

文章编号: 1001-0920(2012)03-0374-05

一种具有提高覆盖性能的传感器网络节能分簇算法

刘志新, 郑庆超, 薛亮, 关新平

(燕山大学 电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 通过分析不同类型节点的失效对于网络覆盖效率的影响, 提出一种具有能量和覆盖意识的无线传感器网络分簇算法. 该算法不依赖节点的物理位置信息, 优先选取部署密度较高区域的节点担任簇首, 当簇首的剩余能量低于设定阈值时实施簇首迁移, 以均衡网络能耗, 降低节点的死亡率. 进一步分析了算法复杂度和节点最优广播半径的选取. 仿真结果表明, 所提出的算法可有效改善网络运行中的覆盖性能, 延长网络寿命.

关键词: 无线传感器网络; 分簇算法; 覆盖效率; 剩余能量

中图分类号: TP393

文献标识码: A

Energy-efficient clustering algorithm with improved coverage performance in wireless sensor networks

LIU Zhi-xin, ZHENG Qing-chao, XUE Liang, GUAN Xin-ping

(Institute of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China. Correspondent: ZHENG Qing-chao, E-mail: zhengzheng1987@126.com)

Abstract: By analyzing the impact of failure of different nodes on the coverage efficiency, an energy and coverage aware clustering algorithm(ECCA) for wireless sensor networks is proposed, which does not rely on the nodes' physical location. With ECCA, the nodes in the high-density areas have high priority to be selected as cluster heads, and then the cluster head role migrates to other nodes when its residual energy is lower than the energy threshold. The method can effectively reduce the nodes' mortality and balance the energy consumption. The complexity of algorithm and the choice of optimal broadcast radius are analyzed further. Simulation results show that, compared with existing algorithms, the quality of the coverage is improved and the network lifetime is prolonged efficiently.

Key words: wireless sensor networks; clustering algorithm; coverage efficiency; residual energy

1 引言

无线传感器网络由大量具有感知、计算和通信能力的传感器节点组成, 通过节点的协同工作, 完成对目标区域信息的采集与处理^[1]. 无线传感器网络在环境监测、交通管理、空间探索和军事领域都有着广阔的应用前景. 由于传感器节点在能量、计算和通信能力方面的局限性, 网络路由协议设计的一个重要目标就是高效地使用节点能量来延长网络寿命^[2]. 针对网络中节点随机部署、能量受限、自组织、网络拓扑变化频繁等特点, 采用基于分簇的层次型路由算法相对于平面路由算法有更好的适应性和节能性^[3]. 分簇算法将传感器网络全部节点划分为不同簇, 每个簇中选举产生一个簇首节点协调管理簇内成员节点的工

作, 并负责簇内信息的收集、融合和转发, 其中簇首选择机制为关键所在. 但在许多实际应用中, 要求网络实时传输监测范围内任一区域的信息, 并对监测区域形成良好覆盖^[4]. 因此, 如何在选择簇首时充分考虑覆盖质量要求、降低节点能耗的研究具有重要意义.

本文从簇首优化选取的角度出发, 提出一种基于节点剩余能量和节点分布密度的分簇算法(ECCA), 在保证算法运行中网络覆盖要求的基础上, 均衡了节点的能耗, 延长了网络寿命.

2 相关工作

在目前典型的分簇算法中, 由Heinzelman等人^[5]提出的LEACH算法是最具代表性的分簇算法之一. 该算法是一种自适应拓扑算法, 周期性地执行簇的

收稿日期: 2010-09-25; 修回日期: 2011-03-02.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61104033, 61172095, 60974123); 国家重点基础研究发展计划项目(2010CB731800); 河北省教育厅基金项目(2008147); 河北省科技支撑配套项目(072435155D).

作者简介: 刘志新(1976—), 男, 副教授, 博士, 从事无线网络资源管理、节能优化等研究; 郑庆超(1987—), 男, 硕士生, 从事无线传感器网络拓扑控制的研究.

重构过程,在簇的形成过程中随机产生簇首,能够保证网络中的节点以等概率当选簇首,均衡了节点的能量消耗。然而,其选取机制并没有考虑节点的剩余能量,且不能保证已当选簇首的分布均衡性。由 Gerla 等人^[6]提出的 Highest-Degree 算法利用节点度数作为分簇依据,其中一跳范围内邻居节点数目最多的节点将广播簇首消息。但是,该算法缺乏当选簇首和网络吞吐量的自适应调整,节点的剩余能量未加考虑。文献[7-8]提出了两种利用加权因子进行分簇的算法。其中 WCA 算法^[7]综合考虑了节点的当前能量、节点度数、节点间的相对位置信息和移动性,并通过分配权重系数计算候选簇首的胜任水平,邻居节点中权值最小的节点将被选为簇首,其邻居不再参与选举。DCA 算法^[8]根据节点适合当簇首的程度为每个节点分配权值,权值高的节点优先决定自己的角色。

为了考虑覆盖的要求,PEAS 算法^[9]引入休眠机制,每个节点根据从邻居节点处获得的交叠信息决定自己是否进入休眠状态,算法通过减少网络中工作节点数目降低了节点之间的重叠面积。文献[10]假设节点位置已知,通过比较节点对于网络覆盖的影响程度,优先选取贡献较小的节点担任簇首,获得了较好的覆盖效果。

3 算法设计和分析

假设所有节点具有相同的初始能量且部署后不再移动。首先给出本文采用的网络模型:

- 1) N 个传感器节点随机分布在一个二维平面区域,每个节点拥有自身的全网唯一 ID 标识。
- 2) 所有节点同构,节点具备数据融合能力。
- 3) 网络中节点的地理位置未知,无 GPS 导航系统或其他定位算法可以利用。
- 4) 节点的发射功率固定,节点可根据接收信号的强度(RSSI)计算出距发送对象的近似距离。

3.1 能量消耗模型

ECCA 采用的无线通信能耗模型如下^[5]:

$$E_T(l, d) = \begin{cases} lE_{\text{elec}} + l\epsilon_{fs}d^2, & d < d_0; \\ lE_{\text{elec}} + l\epsilon_{mp}d^4, & d \geq d_0. \end{cases} \quad (1)$$

其中:节点 a 向距离为 d 的节点 b 发送大小为 l 比特的数据包时, a 消耗的能量由发射电路损耗和功率放大损耗两部分组成; E_{elec} 为节点发射电路的损耗; ϵ_{fs} , ϵ_{mp} 分别为两种模型功率放大所需的能量。当传输距离小于阈值 d_0 时,功率放大损耗采用自由空间模型,否则采用多路径衰减模型,节点 b 接收节点 a 发送的信息,其无线接收装置所需能耗为

$$E_R(l) = lE_{R\text{-elec}}, \quad (2)$$

其中 $E_{R\text{-elec}}$ 为节点接收电路的单位能耗。

3.2 算法描述

ECCA 算法中节点采用“轮”的工作方式,每轮的分簇过程分为两个阶段:1)簇首转移阶段;2)簇的稳定运行阶段。下面介绍相关定义, M 表示网络中所有节点的集合。

定义1(邻居节点) 在 M 中, $d(i, j)$ 表示任意两个节点 i 与 j 之间的欧氏距离,称节点 j 为节点 i 的邻居节点,当且仅当 $d(i, j) \leq R_c$, 其中 R_c 为节点的广播半径。节点 i 的邻居节点集合用 $NB(i)$ 表示。

定义2(节点度数) 在 M 中任一节点 i 的 R_c 范围内,所包含的节点数目称为该节点的节点度数,记为 $ND(i)$ 。

定义3(簇度数) 任一节点 i 的 R_c 范围内,所有节点的邻居节点取并集,所包含的节点数目称为该节点的簇度数,记为 $CD(i)$ 。

定义4(成员节点) 分簇过程结束后,若节点 a 在簇首 b 的覆盖范围内,即 a 与 b 间距离小于 R_c , 则称节点 a 为簇首 b 的成员节点,假设任何节点最多成为一个簇首的成员节点。

3.2.1 簇的初次建立阶段

节点间可通过信息交互获取描述局部网络分布状况的密度信息, ECCA 算法通过选择高密度地区的节点担任簇首确保网络对监测区域的持续覆盖。初始阶段,假设网络中的节点具有相同的时钟,具体实施步骤如下:

Step 1: 信息广播阶段。 所有节点对外广播自身 ID 信息,在此过程中,节点将利用接收到的信息统计其 NB 和 ND 。

Step 2: 信息交互阶段。 节点广播一个包含自身信息的数据包,其中数据包的内容包括节点的 ID, NB , 剩余能量 E_{re} 和当前状态。根据定义3,任一节点 i 通过接收来自 $NB(i)$ 的数据包统计其 $CD(i)$ 。

Step 3: 角色确定阶段。 对所有节点执行如下操作:1)按式(3)计算自身延时时间,若 $\Delta t(i)$ 内未收到簇首信息,则广播自己为簇首;2)若节点接收到簇首信息,则该节点选择成为成员节点;3)收到多个簇首信息的节点选择加入最后的簇首,有

$$\Delta t(i) = \alpha e^{\frac{1}{CD(i)}}, \quad (3)$$

其中 α 为决定延时大小的比例系数。

注1 式(3)表明,具有较高 CD 的节点等待时间较短,将有更大机会当选为簇首,即操作1)保证高密度区的节点将优先担任簇首,进而减少簇的数量。

注2 成员节点接收到多个簇首信息时,后者簇的规模要小于前者,因此操作3)可起到平衡簇的规模的作用。

3.2.2 簇的稳定运行阶段

簇首根据成员节点数目创建 TDMA 时间表, 并告知其成员节点发送数据的时隙. 成员节点只在所分配的时隙内发送数据, 其他时间则处于休眠状态以节约能量. 成员节点发送的数据在簇首处融合并最终由簇首转发至基站, 在一次信息传递过程中, 簇首消耗的能量为

$$E_{CH} = lE_{R-\text{elec}}k + lE_{BF}(k+1) + l(E_{\text{elec}} + \varepsilon_{mp}d_{BS}^4). \quad (4)$$

其中: E_{BF} 为簇首进行一次数据融合消耗的能量, k , d_{BS} 分别为簇首含有的成员节点数目和簇首到基站的距离.

3.2.3 簇首转移阶段

每轮结束后, 簇首根据自身剩余能量 E_{re} 和能量阈值 E_{th} 的关系重新决定自身角色.

情形 1 $E_{re} < E_{th}$, 簇首广播一个退位消息 Quit-msg, 在下一轮放弃担任簇首, 其成员节点标记为未分簇状态并准备重新组簇.

情形 2 $E_{re} \geq E_{th}$, 簇首广播一个簇首信息 Head-msg, 属于该簇首的成员节点保持不变.

由于算法是分布式执行的, 且不同的簇在每轮的结束时间各不相同, 每个簇的簇首将在不同时刻广播 Quit-msg 或 Head-msg 信息. 为了让收到 Quit-msg 信息且同时处于其他簇首 R_c 范围内的节点能够有机会加入其他簇首, ECCA 为每个未分簇节点引入延时 Δt . 其中 Δt 时间内所有未分簇节点保持侦听状态, 收到 Head-msg 信息的节点将向该簇首发送一个加入信息 Join-msg.

本文 Δt 设置为节点连续两次向簇首发送监测数据时的间隔时间. Δt 结束后, 所有仍未分簇且 $E_{re} \geq E_{th}$ 的节点广播一个竞争簇首信息 Compete-msg, 信息包含该节点的 ID 和 CD. 在竞争节点的 R_c 范围内, 拥有最高 CD 的节点将宣布自己为簇首, 同时广播一个 Head-msg 信息.

4 算法分析

定理 1 在整个网络中, ECCA 算法的消息复杂度为 $O(N)$, 其中 N 为网络中节点的数量.

证明 由协议的执行过程可知, 在簇的初次建立阶段, 每个节点发送信息的个数是常数, 网络中共广播 $N \times 3$ 条消息 (ID, 数据包, Head-msg 或 Join-msg). 在每轮的簇首转移阶段, 本轮退位的簇首与继续担任簇首的节点均广播 1 次消息 (Quit-msg 或 Head-msg); 参与簇首竞争的节点发送 2 次消息 (Compete-msg, Head-msg 或 Join-msg); 其他节点广播 1 个加入信息 (Join-msg). 因此, 整个网络的消息复杂度为 $O(N)$. \square

定理 2 传感器节点广播半径 R_c 的最优值为

$$R_c = \sqrt[4]{\frac{2S(\varepsilon_{mp}d_{BS}^4 - E_{R-\text{elec}})}{N\pi\varepsilon_{fs}}}, \quad (5)$$

其中 S 为网络面积.

证明 初始阶段, 假设相邻两个簇之间无重叠, 覆盖整个网络所期望的最少簇首数目 n 满足

$$n\pi R_c^2 = S. \quad (6)$$

在一次信息传递过程中, 成员节点消耗的能量为

$$E_{\text{NON-CH}} = lE_{\text{elec}} + l\varepsilon_{fs}d_{CH}^2. \quad (7)$$

其中: d_{CH} 为节点到簇首的距离, l 为数据包的大小. 用 $\rho(x, y)$ 表示网络中节点的分布密度, 根据文献 [5], d_{CH}^2 的数学期望值为

$$E[d_{CH}^2] = \int \int (x^2 + y^2)\rho(x, y)dx dy = \int \int r^2\rho(r, \theta)rdr d\theta. \quad (8)$$

将 $\rho = 1/\pi R_c^2$ 代入式 (8) 可得

$$E[d_{CH}^2] = \rho \int_0^{2\pi} \int_0^{R_c} r^3 dr d\theta = \frac{1}{\pi R_c^2} \frac{\pi R_c^4}{2} = \frac{R_c^2}{2}. \quad (9)$$

向基站发送一次数据整个簇的能耗为

$$E_{\text{cluster}} = E_{CH} + kE_{\text{NON-CH}}. \quad (10)$$

其中: E_{CH} 同式 (4), $k = N\pi R_c^2/S - 1$ 为成员节点数目的数学期望. 据此, 完成一次数据传输任务, 整个网络的能耗为

$$E_{\text{total}} = nE_{\text{cluster}} = l \left[\frac{S}{\pi R_c^2} (\varepsilon_{mp}d_{BS}^4 - E_{R-\text{elec}}) + N(E_{R-\text{elec}} + E_{\text{elec}} + E_{BF}) + \varepsilon_{fs} \frac{N\pi R_c^2 - S}{2\pi} \right]. \quad (11)$$

令 $dE_{\text{total}}/dR_c = 0$ 可得到网络能耗的最小值, 解得式 (5). \square

ECCA 算法运行过程中, 能量阈值 E_{th} 根据每轮簇首向基站转发数据的次数 f 设置如下, 目的在于确保簇首在每轮中有足够的能量向基站转发信息:

$$E_{th} \geq f \times E_{CH}. \quad (12)$$

将式 (4) 和定理 3 中的值代入 (12) 可得

$$E_{th} \geq fl \left[\frac{N\pi R_c^2}{S} (E_{R-\text{elec}} + E_{BF}) + (E_{\text{elec}} - E_{R-\text{elec}}) + \varepsilon_{mp}d_{BS}^4 \right]. \quad (13)$$

5 实验与性能评估

本节对所提出的算法 ECCA 与 LEACH, Highest-Degree 和直接通信算法在网络寿命、覆盖质量和成簇性能方面进行了比较. 网络环境配置参数见表 1. 将表 1 参数代入式 (5), 可得 $R_c \in [16, 54]$. 在 ECCA 的实验测试中, $f = 200$, $R_c = 30$ m, 代入式 (13) 可得 $E_{th} \geq 1.29$ J.

表1 网络环境参数设置

参数	参数值
覆盖区域 S/m^2	100×100
节点数目	100
基站位置/m	(50, 150)
节点初始能量/J	2
节点感知半径 $(R_s)/m$	15
$E_{elec}, E_{R-elec}/(nJ/bit)$	50
$E_{BF}/(nJ/bit)$	5
$\epsilon_{fs}/(pJ/bit/m^2)$	10
$\epsilon_{mp}/(pJ/bit/m^4)$	0.0013
d_0/m	86.3
$l/bits$	4000

5.1 成簇性能

从上述3种分簇算法的模拟实验中随机选取100次实验,对每轮产生的簇首个数取数学期望,统计所生成簇首个数的分布情况,仿真结果见图1.

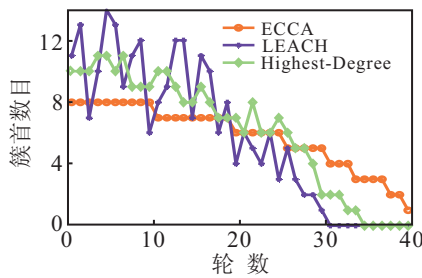


图1 簇首数目分布统计

ECCA算法中每轮的簇首由前一轮继续担任簇首的节点和本轮新增的簇首组成,而新增加的簇首均由网络中退位的簇首决定.由于采用了退位机制和竞争机制,ECCA每轮产生的簇首数目比较稳定.相比之下,LEACH算法仅依靠节点产生的随机数和设定的阈值选取簇首,簇首数目得不到有效控制.Highest-Degree算法则依靠节点的 R_c 和节点度数控制网络中的簇首数目,簇首数目波动比较明显.

图2统计了以上3种算法运行过程中簇的大小的标准偏差 S_{TD} ,有

$$S_{TD} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_j} [(k_i + 1) - \frac{N_j}{n_j}]^2}{(n_j - 1)}} \quad (14)$$

其中: k_i 为第 i 个簇首的成员节点数目, N_j 和 n_j 分别为第 j 轮网络中的节点数目和簇首数目.

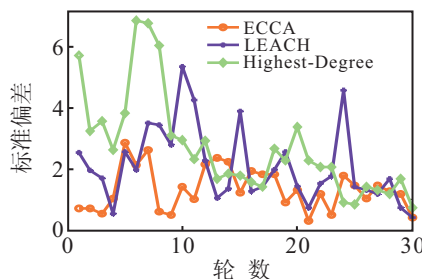


图2 簇的大小标准偏差

S_{TD} 反应了簇划分的平衡性,其值越小,说明网络中簇的规模越均匀.由图2可以看到,与LEACH和Highest-Degree相比,ECCA每轮产生的簇首有较低的 S_{TD} 值,这是因为ECCA算法设计的初衷是使高密度区域的节点优先广播簇首消息,而 Δt 内收到多个簇首消息的未分簇节点选择加入最后的簇首,均衡了网络中每个簇的规模.综上所述,ECCA能更好地协调网络中的节点,可靠性较好.

5.2 网络寿命

本文网络寿命定义为从网络运行开始到网络中无簇首工作所持续的轮数.图3通过统计每轮的存活节点数目,比较了各种算法对于网络寿命的影响.由于ECCA采用了簇首轮换机制,并避免能量低于阈值的节点担任簇首,明显降低了节点的死亡率.通过对比图3中的仿真结果可以看到,ECCA算法的网络寿命比LEACH延长了近30%.

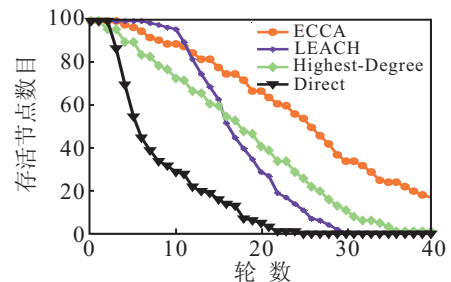


图3 各种算法的网络寿命

5.3 覆盖性能

假设100个待监测点随机分布在网络监测区域内,通过统计节点感知半径 R_s 范围内待监测点的数量比较了4种算法的覆盖性能.

令 G 为网络中所有待监测点的集合, G_m 为集合中任一待监测点 m .若 $d(G_m, i) \leq R_s, i \in M$, 则称 G_m 被节点 i 覆盖.网络运行中被节点覆盖的待监测点数目用 N_{cover} 表示.

图4为4种算法运行过程中 N_{cover} 与运行轮数的关系.算法运行前期,ECCA,LEACH和Highest-Degree每轮的 N_{cover} 无明显差别,运行15轮之后,由于其他算法节点死亡率的急剧增加,ECCA每轮的 N_{cover} 均大于其他3种算法.

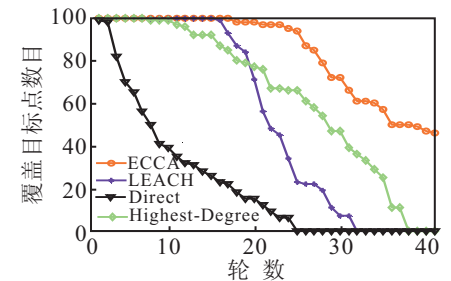


图4 覆盖待监测点数目与轮数的关系

图5统计了 N_{cover} 与死亡节点数目之间的关系。由于 ECCA 与 Highest-Degree 算法均依靠节点度数信息选取簇首, 节点的死亡对于覆盖性能的影响较小。图5中, ECCA 和 Highest-Degree 算法随死亡节点的增加 N_{cover} 下降的速度均低于其他两种算法。这是因为算法 ECCA 选取的簇首都是每个簇中 CD 最大的节点, 簇首的感知区域与其邻居节点有较大的交叠面积。因此, 邻居节点可以迅速弥补因簇首死亡导致的覆盖盲点。由此可见, ECCA 算法在运行过程中产生了较好的覆盖效果, 提升了网络的覆盖性能。

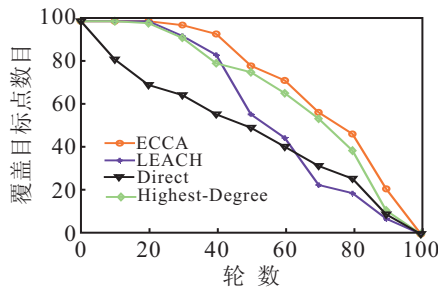


图5 死亡节点对于覆盖质量的影响

6 结 论

本文提出了一种具有能量和覆盖意识的无线传感器网络分簇算法 ECCA, 其核心思想是在分簇过程中考虑节点的分布密度和剩余能量。算法通过对比较节点的簇度数来选取簇首, 当簇首的剩余能量低于设定的能量阈值时进行簇首迁移。仿真结果表明, ECCA 有效地均衡了网络中节点的能耗, 延长了网络寿命, 同时显著提高了网络的覆盖质量。

参考文献(References)

[1] Akyildiz I F, Su W L, Sankarasubramaniam Y, et al. A survey on sensor networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 40(8): 102-114.

[2] Song C, Cao J N, Liu M, et al. Maximizing network lifetime based on transmission range adjustment in wireless sensor networks[J]. Computer Communication, 2009, 32(11): 1316-1325.

[3] Yi S, Heo J, Cho Y, et al. PEACH: Power-efficient and adaptive clustering hierarchy protocol for wireless sensor networks[J]. Computer Communications, 2007, 30(14-15): 2842-2852.

[4] Stanislava S, Heinzelman W B. Cluster head election techniques for coverage preservation in wireless sensor networks[J]. Ad Hoc Networks, 2009, 5(7): 955-972.

[5] Chandrakasan A P, Smith A C, Heinzelman W B. An application specific protocol architecture for wireless microsensor networks[J]. IEEE Trans on Wireless Communication, 2002, 1(4): 660-669.

[6] Gerla M, Tsai J T C. Multicluseter, mobile, multimedia radio network[J]. Wireless Networks, 1995, 1(3): 255-265.

[7] Chatterjee M, Das S K, Turgut D. WCA: A weighted clustering algorithm for mobile adhoc networks[J]. Cluster Computing, 2002, 5(2): 193-204.

[8] Basagni S. Distributed clustering algorithm for ad-hoc networks[C]. Proc of 4th Int Symposium on Parallel Architectures, Algorithms, and Networks. Fremantle, 1999: 310-315.

[9] Ye F, Zhong G, Cheng J. PEAS: A robust energy conserving protocol for long-lived sensor networks[C]. Proc of IEEE Int Conf on Distributed Computing Systems. Providence, 2003: 28-37.

[10] Stanislava S, Heinzelman W B. Cluster head election techniques for coverage preservation in wireless sensor networks[J]. Ad Hoc Networks, 2009, 7(4): 955-972.

下 期 要 目

混合蛙跳算法研究综述	崔文华, 等
基于 SQP 局部搜索的混沌粒子群优化算法	徐文星, 等
需求可拆分车辆路径问题的聚类求解算法	刘旺盛, 等
基于 Squeezer 算法的文本数据流聚类	尤薇佳, 等
基于伪谱法的编队卫星队形重构防碰撞轨迹优化	黄海滨, 等
引入补偿采样和平滑算子的概率集群优化算法	王 楠, 等
基于模糊 K-调和均值的单词-文档谱聚类方法	刘 娜, 等
基于杂波强度在线估计的多目标跟踪算法	闫小喜, 韩崇昭