

无线传感器网络解决能量空洞问题综述

王东方 齐小刚

(西安电子科技大学数学科学系 西安 710071)

(西安电子科技大学综合业务网国家重点实验室 西安 710071)

摘 要 基于无线传感器网络的特点,部分节点因为过早耗尽自身能量而导致网络原有覆盖区域缺失或者数据无法送达 sink 节点,从而形成能量空洞现象。如何避免能量空洞并能有效延长网络周期,是目前无线传感器网络的研究热点。当前解决能量空洞问题主要是以最大限度地均衡网络负载为设计目标。从 5 个方面,即能量控制与功率控制、数据压缩与融合策略、节点非均匀分布、动态性及增加 sink 节点数量和分簇算法,总结了解决此问题的方法,同时分析了各种方法的优缺点及进一步研究的方向。

关键词 无线传感器网络,能量空洞,sink 节点

中图法分类号 TP393 **文献标识码** A

Review of Energy Holes in Wireless Sensor Networks

WANG Dong-fang QI Xiao-gang

(Department of Applied Mathematics, Xidian University, Xi'an 710071, China)

(State Key Laboratory of Integrate Services Networks, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract Based on characters of wireless sensor networks, the nodes around the sink use up their energy much faster than other nodes, which forms the energy holes problem. How to avoid energy problem and to prolong network period is hot in wireless sensor networks. Now methods of solving energy problem are mostly balancing the network's load. We concluded the methods of this problem from five parts, these are energy control and power control, data compress and mixture strategy, node's non-uniform distribution, dynamic nature and increasing sink's number, and cluster algorithm. What is more, we analysed the advantage and disadvantage among these five, and proposed the research direction.

Keywords Wireless sensor networks, Energy holes, Sink node

1 引言

无线传感器网络(Wireless Sensor Networks)是一项新兴而先进的技术,由部署在监测区域内大量的廉价微型传感器节点组成,通过无线通信方式组成一个多跳的自组织的网络系统。无线传感器网络的主要功能是对周边环境信息进行采集和管理,并将感知到的数据发送到基站进行进一步的处理^[1,2]。无线传感器网络节点具有体积小、价格低等良好性质,在工业、农业、交通、军事、安全、医疗、空间探测以及家庭和办公环境等众多领域都有着广泛的应用。

与传统的 Ad hoc 网络相比,节点电源能量有限、通信能力有限以及计算和存储能量有限是无线传感器网络最大的特点,也是制约路由协议的主要因素。因此,无线传感器网络的能效利用非常重要,传感器节点往往采用多跳的方式,一些节点既能转发数据又能产生数据^[2]。大量节点将所采集的数据通过多跳的方式流向极少数的 sink,势必造成 sink 附近节点比远端节点要发送多得多的数据包。这种节点负载的巨大

差异使得 sink 附近节点的能量很快消耗殆尽,最终造成整个网络的断裂,远端节点不能将数据发送到 sink^[3]。在文献[4]中,将把部分节点因为过早耗尽自身能量导致网络原有覆盖区域缺失或者数据无法送达 sink 节点的现象称作“能量空洞”现象。如何避免这种能量空洞现象,使得整个网络节点的负载均衡,从而延长网络的生命周期和提高网络性能,成为目前无线传感器网络研究的一个热点。本文就能量空洞问题近几年提出的一些算法和思想进行了总结。

2 能量空洞问题的理论证明

文献[5]对能量空洞现象进行了研究,并建立模型对其进行了理论证明。模型假设所有节点服从密度为 ρ 的泊松分布,分布于半径为 R 的圆形区域中,而 sink 节点位于圆形区域的中心。节点具有相同的通信半径 r ,且不考虑节点感知信息消耗的能量。如图 1 所示,区域内的任意一个节点 n 离 sink 节点的距离为 d ,同时假设节点传输 1bt 数据消耗的能量为 $d\epsilon \times \lambda\rho$ 。

到稿日期:2010-01-13 返修日期:2010-04-13 本文受国家自然科学基金(No. 60703118,60974082),中央高校基本科研业务费专项资金(No. JY10000970013)资助。

王东方(1984—),女,硕士生,主要研究方向为无线传感器网络中的路由算法,E-mail: dongfang232@163.com; 齐小刚(1973—),男,博士,副教授,硕士生导师,主要研究方向为图论与组合最优化、网络优化理论与方法以及路由与交换。

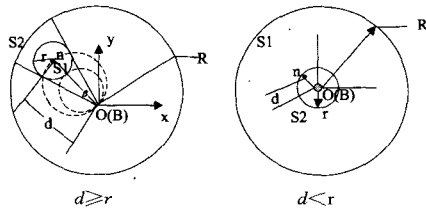


图1 节点负载示意图

这个节点的平均负载与 $(S_1 + S_2)/S_2$ 成正比。在 S_2 中节点的平均负载可以由式(1)得到:

$$\overline{load_n} = \frac{(S_1 + S_2)\rho\lambda\epsilon}{S_2\rho} \begin{cases} \approx \frac{\frac{\beta}{2}(R^2 - d^2)\lambda\epsilon}{\frac{\pi}{2}r^2} + \lambda\epsilon, & d \geq r \\ = \frac{R^2\lambda\epsilon}{r^2}, & d < r \end{cases} \quad (1)$$

式中, $\beta = 2\arcsin(r/d)$ 。从式(1)中可以看出, 每个节点的平均负载随着节点与 sink 节点距离的增加而增加, 这表明了 sink 周围的节点消耗的能量比其它节点更快, 因为少数的节点必须承担大部分的能量负载。因此, 当这些节点消耗完电池能量后, sink 节点也不能继续收集数据信息, 从而形成了能量空洞。

3 研究现状

当前解决能量空洞的方法主要是最大限度地均衡网络负载, 许多文献都提出了一些应对机制。下面介绍解决这个问题的 5 种相关方法。

3.1 能量控制和功率控制

能量控制策略是最早针对无线传感器网络提出的优化策略。文献[6]提出了一种初始能量不均匀策略。作者假定节点均匀分布于一个矩形区域中, 同时根据 sink 节点的位置将区域划分为几个小区域, 根据网络中不能再传输数据时节点的剩余能量来重新分布节点的初始能量, 并得出公式。从公式中可以看出, 离 sink 节点越近, 分配的初始能量越大。

而功率控制是自组织网络经常采用的一种优化策略。对于远离基站的节点, 发射功率大, 传输的距离长; 对于基站附近的节点, 发射功率小, 传输距离短^[3]。直观上看, 这样的通信方式能很好地避免能量空洞。文献[7]提出一种适合于稀疏无线传感器网络的传输调度算法(TSA-MMSN)。在传输过程中, 对传感器节点进行功率控制, 随 sink 的远近调整发射功率, 在保证成功传输数据的前提下, 最大限度节省传感器节点的能量消耗。TSA-MMSN 分析了成功传输数据与节省传感器节点能量消耗之间的约束关系, 利用效用函数提出了一种能量有效的传输调度策略, 从而在一定程度上解决了能量空洞问题。

但是, 这两种策略对传感器节点的要求较高, 导致布置节点时必须遵循一定的规则, 在实际操作中不易实现。

3.2 数据压缩和融合策略

造成能量空洞的根本原因是大量的单向数据流^[3]。在无线传感器网络内部采用数据压缩和融合机制可以减少单向数据流量, 减轻 sink 附近节点的负载。

文献[8]首先提出一个数学模型用于解决无线传感器网络中的能量空洞问题。文中假定一个圆形的网络中节点均匀分布, 从网络流的角度出发, 分析了数据压缩和融合策略的优

势。假设节点每一轮的数据压缩率为 $\alpha = \frac{\text{outputload}}{\text{inputload}} < 1.0$,

最内环节点的近似负载为

$$\begin{aligned} Load_{ring0} &\approx \alpha^{m-1} D_{m-1} + \alpha^{m-2} D_{m-2} + \dots + \alpha D_1 + b \\ &= b + \sum_{i=1}^{m-1} \alpha^i D_i \end{aligned} \quad (2)$$

$$\text{式中, } D_i = \frac{p(\pi(ir)^2 - \pi(ir-r)^2)b}{p\pi r^2} = (2i-1)b_i.$$

这里每个节点的传输负载由第 i 环产生, 在最内环节点进行数据压缩, 则

$$Load_{ring0} \approx b + \sum_{i=1}^{m-1} \alpha^i (2i-1)b < \frac{M_2}{\pi} b_i \quad (3)$$

式(3)是内环负载小于没有进行数据压缩时的负载, 这说明网络的传输负载被有效地降低了。

但是即使采用了融合策略, sink 附近节点承担转发的任务依然很重。

3.3 节点非均匀分布

在多跳的网络中, 能量空洞往往会在离 sink 近的区域形成。一般认为, 在离 sink 节点较近的地方放置更多的传感节点是一种能够缓解能量空洞的措施, 这就是所谓的节点非均匀策略。

在文献[4]中, 作者提出将节点放置于圆形区域中, 并分成若干个半径递增的圆环, 从而证明了如果网络中的节点数目从圆环 C_{R-1} 到最内圆环 C_1 以等比 $q (q > 1)$ 递增, 且圆环 C_R 和圆环 C_{R-1} 中的节点数目比为 $1/(q-1)$, 则在网络中能够实现次优的能耗均衡。这种策略量化了网络中相邻环间的节点数目, 在此基础上可以算出圆环间的节点数目关系。模拟分析显示了使用这种节点非均匀分布策略的网络达到了次优的能耗效率, 网络中仅浪费非常小的能量。

文献[9]中将节点分布于半径为 r 、通信半径为 d 的圆环内, 提出了一个 $h_{\max} - \eta$ 模型。其中 $h_{\max}$ 为节点的最大跳数值, 理论上 $h_{\max} = r/d$; 而 η 是 $h_{\max}$ 跳层节点归一化剩余能量。根据这两个值, 得到了第 h 跳的节点数为

$$n_h = \frac{(1-\eta)^{h-1}}{1+\eta} \cdot \frac{(2\eta)}{1+\eta} \cdot n' \quad 1 \leq h \leq (h_{\max} - 1) \quad (4)$$

仿真结果表明, $h_{\max} - \eta$ 分布得到的结果在对节点能量的利用率以及网络寿命上均远远优于简单的随机分布。

文献[10]中作者对节点的能耗情况进行了研究, 提出了一种非均匀的节点布置算法, 得出了一个布置传感器节点的密度函数, 在靠近 sink 节点的区域中布置较多的节点。

非均匀策略只是在理论上有一定的可行性。可以想象, 非均匀分布策略同时伴随着一些网络开销, 在 sink 节点周围分布节点密度较大, 只有当传感器节点能够低成本大规模生产时, 这种策略才有可能实现。因此, 这种策略并不能从根本上解决能量空洞问题。

3.4 动态性及增加 sink 节点数量

文献[5]对 sink 节点的动态性做了较为全面的研究。文章首先证明了在圆形的无线传感器网络中, sink 节点放置在圆心区域最节省能量。如果采用移动 sink 的方式, sink 沿网络的边缘移动是最符合节能要求的。有这两种有效性, 理论上得到了图 2 中节点 n 的平均负载为

$$\overline{load_n} = \int_0^{2\pi} \frac{(R^2 - d^2)^2 \rho \lambda \epsilon}{4\pi R^2} d\gamma = \frac{1}{2} \left(\frac{R^2 - d^2}{R} \right)^2 \rho \lambda \epsilon \quad (5)$$

式(5)表明, 在移动 sink 节点后网络的平均负载有所降

低,而且有效地延长了网络的生命周期。

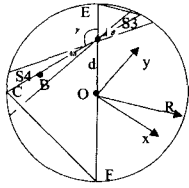


图2 节点的平均负载

另外,文献[11]中作者提到使用一个移动中继节点来延长网络的生存周期。发现移动中继只需要在离 sink 节点两跳范围内移动,网络的生命周期就可以提高将近 4 倍。而文献[12]是将数据收集与移动 sink 结合起来,提出了一个利用移动 sink 协助数据收集的模式。它将 sink 移动区域设置为缓冲区,首先将数据沿最短路径传输到缓冲区,然后在 sink 移动的过程中进行数据收集,证明了缓冲区位置设置在距离中心 $\sqrt{2}R/2$ 时,数据传输总能耗最少。并证明了存在一个缓冲区位置,使得最大节点负载最小化,进而确定了同时考虑到能源消耗和负载平衡的 sink 移动区域。

很多文献中也提到了布置多个 sink 节点来缓解能量空洞。文献[13]证明了在网络中布置多个 sink 节点的优势。网络中节点如图 3 所示。

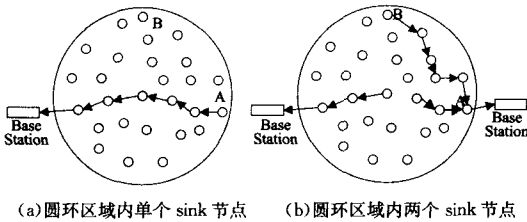


图3 网络中 sink 节点数量

在图 3(b)中,当两个 sink 节点布置于网络中时,节点 A 离最近的 sink 节点只有一跳的距离,而对于节点 B 两个分布机制中的跳数相同,因此通过布置两个 sink 节点而不是一个,可以有效地减少或保持网络中每一个节点的跳数。因为每个节点到它最近 sink 节点消耗的能量与跳数成正比,所以布置多个 sink 节点可以有效地减少数据传输的能量消耗。

文献[13]还提出了一种多移动 sink 的策略。这个选择问题可以描述为:在一个工作周期内,当有数据需要传输时,传感器节点广播一个查询请求报文以及发现周围存在的可以利用的移动 sink,移动 sink 收到此请求后返回一个携带有其当前运动状态的响应报文。因此传感器节点可以知道周围所在的移动 sink 的数量及运动状态。由于移动 sink 所处的运动状态不同(并非距离越近越好),据此传感器节点可以选择一个最佳的移动 sink 进行数据传输。

但是,改变 sink 的位置需要更多的实际条件,而增加 sink 节点又需要耗费多余的成本。因此,在一个 sink 节点的前提下,提出一种好的算法才能更好地解决能量空洞问题。

3.5 分簇算法

层次拓扑下的分簇路由协议一直被认为是可扩张性好、通信性能优秀的协议。采用分簇的路由协议可以分散能量消耗大的节点,平衡网络内节点的能耗,解决能量空洞问题。

传统的分簇协议算法 LEACH^[15],是按照一定的规则在网络中选择节点轮流担任簇头,并由簇头收集数据,直接传给

sink 节点。这样的算法相比多跳网络能够将生命周期延长 15%。但在这种算法中,簇头必须能与 sink 直接通信,在节点控制方面会耗费很大的能量,同时簇头可能不会将收集到的数据发送到 sink 节点,从而造成数据的流失。

EECS^[16]更适应于周期性的数据收集。这种策略提出了一个通信代价公式来决定节点加入哪个簇:

$$\cos t(j, i) = wf[d(p_j, CH_i)] + (1-w) \cdot g[d(CH_i, BS)] \quad (6)$$

$$f = \frac{d(p_j, CH_i)}{d_{f_max}}, g = \frac{d(CH_i, BS)}{d_{g_max} - d_{g_min}} \quad (7)$$

式中, $\cos t(j, i)$ 是节点 p_j 加入簇头 i 的代价, $d(p_j, CH_i)$ 是节点到簇头的距离。式(7)中 f 的子函数保证最小化节点与簇头之间的通信代价; $d(CH_i, BS)$ 是簇头 i 到 sink 的距离。式(6)中 g 子函数保证最小化簇头 i 到 sink 的通信代价; 权值 w 则根据具体应用设置成员节点能量与簇头能耗之间的折中。节点 p_j 选择 $\cos t(j, i)$ 最小的簇头 i 加入, 从而保证每个簇头负载均衡。

对于这种方法,文献[3]中提到分簇策略降低了网络内节点的密度,显著提高了节点能耗的公平性。但由于分簇算法的复杂度较高,会增加网络能耗。而采用异构方式的分簇策略对节点硬件要求较高,不能作为一种解决问题的普遍手段。

结束语 由于无线传感器网络的特点,网络中会出现能量空洞的现象。本文从 5 个方面介绍了解决这个问题的方法,分析了每种方法的优缺点。表 1 对所提到的几种方法做了比较。

表1 五种方法比较

指标 方法	拓扑结构	网络规模	复杂性	异构性	性能	造价
能量控制	静态	小	小	无	中	低
数据压缩	静态	小	中	无	中	中
节点非均匀分布	静态	小	小	无	中	低
动态 sink	动态	大	大	无	高	高
分簇算法	静态	中	小	有	中	低

通过表 1 知道各种方法在具体实现上因网络的实际应用、拓扑结构等诸多因素的不同而不同。尽管取得了很多人鼓舞的结果,但是能量空洞问题还未真正解决。具体表现在以下方面:

第一,目前的研究方法大多停留在理论层面,过于理想化,没有考虑实际应用的诸多难题。例如,在节点非均匀分布的方法中,节点在靠近 sink 周围十分密集,这在现实中是很难实现的,而且可能造成不必要的资源浪费。因此,为了使能量空洞问题的解决方法更贴近实际,应多加考虑动态的方法。

第二,目前解决能量空洞问题的方法大多数只考虑到能量方面的信息,在其他性能,如延迟等方面都没有多加考虑,这就造成一定的混淆。很多情况下,若提高了生命周期,则相对的节点的延迟就会较大。因此,应该找到一个平衡点,来提高生命周期,同时降低节点延迟。

第三,随着应用领域的拓展、网络类型的多样化,单一的解决能量空洞问题的方法难以满足应用需求。因此,若能将多种方法结合应用,可能会达到更好的效果。

由此看来,解决能量空洞问题的方法还存在很多的不足。因此,还需提出一种更实际化、更适用的方法。

参考文献

- [1] 孙利民, 李建中, 陈渝, 等. 无线传感器网络[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005
 - [2] Akyildiz I F, Su W, Sankarasubramaniam Y, et al. Wireless sensor networks: A survey[J]. *Computer Networks*, 2002, 38(4): 393-422
 - [3] 王亮, 钟先信, 石军锋. 无线传感器网络能耗平衡策略的研究[J]. *传感器世界*, 2007(3): 32-36
 - [4] 吴小兵, 陈贵海. 无线传感器网络中节点非均匀分布的能量空洞问题[J]. *计算机学报*, 2008, 31(2): 253-261
 - [5] Luo J, Hubaux J P. Joint Mobility and Routing for Lifetime Elongation in Wireless Sensor Networks[C]// *Proc. INFOCOM*. Mar. 2005
 - [6] Lian J, Chen L, Naik K, et al. Modeling and enhancing the data capacity of wireless sensor networks[C]// Phoha S, La Porta T F, Griffin C, eds. *IEEE Monograph on Sensor Network Operations*. IEEE Press, 2004: 91-138
 - [7] Song L, Hatzinakos D. Architecture of wireless sensor networks with mobile sinks; sparsely deployed sensors [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2007, 56(4): 1826-1836
 - [8] Li J, Mohapatra P. An analytical model for the energy hole problem in many-to-one sensor networks[C]// *Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference*. Dallas, TX, 2005: 2721-2725
 - [9] 赵文辉, 刘大昕, 姜宇, 等. 无线传感器网络节点分布策略研究[J]. *计算机工程与应用*, 2008, 44(35): 115-118
 - [10] 羊四清, 袁辉勇, 易叶青. 无线传感器网络中非均匀的节点布置[J]. *计算机工程与应用*, 2008, 44(24): 118-120
 - [11] Wang W, Srinivasan V, Chua K. Using mobile relays to prolong the lifetime of wireless sensor networks[C]// *Proceedings of ACM MobiCom*. Cologne, Germany, 2005: 270-283
 - [12] 石高涛, 廖明宏. 传感器网络中具有负载均衡的移动协议数据收集模式[J]. *软件学报*, 2007, 18(9): 2235-2244
 - [13] Gandham S R, Dawande M, Prakash R, et al. Energy Efficient Schemes For Wireless Sensor Networks with Multiple Mobile Base Station[C]// *The IEEE Global Telecommunication Conference (GLOBECOM)*. 2003
 - [14] 程龙, 陈灿峰, 马建. 无线传感器网络中多移动 sink 的选择策略[J]. *通信学报*, 2008, 29(11): 12-19
 - [15] Heinzelman W, Chandrakasan A, Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2002, 1(4): 660-670
 - [16] Ye Mao, Li Chengfa, Chen Guihai, et al. EECS: An Energy Efficient Clustering Scheme in Wireless Sensor Networks[C]// *IEEE Int. Performance Computing and Communication Conference*. 2005: 535-540
-
- (上接第 11 页)
- [12] van Zuylen A, Williamson D P. Deterministic Algorithms for Rank Aggregation and Other Ranking and Clustering Problems[J]. *LNCS*, 2008, 4927: 260-273
 - [13] van Zuylen A, Williamson D P. Deterministic Pivoting Algorithms for Constrained Ranking and Clustering Problems[J]. *Mathematics of Operations Research*, 2009, 34(3): 594-620
 - [14] Cai Leizhen. Fixed-parameter Tractability of Graph Modification Problems for Hereditary Properties[J]. *Information Processing Letters*, 1996, 58: 171-176
 - [15] Chen Jianer. Parameterized Computation and Complexity: A New Approach Dealing with NP-hardness[J]. *Journal of Computer Science and Technology*, 2005, 20: 18-37
 - [16] Gramm J, Guo J, Hüffner F, et al. Graph-modeled Data Clustering: Fixed-parameter Algorithms for Clique Generation[C]// *Proc. 5th CIAC*(2003). *LNCS* 2653, 2003: 108-119
 - [17] Gramm J, Guo J, Hüffner F, et al. Graph-modeled Data Clustering: Fixed-parameter Algorithms for Clique Generation [J]. *Theory of Computing Systems*, 2005, 38: 373-392
 - [18] Gramm J, Guo J, Hüffner F, et al. Automated Generation of Search Tree Algorithm for Hard Graph Modification Problems[J]. *Algorithmica*, 2004, 39: 321-347
 - [19] Böcker S, Briesemeister S, Bui Q B A. Going Weighted; Parameterized Algorithms for Cluster Editing[C]// *Proc. 2nd COCOA* (2008). *LNCS* 5165, 2008: 1-12
 - [20] Böcker S, Briesemeister S, Bui Q B A. Going Weighted; Parameterized Algorithms for Cluster Editing[J]. *Theoretical Computer Science*, 2009, 410: 5467-5480
 - [21] Protti F, da Silva M D, Szwarcfiter J L. Applying Modular Decomposition to Parameterized Bicluster Editing[C]// *Proc. 2nd IWPEC*(2006). *LNCS* 4169, 2006: 1-12
 - [22] Fellows M R, Langston M A, Rosamond F, et al. Polynomial-Time Linear Kernelization for Cluster Editing[Z]. *Manuscript*, 2006
 - [23] Fellows M R, Langston M A, Rosamond F, et al. Efficient Parameterized Preprocessing for Cluster Editing[C]// *Proc. 16th FCT*(2007). *LNCS* 4639, 2007: 312-321
 - [24] Guo J. A More Effective Linear Kernelization for Cluster Editing[C]// *1st ESCAPE*(2007). *LNCS* 4614, 2007: 36-47
 - [25] Guo J. A More Effective Linear Kernelization for Cluster Editing[J]. *Theoretical Computer Science*, 2009, 410: 718-726
 - [26] Niedermeier R. *Invited to Fixed-Parameter Algorithms*[M]. Oxford University Press, 2006
 - [27] Hüffner F, Niedermeier R, Wernicke S. Techniques for Practical Fixed-parameter Algorithms[J]. *The Computer Journal*, 2008, 51(1): 7-25
 - [28] Dehne F, Langston M A, Luo X, et al. The Cluster Editing Problem; Implementations and Experiments[C]// *Proc. 2nd IWPEC* (2006). *LNCS* 4169, 2006: 13-24
 - [29] Böcker S, Briesemeister S, Klau G W. Exact Algorithms for Cluster Editing: Evaluation and Experiments[C]// *Proc. 7th WEA*(2008). *LNCS* 5038, 2008: 289-302
 - [30] Lewis J M, Yannakakis M. The Node-deletion Problem for Hereditary Properties is NP-complete[J]. *Journal of Computer and System Sciences*, 1980, 20(2): 219-230
 - [31] Lund C, Yannakakis M. The Approximation of Maximum Subgraph Problems[C]// *Proc. 20th ICALP*. *LNCS* 700, 1993: 40-51
 - [32] Abu-Khzam F N. Kernelization Algorithms for d-Hitting Set Problems[C]// *Proc. 10th WADS*. *LNCS* 4619, 2007: 434-445
 - [33] Amit N. The Bicluster Graph Editing Problem [D]. School of Mathematical Sciences, Tel Aviv University, 2004
 - [34] Guo J, Hüffner F, Komusiewicz C, et al. Improved Algorithms for Bicluster Editing[C]// *Proc. 5th TAMC*. *LNCS* 4978, 2008: 445-456
 - [35] Guo J, Komusiewicz C, Niedermeier R, et al. A More Relaxed Model for Graph-based Data Clustering: s-Plex Editing[C]// *Proc. 5th AAIM*. *LNCS* 5564, 2009: 226-239
 - [36] Fellows M R, Guo J, Komusiewicz C, et al. Graph-based Data Clustering with Overlaps[C]// *Proc. 15th COCOON* (2009). *LNCS* 5609, 2009: 516-526
 - [37] Damaschke P. On the Fixed-parameter Enumerability of Cluster Editing[C]// *Proc. 31st WG*(2005). *LNCS* 3787, 2005: 283-294