

自由空间 MIMO 信道测量系统^①

唐亮^{1,2}, 李林¹

¹(上海机电工程研究所, 上海 201109)

²(上海交通大学 电子信息与电气工程学院, 上海 201109)

摘要: 介绍了 MIMO 系统无线信道研究的现状, 对现阶段的 MIMO 信道建模方法进行了分析和比较, 提出了自由真实空间内的 MIMO 信道实时测量系统方案, 该系统采用 USRP 平台, 能实时地测量真实空间通信信道传输性能, 并对信道数据进行存储分析, 该系统成本低, 为真实 MIMO 信道研究提供了基础。

关键词: MIMO; 真实空间; USRP; 信道测量

System for Free Space MIMO Channel Measurement

TANG Liang^{1,2}, LI Lin¹

¹(Shanghai Institute of Mechanical and Electrical Engineering, Shanghai 201109, China)

²(School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 201109, China)

Abstract: In this paper, we describe the status of research of MIMO wireless channel. MIMO channel modelings on stage were analyzed and compared. We propose MIMO channel real time measurement system within free space, which uses the USRP platform and can real-time measure the communication channel transmission performance, doing simultaneously channel data storage analysis. The cost of the system is low. The paper provides the basis for real MIMO channel research.

Key words: MIMO; real space; USRP; channel measurement

MIMO 通信系统是 5G 系统的重要组成部分, 在有效提高频带利用率中起着举足轻重的作用。其中, MIMO 信道对于通信信号的传输影响深远。MIMO 技术渐渐成熟, 针对 MIMO 系统信道进行性能评估的研究越来越多。

但是目前针对 MIMO 信道的研究一直处于仿真阶段, 并没有对真实的 MIMO 通信环境进行实践研究。国际上已有的信道测量仪也因为成本高导致在学术研究中鲜有使用。因此, 本文从实践的角度, 选用软件无线电平台研发出一种实验方案, 给出低成本的 MIMO 真实信道测量方法, 为 MIMO 理论研究提供一种更合适的方法。

1 MIMO 信道研究现状分析

MIMO 技术在信号接收端和发送端使用多根天线,

在不增加带宽和发送功率的情况下, 成倍地提升信道容量和频谱利用率, 是如今无线通信研究的热点, 已经成为许多无线通信系统, 如: IEEE 802.11n, IEEE 802.16, LTE 等的关键技术。

MIMO 信道的建模是研究 MIMO 技术最直接也是最普遍的方法, 利用信道模型可以通过收发两端的特性方便地模拟和估计无线信号的传播和信道特性。

1.1 传统的纯软件测量方法

在众多有关 MIMO 信道的研究中, 大多数采用纯软件的建模方法^[1]来仿真和评估 MIMO 信道的性能。

文献[2]研究了 MIMO 通信信道的大尺度衰落模型, 文献[3]对多径信道中的小尺度衰落进行了研究。

纯软件的仿真手段, 能节省人力和财力, 是一种方便的 MIMO 系统研究和设计工具, 但是无线通信信道是时时刻刻变化着的, 而且传输环境也时刻受到不

^① 收稿时间:2015-07-01;收到修改稿时间:2015-09-24

同的干扰. 纯软件的方法无法对 MIMO 信道实现实时准确的测量与分析, 也无法对通信环境进行有效评估.

1.2 难度大的硬件测量系统

在大量的纯软件测量方法之外, 国际上出现了难度大的硬件测量原型系统.

目前市场上的成熟信道测量产品与信道分析仪大多是为网络设备制造商及服务供应商提供服务, 以方便他们进行新网络系统的部署, 典型的代表是美国微软研究院推出的 Sora 系统^[4]、美国 AGILENT 科技公司的 J2127A 传输测试仪^[5]、瑞士 Elektrobit AG 公司的 PropSound^[6]以及德国 MEDAV GmbH 公司的 RUSK 系列^[7]、弗吉尼亚理工大学的 OSSIE(Open Source SCA Implementation Embedded)项目^[8]等. 这些无线信道测量仪器价格非常昂贵且高速测量数据速率能力有限.

这些硬件测量系统, 不仅开发周期长, 而且测量成本高, 测量难度大, 严重限制了研究机构探测 MIMO 通信技术的前进发展.

本文则希望在理论的基础之上, 结合实测环境, 研究 MIMO 信道在真实自由空间情况下, 采用基于 linux 无线电 GUNRadio 平台和软件无线电 USRP 平台对实际通信信道的性能进行测量和分析研究.

2 MIMO信道测量系统设计与实现

为了满足实时测量的要求, 本文提出基于 MIMO-OFDM 通信过程中涉及的调制、编码、信道估计、解调和解码等技术, 自主研发一套 MIMO 信道实时测量平台, 即将“Python +linux+GUNRadio +C++”集成到一套硬件设备 USRP 中, 通过软件定义的方式实现 USRP 首发两端的 MIMO 信号通信, 再通过人机交互模块在线监测通信信道, 整个系统称为 MIMO 信道实时测量系统.

2.1 系统组成

整体设备技术采用的思路是将现有 MIMO 技术集成到软件中, 成为一个高度集成化发射和接收设备. 根据通信的技术原理, 同时由人际交互模块实现实时测量. 系统组成如图 1 所示.

该系统将不同功能的通信模块通过软件定义的方式同时加载在同一块信号处理硬件平台上, 通过紧连数模转换器的射频天线将信号发送出去; 在接收端, 模拟信号被射频天线接收, 由模数转换后再次被软件

无线电中的代码模块进行数字信号处理与分析.

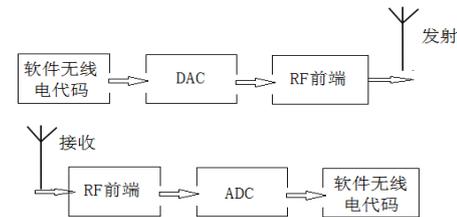


图 1 系统组成框图

2.2 信道测量方案

本测量系统的测量对象是, 真实通信信道的为了大尺度衰落和小尺度衰落参数, 不同的测量内容其测量方案不同. 以下测量方案分别针对信道不可或缺的参数信息.

2.2.1 信号发射

为了完成信号的同步, 发射信号首先要有前导码, 本文选择 3 个自相关性强的 m 序列作为发射信号的前导码. 前导码之后为两个数据流. 发射信号的帧结构如下图所示.

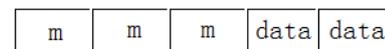


图 2 发射信号帧图

2.2.2 信号捕获

接收信号经过射频前端, 首先与本地序列取相关, 提取信号的前导码, 完成信号的同步, 然后再测量接收信号的幅度大小. 即使是短距离和短时间内的无线 MIMO 通信, 信号幅度也会产生剧烈的变化, 信号幅度反应了信道的衰落特性, 本系统通过 AD 转换器对接收信号的幅度进行统计, 由此获得信道小尺度衰落特性. 整个模块还包括采样模块(下采样)和锁相环模块, 这些模块以 C++ 代码的形式通过 swig 和 GUNRadio 连接而成.

2.2.3 信道测量

对信道的传播信息的测量, 即计算出信道的冲激响应, MIMO 通信信道是多径信道, 可以采用相干检测技术进行估计. 本文采用 PN 码和滑动相关技术对 MIMO 信道冲激响应进行估计, 设系统的冲激响应为 $h(t)$, 伪随机序列为 $n(t)$, 则接收到的信号为:

$$r(t) = \int h(\tau)n(t-\tau)d\tau \quad (1)$$

将接收到的信号与本地信号进行滑动互相关后:

$$E(r(t)n^*(t-\zeta)) = E[\int h(\tau)n(t-\tau)n^*(t-\zeta)d\tau] \quad (2)$$

又因为:

$$E[n(t)n^*(t-\tau)] = \delta(\tau) \quad (3)$$

则通过互相关估计便得到信道的冲激响应:

$$E[r(t)n^*(t-\tau)] = E[\int h(\tau)n(t-\tau)n^*(t-\zeta)d\tau] = h(\zeta) \quad (4)$$

2.3 功能模块设计

上一节已经陈述了信道参数的测量方案,这一节主要介绍系统的功能模块设计.系统的功能模块由一个通过 Python 建立的流向图表示(如图 3).

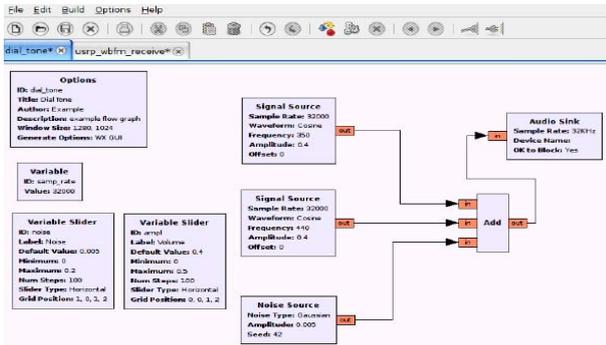


图 3 功能流向图

2.3.1 数据处理与分析模块设计

数据处理与分析模块的功能是对测量得到并存储下来的数据进行降噪和平滑处理,并在该基础上进行图形曲线的绘制. mysql 作为一个开源数据库,有着体积小和速度快的特点,本测量系统采用 mysql 关系型数据库完成信道特性信息的分帧存储.数据处理模块在流向图中以“端点”的形式给出,可以根据需要设置不同的输入输出端口数.为了保证系统的实时性,关键在于提高数据处理的效率,本文基于 linux 操作系统的实时性,分配多个进程,并在数据处理进程中创建多个子线程,并行完成数据处理任务.

2.3.1 人机交互模块设计

本系统基于 GUNRadio 的 gr-wxgui 模块,采用 Python 语言编写友好的人机交互 GUI,将经过处理的数据与信道参数对应,统一用图形化的频谱分析仪和示波器显示,使得整个抽象的信道变得直观,易于研究人员快速理解和判断.下图为图形化的频谱分析仪:

3 系统测试与结果分析

本次重点测试本系统在自由室内空间中进行

MIMO 通信情况下的各项信道性能指标.

测试地理区域: 室内, 10x8 空间范围

测试软件平台: GUN/Linux(PC)、USRP N10

其他: 全向鞭状天线、功率放大器(20dB)

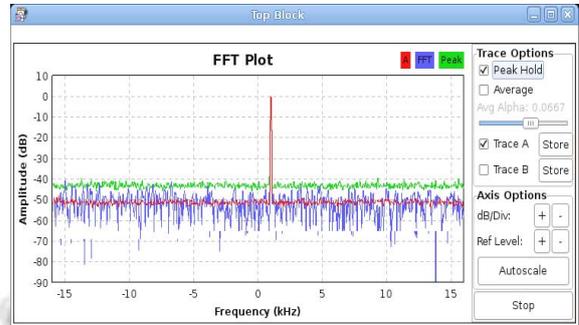


图 4 图形化的 FFT

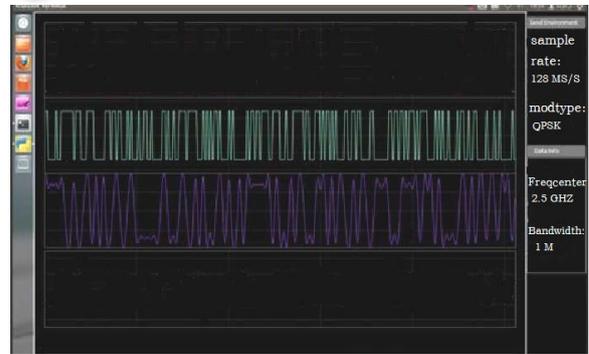


图 5 信号发射 GUI 图

图 5 为发射模块的 GUI 界面,经测试表明,该模块能形成经过 QPSK 调制好的信号,并能对信号波形和参数进行实时显示,发射机的幅度为 DAC 转换器的幅度:

$$P_{DAC} = \frac{DAC_{value}}{9830.1} \cdot 10mW \quad (5)$$

经过功率放大器后,发射功率为:

$$P_s(dB) = P_{DAC}(dB) + 20(dB) \quad (6)$$

点击“发射”按钮,将数据通过天线发送出去.

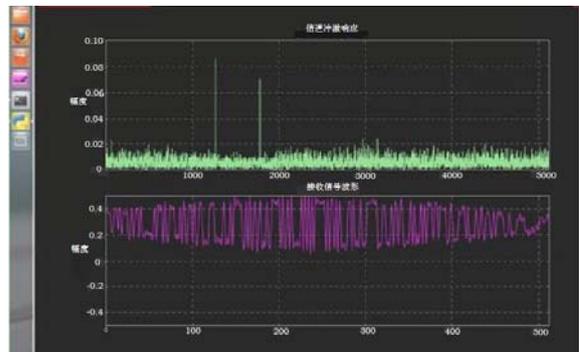


图 6 信号接收 GUI 图

图 6 为接收模块的信号显示图, 信道的冲激响应可以表示为(\mathbf{a}_l 为信道矩阵系数):

$$h(t, \tau) = \sum_{l=0}^{L-1} \mathbf{a}_l(t) \delta(t - \tau_l) \quad (7)$$

接收到的信号为:

$$r(t) = \int h(\tau) n(t - \tau) d\tau \quad (8)$$

经测试表明, 接收模块能完成信号的同步, 并实时显示接收信号的波形, 点击“数据分析”按钮, 可以对数据进行处理。

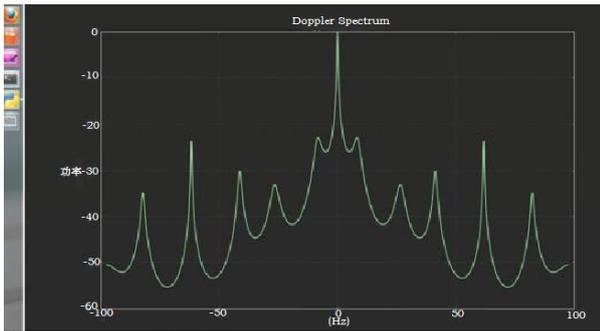


图 7 多普勒频谱图分析图

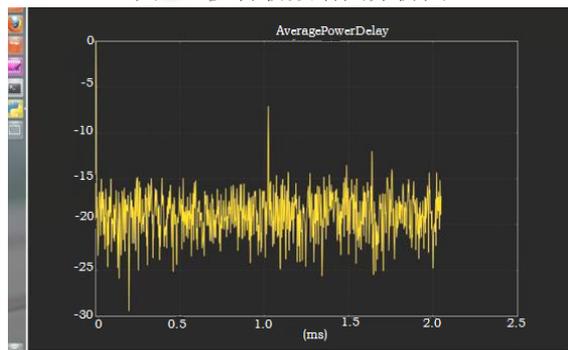


图 8 功率延迟谱分析图

图 7 和图 8 展示了对数据分析的结果图, 多普勒频谱 $S(f)$ 为:

$$S(f) = \int_0^{2\pi} A G(\phi) P(\phi) d\phi \quad (9)$$

其中, $G(\phi)$ 为天线在 ϕ 方向的天线增益, $P(\phi)$ 为在 ϕ 方向的入射能量。

平均功率延迟为:

$$\begin{aligned} P(\tau) &= \int_{-\infty}^{+\infty} S(\tau, f) df \\ &= \sum_{l=0}^{L-1} \mathbf{a}_l^2(t) \delta(t - \tau_l) \end{aligned} \quad (10)$$

经测试表明, 本系统能测量信道的多普勒功率谱和功率延迟分布, 正确反映 MIMO 通信信道参数特性。

该测量系统在室内空间进行测试, 从测量数据和显示结果分析, 自由空间 MIMO 信道测量系统满足设计要求: 能实时监测接收信号的实时情况, 及时反映

信道衰落, 对 MIMO 后面的编码和功率控制研究进行反馈, 在不额外人力和财力成本的情况下提高信道检测率, 保障更快更可靠的通信。

4 结语

本文提出的自由空间 MIMO 通信信道测量系统, 即采用“Python+linux+GURadio+C++”集成于 USRP 平台的方法完全可行。根据现有通信信道测量的现状, 该系统将大大提高分析 MIMO 信道的便利, 精确的对信道特性进行分析和判断, 具有巨大的研究潜在价值。另外, 此套系统的可延展性前景广阔: 可扩展天线数量及数据处理分析模块, 无论是单天线还是多天线均可进行自动切换, 节省硬件设备投资; 数据处理也能进行功能扩展, 进一步分析信道的其他特性, 指导研究人员迅速准确发现信道变化规律, 实现对信号的调制、编码、功率控制等实时调整。

该系统目前研发对象是自由空间内的 MIMO 信道测量技术, 在整个信道测量系统领域, 运用到多种信号处理方法以及全新的方案构造, 可在该领域保持业界领先。

参考文献

- 1 杨宏, 孔耀晖, 茹晨光, 李珂, 潘赟. 基于 GNU Radio 和 USRP 的无线通信系统建模仿真. 现代电子技术, 2013.
- 2 Rappaport TS, Rappaport TS. Wireless Communications: Principles and Practice. 2nd ed. Upper Saddle River NJ, 1995.
- 3 孙岩. 无线通信系统中的 MIMO 信道建模及其空时相关性研究[硕士学位论文]. 西安: 西安电子科技大学, 2008.
- 4 Kyro M, Haneda K, Takizawa K, Vainikainen P. Validation of statistical channel models for 60 GHz radio systems in hospital environments. IEEE Trans. on Biomedical Engineering, 2012.
- 5 Dubowski S. Agilent calls for shift in test philosophy. Network World Canada, 2002, 12(11).
- 6 Zhou T, Tao C, Liu L, et al. High-speed railway channel measurements and characterizations: A review. Journal of Modern Transportation, 2012, 20(4): 199-205.
- 7 Rappaport TS, Murdock JN, Michelson DG, et al. An open-source archiving system. Vehicular Technology Magazine, IEEE, 2011, 6(2): 24-32.
- 8 Robert M, Sayed S, Aguayo C, et al. OSSIE: Open source SCA for researchers. SDR Forum Technical Conference. 2004, 47.