



卷积码在 60 GHz 芯片间无线互连系统中的性能分析

李学华, 申思雨, 王亚飞

(北京信息科技大学信息与通信工程学院 北京 100101)

摘要: 针对 60 GHz 芯片间无线互连系统中信号幅度衰落及多径时延, 导致信道产生突发性错误引起误码率增大的问题, 从编码增益和译码能耗角度研究了该系统中卷积码的性能。根据 60 GHz 芯片间无线互连系统特点, 分析了适用于此场景的 CM7.2 信道特性以及编码系统接收信噪比。结合信道编码理论, 推导了卷积码的临界距离, 得到了编码系统的能效衡量标准。在此理论研究的基础上, 通过 MATLAB 对卷积码进行了蒙特卡洛数值仿真, 得到了编码增益, 进而分析了最大通信距离。通过 Quartus II 对卷积码进行了电路能耗仿真, 得到了编译码能耗, 进而分析了临界距离。综合考虑卷积码的编码增益、译码能耗及有效通信距离, 提出了可优先采用的编码方案。为 60 GHz 芯片间无线互连系统以及其他 60 GHz 近距离无线通信系统提供了纠错编码方面的技术参考。

关键词: 60 GHz; 芯片无线互连; 卷积码; 编码增益; 临界距离

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2015111

Performance of Convolution Codes Based on 60 GHz Inter-Chip Wireless Interconnection System

Li Xuehua, Shen Siyu, Wang Yafei

(School of Information and Telecommunication Engineering,

Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100101, China)

Abstract: In order to solve reliability problem in 60 GHz inter-chip wireless interconnection system, the performance of convolution codes was studied from the view of coding gain and energy consumption. The characteristics of CM7.2 channel and received signal-to-noise ratio (SNR) were analyzed. Combining with channel coding theory, the critical distance was deduced, which was seen as the energy efficiency standard of coding system. On the basis of theoretical research, the maximum communication distance was calculated according to the coding gain which was simulated by MATLAB and the critical distance was achieved according to the circuit energy consumption which was evaluated by Quartus II. Comprehensive considering the coding gain, the energy consumption and the critical distance of convolution codes, the priority coding scheme was proposed, which provided a kind of ECC technical reference for 60 GHz inter-chip wireless interconnection system and other 60 GHz short-range wireless communication systems.

Key words: 60 GHz, inter-chip wireless interconnection, convolution code, coding gain, critical distance

收稿日期: 2015-01-25; 修回日期: 2015-04-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61171039), 北京市青年拔尖人才资助项目 (No.CIT&TCD201404114), 北京市教委科技面上项目 (No.KM201511232010)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61171039), Beijing Youth Talents Foundation of Beijing (No.CIT&TCD201404114), Science and Technology Project of Beijing Municipal Education Commission (No.KM201511232010)

论文引用格式: 李学华, 申思雨, 王亚飞. 卷积码在 60 GHz 芯片间无线互连系统中的性能分析. 电信科学, 2015111

Li X H, Shen S Y, Wang Y F. Performance of convolution codes based on 60 GHz inter-chip wireless interconnection system. Telecommunications Science, 2015111



1 引言

随着高速集成电路技术的不断更新,由芯片构成的电子系统朝着大规模、小体积、高速度的方向飞速发展。在高速 PCB 板中,金属线互连导致信号发生时延、串扰、衰减等信号完整性问题。为解决以上问题,提出了将移动通信技术应用到芯片之间的芯片间无线互连系统^[1-3]。

芯片间无线互连系统架构如图 1 所示。芯片 A 与芯片 B 集成射频模块并采用片上天线技术,通过无线信号实现芯片间数据的高速传输,从而有效缓解了金属布线的极限问题。近年来,人们研究将 UWB(ultra wideband)、RFID 等技术应用于芯片间无线互连系统,但传统的窄带系统因其带宽小、低频电磁干扰严重等缺点不能满足大规模、多用户的网络需求^[4]。60 GHz 脉冲通信系统具有频谱资源丰富、高频干扰小等优点,其可在低信噪比环境下提供吉比特速率的数据传输和极高的系统容量,成为未来最具潜力的无线技术之一^[5]。在之前的研究中发现,由于 60 GHz 频段处于氧气吸收作用的衰减峰,无线传输衰减高达 15 dB/km^[6],这使得 60 GHz 信号可以被限制在很小的空间内传输,最大限度地降低了对其他系统的干扰。同时,60 GHz 信号的波长约为 5 mm,使得其电路元件尺寸可以被设计得很小,大大减少了集成芯片中的面积开销^[7]。由此可见,60 GHz 脉冲通信系统将会成为芯片间无线互连系统中重要的技术应用。

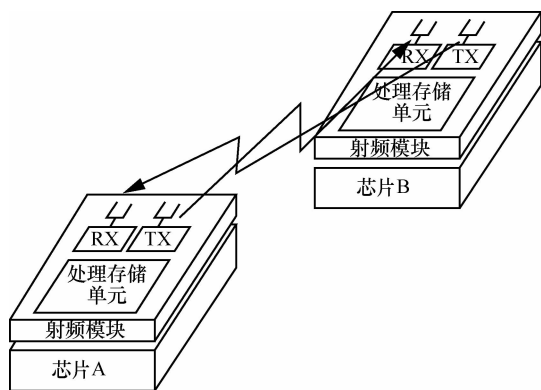


图 1 芯片间无线互连系统架构

在芯片间无线互连的场景中,通信模块的空间尺度和功率受到了极严格限制,复杂度问题是一个需要重点考虑的因素。60 GHz 芯片间无线互连系统,要求通信距离在厘米级范围内,以低功耗、低误码率完成高速率的数据传输^[8]。60 GHz 频段拥有极大的频谱带宽,但高频信号易受环境影响出现严重的幅度衰落和突发性错误,导致数据传输误

码率增高。因此,为解决 60 GHz 芯片间无线互连系统的误码问题,研究出一种高编码增益、低译码能耗的纠错编码方案是十分必要的。本文主要从编码增益和译码能耗两方面入手,将复杂度和能耗较低的卷积码作为研究重点。卷积码能够在高速率数据通信中有效解决突发性错误,其拥有高效的纠错能力和较低的硬件成本^[9]。在过去对卷积码的研究中,大多集中于编码速率、约束长度以及回溯深度的讨论上,并未涉及对卷积码编码增益和译码能效的分析,而对于 60 GHz 芯片间无线互连系统中的卷积码,如何做到在保证误码率的条件下拥有高编码增益和高译码能效是值得研究的。本文结合以上两点研究卷积码在 60 GHz 芯片间无线互连系统中的误码性能。

2 60 GHz 芯片间无线互连系统信道模型

为了准确描述、评估和设计通信系统,信道模型的选择十分重要。由于 60 GHz 芯片间无线互连系统处于研究初期,目前国际没有给出标准的信道模型。根据之前对信道模型的比较筛选等工作,发现 IEEE 802.15.3c 工作组提出的 60 GHz 通信系统信道模型与本系统较符合^[10]。该模型中的 CM7.2 可用于通信距离 1 m 范围内桌面环境下的视距传输,基本符合 60 GHz 芯片之间近距离无线通信的工作场景要求,因此采用 CM7.2 作为通信系统无线链路仿真中的信道模型并进行理论分析。

2.1 信道离散冲激响应

将 SV 信道模型扩展到角度域,得出信道离散冲激响应的复数基带表达式^[10]为:

$$h(t, \phi, \theta) = \sum_{l=0}^L \sum_{k=0}^{K_l} \alpha_{k,l} \delta(t - T_l - \tau_{k,l}) \delta(\phi - \Omega_l - \omega_{k,l}) \delta(\theta - \Psi_l - \psi_{k,l}) \quad (1)$$

其中, $\delta(\cdot)$ 是 Dirac-delta 函数, L 是到达接收端簇的总数量, K_l 是簇内路径的总数量, T_l, Ω_l, Ψ_l 分别表示每个簇的到达时间、天线接收角和天线发射角, $\alpha_{k,l}, \tau_{k,l}, \omega_{k,l}, \psi_{k,l}$ 分别表示每个簇内路径的幅度、到达时间、天线接收角和天线发射角。

对 60 GHz 信道模型进行 100 次仿真实例,根据信道模型统计特性可以得到信道离散冲激响应 $h(t)$,如图 2 所示。由图 2 可以看出,信道中存在多径信号,25 ns 附近信号能量最强,全部路径到达接收端的时间约为 100 ns。在构建 60 GHz 芯片间无线互连系统仿真模型中,可以利用信道离散冲激响应,得到经信道衰减后的接收信号,进而分析卷积码的误码性能。

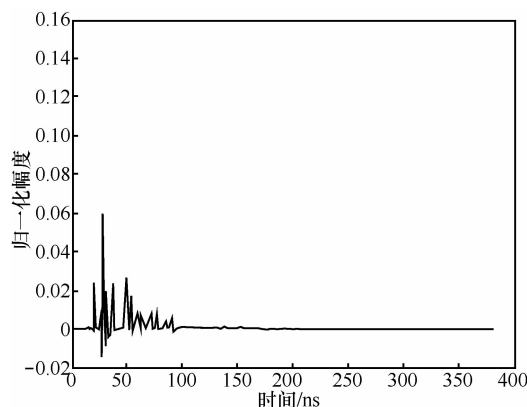


图2 60 GHz 通信系统 CM7.2 信道离散冲激响应

2.2 信道链路预算

在 60 GHz 芯片间无线互连系统中,无线信号在高频段进行传输,空气对其能量的衰减明显,因此通信距离的大小严重制约着接收信号的幅度,60 GHz 信号路径损耗 PL 为:

$$PL = 10 \lg(4\pi df/C)^n \quad (2)$$

其中, n 为路径损耗因子,在视距传输的芯片间无线互连场景中, $n=2^{[10]}$, C 为光速, f 为中心频率 (GHz), d 为通信距离 (cm)。

接收机平均每比特能量为:

$$E_r = E_t + G_t + G_r + ECC_{\text{gain}} - PL \quad (3)$$

其中, E_t 为发射机平均每比特能量, G_t 、 G_r 为理想的全向发送和接收天线增益 0 dBi, ECC_{gain} 为卷积码编码增益。

接收机噪声由开关噪声和热噪声组成。热噪声功率谱密度表达式为:

$$N_0 = kT_0 \left(\frac{T_{\text{ant}}}{T_0} + F_r \right) \quad (4)$$

其中, T_{ant} 、 T_0 分别表示天线温度与参考温度, k 表示波尔兹曼常数, F_r 表示接收机噪声因子。热噪声相较开关噪声大 10 dB^[11]。将式(3)、式(4)相除,可以得到编码系统的接收信噪比为:

$$SNR = \left[P_t \left(\frac{4\pi df}{C} \right)^{-n} \frac{1}{R} 10^{(ECC_{\text{gain}}/10)} \right] / (N_0 + S_0) \quad (5)$$

其中, N_0 为热噪声, S_0 为开关噪声。对于不同卷积码,在发射功率和中心频率一定时,可以得到系统接收信噪比与通信距离和信息速率的关系,其中卷积码编码增益由 MATLAB 系统仿真得到。

3 编码系统能效分析

纠错编码技术以牺牲译码电路能耗为代价换取编码增益,从而改善系统误码性能。相对于未编码系统,编码系统的额外功耗不应大于其节省的能量,否则编码将毫无意义。根据纠错编码理论得知,通过编码增益和译码能耗可以确定临界距离 d_{cr} ,通信距离大于 d_{cr} 的编码系统的能效高,小于 d_{cr} 的编码系统能效低^[12]。

编码系统每比特节省能量与译码能耗差值 ΔE 为:

$$\Delta E = E_{\text{TX,U}} - E_{\text{TX,ECC}} - E_{\text{decode}} \quad (6)$$

其中, $E_{\text{TX,U}}$ 、 $E_{\text{TX,ECC}}$ 和 E_{decode} 3 项分别为未编码系统每比特能量、编码系统每比特能量以及每比特译码能耗。

编码系统平均每比特发射能量^[13]为:

$$E_{\text{TX,ECC}} = (N_0 + S_0) + PL + SNR_U - ECC_{\text{gain}} \quad (7)$$

其中, N_0 、 S_0 为接收机热噪声和开关噪声, PL 为路径损耗, SNR_U 为未编码系统信噪比, ECC_{gain} 为编码增益。

未编码系统平均每比特发射能量^[13]为:

$$E_{\text{TX,U}} = E_{\text{TX,ECC}} 10^{ECC_{\text{gain}}/10} \quad (8)$$

整理式(8),可以得到编码系统每比特节省的能量为:

$$E_{\text{TX,U}} - E_{\text{TX,ECC}} = E_{\text{TX,ECC}} (10^{ECC_{\text{gain}}/10} - 1) \quad (9)$$

编码系统需要消耗额外的能量用于译码电路,其每比特译码能耗为:

$$E_{\text{decode}} = \frac{P_{\text{decode}}}{R} \quad (10)$$

其中, P_{decode} 为译码电路功耗 (mW), R 为信息速率 (Gbit/s)。当 $\Delta E=0$,即节省能量与译码电路能耗相等时,系统达到能耗平衡。则编码系统临界距离 d_{cr} 为:

$$d_{\text{cr}} = \left[\frac{P_{\text{decode}}}{(N_0 + S_0) 10^{SNR_U/10} (1 - 10^{-ECC_{\text{gain}}/10}) R} \right]^{1/n} \left(\frac{\lambda}{4\pi} \right) \quad (11)$$

对于不同卷积码,在译码能耗、编码增益以及信息速率一定时,可以得到其临界距离,即最小通信距离,其中卷积码译码能耗由 Quartus II 电路仿真得到。

4 数值仿真与电路能耗仿真

对于 60 GHz 芯片间无线互连系统,其往往工作在厘米级范围内甚至更小。从通信距离的角度出发不难发现,若距离过远会因误码率大于 10^{-5} 导致系统可靠性下降;若距离过近又会因小于临界距离而导致编码能效降低。因此针对卷积码最大通信距离与临界距离



的分析显得尤为重要。

4.1 MATLAB 系统仿真

在构建 60 GHz 芯片间无线互连仿真模型中,脉冲成形和调制方式的选择十分重要。在该系统中,数据以极窄脉冲作为信息载体进行传输,其具有低功耗、低复杂度等优点,在满足高速率与高可靠性的同时,保证了良好的硬件实现性以及占用尽可能小的芯片面积,因此采用电路结构简单的二阶高斯脉冲作为波形信号^[14]。另一方面,由于 60 GHz 信号存在严重的幅度衰落,因此该系统中的调制方式应具有抗干扰能力强且电路复杂度低的特点。二进制 PAM 通过发送正负脉冲来调制基带数据比特,接收端采用过零检测方式进行数据判决,这种调制解调技术可以有效解决幅度衰落造成的系统误码率过高的问题^[15]。综合以上分析,本文采用二阶高斯脉冲波形和脉冲幅度调制技术,搭建基于 60 GHz 的芯片间无线互连发射接收链路仿真模型,并在此基础上研究卷积码的误码性能。

图 3 给出了 60 GHz 芯片间无线互连系统仿真模型。其中,二进制源产生 50 000 个基带数据比特;纠错编码技术采用卷积码;调制方式采用脉冲幅度调制技术;通信系统信道模型采用 IEEE 802.15.3c 中的 CM7.2;接收机采用电路实现复杂度低的相关接收机;卷积码译码方式采用维特比硬判决译码。

4.2 Quartus II 电路能耗仿真

对于 60 GHz 芯片间无线互连系统中的卷积码,要求在保证低集成电路复杂度和低功耗的前提下,实现高速率、高可靠性的数据传输。为便于对卷积码临界距离进行

分析和仿真,本文使用 Quartus II 软件对卷积码编译码电路的能耗做简单评估。编码采用同步有限状态机的设计方法;译码采用功耗低、时延小的基于幸存路径(每次算出累积汉明距离后,将说明距离最大的那条删除,剩下的为幸存路径)寄存器交换算法的维特比译码。表 1 统计了约束长度为 3 和 7 的卷积码编译码器的资源消耗情况,包括逻辑单元个数、寄存器个数、逻辑单元能耗以及 I/O 单元能耗,其中逻辑单元能耗(LE power dissipation)为维特比译码电路能耗。

从表 1 可以看出,(2,1,3)卷积码编码、译码能耗分别为 0.05 mW 和 1.55 mW。其中译码能耗将用于后续临界距离的分析。

4.3 结果分析

60 GHz 芯片间无线互连系统发射链路仿真参数设置如下:发射机功率 $P_{\text{ow}}=0$ dBm,采样频率 $F_s=0.25\times10^{10}$ Hz,脉冲重复时间 $T_s=1\times10^{-10}$ s,脉冲主瓣时间 $T_m=0.5\times10^{-10}$ s,脉冲波形因子 $\tau=0.25\times10^{-10}$ s。

60 GHz 芯片间无线互连系统卷积码参数设置如下:采用八进制生成矩阵分别为 $g_1=[5\ 7]$ 、 $g_2=[133\ 171]$ 的 (2,1,3) 卷积码和 (2,1,7) 卷积码,译码采用维特比硬判决方法。

4.3.1 卷积码约束长度对误码性能影响

卷积码约束长度的误码率比较如图 4 所示。

观察图 4 发现,卷积码约束长度 K 越长,系统误码性能越好,但随着约束长度的增加,译码电路功耗也会随之增加。本次仿真以误码率达到 10^{-5} 为标准,统计编码系统和未编码系所需的最小信噪比,不同约束长度卷积码的仿

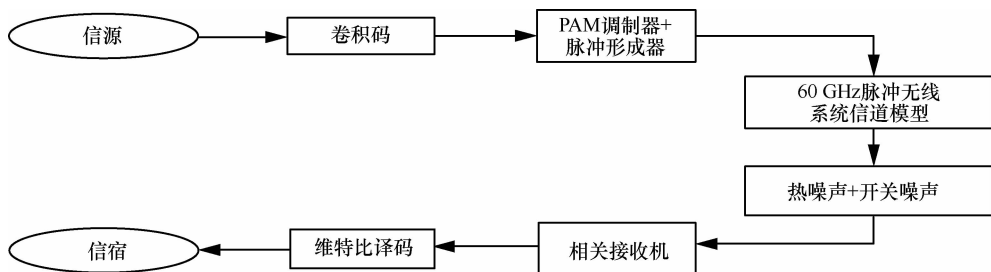


图 3 60 GHz 芯片间无线互连系统仿真模型

表 1 卷积码编译码电路资源消耗

卷积码	编译码	逻辑单元个数/个	寄存器个数/个	逻辑单元能耗/mW	单元能耗/mW
(2,1,3)	编码	8	6	0.05	2.41
	译码	198	83	1.55	8.24
(2,1,7)	编码	160	96	1.28	6.08
	译码	3 509	1 578	28.47	149.54

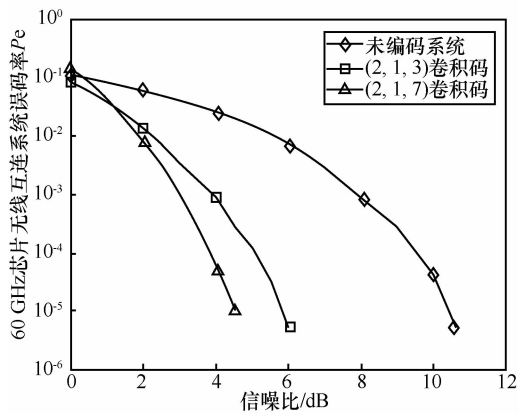


图4 不同卷积码约束长度的误比特率

真结果见表2。虽然约束长度为7的卷积码拥有最高的编码增益6.1 dB,但相较约束长度为3的卷积码仅节省1.3 dB(6.1-4.8=1.3),并没有明显的编码增益,况且根据表1中约束长度为7的卷积码译码能耗高达28.47 mW,远大于约束长度为3的卷积码译码能耗,因此,从平衡编码增益和译码能耗的角度出发,(2,1,3)卷积码可以优先考虑。

表2 不同约束长度卷积码仿真结果

卷积码	未编码信噪比/dB	编码信噪比/dB	编码增益/dB
(2,1,3)	10.6	5.8	4.8
(2,1,7)	10.6	4.5	6.1

4.3.2 (2,1,3)卷积码的最大通信距离

在60 GHz芯片间无线互连系统中,卷积码的最大通信距离取决于编码系统接收信噪比是否满足 10^{-5} 的误码率要求。将表2中(2,1,3)卷积码编码增益代入式(5),可以得到接收信噪比与通信距离和信息速率的关系,如图5所示。其中发射功率 $P_t=0$ dBm,中心频率 $f=60$ GHz。

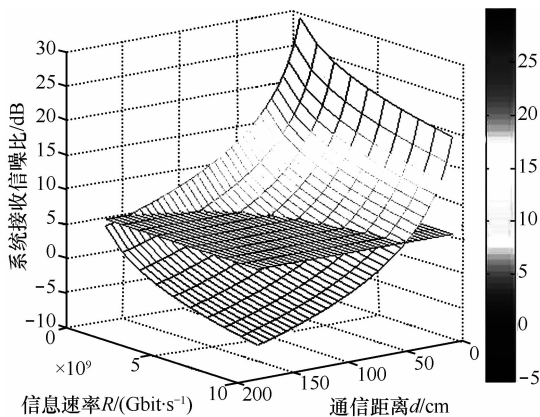


图5 (2,1,3)卷积码系统接收信噪比

如图5所示,系统接收信噪比随通信距离或信息速率的增加而减小,当其小于编码信噪比(5.8 dB)时,系统将不能满足 10^{-5} 的误码率要求。图5中网格平面($SNR=5.8$ dB)为(2,1,3)卷积码编码系统所需最小接收信噪比平面,曲面在平面以上部分均满足误码率要求,而以下部分则不满足。由此,可以得到平面与曲面的交线,即卷积码在不同信息速率下的最大通信距离。

4.3.3 (2,1,3)卷积码的临界距离

由式(11)可以看出,临界距离取决于译码能耗、编码增益以及信息速率,将表1中卷积码逻辑单元功耗(1.55 mW)以及表2中卷积码的编码增益(4.8 dB)代入式(11),即可得到在不同信息速率下的临界距离。根据卷积码最大通信距离和临界距离,可以得出在信息速率一定时,卷积码的有效通信范围。表3给出了几种典型信息速率下的有效通信范围, d_{cr} 为临界距离, d_{max} 为最大通信距离, Δd_{eff} 为有效通信距离。从编码增益和译码能耗的角度考虑,(2,1,3)卷积码在保证误码性能的同时,拥有较高的编码增益、较低的译码能耗以及较宽范围的通信距离。

表3 (2,1,3)卷积码距离特性

距离	1 Gbit/s	5 Gbit/s	10 Gbit/s
d_{cr}/cm	81	36	25
d_{max}/cm	160	72	51
$\Delta d_{eff}/cm$	79	36	26

5 结束语

针对60 GHz芯片间无线互连系统中信号幅度衰落及多径时延导致的系统误码率增大的问题,本文首先研究了适用于该通信系统的信道模型,分析了IEEE 802.15.3c工作组建立的CM7.2信道离散冲激响应以及衰落信道下的系统接收信噪比;其次,根据信道编码理论,推导了卷积码临界距离表达式;再次,搭建了基于二阶高斯脉冲和二进制PAM调制方式的60 GHz芯片间无线互连系统仿真模型,并应用MATLAB对卷积码进行了误比特性能仿真;然后,应用Quartus II对卷积码进行了编译码电路能耗的简单评估;最后,得到了编码增益、译码能耗以及有效通信距离。从编码增益和译码能耗的角度考虑,(2,1,3)卷积码拥有4.8 dB的编码增益、1.55 mW的译码能耗以及至少26 cm的有效通信范围,保证了60 GHz芯片间无线互连系统中



信息传输的可靠性和高效性,因此可以作为优先使用的纠错编码方案,并可应用于其他 60 GHz 近距离无线通信系统中。

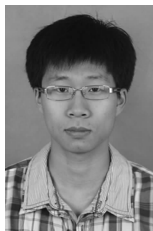
参考文献

- Petrov V. Analytical approaches for short-range wireless technologies evaluation. Proceedings of Open Innovations Association (FRUCT), Espoo, Finland, 2013: 101~106
- 王宜文, 李学华. 芯片内/间无线互连技术发展综述. 电讯技术, 2014, 54(7): 1031~1038
Wang Y W, Li X H. Summarization of intra/inter chip wireless interconnection technology. Elecommunication Engineering, 2014, 54(7): 1031~1038
- 申思雨, 李学华. 基于 60 GHz 的芯片间无线互连系统纠错编码方案研究. 科学技术与工程, 2014, 514(26): 1671~1815
Shen S Y, Li X H. Error control coding scheme based on 60 GHz inter-chip wireless interconnection system. Science Technology and Engineering, 2014, 14(26): 1671~1815
- Karim M N, Hossain S M I, Saha P K. A low power, high data rate ir-uwbl pulse generator with BPSK modulation in 90 nm CMOS technology for on-chip wireless interconnects. Proceedings of Informatics, Electronics & Vision (ICIEV), Dhaka, Bengal, 2012: 87~90
- Foulon S, Pruvost S, Loyez C, *et al.* A 10 Gbit/s 2.1 pJ/bit OOK demodulator at 60 GHz for chip-to-chip wireless communication. Proceedings of Radio and Wireless Symposium (RWS), Santa Clara, USA, 2012: 291~294
- Yong S K, Xia P F, Valdes-Garcia A. 实现吉比特传输的 60 GHz 无线通信技术. 邹卫霞, 许方敏等译. 北京: 机械工业出版社, 2011
Yong S K, Xia P F, Valdes-Garcia A. 60 GHz Technology for Gbit/s WLAN and WPAN: from Theory to Practice. Translated by Zou W X, Xu F M, *et al.* Beijing: China Machine Press, 2011
- 李学华, 贾宗辰. 60 GHz 毫米波在芯片无线互连中的传播特性研究. 微波学报, 2014, 30(5): 1~5
Li X H, Jia Z C. 60 GHz millimeter-wave propagation characteristic for inter/intra chip wireless interconnection. Journal of Microwaves, 2014, 30(5): 1~5
- Yordanov H, Russer P. Wireless inter-chip and intra-chip communication. Proceedings of Microwave Conference, Rome, Italy, 2009: 145~148
- Sansoda B, Khattiya W, Choomchuay S. Performance comparison of convolutional codes for UWB-WBAN applications. Proceedings of Humanitarian Technology Conference (R10-HTC), Sendai, Japan, 2013: 336~339
- Yong S. TG3c channel modeling sub-committee final report. IEEE 802. 15-07-0584-00-003c, 2007
- Zhang Y P. Bit-error-rate performance of intra-chip wireless interconnect systems. IEEE Communications Letters, 2004, 8(1): 39~41
- Rahaman M S, Chowdhury M H. Energy efficiency of error control coding in intra-chip RF/wireless interconnect systems. Microelectronics Journal, 2010, 41(1): 33~40
- Sadeghi N, Howard S, Kasnavi S, *et al.* Analysis of error control code use in ultra-low-power wireless sensor networks. Proceedings of Circuits and Systems, Island of Kos, Greece, 2006: 3558~3561
- 李娜. 60 GHz 脉冲无线通信系统的性能研究(硕士学位论文). 中国海洋大学, 2012
Li N. Performance analysis of 60 GHz impulse radio system (master dissertation). Ocean University of China, 2012
- Wu W, Wu Z Y, Xie W J. UWB PPM-TH and PAM-DS system with time reversal and its improved solution. Proceedings of Information and Automation for Sustainability (ICIAfS), Beijing, China, 2012: 332~336

[作者简介]



李学华,女,博士,北京信息科技大学信息与通信工程学院副教授、副院长,主要研究方向为无线通信物理层关键技术。



申思雨,男,北京信息科技大学硕士生,主要研究方向为射频通信及高速电路传输。



王亚飞,男,博士,北京信息科技大学信息与通信工程学院实验师,主要研究方向为无线通信系统与高速电路信号完整性。