

基于能量自采集的无线传感器网络网关切换机制研究^①

杜文振^② 陈海明 李 栋 崔 莉^③

(中国科学院计算技术研究所 北京 100190)

摘 要 针对野外传感网系统中采用太阳能供电的网关因天气变化而产生能量供给失效的问题,研究了基于历史能量采集信息和实时气象信息的多网关切换方法。首先基于气象信息决定需要切换的网关和网关切换的时机;其次提出了一种网关选择算法(EasiGS),根据候选网关剩余工作时间让节点先验式选择网关接入,以避免网关失效带来的数据丢失问题,并通过最优网关接入方法降低系统中采集节点的整体能耗;最后根据实际应用关注的的数据发送频率、网关恢复时间、节点与候选网关之间的传输距离等信息,通过概率统计的方法对 EasiGS 的计算开销进行了进一步优化。仿真实验表明,EasiGS 能使系统整体能耗达到最优,并且优化后的 EasiGS 能够有效降低节点上的计算量。

关键词 环境监测, 太阳能供电网关, 网关切换方法, 网关选择算法, 能量恢复时间, 概率统计

0 引 言

野外环境监测传感网系统^[1,2]在水体监测、森林监测等领域得到广泛的长期使用。该类系统具有如下特点:(1)传感网络本身由许多具有数据采集及传输通信能力的传感节点和接入网关构成;(2)网关使用能量自采集技术(如太阳能)进行供电。此类系统中的网关除了执行自身的能量采集、任务处理等功能之外,还担负着把数据传输到后端服务器的任务。因此,如果网关因供电不足失效,就会造成数据的丢失,从而影响整个系统的数据传输可靠性和数据完整性。

目前的传感网系统大多采用多网关备份的方法^[3-8],并通过网关切换机制来保证系统的数据传输可靠性。但现有方法多采用判断当前工作网关失效之后切换到备用网关的技术思路。这种方法存在以下局限性:首先,切换方法不能完全避免数据丢

失,因为无论怎么提高网关扫描速度,路由也只会会在网关失效之后进行切换,很难实现网关之间的无缝切换;其次,未重视失效网关能够恢复工作的可能性,切换算法会严重影响传感网系统的整体能量均衡;极端情况下会导致系统网关频繁切换,带来过多的整体能量消耗。

目前在网关切换方面的研究大多是针对 802.11 网络和 Mesh 网络提出的,如文献[8-15]。网关切换解决的问题包括:(1)如何快速扫描需要切换的网关;(2)确定需要切换网关后如何进行快速的切换。在进行网关切换之前,节点需要在候选网关中选择最优的网关。现有的网关选择方法^[3-9]大多综合权衡多种参数进行最优网关选择。然而,与无线 Mesh 网络和移动网络不同的是,本文考虑的网关设备采用能量自采集技术,网关的切换不仅需要考虑其剩余能量还需要考虑失效网关能量恢复等因素。如何结合网关自供电这一特点,研究合适的网关切换策略与方法,在保证数据传输可靠性的同时,选择

① 国家自然科学基金(61303246)和 863 计划(2014AA093402)资助项目。
② 男,1989 年生,博士生;研究方向:物联网,无线传感器,传感网系统路由协议等;E-mail: duwenzhen@ict.ac.cn
③ 通讯作者,E-mail: lcui@ict.ac.cn
(收稿日期:2016-01-21)

最优网关以保证传感网系统整体能耗最优是一个具有实际意义的问题。本文从保证数据可靠性和降低系统整体能耗出发,研究了采用自供电技术的多网关传感网系统中网关无缝切换机制和最优网关选择算法及其优化,研究结果得到了仿真实验验证。

本文主要贡献包括以下几点:

(1) 针对野外环境太阳能供电传感网系统网关能量供给失效问题,利用历史能量采集信息和实时天气信息,提出了一种无缝切换的网关切换方法,保证了数据传输的连续性和可靠性。

(2) 基于网关剩余工作时间、恢复工作时间、传感节点距离网关的跳数、数据发送速率等因素,设计了最优网关选择算法 EasiGS。

(3) 考虑到传感网系统中传感节点的大规模性以及切换的频繁性,基于 EasiGS,结合具体的实际应用,给出不同参数(数据发送频率、网关恢复时间、节点与候选网关之间的传输距离)下的近似最优算法,减少了计算开销。

(4) 实验验证了近似最优网关选择方法的正确性,并结合具体的参数给出了近似算法优化性能分析。

1 相关研究工作

1.1 网关切换时机选择

对于网关切换时机的选择,现有的研究主要集中在对网关的快速扫描和提高路由性能两个方面。网关的快速扫描主要是为了及时发现可用的网关。文献[9]利用快速同步方法来降低扫描延迟。文献[10,11]在链路层进行快速的可用信道扫描来降低扫描延迟。文献[12,13]提出了一种新的网络架构来降低切换延迟。文献[14]通过提高多跳路由协议的性能来降低路由发现延迟。但以上工作的基本思路都要求网关切换请求由节点发起,并由节点主动查询候选网关。在本文的应用场景中,虽然节点也具备主动查询候选网关信息的功能,但是切换时机由主网关确定,并发起切换通知。这也就意味着可以在主网关失效之前通知节点进行切换,并在主

网关失效之前选定最优的候选网关。文献[12,13]虽然提出了新的网络架构,但是这种网络架构不适用于本文的应用场景。

1.2 网关选择

在网关的选择方面,文献[16]提出的方法由网关发送广播信息,每个节点统计距离网关的跳数,选择跳数最少的网关作为最优切换网关。此方法在最初网络建立的时候可用,但是在网络运行时网关需要频繁切换的情况下,这种由网关发起机制会导致大量广播数据包,影响网络传输的有效载荷和系统整体能耗。

文献[3]考虑延迟、跳数、比特误码率等参数综合计算节点到网关的最小代价,选择代价最小的网关作为候选网关。文献[4]通过代价函数计算路由之间的数据流量,选择的候选网关使得网络总体的数据流量最小。文献[5]基于节点与网关之间的欧式距离和候选网关负载量两个参数,并分别赋予它们适合的权重,从而选择最优网关。文献[6]在选择最优网关时考虑了网络服务质量。以上工作都基于多参数赋权形式设计最优网关选择算法,但其在实际应用场景中存在如下问题:首先,计算参数实时数值需要在节点端发起多次查询,会引起一定的通信和能量开销;其次,网关选择算法计算复杂度相对较高,例如文献[6],其在节点上完全实现的难度很大,另一方面,如果采用由网关实现该算法,则需要发送大量查询数据包。另外,文献[7]将网关剩余工作时间作为网关选择的一个因素,但是未考虑网关可恢复工作的可能。

综合以上网关选择算法,结合实际应用场景,现有的工作则存在以下局限性:首先,现有的工作较少考虑网关失效后恢复的场景,而本文根据实际情况将恢复供电时间作为影响网关选择的一个重要因素,根据网关剩余工作时间、恢复工作时间、节点距离网关的跳数、数据发送速率等参数选择最优网关;其次,在资源受限的节点上通过复杂算法选择最优网关会带来很大的计算开销,不适用于频繁切换网关的场景,本文通过优化方法降低计算开销,从而降低网关的切换开销。

2 采用能量自采集网关的野外环境监测传感网系统概述

2.1 系统架构

系统整体架构和网关结构如图 1 所示,系统中由传感节点(包含路由节点,以下无特殊说明均用节点代表)、网关和服务端组成。其中,网关具有能量自采集功能,其主要组成单元如图 1 中所示,包括:太阳能供电单元、处理单元、气象数据采集单元、任务单元和通信单元。

其中处理单元处理网关计算操作;任务单元管理网关需要完成的任务,并且根据供电单元信息得出剩余工作时间;通信单元负责网关与服务器和节点的通信;太阳能供电单元给网关供电,即在光照充足的情况下,太阳能电池板在供给网关工作电源的同时,为蓄电池充电,在光照不足的情况下,网关由蓄电池供电。正常情况下,蓄电池满电量时一般可供应网关工作 3 到 7 天。在实际的系统中,由于各个网关所承担的数据采集的转发任务量不同,使得每个网关的剩余工作时间不同。气象和天气信息获取单元负责从服务器获取参考的气象信息。

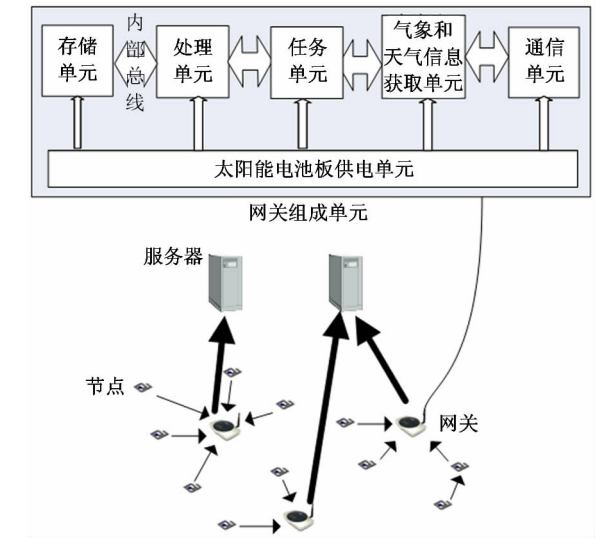


图 1 基于能量自采集网关的传感网系统架构及网关结构图

2.2 网络模型

在环境监测系统中,每个节点通过分层路由算法建立起以各个网关为顶点的层次网络,如图 2 所

示。在本文中用到的主要参数如表 1 所示。其中, $hop(N_{ij}, k)$ 既可事先通过网络建立时将该信息存储在节点本地,也可在进行网关切换时向从属其他网关的节点取得;本文采用两者相结合的方法。 $Lday(i)$ 由网关根据自身剩余电压和工作消耗能量情况计算求得; $Rday$ 由网关根据接收到的气象信息计算而得。利用向服务器端获取到的 7 天内的天气信息,得出网关恢复时间。如果获取到 7 天的气象信息都不能使太阳能板充电,则把网关恢复时间置为最大值 7 天。

在环境监测系统中,每个节点通过建路方案,建立起以各个网关为顶点的层次网络。每个节点选择距离自己最近的网关,在每个节点中存储自己的距离网关的跳数信息 $hop(N_{ij}, i)$ 。如图 2 所示,每个节点记录自身距离网关的跳数信息。

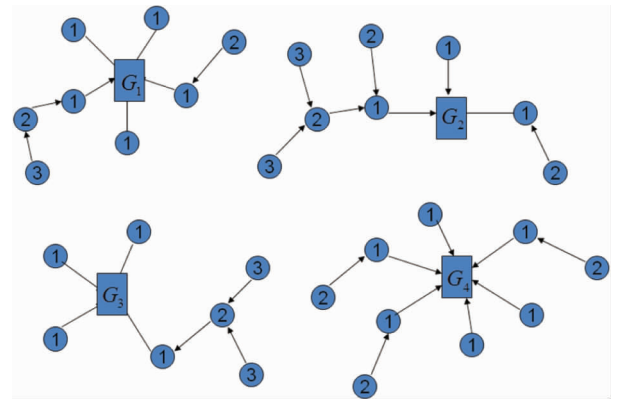


图 2 系统节点层次结构图

表 1 本文用到的参数信息

符号	含义
$G(g_1, g_2, \dots, g_i, \dots)$	传感网网关集合
N_{ij}	从属于网关 g_i 标号为 j 的节点
$hop(N_{ij}, k)$	从属于网关 g_i 的节点到网关 g_k 的跳数
$Lday(i)$	网关 g_i 的剩余工作时间
$Rday$	网关能够恢复工作的时间
R	节点数据发送速率

3 网关切换方法的设计与实现

本节详细介绍网关切换算法的设计和实现。3.1 节介绍根据天气和气象信息网关切换机制。3.2 节介绍了网关选择算法 EasiGS 的详细设计实现和优

化。

3.1 网关无缝切换机制

基于 2.1 节的介绍,网关可从服务器获得当前天气信息,并可以从端获取未来的气象情况。根据这两种信息,提前做出是否需要进行网关切换的判断。

定义 1:太阳能的充电速度为 R_{charge} ,网关的电量消耗速度为 E_{gate} ,在 T 天中网关能够恢复充电的时间为 $Rday$ 。

网关切换需同时满足以下两个条件:

$$R_{\text{charge}} < E_{\text{gate}} \tag{1}$$

$$Lday < Rday \tag{2}$$

式(1)通过网关的电压值变化来判断充电速度是否小于消耗速度(周期性采样网关的电池电压,采样频率根据实际需求在具体应用中设定),如果两次采样所得到的电压值的差为负数则表明充电速度小于消耗速度,反之表明电压值充电速度大于消耗速度。

式(2)通过历史统计的网关的电压与寿命之间的关系来判定。图 3 所示为某个网关的从 1 月 4 号到 1 月 7 号的电压变化曲线,发现当网关电压低于 2.4V 时它已不能正常工作。读取当前网关电压值,然后对照下图得出距离电压 2.4V 剩余工作时间,即 $Lday$ (由于网关存在充电因素,所以实际网关的剩余工作时间要大于 $Lday$,所以需要周期性地更新 $Lday$)。

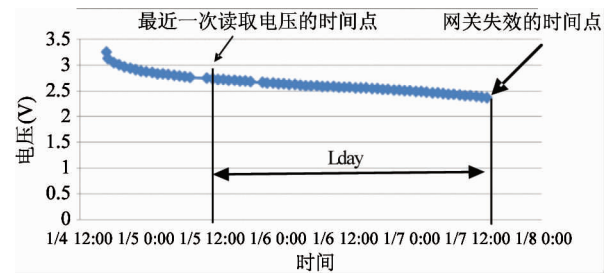


图 3 网关电压变化示意图

考虑到在实际应用场景中,根据历史气象数据^[17]统计,持续阴雨天的时间很少超过 7 天,因此 $Rday < 7$ 。根据图 1 中所示的气象和天气信息获取单元得到的数据预计出 $Rday$ 。由于一年不同时期

电池的一次充电工作时间会出现差别,所以网关根据所工作的时期动态调整。例如未来 $T = 7$ 天的气象信息如表 2 所示,当天分时段气象信息如表 3 所示。

表 2 未来 7 天气象信息^①

时间	0	1	2	3	4	5	6
天气	晴	晴	多云	阴	阴转晴	晴转阴	多云

表 3 当天分时段天气信息^①

时间	5 时	8 时	11 时	14 时	17 时	20 时
天气	晴	阴	晴	多云	晴	晴

根据表 2 和表 3,分别把描述天气的情况进行形式化定义,具体如表 4 所示。表 3 中根据不同季节白天日照时间来调整采集的分时段天气信息。

表 4 气象形式化定义

天气	晴	阴(雨,雪)	多云(阴转多云等)
定义(Level)	0	1	2

定义 2: T_1, T_2, T_3 , 分别为 Level = 1, 2, 3 时,即晴、阴和多云,天气的持续天数。 T_{21} 为多云天气时 (Level = 2), 晴天 (Level = 1) 的小时数。

$$Rday = T_1 + T_{21}$$

网关切换流程如图 4 所示。当需要切换算法的时候,网关用广播包向所在网络节点发送切换网关消息,切换消息通过层次网络直到传送到叶子节点,节点收到切换消息后会向上层节点发送确认消息。

3.2 网关选择算法 EasiGS

在传感网网关发出切换网关命令之后,从属于该网关的节点需要选择切换的网关,选择网关的目标是使网络整体消耗的能量最少。

3.2.1 输入参数

节点收到切换网关命令之后,首先建立一个候选网关信息列表,列表信息包括 $hop(N_{ij}, k)$, $Lday(k)$,

^① 数据来源: [http://www. weather. com. cn/weather/101010100. shtml](http://www.weather.com.cn/weather/101010100.shtml)

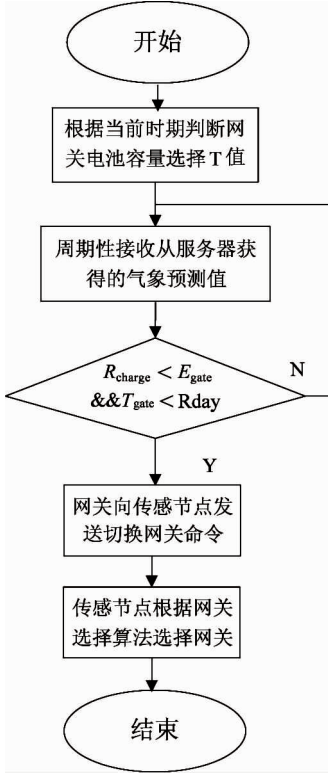


图4 网关切换流程图

以及 $Rday$; 然后根据 $hop(N_{ij}, k)$ 、 $Lday(k)$ 和 $Rday$ 计算最优候选网关。需要指出的是,按照设计目标应该选用传输数据所经过的各节点的能量之和为指标之一来选择网关。考虑在实际场景中,每个节点的发送功率一致,该能量指标可近似视为与跳数参数具有一致的分布,即传输数据能耗最低的路径就是跳数最少的路径。因此,本文采用 $hop(N_{ij}, k)$ 来作为一个指标。

3.2.2 算法设计

EasiGS 算法是为每个节点能够快速选择最优网关而设计的,优化目标是总跳数最少。总跳数包括正常数据传输的跳数和进行最优网关选择时查询数据包所经过的跳数。网关选择的过程如算法 1 所示。

算法 1 网关选择算法. EasiGS

Input: $N_{ij}[k]$, $Rday$, $CalGW$, $Ld = 0$; $k = 1, 2, \dots, N, k \neq i$;

Output: g_t ;

```

1  FOR  $k = 1, 2, \dots, N, k \neq i$ 
2  IF  $Rday \leq N_{ij}[k].Lday(k)$ 

```

```

3       $N_{ij}[k]$  放入集合  $AHop$  中
4      对集合  $AHop$  中按  $N_{ij}[k].hop(N_{ij}, k)$  从小到大排序
5  ELSE
6       $N_{ij}[k]$  放入集合  $IHop$  中
7      对集合  $IHop$  中按  $N_{ij}[k].hop(N_{ij}, k)$  从小到大排序
8  END IF
9  END FOR
10 IF  $AHop = \emptyset$ 
11     IF  $N_{ij}[k] \in IHop$ 
12          $t \leftarrow \arg \max_k (N_{ij}[k].Lday(k))$ 
13         return  $g_t$ 
14     END IF
15 ELSE IF  $IHop = \emptyset$ 
16     IF  $N_{ij}[k] \in AHop$ 
17          $t \leftarrow \arg \min_k (N_{ij}[k].hop(N_{ij}, k))$ 
18         return  $g_t$ 
19     END IF
20 ELSE
21     IF  $\min(AHop.Hop) \leq \min(IHop.Hop)$ 
22         IF  $N_{ij}[k] \in AHop$ 
23              $t \leftarrow \arg \min_k (N_{ij}[k].hop(N_{ij}, k))$ 
24             return  $g_t$ 
25         END IF
26     ELSE
27         FOR  $N_{ij}[k].hop(N_{ij}, k) \in IHop.Hop \geq \min(AHop.Hop)$ 
28              $IHop \leftarrow IHop - N_{ij}[k]$ 
29         END FOR
30         FOR  $N_{ij}[k] \in IHop$ 
31             IF  $Ld \geq N_{ij}[k].Lday(k)$ 
32                  $IHop \leftarrow IHop - N_{ij}[k]$ 
33             END IF
34              $Ld \leftarrow N_{ij}[k].Lday(k)$ 
35         END FOR
36         FOR  $N_{ij}[k] \in (IHop \cup \{N_{ij}[m]\})$ 
37             where  $N_{ij}[m] \in AHop$  and  $N_{ij}[m].hop(N_{ij}, m) = \min(AHop.Hop)$ 
38              $N_{ij}[k]$  放入集合  $CalGW$ 
39         END FOR
40     END IF
41 END IF

```

算法 1 中输入变量 $N_{ij}[k]$ 是一个结构体, 包含 3 个成员变量 $hop(N_{ij}, k)$ 、 $Lday(k)$ 和 $EHop$ 。 $EHop$ 是算法 2 中计算出来代表总的跳数代价; 在算法 1 中 Ld 是用来临时存储跳数信息的一个变量。考虑到节点的资源受限, 为了减少每个节点的计算量, 在进行最优网关选择之前, 先对候选网关进行筛选, 仅对筛选出来的网关进行总的跳数计算。筛选的基本原则是在保证总的跳数少的前提下, 尽可能选择剩余工作时间长的网关。算法 1 的第 1 行到第 9 行把网关分为两类, 一类是网关剩余工作时间大于网关恢复时间的 ($AHop$); 另一类是网关剩余工作时间小于网关恢复时间的 ($IHop$)。本文优先选择剩余工作时间长且距离网关跳数少的节点, 所以对这两类网关进行筛选, 筛选的方法是把剩余工作时间相对较短并且距离节点跳数较多的网关从集合中去掉 (第 10 行到第 19 行)。筛选之后的候选网关满足以下性质: 剩余工作时间越长的候选网关, 节点距离该网关的跳数越多。

最终把节点可选的候选网关剩余工作时间情况分为以下三类:

(1) 候选网关的剩余工作时间大于网关恢复工作时间 (第 15 行到第 19 行), 节点直接选择距离跳数最少网关即可 (第 15 到第 19 行), 因为在此种情况下每一个候选网关的寿命都能满足任务的能量需求, 选择跳数最少的候选网关就是最优的网关。

(2) 候选网关的剩余工作时间都小于网关恢复工作时间 (第 10 行到第 14 行)。如果多网关比较后再切换, 会在原本很短的剩余工作时间内进行冗余的查询操作。为此, 在以下两种方案中选择一个作为网关切换方案: 一种是直接选择剩余工作时间最长的候选网关 (第 10 行到第 14 行); 另一种是先选择剩余工作时间较短的网关然后再切换到剩余工作时间最长的候选网关 (性能参见实验部分的分析)。具体采用哪种方案与节点的数据发送频率、候选网关最少跳数等参数相关, 本文在实验部分进行了详细的讨论。

(3) 候选网关的剩余工作时间既有大于网关恢复工作时间又有小于网关恢复时间的 (第 20 行到第 40 行)。此时, 在大于网关恢复时间的候选网关

中选择跳数最少的一个网关, 再和小于网关恢复时间的网关组合起来, 计算在网关恢复工作时间内各种方案的跳数代价, 最终, 通过比较选择最优的方案。

3.2.3 网关选择算法的优化

在上一小节中, 对于筛选后的候选网关分为三类, 其中, 情况 (1) 无需进行计算, 直接选择距离跳数最少的候选网关即为最优的方案; 情况 (2) 和情况 (3) 则需要对不同方案进行总跳数计算, 然后从中选择总跳数最少的方案。在本节中, 针对情况 (2) 和情况 (3), 结合实际应用的系统, 提出了一种近似最优的低时间复杂度候选网关选择算法。

为了便于计算, 在算法 1 中假设 $d_1, d_2, \dots, d_n$ 分别代表已经进行筛选过的候选网关剩余工作时间, 且是从小到大排列; $h_1, h_2, \dots, h_n$ 分别代表相应的节点到该网关的跳数; 节点产生数据的速率用 R 表示; 网关恢复工作时间用 t_r 表示; 则对于 $d_i (1 \leq i \leq n)$ 和 $h_i (1 \leq i \leq n)$ 存在以下性质:

性质 1: 对于 $i > j, 1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq n$;

则 $d_i > d_j$, 且 $h_i > h_j$ 。

下面针对情况 (2) 和情况 (3) 分别进行分析, 提出近似最优的候选网关选择方案。

在候选网关剩余工作时间低于网关恢复时间的情况下, 则对于筛选后的候选网关除了满足性质 1 还满足性质 2。

性质 2: 对于 $1 \leq i \leq n$;

则 $d_i < t_r$ 。

此种情况下, 由算法 1 可得, 对于直接选择最大剩余时间和先选择跳数相对较少然后再切换剩余时间最长方案, 在 d_n 时间内节点传送的总跳数分别为:

当 $1 \leq i < n$;

$$hop_i = C_{initial} + d_i h_i R + (d_n - d_i) h_n R + \sum_{j=i+1}^n C_j + \alpha_i \quad (3)$$

当 $i = n$ 时;

$$hop_i = C_{initial} + d_i h_i R + \alpha_i \quad (4)$$

其中 α_i 为冗余跳数, 即查询候选网关或者切换网关的时候传输失败或者数据丢失重传等因素造成的额外跳数; $C_{initial}$ 为初始化情况下对所有符合条件的候

选网关进行查找和查询候选网关信息的总跳数; C_i 为查询候选网关 G_i 的总跳数,在本文中 C_i 取为 $4h_i$ 。

如上所示,式(3)减去式(4)可得:

$$\begin{aligned} \text{hop}_i - \text{hop}_n &= d_i R(h_i - h_n) + \sum_{j=i+1}^n C_j + \alpha_i - \alpha_n \\ 1 \leq i < n \quad (5) \end{aligned}$$

在式(5)中 $\alpha_i - \alpha_n$ 在实际计算中可以忽略不计。所以式(5)可以简化为:

$$\begin{aligned} \text{hop}_i - \text{hop}_n &= d_i R(h_i - h_n) + 4h_n \\ 1 \leq i < n \quad (6) \end{aligned}$$

结合实际情况,在本文网关选择算法中假设 h_i 取值范围是4到15; d_i 不低于10h;当 h_i 在4到15之间随机分布的情况下,可得出以下推论:

推论 1: 当 $R > 2$ 的情况下, $\text{hop}_i (1 \leq i < n)$ 小于 hop_n 的概率不低于66%。

证明:

(1) 取 d_i 等于10, R 等于2,则式(6)可以转化为:

$$\begin{aligned} f(h_i, h_n) &= \text{hop}_i - \text{hop}_n \\ &= 20(h_i - h_n) + 4h_n = 4(5h_i - 4h_n) \end{aligned}$$

因此该问题可转化为:在 $4 \leq h_i < 15, 4 < h_n \leq 15, h_i - h_n < 0$ 的情况下,求 $5h_i - 4h_n < 0$ 的概率;根据概率论的知识,可容易的求得 $5h_i - 4h_n < 0$ 的概率为66.11%;

(2) 式(6)中 $h_i - h_n < 0$, 所以随着 d_i 和 R 的增加,式(6)是递减的,也就是 $\text{hop}_i (1 \leq i < n)$ 小于 hop_n 的概率是递增的。

综合(1)和(2)结果可知,推论1得证。

根据推论1应用概率统计原理,计算不同方案的概率,可得出如下结论:在候选网关剩余工作时间都不是很长的情况下,为了避免频繁的切换,可以选择一个剩余工作时间最长的网关;或先选择跳数最少的网关再切换到剩余工作时间最长的网关。

在候选网关剩余工作时间同时存在低于恢复时间和高于恢复时间的情况下,则对于筛选后的候选网关除了满足性质1外还满足性质3。

性质 3: 对于 $1 \leq i < n$,

则 $d_n > t_r$, 且 $d_i < t_r$ 。

此时节点选择直接切换到剩余工作时间大于恢复时间的网关,也可在剩余工作时间小于网关恢复时间的网关中选择一个后再切换到剩余工作时间大于恢复时长的网关。

下面的式(7)是节点在选择剩余工作时间低于恢复时间的网关 G_k , 然后再切换剩余工作时间大于恢复时间的网关 G_m 的总跳数代价。由于不同选择方案初始查询跳数代价都相同,所以为了计算方便,这部分的跳数代价没有计入到初始跳数代价中。

$$\begin{aligned} \text{hop}_k &= (N_{ij}[k].\text{hop}(N_{ij}, k) \times Lday(k)) \times R \\ &+ 4 \sum_{p=k}^m N_{ij}[p].\text{hop}(N_{ij}, p) \\ &+ (N_{ij}[m].\text{hop}(N_{ij}, m) \\ &\times (Rday - Lday(k))) \quad (7) \end{aligned}$$

算法 2. 计算最优网关算法.

Input: $CalGW$;

Output: g_i ;

```

42  FOR  $N_{ij}[k] \in CalGW$ 
43      IF  $N_{ij}[k].Lday(k) \geq Rday$ 
44           $N_{ij}[k].EHop \leftarrow (N_{ij}[k].\text{hop}(N_{ij}, k) * Rday)$ 
45           $m \leftarrow k$ 
46      END IF
47  END FOR
48  FOR  $N_{ij}[k] \in CalGW$ 
49      IF  $N_{ij}[k].Lday(k) < Rday$ 
50           $N_{ij}[k].EHop \leftarrow \text{hop}_k$ 
51      END IF
52  END FOR
53   $t \leftarrow \arg \min_k (N_{ij}[k].EHop)$ 
54  return  $g_i$ 

```

根据算法2可得,对于先选择剩余工作时间为 $d_i (1 \leq i < n)$ 的网关总跳数 hop_i 为:

$$\begin{aligned} \text{hop}_i &= C_{initial} + d_i h_i R + (t_r - d_i) h_n R + \sum_{j=i+1}^n C_j \\ &+ \alpha_i \quad (8) \end{aligned}$$

选择剩余工作时间为 d_n 的网关总跳数为

$$\text{hop}_n = C_{initial} + t_r h_n R + \alpha_n \quad (9)$$

由式(8)减去式(9)可得

$$\text{hop}_i - \text{hop}_n = d_i R(h_i - h_n) + 4 \sum_{j=i+1}^n h_j \quad (10)$$

推论 2:当 $R > 3, d_i > 15$ 且候选网关个数不超过 5 个的情况下, $hop_i (1 \leq i < n)$ 小于 hop_n 的概率不低于 56%。

证明:

(1)取 d_i 等于 15, R 等于 3, 则

$$\begin{aligned} hop_i - hop_n &= d_i R (h_i - h_n) + 4 \sum_{j=i+1}^n h_j \\ &= 45 (h_i - h_n) + 4 \sum_{j=i+1}^n h_j \\ &\leq 45 (h_i - h_n) + 4 (n - i) h_n \\ &\leq 45 (h_i - h_n) + 12 h_n \\ &= 45 h_i - 33 h_n \end{aligned}$$

因此该问题可转化为:在 $4 \leq h_i < 15, 4 < h_n \leq 15, h_i - h_n < 0$ 的情况下, 求 $45 h_i - 33 h_n < 0$ 的概率; 根据概率论的知识, 易得 $45 h_i - 33 h_n < 0$ 的概率为 56% ;

(2)式(10)中 $h_i - h_n < 0$, 所以随着 d_i 和 R 的增加, 式(10)是递减的, 也就是 $hop_i (1 \leq i < n)$ 小于 hop_n 的概率是递增的。

综合(1)和(2)结果可知, 推论 2 得证。

在本文的第 4 部分, 将针对具体的参数取值区间, 基于统计的结果给出参考性的方案选择。

4 系统实验与性能分析

本节通过仿真实验分析本文提出的网关选择算法 EasiGS 的性能。一方面验证本文提出的网关选择算法能够使得节点选择最优的网关; 另一方面分析不同最少跳数、网关数量和发送频率场景下的网络性能, 并根据这些统计结果给出如何选择相应的最优网关选择方案的参考性结论。

本文采用 Matlab 做为仿真实验工具, 设定的候选网关最多跳数不超过 15 跳, 剩余工作时长不低于 10h。本实验根据上节中网关选择算法优化部分进行验证, 根据上节中的推论, 本文分别针对以下两种情况进行验证: 一是候选网关剩余工作时间低于恢复时间, 二是候选网关剩余工作时间同时存在低于恢复时间和高于恢复时间。

4.1 候选网关剩余工作时间低于恢复时间

在本节中把直接切换到剩余时间最长网关的方

案定义为方案一; 把先切换到跳数最少的网关再切换到剩余时间最长的网关定义为方案二。

在本实验中, N 表示候选网关个数, H 表示节点距离候选网关最少跳数, R 表示数据产生频率, D 表示一天时间内节点产生的总跳数。 $Thop_1$ 表示节点选择方案一的总跳数, $Thop_2$ 表示节点选择方案二的总跳数。

在实际应用场景下, 综合考虑成本等因素, 系统中会部署尽可能少的网关, 节点可选的候选网关十分有限。 本文的实验场景选取的候选网关上限为 5 个, 已经足够覆盖实际应用场景。 实验场景将 R_{day} 设定为 120h, 通过不同的 R , 分别统计 N 分别为 2、3、4、5 和 H 为 4 到 9 的情况下, 比较方案一和方案二产生的最少跳数的次数。 如果方案一比方案二产生的最少跳数少, 则方案一优于方案二。 实验进行 10000 次, R 分别设定为 0.5、1、2 次/h, 实验结果分别如图 5 ~ 图 7 所示。

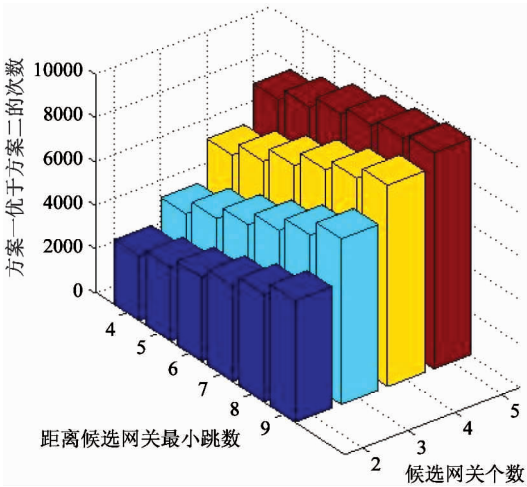


图 5 方案一最优的次数与 H 和 N 的关系 ($R = 0.5$)

如图 5 可得, 在 R 为 0.5、 N 为 5 的情况下, 进行的 10000 次实验中, 即使在方案二优于方案一的情况下, 在本实验中统计 $Thop_1 - Thop_2 > D$ 的次数如下表 5 所示。

在 $Thop_1 - Thop_2 \leq D$ 的情况下, 方案一和方案二的差别不大, 所以根据图 5 和表 5 可得出结论: 在 R 为 0.5 且 N 为 5 的情况下, 方案一不落后于方案二的概率超过 80%, 在此种情况下, 直接选择方案一。

表 5 方案一比方案二产生的总跳数相差大于 D 统计(在进行 10000 次实验,方案一优于方案二的情况下)

$N \backslash H$	4	5	6	7	8	9
5	1948	1435	935	523	254	79

如图 6 可得,在 R 为 1 的情况下,进行的 10000 次实验中,方案一和方案二两种方案产生最少跳数的次数不相上下,所以在此种情况下需要分别进行计算来选择最优的方案。

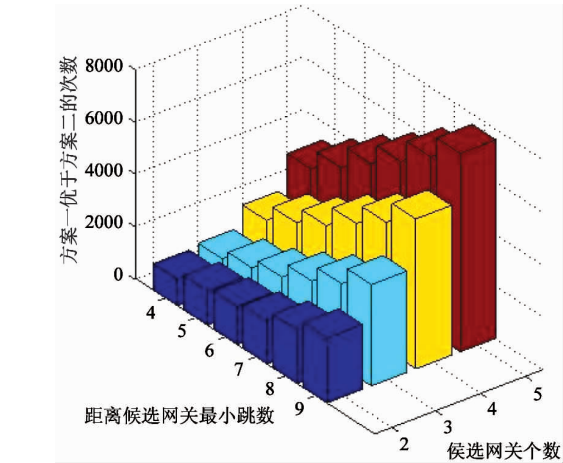


图 6 方案一最优的次数与 H 和 N 的关系 ($R = 1$)

如图 7 所示,在 R 为 2 的情况下,进行的 10000 次实验中,方案一优于方案二的次数不超过 3000 次,即 R 为 2 的情况下,有超过 70% 的概率方案二优于方案一;即使在方案一优于方案二的情况下,根据结果统计, $Thop_2 - Thop_1 > D$ 的次数分别如表 6 所示:

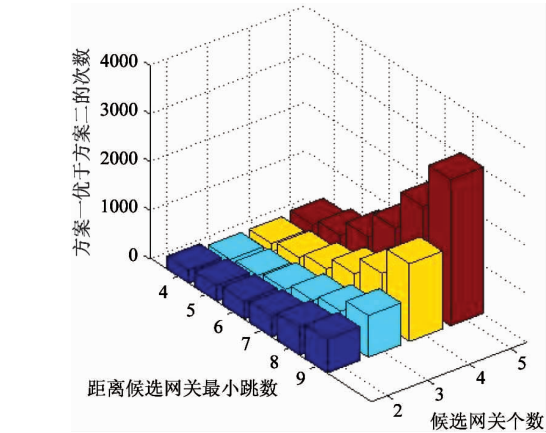


图 7 方案一最优的次数与 H 和 N 的关系 ($R = 2$)

表 6 方案二比方案一产生的总跳数相差大于 D 统计(在进行 10000 次实验,方案二优于方案一的情况下)

$N \backslash H$	2	3	4	5
4	0	17	20	37
5	0	18	35	69
6	0	15	51	140
7	0	33	89	275
8	0	51	168	560
9	0	80	286	1336

根据图 7 和表 6 可得出结论:在 R 为 2 的情况下,方案一不落后于方案二的概率超过 85%,在此种参数情况下,可以无需计算直接选择方案一。

除了上述实验,还进行了实验验证在候选网关个数一定的情况下,随着数据发送速率的提高,两种方案产出的最少跳数次数的变化趋势,如图 8 所示。

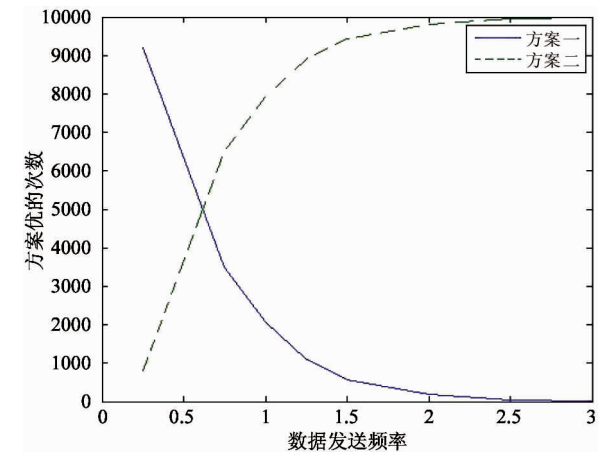


图 8 方案一和方案二的优的次数随着 R 的变化趋势 ($R_{day} = 120$)

图 9 的实验是在候选网关个数一定的情况下,随着候选网关 R_{day} 的增加,两种方案产出的最少跳数次数的变化趋势。

从图 8 和图 9 可得,随着 R 和 R_{day} 的增大,方案二优于方案一的次数会增加。如果不采用此方法,首先要对所有候选方案分别进行计算,然后对计算结果进行排序,选择跳数最少的方案。如果从单个节点进行一次计算考虑,不采用优化方法的计算量非常小,但是实际应用场景中存在着大量的节点,

并且需要比较频繁的切换,这种情况下产生的计算代价就变成一个值得考虑的因素。再者,在 R 大于 2,且在一定的恢复时间内的情况下,即可采用优化方案进行选择。大多数应用场景中, R 不会低于 2 次,所以在多数情况下,优化方案都适用。

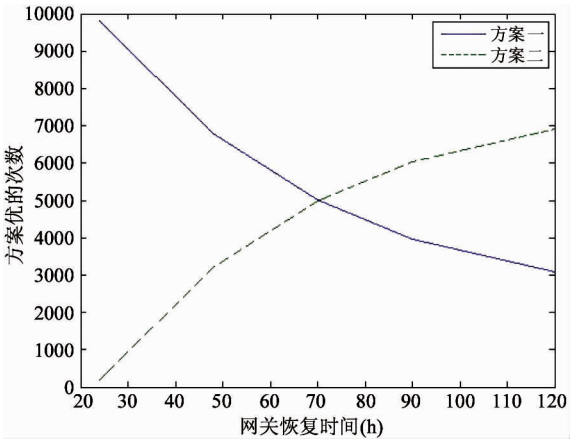


图 9 方案一和方案二的优的次数随着 R_{day} 的变化趋势 ($R=2$)

4.2 候选网关剩余工作时间同时存在低于恢复时间和高于恢复时间

在本节中把候选网关按照跳数从小到大排序,假设有 N 个网关,则候选网关的编号依次为 1 到 N ; 方案 M 代表节点先选择网关 $M(1 \leq M < N)$ 再选择网关 N ; 方案 N 就是节点直接选择网关 N 。结合实际,部署的网关数目有限。对于 N 为 2 的情况,参照 4.1 节的结论。本实验针对筛选后 N 为 3 和 4 的情况分别进行实验分析,实验结果分别如图 10 和图 11 所示。

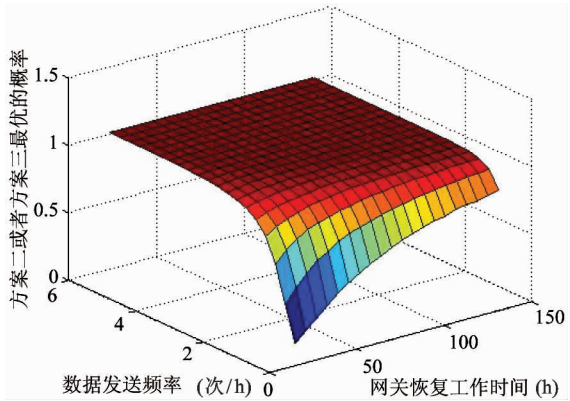


图 10 方案二或方案三的最优的概率与 R 和 R_{day} 的关系 ($N=3$)

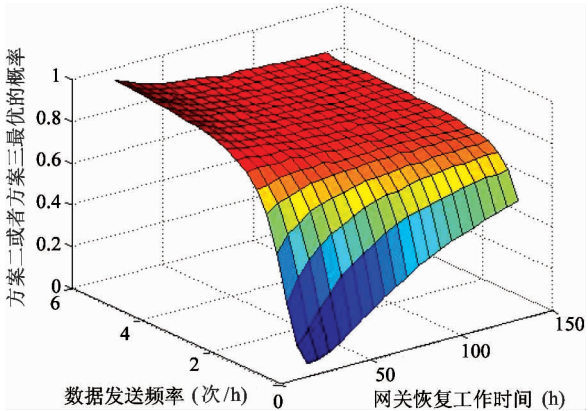


图 11 方案二或方案三的最优的概率与 R 和 R_{day} 的关系 ($N=4$)

如图 10 所示,在 N 为 3 且 R 大于 2 的时候,方案二或者方案三基本上都能以 100% 的比率产生最小跳数,所以在此种情况下,只需在方案二和方案三中进行计算选择最优网关,而无需计算和比较方案一。

如图 11 所示,在 N 为 2 且 R 大于 4 的时候,方案二或者方案三以高于 75% 的概率产生最小距离,所以在此种情况下,只需在方案二和方案三中进行计算选择最优网关,而无需计算和比较方案一和方案四。

类似的结论可以在具有更多候选网关的情况下得到,在这里不再赘述。基于以上实验结论,既可以保证节点总体发送跳数最少,又可以保证节点较高的概率选择最优的网关进行切换。从整个网络来看,尤其是节点数量较多和切换较频繁的场景中,本文算法可以有效地降低系统的整体能量开销。

5 结 论

采用野外环境太阳能供电传感网系统受到越来越广泛的应用。本文从保证数据可靠性和降低系统整体能耗的角度出发,研究了在采用自供电技术的多网关传感网系统中,网关无缝切换机制和最优网关选择算法及其优化方法。本文提出并证明了计算复杂度的近似最优方案,实验结果表明, EasiGS 算法能使系统获得最优的整体能耗性能。

未来的研究工作将进一步考虑结合路由协议实

现,在整体能耗最低的条件下如何提高整个网络接入网关的公平性,并在实际系统中^[1]验证近似最优网关选择算法的性能。

参考文献

- [1] Zhang L, Zhao Z, Li D, et al. Wildlife monitoring using heterogeneous wireless sensor networks . *Ad hoc & Sensor Wireless Networks*, 2013, 18(3-4): 159-179
- [2] Li D, Zhao Z, Cui L, et al. A cyber physical networking system for monitoring and cleaning up blue-green algae blooms with agile sensor and actuator control mechanism on Lake Tai. In: Proceedings of the 1st International Workshop on Cyber-Physical Networking Systems in Conjunction with INFOCOM 2011, Shanghai, China, 2011
- [3] Ghassemian M, Hofmann P, Friderikos V, et al. An optimised gateway selection mechanism for wireless ad hoc networks connected to the Internet. In: Proceedings of the IEEE 63rd Vehicular Technology Conference, Melbourne, Australia, 2006, 2. 782-787
- [4] Tajima S, Higashinoz T, Funabikiy N, et al. An Internet gateway access-point selection problem for wireless infrastructure mesh networks. In: Proceedings of the 7th International Conference on Mobile Data Management, Nara, Japan, 2006. 112-112
- [5] Ammari H, El-Rewini H. Using hybrid selection schemes to support QoS when providing multihop wireless Internet access to mobile ad hoc networks. In: Proceedings of the 1st International Conference on Quality of Service in Heterogeneous Wired/Wireless Networks (QSHINE), Dallas, USA, 2004. 148-155
- [6] Park B N, Lee W, Lee C, et al. QoS-aware adaptive Internet gateway selection in ad hoc wireless Internet access networks. In: Proceedings of the 3rd International Conference on Broadband Communications, Networks and Systems, San José, USA, 2006. 1-10
- [7] Setiawan F P, Bouk S H, Sasase I. An optimum multiple metrics gateway selection mechanism in MANET and infrastructured networks integration. In: Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Las Vegas, USA, 2008. 2229-2234
- [8] Narayan D G, Sugnani K, Raichur A, et al. A cross layer routing metric for gateway aware routing in wireless mesh network. In: Proceedings of the 2013 4th International Conference on Computing, Communications and Networking Technologies, Tiruchengode, India, 2013. 1-6
- [9] Ramani I, Savage S. SyncScan: practical fast handoff for 802.11 infrastructure networks. In: Proceedings of the 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, Miami, USA, 2005, 1. 675-684
- [10] Wu H, Tan K, Zhang Y, et al. Proactive scan: Fast handoff with smart triggers for 802.11 wireless LAN. In: Proceedings of the 26th IEEE International Conference on Computer Communications, Anchorage, USA, 2007. 749-757
- [11] Shin M, Mishra A, Arbaugh W A. Improving the latency of 802.11 hand-offs using neighbor graphs. In: Proceedings of the 2nd International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services, Boston, USA, 2004. 70-83
- [12] Amir Y, Danilov C, Hilsdale M, et al. Fast handoff for seamless wireless mesh networks. In: Proceedings of the 4th International Conference on Mobile Systems, Applications and Services (MobiSys), Uppsala, Sweden, 2006. 83-95
- [13] Zhao W, Xie J. IMeX: Intergateway cross-layer handoffs in Internet-based infrastructure wireless mesh networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2012, 11(10): 1585-1600
- [14] Speicher S. OLSR-FastSync: fast post-handoff route discovery in wireless mesh networks. In: Proceedings of the 64th Vehicular Technology Conference, Melbourne, Australia, 2006. 1-5
- [15] Liu J, Chung S H. An efficient load balancing scheme for multi-gateways in wireless mesh networks. *Journal of Information Processing Systems*, 2013, 9(3): 365-378
- [16] Domingo M C. Integration of ad hoc networks with fixed networks using an adaptive gateway discovery protocol. In: Proceedings of the 2nd IET International Conference on Intelligent Environments, 2006. 371-379
- [17] 气象信息查询. <http://www.cma.gov.cn/2011qxfw/2011qsjcx>: 中国气象局, 2011

Research on a gateway switching mechanism based on gateway's energy-harvesting for wireless sensor networks

Du Wenzhen, Chen Haiming, Li Dong, Cui Li

(Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

Abstract

To address the problem of insufficient energy supply of the solar-powered gateway in field wireless sensor network system due to weather variations, a multi-gateway switching method based on historically collected energy information and real-time weather information was studied. Firstly, which gateways need to switch and when to switch were determined based on the weather information. Secondly, a gateway selection algorithm, called EasiGS, was presented to make nodes proactively choose the appropriate gateway as the accessing gateway based on the remaining work time of the gateway, so as to avoid data loss and to achieve reduced overall energy consumption of the system. Finally, the computational overhead of the gateway selection algorithm was further optimized according to the rate of data transmission, the time for the gateway to recover to work, the hops of shortest path between the candidate gateway and the node. The simulation results show that the EasiGS can achieve optimal overall power consumption of the system. The optimized EasiGS can effectively reduce the amount of computation required by the nodes.

Key words: environment monitoring, solar powered gateway, gateway switch method, gateway selection algorithm, time to restore energy, probability statistics