doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2015.09.019

引用格式:孙振亚,唐向宏,蔡倩,等. MQAM-WPM-FH 多载波跳频通信系统误码率性能分析[J]. 电讯技术,2015,55(9):1051-1057. [SUN Zhenya, TANG Xianghong, CAI Qian, et al. BER Performance Analysis of MQAM-WPM-FH Multicarrier Communication System[J]. Telecommunication Engineering,2015,55(9):1051-1057.]

MQAM-WPM-FH 多载波跳频通信系统误码率性能分析*

孙振亚1,***,唐向宏1,2,蔡 倩1,任玉升3

(1.杭州电子科技大学 通信工程学院,杭州 310018;2.杭州电子科技大学 电子信息工程学院,杭州 310018;3.浙江水利水电学院 电气工程学院,杭州 310018)

摘 要:为了分析多进制正交幅度调制(MQAM)映射方式、小波滤波器长度和小波包树结构对小波 包跳频通信系统(WPM-FH)的影响,首先利用多进制幅移键控(MASK)和 MQAM 之间的关系,推导 了 MQAM-WPM-FH 系统在加性高斯白噪声(AWGN)信道中的误码率理论公式,分析了不同小波滤 波器长度和小波包树结构对 WPM-FH 系统的影响。理论分析和仿真结果表明,与正交频分复用跳 频(OFDM-FH)系统相比,MQAM-WPM-FH 系统具有较高频带利用率和较好的性能;在给定带宽 下,通过增大 MQAM 数据映射中的星座点数 M 和小波滤波器长度 L,可以有效降低多址干扰(MAI) 对系统的干扰;AWGN 信道下,不同的小波包树结构对跳频系统的性能影响较小,但小波包调制结构 的多样性可以提高系统的安全性。

关键词:跳频通信系统;小波包调制;多载波调制;数据映射;误码率性能分析 中图分类号:TN914.4 文献标志码:A 文章编号:1001-893X(2015)09-1051-07

BER Performance Analysis of MQAM–WPM–FH Multicarrier Communication System

SUN Zhenya¹, TANG Xianghong^{1,2}, CAI Qian¹, REN Yusheng³

(1. School of Communication Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China;

School of Electronic and Information Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China;
 School of Electrical Engineering, Zhejiang University of Water Resources and Electric Power, Hangzhou 310018, China)

Abstract: In order to analyze the effect of M-ary quadrature amplitude modulation(MQAM), length of the wavelet filters and wavelet packet tree on the wavelet packet modulation frequency hopping communication system(WPM-FH), this paper derives the bit error rate(BER) equation of MQAM-WPM-FH system in additive white Gaussian noise(AWGN) channel by using the relationship between M-ary amplitude shift keying(MASK) and MQAM. And then it investigates the effect of the length of the wavelet filters and wavelet packet tree on the system. Theoretical analysis and simulation results show that the MQAM-WPM -FH system has better spectrum utilization and BER performance in comparison with MQAM-OFDM-FH system, and by increasing the number of modulation QAM constellation points M and the length L of the filters used in WPM, significant multiple access interference(MAI) reduction can be achieved for a fixed system bandwidth; though different wavelet packet trees have only a small effect on the BER performance of the system, WPM-FH system has better security because of the diversity of WPM.

Key words: frequency hopping communication system; wavelet packet modulation; multi-carrier modulation; data mapping; BER performance analysis

^{*} 收稿日期:2015-01-27;修回日期:2015-04-07 Received date:2015-01-27; Revised date:2015-04-07

^{**} 通讯作者:1173216325@ qq. com Corresponding author:1173216325@ qq. com

1 引 言

在现代通信系统中,多载波调制(MCM)是一种 高效的调制技术^[1]。正交频分复用(OFDM)是一种 较为常用的多载波调制技术,但是 OFDM 信号频谱 具有较大的旁瓣,当信号通过带限信道时,致使其在 时间上延拓,从而造成码间干扰(ISI)。为了抑制码 间干扰,OFDM 符号间要加入适当的保护间隔,降低 了系统的频带利用率。小波包基函数具有较长的持 续时间,所以小波包信号具有较好的频域集中性,调 制信号通过带限信道时,不易造成码间干扰,因而小 波包调制信号不需要加入保护间隔,这使得小波包 调制(WPM)信号比 OFDM 信号具有更好的抗干扰 能力和较高的频谱利用率^[2-4]。

跳频多址接入(FHMA)系统具有抗干扰能力 强、安全可靠及组网容易等特点,已经广泛应用于军 用和民用通信领域^[5]。文献[6]研究了基于多进制 幅移键控(MASK)映射的 OFDM-FH 系统的性能, 由于采用正交解调方式,接收机的实现较为复杂。 文献[7]研究了基于相位调制的 OFDM-FH 系统, 给出了不同信道下的理论误码率,但基于快速傅里 叶变换(FFT)的跳频系统由于循环前缀的加入导致 了频带利用率降低,且文中使用的数据映射方式为 二进制相移键控(BPSK),它无法在需要高频谱利用 率的场合应用。多进制正交调幅(MQAM)是一种频 谱利用率较高的调制方式,适合于在需要高频谱利 用率的场合应用^[8]。文献[9]和文献[10]表明小波 包具有丰富的调制结构,可以进一步提高跳频系统 的安全可靠性。为此,本文将跳频和小波包调制技 术相结合,分析了 MQAM 映射方式以及不同小波包 滤波器长度和小波包调制树结构对 WPM-FH 通信 系统的影响。

2 MQAM-WPM-FH 系统模型及性能分析

基于 MQAM 映射的 WPM-FH 系统的发送端模型如图 1 所示,输入的是速率为 R_b 的二进制数据流 x(n),然后进行串并变换,将数据转换到 N 个并行子信道上,每个子信道上分别进行 MQAM 映射得到 $x_{lm}[n]$,其速率为 $R_l = R_b/(N \cdot lb(M))$ 。然后再将 $x_{lm}[n]$ 调制到各个子载波 $\phi_{lm}(t-nT_l)$ 上,各子信道信号相加得到待发射信号 s(t)(即为小波包调制的基带信号)为

$$s(t) = \sum_{(l,m) \in \Gamma} \sum_{n} x_{lm}(n) \phi_{lm}(t - nT_l) \,. \tag{1}$$

式中, { $\phi_{lm}(t - nT_l)$ } _{n \in Z}是第 *l* 级小波包的正交基函
• 1052 •

数, $T_l = 1/R_l$ 是第l级小波包最小正交时移周期, Γ 为小波包树结构节点标号(l,m)的集合。在进入信 道前s(t)经过跳频调制,每个用户按照各自的跳频 序列工作在对应的频隙上。WPM-FH系统的子频 带和跳频时隙之间的关系如图 2 所示。







图 2 WPM-FH 系统频谱 Fig. 2 Spectrum of WPM-FH

BW_{ss}表示跳频多址(FH-MA)系统带宽,由图 2 可知,系统带宽 BW_{ss}被划分成 q 个频隙,每个频隙 传送一个用户信号。用 BW_{slot}表示每个频隙的宽 度,若频隙宽度等于 WPM 信号的带宽,且 WPM 带 宽取 99% 能量带宽^[11],则

$$BW_{slot} = \frac{(2^l + 1)\beta_c}{T_l}$$
(2)

式中, β_e 满足

接收机主要由跳频解跳、小波包解调、数据解映 射、并串变换等部分构成,其结构框图如图 3 所示。 小波包调制和解调可以采用 Mallat 算法实现^[12],系 统发射机和接收机实现方式简单快速。



图 3 系统接收机框图 Fig. 3 Block diagram of receiver

若设传输信道为高斯白噪声信道(AWGN),噪声 n(t)的双边带功率谱密度为 N₀/2,并假设系统同步,且跳频和解跳过程不对系统造成损失,所以系统中仅存在高斯噪声干扰和由多用户频率碰撞造成的多址干扰(MAI)。假设在任意时刻,系统中同时有 N_u 个用户发射信号,我们可以选择其中任一用户作为参考用户。若其他用户使用与参考用户相同的跳频频率,则会对参考用户造成干扰,我们称其为干扰 用户。系统中存在的干扰用户个数 n 是随机变量, 它服从二项式分布,概率可以表示成^[6]

$$P(n) = \binom{N_u - 1}{n} \left[\frac{1}{q}\right]^n \left[1 - \frac{1}{q}\right]^{N_u - 1 - n}$$
(3)

2.1 MASK-WPM 系统在 AWGN 下的性能分析

设 MASK 调制信号的 M 个电平可以取值为 { $\pm d, \pm 3d, \dots, \pm (M-1)d$ },相邻电平的振幅相距 2d, 其信号空间图可参见文献[13]。若 M 个电平是等 概发送的,则对于抑制载波的 MASK 信号,其平均 功率可以表示为

$$P_{s} = \frac{2}{M} \sum_{i=1}^{M/2} \frac{\left[d(2i-1)\right]^{2}}{2} = d^{2} \frac{M^{2}-1}{6} \quad (4)$$

由小波包理论可知,小波包各终端函数 $\varphi_{lm}(t-nT_l)$ 相互正交,所以在 AWGN 信道下,WPM 调制系 统各子信道间是相互独立的。若只考虑第(l,m)个 终端,则接收到的信号经过处理后可以表示为^[9]

$$\hat{x}_{lm}[n] = x_{lm}[n] + v_{n\circ}$$
(5)

式中, v_n 是噪声抽样值,服从均值为0、方差为 $\frac{N_0}{2}$ 的高斯分布。

由于 $x_{lm}[n] \subset \{\pm d, \pm 3d, \dots, \pm (M-1)d\}$,所以 接收到的信号 $\hat{x}_{lm}[n]$ 必须与 M-1 个门限电平进行 比较才能确定发送的信号。系统的误码率可以通过 计算 M 个电平的平均错误概率得到。当 M 个电平 等概发送时,系统的误比特率(BER)可以表示为

$$P_{e} = \frac{1}{M} \sum_{i=0}^{M-1} P(e | A_{i})_{\circ}$$
 (6)

式中, $P(e|A_i)$ 表示发送 A_i 时的错误概率。利用误差互补函数,式(6)可以进一步表示成^[13]

$$P_{e} = \frac{(M-1)}{M \cdot \operatorname{lb}(M)} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{3 \times \operatorname{lb}(M)}{M^{2}-1}}r\right)_{\circ} \qquad (7)$$

式中, efrc(x) = $\frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_{x}^{\infty} e^{-t^2} dt$ 表示误差互补函数, r = $\frac{P_s}{N_o \cdot \ln(M)}$ 表示比特信噪比。图4 给出了 MASK-

WPM 系统在不同 M 情况下的误比特率理论曲线和 仿真结果,从图中可以看出,仿真与理论推导的结果 吻合较好。



图 4 MASK-WPM 系统误比特率 Fig. 4 BER performance of MASK-WPM system

2.2 MASK-WPM-FH 系统性能分析

在 MASK-WPM-FH 系统的接收端,接收到的 解跳信号可以表示为

 $r(t) = \sum_{(l,m) \in \Gamma} \sum_{n} x_{lm}(n) \phi_{lm}(t-nT_l) + D(t) + n(t) \circ$ 式中, D(t)表示多用户频率碰撞造成的干扰, 其大 小可以为

$$D(t) = \sum_{i=1}^{n} s_i(t) \quad (8)$$

式中,n 表示干扰用户的个数,s_i(t)为第 i 个用户造成的干扰信号,其大小与式(1)类似,即

$$s_i(t) = \sum_{(l,m) \in \Gamma} \sum_n x_{lm}^i(n) \phi_{lm}^i(t - nT_l) \circ$$
(9)

可以通过计算不同干扰用户数下的平均错误概率,得到 MASK-WPM-FH 系统的误码率为

$$P_{b} = \sum_{n=0}^{N_{u}-1} P(e|n) P(n) \quad (10)$$

式中,P(e|n)代表当n个用户发生碰撞时的错误概 率,P(n)代表有n个用户发生碰撞的概率。当n=0 时,无频率碰撞发生,系统性能如式(7)所示;当n≠ 0时,参考用户会和n个干扰用户发生频率碰撞。 信号碰撞而产生的错误比特数是随机的,通过仿真 发现这种错误比特数是一个发送符号内总比特数的 1/4。通过这种近似,跳频系统的平均 BER 可以表 示为

$$P_{b} \approx P_{e} \cdot \left(1 - \frac{1}{q}\right)^{N_{u} - 1} + \frac{1}{4} \sum_{n=1}^{N_{u} - 1} \left[\frac{N_{u} - 1}{n}\right] \left[\frac{1}{q}\right]^{n} \left[1 - \frac{1}{q}\right]^{N_{u} - 1 - n}$$

$$(11)$$

式中, P_e 大小为式(7)所示。

· 1053 ·

2.3 MOAM-WPM-FH 系统性能分析

由于采用矩形 MQAM 映射的信号可以视为两 $\wedge \sqrt{M}$ ASK 信号之和,所以基于矩形 MQAM 映射的 系统接收机可以等效成两个并行的 \sqrt{M} ASK 接收 机^[13],每一路分别对应一个正交载波,其中一个并 行的 \sqrt{M} ASK 接收机框图如图 3 所示,每条支路的 误码率性能与式(11)相同。因此,在AWGN 信道 下,MOAM-WPM-FH 系统的误码率可以表示为

 $P = 1 - (1 - P_b)^2$ (12)式中,P,为式(11)所示的每条正交支路的误码率。

仿真结果分析 3

由于 Daubechies 小波具有较好时频正交性且是 最为常用的小波类型^[11],仿真实验中使用了 Daubechies 小波包。为了更好地与文献[6]中 OFDM-FH系统进行对比,仿真中设定用户数 N₂=31,带宽 $BW_{ss} = 1024R_{bo}$ 跳频频点将从 q 个频点集合中随机 选择,即跳频频点的产生服从[0,q-1]的均匀分 布^[7]。每个信噪比(SNR)下仿真10 000次,所以误 比特率(BER)在10-3附近时会有小的波动,但并不 影响对系统性能的分析。

由式(2)得 MASK-WPM-FH 系统的跳频点数 q可以表示为

$$q = \frac{BW_{SS}}{BW_{slot}} = 1024 \times \frac{N \cdot lb(M)}{(N+1)\beta_c}$$
(13)

由文献[6]可知, MASK-OFDM-FH 系统的跳 频点数 q1 可以表示为

$$q_1 = 1024 \times \frac{N \cdot \operatorname{lb}(M)}{N+1} \circ \tag{14}$$

因此,比较式(13)与式(14)以及文献[11]表1 中 Daubechies 小波滤波器长度 L 和 β_c 之间的关系 可以发现,当 Daubechies 滤波器长度 L>4 时, $\beta_{c}<1_{\circ}$ 一个 MASK-OFDM-FH 调制符号占用的带宽比一 个 MASK-WPM-FH 调制符号占用的带宽宽 1/β. 倍。以多载波跳频系统的子载波数 N=8 为例,当 MASK 映射中 M 取不同值时,系统跳频点数 $q_{3}q_{1}$ 和 M之间的关系可用表1所示。

12		入示		
Table 1 Relationship between $q \cdot q_1$ and M				
М	q	q_1		
2	1379	910		
4	2758	1820		
8	4138	2731		
16	5517	3641		

表 1	q 、 q_1 与	М	之间的关系

由表1可知,在多载波跳频系统的总带宽 BWss 一定的情况下, MASK - WPM - FH 系统比 MASK -OFDM-FH 系统拥有更多的跳频点数,这说明 MASK -WPM-FH 系统比 MASK-OFDM-FH 系统具有更高 的频带利用率。

由于采用矩形 MQAM 映射的信号可以视为两 个 \sqrt{M} ASK 信号之和^[13],所以采用矩形 MQAM 映射 的系统带宽等于采用 \sqrt{M} ASK 映射的系统带宽,这 也说明相比于 MQAM - OFDM - FH 系统, MQAM -WPM-FH系统同样具有更高的频带利用率。下面 给出 Daubechies 小波滤波器长度 L=8 时的部分仿 直结果。

为了更好地比较 WPM 技术与 OFDM 技术对跳 频系统的影响,仿真中 MASK-WPM-FH 系统与 MASK-OFDM-FH 系统使用了相同的跳频点数(q= q_1),这时 WPM 的跳频总带宽小于 OFDM 的跳频总 带宽。

若同时发送数据的用户个数 N_u=31,则在高斯 信道(AWGN)下,MASK-WPM-FH系统的误码率曲 线如图5所示。由图5可知,仿真值与理论计算相 吻合,可以看出本文的理论误码率推导结果是可靠 的。仿真结果表明,随着 SNR 的增加,不同点数 MASK 调制的误码率性能都逐渐得到改善,但当 SNR 增大至某个值时,误码率趋于稳定,不再随着 SNR 的增加而增加。这说明在大 SNR 时,高斯噪声 不再是决定系统误码率的主要因素,不同用户间的 频率碰撞是影响系统性能的主要原因。另外,从图 5 中可以看出,当 SNR 较大时,随着 M 的增加,系统 误码率越小。这也说明,通过增大M,可以有效降低 多址干扰(MAI)对系统性能的影响。



图 5 MASK-WPM-FH 系统误码率 Fig. 5 BER performance of MASK-WPM-FH system

图 6 分别给了数据映射采用 MASK 时, WPM-

FH 系统与 OFDM-FH 系统(采用相关解调)以及文 献[6]所述 OFDM-FH 系统的性能比较。由图 6 可 知,WPM-FH 系统性能优于 OFDM-FH 系统。图 6 还表明,不同的解调方式对跳频系统的 MAI 也有影 响,采用相干解调的跳频系统的 MAI 略小于采用正 交解调的跳频系统 MAI。





图 7 给出了 AWGN 信道下 MQAM-WPM-FH 系统与 MQAM-OFDM-FH 系统的误码率曲线。由 图 7 可知, MQAM-WPM-FH 系统仿真值和理论计 算值基本吻合,这验证了系统理论误码率推导的正 确性,且 MQAM-WPM-FH 系统的性能略优于 MQAM-OFDM-FH 系统的误码率。



图 7 MQAM-WPM-FH 系统与 MQAM-OFDM-FH 系统比较 Fig. 7 Performance comparison between MQAM-WPM-FH

system and MQAM-OFDM-FH system

另外,所选小波类型及其滤波器长度同样对 WPM-FH系统的误码率性能造成影响。为此,本文 研究了 Daubechies 小波滤波器长度 L 取不同长度时 对 MASK-WPM-FH系统性能的影响。当系统总带 宽 BW_{ss}=1024 R_b 、M=8 时,由文献[11]中表1和式 (13)可计算出 MASK-WPM-FH系统的跳频点数 q 与L之间的关系,如表2所示。

表2 q 与	L 之间的关系			
Table 2 Relationship between q and L				
L	q			
4	1685			
6	3546			
8	4137			
10	4334			
12	4404			
14	4551			

由表2可知,系统可用跳频点数 q 随着 L 的增 大而增大,这说明增大滤波器长度 L 可以进一步提 高 WPM-FH 系统的频带利用率。但当 L>8 时,频 带利用率改善的幅度逐渐减小,这说明增大滤波器 长度 L 并不能无限度地提高系统的频带利用率。图 8 给出了 L 取不同值时 MASK-WPM-FH 系统的误 码率曲线。



图 8 不同长度 L 下的 MASK-WPM-FH 系统性能 Fig. 8 Performance of MASK-WPM-FH system with different values of L

从图 8 可以看出,随着滤波器长度 L 的增加, MASK-WPM-FH 系统的 MAI 逐渐减小。这是因为,随着 L 的增加小波包调制信号的频带宽度逐渐 变窄,系统可用的跳频点数增加,使得用户碰撞概率 减小从而降低了 MAI。

考虑到小波包调制结构的多样性,本文以 3-级 Daubechies 小波包树结构为例,给出了当 BW_{ss} = 1024*R_b*、*M*=8、*L*=8 时,4 种调制结构(如图 9 所示) 的 WPM-FH 系统性能。图 9 中树 2 结构是文献 [14]基于小波包调制树优选简易算法得到的小波 包树结构,树 3 结构是文献[15]基于子信道误码率 大小优化得到的小波包调制结构。从图 10 中可以 看出,调制级数相同的不同小波包树结构对 WPM-.1055. FH系统性能影响不大。由于小波包调制具有丰富的树结构,如3-级小波包就有21种小波包树结构^[15],所以选用筛选剪枝后的小波包树结构既可保证系统的可靠性(如图10所示),同时也可减小系统的复杂度。小波包调制技术在FH通信系统中的应用也可提高系统的安全性,这是因为接收方不仅要知道发射方的频率跳变规律,还要知道发送方采用了何种类型的基小波函数和小波包树结构才能正确解调,这也正好体现了小波包调制结构多样性的特点和优势。







图 10 不同树结构在 WPM-FH 系统中性能的比较 Fig. 10 Performance comparison of WPM-FH system with different tree structures

4 结束语

· 1056 ·

本文在高斯信道(AWGN)下讨论了一种基于小 波包调制的多载波跳频系统(WPM-FH),分别给出 了数据映射采用 MASK 和 MQAM 时 MASK-WPM-FH 系统与 MQAM-WPM-FH 系统的误码率性能分 析,并与 OFDM-FH 系统进行了比较,同时还讨论了 小波包滤波器长度 L 对 WPM-FH 系统性能的影响, 为小波包调制(WPM)和 MQAM 映射在跳频通信系 统中的应用提供了一定的参考价值。但本文仅分析 了高斯信道(AWGN)下 MQAM 映射方式、小波的滤 波器长度以及小波包树结构对 MQAM-WPM-FH 系 统性能的影响,没有对贴近实际信道(如衰落信道) 下的性能进行分析,这将是下一步需要研究的内容。

参考文献:

- Mohanty M N, Mishra S. Design of MCM based wireless system using wavelet packet network & its PAPR analysis
 C]//Proceedings of 2013 International Conference on Circuits, Power and Computing Technologies (ICCPCT). Nagercoil; IEEE, 2013;821–824.
- Daoud O. Performance improvement of wavelet packet transform over fast Fourier transform in multiple-input multiple-output orthogonal frequency division multiplexing systems
 [J]. IET Communications, 2012,6(7):765-773.
- [3] Anoh O O, Ali N T, Abd-Alhameed R, et al. On the performance of DWT and WPT modulation for multicarrier systems [C]// Proceedings of 2012 International Conference on Computer Aided Modeling and Design of Communication Links and Networks (CAMAD). Barcelona: IEEE, 2012:348-352.
- [4] 徐宁,谭鸽伟.小波包多载波系统中的 LMS 信道估计
 [J].通信技术,2013,46(1):26-28.
 XU Ning,TAN Gewei. Improved LMS Channel Estimation
 Algorithm for Orthogonal Wavelet Packet Division Multiplexing System [J]. Communications Technology, 2013, 46(1):26-28. (in Chinese)
- [5] 李明阳,柏鹏,林晋福. 一种最优零碰撞区跳频序列集的构造方法[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2013,33(6):59-64.
 LI Mingyang, BAI Peng, LIN Jinfu. A construction method of

optimal no – hit zone frequency hopping sequence set [J]. Journal of Nanjing University of Postsand Telecommunications(Natural Science), 2013, 33(6):59–64. (in Chinese)

- [6] Al-Dweik A, Xiong F. Frequency-hopped multiple-access communications with noncoherentM-ary OFDM-ASK
 [J]. IEEE Transactions on Communications, 2003, 51 (1):33-36.
- [7] 曾琦,彭代渊.相位调制的多用户 OFDM-FH 通信系统性能分析[J].电子学报,2010(4):943-948.
 ZENG Qi,PENG Daiyuan. Performance analysis of Multi -user OFDM-FH communications system with PSK modulation scheme [J]. Acta Electronica Sinica,2010(4): 943-948.(in Chinese)
- [8] 李光球,江虹. OFDM-MQAM 在相关 Nakagami-m 衰 落信道上的性能分析[J]. 电路与系统学报,2009 (1):119-122.
 LI Guangqiu, JIANG Hong. Performance analysis of OFDM-MQAM over correlatedNakagami-m fading channels [J]. Journal of Circuits and Systems,2009(1):119 -122. (in Chinese)
- [9] Akho-Zahieh M, Saleh K, Abdellatif N. Performance of wavelet packets based multicarrier multicode CDMA communication system in the presence of narrowband jamming

[C]//Proceedings of 2013 International Conference on Circuits, Power and Computing Technologies (ICCPCT). Sharjah: IEEE, 2013:1-6.

- 李伟华,赵亚红,吴伟陵. 基于小波包的多载波技术 [10] [J]. 电讯技术,2002,42(2):14-17. LI Weihua, ZHAO Yahong, WU Weiling. Wavelet Packet Based Multicarrier Technique [J]. Telecommunication Engineering, 2002, 42(2): 14-17. (in Chinese)
- [11] Wong K, Wu J F, Davidson T N, et al. Wavelet packet division multiplexing and wavelet packet design under timing error effects [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1997, 45(12): 2877-2890.
- [12] 唐向宏,李齐良. 时频分析与小波变换 [M]. 北京: 科学出版社.2008.

TANG Xianghong, LI Qiliang. Time-frequency Analysis and Wavelet Transform [M]. Beijing: Science Press, 2008. (in Chinese)

- Proakis J G. 数字通信 [M]. 4 版. 张力军,张宗橙,郑 [13] 宝玉,等,译.北京:电子工业出版社,2003. Proakis J G. Digital Communications [M]. 4th ed. Translated by ZHANG Lijun, ZHANG Zongcheng, ZHENG Baoyu, et al. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008. (in Chinese)
- 邓善征, 茹乐, 杜兴民, 等. 小波包调制树优选简易算 [14] 法[J]. 系统仿真学报,2007(20):4759-4761. DENG Shanzheng, RU Le, DU Xingmin, et al. Optimal wavelet packet best-tree searching acquisition easy algorithm [J]. Journal of System Simulation, 2007 (20): 4759-4761. (in Chinese)
- [15] 栗昆昆,唐向宏,马丹丹. 基于子信道误码率的小波 包调制结构优化算法[J]. 系统仿真学报,2014(2): 300-305.

LI Kunkun, TANG Xianghong, MA Dandan. Algorithm on optimization for wavelet packet modulation structures based on BER of sub-channel [J]. Journal of System Simulation, 2014(2): 300-305. (in Chinese)

作者简介:



孙振亚(1989—),男,山东菏泽人,硕士 研究生,主要研究方向为多载波通信、跳频 通信;

SUN Zhenya was born in Heze, Shandong Province, in 1989. He is now a graduate student. His reseach concerns multi-carrier communication and frequency hopping communication.

Email:1173216325@ qq. com

唐向宏(1962—),男,四川蓬溪人,1997 获博士学位,现 为教授、博士生导师,主要研方向为扩频通信、图像压缩与传 输和数字水印技术:

TANG Xianghong was born in Pengxi, Sichuan Province, in 1962. He reecved the Ph. D. degree in 1997. He is now a professor and also the Ph. D. supervisor. His research concerns spread spectrum communications, image compression and transmission and digital watermarking technology.

茲 倩(1992—),女,浙江宁波人,硕士研究生,主要研 究方向为多载波通信、跳频通信;

CAI Qian was born in Ningbo, Zhejiang Province, in 1992. She is now a graduate student. Her reseach concerns multi-carrier communication and frequency hopping communication.

任玉升(1979—),男,山东日照人,讲师,主要研究方向 为多载波通信、跳频通信。

REN Yusheng was born in Rizhao, Shandong Province, in 1979. He is now a lecturer. His reseach concerns multi-carrier communication and frequency hopping communication.