

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2017.01.003

引用格式:王柯君,何荣希.无线多媒体传感器网络中一种改进路由算法[J].电讯技术,2017,57(1):14-21.[WANG Kejun, HE Rongxi. An improved routing algorithm for wireless multimedia sensor networks[J]. Telecommunication Engineering, 2017, 57(1):14-21.]

无线多媒体传感器网络中一种改进路由算法*

王柯君,何荣希**

(大连海事大学 信息科学技术学院,辽宁 大连 116026)

摘要:随着网络负载增加,经典的 TPGF(Two-Phase geographic Greedy Forwarding)算法难以找到节点分离路径,会导致网络吞吐量、投递率以及端到端时延性能下降。此外,当网络拓扑变动不大时,TPGF 中每条路径所包含节点要消耗比其他节点更多的能量,会导致其过快死亡,从而影响网络性能。为此,将联合网络编码技术引入 TPGF,提出一种编码与能量感知的 TPGF 路由算法(NE-TPGF)。该算法综合考虑节点的地理位置、编码机会、剩余能量等因素,同时利用联合网络编码技术进一步扩展编码结构,充分利用网络编码优势来建立相对最优的传输路径。仿真结果表明,NE-TPGF 能够增加编码机会,提高网络吞吐量和投递率,降低端到端时延,并且还有利于减少和平衡节点的能量消耗。

关键词:无线多媒体传感器网络;网络编码;路由算法;能量感知

中图分类号:TN915.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2017)01-0014-08

An Improved Routing Algorithm for Wireless Multimedia Sensor Networks

WANG Kejun, HE Rongxi

(College of Information Science and Technology, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: In the case of high network load, it is difficult for the classic TPGF (Two-Phase geographic Greedy Forwarding) to find node-disjoint paths from the source node to the destination node, which will lead to the performance degradation in terms of throughput, packet delivery ratio and end-to-end delay. In addition, when the network topology changes little, the nodes passed through by each path of TPGF consume more energy than other nodes, which results in a shorter lifetime and network performance degradation. Therefore, network joint coding technology is introduced into TPGF to propose a Network-coding and Energy aware TPGF (NE-TPGF) routing algorithm. NE-TPGF jointly considers the location of the nodes, the coding opportunities and the residual energy of the nodes to compute routing path. Moreover, it takes advantage of network joint coding technology to further expand network coding structure and make full use of the advantages of network coding to find near-optimal paths. Simulation results show that NE-TPGF can improve the coding opportunity, throughput and packet delivery ratio and reduce the end-to-end delay and energy consumption per bit while balancing energy consumption of nodes.

Key words: wireless multimedia sensor network (WMSN); network coding; routing algorithm; energy aware

* 收稿日期:2016-06-06;修回日期:2016-08-02 Received date:2016-06-06;Revised date:2016-08-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61371091);大连海事大学“十三五”重点科研项目(3132016318)

** 通信作者:hrx@dlmu.edu.cn Corresponding author:hrx@dlmu.edu.cn

1 引言

为了满足信息获取的多样化、层次化以及环境监测的复杂化等需求,无线多媒体传感器网络(Wireless Multimedia Sensor Network, WMSN)^[1]应运而生。与传统的无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)相比,WMSN 对传输质量、传输时延、传输能量等提出了更高要求^[2]。路由算法能够根据网络的不同特性,在源、宿节点间建立并维护一条相对最优路径,不同路由算法所建立路径各不相同。因此,设计一种传输质量高、传输时延小、能量消耗少的路由算法在 WMSN 中显得尤为重要。

WMSN 的路由算法可分为以数据为中心的路由算法、分层(分簇)路由算法、基于地理位置的路由算法、基于数据流的路由算法以及基于服务质量(Quality of Service, QoS)的路由算法五大类^[2-3]。其中,基于地理位置的路由算法能够利用节点的位置信息来建立一条相对最近的路径,可以降低建路时的路由控制开销、数据传输的端到端时延,并且有助于提高数据传输的效率。TPGF(Two-Phase Geographical Greedy Forwarding)算法^[4]是针对 WMSN 最早提出的多径路由算法之一,它依靠节点的地理位置信息,发现并建立最大数量的节点分离路径,可以降低端到端传输时延。但是在高业务量下,TPGF 会暴露出为了满足节点分离要求而建路困难的问题,此时会导致数据传输时延大大增加,传输效率急剧下降。文献[5]对 TPGF 进行改进,提出 TPGF2 算法。该算法如果无法发现分离路径上的节点,则重复选用已占用路径上的节点建路。仿真结果表明,在高业务量下,该算法相比 TPGF 有更低的时延和更高的投递率。然而,上述算法均没有考虑节能因素,被选中路径上的节点因利用率较其他节点高,能量消耗更快,导致死亡时间缩短,从而会影响整个网络的性能。因此,针对 TPGF 因一直使用分离路径中的节点而带来的能量不平衡问题,文献[6]引入节能机制,提出 EA-TPGF(Energy Aware TPGF)算法。EA-TPGF 把地理位置信息和节点剩余能量作为路由度量来发现并建立路径,有效地延长了网络的生存周期。

网络编码(Network Coding, NC)技术^[7]能够提高单次数据传输的信息量,降低数据传输的能耗和时延,尤其适合无线网络环境。文献[8]将 NC 与 TPGF 算法相结合,提出了 TPGFNC 算法。该算法

利用网络编码技术融合来自多个节点的数据信息并进行转发,可以在高业务量下找到较 TPGF 更多的源、宿节点间的路径,解决了 TPGF 在高业务量下为满足节点分离要求而建路困难的问题,进一步提升了数据转发的效率。然而,TPGFNC 算法没有主动感知编码机会的存在,只是让数据信息在已有路径上利用编码机会,而且要求编码数据在下一跳节点立即解码,在一定程度上限制了编码机会的发现。此外,TPGFNC 算法也没有考虑节能问题。文献[9]提出的联合网络编码感知路由协议(Network Joint Coding-Aware Routing, NJCAR),不要求编码分组被一次性解码,允许单个编码分组在多个节点被逐步解码,进一步放松了对解码节点的约束,因而可以获得更多的编码机会。

为此,本文将联合网络编码技术引入 TPGF 算法中,提出一种编码与能量感知的 TPGF 路由算法(Network-coding and Energy aware TPGF, NE-TPGF)。该算法在建立路由时,综合考虑节点的地理位置、编码机会、节点剩余能量信息,同时利用联合网络编码技术进一步扩展编码结构,更充分地利用网络编码优势。仿真结果表明,NE-TPGF 能够提高网络吞吐量和投递率,降低端到端时延,并且有利于减少和平衡节点的能量消耗。

2 算法描述

NE-TPGF 算法主要包括贪婪转发与路径优化、联合网络编码感知、路由度量计算以及路由发现等部分。贪婪转发与路径优化部分根据每个节点的地理位置信息以及节点、路径编号,建立一条相对较短的节点分离的路径。联合网络编码感知部分依据中间节点所获取数据流的信息,按照联合编码技术的判断机制,判断编码机会是否存在。路由度量计算部分结合节点编码机会、剩余能量因子提出新的路由度量,并引入编码次数进一步细化编码机会的大小。路由发现部分完成路由的发现。

2.1 贪婪转发与路径优化

NE-TPGF 算法沿用 TPGF^[4]的贪婪转发方式,而且利用回溯和标记来避免发生局部最小化问题。在贪婪转发中,始终选择一跳邻居节点中离宿节点更近的节点作为转发的下一跳,并且允许下一跳节点到宿节点的距离大于自己到宿节点的距离,如图 1 所示。当源节点 a 有数据向宿节点 D 发送时,首

先选择一跳邻居中离节点 D 最近的一个节点(节点 b)。如果节点 a 发现节点 b 正在传输数据(即被另一条数据流占用),节点 a 重新选择除节点 b 外距离宿节点最近的一跳邻居作为转发节点(节点 c)。NE-TPGF 算法中下一跳转发节点 c 到宿节点的距离可以大于本节点 a 到宿节点的距离。

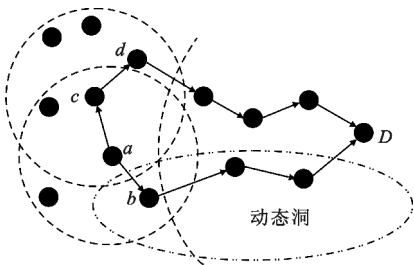


图1 贪婪转发^[4]
Fig. 1 Greedy forwarding^[4]

在路由建立阶段,对于任意一个节点,如果遇到除前一跳节点外,没有其他节点可以作为下一跳转发数据,则定义该节点为阻塞节点(Block Node),并且定义这种状态为阻塞状态^[4],如图2所示。图中节点 a 将数据传给节点 b ,节点 b 发现除了前一跳节点 a ,无其他可用邻居节点。此时,节点 b 标记自己为阻塞节点,并将数据信息回溯给节点 a ,节点 a 重新按贪婪方式选择转发节点^[4]。

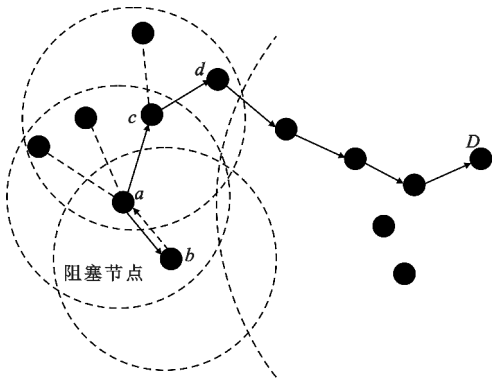


图2 阻塞节点和阻塞状态^[4]
Fig. 2 Block node and block situation^[4]

与 TPGF^[4]一样,NE-TPGF 的路径优化也是为了让每一条路径所含节点数最少。利用地理位置信息建立路由时,路径中可能会出现路径循环现象,如图3所示。图中由节点 a 、 b 、 c 和 d 构建的路径引起了路径循环,因为节点 a 能够沿着虚线直接将数据包转发给节点 d 。因此,给每一条路径分配一个路径编号,给每一个转发节点分配一个递减的节点编

号。当路由应答信息从宿节点返回源节点时,网络中任意一个中继节点只转发信息给具有相同路径编号和最大节点编号的节点^[4]。图中源节点 a 要向宿节点 D 发送数据包,开始建立路由。当宿节点 D 收到路由请求包时,沿着先前建立好的路径(路径 P_2)返回。当路由应答包返回节点 d 时,节点 d 将路由应答包直接转发给节点 a ,因为在节点 a 、 b 、 c 中,节点 a 具有最大的节点编号。

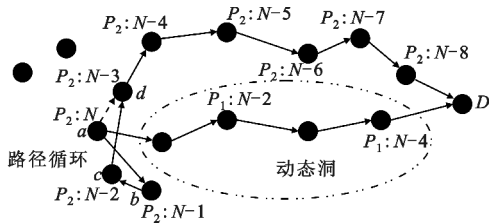


图3 路径循环及优化^[4]
Fig. 3 Path circle and optimization^[4]

2.2 编码机会感知

编码机会是网络编码的核心问题,为了提高流间网络编码的性能,就需要发现更多编码机会。编码机会形成于逆向数据流的相互作用,其数量取决于各个数据流的空间分布。文献[10]将该空间分布定义为编码结构,同时将编码结构分为单跳编码结构(Single-hop Coding Structure, SCS)和多跳编码结构(Multi-hop Coding Structure, MCS)两大类。联合网络编码属于 MCS 结构,可以发现较 SCS 更多的编码机会。NE-TPGF 利用联合网络编码技术,在建立路由时,让中间节点尽可能多地获取路径信息。

NE-TPGF 使用的联合网络编码技术与基于 SCS 结构的编码技术不同,不要求编码包在编码节点的下一跳或下游任意一跳被立即解码,而是允许多个下游节点共同参与解码过程,通过逐步解码的方式,放宽对解码节点的要求,因此,能够在编码节点处发现更多的编码机会。图4中有3条不同方向的数据流($f_1:2 \rightarrow 8 \rightarrow 6 \rightarrow 5$, $f_2:4 \rightarrow 8 \rightarrow 1$, $f_3:7 \rightarrow 8 \rightarrow 3$)交汇于中间节点8。如果按照 SCS 结构的编码方式,节点8只能将数据流2和数据流3上的数据包进行编码(此处的编码表示为简单的异或操作),但不能将数据流1上的数据包也进行编码,主要是因为数据流2上编码节点的下一跳节点(节点1)能够通过机会侦听的方式缓存数据流3的上一跳节点(节点7)所发送的数据包。这样,下一跳节点(节点1)能够再一次通过异或操作恢复出所需的原数据

包 P_2 。同理,数据流 3 的下一跳节点(节点 3)因其能侦听到数据流 2 的上一跳节点所发送的数据包,能够获取原始数据包 P_3 。由于数据流 1 上编码节点 8 的下游节点 6 和节点 5 分别无法同时侦听到数据流 3 的上游节点的数据包 P_3 和数据流 2 的上游节点的数据包 P_2 ,无法对 3 条数据流编码,即无法从编码包 $P_1 \oplus P_2 \oplus P_3$ 解码出原数据包 P_1 ,因此不满足编码要求。然而,使用联合编码技术的 NE-TPGF 可以将数据流 1 上的数据包 P_1 也进行编码,这是因为数据流 1 的下游节点 5 和 6 能够分别侦听到节点 7 和节点 4 发送的数据包,节点 6 和节点 5 可以通过合作的方式解码编码包 $P_1 \oplus P_2 \oplus P_3$ 。节点 6 在收到编码包 $P_1 \oplus P_2 \oplus P_3$ 后,对其进行部分解码成 $P_1 \oplus P_2$,再传给节点 5。而节点 5 收到 $P_1 \oplus P_2$ 后,再对其进行解码,最终获取原数据包 P_1 。可以看出,NE-TPGF 的联合网络编码机制比 SCS 结构的编码机制增加了一次编码机会,减少了一次数据传输。

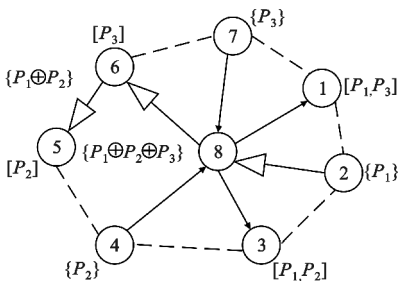


图 4 联合网络编码机制
Fig. 4 Network joint-coding mechanism

NE-TPGF 中引入联合编码机会的判断机制为:当网络中的数据流 L 在节点 n 处交汇,当且仅当式(1)成立时,流 L 中的数据包能够被编码且转发。

$$\begin{aligned} &\forall f_u, f_d \in F(n): f_u \neq f_d, \exists n_u \in U(n, f_u) \text{ 且} \\ &\exists n_d \in D(n, f_d) \text{ 满足 } n_u \in Nb(n_d) \end{aligned} \quad (1)$$

式中: F_n 表示网络中所有数据流, f_u, f_d 表示 F_n 中两条不同的数据流, $U(n, f_u)$ 表示数据流 f_u 上中间节点 n 的上游节点, $D(n, f_d)$ 表示数据流 f_d 上中间节点 n 的下游节点, $Nb(n_d)$ 表示节点 n_d 的邻居节点。此外,在判断编码机会时,本文假设一跳范围内的邻居节点都能侦听到各自发送的数据分组。

由于 NE-TPGF 在中间节点处判断编码机会是否存在时,需要利用不同数据流上的节点信息,因此,在路由发现阶段将利用路由控制报文 RREQ 和 RREP 以及 HELLO 报文携带并记录所经历数据流

上的所有节点信息。基于此,本文对 RREQ、RREP 以及 HELLO 报文的首部进行修改,添加本数据流的路径信息(Path_info)。图 4 中编码节点 8 需要掌握的路径信息如表 1 所示。

表 1 编码节点掌握的路径信息
Tab. 1 The path information for encoding node

数据流	路径信息		
	上游节点	下游节点	下游节点一跳邻居
f_1	2	6, 5	7, 4
f_2	4	1	7, 2
f_3	7	3	4, 2

2.3 路由度量计算

为了在路由发现阶段综合感知节点编码机会以及剩余能量,建立一条相对较短的从源到宿节点的路径,NE-TPGF 参考文献[6]的路由度量,并对其进行修改,引入编码次数及链路代价,并重新定义衡量编码机会大小的因子,进一步细化不同节点在不同条件下的编码机会大小。此外,还调整了路由度量中的编码机会、地理位置和剩余节点能量的权值系数。NE-TPGF 在建立路由时鼓励寻找一条编码机会较多的路径,因此提高了路由度量中编码机会对应的权值。NE-TPGF 的路由度量定义为

$$F = (P_i^c)^\alpha \times D_{id}^\beta \times E_i^{-\gamma} \quad (2)$$

式中: P_i 表示本节点将数据包传输给下一跳节点 i 的链路代价。当下一跳节点存在编码机会时,转发给该节点的链路代价小,当不存在编码机会时,链路代价大。因此,存在编码机会时, $P_i = 0.5$; 不存在编码机会时, $P_i = 1$ 。 c 表示在节点 i 处的编码次数,每次通过式(1)判断编码机会存在时,编码次数加 1; P_i^c 可表示编码机会的大小。假设源节点有两个一跳邻居节点 A 和 B , 已知节点 A 处存在编码机会,且编码次数为 3 次,而节点 B 不存在编码机会,即编码次数为 0, 因此节点 A 的编码机会大小为 $0.5^3 = 0.125$, 节点 B 的编码机会大小为 $1^0 = 1$ 。 D_{id} 表示下一跳节点 i 到宿节点的距离, E_i 表示节点 i 的剩余能量值, α, β 和 γ 是权值常数。NE-TPGF 在建立路由时更多地考虑编码机会大小,因此,设 α 为 0.4, 而 β 和 γ 为 0.3。路由度量值 F 越小的节点更有可能被选为下一跳转发节点。NE-TPGF 根据式(2)计算每个邻居节点的 F 值,并选择 F 值最小的转发路由请求报文。

2.4 路由发现机制

NE-TPGF 的路由发现过程与 TPGF^[4] 类似,当

源节点发送数据时,发送路由请求报文,建立节点分离的最短(近似于最短)路径,且在返回路由应答报文的同时进行路径的优化。与 TPGF 不同的是,NE-TPGF在选择下一跳转发节点时,将其邻居节点的剩余能量值、编码机会值也作为衡量指标。在图 5 所示网络中,有 4 条数据流,给每个节点添加自己的属性值(编码次数、距离 D 的距离、本节点的剩余能量值)。源节点 S 要发送数据包给目的节点 D ,如果没有现成的路径,则启动路由发现过程。假设节点 S 有 3 个邻居节点,分别是节点 L 、节点 A 和节点 E ,其属性值分别为 $(0, 3.3, 40)$ 、 $(1, 2.5, 50)$ 、 $(0, 3.0, 45)$ 。根据式(2)可以计算出 3 个节点的 F 值,分别是0.473、0.309、0.444。因此,源节点 S 选择 F 值最小的一个节点 A 作为下一跳节点,并转发路由请求报文(RREQ)。该 RREQ 报文需要携带的信息包括本节点及其历经的节点 ID 号、编码信息(编码机会大小 P_i^e)、地理位置信息(坐标值)、剩余能量信息,以及路径编号与节点编号。

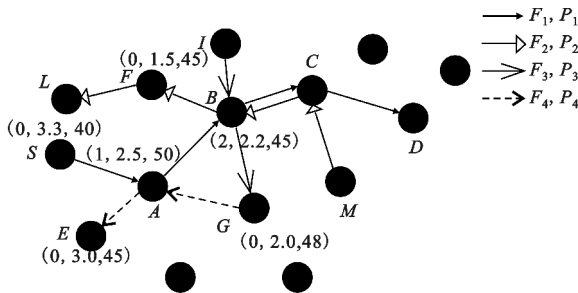


图 5 NE-TPGF 的转发节点选择
Fig. 5 Forwarding node selection of NE-TPGF

节点 A 收到 RREQ 报文后,记录该 RREQ 所携带的上游节点信息,并添加本节点信息,更新节点编号值,将 RREQ 报文继续转发给 F 值最小的下一跳节点。此时,节点 A 将选择 B 作为下一跳节点,因为在节点 A 的邻居节点 B 和 G 中, B 的 F 值(0.241)要小于 G 的 F 值(0.370)。重复上述过程,直到宿节点 D 收到 RREQ 报文。此时,节点 D 沿反向路径返回一个路由应答报文(RREP)。在返回过程中,任意一个节点收到 RREP 报文后,都按式(1)进行编码机会的判断,同时记录下编码数据包的次数,计算编码机会大小,并添加到 RREP 报文。之后,转发节点依据之前记录的路径编号和节点编号执行 2.1 节所述的路径优化过程。最终源节点收到 RREP 报文,沿着已建立路径转发数据包。

与 TPGF 算法^[4]相比,在引入联合网络编码技

术的 NF-TPGF 算法中,需要判断是否存在编码机会以及编码机会的大小。因此,每个节点需要获取所处数据流上其他节点的信息,会导致算法的开销和复杂性较 TPGF 算法大。

3 算法仿真及性能分析

本节用 OPNET 仿真平台搭建具有不同数目(40~110)传感器节点的多个仿真场景,对 NE-TPGF、TPGF^[4]、TPGF2^[5]、EA-TPGF^[6]、TPGFNC^[8] 5 种算法的性能进行仿真分析,评测指标包括编码次数、吞吐量、平均投递率、端到端时延、单位比特能耗以及剩余能量标准差。仿真中 Sink 节点为 5 个,数据包的宿节点在 5 个 Sink 节点中随机选择,其他节点为数据源节点。仿真参数设置如表 2 所示。

表 2 仿真参数
Tab. 2 Simulation parameters

仿真参数	参数值
仿真区域/ m^2	1 000×1 000
传输半径/ m	250
发包间隔/(packet·s ⁻¹)	2
数据包大小/ b	4 096
MAC 层协议	IEEE802.11b
节点数	40~110
节点初始能量/ J	50
仿真时间/ s	300

仿真中采用文献[11]的能量消耗模型,节点每接收和发送 k b 数据包所消耗的能量 $E_{RX}(k)$ 和 $E_{TX}(k)$ 分别为

$$E_{RX}(k)=kE_{elec}, \tag{3}$$

$$E_{TX}(k,d)=k(E_{elec}+\varepsilon_{amp}d^{\gamma}). \tag{4}$$

式中: E_{elec} 为节点传输或接收单位比特数据需要消耗的能量, ε_{amp} 为信号放大消耗的能量, d 为发送节点到接收节点的距离, γ 为路径损耗系数。仿真中取 $\gamma=2$, $E_{elec}=50$ nJ/b, $\varepsilon_{amp}=10$ pJ/(b·m²)。

图 6 比较了 TPGFNC 和 NE-TPGF 算法在不同节点数量下的编码次数。由于 TPGF、TPGF2 和 EA-TPGF 算法没有使用网络编码技术,其编码次数为 0。从图中可以看出,随着网络节点数量增多,两种算法的编码次数增加,而且 NE-TPGF 算法的编码次数高于 TPGFNC 算法,原因在于:随着节点数增

加,数据流量增加,在节点处产生的编码机会增加,因此算法的编码次数增加。另外,由于 NE-TPGF 能够主动感知节点间编码机会的存在,采用联合编码机制扩展了编码结构,增加了编码机会,因此其编码次数高于 TPGFNC。

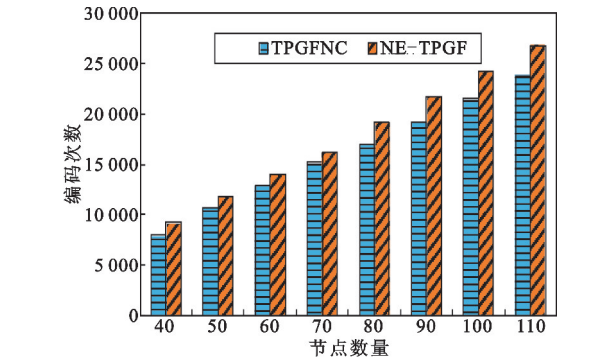


图 6 编码次数对比
Fig. 6 Encoding number versus node number

图 7 比较了 5 种算法在不同节点数目下的吞吐量性能。从图中可以看出,随着网络节点数增加,算法的吞吐量均递增。当节点数增加到一定程度时(大于 70),吞吐量的增加趋势变缓,主要原因是:随着网络中节点数增加,数据业务也不断增加,宿节点接收的数据比特也逐渐增加,但当节点数达到一定程度后,网络中逐渐出现拥塞,数据包的等待时间和传输时间变长,丢包率增加,宿节点在单位时间内接收到的数据比特数也有所减少,因此,全网吞吐量逐渐趋于平缓。另外,从图中还可看出,TPGF、EA-TPGF、TPGF2、TPGFNC、NE-TPGF 5 种算法的吞吐量依次递增,主要原因在于:TPGF 要求建立节点分离路径,而 TPGF2 允许在建路时重复使用正在被其他数据流占用的节点,释放了对节点分离的要求,因此 TPGF2 更容易建路成功,能够及时传输数据,吞吐量性能要好于 TPGF;而 EA-TPGF 在建路时虽然也不重复使用被占用的节点,但其不仅考虑地理位置因素,也要考虑剩余能量因素,不会一直用已选中的节点转发数据,可以避免这些节点因能量耗尽而过早死亡,因此,其吞吐量高于 TPGF,但略低于 TPGF2。由于 TPGFNC 和 NE-TPGF 算法使用网络编码技术,允许单次传输多个数据包,同样也可以放宽对节点分离的要求,而且能提高数据转发的效率,因此,其吞吐量性能高于 TPGF、EA-TPGF、TPGF2。另外,由于 NE-TPGF 用到联合编码路由感知技术,可以发现更多的编码机会,因此其吞吐量高于 TPGFNC。

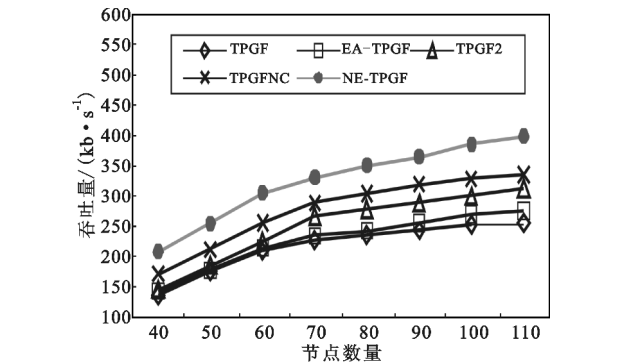


图 7 吞吐量对比
Fig. 7 Throughput versus node number

图 8 比较了 5 种算法在不同节点数目下平均投递率性能。从图中可以看出,在网络中节点数量较少时(小于 60),5 种算法的投递率均呈缓慢上升趋势。随着节点数量继续增加,投递率开始逐渐下降,主要原因是:随着网络节点数增加,数据流量上升,宿节点接收到的数据包数量也随之增加,因此投递率提升。然而,随着节点数继续增多,网络开始出现拥塞,数据包传输成功率下降,因而投递率开始出现下降的趋势。最后网络中的数据流量逐渐趋于饱和,再增加节点对投递率的影响不大。此外,从图中还可看出,NE-TPGF 算法在平均投递率性能上要优于其他 4 种算法,主要是因为 NE-TPGF 加入联合网络编码机制,单次将多个数据包发送出去,可减少分组传输次数,降低了因多次传输带来的丢包的可能性,同时,也提高了单位时间内节点收到的数据包数量。

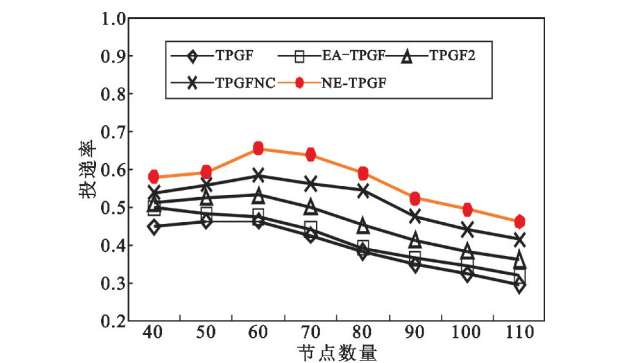


图 8 投递率对比
Fig. 8 Packet delivery ratio versus node number

图 9 比较了 5 种算法的平均端到端时延性能。从图中可以看出,随着节点数量增加,5 种算法的端到端时延也随之增加,其原因是:随着网络中节点数增加,数据业务增加,数据在队列中的等待时间以及传输时间均变长,因此,端到端时延随之增大。另外,从图中还可看出,5 种算法中,NE-TPGF 的平均时延最小,EA-TPGF 和 TPGF 最高,TPGFNC 和

TPGF2 居中,而且 TPGFNC 时延低于 TPGF2,这是因为 NE-TPGF 允许同一个节点在建路时重复被选中,即使在高业务量下也能找到距离相对较近的路径。此外,引入网络编码技术也可以减少数据包的转发次数,提高单次转发的信息量,减少数据包在节点处的排队时延。TPGF2 虽然也可以重复使用被占用的节点,但没有引入网络编码技术,且同一个节点要转发多个数据流的数据包,更有可能导致网络拥塞,因此其时延要高于 TPGFNC 和 NE-TPGF。TPG-FNC 虽然也引入了网络编码技术,却只是被动地在已经建立好路径的基础上感知编码机会,没有充分考虑路径上的编码机会。EA-TPGF 和 TPGF 既不重复使用被占用的节点,也不使用网络编码,在高业务量下,很难建路成功,导致数据丢失,传输绕远,在时延性能上表现最差。

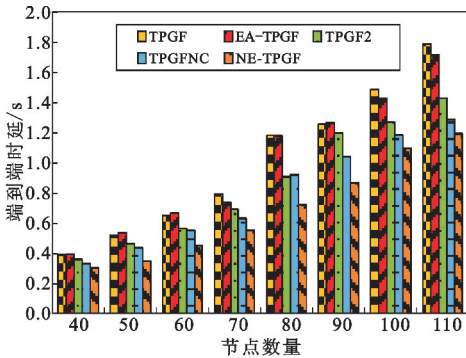


图9 端到端时延对比

Fig. 9 End-to-end delay versus node number

图 10 比较了 5 种算法在不同节点数量下的单位比特能耗。从图中可以看出,NE-TPGF 的单位比特能耗最低,原因是:NE-TPGF 引入了联合网络编码技术,减少数据包转发次数,提高数据包的传输效率,在降低能量消耗的情况下又使宿节点成功接收的数据比特数大大增加,因此其单位比特能耗最低。

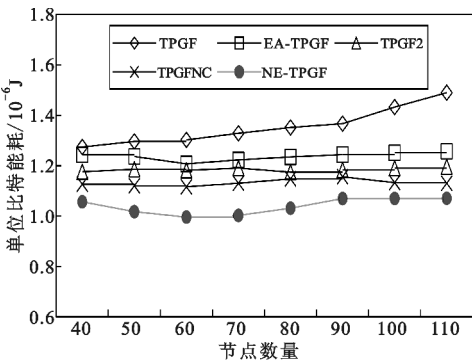


图 10 单位比特能耗对比

Fig. 10 Energy consumption per bit versus node number

图 11 比较了 5 种算法在不同节点数量下节点剩余能量标准差。从图中可以看出,NE-TPGF 和 EA-TPGF 的节点剩余能量标准差要低于其他 3 种算法,但是相差不大,原因是:NE-TPGF 和 EA-TPGF 引入节能机制,在建路时考虑节点剩余能量因素,平衡了网络能量消耗,因此其剩余能量标准差要小于其他算法。而 NE-TPGF 在选路时更倾向于选择编码机会多的节点,因此其剩余能量标准差要略微高于只考虑剩余能量的 EA-TPGF 算法。

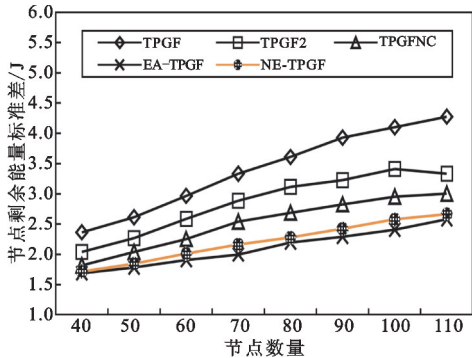


图 11 节点剩余能量标准差

Fig. 11 Standard deviation of node residual energy versus node number

4 结束语

本文针对 WMSN 中经典的 TPGF 路由算法^[4]在高业务量下难以找到节点分离路径,而且网络拓扑变动较小时,每条路径所包含节点要消耗比其他节点更多能量,导致其生存时间较短等问题,将联合网络编码机制、节能感知技术与 TPGF 路由算法相结合,提出了一种改进的路由算法 NE-TPGF。NE-TPGF 综合考虑节点地理位置、编码机会、节点剩余能量等因素,利用联合网络编码技术进一步扩展编码结构,并提出改进的路由度量,以此为依据选择更合适的下一跳转发节点。最后利用 OPNET 仿真平台对 NE-TPGF 与 TPGF^[4]、TPGF2^[5]、TPGFNC^[6]和 EA-TPGF^[8]4 种算法进行仿真对比,仿真结果表明,本文提出的算法在编码次数、吞吐量、投递率、端到端时延、单位比特能耗等指标上表现更优。由于 NE-TPGF 算法需要判断编码机会的存在及其大小,每个节点需要充分了解数据流上所有节点的信息,需要掌握信息量较多,因此,下一步研究可考虑简化节点信息的获取、管理机制,进一步降低协议的开销。

参考文献:

[1] AKYILDIZ L F, MELODIA T, CHOWDHURY K R. A surveyon wireless multimedia sensor networks[J]. Com-

- puter Networks, 2007, 51(4): 921-960.
- [2] SHEN H, BAI g. Routing in wireless multimedia sensor networks: a survey and challenges ahead[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2016, 71(8): 30-49.
- [3] BHANDARY V, MALIK A, KUMAR S. Routing in wireless multimedia sensor networks: a survey of existing protocols and open research issues[J]. Journal of Engineering, 2016(7): 1-27.
- [4] SHU L, ZHANG Y, YANG L T, et al. TPGF: geographic routing in wireless multimedia sensor networks[J]. Telecommunication Systems, 2010, 44(1): 79-95.
- [5] BENNIS I, FOUCAL H, ZYTOUNE O, et al. An evaluation of the TPGF protocol implementation over ns-2[C] // Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC). Sydney: IEEE, 2014: 428-433.
- [6] BENNIS I, ZYTOUNE O, ABOUTAJDINE D, et al. Low energy geographical routing protocol for wireless multimedia sensor networks [C] // Proceedings of the 9th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC). Sardinia, Italy: IEEE, 2013: 585-589.
- [7] AHLISWEDE R, CAI N, LI S Y R, et al. Network information flow[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2000, 46(4): 1204-1216.
- [8] AWAD F, BANIMELHEM O, ALROUSAN n. The potential of using network coding with geographical forwarding routing for wireless multimedia sensor networks [C] // Proceedings of the 11th International Conference on Computer and Information Technology (CIT). Pafos, Cyprus: IEEE, 2011: 9-14.
- [9] ZHOU Z H, ZHOU L. Network joint coding-aware routing for wireless ad hoc networks [C] // Proceedings of 2010 IEEE International Conference on Wireless Communications Networking and Information Security (WCNIS). Beijing: IEEE, 2010: 17-21.
- [10] 陈晨, 董超, 茅娅菲, 等. 无线网络编码感知路由综述[J]. 软件学报, 2015, 26(1): 82-97.
CHEN Chen, DONG Chao, MAO Yafei, et al. Survey on network-coding-aware routing in wireless network [J]. Journal of Software, 2015, 26(1): 82-97. (in Chinese)
- [11] HEINZELMAN W B, CHANDRAKASAN A P, BALAKRISHNAN H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2002, 1(4): 660-670.

作者简介:



王柯君 (1992—), 男, 浙江绍兴人, 2016 年于大连海事大学获电子与通信工程专业硕士学位, 主要研究方向为无线 ad hoc 网络和网络编码技术;

Email: zjsx_wkj@ sina. com

何荣希 (1971—), 男, 四川南充人, 1999 年于电子科技大学获通信与信息系统专业博士学位, 现为教授、中国计算机学会高级会员, 主要研究方向为光网络和无线网络。

Email: hrx@ dlmu. edu. cn



《电讯技术》编辑部致谢并表彰审稿专家

2016 年, 本刊 188 位审稿专家以严谨的学术态度和认真负责的精神, 利用业余时间为本刊审稿 1 211 篇 1 598 次, 在保证论文质量、扩大本刊影响力和提升作者写作水平等方面作出了积极有效的贡献。在此, 向各位审稿专家表示衷心的感谢。同时, 为了充分调动审稿专家的积极性, 增强审稿专家的责任感和成就感, 编辑部决定对艾树峰等 70 位全年审稿 12 篇 (含) 或 12 次 (含) 以上以及作出特别贡献的审稿专家进行表彰、奖励并颁发荣誉证书, 数据统计时间段为 2016 年 1 月 1 日至 2016 年 12 月 31 日。致谢名单及优秀审稿专家名单详见本刊网站 [www. teleonline. cn](http://www.teleonline.cn) “信息公告”栏目发布的相关信息。

本刊编辑部 赵 勇