

基于余数系统的OFDM无损峰均比抑制方法

姚毅, 胡剑浩, 马 上

(电子科技大学通信抗干扰技术国家级重点实验室 成都 611731)

【摘要】正交频分复用(OFDM)传输方法输出信号由多个子信道叠加而成,会产生较高的峰均比。提出一种基于余数系统的峰均比抑制方法,利用余数系统并行、余数小于对应余数基的特性,从信号前端入手控制OFDM传输信号的动态范围,有效利用放大器的线性动态范围,防止非线性失真的产生,达到无损抑制峰均比的目的。与传统的OFDM相比,峰均比抑制性能提高5 dB以上,并推导出该方法与OFDM传输带宽关系的表达式,分析得出在OFDM的信噪比大于0的前提下,该方法占用的传输带宽更小。

关键词 正交频分复用; 并行传输; 峰值平均功率比; 余数系统

中图分类号 TN914

文献标志码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2013.05.005

Residue Number System Based OFDM Method for Lossless PAPR Reduction

YAO Yi, HU Jian-hao, and MA Shang

(The National Key Lab of Science and Technology on Communication, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 611731)

Abstract The main limitation of Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)-based transmission systems is the high Peak-to-Average Power Ratio (PAPR) of the transmitted signals. This paper proposes a residue number system (RNS) based OFDM transmission method. This method can achieve lossless PAPR reduction by using the features of RNS to control dynamic range of the transmitted signals and to avoid nonlinear distortion. Numerical results show that the proposed method offers PAPR performance improvement at least 5 dB and takes less transmission bandwidth when the SNR of OFDM is above 0 dB, compared with the original OFDM.

Key words orthogonal frequency division multiplexing; parallel transmission; peak-to-average power ratio; residue number system

正交频分复用(OFDM)将高速串行数据流分成多个并行的低速数据流映射到正交子载波上进行传输,具有频谱利用率高和抗频率选择性衰落等优点,已作为未来移动通信的主流技术之一。然而,由于其输出信号是多个子信道的叠加,存在较高的峰值平均功率比(PAPR),简称峰均比。当多个子载波信号相位一致时,叠加会造成较高的PAPR,若发射机内放大器不能满足信号大的动态范围变化,将会带来信号畸变,使子信道间正交性遭到破坏,系统性能恶化,这已成为OFDM主要技术瓶颈之一,因此降低OFDM系统过高的PAPR得到了广泛研究^[1-2]。

目前已提出了许多抑制PAPR的方法,根据原始信号是否由于失真产生损失,可分为有损抑制和无损抑制两类方法。有损抑制的方法有限幅算法、峰值加窗、压扩变换,其中较为流行的限幅算法

(Clipping)^[3-4]对PAPR抑制效果明显,且算法简单,但会使信号波形畸变失真,当限幅噪声严重时将导致误码率恶化,因此有损抑制有一定的局限性。无损抑制的方法有编码类技术^[5]和概率类技术^[6],前者基本思想是加入信息冗余,限制信号码字集合,只有峰值低于门限的码字才被选用于传输,具有纠错能力,但不适用与子载波数多的OFDM系统;后者不同前者完全避开较大的信号峰值,而是着眼于使峰值出现的概率降低,不会产生信号畸变,能有效地降低PAPR值,若利用相位因子、支路序号等边带信息会降低系统频谱利用率并需保证可靠无误传输,且计算复杂度很大。

余数系统(residue number system, RNS)是中国古老的数字表征系统,也称作“中国剩余定理”(Chinese remainder theorem, CRT)。它将一个大的整

收稿日期: 2011-12-07; 修回日期: 2012-05-25

基金项目: 国家自然科学基金(61076096, 60873076)

作者简介: 姚毅(1983-), 男, 博士生, 主要从事通信与信息系统、余数系统等方面的研究。

数转化为几个独立并行的小整数进行运算, 因具有天然的无权重、无进位、并行性的特点, 近期在并行通信等领域受到了不少关注。文献[7-8]提出了基于RNS算法的OFDMA的传输方案, 该方案通过余数系统将区分用户的导频信号分配到相应的子载波上, 可使小区内干扰为零, 使小区间干扰平均化。文献[9-10]提出基于余数系统的并行正交通信方案, 建立了基于余数系统的并行、高速、低复杂度的通信模型, 并利用余数系统, 降低了接收机实现的复杂度, 提高了系统的误码性能。

本文提出了一种新的基于余数系统无损峰均比抑制方法, 其思想是将原有的信号频带划分成 ν 份同时输入, 信号通过余数系统转化为 ν 个余数, 对应到相应的余数通道中进行OFDM调制, 而各余数通道信号可通过频分复用等方式共用原信号带宽。且每个余数通道信号的动态范围由相应的余数基大小决定, 从信号前端入手控制输入信号在一个较小的动态范围来缩小传输信号范围, 且不会产生信号畸变, 从而做到PAPR的无损抑制。与传统的OFDM相比其抑制性能提高了5 dB, 只要传输信号的SNR > 0, 该方法占用的频带资源小于传统的OFDM。

1 OFDM的PAPR概述

OFDM系统基本结构如图1所示, N 表示OFDM系统的子载波个数, T 表示OFDM符号的持续时间, $d_i (i=0, 1, \dots, N-1)$ 是分配给每个子信道的数据符号, s_k 为经过IDFT后的输出信号。为了叙述的简洁, 对信号以 T/N 的速率进行抽样, 即令 $t = kT/N$, $k=0, 1, 2, \dots, N-1$, 得到OFDM的输出信号为:

$$s_k = s(kT/N) = \sum_{i=0}^{N-1} d_i \exp(j \frac{2\pi i k}{N}) \quad 0 \leq k \leq N-1 \quad (1)$$

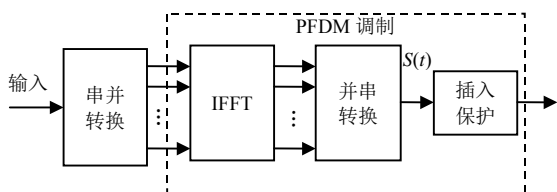


图1 OFDM传输基本结构图

其最大峰值功率与平均功率的比值为:

$$\text{PAPR} = \frac{\max[P(t)]}{E[P(t)]} = 10 \lg \frac{\max\{|s_k|^2\}}{E\{|s_k|^2\}} \quad (2)$$

$$k = 0, 1, 2, \dots, N-1$$

一般采用互补累积分布函数(complementary cumulative distribution function, CCDF)衡量OFDM系统的PAPR分布, 即计算峰均比超过某一门限值 z 的概率。

$$P\{\text{PAPR} > z\} = 1 - \{\text{PAPR} \leq z\} = 1 - (1 - e^{-z})^N \quad (3)$$

由式(1)和式(2)可知, OFDM输出信号由 N 个输入信号正交叠加而成, 则输入信号大的动态范围可能导致高的峰均比, 产生非线性失真, 从而影响系统性能。下面将提出基于余数系统的OFDM峰均比抑制方法, 从信号前端入手控制OFDM信号的动态范围, 达到无损抑制PAPR的目的。

2 RNS-OFDM无损峰均比抑制方法

2.1 余数系统

余数系统由一组两两互素的余数基(moduli) $m_i (i=1, 2, \dots, \nu)$ 定义, 任何一个整数信号符号 R , 能够被余数序列 $\{r_1, r_2, \dots, r_\nu\}$ 唯一、明确地表示为:

$$r_i = R \pmod{m_i} \quad (4)$$

M 作为信号的动态范围, 也就是信号符号 R 的合法范围为:

$$M = \prod_{i=1}^{\nu} m_i \quad (5)$$

当 $0 \leq R < M$ 时, 符号 R 可由 ν 个余数基明确地表示。如选择一组余数基 $\{3, 7, 8\}$, $M = 3 \times 7 \times 8 = 168$, 可以明确表示的信号符号 R 范围为 $[0, 168)$; 如 $R = 160$ 通过该组余数基的余数系统表示为 $\{1, 6, 0\}$, 则余数系统可将一个大的整数转化为其余数表示, 且每个余数通道信号的动态范围由相应的余数基大小决定。

通常将二进制符号转换为余数系统的过程称为B/R(binary to residue), 余数系统转换为二进制的过程称为R/B(residue to binary)。通过CRT^[11], 利用式(6), 可以从余数序列中唯一地恢复出信号符号:

$$R = \left(\sum_i^n S_i \langle 1/S_i \rangle_{m_i} r_i \right) \pmod{M} \quad (6)$$

式中, $S_i = M / m_i$; $\langle 1/S_i \rangle_{m_i}$ 称为 S_i 的模倒数, 满足 $(S_i \langle 1/S_i \rangle_{m_i}) \pmod{m_i} = 1$ 。

2.2 基于RNS无损PAPR抑制方法

基于余数系统的无损峰均比抑制方法结构如图2所示。该方法有 ν 个余数基 $\{m_1, m_2, \dots, m_\nu\}$, 信源发送串行数据由 $d_0, d_1, d_2, \dots, d_i, \dots, d_{N-1}$ 表示。

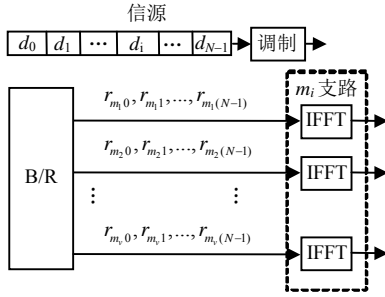


图2 RNS-OFDM的PAPR抑制方法结构图

经B/R变换后串行数据流分成 v 路余数通道并行传输, 其余数系统表示为:

$$\left\{ \begin{array}{l} r_{m_1,0}, r_{m_1,1}, \dots, r_{m_1,(N-1)}; \\ r_{m_2,0}, r_{m_2,1}, \dots, r_{m_2,(N-1)}; \\ \vdots \\ r_{m_v,0}, r_{m_v,1}, \dots, r_{m_v,(N-1)}; \end{array} \right.$$

各余数基 m_i 对应的余数通道的余数信号表示为 $\{r_{m_i,0}, r_{m_i,1}, \dots, r_{m_i,(N-1)}\}$, 各通道余数信号可通过频分复用等方式共用原信号带宽。在本文中 m_i 余数通道经过IFFT后, 根据式(1), 信号可表示为:

$$s_{k,m_i} = s(kT/N) = \sum_{i=0}^{N-1} r_{m_i,i} \exp(j \frac{2\pi i k}{N}) \quad (7)$$

$0 \leq k, i \leq N-1$

然后发送端将并行的 v 路余数通道合成、调制, 完成整个发端的功能。根据分析, 可以得出只要传输信号信噪比大于0, 将信号分到 v 路余数通道传输不会占用更多的频带资源。

接收端主要由余数通道接收模块、FFT模块及R/B模块3部分组成, 进行多路并行处理, 如图3所示。加入了信道噪声的信号送入接收端, v 个余数通道接收模块接收相应余数通道的信号, 最后经过R/B模块恢复出原始数据。文献[9]已提出了基于余数的并行通信方案的接收器的设计, 特别在最大似然检测情况下与传统方案相比, 大大减小了实现的复杂度, 本文不再累述。

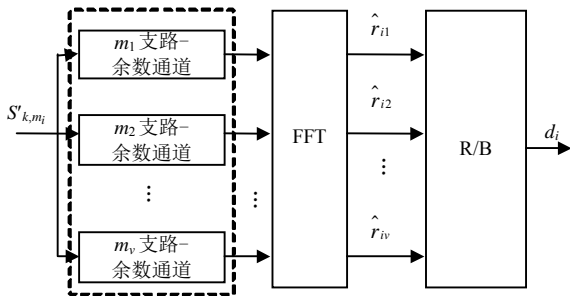


图3 接收端原理框图

当OFDM系统的线性动态范围足够大时, 由于

信道叠加而成的输出信号才不会带来信号畸变。而在实际应用中放大器的动态范围是有限的, 基于余数系统的并行传输方法, 余数的大小总小于对应的余数基 m_i 的大小, 即余数 r_i 的范围为 $0 \leq r_i < m_i$, $1 \leq i \leq v$, 而余数基的大小选择可以远小于原数 d_i , 在较大程度上恰恰控制了信号的动态范围防止畸变的产生, 达到无损抑制PAPR的目的。下面对RNS-OFDM无损PAPR抑制方法性能进行分析。

3 基于RNS的PAPR抑制方法性能估计

3.1 PAPR抑制性能

本节将RNS-OFDM方法与传统的OFDM在峰均比抑制性能和频带资源占用方面进行分析估计。

比较传统的OFDM与RNS-OFDM对峰均比的抑制性能, 以一个具体实例说明: 若传输 N 个信号符号 $d_0, d_1, d_2, \dots, d_i, \dots, d_{N-1}$, 信号 d_i 的动态范围记为 $D: [0, 128]$, 子载波个数为1 000。由传统的OFDM系统传输, 当各子载波相位相同时由式(1)可知输出信号 s_k 达到最大峰值, s_k 动态范围为 $[0, 128\ 000]$ 。而RNS-OFDM传输方法, 余数基 $\{m_1, m_2, m_3\}$ 如取值为 $\{3, 7, 8\}$, 该余数基可表示的数值的动态范围 M 为 $[0, 168]$, $M \supset D$, 由CRT可知通过余数 (r_1, r_2, r_3) 可以唯一地恢复出原数 d_i 。由式(8)可知RNS-OFDM传输方法的输出信号 s_{k,m_i} 动态范围为 $[0, 15\ 000]$ 。则RNS-OFDM输出信号的最大峰值在量级上比传统的OFDM缩小近10倍, 而由式(2)最大功率的范围在量级上缩小近百倍。

以上是从信号的最大动态范围角度将RNS-OFDM方法在PAPR性能上做了一个初步的估计, 与传统的OFDM相比可以预计该方法在PAPR抑制性能上会有所提升, 其带来的性能改善的量化分析将在下一节仿真结果中给出。

3.2 传输带宽

下面分析RNS-OFDM传输带宽占用情况。由香农公式^[12]单位时间的信息容量(单位: bit/s)可表示为:

$$C_i = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{C}{T} = W \log_2 \left(1 + \frac{P_s}{n_0 W} \right) \quad (8)$$

式中, W 是实际信道的传输宽度; P_s 是信号的平均功率; $n_0 W$ 为高斯白噪声在带宽 W 内的平均功率。可见单位时间内的信道容量与信噪比和传输带宽有关。

传输信道结构如图4所示, 若传输时间 T 固定, 信道容量一定时, 如果接收端恢复原信息时没有信息丢失, 则输入和输出的信息速率相等, 即得:

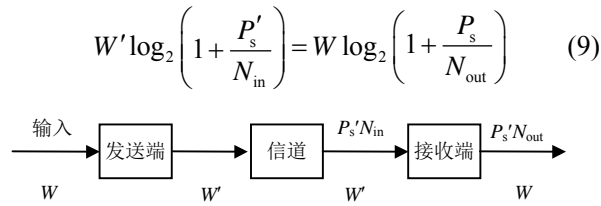


图4 传输信道框图

现需要比较RNS-OFDM方法与传统OFDM的信道传输带宽, 设两种方式发送端的输入信号一致, 进入IFFT的子载波个数 N 相同。令经过RNS-OFDM方法处理后的信号带宽为 W_{RNS} (即传输带宽), 功率为 P_{RNS} , 在信道中加入了平均功率为 N_{RNS} 的高斯白噪声。经过传统的OFDM处理后的传输带宽令为 W_{OFDM} , 功率为 P_{OFDM} , 信道噪声平均功率为 N_{OFDM} 。

在单位时间内信道容量一定的条件下, 利用式(9)可推导得:

$$W_{RNS} \log_2 \left(1 + \frac{P_{RNS}}{N_{RNS}} \right) = W_{OFDM} \log_2 \left(1 + \frac{P_{OFDM}}{N_{OFDM}} \right) \quad (10)$$

令每传送1bit信息的能量为 E_b , 信息传输速率为 r , 则总的信号功率 $P_s = E_b r$ 。由RNS-OFDM传输结构, 得到RNS-OFDM总的传输速率与传统的OFDM系统的关系为 $r_{RNS} = \nu r_{OFDM}$, 即是传统OFDM信息传输速率的 ν 倍, ν 为余数基的个数。则RNS-OFDM总的信号功率 $P_{RNS} = E_b r_{RNS} = E_b \nu r_{OFDM} = \nu P_{OFDM} = \nu P_s$ (为书写的简洁 P_{OFDM} 记为 P_s), 带入式(10)可得:

$$W_{RNS} = \frac{\log \left(1 + \frac{P_s}{N_{OFDM}} \right)}{\log \left(1 + \frac{\nu P_s}{N_{RNS}} \right)} W_{OFDM} \quad (11)$$

需比较RNS-OFDM与传统OFDM传输带宽, 设信道占用率系数为 α , $W_{RNS} = \alpha W_{OFDM} = \alpha W$ (为书写的简洁 W_{OFDM} 记为 W), 则有:

$$N_{OFDM} = n_0 W_{OFDM} = n_0 W \quad (12)$$

$$N_{RNS} = n_0 W_{RNS} = n_0 \alpha W_{OFDM} = \alpha n_0 W \quad (13)$$

通常情况下信噪比远大于1, 将式(12)和式(13)代入式(11)得其传输带宽占用率表达式为:

$$\alpha = \frac{\log \frac{P_s}{n_0 W}}{\log \nu + \log \frac{P_s}{\alpha n_0 W}} = \frac{1}{1 + \frac{\log \nu - \log \alpha}{\log \frac{P_s}{n_0 W}}} \quad (14)$$

ν 是RNS-OFDM传输方法的余数基个数, 传统OFDM系统的信号信噪比由分贝表示为

$SNR = 10 \log \frac{P_s}{N_0}$ 。可见该方法的传输带宽与余数基个数和OFDM系统的信噪比有关。

由式(14)仿真出 α 与信噪比SNR之间的关系曲线, 如图5所示。分别画出了余数基个数为2~5的传输带宽占用率曲线。如余数基个数 $\nu = 3$, 传统OFDM系统的信噪比为 $SNR = 20 \text{ dB}$ 时, $\alpha = 77.2\%$, 即RNS-OFDM占用的传输带宽为传统OFDM的77.2%。

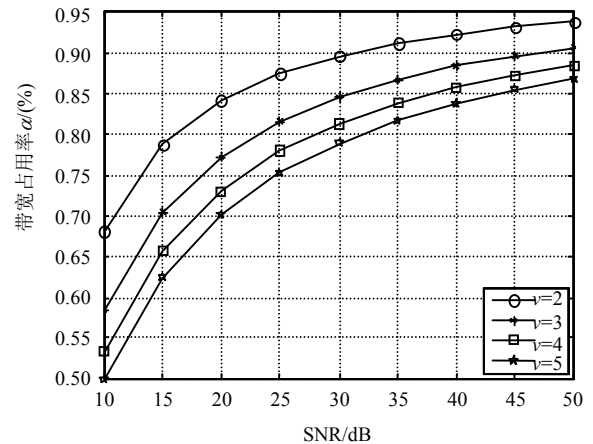


图5 传输带宽占用率曲线

为便于实际应用, 简化式(14), 得到RNS-OFDM与传统的OFDM传输带宽关系的近似计算表达式(在下一节的仿真中, 将对传输带宽近似计算的结果进行验证分析):

$$W_{RNS} = \frac{1}{1 + \frac{\log \nu}{\log \frac{P_s}{N_0}}} W \quad (15)$$

由以上分析可得, 只要满足 $\frac{P_s}{N_0} > 1$, 即传输信

号 $SNR > 0$ 时, RNS-OFDM的传输带宽就小于传统OFDM的传输带宽。而实际情况中OFDM的信噪比功率一般不会小于0, 即总会有RNS-OFDM方法占用的传输带宽小于传统OFDM。

3.3 复杂度

关于该方案实现的复杂度, 可以知道RNS-OFDM在结构上增加了R/B、B/R、余数通道, 添加了硬件开销。但同时该方案又继承了余数系统并行、高速、低复杂度的优势^[9,13-14], 在实际硬件系统实现上会有向降低硬件复杂度方向折中的可能。

4 仿真结果

本文仿真中余数基 $\{m_1, m_2, m_3\}$ 个数取3个, 值为 $\{128, 127, 63\}$, 子载波数个数 $N = 2048$, 输入的符

号数为1 000个, 采用互补累积分布函数图(CCDF)来比较PAPR的抑制性能。

对比RNS-OFDM传输方法和传统的OFDM的峰均比性能, 输入信号采用64QAM的调制方式。图6中曲线RNS_{m1}-PAPR、RNS_{m2}-PAPR、RNS_{m3}-PAPR分别表示余数基 {m₁, m₂, m₃} 对应的各余数支路信号的峰均比性能, 曲线Ori-PAPR表示传统的OFDM峰均比性能。可以看到RNS-OFDM传输方法比传统的OFDM系统在1%PAPR处抑制性能有大于5 dB的提高。

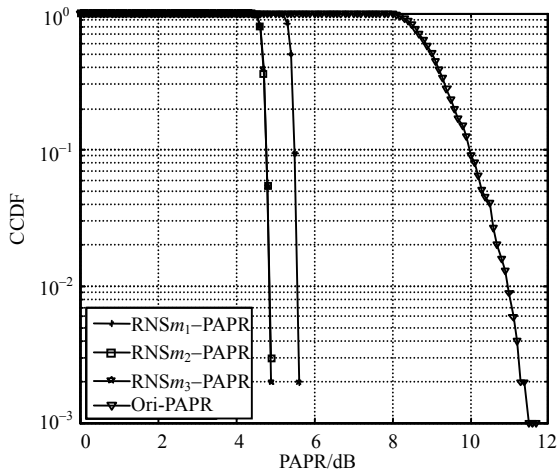


图6 RNS-OFDM与传统OFDM的PAPR性能比较

改变调制方式分别比较256QAM、128QAM、64QAM、16QAM和QPSK的余数各支路PAPR。由图7可见各余数支路的PAPR抑制性能基本一致, 可以认为调制方式的选择对RNS-OFDM传输方法的各余数支路的PAPR抑制性能几乎没有影响。

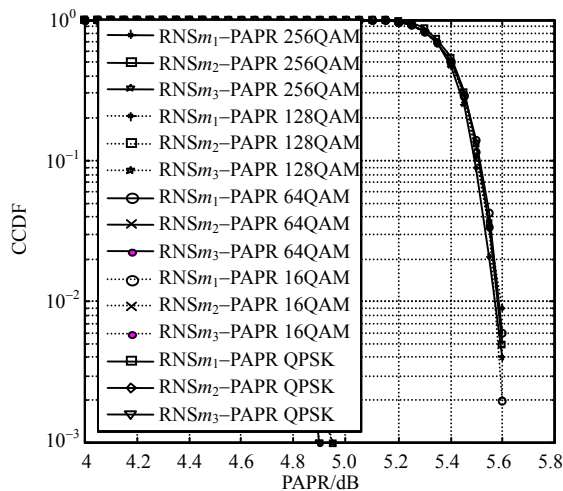


图7 调制方式为256QAM、128QAM、64QAM、16QAM和QPSK的PAPR比较

表1反映当余数基个数 ν 和OFDM系统的信噪比SNR变化时, 由近似计算式得出的RNS-OFDM相

对于传统OFDM传输带宽的占用率情况。

表1 RNS-OFDM相对于传统的OFDM带宽占用的百分比(近似计算) (%)

ν	SNR/dB				
	10	20	30	40	50
2	76.9	86.9	90.9	93.0	94.3
3	67.7	80.7	86.3	89.3	91.3
4	62.4	76.9	83.3	86.9	89.3
5	58.9	74.1	81.1	85.1	87.7

将表中数据与传输带宽占用率曲线(见图5)相比, 近似计算值比曲线图分析出的带宽占用率略大, 但也十分接近真实值, 便于在实际运用中使用。由以上数据可得出RNS-OFDM传输方法比传统的OFDM占用的传输带宽更小。在单位时间内信道容量一定的条件下, 信噪比与传输带宽成指数关系, 可以通过余数基个数 ν 的变化对信噪比进行小的调整, 带来传输带宽较大的改良。

5 结论

本文提出了一种新的基于余数系统的OFDM无损峰均比抑制方法, 从信号输入前端控制信号的动态范围使输出信号峰值在一个较小范围变化。该方法在放大器有限的动态范围条件下有效抑制了峰均比, 且不会产生信号畸变。通过仿真基于余数系统的OFDM并行传输方法与传统的OFDM相比, 在峰均比的抑制性能方面有大于5 dB的提高; 且只要OFDM的信噪功率比大于0, RNS-OFDM占用的频带资源总小于传统的OFDM。进一步研究将对该方法实现的复杂度、误码率方面做探讨。

参 考 文 献

- [1] JIANG Tao, WU Yi-yan. An overview : Peak-to-average power ratio reduction techniques for OFDM signals[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2008, 54(2): 257-268.
- [2] HAN S H, LEE J H. An overview of peak-to-average power ratio reduction techniques for multicarrier transmission[J]. IEEE Wireless Communication, 2005, 12(2): 56-65.
- [3] GONG Lin, YANG Shu-hui, CHEN Yin-chao. Research on the reduction of PAPR for OFDM signals by companding and clipping method[C]//Proceedings of the IEEE WiCOM2010. Chengdu, China: IEEE, 2011: 1-4.
- [4] ZHANG Ai-li, WU Lin-jun. Performance of PAPR in the clipped OFDM systems[C]//Proceedings of the IEEE CMSP2011. Guilin, China: IEEE, 2011: 263-266.
- [5] JUWONO F H, GUNAWAN D. The effectiveness of using source coding to reduce PAPR in OFDM system[C]// Proceedings of the IEEE WiCOM2010. Chengdu, China: IEEE, 2010: 1-3.

(下转第733页)

- YANG Hai-peng, XU Zhi-ying. Network the Study of constructing information security system[J]. Journal of Jilin Teachers Institute of Engineering and Technology, 2011, 27(2): 73-75.
- [5] 吕欣. 信息系统安全保障理论与评价指标体系[J]. 微电子学与计算机, 2006, 23(10): 10-12.
- LÜ Xin. Studies on information system assurance theory and evaluation indicator systems[J]. Microelectronics and Computer, 2006, 23(10): 10-12.
- [6] 胡勇, 漆刚, 陈麟, 等. 信息系统风险量化评估指标体系[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2006, 43(5): 1048-1052.
- HU Yong, QI Gang, CHEN Lin, et al. The quantitative assessment indexes of risk evaluation in information system[J]. Journal of Sichuan University (Natural Science Edition), 2006, 23(10): 10-12.
- [7] 杨海鹰, 余建坤, 谢建, 等. 信息系统安全评价指标体系的评价因素集研究[J]. 全国商情理论研究, 2011(Z4): 32-35.
- YANG Hai-ying, YU Jian-kun, XIE Jian, et al. Research on evaluation factors of security evaluation index in the information system[J]. China Business, 2011(Z4): 32-35.
- [8] 费军, 余丽华. 基于模糊层次分析法的计算机网络安全评价[J]. 计算机应用与软件, 2011, 28(10): 120-123.
- FEI Jun, YU Li-hua. Computer network security assessment with fuzzy analytic hierarchy process[J]. Computer Applications and Softwares, 2011, 28(10): 120-123.
- [9] 朱建军. 层次分析法的若干问题研究及应用[D]. 沈阳: 东北大学, 2005.
- ZHU Jian-jun. Research on some problems of the analytic hierarchy process and its application[D]. Shenyang: Northeastern University, 2005.
- [10] 金菊良, 魏一鸣, 丁晶. 基于改进层次分析法的模糊综合评价模型[J]. 水利学报, 2004(3): 65-70.
- JIN Ju-liang, WEI Yi-ming, DING Jing. Fuzzy comprehensive evaluation model based on improved analytic hierarchy process[J]. Shuili Xuebao, 2004(3): 65-70.

编辑 税红

(上接第671页)

- [6] KOJIMA T, SHIDA Y, FUJINO T. A study of SLM PAPR reduction of OFDM signals without side information[C]// Proceedings of the IEEE ATC2010. Ho Chi Minh City, Vietnam: IEEE, 2010: 168-171.
- [7] ZHU Da-lin, NATARAJAN B. Residue number system arithmetic inspired hopping pilot pattern design for cellular downlink OFDMA[C]// Proceedings of the IEEE WTS2010. Tampa, FL, USA: IEEE, 2010: 1-6.
- [8] ZHU Da-lin, NATARAJAN B. Residue number system arithmetic-inspired hopping-pilot pattern design[J]. IEEE Trans Veh Technol 2010, 59(7): 3679-3683.
- [9] YANG Lie-liang, HANZO L. Performance of a residue number system based parallel communication system using orthogonal signaling: Part I-system outline[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2002, 51(6): 1528-1540.
- [10] YANG Lie-liang, HANZO L. A residue number system based parallel communication scheme using orthogonal signaling: Part II-multipath fading channels[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2002, 51(6): 1547-1559.
- [11] WANG Yu-ke. New Chinese remainder theorems[C]// Proceedings of the 1998 IEEE Conference on Signals, Systems & Computers. Pacific Grove, CA, USA: IEEE, 1998: 165-171.
- [12] SLOANE N, WYNER A. Claude E Shannon: Collected papers[M]. USA: Wiley-IEEE Press, 1993: 5-83.
- [13] MA Shang, HU Jian-hao, ZHANG Lin, et al. An efficient 2ⁿ RNS scaler and its VLSI implementation[C]// Proceedings of the IEEE ICCAS2008. Xiamen: IEEE, 2008: 1370-1373.
- [14] YE Yan-long, HU Jian-hao, MA Shang, et al. A new efficient RNS-to-binary conversion for the three-moduli sets[C]// Proceedings of the IEEE ICCAS2009. Milpitas, CA, USA: IEEE, 2009: 1000-1005.

编辑 张俊