

基于非正交波形的超奈奎斯特采样*

马冰¹, 白勇²

(1.海南政法职业学院, 海南 海口 571100; 2.海南大学 信息与通信工程学院, 海南 海口 570228)

摘要: 针对超奈奎斯特(Faster-than-Nyquist, FTN)系统, 提出了基于非正交波形编码的超奈奎斯特采样, 并与传统的正交波形 FTN 和传统的正交 Nyquist 系统进行了对比分析。在 99.99% 的功率带宽和 5 次迭代检测译码的条件下, 仿真结果表明: 相比于升余弦的正交波形 FTN 系统, 基于高斯和扩展高斯(Extended Gaussian Functions, EGF)脉冲成形的非正交波形 FTN 系统可以获得 4.4 dB 的成形增益, 同时由于良好的时频聚焦特性, 其均衡复杂度只是升余弦的 1/16。

关键词: 超奈奎斯特; 奈奎斯特; 脉冲成形; 波形; 非正交

中图分类号: TN911.3

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.201174

中文引用格式: 马冰, 白勇. 基于非正交波形的超奈奎斯特采样[J]. 电子技术应用, 2021, 47(10): 73-76, 81.

英文引用格式: Ma Bing, Bai Yong. A novel faster-than-Nyquist signaling based on non-orthogonal waveform[J]. Application of Electronic Technique, 2021, 47(10): 73-76, 81.

A novel faster-than-Nyquist signaling based on non-orthogonal waveform

Ma Bing¹, Bai Yong²

(1.Hainan Vocational College of Political Science and Law, Haikou 571100, China;

2.School of Information and Communication Engineering, Hainan University, Haikou 570228, China)

Abstract: For the faster-than-Nyquist (FTN) system, a joint convolutional coded modulation scheme with non-orthogonal shaping pulses, Gaussian pulse and extended Gaussian functions (EGF), is proposed and compared with the traditional FTN with the orthogonal waveform and the traditional orthogonal Nyquist systems. On the condition of approximate equivalent 99.99% power bandwidth and 5 iterations, the simulation results show that compared with the FTN system based on the raised cosine pulse, the FTN systems with EGF and Gaussian pulse can get 4.4 dB shaping gain and have only one sixteenth equalization complexity due to good time-frequency gathering feature.

Key words: faster-than-Nyquist; Nyquist; pulse shaping; waveform; non-orthogonal

0 引言

频谱资源紧张是目前无线和有线通信技术面临的主要挑战之一。特别是在未来 6G 传输系统, 用户需求和移动终端的不断增长, 人们对频谱效率的要求越来越高。在未来万物互联的时代, 亟需新的物理层技术来提高频谱效率。超奈奎斯特(Faster-Than-Nyquist, FTN)传输通过压缩相邻脉冲之间的发送间隔来提高频谱效率。FTN 传输技术是 Mazo 则在 1975 年首次提出的^[1-2]。Liveris 等第二次发现 FTN^[3]并提出了较为实用的 FTN 方案, 利用升余弦脉冲替代 sinc 脉冲^[2]。Rusek 等将 Mazo 限从时域的 FTN 推广到时频二维的 FTN, 提出了多载波的 FTN^[4-5]。FTN 在过去的几十年内得到了快速的发展, 已成为提高频谱效率的重要技术, 广泛应用于 5G 蜂窝微波无线回

程^[6]、beyond 5G 无线通信^[7]、可见光通信^[8]、光纤通信和卫星通信。但是, 升余弦等传统的正交波形的时频聚焦特性较差, 拖尾衰减慢, 导致接收端的最大后验概率(Maximum A Posteriori, MAP)均衡复杂度一般也较高, 这导致正交波形不能很好适应 FTN 传输。因此, 本文研究了基于非正交波形的 FTN 新技术。

在 FTN 系统中, 波形条件可以放宽, 选择适合 FTN 传输的新波形。现在关于 FTN 的研究大都是基于复数域正交的成形脉冲, 例如 sinc 脉冲、升余弦脉冲。复数域非正交脉冲波形的能量聚集特性好, 拖尾衰减快, 接收端的均衡复杂度一般较低, 比较适合 FTN 传输。常见的复数域非正交的脉冲有: 扩展高斯脉冲(Extended Gaussian Functions, EGF)脉冲^[9-10]、全向正交变换算法(Isotropic Orthogonal Transform Algorithm, IOTA)脉冲、高斯脉冲等。IOTA 脉冲是 EG 脉冲的特例。在 FTN 均衡方面, 本文采用 Ungerboeck 模型^[11-12]替换了传统的 Forney 模型^[13]。

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(61561017); 海南省高等学校教育教学改革研究项目(Hnjg2018-96)

本文的主要贡献是用非正交的新波形替换传统 FTN 中的正交波形,研究了基于非正交波形的 FTN 编码调制新技术。对于单载波 FTN,由于非正交波形具有良好的时域聚集特性,因此其对应的 FTN 均衡在保证误码性能的前提下能够大幅度降低复杂度。

1 超奈奎斯特系统模型

1.1 发送端模型

单载波 FTN 发送端模型如图 1 所示。信源 u_n 经过信道编码、交织、星座映射得到星座点符号 a_n 。 a_n 经过 FTN 调制得到发送信号 $s_a(t)$,即:

$$s_a(t) = \sum_{n=0}^{N-1} a_n p(t - n\tau T_s), 0 < \tau \leq 1 \quad (1)$$

其中, τ 表示 FTN 系统的压缩因子, T_s 表示 Nyquist 符号周期, $p(t)$ 表示成形脉冲, N 表示符号个数。 τ 改变了相邻成形脉冲之间的发送间隔即改变了符号周期。当 $\tau < 1$ 时,在相同时间段内发射机可以发送更多的成形脉冲。

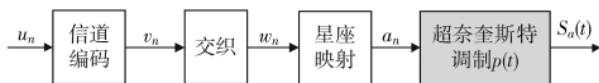


图 1 超奈奎斯特发送端模型

发送信号 $s_a(t)$ 对应的功率谱密度(Power Spectral Density, PSD)^[14]为:

$$\text{PSD}(s_a(t)) = \frac{E(a_k^2) |P_k(F)|^2}{\tau T_s} \quad (2)$$

其中, $E(a_k^2)$ 表示星座点符号 a_k 的方差, $|P_k(F)|^2$ 表示第 k 个成形脉冲 $p(t - k\tau T_s)$ 的能量谱密度。从式(2)可以看出,发送信号 $s_a(t)$ 的带宽取决于 $|P_k(F)|^2$ 的带宽。减小 τ 并不改变信号传输的带宽,信号传输带宽由成形脉冲自身和截断因子 ζ 确定。实际应用中,成形脉冲通常截断为 ζ 个符号周期。

1.2 接收端模型

接收信号 $r(t) = s_a(t) + n(t)$, 其中 $n(t)$ 表示白噪声过程。接收信号在 $t = k\tau T_s$ 时刻进行采样,则接收信号的第 k 个采样值为:

$$r_k = \sum_{l=-L}^L p_l a_{k-l} + n_k \quad (3)$$

其中,干扰长度 $L = \lfloor \zeta / \tau \rfloor$, $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示向下取整;成形脉冲 $p(t)$ 具有偶对称特性,系数 $p_l = p_{-l}$ 。

最优性能的接收机即如图 2 所示的 Turbo 迭代接收

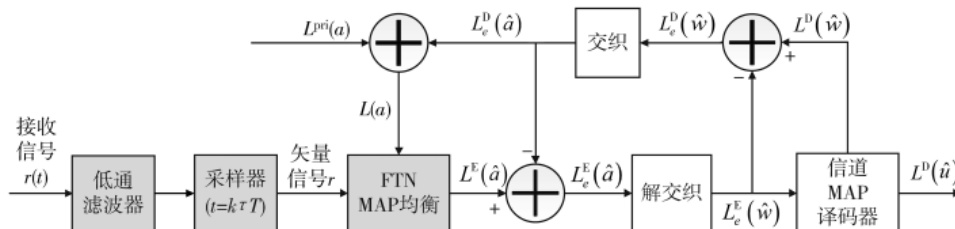


图 2 超奈奎斯特的均衡示意图

机。由于系数 $\{p_l\}$ 具有对称特性,摒弃传统的 Forney 模型^[13]对应的 MAP 算法,采用 Ungerboeck 模型^[11-12]对应的 MAP 算法,其转移概率为:

$$\gamma_k(\sigma_{k-1}, \sigma_k) = P(a_k) e^{\frac{\mathbf{R}[a_k^* (n - \sum_{l=0}^{L-1} p_l a_{k-l})]}{N_0}} \quad (4)$$

其中,系数 $p_0 = 0.5p_0$, $\{p_l = p_{-l}, l \neq 0\}$, $\mathbf{R}(\cdot)$ 表示取实部运算, σ_k 表示第 k 时刻对应的状态, N_0 表示白噪声功率谱密度, $P(a_k)$ 表示先验符号概率。

2 成形脉冲

在 FTN 系统设计中,将成形脉冲因素考虑进来。

2.1 复数域非正交成形脉冲

升余弦成形脉冲 p_R^β 为:

$$p_R^\beta = \text{sinc}(\pi t / T_s) \frac{\cos(\pi \beta t / T_s)}{1 - 4\beta^2 t^2 / T_s^2} \quad (5)$$

其中, β 表示滚降因子。图 3 中“Rcos”代表升余弦成形脉冲的波形。

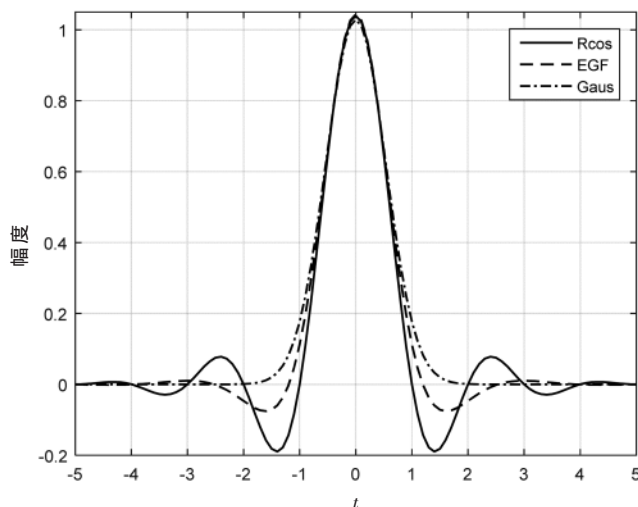


图 3 升余弦、高斯、EGF 的时域波形对比

高斯成形脉冲 p_G^σ 为:

$$p_G^\sigma(t) = (2\sigma)^{\frac{1}{4}} e^{-\pi \sigma t^2} \quad (6)$$

其中, σ 表征能量分布因子, $\sigma > 0$ 。EGF 成形脉冲^[13-14] $p_E(t)$ 为:

$$p_E^{\sigma, v_0, \tau_0}(t) = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{\infty} d_{k, \sigma, v_0} \left[p_G^\sigma \left(t + \frac{k}{v_0} \right) + p_G^\sigma \left(t - \frac{k}{v_0} \right) \right] \times$$

$$\sum_{l=0}^{\infty} d_{l,1/\sigma,\tau_0} \cos\left(2\pi l \frac{t}{\tau_0}\right) \quad (7)$$

其中, $p_G(t)$ 为式(6)的高斯脉冲, $v_0 \cdot \tau_0 = 0.5$, $\alpha \cong 0.528v_0^2$, $\alpha \leq \sigma \leq 1/\alpha$, d_{k,σ,v_0} 为实数。图3中“EGF”代表EGF脉冲, EGF成形脉冲的波形受 σ 和 v_0 影响。从图3可知, 升余弦和EGF脉冲存在过零点, 高斯脉冲不存在过零点。EGF和高斯脉冲为非正交波形。

2.2 功率带宽与干扰强度

当对成形脉冲进行 $\pm \zeta T_s$ 的截断时, 脉冲时域的截断必然导致脉冲的频谱展宽。本文用功率带宽替代传统的绝对带宽。国际电信联盟在ITU-R SM.1541-3中定义了99.5%功率带宽。为留出更多的余量, 本文采用99.99%功率带宽。在后续的分析中 $\zeta=3$, $T_s=1$ 。高斯脉冲($\sigma=0.56$)、EGF脉冲($\sigma=0.56$, $v_0=0.707$)、升余弦脉冲($\beta=0.3$)具有近似相等的99.99%功率带宽 W 如表1所示, 表中“ $\times 2$ ”表示双边带。定义干扰比^[15](Interference-to-Noise Rate, INR):

$$\text{INR} = \left(\sum_{l \neq 0} p^2[l] \right) \cdot E_s / N_0 \quad (8)$$

表1 成形脉冲的99.99%功率带宽

功率带宽	升余弦	EGF	高斯
99.99%	0.884 8 $\times 2$	0.882 0 $\times 2$	0.882 8 $\times 2$

定义干扰强度因子^[15]:

$$\gamma = \frac{\sum_{l \neq 0} p^2[l]}{p^2[0]} \quad (9)$$

当 $\gamma > 1$, FTN 经历强干扰。FTN 系统经历的干扰随着 τ 的减小而增大。当 $\tau \leq 0.46$ 时, 3种成形脉冲对应的FTN系统都将经历强干扰。

3 仿真结果分析

式(4)中的MAP均衡的复杂度为 $O(M^L)$ 。为了提升频谱效率, 需要减小 τ , 对应的 L 也将增大。 L 较大导致MAP均衡复杂度太高。在复杂度和误码性能都在可接受的范围内, FTN均衡实际采用 L' 个抽头, 均衡复杂度为 $O(M^{L'})$, 且 $L' \leq L$ 。

3.1 相同波形的超奈奎斯特性能比较

仿真参数如下: $\tau=0.6$, 1/2码率的(7,5)₈卷积码, 调制阶数为4。两种成形脉冲在不同抽头个数对应的误码性能如图4、图5所示。在图中, C4表示 $L'=4$, 其他标识类推; ID1和ID5表示迭代次数分别为1和5。

在图4中, 对于升余弦脉冲, 当迭代次数为5时, $L'=6$ 和 $L'=3$ 对应的误码性能相差1 dB; $L'=6$ 和 $L'=4$ 的误码性能相差0.3 dB。 $L'=4$ 的MAP均衡, 在大幅度降低复杂度的同时, 误码性能损失很小。当不进行迭代时, 降低抽头个数对误码性能影响较大, 最大有4 dB差异。

在图5中, 对于EGF脉冲, 5次迭代, $L'=2$ 和 $L'=4$

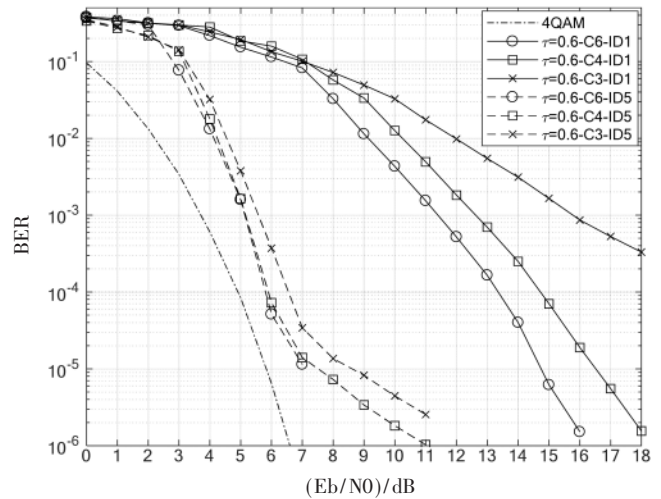


图4 实际抽头个数 L' 对均衡的性能的影响(升余弦)

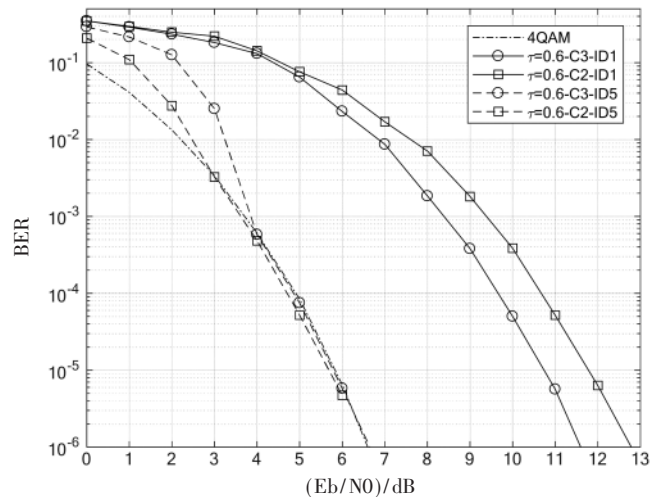


图5 实际抽头个数 L' 对均衡的性能的影响(EGF)

对应的误码性能相当。不迭代时, 误码性能为 10^{-5} 时, $L'=2$ 和 $L'=4$ 对应的信噪比相差大约 0.8 dB。

抽头数 L' 在保证误码性能同时大幅度降低均衡复杂度。减小抽头个数, 则式(3)变为:

$$r_k = \sum_{l=-M}^M p[l] a[k-l] + \underbrace{\left(\sum_{l=-L}^{-M} p[l] a[k-l] + \sum_{l=M}^L p[l] a[k-l] + n_k \right)}_{\text{INA}} \quad (10)$$

其中, $M < L$, INR 项将省略的抽头视为噪声。

$$\begin{aligned} \text{var}[\text{INA}] &= \sum_{l=-L}^{-M} p^2[l] \text{var}(a[k-l]) + \\ &\quad \sum_{l=M}^L p^2[l] \text{var}(a[k-l]) + \text{var}(n_k) \\ &= 2P_s \cdot \sum_{l=N}^L p^2[l] + N_0 \end{aligned} \quad (11)$$

其中, P_s 表示发送信号的功率。根据上述分析可以看出, 忽略抽头就是将干扰视作噪声。这将导致信噪比降低, 降低的百分比为:

$$DR_{SNR} = \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2 \left(SNR + 1 / \sum_{l=N}^L p^2[l] \right)} \right) \times 100\% \quad (12)$$

可以看出,当抽头 p_l 数值较小和信噪比较高时,抽头降低的信噪比可以忽略不计。

对于同一种成形脉冲,以高斯脉冲为例,随着 τ 减小,干扰将逐渐增大,干扰从弱干扰过度到强干扰。如图6所示, $\tau=0.4$ 时,系统经历强干扰。误比特性能为 10^{-5} 时,与较弱干扰时($\tau=0.5 \sim 0.9$)FTN 系统的误码性能相比,强干扰的 FTN 系统的误码性能有 4.5 dB 的损失。当系统经历强干扰时,需要寻找更强的信道编码增强系统的抗干扰性能。

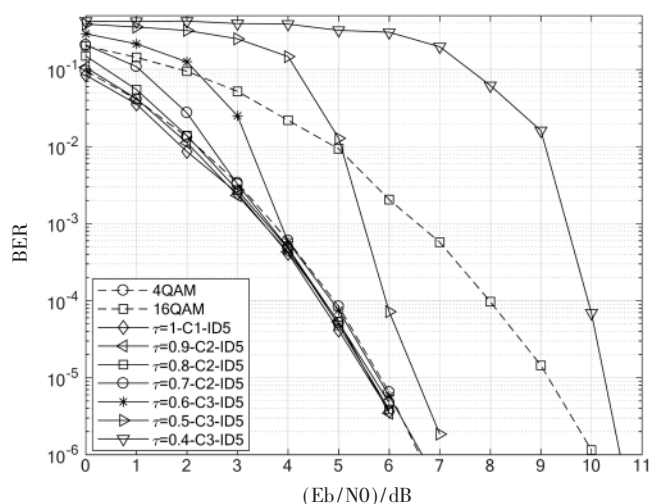


图6 基于高斯脉冲的系统误码性能

3.2 不同波形的超奈奎斯特性能比较

选择 99.99% 功率带宽近似相等的波形,如表1所示。基于3种成形脉冲的 FTN 编码调制性能如图7所示,其对应的星座映射为 4QAM。在高信噪比下,EGF、高斯成形脉冲相比于升余弦成形脉冲能够带来显著的性能增益。

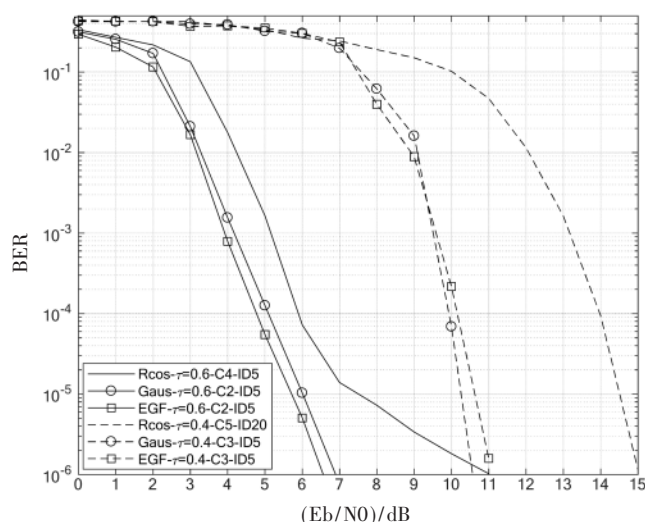


图7 3种波形下的 FTN 性能($\tau=0.6, 0.4$)

能增益。当干扰为非强干扰时,以 $\tau=0.6$ 为例,当误码率为 10^{-5} 时,EGF、高斯成形脉冲相比于升余弦成形分别有 1.9 dB 和 1.6 dB 的性能增益。而此时基于 EGF、高斯成形脉冲的均衡复杂度($O(4^2)$)是基于升余弦脉冲均衡复杂度($O(4^4)$)的 1/16。当干扰为强干扰时,以 $\tau=0.4$ 为例,当误码率为 10^{-5} 时,EGF、高斯成形脉冲相比于升余弦成形分别有 4 dB 和 3.5 dB 性能增益。而此时基于 EGF、高斯成形脉冲的均衡复杂度($O(5 \times 4^3)$)是基于升余弦脉冲均衡复杂度($O(20 \times 4^5)$)的 1/64。可见,选择合适的非正交成形脉冲,不仅能够显著减少干扰对系统误码性能的影响,而且能够明显降低译码复杂度。 τ 从 0.6 减小至 0.4 时,FTN 系统的干扰因子 γ 从 0.58 增大至 1.4,此时非正交成形脉冲相比于正交脉冲之间的信噪比增益越大。

4 结论

本文研究了基于非正交的高斯和扩展高斯(EGF)脉冲成形的 FTN 编码调制新技术,并与传统的正交波形 FTN 进行了对比分析。当 $\tau=0.4$ 时,在误码率为 10^{-5} 条件下,基于 EGF 和高斯成形脉冲的新技术相比于传统升余弦的 FTN 技术分别有 4 dB 和 3.5 dB 的成形增益。由于非正交波形具有良好的时域聚集特性,时域抽头数少,新技术的 MAP 均衡复杂度大大减少,可比升余弦 FTN 有一个数量级意义上的降低。

参考文献

- [1] MAZO J E. Faster-than-Nyquist signaling[J]. The Bell System Technical Journal, 1975, 54(8): 1451-1462.
- [2] MAZO J E, LANDAU H J. On the minimum distance problem for faster-than-Nyquist signaling[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1988, 34(6): 1420-1427.
- [3] LIVERIS A D, GEORGHIADES C N. Exploiting faster-than-Nyquist signaling[J]. IEEE Transactions on Communications, 2003, 51(9): 1502-1511.
- [4] RUSEK F, ANDERSON J B. The two dimensional Mazo limit[C]//2005 IEEE International Symposium on Information Theory. IEEE, 2005: 970-974.
- [5] RUSEK F, ANDERSON J B. Multistream faster than Nyquist signaling[J]. IEEE Transactions on Communications, 2009, 57(5): 1329-1340.
- [6] MASO M, TOMASIN S. Pre-equalized faster than Nyquist transmission for 5G cellular microwave backhaul[C]//IEEE International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications. IEEE, 2016.
- [7] LEE B, KIM J, LEE H, et al. Towards faster-than-Nyquist transmission for beyond 5G wireless communications[C]//ICC 2019-2019 IEEE International Conference on Communications (ICC). IEEE, 2019.
- [8] ZHOU J, WANG Q, WEI J, et al. Faster-than-Nyquist non-orthogonal frequency-division multiplexing for visible light

(下转第 81 页)

- [2] DUGGAN M, FLESK K, DUGGAN J, et al. A reinforcement learning approach for dynamic selection of virtual machines in cloud data centres[C]//The Sixth International Conference on Innovative Computing Technology(INTECH). IEEE, 2016.
- [3] NATHUJI R, KANSAL A, CHAFFARKHAH A. Q-clouds: managing performance interference effects for QoS-aware clouds[C]//Proceedings of the 5th European Conference on Computer Systems. ACM, 2010: 237-250.
- [4] KIM J, RUGGIERO M, ATIENZA D, et al. Correlation-aware virtual machine allocation for energy efficient data centers[C]//Proceedings of the Conference on Design, Automation and Test in Europe. EDA Consortium, 2013: 1345-1350.
- [5] WANG J V, FOK K Y, CHENG C T, et al. A stable matching-based virtual machine allocation mechanism for cloud data centers[C]//2016 IEEE World Congress on Services(SERVICES), 2016: 103-106.
- [6] MAURYA K, SINHA R. Energy conscious dynamic provisioning of virtual machines using adaptive migration thresholds in cloud data center[J]. International Journal of Computer Science and Mobile Computing, 2013, 2(3): 74-82.
- [7] BEIK R. Green cloud computing: greedy algorithms for virtual machines migration and consolidation to optimize energy consumption in a data center[J]. International Journal of Digital Application & Contemporary Research, 2014, 2(9): 1-9.
- [8] WANG J V, CHENG C T, TSE C K. A power and thermal-aware virtual machine allocation mechanism for cloud data centers[C]//IEEE International Conference on Communication Workshop. IEEE, 2015.
- [9] MHEDHEB Y, JRAD F, TAO J, et al. Load and thermal-aware VM scheduling on the cloud[C]//Algorithms and Architectures for Parallel Processing. Springer International Publishing, 2013, 8285: 101-114.
- [10] JOSEPH C T, MARTIN J P. Task dependency aware selection(TDAS) in cloud[J]. Procedia Computer Science, 2016, 93: 269-275.
- [11] KAAOUACHE M A, BOUAMAMA S. Solving bin packing problem with a hybrid genetic algorithm for VM placement in cloud[C]//19th International Conference on Knowledge Based and Intelligent Information and Engineering Systems, 2015.
- [12] SPEC. SPECpower08[EB/OL]. (2019-10-29)[2021-04-26]. <http://www.spec.org>.
- [13] Liu Xiaofang, Zhan Zhihui, DENG J D, et al. An energy efficient ant colony system for virtual machine placement in cloud computing[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2018, 22(1): 113-128.
- [14] ZHANG W, HAN S, HE H, et al. Network-aware virtual machine migration in an overcommitted cloud[J]. Future Generation Computer Systems, 2016, 76(11): 428-442.
- [15] ALBOANEEN D A, TIANFIELD H, ZHANG Y. Glowworm swarm optimisation algorithm for virtual machine placement in cloud computing[C]//2016 IEEE Conferences on Ubiquitous Intelligence & Computing, Advanced and Trusted Computing, Scalable Computing and Communications, Cloud and Big Data Computing, Internet of People, and Smart World Congress. IEEE, 2016.

(收稿日期: 2021-04-26)

作者简介:

徐胜超(1980-), 男, 硕士, 讲师, 主要研究方向: 并行分布式处理软件。

宋娟(1980-), 女, 硕士, 副教授, 主要研究方向: 智能计算、数据挖掘。

潘欢(1983-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 智能体协调控制、系统优化分析。



扫码下载电子文档

(上接第 76 页)

- communications[J]. IEEE Access, 2018, 6: 17933-17941.
- [9] SIOHAN P, ROCHE C. Cosine-modulated filterbanks based on extended Gaussian functions[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2000, 48(11): 3052-3061.
- [10] ROCHE C, SIOHAN P. A family of extended Gaussian functions with a nearly optimal localization property[M]. Multi-Carrier Spread-Spectrum. Springer US, 1997: 179-186.
- [11] COLAVOLPE G, BARBIERI A. On MAP symbol detection for ISI channels using the Ungerboeck observation model[J]. IEEE Communications Letters, 2005, 9(8): 720-722.
- [12] UNGERBOECK G. Adaptive maximum-likelihood receiver for carrier-modulated data-transmission systems[J]. IEEE

Transactions on Communications, 1974, 22(5): 624-636.

- [13] RUSEK F. Partial response and faster-than-Nyquist signaling[M]. Lund University, 2007.

- [14] ANDERSON J B, SVENSSON A. Coded modulation systems[M]. Springer Science & Business Media, 2003.

- [15] EL GAMAL A, KIM Y H. Network information theory[M]. Cambridge University Press, 2011.

(收稿日期: 2020-12-04)

作者简介:

马冰(1985-), 通信作者, 女, 硕士, 助教, 主要研究方向: 移动通信、计算机网络, E-mail: 1531877735@qq.com。

白勇(1970-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 无线通信。



扫码下载电子文档

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所