

一种改进的无数据辅助频偏估计算法

安 琦, 何子述, 李会勇

(电子科技大学 电子工程学院, 成都 611731)

摘 要: 面对无线电监测或电子对抗等非协作电子环境, 在低信噪比情况下对截获信号载波频偏进行估计时存在估计范围和估计精度不平衡的问题。为此, 提出一种改进的无数据辅助频偏估计算法。对 Q 倍的归一化基带信号做自相关函数的差分运算, 消除最大相关间隔对估计范围的影响, 并通过对差分后相位的加权求和得到有效的频偏估计值。仿真结果表明, 即使在信噪比低至 -15 dB 时, 该算法仍然可以达到近似 10^{-4} 的估计误差精度, 能够满足实际监测要求。

关键词: 频偏估计; 估计精度; 最大相关间隔; 加权平均; 无数据辅助

中文引用格式: 安 琦, 何子述, 李会勇. 一种改进的无数据辅助频偏估计算法[J]. 计算机工程, 2017, 43(11): 66-69, 75.

英文引用格式: AN Qi, HE Zishu, LI Huiyong. An Improved Non-Data-Aided Frequency Shift Estimation Algorithm[J]. Computer Engineering, 2017, 43(11): 66-69, 75.

An Improved Non-Data-Aided Frequency Shift Estimation Algorithm

AN Qi, HE Zishu, LI Huiyong

(School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

[Abstract] In order to solve the problem of imbalance between the estimation accuracy and estimation range of the intercepted signal with low Signal-to-Noise Ratio (SNR) in electronic environment, such as radio monitoring and electronic warfare and other non-cooperation communications, this paper proposes an improved Non-Data-Aided (NDA) frequency shift estimation algorithm. The influence of the maximum correlation interval to estimation range is removed through the difference function of the self-correlation of Q times of the normalized baseband signal. Then an effective estimation value is accomplished by the weighted summation of the difference phase. Simulation results show that the proposed algorithm can obtain the estimation accuracy of almost 10^{-4} even if the SNR is low to -15 dB, which could meet the requirements of the actual monitoring.

[Key words] frequency shift estimation; estimation accuracy; maximum correlation interval; weighted average; Non-Data-Aided (NDA)

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2017.11.011

0 概述

随着无线通信及网络技术的飞速发展, 载波、位和帧等同步技术性能的好坏直接决定无线通信系统是否能有效工作^[1]。在无线电监测或电子对抗等非协作电子环境中, 无数据辅助的特性使得系统中的载波同步变得更加艰难。

目前针对无数据辅助的载波频偏估计算法, 主要基于数据辅助估计算法进行改进。经典的数据辅助频偏估计算法如 Fitz^[2]、L&R^[3]、Kay^[4]、L&W^[5]、M&M^[6]、WNALP^[7]等都是基于最大似然准则提出的。它们的各种改进算法, 如 Chirp Z 变换^[8]等算法^[9-10]被相继提出, 使得改进后的频偏估计方差能更快更准确地靠近克拉美罗下界 (Cramer-Rao Low

Bound, CRLB) 曲线。另一方面, 由于频域算法^[11]在增加计算量的同时并没有对频偏估计有较大改善, 因此很少被采用。而其他改进方法, 例如基于系统模型的改进方法^[12-13]等则需要根据实际特例处理, 也不被广泛通用。

文献[14]较早设计无数据辅助的频偏估计改进算法, 提出对接收信号做 M 次方非线性运算, 以消除未知数据符号相位对频偏估计带来的影响。由于常用通信系统中多数采用 PSK 调制信号, 仅对相位进行调制的特性使得该方法非常有效。此后基于八阶统计量^[15]、加权相位直方图^[16]、载波频偏与相位噪声的联合估计^[17]等多种改进算法^[18-19]也被不断提出, 并尝试获得一个更靠近 CRLB 的频偏估计结果。

作者简介: 安 琦 (1987—), 女, 博士研究生, 主研方向为数字信号处理; 何子述、李会勇, 教授。

收稿日期: 2016-09-01 **修回日期:** 2016-11-23 **E-mail:** sunnycaroline@163.com

针对目前无数据辅助频偏估计算法在信噪比较低时不能有效平衡估计精度和估计范围的问题,本文提出一种改进的频偏估计算法,通过对 Q 次倍归一化信号进行自相关差分相位的加权求和,得到有效的频率偏差估计值。

1 无数据辅助频偏估计原理

假设接收信号经过定时同步等前期处理,输出的基带信号可以写为:

$$x(k) = c_k e^{j(2\pi f_\Delta k T_s + \theta)} + n(k) \quad (1)$$

其中, $c_k (k=1,2,\dots,N)$ 为发送端发出的调制符号序列, N 为在接收端选择截取的一段待处理信号的采样样本数, f_Δ 是需要估计的载波频偏, T_s 是接收信号的采样周期, θ 为随机的载波初始相位,服从 $[0,2\pi)$ 内的均匀分布。通常设定通信系统的信道噪声 $n(k)$ 是随机的复加性高斯白噪声,其均值为0,双边频谱密度为 $N_0/2$ 。

式(1)可以连续变换为:

$$y(k) \simeq A e^{j(2\pi f_\Delta k T_s + \theta + n_0(k))} \quad (2)$$

其中, $n_0(k)$ 与 $n(k)$ 具有相似的分布特性,也是一个零均值的复高斯过程。

因此, $y(k)$ 的差分相位可以表示为:

$$\begin{aligned} \Delta\varphi_{y(k)} &= \varphi_{y(k+1)} - \varphi_{y(k)} = \arg[y(k+1)y^*(k)] \\ &= 2\pi f_\Delta T_s + n_0(k+1) - n_0(k) \end{aligned} \quad (3)$$

其中, $y^*(k)$ 表示 $y(k)$ 取共轭, $\arg[\cdot]$ 表示对信号取辐角,其辐角取值范围为 $(-\pi, \pi]$ 。

根据Kay的方法原理,设定目标函数为:

$$J = (\Delta\varphi - 2\pi f_\Delta T_s \mathbf{e})^T \mathbf{C}^{-1} (\Delta\varphi - 2\pi f_\Delta T_s \mathbf{e}) \quad (4)$$

其中, $\Delta\varphi = [\Delta\varphi_{y(1)}, \Delta\varphi_{y(2)}, \dots, \Delta\varphi_{y(N)}]^T$, $\mathbf{e} = [1, 1, \dots, 1]^T$, $[\cdot]^T$ 表示矩阵的转置; \mathbf{C} 为 $\Delta\varphi_{y(k)}$ 的协方差矩阵。当目标函数 J 取得最小值时,对应的 f_Δ 即为估计值 \hat{f}_Δ 。

另一方面,无线通信系统常选用频带利用率更高的PSK调制。为了消除接收信号未知调制信息的影响,文献[14]提出将接收到的信号做如下非线性变换:

$$z(k) = (x(k))^M \quad (5)$$

由于PSK调制序列 $c(k)$ 的特点是相位均匀且幅度相等,有 $(c(k))^M = 1$,因此经过 M 次非线性变换后,可以几乎完全消除调制信号的相位影响。此时,再根据Kay方法原理进行推导,就可以得到相应的无数据辅助的频偏估计表达式。

但在实际的非协作无线通信环境中,由于无线电监测以及电子对抗的特殊性,截获到的信号常常具有非常低的信噪比,这给信号处理工作带来极大的困难。现有的频偏估计算法在低信噪比情况下的估计精度和估计范围常呈现一种反比效应,不能达到有效平衡,严重影响了后续解调等信号处理过程的性能。

2 本文估计算法

本文针对现有频偏估计算法在低信噪比情况下估计精度和估计范围不平衡的问题,基于WNALP算法,提出了一种改进的频偏估计算法,称为归一化的加权自相关线性估计器(Normalized Weighted Autocorrelation Linear Predictor, NWALP)。算法首先对待处理的基带信号进行归一化,然后利用 Q 次方非线性运算来消除调制信息的影响,最后对其自相关函数做差分相位的加权求和,从而完成对待处理信号中的载波频率偏差的有效估计。

假定待处理的含频偏基带信号序列用式(1)中的 $x(k)$ 表示,对它进行幅度的归一化:

$$\tilde{x}(k) = x(k) / |x(k)|, k=1,2,\dots,N \quad (6)$$

则在假定 $n(k) \gg 1$ (SNR足够大)下,有式(7)存在。

$$\tilde{x}(k) \simeq e^{j(2\pi f_\Delta T_s + \theta + \tilde{\beta}(k))} \quad (7)$$

其中, $\tilde{\beta}(k)$ 也是一个零均值的高斯过程。

定义自相关函数为:

$$\begin{aligned} R_0(m) &= \sum_{k=m+1}^N \tilde{z}(k) \tilde{z}^*(k-m) \\ m &= 1, 2, \dots, L_r \end{aligned} \quad (8)$$

其中, $\tilde{z}(k) = \tilde{x}^Q(k)$ 表示归一化基带信号的 Q 次方, L_r 表示自相关函数的最大相关间隔,是一个需要自主选择和设定的参数。

同理,该自相关函数也可以连续变换为:

$$R_0(m) \simeq e^{j(2\pi m f_\Delta T_s + \tilde{\epsilon}(m))} \quad (9)$$

其中, $\tilde{\epsilon}(m)$ 同样也是一个零均值的高斯过程。

可以看出:

$$\begin{aligned} \angle R_0(m) R_0^*(m-1) &= 2\pi f_\Delta T_s + \tilde{\epsilon}(m) + \tilde{\epsilon}(m-1) \\ 2 \leq m \leq L_r \end{aligned} \quad (10)$$

定义 $\Delta\varphi_{0R(m)} \triangleq \angle R_0(m) R_0^*(m-1)$,参考Kay方法原理,设定目标函数为:

$$J_0 = \mathbf{P}^T \mathbf{C}^{-1} \mathbf{P} \quad (11)$$

$$\mathbf{P} = \Delta\varphi_0 - 2\pi f_\Delta T_s \mathbf{e}$$

$$\Delta\varphi = [\Delta\varphi_{0R(1)}, \Delta\varphi_{0R(2)}, \dots, \Delta\varphi_{0R(L_r)}]^T$$

当目标函数 J_0 取得最小值时,对应的 f_Δ 即为对载波频偏的估计值 \hat{f}_Δ 。因此,本文提出的归一化的加权自相关线性预测器可以表示为:

$$\hat{f}_\Delta = \frac{1}{2\pi Q T_s} \cdot \sum_{m=2}^{L_r} \omega_0(m) \cdot \arg[R_0(m) R_0^*(m-1)] \quad (12)$$

其中, ω_0 是加在差分相位上的权重。

$$\omega_0(m) = \frac{3[(N-m)(N-m+1) - L_r(N-L_r)]}{L_r(4L_r^2 - 6L_rN + 3N^2 - 1)}$$

(13)

该算法采用归一化的基带信号作为待处理信号,有效地削弱了 Q 次非线性运算带来的性能损耗,对自相关相位差的辐角进行加权平均,相比相位差加权平均后再取辐角,能更有效地降低噪声的影响,这在 Kay 方法中也有相应的表述。与 Fitz、L&R 算法及其改进算法相比,自相关函数的差分相位运算则使得估计范围与自相关函数的最大相关间隔 L_r 无关,解决了相位模糊问题。该算法的理论归一化频偏估计范围与 WNALP 算法的估计范围相同,同时,WNALP 算法在低信噪比下较高的估计方差也得到了改善,有效地平衡了频偏估计精度和估计范围。

3 仿真实验

假定待处理基带信号为加性高斯白噪声下的 QPSK 信号,总的采样点数为 $N=256$,采样频率被归一化 $f_s=1$ 。最大相关间隔被设定为 $L_r=N/2$ 。每次性能仿真实验至少经过 1 000 次蒙特卡罗仿真实验。 $M_{\text{MCRLB}}^{[7]}$ 作为理论的最优估值,也被用来作为频偏估计精度的衡量指标。

$$M_{\text{MCRLB}} = \frac{3}{2\pi^2 N(N^2 - 1)} \cdot \frac{1}{E_s/N_0} \quad (14)$$

设定归一化频偏 $f_d = 0.001$,在信噪比为 $-15 \text{ dB} \sim 20 \text{ dB}$ 的范围下,对算法频率偏差估计方差进行仿真实验,得到的结果如图 1 所示。

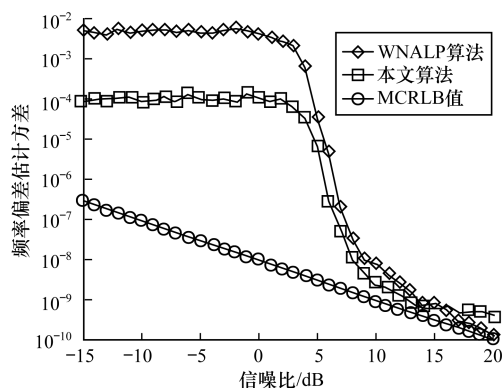


图 1 频率偏差估计方差比较

可以看出,即使仿真设定的频偏在一个较小的值上,WNALP 算法仍然在低信噪比下表现出相对较高的估值误差,达到了 10^{-2} 量级及以上。相对地,本文提出的算法估计误差在 10^{-4} 量级,可以提高几乎 2 个数量级的估计精度。另一方面,当 SNR 提高到 5 dB 以后,本文算法的估计误差方差也迅速下降到 MCRLB 值附近,这说明本文方法在信噪比增大时也可以有效地估计频偏。

为了模拟算法的实时性,仿真时间被用来作为算法性能的比较参数。如表 1 中所示,本文算法单次蒙特拉罗仿真时间优势明显。

表 1 2 种算法的单次仿真时间比较 10^{-3} s

算法	仿真时间
WNALP 算法	3.2
本文算法	2.5

能够被估计的频偏范围也是一项重要的参考指标,这也直接决定估计算法是否可以实际应用。然而,多数估计算法的估计精度和估计范围成反比,当估计范围较大时,其估计精度不足,而估计精度较高时,其可估计范围并不大。

在信噪比为 -15 dB 时,2 种算法估计范围的仿真结果如图 2 所示。本文算法的估计范围随 SNR 变换的情况如图 3 所示。由图 2 可以看出,本文算法可以达到与改进前算法 WNALP 相同的频偏估计范围,而随着信噪比的降低,其估计范围开始有减小的趋势,这是在低信噪比下提高估计精度付出的代价。

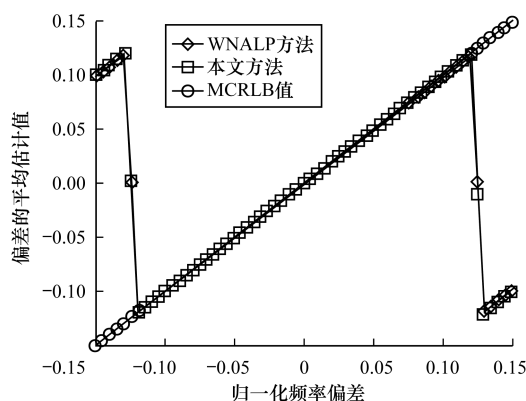


图 2 估计范围仿真结果比较 1

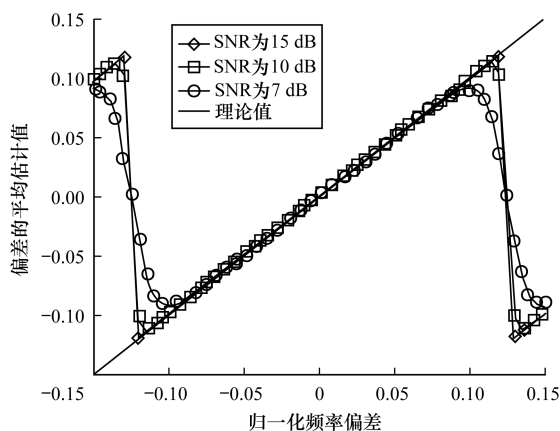


图 3 估计范围仿真结果比较 2

选择现代通信中常用的 7 种相位调制信号作为本文算法的验证源信号,当信噪比为 -10 dB 时,这些常用信号在频偏估计和校正前后的星座图对比仿真结果如图 4 所示。可以看出,除了阶数较高的 16PSK 信号,其他 6 种常用相位调制通信信号在信噪比低至 -10 dB 时仍然可以有效地对频偏进行估计和校正,而有效的频偏估计,对信号的星座图以及后续的信号识别等处理流程可以带来极大的便利。

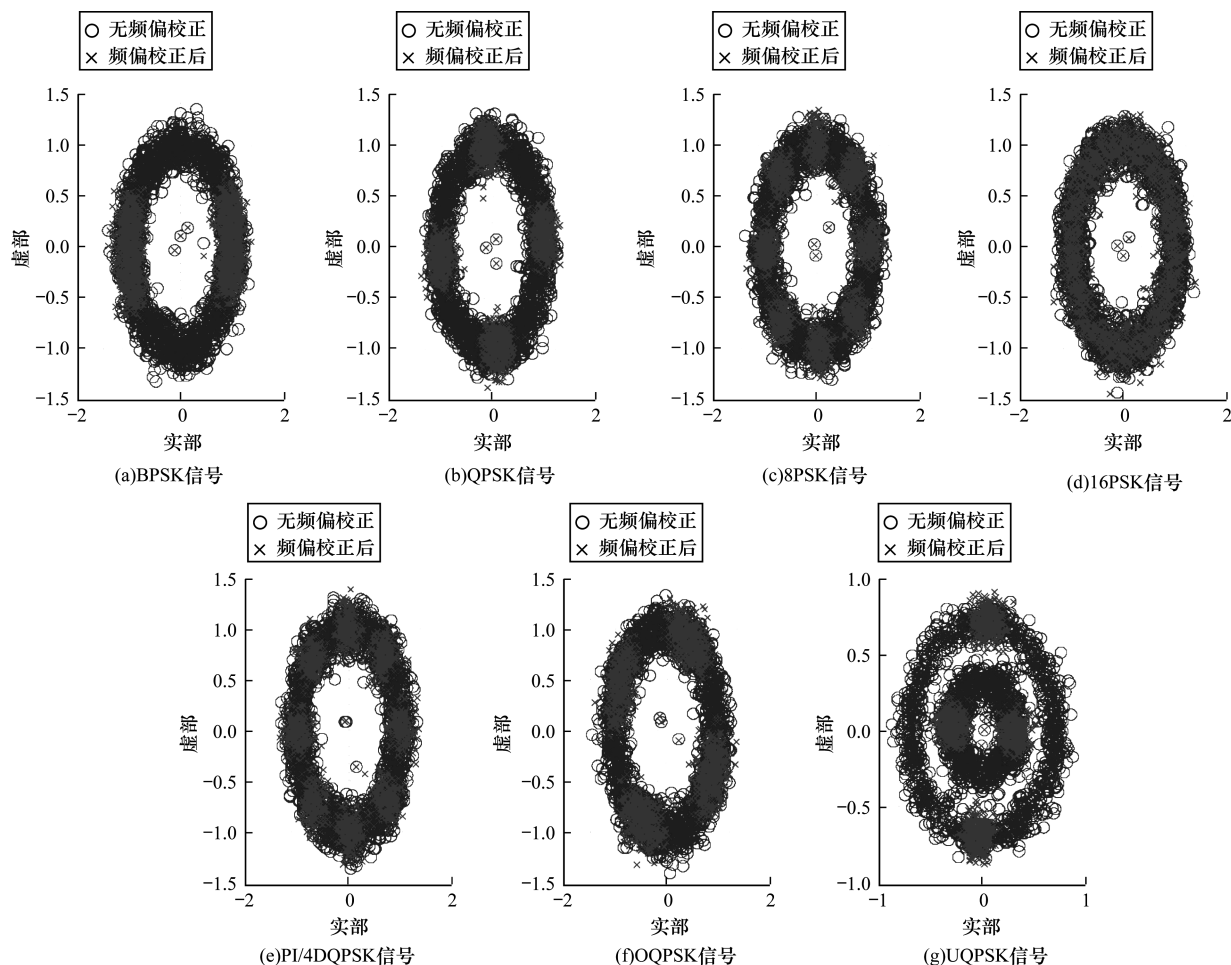


图4 常用通信信号频偏估计校正前后星座图比较

4 结束语

本文针对无线电监测和电子对抗等非协作无线通信环境,提出一种归一化的加权自相关线性估计算法,对归一化的基带信号做非线性处理后进行自相关的差分相位运算,再通过加权平均有效估计载波频偏。该算法以较小的估计范围为代价,大幅提高了估计精度,平衡了估计范围和精度,并且对于低信噪比环境具有较好的兼容性。在盲信号调制识别过程中还存在许多需要进行盲估计的参数,如符号速率等,因此,如何有效地对这类参数进行盲估计将是笔者下一步的研究方向。

参考文献

- [1] HUA Min, WANG Mao, YANG Wenjie, et al. Analysis of the Frequency Offset Effect on Random Access Signals [J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 61(11): 4728-4740.
- [2] FITZ M P. Planar Filtered Techniques for Burst Mode Carrier Synchronization [C]//Proceedings of IEEE Global Telecommunication Conference. Washington D. C., USA: IEEE Press, 1992: 365-369.
- [3] LUISE M, REGGIANINI R. Carrier Frequency Recovery in All Digital Modems for Burst Mode Transmissions [J]. IEEE Transactions on Communications, 1995, 43(2-4): 1169-1178.
- [4] KAY S. A Fast and Accurate Single Frequency Estimator [J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1989, 37(12): 1987-1990.
- [5] LOVELL B C, WILLIAMSON R C. The Statistical Performance of Some Instantaneous Frequency Estimators [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1992, 40(7): 1708-1723.
- [6] MENGALI U, MORELLI M. Data-aided Frequency Estimation for Burst Digital Transmission [J]. IEEE Transactions on Communications, 1997, 45(1): 23-25.
- [7] AWOSEYILA A B. Improved Single Frequency Estimation with Wide Acquisition Range [J]. Electronics Letters, 2008, 44(3): 245-247.
- [8] LENG Haijun, YU Song, LI Xin, et al. Frequency Offset Estimation for Optical Coherent M-QAM Detection Using Chirp Z-transform [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(9): 787-789.
- [9] 汪文, 冷文, 王安国, 等. 一种数据辅助频偏估计算法 [J]. 计算机工程, 2014, 40(4): 112-115.
- [10] 王品, 黄炎, 王超, 等. 基于自相关的宽范围高精度频偏估计算法 [J]. 计算机工程, 2011, 37(4): 102-103, 106.

(下转第75页)

根据如图 6 所示的结果,随着网络密度的增加,数据的传输延迟逐渐降低,这与真实情况比较接近,节点密度增加可令数据传输的自由度较高,能够选取相对最为节省传输时间的路径。从图 6 中可看出,网络密度 $\beta \geq 0.4$ 时,本文算法的系统数据传输延迟相对最小。OSPR 算法因为考虑了数据传输延迟问题,其数据的传输延迟要优于 GS 算法。实验结果表明,本文算法具有较高的数据传输效率。

6 结束语

本文提出一种快速控制包分布式超梯度对偶分解 CDN 负载管理算法,在泛播 CDN 中给出一种简化的 DNS 控制负载管理模型,制定负载管理问题的凸优化模型,并提出一种分布式对偶算法对上述凸优化模型进行求解,实现模型优化性能提升。下一步研究是对算法应用系统的开发以及真实数据实验应用,并进行算法的对比验证。

参考文献

- [1] 李 乔,何 慧,张宏莉.内容分发网络研究[J].电子学报,2013,41(8):1560-1568.
- [2] 尹 浩,詹同宇,林 闯.多媒体网络:从内容分发网络到未来互联网[J].计算机学报,2012,35(6):1120-1130.
- [3] 卢 凤,李海荣,韩 艳.基于时空相似度感知的 Web 服务 QoS 协同过滤推荐[J].计算机工程,2017,43(4):28-33,38.
- [4] LINDBERG M. Analysis of a Feedback-based Energy Conserving Content Distribution Mechanism for Mobile Networks [J]. IFAC Proceedings Volumes, 2014, 47(3):8749-8755.
- [5] BOSTOENA T, MULLENDERA S, BERBERS Y. LofSwitch: An Online Policy for Concerted Server and Disk Power Control in Content Distribution Networks[J]. Ad Hoc Networks, 2015, 25:606-621.
- [6] GARMEHIA M, ANALOUIA M, PATHAN M, et al. An Economic Replica Placement Mechanism for Streaming Content Distribution in Hybrid CDN-P2P Networks[J]. Computer Communications, 2014, 52(1):60-70.
- [7] LEVY A, CORRIGAN-GIBBS H, BONEH D. Stickler: Defending Against Malicious Content Distribution Networks in an Unmodified Browser[J]. IEEE Security & Privacy, 2016, 14(2):22-28.
- [8] TRAN H A, HOCEINI S, MELLOUK A, et al. QoE-based Server Selection for Content Distribution Networks[J]. IEEE Transactions on Computers, 2014, 63(11):2803-2815.
- [9] HU Menglan, LUO Jun, WANG Yang, et al. Practical Resource Provisioning and Caching with Dynamic Resilience for Cloud-based Content Distribution Networks [J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2014, 25(8):2169-2179.
- [10] LAWEY A Q, EL-GORASHI T E H, ELMIRGHANI J M H. BitTorrent Content Distribution in Optical Networks[J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(21):4209-4225.
- [11] XIE Junfeng, XIE Renchao, HHANG Tao. ICICD: An Efficient Content Distribution Architecture in Mobile Cellular Network [J]. IEEE Access, 2015, 5(1):3205-3215.
- [12] AL-KANJ L, DAWY Z, YAACOU E. Energy-aware Cooperative Content Distribution over Wireless Networks: Design Alternatives and Implementation Aspects[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2013, 15(4):1736-1760.
- [13] 张 成,杨东风,黄 协,等.内容分发网络中基于相关内容吸引的缓存算法[J].计算机工程,2014,40(9):117-123.
- [14] ATATA R, YAACOU E, ALOUINI M S, et al. Delay-sensitive Content Distribution via Peer-to-peer Collaboration in Public Safety Vehicular Ad Hoc Networks[J]. Ad Hoc Networks, 2014, 16(2):182-196.
- [15] HOILES W, GHAREHSHIRAN O N, KRISHNAMURTHY V, et al. Adaptive Caching in the YouTube Content Distribution Network: A Revealed Preference Game-theoretic Learning Approach [J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2015, 1(1):71-85.
- [11] 谭晓衡,张 毛.一种高精度的改进 FFT 频偏估计算法[J].重庆理工大学学报(自然科学版),2010,24(7):71-75.
- [12] ZHANG Junwen, SHAO Yufeng, FANG Wuliang, et al. Research of Single Carrier Frequency Domain Equalization Based on Single-sideband Modulation [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(7):1971-1976.
- [13] 刘世刚,葛临东.一种宽范围高精度的前向载波频偏估计算法[J].系统仿真学报,2008,20(18):4968-4970.
- [14] VITERBI A J, BITERBI A M. Nonlinear Estimation of PSK-modulated Carrier Phase with Application to Burst Digital Transmission [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1983, 29(4):543-551.
- [15] LI Ming, CHEN Liankuan. Blind Carrier Frequency Offset Estimation Based on Eight-order Statistics for Coherent Optical QAM Systems [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2011, 23(21):1612-1614.
- [16] 何 维,张士灏.非数据辅助的 QAM 信号载波频偏估计算法[J].信号处理,2015,31(1):45-50.
- [17] ZHOU Xian. Efficient Joint Carrier Frequency Offset and Phase Noise Compensation Scheme for High-speed Coherent Optical OFDM Systems [J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(11):1755-1761.
- [18] KIM D, NARASIMHA M J, COX D C. An Improved Non-Data-Aided Carrier Frequency Offset Estimator for PSK Packets [C]//Proceedings of GLOBECOM'96. Washington D. C., USA:1996:1345-1347.
- [19] 张 毅,欧阳志新,邓云凯,等.高性能无数据辅助 QPSK 频偏估计新算法[J].西安电子科技大学学报(自然科学版),2013,40(2):187-193.

编辑 索书志

编辑 金胡考

(上接第 69 页)