

基于张量填补和用户偏好的联合推荐算法

熊智^{1,2}, 徐恺¹, 蔡玲如^{1,2}, 蔡伟鸿^{1,2}

(1. 汕头大学计算机科学与技术系, 广东 汕头 515063; 2. 汕头大学智能制造技术教育部重点实验室, 广东 汕头 515063)

摘 要: 针对现有推荐算法缺乏对用户偏好的考虑, 推荐效果不理想的问题, 提出了一种联合张量填补和用户偏好的推荐算法。首先, 基于评分矩阵和项目所属类别矩阵构建用户-项目-类别的三维张量; 然后, 利用 Frank-Wolfe 算法进行迭代计算, 填补缺失数据, 同时基于张量数据构建用户类别偏好矩阵和评分偏好矩阵; 最后, 基于填补后的张量以及 2 个偏好矩阵设计联合推荐算法, 并采用差分进化算法进行参数调优。实验结果表明, 与一些常用算法和新近提出的算法相比, 所提算法的推荐效果优于对比算法, 其精度平均提升了 1.96%~3.44%, 召回率平均提升了 1.35%~2.40%。

关键词: 推荐算法; 联合推荐; 张量填补; 用户偏好

中图分类号: TP391.3

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2019231

Joint recommendation algorithm based on tensor completion and user preference

XIONG Zhi^{1,2}, XU Kai¹, CAI Lingru^{1,2}, CAI Weihong^{1,2}

1. Department of Computer Science and Technology, Shantou University, Shantou 515063, China;

2. Key Laboratory of Intelligent Manufacturing Technology (Shantou University), Ministry of Education, Shantou University, Shantou 515063, China

Abstract: Aiming at the problem that existing recommendation algorithms have little regard for user preference, and the recommendation result is not satisfactory, a joint recommendation algorithm based on tensor completion and user preference was proposed. First, a user-item-category 3-dimensional tensor was built based on user-item scoring matrix and item-category matrix. Then, the Frank-Wolfe algorithm was used for iterative calculation to fill in the missing data of the tensor. At the same time, a user category preference matrix and a scoring preference matrix were built based on the 3-dimensional tensor. Finally, a joint recommendation algorithm was designed based on the completed tensor and the two preference matrices, and the differential evolution algorithm was used for parameter tuning. The experimental results show that compared with some typical and newly proposed recommendation algorithms, the proposed algorithm is superior to the compare algorithms, the precision is improved by 1.96% ~ 3.44% on average, and the recall rate is improved by 1.35%~2.40% on average.

Key words: recommendation algorithm, joint recommendation, tensor completion, user preference

收稿日期: 2019-03-04; 修回日期: 2019-10-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61202366); 广东省自然科学基金资助项目 (No.2018A030313438, No.2018A030313889); 广东省科技计划资助项目 (No.2019B010116001)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61202366), The Natural Science Foundation of Guangdong Province (No.2018A030313438, No.2018A030313889), Science and Technology Planning Project of Guangdong Province (No.2019B010116001)

1 引言

随着计算机技术的发展与应用,越来越多的用户通过网络获取信息,使互联网上的数据呈爆发式增长趋势。如何在“信息超载”的时代为用户进行精准推荐是目前众多学者所关注的问题。推荐系统能够根据用户喜好过滤冗余的信息进而为用户自动推荐^[1]。推荐系统使用户能够更加快速地获取自己感兴趣的信息,节省用户的时间成本,增强产品的用户体验。近年来,推荐系统得到了广泛应用,推荐算法的种类也越来越多样化^[1-2]。

目前,主流的推荐算法主要包括基于协同过滤的推荐算法^[3-5]、基于矩阵分解的推荐算法^[6-7]、基于关系网络的推荐算法^[8]、基于机器学习的推荐算法^[9-11]和混合推荐算法^[12]等。基于协同过滤的推荐算法和基于矩阵分解的推荐算法往往只构建用户和项目之间的评分矩阵,根据相似用户进行推荐。基于关系网络的推荐算法挖掘用户与用户、项目与项目之间更深层次的联系,利用图或网的形式进行推荐,它与基于机器学习的推荐算法一样,当用户及项目数量较大时,算法的计算量较大,因此通常需要高性能硬件环境的支撑。在一个实际的推荐系统中,所能获得的数据除了用户对项目的评分,通常还包含项目的分类情况,例如,小说可以分成科幻、历史等类别,电影可以分为喜剧、战争、动画等类别。如果能很好地利用项目的类别信息,将有助于提升推荐质量。然而,上述推荐算法仅依据评分数据进行推荐,忽略了项目的类别信息。

张量是矢量概念和矩阵概念的推广,它可以表示更高维度的数据。近些年来,有些研究开始引入评分数据之外的信息构建三维张量,例如类别信息和时间信息等,进而设计推荐算法。相对于二维的评分数据,考虑了其他维度信息的三维张量更加稀疏和复杂。文献[13]在电影推荐中将用户-电影-类别组成的三维张量拆分为用户-电影、电影-类别的双边关系,然后使用矩阵分解等算法进行处理并推荐。文献[14]构建用户-项目-时间的三维张量,提出一种基于审美的衣服推荐算法,但是也将三维张量转化成多个二维矩阵进行处理,虽然考虑了三维的数据信息,但丢失了数据之间整体的联系性。文献[15]构建用户-标签-项目的三维张量用于标签推荐,利用低阶多项式改进了用户、项目和标签之间

的统计信息,同时解决了数据稀疏性问题。尽管其相对于经典的 CP (CANDECOMP/PARAFAC) 分解和 Tucker 分解^[16]在时间和空间的复杂性上都有所改善,但是计算成本依然相对较高,因而只能用于小规模三维张量。文献[17]利用高阶奇异值分解 (HOSVD, high order singular value decomposition) 进行音乐推荐。并通过音乐之间的相似性来解决数据稀疏性问题。文献[18]在标签推荐上采用了与文献[17]类似的方式,但这 2 种方法都没有采用迭代处理提升准确度。

在一些大型系统中,项目和用户的数量都很庞大,而用户评分过的项目通常很少,2 个用户共同评分过的项目更少,解决数据稀疏问题是提高推荐质量的关键。张量填补是解决数据稀疏性的一种常用方法。文献[19]通过张量因式分解的形式填补张量中的缺失值,但它只适用于 $N \times N \times N$ 的张量。文献[20]提出利用黎曼流形和非线性梯度下降的方式来填补张量中的缺失值,虽然能处理更高维度的数据,但要求张量的秩已知或者可以被测量。

推荐算法要向用户推荐其喜欢的项目,也就是说要“投其所好”。如果能从已有的数据中分析挖掘用户的偏好信息,并在推荐算法中加以应用,将会使推荐更加切合用户的需求,有助于提高推荐效果^[21]。因此,本文综合考虑用户的项目类别偏好和评分偏好,提出了一种基于张量填补和用户偏好的联合推荐 (TCUP, tensor completion and user preference) 算法。首先,基于评分矩阵和项目所属类别矩阵构建用户-项目-类别的三维张量;然后,利用 Frank-Wolfe 算法进行迭代计算,填补张量中的缺失数据,同时基于张量数据构建用户类别偏好矩阵和评分偏好矩阵;最后,基于填补后的三维张量以及 2 个偏好矩阵设计了联合推荐算法,并采用差分进化算法进行参数调优。为了验证 TCUP 算法的有效性,本文使用 MovieLens^[22]数据集进行测试。在 4 种不同规模数据集下的实验结果表明,TCUP 算法的数据填补效果和推荐效果优于一些常用和新近提出的算法。

2 相关知识

2.1 张量的相关符号及计算式

本文中,向量和矩阵分别用小写和大写的加粗字母表示,张量用加粗的花体字母表示。文中涉及

的相关符号和计算式如下。

$\|A\|_* = \sum_i \sigma_i$ 表示矩阵的核范数，其中 σ_i 表示矩阵 A 的奇异值。

$\mathcal{X} \in \mathbb{R}^{I_1 \times I_2 \times \dots \times I_D}$ 表示 \mathcal{X} 是一个 D 阶(维)张量， I_1, I_2, \dots, I_D 分别表示 \mathcal{X} 各个维度的大小。

$\langle \mathcal{X}, \mathcal{Y} \rangle = \sum_{i_1=1}^{I_1} \dots \sum_{i_D=1}^{I_D} \mathcal{X}_{i_1 \dots i_D} \mathcal{Y}_{i_1 \dots i_D}$ 表示 2 个相同维度的张量 \mathcal{X} 和 \mathcal{Y} 的内积， $\mathcal{X}_{i_1 \dots i_D}$ 和 $\mathcal{Y}_{i_1 \dots i_D}$ 分别表示 \mathcal{X} 和 \mathcal{Y} 中的元素。

$\langle A, B \rangle = \text{tr}(A^T B)$, $\text{tr}(A^T B)$ 表示 $A^T B$ 的迹。

$\|\mathcal{X}\|_F = \sqrt{\langle \mathcal{X}, \mathcal{X} \rangle}$ 表示张量 \mathcal{X} 的 F -范数。

$\mathcal{X}_{\langle d \rangle}$ 表示张量的矩阵化，它表示张量 \mathcal{X} 沿第 d 维的展开矩阵，其行数为 I_d ，列数为 $\frac{I_1 I_2 \dots I_D}{I_d}$ ，张量 \mathcal{X} 中的元素 $\mathcal{X}_{i_1 \dots i_D}$ 在矩阵 $\mathcal{X}_{\langle d \rangle}$ 中的坐标为 (i_d, j) ， $j = 1 + \sum_{l=1, l \neq d}^D (i_l - 1) \prod_{m=1, m \neq d}^{l-1} I_m$ 。

$A^{\langle d \rangle}$ 表示矩阵的张量化，它表示一个张量，其沿第 d 维的展开矩阵为 A ，即 $(\mathcal{X}_{\langle d \rangle})^{\langle d \rangle} = \mathcal{X}$ 。

为了便于理解张量的矩阵化和矩阵的张量化，下面给出一个三阶张量的示例（文中所述张量皆为三阶张量）。假设 \mathcal{X} 为图 1 所示的 $3 \times 4 \times 2$ 的张量，即 $\mathcal{X} \in \mathbb{R}^{3 \times 4 \times 2}$ 。

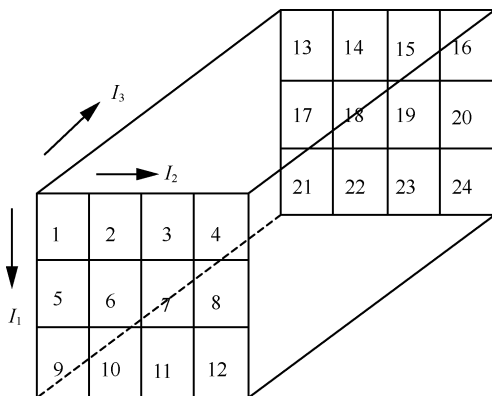


图 1 张量示例

那么，张量 \mathcal{X} 的矩阵化可表示为如式(1)~式(3)所示的形式。

$$\mathcal{X}_{\langle 1 \rangle} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 13 & 14 & 15 & 16 \\ 5 & 6 & 7 & 8 & 17 & 18 & 19 & 20 \\ 9 & 10 & 11 & 12 & 21 & 22 & 23 & 24 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\mathcal{X}_{\langle 2 \rangle} = \begin{bmatrix} 1 & 5 & 9 & 13 & 17 & 21 \\ 2 & 6 & 10 & 14 & 18 & 22 \\ 3 & 7 & 11 & 15 & 19 & 23 \\ 4 & 8 & 12 & 16 & 20 & 24 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\mathcal{X}_{\langle 3 \rangle} = \begin{bmatrix} 1 & 5 & 9 & \dots & 4 & 8 & 12 \\ 13 & 17 & 21 & \dots & 16 & 20 & 24 \end{bmatrix} \quad (3)$$

2.2 FW 算法

FW (Frank-Wolfe) 算法是一种求解受限(带约束)凸优化问题的方法。它采用迭代计算的方式，将非线性优化问题转换成一系列线性优化问题进行求解。FW 算法能够应用于矩阵分解，并能保证较好的收敛性^[23]。假设有优化问题 $\min_{x \in \mathcal{D}} f(x)$ ，其中， $f(x)$ 是连续可微的凸函数， \mathcal{D} 为凸形紧集，即在集合 \mathcal{D} 内最小化 $f(x)$ 的值。FW 算法求解该问题的流程如算法 1 所示。

算法 1 Frank-Wolfe 算法

- 1) 设置最大迭代次数 T 。
- 2) 初始化一个解 $\mathbf{x}^{(0)}$ ，当前迭代次数 $t=0$ 。
- 3) 求解线性优化问题 $\mathbf{s}^{(t+1)} = \underset{s \in \mathcal{D}}{\text{argmin}} \langle \mathbf{s}, \nabla f(\mathbf{x}^{(t)}) \rangle$ ，构建可行的下降方向。
- 4) 搜索 $\gamma^{(t+1)} = \underset{\gamma \in [0,1]}{\text{argmin}} f(\mathbf{x}^{(t)} + \gamma(\mathbf{s}^{(t+1)} - \mathbf{x}^{(t)}))$ 确定迭代步长。
- 5) 进行一次迭代， $\mathbf{x}^{(t+1)} = \mathbf{x}^{(t)} + \gamma^{(t+1)} \cdot (\mathbf{s}^{(t+1)} - \mathbf{x}^{(t)})$ 。
- 6) 更新当前迭代次数， $t=t+1$ 。
- 7) 当前迭代次数 t 是否达到最大迭代次数 T ，若是则停止迭代并输出 $\mathbf{x}^{(t)}$ ，否则重复步骤 3)~步骤 6)。

3 联合推荐算法

基于张量填补和用户偏好的联合推荐算法包括以下 4 个步骤：张量构建、张量填补、偏好构建和联合推荐，如图 2 所示。下面分别介绍这 4 个步骤。

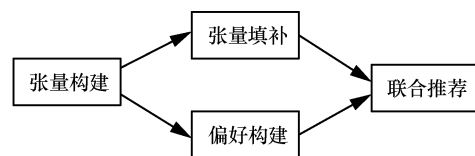


图 2 联合推荐算法的步骤

3.1 张量构建

根据用户对项目的评分数据和项目所属的类

别数据可分别构建矩阵 M 和 N 。矩阵 M 中记录用户对项目的评分，如果某个用户对某个项目有评分，则对应的元素为该评分值，否则为 0。矩阵 N 记录项目所属的类别，如果某个项目属于某个类别，则对应的元素为 1，否则为 0。一个项目可以属于多个类别。

根据矩阵 M 和 N 可构建 2 个三维张量 \mathcal{A} 和 \mathcal{B} 如式(4)和式(5)所示。

$$\mathcal{A}_{uic} = \begin{cases} M_{ui}, & M_{ui} \neq 0, N_{ic} \neq 0 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

$$\mathcal{B}_{uic} = \begin{cases} 1, & M_{ui} \neq 0, N_{ic} \neq 0 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

其中， u, i 和 c 分别表示用户、项目和类别的坐标。此外，本文用 U, I 和 C 分别表示用户、项目和类别的数量。

3.2 张量填补

张量 \mathcal{A} 通常非常稀疏，本文利用张量填补的方式来填补其中缺失的数据。对于已知的 D (这里 $D=3$) 维张量 \mathcal{A} ，假设令 \mathcal{A} 中元素不为 0 的坐标构成的集合为 Ω ，其张量填补可表述成如下优化问题：寻找一个与 \mathcal{A} 规模相同的张量 \mathcal{X} ，使

$$\min: F(\mathcal{X}) = \frac{1}{2} \|\mathcal{P}_\Omega(\mathcal{X} - \mathcal{A})\|_F^2 \quad (6)$$

$$\text{s.t. Rank}(\mathcal{X}) \leq \tau \quad (7)$$

其中， $\mathcal{P}_\Omega(\mathcal{X} - \mathcal{A})$ 是一个张量，当 $(i_1, i_2, \dots, i_D) \in \Omega$ 时， $[\mathcal{P}_\Omega(\mathcal{X} - \mathcal{A})]_{i_1 \dots i_D} = \mathcal{X}_{i_1 \dots i_D} - \mathcal{A}_{i_1 \dots i_D}$ ，否则 $[\mathcal{P}_\Omega(\mathcal{X} - \mathcal{A})]_{i_1 \dots i_D} = 0$ 。该张量填补问题即为，找一个秩不超过 τ 的张量 \mathcal{X} ，使在 Ω 范围内 \mathcal{X} 同 \mathcal{A} 尽可能接近。

在矩阵填补中，核范数 (nuclear norm) 常用来替代矩阵的秩。对于张量，也有一些核范数，例如 overlapped 核范数^[24]和 scaled-latent 核范数^[25]等，而 scaled-latent 核范数在低秩张量填补中优于 overlapped 核范数^[26]。因此本文用 scaled-latent 核范数来代替张量的秩。

\mathcal{X} 的 scaled-latent 核范数定义为

$$\|\mathcal{X}\|_{\text{scaled}} = \min_{\sum_{d=1}^D \mathcal{X}_d = \mathcal{X}} \sum_{d=1}^D \frac{1}{\sqrt{I_d}} \|(\mathcal{X}_d)_{\langle d \rangle}\|_* \quad (8)$$

式(8)表示将 \mathcal{X} 拆解成 D 个张量的和 (D 为 \mathcal{X} 的维度)，要找到一种拆解方式使 $\sum_{d=1}^D \frac{1}{\sqrt{I_d}} \|(\mathcal{X}_d)_{\langle d \rangle}\|_*$

最小，该最小值即为 \mathcal{X} 的 scaled-latent 核范数。那么，可以将式(7)替换成

$$\|\mathcal{X}\|_{\text{scaled}} \leq \tau \quad (9)$$

下面采用 FW 算法求解由式(6)和式(9)构成的优化问题。根据式(6)，FW 算法中的步骤 3) 可写为

$$\mathcal{S}^{(t+1)} = \underset{\|\mathcal{S}\|_{\text{scaled}} \leq \tau}{\text{argmin}} \langle \mathcal{S}, \nabla F(\mathcal{X}^{(t)}) \rangle = \underset{\|\mathcal{S}\|_{\text{scaled}} \leq \tau}{\text{argmin}} \langle \mathcal{S}, \mathcal{P}_\Omega(\mathcal{X}^{(t)} - \mathcal{A}) \rangle \quad (10)$$

虽然式(10)是一个线性优化问题，但由于 scaled-latent 核范数的定义较为复杂，因而式(10)中的约束较为复杂，很难求得式(10)的最优解，因此本文采用如下方法求其次优解：首先构造一批满足约束条件 $\|\mathcal{S}\|_{\text{scaled}} \leq \tau$ 的可行解，然后从这些可行解中挑选最优解。

构造与 \mathcal{X} 规模相同的张量 $\mathcal{G}_{d,k,l} = l\tau\sqrt{I_d}(\mathbf{u}_k \mathbf{v}_k^T)^{\langle d \rangle}$ ，其中， $d \in \{1, \dots, D\}$ ， \mathbf{u}_k 和 \mathbf{v}_k 分别为 $(\mathcal{P}_\Omega(\mathcal{X}^{(t)} - \mathcal{A}))_{\langle d \rangle}$ 的某个奇异值 σ_k 对应的左右奇异(列)向量， $l \in [-1, 1]$ 。 $\mathcal{G}_{d,k,l}$ 可以拆解成如下 D 个张量的和。

$$\mathcal{G}_1 = \dots = \mathcal{G}_{d-1} = \mathcal{G}_{d+1} = \dots = \mathcal{G}_D = 0, \quad \mathcal{G}_d = \mathcal{G}_{d,k,l}$$

即 $\mathcal{G}_{d,k,l} = \sum_{i=1}^D \mathcal{G}_i$ ，并且有

$$\begin{aligned} \sum_{d=1}^D \frac{1}{\sqrt{I_d}} \|(\mathcal{G}_d)_{\langle d \rangle}\|_* &= \frac{1}{\sqrt{I_d}} \|(\mathcal{G}_{d,k,l})_{\langle d \rangle}\|_* = \\ \frac{1}{\sqrt{I_d}} \|l\tau\sqrt{I_d}(\mathbf{u}_k \mathbf{v}_k^T)^{\langle d \rangle}\|_* &= \\ \frac{1}{\sqrt{I_d}} \|l\tau\sqrt{I_d}(\mathbf{u}_k \mathbf{v}_k^T)\|_* &\leq |l|\tau \leq \tau \quad (11) \end{aligned}$$

因此，根据式(8)可知 $\|\mathcal{G}_{g,k,l}\|_{\text{scaled}} \leq \tau$ ，即张量 $\mathcal{G}_{g,k,l}$ 满足式(10)中的约束条件。选择不同的 d 值、 $(\mathcal{P}_\Omega(\mathcal{X}^{(t)} - \mathcal{A}))_{\langle d \rangle}$ 不同的奇异值 σ_k ，以及不同的 l 值，可以构造很多这样的张量 $\mathcal{G}_{g,k,l}$ 。

下面计算 $\langle \mathcal{G}_{d,k,l}, \mathcal{P}_\Omega(\mathcal{X}^{(t)} - \mathcal{A}) \rangle$ 的值。假设 $(\mathcal{P}_\Omega(\mathcal{X}^{(t)} - \mathcal{A}))_{\langle d \rangle}$ 是秩为 r 的矩阵，其奇异值分解为

$$[\mathbf{u}_1 \cdots \mathbf{u}_r] \begin{bmatrix} \sigma_1 & & \\ & \ddots & \\ & & \sigma_r \end{bmatrix} [\mathbf{v}_1 \cdots \mathbf{v}_r]^T = \sum_{i=1}^r \sigma_i \mathbf{u}_i \mathbf{v}_i^T \quad (12)$$

其中, $\sigma_k > 0$ 为奇异值, \mathbf{u}_k 和 \mathbf{v}_k 为对应的左右奇异(列)向量。由于左奇异向量之间两两正交, 右奇异向量之间两两正交, 则

$$\begin{aligned} \langle \mathbf{g}_{d,k,l}, \mathcal{P}_\Omega(\mathcal{X}^{(t)} - \mathcal{A}) \rangle &= \\ \langle l\tau\sqrt{I_d}(\mathbf{u}_k \mathbf{v}_k^T)^{<d>}, \mathcal{P}_\Omega(\mathcal{X}^{(t)} - \mathcal{A}) \rangle &= \\ \langle l\tau\sqrt{I_d}(\mathbf{u}_k \mathbf{v}_k^T), (\mathcal{P}_\Omega(\mathcal{X}^{(t)} - \mathcal{A}))_{<d>} \rangle &= \\ \langle l\tau\sqrt{I_d}(\mathbf{u}_k \mathbf{v}_k^T), \sum_{i=1}^r \sigma_i \mathbf{u}_i \mathbf{v}_i^T \rangle &= \\ l\tau\sqrt{I_d} \sum_{i=1}^r (\sigma_i \langle \mathbf{u}_k \mathbf{v}_k^T, \mathbf{u}_i \mathbf{v}_i^T \rangle) &= \\ l\tau\sqrt{I_d} \sum_{i=1}^r (\sigma_i \text{tr}(\mathbf{v}_k \mathbf{u}_k^T \mathbf{u}_i \mathbf{v}_i^T)) &= l\tau\sqrt{I_d} \sigma_k \end{aligned} \quad (13)$$

由于式(10)要求最小值, 根据式(13)可知, $\mathcal{S}^{(t+1)}$ 为所构造的张量 $\mathbf{g}_{g,k,l}$ 中使 $\langle \mathbf{g}_{d,k,l}, \mathcal{P}_\Omega(\mathcal{X}^{(t)} - \mathcal{A}) \rangle$ 最小的那个, 其 l 等于 -1 , σ_k 为 $(\mathcal{P}_\Omega(\mathcal{X}^{(t)} - \mathcal{A}))_{<d>}$ 的最大奇异值, d 为使 $\sqrt{I_d} \sigma_k$ 达到最大的值。 σ_k 可以通过幂法快速求得。

对于 FW 算法中的步骤 4), 根据式(6), 要求 γ 使 $\|\mathcal{P}_\Omega(\mathcal{X}^{(t)} + \gamma(\mathcal{S}^{(t+1)} - \mathcal{X}^{(t)}) - \mathcal{A})\|_F^2$ 达到最小。可令 $b = \mathcal{P}_\Omega(\mathcal{X}^{(t)} - \mathcal{A})$, $c = \mathcal{P}_\Omega(\mathcal{S}^{(t+1)} - \mathcal{X}^{(t)})$, 则

$$\begin{aligned} \|\mathcal{P}_\Omega(\mathcal{X} + \gamma(\mathcal{S}^{(t+1)} - \mathcal{X}^{(t)}) - \mathcal{A})\|_F^2 &= \\ \langle b + \gamma c, b + \gamma c \rangle &= \\ \langle c, c \rangle \gamma^2 + 2 \langle b, c \rangle \gamma + \langle b, b \rangle \end{aligned} \quad (14)$$

式(14)是一个开口向上的二次函数, 并在 $-\frac{\langle b, c \rangle}{\langle c, c \rangle}$ 处取得极小值。 γ 的取值范围为 $[0, 1]$, 则很容易根据 $-\frac{\langle b, c \rangle}{\langle c, c \rangle}$ 选取最优的 γ 值。

另外, 根据上面的求解过程可知, 采用 FW 算法进行张量填补的计算开销较小。

3.3 偏好构建

一般的推荐算法都是直接依据张量(或矩阵)填补后的数据进行推荐, 然而本文认为, 张量填补

虽然能够填补缺失的数据, 但并不能就此做出推荐, 因为张量填补没有很好地考虑到用户的偏好信息。以书籍推荐为例, 如果某用户从未接触过历史类型的书籍, 但在填补后的张量中, 可能由于有一些与他相似的用户给历史类型书籍评了高分, 导致某些历史类型的书籍被该用户评了高分(不是该用户进行的评分, 而是被填补的)而被推荐, 因此需要考虑用户的类别偏好。如果某用户特别偏爱历史类型的书籍, 对历史类型书籍的评分明显高于其他用户, 那么有可能因为其他用户对历史类型书籍的评分过低, 导致历史类型的书籍被该用户评分(不是该用户进行的评分, 而是被填补的)过低而不被推荐, 因此需要考虑用户的评分偏好。所以, 在推荐中加入用户的类别偏好和评分偏好将有助于提升推荐质量。

根据张量 \mathcal{A} 和 \mathcal{B} 构建用户的类别偏好矩阵 \mathbf{P} 和评分偏好矩阵 \mathbf{Q} 。用户 u 对类别 c 的偏好定义为, 用户 u 对类别 c 项目的评分次数除以用户 u 对所有类别项目的总评分次数, 其计算方法为

$$P_{uc} = \frac{\sum_{i=1}^I \mathcal{B}_{uic}}{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^C \mathcal{B}_{uij}} \quad (15)$$

用户 u 对类别 c 的评分偏好定义为, 用户 u 对类别 c 项目的平均评分减去其他用户对类别 c 项目的平均评分, 其计算方法为

$$Q_{uc} = \frac{\sum_{i=1}^I \mathcal{A}_{uic}}{\sum_{i=1}^I \mathcal{B}_{uic}} - \frac{\sum_{i=1}^{u-1} \sum_{j=1}^I \mathcal{A}_{ijc} + \sum_{i=u+1}^U \sum_{j=1}^I \mathcal{A}_{ijc}}{\sum_{i=1}^{u-1} \sum_{j=1}^I \mathcal{B}_{ijc} + \sum_{i=u+1}^U \sum_{j=1}^I \mathcal{B}_{ijc}} \quad (16)$$

用户的类别偏好矩阵 \mathbf{P} 和评分偏好矩阵 \mathbf{Q} 分别表示为

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \cdots & P_{1C} \\ P_{21} & P_{22} & \cdots & P_{2C} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{U1} & P_{U2} & \cdots & P_{UC} \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & \cdots & Q_{1C} \\ Q_{21} & Q_{22} & \cdots & Q_{2C} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Q_{U1} & Q_{U2} & \cdots & Q_{UC} \end{bmatrix} \quad (18)$$

3.4 联合推荐

假设张量 \mathcal{A} 填补后的张量为 \mathcal{A}' 。为了进行最后的推荐, 需要根据三维张量 \mathcal{A}' , 以及类别偏好矩阵 \mathbf{P} 和评分偏好矩阵 \mathbf{Q} 计算得到 U 行 I 列的推荐矩阵 \mathbf{O} , 矩阵 \mathbf{O} 的元素表示各个项目对各个用户的推荐程度。下面给出矩阵 \mathbf{O} 的计算方法。

在张量 \mathcal{A}' 中, 用户 u 和项目 i 对应一个类别向量 \mathbf{A}'_{ui*} ; 在矩阵 \mathbf{P} 和 \mathbf{Q} 中, 用户 u 分别对应向量 \mathbf{P}_{u*} 和 \mathbf{Q}_{u*} ; 这 3 个向量的长度均为 C 。本文根据这 3 个向量来计算 \mathbf{O}_{ui} 的值 (注意, 如果用户 u 已经对项目 i 评过, 则不需要计算 \mathbf{O}_{ui} 的值), 计算方法如图 3 所示。首先对 3 个向量进行加权求和得到一个向量, 然后取该向量的最大元素作为最终 \mathbf{O}_{ui} 的值。

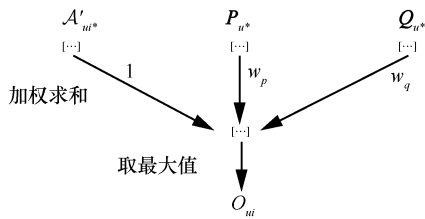


图 3 推荐程度值的计算

本文采用差分进化算法来确定 $\mathbf{w}=(w_p, w_q)$ 的最优值。差分进化算法是基于种群的全局优化方法, 包括变异、交叉和选择 3 种基本操作^[27]。详细步骤如算法 2 所示, 其中 \mathbf{w} 为个体, 个体的适应度函数为以该个体为权重时的推荐精度 (精度的定义参见 4.2 节)。

算法 2 求最优权重的差分进化算法

- 1) 设置种群大小 NP、最大迭代次数 G 、缩放因子 F 和交叉概率 CR。
- 2) 随机产生初始种群中的个体 $\mathbf{w}_i, i=1,2,\dots, NP$, 当前代数 $g=0$ 。
- 3) 变异。种群内个体的差分向量经过缩放与种群内相异的个体相加产生变异个体 $\mathbf{v}_i=\mathbf{w}_a+F(\mathbf{w}_b-\mathbf{w}_c), i\neq a\neq b\neq c$ 。
- 4) 交叉。变异个体和原个体进行交叉, 产生试验个体 \mathbf{u}_i : 如果 $\text{rand}(0,1)\leq CR$, 那么 $\mathbf{u}_{i,j}=\mathbf{v}_{i,j}$, 否则 $\mathbf{u}_{i,j}=\mathbf{w}_{i,j}, j$ 表示个体的分量, 且保证 \mathbf{u}_i 至少包含变异个体 \mathbf{v}_i 的一个分量。
- 5) 选择。挑选原个体 \mathbf{w}_i 和试验个体 \mathbf{u}_i 中适应度函数值大的那个作为新的个体 \mathbf{w}_i 进入下一代种群, 更新当前代数 $g=g+1$ 。

6) 如果 $g=G$, 则停止迭代并输出种群中的最优个体; 否则重复步骤 3)~步骤 5)。

4 实验结果及分析

4.1 数据集及实验环境

实验所用的数据来源于 MovieLens^[22] 上最新的数据集, 数据集中评分的范围为 0.5~5 (包含 0.5 分和 5 分), 且为 0.5 的倍数。为了验证不同数据规模对实验结果的影响, 本文使用 4 种不同规模的数据集进行测试, 各数据集的相关信息如表 1 所示。

数据集名称	用户数/个	电影数/个	类别/种	评分次/次	稠度
300u	300	4 667	19	66 887	0.251 4%
1200u	1 200	9 253	19	328 135	0.155 5%
2400u	2 400	11 292	19	611 198	0.118 7%
4000u	4 000	13 370	19	1 028 536	0.101 2%

每个数据集被随机分成 80% 的训练集和 20% 的测试集。实验在配置为 Intel Core i7 3.40 GHz CPU、24 GB 内存的 Windows 7 PC 机上进行, 运行环境为 Matlab R2014a。

4.2 评价指标

从误差和准确性两方面来评测推荐算法的性能。评价误差的性能指标包括平均绝对误差 (MAE, mean absolute error) 和均方根误差 (RMSE, root mean square error), 用来衡量在测试集中张量填补值与真实值之间的误差, 计算方法如下。

$$MAE = \frac{\sum_{(u,i,c)\in\mathcal{T}} |t_{uic} - \hat{t}_{uic}|}{|\mathcal{T}|} \quad (19)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{(u,i,c)\in\mathcal{T}} (t_{uic} - \hat{t}_{uic})^2}{|\mathcal{T}|}} \quad (20)$$

其中, \mathcal{T} 表示测试集, $|\mathcal{T}|$ 表示测试集的大小, t_{uic} 表示测试集中真实的评分数据, \hat{t}_{uic} 表示经过张量填补计算得到的评分值。评价准确性的性能指标包括精度 Precision、召回率 Recal、负正率 FPR、F1 分数和准确率 Accuracy, 用来衡量推荐效果的好坏, 可通过 TP (true positive)、TN (true negative)、FP (false positive) 和 FN (false negative) 进行计算。TP、TN、FP 和 FN 分别表示测试集中以下元素的

数量。

TP: 项目推荐给用户, 且事实上用户也对项目评过。

TN: 项目未推荐给用户, 且事实上用户未对项目评过。

FP: 项目推荐给用户, 但事实上用户未对项目评过。

FN: 项目未推荐给用户, 但事实上用户对项目评过。

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP+FP} \quad (21)$$

$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP+FN} \quad (22)$$

$$\text{FPR} = \frac{FP}{FP+TN} \quad (23)$$

$$\text{F1} = \frac{2\text{PrecisionRecall}}{\text{Precision}+\text{Recall}} \quad (24)$$

$$\text{Accuracy} = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN} \quad (25)$$

4.3 对比算法及参数测定

本文将提出的基于张量填补和用户偏好的联合推荐算法 TCUP 与 4 种典型的以及 2 种新近的推荐算法进行对比测试, 对比算法及其用到的主要相关参数如表 2 所示。

由于 LRML 算法没有依据具体的评分值进行推荐, 而只是将条目 (用户, 项目) 标记为 0 或 1, 分别表示用户是否对该项目评过, 因此对于该算法本文不进行填补误差的分析, 而只进行推荐准确性的分析。结合文献[3,6,9-11,17,20]中的参数设置, 以及文献[7]中对比测试时的参数设置, 并通过多次实验为各算法选择最优参数, 结果如表 3 所示。在测试 TCUP 算法中的最优权重 w_p 和 w_q 时, 计算的是 top@10 下的最优权重, 并以此权重作为其他 top@N 推荐的权重。差分进化算法的参数如下: 种群大小 NP 为 20, 缩放因子 F 为 0.2, 交叉概率为 CR 为 0.9, 最大进化代数 G 为 20。以下所有测试均是在最优参数下进行的。

4.4 张量填补的误差分析

误差分析是用来评测各算法填补得到的评分值与测试集中真实值的偏差情况, 结果如表 4 所示。由表 4 中的结果可知, 在 300u 数据集下, ALS 算法表现最差, SVD++ 算法表现最好。在其他更大规

模的数据集下, HOSVD 算法的误差明显高于其他算法; SVD++、Precon 和 TCUP 算法表现较好, 误差明显低于其他 3 种算法, 其中 TCUP 算法略优于 SVD++ 和 Precon 算法。从总体上来看, TCUP 算法的综合表现最优, 尤其是当应用于较大规模的数据集时。

表 2 对比算法及相关参数

算法	简介	参数
UserCF ^[3]	UCF (user collaborative filtering, 基于用户的协同过滤), 它根据用户之间的相似度和最近邻的评分进行推荐	近邻数量 k
ALS ^[9]	ALS (alternating least square, 交替最小二乘法), 它相当于一种用户和项目协同过滤的混合推荐算法	隐因子个数 r
HOSVD ^[17]	HOSVD (high order singular value decomposition, 高阶奇异值分解), 它将一个张量近似表示成核张量和因子矩阵乘积的形式, 并根据近似张量中的填补值进行推荐	核张量大小 R
SVD++ ^[6]	SVD (singular value decomposition, 奇异值分解) 的一种改进方式, 它在考虑了用户偏置和项目偏置的情况下进行推荐	学习率 b 、正则化参数 u 和步长 v
Precon ^[20]	利用 Tucker 分解的对称结构提出一种基于黎曼流形处理的张量填补方法, 并应用于电影评分数据的填补	核张量大小 R
LRML ^[10]	LRML (latent relational metric learning), 采用一个增强的记忆模块, 通过记忆块来学习构建用户和项目之间的潜在关系	嵌入层维度 d 和切片数量 N
TCUP	TCUP (tensor completion and user preference), 本文提出的基于张量填补和用户偏好的联合推荐算法	张量秩的限制 τ , 偏好权重 w_p 和 w_q

表 3 不同算法的参数设置

算法	300u	1200u	2400u	4000u
UserCF	$k=12$	$k=19$	$k=26$	$k=28$
ALS	$r=2$	$r=2$	$r=2$	$r=2$
HOSVD	$R=20$	$R=45$	$R=55$	$R=70$
SVD++	$b=u=v=0.15$	$b=u=v=0.1$	$b=u=v=0.1$	$b=u=v=0.1$
Precon	$R=2$	$R=2$	$R=2$	$R=2$
LRML	$d=100$ $N=25$	$d=100$ $N=50$	$d=100$ $N=50$	$d=100$ $N=100$
TCUP	$\tau=65$ $w_p=0.49$ $w_q=0.98$	$\tau=95$ $w_p=0$ $w_q=0.33$	$\tau=120$ $w_p=0.32$ $w_q=0.51$	$\tau=140$ $w_p=0$ $w_q=0.31$

4.5 推荐算法的准确性分析

图 4 和图 5 分别展示了不同数据集下各算法的精度和召回率的对比, 其中 top@N 表示向每个用户

表 4 误差分析比较

算法	300u		1200u		2400u		4000u	
	MAE	RMSE	MAE	RMSE	MAE	RMSE	MAE	RMSE
UserCF	0.783 2	1.011 7	0.709 9	0.927 4	0.699 4	0.921 3	0.687 0	0.903 3
ALS	0.979 6	1.373 4	0.698 0	0.941 6	0.681 9	0.923 3	0.658 3	0.878 7
HOSVD	0.821 4	1.018 2	0.771 8	0.973 7	0.770 3	0.975 2	0.769 8	0.974 9
SVD++	0.708 5	0.911 0	0.670 2	0.873 7	0.664 3	0.865 7	0.655 0	0.854 5
Precon	0.719 9	0.944 5	0.668 0	0.875 8	0.658 7	0.862 9	0.648 1	0.851 7
TCUP	0.715 6	0.914 0	0.672 3	0.868 5	0.658 6	0.856 2	0.644 6	0.840 4

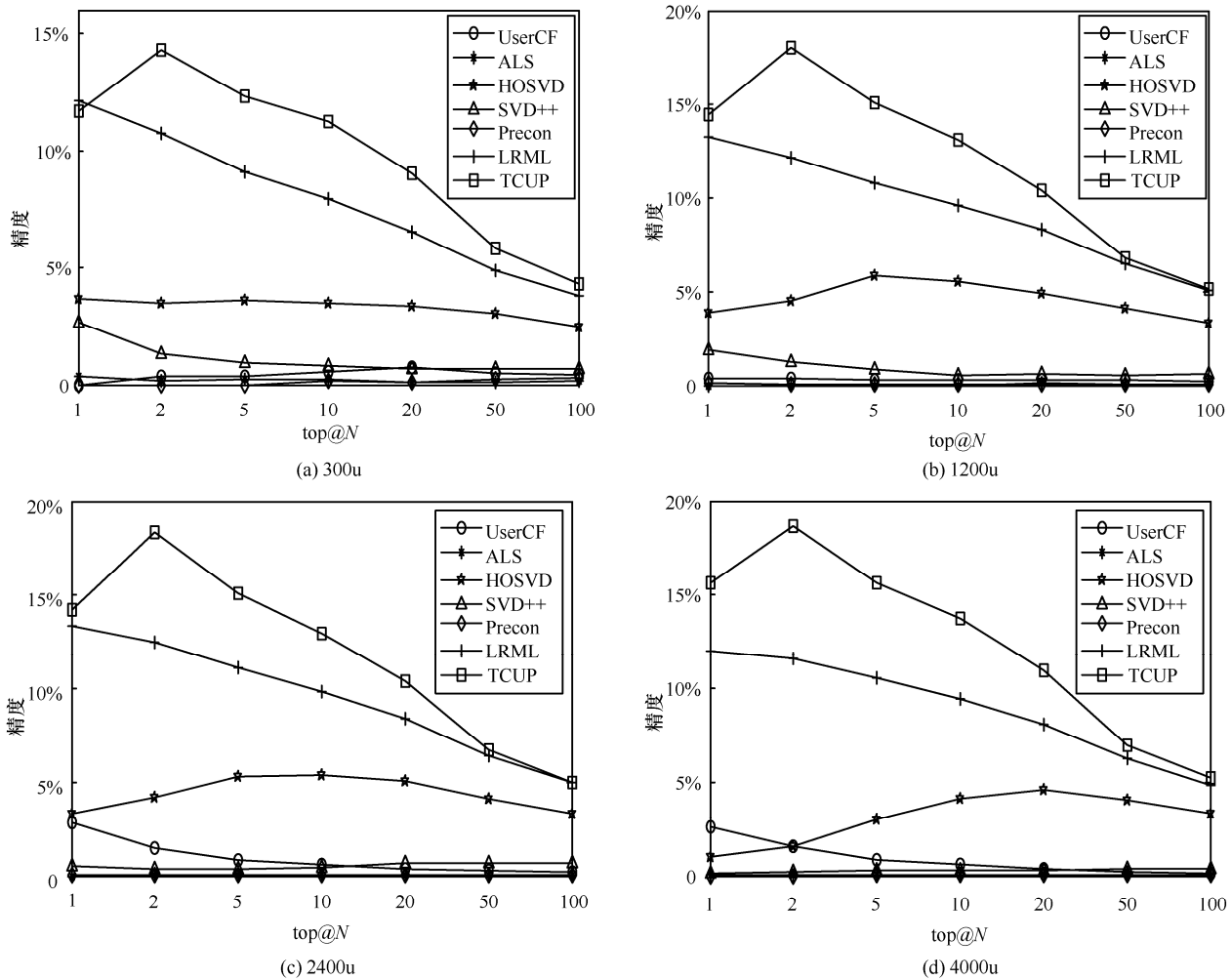


图 4 不同数据集下各算法的精度对比

推荐项目的数量。图 4 的结果表明，TCUP 算法表现最佳，其推荐精度在不同数据集下均明显高于其他算法；LRML 算法的性能次之，精度可以保持一个较好的水平；UserCF、ALS、SVD++和 Precon 算法的精度则基本一直处于较低水平。相对于 LRML 算法，在 300u 数据集下推荐时，TCUP 算法

的精度平均提升幅度最小，为 1.96%；在 4000u 数据集下进行推荐时，TCUP 算法的精度平均提升幅度最大，为 3.44%。

从图 5 可以看出，所有算法的召回率均随着 top@N 的增大而增大，这是因为随着推荐数量的增加，推荐给用户且用户评过分（即看过）的电影数

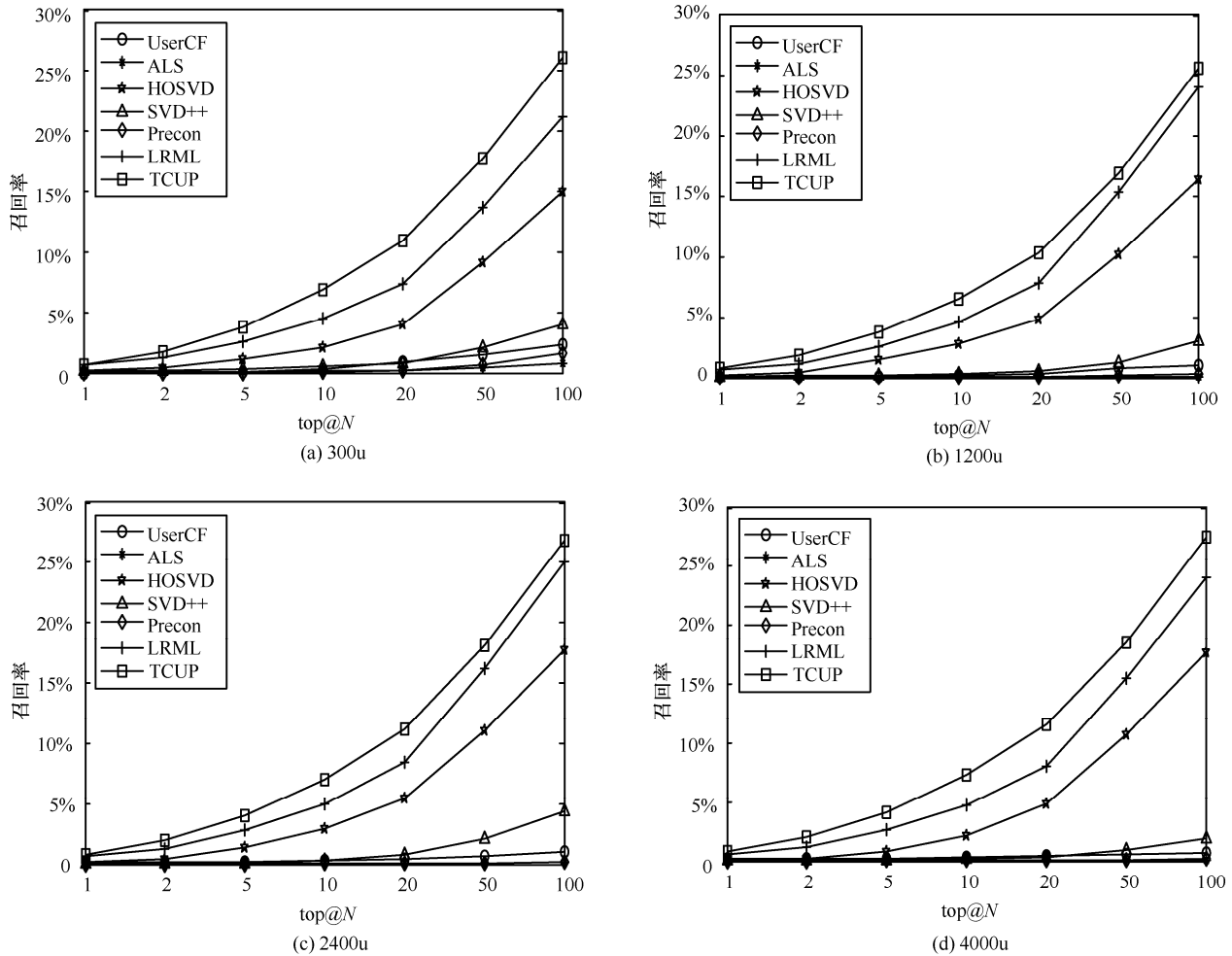


图 5 不同数据集下各算法的召回率对比

量也在增加，而用户评过（即看过）的电影数量保持不变。TCUP 算法表现最好，LRML 算法的性能略低于 TCUP；UserCF、ALS、SVD++和 Precon 算法的召回率则一直处于较低水平，性能较差。相对于 LRML 算法，在 1200u 数据集下进行推荐时，

TCUP 算法的召回率平均提升幅度最小，为 1.35%；在 300u 数据集下进行推荐时，TCUP 算法的召回率平均提升幅度最大，为 2.40%。

表 5~表 8 分别给出了不同数据集下各算法的负正率、F1 分数和准确率。结果表明，所有算法的

表 5 300u 下不同算法的性能对比

Top@N	负正率							F1 分数						准确率							
	UserCF	ALS	HOSVD	SVD++	Precon	LRML	TCUP	UserCF	ALS	HOSVD	SVD++	Precon	LRML	TCUP	UserCF	ALS	HOSVD	SVD++	Precon	LRML	TCUP
1	0.02%	0.02%	0.02%	0.02%	0.02%	0.02%	0.02%	0.00%	0.04%	0.42%	0.31%	0.00%	1.29%	1.34%	99.62%	99.62%	99.63%	99.63%	99.63%	99.60%	99.63%
2	0.04%	0.04%	0.04%	0.04%	0.04%	0.04%	0.04%	0.07%	0.04%	0.76%	0.29%	0.00%	2.16%	3.10%	99.60%	99.60%	99.61%	99.60%	99.60%	99.58%	99.62%
5	0.11%	0.11%	0.10%	0.11%	0.11%	0.10%	0.09%	0.16%	0.09%	1.68%	0.43%	0.00%	3.97%	5.75%	99.54%	99.54%	99.55%	99.54%	99.54%	99.52%	99.56%
10	0.21%	0.22%	0.21%	0.21%	0.21%	0.20%	0.19%	0.43%	0.15%	2.64%	0.60%	0.10%	5.70%	8.51%	99.43%	99.43%	99.45%	99.43%	99.43%	99.43%	99.48%
20	0.43%	0.43%	0.42%	0.43%	0.43%	0.41%	0.39%	0.80%	0.13%	3.66%	0.71%	0.13%	6.89%	9.89%	99.22%	99.22%	99.24%	99.22%	99.22%	99.23%	99.29%
50	1.07%	1.08%	1.05%	1.07%	1.07%	1.04%	1.02%	0.76%	0.18%	4.55%	1.01%	0.31%	7.20%	8.79%	98.58%	98.57%	98.64%	98.59%	98.58%	98.63%	98.70%
100	2.15%	2.16%	2.10%	2.14%	2.14%	2.10%	2.06%	0.67%	0.22%	4.24%	1.12%	0.45%	6.42%	7.40%	97.51%	97.50%	97.60%	97.52%	97.52%	97.60%	97.68%

表 6 1200u 下不同算法的性能对比

Top@N	负正率							F1 分数							准确率						
	UserCF	ALS	HOSVD	SVD++	Precon	LRML	TCUP	UserCF	ALS	HOSVD	SVD++	Precon	LRML	TCUP	UserCF	ALS	HOSVD	SVD++	Precon	LRML	TCUP
1	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%	0.03%	0.00%	0.36%	0.17%	0.01%	1.20%	1.38%	99.77%	99.77%	99.77%	99.77%	99.77%	99.76%	99.78%
2	0.02%	0.02%	0.02%	0.02%	0.02%	0.02%	0.02%	0.07%	0.00%	0.82%	0.22%	0.01%	2.11%	3.28%	99.76%	99.76%	99.76%	99.76%	99.76%	99.75%	99.77%
5	0.05%	0.05%	0.05%	0.05%	0.05%	0.05%	0.05%	0.11%	0.00%	2.34%	0.35%	0.01%	4.15%	6.02%	99.73%	99.73%	99.74%	99.73%	99.73%	99.73%	99.75%
10	0.11%	0.11%	0.10%	0.11%	0.11%	0.10%	0.09%	0.20%	0.00%	3.69%	0.36%	0.05%	6.17%	8.72%	99.68%	99.67%	99.69%	99.68%	99.68%	99.68%	99.70%
20	0.22%	0.22%	0.21%	0.22%	0.22%	0.20%	0.19%	0.31%	0.09%	4.90%	0.56%	0.06%	8.09%	10.40%	99.57%	99.57%	99.59%	99.57%	99.57%	99.59%	99.61%
50	0.54%	0.54%	0.52%	0.54%	0.54%	0.51%	0.51%	0.44%	0.01%	5.86%	0.74%	0.07%	9.15%	9.70%	99.25%	99.24%	99.29%	99.25%	99.24%	99.30%	99.32%
100	1.08%	1.09%	1.05%	1.08%	1.08%	1.04%	1.03%	0.33%	0.03%	5.47%	1.00%	0.09%	8.41%	8.53%	98.70%	98.70%	98.77%	98.71%	98.70%	98.79%	98.81%

表 7 2400u 下不同算法的性能对比

Top@N	负正率							F1 分数							准确率						
	UserCF	ALS	HOSVD	SVD++	Precon	LRML	TCUP	UserCF	ALS	HOSVD	SVD++	Precon	LRML	TCUP	UserCF	ALS	HOSVD	SVD++	Precon	LRML	TCUP
1	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%	0.29%	0.00%	0.34%	0.06%	0.00%	1.28%	1.45%	99.83%	99.83%	99.83%	99.83%	99.83%	99.82%	99.83%
2	0.02%	0.02%	0.02%	0.02%	0.02%	0.02%	0.01%	0.29%	0.01%	0.81%	0.07%	0.00%	2.28%	3.57%	99.82%	99.82%	99.82%	99.82%	99.82%	99.81%	99.82%
5	0.04%	0.04%	0.04%	0.04%	0.04%	0.04%	0.04%	0.35%	0.01%	2.24%	0.15%	0.00%	4.49%	6.44%	99.79%	99.79%	99.80%	99.79%	99.79%	99.79%	99.81%
10	0.09%	0.09%	0.08%	0.09%	0.09%	0.08%	0.08%	0.40%	0.01%	3.77%	0.31%	0.01%	6.57%	9.21%	99.75%	99.75%	99.76%	99.75%	99.75%	99.75%	99.77%
20	0.18%	0.18%	0.17%	0.18%	0.18%	0.16%	0.16%	0.37%	0.02%	5.21%	0.69%	0.02%	8.43%	11.06%	99.66%	99.66%	99.68%	99.67%	99.66%	99.67%	99.70%
50	0.44%	0.44%	0.43%	0.44%	0.44%	0.42%	0.41%	0.38%	0.03%	6.02%	1.07%	0.03%	9.19%	10.09%	99.39%	99.39%	99.43%	99.41%	99.39%	99.43%	99.47%
100	0.89%	0.89%	0.86%	0.88%	0.89%	0.85%	0.84%	0.31%	0.04%	5.59%	1.16%	0.05%	8.29%	8.68%	98.95%	98.95%	99.01%	98.99%	98.95%	99.02%	99.07%

表 8 4000u 下不同算法的性能对比

Top@N	负正率							F1 分数							准确率						
	UserCF	ALS	HOSVD	SVD++	Precon	LRML	TCUP	UserCF	ALS	HOSVD	SVD++	Precon	LRML	TCUP	UserCF	ALS	HOSVD	SVD++	Precon	LRML	TCUP
1	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%	0.26%	0.00%	0.10%	0.02%	0.00%	1.14%	1.57%	99.85%	99.85%	99.85%	99.85%	99.85%	99.84%	99.85%
2	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%	0.30%	0.00%	0.30%	0.03%	0.00%	2.09%	3.59%	99.84%	99.84%	99.84%	99.84%	99.84%	99.84%	99.85%
5	0.04%	0.04%	0.04%	0.04%	0.04%	0.03%	0.03%	0.35%	0.00%	1.27%	0.11%	0.01%	4.19%	6.57%	99.82%	99.82%	99.82%	99.82%	99.82%	99.82%	99.83%
10	0.07%	0.08%	0.07%	0.07%	0.07%	0.07%	0.06%	0.40%	0.01%	2.85%	0.18%	0.02%	6.24%	9.52%	99.78%	99.78%	99.79%	99.78%	99.78%	99.79%	99.80%
20	0.15%	0.15%	0.14%	0.15%	0.15%	0.14%	0.13%	0.41%	0.01%	4.70%	0.27%	0.02%	8.04%	11.25%	99.71%	99.71%	99.72%	99.71%	99.71%	99.72%	99.74%
50	0.37%	0.37%	0.36%	0.37%	0.37%	0.35%	0.35%	0.31%	0.02%	5.86%	0.51%	0.03%	8.87%	10.17%	99.49%	99.48%	99.51%	99.49%	99.49%	99.52%	99.54%
100	0.75%	0.75%	0.73%	0.75%	0.75%	0.72%	0.71%	0.21%	0.02%	5.60%	0.59%	0.05%	8.09%	8.72%	99.11%	99.11%	99.16%	99.12%	99.11%	99.17%	99.19%

负正率都较低，这是因为评分非常稀疏，而且 top@N 也较小，所以大量的元素都属于“项目未推荐给用户，且事实上用户也未对项目评过”，即

TN 非常大，由式(23)可知负正率会非常小。在部分测试中由于保留小数位数的原因，有些算法的负正率会相同。但总体上 TCUP 算法的负正率相比于其

他算法较低,性能最优。在 F1 分数的测试中,TCUP 算法表现一直最优,这是因为它的精度和召回率相比其他算法都有优势。另外,所有算法的准确率都在 97%以上,这是因为 TN 非常大,由式(23)可知准确率会比较接近 1。但相对而言,TCUP 算法的准确率一直都是最高的。

整个实验结果表明,相对于其他 6 种算法,TCUP 算法呈现较低的误差,在精度、召回率、负正率、F1 分数,以及准确率上都有较明显的优势,因此,本文提出的 TCUP 算法能取得更好的推荐效果。

5 结束语

本文提出了一种联合张量填补和用户偏好的推荐算法 TCUP。该算法首先基于评分矩阵和项目所属类别矩阵构建用户-项目-类别的三维张量。然后,将三维张量的填补描述成带约束的非线性优化问题,并借助 scaled-latent 核范数来代替对张量秩的约束,接着利用 Frank-Wolfe 算法将非线性优化问题转换成一系列线性优化问题进行求解,并为 scaled-latent 核范数约束下的线性优化问题给出了一种计算量较小的求解方案。最后,基于张量数据构建用户类别偏好矩阵和评分偏好矩阵,联合填补后的张量和 2 个偏好矩阵设计了推荐算法,并采用差分进化算法进行参数调优。实验结果表明,相对于其他 6 种推荐算法,TCUP 算法在误差分析上呈现一个较低的误差;在准确性分析上其精度和召回率等指标均有明显优势,其中,精度的平均提升幅度为 1.96%~3.44%,召回率的平均提升幅度为 1.35%~2.40%。由于高维张量各维度的重要程度不同,如何更好地考虑各维度的差别是接下来的研究方向。

参考文献:

- [1] JUGOVAC M, JANNACH D. Interacting with recommenders—overview and research directions[J]. *ACM Transactions on Interactive Intelligent Systems*, 2017, 7(3): 1-46.
- [2] SHAH K, SALUNKE A, DONGARE S, et al. Recommender systems: an overview of different approaches to recommendations[C]//The 4th International Conference on Innovations in Information, Embedded and Communication Systems. IEEE, 2017.
- [3] FORMOSO V, FERNÁNDEZ D, CACHEDA F, et al. Distributed architecture for k -nearest neighbors recommender systems[J]. *World Wide Web*, 2015, 18(4): 997-1017.
- [4] PONNAM L T, PUNYASAMUDRAM S D, NALLAGULLA S N, et al. Movie recommender system using item based collaborative filtering technique[C]//International Conference on Emerging Trends in Engineering, Technology and Science. IEEE, 2016.
- [5] 吴毅涛, 张兴明, 王兴茂, 等. 基于用户模糊相似度的协同过滤算法[J]. *通信学报*, 2016, 37(1): 198-206.
- [6] WU Y T, ZHANG X M, WANG X M, et al. User fuzzy similarity-based collaborative filtering recommendation algorithm[J]. *Journal on Communications*, 2016, 37(1): 198-206.
- [7] KOREN Y. Factorization meets the neighborhood: A multifaceted collaborative filtering model[C]//The 14th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. ACM, 2008: 426-434.
- [8] 吴宾, 娄铮铮, 叶阳东. 联合正则化的矩阵分解推荐算法[J]. *软件学报*, 2018, 29(9): 2681-2696.
- [9] WU B, LOU Z Z, YE Y D. Co-regularized matrix factorization recommendation algorithm[J]. *Journal of Software*, 2018, 29(9): 2681-2696.
- [10] WANG Q, MAO Z, WANG B, et al. Knowledge graph embedding: a survey of approaches and applications[J]. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 2017, 29(12): 2724-2743.
- [11] 黄美灵. Spark MLlib 机器学习: 算法、源码及实战详解[M]. 北京: 电子工业出版社, 2016.
- [12] HUANG M L. Spark MLlib machine learning: algorithm, source code and detailed practice[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2016.
- [13] TAY Y, TUAN L A, HUI S C. Latent relational metric learning via memory-based attention for collaborative ranking[C]//The 27th International World Wide Web Conference. 2018: 729-739.
- [14] ZHANG S, YAO L, SUN A, et al. DeepRec: an open-source toolkit for deep learning based recommendation[J]. *ACM Computing Surveys*, 2019, 52(1): 1-38.
- [15] KUMAR V, PUJARI A K, SAHU S K, et al. Collaborative filtering using multiple binary maximum margin matrix factorizations[J]. *Information Sciences*, 2017, 380(C): 1-11.
- [16] XU Y, HAO R, YIN W, et al. Parallel matrix factorization for low-rank tensor completion[J]. *Inverse Problems and Imaging*, 2015, 9(2): 601-624.
- [17] YU W, ZHANG H, HE X, et al. Aesthetic-based clothing recommendation[C]//The 27th International World Wide Web Conference. 2018: 649-658.
- [18] CAI Y, ZHANG M, LUO D, et al. Low-order tensor decompositions for social tagging recommendation[C]//The Forth ACM International Conference on Web Search and Web Data Mining. ACM, 2011: 695-704.
- [19] KOLDA T G, BADER B W. Tensor decompositions and applications[J]. *Siam Review*, 2009, 51(3): 455-500.
- [20] NANOPOULOS A, RAFAILIDIS D, SYMEONIDIS P, et al. MusicBox: personalized music recommendation based on cubic analysis of social tags[J]. *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Lan-*

guage Processing, 2010, 18(2): 407-412.

- [18] SYMEONIDIS P. ClustHOSVD: Item recommendation by combining semantically enhanced tag clustering with tensor HOSVD[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2016, 46(9): 1240-1251.
- [19] JAIN P, OH S. Provable tensor factorization with missing data[C]// International Conference on Neural Information Processing Systems. NIPS, 2014: 1431-1439.
- [20] KASAI H, MISHRA B. Low-rank tensor completion: a riemannian manifold preconditioning approach[C]//The 33rd International Conference on Machine Learning. 2016: 1012-1021.
- [21] LIU W, WU C, FENG B, et al. Conditional preference in recommender systems[J]. Expert Systems with Applications, 2015, 42(2): 774-788.
- [22] HARPER F M, KONSTAN J A. The movielens datasets: history and context[J]. ACM Transactions on Interactive Intelligent Systems, 2015, 5(4): 1-19.
- [23] JAGGI M. Revisiting frank-wolfe: projection-free sparse convex optimization[C]//The 30th International Conference on Machine Learning. IMLS, 2013: 427-435.
- [24] LIU J, MUSIALSKI P, WONKA P, et al. Tensor completion for estimating missing values in visual data[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2013, 35(1): 208-220.
- [25] WIMALAWARNE K, SUGIYAMA M, TOMIOKA R. Multitask learning meets tensor factorization: task imputation via convex optimization[C]//International Conference on Neural Information Processing Systems. NIPS, 2014: 2825-2833.
- [26] GUO X, YAO Q, KWOK J T. Efficient sparse low-rank tensor completion using the Frank-Wolfe algorithm[C]//The 31th AAAI Conference on Artificial Intelligence. 2017: 1948-1954.
- [27] PRIC K, STORN R M, LAMPINEN J A. Differential evolution: a practical approach to global optimization[M]. Berlin: Springer, 2005.

[作者简介]



熊智 (1978-), 男, 湖北黄冈人, 博士, 汕头大学副教授, 主要研究方向为服务器集群、大数据应用、机器学习。



徐恺 (1992-), 男, 河南信阳人, 汕头大学硕士生, 主要研究方向为推荐算法、机器学习、大数据应用。



蔡玲如 (1979-), 女, 广东汕头人, 博士, 汕头大学副教授, 主要研究方向为系统建模与仿真、大数据应用、博弈论。



蔡伟鸿 (1963-), 男, 广东潮州人, 博士, 汕头大学教授, 主要研究方向为云计算、信息安全、网络通信。

致 谢

《通信学报》自 1980 年创刊以来,承蒙各位专家学者的支持和厚爱,为我刊审阅了大量来稿。在新年到来之际,我们谨向 2019 年关心和支持我刊,在百忙中为我刊审稿的专家学者致以崇高的敬意和深深的感谢。希望各位专家能继续支持我们的工作,感谢你们付出的辛勤劳动! 恭祝各位专家新年快乐!

2019 审稿专家名单

(如有遗漏敬请包涵,排名不分先后)

艾 渤 安辉耀 安建平 安玲玲 安 鹏 白宝明 白恩健 白文乐 白智全 包晓安 包志华 鲍长春
毕笃彦 蔡国永 蔡 康 蔡 凌 蔡文郁 蔡 英 蔡岳平 蔡跃明 曹继华 曹蓟光 曹 健 曹 进
曹 凯 曹卫平 曹 源 曹治国 曾 琦 曾 嵘 曾 勇 柴争义 常朝稳 常晓林 陈 岚 陈 波
陈北京 陈 兵 陈 朝 陈 晨 陈丹伟 陈东明 陈恩庆 陈芳炯 陈 福 陈海光 陈海华 陈宏滨
陈后金 陈 华 陈嘉兴 陈建平 陈建文 陈 晶 陈 恺 陈 林 陈 琳 陈鲁生 陈 萃 陈 明
陈明志 陈宁江 陈庆章 陈山枝 陈铁明 陈文胜 陈晓江 陈 新 陈兴蜀 陈秀波 陈 雪 陈 越
陈增强 陈 哲 陈志刚 陈志奎 陈智雄 陈子阳 谌 刚 成礼智 程 渤 程 光 程宏兵 程 建
程 剑 池 灏 迟学芬 迟永钢 仇洪冰 代 彬 代 锋 戴旭初 戴志涛 单承赣 邓 波 邓小龙
邓晓衡 刁文瑞 丁恩杰 丁 群 丁世飞 丁卫平 丁 勇 丁宇新 董丽华 董庆宽 董晓梅 董 颖
董振江 都 政 窦全胜 窦万春 杜 蛟 杜军朝 杜军平 杜 坤 杜瑞颖 杜文峰 杜 晔 端木春江
段书凯 段琢华 范九伦 范科峰 范灵俊 方锦清 方 娟 方 巍 方 勇 冯 博 冯登国 冯景瑜
冯 径 冯柳平 冯松鹤 冯 涛 冯 伟 冯兴乐 付安民 付绍静 付松年 付 伟 付卫红 付 雄
付永钢 傅建明 甘 勇 甘早斌 高军涛 高 隼 高尚 高 胜 高文宇 高新波 高振国 戈立军
宫继兵 龚海刚 龚 俭 龚声蓉 龚 征 谷大武 顾 红 顾仁涛 顾学迈 顾 燕 官 科 官权升
管 武 桂 冠 郭 滨 郭成安 郭大波 郭 禾 郭 虹 郭 磊 郭良敏 郭 萍 郭 庆 郭迎春
郭渊博 郭云川 韩国强 韩江洪 韩劲松 韩 敏 韩太林 韩伟力 韩益亮 韩 臻 郝士琦 郝晓辰
何纯全 何 萌 何 明 贺鹏飞 黑新宏 洪 飞 胡爱群 胡 蝶 胡 栋 胡 浩 胡红钢 胡华平
胡进峰 胡 军 胡 俊 胡青松 胡胜红 胡学先 胡宇翔 胡玉鹏 胡致远 华 光 华惊宇 黄昌勤
黄传河 黄春晖 黄海平 黄海生 黄 河 黄河燕 黄华军 黄华伟 黄坚豪 黄 杰 黄开枝 黄梦醒
黄旗明 黄 勤 黄庆华 黄善国 黄 韬 黄添强 黄小红 黄秀姐 黄学军 黄 征 黄挚雄 霍占强
吉根林 纪其进 季新生 季振洲 冀保峰 贾春福 贾俊铖 贾维嘉 贾云健 江 虹 姜春茂 姜 静
姜 奇 蒋国平 蒋黎明 蒋 鹏 蒋文斌 金 梁 金 石 金舒原 金彦亮 靳小龙 荆瑞泉 景维鹏
巨 刚 康海燕 柯品惠 柯熙政 兰巨龙 郎为民 雷 凯 李爱平 李博涵 李春国 李德识 李凤华
李红艳 李洪伟 李华康 李 晖 李会勇 李慧贤 李继国 李建波 李建更 李建华 李 剑 李 靖
李 军 李军怀 李 君 李 莉 李玲玲 李领治 李龙江 李梦东 李 明 李 楠 李 宁 李 强
李仁发 李 瑞 李 睿 李绍滋 李生红 李士宁 李 松 李 韬 李陶深 李伟生 李文璟 李相平

李兴华	李旭杰	李学华	李艳平	李艳涛	李阳阳	李英善	李 莹	李 勇	李勇军	李有明	李玉峰
李玉鑑	李云松	李占山	李哲涛	李振宇	李正权	李志农	李致远	李智勇	梁国龙	梁俊斌	廖 斌
廖祝华	林 晖	林嘉宇	林 敏	林荣恒	林 崧	林伟伟	林志贵	刘安丰	刘纯平	刘方明	刘粉林
刘功亮	刘海涛	刘洪涛	刘建明	刘建勋	刘杰平	刘 靖	刘 琚	刘开华	刘连山	刘林峰	刘 留
刘 全	刘绍辉	刘婷婷	刘统玉	刘文波	刘晓光	刘星成	刘兴伟	刘徐迅	刘玉玲	刘郁林	刘 渊
刘知远	刘治国	龙 航	龙 华	龙 军	卢新明	鲁宏伟	鲁剑锋	鲁蔚锋	陆月明	罗海勇	罗洪斌
罗 娟	罗军舟	罗俊海	罗仁泽	罗 涛	吕 晶	吕文俊	吕 钊	马春光	马东堂	马建峰	门朝光
孟维晓	孟祥武	宁更新	牛 犇	牛少彰	牛奕龙	欧阳丹彤	欧阳缙	潘海为	潘 俊	潘长勇	潘正祥
庞建民	庞辽军	裴庆祺	彭俊杰	彭 敏	彭荣群	彭 伟	彭 鑫	彭长根	亓 晋	齐丽娜	齐小刚
钱亚冠	钱振兴	钱志鸿	乔树山	秦 波	秦 浩	秦小麟	卿朝进	邱恭安	邱卫东	任海鹏	任艳丽
任一支	任 智	阮方鸣	沙学军	邵建华	邵艳玲	余 堃	沈 华	沈建华	沈 雷	沈连丰	沈庆国
石为人	史国振	史霄波	舒 坚	束 锋	宋 飞	宋广佳	宋建新	宋立众	宋铁成	宋婷婷	孙 聪
孙冬艳	孙光民	孙锦华	孙 君	孙铁利	孙学宏	孙彦景	孙志刚	谈 玲	谭小彬	汤 琦	唐成华
唐小勇	唐友喜	唐振民	唐志军	唐 卓	陶 军	滕志军	田 辉	田金文	田俊峰	田亚飞	田有亮
佟晓筠	万志国	汪永明	汪祖民	王佰玲	王宝生	王 彬	王昌达	王春悦	王德刚	王尔馥	王尔申
王风宇	王国宇	王海涛	王海艳	王慧明	王 坚	王 健	王杰令	王敬宇	王 堃	王良民	王 林
王 凌	王领强	王明生	王汝言	王圣宝	王世练	王世顺	王腾蛟	王万良	王伟明	王伟平	王卫东
王向阳	王晓阳	王 新	王兴伟	王兴元	王 燕	王 毅	王永建	王 勇	王宇新	王跃飞	王云江
王昭顺	王 震	王之梁	王志坚	王志晓	王中鹏	王 竹	魏急波	魏蛟龙	魏凯敏	魏立斐	文伟平
闻英友	吴春明	吴 凡	吴国新	吴家皋	吴 俊	吴 蒙	吴 强	吴少川	吴绍华	吴素萍	吴廷勇
吴 巍	吴晓平	吴宣利	吴 怡	吴玉成	吴哲夫	吴振强	吴志军	伍前红	伍仁勇	伍之昂	武 刚
武明虎	席 亮	肖 斌	肖绍球	谢洪涛	谢 立	谢卫华	谢显中	熊 钢	熊金波	徐 成	徐九韵
徐 恪	徐立中	徐明迪	徐明伟	徐启建	徐秋亮	徐少毅	徐伟强	徐位凯	徐志江	许 都	许方敏
许 晖	许 力	许晓荣	薛广涛	薛小平	延志伟	闫 河	严 飞	阎 毅	颜 斌	阳凡林	杨柏林
杨 波	杨晨阳	杨春刚	杨东凯	杨冬菊	杨高波	杨 庚	杨恒伏	杨家轩	杨 军	杨科华	杨 力
杨立才	杨 宁	杨盘隆	杨 强	杨 维	杨晓晖	杨秀梅	杨亚涛	杨 燕	杨 裔	杨 云	杨泽明
杨 震	姚涵涛	姚念民	叶阿勇	叶 苗	叶晓国	叶芝慧	叶中付	易 鸣	殷丽华	殷 锐	于 秦
于艳华	于银辉	俞东进	虞贵财	虞红芳	禹 勇	袁 琪	翟明岳	詹亚锋	战金龙	张宝富	张 达
张大龙	张冬梅	张更新	张光华	张海懿	张行功	张 恒	张焕国	张建标	张建敏	张建明	张 娇
张 可	张 磊	张 立	张立军	张连明	张明武	张 奇	张钦宇	张三峰	张士兵	张 薇	张卫明
张文彬	张 霞	张小松	张晓哲	张以文	张毅锋	张迎周	张永刚	张永晖	张永铮	张友春	张玉清
张跃宇	张云勇	张长江	张治中	张自力	章嘉懿	章坚武	章 洋	赵 波	赵海涛	赵华伟	赵继军
赵军辉	赵 明	赵泉华	赵 睿	赵小虎	赵小敏	赵 岩	赵一鸣	赵永利	赵永祥	赵 跃	赵增华
赵知劲	赵志峰	赵志刚	郑国强	郑国莘	郑君杰	郑 凯	郑学强	仲 红	周 斌	周军锋	周丽娟
周南润	周庆国	周四望	周 天	周学广	周一青	周 宇	周志刚	朱翠涛	朱 刚	朱国胜	朱浩瑾
朱洪波	朱 辉	朱建明	朱 江	朱丽平	朱培栋	朱晓荣	诸葛斌	祝烈煌	邹德清	邹国兵	

Journal on Communications

Contents List Vol.40 (2019)

Topics: 5G and AI

	No.	Pages
Research on crowd flows prediction model for 5G demand.....		
..... <i>HU Zheng, YUAN Hao, ZHU Xinning, NI Wanli</i>	2	[2019042](1)
Deep reinforcement learning based resource allocation algorithm in cellular networks.....		
..... <i>LIAO Xiaomin, YAN Shaohu, SHI Jia, TAN Zhenyu, ZHAO Zhongling, LI Zan</i>	2	[2019002](11)
Deep learning based physical layer wireless communication techniques: opportunities and challenges.....		
..... <i>GUI Guan, WANG Yu, HUANG Hao</i>	2	[2019043](19)
Latest progress on 3.5 GHz 5G NR trial.....		
..... <i>LIU Guangyi, WANG Qixing, LIU Jianjun, WANG Fei, ZHENG Yi</i>	2	[2019045](24)

Topics: Marine Information Perception, Transmission and Fusion

Summary and future development of marine target surveillance based on spatial information network.....		
..... <i>HE You, YAO Libo, JIANG Zhengjie</i>	4	[2019056](1)
New marine information network for realizing all-coverage over sea.....		
..... <i>DUAN Ruiyang, WANG Jingjing, DU Jun, WANG Yunlong, SHEN Yuan, REN Yong</i>	4	[2019051](10)
Research on sea surface NB-IoT coverage based on improved SPM.....		
..... <i>HU Zheng, CHEN Baodan, REN Jia, FAN Yupei, WANG Lian</i>	4	[2019079](21)
Confidential communication scheme based on uncertainty of underwater noisy channels.....		
..... <i>XU Ming, CHEN Fang</i>	4	[2019055](33)
Design and characteristic analysis of fiber optic Fabry-Perot sensor for static ice strain monitoring.....		
..... <i>HUANG Mengxing, LI Yuhang, WANG Guanjun, LIU Jianxun, YAN Lu, WANG Longjuan</i>	4	[2019087](43)

Topics: Network Attack, Defense and Security Metrics

Automated crowdturfing attack in Chinese user reviews.....	<i>WANG Li'na, Guo Xiaodong, WANG Run</i>	6	[2019149](1)
--	---	---	--------------

Survey on network system security metrics.....
 *WU Chensi, XIE Weiqiang, JI Yixiao, YANG Su, JIA Ziyi, ZHAO Song, ZHANG Yuqing* 6 [2019148](14)

Efficient revocable attribute-based encryption scheme *LI Xuejun, ZHANG Dan, LI Hui* 6 [2019150](32)

Account hijacking threat attack detection for OAuth2.0 authorization API.....
 *LIU Qixu, QIU Kaili, WANG Yiwen, CHEN Yanhui, CHEN Langping, LIU Chaoge* 6 [2019144](40)

Topics: Novel Network Architecture

Research on the full-dimensional defined polymorphic smart network.....
 *HU Yuxiang, YI Peng, SUN Penghao, WU Jiangxing* 8 [2019192](1)

Next generation converged media network architecture.....
 *ZHANG Wenjun, GUAN Yunfeng, HE Dazhi, CHEN Zhiyong, SONG Li, XU Yiling, XIA Bin* 8 [2019164](13)

Low-latency networking: architecture, key scenarios and research prospect
 *ZUO Xutong, WANG Mowei, CUI Yong* 8 [2019175](22)

Analysis and modeling of Internet backbone traffic with 5G/B5G.....
 *YANG Yuan, XU Mingwei, CHEN Hao* 8 [2019182](36)

Papers

Blind mask template attacks on masked cryptographic algorithm..... *WANG Yi, WU Zhen, LIN Bing* 1 [2019007](1)

Retina-imitation sampling based binary descriptor.....
 *YUAN Qingsheng, JIN Guoqing, ZHANG Dongming, BAO Xiuguo* 1 [2019021](15)

HTTP malicious traffic detection method based on hybrid structure deep neural network.....
 *LI Jia, YUN Xiaochun, LI Shuhao, ZHANG Yongzheng, XIE Jiang, FANG Fang* 1 [2019019](24)

Contention graph based concurrent scheduling algorithm in millimeter wave WPAN.....
 *WANG Yibing, NIU Yong, DING Weiguang, WU Hao* 1 [2019010](34)

Nonparametric Bayesian dictionary learning algorithm based on structural similarity
 *DONG Daoguang, RUI Guosheng, TIAN Wenbiao, KANG Jian, LIU Ge* 1 [2019015](43)

Research on video streaming media cooperative downloading in vehicular ad hoc network
 *CHEN Liang, WANG Jun, CHEN Rong, GU Xiang, WANG Jin, WAN Jie* 1 [2019018](51)

Service function chain construct algorithm based on reliability			
..... LAN Julong, JIN Zijin, SUN Penghao, JIANG Yiming, WANG Yue	1	[2019003](64)	
Coverage control algorithm for wireless sensor networks based on non-cooperative game			
..... LIU Haoran, ZHAO Heyao, DENG Yujing, WANG Xingqi, YIN Rongrong	1	[2019006](71)	
Low complexity codebook search method in massive MIMO system			
..... LIU Jianfei, HE Liping, TAO Ying, LIU Di, ZENG Xiangye, WANG Mengjun	1	[2019009](79)	
Research on Cloudlet selection strategy for data streaming applications in mobile cloud environment			
..... LIU Wei, XIONG Shu, DU Wei, WANG Wei	1	[2019020](87)	
Reverberation multi-source localization algorithm based on compressed sensing with dual microphones			
..... ZHANG Yi, LI Juan, ZHANG Min	1	[2019011](102)	
Secure resource allocation in hybrid energy-harvesting relay and full-duplex receiver			
..... WANG Wei, LI Xinrui, YIN Liuguo, ZHANG Guoan, ZHANG Shibing	1	[2019016](110)	
Surface sliding mode controller for chaotic oscillation in power system with power disturbance			
..... MIN Fuhong, MA Hanyuan, WANG Yaoda	1	[2019005](119)	
Cloud data assured deletion scheme based on overwrite verification			
..... DU Ruizhong, SHI Pengliang, HE Xinfeng	1	[2019012](130)	
Efficient privacy-preserving image retrieval scheme over outsourced data with multi-user			
..... WANG Xiangyu, MA Jianfeng, MIAO Yinbin	2	[2019023](31)	
Method of privacy protection based on multiple edge servers in personalized search			
..... ZHANG Qiang, WANG Guojun, ZHANG Shaobo	2	[2019024](40)	
SDN based network resource selection multi-objective optimization algorithm			
..... BAO Nan, ZUO Jiakuo, HU Han, BAO Xu	2	[2019031](51)	
Amplitude information based robust tracking method for multiple marine targets			
..... LIU Chao, ZHANG Zhiguo, SUN Jinping	2	[2019037](60)	
Opportunistic secure transmission scheme for simultaneous wireless information and power transfer			
..... MA Keming, CHEN Yajun, HU Xin, HUANG Kaizhi, JI Xinsheng	2	[2019036](70)	

Distributed congestion control strategy using network utility maximization theory in VANET.....
..... *TAN Guozhen, HAN Guodong, ZHANG Fuxin, DING Nan, LIU Mingjian* 2 [2019040](82)

Time delay estimation algorithm of narrow band internet of things based on inter-cell interference cancellation
..... *TANG Hong, MOU Hongyan, YANG Haolan* 2 [2019038](92)

Multi-point path planning based on the algorithm of colony-particle swarm optimization
..... *LIU Lijue, LUO Shuning, GAO Yan, CHEN Meifei* 2 [2019039](102)

Underwater acoustic communication physical layer key generation scheme
..... *LIU Jingmei, SHEN Zhiwei, HAN Qingqing, LIU Jingwei* 2 [2019027](111)

Malicious PDF document detection based on mixed feature *DU Xuehui, LIN Yangdong, SUN Yi* 2 [2019028](118)

Performance analysis of two-way relay cooperation underlay cognitive radio networks based on WIPT.....
..... *XU Jisheng, ZENG Fanzi, LI Kang, LI Yongfeng* 2 [2019041](129)

Design of SCMA codebook based on chaotic signal and system performance analysis.....
..... *ZHAO Geng, MA Yanyan, MA Yingjie* 2 [2019026](137)

Influence of nominal distortion of Beidou-3 B1C signal on ranging performance.....
..... *WANG Xue, GUO Yao, RAO Yongnan, LU Xiaochun, KANG Li* 2 [2019032](145)

Efficient authentication scheme for double-layer satellite network
..... *ZHU Hui, WU Heng, ZHAO Haiqiang, ZHAO Yuqing, LI Hui* 3 [2019058](1)

Service function chain deployment algorithm based on optimal weighted graph matching
..... *LI Dan, LAN Julong, WANG Peng, HU Yuxiang* 3 [2019059](10)

Symbolic execution optimization method based on input constraint.....
..... *WANG Sunlyu, LIN Yuqi, YANG Qiusong, LI Mingshu* 3 [2019062](19)

RPMA low-power wide-area network planning method based on data mining..... *ZHU Xiaorong, SHEN Yao* 3 [2019050](28)

Reliable transmission mechanism with differentiated protection in virtualized fiber-wireless access network
..... *WANG Ruyan, GAO Yishuang, CHEN Xiao* 3 [2019069](36)

Provable data possession scheme based on public verification and private verification.....
..... *TIAN Junfeng, CHAI Mengjia, QI Liuling* 3 [2019053](48)

Artificial noise-aided robust secure information and power transmission scheme in heterogeneous networks with simultaneous wireless information and power transfer.....			
.....	ZHANG Bo, HUANG Kaizhi, ZHONG Zhou, CHEN Yajun	3	[2019047](60)
Evidence combination method based on Pignistic function transformation and correlation coefficient.....			
.....	YANG Xiaoping, LIAN Weijian, LI Mengjie, QIAN Zhihong	3	[2019049](73)
QoE-aware video cooperative caching and transmission mechanism based on TWDM-PON and C-RAN			
.....	WU Dapeng, LI Xue, LI Hongxia	3	[2019066](80)
Data dissemination scheduling algorithm for V2R/V2V in multi-channel VANET			
.....	PENG Xin, DENG Qingyong, TIAN Shujuan, LIU Haolin, XIE Wenwu, LI Renfa	3	[2019060](92)
Improved CMA-FSE blind equalization algorithm for wireless ultraviolet communication			
.....	ZHAO Taipei, LIU Longfei, WANG Jing, YANG Liyang	3	[2019065](102)
Performance of block Markov superposition transmission over non-Gaussian impulsive channels.....			
.....	MA Xiao, JI Meiyong, CHEN Shengxiao	3	[2019046](109)
UDM: NFV-based prevention mechanism against DDoS attack on SDN controller			
.....	QIAN Hongyan, XUE Hao, CHEN Ming	3	[2019067](116)
Game-theoretical analysis of mobile contributors in mobile crowd sourcing network with word of mouth mode			
.....	ZENG Feng, WANG Runhua, PENG Jia, CHEN Zhigang	3	[2019029](125)
Full-diversity design criterion for multi-user STBC based on integer-forcing detection.....			
.....	LI Guoquan, ZHOU Xiangyun, LIN Jinzhao, XU Yongjun, PANG Yu, WANG Jiacheng	3	[2019063](139)
Multicast service protection algorithm based on elastic optical network.....			
.....	WU Jingjing, ZHANG Jianfang	3	[2019061](147)
Human motion state recognition based on smart phone built-in sensor.....			
.....	YIN Xiaoling, CHEN Xiaojiang, XIA Qishou, HE Juan, ZHANG Pengyan, CHEN Feng	3	[2019057](157)
Collection policy refining method for threat monitoring in complex network environment			
.....	LI Fenghua, LI Zifu, LI Ling, ZHANG Ming, GENG Kui, GUO Yunchuan	4	[2019096](49)
Research on WSN lifetime optimization game algorithm combined power and channel			

.....	<i>HAO Xiaochen, YAO Ning, XIE Lixia, WANG Jiaojiao, WANG Liyuan</i>	4	[2019097](62)
Deletable blockchain based on threshold ring signature.....	.....	
.....	<i>REN Yanli, XU Danting, ZHANG Xinpeng, GU Dawu</i>	4	[2019084](71)
Attribute generalization mix-zone based on multiple secure computation.....	.....	
.....	<i>WANG Bin, ZHANG Lei, ZHANG Guoyin</i>	4	[2019077](83)
Key-exposure resilient integrity auditing scheme with encrypted data deduplication.....	.....	
.....	<i>ZHANG Xiangsong, LI Chen, LIU Zhenhua</i>	4	[2019076](95)
Power consumption modeling and optimization for NB-IoT eDRX.....	.....	
.....	<i>JIAN Xin, WEI Yixiao, LIU Yuqin, SONG Jian, ZENG Xiaoping, TAN Xiaoheng</i>	4	[2019094](107)
Fuzzy evaluation for response effectiveness in cases of incomplete information.....	.....	
.....	<i>LI Fenghua, LI Yongjun, YANG Zhengkun, ZHANG Han, ZHANG Lingcui</i>	4	[2019078](117)
Identity-based cloud storage integrity checking from lattices.....	.....	
.....	<i>TIAN Miaomiao, GAO Chuang, CHEN Jie</i>	4	[2019073](128)
Spectrum allocation method for cognitive satellite network based on service priorities.....	.....	
.....	<i>JIA Min, JING Xiaoye, LIU Xiaofeng, LIU Feng, GUO Qing, GU Xuemai</i>	4	[2019080](140)
Airport delay prediction model based on regional residual and LSTM network.....	.....	
.....	<i>QU Jingyi, YE Meng, QU Xing</i>	4	[2019091](149)
Passive indoor human daily behavior detection method based on channel state information.....	.....	
.....	<i>DANG Xiaochao, HUANG Yaning, HAO Zhanjun, SI Xiong</i>	4	[2019082](160)
Image forgery detection algorithm based on U-shaped detection network.....	<i>WANG Zhuzhu</i>	4	[2019086](171)
Emulation platform for inter-domain protocols validation of integrated space-terrestrial network.....	.....	
.....	<i>YANG Zengyin, LI Hewu, WU Qian, WU Jianping, LIU Jun</i>	5	[2019112](1)
Risk assessing and privacy-preserving scheme for privacy leakage in APP.....	.....	
.....	<i>WANG Xinyu, NIU Ben, LI Fenghua, HE Kun</i>	5	[2019085](13)
Physical layer security performance analysis of multi-antenna full-duplex relay aided heterogeneous cellular network.....	<i>ZHONG Zhou, ZHANG Bo, QI Xiaohui, HUANG Kaizhi</i>	5	[2019074](24)

Research on the chaotic secure communication of the phase-space symmetric Lorenz oscillator group.....		
..... <i>LIU Linfang, RUI Guosheng, ZHANG Yang, WU Qianlong</i>	5	[2019117](32)
Analysis of service extensible capability for extensible network service model		
..... <i>JI Zuqin, SHEN Jun, DING Delin, CUI Xiaowei</i>	5	[2019109](39)
Attribute-based encryption scheme supporting attribute revocation in cloud storage environment.....		
..... <i>SUN Lei, ZHAO Zhiyuan, WANG Jianhua, ZHU Zhiqiang</i>	5	[2019116](47)
Privacy self-correlation privacy-preserving scheme in LBS.....		
..... <i>LI Weihao, CAO Jin, LI Hui</i>	5	[2019110](57)
Research on a new network covert channel model in blockchain environment		
..... <i>LI Yanfeng, DING Liping, WU Jingzheng, CUI Qiang, LIU Xuehua, GUAN Bei</i>	5	[2019111](67)
Hierarchical scalable storage architecture for massive electronic bill		
..... <i>LI Fenghua, LI Dingyan, JIN Wei, WANG Zhu, GUO Yunchuan, GENG Kui</i>	5	[2019104](79)
Differential privacy protection scheme based on edge betweenness model.....		
..... <i>HUANG Haiping, WANG Kai, TANG Xiong, ZHANG Dongjun</i>	5	[2019095](88)
Optimization and realization of SWIPT relay channel transmission rate based on rateless code		
..... <i>LEI Weijia, DONG Minghao</i>	5	[2019092](98)
Advantage estimator based on importance sampling.....		
..... <i>LIU Quan, JIANG Yubin, HU Zhihui</i>	5	[2019122](108)
Optimal resource allocation for two-stage connectionless access with collision detection.....		
..... <i>JIAN Xin, WANG Fang, SONG Jian, FU Shu, TAN Xiaoheng, ZENG Xiaoping</i>	5	[2019102](117)
Research on end hopping and spreading for active cyber defense.....		
..... <i>SHI Leyi, GUO Hongbin, WEN Xiao, LI Jianlan, CUI Yuwen, MA Mengfei, SUN Hui</i>	5	[2019071](125)
2D-TDOA passive location based on geodetic longitude and latitude.....		
..... <i>MA Fangli, XU Yang, XU Peng</i>	5	[2019118](136)
Channel capacity analysis of non-line-of-sight ultraviolet communication in noncoplanar geometry based on traversing tiny unit method.....		
..... <i>SONG Peng, SU Caixia, ZHAO Taipei, CHEN Jinni, ZHU Lei, ZHANG Xiaodan</i>	5	[2019103](144)
Revocable identity-based proxy re-signature scheme in the standard model.....		
..... <i>YANG Xiaodong, LI Yutong, WANG Jinli, MA Tingchun, WANG Caifen</i>	5	[2019072](153)

Robust deployment strategy for security data collection agent.....
.....*CHEN Lili, WANG Zhen, GUO Yunchuan, HUA Jiafeng, YAO Yuchao, LI Fenghua* 6 [2019121](51)

Research on critical SNR and power allocation of artificial noise assisted secure transmission
.....*DENG Hao, WANG Huiming* 6 [2019114](66)

Study on utility optimization for randomized response mechanism
.....*ZHOU Yihui, LU Laifeng, WU Zhenqiang* 6 [2019088](74)

Acquisition algorithm for BOC signals in high dynamic environment.....
.....*PAN Yi, ZHANG Tianqi, ZHANG Gang, MA Baoze* 6 [2019145](82)

Interference-aware node access scheme in UAV-aided VANET
.....*FAN Xiyi, HUANG Chuanhe, ZHU Junyu, WEN Shaojie* 6 [2019081](90)

Multidimensional QoS cloud computing resource scheduling method based on stakeholder perspective
.....*SU Mingfeng, WANG Guojun, LI Renfa* 6 [2019113](102)

3D channel modeling and space-time correlation analysis for V2V communications.....
.....*ZENG Wenbo, HE Yigang, LI Bing, SHI Guolong, ZHAO Feng* 6 [2019115](116)

Optimal strategy selection method for moving target defense based on signaling game.....
.....*JIANG Lyu, ZHANG Hengwei, WANG Jindong* 6 [2019125](128)

Secure authentication enhancement scheme for seamless handover and roaming in space information network
.....*XUE Kaiping, ZHOU Huancheng, MENG Wei, LI Shaohua* 6 [2019128](138)

Incremental clustering method based on Gaussian mixture model to identify malware family
.....*HU Jianwei, CHE Xin, ZHOU Man, CUI Yanpeng* 6 [2019135](148)

Privacy-preserving photo sharing framework cross different social network.....
.....*LI Fenghua, SUN Zhe, NIU Ben, CAO Jin, LI Hui* 7 [2019107](1)

SSRC: source rate control algorithm for delay-sensitive flow in data center network.....
.....*YANG Yang, CAO Min, YANG Jiahai, CHE Rong, LIU Wei* 7 [2019070](14)

Task scheduling algorithm for system-wide information management based on multiple QoS constraints
.....*LI Gang, WU Zhijun* 7 [2019166](27)

Efficient 3D imaging method of MIMO radar for moving target	<i>WANG Wei, HU Ziyang, YUE Jia'nan</i>	7	[2019140](38)
Invertible secret image sharing scheme based on improved FEMD	<i>MA Limin, WANG Jiahui</i>	7	[2019130](48)
Multi-step attack detection method based on network communication anomaly recognition.....			
.....	<i>JU Ankang, GUO Yuanbo, LI Tao, YE Ziwei</i>	7	[2019142](57)
Extended access control mechanism for cross-domain data exchange			
.....	<i>XIE Rongna, GUO Yunchuan, LI Fenghua, SHI Guozhen, WANG Yaqiong, GENG Kui</i>	7	[2019151](67)
Geographical routing and participant collaboration model based communication mechanism of WSN			
.....	<i>ZHAO Haijun, HE Chunlin, PU Bin, CUI Mengtian</i>	7	[2019162](77)
IMM4HT: an identification method of malicious mirror website for high-speed network traffic.....			
.....	<i>ZHANG Lei, ZHANG Peng, SUN Wei, YANG Xingdong, XING Lichao</i>	7	[2019089](87)
Migration compensation algorithm for maneuvering target in passive radar based on FRT-MLVD.....			
.....	<i>ZHAO Yongsheng, HU Dexiu, JIN Ke, LIU Zhixin, ZHAO Yongjun</i>	7	[2019158](95)
Early Merge mode decision algorithm for 3D-HEVC based on learning model.....			
.....	<i>LI Yue, YANG Gaobo, DING Xiangling, ZHU Yapei</i>	7	[2019165](104)
Radio signal recognition based on image deep learning	<i>ZHOU Xin, HE Xiaoxin, ZHENG Changwen</i>	7	[2019167](114)
Mobile platform continuous authentication scheme based on gait characteristics.....			
.....	<i>YANG Li, MA Zhuoru, ZHANG Chenghui, PEI Qingqi</i>	7	[2019146](126)
Provably secure rational delegation computation protocol.....			
.....	<i>TIAN Youliang, LI Qiuxian, ZHANG Duo, WANG Linjie</i>	7	[2019133](135)
Robust angle estimation method for noncircular targets in MIMO radar with mutual coupling.....			
.....	<i>WANG Xianpeng, GUO Yuehao, HUANG Mengxing, SHEN Chong, CAO Chunjie, FENG Wenlong</i>	7	[2019163](144)
Bayesian network structure learning algorithm based on hybrid binary salp swarm-differential evolution algorithm			
.....	<i>LIU Bin, FAN Ruixing, LIU Haoran, ZHANG Liyue, WANG Haiyu, ZHANG Chunlan</i>	7	[2019124](151)
Multi-ray channel modeling for programmable wireless environments in the terahertz band			
.....	<i>LUO Wenyu, LIU Hechao</i>	7	[2019161](162)
Beamforming for heterogeneous cloud radio access network	<i>ZUO Jiakuo, YANG Longxiang, BAO Nan</i>	8	[2019170](45)

MicroNF: a microservice-based hybrid framework for NFV
..... *SUN Chen, BI Jun, ZHENG Zhilong, WANG Shuhe, HU Hongxin* 8 [2019131](54)

Function encoding based approach for App clone detection in cloud environment.....
..... *YANG Jia, FU Cai, HAN Lansheng, LU Hongwei, LIU Jingliang* 8 [2019106](60)

Radar marine maneuvering target detection via high resolution sparse fractional ambiguity function.....
..... *YU Xiaohan, CHEN Xiaolong, GUAN Jian, HUANG Yong* 8 [2019156](72)

Flow-network based auto rescale strategy for Flink
..... *LI Ziyang, YU Jiong, BIAN Chen, ZHANG Yitian, PU Yonglin, WANG Yuefei, LU Liang* 8 [2019173](85)

Improved SMC cardinality-balanced multi-Bernoulli forward-backward smoothing track-before-detect algorithm
..... *PEI Jiazheng, HUANG Yong, DONG Yunlong, CHEN Xiaolong* 8 [2019098](102)

Method of network slicing deployment based on performance-aware
..... *HUANG Kaizhi, PAN Qirun, YUAN Quan, YOU Wei, TANG Hongbo* 8 [2019169](114)

Proactive migration model of SWIM service based on situation awareness.....
..... *WU Zhijun, ZHOU Shengyan, LEI Jin* 8 [2019171](123)

Anomaly detection model based on multi-grained cascade isolation forest algorithm
..... *YANG Xiaohui, ZHANG Shengchang* 8 [2019132](133)

Cloud resource prediction model based on triple exponential smoothing method and temporal convolutional
network..... *XIE Xiaolan, ZHANG Zhengzheng, WANG Jianwei, GHENG Xiaochun* 8 [2019172](143)

2-adic complexity of SLCE sequence..... *WANG Yan, LI Shunbo, XUE Gaina* 8 [2019143](151)

Dual-architecture Internet supporting intelligent governance of cyber content *YANG Peng, LI Youping* 9 [2019197](1)

Interference graph based adaptive interference coordination method in indoor UDN.....
..... *WU Xuanli, XIE Ziyi, WU Wei* 9 [2019136](15)

Research on algorithm for raster map multi-level sharing based on region incrementing color visual cryptography
..... *FANG Liguo, FU Zhengxin, HU Hao, SHEN Gang, YU Bin* 9 [2019193](24)

Routing framework and creation algorithm in Ad Hoc based SDN
..... *DONG Fang, HU Yuxiang, LI Ou* 9 [2019153](33)

Reduced phase-state detection based on virtual modulation indexes for Multi- <i>h</i> CPM.....		
.....XIE Shunqin, ZHOU Ke, CHEN Dahai, LI Xianglu, ZHONG Sheng, ZHANG Jian	9	[2019185](45)
Instruction flow mining algorithm based on the temporal sequence of node communication actions.....		
.....XIANG Yingzhuo, XU Zhengguo, YOU Ling	9	[2019176](51)
Service recommendation method based on context-embedded support vector machine.....		
.....ZHAO Chenyang, WANG Junling	9	[2019190](61)
Research on GPS geometry-based observational stochastic error model.....		
.....ZHOU Taoyun, LIAN Baowang, YANG Dongdong, ZHANG Yi, CAI Chenglin	9	[2019188](74)
Time-variant interest community based query message routing algorithm in opportunity social network.....		
.....BI Junlei, LI Zhiyuan	9	[2019177](86)
Adaptive routing and wavelength assignment method based on SDN.....		
.....ZHAO Zhongnan, WANG Jian, GUO Hongwei	9	[2019157](95)
Personalized privacy protection method for group recommendation.....		
.....WANG Haiyan, LU Jinxiang	9	[2019183](106)
Multi-tier cooperative caching in fog radio access network.....		
.....JIANG Yanxiang, XIA Chengyu	9	[2019093](116)
Spectrum resource allocation method of maximizing transmission rate in cognitive heterogeneous wireless networks.....		
.....DONG Xiaoqing, CHENG Lianglun, ZHENG Gengzhong, WANG Tao	9	[2019189](124)
Joint optimization method of failure probability and fiber-link load balancing in flexible bandwidth optical network.....		
.....CHEN Bowen, FU Xiaodong, LEI Yu	9	[2019178](136)
TSL: predicting popularity of Facebook content based on tie strength.....		
.....WANG Xiaomeng, FANG Binxing, ZHANG Hongli, WANG Xing	10	[2019207](1)
Denoising and reconstruction of evaporation duct based on quadratic optimal threshold approximation message passing method.....		
.....RUI Guosheng, LIU Ge, TIAN Wenbiao, DONG Daoguang, ZHANG Yanan	10	[2019200](10)
Frequency hopping modulation recognition based on time-frequency energy spectrum texture feature.....		
.....LI Hongguang, GUO Ying, SUI Ping, QI Zisen	10	[2019191](20)
Research on space focusing virtual coverage based on orthogonal frequency time reversal method.....		
.....NIE Yifang, LI Fangwei	10	[2019211](30)

Task distribution algorithm based on community in mobile crowd sensing			
.....	<i>LONG Hao, ZHANG Shukui, ZHANG Yang, ZHANG Li</i>	10	[2019213](42)
Hybrid anonymous channel for recipient untraceability via SDN-based node obfuscation scheme			
.....	<i>ZHAO Hui, WANG Liangmin</i>	10	[2019155](55)
Measurement of video initial buffer size for mobile network	<i>CHENG Guang, FANG Min, WU Hua</i>	10	[2019179](67)
Finite automaton intrusion tolerance system model based on Markov			
.....	<i>LUO Zhiyong, YANG Xu, SUN Guanglu, XIE Zhiqiang, LIU Jiahui</i>	10	[2019196](79)
Shamir-based virtual machine placement policy	<i>TIAN Junfeng, WANG Zilong, HE Xinfeng, LI Zhen</i>	10	[2019141](90)
Feature selection algorithm based on XGBoost	<i>LI Zhanshan, LIU Zhaogeng</i>	10	[2019154](101)
Identifying vital nodes algorithm in social networks fusing higher-order information			
.....	<i>YAN Guanghui, ZHANG Meng, LUO Hao, LI Shikui, LIU Ting, WANG Jianfeng</i>	10	[2019198](109)
Enhancement of underwater acoustic signal based on denoising automatic-encoder			
.....	<i>YIN Jingwei, LUO Wuxiong, LI Li, HAN Xiao, GUO Longxiang</i>	10	[2019181](119)
On the performance optimization for the cloud architecture with sleep-mode and registration service			
.....	<i>JIN Shunfu, WU Haixing, HUO Tiantian, ZHAO Wenjuan</i>	10	[2019202](127)
Energy-saving algorithm considering idle light-path prediction in SDM-EON			
.....	<i>XIONG Yu, HE Jinyou, WANG Baohua, ZHOU Bin</i>	10	[2019203](137)
Energy efficiency analysis of heterogeneous cellular network based on Thomas cluster process			
.....	<i>JIN Minglu, GUO Nan</i>	10	[2019184](149)
SDN control and forwarding method based on identity attribute			
.....	<i>ZHU Xianwei, CHANG Chaowen, ZHU Zhiqiang, QIN Xi</i>	11	[2019232](1)
Predictive channel scheduling algorithm between macro base station and micro base station group			
.....	<i>XIE Yinghai, YAO Ruohe, WU Bin</i>	11	[2019217](19)
Modulation recognition method based on multi-inputs convolution neural network			
.....	<i>ZHA Xiong, PENG Hua, QIN Xin, LI Guang, LI Tianyun</i>	11	[2019206](30)
Novel criterion function for minor subspace tracking based on Rayleigh quotient			
.....	<i>XU Zhongying, GAO Yingbin, KONG Xiangyu, DU Boyang</i>	11	[2019216](38)

Multi-service differentiated traffic management optimization strategy in cloud data center		
..... WANG Yaomin, WANG Xia, DONG Yi, GAO Lian, ZHANG Songhai, SHI Xinling	11	[2019215](45)
Fusion spectrum sensing algorithm based on eigenvalues	ZHAO Wenjing, LI He, JIN Minglu	11 [2019201](57)
Image privacy preservation scheme based on QR code and reversible visible watermarking		
..... YAO Yuanzhi, WANG Feng, YAN Wenbo, YU Nenghai	11	[2019220](65)
Method to improve edge coverage in fuzzing		
..... JIA Chunfu, YAN Shengbo, WANG Zhi, WU Chenlu, LI Hang	11	[2019223](76)
Cooperative interference power allocation in physical layer security under imperfect time synchronization ..		
..... GUO Wenbo, SONG Changqing, WEN Rong, ZHAO Hongzhi, TANG Youxi	11	[2019214](86)
Sum-rate maximization in MIMO NOMA system with imperfect CSI		
..... SUN Yanjing, LIU Yang, ZHOU Jiasi, CAO Qi, LI Song	11	[2019221](94)
Algorithm of blockchain data provenance based on ABE		
..... TIAN Youliang, YANG Kedi, WANG Zuan, FENG Tao	11	[2019222](101)
Homomorphic signature schemes for single-source and multi-source network coding		
..... YU Huifang, LI Wen	11	[2019219](112)
Ciphertext-only fault analysis of the SIMON lightweight cipher		
..... LI Wei, WU Yixin, GU Dawu, LI Jiayao, CAO Shan, WANG Menglin, CAI Tianpei, DING Xiangwu, LIU Zhiqiang	11	[2019204](122)
Efficient pairing-free CP-ABE based on ordered binary decision diagram	DING Sheng, CAO Jin, LI Hui	12 [2019234] (1)
Privacy risk adaptive access control model via evolutionary game		
..... DING Hongfa, PENG Changgen, TIAN Youliang, XIANG Shuwen	12	[2019240] (9)
k -error linear complexity of q -ary sequence of period p^2	WU Chenhuang, XU Chunxiang, DU Xiaoni	12 [2019230] (21)
High-performance and high-concurrency encryption scheme for Hadoop platform		
..... JIN Wei, YU Mingjie, LI Fenghua, YANG Zhengkun, GENG Kui	12	[2019224] (29)
Self-correcting complex semantic analysis method based on pre-training mechanism		
..... LI Qing, ZHONG Jiang, LI Lili, LI Qi	12	[2019195] (41)
Evaluation and protection of multi-level location privacy based on an information theoretic approach		
..... ZHANG Wenjing, LIU Qiao, ZHU Hui	12	[2019235] (51)

Software-defined networking QoS optimization based on deep reinforcement learning			
..... LAN Julong, ZHANG Xueshuai, HU Yuxiang, SUN Penghao	12	[2019227]	(60)
Energy-efficient strategy for data migration and merging in Storm			
..... PU Yonglin, YU Jiong, LU Liang, LI Ziyang, BIAN Chen, LIAO Bin	12	[2019226]	(68)
Joint energy efficiency and spectral efficiency optimization algorithm for UDN under the restriction of interference threshold and backhaul capacity			
..... WU Xuanli, CHEN Xu	12	[2019205]	(86)
Channel estimation method based on compressive sensing for FBMC/OQAM system			
..... YUAN Weina, YAN Qiu	12	[2019239]	(98)
Study on the constructions of optimal almost quaternary sequences with period $2q$			
..... PENG Xiuping, JI Huipu, ZHENG Deliang, NIU Xiaoxia	12	[2019225]	(105)
Clustering routing protocol based on improved PSO algorithm in WSN			
..... WU Xiaonian, ZHANG Chuyun, ZHANG Runlian, SUN Yaping	12	[2019241]	(114)

Comprehensive Reviews

Technology prospect of 6G mobile communications			
..... ZHANG Ping, NIU Kai, TIAN Hui, NIE Gaofeng, QIN Xiaoqi, QI qi, ZHANG Jiao	1	[2019022]	(141)
Research status of community detection based on local expansion			
..... SHI Yancui, WANG Yuan, ZHAO Qing, ZHANG Xiankun	1	[2019013]	(149)
Survey on trusted cloud platform technology			
..... HE Xinfeng, TIAN Junfeng, LIU Fanming	2	[2019035]	(154)
Research progress of trusted sensor-cloud based on fog computing			
..... WANG Tian, SHEN Xuwei, LUO Hao, CHEN Baisheng, WANG Guojun, JIA Weijia	3	[2019068]	(170)
Survey of software defined D2D and V2X communication			
..... SHAO Wenjuan, SHEN Qingguo	4	[2019075]	(179)
State-of-the-art and trend of emergency rescue communication technologies for coal mine			
..... HU Qingsong, YANG Wei, DING Enjie, LI Shiyin, LI Binghao	5	[2019123]	(163)
Survey of the deterministic network			
..... HUANG Tao, WANG Shuo, HUANG Yudong, ZHENG Yao, LIU Jiang, LIU Yunjie	6	[2019119]	(160)

Research on the IP alias resolution technology.....			
.....	<i>WANG Zhanfeng, CHENG Guang, HU Chao, LI Han, WENG Nianfeng, CAO Huaping</i>	7	[2019134](169)
Survey of mobility prediction in wireless network.....	<i>WANG Ying, SU Zhuang</i>	8	[2019159](157)
Review of information hiding on Chinese text.....	<i>WU Guohua, GONG Lichun, YUAN Lifeng, YAO Ye</i>	9	[2019208](145)
Differential privacy protection technology and its application in big data environment			
.....	<i>FU Yu, YU Yihan, WU Xiaoping</i>	10	[2019209](157)
Survey of identity resolution system in industrial Internet of things			
.....	<i>REN Yuzheng, XIE Renchao, ZENG Shiqin, ZHAO Haoran, YU Jiayi, HUO Ru, HUANG Tao, LIU Yunjie</i>	11	[2019238](138)
Survey of research on application of heuristic algorithm in machine learning			
.....	<i>SHEN Yanping, ZHENG Kangfeng, WU Chunhua, YANG Yixian</i>	12	[2019242](124)

Distinguished and Excellent Young Scholars

Overview of the key technology of photonic firewall at high speed.....			
.....	<i>HUANG Shanguo, LI Xin, TANG Ying, GUO Junfeng</i>	9	[2019212](157)
Overview of quantum key distribution metropolitan optical networking technology.....			
.....	<i>WANG Hua, ZHAO Yongli</i>	9	[2019210](168)
Multi-dimensional adaptive transmission technique for short-to-medium reach optical fiber.....			
communication system	<i>TANG Ming, CHEN Xi</i>	11	[2019237](156)
DL-assisted programmable multilayer network application awareness system for IP-over-EON			
.....	<i>ZHU Zuqing, KONG Jiawei, NIU Bin, TANG Shaofei, FANG Hongqiang, LIU Siqi</i>	11	[2019229](171)

Correspondences

Weakly supervised semantic segmentation and optimization algorithm based on multi-scale feature model			
.....	<i>XIONG Changzhen, ZHI Hui</i>	1	[2019004](163)
Fast and resource efficient method for indoor localization based on fingerprint with varied scales.....			
.....	<i>LE Yanfen, TANG Zhuo, SHENG Cunbao, SHI Weibin</i>	1	[2019001](172)

C3S: research of CI-based concurrent transmission strategy for intelligent sensing system
 *MAO Yanyan, CHENG Dapeng, FENG Yanli, DOU Quansheng, LI Dashe* 1 [2019017](180)

Research on the algorithm for reducing the PAPR of OFDM system based on quantum chaotic mapping
 *MA Yingjie, ZHAO Geng, WEI Zhanzhen, LI Zhaobin, JU Lei* 1 [2019008](195)

Boolean-chaos-based physical random number generator.....
 *ZHANG Qiqi, ZHANG Jianguo, LI Pu, GUO Yanqiang, WANG Yuncai* 1 [2019014](201)

Integral fault analysis of the ARIA cipher
 *SHEN Yu, LI Wei, GU Dawu, WU Yixin, CAO Shan, LIU Ya, LIU Zhiqiang, ZHOU Zhihong* 2 [2019033](164)

Single password authentication method for remote user based on mobile terminal assistance.....
 *XU Yuan, YANG Chao, YANG Li* 2 [2019044](174)

Openstack authentication protocol based on digital certificate..... *ZHU Zhiqiang, LIN Renhao, HU Cuiyun* 2 [2019030](188)

k -error linear complexity of binary cyclotomic generators..... *CHEN Zhixiong, WU Chenhuang* 2 [2019034](197)

Logistic chaotic sequence generator based on physical unclonable function
 *HUANG Chunguang, CHENG Hai, DING Qun* 3 [2019064](182)

Physical random analysis of Boolean chaos
 *GONG Lishuang, HOU Erlin, LIU Haifang, LI Kaikai, WANG Yuncai* 3 [2019048](190)

ELAB: end-host-based congestion aware load balancing for data center network
 *CHEN Guo, ZHANG Weifeng* 3 [2019054](196)

Joint downlink and uplink resource allocation for multi-carrier SWIPT system
 *CUI Miao, YU Xin, LI Xueyi, ZHANG Guangchi, LIU Yijun, LIN Fan* 3 [2019052](206)

Wireless Mesh network secure routing mechanism based on dynamic reputation *YANG Hongyu, HAN Yue* 4 [2019083](195)

Link quality prediction based on random forest *LIU Linlan, GAO Shengrong, SHU Jian* 4 [2019025](202)

Low latency handover scheme for 5G dual-connectivity scenario
 *PEI Xuming, JIA Jianxin, QIAN Hua, ZHU Zhenghang, TANG Zhenyu, KANG Kai* 4 [2019090](212)

Research on optimal two element exchange algorithm for large scale cloud computing server scheduling problem
 *WANG Wanliang, ZANG Zelin, CHEN Guoqi, TU Hangyao, WANG Yule, LU Linyan* 5 [2019105](180)

Research on cryptographic properties of a new S-box based on cellular automaton			
.....	<i>GUAN Jie, HUANG Junjun</i>	5	[2019101](192)
Research on area-efficient low-entropy masking scheme for AES			
.....	<i>JIANG Jiuxing, HOU Jiao, HUANG Hai, ZHAO Yuying, FENG Xinxin</i>	5	[2019100](201)
Information hiding algorithm based on mapping and structure data of 3D model			
.....	<i>REN Shuai, WANG Zhen, SU Dongxu, ZHANG Tao, MU Dejun</i>	5	[2019108](211)
Attribute-based proxy re-encryption scheme with multiple features			
.....	<i>FENG Chaosheng, LUO Wangping, QIN Zhiguang, YUAN Ding, ZOU Liping</i>	6	[2019127](177)
(t, k) -diagnosability of exchanged crossed cube under the PMC model			
.....	<i>GUO Chen, XIAO Zhifang, LEMG Ming, PENG Shuo, WANG Bo</i>	6	[2019099](190)
Performance comparison of systematic polar code and non-systematic polar code			
.....	<i>LI Hui, YE Ming, TONG Qiang, CHENG Jie, WANG Lijie</i>	6	[2019147](203)
Research on low-rate DDoS attack of SDN network in cloud environment			
.....	<i>CHEN Xingshu, HUA Qiang, WANG Yitong, GE Long, ZHU Yi</i>	6	[2019120](210)
Robust resource allocation algorithm for heterogeneous wireless network with SWIPT			
.....	<i>XU Yongjun, HU Yuan, LI Guoquan, LIN Jinzhao, CHEN Qianbin</i>	7	[2019160](186)
Multi-target localization algorithm based on adaptive grid in wireless sensor network			
.....	<i>WANG Tianjing, LI Xiuqin, BAI Guangwei, SHEN Hang</i>	7	[2019129](197)
Incentive mechanism based on auction model for mobile crowd sensing network			
.....	<i>LIU Yuanni, LI Yaoxi, LI Huicong, LI Wanlin, ZHANG Jianhui, ZHAO Guofeng</i>	7	[2019138](208)
Decentralized credit system based on blockchain and its application			
.....	<i>WANG Mingsheng, CAO Heyang, LI Peiyao</i>	8	[2019126](169)
Low-latency neighbor discovery algorithm based on multi-beacon message in mobile low-duty-cycle sensor network			
.....	<i>LIANG Junbin, ZHOU Xiang, MA Fangqiang, JIANG Chan, HE Zongjian</i>	8	[2019139](178)
Contact plan design based on bi-directional particle swarm optimization in satellite network			
.....	<i>DAI Cuiqin, TANG Huang, GUO Linfeng</i>	8	[2019180](189)

Automatic modulation recognition algorithm for MQAM signal	ZHANG Huadi, LOU Huaxun	8	[2019168](200)
Resource allocation strategy based on optimal matching auction in the enterprise network .....	.....	
.....	CONG Xin, ZI Lingling, SHEN Xueli	8	[2019186](212)
FMCW radar range estimation algorithm based on fast iterative interpolation .....	.....	
.....	DUAN Yongchang, LI Xin, HUANG Yaohui, HUANG Ping	9	[2019187](175)
Related-key impossible boomerang cryptanalysis on TWINE	XIE Min, TIAN Feng, LI Jiaqi	9	[2019152](184)
Co-pairwise ranking model for item recommendation .....	.....	
.....	WU Bin, CHEN Yun, SUN Zhongchuan, YE Yangdong	9	[2019137](193)
Asymptotic RZF cooperative beamforming algorithm based on energy efficiency.....	.....	
.....	ZHANG Yinghui, ZHANG Biao, LU Xiaoting, LIU Yang	10	[2019174](169)
Blind equalization algorithm based on complex support vector regression .....	.....	
.....	YANG Ling, CHEN Liang, ZHAO Bin, ZHANG Guolong, LI Yuan	10	[2019199](180)
Spatiotemporal squeeze-and-excitation residual multiplier network for video action recognition .....	.....	
.....	LUO Huilan, TONG Kang	10	[2019194](189)
Bidirectional authentication key agreement protocol supporting identity's privacy preservation based on RLWE .....	.....	
.....	YANG Yatao, HAN Xinguang, HUANG Jierun, ZHAO Yang	11	[2019218](180)
Digital watermarking algorithm in SWT domain based on robust local feature.....	.....	
.....	NIU Panpan, YANG Siyu, WANG Li, YANG Hongying, LI Li, WANG Xiangyang	11	[2019228](187)
Policy translation and configuration using dynamic template .....	.....	
.....	GUO Yunchuan, LI Ling, LI Yongjun, CHENG Lin, DU Jun, ZHANG Lingcui	12	[2019236](138)
Verifiable three-party secure key exchange protocol based on eigenvalue .....	.....	
.....	ZHANG Yanshuo, WANG Zehao, WANG Zhiqiang, CHEN Huiyan	12	[2019233](149)
Joint recommendation algorithm based on tensor completion and user preference .....	.....	
.....	XIONG Zhi, XU Kai, CAI Lingru, CAI Weihong	12	[2019231](155)

通 信 学 报

2019 年（第 40 卷）总目次

专题：5G 与 AI

期 编号 页码

面向 5G 需求的人群流量预测模型研究.....	胡 铮, 袁 浩, 朱新宁, 倪万里	2	[2019042](1)
基于深度强化学习的蜂窝网资源分配算法.....	廖晓闽, 严少虎, 石 嘉, 谭震宇, 赵钟灵, 李 赞	2	[2019002](11)
基于深度学习的物理层无线通信技术: 机遇与挑战.....	桂 冠, 王 禹, 黄 浩	2	[2019043](19)
3.5 GHz 5G 新空口基站设计与外场实验研究.....	刘光毅, 王启星, 刘建军, 王 飞, 郑 毅	2	[2019045](24)

专题：海洋信息感知、传输与融合

基于空间信息网络的海洋目标监视分析与展望.....	何 友, 姚力波, 江政杰	4	[2019056](1)
面向“三全”信息覆盖的新型海洋信息网络.....	.....	
.....	段瑞洋, 王景璟, 杜 军, 王云龙, 沈 渊, 任 勇	4	[2019051](10)
基于改进 SPM 的海上 NB-IoT 覆盖研究.....	胡 正, 陈褒丹, 任 佳, 樊雨沛, 汪 炼	4	[2019079](21)
基于水下噪声信道不确定性的保密通信方案.....	徐 明, 陈 芳	4	[2019055](33)
面向海洋静冰压力监测的薄膜结构光纤 Fabry-Perot 传感器设计与性能分析.....	.....	
.....	黄梦醒, 李宇航, 王冠军, 刘建勋, 严 璐, 王隆娟	4	[2019087](43)

专题：网络攻防与安全度量

面向中文用户评论的自动化众包攻击方法.....	王丽娜, 郭晓东, 汪 润	6	[2019149](1)
网络系统安全度量综述.....	吴晨思, 谢卫强, 姬逸潇, 杨 粟, 贾紫艺, 赵 松, 张玉清	6	[2019148](14)
可高效撤销的属性基加密方案.....	李学俊, 张 丹, 李 晖	6	[2019150](32)
面向 OAuth2.0 授权服务 API 的账号劫持攻击威胁检测.....	.....	
.....	刘奇旭, 邱凯丽, 王乙文, 陈艳辉, 陈浪平, 刘潮歌	6	[2019144](40)

专题：新型网络架构

全维可定义的多模态智慧网络体系研究.....	胡宇翔, 伊 鹏, 孙鹏浩, 邬江兴	8	[2019192](1)
新一代融合媒体网络架构.....	张文军, 管云峰, 何大治, 陈智勇, 宋 利, 徐异凌, 夏 斌	8	[2019164](13)
低时延网络: 架构, 关键场景与研究展望.....	左旭彤, 王莫为, 崔 勇	8	[2019175](22)
5G/后 5G 部署对互联网主干影响的分析与建模.....	杨 芫, 徐明伟, 陈 浩	8	[2019182](36)

学 术 论 文

对加掩加密算法的盲掩码模板攻击.....	王 焱, 吴 震, 蔺 冰	1	[2019007](1)
仿视网膜采样的二进制描述子.....	袁庆升, 靳国庆, 张冬明, 包秀国	1	[2019021](15)
基于混合结构深度神经网络的 HTTP 恶意流量检测方法.....	李 佳, 云晓春, 李书豪, 张永铮, 谢 江, 方 方	1	[2019019](24)
基于冲突图的毫米波无线个域网并行调度方案.....	王一兵, 牛 勇, 丁玮光, 吴 昊	1	[2019010](34)
基于结构相似性的非参数贝叶斯字典学习算法.....	董道广, 芮国胜, 田文飏, 康 健, 刘 歌	1	[2019015](43)
车载自组织网视频流媒体协助下载研究.....	陈 亮, 王 军, 陈 蓉, 顾 翔, 王 进, 万 杰	1	[2019018](51)
基于可靠性的服务功能链构建算法.....	兰巨龙, 金子晋, 孙鹏浩, 江逸茗, 王 月	1	[2019003](64)
基于非合作博弈的无线传感器网络覆盖控制算法.....	刘浩然, 赵赫瑶, 邓玉静, 王星淇, 尹荣荣	1	[2019006](71)
大规模 MIMO 系统中低复杂度的码本搜索方法.....	刘剑飞, 何利平, 陶 颖, 刘 迪, 曾祥焯, 王蒙军	1	[2019009](79)
移动云环境中数据流应用的 Cloudlet 选择策略研究.....	刘 伟, 熊 曙, 杜 薇, 王 伟	1	[2019020](87)
基于压缩感知的双麦克风混响多声源定位算法.....	张 奕, 李 娟, 张 敏	1	[2019011](102)
联合能量收集中继与全双工目的节点的安全资源分配方案.....	王 伟, 李鑫睿, 殷柳国, 章国安, 张士兵	1	[2019016](110)
含功率扰动电力系统混沌振荡的动态滑模控制.....	闵富红, 马汉媛, 王耀达	1	[2019005](119)
基于覆写验证的云数据确定性删除方案.....	杜瑞忠, 石朋亮, 何欣枫	1	[2019012](130)
高效隐私保护的多用户图像外包检索方案.....	王祥宇, 马建峰, 苗银宾	2	[2019023](31)

基于多边缘服务器的个性化搜索隐私保护方法	张强, 王国军, 张少波	2	[2019024](40)
基于 SDN 的网络资源选择多目标优化算法	鲍楠, 左加阔, 胡晗, 鲍煦	2	[2019031](51)
基于幅度信息的海上多目标稳健跟踪方法	柳超, 张志国, 孙进平	2	[2019037](60)
面向物联网无线携能通信系统的机会安全传输方案	马克明, 陈亚军, 胡鑫, 黄开枝, 季新生	2	[2019036](70)
基于网络效用最大化理论的分布式车联网拥塞控制策略			
.....	谭国真, 韩国栋, 张福新, 丁男, 刘明剑	2	[2019040](82)
基于小区间干扰消除的 NB-IoT 时延估计算法	唐宏, 牟泓彦, 杨浩澜	2	[2019038](92)
基于回溯蚁群-粒子群混合算法的多点路径规划	刘丽珏, 罗舒宁, 高琰, 陈美妃	2	[2019039](102)
水下声通信物理层密钥生成方案	刘景美, 沈志威, 韩庆庆, 刘景伟	2	[2019027](111)
基于混合特征的恶意 PDF 文档检测	杜学绘, 林杨东, 孙奕	2	[2019028](118)
基于 WIPT 的两路中继协作 underlay 认知无线电的性能分析	徐纪胜, 曾凡仔, 李康, 李勇峰	2	[2019041](129)
基于混沌序列的 SCMA 码本设计及系统性能分析	赵耿, 马艳艳, 马英杰	2	[2019026](137)
北斗三号 B1C 信号标称失真对测距性能的影响	王雪, 郭瑶, 饶永南, 卢晓春, 康立	2	[2019032](145)
适用于双层卫星网络的星间组网认证方案	朱辉, 武衡, 赵海强, 赵玉清, 李晖	3	[2019058](1)
基于最优加权图匹配的服务功能链部署方法	李丹, 兰巨龙, 王鹏, 胡宇翔	3	[2019059](10)
基于输入约束的符号执行优化	汪孙律, 林渝淇, 杨秋松, 李明树	3	[2019062](19)
基于数据挖掘的 RPMA 低功耗广域网网络规划方法	朱晓荣, 沈瑶	3	[2019050](28)
带有区分保护的虚拟化 FiWi 网络可靠传输机制	王汝言, 高毅爽, 陈霄	3	[2019069](36)
基于公有验证和私有验证的数据持有性验证方案	田俊峰, 柴梦佳, 齐鏊岭	3	[2019053](48)
异构携能通信网络中人工噪声辅助的顽健能量与信息安全传输方案			
.....	张波, 黄开枝, 钟州, 陈亚军	3	[2019047](60)
基于 Pignistic 概率函数和相关系数的证据组合方法	杨晓萍, 廉伟健, 李孟杰, 钱志鸿	3	[2019049](73)
基于 TWDM-PON 与 C-RAN 的 QoE 感知视频协作缓存与传输机制	吴大鹏, 李雪, 李红霞	3	[2019066](80)
多信道车联网 V2R/V2V 数据传输调度算法			
.....	彭鑫, 邓清勇, 田淑娟, 刘昊霖, 谢文武, 李仁发	3	[2019060](92)

无线紫外光散射通信中的改进 CMA-FSE 盲均衡算法	赵太飞, 刘龙飞, 王 晶, 杨黎洋	3	[2019065](102)
分组马尔可夫叠加传输在非高斯脉冲信道上的性能研究	马 啸, 吉眉颖, 陈声晓	3	[2019046](109)
UDM: 基于 NFV 的防止 DDoS 攻击 SDN 控制器的机制	钱红燕, 薛 昊, 陈 鸣	3	[2019067](116)
口碑参与模式下移动众包网络的用户博弈研究	曾 锋, 王润华, 彭 佳, 陈志刚	3	[2019029](125)
基于迫整检测的全分集多用户空时分组编码设计准则			
.....	李国权, 周湘云, 林金朝, 徐勇军, 庞 宇, 王家城	3	[2019063](139)
基于弹性光网络的多播业务保护算法	吴菁晶, 张建芳	3	[2019061](147)
基于智能手机内置传感器的人体运动状态识别			
.....	殷晓玲, 陈晓江, 夏启寿, 何 娟, 张鹏艳, 陈 峰	3	[2019057](157)
复杂网络环境下面向威胁监测的采集策略精化方法			
.....	李凤华, 李子孚, 李 凌, 张 铭, 耿 魁, 郭云川	4	[2019096](49)
联合功率与信道的 WSN 生命期优化博弈算法	郝晓辰, 姚 宁, 解力霞, 王姣姣, 王立元	4	[2019097](62)
基于门限环签名的可删除区块链	任艳丽, 徐丹婷, 张新鹏, 谷大武	4	[2019084](71)
基于多方安全计算的属性泛化 mix-zone	王 斌, 张 磊, 张国印	4	[2019077](83)
抗密钥泄露的支持密态数据去重的完整性审计方案	张襄松, 李 晨, 刘振华	4	[2019076](95)
窄带物联网非连续接收机制功耗模型与优化			
.....	简 鑫, 韦一笑, 刘钰芬, 宋 健, 曾孝平, 谭晓衡	4	[2019094](107)
不完全信息下的威胁处置效果模糊评估	李凤华, 李勇俊, 杨正坤, 张 晗, 张玲翠	4	[2019078](117)
格上基于身份的云存储完整性检测方案	田苗苗, 高 闯, 陈 洁	4	[2019073](128)
基于业务优先级的认知卫星网络频谱分配方法			
.....	贾 敏, 敬晓晔, 刘晓锋, 刘 枫, 郭 庆, 顾学迈	4	[2019080](140)
基于区域残差和 LSTM 网络的机场延误预测模型	屈景怡, 叶 萌, 渠 星	4	[2019091](149)
基于信道状态信息的无源室内人员日常行为检测方法	党小超, 黄亚宁, 郝占军, 司 雄	4	[2019082](160)
基于 U 型检测网络的图像篡改检测算法	王珠珠	4	[2019086](171)
天地一体化信息网络域间协议实验平台	杨增印, 李贺武, 吴 茜, 吴建平, 刘 君	5	[2019112](1)

APP 隐私泄露风险评估与保护方案	王新宇, 牛 犇, 李风华, 贺 坤	5	[2019085](13)
多天线全双工中继辅助的异构蜂窝网物理层安全性能分析	钟 州, 张 波, 戚晓慧, 黄开枝	5	[2019074](24)
基于相空间对称 Lorenz 阵子群的混沌保密通信研究	刘林芳, 芮国胜, 张 洋, 吴前龙	5	[2019117](32)
可扩展网络服务模型的服务扩展能力分析	吉祖勤, 沈 军, 丁德林, 崔效玮	5	[2019109](39)
云存储环境下支持属性撤销的属性基加密方案	孙 磊, 赵志远, 王建华, 朱智强	5	[2019116](47)
基于位置服务隐私自关联的隐私保护方案	李维皓, 曹 进, 李 晖	5	[2019110](57)
区块链环境下的新型网络隐蔽信道模型研究			
.....	李彦峰, 丁丽萍, 吴敬征, 崔 强, 刘雪花, 关 贝	5	[2019111](67)
面向海量电子凭据的分层可扩展存储架构	李风华, 李丁焱, 金 伟, 王 竹, 郭云川, 耿 魁	5	[2019104](79)
基于边介数模型的差分隐私保护方案	黄海平, 王 凯, 汤 雄, 张东军	5	[2019095](88)
基于无率码的信息与能量同传中继信道传输速率的优化与实现	雷维嘉, 董明昊	5	[2019092](98)
基于重要性采样的优势估计器	刘 全, 姜玉斌, 胡智慧	5	[2019122](108)
带冲突检测的两阶段无连接接入协议最优资源分配			
.....	简 鑫, 王 芳, 宋 健, 付 澍, 谭晓衡, 曾孝平	5	[2019102](117)
端信息跳扩混合的主动网络防御技术研究			
.....	石乐义, 郭宏彬, 温 晓, 李剑蓝, 崔玉文, 马猛飞, 孙 慧	5	[2019071](125)
基于大地经纬度的二维 TDOA 无源定位	马方立, 徐 扬, 徐 鹏	5	[2019118](136)
基于遍历微小单元法非直视非共面紫外光通信信道容量分析			
.....	宋 鹏, 苏彩霞, 赵太飞, 陈锦妮, 朱 磊, 张晓丹	5	[2019103](144)
标准模型下可撤销的基于身份的代理重签名方案	杨小东, 李雨潼, 王晋利, 麻婷春, 王彩芬	5	[2019072](153)
安全数据采集代理顽健部署策略研究	陈黎丽, 王 震, 郭云川, 华佳烽, 姚宇超, 李风华	6	[2019121](51)
人工噪声策略的临界信噪比和功率分配研究	邓 浩, 王慧明	6	[2019114](66)
随机响应机制效用优化研究	周异辉, 鲁来凤, 吴振强	6	[2019088](74)
高动态 BOC 信号捕获算法	潘 毅, 张天骐, 张 刚, 马宝泽	6	[2019145](82)
无人机辅助车联网环境下干扰感知的节点接入机制	范茜莹, 黄传河, 朱钧宇, 文少杰	6	[2019081](90)

基于利益相关视角的多维 QoS 云资源调度方法.....	苏命峰, 王国军, 李仁发	6	[2019113](102)
车对车三维信道建模及其空-时相关特性分析.....	曾文波, 何怡刚, 李兵, 时国龙, 赵锋	6	[2019115](116)
基于信号博弈的移动目标防御最优策略选取方法.....	蒋 侣, 张恒巍, 王晋东	6	[2019125](128)
天地一体化网络无缝切换和跨域漫游场景下的安全认证增强方案.....	薛开平, 周焕城, 孟 薇, 李少华	6	[2019128](138)
基于高斯混合模型的增量聚类方法识别恶意软件家族.....	胡建伟, 车 欣, 周 漫, 崔艳鹏	6	[2019135](148)
跨社交网络的隐私图片分享框架.....	李风华, 孙 哲, 牛 犇, 曹 进, 李 晖	7	[2019107](1)
SSRC: 时延敏感流的数据源端速率控制算法.....	杨 洋, 曹 敏, 杨家海, 车 嵘, 刘 伟	7	[2019070](14)
基于多 QoS 约束条件的广域信息管理系统任务调度算法.....	李 罡, 吴志军	7	[2019166](27)
高效的 MIMO 雷达运动目标三维成像方法.....	王 伟, 胡子英, 岳佳男	7	[2019140](38)
基于改进 FEMD 算法的可逆秘密图像共享方案.....	马利民, 王佳慧	7	[2019130](48)
基于网络通信异常识别的多步攻击检测方法.....	据安康, 郭渊博, 李 涛, 叶子维	7	[2019142](57)
面向数据跨域流转的延伸访问控制机制.....	谢绒娜, 郭云川, 李风华, 史国振, 王亚琼, 耿 魁	7	[2019151](67)
基于地理路由和参与者协作模型的 WSAW 的通信机制.....	赵海军, 贺春林, 蒲 斌, 崔梦天	7	[2019162](77)
面向高速网络流量的恶意镜像网站识别方法.....	张 蕾, 张 鹏, 孙 伟, 杨兴东, 邢丽超	7	[2019089](87)
基于 FRT-MLVD 的无源雷达机动目标徙动补偿算法.....	赵勇胜, 胡德秀, 靳 科, 刘智鑫, 赵拥军	7	[2019158](95)
基于学习模型的 3D-HEVC 提前 Merge 模式终止算法.....	李 跃, 杨高波, 丁湘陵, 朱亚培	7	[2019165](104)
基于图像深度学习的无线电信号识别.....	周 鑫, 何晓新, 郑昌文	7	[2019167](114)
基于步态特征的移动平台持续认证方案.....	杨 力, 马卓茹, 张程辉, 裴庆祺	7	[2019146](126)
可证明安全的理性委托计算协议.....	田有亮, 李秋贤, 张 铎, 王琳杰	7	[2019133](135)
互耦条件下 MIMO 雷达非圆目标稳健角度估计方法.....	王咸鹏, 国月皓, 黄梦醒, 沈 重, 曹春杰, 冯文龙	7	[2019163](144)
基于混合樽海鞘-差分进化算法的贝叶斯网络结构学习算法.....	刘 彬, 范瑞星, 刘浩然, 张力悦, 王海羽, 张春兰	7	[2019124](151)
基于可编程无线环境的太赫兹频段多射线信道模型.....	罗文字, 刘河潮	7	[2019161](162)

异构云无线接入网络中的波束成形算法.....	左加阔, 杨龙祥, 鲍楠	8	[2019170](45)
MicroNF: 基于微服务的异构网络功能虚拟化框架.....	孙晨, 毕军 , 郑智隆, 王舒鹤, 胡宏新	8	[2019131](54)
云环境下基于函数编码的移动应用克隆检测.....	杨佳, 付才, 韩兰胜, 鲁宏伟, 刘京亮	8	[2019106](60)
雷达海上机动目标高分辨稀疏分数阶模糊函数检测方法.....	于晓涵, 陈小龙, 关键, 黄勇	8	[2019156](72)
基于流网络的 Flink 平台弹性资源调度策略.....			
.....	李梓杨, 于炯, 卞琛, 张译天, 蒲勇霖, 王跃飞, 鲁亮	8	[2019173](85)
改进的 SMC-CBMeMber 前向后向平滑检测前跟踪算法.....	裴家正, 黄勇, 董云龙, 陈小龙	8	[2019098](102)
基于性能感知的网络切片部署方法.....	黄开枝, 潘启润, 袁泉, 游伟, 汤红波	8	[2019169](114)
基于态势感知的 SWIM 服务权限主动移交模型.....	吴志军, 周胜琰, 雷缙	8	[2019171](123)
基于多粒度级联孤立森林算法的异常检测模型.....	杨晓晖, 张圣昌	8	[2019132](133)
基于三次指数平滑法和时间卷积网络的云资源预测模型.....	谢晓兰, 张征征, 王建伟, 程晓春	8	[2019172](143)
SLCE 序列的 2-adic 复杂度.....	王艳, 李顺波, 薛改娜	8	[2019143](151)
支持内容智能治理的双结构互联网.....	杨鹏, 李幼平	9	[2019197](1)
室内超密集网络中基于干扰图的自适应干扰协调方法.....	吴宣利, 谢子怡, 吴玮	9	[2019136](15)
基于区域递增式彩色视觉密码的栅格地图多级分存算法研究.....			
.....	房礼国, 付正欣, 胡浩, 沈刚, 郁滨	9	[2019193](24)
基于 SDN 的自组织网络路由框架及构建方法.....	董芳, 胡宇翔, 李鸥	9	[2019153](33)
基于虚拟调制指数集的多指数 CPM 减相位状态检测.....			
.....	谢顺钦, 周镛, 陈大海, 李湘鲁, 钟声, 张健	9	[2019185](45)
基于节点通信行为时序的指控信息流挖掘算法.....	项英倬, 徐正国, 游凌	9	[2019176](51)
基于隐含上下文支持向量机的服务推荐方法.....	赵晨阳, 王俊岭	9	[2019190](61)
基于几何相关的 GPS 观测量随机误差模型的研究.....	周桃云, 廉保旺, 杨冬冬, 张怡, 蔡成林	9	[2019188](74)
机会社交网络中基于时变兴趣社区的查询消息路由算法.....	毕俊蕾, 李致远	9	[2019177](86)
基于 SDN 的自适应路由与波长分配方法.....	赵中楠, 王健, 郭红微	9	[2019157](95)
面向群组推荐的个性化隐私保护方法.....	王海艳, 陆金祥	9	[2019183](106)

雾无线接入网中的多层协作缓存方法	蒋雁翔, 夏骋宇	9	[2019093](116)
认知异构无线网络中传输速率最大化的频谱资源分配方法	董晓庆, 程良伦, 郑耿忠, 王涛	9	[2019189](124)
频谱灵活光网络的故障概率与光纤链路负载均衡联合优化方法	陈博文, 符小东, 雷雨	9	[2019178](136)
TSL: 基于连接强度的 Facebook 消息流行度预测模型	王晓萌, 方滨兴, 张宏莉, 王星	10	[2019207](1)
基于二次最优阈值近似消息传递法的蒸发波导去噪重构			
..... 芮国胜, 刘歌, 田文飏, 董道广, 张雅楠		10	[2019200](10)
基于时频能量谱纹理特征的跳频调制方式识别	李红光, 郭英, 睦萍, 齐子森	10	[2019191](20)
基于频率正交时间反演的空间聚焦虚拟覆盖方法研究	聂益芳, 李方伟	10	[2019211](30)
移动群智感知中基于社区的任务分发算法	龙浩, 张书奎, 张洋, 张力	10	[2019213](42)
基于 SDN 节点淆乱机制的接收方不可追踪的混合匿名通道	赵蕙, 王良民	10	[2019155](55)
面向移动网络的视频初始缓冲队列长度测量方法	程光, 房敏, 吴桦	10	[2019179](67)
基于马尔可夫的有限自动机入侵容忍系统模型	罗智勇, 杨旭, 孙广路, 谢志强, 刘嘉辉	10	[2019196](79)
基于 Shamir 的虚拟机放置策略	田俊峰, 王子龙, 何欣枫, 李珍	10	[2019141](90)
基于 XGBoost 的特征选择算法	李占山, 刘兆庚	10	[2019154](101)
融合高阶信息的社交网络重要节点识别算法	闫光辉, 张萌, 罗浩, 李世魁, 刘婷	10	[2019198](109)
基于降噪自编码器的水声信号增强研究	殷敬伟, 罗五雄, 李理, 韩笑, 郭龙祥, 王建峰	10	[2019181](119)
基于休眠模式与注册服务的云架构性能优化问题的研究	金顺福, 武海星, 霍甜甜, 赵文娟	10	[2019202](127)
SDM-EON 中考虑空闲光路预测的节能算法	熊余, 贺进有, 王保华, 周彬	10	[2019203](137)
基于 Thomas 簇过程的异构蜂窝网能量效率分析	金明录, 郭楠	10	[2019184](149)
基于身份属性的 SDN 控制转发方法	祝现威, 常朝稳, 朱智强, 秦晰	11	[2019232](1)
宏基站和微基站群之间的预测性信道调度算法	谢映海, 姚若河, 吴斌	11	[2019217](19)
基于多端卷积神经网络的调制识别方法	查雄, 彭华, 秦鑫, 李广, 李天昀	11	[2019206](30)
基于 Rayleigh 商的次子空间准则跟踪函数	徐中英, 高迎彬, 孔祥玉, 杜伯阳	11	[2019216](38)
面向云数据中心的多业务差异化流量管理优化策略			
..... 王耀民, 王霞, 董易, 高莲, 张松海, 施心陵		11	[2019215](45)

基于特征值的频谱感知融合算法	赵文静, 李贺, 金明录	11	[2019201](57)
基于二维码和可逆可视水印的图像隐私保护方案	姚远志, 王锋, 严文博, 俞能海	11	[2019220](65)
提高 fuzzing 边覆盖率的改进方法	贾春福, 严盛博, 王志, 武辰璐, 黎航	11	[2019223](76)
不完美时间同步下物理层安全协同干扰功率分配	郭文博, 宋长庆, 文荣, 赵宏志, 唐友喜	11	[2019214](86)
基于非完美信道信息的 MIMO NOMA 系统和速率最大化			
.....	孙彦景, 刘洋, 周家思, 曹起, 李松	11	[2019221](94)
基于属性加密的区块链数据溯源算法	田有亮, 杨科迪, 王缙, 冯涛	11	[2019222](101)
单/多源网络编码同态签名方案	俞惠芳, 李雯	11	[2019219](112)
SIMON 轻量级密码算法的唯密文故障分析			
.....	李玮, 吴益鑫, 谷大武, 李嘉耀, 曹珊, 汪梦林, 蔡天培, 丁祥武, 刘志强	11	[2019204](122)
基于 OBDD 访问结构的无配对 CP-ABE 方案	丁晟, 曹进, 李晖	12	[2019234](1)
基于演化博弈的隐私风险自适应访问控制模型	丁红发, 彭长根, 田有亮, 向淑文	12	[2019240](9)
周期为 p^2 的 q 元序列的 k -错线性复杂度	吴晨煌, 许春香, 杜小妮	12	[2019230](21)
支持高并发的 Hadoop 高性能加密方法研究	金伟, 余铭洁, 李凤华, 杨正坤, 耿魁	12	[2019224](29)
基于预训练机制的自修正复杂语义分析方法	李青, 钟将, 李立力, 李琪	12	[2019195](41)
基于信息论方法的多等级位置隐私度量与保护	张文静, 刘樵, 朱辉	12	[2019235](51)
基于深度强化学习的软件定义网络 QoS 优化	兰巨龙, 张学帅, 胡宇翔, 孙鹏浩	12	[2019227](60)
基于 Storm 平台的数据迁移合并节能策略			
.....	蒲勇霖, 于炯, 鲁亮, 李梓杨, 卞琛, 廖彬	12	[2019226](68)
干扰门限与回程容量限制下 UDN 的能效与谱效联合优化算法	吴宣利, 陈旭	12	[2019205](86)
基于压缩感知的 FBMC/OQAM 系统信道估计方法	袁伟娜, 严秋	12	[2019239](98)
周期为 $2q$ 理想几乎四进制序列构造研究	彭秀平, 冀惠璞, 郑德亮, 牛晓霞	12	[2019225](105)
WSN 中基于改进粒子群优化算法的分簇路由协议	武小年, 张楚芸, 张润莲, 孙亚平	12	[2019241](114)

综 述

6G 移动通信技术展望	张平, 牛凯, 田辉, 聂高峰, 秦晓琦, 戚琦, 张娇	1	[2019022](141)
-------------------	------------------------------	---	----------------

基于局部扩展的社区发现研究现状	史艳翠, 王 嫒, 赵 青, 张贤坤	1	[2019013](149)
可信云平台技术综述	何欣枫, 田俊峰, 刘凡鸣	2	[2019035](154)
基于雾计算的可信传感云研究进展	王 田, 沈雪微, 罗 皓, 陈柏生, 王国军, 贾维嘉	3	[2019068](170)
软件定义的 D2D 和 V2X 通信研究综述	邵雯娟, 沈庆国	4	[2019075](179)
煤矿应急救援通信技术的现状与趋势	胡青松, 杨 维, 丁恩杰, 李世银, 李冰皓	5	[2019123](163)
确定性网络研究综述	黄 韬, 汪 硕, 黄玉栋, 郑 尧, 刘 江, 刘韵洁	6	[2019119](160)
别名解析技术研究进展	王占丰, 程 光, 胡 超, 李 晗, 翁年凤, 曹华平	7	[2019134](169)
无线网络中的移动预测综述	王 莹, 苏 壮	8	[2019159](157)
中文文本信息隐藏研究进展	吴国华, 龚礼春, 袁理锋, 姚 晔	9	[2019208](145)
大数据环境下差分隐私保护技术及应用	付 钰, 俞艺涵, 吴晓平	10	[2019209](157)
工业互联网标识解析体系综述			
.....	任语铮, 谢人超, 曾诗钦, 赵浩然, 喻嘉义, 霍 如, 黄 韬, 刘韵洁	11	[2019238](138)
智能启发算法在机器学习中的应用研究综述	沈焱萍, 郑康锋, 伍淳华, 杨义先	12	[2019242](124)

杰青优青专栏

高速光子防火墙关键技术综述	黄善国, 李 新, 唐 颖, 郭俊峰	9	[2019212](157)
量子密钥分发城域光组网技术前瞻	王 华, 赵永利	9	[2019210](168)
面向中短距光纤通信系统的多维自适应传输技术	唐 明, 陈 曦	11	[2019237](156)
基于深度学习的面向 IP-over-EON 的可编程跨层网络业务性能感知系统			
.....	朱祖勍, 孔嘉伟, 牛 彬, 唐绍飞, 房红强, 刘思祺	11	[2019229](171)

学术通信

融合多尺度信息的弱监督语义分割及优化	熊昌镇, 智 慧	1	[2019004](163)
基于多分布密度位置指纹的高效室内定位算法研究	乐燕芬, 汤 卓, 盛存宝, 施伟斌	1	[2019001](172)
C3S: 基于相长干涉的智能传感系统并发传输策略研究			
.....	毛艳艳, 程大鹏, 冯烟利, 窦全胜, 李大社	1	[2019017](180)

基于量子混沌映射降低 OFDM 系统 PAPR 的算法研究	马英杰, 赵 耿, 魏占祯, 李兆斌, 鞠 磊	1	[2019008](195)
基于布尔混沌的物理随机数发生器	张琪琪, 张建国, 李 璞, 郭龔强, 王云才	1	[2019014](201)
ARIA 密码的积分故障分析	沈 煜, 李 玮, 谷大武, 吴益鑫, 曹 珊, 刘 亚, 刘志强, 周志洪	2	[2019033](164)
基于移动端协助的远程用户单一口令认证方法	徐 渊, 杨 超, 杨 力	2	[2019044](174)
基于数字证书的 openstack 身份认证协议	朱智强, 林初昊, 胡翠云	2	[2019030](188)
关于二元割圆序列的 k -错线性复杂度	陈智雄, 吴晨煌	2	[2019034](197)
基于 PUF 的 Logistic 混沌序列发生器	黄春光, 程 海, 丁 群	3	[2019064](182)
布尔混沌系统的物理随机性分析	龚利爽, 侯二林, 刘海芳, 李凯凯, 王云才	3	[2019048](190)
ELAB: 基于端系统的新型拥塞感知负载均衡机制	陈 果, 张滩丰	3	[2019054](196)
多载波无线携能通信的上下行链路联合资源分配	崔 苗, 喻 鑫, 李学易, 张广驰, 刘怡俊, 林 凡	3	[2019052](206)
基于动态信誉的无线 Mesh 网络安全路由机制	杨宏宇, 韩 越	4	[2019083](195)
基于随机森林的链路质量预测	刘琳岚, 高声荣, 舒 坚	4	[2019025](202)
5G 双连接场景下的低传输时延切换机制	裴旭明, 贾建鑫, 钱 骅, 朱正航, 唐振宇, 康 凯	4	[2019090](212)
大规模云计算服务器优化调度问题的最优二元交换算法研究	王万良, 臧泽林, 陈国棋, 屠杭垚, 王宇乐, 陆琳彦	5	[2019105](180)
一类新的基于元胞自动机的 S 盒的密码学性质研究	关 杰, 黄俊君	5	[2019101](192)
低面积复杂度 AES 低熵掩码方案的研究	姜久兴, 厚 娇, 黄 海, 赵玉迎, 冯新新	5	[2019100](201)
基于三维模型贴图与结构数据的信息隐藏算法	任 帅, 王 震, 苏东旭, 张 弢, 慕德俊	5	[2019108](211)
支持多种特性的基于属性代理重加密方案	冯朝胜, 罗王平, 秦志光, 袁 丁, 邹莉萍	6	[2019127](177)
交换交叉立方网络在 PMC 模型下的 (t, k) -诊断度研究	郭 晨, 肖志芳, 冷 明, 彭 硕, 王 博	6	[2019099](190)
系统极化码和非系统极化码的性能比较	李 晖, 叶 铭, 童 强, 程 杰, 王力杰	6	[2019147](203)

云环境下 SDN 网络低速率 DDoS 攻击的研究.....	陈兴蜀, 滑 强, 王毅桐, 葛 龙, 朱 毅	6	[2019120](210)
异构携能通信网络顽健资源分配算法.....	徐勇军, 胡 圆, 李国权, 林金朝, 陈前斌	7	[2019160](186)
无线传感器网络中基于自适应网格的多目标定位算法.....	王天荆, 李秀琴, 白光伟, 沈 航	7	[2019129](197)
基于拍卖模型的移动群智感知网络激励机制.....			
.....	刘媛妮, 李垚焯, 李慧聪, 李万林, 张建辉, 赵国锋	7	[2019138](208)
基于区块链的去中心化信贷系统及应用.....	王明生, 曹鹤阳, 李佩瑶	8	[2019126](169)
移动低占空比传感网中基于多信标消息的低时延邻居发现算法.....			
.....	梁俊斌, 周 翔, 马方强, 蒋 婵, 何宗键	8	[2019139](178)
卫星网络中基于双向寻优粒子群算法的连接计划设计.....	戴翠琴, 唐 煌, 郭林峰	8	[2019180](189)
MQAM 信号调制方式自动识别方法.....	张华娣, 楼华勋	8	[2019168](200)
基于最佳匹配拍卖的企业级网络资源分配策略.....	丛 鑫, 瞿玲玲, 沈学利	8	[2019186](212)
基于快速迭代插值的 FMCW 雷达距离估计算法.....	段永昌, 李 欣, 黄耀辉, 黄 平	9	[2019187](175)
TWINE 算法的相关密钥不可能飞来去器攻击.....	谢 敏, 田 峰, 李嘉琪	9	[2019152](184)
联合成对排序的物品推荐模型.....	吴 宾, 陈 允, 孙中川, 叶阳东	9	[2019137](193)
基于能效的渐近式 RZF 协作波束成形算法研究.....	张颖慧, 张 彪, 逯效亭, 刘 洋	10	[2019174](169)
基于复数支持向量回归机的盲均衡算法.....	杨 凌, 陈 亮, 赵 骥, 张国龙, 李 媛	10	[2019199](180)
时空压缩激励残差乘法网络的视频动作识别.....	罗会兰, 童 康	10	[2019194](189)
基于 RLWE 支持身份隐私保护的双向认证密钥协商协议.....			
.....	杨亚涛, 韩新光, 黄洁润, 赵 阳	11	[2019218](180)
基于稳健特征点的平稳小波域数字水印算法.....			
.....	牛盼盼, 杨思宇, 王 丽, 杨红颖, 李 丽, 王向阳	11	[2019228](187)
基于动态模板的策略翻译及配置方法.....	郭云川, 李 凌, 李勇俊, 成 林, 杜 君, 张玲翠	12	[2019236](138)
基于特征值的可验证三方安全密钥交换协议.....	张艳硕, 王泽豪, 王志强, 陈辉焱	12	[2019233](149)
基于张量填补和用户偏好的联合推荐算法.....	熊 智, 徐 恺, 蔡玲如, 蔡伟鸿	12	[2019231](155)