

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2015.12.007

引用格式:李兴华,彭江涛,王亚飞. 60 GHz 芯片间无线互连系统的 MMSE-RAKE 接收机误码性能分析[J]. 电讯技术,2015,55(12):1349-1354. [LI Xuehua, PENG Jiangtao, WANG Yafei. BER Performance Analysis of MMSE-RAKE Receiver in 60 GHz Inter-chip Wireless Interconnect System[J]. Telecommunication Engineering, 2015, 55(12): 1349-1354.]

60 GHz 芯片间无线互连系统的 MMSE-RAKE 接收机误码性能分析*

李兴华**, 彭江涛, 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 芯片间无线互连信道中存在的多径衰落问题,将匹配滤波器和最小均方误差算法应用到 60 GHz 脉冲通信系统,重点分析多径信道下采用最小均方误差合并算法的 RAKE 接收机的误码性能。在 IEEE 802.15.3c 信道模型的基础上,对采用不同合并方式、不同干扰用户数目下的 RAKE 接收机误码性能进行了研究。仿真结果表明,随着干扰芯片数量的增加,引入匹配滤波器和最小均方误差算法的 RAKE 接收机不仅降低了接收机的采样率,而且有效提高了系统抗多用户干扰的能力,为芯片间无线互连系统的 RAKE 接收机设计提供了技术参考。

关键词:芯片间无线互连;60 GHz 脉冲通信系统;RAKE 接收机;最小均方误差算法;匹配滤波器

中图分类号: TN928 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-893X(2015)12-1349-06

BER Performance Analysis of MMSE-RAKE Receiver in 60 GHz Inter-chip Wireless Interconnect System

LI Xuehua, PENG Jiangtao, WANG Yafei

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

Abstract: To solve multipath fading problems in 60 GHz inter-chip wireless interconnect system, matched filter and minimum mean square error (MMSE) algorithm are applied to 60 GHz impulse communication system, and the bit error rate (BER) performance of MMSE-RAKE receiver is researched. Based on the IEEE 802.15.3c channel module, the performance of RAKE with different weighted consolidation strategies and interference users is analyzed. The simulation results show that, with the increasing of interference users, the MMSE-RAKE receiver with matched filter and MMSE not only effectively reduces the sample rate of receiver, but also improves the anti-multisuser interference ability of system. The research provides the technical reference for RAKE receiver design of inter-chip interconnect system.

Key words: inter-chip wireless interconnect; 60 GHz pulse communication system; RAKE receiver; MMSE algorithm; matched filter

* 收稿日期:2015-03-11;修回日期:2015-07-10 Received date:2015-03-11;Revised date:2015-07-10
基金项目:国家自然科学基金专项基金(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 Special Funds of the National Natural Science Foundation of China (Grant 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

1 引言

高速大容量计算机的飞速发展,导致计算机印制电路板(Printed Circuit Board,PCB)的芯片密度、布局布线的难度越来越大,传输线间的串扰、寄生电感、电容等信号完整性问题日益突出。为了解决这些问题,学者们提出了多种芯片无线互连的实现方案,如三维堆叠技术、光互连技术、射频互连技术和无线互连技术。文献[1]给出了芯片间无线互连系统。无线互连取代了传统的金属连接线,不仅提高了 PCB 设计封装的灵活性,同时降低了集成电路的功耗和成本。目前,国内外关于芯片无线互连技术的研究已经深入到诸多领域,研究热点集中在片上天线的研究、芯片间无线信道模型的研究、收发芯片的研究等。

在芯片收发电路的研究中,超宽带是物理层主要采用的技术。其中,脉冲超宽带(Impulse Radio Ultra-Wide Band,IR-UWB)技术凭借其宽频谱、低功耗、易实现的特点,成为芯片无线互连系统普遍采用的技术方案。文献[2]提出了信号形式为高斯单脉冲的 IR-UWB 系统来实现芯片间无线互连的方案,并且分析了该方案的各项性能指标,从而验证了该方案的可行性。随着对高速率以及片上天线小型化的需求,60 GHz毫米波技术以其更宽的频谱、超高的传输速率、更适合于短距离传输环境等优点,成为该领域新的研究趋势。目前,日本应庆大学采用毫米波技术,在14 mm距离内实现了传输速率为11 Gb/s的芯片间高速无线互连^[3]。文献[4]设计实现了脉冲周期仅有100 ps的60 GHz超宽带脉冲发射机,论证了将60 GHz脉冲无线电技术应用于芯片无线互连的可行性。然而,上述文献的研究都是在相对理想的两芯片间的通信环境下,真实的传播环境要复杂得多,文献[5]已经证实采用芯片无线互连的电脑机箱存在严重的多径干扰,尤其在60 GHz频段,干扰会更严重。虽然文献[6]将 RAKE 接收技术应用到芯片无线互连系统,在一定程度上解决了多径信道衰落问题,但其研究的是两芯片间的理想通信,而真实的 PCB 板上芯片的数目一般有数十个甚至更多,通信环境复杂,这就不可避免地造成多用户干扰。因此,研究一种可以有效地减小多径、多用户干扰的 RAKE 接收方案,以满足芯片无线互连系统高速、可靠的传输要求是十分必要的。

本文首先研究了采用 60 GHz 脉冲通信的芯片

无线互连系统模型;其次,分析了适用于多芯片互连的 MMSE-RAKE 接收机,并对其误码率进行了理论分析;最后,对不同合并方案、不同用户数目情况下的 MMSE-RAKE 接收机误码性能进行了仿真分析。

2 系统模型

60 GHz 无线通信系统主要采用单载波或者正交频分复用技术,其收发机的结构相对复杂,文献[4]已经证实60 GHz频段可以传输基带的超宽带无线电信号,因此,芯片无线互连系统可以将60 GHz脉冲作为其发射信号,调制方式采用脉冲幅度调制,从而降低收发器件的电路结构和成本。图 1 是文献[6]给出的基于片上天线的60 GHz芯片无线互连系统示意图。

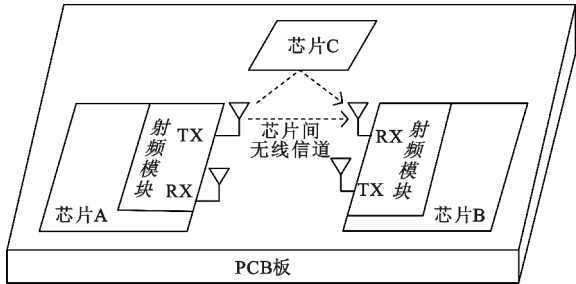


图 1 芯片无线互连系统框图
Fig. 1 Block diagram of inter-chip wireless interconnect

在多芯片无线互连系统中,假设有 K 个芯片,每个芯片产生的是 0、1 等概率的二进制比特序列 $b_k(i)$,采用脉冲幅度调制,脉冲成形器的波形为

$$g(t)=p(t)\cos(2\pi f_c t),t\in[0,T_p]。 \tag{1}$$

式中, $p(t)$ 是高斯脉冲信号; f_c 是中心频率,这里取 60 GHz; T_p 是脉冲持续时间。则发射端的输出波形为

$$s_k(t)=\sum_{j=-\infty}^{+\infty}d_jg(t-jT_s)。 \tag{2}$$

由于芯片间多径信道还处于研究阶段,文献[7-8]只是对电脑机箱环境进行测量,没有提出标准的信道模型。在60 GHz频段,国际组织 TG3c 小组根据在办公室、家庭、实验室和桌面环境进行的宽带测量结果提出了 IEEE 802. 15. 3c 标准^[9],推荐了几种60 GHz信道模型,在 TG3c 小组给出的模型中,CM7 信道模型适用于视距条件下通信距离在 0 ~ 1 m 以内的短距离桌面传输环境,是目前最接近于芯片无线互连环境的信道模型,因此本文以此信道模型作为理论研究和实验仿真的基础。

芯片无线互连系统的传输速率在 Gb/s 量级,而信道的变化通常很慢,因此可将其视作准静态信道,所以60 GHz信道的冲激响应可以表示为

$$h(t) = \sum_{l=0}^{L-1} \alpha_l \delta(t - \Lambda_l)。$$

(3)

式中, α_l 是第 l 个路径的幅度, Λ_l 是路径时延。

发射信号 $s_k(t)$ 经过信道后到达接收端,接收信号为

$$r(t) = \sum_{k=1}^K s_k(t) \otimes h_k(t) + n(t)。$$

(4)

式中, $s_k(t) = \sum_{i=1}^N b_k(i) g(t)$, $n(t)$ 是高斯白噪声。

3 RAKE 接收性能分析

3.1 RAKE 接收方案设计

在研究芯片无线互连系统的接收机时,既要考虑系统对高速率、低复杂度、低功耗的需要,又要兼顾系统高性能的要求。RAKE 接收作为一种多径分集技术,可以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^[10]。将 RAKE 接收技术引入到 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。在 RAKE 接收技术中,最大比合并法在服从瑞利衰落、噪声是高斯白噪声的信道环境中,系统的误码性能是最好的,但是,当多用户干扰存在的情况下,最小均方误差合并算法的系统性能更好。为此,将具有较好性能的最小均方误差算法引入 RAKE 接收机的合并策略中,利用两者的优势,提高系统的可靠性,但这必然增加接收机的复杂度。而匹配滤波器可以使用符号速率对接收信号进行滤波和采样,很大程度上降低了接收机设计的复杂度。因此,为了降低接收端对采样率的要求,在接收机设计时可以引入匹配滤波器。

为了达到系统抗衰落、抗干扰的性能要求与实现复杂度之间的平衡,本文在设计适用于多芯片互连系统的 MMSE-RAKE 接收机时主要从以下方面考虑:

(1)接收机的射频前端选用匹配滤波器,匹配滤波器采用模拟电路实现,经过滤波之后使用符号速率对接收信号进行采样,从而有效降低接收机设计的复杂度;

(2)接收机的叉指数目 L 直接决定着并行相关器的个数,叉指数为 L 的 RAKE 接收机就对应着 L 个并行的相关器,这无论是对前端模拟电路的设计

还是对功耗来说都是很大的挑战。因此,根据文献[6]对 60 GHz 信道的分析,可以设计两叉指的部分 RAKE 接收机,既能有效收集多径能量,又不过多地增加接收机复杂度;

(3)当接收机的叉指数设为 2 时,根据最小均方误差算法推导 RAKE 接收机的加权因子,使得输出信号的均方差最小,从而获得最优性能。

图 2 是综合以上因素设计的多芯片无线互连系统的 MMSE-RAKE 接收机结构。

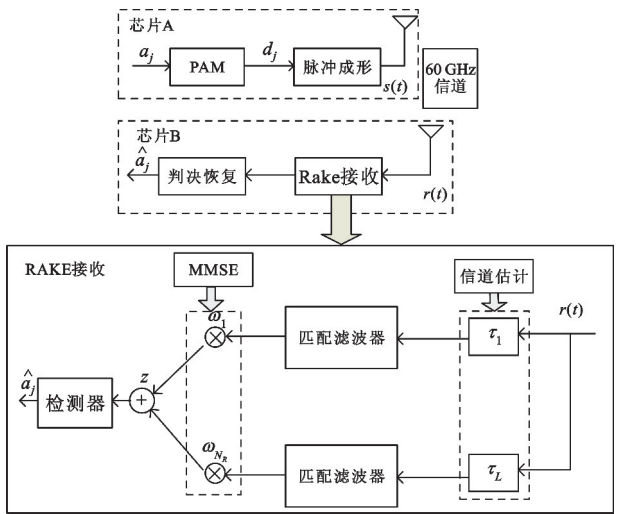


图 2 采用 MMSE-RAKE 的芯片无线互连系统框图
Fig. 2 Block diagram of MMSE-RAKE receiver in inter-chip interconnect system

如图 2 所示,当 PCB 板上多芯片进行通信时,通信的双方首先发送导频信号,可以利用导频信道或在发射信号的结构中周期性地插入导频信号,完成对信道的估计,得到信道的损耗、时延等特性参数,然后再建立数据通信。本文设计的训练序列为长度为 10 的全 1 比特。信号帧由导频序列和数据序列两部分构成,导频序列用于信道估计。在芯片接收端,发射信号经过多径信道的传播到达接收天线,接收信号 $r(t)$ 通过匹配滤波器进行接收、采样、判决后得到两路分离信号,采样速率为符号速率,在 RAKE 合并方案上,采用最小均方误差算法得到叉指权值,最后判决得到输出信号。

3.2 误码性能分析

在 RAKE 接收机中,叉指数设为 2,可以从时域上写出接收机的数学表达式为

$$F(t) = \sum_{p=1}^2 \omega_p s(t - \theta_p)。$$

(5)

式中, ω_p 是叉指权值, θ_p 是叉指时延。

接收信号经过叉指为 2 的 RAKE 接收机后,采样输出为

$$y_n=r(t)\otimes F(t)|_{t=nT}=$$
$$\sum_{k=1}^K\sum_{l=1}^N b(i)\sum_{l=0}^{L-1}\sum_{p=1}^2\omega_p\alpha_lR_s(nT-iT+\theta_p-A_l)+\tilde{n}(nT)。$$

(6)

式中, $R_s(t)=\int_{-\infty}^{+\infty}s(\tau)s(t+\tau)d\tau$ 是发射信号的自相关函数, $\tilde{n}(t)$ 是滤波后的噪声。

定义 $\boldsymbol{W}=[\omega_1,\omega_2]^T$ 是 RAKE 接收机的合并权值矢量,同时定义

$$\boldsymbol{\varphi}[n]=\sum_{l=0}^{L-1}\alpha_l\begin{bmatrix}R_s(nT+\theta_j-A_l)\\R_s(nT+\theta_2-A_l)\end{bmatrix},$$

(7)

那么式(6)可以重写为

$$y_n=\sum_{k=1}^K\sum_{l=1}^N b(i)\boldsymbol{W}^T\boldsymbol{\varphi}[n-i]+\tilde{n}(n)。$$

(8)

采用最小均方误差算法,信号的均方差为

$$E[|\sum_{i=1}^Nb(i)-y_n|^2]=\sigma_s^2\{1-2\boldsymbol{W}^T\boldsymbol{\varphi}[0]+$$
$$\boldsymbol{W}^T(\sum_{i=0}^N\boldsymbol{\varphi}[i]\boldsymbol{\varphi}^T[i])\boldsymbol{W}\}-$$
$$E(\tilde{n}^2(n))。$$

(9)

式中, $\sigma_s^2=E[\sum_{i=1}^Nb^2(i)]$ 是信号功率,这里假设不同用户数据相互独立,则信号间互相关系数为 0。

式(7)可以看成是矢量 $\boldsymbol{W}$ 的一元二次方程,最小值对应的最佳权值为

$$\omega_{opt}=(\sum_{i=1}^N\boldsymbol{\varphi}[i]\boldsymbol{\varphi}^T[i])^{-1}\boldsymbol{\varphi}[0]。$$

(10)

根据此权值,可以设定 MMSE-RAKE 接收机的合并权值。从式(10)可知,最佳权值取决于信道估计得到的衰减系数、路径时延以及发射脉冲信号,其计算结果是 2 阶矩阵。

根据式(9),可得到接收信号总能量为

$$E_s=\sigma_s^2\boldsymbol{\varphi}[0]^T(\sum_{i=1}^N\boldsymbol{\varphi}[i]\boldsymbol{\varphi}^T[i])^{-1}\boldsymbol{\varphi}[0]+E(\tilde{\omega}^2(n))。$$

(11)

由此,可以得到 RAKE 接收机的输出信噪比为

$$SNR=E_s/E[\sum_{i=1}^Nn^2(i)]。$$

(12)

最终,多径衰落信道下多芯片无线互连系统的误码率为

$$P_b=Q(\sqrt{SNR})=$$
$$Q\left(\sqrt{\frac{\sigma_s^2\boldsymbol{\varphi}[0]^T(\sum_{i=1}^N\boldsymbol{\varphi}[i]\boldsymbol{\varphi}^T[i])^{-1}\boldsymbol{\varphi}[0]+E(\tilde{\omega}^2(n))}{E[\sum_{i=1}^Nn^2(i)]}}\right)。$$

(13)

4 仿真分析

系统仿真采用 MATLAB 数值仿真软件,信道模型是 IEEE 802. 15. 3c 中的 CM7 信道,发送端采用 DS-PAM 调制,信源信号是等概二进制序列 0 和 1,通过扩频编码以区分多用户,发送信号的波形为 $g(t)$,符号速率为 10 Gb/s,发射功率为 -30 dBm,收发芯片的通信距离为一般 PCB 板的物理尺寸,本文取 20 cm,同时假设收发理想同步,RAKE 接收的分支数 $L=2$,最后通过蒙特卡洛法仿真 MMSE-RAKE 接收机的误码性能。

4.1 合并方式对误码率的影响

图 3 是芯片无线互连系统的 RAKE 接收机采用不同合并方式下的误码率性能。可以看出,接收机的合并方式分别采用了等增益(Equal Gain Combining, EGC)、最大比(Maximal Ratio Combining, MRC)和最小均方误差 3 种算法来得到合并的权重,其中,EGC 和 MRC 方式的误码性能相当,但随着信噪比的增加,两者的误码性能变化不大,当信噪比大于 15 dB 时,EGC 和 MRC 方式的误码率仍然保持在 10^{-3} 左右,已经不能满足芯片无线互连系统可靠性的要求。MMSE 方式的误码性能要明显好于 EGC 和 MRC,并且随着信噪比的增加,误码率减小得更明显,尤其是当信噪比大于 15 dB 时,MMSE 方式的误码率已经远远低于 EGC 和 MRC 方式,因此采用 MMSE 合并方式的 RAKE 接收机能够为芯片无线互连系统提供可靠性能。

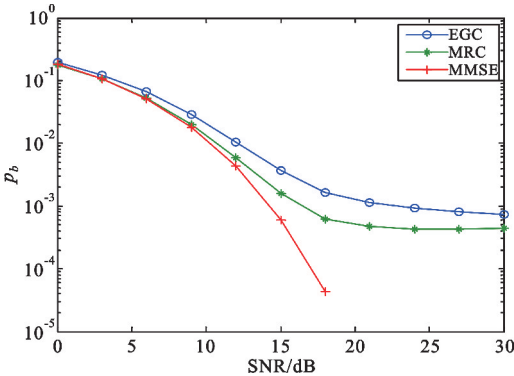


图 3 CM7 信道下 3 种合并方式的性能
Fig. 3 Performance of three combining methods

图 4 是在接收机 3 种合并方式的基础上加入线性均衡器的系统误码性能仿真图。从图 4 可以看出,加入线性均衡器后,EGC 和 MRC 方式的误码率

性能曲线有明显变化,在信噪比大于15 dB时,两者的性能得到明显改善,但是对 MMSE 方式的误码性能改善并不明显。同时还可以看出,3 种合并方式都加入线性均衡器后,在相同信噪比时,三者的误码率差别不大,这说明引入均衡器能够降低 RAKE 接收机的误码率,但是均衡器的加入必然增加电路的复杂度,相对于 EGC 和 MRC,MMSE 在不增加均衡器的条件下,误码率性能也能满足系统的要求。因此,在用于多芯片无线互连的 MMSE-RAKE 接收机的设计中,不引入信道均衡,这样可以减少复杂度,同时保证系统的可靠性能。

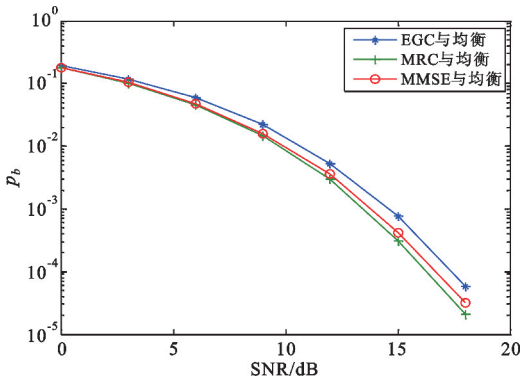


图 4 CM7 信道下加入均衡的误码性能
Fig. 4 BER performance of receiver with equalization

4.2 多用户对误码率的影响

图 5 是采用 3 种不同合并方式情况下 2 叉指部分 RAKE 接收机存在 10 个干扰用户时的误码率性能曲线。

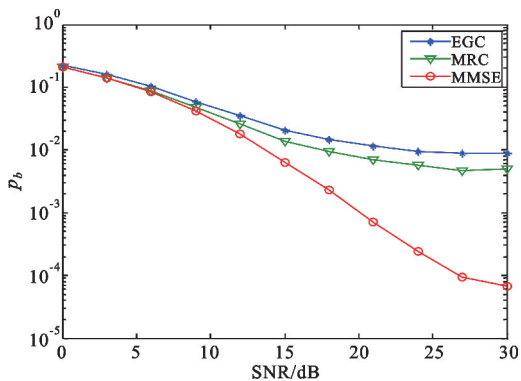


图 5 10 个干扰用户条件下系统误码性能
Fig. 5 BER performance of system with 10 interference users

图 6 是存在 50 个干扰用户的情况下,2 叉指部分 RAKE 接收机采用 3 种不同合并方式下的误码性能曲线。

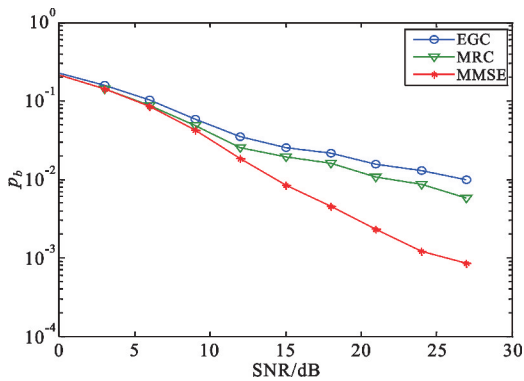


图 6 50 个干扰用户条件下系统误码性能
Fig. 6 BER performance of system with 50 interference users

由图 5 和图 6 可以看出,当干扰用户为 10 时,EGC 和 MRC 的误码性能已经明显差于 MMSE 的误码性能,而且随着用户数的增加,三者的误码性能都有所下降,但是 EGC 和 MRC 的误码率大于 10^{-3} ,已经不能满足系统要求了,而 MMSE 表现出较好的抗干扰性能。因此,在多芯片无线互连时,RAKE 接收机引入 MMSE 合并算法能够明显提高接收机抗多用户干扰的能力,改善系统的误码性能。

5 结束语

本文针对目前芯片无线互连系统中尚未解决的多径干扰问题,将最小均方误差算法引入到 RAKE 接收机;搭建了 60 GHz 芯片间无线互连系统仿真平台,以 IEEE 802.15.3c 信道模型为基础,对 MMSE-RAKE 接收机的误码性能进行了理论分析和仿真比较。结果表明,在 CM7 信道环境下,MMSE-RAKE 性能要优于 EGC-RAKE 和 MRC-RAKE,并且随着干扰芯片的增加,EGC-RAKE 和 MRC-RAKE 接收性能恶化较为严重,而 MMSE-RAKE 接收机在不需信道均衡的情况下仍然表现出较好的性能。因此,在设计适用于多芯片无线互连系统的 RAKE 接收机时,通过引入匹配滤波器和最小均方误差算法,在一定程度上解决了芯片间多径信道衰落问题,但其实现复杂度需要进一步研究。

参考文献:

[1] MARTIN P M,GOUGUEC T L,MAHDI N. Wireless interconnects by using printed antennas for inter-chip communications in PCB context[C]//Proceedings of 2014 European Radar Conference. Rome:IEEE,2014:1789-1792.
[2] KIKKAWA T. Wireless inter-chip interconnects using IR-UWB-CMOS[C]//Proceedings of 2010 IEEE Solid-State and Integrated Circuit Technology. Shanghai:IEEE,

- 2010:623-626.
- [3] 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.
 - [4] FOULON S, PRUVOST S, LOYEZ C, et al. A 10GBits/s 2.1 pJ/bit OOK demodulator at 60GHz for chip-to-chip wireless communication[C]//Proceedings of 2012 IEEE Radio and Wireless Symposium. Santa Clara: IEEE, 2012:291-294.
 - [5] CHIANG P Y, WORACHEEWAN S, HU C, et al. Short-range, wireless interconnect within a computing chassis: Design challenges[J]. IEEE Design&Test of Computers, 2010, 27(4):32-43.
 - [6] 彭江涛, 李学华. 60GHz 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 Jiangtao, LI Xuehua. Performance of Rake Receiver in 60GHz Inter Chip Wireless Interconnect System[J]. Telecommunication Engineering, 2014, 54(10):1424-1429. (in Chinese)
 - [7] REDFIELD S, WORACHEEWAN S, LIU H, et al. Understanding the ultrawideband channel characteristics within a computer chassis[J]. Antennas and Wireless Propagation Letters, 2011(10):191-194.
 - [8] WU H T, LIN J J, KENNETH K O. Inter-chip wireless communication[C]//Proceedings of 2013 7th European Conference on Antennas and Propagation. Gothenburg: IEEE, 2013:3647-3649.
 - [9] IEEE 802 15-07-0584-00-003c, TG3c channel modeling sub-committee final report[S].
 - [10] 王德强, 刘丹谱, 乐光新. 超宽带 Rake 接收机在密集多径信道下的性能[J]. 电子与信息学报, 2005, 27(3):415-418.

WANG Deqiang, LIU Danpu, YUE Guangxin. Performance of Ultra-wide Band Rake Receivers in Dense Multipath Channels[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2005, 27(3):415-418. (in Chinese)

作者简介:



李学华 (1977—), 女, 湖南长沙人, 博士, 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研究;

LI Xuehua was born in Changsha, Hunan Province, in 1977. She is now an associate professor with the Ph. D. degree and also the instructor of graduate students. Her research concerns wireless communication technology and signal integrity in high-speed circuit.

Email:lixuehua@bistu.edu.cn

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, 2015 年于北京信息科技大学获硕士学位, 主要研究方向为射频通信;

PENG Jiangtao was born in Zhoukou, Henan Province, in 1989. He received the B. S. degree from Harbin Institute of Technology and the M. S. degree from Beijing Information Science and Technology University in 2011 and 2015, respectively. His research concerns RF communications.

Email:pjthit@163.com

王亚飞 (1981—), 男, 博士, 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。

WANG Yafei was born in 1981. He is now an experimentalist with the Ph. D. degree. His research concerns signal integrity of wireless communication system and high speed circuit.

Email:yafeiwang@bistu.edu.cn