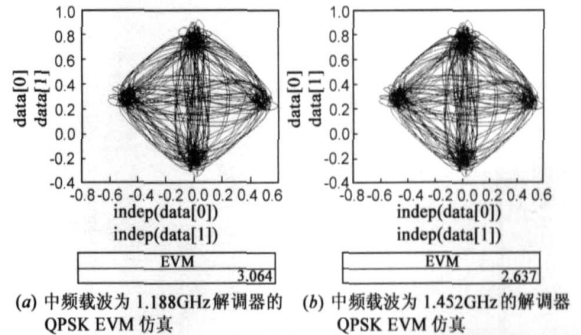


图 4 宽带中频解调器 QPSK EVM 特性仿真

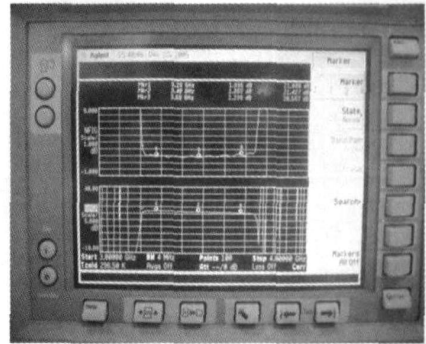


图 5 低噪声放大器测试结果

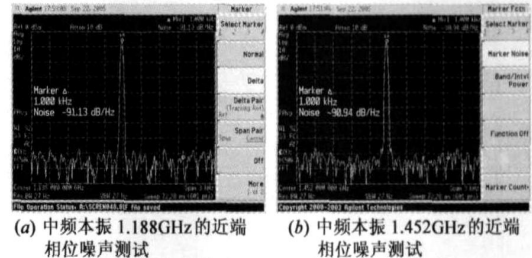
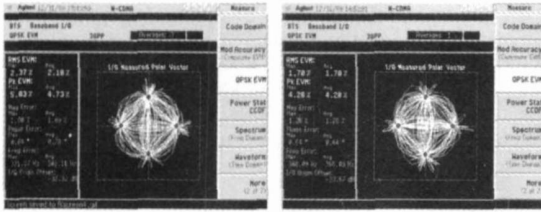


图 6 中频频率合成器近端相位噪声测试

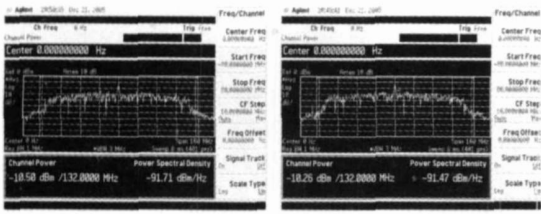
中频频率合成器的近端相位噪声测试结果如图 6 所示。可以看出,中频载波为 1.188GHz,在偏离中心频率 1kHz 处的相位噪声为 -91dBc/Hz;中频载波为 1.452GHz,在 1kHz 处的相位噪声为 -90dBc/Hz。由于 OFDM 系统对频率合成器的相位噪声比较敏感,经过测试,设计出的中频和射频频率合成器完全满足整系统的要求。

在射频接收机性能调试中,由于没有相关的 UWB 信号源和测试接收机,我们用 WCDMA 下行导频信号模拟 UWB 的子载波信号,测试接收机的解调精度,测试结果如图 7 所示。这样能反映出接收机的解调精度,同时,为了测试射频接收机的子带内平坦度特性,我们对接收的模拟 I 路和 Q 路频谱进行了测试,如图 8 所示。综合这两个指标的测试,基本能反映出宽带解调器的

特性. 由图 7 可以看到中频载波频率为 1.188GHz 的 QPSK EVM 为 2.37%, 载波频率为 1.452GHz 的解调器的 QPSK EVM 为 1.7%. 实测结果与仿真结果吻合. 由图 8 的频谱图可以看出, 接收的 I、Q 信号在 110MHz 带宽内波动约为  $\pm 2$ dB.

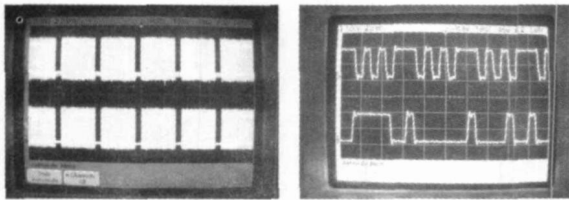


(a) 载波频率 1.188GHz 解调器 QPSK EVM 测试结果 (b) 载波频率 1.452GHz 解调器 QPSK EVM 测试结果  
图 7 宽带解调器 QPSK EVM 测试结果



(a) 接收机解调出的基带 I 路频谱 (b) 接收机解调出的基带 Q 路频谱  
图 8 解调出基带信号频谱

在实际数据文件传输中, 接收的 I、Q 时域波形如图 9 所示. 图 9(a) 为没有展开的包数据波形, 图 9(b) 为展开的比特数据波形.



(a) 接收机送往基带的时域包结构波形 (b) 接收机送往基带的时域比特波形  
图 9 接收机送往基带的时域信号波形

### 5 结论

经过设计、仿真和调试, 研制出 DC-OFDM UWB 射频接收机, 并在高速 UWB 无线通信实验、演示系统(如图 10 所示)得到应用. 采用该方案, 无线传输速率达到 110Mbps, 传输距离超过 10m, 可用来同时传输 4 路高清电视节目或未压缩视频图像, 或进行无线高速数据传输等.



图 10 DC-OFDM-UWB 接收机测试场景

随着通信技术的发展, DC-OFDM UWB 射频接收机在数字家庭和办公室高速无线网络, 信息家电和无线多媒体通信等领域有广泛的应用前景, 对实现我国超宽带技术的产业化、标准化, 具有重要的现实意义.

### 参考文献:

- [1] 通信学报专辑责任编辑组. 超宽带无线电技术[J]. 通信学报, 2005, 26(10): 2-6.
- [2] Revision of Part 15 of the commission's rules regarding ultra wideband transmission systems[S]. FCC, ET Docket 98-153, Apr, 2002.
- [3] 周先军, 胡修林, 张蕴玉, 等. 超宽带无线通信关键技术[J]. 电子技术应用, 2005, 31(10): 50-53.
- [4] Multiband OFDM physical layer proposal for IEEE 802.15 task group 3a[S]. IEEE 802.15 Working Group Documentation, no. IEEE P802.15-03/268r2, Nov. 2003.
- [5] Hongbing Zhu, Wei Hong, Ling Tian. RF subsystem for UWB communication systems[A]. 2005 Asia Pacific Microwave Conference Proceedings[C]. vol. 5, 2005. 3138-3140.
- [6] 李育红, 毋燕燕, 周正. 基于 QPSK 调制的高速 UWB OFDM 系统性能分析[J]. 无线电工程. 2005, 35(10): 13-15, 46.
- [7] 叶志猛, 季卫华. OFDM 应用中的关键技术[J]. 中国数据通信, 2003, 5(12): 79-87.
- [8] Ulrich L Rohde, David P Newkirk. RF/Microwave Circuit Design for Wireless Applications[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004. 100-105.
- [9] 董在望. 通信电路原理[M]. 高等教育出版社, 2002. 8: 270-271.
- [10] 王险峰. WCDMA 终端 EVM 指标分析[DB/OL]. Maxim 公司应用笔记.
- [11] 王险峰. WCDMA 手机关键指标分析. 第三届中国无线电技术研讨会[G]. 环球资源, 2000.

### 作者简介:



田玲女, 1977年4月出生, 现为东南大学信息科学与工程学院在职博士, 研究方向为移动通信中射频技术的研究.  
E-mail: ltian@seu.edu.cn

洪伟男, 1962年生. 现为东南大学无线电工程系教授、博士生导师, 教育部长江学者计划特聘教授、副主任、毫米波国家重点实验室主任. 近年来发表学术论文 200 多篇, 出版学术专著 2 部, 曾获自然科学奖、教育部和江苏省科技进步奖等多项奖励. 现为国际权威刊物 IEEE Trans. MTT 等国内外权威学术刊物的编委或审稿人, 中国电子学会天线分会副主任委员等.