

应用于未来WLAN网络的 8×8 MIMO宽带射频子系统

Design of an 8×8 MIMO Broadband
RF Subsystem for Future WLAN

作者：赵丽 周健义 杨汶汶 于志强 曹丽娜 东南大学

应用于未来 WLAN 网络的 8×8 MIMO 宽带射频子系统主要有三个技术难点。首先，随着信道带宽增大，射频收发信机对 I/Q 路不平衡和信道平坦度所造成的影响更加敏感。其次，在 802.11ac 标准中采用了 OFDM 调制信号，使得系统更容易受到载波偏移和相位噪声影响。最后，复杂调制信号的峰均比很高，需要在功率放大器中引入更多的功率回退，因此如何提高系统的发射功率成为一个难点。

为了解决这些问题，提高射频子系统的性能，作者采用了一些技术方法。在本振参考信号产生模块和锁相环模块中对噪声进行了去耦处理，提高了射频子系统的相位噪声性能。宽带调制器和运算放大器的组合使用，保证了在 80 MHz 中频带宽内的 I/Q 平衡特性。合理的印刷电路板布板和各个模块间金属隔舱的使用，降低了接收机和发射机之间的干扰。

测试结果表明，该系统可实现在高达 80m 的覆盖范围内实现高于 1 Gbps 的信号传输速率。该射频系统的发射机输出功率高达 23 dBm，为复杂调制下的功率回退提供了足够余量。该射频系统接收机的动态范围达到 50dB 以上。该射频子系统的天馈部分采用了并馈偶极子阵列全向天线，天线增益达到

8dBi。在 80MHz 带宽 64QAM 信号的调制下，实验测得该发射机和接收机的 EVM 分别为 2.6% 和 3.2%。

系统概览

未来 WLAN 网络预计将由分布于建筑物中的接入点 (Access Point, AP) 和用户设备 (User Equipment, UE) 组成。接入点和用户设备在硬件实现上一样，如图 1 所示。本文所介绍的射频子系统框图如图 2 所示。该射频子系统工作于 5.76 GHz~5.84 GHz，中频带宽为 80 MHz，包括一个电源模块、一个控制模块、一个参考信号生成模块和 8 个射频收发信机模块。电源模块通过 DC-DC 转换器将 48 V 供电转为 6 V 电压以提供给系统其他部分使用。控制模块负责基带部分与射频收发信机之间的通信，包括实现增益控制、频率控制以及收发转换等功能。参考信号生成模块通过恒温晶振和锁相环，给 8 个射频收发信机模块提供 10 MHz 参考信号。

射频子系统工作于时分双工 (TDD) 模式。射频收发信机通过一个射频接口与天线相连，并通过 I/Q 接口与基带相连。射频与基带的 I/Q 接口信号峰峰值为 500 mV。每个发射机与接收机通过环形器，共用一个天线，如图 3 所示。由于有 8 个射频收发信机模块，整个

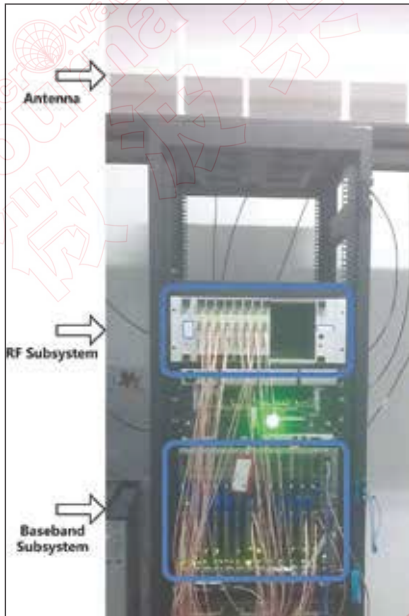


图 1. 通信节点硬件平台。

射频子系统一共采用了 8 套天线。

射频系统非理想特性的处理

相位噪声

相位噪声恶化主要源自以下三个原因：1、锁相环路带宽的设置不合理；2、电源噪声；3、锁相环参考信号本身的抖动。射频子系统工作于时分双工模式，接收机和发射机链路上的放大器随着收发控制信号的状态关断或者工作。由于射频子系统在接收和发射状态的功耗差别很大，所以系统所消耗的电流会在短时间内剧烈变化，从而引入极大的噪声。如果电源板上的电源没有充分去耦，将会极大地影响参考信号生成模块，使得参考信号发生抖动。合理设置锁相环路带宽，在锁相环电源中采用超低噪声稳压模块，并使用钽电容去耦可以有效地降低信号源的相位噪声。

将多块射频收发板插入射频子框时，如何将 10 MHz 参考信号顺利分配至每块射频收发板，且保证参考信号不发生畸变显得尤为重要。在本系

统中采用了一款超低抖动的 LVCMOS 扇出缓冲器芯片以用于参考信号生成模块，保证了系统正常工作。

I/Q 不平衡

根据文献，相位不平衡 θ 和幅度不平衡 β 会使通信系统的信噪比

SNR 恶化到 SNR'

$$SNR' = \frac{P_S}{P_N + P_{N\theta} + P_{N\alpha}} = \frac{SNR}{1 + SNR [\tan^2(\theta/2) + \alpha^2]} \quad (1)$$

ethertronics®

INNOVATE

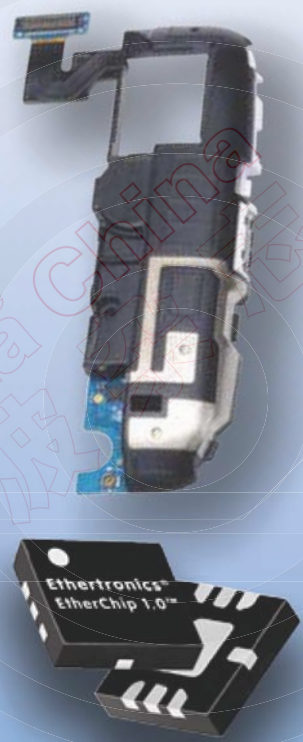
创新的未来


天线及RF系统


顶级手机、平板电脑、笔记本电脑及其它无线设备供应商与Ethertronics合作，解决他们最棘手的RF挑战，为市场提供创新的、尖端无线产品。凭借超过12亿的天线出货，Ethertronics支持广泛的无线设备和应用，包括2G、3G和4G（LTE和LTE Advanced）蜂窝、WiFi、WiMAX和WLAN、蓝牙、GPS等等。


Ethertronics屡获殊荣的天线和有源天线系统有助于制造商为客户提供在一个拥挤市场的最佳连接体验和待机时间。

倚天泰克电子（上海）有限公司
联系我们了解更多信息
ChinaSales@ethertronics.com









www.ethertronics.com/china/

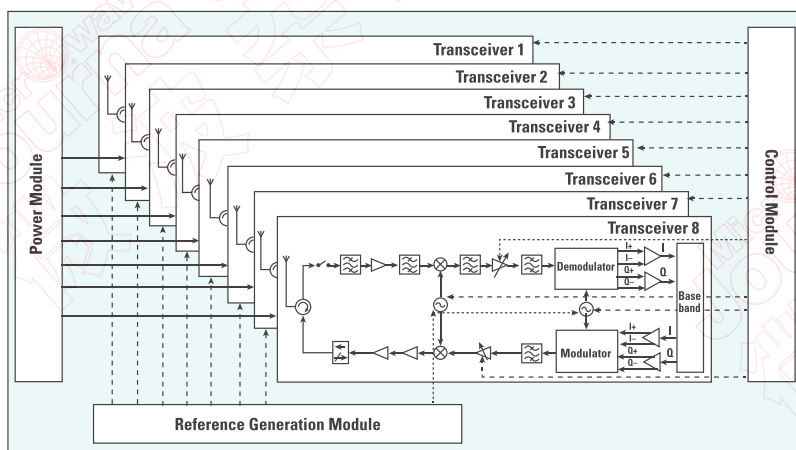


图 2. 射频子系统框图。

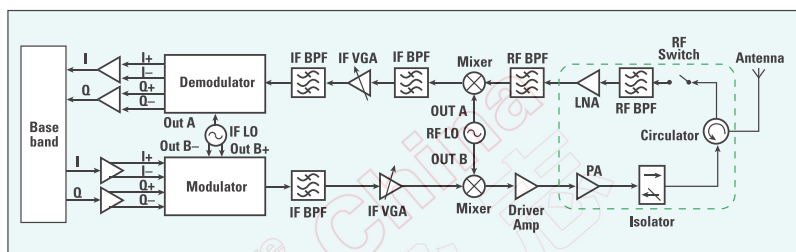


图 3. 5.8GHz WLAN 射频收发信机框图。

$$\text{其中 } \alpha = \frac{(10^{\beta/20} - 1)}{(10^{\beta/20} + 1)}$$

如果为了得到 21 dB 的信噪比，且信噪比恶化 2dB，那么系统所能容许的相位不平衡最大为 5°，幅度不平衡最大为 0.5dB。在实际的射频系统中，I/Q 不平衡对 80 MHz 宽带系统的影响比窄带系统要大的多。

I/Q 不平衡性主要由印刷电路板布板时引入的不对称和 I/Q 信号不同的路径长度导致。对于调制解调器，不纯净的本振信号也会造成 I/Q 信号的不平衡。在射频收发信机中，在锁相环与解调器之间加入了带通滤波器，以滤除杂波。此外，I/Q 不平衡还可以通过采用其它的措施进行一定程度的补偿，本系统中通过调节运算放大器的反馈电阻，可以补偿 I/Q 路的幅度不平衡，在 I 路或者 Q 路并联电容，可以补偿 I/Q 路的相位不平衡。

干扰

在设计射频收发信机的过程中，对各个功能模块（尤其是大信号模块部分）的有效屏蔽非常重要。通过采用金属结构件可以使该射频收发信机的

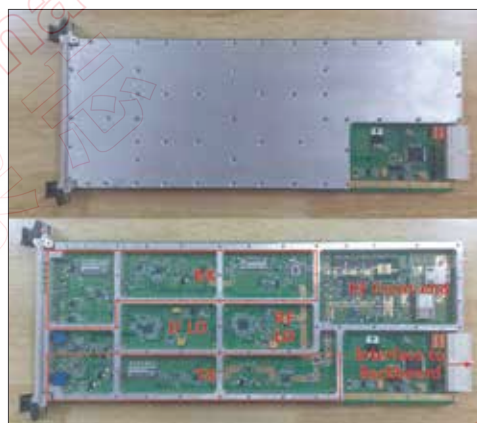


图 4. 5.8GHz WLAN 射频收发信机实物图。

各个功能模块被有效的隔离开，如图 4 所示。本振电路部分属于大功率信号模块，本振信号及其谐波常常可能通过介质基板或者其他渠道耦合到射频前端，对射频系统的正常工作造成干扰。本文介绍的射频收发信机中，在本振输出端连接了电感电容集总元件带通滤波器，以滤除本振的谐波。此外，所采用的高本振隔离混频器也一定程度上减小了本振泄露的影响。

另一个干扰来自载波泄露，其主要原因来自于调制器输入端的 I/Q 信号直流偏置不平衡。采用图 3 所示的运算放大器，可以在基带和调制器之间起到缓冲的作用，并且为 I/Q 信号提供直流偏置补偿。通过交替调节 I/Q 两路信号的直流偏置可以有效的抑制载波泄露。通过采用这些措施，本系统中的 I/Q 信号直流偏置不平衡

在 -55dBc 以下。

射频收发信机与天线的设计

基本结构

射频收发信机的中频电路部分和本振信号部分集成于一块 1.5 mm 厚的 4 层印刷电路板上。印刷电路板第一层是介电常数为 2.55，厚度为 0.5 mm 微波板材，其他层是 FR4 材料。图 3 中绿色框内是射频前端部分，为了使功放更好地接地及散热，该部分使用双层印刷电路板，电路板介电常数为 2.55，厚度为 0.5 mm。两块印刷电路板通过螺丝固定于金属底座上，双层电路板和四层电路板之间微带线断开的部分通过粘接铜皮连接起来。射频

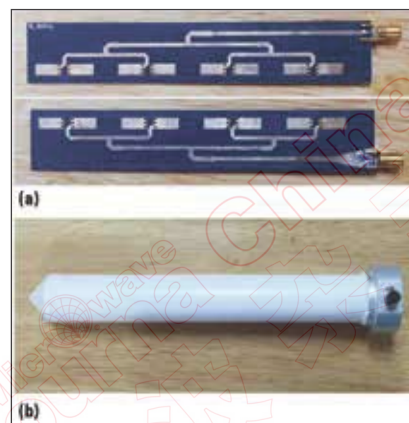


图 5. 天线实物图 (a) 封装图 (b)。

表 1 收发信机链路预算			
模块	指标		
发射机			
调制器	1dB压缩点	+ 9 dBm	
	镜像抑制	> 35 dB	
中频放大器及滤波器	增益	10 dB	
	1dB压缩点	+ 18 dBm	
混频器	变频损耗	7 dB	
	IP3	+ 23 dBm	
驱动放大器	增益	10 dB	
	1dB压缩点	+ 15 dBm	
功率放大器	增益	25 dB	
	1dB压缩点	+ 34 dBm	
发射机	平坦度	< 1 dB	
接收机			
两级低噪声放大器	噪声系数	2.3 dB	
	增益	30 dB	
	1dB压缩点	+ 15 dBm	
混频器	变频损耗	7 dB	
	输入三阶交调	+ 23 dBm	
中频放大器及滤波器	AGC=0	AGC=60	AGC=127
	增益: 60 dB	增益: 30 dB	Gain: 0 dB
	输入三阶交调		+ 18 dBm
	1dB压缩点	+ 13 dBm	
解调器	镜像抑制	> 30 dB	
	平坦度	< 1.5 dB	
天线			
	回波损耗	< 15 dB	
	增益	> 8 dBi	

频率为 5.76 GHz~5.84 GHz，本振频率 4.2 GHz，中频频率 1.6 GHz，带宽 80 MHz。

链路预算

IEEE 802.11ac 标准规划了 5 GHz~6 GHz 的射频工作频段，在单数据流场合、80 MHz 带宽的 64 QAM 信号调制下，数据传输速率可以达到 293 Mbps，此时的接收机灵敏度为 -58 dBm。对于 80 MHz 带宽，QPSK 调制，灵敏度达到 -71 dBm。接收机灵敏度 (P_{sen})、热噪声 (P_{noise})、噪声系数 (NF) 和信噪比 (SNR) 的关系如下：

$$P_{sen} = P_{noise} + NF + SNR \quad (2)$$

按照 80 MHz QPSK 信号信噪比

为 16 dB，热噪声为 -95 dBm 计算，那么为达到 -71dBm 的灵敏度，接收机的噪声系数应该低于 7 dB。通过使用多数数据流技术，可以使总的速率高于 1Gbps。本文所介绍的收发信机的链路预算如表 1 所示。

天线

高增益并馈天线由四个间隔半波长的双偶极子组成。双偶极子的两臂印刷在电路板的两面，通过金属通孔相连。这种结构可以有效地抑制交叉极化。馈电网络类似两级功分，同样宽度的平行线印刷在电路板的两面。当馈线连接到不同的振臂上，两个偶极子有 180° 的相位差，即工作在差模状态。天线板材采用与射频前端部分相同的微波双层板，尺寸为 12.3 cm × 2.2 cm。天线的结构如图 5 所示，封装在圆柱形

塑料筒里，与电缆通过 3.5mm SMA 接头相连。

测试结果

测试本文所介绍的射频子系统时所需的仪器包括：Keysight N8421A 任意波形发生器，R&S SMBV100A 信号发生器，Keysight N9020 频谱分析仪，Keysight DSO91304A 示波器。发射机的主要性能和本振信号的测试结果如表 2 所示。发射机 IMD3 和 EVM 性能如图 6 所示。接收机的主要性能如表 3 所示。接收机的 EVM 性能随着带宽的增加变差，如图 7 所示。接收机的最大输入信号功率为 -20dBm，最小输入信号功率（即灵敏度）为 -70dBm，其动态范围约为 50dB。

测试时使用的基带调制信号由任

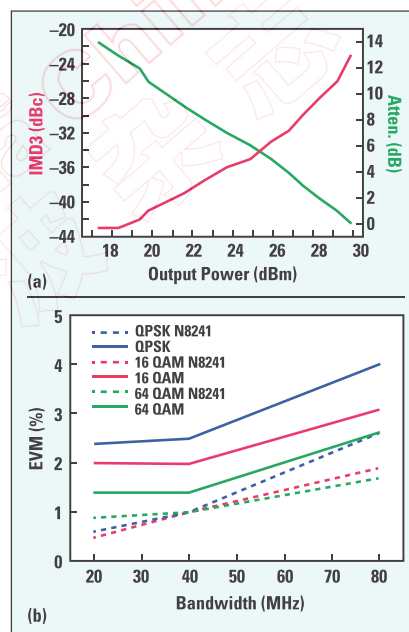


图 6. 发射机测试结果 IMD3 (a) 发射功率达到 23dBm 时的 EVM (b)。

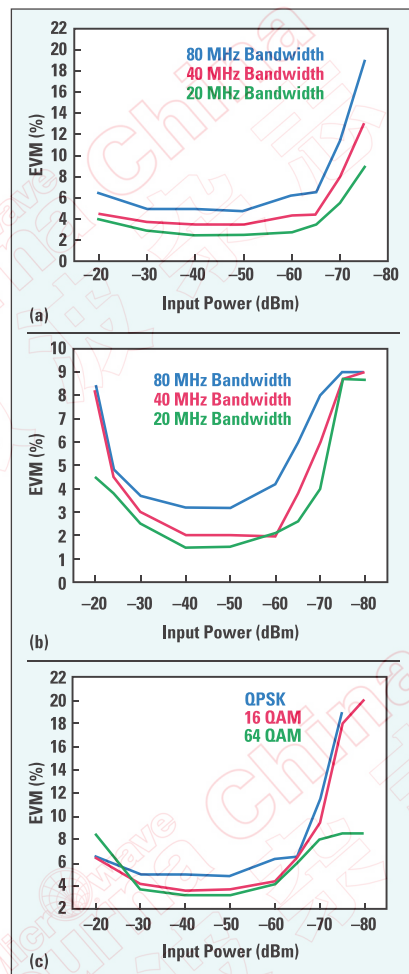


图 7. 接收机 EVM 性能 QPSK 信号 (a) 64QAM 信号 (b) 80MHz 调制信号 (c)。

指标	测试结果
本振相位噪声	4.2 GHz -83 dBc @ 1 kHz, -91 dBc @ 10 kHz, -102 dBc @ 100 kHz, -127 dBc @ 1 MHz
	1.6 GHz -93 dBc @ 1 kHz, -98 dBc @ 10 kHz, -110 dBc @ 100 kHz, -135 dBc @ 1 MHz
输出三阶交调	-36 dBc @ $P_{out} = +23$ dBm
增益平坦度	0.8 dB
载波抑制	> 55 dB
镜像抑制	> 35 dB
EVM (80MHz QPSK)	4% @ $P_{out} = +23$ dBm
SNR (80MHz QPSK)	28 dB @ $P_{out} = +23$ dBm

指标	测试结果
噪声系数	6 dB
增益平坦度	1.2 dB
动态范围	-20 to -70 dBm
镜像抑制	> 35 dB
EVM (80 MHz QPSK)	5% @ $P_{in} = -40$ dBm
SNR (80 MHz QPSK)	26 dB @ $P_{in} = -40$ dBm

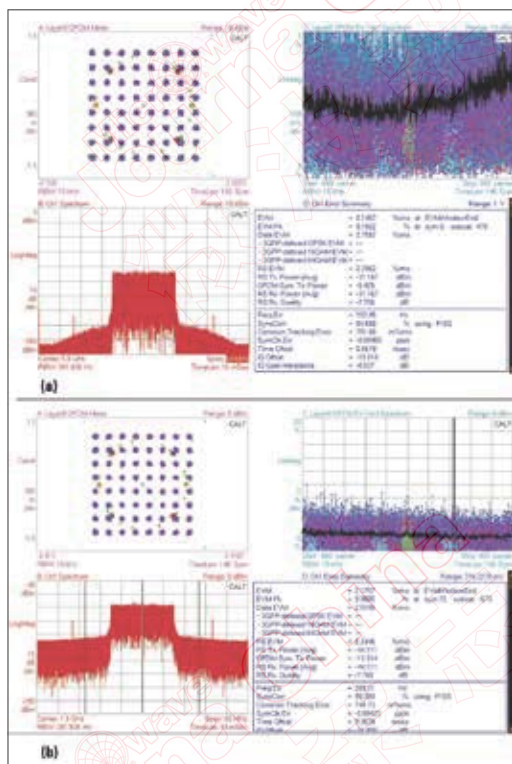


图 8. 20MHz LTE 信号 100 个资源块配置下, 发射机输出 23dBm 功率时的 EVM 性能 (a) 接收机的 EVM 性能 (b)。

任意波形发生器生成, 通过信号源上变频调制到 5.8 GHz。受到仪器带宽的限制, 本文中采用 20 MHz LTE 信号 (也是 OFDM 信号) 对射频收发信

机进行测试。发射机输出 23 dBm 功率时, 测得其 EVM 为 2.1%, 接收机的 EVM 为 2.2%, 如图 8 所示。由于 N8421A 缺少 IQ 偏移校准, 所以在宽带调制信号下实验测得的系统 EVM 性能不是很好, 对应于 80 MHz QPSK、16QAM、64QAM 的信号调制, 测得系统的 EVM 分别为 3.5%、2.4%、2%, 可以预见接收机实际的 EVM 性能要优于测试结果。系统中使用的天线的回波损耗和方向图的仿真与测试结果如图 9 所示。天线在 5.8 GHz 频率附近具有 8 dB_i 的增益, 在 4.8 GHz~6.5 GHz 的频率范围内阻抗匹配良好。将本文介绍的射频系统应用到了一个未来 WLAN 试验网, 该场景如图 10 所示。图 10 中左边的机柜作为接入点, 右边的机柜作为最近的终端, 数据流通过机柜顶端的

结论

本文详述了一个 8×8 MIMO 宽带射频子系统的设计, 研制和测试过程, 着重分析了影响射频子系统性能的相位噪声、I/Q 平衡、射频干扰等非理想特性, 并提出了解决方案以提高系统性能。射频接收机具有低噪声、大动态范围、高镜像抑制等特点。当射频发射机的输出功率为 23 dBm 时, 具

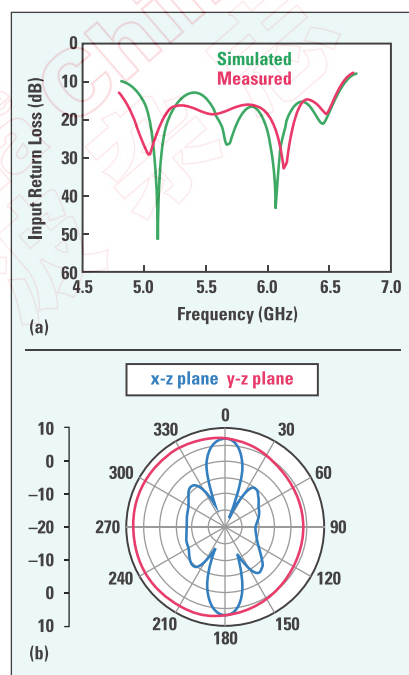


图 9. 天线回波损耗 (a) 方向图 (b)。

有高三阶交调抑制、低 EVM 等特性。子系统所使用的天线在 5.8 GHz 处具有有 8 dB_i 的天线增益。本文所介绍的 8×8 MIMO 宽带射频子系统被成功应用于一个未来 WLAN 试验网, 在 80m 的覆盖范围内成功实现了 1 Gbps 以上的传输速率。■

致谢

本文得到国家自然科学基金 60702163, 国家科技重大专项 2010ZX03007-002-01 和 2011ZX03004-003 资助。

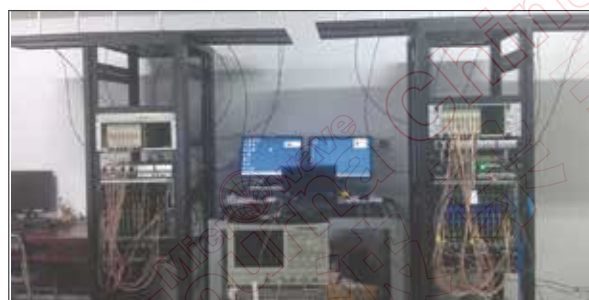


图 10. 未来 WLAN 试验网工作场景。