

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2014.10.020

引用格式:彭江涛,李学华.60 GHz芯片间无线互连系统中的 Rake 接收性能[J].电讯技术,2014,54(10):1424-1429. [PENG Jiang-tao,LI Xue-hua. Performance of Rake Receiver in 60 GHz Inter Chip Wireless Interconnect System[J].Telecommunication Engineering,2014,54(10):1424-1429.]

60 GHz芯片间无线互连系统中的 Rake 接收性能*

彭江涛,李学华**

(北京信息科技大学 信息与通信工程学院,北京 100101)

摘 要:在60 GHz芯片间无线互连信道中存在着多径干扰问题,采用 Rake 接收是提高系统性能的重要手段。针对脉冲超宽带(IR-UWB)的芯片间无线互连系统,分析了多径信道下 Rake 接收机的误码性能。在 IEEE 802.15.3c 信道模型基础上,对不同分支数以及不同合并方案下的选择 Rake(S-Rake)和部分 Rake(P-Rake)接收机误码性能进行了研究。仿真结果表明采用支路数为 2 的 P-Rake 在数据速率为10 Gb/s 时仍具有良好的抗多径性能,这为芯片间无线互连系统的 Rake 接收方案提供了技术参考。

关键词:芯片间无线互连;60 GHz 频段;脉冲超宽带;Rake 接收机;抗多径性能

中图分类号:TN928 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2014)10-1424-06

Performance of Rake Receiver in 60 GHz Inter Chip
Wireless Interconnect System

PENG Jiang-tao,LI Xue-hua

(School of Information and Telecommunication Engineering,
Beijing Information Science and Technology University,Beijing 100101,China)

Abstract :In 60 GHz inter chip wireless interconnec channel ,signals suffer from multipath propagation. Rake reception is an important way to boost the performance of receivers. With the assumption that impulse radio ultra-wideband(IR-UWB) is used to inter chip wireless interconnect system,the bit error rate(BER) performance of Rake receivers in multipath channels is analyzed. Based on the channel model approved by IEEE802.15.3c group,the BER performance of Selective-Rake(S-Rake) and Partial-Rake(P-Rake) are simulated by using different number of Rake taps and different weighted consolidation strategies. Simulation results show that P-Rake with two taps has better anti-multipath performance for 10 Gb/s. The research provides the technique reference for Rake receiver design of inter chip wireless interconnect systems.

Key words:inter chip wireless interconnect;60 GHz band;impulse radio ultra-wideband;Rake receiver; anti-multipath performance

1 引 言

尺寸减小的趋势,然而随着芯片管脚数目的增加,芯片内/间布线变得越来越困难,而且工作频率的增

集成电路的发展越来越呈现出芯片功能复杂、

* 收稿日期:2014-03-20;修回日期:2014-06-03 Received date:2014-03-20;Revised date:2014-06-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61171039);北京市教委科技面上项目(KM201311232009);北京市属高等学校高层次人才引进与培养计划项目(CIT&TCD201404114)

Foundation Item:The National Natural Science Foundation of China(No.61171039);The Science and Technology Project of Beijing Municipal Education Commission(KM201311232009);The Importation and Development of High-Caliber Talents Project of Beijing Municipal Institutions(CIT&TCD201404114)

** 通讯作者:lixuehua@bistu.edu.cn Corresponding author:lixuehua@bistu.edu.cn

加,将导致芯片引脚以及传输线之间的串扰、寄生电感、电容等信号完整性问题日趋突出^[1]。为了解决传统金属互连线问题,人们提出了短距离无线互连技术以实现芯片内/间通信^[2],无线互连不仅为电路设计带来灵活性,而且能够降低功耗和生产成本^[3]。目前,耦合技术可以解决芯片内部微米级的短距离通信,而通信距离在毫米以上的芯片间互连则是采用片上天线的超宽带(Ultra-Wide Band, UWB)技术^[4]。文献[5]采用 90 nm CMOS 工艺,设计了调制方式为 BPSK 的 UWB 发射芯片,并实现了通信距离为 20 cm、速率达到 2.5 Gb/s、误码率为 10^{-6} 的芯片间无线互连^[6]。

随着对更高传输速率以及天线小型化的需求,60 GHz毫米波技术因其带宽大、速率高、适合短距离传输等优势成为研究趋势。文献[7]验证了采用 60 GHz单极子天线实现芯片间无线互连的可行性。文献[8]设计了中心频率为 60 GHz、调制方式为 OOK 的接收芯片,在距离为 10 mm 时,速率可以达到 10 Gb/s。然而,上述文献只是针对点对点的收发芯片,通信信道相对简单,如果将无线互连应用到 PCB 板,就必须考虑密闭机箱复杂的电磁环境。由于机箱中的 PCB 板通常包含有大量高反射外壳的金属器件,在封闭环境中,信号传输将经历多径。文献[9]表明采用超宽带技术测量的电脑机箱环境表现出严重的多径干扰。针对此多径信道,文献[10]设计了频段在 3~5 GHz、采用 Rake 技术的 UWB 接收芯片,但是传输速率只有 500 Mb/s,不能满足高速传输的需求。因此,研究一种 Rake 接收方案以满足芯片间无线互连系统高速、可靠的传输要求是十分必要的。

本文首先研究了采用 PAM 调制的 60 GHz 芯片间无线互连系统;其次,分析了适用于该系统的 IEEE 802.15.3c 信道模型,并对 Rake 接收的误码性能进行理论推导;再次,仿真了不同分支数目以及合并策略下的 S-Rake(Selective-Rake)和 P-Rake(Partial-Rake)误码性能,并与其他文献的接收方案进行了比较;最后给出结论。

2 系统模型

超宽带技术采用极宽频段的极窄脉冲作为信息载体,具有高带宽、低复杂度、低功耗的特点,特别适用于芯片间无线互连这种短距离通信环境。目前,

在 60 GHz 的芯片间无线互连系统中,调制方案主要分为无载波的脉冲幅度调制(PAM)方案和有载波的相位调制(BPSK)方案。而无载波方案采用频谱在射频段的极窄脉冲,不需要进行频谱搬移,省去了载波调制和载波恢复模块,将大大降低系统收发机的结构及功耗,是芯片间无线互连系统实现的一种有效方案^[11]。因此,本文采用基于脉冲超宽带的芯片间无线互连方案,图 1 是系统模型的框图。

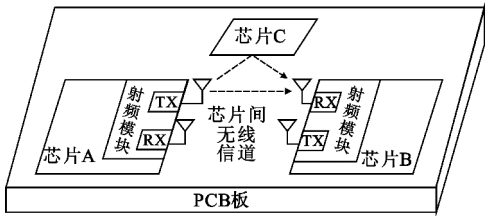


图 1 芯片间无线互连系统框图
Fig.1 Block diagram of inter chip wireless interconnect

图 1 所示,在采用无线互连的 PCB 板上,芯片除保留原有的功能模块外,还集成了射频模块,该模块由片上天线和 UWB 收发机组成,芯片之间通过无线连接完成信息的传输,从而取代了传统的有线连接方式,大大提高了 PCB 设计封装的灵活性,降低了集成电路成本。具体的传输过程如下,芯片 A 产生信息序列,经过采用 PAM 调制的发射模块 TX 发射出去,通过芯片间无线信道多径传输后,芯片 B 接收并恢复信息序列。

假设天线传输特性理想,系统采用高斯脉冲的二阶导^[12]作为超宽带脉冲波形,信号形式为

$$p(t) = (1 - 4\pi \frac{t^2}{a^2}) e^{-\frac{2\pi^2 t^2}{a^2}}, t \in [0, T_p] \quad (1)$$

其中, a 是脉冲因子。在 60 GHz 频段,脉冲宽度 T_p 为 16.7 ps,则 PAM 信号可以表示为

$$s(t) = \sum_{j=-\infty}^{+\infty} d_j p(t - jT_s) \quad (2)$$

其中, d_j 表示 PAM 映射后的二进制数据序列,并且 ± 1 等概率出现, T_s 表示脉冲重复周期, UWB 信号满足 $T_s \geq T_p$ 。

在芯片间无线互连环境中,相对于传输速率,无线信道的变化通常很慢,在若干信号时间内可视为准静态信道,对于分辨率为 Δ 的多径信道,可用有限冲激响应滤波器表示:

$$h(t) = \sum_{i=0}^{L-1} \alpha_i \delta(t - i\Delta) \quad (3)$$

其中, $\alpha_i, i=0, \dots, L-1$ 表示路径幅度衰落, L 表示路径数量, $\tau_{\max} = L\Delta$ 为多径信道最大时延扩展。

经过多径信道传播后,接收信号为

$$r(t)=\sum_{j=-\infty}^{+\infty}d_j\sum_{l=0}^{L-1}\alpha_{jl}p(t-jT_s-i\Lambda)+n(t)\tag{4}$$

其中, $n(t)$ 表示信道加性高斯白噪声,其双边功率谱密度为 $N_0/2$ 。

3 信道模型

本文研究传输距离在厘米级的60 GHz芯片间无线互连系统,根据国际组织 IEEE 802. 15. 3c 工作组提出的60 GHz室内/室外的信道模型^[13],其中CM7信道适用于视距条件下通信距离为0~1 m的多径传输环境,因此,本文采用该信道模型作为基础进行理论分析和仿真。

60 GHz频段的路径损耗模型为

$$PL(d)=20\lg(4\pi d_0/\lambda)+10n\lg(d/d_0)+X_{\sigma}\tag{5}$$

其中,前两项表示平均路径损耗, d_0 是参考距离, n 为路径损耗系数,取决于信道环境,文献^[14]指出 $n=1.6$,第三项表示阴影衰落。

60 GHz信道的脉冲响应呈现成簇到达现象,且在视距和定向天线的情况下,视距传播存在明显的直达径分量,因此,IEEE信道模型定义的信道冲激响应为

$$h(\tau,\phi)=\alpha_{\text{LOS}}\delta(\tau,\phi)+\sum_{l=0}^L\sum_{k=0}^K\alpha_{k,l}\delta(\tau-T-\tau_{k,l})\delta(\phi-\theta_l-\omega_{k,l})\tag{6}$$

其中, δ 是狄拉克冲激函数, $\beta\delta(\tau,\phi)$ 为直达径分量, L 是簇的数目, K_l 是第 L 簇中到达的多径分量数目, $\alpha_{k,l}$ 、 $\tau_{k,l}$ 和 $\omega_{k,l}$ 分别是每个多径分量的复数幅度、时延和到达方位角, T_l 和 θ_l 是每簇的时延和平均到达方位角。图2是传输距离为20 cm,60 GHz CM7信道冲激响应的一个样本。为了具有一般性,本文仿真了信道的多个样本,仿真结果是在信道样本的集合上进行的统计平均。

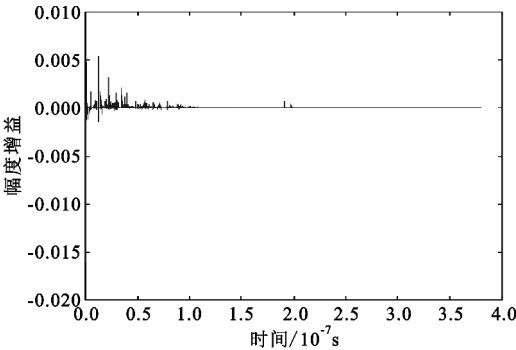


图2 CM7信道冲激响应
Fig. 2 Impulse response under CM7

通过对信道冲激响应多个样本的统计分析,可以得到信道多径分量的功率分布。图3是对信道多径能量的分析,得出衰减到峰值功率10 dB时的路径数为1.3,说明在60 GHz频段,芯片间信号无线传输除明显的直达径外,还有一条主要的干扰路径。

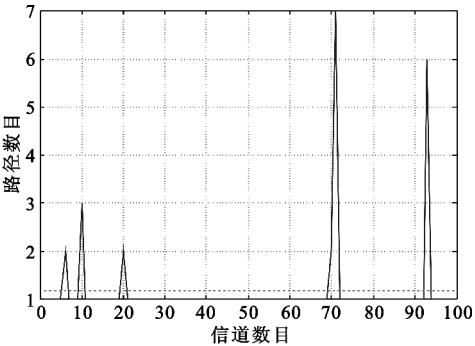


图3 峰值功率10 dB以上的路径数
Fig. 3 Number of significant paths within 10 dB of peak

4 Rake接收性能分析与仿真

Rake接收作为一种多径分集技术利用互不相关的可分离路径有效地捕获信号能量,从而达到克服衰落提高系统可靠性的目的^[15]。将Rake接收引入到60 GHz芯片间无线互连系统中,将有效地抵抗多径衰落,降低判决时刻的误码率,提高系统的可靠性。

4.1 Rake接收方案设计

与传统无线通信的Rake接收机相比,芯片间无线互连系统的Rake接收机既要具有良好的性能,又要具有较低复杂度、较小芯片占用面积的特点,这就要求芯片的Rake接收模块简单易实现,处理的多径数量要少,并且多径合并策略要简单。因此要根据信道模型的分析、系统性能和复杂度的要求,合理地选择接收机处理多径支路的数量以及合并策略,从而实现高速、可靠、低复杂度的芯片间无线互连。

图4是采用Rake接收的芯片间无线互连系统框图,假设芯片A为信源,芯片B为信宿,在B的RX端加入Rake接收模块,该模块由多径分离模块、并行相关模块和多径合并模块构成。其中 τ 是引入的时延,即通过多径分离模块得到前两径到达接收机的时间差; N 是并行相关器的个数,而并行相关器的个数直接决定了接收机的复杂度,因此,根据信道多径能量的分析,选取信号质量相对较好的前

两径作为接收机处理的路径; ω 是加权因子,根据合并策略的不同,分为最大比合并 (Maximal Ratio Combining, MRC) 和等增益合并 (Equal Gain Combining, EGC), 本文选择复杂度较低的等增益合并作为接收端的合并策略; $m(t)$ 是相干解调的掩膜,是接收端产生的模板信号。

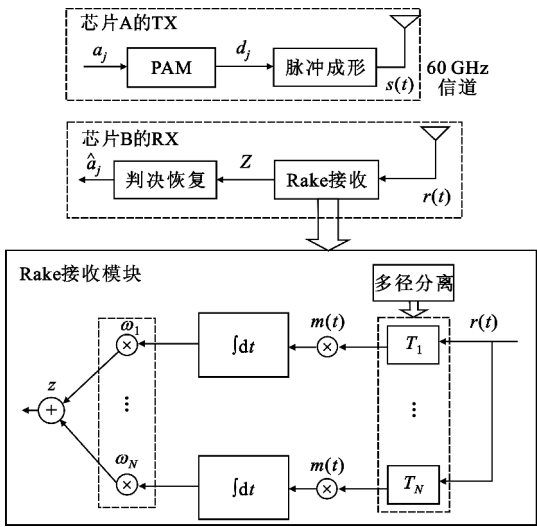


图 4 采用 Rake 接收的系统框图
Fig. 4 Block diagram of Rake receiver system

图 4 所示,芯片 A 发送信号 $s(t)$, 通过 CM7 信道后,芯片 B 接收到的信号为 $r(t)$, 然后 $r(t)$ 经过多径分离分为两路信号,并对每路信号进行相关接收,最后合并得到的判决变量 Z 为

$$Z = \sum_{i=0}^{L-1} \omega_i \int r(t) m(t) dt = \sum_j d_j \sum_{i=0}^{L-1} \alpha_i \omega_i \int p(t-jT_s-\tau_i) m(t-\tau_i) dt + n(t) \quad (7)$$

其中, d_j 为第 j 个符号, α_i 为路径衰减系数, ω_i 为加权因子。输出端信噪比为

$$SNR = \frac{E_b \sum_{i=0}^{L-1} \alpha_i^2 \omega_i^2}{N_0} \quad (8)$$

其中, E_b 为单位脉冲能量。

2PAM 调制方式在高斯白噪声信道下的误码率为 $P = Q(\sqrt{2SNR})$, 假设信道幅度衰落的概率密度函数为 $f(\alpha_i)$, 得到多径衰落信道下系统的误码率^[15] 为

$$P_e = \int \cdots \int P f(\alpha_0 \cdots \alpha_{L-1}) d\alpha_0 \cdots d\alpha_{L-1} \quad (9)$$

4.2 仿真分析

本文采用图 4 所示的系统模型仿真芯片间无线互连系统。应用 MATLAB 进行仿真,输入端发送二

进制序列,经过 PAM 调制,脉冲成形器产生二阶高斯脉冲,信道采用 IEEE 标准信道,噪声根据仿真需要的 SNR 来产生,接收端假设理想同步,经过 Rake 接收得到实际接收序列,最终得出系统的误码率。

由于对低功耗的要求,脉冲平均发射功率设为 -30 dBm,为了消除符号间干扰 (ISI),脉冲重复周期 T_s 要大于信道的最大时延扩展,设为 2 ns, 60 GHz 脉冲持续时间 $T_p = 16.7$ ps, 信息速率 $R_b = 10$ Gb/s,为了符合一般 PCB 板的物理尺寸,收发机距离 d 设为 20 cm,时变衰落信道下 Rake 接收误码性能估计采用蒙特卡洛方法。

使用 Rake 接收增加了接收机的复杂度,分离合并的多径数目越多,复杂度越大。因此,可通过减少接收机处理的多径分量数目来降低接收机的复杂度。减少接收机处理的多径分量的方法有两种:第 1 种方法是选择性 Rake (S-Rake),即从接收机输入端获得的多径分量中选择 S 个最好的分量;第 2 种方法是部分 Rake (P-Rake),即从接收机输入端获得的多径分量中合并最先到达的 L 个分量。

(1) 在多径分量相同时, S-Rake 和 P-Rake 的误码性能比较。

图 5 为两条支路下 S-Rake 和 P-Rake 的性能比较,可见在信噪比相同的条件下, S-Rake 和 P-Rake 相比性能差别并不大,但是要得到能量最大的两径,就要对到达接收机的所有路径进行分离,这将导致接收机处理数目很大,芯片面积、复杂度增大,而 P-Rake 接收机的结构要相对简单,因此,实际应用时,可选择 P-Rake 接收机。

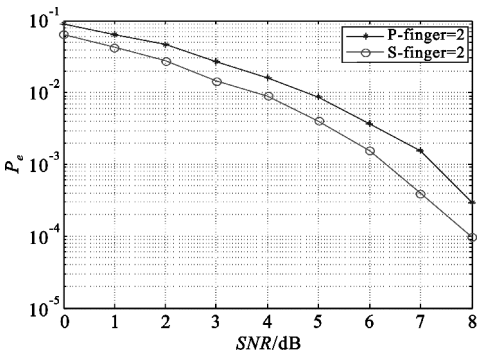


图 5 两条支路下 S-Rake 和 P-Rake 性能比较
Fig. 5 Performance of S-Rake and P-Rake with same taps

(2) 在多径分量不同时,采用 P-Rake 对系统性能的影响。

图 6 为不同支路情况下 P-Rake 的性能比较,

可见随着支路数目的增加,P-Rake 接收机性能有所提高,但是相较 2 支路的 P-Rake,5 支路和 10 支路的 P-Rake 对接收性能改善不明显,说明 60 GHz 的 CM7 信道中信号质量较好的多径分量主要集中在前两径。因此接收机可采用支路数为 2 的 P-Rake,既具有良好的性能,又降低了接收机的复杂度。

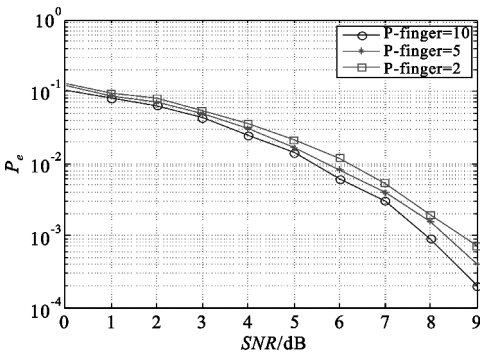


图 6 不同支路情况下 P-Rake 性能比较
Fig. 6 P-Rake performance comparison with different taps

(3) 采用最大比合并 (MRC) 和等增益合并 (EGC) 方案的 P-Rake 接收机性能比较。

图 7 为 MRC 和 EGC 合并方式下 P-Rake 性能比较,可见当支路数为 2 的情况下,MRC 合并方案和 EGC 合并方案的接收机性能相差不大,但是 MRC 方案需要精确的信道估计,放大强分量,衰减弱分量,相对而言,EGC 方案将不同支路直接相加,省去了信道估计,降低了接收机的复杂度。

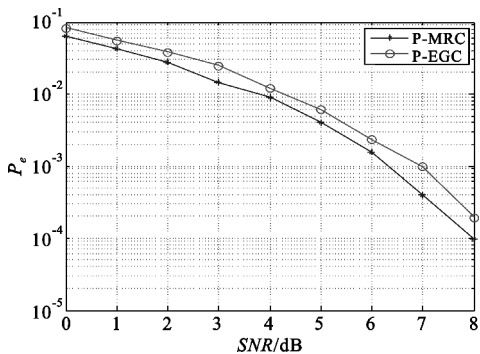


图 7 MRC 和 EGC 合并方式下 P-Rake 性能比较
Fig. 7 P-Rake performance comparison with MRC and EGC

表 1 是不同接收方案的芯片间无线互连系统性能比较。文献[10]虽然采用 Rake 接收,在低频段实现了芯片间无线互连系统,但其传输速率较低,不能满足高速通信的需求;文献[8]在 60 GHz 频段,实现了 10 Gb/s 的高速无线互连,但由于采用的是非相干接收,而且没有抗多径干扰的措施,导致其误码性能较差。本文基于 60 GHz 的 UWB 传输方案,采用两支路、等增益合并的 P-Rake,克服了上述文献的

缺点,在误码率接近 10^{-4} 时,将系统的通信距离提高到 20 cm,速率提高到 10 Gb/s,而发射功率仅为 -30 dBm,满足芯片间无线互连高速、可靠、低复杂度的要求。

表 1 芯片间无线互连系统接收性能比较
Table 1 Performance comparison of receiver in inter chip wireless interconnect

文献	发射功率 /dBm	传输距离 /cm	频段 /GHz	传输速率/(b · s ⁻¹)	调制方式	是否 Rake 接收	误码率
[10]	-60	15	3-10	500M	OOK	是	3.3×10^{-4}
[8]	-28	1	60	10G	OOK	否	3.1×10^{-4}
本文	-30	20	60	10G	PAM	是	2.5×10^{-4}

5 结束语

本文针对目前芯片间无线互连系统中尚未解决的多径干扰问题,通过在接收机中加入 Rake 接收模块,实现多径分集来提高系统的可靠性;搭建了 60 GHz 芯片间无线互连系统仿真平台,根据 IEEE 802.15.3c 信道模型,对不同 Rake 接收方案的误码性能进行了仿真比较。结果表明,当传输距离为 20 cm、信噪比为 8 dB、误码率接近 10^{-4} 时,采用等增益合并方案的 P-Rake 接收机既能实现 10 Gb/s 的高传输速率,又具有较低的复杂度。相较其他接收方案,本文的 P-Rake 方案提高了芯片间无线互连系统的信息速率以及传输可靠性,在一定程度上解决了芯片间信道的多径干扰问题,为今后芯片间无线互连系统接收方案的设计提供了技术参考,但其实际电路能否满足上述速率和误码性能的要求还需进一步研究。

参考文献:

[1] Moore B,Selathamby C,Iniewski K. Chip to chip communications for terabit transmission rates [C]//Proceedings of 2008 IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems. Macao:IEEE,2008 :1558-1561.

[2] Kawasaki K, Akiyama Y, Komori K, et al. A millimeter wave intra-connect solution [J]. IEEE Journal of Solid State Circuits,2010,45 (12) :2655-2666.

[3] 王宜文,李学华. 芯片内/间无线互通技术发展综述 [J]. 电讯技术,2014,54 (7) :1031-1038.

WANG Yi-wen,LI Xue-hua. Summarization of Intra/Inter Chip Wireless Interconnection Technology [J]. Telecommunication Engineering, 2014, 54 (7) : 1031 - 1038. (in Chinese)

[4] Kikkawa T. Wireless inter-chip interconnects using IRU-

- WB CMOS [C]//Proceedings of 2010 10th International Conference on Solid State and Integrated Circuit Technology. Shanghai:IEEE,2010:623-626.
- [5] Afroz S, Amir M F, Saha A, et al. A 10Gbps UWB transmitter for wireless inter-chip and intra-chip communication [C]//Proceedings of 2010 IEEE International Conference on Electrical and Computer Engineering. Dhaka: IEEE,2010:104-107.
- [6] Sun M, Zhang Y P, Zheng G X, et al. Performance of intra-chip wireless interconnect using on-chip antennas and UWB radios [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2009, 57(9): 2756-2762.
- [7] 杨曙辉, 王彬, 陈迎潮, 等. 基于 PCB 介质的芯片间无线互连及 60GHz 天线设计 [J]. 深圳大学学报(理工版), 2014, 31(1): 16-22.
- YANG Shu-hui, WANG Bin, CHEN Ying-chao, et al. PCB medium based inter-chip wireless connections and design of 60GHz antenna [J]. Journal of Shenzhen University (Science and Engineering), 2014, 31(1): 16-22. (in Chinese)
- [8] Foulon S, Pruvost S, Loyez C, et al. A 10Gbits/s 2.1pJ/bit OOK demodulator at 60GHz for chip-to-chip wireless communication [C]//Proceedings of 2012 IEEE Radio and Wireless Symposium. Santa Clara, CA:IEEE,2012:291-294.
- [9] Chiang P Y, Woracheewan S, Hu C, et al. Short-range, wireless interconnect within a computing chassis: Design challenges [J]. IEEE Design and Test of Computers, 2010, 27(4): 32-43.
- [10] Hu C, Khanna R, Nejedlo J, et al. A 90 nm-CMOS, 500 Mbps, 3-5 GHz fully-integrated IR-UWB transceiver with multipath equalization using pulse injection-locking for receiver phase synchronization [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2011, 46(5): 1076-1088.
- [11] Xia L, Hu C, Redfield S, et al. Wireless Interconnects for Future Computing Systems [J]. Intel Technology Journal, 2012, 16(2): 134-155.
- [12] Fernandes J R, Wentzloff D. Recent advances in IR-UWB transceivers: An overview [C]//Proceedings of 2010 IEEE International Symposium on Circuits and Systems. Paris:IEEE,2010:3284-3287.
- [13] IEEE Standard 802.15.3c, Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications for high rate Wireless Personal Area Networks (WPANs) [S].
- [14] Zheng Y, Zhang Y, Tong Y. A novel wireless interconnect technology using impulse radio for inter chip communications [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2006, 54(4): 1912-1920.
- [15] 施彩华. 基于 Rake 接收机的 UWB 通信系统性能分析 [J]. 电讯技术, 2008, 48(6): 17-20.
- SHI Cai-hua. Performance Analysis of UWB Communication System Based on Rake Receiver [J]. Telecommunication Engineering, 2008, 48(6): 17-20. (in Chinese)
- [16] 张勇, 齐丽娜. 室内密集多径环境下 DS-PAM-UWB Rake 接收性能分析 [J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2007, 27(5): 34-37, 45.
- ZHANG Yong, QI Li-na. Performance of Rake Receiver in DS-PAM-UWB System over Indoor Dense Multipath [J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2007, 27(5): 34-37, 45. (in Chinese)

作者简介:



彭江涛(1989—),男,河南周口人,2011年于哈尔滨工业大学获学士学位,现为北京信息科技大学硕士研究生,主要研究方向为射频通信;

PENG Jiang-tao was born in Zhoukou, Henan Province, in 1989. He received the B. S. degree from Harbin Institute of Technology in 2011. He is now a graduate student. His research concerns RF communications.

Email: pjthit@163.com

李学华(1977—),女,湖南长沙人,副教授、硕士生导师,主要从事无线通信关键技术、高速电路信号完整性等方面的研究。

LI Xue-hua was born in Changsha, Hunan Province, in 1977. She is now an associate professor and also the instructor of graduate students. Her research interests include wireless communication technology and signal integrity in high-speed circuit.

Email: lixuehua@bistu.edu.cn