

能量捕获无线传感器网络能耗感知的路由方案

应 岚¹, 林一民², 池凯凯²

(1. 衢州学院教师教育学院, 浙江 衢州 324000; 2. 浙江工业大学计算机科学与技术学院, 杭州 310023)

摘 要: 现有能量捕获无线传感器网络路由方案较少考虑链路质量以及节点能量是否足够等问题。为此, 对能量溢出感知的剩余能量最大化路由问题进行建模, 结合储能设备上能量溢出浪费情况和基于链路数据包传递率的通信能耗指标, 提出一种能量溢出感知的路由方案, 选择通信能耗和溢出能量总和较低的路由。实验结果表明, 与 Martinez G 等人提出的路由方案 (IEEE Sensors Journal, 2014, No. 9) 相比, 改进方案可使节点剩余能量提高 50% 左右。

关键词: 无线传感器网络; 能量捕获无线传感器网络; 路由方案; 节能; 最优化理论

中文引用格式: 应 岚, 林一民, 池凯凯. 能量捕获无线传感网能耗感知的路由方案 [J]. 计算机工程, 2016, 42(2): 108-112.

英文引用格式: Ying Lan, Lin Yimin, Chi Kaikai. Energy Wastage-aware Routing Scheme for Energy-harvesting Wireless Sensor Network [J]. Computer Engineering, 2016, 42(2): 108-112.

Energy Wastage-aware Routing Scheme for Energy-harvesting Wireless Sensor Network

YING Lan¹, LIN Yimin², CHI Kaikai²

(1. College of Teacher Education, Quzhou University, Quzhou, Zhejiang 324000, China;

2. School of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

【Abstract】 The existing Energy-harvesting Wireless Sensor Network (EH-WSN) routing schemes almost do not consider some important issues like the link quality, whether the node energy is enough, etc.. So, the energy wastage-aware residual-energy-maximized routing problem for EH-WSN is formulated. Taking into account the energy overcharge wastage and link packet delivery rate based communication energy consumption, an improved wastage-aware routing scheme is proposed, which finds the route with low communication energy consumption and energy overcharge wastage. Simulation results demonstrate that, compared with the wastage-aware routing scheme proposed by Martinez G, et al (IEEE Sensors Journal, 2014, No. 9), the proposed routing scheme is able to improve the node residual energy by about 50%.

【Key words】 Wireless Sensor Network (WSN); Energy-harvesting Wireless Sensor Network (EH-WSN); routing scheme; energy saving; optimization theory

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2016.02.020

1 概述

在无线传感器网络 (Wireless Sensor Network, WSN) 中, 传感器节点的能量限制是该网络应用受限的一个决定性因素。传感器节点的能量一般来源于电池, 而电池的容量是有限制的, 电池储能耗尽意味着传感器节点生命的结束。

能量捕获无线传感器网络 (Energy-harvesting

WSN, EH-WSN)^[1] 由具有能从环境中捕获能量的传感器节点组成, 该网络提供了一种有效突破能量供应瓶颈的解决方法, 具有非常广泛的应用前景, 相关研究也较多, 如文献 [2] 介绍了基于太阳能捕获的 EH-WSN, 文献 [3] 介绍了基于振动能捕获的 EH-WSN。

目前已经有一些相关工作来研究 EH-WSN 的路由协议设计。文献 [4] 针对能够捕获太阳能的无

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61472367); 浙江省自然科学基金资助项目 (LY13F020025)。

作者简介: 应 岚 (1995 -), 女, 本科生, 主研方向为无线传感器网络; 林一民, 硕士研究生; 池凯凯, 副教授。

收稿日期: 2015-01-28 **修回日期:** 2015-03-25 **E-mail:** kkchi@zjut.edu.cn

线传感器网络提出一种路由方案。该方案是定向扩散协议的修改版本, 将传感器节点分为当前具有太阳能捕获机会的节点和当前不具有太阳能捕获机会的节点, 然后选出一条路由, 该路由包含相对较多的有太阳能捕获机会的节点和相对较少的没有太阳能捕获机会的节点。文献[5]给出了综合考虑节点剩余能量和能量捕获速率这两方面的节点能量性能指标, 并讨论了基于该指标的最小代价路由。文献[6]提出了基于地理位置信息的路由协议。文献[7]提出了基于能量捕获的机会式路由协议。文献[8-10]提出了一种分簇路由算法。

上述协议虽然考虑到了能量捕获的特性, 如能量捕获速率, 但没有考虑到因储能设备上储能满了溢出而造成的能量浪费。文献[11]提出了最小化数据传递能耗与溢出能耗这两方面总能耗的路由方案, 从而最大化网络节点的总剩余能耗。然而, 该方案存在一些方面的不足: (1) 传输能耗的计算未考虑到链路丢包特性, 在实际网络中会选出包含通信质量较低链路的路径; (2) 考虑到了储能溢出的情况, 但未考虑到节点能量不够使用的情况, 选出的路径中可能会存在一些节点, 这些节点在数据源发出最后一个包后还需经历一段较长能量捕获时延才能有足够能量中继该数据流的所有包。针对上述问题, 本文提出一种综合考虑溢出能耗、链路丢包特性以及节点能量等方面的路由方案。

2 系统模型

2.1 网络模型

本文考虑具有能量捕获能力的无线传感器网络。将传感器网络表示为 $G(V, E)$, 其中, V 为节点集合; E 为链路集合。在网络中, 处于感知状态的节点生成恒定速率的数据包。当前需要建立路由的数据源以恒定速率 r_s pkt/s 生成数据包, 该数据流将持续 T s, 节点产生的数据包长为 L bit。

设任意节点 i , 当前已经在中继的数据流数目为 N_i , 这 N_i 个数据流的上一跳节点为 $j_1^u, j_2^u, \dots, j_{N_i}^u$, 下一跳节点为 $j_1^d, j_2^d, \dots, j_{N_i}^d$, 速率分别为 $r_i^{(1)}, r_i^{(2)}, \dots, r_i^{(N_i)}$, 还将持续的时间长度为 $T_i^{(1)}, T_i^{(2)}, \dots, T_i^{(N_i)}$ 。

节点 i 到节点 j 的链路 (i, j) 的包成功传递率为 $p_{i,j}$, 节点的数据传输速率为 K bit/s。

2.2 能量捕获与存储模型

网络中的不同节点在某个特定时刻的能量捕获速率是不同的, 而同一个节点在不同时段内的能量捕获速率也是不同的。用 P_i^h 表示节点 i 在当前新数据流发起时下一数据传递时间段内的能量捕获速率, 单位为 Wh/s。由于一个数据流的数据传递时间段往往较短, P_i^h 的值在节点 i 上通常是可以特定方式得

到。例如对于太阳能捕获这类能量捕获速率变化较慢的场景, 可以用数据流发起时刻的能量捕获速率来近似代表接下来数据传递时间段内的能量捕获速率。而对于能量捕获速率变化相对较快的场景, 也可以利用指数加权移动平均等方法来估计 P_i^h 的值^[2]。

用 B 表示节点上的能量存储容量, 如果节点存了 B 能量, 后续捕获的能量将被溢出而浪费掉。将当前新数据源发起路由建立的时刻表示为时刻 0。节点 i 在时刻 0 的储能表示为 $e_i(0)$, 而当前数据流结束即过了 T s 后的时刻节点 i 的储能表示为 $e_i(T)$ 。

2.3 能耗模型

节点接收数据的能耗模型为:

$$E_{rx} = e_{ckt} t \quad (1)$$

其中, e_{ckt} 为收发模块电路每秒的工作能耗; t 为接收数据所耗的时间。节点发送数据的能耗模型为:

$$E_{tx} = (e_{ckt} + P) t \quad (2)$$

其中, P 为节点的发送功率。

3 能量溢出与链路质量感知路由问题建模

本节对本文所考虑的能量溢出与链路质量感知路由进行数学建模, 建模为一个 0-1 整数规划问题。所考虑和设计的路由为单路径路由。

用变量 $\delta_{i,j}$ 来刻画链路 (i, j) 是否在路由算法所选出的路径上, $\delta_{i,j} = 0$ 表示 (i, j) 不在选出的路径上; $\delta_{i,j} = 1$ 表示 (i, j) 在选出的路径上。变量组 $\{\delta_{i,j} : (i, j) \in E\}$ 的取值要满足能量、流平衡等方面的约束, 并以最大化网络节点总剩余能量为目标。

3.1 节点能耗分析

首先分析任意节点 i 在时刻 0 (即当前新数据流的发起时刻) 到时刻 T 这段时间内为正在中继的数据流所消耗的能量。

从时刻 0 到时刻 T 这段时间内, 节点 i 为正在服务的第 m 个数据流接收数据和转发数据, 接收数据的链路为 (j_m^u, i) , 转发链路为 (i, j_m^d) 。而在时刻 0 到时刻 T 这段时间内, 要接收和转发的数据包数目为 $\min\{T, T_i^{(m)}\} \cdot r_i^{(m)}$ 。因为接收链路的包成功传递率为 $p_{j_m^u, i}$, 每个包被正确接收所需要的平均发送次数为 $1/p_{j_m^u, i}$, 所以总共的接收数据包数目为 $\frac{\min\{T, T_i^{(m)}\} \cdot r_i^{(m)}}{p_{j_m^u, i}}$ 。由于包长为 L bit, 数据传输速率为 K bit/s, 因此对应于第 m 个数据流的接收总耗时为

为 $\frac{\min\{T, T_i^{(m)}\} \cdot r_i^{(m)} L}{p_{j_m^u, i} \cdot K}$, 从而基于式(1)可知接收能耗为

为 $\frac{\min\{T, T_i^{(m)}\} \cdot r_i^{(m)} L}{p_{j_m^u, i} \cdot K} e_{ckt}$ 。综上, 节点 i 为 N_i 个数据

流所消耗的接收能量为 $\frac{Le_{ckt}}{K} \sum_{m=1}^{N_i} \frac{\min\{T, T_i^{(m)}\} \cdot r_i^{(m)}}{p_{j_m^u, i}}$ 。

同理可得,节点 i 为 N_i 个数据流所消耗的发送能量为 $\frac{(e_{\text{ckt}} + P)L}{K} \cdot \sum_{m=1}^{N_i} \frac{\min\{T, T_i^{(m)}\} \cdot r_i^{(m)}}{P_{i,j_m^d}}$ 。

因此,节点 i 在时刻 0 到时刻 T 这段时间内为正在中继的数据流所消耗的能量为:

$$E_{c_1}^{(i)} = \frac{Le_{\text{ckt}}}{K} \sum_{m=1}^{N_i} \frac{\min\{T, T_i^{(m)}\} \cdot r_i^{(m)}}{P_{j_m^u, i}} + \frac{(e_{\text{ckt}} + P)L}{K} \sum_{m=1}^{N_i} \frac{\min\{T, T_i^{(m)}\} \cdot r_i^{(m)}}{P_{i, j_m^d}} \quad (3)$$

而为新数据流中继所消耗的接收能量为 $\frac{e_{\text{ckt}}TLr_s}{K} \sum_{j: (j,i) \in E} \delta_{j,i} \frac{1}{P_{j,i}}$; 新数据流中继所消耗的发送能量为 $\frac{(e_{\text{ckt}} + P)TLr_s}{K} \sum_{j: (i,j) \in E} \delta_{i,j} \frac{1}{P_{i,j}}$ 。需要说明的是,如果选出的路径不包含节点 i ,即对于任意进入节点 i 的链路 (j,i) 都是 $\delta_{j,i} = 0$ 和对于任意流出节点 i 的链路 (i,j) 都是 $\delta_{i,j} = 0$,则这两项能耗都为 0。

因此,节点 i 从时刻 0 到时刻 T 消耗的总能量为:

$$E_c^{(i)} = E_{c_1}^{(i)} + \frac{e_{\text{ckt}}TLr_s}{K} \sum_{j: (j,i) \in E} \delta_{j,i} \frac{1}{P_{j,i}} + \frac{(e_{\text{ckt}} + P)TLr_s}{K} \sum_{j: (i,j) \in E} \delta_{i,j} \frac{1}{P_{i,j}} \quad (4)$$

3.2 节点剩余能耗约束

节点 i 从时刻 0 到时刻 T 所捕获的能量为:

$$E_h^{(i)} = P_i^h T \quad (5)$$

基于上式和式(4)可进一步得出节点 i 在时刻 T 所剩余的能量为:

$$e_i(T) = \min\{e_i(0) + E_h^{(i)} - E_c^{(i)}, B\} \quad (6)$$

由于希望所选出的路径上的节点在 T 时刻为止能有足够的能量把需要中继的包发送出去,这些数据包包含已有数据流在 T 时长内需要节点 i 来中继的包,以及当前新发起的数据流在 T 时长需要节点 i 来中继的包,因此节点 i 在时刻 T 所剩余的能量必须大于等于 0,即所要设计的变量 $\delta_{i,j}$ 取值要满足以下约束:

$$\min\{e_i(0) + E_h^{(i)} - E_c^{(i)}, B\} \geq 0 \quad (7)$$

3.3 流平衡约束

对于源节点 s ,由于它是当前新数据流的发起者,因此对于节点 s 的邻居节点,必须满足以下两式:

$$\sum_{j: (j,s) \in E} \delta_{j,s} = 0 \quad (8)$$

$$\sum_{j: (s,j) \in E} \delta_{s,j} = 1 \quad (9)$$

其中,式(8)表示对于当前新数据流没有数据流入源节点 s ;而式(9)表示有且只有一条流出源节点 s 的链路被选出来作为所需选出路径的第一跳。

对于目的节点 d ,由于它是当前新数据流的最终

接收者,因此对于节点 d 的邻居节点,必须满足以下两式:

$$\sum_{j: (j,d) \in E} \delta_{j,d} = 1 \quad (10)$$

$$\sum_{j: (d,j) \in E} \delta_{d,j} = 0 \quad (11)$$

而对于任意一个不是当前新数据流的源节点和目的节点的节点 i ,其流入的数据量要等于流出的数据量,即满足以下流平衡约束:

$$\sum_{j: (j,i) \in E} \delta_{j,i} = \sum_{j: (i,j) \in E} \delta_{i,j} \quad (12)$$

3.4 目标函数

本文所要设计的单路径路由方案以最大化节点总剩余能量为目标,而根据式(6)可知网络节点的总剩余能量为:

$$E(\delta_{i,j}) = \sum_{i \in V} e_i(T) = \sum_{i \in V} \min\{e_i(0) + E_h^{(i)} - E_c^{(i)}, B\} \quad (13)$$

3.5 最优路由问题建模

基于以上分析,本文所考虑的能量溢出感知的最优单路径路由问题建模为如下所示的 0-1 整数规划。

最小化 $E(\delta_{i,j})$

约束条件:

$$\min\{e_i(0) + E_h^{(i)} - E_c^{(i)}, B\} \geq 0, \forall i \in V$$

$$\sum_{j: (j,s) \in E} \delta_{j,s} = 0, \sum_{j: (s,j) \in E} \delta_{s,j} = 1$$

$$\sum_{j: (j,d) \in E} \delta_{j,d} = 1, \sum_{j: (d,j) \in E} \delta_{d,j} = 0$$

$$\sum_{j: (j,i) \in E} \delta_{j,i} = \sum_{j: (i,j) \in E} \delta_{i,j}, \forall i \in V \setminus \{s, d\}$$

对于该路由最优化问题,设计分布式路由协议来给源节点找出最优路径是下一步要考虑的问题。

4 能量溢出与链路质量感知路由方案

动态源路由 (Dynamic Source Routing, DSR) 是一个用于无线多跳网络的经典按需路由协议。本节介绍基于 DSR 修改的分布式路由实现,主要是对 DSR 路由进行以下部分修改:

(1) RREQ 域内容。在路由请求包 RREQ 中,除了包含在 DSR 中所具有的信息外,还包含 T, r_s, L 参数值。

(2) 源节点将 RREQ 包进行全网广播,或基于物理位置信息进行定向广播。在 RREQ 包到达目的节点的过程中,每到一个中继节点,该中继节点首先检查缓存表,查看是否已经收到过该 RREQ 包,如果之前已经收到过则丢弃该 RREQ 包;否则,从包中读出 T, r_s, L 参数值,本文根据式(5)来计算本节点的 $e_i(T)$,如果 $e_i(T) < 0$ 则丢弃该 RREQ 包,存储该中继节点的以下信息到 RREQ: 中继节点编号,当前储

能 $e_i(0)$, 当前的能量捕获速率 P_i^h , 当前一跳的包传递率 $p_{i,j}$, 以及基于式(3)计算出的 $E_{c_i}^{(i)}$ 。

(3) 接收节点上进行候选路径的性能计算。接收节点 d 每接收到一个 RREQ 包就从中读出该 RREQ 所走过的路径, 该路径为候选路径之一。同文献[11]中的路由一样, 接收节点在收到当前数据源广播的第一个 RREQ 包时启动一个计时器, 在计时器溢出之前所收到的每一 RREQ 对应一条候选路径, 当计时器溢出时就不再对后续接收的当前数据源的 RREQ 包进行处理。假设有 N 条后续路径, 这 N 条后续路径所包含的节点的集合表示为 V' , 则对于任意一条候选路径, 根据式(4)~式(6)计算出使用该候选路径时节点集合 V' 中每个节点 i 的 T 时刻储能 $e_i(T)$, 然后求出 V' 中节点的 T 时刻总储能 $\sum_{i \in V'} e_i(T)$ 。该总储能越大则该候选路径越好。接收节点 d 最终将 T 时刻总储能最大的后续路径定为最终路径, 然后给源节点以单播的方式发送路由回复包 RREP 来告知源节点该最终路径。

5 性能评估

本节通过将所提出的路由方案与文献[11]中的路由进行比较, 评估所提出路由方案的性能。评估的性能指标是节点的平均储能。

仿真的网络场景如下所述: 网络中有 36 个节点, 节点的物理位置如图 1 所示, 其中, 虚线表示节点之间的通信链路。每个链路的数据包成功传递率在 $[p_{th}, 1]$ 区间里随机等概率选取。

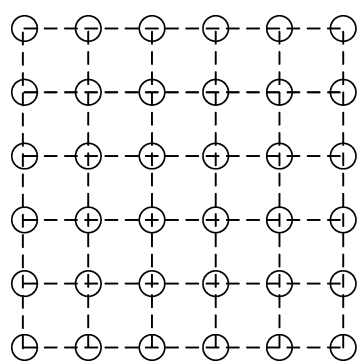


图1 EH-WSN 仿真拓扑结构

源节点发送的数据包长为 100 Byte, 发送速率为 4 pkt/s, 每个节点初始能量为 10 Wh。每 2 s 发起一个新的数据流, 每个数据流源节点和目的节点在所有节点中随机选取, 每个流的持续时间为 8 s。每比特接收的能耗为 70 μ Wh, 每个比特发送的能耗为 100 μ Wh。节点的能量捕获速率为 0.15 Wh/s。下文中的所有数据都是 1 000 次仿真实验的平均值。

图 2 给出了不同 p_{th} 值下 8 个数据流结束时刻的节点平均储能。从图中可以看出, 对于 2 种路由方案, 随着数据包传递率下限值 p_{th} 的增加, 节点平均

储能都是增加的。这是由于较高的平均数据包传递率会带来较小的能量消耗。相比于已有的能量溢出感知路由, 本文提出的能量溢出感知路由即使在高丢包率下也有较高的节点储能, 这是由于该路由方案考虑到了链路传递率对能耗的影响。另外, 在使用本文提出的能量溢出感知路由时, 节点平均储能要显著高于文献[11]路由方案。例如, 当 $p_{th} = 0.7$ 时, 节点平均能量提高了 54.9%。

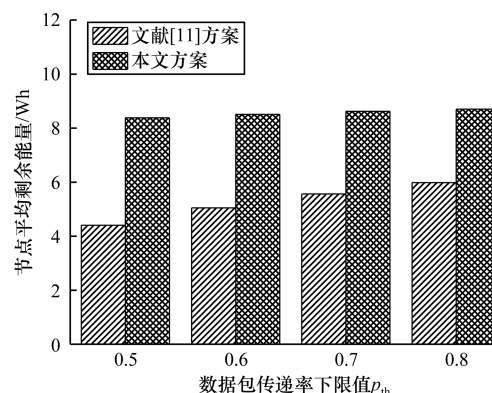


图2 不同 p_{th} 值下 8 个数据流结束时刻的节点平均剩余能量

图 3 给出了 $p_{th} = 0.6$ 时在不同个数据流结束时刻的传输效率。传输效率定义为: 传输的数据包总数目/(网络初始时刻的总能量 - 结束时刻的总能量)。从图中可以看出, 在使用本文提出的能量溢出感知路由时, 传输效率要显著高于文献[11]路由方案。例如, 当 $M = 8$ 时, 储能提高了 231%。

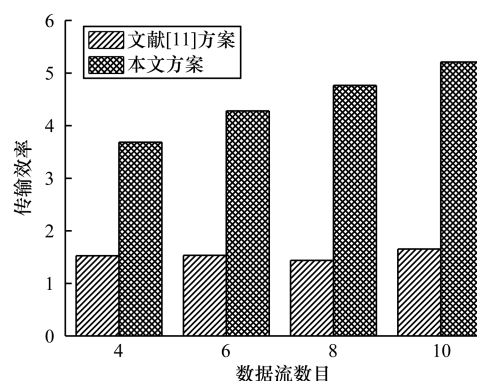


图3 M 个数据流结束时刻的传输效率

6 结束语

本文提出一种用于能量捕获无线传感器网络的能量溢出感知路由方案。在进行路由的性能评估时, 同时考虑了储能设备上能量溢出浪费和基于链路数据包传递率的通信能耗指标, 能够找出相对比较节能的路由。实验结果表明, 与已有的能量溢出感知路由相比, 该能量溢出感知路由方案能显著增加节点的平均储能。但是, 本文尚未考虑吞吐量性能, 因此, 设计既节能又有较高吞吐量的路由方案是下一步的研究方向。

参考文献

- [1] Sudevalayam S, Kulkarni P. Energy Harvesting Sensor Nodes: Survey and Implications[J]. IEEE Communications Surveys Tutorials, 2011, 13(3): 443-461.
- [2] Jiang Xiaofan, Polastre J, Culler D. Perpetual Environmentally Powered Sensor Networks[C]//Proceedings of the 4th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks. Los Angeles, USA: IEEE Press, 2005: 463-468.
- [3] Ammar Y, Buhrig A, Marzencki M, et al. Wireless Sensor Network Node with Asynchronous Architecture and Vibration Harvesting Micro Power Generator[C]//Proceedings of Smart Objects and Ambient Intelligence Conference. New York, USA: ACM Press, 2005: 287-292.
- [4] Voight T, Ritter H, Schiller J. Utilizing Solar Power in Wireless Sensor Networks[C]//Proceedings of the 28th Annual IEEE International Conference on Local Computer Networks. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2003: 416-422.
- [5] Kansal A, Hsu J, Srivastava M, et al. Harvesting Aware Power Management for Sensor Networks[C]//Proceedings of the 43rd IEEE/ACM Design Automation Conference. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2006: 651-656.
- [6] Zeng Kai, Ren Kui, Lou Wenjing, et al. Energy-aware Geographic Routing in Lossy Wireless Sensor Networks with Environmental Energy Supply[C]//Proceedings of International Conference on Quality of Service in Heterogeneous Wired/Wireless Networks. New York, USA: ACM Press, 2006: 8-17.
- [7] Eu Z, Tan H. Adaptive Opportunistic Routing Protocol for Energy Harvesting Wireless Sensor Networks[C]//Proceedings of ICC'12. Ottawa, Canada: IEEE Press, 2012: 318-322.
- [8] 樊晓平, 杨 玺, 刘少强, 等. 具有能量补给的无线传感器网络分簇路由算法[J]. 计算机工程, 2008, 34(11): 120-122.
- [9] 张玉娟, 樊晓平, 刘少强, 等. 太阳能补给下无线传感器网络分簇路由算法[J]. 计算机应用研究, 2012, 24(1): 260-262.
- [10] 姚玉坤, 王 冠, 任 智, 等. 能耗均衡的自供能无线传感器网络分簇路由算法[J]. 传感技术学报, 2013, 25(10): 1420-1425.
- [11] Martinez G, Li Shufang, Zhou Chi. Wastage-aware Energy-harvesting Routing in Wireless Sensor Networks[J]. IEEE Sensors Journal, 2014, 14(9): 2967-2974.
- (上接第 107 页)
- [3] Lin C J. Projected Gradient Methods for Nonnegative Matrix Factorization[J]. Neural Computation, 2007, 19(10): 2756-2779.
- [4] Zdunek R, Cichocki A. Nonnegative Matrix Factorization with Constrained Second-order Optimization[J]. Signal Processing, 2007, 87(8): 1904-1916.
- [5] Cichocki A, Zdunek R, Amari S. New Algorithm for Non-negative Matrix Factorization in Application to Blind Source Separation[C]//Proceedings of ICASSP'06. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2006: 621-624.
- [6] 卢 宏, 赵知劲, 杨小牛. 基于行列式和稀疏性约束的 NMF 的欠定盲源分离算法[J]. 计算机应用, 2011, 31(2): 553-555.
- [7] 赵知劲, 卢 宏, 尚俊娜. 基于约束 NMF 的盲源分离算法[J]. 压电与声光, 2010, 32(6): 1049-1052.
- [8] 刘中健, 赵知劲, 尚俊娜. 快速 NMF 盲源分离算法[J]. 信号处理, 2014, 30(6): 699-705.
- [9] Schachtner R, Poppel G, Tome A M, et al. Minimum Determinant Constraint for Non-negative Matrix Factorization[C]//Proceedings of ICA'09. Berlin, Germany: Springer, 2009: 106-113.
- [10] Hoyer P O. Non-negative Matrix Factorization with Sparseness on Strains[J]. Journal of Machine Learning Research, 2004, 5: 1457-1469.
- [11] 黄雯雯. 基于非负矩阵分解的盲信号分离方法研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2013.
- [12] 赖淑珍. 非负矩阵分解若干算法研究与应用[D]. 成都: 电子科技大学, 2014.
- [13] 叶 军. 基于投影梯度及下逼近方法的非负矩阵分解[J]. 计算机工程, 2012, 38(3): 200-202.
- [14] 张宇飞. 加稀疏约束的非负矩阵分解[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.
- [15] Bofill P, Zibulevsky M. Underdetermined Source Separation Sparse Representation[J]. Signal Processing, 2001, 81(11): 2353-2362.
- [16] Cichocki A, Zdunek R. MFLAB-Matlab Toolbox for Non-negative Matrix Factorization[EB/OL]. (2010-06-01). <http://www.bsp.brain.riken.jp/ICALAB/nmflab.html>.

编辑 金胡考

编辑 金胡考