#### 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%o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

 <sup>\*</sup> 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)

<sup>\*\*</sup> 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<sup>[1]</sup>。

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<sup>[2]</sup>,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<sup>[3]</sup>同样 如此;SCME<sup>[4]</sup>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<sup>[5-7]</sup>;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<sup>[8]</sup>。建模框架流程如图1所示。





# 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 · 1276 ·

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):

 $PL = (44.9 - 6.55 \lg(h_{bs})) \lg\left(\frac{d}{1000}\right) + 45.5 +$ 

$$(35.46-1.1h_{ms}) \lg(f_c) - 13.82 \lg(h_{bs}) + 0.7h_{ms} + C$$
(1)

其中,C(dB)为校正因子,如式(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):

$$PL = \begin{cases} 31.5 + 35 \lg(d), \quad 郊区路损\\ 34.5 + 35 \lg(d), \quad 市区路损, \quad d \ge 35 m \end{cases}$$
(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  $f_e = 1\ 900\ MHz时,路径损耗如式(4):$ 

$$PL = \begin{cases} 34.53 + 38\lg(d), d \ge 30\\ 30.18 + 26\lg(d), d \ge 20 \end{cases}$$
(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):

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

其中, $\sigma_{SH}$ 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; $\gamma$  推导如式(6):

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

其中, $\rho_{\gamma\alpha}$ =-0.6为时延扩展与基站天线阴影衰落之间的互相关系数, $\rho_{\gamma\beta}$ =-0.6为角度扩展与基站天线阴影衰落之间的互相关系数, $\zeta$ =0.5为基站天线之间阴影衰落的互相关系数, $\xi$ 和 $\omega_i$ (*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):

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

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

其中,随机变量 u1 和 u2 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。



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



#### 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。





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

Messages											
E- theta_input_in	28000000	10000000	01010000	(14)(0)(0)	(1+0000000	23000000	52000100	3:000000	(46600000	(5:000000	56000000
4y dk											
🔷 rst		L .	1	1	1	1	Π	1	U	1	1
■-4 cos		00)4000005	0)0)3f06/133	0 (3c2456ab	())(376d179a	0 (3107434c	0	f )0 (1fffq645	(0)1\$e2020	1 (0)0b1de661	0003676a3
∎-∲sn	1fffc645	00	a (i) (ib toeoef	[0 [15e20201	())(Iffico45	)a(2422ftof	D[310743	k: )2	0	5 (a)isfoofaas	31
■-4/x0	2tdd3baf	2658Libar									
■-4/x1		2000tbaf	))25dd3baf	[25dd]thaf	()(25)(d)(b)af	25disbaf	(20ddibaf	() (253453baf	(20dd)baf	(Codd:baf	255bbbaf
■-4/x2	3a4bd986	31a4bd5835	) (sa 46d5(55	034466936	034465355	) salbdato	0112693631	Oltroesids	0110659368	Citize scitt	010069568
■-4/x3		(iferation	)))(atarao)a	0(557(5210	0[35733210	) (35703210	22019409	()22019409	( (220 SH39	Distant and the second	04dba777
■-4/ x4		3lc2/Sea	) (Jse8c0cpe	())39646497	()39606497	312/1/89	(23af9a7b	(115533d)7	(11b538df7	Dec09795	()(cf6b758
■-4/x5		(2/128474	) 3681587	12659075	( isotbabba	1 2ea505e2	(C)25x29a73	( [teee/9440	(175887ee	08373635	1 Joof2vebb5
■-4/ x6		(III)8/fb2ta9	) (af1156d1	[]]36256153	( );;7036716	) [30031ab5	(22467244	() (20ae649d)	( (15dd5ac3	(m)(add29782	1 17734a63
■- <sup>4</sup> y x7		3///547/	) (3ee60c73	33cbec48	( 1378670cc	130ac507e	29636554	(11fd25ec1	( )15cde849	()(boedodd	0003336e9
■-4/>>8		(Siffeet)	) ) tefdaalte	(1666313	(3746cc0f	1 (30ff6b49	292.003	()20416ba2	16565071	()\$5511065	1 (00tb3192

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 • 1278 • 成器的 FPGA 实现仿真图。

电讯技术

GSR	Pu0										
Gauss_rand1	2478	2912	12478	1957	14437	[5453	5 999	(4368	1628	)6204	1762
		-1556	1-13946	11199	395	1/02/	7157	(8748	11183	)330	1-1219
		2478	1-957	[-4437	(5453	5.999	[-368	1528	35204	1-762	12024
		5,346	11199	395	0722/	17157	63723	11183	3890	1-1219	1582
		19736	53211	113359	Innan	112965	12202	(332505	6808	)6795	3-13771
		25159	-32610	28922	19465	227/89	6062	(4145	32053	(\$20.56	229734
		3069	9094	117791	117931	7492	2592	10556	2873	)4121	112342
	e 18eb 527	10055clas	a 18eb 527	(5249112c	50c0a528	3dd715b/9e	£3c641fc	88715804	Telefores	aeacch.Sa	bibbi9ba2
		k99216c1	67576365	109cf7ad5	ea7783356	75aec882	seeded tab	84963e1	4032800	Jada 121a8	193541faf
		20090	19736	1-3211	11039	132309	-17365	(32202	152505	) 6808	36/95
		25353	26159	-32610	29922	65465	-27789	(-6262	-4145	)32053	32056
		-31973	20090	119736	-3211	113359	32309	017365	32202	)-32505	1-6808
		7176	25838	26159	32610	29922	\$465	027789	+6062	)-4145	32053
		-20431	-31973	20090	19735	1-3211	(13359)	(32309	-17365	32202	132505
		25620	17176	25888	26159	3-32510	29972	(\$465	-27789	) 6052	4145

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:

- 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 JOSAC. 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,陈东锋,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)
- 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 Zwrich, 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 Multiuser 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.