



FTH-PPM 多址接入技术在 60 GHz 脉冲 无线通信系统中的性能

沈琛, 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: 针对 60 GHz 脉冲无线通信系统中存在的多址接入干扰问题, 研究了基于 FTH-PPM 多址接入方案的性能。在 IEEE 802.15.3c 信道模型下, 分析了系统误码率性能与跳频码数量、信噪比、用户数之间的关系, 研究了 FTH-PPM 多址调制系统特性, 并与 TH-PPM、TH-PAM 方案进行比较。仿真结果表明, 系统在多址条件下, 可以通过改变信噪比、频率跳数、用户数来满足所需的误码率, 同时在一定范围内, FTH-PPM 的误码率性能优于 TH-PAM 和 TH-PPM 的误码率性能, 并且可以根据脉冲占空比的值选择合适的多址调制方式, 为 60 GHz 脉冲无线通信的应用提供技术参考。

关键词: 60 GHz; 脉冲无线通信; FTH-PPM; 多址接入干扰

中图分类号: TN914

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2017233

Performance of FTH-PPM multiple access technology in 60 GHz wireless communication system

SHEN Chen, LI Xuehua

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

Abstract: Aiming at the problem of multiple access interference in 60 GHz pulse wireless communication system, the performance of system based on FTH-PPM multiple access scheme was studied. Under the IEEE 802.15.3.c channel model, the relationship between the bit error rate performance of the system and the number of frequency hopping codes, the signal to noise ratio and the number of users were analyzed. The characteristics of FTH-PPM multiple access modulation system were studied and compared with TH-PPM and TH-PAM schemes. The simulation results show that the system can meet the required bit error rate by changing the signal to noise ratio, the number of hops and the number of users. At the same time, the BER performance of FTH-PPM is better than that of TH-PAM and TH-PPM. The system can select the appropriate multiple access modulation mode according to the value of the pulse duty cycle. The research will provide technical reference for the application of 60 GHz pulse wireless communication.

Key words: 60 GHz, pulse wireless communication, FTH-PPM, multiple access interference

收稿日期: 2017-03-29; 修回日期: 2017-07-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61601038)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.61601038)



1 引言

无线通信的发展给人们的生产和生活提供了极大的便利,面向 2020 年及未来的 5G 移动通信获得了学术界和工业界越来越多的重视。在 5G 网络中可能存在同一种无线接入技术之间同频部署的干扰和不同无线接入技术之间共享频谱的干扰。如何排除这些干扰,实现多种无线接入技术之间的共存,是一个需要深入研究的课题。随着网络技术的快速发展,连接到无线通信网络的设备数量日益增长,使得无线通信频谱资源愈加紧张,并对通信数据传输速率的要求也越来越高。60 GHz 无线通信具有约 7 GHz 不用许可的丰富带宽,原始数据能提供 Gbit/s 数量级的传输速率,成为未来最具潜力的无线通信技术之一,日益受到人们的广泛关注^[1-6]。

工作于该频段的 60 GHz 无线通信系统应该具有抗干扰性好、安全性高、频率复用性好、传输速率高、国际通用性和免许可性等优势,并且严重的路径损耗使得 60 GHz 更适用于短距离通信,因此,60 GHz 频段也被列为 5G 高频新空口的候选频段之一。60 GHz 脉冲无线通信系统的带宽很宽,如果使用很宽的频带来传送一路信息数据,那么频带利用率就很低,这是通信系统所不希望的。对于 60 GHz 脉冲无线通信系统来说,要提高频谱利用率,必须在同一频带上传输多路数据信息,即提高多址能力。60 GHz 的多址接入方案研究目的就是要选择适当的信号结构、合适的多址调制方式实现多址传输,力求多用户干扰最小,系统结构简单^[7-11]。这是将 60 GHz 频段用于短距离无线通信的一个重要研究内容。

目前针对 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[12]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[13]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明显改善,并且前者优于后者。参考文献[7]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。参考文献[14]提出了 60 GHz 无线通信技术已经成为短距离无线通信技术的首选,并将建立的 60 GHz 无线通信系统模型应用于芯片间互联装置,能够有效降低多径干扰带来的影响。参考文献[15]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。但是,目前关于 60 GHz 脉冲无线通信系统多址调制方案的研究仅仅考虑了跳时码,并未分析加入跳频码后对系统性能的影响,因此研究一种更加有效的多址接入方案来提高 60 GHz 脉冲无线通信系统性能则是十分必要的。

本文首先建立了基于 FTH-PPM 多址调制的 60 GHz 脉冲无线通信系统模型;其次,对 FTH-PPM 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 FTH-PAM 的误码率性能与跳频和跳时码数量、信噪比、用户数之间的关系进行了仿真,并与 TH-PPM、TH-PAM 方案进行了比较。性能仿真与分析结果显示,通过改变跳频码数、信噪比、用户数可以改善系统的多址接入性能,并且可以根据脉冲占空比的值来选择合适的多址调制方式,在一定范围内,采用 FTH-PPM 时系统性能要优于采用 TH-PPM 和 TH-PAM 时的系统性能。因此,FTH-PPM 多址调制方式适合用于 60 GHz 脉冲无线短距离通信。

2 系统模型

基于 60 GHz 脉冲无线通信系统的跳时跳频 PPM 多址调制系统模型如图 1 所示。PN 码选择具有良好相关特性的 Gold 码,信道编码选择具

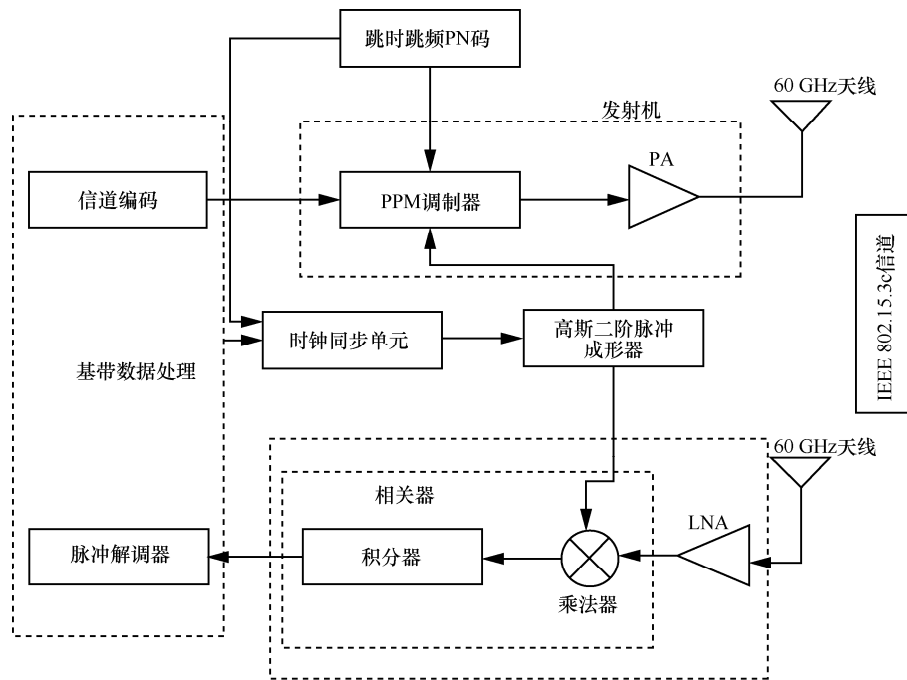


图1 60 GHz 脉冲无线通信系统的跳时跳频 PPM 多址调制系统模型

有高码率的 LDPC (low density parity check code, 低密度奇偶校验码) [16], 接收端采用结构简单的相干接收。关于信道模型的选择, 在 2009 年, IEEE 802.15.3c 工作小组推荐了几种适合 60 GHz 无线通信系统的信道模型 [17]。其中, CM4 信道为非视距情况下办公环境中的 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。

根据高斯脉冲导函数的性质, 由于高斯信号的 n 阶导数保持了原高斯信号的频谱特性, 只是中心频率向高频移动, 因此可以在时域产生 ps 量级的高斯或高斯导函数信号, 直接得到 60 GHz 脉冲, 不需要对频谱进行搬移, 收发机不再需要载波恢复和载波调制模块, 很大程度上降低了收发模块的复杂度和功耗 [18]。因此, 本文考虑采用高斯脉冲的二阶导作为 60 GHz 脉冲波形。

高斯二阶导脉冲信号的表达式为:

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

其中, $\alpha^2 = 4\pi\sigma^2$ 为脉冲因子。

3 FTH-PPM 多址性能分析

3.1 多用户干扰模型

60 GHz 脉冲无线通信系统中第 v 个用户的跳时跳频 PPM 信号可表示为:

$$s^v(t) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} A_{d[j/N_s]}^{(v)} p(t - jT_f - c_j^{(v)}T_c - \delta d_{[j/N_s]}^v) e^{-j2\pi k_{[j]}^{(v)}t} \quad (2)$$

其中, $A_{d[j/N_s]}^{(v)}$ 表示第 v 个用户在第 j 帧所传输的信息, $p(t)$ 表示高斯二阶导脉冲信号, 其脉冲宽度为 T_p , T_f 表示帧长, 一帧被分成 N_{th} 个时隙, 时隙长度为 T_c , 其关系为: $T_c = T_f/N_{th}$ 。 $c_j^{(v)}$ 表示第 v 个用户的第 j 个伪随机跳时码, $0 \leq c_j^{(v)} \leq N_{th}$, $c_j^{(v)}T_c$ 表示跳时增加的时间偏移量, $\delta d_{[j/N_s]}^v$ 表示 PPM 产生的附加时间偏移量, 其中, $\delta \geq T_p$, 序列 d 表示第 v 个用户经过信道编码后产生的数据串, N_s 表示重复码长度, 用来传输相同的信息。 $e^{-j2\pi k_{[j]}^{(v)}t}$ 表示跳频增加的频率偏移量, 其中, $k_j^{(v)}$ 表示第 v 个用户在第 j 帧的伪随机跳频码, $0 \leq k_j^{(v)} \leq$



N_{th} 。频谱总带宽 B 分成 N_{th} 份子带宽, $B_f = B/N_{\text{th}}$, $B_f \geq 500 \text{ MHz}$ 。

多用户 FTH-PPM 信号传输原理如图 2 所示。其中任意一个时隙所传输的脉冲长为 T_c 、宽为 B_f 。

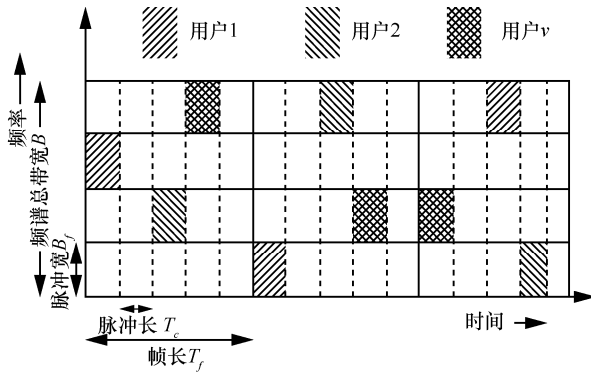


图 2 多用户 FTH-PPM 信号传输原理

为了分析多址干扰, 做出如下假设。

- 假设 N_u 表示处于工作状态的用户数, 用户所产生的数据序列中 0 与 1 是等概率出现且独立同分布。
- 假设跳时序列 $c_j^{(v)}$ 和时间时延 τ_v 在时间间隔 $[0, T_f]$ 内是相互独立且等概的。
- 假设跳频序列 $k_j^{(v)}$ 在频带 B 内是相互独立且等概的。
- 假设每个用户所采用的 PN 码是随机产生、相互独立且等概的。
- 假设每个用户采用相干接收, 并且已知特

定的 PN 码。

- 假设接收机和对应的发射机收发信息完全同步。

参考 IEEE 802.15.3c 标准给出的无线信道冲激响应^[19], 考虑在有定向天线存在的视距条件下, 视距传输存在明显的直射路径分量, 给出 CM4 信道冲激响应为:

$$h(t) = \sum_{l=1}^L \alpha_l \delta(t - \tau_l) \quad (3)$$

$$h(t) = \sum_{l=1}^L \alpha_l \delta(t - \tau_l), \quad l = 1, \dots, L \quad (4)$$

其中, α_l 为第 l 个路径的幅度衰落系数, τ_l 为路径分量。

经过 CM4 信道传输后, 接收信号为:

$$\begin{aligned} r(t) &= \sum_{v=1}^{N_u} \sum_{l=1}^L \alpha_l B_v s^v(t - \tau_l - \xi_v) + n(t) \\ &= \sum_{l=1}^L \alpha_l B_v s^l(t - \tau_l - \xi_l) + \\ &\quad \sum_{v=2}^{N_u} \sum_{l=1}^L \alpha_l B_v s^v(t - \tau_l - \xi_v) + n(t) \end{aligned} \quad (4)$$

其中, $s^v(t)$ 为用户 v 的接收信号, $n(t)$ 为加性高斯白噪声, 其功率谱密度为 $N_0/2$, B_v 表示第 v 个用户每个路径的衰落系数, ξ_v 为每个路径分量的路径时延。

在单用户情况下, FTH-PPM 系统模型如图 3

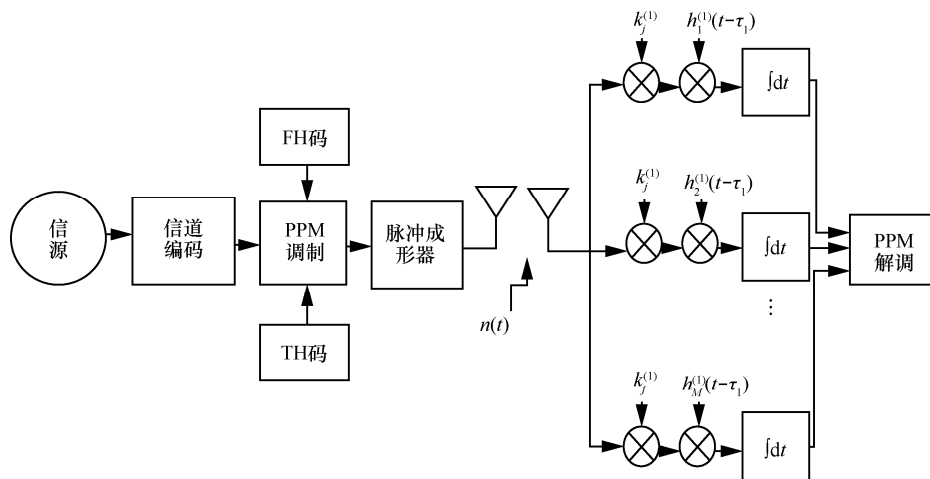


图 3 单用户 FTH-PPM 系统模型

所示, 正交 PPM 信号的最佳接收机包括 M 个并行的互相关器。当超过一个用户时, 多址干扰就成为系统性能和容量的限制因素。多用户环境下, 多址干扰可以被看作零均值高斯随机变量^[20]。

因为是采用相关检测, 所以在判决时, 将其余用户的信号都视为多用户干扰, 设用户 1 为主要接收信号, 把其他用户的信号都看作多用户干扰。则式 (4) 中, $\sum_{l=1}^L \alpha_l B_l S^1(t - \tau - \xi_1)$ 为有用信号, $\sum_{v=2}^{N_u} \sum_{l=1}^L \alpha_l B_v S^v(t - \tau_l - \xi_1)$ 为多用户干扰信号。

用户 1 发送的信号经过相关接收机检测时需要提供的互相关基函数为:

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

$$v^{(1)}(t) = p^{(1)}(t) - p^{(1)}(t - \delta) \quad (6)$$

接收机的输出信号为:

$$Z^{(1)} = \int_0^{T_f} r(t) m^{(1)}(t - \tau_1) dt \quad (7)$$

将式 (4) ~ 式 (6) 代入式 (7), 可得:

$$Z^{(1)} = Z_1 + Z_{\text{mui}} + Z_n \quad (8)$$

其中, Z_1 表示有用信号相关检测输出, Z_{mui} 表示多用户干扰, Z_n 表示高斯白噪声相关输出。

3.2 FTH-PPM 在 CM4 信道下的性能

假设每个用户所受到的干扰是相同的, 则可以根据任意一个用户接收信号的误码率 (bit error rate, BER) 性能衡量整个多用户通信系统的传输性能。BER 的值可以通过求解 SINR 的值得到, 因此, 求解 SINR 的值将变得十分关键。本节将对 60 GHz 脉冲无线通信系统中的 SINR 和 BER 进行分析。

根据第 3.1 节对多用户干扰模型的分析, 可以得到接收端输出的有用能量之和为:

$$E_b = E(Z_1^2) = \sum_{l=1}^L \alpha_l^2 B_l^2 N_s^2 \quad (9)$$

接收端输出的噪声干扰方差为:

$$\delta_n^2 = E(Z_n^2) = \sum_{l=1}^L N_s N_0 \quad (10)$$

多用户干扰方差为:

$$\delta_{\text{mui}}^2 = \frac{T_p N_s}{T_f} \sum_{v=2}^{N_u} \sum_{l=1}^L \alpha_l^2 B_v^2 \quad (11)$$

根据参考文献[21]可得到信干噪比的计算式为:

$$\text{SINR} = \frac{E_b}{\delta_{\text{mui}}^2 + \delta_n^2} \quad (12)$$

在 60 GHz 短距离脉冲无线通信系统中, 采用正交 PPM 调制, 可以有效地减少码间串扰并且保持较高的传输性能。此时有 $T_c \geq 2T_p$, 令 $\beta T_c = T_c$, β 为脉冲占空比的倒数, 且有 $\beta \geq 2$ 。假设通信系统实施较好的功率控制, 则接收端各个用户的信号能量基本相同, 传输时每条链路的路径衰减 B_v 是相等的^[22], 则可以得出信干噪比 (SINR) 与 β (通常为定值)、 N_{th} (跳时码最大值上界)、 N_{h} (跳频码最大值上界)、SNR (单位脉冲信噪比)、 N_u (用户数)、 N_s (每比特脉冲数) 的关系, 因此式 (13) 可改写成:

$$\text{SINR} = \frac{N_s}{\frac{N_u - 1}{\beta N_{\text{th}} N_{\text{h}}} + \frac{1}{10^{\frac{\text{SNR}}{10}}}} \quad (13)$$

根据参考文献[23]对 BER 与 SINR 关系的推导, 可以得到:

$$\text{BER} = 0.5 \text{erfc}\left(\sqrt{\frac{\text{SINR}}{2}}\right) \quad (14)$$

将式 (13) 代入式 (14), 可得基于 FTH-PPM 多址调制的 60 GHz 脉冲无线通信系统误码率的表达式为:

$$\text{BER}_{\text{FTH-PPM}} = 0.5 \text{erfc}\left(\sqrt{\frac{N_s}{2(N_u - 1) + \frac{2}{\beta N_{\text{th}} N_{\text{h}}} + \frac{\text{SNR}}{10^{\frac{\text{SNR}}{10}}}}}\right) \quad (15)$$

根据参考文献[24]和参考文献[15]可以分别



得到基于 TH-PAM 和 TH-PPM 多址调制的 60 GHz 脉冲无线通信系统的误码率表达式为:

$$BER_{TH-PPM} = 0.5 \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{N_s}{\frac{2(N_u-1)}{\beta N_{th}} + \frac{2}{10^{\frac{SNR}{10}}}}} \right) \quad (16)$$

$$BER_{TH-PAM} = 0.5 \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{2N_s}{\frac{N_u-1}{\beta N_{th}} + \frac{1}{10^{\frac{SNR}{10}}}}} \right) \quad (17)$$

令式(15)与式(17)相等,可以求解出式(18):

$$\beta = \frac{(N_u-1)-(N_{th}-4)}{3N_{th}N_{th}} \cdot 10^{\frac{SNR}{10}} \quad (18)$$

可见,当用户数和跳时跳频数一定时, β 是关于 SNR 的函数,当 β 值变小,即脉冲占空比增大时, SNR 的值随之增大,反之,随之减小,即 FTH-PPM 与 TH-PAM 的 BER 曲线将会有有一个交点,在一定范围内,某一种调制方式的性能将更具有优越性。因此,可以根据脉冲占空比的值来选择合适的多址调制方式,如图 4 所示。

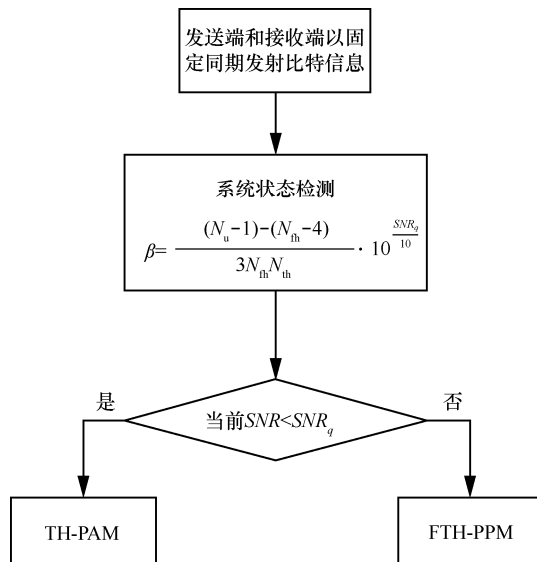


图4 调制方案选择机制

4 仿真分析

根据第 3 节对误码率表达式的推导,本节将通过 MATLAB 工具,对误码率表达式做出数值仿

真,分析 FTH-PPM 在 60 GHz 脉冲无线通信系统中的性能,并与 TH-PAM 和 TH-PPM 多址调制方案进行对比分析。

图 5 分析了 60 GHz 脉冲无线系统 FTH-PPM 的误码率性能与信噪比的关系,仿真参数设置如下:重复码长度 $N_s=5$,脉冲占空比倒数 $\beta=8$,跳时数 $N_{th}=8$,跳频数 $N_{fh}=3, 4, 5, 6$,用户数 $N_u=60$,信噪比范围为 0~10 dB。

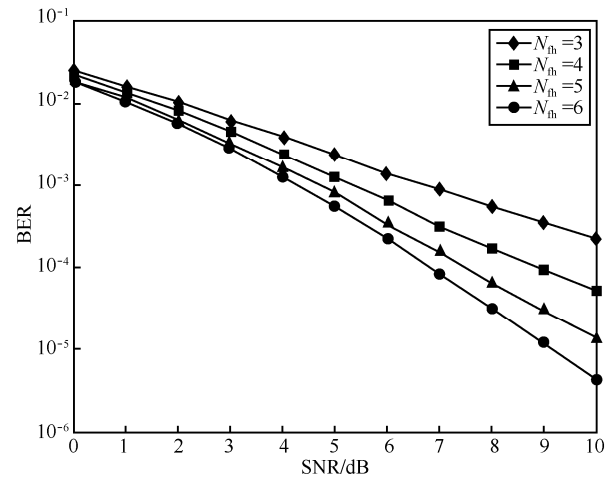


图5 60 GHz 脉冲无线系统 FTH-PPM 的误码率性能与信噪比的关系

由图 5 可以看出,在跳频码 N_{fh} 相同的情况下,60 GHz FTH-PPM 脉冲无线通信系统的多址接入性能 BER 随着 SNR 的增加而变好。当信噪比 $SNR > 9$ dB 且跳频码 $N_{fh}=6$ 时,系统误码率可以保持在 10^{-5} 以下,可以保证多用户之间的通信质量,但是,当 $SNR < 9$ dB 时,系统误码率比较差,始终大于 10^{-5} ,无法保证通信质量。在信噪比 SNR 相同的情况下,60 GHz FTH-PPM 脉冲无线通信系统的多址接入性能 BER 随着跳频码 N_{fh} 数量的增加而变好。显然,如果当前信噪比条件下不能满足系统 QoS 要求时,只需要增加跳频码的数量即可调整 QoS,从而来满足系统要求。

图 6 分析了 60 GHz 脉冲无线系统 FTH-PPM 的误码率性能与用户数的关系,仿真参数设置如下:重复码长度 $N_s=5$, $\beta=8$,跳时数 $N_{th}=8$,信噪比 $SNR=10$ dB,用户数范围为 40~80 个。

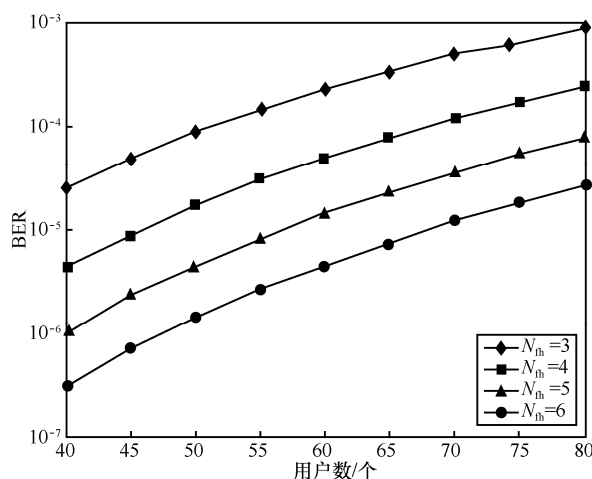


图 6 60 GHz 脉冲无线系统 FTH-PPM 的误码率性能与用户数的关系

由图 6 可以看出, 在跳频码数量、SNR、重复码长度的值都确定时, 60 GHz FTH-PPM 脉冲无线通信系统的多址接入性能 BER 随着用户数 N_u 的增加而变差。当跳时码数 $N_{th}=6$, 且用户数 $N_u < 65$ 时, 系统误码率保持在 10^{-5} 以下, 可以保证多用之间的通信质量。当跳时码数 $N_{th}=5$, 且用户数 $N_u < 58$ 时, 系统误码率保持在 10^{-5} 以下, 当跳时码数 $N_{th}=4$, 且用户数 $N_u < 45$ 时, 系统误码率保持在 10^{-5} 以下。显然, 随着用户数的增加, 如果当前不能满足系统 QoS 要求时, 只需要增加跳频码的数量即可调整 QoS, 从而满足系统要求。

图 7 分析了 60 GHz 脉冲无线系统 FTH-PPM 和 TH-PAM、TH-PPM 的误码率性能比较。仿真参数设置如下: 重复码长度 $N_s=5$, $\beta=8$, 跳时数 $N_{th}=8$, 信噪比 $SNR=10$ dB, 用户数 $N_u=50$ 。

由图 7 可以看出, FTH-PPM 误码率性能远远好于 TH-PPM, 并且 FTH-PPM 与 TH-PAM 的仿真曲线有一交点, 当 $SNR > 4$ dB 时, 可以选择采用 FTH-PPM, 当 $SNR < 4$ dB 时, 可以选择采用 TH-PAM, 此时 β 为 8, 即脉冲占空比 $1/\beta$ 为 0.125。

如图 8 所示, 调整 β 值为 6, 即脉冲占空比为 0.17 时, 交点左移, 当 $SNR > 3$ dB 时, 可以选择采用 FTH-PPM, 当 $SNR < 3$ dB 时, 可以选择采用 TH-PAM。

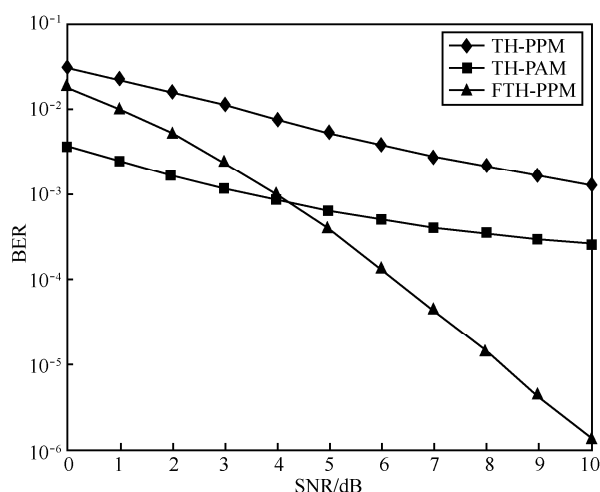


图 7 60 GHz 脉冲无线系统 FTH-PPM 和 TH-PAM、TH-PPM 的误码率性能比较 ($\beta=8$)

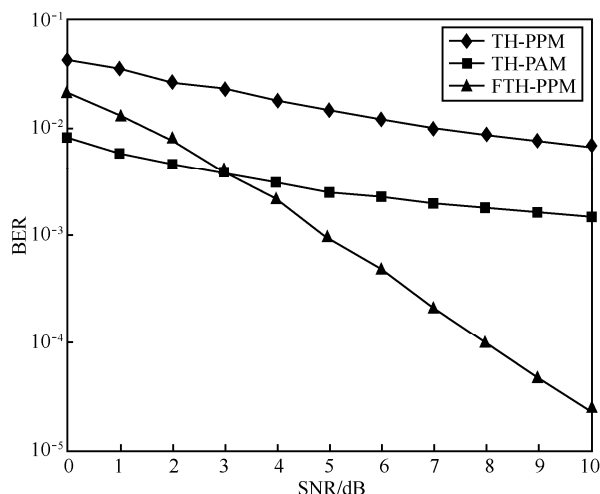


图 8 60 GHz 脉冲无线系统 FTH-PPM 和 TH-PAM、TH-PPM 的误码率性能比较 ($\beta=6$)

如图 9 所示, 调整 β 值为 5, 即脉冲占空比为 0.2 时, 交点继续左移, 当 $SNR > 2$ dB 时, 可以选择采用 FTH-PPM, 当 $SNR < 2$ dB 时, 可以选择采用 TH-PAM。

综合图 7~图 9 可以看出, 仿真分析与理论分析相一致, FTH-PPM 误码率性能远远好于 TH-PPM, 在其他条件保持不变的情况下, 脉冲占空比越大, 一定范围内 FTH-PPM 的误码率性能更优于 TH-PAM 的误码率性能, 因此系统可以根据脉冲占空比的值来选择合适的多址调制方式。

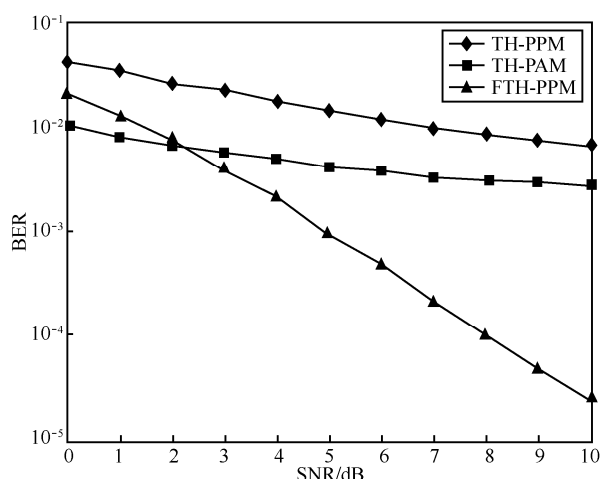


图9 60 GHz 脉冲无线系统 FTH-PPM 和 TH-PAM、TH-PPM 的误码率性能比较 ($\beta=5$)

5 结束语

针对 60 GHz 脉冲无线通信系统中存在的多址接入干扰问题,本文建立了基于 FTH-PPM 的系统模型。在 IEEE 802.15.3c 信道模型下,研究了系统误码性能与跳频码数量、信噪比、用户数之间的关系,分析了 FTH-PPM 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、TH-PAM 进行比较。性能仿真与分析结果显示,通过改变跳频码数、信噪比、用户数可以改善系统的多址接入性能,并且可以根据脉冲占空比的值来选择合适的多址调制方式,在一定范围内,采用 FTH-PPM 时系统性能要优于采用 TH-PAM、TH-PPM 时的系统性能。因此, FTH-PPM 多址调制方式适合用于 60 GHz 脉冲无线短距离通信。本文的研究将为 5G 超密集场景的应用提供技术参考。

参考文献:

- [1] 李纪舟, 钟建强, 王瑜. 60 GHz 无线通信技术发展现状及趋势研究[J]. 通信技术, 2015, 48(6): 231-236.
LI J Z, ZHONG J Q, WANG Y. Development status and trend of 60GHz wireless communication technology[J]. Communications Technology, 2015, 48(6): 231-236.
- [2] 陈晓贝, 魏克军. 全球 5G 研究动态和标准进展[J]. 电信科学, 2015, 31(5): 16-19.

- CHEN X B, WEI K J. Global research and standardization progress of 5G[J]. Telecommunications Science, 2015, 31(5): 16-19.
- [3] 周一青, 潘振岗, 翟国伟, 等. 第五代移动通信系统 5G 标准化展望与关键技术研究[J]. 数据采集与处理, 2015, 30(4): 714-724.
ZHOU Y Q, PAN Z G, ZHAI G W, et al. Standardization and key technologies for future fifth generation of mobile communication systems[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2015, 30(4): 714-724.
- [4] 王胡成, 徐晖, 程志密, 等. 5G 网络技术研究现状和发展趋势[J]. 电信科学, 2015, 31(9): 156-162.
WANG H C, XU H, CHENG Z M, et al. Current research and development trend of 5G network technologies [J]. Telecommunications Science, 2015, 31(9): 156-162.
- [5] 周游, 胡宗福, 曾鸣. 60 GHz 室内天线位置优化与天线选择策略[J]. 通信技术, 2012, 45(10): 1-5.
ZHOU Y, HU Z F, ZENG M. On separation optimization and antenna selection of 60 GHz in building antenna system[J]. Communications Technology, 2012, 45(10): 1-5.
- [6] TALWAR S, CHOUDHURY D, DIMOU K, et al. Enabling technologies and architectures for 5G wireless[C]//2014 IEEE MTT-S International on Microwave Symposium, June 1-6, 2014, Tampa, USA. New Jersey: IEEE Press, 2014: 1-4.
- [7] 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.
- [8] BARRATT T H, MELLIOS E, CAIN P, et al. Measured and modelled corner diffraction at millimetre wave frequencies[C]//IEEE International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications, September 4-8, 2016, Valencia, Spain. New Jersey: IEEE Press, 2016: 1-5.
- [9] ROH W, SEOL J Y, PARK J, et al. Millimeter-wave beamforming as an enabling technology for 5G cellular communications: theoretical feasibility and prototype results[J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(2): 106-113.
- [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, 54(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, 54(10): 1424-1429.
- [11] YU Y, PENG M, LI J, et al. Resource allocation optimization for hybrid access mode in heterogeneous networks[C]//IEEE Wireless Communications and Networking Conference, March 9-12, 2015, New Orleans, USA. New Jersey: IEEE Press, 2015: 1243-1248.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] ZHANG X, SHI W, ZHU W. The design and performance analysis of inter-chip wireless communication system in instrument based on 60 GHz[C]//IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments, July 16-18, 2015, Qingdao, China. New Jersey: IEEE Press, 2015: 813-818.
- [15] 张永斌, 李学华, 姚勃旭. 60 GHz 脉冲无线通信系统的TH-PAM多址接入方案[J]. 电信科学, 2016, 32(4): 17-23.
- ZHANG Y B, LI X H, YAO B X. 60 GHz pulse wireless communication system with TH-PAM multiple access scheme[J]. Telecommunications Science, 2016, 32(4): 17-23.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 何晓哲. 60 GHz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.
- [19] HANSEN C J. WiGiG: multi-gigabit wireless communications in the 60 GHz band[J]. IEEE Wireless Communications, 2011, 18(6): 6-7.
- [20] 吴建军, 陈江, 蒋伟, 等. TH-PPM UWB系统的多址干扰模型改进及误码性能分析[J]. 北京大学学报自然科学版, 2007, 43(1): 113-118.
- WU J J, CHEN J, JIANG W. Enhanced modeling of multi-access interference and BER derivation for TH-PPM UWB system[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2007, 43(1): 113-118.
- [21] QIU H B, ZHENG L. New method of BER calculate for impulse-UWB TH-PPM multiple-access communications[J]. Journal of China Institute of Communications, 2005, 26(10): 133-137.
- [22] 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.
- QIU 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.
- [23] BOTTOMLEY G E, WILHELMSSON L R. Recovering signal energy from the cyclic prefix in OFDM[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2008, 57(5): 3205-3211.
- [24] 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. Research on wireless chip domain network and multiple access communication mechanism[D]. Beijing: Beijing Information Science and Technology University, 2014.

[作者简介]



沈琛(1992-), 女, 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60 GHz无线通信关键技术。



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院长、副教授, 主要研究方向为无线通信物理层关键技术。