

# 一种面向物联网的感知 节点 Amorphous 定位改进算法研究

钱开国<sup>1</sup>, 王玉见<sup>2</sup>

(1. 昆明学院 物理科学与技术系, 云南 昆明 650214; 2. 昆明学院 信息技术学院, 云南 昆明 650214)

**摘要:**针对物联网底层感知节点定位算法 Amorphous 及其改进算法存在定位误差大的问题, 提出一种改进算法, 选择跳数小, 更可靠的信标节点作为参考节点, 减少最小跳路径距离替代节点间欧氏距离引入的距离估计误差. 同时采用双曲线计算方法减少累积误差, 提高节点定位精度. 仿真实验表明, 在传感器网络节点均匀分布时, 该改进算法的定位误差小于 Amorphous 和 DV-Hop 及其改进算法. 在非均匀分布时, 该改进算法的定位误差远小于其他 3 种算法, 定位性能明显改进.

**关键词:**无线传感器网络; 定位算法; 节点分布; 相对定位误差

**中图分类号:** TN929.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5639(2017)06-0058-05

**DOI:** 10.14091/j.cnki.kmxyxb.2017.06.013

## An Improved Amorphous Localization Algorithm in Wireless Sensor to Internet of Things

QIAN Kaiguo<sup>1</sup>, WANG Yujian<sup>2</sup>

(1. Department of Physics Science and Technology, Kunming University, Kunming, Yunnan, China 650214;

2. College of Information Technology, Kunming University, Kunming, Yunnan, China 650214)

**Abstract:** Due to the sensor node localization algorithm Amorphous in the low level of internet of things and the problem of localization error in its improved algorithm, an improved algorithm is put forward to ensure the localization accuracy. We select the beacon node with small hop count but more reliable as the reference node; we reduce the distance of mini hop path to take place of the distance estimation error between nodes by Euclidean distance. Meanwhile, two-dimensional hyperbolic calculation method is adopted to reduce the accumulative error to improve the node location accuracy. Simulation experiment showed when the sensor networks node is uniform distribution, the localization error of the improved algorithm is lower than those of Amorphous, DV-Hop algorithm and their improved algorithm; when the sensor networks node is non-uniform distribution, the localization error of the improved algorithm is much lower than the other three algorithms and with obvious improvement in positioning.

**Key words:** wireless sensor network (WSN); localization algorithm; node distribution; relative positioning error

物联网(Internet of Things, IoT)是当前新兴的网络技术, 其实现了用户应用终端从互联网的人与人之间的信息交互与通信扩展到人与物、物与物之间的沟通连接, 物品自动识别和信息共享<sup>[1]</sup>. 在文献[2]提出的物联网的体系结构中, 无线传感器网络<sup>[3]</sup>是其信息感知层的关键技术, 实现物体对外部物理环境的感知, 允许系统对物品属性进行识别以及对信息的采集和捕获. 其中位置信息对于物联网应用至关重要<sup>[4]</sup>, 其本身

代表了监测事件信息, 同时是传感器网络的覆盖控制、路由等关键技术设计的基础. 由于无线传感器网络是大规模、低成本部署, 传感器节点不可能全部装配位置信息感知模块, 因此, 设计有效的节点定位算法是无线传感器网络关键技术之一. 已有的定位算法分为基于测距(Range-based)和免测距(Range-free)的两种定位方法<sup>[5]</sup>, 典型的基于测距的算法有 RSSI (Received Signal Strength Indicator)<sup>[6]</sup>, TOA (Time of Arrival)<sup>[7]</sup>,

收稿日期: 2017-10-11

基金项目: 云南省教育厅科学研究基金资助项目(2016ZZX182); 昆明学院物联网应用技术科研创新团队基金资助项目(2015CXTD04); 昆明市物联网及泛在工程技术中心开放课题基金资助项目(KMIOTKFKT2014001).

作者简介: 钱开国(1979—), 男, 云南宁蒗人, 教授, 硕士, 主要从事无线传感器网络研究.

TDOA (Time Difference of Arrival)<sup>[8]</sup>, AOA (Angle of Arrival)<sup>[9]</sup>等. 这些定位方法测量到节点间的距离或者方位后, 利用最小二乘法确定节点位置. 传感器节点需要配置硬件测量模块, 成本高, 节点能量消耗较大, 影响传感器网络的生命周期. 而免测距算法根据网络拓扑信息估计节点间距离, 然后计算未知节点位置<sup>[7]</sup>. 免测距的定位算法有 Centriod, DV-Hop<sup>[10]</sup>, APIT<sup>[11]</sup>, Amorphous<sup>[12]</sup>. 此外, 免测距定位算法不需要硬件支持, 具有成本较低、功耗低等优点. 其中 Amorphous 定位算法通过节点间连通信息估算出未知节点到信标节点的距离, 再采用三边定位确定未知节点位置. 不需要硬件支持, 实现机制简单, 且容易实现, 受到研究人员的广泛关注. 但距离估计完全依赖网络的连通性, 节点部署分布越均匀, 则定位越精确. 而在非均匀部署的传感器网络应用中, 距离估计误差较大, 定位精度不高, 难以满足定位需求.

针对 Amorphous 算法的特点, 分析利用最小跳路径距离来估计未知节点到信标节点间的欧氏距离, 以及节点跳数对距离误差的累积影响程度, 使用信标节点对于未知节点可靠函数计算时, 尽可能选择路径跳数较小的节点参与距离估算和定位计算, 以减少定位误差. 同时采用双曲线法取代最小二乘法完成未知节点定位计算, 进一步提高定位精度.

## 1 Amorphous 和相关改进算法

经典 Amorphous 分为平均跳距离 (Average Hop Size, AHS) 计算、跳数获取、距离估计、未知节点定位计算 4 步.

1) AHS 计算. 信标节点根据公式(1) 计算平均跳距离 AHS.

$$AHS = r(1 + e^{-n_{local}} - \int_{-1}^1 e^{-\frac{n_{local}}{\pi}(\arccos(-t\sqrt{1-t^2}))} dt), \quad (1)$$

其中:  $r$  为节点通信半径;  $n_{local}$  为网络平均连通度.

2) 跳数获取. 每个节点 (包括信标节点) 以泛洪方式广播一个包含自身 Id、位置和 hops 字段的元数据, 邻居节点将该元数据与自己保存的来自同一 Id 的元数据比较, 如果自己已保存的元数据 hops 较小, 则不接受该元数据. 如果自己保存的元数据较大或者没有来自于同一 Id 的元数据, 则将 hops 字段加 1 并转发该数据. 通过泛洪通信方式, 每个节点均获取到其他节点的距离跳数.

3) 未知节点到信标节点的距离计算. 根据平均每跳距离 AHS 及距各信标节点跳数 hops, 未知节点

计算到达每个信标节点的距离, 如公式(2) 所示.

$$d = AHS \times hops. \quad (2)$$

4) 未知节点定位. 采用最小二乘法对未知节点定位. 设未知节点  $X$  的坐标  $(x, y)$ , 信标节点  $B_i$  的坐标  $(x_i, y_i)$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ , 按照公式(2) 估算出  $X$  到信标节点  $B_i$  的距离  $d_i$ . 则

$$\begin{aligned} (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 &= d_1^2, \\ (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 &= d_2^2, \\ \vdots &\quad \quad \quad \vdots \\ (x - x_n)^2 + (y - y_n)^2 &= d_n^2. \end{aligned} \quad (3)$$

变换成矩阵形式:

$$AX = B, \quad (4)$$

$$\text{其中 } A = \begin{pmatrix} x_1 - x_n & y_1 - y_n \\ x_2 - x_n & y_2 - y_n \\ \vdots & \vdots \\ x_{n-1} - x_n & y_{n-1} - y_n \end{pmatrix},$$

$$B = \begin{pmatrix} d_n^2 - d_1^2 + x_1^2 - x_n^2 + y_1^2 - y_n^2 \\ d_n^2 - d_2^2 + x_2^2 - x_n^2 + y_2^2 - y_n^2 \\ \vdots & \quad \quad \quad \vdots \\ d_n^2 - d_{n-1}^2 + x_{n-1}^2 - x_n^2 + y_{n-1}^2 - y_n^2 \end{pmatrix},$$

$$\text{则 } X = A^{-1}B. \quad (5)$$

在 Amorphous 定位过程中, 采用未知节点到信标节点的最小跳路径跳距代替节点间欧氏距离.

设采用公式(1) 计算的平均跳距 AHS 误差为  $\varepsilon$ , 则在公式(2) 中引入的距离估计误差为:

$$\Delta = \varepsilon \times hops, \quad (6)$$

其中跳数 hops 越大, 引入的距离估计误差  $\Delta$  越大.

在传感器节点均匀分布时, 距离估计误差较小, 但在节点分布不均的网络应用中, 节点间跳数 hops 较大, 引入误差较大, 如图 1 所示.

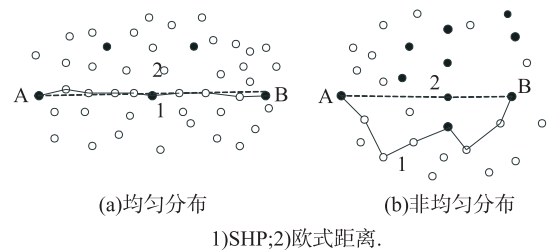


图1 最小跳路径偏离

为提高 Amorphous 算法的定位精度, 文献[13] 通过估算距离加权修正和线性规划方法减少定位误差. 文献[14] 通过修正跳数来提高定位精度. 文献

[15] 采用修正平均估计跳距和利用双曲线定位计算改进定位误差. 文献[16] 通过联立距离和跳数路径比率方程消除了平均跳距计算过程, 从而降低定位算法的计算复杂性. 而 A cluster-based localization<sup>[17]</sup> 首先将网络分簇, 然后在簇内实现分布式定位, 关注点是减少定位过程中网络通信负载. Selective 3-Anchor DV-hop<sup>[18]</sup> 提出了利用3个信标节点完成定位计算, 但3个信标节点的选择使用跳数向量相似判定原则, 其准确性较差.

## 2 Amorphous 定位改进算法

Amorphous 定位改进算法分为 SHP 获取、平均跳距 AHS 计算、信标节点选择和定位计算4个阶段.

### 2.1 跳数获取阶段

信标节点  $i$  生成元数据包含自身序号、位置信息字段和跳数字段, 即  $(id, x_i, y_i, hops)$  的四元组, 其中  $hops$  字段的初始值为0, 向周围邻居节点广播出去, 邻居节点接收该元数据后, 将  $hops$  字段值加1, 然后以泛洪方式广播出去, 每个接收节点如果收到来自同一信标节点的元数据, 则只保留  $hops$  字段值较小的元组数据. 同时未知节点生成最小跳数查询元数据, 包括自身序号和跳数字段, 即  $(id, hops)$  的二元组, 采用同信标节点一样的方式在全网内泛洪. 通过拓扑信息交换, 所有节点均保存相互间的距离跳数.

### 2.2 信标节点计算平均跳距

每个信标节点, 根据自身的连通度状态, 计算自身的每跳平均距离权值, 计算公式如(7)式.

$$HopSize_i = r(1 + e^{-n_{i\_local}} - \int_{-1}^1 e^{-\frac{n_{i\_local}}{\pi}(\arccos t - \sqrt{1-t^2})} dt), \quad (7)$$

其中:  $r$  为通信半径,  $n_{i\_local}$  为信标节点  $i$  的连通度.

### 2.3 信标节点选择

未知节点定位时, 选择 SHP 路径长的信标节点, 则距离累积误差大, 且更容易引人弯曲路径. 因此, 选择距未知节点  $u$  跳数较小及 SHP 路径较短的信标节点作为定位参考节点. 将初始时网络配置的信标节点赋予较高的可信度, 供未知节点优先选择. 未知节点首先选择其1-跳邻居高可信信标节点, 如该信标节点数小于3时, 选择2-跳邻居高可信信标节点. 完成定位后, 赋予较低的可信度, 升级为信标节点. 如果2-跳选择的高可信信标节点数和低可信信标节点数小于3时, 则等待下轮定位.

### 2.4 距离计算

选择好信标节点后, 按公式(8) 计算未知节点到信标节点的距离.

$$d = hops_{i \rightarrow j} \times hops, \quad (8)$$

其中  $hops$  为未知节点到信标节点的最小跳数.

### 2.5 定位计算

由于未知节点定位中, 传统 Amorphous 算法采用的多边定位法和最小二乘法的方法使误差二次化, 使得节点的定位误差较大. 因此采用双曲线定位方法, 设未知节点  $j$  的位置为  $(x_j, y_j)$ , 选择的信标节点  $i$  的位置为  $(x_i, y_i)$ , 计算过程如下:

$$(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 = d_{ji}^2. \quad (9)$$

如果参与定位的锚节点数为  $n$ , 则有:

$$\begin{cases} -2x_1 x_j - 2y_1 y_j + x_j^2 + y_j^2 = d_{j1}^2 - x_1^2 - y_1^2, \\ -2x_2 x_j - 2y_2 y_j + x_j^2 + y_j^2 = d_{j2}^2 - x_2^2 - y_2^2, \\ \vdots \\ -2x_n x_j - 2y_n y_j + x_j^2 + y_j^2 = d_{jn}^2 - x_n^2 - y_n^2. \end{cases} \quad (10)$$

$$\text{令 } A_i = x_i^2 + y_i^2, B_j = x_j^2 + y_j^2,$$

$$Z = [x_j, y_j, B]^T,$$

$$G = \begin{pmatrix} -2x_1 & -2y_1 & 1 \\ -2x_2 & -2y_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ -2x_n & -2y_n & 1 \end{pmatrix},$$

$$H = \begin{pmatrix} d_{j1}^2 - A_1 \\ d_{j2}^2 - A_2 \\ \vdots \\ d_{jn}^2 - A_n \end{pmatrix}.$$

则公式(10) 的矩阵表达式为:

$$GZ = H. \quad (11)$$

$Z$  的计算公式为:

$$Z = (G^T G)^{-1} G^T H. \quad (12)$$

所以未知节点  $j$  的坐标为:

$$(x_j, y_j) = (Z(1), Z(2)). \quad (13)$$

## 3 实验结果与分析

在  $900 \text{ m} \times 900 \text{ m}$  的区域内, 随机均匀部署300个传感器节点和 C-Shape 非均匀部署300个传感器节点. 在 C-Shape 分布中, 左上角传感器节点分布较为密集, 右下角较为稀疏, 右中部分没有节点部署, 实验拓扑如图2所示, 两种应用场中进行仿真实验,

验证本文改进算法、经典 Amorphous 算法、DV-Hop

算法和文献[13]算法定位误差.

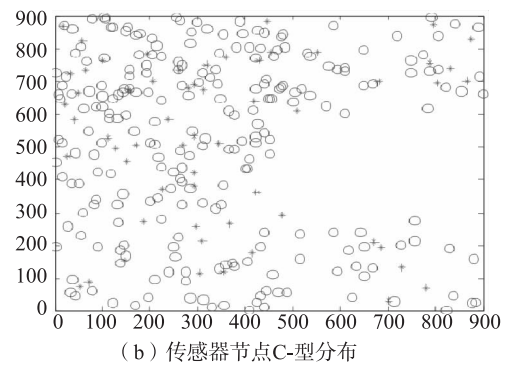
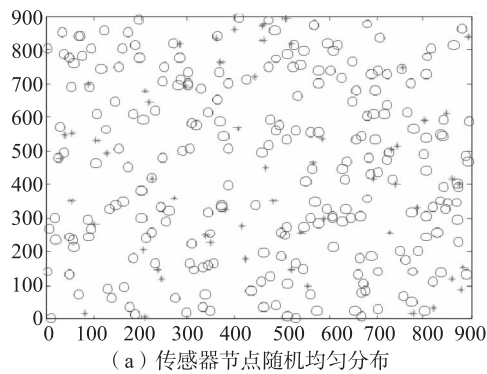


图2 网络拓扑结构

从网络的平均相对定位误差(Average Relative Positioning Error, ARPE)比较4种算法的定位性能. 平均相对定位误差按公式(14)定义.

$$ARPE = \sum_{i=1}^{N-M} \frac{\sqrt{(\hat{x}_i - x_i)^2 + (\hat{y}_i - y_i)^2}}{(N-M)r_{comm}}, \quad (14)$$

式中 $(\hat{x}_i, \hat{y}_i)$ 为节点*i*的估计位置, $(x_i, y_i)$ 为实际坐

标, $r_{comm}$ 节点通信半径.

### 3.1 信标节点对ARPE影响

将信标节点比例设置为10% ~ 60%,步长增长5%的条件下,计算4种算法的ARPE均值,结果如图3所示.

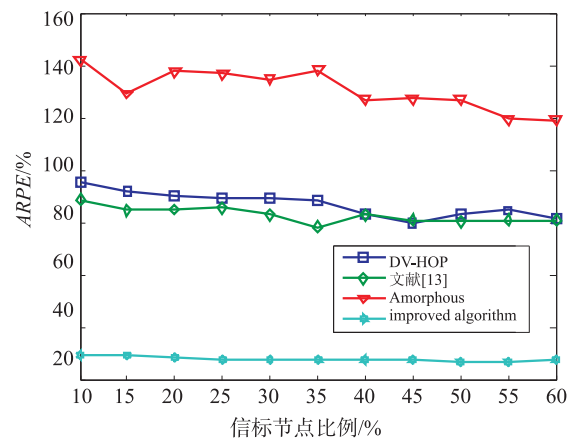
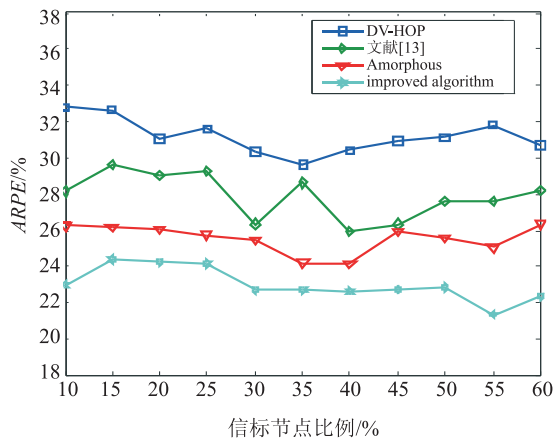


图3 信标节点增长时的ARPE对比值

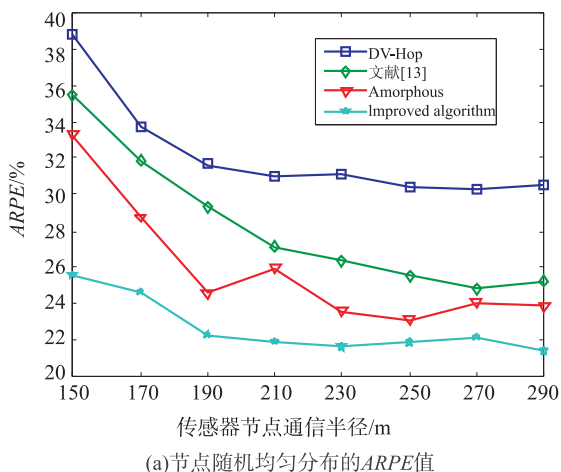
由图3可知,在节点随机均匀分布时,本文改进算法的ARPE明显低于经典Amorphous算法、DV-Hop算法和文献[13]算法的定位性能,随着信标节点比例增大,定位误差整体呈降低趋势,从24%降低到23%,但存在较小的震荡.在传感器节点C-型非均匀分布时,本文改进算法的ARPE均值远远低于前3种算法.随着信标节点比例的增加,改进算法的ARPE均值保持在28%左右,而经典Amorphous算法、DV-Hop算法和文献[13]算法的ARPE均值降低.

综合图3来看,本文改进算法在节点均匀分布时,提供23%左右的ARPE均值,在传感器节点C-

型分布时,定位误差上升到28%左右,定位误差变化不大,在两种网络节点分布应用中,均能满足定位精度要求.而经典Amorphous算法、DV-Hop算法和文献[13]算法在节点均匀分布时,其ARPE均值在25%到33%之间,在传感器节点C-型非均匀分布时,经典Amorphous的ARPE均值大于120%,DV-Hop算法和文献[13]算法的ARPE均值大于80%,不能满足定位精度要求,说明这3种定位算法不适用于传感器节点非均匀分布的传感器网络应用.同时在两种节点分布中,对于本文改进算法,信标节点比例对ARPE均值影响不大.

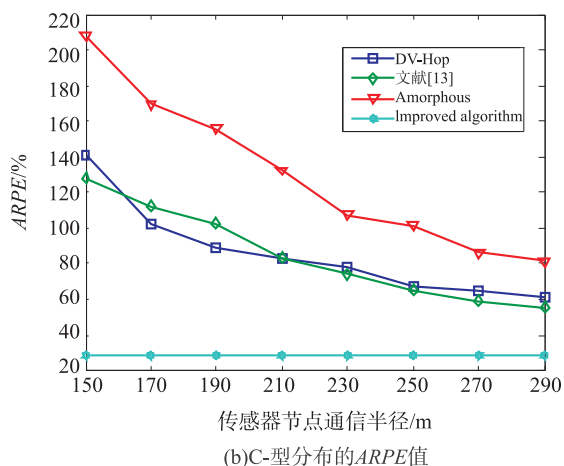
### 3.2 节点通信半径对 $ARPE$ 影响

传感器节点通信半径设置为 150 ~ 290 m, 步长



(a) 节点随机均匀分布的  $ARPE$  值

增长 20 m, 计算 4 种算法的  $ARPE$  均值, 结果如图 4 所示。



(b) C-型分布的  $ARPE$  值

图4 通信半径增大时的  $ARPE$  对比值

由图 4 可以看出, 在节点均匀分布时, 本文改进算法的  $ARPE$  均值微小于经典 Amorphous 算法, 明显小于 DV-Hop 和文献[13]算法. 随着信标节点比例增大, 4 种算法的  $ARPE$  均值均降低. 在传感器节点呈 C-型非均匀分布时, 本文改进算法的  $ARPE$  均值远远小于经典 Amorphous 算法、DV-Hop 算法和文献[13]算法的  $ARPE$  均值.

随着节点通信半径的增加, 定位误差保持在 28% 左右, 而其余 3 种算法的  $ARPE$  均值整体降低, 但均大于 60%. 综合图 4 来看, 无论传感器节点呈随机均匀分布或 C-型非均匀分布, 本文改进算法的定位误差均较小, 而其余 3 种定位算法, 在传感器节点非均匀分布时,  $ARPE$  均值大于 60%, 远大于在均匀分布的应用, 因此不适用于节点非均匀分布的传感器网络应用. 同时在两种节点分布中, 对于本文改进算法, 通信半径对  $ARPE$  均值影响不大.

## 4 结语

无线传感器网络节点位置信息获取是传感器网络应用的关键技术之一, 典型的定位算法 Amorphous 在无线传感器网络节点非均匀分布的应用中, 定位误差大, 不适用. 而我们通过信标节点对未知节点的信任计算, 在未知节点定位时, 尽可能选择 SHP 路径短的、更可信的信标节点作为参考节点, 消除距离估计累积误差, 使其适用于非均匀分布的网络应用. 同时未知节点定位时, 使用双曲线计算法取代最小二乘法, 使距离估计二次误差变为线性误差, 进一步降低定位误差. 实验证明, 改进后的算法

在传感器节点均匀分布的网络应用中, 定位误差明显改善. 在传感器节点非均匀分布的网络应用中, 定位误差远远低于 Amorphous 定位算法, 其  $ARPE$  均值低于 28%, 满足网络应用定位精度要求. 同时改进算法的  $ARPE$  均值受信标节点比例和通信半径影响较小, 在实际网络应用中, 可以部署较少的信标节点执行网络节点定位, 从而降低传感器网络建网成本和网络节点发射功率, 减小传感器节点定位时的能耗, 延长网络的生命周期.

## [参考文献]

- [1] 孙其博, 刘杰, 黎彝, 等. 物联网: 概念、架构与关键技术研究综述[J]. 北京邮电大学学报, 2010, 33(3): 1-9.
- [2] 钱志鸿, 王义君. 物联网技术与应用研究[J]. 电子学报, 2012, 40(5): 1023-1029.
- [3] REN F, HUANG H, LIN C. Wireless sensor networks[J]. Journal of Software, 2003, 14(14): 1513-1525.
- [4] 王福豹, 史龙, 任丰原. 无线传感器网络中的自身定位系统和算法[J]. 软件学报, 2005, 16(5): 857-867.
- [5] 曾凡仔, 孙正章, 罗娟, 等. 无线传感器网络的节点定位方法[J]. 通信学报, 2008, 29(11): 62-66.
- [6] NIEOLESEU D, NTH B. Ad-hoc positioning systems (APS) [J]. IEEE Global Telecommunications Conference, 2001 (5): 2926-2931.
- [7] PATWARI N, HERO A O, PERKINS M, et al. Relative location estimation in wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2003, 51(8): 2137-2148.

(下转第 67 页)

## 4 结论

以本文提出的描述长度增量作为条件概率分布间的相似性测度, 可以基于聚类算法和最小描述长度准则实现自适应的 Context 量化. 同时, 本文提出的 Context 量化算法无论对二进制还是多进制信源均能同时自适应确定量化级数和优化的量化分区. 基于小波的图像压缩对比实验结果表明, 该 Context 量化算法获得了与人工精心调试的经验量化器类似的压缩效率, 但却不依赖人工经验, 因此本方法可推广至其他基于 Context 建模的熵编码应用中.

### [参考文献]

- [1] 袁建亮, 朱远平. 基于 JPEG2000 的感兴趣区域压缩编码算法[J]. 天津师范大学学报, 2014, 34(1): 42–46.
- [2] 周映虹, 马争鸣. JPEG2000 中重要性编码及上下文建模的改进[J]. 中国图像图形学报, 2008, 13(8): 1402–1410.
- [3] WEINBERGER M J, RISSANEN J. Applications of universal context modeling to lossless compression of gray-scale images[J]. IEEE Trans Image Processing, 1996, 5(4): 575–586.
- [4] WU X, ZHAI G. Adaptive sequential prediction of multidimensional signals with applications to lossless image coding[J]. IEEE Trans Image Processing, 2011, 20(1): 36–42.
- [5] 刘文松, 朱恩, 王健, 等. JPEG2000 算术编码器的算法优化和 VLSI 设计[J]. 电子学报, 2011, 39(11): 2486–2491.
- [6] CHEN J H, ZHANG Y F, SHI X L. Image coding based on wavelet transform and uniform scalar dead zone quantizer[J]. Signal Processing: Image Communication, 2006, 21: 562–572.
- [7] WU X, CHOU P A, XUE X. Minimum conditional entropy context quantization[J]. IEEE International Symposium on Information Theory, 2000, 28(3): 43.
- [8] CAGNAZZO M, ANTONINI M, BARLAUD M. Mutual information-based context quantization[J]. Signal Processing: Image Communication, 2010, 25(1): 64–74.
- [9] FORCHHAMMER S, WU X, ANDERSEN J D. Optimal context quantization in lossless compression of image data sequences[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(4): 509–517.
- [10] FORCHHAMMER S, WU X. Context quantization by minimum adaptive code length[J]. IEEE International Symposium on Information Theory, 2007, 36(2): 246–250.
- [11] RISSANEN J. Stochastic complexity and modeling[J]. The Annals of Statistics, 1986, 14(3): 1080–1100.
- [8] GIROD L, ESTRIN D. Robust range estimation using acoustic and multimodal sensing[J]. IEEE Robotics and Automation Society, 2001(3): 1312–1320.
- [9] LOUKAS L, POOVENDRAN R. POPE: robust position estimation in wireless sensor networks[J]. International Conference on Information Processing in Sensor Networks, 2005, 43: 324–331.
- [10] WU G, WANG S, WANG B, et al. A novel range-free localization based on regulated neighborhood distance for wireless ad hoc and sensor networks[J]. Computer Networks, 2012, 56: 3581–3593.
- [11] NICULESCU D, NATH B. DV based positioning in ad hoc networks[J]. Telecommunication Systems, 2003, 22: 267–280.
- [12] HE T, HUANG C, BLUM B M, et al. Range-free localization and its impact on large scale sensor networks[J]. ACM Transactions on Embedded Computing System, 2005, 4(4): 877–906.
- [13] 石为人, 贾传江, 梁焕焕. 一种改进的无线传感器网络 DV-Hop 定位算法[J]. 传感技术学报, 2011, 24(1): 83–87.
- [14] 刘颖. 一种无线传感器网络的 Amorphous 定位算法改进[J]. 制造业自动化, 2011, 33(1): 161–163.
- [15] KUMAR S K, LOBIYAL D K. Improvement over DV-hop localization algorithm for wireless sensor networks[J]. World Academy of Science, 2013, 7(4): 235–245.
- [16] LIU Y, LUO X, LONG C, et al. Improved DV-hop localization algorithm based on the ratio of distance and path length[J]. Journal of Information & Computational Science, 2012, 9(7): 1875–1882.
- [17] MANISEKARAN S V, VENKATESAN R. Cluster-based architecture for Range-free localization in wireless sensor networks[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2014, 2014(9): 1–9.
- [18] GUI L, T VAL T, A WEI A. Improvement of range-free localization technology by a novel DV-hop protocol in wireless sensor networks[J]. Ad Hoc Networks, 2015, 24: 55–73.

(上接第 62 页)