

一种传感器网络的分布式多播路由优化算法

刘 军* 程良伦 王建华
(广东工业大学自动化学院 广州 510006)

摘 要: 传感器感知的信息需要通过网络传送给感兴趣目标节点, 传统网络中的多播技术往往能耗高、实时性不够理想, 不利于在传感器网络中使用。针对 WSN 中节点对网络拓扑未知, 该文先将多播路由问题演化为最优多播路径问题, 通过启发式算法求解分布式最优路径, 并通过一种基于贪婪思想的裁剪合并策略优化多播路由树, 直至整个网络得到最优路径, 最后并结合了节点区域集中以及无线多播特性, 提出了 DCast 路由算法。最后通过仿真实验与 uCast, SenCast 等经典的传感器网络的多播路由算法仿真比较, 可以得出其算法在时延性以及能耗等方面性能有优势。

关键词: 传感器网络; 多播路由; 分布式; NP 难问题; 贪婪算法; 裁剪合并策略

中图分类号: TP393.04

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2013)10-2328-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2013.00056

Distributed Multicast Routing Optimal Algorithm in Sensor Networks

Liu Jun Cheng Liang-lun Wang Jian-hua

(School of Automation Guangdong University of Technology Guangzhou 510006, China)

Abstract: Information of sensor percept are send to interested target node through sensor network. The multicast technology in traditional networks are usually more energy consumption, worse real-time. It is not fitted in sensor network. For nodes is unknown of network topology, multicast routing issue is converted to the optimal multicast path issue firstly, and it is solved through the heuristic algorithm. The multicast routing tree is optimized through cutting merger strategy with greedy, the optimal path is got in the entire network. Finally, combined with the node area concentration and wireless multicast characteristics, a routing algorithm, named DCast, is proposed. Finally, simulation results demonstrate the advantages of energy consumption and delay compared with other classic multicast routing algorithm such as uCast, SenCast.

Key words: Sensor network; Multicast routing; Distributed; NP-hard problem; Greedy algorithm; Cutting merger strategy

1 引言

多播(multicast)是指一种由一个源节点同时向多个目的节点发送数据的通信方式。传统的多播主要应用多媒体信息传输, 如视频会议、远程教育等。近年来, 随着物联网、传感器网络的兴起, 多播路由以其能效高代价少的特点使得在资源受限的自组网中的优势日益凸显, 且应用逐渐广泛。多播方法在传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSN)中“一对多”场景中的应用可以大幅减少传感器节点的能量消耗和传输时延, 从而延长传感器节点的生命时间^[1-3]。而构建高效的多播路由是该类应用的

前提条件。本文的主要目的就是在资源受限的无线自组网中构建高效多播树, 为多播路由的应用提供理论基础。

近年来, 许多学者从启发式算法以及进化算法等方面对多播路由问题进行了广泛研究。文献[4]在经典MPH算法基础上, 设计了一种基于Dijkstra的DCMPH算法, 用于构造时延约束最小代价组播树。文献[5]提出一种双域模型的人工鱼群算法寻优, 通过前驱编码来完成多播树到人工鱼的映射, 利用不可行解的优化来提供求解质量。文献[6]提出一种改进的免疫算法来求解时延受限的多播路由。文献[7]利用粒子群算法优化Ad hoc网络的最小能耗多播路由算法性能。文献[8]的研究表明不可能满足路径和费用同时最小的要求, 必须在二者之间权衡折中。然而以上研究大多是针对Internet的多播路由, 不适宜于传感器网络。

2013-01-15 收到, 2013-04-09 改回

国家自然科学基金(60673132), 广东省重大科技专项(2009A080207008)和国家自然科学基金广东联合基金重点项目(U1201251)资助课题

*通信作者: 刘军 liujun7700@163.com

针对传感器网络设计的经典的分布式多播树算法是uCast^[9],将目的节点信息编码至数据包头中,路由选择是通过一种打分机制来判断离目标节点的远近,选择分数最高的作为下一跳中继节点。其本质是一局部贪婪算法,但没有兼顾网络代价能耗时延的关系,且主要应用于小规模的多播场景。传感器网络的周期性的休眠机制可以减少能耗,但是也使其多播问题更加复杂。oCast^[10]是针对这种调度机制研究多播路由协议,通过目标节点的调度时隙合理选择中继节点来优化多播路由协议。文献[11]用组件化的思想将传感器网络的多播问题抽象为最小非页节点问题,通过一种最优Steiner树(边加权)算法,求取最优多播树并证明其近似率接近于 $\ln|R|$ 。文献[12]提出了一种DLEMA的多播算法,基于Dijkstra算法,其主要是针对地理组播,求解的是最短路径。文献[13]提出一种虚拟路径来构建最短多播树。通过上面分析,现有的多播路由研究^[3,13-16]较少考虑在传感器网络环境中路由特性,存在链路不可靠性,有时延约束,而仅简单认为最短路径和即为最优多播树,假设过于理想。本文针对上述问题,提出一种仅依靠本地信息的分布式多播路由算法。

本文组织结构如下:第2节对问题描述,并抽象出数学模型,设定网络拓扑结构模型;第3节详叙了针对前面数学模型的算法设计;第4节针对前面提出的算法,对其性能及特点进行分析;第5节以网络时延性和能耗作为主要技术指标,通过仿真算例,分析该方法的性能;最后是结束语。

2 问题模型

在实际应用中,由于无线链路在通信传播过程中具有非常大的不确定性,节点之间是以概率连通的。通过预期传输次数的预期值作为通信次数是比较合理的,我们以前向和反向的传达率来衡量通信链路质量^[17]。

依据图论知识,无线传感器网络可抽象为一个无向带权图 $G(V, E)$,其中 V 是顶点集合(感知节点), E 为边集合(通信链路)。模型为 G 中存在一源节点 s 和目的节点集合 $D=\{v_i\}, i=1,2,\dots,m$,其中 v_i 为各目的节点,多播路由为 $T(s, D)$ 。

本文中采用文献[8]中的定义,多播路由树优化被认为在时延函数满足约束条件下,使树的能耗代价尽可能小。其数学表示为

$$\left. \begin{aligned} \min P(T) &= \sum_{(x,y) \in E_T} w(x,y) \\ \text{s.t. } D_{p_s-d_i} &\leq \Delta \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

3 算法设计

在本节中考虑通过启发式算法来解决上一节提出的问题,即在时延约束条件下使得整个多播树的能耗最小化,设计一种基于分布式的多播路由算法DCast(Distributed multiCast)。

3.1 算法基本思想

在多播树构建时首先需要寻找目标节点,在本文中假设目标节点位置以及网络拓扑结构未知,因此第1步是需要探测寻找目标节点,并找到源节点到目标节点的路由。通过启发式算法在解空间搜索最优解时效率较低,因此如果在做解空间搜索时先预知最优解下限,则可以排除更多不可行解,就可以大大提高算法效率,减少搜索时间。优化之前先判断各目的节点的最优路径,即时延最短的路径,若不满足时延条件,则返回;若满足,这些路径构造的多播树就是多播优化的时延下限,然后对本多播树做优化处理,合并路径,减少能耗。

对于多目标节点的确定以及最优路径的选择需要通过改进的蚁群算法去寻找。通过蚁群来寻找目标节点,并找出时延最短路径,这些路径累加和就是多播树的下限。通过蚁群算法寻找到各目标节点时延最短路径,网络拓扑如图1所示。

每个目的节点的最小路径的上时延约束为 Δ 。这样构成了多播路由的优化的下限,若某个节点的路径不满足时延约束条件,则该多播树无法建立。在求得多播树优化的下限后,下一步就是对多播树进行优化,使得在满足各目的节点时延约束的条件下使得整个网络多播树能耗最小。

3.2 裁剪合并路径策略

在得知最小多播树解的下限后,我们采用一种贪婪的策略对该多播树进行裁剪合并,使得整个多

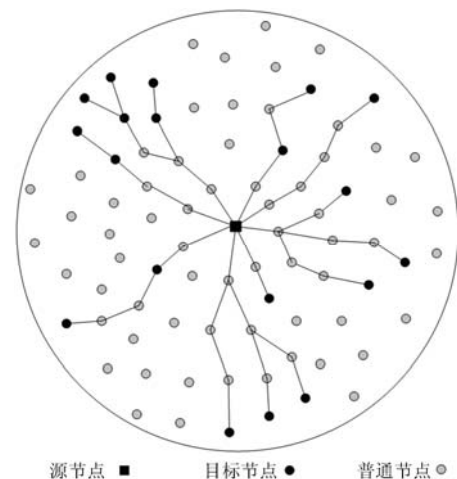


图1 最短多播树生成示意图

播树能耗代价最低。在满足各个目的节点路径的时延约束下，合并各个目的节点的路径，这样减少整个多播树的路径，从而减少能耗代价。从目的节点集合 D 中，选出路径长度最大的目的节点 d_i ，然后以该目的节点的最短路由作为基准路径，将附近的目标节点加入到该路径中。基准路径上的各个路由中继节点定义为 $r_{d_i}^j$ 。其中 $0 < j < l_{d_i}^{\max}$ 。具体方法：选出一条最长的路径作为主干路径。以源节点后的中继节点为搜索源节点，基准路径上的各个路由中继节点定义为 $r_{d_i}^j$ 。其中 $0 < j < l_{d_i}^{\max}$ 。通过蚁群算法搜索周围的目的节点。其路径时延约束小于 $\Delta - \sum_{i=0}^i d_{d_j}^i$ ，若搜索到目标节点，并优于当前路由代价则合并路径，修改其目的节点的路径。这样从中继节点依次搜索，逐步优化。该图可以解释通过蚁群算法，在各个中继路由节点中依次选择时，不断缩短路径，使得最后整个路径变得优化。图2显示，通过蚁群算法，由中继节点开始对各个目标节点的路径优化合并，通过场景1,2,3的演化，路径渐渐合并，达到优化多播树的目的。

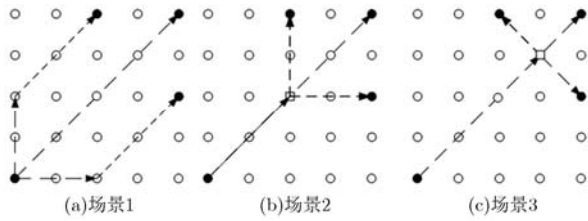


图2 多播路由并裁剪策略示意图

算法伪代码如表1所示。

3.3 算法步骤分析

步骤 1 通过蚁群算法，寻找各个目的节点，找出最短路径 $P_{d_i-\min}$ ，并计算每个目标节点的最短路径长度 $L_{d_i-\min}$ 。

步骤 2 找出能够构成节点簇的所有节点形成节点簇。每个目标节点在自己2跳范围内进行探测，选出周围度数大于1的“星”节点以及通过两跳能够连接的节点，让每一个“星”节点和其上的目标节点组成一个节点簇，直到找出所有的节点簇为止，并合并最短路径长度，满足时延代价要求。

图3中两类不同的多播树，总的长度都为6跳。但是图3(b)中，利用了无线传播特性，因此其实际代价为4，因此得出在目的节点的上一跳的选择不同，而导致路由代价不同。这种无线传播独有的偷听和广播效应可以大大减少多播树路径长度，从而减少时延和代价，因此在多播树构建时要考虑利用这种无线特性。

表1 算法伪代码

```

Input:  $s$  source nodes, nodes set  $D, v_i \in D$ , the goal nodes
         number  $m$ , the minimum delay tree  $T_{\min}^d$ 
Output: Optimal Multicast Tree  $T_o$ 
1  $T_o \leftarrow \emptyset$ 
2 while  $D \neq 0$  do
3  $P_{\max\text{-path}} \leftarrow \text{SearchLongestPath}(T_{\min}^d)$ 
4  $T_o \leftarrow d_{P_{\max\text{-path}}}$ 
5 for  $i \leftarrow 1$  to  $\text{Long}(P_{\max\text{-path}})$  do
6  $D_N \leftarrow \text{ACO}(r_i, \Delta - \text{delay}_{r_i})$ ,
7 for  $j \leftarrow 1$  to  $\text{Num}(D_N)$  do
8 if  $D_{d_n^j - r_i} + D_{r_i} < \Delta$  then
9 if  $P_{r_j - i} < P_{r_j}$  then
10  $T_o \leftarrow d_n^j$ 
11  $D \leftarrow D - d_n^j$ 
end if
12 end if
13  $j++$ 
14  $i++$ 
15 end if
16 return  $T_o$ 
    
```

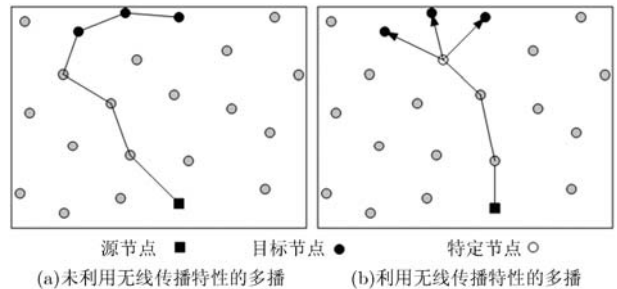


图3 两类不同多播树的比较

步骤 3 采用前面的裁剪合并路径策略来优化多播路由树。寻找到各个最优路径后，进行裁剪合并，此时需要综合考虑前面提出的时延，能耗代价，完成之后将这些节点加入到 $T(s, D)$ 中。

步骤 4 重复步骤3，直到所有目的节点加入到 $T(s, D)$ 中。

如图4可以看到多播树的演化，通过前面描述的裁剪合并策略后，多播路由树大大简化，使得整个网络在满足时延的条件下，能耗最小化。

3.4 多播树维护机制

由于网内其它节点动态退出或失效不会对算法的运行带来太大影响，故算法只需考虑位于多播树上中继节点失效的情况。当中继路由节点退出(或失效)后，目标节点路由将被中断而导致数据包无法送达，因此需要考虑多播树维护机制。主要思

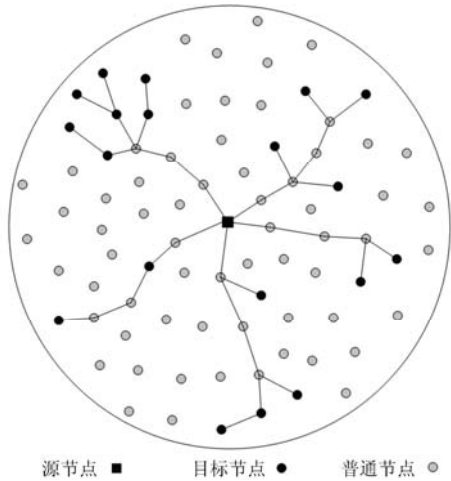


图4 多播路由演化

想为存储考虑备选路由，在初始寻找最优路由时，将路由裁剪合并过程中的次优路径及时报告给源节点记录，一旦当前路径断裂，中继节点通过 Piggyback 的方法^[14]，将消息回报给源节点，重新路由。

当源节点通过所有的路由方法找到其目的节点源节点后仍无法与目标节点握手，或各种路由方式也找不到目标节点及其邻居节点则认定目标节点退出，其未传输完成的数据命令，存储到目标节点附近节点中，当目标节点重新加入后，广播自身信息，邻居节点将命令发送至目标节点并将目标节点加入信息回溯至源节点。

4 算法分析

4.1 裁剪合并路径策略分析

本策略有利于减少多播路由分支树，从而减少路由能耗代价。多播路由由本质为选择最少的中继节点连接源节点和目的节点，因此近似为最小覆盖集问题。最小覆盖集问题是一NP难问题，解决这一问题的最好方法为贪婪算法，贪婪算法已被证明是覆盖集问题的一个多项式时间复杂度 $(1+\ln r)$ ratio近似算法，其中 r 是输入 S 中集合的最大的集的势^[18]。本文提出裁剪合并路由策略也总是选择最短路径合并分支，其本质为一种贪婪策略，因此其近似率也接近贪婪算法的近似率。尽管采用的是一种贪婪策略来最小化路径分支，但是只是从局部最优考虑，不是一种全局最优。事实上寻找全局最优是另一个NP难问题，在图论中为Steiner问题，而传感器网络要保证全局最优，需要权衡代价，时延，能耗的因素，因此比Steiner问题更加复杂^[19]。

4.2 算法正确性证明

由前面的算法描述不难看出，算法首先寻找到

各个目标节点单播路由，然后在其基础上进行优化，因此其算法性能应优于单播路由。

引理 1 算法多播路由能耗代价不大于单播能耗开销。

证明 步骤1中，首先寻找到各个目标节点到源节点的时延最短路径，其构成的树记为 T_0 。该路由之和为单播路径代价，即

$$P(T_0) = \sum_{i=1}^n r_i \quad (2)$$

在步骤2和步骤3时，当路由进行优化时比较能耗有

$$P_{r_{j-i}} < P_{r_j} \quad (3)$$

即保证节点加入到新的多播树的路径能耗必须小于本身直接到目标节点路径能耗。假设该多播树的最大路径上的某一中继节点记 r_t ，则

$$P_{r_s} + P_{r_{j-i}} < P_{r_s} + P_{r_j} \quad (4)$$

因此，当算法不断运行，树的能耗也渐渐减少，优化后的路径小于等于多播路由。则

$$P(T) = \sum_{(x,y) \in E_T} w(x,y) < P(T_0) \quad (5)$$

因此优化后的多播树能耗较低。证毕

引理 2 多播树优化算法不会破坏其时延约束。

证明 在算法的步骤3中，多播树裁剪之前有

$$D_{d_i-r_i} + D_{r_i} < \Delta \quad (6)$$

只有满足时延约束条件时，才进行路由裁剪，因此不会破坏其时延特性。证毕

定理 若满足时延约束的多播树存在，则DCast算法就一定能找到一棵满足时延约束且能耗较小的多播树。

证明 算法首先通过蚁群算法，寻找每个目标节点的能耗最低路由，且满足时延性能作为前提条件，这些路由构成多播树的初始解。由引理1可知，算法的裁剪后多播树能耗降低。由引理2可知，在进行路由裁剪时不会破坏其时延性。因此后面算法的运行不会破坏多播树的约束条件，即生成的树是一颗满足时延约束的低代价多播树。证毕

4.3 算法复杂性分析

算法假设目标节点位置未知，且网络拓扑动态变化，各节点对其它节点位置未知。则算法在初始时通过蚁群算法寻找各目标节点的最短路径，因此先分析蚁群算法复杂性。蚁群算法作为一种源启发式算法，假设 N_c 为迭代次数， n 为网络规模， m 为人工蚁群数量。由于蚁群算法复杂度为 $T(n) = O(N_c \cdot n^2 \cdot m)$ ^[20]，各个目标节点是分布式运行，因此生成的初始多播树的时间复杂度为： $T(n) = O(N_c \cdot n^2 \cdot m)$ 。

在算法时间复杂度的计算中,最关键的是得出算法中最大的执行次数,很容易看出算法中最内层循环体语句往往具有最大的语句频度,在计算过程中主要对它们进行分析和计算。内层循环通过蚁群算法寻找时延范围内的目标节点,且由最大路径的首个中继节点开始寻找,随着中继节点靠近目标节点,允许时延将越小,蚁群搜寻的范围将更小,则其算法复杂度为: $T(n)=O(c \cdot n \cdot \log_2 n) \cdot (N_c \cdot n^2 \cdot m)$ 。 c 为目标节点占网络中节点比例常数。算法复杂度为: $T(n)=n^3 \log_2 n$ 。可以看出,由于其中采用蚁群算法来寻找目标节点,其算法复杂度较大。

5 仿真实验分析

前面讨论了将最小路径问题演化为一个优化问题,最后提出一个启发式算法,本节通过实验评估该算法的性能。主要关注3个方面,能否找到多播路由树,能耗代价等性能如何,不同目的节点部署对算法性能影响。由于分布式传感器网络的多播算法还较少,主要与经典的分布式uCast和SenCast^[9]比较。使用uCast的目的节点布置模型^[9]。

本节中主要使用了NS2和Matlab2007进行了仿真模拟,评估算法的性能。主要从能否找出优化多播树,时延、通信开销、能耗等几个方面指标进行了模拟和实验分析。因此本节比较了SenCast与uCast和DCast延迟性能。

5.1 仿真场景介绍

将DCast与另外两种典型多播路由算法SenCast和uCast比较。SenCast是一个集中式的算法,需要利用全局的网络拓扑信息。其核心思想是,首先用最短路径连接距离Sink最近的目标节点生成一棵多播树,然后再把距离这条路径最近的目标节点也用最短路径连到初始的那棵多播树上,依次迭代,直到所有的目标节点都位于这棵多播树上为止,最后生成的多播树是一棵相当紧凑的多播树。uCast是一种分布式算法,其拓扑动态适应性很好,但是多播通信开销比较大。仿真环境设置如表2所示。

表2 算法仿真环境设置

参数	默认值
MAC层	TDMA
带宽	128 kb/s
报文负载	20 Byte
报文总数	100
总模拟时间	1200 s
节点部署	Uniform Random
半径大小	200 m
传感器节点数目	625
传输半径	10 m
Source 节点坐标	(200, 200)

为了精确地模拟这3个协议的能耗,实验参数的选取是根据Mica2的实际参数设定的:基于CC2420芯片RF上的发送和接收电流分别为18.8 mA和17.4 mA。电压设置为3 V,信道数据发送速率250 kbps,报文头部长度为4 Byte。下面发送100个报文从Source到目标,重复实验10次测量平均能耗(单位为J)和时延(单位为ms)。

由于前面我们分析,目的节点的拓扑结构对多播树效率影响较大。试验中采用文献[9]中的目的节点部署模型。用4个参数表征,分布区域扇形角度 θ ;半径 r ,即源节点到最远节点距离;密度,可以用在节点通信范围内目的节点的个数作为密度;目的节点数目 m 。

5.2 仿真结果分析

另外随着网络半径规模增大,而uCast有更好的能量效率,说明DCast更能适宜大规模网络,uCast能效最低,其对于大规模网络扩展性不够理想,由于SenCast是一种集中式路由算法,能够有比较理想的能效。图5-图8为仿真结果图。

从图5中可以看出随着分布角度的变化,能耗变化,总的能耗DCast最小,而SenCast其次,uCast

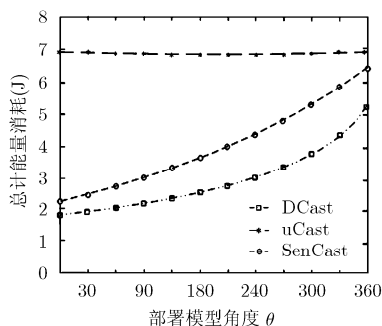


图5 分布角度对能耗的影响

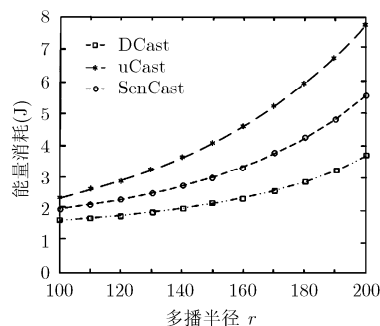


图6 分布半径对能耗的影响

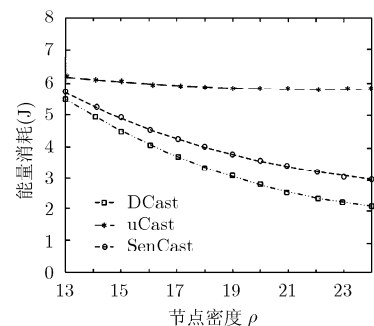


图7 分布密度对能耗的影响

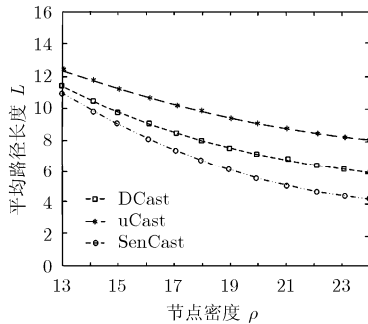


图8 分布密度对平均路径长度的影响

最大，而且随着角度的变化其uCast能耗基本不变，而DCast和SenCast逐渐变大。分析原因是由于SenCast和DCast都利用了无线多播特性，使得目标节点集中时其多播路由可以大大减少，从而能耗减少；而uCast通过一种打分机制来寻找最优路由，对集中目标节点的多播路由无优势。

图6给出了分布半径对能耗的影响，其中DCast能耗较其它二者小，说明其多播树质量更优，且随着网络规模的扩大，仍然具有较好的能效特性。

图7比较了目标节点的密度与能耗关系，随着密度增加，可以发挥无线多播特性的优势，由于SenCast和DCast都利用了组件的思想，使得能效较低。

图8比较了节点密度对目标节点的平均路径的影响，可以看出多播路由随着密度增加而平均路径减小，说明多播路由优于单播。另外uCast, DCast和SenCast平均路径依次降低，这是由于SenCast将网络时抽象为求最小路径，因此我们可以看出尽管其平均路径长度更短，但是其能耗效率并不优于DCast，说明通过路由路径长度衡量路由能耗是不准确的。也证明了前面理论分析的正确。

6 结束语

本文分析了传感器网络中的多播路由模型。针对在传感器网络中，网络拓扑变化，不能得知整个网络拓扑结构，提出通过蚁群算法来探索得知目标节点。然后将网络抽象为在各个目标节点的多播路径满足时延要求下求整个路由树的最低能耗。然后结合启发式的贪婪思想提出了适应于WSN的路由算法，最后通过仿真分析前面提出的算法性能。本文设计的分布式多播算法DCast，其能够自组织路由，体现出良好的时延和能耗性能。实验结果表明，DCast在能量有效性、实时性、可扩展性等方面，优于现有的多播协议，具有较好的实用价值和应用前景。

由于本路由算法是分布式算法，且假设网络拓

扑结构不知，采用蚁群算法来求最优路径，因此其算法时间比起其它算法时间将会大很多，然而在实际中过于理想的假设是不能成立的。下一步工作主要考虑对于算法收敛性的理论深入分析，提供收敛性证明。

参考文献

- [1] Wagenknecht G, Anwander M, and Braun T. SNOMC: an overlay multicast protocol for wireless sensor networks[C]. 9th Annual Conference of Wireless On-demand Network Systems and Services (WONS), Courmayeur, 2012: 75-78.
- [2] Peng S, Li S, Chen L, et al. SenCast: scalable multicast in wireless sensor networks[C]. 22nd IEEE International Symposium on Parallel and Distributed Processing IPDPS, Miami, 2008: 1-9.
- [3] Myounggyu W and Stoleru R. Energy efficient and robust multicast routing for large scale sensor networks[C]. 8th IEEE International Conference of Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob), Barcelona, 2012: 26-33.
- [4] 周灵, 孙亚民. 基于MPH的时延约束Steiner树算法[J]. 计算机研究与发展, 2008, 45(5): 810-816.
Zhou L and Sun Y M. A delay-constrained steiner tree algorithm Using MPH[J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2008, 45(5): 810-816.
- [5] 马炫, 刘庆. 基于人工鱼群算法的多播树演化寻优[J]. 通信学报, 2012, 33(9): 1-7.
Ma X and Liu Q. Evolving multicast tree based artificial fish swarm algorithm[J]. *Journal on Communications*, 2012, 33(9): 1-7.
- [6] 章兢, 王炼红. 基于改进克隆选择算法的时延受限多播路由[J]. 通信学报, 2009, 30(7): 54-58.
Zhang J and Wang L H. Multicast routing with delay constrain based on improved CSA[J]. *Journal on Communications*, 2009, 30(7): 54-58.
- [7] 朱晓建, 沈军. 基于粒子群优化的Ad hoc网络最小能耗多播路由算法[J]. 通信学报, 2012, 33(3): 52-58.
Zhu X J and Sheng J. Minimum energy consumption multicast routing in Ad hoc networks based on particle swarm optimization[J]. *Journal on Communications*, 2012, 33(3): 52-58.
- [8] 孙彦景, 钱建生, 马姗姗, 等. 时延和能耗均衡的强连通支配集构造算法[J]. 通信学报, 2012, 33(5): 58-65.
Sun Y J, Qian J S, Ma S S, et al. Strongly connected dominating set construction algorithm balancing time delay and energy consumption[J]. *Journal on Communications*, 2012, 33(5): 58-65.
- [9] Qing C, Tian H, and Abdelzaher T. uCast: unified connectionless multicast for energy efficient content

- distribution in sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2007, 18(2): 240-250.
- [10] Lu S, Bolin D, Yong Y, *et al.* oCast: optimal multicast routing protocol for wireless sensor networks[C]. 17th IEEE International Conference on Network ICNP, Princeton, 2009: 151-160.
- [11] 彭绍亮. 无线传感器网络中高效传输技术研究[D]. [博士论文], 国防科学技术大学, 2008.
Peng S L. Research on high efficient data delivery in wireless sensor networks[D]. [Ph.D. dissertation], National University of Defense Technology, China, 2008.
- [12] Musznicki B, Tomczak M, and Zwierzykowski P. Dijkstra-based localized multicast routing in wireless sensor networks[C]. 8th International Symposium on Communication Systems, Networks & Digital Signal Processing (CSNDSP), Poznan, 2012: 1-6.
- [13] Hosung P, Jeongcheol L, Soochang P, *et al.* Multicast protocol for real-time data dissemination in wireless sensor networks[J]. *IEEE Communications Letters*, 2011, 15(12): 1291-1293.
- [14] Lixiong C, Xue L, Qixin W, *et al.* A real-time multicast routing scheme for multi-hop switched fieldbuses[C]. Proceedings IEEE of International Conference on Computer Communications, Shanghai, 2011: 3209-3217.
- [15] Feng C H, Zhang Y, Demirkol I, *et al.* Stateless multicast protocol for Ad hoc networks[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2012, 11(2): 240-253.
- [16] Ababneh N, Ortiz A M, Timmons N, *et al.* Energy-efficient multicast tree construction protocol for real-time data streaming in WSNs[C]. 8th IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob), Barcelona, 2012: 26-33.
- [17] Couto D S J D, Aguayo D, Bicket J, *et al.* A high-throughput path metric for multi-hop wireless routing[J]. *Wireless Networks*, 2005, 11(4): 419-434.
- [18] 陆克中, 孙宏元. 无线传感器网络最小覆盖集的贪婪近似算法[J]. 软件学报, 2010, 21(10): 2656-2665.
Lu K Z and Sun H Y. Greedy approximation algorithm of minimum cover set in wireless sensor networks[J]. *Journal of Software*, 2010, 21(10): 2656-2665.
- [19] 张瑾, 丁爱萍, 马良. 度约束欧氏Steiner最小树问题及其求解[J]. 上海理工大学学报, 2008, 30(5): 443-448.
Zhang J, Ding A P, and Ma L. Solving the degree-constrained Euclidean Steiner[J]. *Journal of University of Shanghai for Science and Technology*, 2008, 30(5): 443-448.
- [20] 陈岩. 蚁群优化理论在无人机战术控制中的应用研究[D]. [博士论文], 国防科学技术大学, 2007.
Chen Y. Any optimization theory applied to UAV tactical control problem[D]. [Ph.D. dissertation], National University of Defense Technology, China, 2007.
- 刘 军: 男, 1986年生, 博士生, 研究方向为无线传感器网络、物联网、信息物理融合系统.
- 程良伦: 男, 1964年生, 博士生导师, 教授, 研究方向为无线传感器、物联网、信息物理融合系统.
- 王建华: 男, 1982年生, 博士生, 物联网、传感器网络、事件检测、信息物理融合系统.