

无线传感器网络中基于网络层的能源有效性研究^{*}

杜可君, 周兴社, 李志刚

(西北工业大学 计算机学院, 陕西 西安 710072)

摘要: 如何有效地使用有限的能源是无线传感器网络的一个核心问题。以环境监测为背景, 基于网络层建立了无线传感器网络生命期的模型, 并对其进行分析, 指出能源有效路由算法和数据融合是网络层节省能源的重要因素。最后给出了一种基于网络层的能源有效性解决方案, 达到延长网络生命期的目的。

关键词: 无线传感器网络; 能源有效性; 网络生命期

中图法分类号: TP39; TP393

文献标识码: A

文章编号: 1001-3695(2006)06-0074-02

Research on Energy-awareness of Wireless Sensor Networks Based on Network Layer

DU Ke-jun, ZHOU Xing-she, LI Zhi-gang

(College of Computer Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an Shanxi 710072, China)

Abstract: A key challenge in wireless sensor networks is using the limited energy in a reasonable way in order to maximize the network lifetime. This paper builds a model of network lifetime for wireless sensor networks based on network layer. By analysis of the model, energy-aware routing and data aggregating are proved to be the two crucial factors to save energy. Finally, a network-based energy-aware solution is presented.

Key words: Wireless Sensor Networks; Energy-Awareness; Network Lifetime

无线传感器网络是由众多具有通信和计算能力的传感器节点, 以无线通信的方式连接而成的。由于受成本和物理环境的限制, 目前传感器节点一般都是采用电池供电的方式获取能源, 而对于绝大多数应用来说, 给大规模的传感器节点更换电池是不现实的, 因此, 能源就成为传感器网络系统最宝贵的资源。如何高效、合理地使用能源, 尽可能地延长网络的生命期, 成为了传感器网络研究的核心问题之一。目前, 从节点、网络、应用三个层面对传感器网络的能源感知计算都在进行研究^[1]。传感器网络是一种应用定制的网络, 因此很难找到一种对所有应用背景都适用的能源感知计算模型。本文的应用背景是: 传感器网络用于环境监测, 所有的节点都感知环境的信息, 并将感知到的信息发送给网关。针对这种背景, 本文从网络层入手, 首先建立传感器网络的生命期模型, 然后分析了网络层影响生命期的因素, 最后在综合考虑这些因素的条件下, 给出了一种基于网络层的能源有效性解决方案。

1 无线传感器网络的生命期模型

生命期是无线传感器网络的一个重要参数。能否利用有限的能源, 尽可能地延长网络的生命期是衡量能源有效性的一个重要标准。本文要解决的问题是, 在能源有限的前提下, 基于网络层实现能源有效性。为了解决问题, 我们需要将问题抽象, 在一定的假设条件下建立无线传感器网络生命期的数学模型。

1.1 模型假设

网络结构如图 1 所示, 网络中只有一个网关节点, 其余所有的传感器节点都是同构节点且没有地理位置信息。节点在工作时不发生移动; 节点的能量有限, 且不可再生。为了简化数学模型, 我们假设每个节点都有自己恒定的收发数据的速率和功率, 但节点之间可以不同。

1.2 模型建立

关于无线传感器网络的生命期至今还没有统一准确的定义, 许多学者都在试图从不同的方面对其进行说明。从应用角度上^[2], Manish 等人将网络生命期定义为网络从启动到无法向应用提供期望信息的时间。显然, 这种定义不是很精确, 因为很难准确地界定怎样才算满足用户的期望。从网络流的角度^[3], Jae-Hwan 等人给网络建立了数学模型, 但该模型描述的仅仅是最一般的网络约束条件。而在传感器网络中, 传播数据时对数据进行融合是一项很重要的节约能源的技术, 参考文献 [3] 中的数学模型没有考虑数据融合。本文中, 我们将数据融合的因素考虑进来, 重新给网络的生命期建模。如图 2 所示, 网络要处在正常的工作状态下, 必须要同时满足能量和数据流量的约束条件。

$$\sum_{k \in S_i} q_{ik} e_{ik}^t T + \sum_{j: i \in S_j} q_{ji} e_{ij}^r T \leq E_i \quad \forall i \in N \quad (1)$$

$$\left(\sum_{j: i \in S_j} q_{ji} + Q_i \right) \alpha_i = \sum_{k \in S_i} q_{ik} \quad \forall i \in N - D \quad (2)$$

$$\overline{E}_i \geq e_{ji}^r + e_{ik}^t \quad \forall i \in N, j: i \in S_j, k \in S_i \quad (3)$$

其中, N 表示所有节点的集合, D 表示目标节点集合, S_i 表示从 i 节点出发可以直接到达的节点的集合, E_i 表示 i 节点能量的

初始值, e_{ij}^t 和 e_{ij}^r 分别表示 i 节点发送和接收单位数据消耗的能量, q_{ij} 表示从 i 节点到 j 节点发送数据的速率, Q_i 表示 i 节点产生数据的速率, α 表示 i 节点对数据的融合因子, 是一个在 $(0, 1]$ 区间上的变量。

式(1)描述了网络能量的约束条件; 式(2)描述了网络数据流量的约束条件; 式(3)描述了节点仍然有效的能量的下限, 即剩余能量至少还能够完成一次收发的行为。在同时满足式(1)、式(2)和式(3)的约束条件下 T 能取到的最大值, 就是网络的生命期。

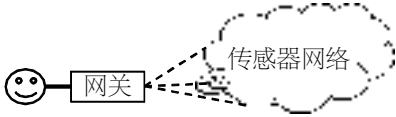


图 1 网络示意图

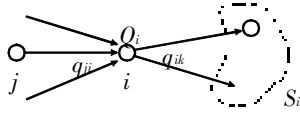


图 2 数据流向图

1.3 模型分析

影响网络生命期的因素非常多, 在节点、网络、应用三个层面上都会涉及到能源有效性的问题。本文提出的生命期模型是从网络流的角度出发的, 因此只考虑网络层的影响因素。在模型中, 对每个节点而言, e^t , e^r , q 以及 Q 都是恒定的, 对网络生命期真正有影响的因素只有 α 和 E_i 。因此具体到网络的实现中, 针对这两个因素, 很多节省能源的技术都围绕着在能源有效性路由算法和数据融合两个方面。

(1) 传播数据的时候, 希望能够选择通信代价较小的路径, 同时为了保证网络的连通性, 还必须均衡地使用网络的能量, 不能让一部分节点过早地失效。也就是说通信的能量开销和路径中每个节点的剩余能量这两个因素, 在设计路由时要综合考虑才能达到延长网络生命期的目的。

(2) 传感器网络数据的冗余性是一个很重要的特点, 很多邻近的节点采集的数据比较相似。从能量的角度来说, 让这些数据都在网络内传播是一种浪费, 将这些冗余的数据融合可以减轻网络的业务负担, 从而延长网络的生命期。

2 基于网络层的能源有效性解决方案

经过第 1 节的分析, 笔者了解到在网络层, 能源有效路由协议和数据融合是影响网络生命期的两个重要因素。因此, 将从这两个角度出发, 提出基于网络层的能源有效性解决方案。

2.1 路由协议

关于无线传感器网络路由协议的讨论非常多, 有兴趣的读者可以参阅文献[4]。由于本文讨论的对象为同构网络, 且每个节点的能量都很有限, 因此, 在设计路由协议时, 必须满足下列条件:

(1) 分担业务以达到能量均衡。频繁地使用某条路径可能会导致该条路径中的某些节点过早地失效, 会影响到网络的连通性, 严重的情况下会导致整个网络的失效。采用一定的机制实现业务分流而达到能量均衡的目的是十分必要的。

(2) 选择从源节点到目标节点通信代价最小的路径, 降低通信能耗。

为了将上述两点有机地结合起来, 笔者采用层次型的路由协议, 网络结构如图 3 所示。网络划分为若干个群, 群首节点的选择与 LEACH^[5] 算法相同。由于节点之间通信可达的距离越远, 则节点的发射功率就越强, 通信能耗也就越大。因此, 我

们这里的路由方式与 LEACH 不同, 群内以及群间的通信都是采用多跳的形式。在群内, 节点采用多跳的方式将信息发送给群首, 然后群首之间也是通过多跳的形式将数据发送到网关, 这样可以减小节点的发送功率。

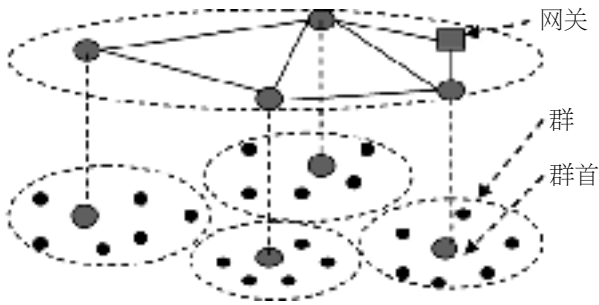


图 3 网络体系结构图

路由分为群内和群间两个层次。群内相邻节点采集的数据比较接近, 单个节点信息的丢失不会造成太大的影响, 因此选择路由时主要是考虑降低通信的能耗; 群间通信传递的数据代表整个群的信息, 这种信息的丢失会造成比较严重的影响, 因此群间路由时, 需要转发节点具有较强的可靠性, 我们选取剩余能量大的节点作为下游的转发节点。综合考虑到群内和群间两个因素, 我们给出选择转发节点时代价函数的定义:

$$cost_{ij} = \begin{cases} e_{ij}^t + e_{ij}^r & \text{群内} \\ \frac{1}{E_j} & \text{群间} \end{cases}$$

整个网络不保留全局路由信息, 在群内, 节点记录自己到群首的跳数, 群首记录自己到网关节点的跳数。这样, 不管是群内还是群间, 节点都会从跳数小于自己(更靠近上层节点)的邻居节点中选择 $cost$ 值最小的节点作为下游转发节点, 如果存在 $cost$ 值相同的若干个节点, 则从中随机选择一个作为转发节点。

2.2 数据融合方式

考虑到网络层次型的结构, 且没有全局的路由信息, 因此, 我们只在每个群的内部由群首节点对数据进行融合。群首会根据应用的需求, 选择一个合适的融合因子 α 按照 1.2 节中的式(2), 对数据进行融合。这里的融合因子 α 的选择与具体的应用背景关系很大, 若是监测温度这种各节点之间差异较小的数据, α 的值就可以取得相对较小(靠近 0); 反之 α 就要取一个相对较大的值(极端情况可为 1), 以防止信息损失过多而不满足应用的需求。

2.3 能源有效性分析

这种解决方案综合考虑了我们在第 1 节中分析的影响网络生命期的因素, 从路由协议和数据融合两个角度实现能源有效性。

(1) 在能量的均衡使用方面: ①通过群的划分与更新实现了网络业务的分担。②群首节点之间通信时选择能量大的节点作为转发节点, 这样可以防止过度频繁地使用某几个群首节点而导致这几个节点能量消耗殆尽。③在群内转发数据时, 如出现有若干个相同跳数和 $cost$ 值的下游节点, 通过随机选择的方式也可以实现业务的分流。

(2) 在节省能量方面: ①群内选择通信代价小的路由, 这样降低了每次群内路由的能量开销。②群首节点对群内的数据进行融合, 减少了发往网关的数据量, 从而节省了能源。

```
//写日志信息
return 0;}

然后,定义安全日志 security_operations 对象 SeAudit_security_ops,并用定义好的日志 Hook 函数对其进行初始化:

static struct security_operations SeAudit_security_ops={
    ...
    .inode_mkdir = SeAudit_inode_mkdir,
    ...
};
```

最后,定义模块初始化函数 SeAudit_init() 和模块退出函数 SeAudit_exit()。在模块初始化函数中需要调用 LSM 框架的注册函数 register_security() 对安全日志对象 SeAudit_security_ops 进行注册;在模块退出函数中调用注销函数 unregister_security() 将安全日志对象 SeAudit_security_ops 注销。同时还

需要考虑安全模块的叠加问题:

```
static int __init SeAudit_init ( void) //模块初始化函数
{
    if ( register_security ( &SeAudit_security_ops) ) {
        if ( mod_reg_security ( MY_NAME, &SeAudit_security_ops) ) {
            return -EINVAL;
        }
        secondary =1; //注册为辅助安全模块
    }
    return 0; //注册为主安全模块
}

static void __exit SeAudit_exit ( void) //模块退出函数
{
    if ( secondary) {
        if ( mod_unreg_security ( MY_NAME, &SeAudit_security_ops) )
            //注销辅助安全模块
            ...
    } else {
        if ( unregister_security ( &SeAudit_security_ops) )
            { //注销主安全模块
                ...
            }
    }
}
```

(上接第 75 页)

(3) 根据 LEACH^[5] 算法,网络会周期性地处于划分和工作两个阶段。当网络处于工作阶段时,如果某个群首节点出现意外情况(如故障或能量耗尽)而失效,则需要重新选择该群的群首节点。由于网络不采用全局路由,因此只需要通知和该群首相邻的群首节点,从而避免了在整个网络内广播信息,使网络的维护变得简单,同时也节省了能源。

3 结束语

如何有效地使用有限的能源是无线传感器网络的一个核心问题。本文从网络层的角度出发,建立了传感器网络生命期的模型并对其进行分析,指出能源有效性路由算法和数据融合是网络层延长网络生命期的重要因素。最后提出了一种基于网络层的能源有效解决方案,包括网络结构、路由协议和数据融合三方面,以达到延长网络生命期的目的。由于群首节点之间的距离较远,通信时功率太小可能会导致信息不可达,太大了又会产生信息的浪费。如何采用合理的通信功率而达到网络的有效连通是我们今后要进一步努力的方向。

3 结论

基于 LSM 框架设计的日志记录模块是内核级的日志记录操作,在系统调用中调用 Hook 函数执行日志记录,保证了日志的完整性和准确性。同时日志记录不需对内核进行任何的修改,以模块的方式提供给用户,也不会导致内核的臃肿。

参考文献:

[1] Chris Wright, Crispin Cowan, Stephen Smalley, *et al.* Linux Security Modules:General Security Support for the Linux Kernel[EB/OL] . USENIX Security Symposium, <http://lsm.immunix.org/docs/lsm-usenix-2002/html>, 2002-08/2005-02.

[2] Chris Wright, Crispin Cowan, Stephen Smalley, *et al.* Linux Security Module Framework[EB/OL] . Ottawa Linux Symposium, <http://lsm.immunix.org/docs/lsm-ols-2002/html>, 2002-06/2005-03.

[3] Stephen Smalley, Timothy Fraser, Chris Vance. Linux Security Modules: General Security Hooks for Linux[EB/OL] . <http://lsm.immunix.org/docs/overview/linuxsecuritymodule.html>, 2004-05/2005-03.

[4] Stephen Smalley(NSA), Chris Vance(NAI Labs), Wayne Salamon (NAI Labs) . Implementing SELinux as a Linux Security Module[R] . NAI Labs Report, <http://www.nsa.gov/selinux/module-abs.html>, 2002-05/2005-04.

[5] Benjamin A Kuperman. A Categorization of Computer Security Monitoring Systems and the Impact on the Design of Audit Sources[D] . Purdue University, http://www.cs.purdue.edu/AnnualReports/2003-2004/grad_cirriculum_learning.pdf, 2004-08/2005-04.

作者简介:

张浩(1981-),男,安徽无为人,硕士研究生,研究方向为计算机信息安全、Linux 日志审计系统;刘乃琦(1950-),男,四川成都人,副院长,教授,研究方向为计算机系统安全技术、网络安全技术、信息安全理论与应用技术。

参考文献:

[1] aghunathan V, Schurgers C, Sung Park, *et al.* Energy-aware Wireless Microsensor Networks[J] . Signal Processing Magazine, IEEE, 2002, 40-50.

[2] Bhardwaj M, Chandrakasan A P. Bounding the Lifetime of Sensor Networks via Optimal Role Assignments[C] . The 21st Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, 2002. 23-27, 1587-1596.

[3] Jae-Hwan Chang, Tassiulas L. Maximum Lifetime Routing in Wireless Sensor Networks[J] . IEEE/ACM Transactions on Networking, 2004, 12(4) : 609-619.

[4] Kemal Akkaya, Mohamed Younis. A Survey on Routing Protocols for Wireless Sensor Networks[J] . The Elsevier Ad hoc Network Journal, 2003.

[5] W Heinzelman, A Chandrakasan, H Balakrishnan. Energy-efficient Communication Protocol for Wireless Sensor Networks[C] . Proceedings of the Hawaii International Conference System Sciences, 2000.

作者简介:

杜可君(1981-),男,硕士研究生,主要研究方向为网络化嵌入计算;周兴社(1955-),教授,博导,主要研究领域为网络与分布计算;李志刚(1975-),男,博士研究生,主要研究方向为网络化嵌入计算。