

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2014.09.019

引用格式:陈雷成,王华华,江彦鲤,等.一种低复杂度信道模拟器的设计[J].电讯技术,2014,54(9):1275-1279. [CHEN Lei-cheng, WANG Hua-hua, LI Ming, et al. Design of a Low Complexity Channel Simulator[J]. Telecommunication Engineering, 2014, 54(9):1275-1279.]

一种低复杂度信道模拟器的设计*

陈雷成**,王华华,江彦鲤,陈发堂,李 明

(重庆邮电大学 重庆市移动通信技术重点实验室,重庆 400065)

摘 要:针对 TD-LTE 射频一致性测试系统专项的需求及通用信道模拟器设计周期长、复杂度高的现状,研究了影响无线信道特性的路径损耗、阴影衰落、多径多普勒效应和高斯白噪声等因素,并相应提出了一种新的计算正余弦函数方法和高斯白噪声产生方法。通过信道理论建模、Matlab 链路搭建进行模型优化分析以及基于 Xilinx 公司 Virtex-6 芯片的模型 FPGA 实现,得到了一种简单有效的信道模拟器。实验表明,用 TD-LTE 基带信号作为激励,该信道冲激响应与 Matlab 理论值误差在 2‰之内,且模型不涉及 SCM、WINNER 等模型天线方向图、多链路等高复杂度模块,说明该信道模拟器具有简便性和可靠性。

关键词:TD-LTE;射频一致性测试系统;信道模拟器;多径多普勒效应;高斯白噪声;低复杂度

中图分类号:TN929.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2014)09-1275-05

Design of a Low Complexity Channel Simulator

CHEN Lei-cheng, WANG Hua-hua, JIANG Yan-li, CHEN Fa-tang, LI Ming

(Key Laboratory of Mobile Communication Technology of Chongqing, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: According to the requirement of TD-LTE Radio Frequency (RF) Conformance Test System and the actuality of long designing circle and high complexity of general channel simulator, this paper studies the characteristics of the path loss, multipath and Doppler effect and Gauss white noise (GWN) and other factors of the wireless channel, and proposes a new method to calculate the sine and cosine functions and a new method to produce GWN. Then through the channel theory modeling, Matlab link building, and FPGA implementation based on Virtex-6 chip of Xilinx Company, a simple and effective channel simulator is obtained. The experiment results show that with the TD-LTE baseband signal as excitation, the error between the channel impulse response and the theoretical value is lower than 2‰, and the model optimizes the high complexity modules of antenna pattern and multi-link of Spatial Channel Model (SCM), WINNER and other models, which verifies the simplicity and reliability of the channel simulator.

Key words: TD-LTE; RF conformance test system; channel simulator; multipath and Doppler effect; Gauss white noise; low complexity

* 收稿日期:2014-03-10;修回日期:2014-06-09 Received date:2014-03-10;Revised date:2014-06-09
基金项目:国家科技重大专项(2011ZX03001-003-01);重庆邮电大学青年科学基金工程(A2012-91)
Foundation Item:The National Science and Technology Major Project (2011ZX03001-003-01);The Sciences Youth Funded Projects for Chongqing University of Posts and Telecommunications (A2012-91)

** 通讯作者:chen_07031108@foxmail.com Corresponding author:chen_07031108@foxmail.com

1 引言

鉴于无线信道研究中信道模型的重要性以及在
实际无线通信环境中进行相关研究与测试的不切实际
性,研究人员通常通过数学建模及软硬件仿真实
现各种所需的信道模拟器,以便在实验室中对实际
无线信道进行虚拟实现^[1]。

目前,通用信道模型虽然可以对实际环境进行
有效模拟,但普遍有设计周期长、复杂度高的缺点。
空间信道建模(SCM)是3GPP组织提出的一种标准
化模型^[2],但其需要考虑高复杂度的天线方向图、
射线到达角和离开角等因素;相关矩阵模型^[3]同样
如此;SCME^[4]是对SCM的拓展模型,但由于引入
了中径和簇内时延等概念,其总体设计复杂度更高;
WINNERII模型是在SCM和SCME基础上发展的又
一种高仿真度信道模型,其环境场景分为四大类、14
类、19子类和27小类,不同场景建模方法不尽相
同,如此细致的分类也直接导致建模复杂度的提
高^[5-7];COST259和COST273建模中散射体对射线
的散射机制也很大程度上增大了建模复杂度。

针对上述模型高复杂度的缺点,本文通过理论
建模、硬件实现以及对其中相关算法的改进,设计
了一种低复杂度、低资源消耗的信道模拟器,并已
经应用到了TD-LTE射频一致性测试科技专项中。

2 信道模拟器的总体架构设计

基带信号建模时,小尺度衰落的研究是重中之
重,而将路径损耗和阴影衰落仅用一个常数进行加
权,最后考虑加性噪声^[8]。建模框架流程如图1
所示。

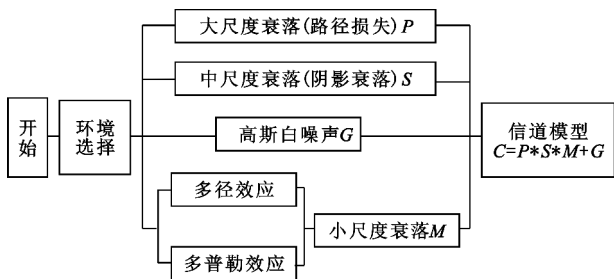


图1 信道模拟器建模方案

Fig. 1 The modeling scheme of channel simulator

3 信道模拟器的数学理论建模

3.1 路径损耗模块

大尺度衰落有很多模型,针对不同的环境,我们

采用不同的路损模型。

3.1.1 宏小区环境

采用COST231-Hata模型,其是基于Hata模型
发展得到,适用于1 500~2 000 MHz,如式(1):

$$PL = (44.9 - 6.55 \lg(h_{bs})) \lg\left(\frac{d}{1000}\right) + 45.5 + (35.46 - 1.1h_{ms}) \lg(f_c) - 13.82 \lg(h_{bs}) + 0.7h_{ms} + C \tag{1}$$

其中,C(dB)为校正因子,如式(2):

$$C = \begin{cases} 0, & \text{中等城市和郊区} \\ 3, & \text{大城市中心地区} \end{cases} \tag{2}$$

设定基站、移动台天线高度等相关参变量,得到
路径损耗如式(3):

$$PL = \begin{cases} 31.5 + 35 \lg(d), & \text{郊区路损} \\ 34.5 + 35 \lg(d), & \text{市区路损} \end{cases}, d \geq 35\text{m} \tag{3}$$

3.1.2 微小区环境

对于无视距径(NLOS)情形,采用COST231
Walfish-Ikegami NLOS模型;视距径(LOS)情形,采
用COST231-Walfish-Ikegami街道峡谷模型。载频
f_c=1 900 MHz时,路径损耗如式(4):

$$PL = \begin{cases} 34.53 + 38 \lg(d), & d \geq 30 \\ 30.18 + 26 \lg(d), & d \geq 20 \end{cases} \tag{4}$$

3.2 阴影衰落模块

依据Albert Algans等人的AS、DS和SF经验性
统计分析,得到阴影衰落分布函数如式(5):

$$\sigma_{SF} = 10^{(\sigma_{SH} \gamma / 10)} \tag{5}$$

其中,σ_{SH}为阴影衰落标准差,是根据路径损耗与距
离的回归线的标准偏差分析得到的,单位dB;γ推
导如式(6):

$$\gamma = \sqrt{\rho_{\gamma\alpha}} \omega_1 + \sqrt{\rho_{\gamma\beta}} \omega_2 + \sqrt{1-\zeta} \omega_3 + \xi \sqrt{\zeta} \tag{6}$$

其中,ρ_{γα}=-0.6为时延扩展与基站天线阴影衰落之
间的互相关系数,ρ_{γβ}=-0.6为角度扩展与基站天线
阴影衰落之间的互相关系数,ζ=0.5为基站天线之
间阴影衰落的互相关系数,ξ和ω_i(i=1,2,3)是服
从高斯分布的随机参数。

鉴于以上分析以及阴影衰落的不变性,我们设
定宏小区与微小区阴影衰落分别为8 dB和10 dB。

3.3 小尺度衰落模块

基于对小尺度衰落的分析,设定传输信号为
s(t),则相应信道传播理论模型如式(7):

$$y(t) = \sum_{n=1}^N a_n e^{j\omega t - j\omega \tau_n + j\omega_n t} \tag{7}$$

3.4 高斯白噪声模块

本文噪声产生方法采用一种改进型 Box-Muller 方法,实现方案如式(8):

$$\begin{cases} f(u_1) = \sqrt{-2\ln(u_1)} \\ g_1(u_2) = \cos(2\pi u_2), n_1 = f(u_1)g_1(u_2) \\ g_2(u_2) = \sin(2\pi u_2), n_2 = f(u_1)g_2(u_2) \end{cases} \quad (8)$$

其中,随机变量 u_1 和 u_2 服从 $(0,1)$ 均匀分布。
相比传统的方式,本改进方案可以达到较高的吞吐速率,而且只需较少的硬件重配置即可完成不同均匀随机数位宽的设置,进而得到尾部精度不同的高斯分布曲线。该方案通过混合分段方式的改进可以节省硬件资源,且对精度没有较大影响,更适用于高速数字信号处理。

4 信道模拟器的 FPGA 设计

下面针对上述数学模型进行基于 FPGA 的硬件设计,TD-LTE 基带信号经过信道模拟器的过程相当于在基带信号上叠加信道冲激响应函数,实现过程采用模块化处理。

4.1 硬件环境

由于 Xilinx 公司 Virtex-6 FPGA 较好地解决了硬件芯片技术和电路设计技术融合问题,与前代 Virtex 器件和竞争厂商 FPGA 产品相比,其功耗大大降低,性能更高且成本更低,故此处选用 Virtex-6 系列 XC6VLX475T 芯片。信道模拟器的 FPGA 实现架构如图 2 所示。

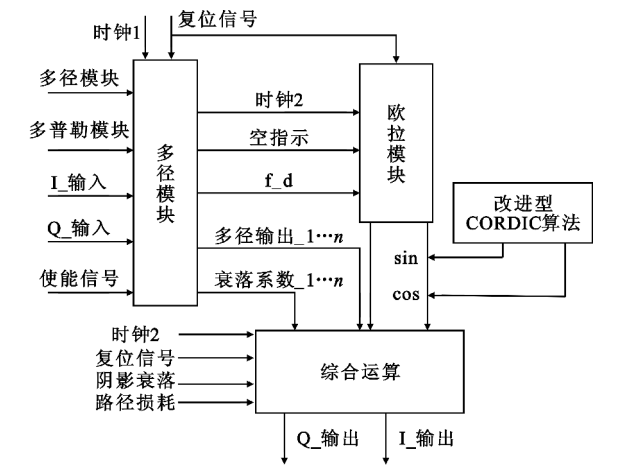


图 2 FPGA 整体性设计框图
Fig.2 FPGA design diagram

根据图 2,整体架构分为五个部分:多径模块、欧拉模块、改进型 CORDIC 算法模块、大中尺度衰落

(路径损耗和阴影衰落)模块和综合运算模块。

4.2 路径损耗和阴影衰落模块实现

此模块较容易实现,需要注意的是,在阴影衰落服从高斯白噪声参数生成的时候同样采用 3.4 节中的方法。

4.3 高斯白噪声模块实现

此模块架构采用经典的 Box-Muller 算法,其中第二步拟合单元中根号和三角函数的运算采用下面 4.4.2 节中图 5 所示的改进型 CORDIC 算法解决方案。具体的实现流程如图 3 所示。

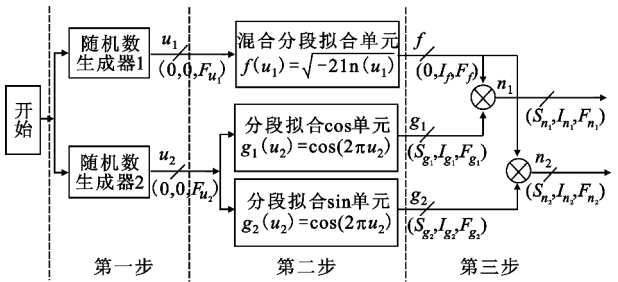


图 3 高斯白噪声生成方法
Fig.3 GWN generation method

如图 3 所示,高斯白噪声生成方法共有三步:首先生成两路均匀随机数,之后为分段拟合单元部分,最后根据式(8)经过计算输出两路高斯随机数。

4.4 小尺度衰落模块实现

4.4.1 多径时延模块

至于多径时延的实现可以采用多种方法,比如 FIFO 和 RAM 等方案,本文采用 FIFO 实现多径时延,具体实现方案如图 4 所示。

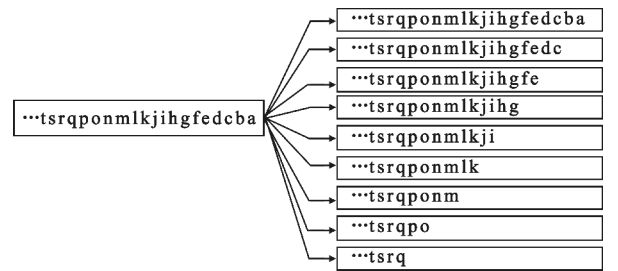


图 4 多径的 FIFO 实现框图
Fig.4 The implementation diagram of multipath based on FIFO

4.4.2 多普勒扩展模块

事实上,本模块的实现难点在于自然指数欧拉展开式中 sin 和 cos 函数处理。本文采用一种改进的 CORDIC 算法,如图 5 所示。

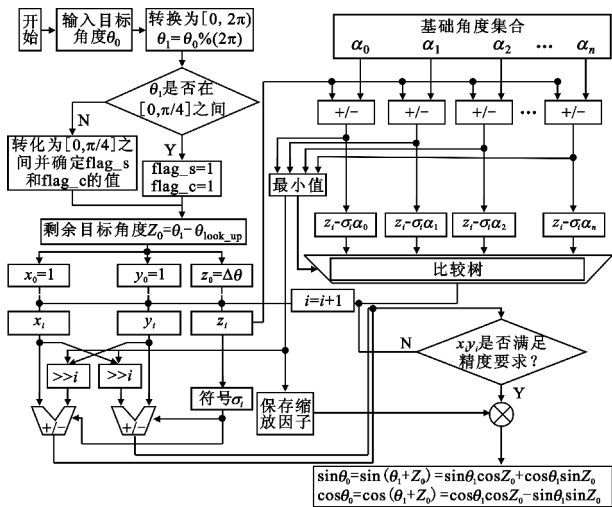


图5 正余弦函数的CORDIC算法解决方案
Fig. 5 Improved method of CORDIC algorithm

依照图5所示,此处改进型CORDIC算法共有以下4个模块:区间折叠模块、典型CORDIC算法循环模块、并行角度模块和精度判断模块。

5 模型仿真实现与分析

本文使用Xilinx ISE13.4和ModelSim 6.5软件进行设计输入和功能仿真。为不失一般性,本文采用3GPP TS 36.104协议中给出的典型市区(ETU)环境中时延和功率增益参数,仿真如图6所示,CORDIC算法实现仿真图如图7所示。

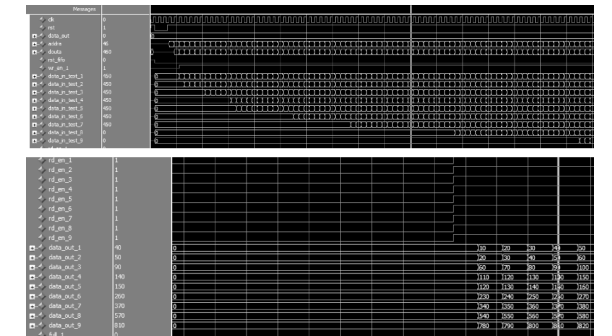


图6 多径时延的仿真实现
Fig. 6 Simulation of multipath time delay

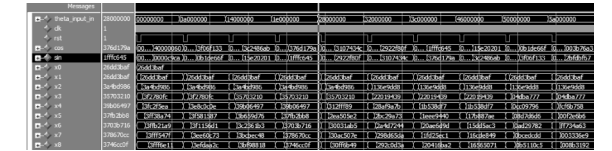


图7 正余弦函数的改进型CORDIC实现
Fig. 7 The implementation of improved CORDIC

图8为针对4.3节提出的改进型高斯随机数生

成器的FPGA实现仿真图。

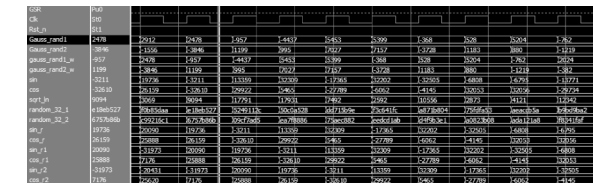


图8 改进型高斯随机数生成器的FPGA实现
Fig. 8 The implementation of a new GRNG based on FPGA

将两个TD-LTE子帧的OFDM符号作为激励信号,分别经过Matlab链路和上述FPGA信道模拟器,之后将两路接收信号做误差分析,如图9所示。图中,横坐标为数据点数,纵坐标为点所对应的仿真(FPGA输出值)与实际的(Matlab链路输出值)误差。

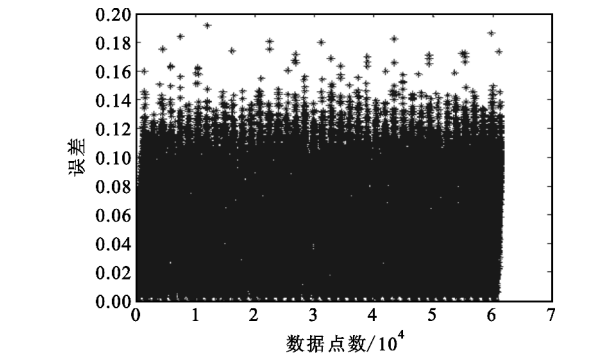


图9 Matlab与FPGA计算的误差图
Fig. 9 The error chart of Matlab and FPGA

相比于定点化的FPGA仿真值,Matlab链路输出的浮点值更接近理论值。由图9可知,信道模型仿真输出值与Matlab理论值之间误差都在2‰以下,在可行范围内,可以认为FPGA数据计算有效,从而说明了该信道模型的可行性。

6 结论

鉴于研究项目需求和目前通用信道模拟器(诸如SCM、SCME、WINNER和COST系列模型等)高复杂度、长设计周期的缺点,本文设计了一种简便、有效的基带信号信道模拟器。相较于标准模型涉及到天线方向图、多链路等情况,该类型建模方法本身具有先天的简便性;与同类型建模方法相比,由于该模型应用了改进的CORDIC算法和改进型的高斯随机数生成器,硬件资源消耗更少,逻辑布局复杂度更低。该研究成果已经应用到TD-LTE射频一致性测试专项中,并经过验证有良好的实用性。

参考文献:

[1] Hoydis J, Brink S, Debbah M, et al. Massive MIMO in the UL/DL of Cellular Networks; How Many Antennas Do We Need? [C] // Proceedings of 2013 the IEEE JSSAC. Ottawa, Canada: IEEE, 2013: 160-171.

[2] 3GPP TR 25.996, Spatial channel model for Multiple Input Multiple Output (MIMO) simulations (Release 11) [S].

[3] 刘辉, 周灵, 陈东峰, 等. 一种新的 MIMO 信道模型 [J]. 电讯技术, 2012, 52(4): 544-547.

LIU Hui, ZHOU Ling, CHEN Dong-feng, et al. A New MIMO Channel Model [J]. Telecommunication Engineering, 2012, 52(4): 544-547. (in Chinese)

[4] Baum D S, Salo J, Galdo G, et al. An interim channel model for beyond-3G systems—extending the 3GPP spatial channel model (SCM) [C] // Proceedings of 2005 the IEEE VTC. ETH Zurich, Switzerland: IEEE, 2005: 3132-3136.

[5] 3GPP TS 36.814, Further advancements for E-UTRA physical layer aspects (Release 9) [S].

[6] Lim C, Yoo T, Clerckx B, et al. Recent Trend of Multi-user MIMO in LTE-Advanced [J]. Communications Magazine, 2013, 51(3): 127-135.

[7] IST-4-027756, WINNERII Channel Models (D1.1.2 V1.1) [S].

[8] 3GPP TS 36.104, Base Station (BS) radio transmission and reception (Release 9) [S].

作者简介:



陈雷成(1988—),男,山东莒县人,2012年获工学学士学位,现为重庆邮电大学硕士研究生,主要研究方向为无线通信系统信道建模研究与实现;

CHEN Lei-cheng was born in Juxian, Shandong Province, in 1988. He received the B. S. degree in 2012. He is now a graduate student. His research concerns channel modeling and realization for wireless communication systems.

Email: chen_07031108@foxmail.com

王华华(1981—),男,山西临汾人,高级工程师,主要研究方向为 TD-LTE 系统开发;

WANG Hua-hua was born in Linfen, Shanxi Province, in 1981. He is now a senior engineer. His research concerns system development of LTE.

陈发堂(1965—),男,重庆綦江人,教授、硕士生导师,主要研究方向为无线通信系统。

CHEN Fa-tang was born in Qijiang, Chongqing, in 1965. He is now a professor and also the instructor of graduate students. His research concerns wireless communication system.