



# 60 GHz 脉冲无线通信系统的 TH-PAM 多址接入方案

张永斌, 李学华, 姚勃旭

(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 脉冲无线通信系统中的多用户干扰问题, 研究了基于 TH-PAM 的多址调制方案的性能。在 IEEE 802.15.3c 信道模型下, 建立了系统误码性能、通信距离和用户数关系的分析模型, 研究了 TH-PAM 多址调制系统的多用户干扰特性, 并与 TH-PPM 方案进行了比较。仿真结果表明, 采用 TH-PAM 多址调制方式的系统在通信距离小于 30 m 的范围内, 误码率可以保持在  $10^{-5}$  以下, 而采用 TH-PPM 方式的系统在 100 m 的范围内, 误码率始终大于  $10^{-4}$ 。由此可见, TH-PAM 比 TH-PPM 更加适合用于 60 GHz 短距离无线通信, 为 5G 高频新空口的热点高容量应用场景提供了技术参考。

**关键词:** 60 GHz 频段; 5G; 脉冲无线通信; TH-PAM; TH-PPM; 多用户干扰

**中图分类号:** TN914

**文献标识码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.1000-0801.2016118

## TH-PAM multiple access scheme for 60 GHz pulse wireless communication system

ZHANG Yongbin, LI Xuehua, YAO Boxu

School of Information & Communication Engineering, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100101, China

**Abstract:** In view of the multi-user interference problem in 60 GHz pulse wireless communication system, the performance of the system based on TH-PAM multiple modulation scheme was studied. Under the IEEE 802.15.3c channel model, relationship analysis model between system BER performance, communication distance and number of user was put forward, multi-user interference characteristics of the system with TH-PAM multiple access modulation was studied. It was compared with TH-PPM multiple access system. Simulation results show that the BER of TH-PAM multiple access system can keep below  $10^{-5}$  within the scope of the communication distance is less than 30 meters, and the BER of TH-PPM multiple access system is always greater than  $10^{-4}$  in range of 100 meters. As a result, TH-PAM was more suitable for 60 GHz short-range wireless communication than TH-PPM and provided technical reference for hot high capacity scenario of 5G high-frequency new hollow.

**Key words:** 60 GHz, 5G, pulse wireless communication, TH-PAM, TH-PPM, multi-user interference

收稿日期: 2015-12-08; 修回日期: 2016-03-30

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(No.CIT&TCD201404114), Science and Technology Project of Beijing Municipal Education Commission(No. KM201511232010)



## 1 引言

从 2012 年以来,NGMN、IMT-2020 推进组、5GMF、5G Forum 等论坛和标准组织陆续出版了 5G 白皮书。其中,在 5G 需求层面最有代表性的是 NGMN 和 IMT-2020 工作组出版的需求白皮书。在 2015 年 6 月的 ITU-R 会议上,5G 工作取得了巨大进展。5G 被正式命名为 IMT-2020;IMT-2020 对 5G 候选技术做了比较深入的分析研究,确定了 10 种使能技术:超密集组网、大规模天线、全频谱接入、新型多址、新型多载波、先进调制编码、终端直通、灵活双工、全双工和频谱共享。如图 1 所示,5G 高频新空口通过超大带宽来满足热点高容量场景极高传输速率的要求。同时,高频段覆盖小、信号指向性强,可通过密集部署来达到极高的流量密度<sup>[1]</sup>。

由于拥有丰富的免许可频谱资源、高方向性、高系统容量和数 Gbit/s 的高传输速率等优势<sup>[2]</sup>,60 GHz 频段被列为 5G 高频新空口的候选频段之一。当前国内外对 60 GHz 无线通信系统的研究主要集中在信道的测量、标准的制定、收发信机集成电路芯片的设计等方面,而且主要针对 60 GHz 载波无线通信。众所周知,载波通信对于信道的多径效应十分敏感,特别是像 60 GHz 这种高频信号,经过多条路径的传输,在接收端会出现多种不同延迟、相位的信号发生重叠的情况,这将严重降低系统的性能。参考文献[3]首次提出了基于 60 GHz 的脉冲通信方式,并对其容量和误码率性能进行了分析。研究结果表明,该通信方式具有良好的抗多径衰落特性。

在 5G 高频新空口热点高容量场景中,多用户干扰问题是不可避免的。在无线通信系统中,多址接入技术使得多个用户共享同一信道成为可能,可以有效地解决多用户干扰问题。针对 5G 低频段应用的多址技术包括<sup>[1]</sup>:基于多维调制和稀疏码扩频的 SCMA (sparse code multiple access,稀疏码分多址接入)技术、基于非正交特征图样的 PDMA(pattern division multiple access,图样分割多址接入)

技术和基于复数多元码及增强叠加编码的 MUSA(multi-user shared access,多用户共享接入)技术等,这些新型多址接入技术通过多用户信息在相同资源上的叠加传输,在接收侧利用先进的接收算法分离多用户信息,不仅可以有效提升系统频谱效率,还可成倍地增加系统的接入容量。针对 UWB(ultra wideband,超宽带)无线通信系统的多址调制技术的研究主要集中在 TH-PAM 和 TH-PPM 方案上。参考文献[4]分析了单用户  $M$ -PAM 和  $M$ -PPM 系统的误码率性能,结果表明,采用 2-PAM 和 2-PPM 能够实现更好的误码性能。参考文献[5]表明在 AWGN 信道下,TH-PAM 和 TH-PPM 超宽带单用户系统的性能均随脉冲重复次数的增加而有明显的改善,并且前者优于后者。目前,针对 60 GHz 脉冲无线通信系统多址调制方案的研究尚未展开。综上所述,研究一种多址接入方案以满足 60 GHz 脉冲无线通信系统的需求是十分必要的。

本文首先建立了基于 TH-PAM 多址调制的 60 GHz 脉冲无线通信系统模型;其次,对 TH-PAM 的多址性能进行了研究,建立了系统误码性能的理论分析模型。再次,对 60 GHz TH-PAM 的误码率性能与通信距离、用户数三者之间的关系进行了仿真,并与 TH-PPM 进行了比较。

## 2 60 GHz 脉冲无线通信系统模型

基于 60 GHz 脉冲无线通信系统的 TH-PAM 多址调制方案的系统模型如图 2 所示。信道编码选择具有高码率的 LDPC(low density parity check code,低密度奇偶校验码)<sup>[6]</sup>,PN 码选择具有良好相关特性的 Gold 码,调制方式选择 PAM,接收端采用结构简单的相干接收。

在信道模型的选择上,IEEE 802.15.3c 工作小组在 2009 年推荐了几种 60 GHz 无线通信系统信道模型<sup>[8]</sup>。其中,CM4 信道为非视距情况下的办公环境中的 60 GHz 信道模型,符合本文的应用场景,因此本文采用该信道模型作为基础进行理论分析和仿真。参考文献[9]根据 Friis 方程和 60 GHz 系统噪声模型推导出了系统性能与最大通信



图 1 5G 无线技术路线与应用场景

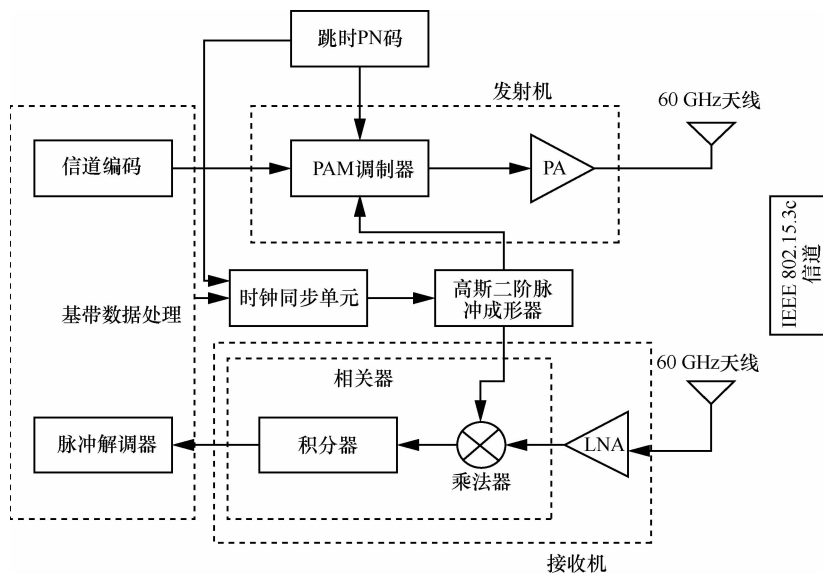


图2 60 GHz 脉冲无线通信系统

距离  $d$  之间的关系为:

$$SNR \leq 116 - 10 \lg \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right)^n \quad (1)$$

其中,  $n$  为功率衰减指数, 一般取 2.2,  $\lambda$  是与中心频率  $f_c$  相对应的波长。

在 60 GHz 脉冲无线通信系统中, 脉冲波形携带需要传输的信息, 这是与载波通信的本质区别。采用 60 GHz 频率的余弦函数将基带脉冲信号调制到射频段, 即可以得到满足 60 GHz 射频辐射模板的脉冲波形。高斯脉冲信号频谱曲线光滑, 但其信号成分中含有直流分量, 不利于通信系统的有效传输, 为了避免脉冲信号直流分量给通信系统带来的信号畸变, 可以对高斯函数进行求导运算, 参考文献

献[10]中选择了高斯脉冲的二阶导数作为 60 GHz 脉冲波形, 信号形式为:

$$p(t) = \left( 1 - 4\pi \frac{t^2}{\alpha^2} \right) e^{-\frac{2\pi^2 t^2}{\alpha^2}} \quad (2)$$

其中,  $\alpha^2 = 4\pi\sigma^2$  为脉冲因子。

本文也选择了高斯脉冲的二阶导数作为 60 GHz 脉冲波形。图 3 为应用高斯二阶导函数产生的 60 GHz 脉冲信号波形及其功率谱密度。

### 3 TH-PAM 多址性能

#### 3.1 多用户干扰模型

多址技术可以有效地解决多用户干扰问题, TH-PAM

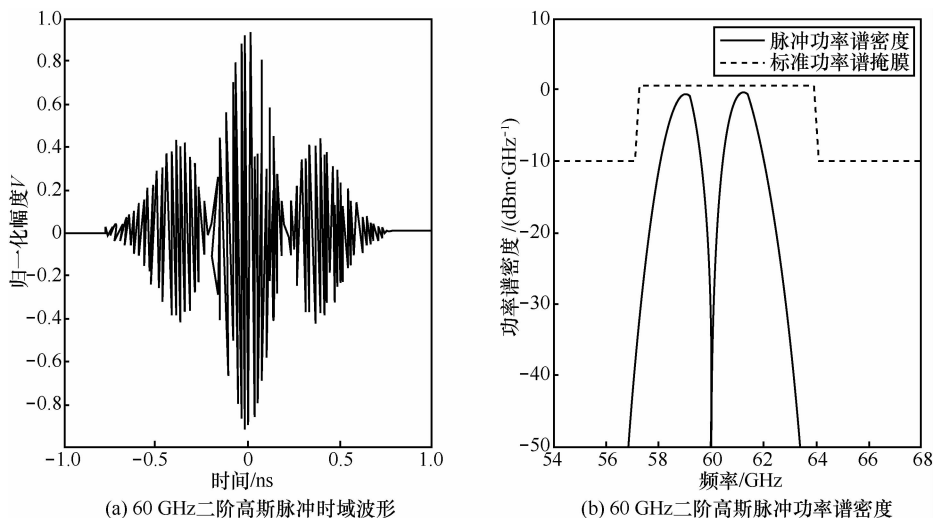


图3 60 GHz 高斯脉冲时域波形及功率谱密度



是利用不同伪随机码区分不同用户,用不同脉冲幅度表示不同信息的多址调制技术。在多用户的60 GHz脉冲无线通信系统中,用户 $k$ 的TH-PAM信号可以表示为<sup>[11,12]</sup>:

$$s^{(k)}(t) = \sum_{j=0}^{\infty} \sqrt{E_w} D_{\lfloor j/N_s \rfloor}^{(k)} p_{tr}(t - jT_r - c_j^{(k)} T_c) \quad (3)$$

其中, $D_{\lfloor j/N_s \rfloor}^{(k)}$ 表示第 $j$ 帧传输的二进制信息, $\lfloor j/N_s \rfloor$ 表示对 $j/N_s$ 向下取整。 $p_{tr}(t)$ 为能量归一化单周期高斯二阶导数脉冲波形,即 $\int_{-\infty}^{\infty} |p_{tr}|^2 dt = 1$ 。其脉冲宽度为 $T_p$ ,码片时间为 $T_c$ ,且有 $T_p \leq T_c$ 。 $N_h = \frac{T_f}{T_c}$ 表示跳时码最大值上界, $T_f$ 表示帧长, $0 \leq c_j^{(k)} < N_h$ 为用户 $k$ 的伪随机跳时码序列(用户地址码)。 $N_s$ 表示每比特脉冲数,则每比特平均脉冲重复周期可表示为 $T_s = N_s T_f$ ,信息比特速率为 $R_b = (N_s T_f)^{-1} = (N_s N_h T_c)^{-1}$ 。 $E_w$ 表示归一化单周期脉冲波形能量。

经过CM4多径信道传输后,接收信号为:

$$\begin{aligned} r(t) &= \sum_{k=0}^{N_u-1} \sum_{i=0}^{L-1} A_k a_i s^{(k)}(t - \tau_k - i\Delta) + n(t) \\ &= \sum_{i=0}^{L-1} A_i A_0 s^{(0)}(t - \tau_0 - i\Delta) + \\ &\quad \sum_{k=0}^{N_u-1} \sum_{i=0}^{L-1} A_k a_i s^{(k)}(t - \tau_k - i\Delta) + n(t) \end{aligned} \quad (4)$$

其中, $a_i (i=0,1,\dots,L-1)$ 表示路径幅度衰落, $L$ 表示路径数, $\Delta$ 表示多径信道时延, $A_k$ 表示多用户路径损耗。

假设模型是对称的,接收机和发射机收发信息完全同步,则接收机已知对应的PN码和传输时延 $\Delta$ 。接收端采用相干检测,设用户0为主要接收信号,其余用户的信号皆视为多用户干扰。则用户0接收机检测时需提供的相干掩膜信号为:

$$m^{(0)}(t) = \sum_{j=0}^{N_s-1} v^{(0)}(t - jT_r - c_j^0 T_c) \quad (5)$$

接收机的输出信号为:

$$\begin{aligned} R^{(0)} &= \int_0^{T_b} r(t) m^{(0)}(t - \tau_0) dt \\ &= R_0 + R_{\text{mui}} + R_n \end{aligned} \quad (6)$$

其中, $R_0$ 为有用信号相关检测输出, $R_{\text{mui}}$ 为多用户干扰, $R_n$ 为高斯白噪声相关输出。

### 3.2 SINR 和 BER 性能

由于短距离无线通信中每个用户受到的干扰可假设

是相同的,因此可根据某一个用户接收信号的BER性能来衡量整个多用户系统的传输性能。而BER与SINR是相关联的,故60 GHz短距离脉冲无线通信系统中SINR值的确定将十分关键。根据参考文献[14],有:

$$SINR = \frac{E_b}{\sigma_{\text{mui}}^2 + \sigma_n^2} \quad (7)$$

其中, $E_b$ 为接收端有用信号能量之和, $\sigma_{\text{mui}}^2$ 为多用户干扰方差, $\sigma_n^2$ 为接收端输出噪声干扰方差。根据第3.1节中分析的多用户干扰模型,可以得到:

$$E_b = E(R_0^2) = \sum_i^{L-1} a_i^2 A_0^2 N_s^2 E_w^{(0)} \quad (8)$$

$$\sigma_n^2 = E(R_n^2) = \frac{N_s N_0}{2} \quad (9)$$

根据参考文献[13,14]中对多用户干扰方差特性的分析,再结合式(4)可得:

$$\sigma_{\text{mui}}^2 = \frac{T_p}{2T_f N_s} \sum_{k=1}^{N_u-1} \sum_{i=0}^{L-1} a_i^2 A_k^2 \quad (10)$$

为了减少码间串扰并保持较高的传输性能,在60 GHz脉冲无线通信系统中将采用正交PAM调制。如果系统实施良好的功率控制,接收端的各用户信号能量基本相等,每条传输链路的衰减总和是相同的,可以得到SINR与 $\beta$ (脉冲占空比的倒数,取决于 $T_p$ 和 $T_c$ 的大小,一般为定值)、 $N_u$ (用户数)、 $N_s$ (每比特脉冲数)、 $N_h$ (跳时码最大值上界)、SNR(单位脉冲信噪比)的关系,可将式(7)写成:

$$SINR_{\text{TH-PAM}} = \frac{N_s}{\frac{(N_u-1)}{2\beta N_h} + \frac{1}{SNR}} \quad (11)$$

根据参考文献[15,16]可得TH-PPM的SINR为:

$$SINR_{\text{TH-PPM}} = \frac{N_s}{\frac{(N_u-1)}{\beta N_h} + \frac{1}{SNR}} \quad (12)$$

根据参考文献[13]中对TH-PPM的BER与SINR关系的推导和参考文献[17]中对TH-PAM的BER与SINR关系的推导,并且结合式(1)中通信距离与信噪比的关系,可基于TH-PAM和TH-PPM多址调制的60 GHz脉冲无线通信系统的误码率、通信距离以及用户数的关系分别为:

$$BER_{\text{TH-PAM}} = 0.5 \text{erfc} \left( \sqrt{\frac{2N_s}{\frac{(N_u-1)}{\beta N_h} + \frac{1}{\frac{116-10 \lg \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right)^n}{10}}}}} \right) \quad (13)$$

$$BER_{TH-PPM} = 0.5 \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{N_s}{\frac{2(N_u - 1)}{\beta N_h} + \frac{2}{10^{\frac{116 - 10 \lg \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right)^n}}}}}} \right) \quad (14)$$

#### 4 性能仿真

根据第3节推导出的误码率计算式,本节将使用MATLAB工具,对误码率计算式进行数值计算仿真,验证TH-PAM和TH-PPM在60 GHz脉冲无线通信系统中的抗多用户干扰性能。仿真参数设置如下: $\beta=10$ ,  $f_c=60$  GHz,  $c=3 \times 10^8$  m/s,  $\lambda = \frac{c}{f_c}$ ,  $n=2.2$ ,  $N_h=5$ 。

参考文献[7]指出,在理论上,为了避免过大的非线性失真,一种直观的方案是采用输出功率回退机制,限定发射信号的输出功率。众所周知,降低发射功率会使信噪比降低,致使系统的抗干扰能力减弱。根据参考文献[9]中的链路预算分析,本文研究了功放元件非线性特性对系统性能的影响。如图4所示,当信噪比小于10 dB时,输入/输出将处于线性区,但TH-PAM系统的误码率始终大于 $10^{-5}$ ,TH-PPM系统的误码率更差,始终大于 $10^{-3}$ ,都无法保证通信质量;当信噪比大于10 dB时,功放元件将工作在非线性区,但TH-PAM系统的误码率大于 $10^{-5}$ ,能够满足信息可靠传输的要求,而TH-PPM系统依然无法保证通信质量。因此,功率回退机制是在牺牲系统性能的情况下降低了非线性失真的负面影响。如果要满足系统QoS(quality of service,服务质量)的需求,这就对功放元件的结构设计、制造工艺等方面提出了较高的要求。

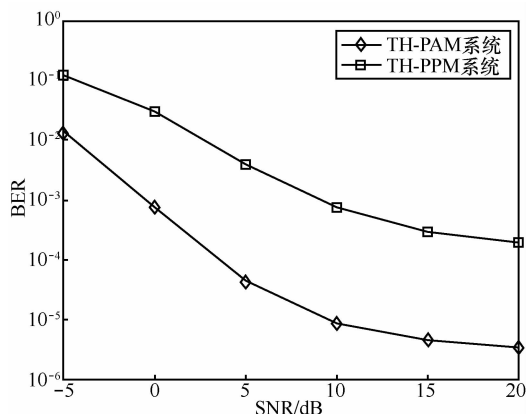


图4 系统信噪比与误码率性能的关系

如图5所示,在用户数 $N_u=50$ 的情况下,TH-PAM和TH-PPM 60 GHz脉冲无线通信系统的误码率性能都随着

距离 $d$ 的增大而变差。TH-PAM多址调制方式在 $d \leq 30$  m的范围内,误码率可以保持在 $10^{-5}$ 以下,说明该方式比较适合短距离之间的信息传输。而TH-PPM多址调制方式的系统误码率比较差,始终大于 $10^{-4}$ 。显然,相比于TH-PPM,TH-PAM多址调制方式更适合多用户60 GHz脉冲无线通信系统。

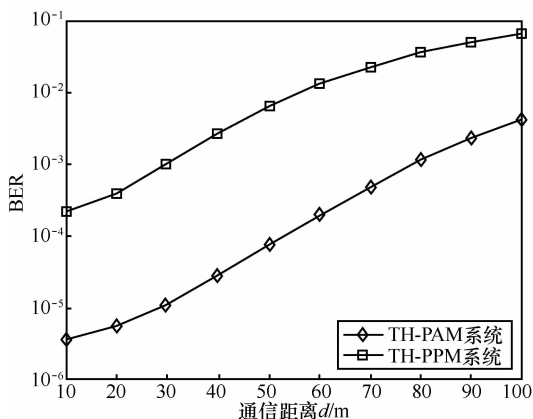


图5 TH-PAM与TH-PPM的误码率性能比较

如图6所示,随着通信距离 $d$ 的不断增加,系统能保证正常通信的用户数在不断减少。当通信距离 $d \leq 45$  m时,只要提高单位比特脉冲数 $N_s$ 的值,采用TH-PAM多址调制方式的系统误码率就可以保持在 $10^{-5}$ 以下,即可保证500个用户正常通信。当用户数相对比较小时,例如 $N_u \leq 300$ ,采用TH-PAM多址调制方式的系统可以保证更加理想的误码性能。从图7可以看出,当通信距离为45 m,用户数为500个时,采用TH-PPM多址调制方式的系统误码率已经接近 $3.1 \times 10^{-2}$ ,系统的可靠性较差。即使在用户数为200时,系统的误码率也只有 $2.2 \times 10^{-3}$ 。综上所述,TH-PAM比TH-PPM多址调制方式更适合用于多用户60 GHz脉冲短距离无线通信系统。

#### 5 结束语

当前,5G愿景与需求已基本明确,国际标准制定工作即将启动。为此,迫切需要尽快细化5G技术路线,整合各种无线关键技术。60 GHz是5G高频新空口的候选频段之一。针对目前60 GHz脉冲无线通信系统中尚未解决的多用户干扰问题,通过在发送端引入TH-PAM多址调制方案,实现多址接入来提高系统的可靠性。本文建立了基于TH-PAM的60 GHz脉冲无线通信系统模型,在IEEE 802.15.3c信道模型下研究了系统误码性能、用户数和

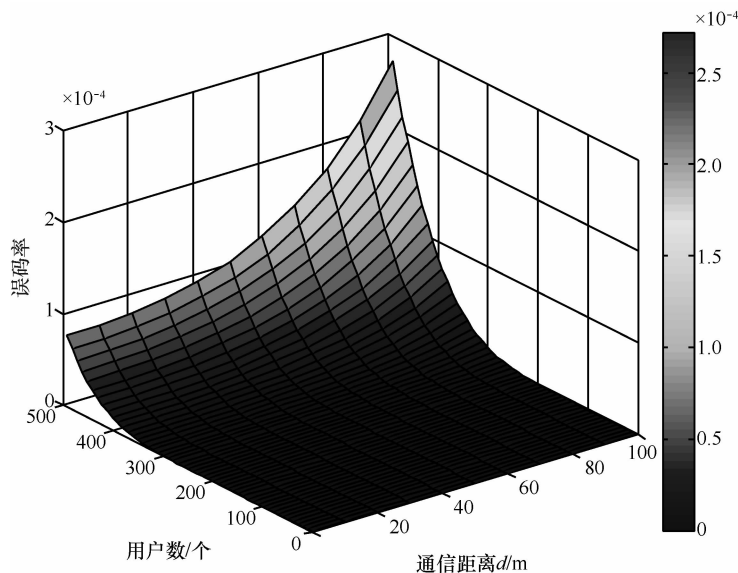


图6 TH-PAM 的误码率性能与通信距离、用户数的关系

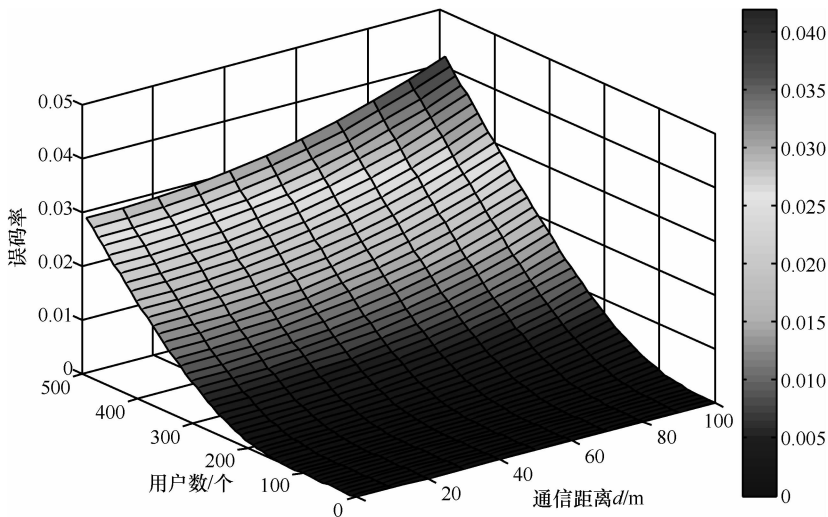


图7 TH-PPM 的误码率性能与通信距离、用户数的关系

通信距离之间的关系,分析了 TH-PAM 多址调制下 60 GHz 脉冲无线通信系统的多用户干扰特性,并与 TH-PPM 方案进行了比较。性能仿真与分析结果显示,TH-PAM 比 TH-PPM 多址调制方式更加适合用于 60 GHz 脉冲无线短距离通信。本文的研究为今后 5G 高频新空口的热点高容量场景的研究提供了重要的参考。

### 参考文献:

[1] IMT-2020 (5G) Promotion Group. The white paper of 5G wireless technology architecture[R]. 2015.  
[2] HANSEN C J. WiGiG: multi-gigabit wireless communications in

the 60 GHz band [J]. Wireless Communications IEEE, 2011, 18(6): 6-7.

[3] 李娜. 60 GHz 脉冲无线通信系统的性能研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.  
LI N. Performance study of 60 GHz pulse wireless communication system [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012.  
[4] 王玮. 60 GHz 无线通信系统幅度接收误码率分析 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.  
WANG W. BER evaluation for 60 GHz wireless communication systems with amplitude detection receiver [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013.

- [5] 杨银霞, 颜彪, 胡倩. TH-PPM 与 TH-PAM 超宽带系统的性能分析与比较[J]. 扬州大学学报(自然科学版), 2009, 12(3): 39-42.  
YANG Y X, YAN B, HU Q. Analysis and comparison of performance for TH-PPM and TH-PAM ultra wideband systems[J]. Journal of Yangzhou University(Natural Science Edition), 2009, 12(3): 39-42.
- [6] TRACHEWSKY J A, SHEN B Z, BLANKSBY A J, et al. LDPC coding systems for 60 GHz millimeter wave based physical layer extension: US8392786 B2[P]. [2013-05-03].
- [7] 柳跃腾. 60 GHz 短距离无线通信干扰消除技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2013.  
LIU Y T. Interference rejection techniques of 60 GHz short range wireless communication[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2013.
- [8] ZWICK T, BEUKEMA T J. Wideband channel sounder with measurements and model for the 60 GHz indoor radio channel[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2005, 54 (4): 1266-1277.
- [9] 何晓哲. 60GHz 毫米波无线通信系统调制及信道容量分析[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.  
HE X Z. 60 GHz millimeter-wave wireless communication system: modulation and capacity research[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2011.
- [10] 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(10): 1424-1429.  
PENG J T, LI X H. Performance of rake receiver in 60 GHz inter chip wireless interconnect system[J]. Telecommunication Engineering, 2014(10): 1424-1429.
- [11] BAI Z, KWAK K. Performance analysis of TH-PAM of UWB system and the coded scheme[C]//International Conference on IEEE, Sept 23-26, 2005, Wuhan, China. New Jersey: IEEE Press, 2005: 296-299.
- [12] SCHOLTZ R A. Multiple access with time-hopping impulse modulation[C]//IEEE Military Communications Conference, Oct 11-14, 1993, Boston, MA, USA. New Jersey: IEEE Press, 1993: 447-450.
- [13] 刘传勇. UWB 无线通信系统的性能分析[D]. 武汉: 华中师范大学, 2006.  
LIU C Y. Performance analysis for UWB wireless communication system[D]. Wuhan: Central China Normal University, 2006.
- [14] 仇洪水, 郑霖. 脉冲超宽带 TH-PPM 多址通信的误比特率计算方法[J]. 通信学报, 2005, 26(10): 133-137.  
CHOU H S, ZHENG L. New method of BER calculate for impulse-UWB TH-PPM multiple-access communications[J]. Journal on Communications, 2005, 26(10): 133-137.
- [15] 王宜文. 无线芯片域网络组网及多址通信机制研究 [D]. 北京: 北京信息科技大学, 2014.  
WANG Y W. The research of wireless chips area network networking and multiple access communication mechanism[D]. Beijing: Beijing Information Science and Technology University, 2014.
- [16] 王宜文, 李学华. 无线芯片域网络自适应多址调制方案的研究[J]. 高技术通讯, 2014(7): 709-715.  
WANG Y W, LI X H. A novel adaptive multiple access modulation technique for wireless chip area networks[J]. Chinese High Technology Letters, 2014(7): 709-715.
- [17] 刘敏. 2PAM-TH UWB 系统误码性能分析[D]. 扬州: 扬州大学, 2009.  
LIU M. BER analysis of 2PAM-TH UWB communication system[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2009.

## [作者简介]



张永斌(1991-),男,北京信息科技大学信息与通信工程学院硕士生,主要研究方向为射频通信及高速电路传输。



李学华(1977-),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。



姚勃旭(1988-),男,北京信息科技大学信息与通信工程学院硕士生,主要研究方向为射频通信及通信系统信道编码。