

无线传感器网络中一种混合动态自适应路由算法^{*})

郭彬 李喆 耿蓉

(东北大学信息科学与工程学院 沈阳 110004)

摘要 针对无线传感器网络的节能以及能耗均衡问题,本文提出了一种无线传感器网络混合路由网络模型,将平面路由和层次路由有机地结合在一起,在数据获取阶段采用层次路由,而在数据传输过程中使用平面路由。同时,论文提出了一种基于该模型的动态成簇自适应路由算法 HDAR(Hybrid Dynamic Adaptive Routing algorithm)。在算法中设计了基于现场数据的动态成簇机制来完成数据的收集,使用自适应的路由选择算法将数据传输回 Sink 节点。仿真结果表明 HDAR 协议在节能和能耗均衡方面达到了良好的效果。

关键词 动态成簇,混合路由,无线传感器网络,自适应路由

Hybrid Dynamic Adaptive Routing Algorithm in Wireless Sensor Networks

GUO Bin LI Zhe GENG Rong

(School of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004)

Abstract In this paper, a hybrid routing sensor network model is proposed which combines plane routing and hierarchical routing seamlessly. Hierarchical routing is adopted in data acquiring stage while plane routing is used in data transmission stage. A new hybrid dynamic adaptive routing (HDAR) algorithm is proposed, based on the hybrid network model. HDRA utilizes a dynamic clustering scheme to complete data gathering and the aggregated data is relayed to the sink node through paths generated by adaptive route selection algorithm. Simulation results show that HDRA is able to save energy, as well as balance energy dissipation evenly throughout the sensors.

Keywords Hybrid routing, Dynamic clustering, Wireless sensor network, Adaptive routing

1 引言

由众多具有通信、计算能力的传感器(或作动器)节点通过无线方式连接,相互协作,与物理世界进行交互,共同完成特定的应用任务的网络,称为无线传感器网络。无线传感器网络与传统的有线传感器网络相比,易于部署,即传感器节点位置不需要事先确定或精心设计,允许任意放置,部署维护成本低且具有较高的灵活性。传感器网络在科学研究、环境监测、武器装备、工农业生产、日常生活等领域具有非常广阔的应用前景,将使整个社会发生又一次变革^[1,2]。

路由是无线传感器网络的关键问题之一。无线传感器网络对能量有效性的要求,以及无线通信信道可靠性低,节点存储资源有限,数据多跳传输等特点使得无线传感器网络中的路由问题不同于传统网络中的路由问题。对于规模庞大的传感器网络,采用层次化的成簇路由协议是一个很好的选择,成簇路由可以有效的减少转发信息,而且有利于进行网内的数据融合^[4],较具有代表性的传感器网络成簇算法有 LEACH^[3], TEEN^[8]等。但成簇路由由缺乏路由选择的灵活性,不能利用最优路径传输数据。

为此,本文中提出了一种混合路由网络模型,将平面路由和层次路由有机地结合在一起。在数据获取阶段为了更好地收集数据采用层次路由,而在数据传输过程中使用灵活的平面路由方式。同时提出了一种基于混合网络模型的混合动态自适应路由算法 HDAR(Hybrid Dynamic Adaptive Routing algorithm)。算法中设计了一种基于现场数据的动态成簇机制来完成数据的收集工作,由簇首进行数据融合。在数据传输阶段,经簇首融合后的数据使用自适应路由选择算法传

回 Sink 节点。HDAR 通过两种子算法的结合不但提高了数据融合效率,而且增加了路由选择的灵活性,从整体上降低了网络的能耗。

2 传感器网络混合路由模型

通过研究分析平面型路由、层次型路由各自的优点和局限,提出了一种无线传感器网络混合路由模型。如图 1,在混合路由模型全网路由分为两个阶段,数据获取阶段和数据传输阶段。

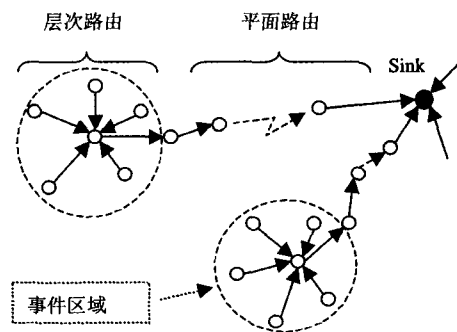


图 1 传感器网络混合路由模型

传感器网络节点有很大的冗余性,因此节点获取的数据也存在很大的冗余^[2]。如果全部传回给 Sink 节点,必然增加中间转发节点能量的不必要的消耗,因此在数据产生后应该尽快进行有效的数据收集和融合。通过研究发现层次路由利用成簇的方法可以为数据融合提供很好的时机,使用簇首进行事件区域数据的收集和融合工作。因此,模型中数据

^{*} 基金项目:国家高技术研究发展计划项目(2002AA784030)。郭彬 博士研究生,研究方向为无线传感器网络、移动通信;李喆 教授,博士生导师,研究方向为无线传感器网络、Ad hoc 网络、移动通信。耿蓉 博士研究生,研究方向为无线传感器网络、Ad Hoc 网络 QoS。

获取阶段在事件区域内采用成簇形式的层次路由。这个阶段,如何将相似的数据聚集到一起应当是考虑的重点,即如何合理地选择本地事件区域的簇首,并且在成簇过程中使用较少的能耗。如果簇首选举的合理,那么成簇后的簇首执行本地数据的收集和数据融合工作的效率就会提高,从而更多地减少了需要传回到 Sink 节点的数据包数量。如果数据包传回 Sink 节点需要多个节点转发,那么数据包数量的减少可以明显地减少这些转发节点的负担,节省大量的能量。

经过簇首数据融合的数据最终要被传回到 Sink 节点,此时主要考虑的是路径的传输效率以及整个网络节点的能耗均衡等问题,因此模型中在这个阶段采用平面路由。利用平面路由的灵活性,选取延迟更小、效率更高的路径来传输数据,从而提高节点能量的利用率。并且可以通过能量感知的路径选择策略达到全网节点的能量均衡,避免造成个别节点能量的快速消耗,产生监测盲点。

3 混合动态自适应路由算法

基于以上混合路由模型,考虑了无线传感器网络自有的特点,提出了一种混合动态自适应路由算法 HDAR, HDAR 算法主要由两个子算法构成:动态成簇算法和自适应选择路由算法。在数据采集阶段,设计了一种动态成簇算法(DCA),基于网络中的现场数据,动态地建立簇和解散簇,完成数据收集和融合的任务。在数据传输阶段,设计了一种根据网络生命阶段而动态变化的自适应选择路由算法(ASR),节点根据邻居节点的剩余能量和到 Sink 节点的跳数等信息动态地采取不同的路径选择策略。

在路由算法设计中,本文对适用的无线传感器网络做如下假设:

(1)网络中节点数目很大,Sink 节点位于网络中心。

(2)每个节点都可获取其邻居节点信息:节点 ID,剩余能量,到 Sink 的跳数等。

(3)网络为响应式网络,所有节点只有监测数据超过自身监测阈值,才将监测数据发送出去。

3.1 动态成簇算法

传感器网络数据的监测通常是关心某一个区域的信息,单独节点的信息对于用户是没有多大意义的。因此将感知事件数据有效地聚集起来是数据获取阶段的重要任务。基于以上考虑,利用同一感知事件所产生数据所具有的相似性和等时性,设计了基于网络中现场数据的动态成簇算法(DCA)。

在算法中做如下定义:

(1)上游节点和下游节点:相对于一个节点,靠近 Sink 节点方向的节点定义为上游节点,远离 Sink 节点方向的节点定义为下游节点。

(2)前后一致机制:一个节点收到下游节点产生的数据(不是下游节点转发的数据),而在收到这个数据前后很短的时间内,如果这个节点自身监测数据也超过了阈值,那么就这对节点是前后一致的。

(3)连接加强(Reinforced):当一对节点多次符合前后一致原则时,则加强这对节点的连接。连接加强后,上游节点要等待下游节点的数据,进行数据融合。

(4)连接减弱(Negative Reinforcement):连接加强后的一对节点,当多次不符合前后一致原则时,则减弱这对节点的连接,恢复为正常节点。

(5)双连(Bi-reinforced):节点同时被上游节点和下游节点同时连接加强的状态。

由于传感器网络是以数据为中心的网络,网络中的数据

在时间和空间上都具有不确定性,并且数据区域的规模也是动态变化的。成簇算法必须适应这种不确定性以及动态变化才能达到较高的数据收集效率及节能效果。在本节的动态成簇算法中,包括簇的动态建立过程和簇的动态扩展过程。簇的动态建立过程中,根据事件区域内数据的频率和强度动态选择节点充当簇首节点,组织簇结构进行数据收集。而在簇建立后,如果事件区域范围发生动态的变化,则启动簇的动态扩展过程,以跟踪区域的动态变化,从而完成更有效的数据收集任务。

3.1.1 簇的动态建立

图 2 为簇的动态建立过程示意图。当事件发生后,事件区域内节点开始发送数据。当一对节点之间的数据频率和强度达到实现设定的阈值后,这一对节点之间的连接被加强,如图 2(b)所示。当事件区域内有节点达到双连状态后,其成为该事件区域内的簇首,向所有节点发出查询信息,如图 2(d)。其他节点收到查询后,将事件数据转向发往簇首节点。这样一个簇结构就伴随事件区域的产生而动态建立起来了。

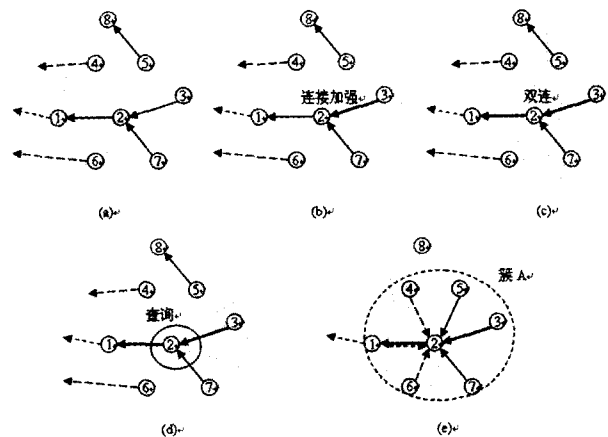


图 2 簇的动态建立过程示意图

综上所述,在簇的建立过程中,应遵循以下几点原则:

(1)一个节点在非成簇状态不可能与两个上游节点同时连接加强,但可以同时与两个或两个以上下游节点连接加强。

(2)成簇状态下前后一致机制仍然起作用的,簇成员和簇首之间的连接通过前后一致机制可以被加强,也可以被减弱。在成簇状态下,簇首可能同时与多个上游节点和下游节点连接加强。

(3)维持一个簇结构的原则是:簇首至少与一个上游节点和一个下游节点同时连接加强,既是维持双连状态时这个簇才维持,否则簇就被解散。但实现过程中为了避免簇的频繁变化,在簇建立后必须维持一定时间 T , T 时间后簇根据规则变化。

3.1.2 簇的动态扩展

在传感器网络中,事件区域的范围并不是一成不变的。当事件区域发生变化时,就要求已经建立起来的簇结构也能够进行动态的变化。

图 3 为簇的动态扩展过程示意图。当簇结构建立以后,事件区域的范围发生了变化,如图 3(a),此时事件区域内加入了新的节点,这就需要把新加入节点也纳入簇结构中。如图 3(b)所示,新加入节点向原簇 A 中节点发送数据。当数据速率和强度达到要求时,节点 3 达到双连状态,向周围节点发出查询信息。事件区域内节点收到新的查询信息,通过判断信息中簇首节点的剩余能量信息,各自选择要加入的新簇。此时随着事件区域的扩大,事件区域内的节点分裂为两个簇

结构进行数据的收集工作,如图 3(c)。从而完成了簇的动态扩散过程。

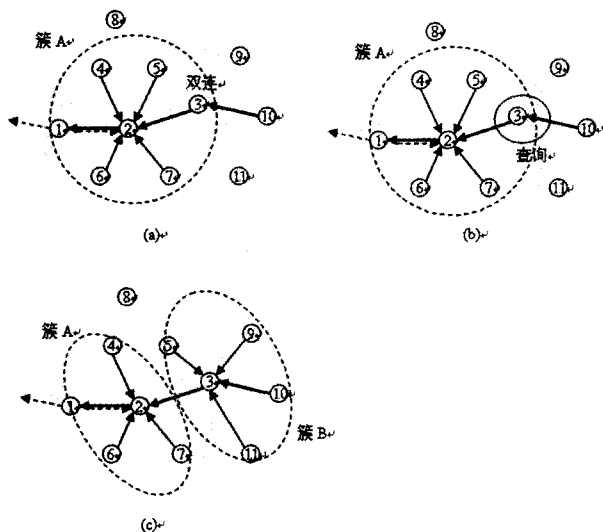


图 3 簇的动态扩展过程示意图

在数据收集阶段通过基于网络中的现场数据的动态成簇算法,利用前后一致机制动态选举位于事件区域中心的节点作为簇首,进而由簇首收集事件区域节点的数据。这样有效利用了同一事件区域节点监测数据的相似性和等时性,提高了数据融合的效率,有效地减少了网络中的转发信息。

3.2 自适应选择路由算法

在数据传输阶段,主要任务是如何将簇首融合后的数据包传回到 Sink 节点,传统网络往往只关心服务质量,通常寻找最优路径实现点到点的数据传输。然而由于无线传感器网络的特殊性,存在以下主要问题:

(1)传统网络主要关心路径的服务质量,而无线传感器网络中能量是主要考虑的对象,建立路径时应避免对某个节点的过度使用^[5]。

(2)与传统网络多点对多点的传输方式不同的是,无线传感器网络中所有数据包的最目的地都是 Sink 节点,即多点对单点的传输方式^[6]。这样 Sink 节点附近的节点必然转发更多的数据包,因此必须使 Sink 节点周围节点的能耗均衡。

(3)无线传感器网络一旦布置完成,会持续工作几个月到几年的时间,根据节点的能量的消耗情况网络也分为不同的生命阶段,为了延长整个网络的生存时间,在不同的生命阶段,应该采用相适应的路由算法。

考虑到以上几点,设计了一种动态自适应的路由算法 ASR(Dynamic Adaptive Routing)。ASR 算法在最小跳数路由算法基础上,节点根据周围邻居的能量状况,来判断选择下一跳节点的时候应该是优先考虑节点能量状况,还是优先考虑节点到达 Sink 所需要的跳数。

ASR 算法中当节点选择路径的时候,首先根据上游节点信息计算每个节点的路径选择函数 F 的值,然后选择函数值最大的节点作为它的下一跳。

路径选择函数定义如式(1):

$$F(E_{residual(i)}, H_{min(i)}) = a(E_{residual(i)} / E_{mit(i)}) \times (1 - H_{min(i)} / H_{max}) + b(H_{min(i)} / H_{max})(1 - E_{residual(i)} / E_{mit(i)}) \quad (1)$$

$E_{residual(i)}$ 为节点 i 的剩余能量;

$E_{mit(i)}$ 为节点的初始能量;

H_{min} 为节点 i 到 Sink 节点的最小跳数;

H_{max} 为网络中距离 Sink 节点最远节点到 Sink 的最小跳

数。

a, b 为平衡因子,依据网络节点密度和每跳能耗具体选定。

ASR 算法描述如下:

Step 1:网络初始化, Sink 节点广播一个初始化信令,通过这次广播,全网节点获取自己的上游节点和下游节点的相对位置关系。并且得到节点到 Sink 节点的跳数信息。

Step 2:每个收到这个通告的节点都回复一个确认信息,来指出本身愿意成为 Sink 节点的一个下游节点。确认信息中包括本节点的基本信息,包括节点 ID,节点的能量等状况。

Step 3:节点是成为下游节点后,广播自己的初始化信令。等待其他节点的确认信息。如果等待一段时间后没有收到确认信息,转向 Step5。

Step 4:节点收到上游节点通告后,等待一个随机时间,在这段时间内如果收到多个上游节点通告,则节点根据每个上游节点通告中的能量信息以及跳数信息计算路径选择函数的值,从中选择函数值最大的节点作为自己的上一跳节点,并向这个上游节点发出确认信息。转向 Step3,继续构造网络主干,直到全网主干构造完毕。

Step 5:等待一轮时间到期,转 Step1,重新构造网络主干。

根据算法,当网络节点之间能量差异不大的情况下,ASR 算法接近最小跳数算法,选择最小跳数路由进行数据传输;而当能量出现较大差异时,ASR 算法将根据路由选举函数重新选定下一跳节点,并在选择中更多的考虑节点的剩余能量情况。ASR 算法中为了不使某些节点总处于网络主干而造成能量的过分消耗,引起网络分立和网络监测数据的不完整,因此 Sink 节点要周期性地重新构造网络主干路由,从而使全网能量消耗均衡。

4 仿真分析与讨论

在文[7]中本文作者已经使用网络仿真软件 NS2 将动态成簇的原型算法与 LEACH 和 PEGASIS 做了对比,初步取得了较好的效果。但是 LEACH 和 PEGASIS 都是主动式网络数据收集算法,而在通常情况下响应式算法比非响应式更节能。在本文中,我们改进了动态成簇算法,使用基于 TinyOS 传感器网络的硬件级别能量仿真软件 powerTOSSIM^[9]将所设计算法与同为响应式成簇算法的 TEEN^[8]进行了对比分析。

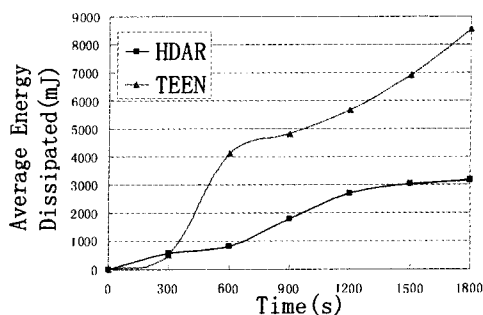


图 4 平均能耗对比

在图 4 中对比了 100 个节点的网络在 1800 秒内两种算法的平均能量消耗情况。可以看出,在开始的时候,动态自适应算法 HDAR 的能耗与 TEEN 几乎相近,主要是因为这个阶段两种算法中所有的节点都需要完成动态成簇,初始化路径选择。随着网络的运行,TEEN 消耗的能量消耗逐渐高于

HDAR算法。主要原因有两个,首先在 TEEN 算法中需要全网中的所有节点都要定期在簇内重新选举簇首,而在 HDAR 中只需那些有数据要发送的节点根据网络的现场数据来成簇,那些没有数据要发送的节点则不用参与成簇的工作,节省了能量,其次在 HDAR 算法中是根据现场数据动态成簇,充分利用了现场数据的相似性和等时性,这有效地提高了数据融合的效率,减少了需要传回到 Sink 节点的数据包数目,因而进一步减少了节点的能量消耗。由于以上两方面原因 HDAR 算法的能量消耗要小于 TEEN。

这种优势会随着网络规模的加大而更加明显,图 5 示出了网络运行时间为 1800 秒,两种算法在不同网络规模下的能量消耗对比。可以看出网络规模越大,两种算法的能耗都是上升的趋势,主要原因是由于数据包传回到 Sink 节点的路径变长,即参与到数据转发工作的节点变多,造成了网络节点平均能耗的上升。可以看出,TEEN 算法的能量消耗上升较快,这是由于上面分析的第一个原因,TEEN 参与到簇重构工作的是全部网络节点,而 HDAR 仍然是那些要发送数据的节点。当网络规模变大,TEEN 算法中节点的能耗迅速上升,而 HDAR 中能量消耗主要还是那些参与到数据收集和融合工作中的节点,因而平均能耗上升不大。可以看出,本文所设计的 HDAR 算法更适合大规模网络,无线传感器网络的特点之一正是网络规模巨大。

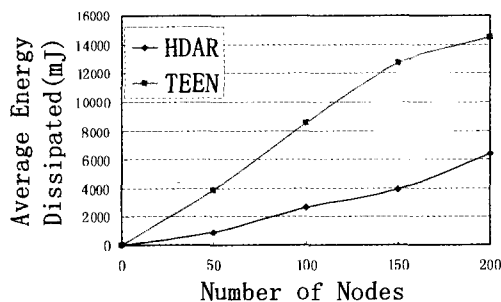


图 5 不同网络规模下的能耗对比

在 TEEN 中采用了定期簇首轮换的策略来使节点的能耗均衡,但这种重新簇首选举的方法,是在全网内进行的,这种频繁更换簇首的过程也耗费了大量能量,特别是成簇周期很短的时候,能耗将会更大,如图 6 所示,仿真到达 380 秒后,节点死亡速度加快。可以看出,TEEN 算法具有能量均衡作用,但是代价过高。

HDAR 中在数据包传回到 Sink 阶段,采用了自适应路由选择算法,可以根据节点剩余能量情况,采取动态的路由选择策略,较好地保护了那些能量接近耗尽的节点,保持了网络功能的完整性。如图 6 所示,在 650 秒之前,节点死亡速度较慢,而超过 650 秒后,由于网络到了网络生命后期,所有节点的剩余能量都很少了,因此出现节点的快速死亡。800 秒以后,由于网络中节点数目减少,数据包数据更是明显减少,网络负载下降,因此节点死亡速度又有所减慢,直至所有节点死亡。从对比结果看,HDAR 有效地延长了网络正常工作的时间,达到了预期的目的。

以上对比结果均是在网络中事件数为 2 的情况下得到的,即网络在中低度负载情况下的对比,在图 7 中对比了 HDAR 与 TEEN 在不同网络负载下的性能。从图 7 可以看出 TEEN 与 HDAR 在能耗方面的差距随着网络负载的加大而逐渐变小,当负载达到一定程度,两者基本没什么差别。而当负载过大时,动态成簇显出劣势。分析其主要原因是:在负载较高的情况下,因为此时 HDAR 与 TEEN 一样,网络中的

所有节点都参与到了成簇和数据转发的工作。而频繁动态成簇造成 HDAR 过多的能耗。

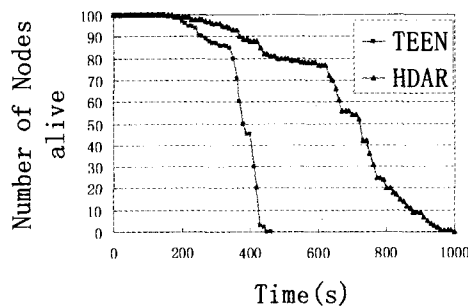


图 6 存活节点数目对比

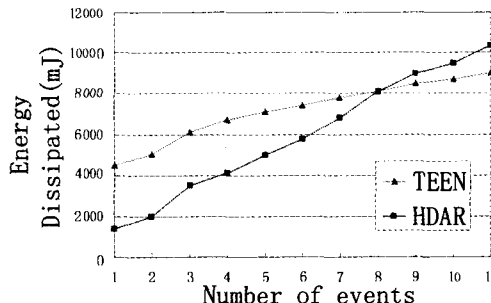


图 7 在不同网络负载下的能耗对比

小结 论文中提出了一种层次路由与平面路由相结合的无线传感器网络路由模型,并在此模型的基础上提出了一种新的动态成簇自适应路由算法。HDAR 算法结合了基于现场数据的动态成簇算法和基于能量的自适应路由算法。仿真结果表明 HDAR 具有良好的扩展性,适应于大规模的传感器网络应用。有效地降低了节点能耗,提高了能量均衡效果,延长了网络生存时间。

参考文献

- 1 Akyildiz I F, Su W, Sankarasubramaniam Y, Cayirci E. A survey on sensor networks. *IEEE Communications Magazine*, 2002, 40(8): 102~114
- 2 Akyildiz F, Su W, Sankarasubramaniam Y, Cayirci E. Wireless sensor networks: a survey, *Computer Networks*[J]. *The International Journal of Computer and Telecommunications Networking*, 2002, 38(4): 393~422
- 3 Heinzelman W R, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy efficient communication protocol for wireless microsensor networks. In: 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences, 2000. 3005~3014
- 4 Bandyopadhyay S, Coyle E. An Energy Efficient Hierarchical Clustering Algorithm for Wireless Sensor Networks. In: Proc. of IEEE INFOCOM'03, San Francisco, CA, April 2003
- 5 郑增威,吴朝晖. 若干无线传感器网络路由协议的比较研究[J]. *计算机工程与设计*, 2003, 9(24): 28~31
- 6 唐勇,周明天,张欣. 无线传感器网络路由协议研究进展. *软件学报*, 2006, 17(3): 410~421
- 7 Guo Bin, Li Zhe, Wei Zejun. A Dynamic-cluster Energy-aware Routing Algorithm Based on Neural Structure in the Wireless Sensor Networks. In: The 5th International Conference on Computer and Information Technology (CIT2005), Shanghai, China, 2005. 401~409
- 8 Manjeshwar A, Agrawal D P. TEEN: A Protocol for Enhanced Efficiency in Wireless Sensor Networks. In: Proc. of the 1st International Workshop on Parallel and Distributed Computing Issues in Wireless Networks and Mobile Computing. San Francisco, April 2001
- 9 Shnayder V, et al. Simulating the power consumption of large-scale sensor network applications[A]. In: The Second ACM Conf. on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys), Baltimore, MD, 2004