

最大生存周期的无线传感器网络数据融合算法

张振宇¹ 赵秋伶²

(辽宁工程技术大学电信学院 葫芦岛 125105)¹ (辽宁工程技术大学基础教学部 葫芦岛 125105)²

摘要 针对无线传感器网络的节点能量有限,且在进行信息传输时存在数据冲突、传输延时等问题,提出基于最大生存周期的无线传感器网络数据融合算法。该算法将整个网络中的节点分成多个簇,并根据节点的传输范围,将每个簇中的节点均匀分布,每个节点根据自己的本地信息和剩余能量选择通信方式向簇头节点传输数据,从而形成传输数据的最短路径;并根据集中式 TDMA 调度模型,运用基于微粒群的 Pareto 优化方法,使得网络在完成规定的信息传输时每个节点耗费的平均时隙和平均能耗最低。仿真结果表明,上述算法不但可以最大化网络的生存周期,还可以有效地降低数据融合时间,减少网络延时。

关键词 无线传感器网络,最大生存周期,数据融合,智能算法

中图分类号 TN92 **文献标识码** A

Data Aggregation Algorithm of Maximum Lifetime for Wireless Sensor Network

ZHANG Zhen-yu¹ ZHAO Qiu-ling²

(School of Electronic and Information Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China)¹

(Basic Teaching Department, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China)²

Abstract For wireless sensor network there is a series of problems such as node energy limited and data conflict and transmission delay in information transmission, Put forward data aggregation algorithm on the basis of the maximum lifetime of wireless sensor network. The algorithm divided the nodes in the network into a plurality of clusters, Each cluster in the uniform distribution of nodes according to the node's transmission range, Each of the nodes select communication mode in the light of their local information and residual energy to transmit data to the cluster head node, and form the shortest path of data transmission. Then apply particle swarm optimization method based on Pareto in line with the centralized TDMA scheduling model. The average processing time slot and the average energy consumption optimization was optimized in the completion of the information transmission. Simulation results show that the algorithm can not only maximize the survival time of the network, but also can effectively reduce the data fusion time and reduce network delay.

Keywords Wireless sensor network, Maximum lifetime, Data aggregation, Intelligent algorithm

1 引言

无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)是一种新兴的信息获取和处理技术。WSN是由部署在监测区域内大量的微型传感器节点组成的一个多跳自组织网络,集成了传感器、微机电系统和网络等先进技术,能够协同地实时感知、采集和处理网络覆盖区域中各种环境或监测对象的信息,并传送到用户终端^[1]。WSN具有成本低、范围大、布设灵活等特点,非常适合应用于无人环境、恶劣环境或超远距离情况下信息的采集和传送,比如智能电网等领域,日益受到学术界和工业界的高度重视,是当前国际上备受关注的新兴前沿研究热点之一^[2]。

但由于无线传感器网络中节点的能量和数目十分有限,若在收集信息的过程中采用各个节点单独传送数据到汇聚节点的方法,则会造成网络过多能量的消耗和传输信息的频繁冲突碰撞。因此,在无线传感器网络中,数据融合已经成为一种重要的用来减少网络中数据传输总量的节能技术。它不但

可以用一定的算法将传感器节点采集到的大量原始数据进行网内处理,去除其中的冗余信息,延长无线传感器网络的生存周期,而且还可以减少融合节点在融合之前等待孩子节点传输数据的时间,减少无线传感器网络数据融合的延时^[3]。

2 无线传感器网络的数据融合

2.1 数据融合的概念

在无线传感器网络中,数据融合即利用计算机技术,对按时间顺序获得的若干传感器的观测信息,在一定的准则下加以自动分析、综合,从而完成所需要的决策和估计任务而进行的信息处理过程^[4]。

2.2 节点剩余能量的计算

设节点的初始能量为 E_r ,网络经过一段时间的运行后,设节点在 T_1 时刻前共执行了 n_1 次信息发送, n_2 次信息接受,则节点 i 在 T_1 时刻的剩余能量可用式(1)表示^[5,6]:

$$E_r(i) = E_r(i) - \sum_{k=1}^{n_1} E_t(i, j_k) - \sum_{l=1}^{n_2} E_r(i, j_l), j_k, j_l \in N_i \quad (1)$$

张振宇(1975-),男,博士,讲师,主要研究方向为数字信号处理、集成电路设计, E-mail: 442913397@qq.com.

3 低功耗和低延时无线传感器网络数据融合算法

3.1 节点数据结构

传感器节点 i 需要维护的信息包括:①簇头节点 P_i 。②节点的标志位 F_i ; $F_i=0$ 时表示节点不在最优传输路径中; $F_i=1$ 表示节点已经在最优传输路径中。③节点的剩余能量标志位 H_i ; 设置能量阈值 ST , 若节点 i 剩余能量值为 S_i , $S_i < ST$ 时, 置 $H_i=0$, 并向邻近节点广播位置信息, 通知邻节点不再向 i 发送信息; 否则置 $H_i=1$, 可以进行下一次接收或者发送信息。

3.2 算法描述

假设在一个二维区域内随机分布着大量的传感器节点。这些节点可被划分成多个簇, 每个簇中同时存在多跳和单跳通信, 也就是说, 距离簇头远的节点用多跳进行数据传输, 距离簇头近的节点用单跳通信。另外, 根据传感器节点的传输范围, 对每个簇内的节点进行均匀布置, 如图 1 所示。

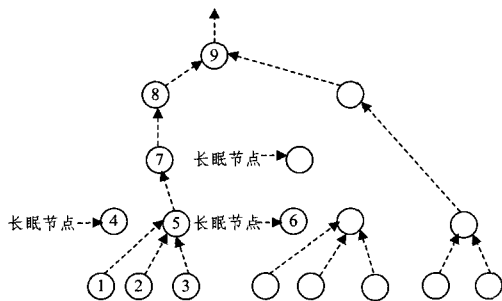


图 1 数据融合方案

由簇头启动数据融合的过程, 簇头的每个节点都是根据自身的信息来决定是否进行信息的传递。融合过程开始后, 需要多个初始节点来启动运算。无线传感器网络的结构处于不断变化之中, 所以每个节点的位置也在不断地变化, 若选取几个固定的节点势必会造成较大时间延时和能量消耗。基于上述原因, 每次选取距离基站最远的多个节点来启动运算, 这样就能保证每次的初始节点都是不同的, 每次成为簇头的节点都是距离基站最近的, 这样就能有效地降低数据融合过程中的延时和能量消耗, 最大化网络的生存周期。

每个簇中数据传输的过程为: 首先, 簇头节点检测自身的剩余能量 S_i , 若 $S_i > ST$, 置 $H_i=1$, 并向所有可达到的传感器节点发布自己的位置信, 否则簇头节点广播信息使得其他节点进入休眠状态。我们假设簇头节点的剩余能量 $S_i > ST$, 则簇头节点向所有可达到的传感器节点发布自己的位置信息, 在收到簇头的位置后, 非簇头节点 i 决定自己所在的簇, 并向邻近节点广播它与簇头之间的最小跳数, 当某一邻居节点 j 的跳数小于这个最小跳数时, 则发回反馈信息。根据反馈信息, 节点 i 判断离它最近节点 j 的剩余能量, 若节点 j 的剩余能量 S_j 大于能量阈值 ST , 则节点 i 选择节点 j 作为父节点, 并向父节点 j 发送加入请求, 否则置 $H_i=0, F_j=0$, 向邻近节点广播自己的位置信息, 通知邻节点不再向 j 发送信息, 同时节点 j 进入长期的长眠状态, 而后节点 i 重复上述过程, 直到选出父节点为止。

如图 1 所示, 簇头节点 9 首先启动运算并检测自身的剩余能量值 S_9 , 若 $S_9 < ST$, 则置 $H_9=0$, 并向其它节点广播信息, 使其它节点进入休眠状态; 若 $S_9 > ST$, 则置 $H_9=1$, 簇头节点 9 向邻近节点发布自己的位置信息。在收到各个邻近簇

头的位置信息后, 图 1 中的非簇头节点经过比较加入簇头为 9 的簇内, 每个节点估算自己到簇头的跳数。节点 1 向邻近节点广播自己到簇头节点 9 的跳数为 4, 因为节点 4 到簇头的距离为 3 跳小于节点 1 到簇头的跳数, 节点 4 收到后会向节点 1 发送反馈信息。因节点 4 距离 1 相比节点 5 较近, 则节点 4 有可能为节点 1 的父节点, 而后检测节点 4 的剩余能量值 S_4 , 若 $S_4 < ST$, 置 $H_4=0, F_4=0$, 并向邻近节点广播自己的位置信息, 通知邻节点不再向 4 发送信息, 同时自己进入长期的休眠状态, 系统最终判定节点 4 不是节点 1 的父节点。继而节点 1 再次向邻近节点广播自己已经较远中间节点到簇头节点 9 的跳数为 4 跳, 因节点 5 到簇头的跳数为 3 小于节点 1 到簇头的跳数, 节点 5 收到后会向节点 1 发送反馈信息。因节点 5 距离 1 相比节点 6 较近且节点 5 的剩余能量 $S_5 > ST$ (置 $H_5=1, F_5=1$), 所以节点 1 会选择节点 5 作为父节点。同理可知, 节点 2、3 的父节点也为 5, 7 成为 5 的父节点, 8 成为 7 的父节点, 以此类推, 直到簇头节点 9。

3.3 时隙分配方案

节点在信息传输过程中, 可能存在空闲侦听、传输碰撞等现象, 从而导致传感器网络在进行信道访问时存在较大的时延和能量消耗。因此设计了一种新的 TDMA 调度方案, 并运用基于微粒群 Pareto(简称 PAPS0)优化方法, 使得无线传感器网络在完成规定的信息传输任务时每个节点的平均时隙和平均能耗最优^[7]。

3.3.1 优化目标

把一个传感数据包经过多跳传输到簇头节点的过程称为一个任务, 每一跳的传输称为一个子任务, 一个子任务对应一个执行节点, 并占用一个时隙, 则无线传感器网络完成指定任务每个节点的平均时隙和平均能耗分别以 f_1 和 f_2 表达, 如下所示:

$$f_1 = \frac{\text{Totalslots}}{N} \quad (2)$$

$$f_2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [P_i^T (t_i^{-\alpha} + t_i^{\alpha}) + P_i^R (t_i^{-\alpha} + t_i^{\alpha})] \quad (3)$$

式中, N 为节点总数; P_i^T 和 P_i^R 分别表示节点 i 的发送功率和接收功率; $t_i^{-\alpha}$ 、 t_i^{α} 为节点 i 在发送和接收状态与睡眠状态之间的切换时间总和; t_i^T 和 t_i^R 则分别是节点 i 完成这批任务所需要的总的发送时间和接收时间。由式(2)和(3)知, 在网络拓扑和数据收集任务一定的条件下, 追求网络中总延时和总能耗最优就是要求每个节点切换能量的平均消耗和平均时隙数最优^[8]。

3.3.2 个体的编码和解码

将进化算法用于 TDMA 分配, 一个重要的问题是在个体表达和问题的解之间找到合适的映射关系。这样才能把个体的搜索空间限定在问题的解空间内, 并在此空间内进行最优解的搜索来达到问题求解的目的。根据第 3.3.1 节的描述, 一批数据包的总传输任务可以看成是所有子任务的一个序列。由此, 标记一个子任务为(任务编号, 序列号), 其中: 任务编号指该子任务隶属于哪个任务, 序列号则指这个子任务在该任务中执行的顺序号。例如, 子任务(3,2)是指第 3 个任务的第 2 跳传输。在编码中, 一个任务编号出现的次数可以暗示其对应的子任务序列号。因此可取出子任务序列中的任务编号作为一个个体的编码序列。

根据个体的编码规则可以得到其解码规则。首先, 将一个个体转换为一个子任务的序列。然后, 依序给每个子任务

分配时隙。同时,在无冲突的条件下,将尽可能多的子任务配置在同一时隙。至此,个体与 TDMA 调度方案之间的映射关系便已完全建立。

3.3.3 基本粒子群

粒子群优化算法是一种进化计算技术,最早由 Kenney 与 Eberhart 于 1995 年提出,初始在解空间中随机引入一组“潜力”解,通过模仿鸟群捕食的行为和通信机制,迭代搜寻达到最优值。在 PSO 中,每个优化问题的解可看作搜索空间中一只鸟,称之为“粒子”,追随当前的最优粒子在搜索空间中搜索,每个粒子有一个根据它自身经历和它同伴所分享的全局最优信息进行动态调整的飞翔速度,使得整个种群朝着最优的位置收敛。整个过程的迭代方程如下:

$$V_{id}(t+1) = W * V_{id}(t) + C_1 * r_{1d}(t) * (P_{id}(t) - X_{id}(t)) + C_2 * r_{2d}(t) * (P_{gd}(t) - X_{id}(t)) \quad (4)$$

$$X_{id}(t+1) = X_{id}(t) + V_{id}(t+1) \quad (5)$$

式中,“ i ”表示微粒;“ d ”表示微粒的第 d 维;“ t ”表示第 t 代; V_{id} 和 X_{id} 分别是微粒 i 的速度和位置; P_{id} 为微粒 i 所经历的最好位置(p_best), P_{gd} 为所有微粒所经历过的最好位置(g_best); W 为惯性权重,它使微粒保持运动惯性,使其具有扩展搜索空间的趋势,从而有能力探索新的区域; C_1 和 C_2 为加速度常数,表示把微粒拉向 p_best 和 g_best 的随机项权重; r_1 、 r_2 返回一个在 $[0,1]$ 范围内变化的随机数。

3.3.4 多目标粒子群算法解的评价机制

在多目标优化问题中,解的评价机制可为微粒群在搜索空间中的飞行提供方向。一般来说,多目标问题解的评价方法有两种:一种是多个目标的加权和的方法;一种是 Pareto 优化方法。

在微粒群优化算法中,有个体和群体的概念。在算法进行迭代时,微粒的飞行方向是通过自身最优解和全局最优解的拉动作用来共同提供的。因此,我们使用微粒自身的最优解和全局的最优解相结合的方式对多目标解进行评价^[9]。

对于微粒群中个体的局部最优解,采用加权和的方法进行评价。对于一个最小化个体目标的问题,引入权重因子 $\partial_i \in [0,1]$,将评价函数取为:

$$f_i(t) = \sum_{i=1}^M \partial_i * f_i \quad (6)$$

式中, $\sum_{i=1}^M \partial_i = 1$ 。具体的评价方法为:当微粒飞行到一个新位置 X_{id} 时,采用式(6)计算该位置的评价函数值,若该评价函数值优于微粒在 P_{id} 的评价函数值,则更新其最优位置为当前位置 X_{id} 。此外,各目标权重因子 ∂_i 是在初始化时以 $\sum_{i=1}^M \partial_i = 1$ 为条件随机生成的。

TDMA 调度中的任务完成时每个节点的平均时隙数和平均能耗最优两个指标,但两个指标间存在着冲突,在网络任务一定的条件下,每个节点的平均能耗要最小就是要求切换能量消耗最小,也就是要求节点的工作连续性好,这就意味着父节点应收集完所有子节点的数据包之后才统一进行下跳传输,这势必会增加完成任务时每个节点的平均时隙数,反之亦然。由于任务完成时每个节点的平均时隙数和平均能耗不能同时达到最优,加权和的方法难以充分评价解的优劣性,因此使用 Pareto 优化概念比较解的优劣性。为了比较解的优劣性,我们引入支配概念,其严格定义如下:对于一个最小化 M 个目标的问题 $\min F = [f_1, f_2, \dots, f_M]$,存在任意两个解 X_1 和 X_2 ,若 X_1 支配 X_2 ,则必须同时满足如下条件:

1) X_1 在所有目标上不比 X_2 大,即 $f_j(X_1) \not> f_j(X_2), j \in (1, 2, \dots, M)$;

2) X_1 至少在一个目标上是严格比 X_2 小的,即 $f_j(X_1) < f_j(X_2)$ 。

若解不满足上述条件中的任何一条时,则称 X_1 不支配 X_2 。所有互不支配的解构成非支配解集,当解的比较空间是整个空间时,该非支配解构成 Pareto 最优解。

3.3.5 PAPSO 优化实施步骤

PAPSO 实施步骤如下:

(1) 设定粒子数 n_p , 规定迭代次数 N_{max} , 随机产生 n_p 初始解(调度方式) X ; 并初始化 W 、 C_1 、 C_2 和 ∂_i 的值; 设置粒子当前的位置为个体极值位置 p_best , 应用评价机制对粒子的个体极值进行评价, 找到全局极值位置 g_best , 而后依次计算它们的目标值 f_1, f_2, \dots, f_j ; 然后依 Pareto 优化概念, 逐一判断它们之间的支配关系, 并形成一初始的 Pareto 解集。

(2) 进行迭代运算, 用式(4)和式(5)产生下一代微粒。

(3) 应用评价机制对 $X(j)$ 和 $p_best(j)$ 进行评价; 如果 $f(X(j)) > f(p_best(j))$, 则 $p_best(j) = X(j)$; 更新所有个体的最优位置和全局的最优位; 应用支配的概念, 找出非支配解集, 进而找出 Pareto 解集。

(4) 满足迭代条件(有此以迭代代数作为条件), 输出最后一代的种群个体(即 Pareto 最优解集); 否则, 执行步骤(3)。

4 仿真及其分析

在一个二维环境中进行试验, 169 个节点被均匀放置在 $600m^2$ 的网格区域中。

仿真试验中, 每个节点的信道容量为 500kbs, 节点的通信距离设为 15m, 互在通信范围内的节点可以形成链接。节点活动状态和睡眠状态的切换时间是 470us, TDMA 时隙的大小取一个数据包所需的传输时间和可能的时钟偏移时间之和, 以消除时钟偏移对 TDMA 算法的影响。发送和接收一个数据包所需的功率是 81mW 和 180mW。

基于上述的网络模型, 分别对 LEACH、DEEC 及新算法进行了仿真, 重点比较和分析了 3 种路由算法运行过程中网络的生命周期^[10]。

图 2 为仿真运行过程中整个网络的生命周期对比。由图可见, 在节点初始数目相同的网络中, 新算法使得网络的生命周期最长, LEACH 算法在网络大约 40% 的节点死亡之前其性能比 DEEC 算法差, 之后其性能要优于 DEEC 算法。新算法由于在簇头选择时考虑了节点的剩余能量, 当节点剩余能量较小的时候, 将选择距离其最近的节点作为簇头, 继续进行信息的传输, 且由于选择了最短传输路径和最优化时隙分配方案, 所以在完成传输任务时每个节点消耗的平均能量和平均时隙最优, 最大化了网络的生命周期。

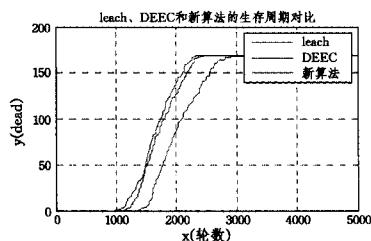


图 2 网络的生产周期

仿真实验还比较了 NBSA 算法和 PAPSO 优化方法用于

TDMA 调度方案时,网络中每个节点在完成规定任务时的平均能耗和平均时隙。在多目标粒子群 Pareto 优化方法中,权重因子 W 取为 1.5, C_1 、 C_2 取为 2.0,微粒群的大小取为 40,最大进化代数取为 600。

从表 1 不难看出 PAPSO1 是时间性能上表现最好的,当然能量性能是 7 个解中最差的,而 PAPSO7 则是能量指标表现最突出的,同样其时间表现又是 7 者之中最次的。它们之间分布着其余 5 个解。

表 1 NBSA 算法和 PAPSO 算法的结果列表

算法	平均时隙(个)	平均能耗/(mJ)
NBSA	1.436	6.625
PAPSO1	1.056	6.567
PAPSO2	1.138	6.523
PAPSO3	1.195	6.480
PAPSO4	1.327	6.450
PAPSO5	1.519	6.425
PAPSO6	1.540	6.437
PAPSO7	1.796	6.427

由于这 7 个解的分布情况是均匀的,同时考虑到其均匀分布性质,选择 PAPSO4 的解作为双目标 f_1, f_2 的折中解。依 Pareto 优化概念对各算法的结果进行分析,显见, PAPSO (1-4)对 NBSA 构成支配。可见多目标粒子群 Pareto 优化方法能得到比 NBSA 更好的调度结果。

结束语 无线传感器网络中,需要利用数据融合技术来减少数据传输量,节省节点的能量,延长节点的生命周期。为降低融合过程中的时延和能量消耗,提出网络数据传输最短路径算法,并结合 Pareto 优化方法和搜索能力强的 PSO 算法,对集中式 TDMA 调度问题提出了 PSO-Pareto 优化方法,从而在信息传输的路径和每个节点完成规定任务所需的平均时隙、平均能耗两个方面论述了减少网络的时延和能耗,最大化了网络的生存周期和最小化了网络的延时。

(上接第 7 页)

性,如基于事件类型,或地理位置等。

结束语 传感器网络由于资源严格受到限制,很难处理好各种资源之间的关系,通常是在各种限制之间,根据传感器网络的应用需求,寻找一种适当的折中方法。本文针对 UWSN 和移动 sink 这种场景,提出密钥分发和移动 sink 特权限制协议 mAKPS。通过把大量的存储开销转移到功能较强的移动 sink 上,降低了普通传感器节点的存储要求。

参 考 文 献

[1] Chen Xiang-qian, Makki K, Yen Kang, et al. Sensor network security: a survey [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, Second Quarter 2009, 11(2):52-73

[2] Ma Di, Tsudik G. Extended abstract: Forward-secure sequential aggregate authentication[C]//IEEE Symposium on Security and Privacy, 2007. Berkeley, CA: IEEE, 2007: 86-91

[3] Di Pietro R, Mancini L V, Soriente C, et al. Catch me (if you can): Data survival in unattended sensor networks[C]//Sixth Annual IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications, PerCom' 08, 2008. Hong Kong: IEEE,

参 考 文 献

[1] Akyildiz I F, Su W, Sankarasubramaniam Y, et al. Wireless sensor networks[J]. Computer Networks, 2010, 38(4): 393-422

[2] Gungor V C, Lu Bin, Hancke G P. Opportunities and Challenges of Wireless Sensor Networks in Smart Grid[C]//IEEE Transactions on Industrial Electronics, VOL. 57, 2010: 3557-35-64

[3] Khedo K K, Perseedoss R, et al. A Wireless Sensor Network Air Pollution Monitoring System[J]. International Journal of Wireless & Mobile Networks(IJWMN), 2010, 15(5)

[4] 杜菲. 无线传感器网络中数据融合算法的研究[J]. 信息与电脑, 2011, 6: 162-164

[5] 掌明. 基于最大生存周期的无线传感器网络能量模型研究[J]. 现代电子技术, 2007, 21: 38-40

[6] Shih E, Cho S H, Ickes N, et al. Energy-efficient link layer for wireless microsensor networks[C]//Proc of the Workshop on VLSI 2001. Orlando, 2001: 16-21

[7] Ergen S C, Varaiya P. TDMA scheduling algorithms for sensor network[R]. Berkeley: Department of Electrical Engineering and Computer Sciences, University of California, 1970

[8] Gandham S, Zhang Ying, Huang Qing-feng. Distributed minimal time convergecast scheduling in wireless sensor networks[C]//The 26th Int Conf Distributed Computing Systems (ICDCS06). Lisboa, 1999

[9] Deb K. Evolutionary algorithms for multi criterion optimization in engineering Design[C]//Proc of Evolutionary Algorithms in Engineering and Computer Science (EUROGEN-99). John Wiley & Sons, Chichester, 1999: 135-161

[10] 李闻, 林亚平, 童调生. 传感网络中一种基于蚂蚁算法的分布式数据汇集路由算法[J]. 小型微型计算机系统, 2005, 26(5): 788-792

2008: 185-194

[4] Ma Di, Tsudik G. Dish: Distributed self-healing (in unattended sensor networks)[C]//SSS 2008, LNCS 5340, 2008. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2008: 47-62

[5] Rasheed A, Mahapatra R N. The Three-Tier Security Scheme in Wireless Sensor Networks with Mobile Sinks [J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2012, 23(5): 958-965

[6] Zhang Wen-sheng, Song Hui, Zhu Sen-cun, et al. Least privilege and privilege deprivation: towards tolerating mobile sink compromises in wireless sensor networks[C]//Proceedings of the 6th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing (MobiHoc' 05), 2005. New York, NY, USA: ACM, 2005: 378-389

[7] Liu Zhi-hong, Ma Jian-feng, Huang Qi-ping, et al. Asymmetric key pre-distribution scheme for sensor networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(3): 1366-1372

[8] Leighton T, Micali S. Secret-key agreement without public-key cryptography[C]//Proceedings of the 13th Annual International Cryptology Conference on Advances in Cryptology (CRYPTO' 93), 1993. London, UK: Springer-Verlag, 1993: 456-479