

基于 SystemC 的 MIMO OFDM 系统的仿真实现

胡佳明, 金心宇, 汪 凡

(浙江大学信息科学与工程学院, 杭州 310027)

摘 要: MIMO 和 OFDM 是 B3G 和 4G 宽带无线通信的关键技术之一, 能极大地提高信道的频谱利用率。传统的通信系统的设计都采用 Matlab 仿真, 该文采用 SystemC 对 4 × 4 MIMO OFDM 无线通信系统进行了仿真实现。研究结果表明: MIMO OFDM 系统能获得更高的数据率和更好的传输质量, 使用 SystemC 仿真速度快, 易于硬件实现, 而且更节约系统资源。

关键词: 多输入多输出; 正交频分复用; 正交空时块码; VBLAST; SystemC

Simulation of MIMO OFDM System Based on SystemC

HU Jiaming, JIN Xinyu, WANG Fan

(College of Information Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

【Abstract】 The combination of MIMO and OFDM is the core technique of B3G and 4G wideband wireless communication, which can effectively increase spectral utilization. Traditionally, design of communication system is simulated with Matlab. This paper realizes the simulation of 4*4 MIMO OFDM wireless communication system using SystemC. Research result demonstrates that MIMO OFDM system provides higher data rate and better performance, and SystemC is a fast operated and easy realized development platform which can save more PC resources.

【Key words】 MIMO; OFDM; OSTBC; VBLAST; SystemC

1 概述

随着无线通信技术的不断发展, 人们对于通信速率和质量的要求越来越高。3G 标准具备在静止条件下实现 2Mbps、高速移动条件下实现 384Kbps 的数据传输能力。这样的数据传输能力难以在移动环境下高质量视频信息传输, 采用新的传输技术, 实现更高速率的 B3G 和 4G 通信成为无线通信研究的热点问题。

由于无线频带是有限的, 提高频谱利用率和系统容量成为通信的迫切要求。理论证明, 多天线系统能成倍地提高系统容量^[1], 成为 B3G 和 4G 的最有希望的技术之一。MIMO 的作用主要体现在分集和复用。理论证明, 在每根发射天线上发射功率一致的情况下, 接收天线数目和发射天线数目互易, 系统容量不变^[1,2]。空时发射分集的引入可以提高同样符号速率的系统性能。空间复用技术通过不同天线发送独立无关的码元, 成倍地提高了发送速率。

高速码元在无线信道丰富的多径传播中产生严重的时间选择性衰落, 使得译码非常困难。多载波技术使码片时间增加, 从而很好地抑制了信道多径时延。OFDM (正交频分复用) 正是多载波技术中非常有效的一种, 它通过并行传输频域正交的子载波, 很好地克服了多径时延, 同时因为子载波正交, 也达到很高的频谱利用率^[4]。由于可以使用成熟的 FFT (快速傅立叶变换) 技术, 使得 OFDM 在应用上非常方便, 因此成为未来通信系统的核心技术。

本文设计并采用 SystemC 仿真实现了一种 4 × 4 MIMO OFDM 无线通信系统。SystemC 是一种新的软硬件协同设计语言, 它是 Synopsys 公司、Coware 公司和 Frontier Design 公司合作开发结果, 其目的是为系统级设计提供一种单一的语言, 即提供一个公共平台来更好地进行软硬件协同设计和验证。研究结果表明, MIMO OFDM 系统对比于传统单输

入/单输出系统, 能获得更高的数据率和更好的传输质量; 由于采用高效的编译执行的 C/C++, 使用 SystemC 仿真相比于传统仿真工具 Matlab/Simulink, 仿真速度快, 同时它既可以进行系统级算法设计, 也易于硬件实现, 而且更节约系统资源。

2 MIMO OFDM 通信系统结构

文中系统采用模块化的方式来表示, 系统框图如图 1。可变数据源模块(1)产生信息码元, 信息码元通过编码调制模块(2)编码, 映射到符号, 然后通过空时编码模块(3)编码, 经过 OFDM 组帧模块(4)组帧, 加入 preamble 信号, OFDM 调制模块(5)调制, 上变频, 发射出去, 载波信号经过信道模块(6), 下变频, OFDM 解调模块(7)解调, 解帧模块(8)解帧, 空时译码模块(10)接收 OFDM 解调符号和信道估计模块(9)输入的信道参数进行空时译码, 输出软信息给解编码调制模块(11)进行解码。将(11)输出的解码二进制信息和数据源模块(1)的输出信息进行比较即可得到系统的误差性能。

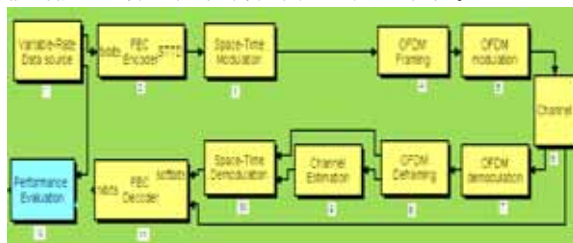


图 1 MIMO OFDM 仿真系统

空时编解码模块(3, 10)中应用的空时发射接收技术有

作者简介: 胡佳明(1980 -), 男, 硕士生, 主研方向: 宽带无线通信系统研究, B3G/4G 无线通信系统设计; 金心宇, 教授; 汪 凡, 博士生

收稿日期: 2006-02-05 **E-mail:** beckham@zju.edu.cn

OSTBC 和 VBLAST，通信系统中可以根据需要选择采用。

(1)OSTBC(正交空时块码)

为了获得更好的信号传输可靠性，可以采用空时分集发射技术。典型的结构就是OSTBC(正交空时块码)，在 4×4 的 MIMO 系统，将发射信号 4 个分为一组，在 4 根天线 8 个时刻上对其进行编码^[5]。假设输入信号 $X=\{s_1,s_2,s_3,s_4\}$ ，编码输出信号为

$$Y = \begin{matrix} S1/2, & -S2/2, & -S3/2, & -S4/2, & S1*/2, & -S2*/2, & -S3*/2, & -S4*/2 \\ S2/2, & S1/2, & S4/2, & -S3/2, & S2*/2, & S1*/2, & S4*/2, & -S3*/2 \\ S3/2, & -S4/2, & S1/2, & S2/2, & S3*/2, & -S4*/2, & S1*/2, & S2*/2 \\ S4/2, & S3/2, & -S2/2, & S1/2, & S4*/2, & S3*/2, & -S2*/2, & S1*/2 \end{matrix} \quad (1)$$

其中，4 根天线发射总功率归一化。

在接收端对 4 根天线 8 个时刻的 32 个信号进行联合译码时，由于发送端采用了很大的发送分集(8 个时刻仅发送了 1 个时刻的信息)，因此接收端解码非常简单，且有很好的性能。

(2)VBLAST(垂直贝尔实验室分层结构)

为了获得更高的数据率，可以采用空间复用发射技术。典型的结构是 VBLAST，在 4×4 的 MIMO 系统，将串行信号分别分配到发射天线上并行传输，达到了 MIMO 系统理论上的最高传输速率。

在接收端对 4 根天线上同一时刻的 4 个信号进行联合译码，采用 OSIC-MMSE(排序的连续干扰抵消 - 最小方差误差)算法^[6]。此算法相对最优的 ML(最大似然估计)算法复杂度性能较低，但译码性能较差，是一种天线数较多仍有很好适用性的次优算法。

3 SystemC 仿真实现 MIMO OFDM 通信系统

SystemC 是在 C++ 的基础上扩展了硬件类和仿真核形成的，由于结合了面向对象编程和硬件建模机制原理两方面的优点，这可以使 SystemC 在抽象层次的不同级进行系统设计。系统硬件部分可以用 C/C++ 类来描述，其基本单元是模块。模块内可包含子模块、端口和进程，模块之间通过端口和信号进行连接和通信。系统的功能由进程来实现，其同步操作通过时钟进程来执行。而系统软件部分的设计可以用 C/C++ 语言来实现功能和算法。

系统中使用 SystemC 中最为典型的通信机制 FIFO(First In First Out)。作者实现的通信系统依然使用自顶向下的方法进行设计，实现流程如图 2。

(1)sc_main 为仿真的入口函数，可以认为是仿真链中的入口模块，主要初始化系统参数，并且调用 sc_start()，让底层模块仿真并行进行，直到用户停止仿真或者出现异常，仿真才会中止。

(2)笔者为通信系统编写顶级模块 HIERARCHICAL_TOP_CHAIN。初始化其底层模块，并将底层模块输入输出端口连接起来。系统中 HIERARCHICAL_TOP_CHAIN 所连接的二级模块为发送模块、信道模块和接收模块。

(3)编写二级模块。比如，对于一个接收机模块 HIERARCHICAL_RX_CHAIN，完成初始化底层模块，并将底层模块输入输出端口连接起来。采用 VBLAST 编解码技术系统中接收机模块由 OFDM 解调模块、解帧模块、信道估计模块、空时译码模块、信道编码译码模块和误差比较模块组成。

(4)编写实现通信的底层模块。一般一个底层模块由 4 个文件组成：2 个 SystemC 文件用来定义端口、输入输出、模块内部参数以及模块功能，这 2 个文件是必须的；2 个 C/C++

文件用来实现具体的算法。

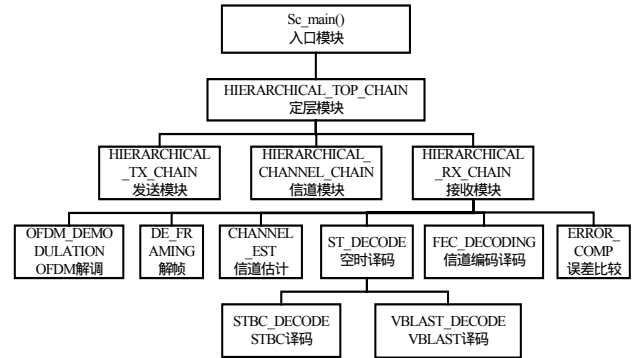


图 2 MIMO OFDM 系统的 SystemC 实现结构

空时译码模块中包含两种空时技术模块，以 VBLAST 译码模块 VBLAST_DECODE 为例，2 个 SystemC 文件是 vblast_decode.h 和 vblast_decode.cpp。其中，vblast_decode.h 对模块进行定义，如模块端口的定义：

```
cpx_drv_in<float_complex> vblast_decode_input1; // input
//complex symbols from "DEFRAMING" module
cpx_drv_in<float_complex> vblast_decode_input2; // input complex
//symbols from "CHANNEL_EST" module
cpx_drv_out<float_complex> vblast_decode_output; // output complex
//symbols to "FEC_DECODING" module
```

同时也定义了模块输入输出参数和模块参数，并定义了一些方法；在 vblast_decode.cpp 中实现了模块功能，对输入数据进行处理得到输出数据，并调用 vblast_funct_lib_decode.h 和 vblast_funct_lib_decode.cpp 中定义的算法实现函数。

两个外部的 C++ 文件是 vblast_funct_lib_decode.h 和 vblast_funct_lib_decode.cpp，完成 VBLAST 算法的实现，文中系统采用 OSIC-MMSE 算法^[3]。

4 仿真分析

本文对 4 收 4 发的 MIMO OFDM 系统进行了性能仿真。信道编码方式为卷积码和 Turbo 码，采用(2, 1, 7)的卷积编码器，交织长度为 1 440，Turbo 译码迭代次数为 8，通过打孔调整为 4 种编码速率，并对应不同的 4 种映射法则，如表 1 所示；空时编码技术为 OSTBC 和 VBLAST，输出软信息给信道译码模块译码；信道通过 OFDM 技术分为 2 048 个子信道，并在前后两端均空余 172 个子信道作为保护边带，FFT 长度为 2 048 点；23 个 OFDM 时刻为 1 帧，每帧 3 个 preamble 信号，1 个 preamble 作同步，另 2 个作信道估计，10 个 OFDM 符号时刻作一次信道估计，帧长为 23(时刻数) × 2048(OFDM 符号数) × 4(天线数)；MIMO 信道采用 SUI-3，为多径衰落的多普勒频移扩展信道，如表 2 所示。

表 1 编码调制

	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4
映射法则:	BPSK	QPSK	16QAM	64QAM
编码速率:	1/2	2/3	3/4	5/6

表 2 SUI-3 信道参数

	POWER(dB)	K Factor	τ (μ s)	Doppler(Hz)
SUI-3:	[0 -5 -10]	[1 0 0]	[0.0 0.5 1.0]	[0.4 0.4 0.4]

图 3 为 4×4 OSTBC 1/2 码率在模式 2(映射方式为 QPSK，信道编码码率为 2/3)、SUI-3 下的系统性能曲线，mse 曲线代表信道估计的误差。可以看出，Turbo 编解码方式，由于采用级联迭代译码的方式，拥有非常优良的性能，在 BER 为 $1e-6$ 时，大约相对于 CC(卷积码)系统有 4dB 左右的增益。图

4 为 4×4 VBLAST 系统在模式 2、SUI-3 下的系统性能曲线。可以看出, 相对于 OSTBC 系统, VBLAST 系统性能较差。这是因为 OSTBC 在发射端采用了空时分集技术, 从而获得了很高的发射分集增益。这也是以牺牲发射码元速率来获得的。此 OSTBC 系统采用 8 时刻发 4 个信号的编码方案, 空时编码速率为 $4/8=1/2$, 而 VBLAST 系统 1 个时刻发送 4 个信号, 编码速率为 4, 所以同样模式下 OSTBC 系统数据率仅为 VBLAST 系统的 $1/8$ 。

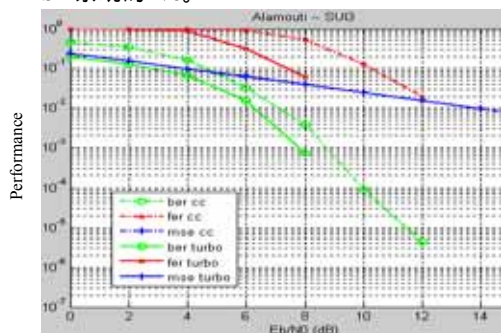


图 3 OSTBC 4×4 模式 2 下性能曲线

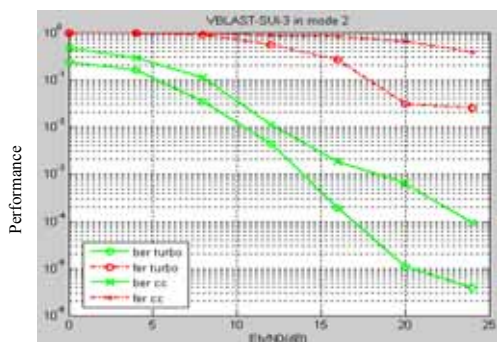


图 4 VBLAST 4×4 模式 2 下性能曲线

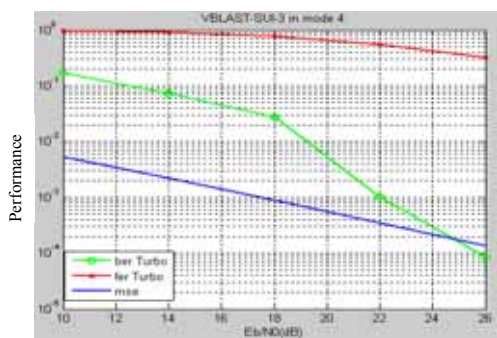


图 5 VBLAST 4×4 模式 4 下性能曲线

图 5 为 VBLST 系统在模式 4(映射方式为 64QAM, 信道编码码率为 $5/6$)下采用 turbo 信道编解码性能曲线。由于采用了高阶调制和高速率编码, 系统信息传送速率有了很大的提高, 为模式 2 的 3.75 倍。但是误差性能相对于模式 2 有了较大的下降。这是容易理解的, 因为 64QAM 星座点距离更为密集, 且 $5/6$ 的编码速率信息冗余量更少, 这些直接导致了接收端判决更为困难。

本文系统使用 SystemC 实现时, 在 Intel P4 2.4GHz、512MB RAM 上运行每帧数据只需约 15s, 而用 Matlab/Simulink 实现则大约需要 2min, 大大地提高了仿真运行效率。

5 结论

本文研究了 MIMO OFDM 仿真通信系统的关键技术, 并使用新的开源软硬件协同设计语言 SystemC 实现了这个系统。多天线系统能成倍地增加系统容量, 仿真结果表明, 空时发射分集技术能极大地提高系统误差性能, 而空间复用技术则能成倍地提高传送数据率, 相比于传统的仿真方法, 使用 SystemC 仿真通信系统易于硬件实现, 更高效运行且更少占用系统资源。结合 OFDM 技术、信道编码(卷积码、turbo 码)、软译码以及自适应编码调制和自适应天线功率分配等技术, 多天线系统展现了良好的性能, 成为未来宽带无线通信的一种有效解决方案。

参考文献

- 1 Telatar I E. Capacity of Multi-antenna Gaussian Channels[J]. Eur. Trans. on Telecommun, 1999, 10(6): 585-595.
- 2 Alamouti S M. A Simple Transmit Diversity Technique for Wireless Communication[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1998, 16(8): 1451-1458.
- 3 Woliansky P W, Foschini G J, Golden G D, et al. V-BLAST: An Architecture for Realizing Very High Data Rates over the Rich-scattering Wireless Channel[C]// Proc. of IEEE ISSSE-1998, Pisa, Italy, 1998: 295-300.
- 4 佟学俭, 罗 涛. OFDM 移动通信技术原理与应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2003.
- 5 Tarokh V, Jafarkhani H, Calderbank A R. Space-time Block Codes from Orthogonal Designs[J]. IEEE Trans. on Inform. Theory, 1999, 45(5): 1456-1467.
- 6 Vucetic B, Yuan Jinhong. Space-time Coding[M]. John Wiley & Sons Ltd., 2003.

(上接第 282 页)

参考文献

- 1 中华人民共和国公安部. GA 461-2004 居民身份证用数字相片技术要求[S]. 2004.
- 2 Gonzalez R C, Woods R E. 数字图像处理[M]. 第 2 版. 阮秋琦, 阮宇智, 译. 北京: 电子工业出版社, 2003: 224-240.
- 3 Ulrich M, Steger C. Performanc Evaluation of 2D Object Recognition Techniques[R]. Lehrstuhl f r Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universitt MUnchen, Technical Report: PF-2002-01, 2002.
- 4 Sonka M, Hlavac V, Boyle R. Image Processing, Analysis, and Machine Vision Chapman & Hall Computing[M]. 2nd Edition. London: Brooks/Cole Publishing, 2002.
- 5 吕凤军. 数字图像处理编程[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.
- 6 李玉山. 数字视觉视频技术[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2006.
- 7 张广军. 机器视觉[M]. 北京: 科学出版社, 2005.