

# 利用传感器距离和能耗约束的无线传感器网络路由优化

李欣, 徐亮

(新疆工程学院 计算机工程系, 乌鲁木齐 830000)

**摘要:** 针对大多数现有的无线传感器网络设计方法通常仅找到给定图的最短路径而导致能耗较高的问题, 提出了一种寻找节点之间的最短路径和最低能耗的路由优化模型; 该模型约束 WSN 的特定资源, 考虑多种约束条件: 多周期、最短距离和低能耗; 根据混合整数线性规划, 使用 11.0 ILOG CPLEX 优化引擎的 ILOG OPL 开发工具 5.5 进行编码和求解本文的优化模型; 实验结果表明, 在 3 个不同周期和约束条件下, 每组实验中文章模型花费的时间均少于 10 s, 完全满足资源有限的无线网络应用要求; 相比其他几种较新的路由优化模型, 文章模型在节能和端到端延迟方面取得了更好的性能。

**关键词:** 无线传感器网络; 最优路径; 路由优化; 混合整数线性规划; 能耗约束

## A Routing Optimization Model of WSN Based on Constraint of Sensor Distance and Energy Cost

Li Xin, Xu Liang

(Department of Computer Engineering, Xinjiang Engineering College, Urumqi 830000, China)

**Abstract:** As the problem of the single user to optimize cased of the most existing wireless sensor network designs which usually cause the high energy consumption, a route optimization model to find the shortest path between nodes and to make energy lowest is proposed. This model is bound to a particular resource of WSN, and considers a variety of constraints: multi-cycle, the shortest distance and low energy consumption. According to the mixed integer linear program, 11.0 ILOG CPLEX optimization engine in ILOG OPL Development Tools 5.5 is used for encoding and solving optimization model in this paper, experimental results show that the time spent in each group experiments were less than 10 s under three different cycles several conditions and constraints, and fully meet the limited resources of the wireless network applications. It has better performance than several other advanced routing optimization models on energy conservation and the end-to-end delay.

**Keywords:** wireless sensor network (WSN); optimal path; routing optimization; mixed integer linear program; constraint of energy cost

## 0 引言

近年, 无线传感器网络 (wireless sensor network, WSN)<sup>[1-2]</sup> 已在许多领域得到广泛应用。由于传感器节点的能量有限, 感知和计算操作, 同时传输和接收数据会消耗更多能量<sup>[3]</sup>。因此, 在网络中节约能量的同时并将路由响应返回给基站是最佳选择<sup>[4]</sup>。文献 [5] 提出一种基于能量衡定向扩散的移动 Agent 路由算法 (EBDDMA), 保证最小端到端的传输延迟, 平衡网络能耗, 延长网络生存期。然而, 该算法的约束条件只有一个, 且寻找的给定图的最短路径。

本文提出了一种寻找节点之间的最短路径和最低能耗的路由优化模型, 该模型约束 WSN 的特定资源, 考虑多种约束条件: 多周期、最短距离和低能耗, 按照混合整数线性规划<sup>[6]</sup>求解 WSN 路由优化模型。

## 1 网络模型

由于传感器可利用能源有限和技术的局限性, 无线电信号无法到达很远方<sup>[7]</sup>。因此, 每个传感器是在睡眠模式下待命, 这样可以减少能源消耗。当一个事件发生时, 传感器进入唤醒模式, 接收信息。然后它搜索其它传感器发送的信息并将信息发送给基站 (Sink 节点)<sup>[8]</sup>, 如图 1 所示。

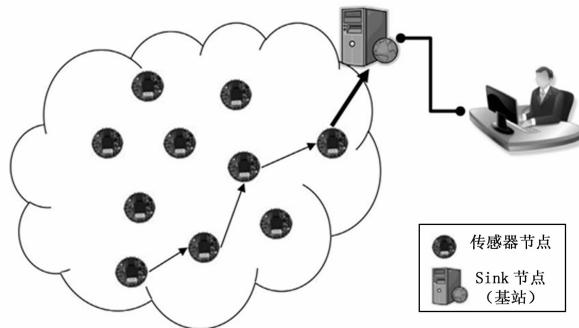


图 1 无线传感器网络的框架

收稿日期: 2015-03-12; 修回日期: 2015-05-07。

基金项目: 新疆维吾尔自治区自然科学基金项目 (2013211A031); 新疆工程学院基金资助项目 (2014030415)。

作者简介: 李欣 (1982-), 男, 硕士, 讲师, 主要从事传感器网络、路由优化设计等方向的研究。

WSN 模型有几个要求, 它有一些传感器节点和一个基站

节点。源传感器信息必须能到达基站节点。本文假设基站节点从传感器节点收集数据的整个过程中基站节点的位置不改。还假设传感器节点知道自己的地理坐标。每个传感器都有资源约束（关于能源和连接的距离），但是基站节点没有能量约束<sup>[9]</sup>。图 2 所示为数学模型中使用的符号。

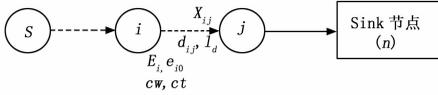


图 2 符号的图式化

## 2 WSN 路由优化模型设计

首先，寻找没有给定图时两个节点之间的最短路径的可能范围，当传感器与其它传感器连接时，以恒定速率消耗能量。因此，考虑待机模式和信息传输时节点的能耗，假设所有传感器的能量最初一样多，传感器传输数据的能耗与传感器之间的距离成正比。本文考虑两种类型的资源限制，使用距离和能量。所用数学符号如表 1 所示。

表 1 数学符号

索引	
$i, j, k$	节点序列 ( $i, j, k = 1, 2, \dots, N$ )
$N$	节点数量 ( $i, j, k \in N$ )
$s$	源节点序列
$n$	基站节点序列
参数	
(1) 距离	
$d_{ij}$	$i, j \in N$ , 节点 $i$ 到节点 $j$ 的距离
$ld$	最大连接距离 (常数)
(2) 能量	
$e_{i0}$	$i \in N, (e_{i0} > 0)$ , 节点 $i$ 的初始能量
$cw$	唤醒节点的能耗 (常数)
$ct$	传输能耗比率 (常数)
决策变量	
$X_{ij}$	如果节点 $i$ 和 $j$ 连接, 值为 1; 否则, 为 0, $i, j \in N$
$E_i$	节点 $i$ 的能量, $i \in N$

根据如下混合整数线性规划 (MILP) 计算:

$$\min \sum_{i \in N, i \neq n} e_{i0} - \sum_{i \in N, i \neq n} E_i \quad (1)$$

约束条件:

$$\sum_{i \in N, i \neq k} X_{ik} - \sum_{j \in N, j \neq k} X_{kj} = 0, \quad \text{all } k \in N, k \neq s, k \neq n \quad (2)$$

$$X_{ij} + X_{ji} \leq 1, \text{all } i, j \in N, i \neq j \quad (3)$$

$$\sum_{j \in N, j \neq s} X_{sj} = 1 \quad (4)$$

$$\sum_{i \in N, i \neq n} X_{in} = 1, \text{all } j \in N \quad (5)$$

$$d_{ij} \cdot X_{ij} \leq ld, \text{all } i, j \in N, i \neq j \quad (6)$$

$$E_i - e_{i0} + cw \cdot \sum_{j \in N, i \neq j} X_{ij} + ct \cdot \sum_{j \in N, i \neq j} d_{ij} \cdot X_{ij} = 0 \quad (7)$$

$$X_{ij} \in \{0, 1\}, \quad \text{all } i, j \in N \quad (8)$$

$$E_i > 0, \text{all } i \in N \quad (9)$$

其中: 目标函数 (1) 是激活后的节点能耗总和最小化, 式 (2) 为流量守恒约束, 即从节点  $i$  到节点  $k$  的总流量等于从节点  $k$  到节点  $j$  的总流量, 除了源节点  $s$  和基站节点  $n$  外。式 (3) 是消除了子路径的条件约束。式 (4) 和式 (5) 表明, 流量必须从源节点  $s$  流出和流入基站节点  $n$ 。式 (6) 限制节点间的连接距离。式 (7) 定义节点的剩余能量, 一个节点的剩余能量等于节点初始能量减去激活节点能耗和链接节点相关联的传输能耗。式 (8) 确保决策变量  $X_{ij}$  值为 0 或 1。式 (9) 确保决策变量  $E_i$  为非负值。

## 3 试验与分析

### 3.1 数据集及实验设置

为了评估设计的 WSN 数学模型的性能, 在大规模网络上进行模拟。传感器节点的距离数据是从 VRPTW 基准问题<sup>[10]</sup> 的 100 个客户数据中提取。基准数据集包含 6 个不同子集:  $R1, R2, RC1, RC2, C1$  和  $C2$ 。客户随机分布在  $R1$  和  $R2$ , 而在  $C1$  和  $C2$  聚合。对  $RC2$  和  $RC1$ , 聚合和随机分布是混合在一起。因为  $x$  和  $y$  坐标轴中每种类型的问题相同, 所以使用基准数据库的  $C1, R1$  和  $RC1$  类型问题。在所有例子中, 基站节点位于中心, 测试问题需要不同参数, 对应  $C1, R1$  和  $RC1$  的周期 ( $T$ ) 数分别为 5, 10, 15。同样地, 距离限制 ( $ld$ ) 是 5 (10), 15 和 30。本文使用  $R1$  和  $RC1$  是因为这些类型中节点间的距离小于 5 的节点很少。传感器的初始化能量  $e_{i0}$  分别为 10, 20 和 30。在本实验中, 本文必须求解总共 2 700 个问题。因此, 随机选择 10 个源节点且在给定周期数量  $T$  的前提下分析 270 个问题。表 2 显示了测试问题的变量数和约束条件数。

表 2 测试问题中变量和约束条件数量比较

周期数 ( $T$ )	变量数	约束条件数
	$C1/R1/RC1$	$C1/R1/RC1$
5	51 506	102 510
10	103 011	205 020
15	154 516	307 530

### 3.2 计算结果

表 3 显示了测试问题的结果, 从表中可以看出, 所有问题的计算时间均小于 10 s。根据约束距离的大小, 目标函数值不同, 随着约束距离的减少, 目标函数值增加。这种结果表明在严格约束条件下, 下一个节点的选择范围会变小而且一些节点将必须给基站传递信息。实验结果还显示当时间周期数量增加时, 与约束距离 15 和 30 相关的目标函数值明显不同, 这意味着在距离为 15 内存在许多节点。对于问题类型, 实验显示  $R1$  (随机) 类型和  $C1$  (聚合) 与  $RC1$  (随机与聚合) 类型相比目标函数值较小, 这意味着源节点或者基站节点包含在其它聚合中。图 3、图 4、图 5 分别为周期为 5、10、15 时的平均目标函数值。

从图 3 至图 5 可以看出,  $RC1$  有最大目标函数值且在 5 个时期和 10 个时期结果差异较大。因此, 本文认为随着周期数

表 3 计算实验结果比较

周期数 (T)	约束距离 (d)	目标函数值								
		C1			R1			RC1		
		平均值	最小	最大	平均值	最小	最大	平均值	最小	最大
5	5(10)	47.9	30.00	51.50	31.13	12.35	48.76	35.88	23.65	55.66
	15	41.40	23.50	45.00	30.51	12.35	47.10	53.08	25.04	64.99
	30	41.40	23.50	45.00	34.13	12.35	47.10	52.17	25.04	64.99
10	5(10)	73.14	52.38	87.30	62.92	24.69	97.53	71.76	47.31	111.33
	15	79.62	50.08	88.97	60.64	24.69	93.72	105.90	50.08	132.02
	30	79.45	50.08	88.97	63.65	24.69	93.72	104.58	50.08	132.02
15	5(10)	109.70	78.58	130.95	101.60	37.04	143.94	195.89	112.85	261.52
	15	121.04	75.12	125.84	100.10	37.04	141.30	160.78	94.15	198.03
	30	103.8	70.96	128.84	105.38	37.04	141.30	158.31	75.12	198.03

量增加, C1 的目标函数值和 R1 目标函数值之间的差异会逐渐减少, 然而 R1 和 RC1 的目标函数值会逐渐增大。最后, 随着约束距离的增加, C1 和 R1 目标函数值的差异会逐渐降低, 然而 R1 和 RC1 目标函数值的差异会逐渐增大。

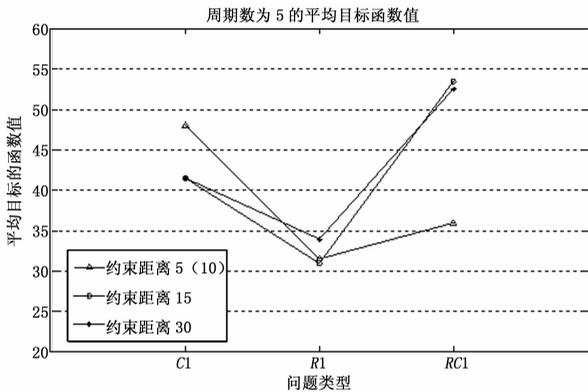


图 3 周期数为 5 的平均目标函数值

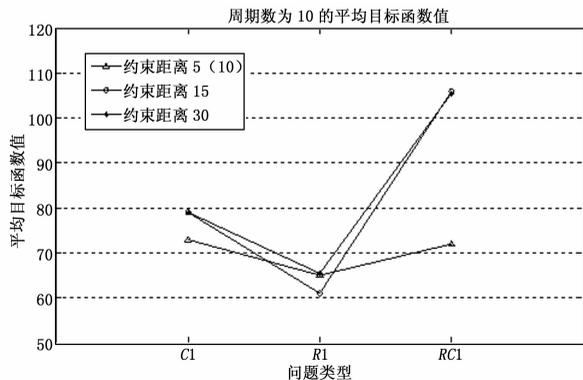


图 4 周期数为 10 的平均目标函数值

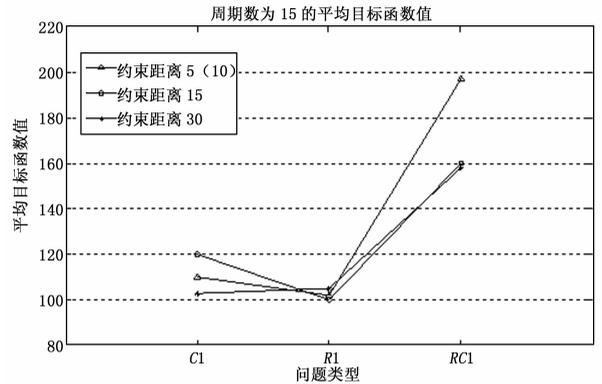


图 5 周期数为 15 的平均目标函数值

型较现有方案更加节能。

### 3.3.2 延迟比较

表 5 是延迟性能结果, 从表中可以看出, 本文模型比文献

表 4 节能对比

时间/s	剩余能量/J			
	文献[4]	文献[9]	文献[5]	本文模型
0	100	100	100	100
10	94	96	98	99
25	92	93	95	96
50	86	89	92	95
75	80	86	88	92
100	70	84	87	91

[4] 方案减少了 1 ms 的延迟, 通过考虑多种约束条件, 每个节点的能量损失会减少, 从而可以减少每个节点的延迟, 比较结果足以表明本文模型的优越性。

表 5 延迟对比

时间/s	延迟/ms			
	文献[4]	文献[9]	文献[5]	本文模型
0	0	0	0	0
10	0.342	0.16	0.35	0.20
25	0.819	0.23	0.72	0.21
50	1.251	0.33	0.82	0.22
75	1.342	0.54	0.76	0.44
100	1.444	0.65	1.12	0.49

## 3.3 比较及分析

### 3.3.1 节能比较

将本文模型的节能性能与文献 [4-5]、[9] 提出的模型进行比较, 比较结果如表 4 所示。

由表 4 可知, 在计算的初始阶段, 所有方案具有相同的能量, 即 100 焦耳 (最大能量)。随着计算时间的增加, 节点剩余能量的百分比减少。计算结束时, 较文献 [4] 方案, 本文模型节省 21% 能量; 较文献 [9] 方案, 本文模型节省 7% 能量; 较文献 [5] 方案, 本文模型节省 4% 能量, 因此本文模

桥电机驱动芯片，该芯片的输入电压从 2.7~10.8 V，最大驱动电流可达到 2 A<sup>[9]</sup>。相比 L298 电机驱动芯片，体积非常小。采用电机驱动的主要目的是方便的控制探头移动，检测金属物。电机驱动电路如图 8 所示；其中 P21、P22、P23、P24 接 MSP430G2553 的 P21、P22、P23、P24，做为输入端控制电机的转速和方向；OUT1 和 OUT2 为一组输出，OUT3 和 OUT4 为另一组输出，共可连接两路直流电机。

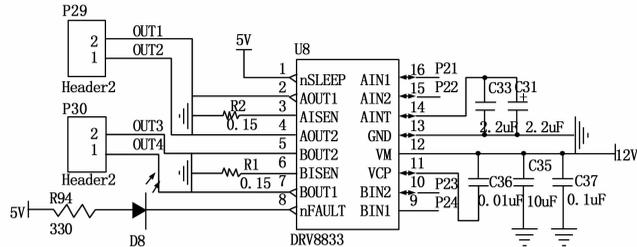


图 8 DRV8833 电机驱动电路

### 3 测试结果

等效并联电阻  $R_p$  表示的就是涡流损耗，并且与涡流损耗成反比。 $R_p$  越大，涡流损耗越小； $R_p$  越小，涡流损耗越大。回顾前面介绍的  $R_p$  与 code 之间的关系， $R_p$  决定信号采集的上下限。也可通过实验看出这个检查范围对检测精度的影响<sup>[10]</sup>。实验说明：金属物跟 LDC1000 的线圈固定一个距离用于参照。设定一个  $R_p\_Min$  值，将金属物远离，读 code 的值 (0x21 和 0x22 寄存器) 并平均，记为 min，然后将金属物放到固定位置，读 code 的值并平均记为 max。然后更换一个  $R_p\_Min$  值，继续实验，可得如下数据：

表 1 实验测试结果

$R_p\_Min(k\Omega)$	1.8	2.4	3.0	4.4	5.4	
min	3670	4740	6230	9135	11950	金属物远离探头
max	3710	4828	6376	9320	12230	金属物靠近探头
差值	40	88	146	185	280	涡流损耗

差值结合测试数据，适当增大  $R_p\_Min$  的值，可使得测

(上接第 2591 页)

### 4 结语

本文提出了一种无线网络传感器模型，该模型同时考虑了多个约束条件：多周期、最短距离和低能耗。随着周期数量增加，聚合差异会逐渐减少，随着约束距离的增加，随机差异会逐渐降低。数值实例和计算实验验证了该模型的有效性。

尽管数学模型的计算不会花费大量的时间，但大规模 WSN 可能需要更多的时间。因此，未来将开发一种现代启发式模型，使得计算时间降低到合理水平。

#### 参考文献：

[1] 范松博, 张永胜, 孙泽宇. 无线传感器网络中分簇路由由优化算法 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22 (2): 493-498.  
 [2] Salami O, Bagula A, Anthony Chan H. Framework for link reliability in inter-working multi-hop wireless networks [J]. Mathematical and Computer Modelling, 2011, 53 (11): 2219-2228.  
 [3] 车 楠. 无线传感器网络环境中节点布置问题研究 [D]. 哈尔滨:

量值 max 和 min 的差值加大，如果有金属物在该范围内，可清楚的测得距离与 code 值几乎成正比例<sup>[11]</sup>，因此可方便的探测到金属物体的位置、距离、旋转角度等。

### 4 结论

本文提出了一种新型电感数字传感器的设计，通过超低功耗 MSP430G2553 做为主控，以 TI 最新推出世界首款电感到数字转换器 LDC1000 做为探头，通过 SPI 接口实现高速数据采集，达到降低功耗、减小体积、数字接口的目的，使得数据处理更方便快捷。试验结果表明：该装置对金属物的检测快速、可靠、精度高、方便安装。可应用在灰尘、污垢、油和潮湿等恶劣环境中。

#### 参考文献：

[1] TI. LDC1000 电感数字转换器 [Z]. 上海, 2014, 21-23.  
 [2] 傅 强, 杨 艳. LaunchPad 口袋实验平台 [Z]. 德州仪器半导体公司, 2013, 99-102.  
 [3] 郭 玉, 李彦梅, 王 鹏. 基于电涡流传感器的硬币辨伪系统的设计 [J]. 传感技术学报, 2012, 25 (4): 557-560.  
 [4] TI. LDC1000 Evaluation Module User's Guide [Z]. American, 2014, 17-18.  
 [5] 石延平, 刘成文, 倪立学. 基于非晶态合金的动态轨道衡压磁电感式应力传感器的研究 [J]. 传感技术学报, 2009, 22 (12): 1704-1708.  
 [6] 鲍内豪, 蒋 峰, 赵 湛, 等. 基于非晶带巨磁阻抗效应的新型弱磁场传感器 [J]. 传感技术学报, 2006, 19 (6): 2380-2383.  
 [7] 解 源, 钱俊岳. 基于非晶态合金的磁场传感器的研究 [J]. 电测与仪表, 2006, 43 (2): 59-61.  
 [8] 方东明, 赵小林, 王西宁, 等. 射频螺线管微电感的设计和仿真, 传感技术学报 [J]. 2006, 19 (5): 1878-1880.  
 [9] 沈建华, 杨艳琴, 等. MSP430 系列 16 位超低功耗单片机原理与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.  
 [10] 王 鹏, 秦道渝, 丁天怀, 等. 微小电感平面线圈的信号检测技术研究 [J]. 传感技术学报, 2007, 20 (10): 2333-2336.  
 [11] 谢维达, 许 菁, 邵德荣. 基于电感式传感器的非接触测速定位方法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2004, 12 (1): 38-41.  
 哈尔滨工业大学, 2012.  
 [4] 苏金树, 郭文忠, 余朝龙, 等. 负载均衡感知的无线传感器网络容错分簇算法 [J]. 计算机学报, 2014, 37 (2): 445-456.  
 [5] Khuller S, Purohit M, Sarpatwar K K. Analyzing the Optimal Neighborhood: Algorithms for Budgeted and Partial Connected Dominating Set Problems [C]. SODA, 2014, 43 (27): 1702-1713.  
 [6] Eom H Y, Melikov A. Approximation Method for QoS Analysis of Wireless Cellular Networks with Impatient Calls [J]. IEMS, 2010, 9 (4): 339-347.  
 [7] Samadian R, Noorhosseini S M. Probabilistic support vector machine localization in wireless sensor networks [J]. ETRI Journal, 2011, 33 (6): 924-934.  
 [8] 李 睿, 李晋国, 陈 浩. 两层传感器网络中安全分类协议研究 [J]. 通信学报, 2015, 36 (2): 57-64.  
 [9] 顾云丽, 徐 昕, 侯荣涛, 等. 基于移动 Sink 的无线传感器网络任播路由协议 [J]. 计算机科学, 2013, 27 (12): 578-584.  
 [10] VRPTW Benchmark Problems [EB/OL]. <http://web.cba.neu.edu/~msolomon/problems.htm>, 2012.