

无线传感器网络中结合节点传输范围和网络编码的节能策略

田贤忠 阳 胜 徐 卫

(浙江工业大学计算机科学与技术学院 杭州 310023)

摘 要 在无线传感器网络中,汇聚节点附近的节点在传输数据时需要承受巨大的通信负载,节点能量消耗非常快,容易出现能量空洞问题,因此这片区域变成了整个无线传感器网络的通信瓶颈。为了节省瓶颈区域的能量消耗,通过分析节点的传输范围对节点能耗的影响,合理调整瓶颈区域内节点的传输范围,并结合网络编码方法,提出了 TRNC 策略。理论分析和数值模拟结果表明,该策略能有效地提高整个网络的能量利用率,并且有助于减少节点的能耗。

关键词 无线传感器网络,传输范围,网络编码,节能

中图法分类号 TP393 **文献标识码** A

Saving Energy Strategy by Combining Node Transmission Range and Network Coding(TRNC) for Wireless Sensor Network

TIAN Xian-zhong YANG Sheng XU Wei

(College of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract In a wireless sensor network, the sink's neighbor nodes have to withstand enormous traffic load in forwarding data, and these nodes run out of their battery power very soon. It is prone to be energy hole problem, thus this zone becomes a communication bottleneck for the whole wireless sensor networks. In order to save energy in the bottleneck zone, the paper proposed the TRNC strategy. It properly adjusts the transmission power range of nodes in the bottleneck zone by analyzing the impact of the transmission power range of the nodes on energy consumption, at the same time, it combines the network coding method. Theoretical analysis and numerical simulation results show that the strategy can effectively improve the energy utilization efficiency and reduce the energy consumption.

Keywords Wireless sensor network, Transmission range, Network coding, Saving energy

1 引言

在单汇聚节点的无线传感器网络中,传感器节点发送数据包给汇聚节点一般需要经过其他节点的转播。由于传感器节点都是由不可充电的电池提供能量的,汇聚节点附近的节点为了转发其他区域节点产生的数据包而承担着巨大的额外通信负载,会导致这片区域节点的能量会快速耗尽,即使距离较远的节点依然活着,但是它们的数据包将不可能发送到汇聚节点。汇聚节点附近的节点所构成的区域称为瓶颈区域^[1],瓶颈区域是无线传感器网络的一个通信瓶颈。

在无线传感器网络中,如果节点的传输范围固定且相同,那么非常容易形成瓶颈区域,当瓶颈区域内节点能量耗尽时,整个无线传感器网络的生存时间就到期了。因此,如何节省瓶颈区域节点的能耗问题值得我们探讨,本文主要研究瓶颈区域的能量消耗问题,主要贡献在于:通过分析节点的传输范围对节点的能耗影响,合理调整瓶颈区域节点的传输范围,对瓶颈区域进行分层,然后在分层的基础上使用网络编码方法,从而降低瓶颈区域节点的能耗。

本文第2节介绍相关工作;第3节描述 TRNC 节能策略;第4节分析瓶颈区域的能量消耗;第5节数值模拟;最后总结全文。

2 相关工作

随着无线传感器网络的发展,无线传感器网络的应用越来越广泛,学者和研究人员针对无线传感器网络的研究越来越深入,其能耗问题成为了关注的重点。文献[1]分析了能量受限的无线传感器网络的瓶颈区域的能量消耗问题以及生存时间上限。文献[2]通过研究传感器节点与汇聚节点的距离和节点密度的关系,发现节点的传输范围和覆盖区域直接影响着节点的密度,然后提出了根据节点与汇聚节点距离的增加而增大节点的密度来避免形成瓶颈区域的策略。文献[3]针对均匀分簇导致无线传感器网络的能耗不均的问题,提出一种能量均衡的非均匀分簇算法,该算法能有效均衡节点能耗。文献[4]提出了初始化节点的电池能量与它和汇聚节点的距离成反比例的优化策略,但是无线传感器节点布置的环境一般非常恶劣,因此,其实际可操作性不高。文献[5]提出

本文受浙江省自然科学基金项目(Y1110570)资助。

田贤忠(1968—),男,博士,教授,主要研究方向为无线网络、网络编码,E-mail:txz@zjut.edu.cn;阳 胜(1989—),男,硕士,主要研究方向为无线传感器网络、网络编码,E-mail:275577745@qq.com(通信作者);徐 卫(1965—),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为无线网络、网络编码。

了汇聚节点附近两个相邻节点的距离要小于无线传感器网络外围两个相邻节点的距离,便能避免形成瓶颈区域的方案。该方案根据传输距离进行分层,最靠近汇聚节点的一层节点传输范围最小,从汇聚节点到无线传感器网络的叶子节点,节点的传输范围依次递增,这样虽然能在一定程度上均衡节点的生存时间,但实际上无线传感器节点本身就决定了节点的最大传输范围,因此一直扩大节点的传输范围是不可取的。此外,最靠近汇聚节点的节点数目较少,这一层的通信负载依然很大,瓶颈效应同样存在。文献[6]分析了传输范围对无线传感器网络的能耗的影响,提出了对通信负载最大的瓶颈区域进行分层的方法,该方法能在一定程度上减轻瓶颈区域的影响,然而该方案还可以进一步改善,比如结合网络编码。我们知道,网络编码能有效提高网络的吞吐量、带宽和能量效率,自从网络编码^[7]的思想被提出以后,其实际应用一直备受关注,而网络编码在无线传感器网络中的应用研究更是激发了大量学者的兴趣。Katti等^[8]研究了使用 XOR 对数据包进行编码的实践网络编码策略。文献[9]提出了在无线传感器网络中使用编码更新的网络编码方案。文献[10]设计出了使用网络编码的通信协议,它可以有效地平衡无线传感器网络的能量效率和可靠性。文献[11]提出了在无线传感器网络中使用责任循环和网络编码来延长生存时间的方案,该方案通过节点在激活状态与睡眠状态之间的轮流切换和在瓶颈区域中使用单层网络编码来提高能量效率,从而延长网络生存时间,但是该方案并没有考虑到传输范围对节点能量的影响,网络编码的应用也有待扩展。因此,我们从文献[6]提出的方案中得到启发,根据瓶颈区域节点与汇聚节点之间的距离将瓶颈区域分成两层,然后结合文献[11]中提出的在瓶颈区域使用网络编码策略,提出了进一步优化瓶颈区域内节点能量消耗的方案。

本文从无线传感器网络瓶颈区域节能的角度出发,根据瓶颈区域节点与汇聚节点的实际距离,合理调整节点的传输范围,将瓶颈区域进行分层,然后结合网络编码机制,提出了使用双层网络编码的 TRNC 节能策略。

3 TRNC 节能策略

3.1 研究动机

无线传感器网络是由部署在监测区域内的大量无线传感器节点组成,通过无线通信方式形成的一个多跳自组织的网络系统。无线传感器网络的一个典型特征是节点能量有限,如何设计出良好的节能策略,来提高节点的能量效率,是无线传感器网络面临的重要挑战。

3.1.1 传输范围对能耗的影响

在无线传感器网络中,由文献[12]提出的无线传感器节点能耗模型可得,传感器节点每秒接收数据消耗的能量可表示为 E_r ,当路径衰减指数为 k 时,节点向距离为 d 外的目的节点发送数据,每秒产生的能量消耗表示为 E_t ,即:

$$E_r = R_d \alpha_{12} \quad (1)$$

$$E_i = R_d(\alpha_{11} + \alpha_2 d^k) \quad (2)$$

式中, R_d 、 α_{11} 、 α_{12} 、 α_2 都是常量。其中 R_d 表示节点每秒转发的比特数, α_{11} 表示发送 1 比特数据消耗的能量, α_{12} 表示接收 1 比特数据消耗的能量, α_2 表示传输 1 比特数据在放大电路中消耗的能量。由式(1)可得, 节点接收数据包所消耗的能量与传输距离无关, 所以节点接收数据时不受节点传输范围的影响。

响。由式(2)可得,节点发送数据包时,其能量开销与节点的传输距离成正相关关系,即节点传输距离越远,消耗的能量也越多。因此,根据节点的具体位置,合理减少节点的传输范围有助于减少能量开销。

3.1.2 网络编码对能耗的影响

网络编码一经提出,便得到了广泛的应用。最经典的网络编码例子就是蝴蝶模型^[8],其主要思想是,当中间链路成为通信瓶颈时,使用 XOR 编码将两个数据包编码成一个数据包,然后再广播给两个目的节点,最后目的节点根据已经接收的数据包将编码包进行解码操作,便能将编码数据包还原成原始数据包。因此,使用网络编码能提高吞吐量。网络编码能将两个数据包编码成一个数据包发送给目的节点,忽略掉编码的计算开销,其消耗的能量与节点直接转发所消耗的能量相同,因此使用网络编码方法能够有效地节省能耗。

无线传感器网络的瓶颈区域是整个网络数据传输流最集中的地方,即无线传感器网络的通信瓶颈。由于瓶颈区域内节点的能量是有限的,如何提高无线传感器网络瓶颈区域内节点的能量利用率是我们研究的关键。瓶颈区域内节点可以与汇聚节点直接通信的特性为网络编码的利用提供了可能,此时使用网络编码不仅可以提高网络的吞吐量,还可以节省瓶颈区域内节点的能耗。文献[6]已经通过调整瓶颈区域内节点的传输范围将瓶颈区域分层,分层之后瓶颈区域内的节点仍然保持可以与汇聚节点直接通信,因此,我们可以将网络编码直接运用在已经分好两层的瓶颈区域之上,从而提出了结合调整节点传输范围和使用网络编码方法的 TRNC 节能策略。

3.2 结合传输范围和网络编码的节能策略(TRNC 策略)

TRNC 策略首先根据瓶颈区域内节点与汇聚节点的距离将瓶颈域分成两层,其中对于最靠近汇聚节点的一层,其节点的传输范围较小,而另一层则相反。其次,把每层的一半节点设置为网络编码节点另一半设置为直接转发节点,网络编码节点需要先将数据包进行编码操作,再把编码的数据包发送给汇聚节点,而直接转发节点则直接将接收的数据包发送给汇聚节点。最终,汇聚节点将接收的编码数据包进行解码操作,便能得到原始数据包。

假设无线传感器网络采用的是多路径转发方式。其网络的传输模型如图 1 所示,无线传感器网络包含的 N 个传感器节点随机均匀分布在半径为 R 的圆形区域内,瓶颈区域 B 是以整个无线传感器网络的中心为圆心、 r 为半径的圆形区域,其中 r 等于一个传感器节点最大的传输范围,以便瓶颈区域之外的节点传输数据到汇聚节点必须经过瓶颈区域。

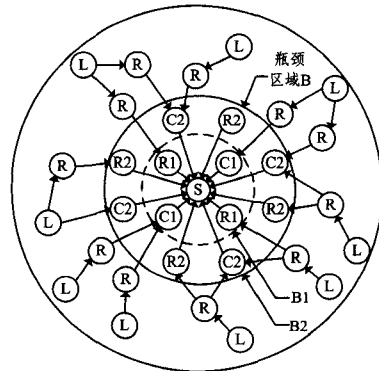


图 1 无线传感器网络传输模型

瓶颈区域 B 包括子区域 $B1$ 和 $B2$, 其中 $B1$ 内节点的传输范围为 $r/2$, $B2$ 内节点的传输范围为 r 。在瓶颈子区域 $B1$ 和 $B2$ 中, 节点都被均匀地分成直接转发节点组和网络编码节点组, 其中 $B1$ 内的直接转发节点组为 $R1$, 网络编码节点组为 $C1$; 而 $B2$ 内的直接转发节点组为 $R2$, 网络编码节点组为 $C2$ 。直接转发节点对接收的数据包不做任何操作, 直接转发给汇聚节点; 网络编码节点对接收的数据包先进行编码, 然后再转发给汇聚节点。在瓶颈区域之外, 节点被标记为 L 和 R , 其中 L 表示叶子节点, 其将定期地感知数据, 然后将感知形成的数据包向汇聚节点的方向转发; 而 R 表示中间节点, 对接收的数据包往汇聚节点的方向直接转发。

3.2.1 瓶颈区域分层策略

在无线传感器网络中, 瓶颈区域之外的节点传送数据包给汇聚节点时, 都需要经过瓶颈区域 B 内节点的转发。由于瓶颈区域中的所有传感器节点都是随机均匀分布的, 有些传感器节点距离汇聚节点比较近, 有些传感器节点距离汇聚节点比较远, 由 3.1.1 节分析的结论可知, 节点发送数据消耗的能量与传输距离成正相关关系, 所以当传感器节点距离汇聚节点较近时, 可以适当地缩小传感器节点的传输范围, 这样便可以节省能耗。瓶颈区域相对于整个无线传感器网络而言, 其区域所占的空间比较小, 传感器节点的个数也较少, 因此, 我们根据节点传输范围对瓶颈区域分层时, 选择将瓶颈区域分成两层, 即子区域 $B1$ 和 $B2$, 如图 1 所示, 瓶颈区域 $B1$ 是半径为 $r/2$ 的圆形区域, 而瓶颈区域 $B2$ 是整个瓶颈区域 B 除去区域 $B1$ 的环形区域。这样不仅能方便地对传感器节点进行处理, 而且瓶颈区域内两层节点之间的通信不会相互干扰。因此, 将瓶颈区域分成两层既能合理地适应无线传感器网络瓶颈区域的实际情况, 也不会影响节点的正常通信。

由于无线传感器网络采用的是多路径转发方式, 因此瓶颈区域之外的节点传输数据给汇聚节点都采用多跳多路径方式进行转播, 而瓶颈区域的节点传输数据给汇聚节点都采用单跳直接通信。当瓶颈区域之外的节点能与瓶颈区域的节点直接通信时, 根据节点与瓶颈区域内节点的实际距离, 选择 $B1$ 内的节点或者 $B2$ 内的节点进行通信。如果节点能够与瓶颈区域 $B1$ 的节点通信时, 我们优先选择 $B1$ 内的节点。由于瓶颈区域内节点与汇聚节点都使用直接通信的方式, 因此当瓶颈区域外的节点传送数据包给汇聚节点经过瓶颈区域时, 只需由 $B1$ 内的节点或者 $B2$ 内的节点转发即可。

3.2.2 瓶颈区域内的双层网络编码策略

由 3.1.2 节分析的结论可知, 使用网络编码能够在一个单位时间内将两个及两个以上的数据包编码成一个数据包发送给目的节点, 因此将相同数目的数据包发送给目的节点至少能够节省一半的能量。在瓶颈区域 B 中, 所有节点都采用单跳的方式与汇聚节点直接通信, 因此, 我们可以对瓶颈区域的网络编码节点使用 XOR 编码方法。

由上一节描述的分层策略可知, 我们是根据瓶颈区域节点与汇聚节点的实际距离把瓶颈区域分成两个子区域 $B1$ 和 $B2$, 然后调整子区域 $B1$ 和 $B2$ 内节点的传输范围。在瓶颈区域 $B1$ 和 $B2$ 中, 节点都被均匀分成两类: 直接转发节点和网络编码节点, 直接转发节点和网络编码节点都各占一半的比例, 且呈对称分布。

瓶颈区域网络编码的模型^[11]类似于蝴蝶型网络编码模

型, 如图 2 所示。瓶颈区域之外的节点 $S1$ 和 $S2$ 广播数据包 a 和 b , 瓶颈区域内直接转发节点 $R1$ 将接收到的数据包 a 直接转发给汇聚节点 O , 直接转发节点 $R2$ 也将接收到的数据包 b 直接转发给汇聚节点 O , 而瓶颈区域内网络编码节点 C 将接收到的数据包 a 和 b 作异或运算生成编码包 $a \oplus b$, 然后发送给汇聚节点 O 。汇聚节点 O 通过已经接收到的数据包 a 或者数据包 b , 便能将编码包 $a \oplus b$ 解码得到数据包 a 和 b , 这样便能减少发送次数, 从而减少能量消耗。

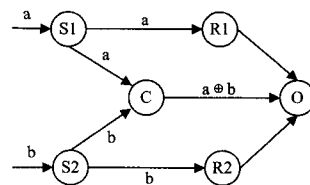


图 2 瓶颈区域网络编码模型

瓶颈区域之外的节点与汇聚节点的通信需要瓶颈区域节点的帮助, 瓶颈区域 $B1$ 和 $B2$ 的节点都是与汇聚节点直接通信的, 因此, 不论瓶颈区域 $B1$ 转发的是原始数据包还是编码数据包, 都将不会经过瓶颈区域 $B2$ 内的节点, 反之亦然。也就是说, 瓶颈区域 $B1$ 和 $B2$ 的节点之间传输数据包时不会相互干扰。因此, 两层网络编码模型适合使用在瓶颈区域中。

4 性能分析

TRNC 策略应用在无线传感器网络的瓶颈区域中, 我们主要分析瓶颈区域节点的平均能量消耗。瓶颈区域内所有节点消耗的总能量主要包括 4 部分: 瓶颈区域节点感知数据产生的能量、瓶颈区域节点接收瓶颈区域之外节点发送的数据包所消耗的能量、瓶颈子区域 $B1$ 发送数据包所消耗的能量和瓶颈子区域 $B2$ 发送数据包所消耗的能量。将瓶颈区域消耗的总能量除以瓶颈区域节点的个数, 便是瓶颈区域节点平均消耗的能量。

根据 3.2 节提出的网络模型可得, 在整个区域内放置了 N 个传感器节点, 无线传感器网络中的传感器节点都是随机均匀分布的, 则瓶颈区域的传感器节点个数可表示为:

$$N(B) = n \frac{\pi r^2}{\pi R^2} = n \frac{r^2}{R^2} \quad (3)$$

除去瓶颈区域内的节点, 剩下的都为非瓶颈区域的节点, 因此, 非瓶颈区域的节点个数表示为:

$$N(NB) = N \frac{\pi R^2 - \pi r^2}{\pi R^2} = N \frac{R^2 - r^2}{R^2} \quad (4)$$

由 TRNC 策略可得, 我们将瓶颈区域分成了两个子区域 $B1$ 和 $B2$, 其所覆盖的面积比例为 1 : 3, 则对应区域内节点个数 $N(B1)$ 和 $N(B2)$ 的比例也为 1 : 3, 即:

$$N(B1) = N \frac{\pi (\frac{r}{2})^2}{\pi R^2} = N \frac{r^2}{4R^2} \quad (5)$$

$$N(B2) = 3N(B1) = N \frac{3r^2}{4R^2} \quad (6)$$

假设传感器节点每秒感知信息产生的能量为 E , 则瓶颈区域节点每秒感知数据产生的能量为 $N(B)E$ 。假设瓶颈区域内每个节点负责将数据包发送给汇聚节点为事件 p , 由式 (1) 可得, 传感器节点每秒接收数据消耗的能量为 E_r , 则瓶颈区域节点每秒接收瓶颈区域之外节点发送的数据包所消耗的能量为 $pN(NB)E_r$ 。在瓶颈区域分成的两个子区域 $B1$ 和

B2 中,由于节点传输范围不同,因此对应发送数据包给汇聚节点所消耗的能量也不同。下面我们将分别分析这两部分能量。

由于在瓶颈区域 B1 中,传感器节点的传输范围为 $r/2$,根据式(2)可推导出其每秒发送数据消耗的能量为:

$$E_{d1} = R_d(\alpha_{11} + \alpha_2(\frac{r}{2})^k) \quad (7)$$

而在瓶颈区域 B2 中,传感器节点的传输范围为 r ,同理可得,其每秒发送数据消耗的能量为:

$$E_{d2} = R_d(\alpha_{11} + \alpha_2 r^k) \quad (8)$$

瓶颈区域 B1 和 B2 除了将自身感知信息产生的数据包发送给汇聚节点之外,还需要转发瓶颈区域之外节点产生的数据包。在瓶颈区域之外节点产生的数据包中,假设所占比例为 q 的数据包由瓶颈区域 B1 的节点来转发,剩下的比例为 $1-q$ 的数据包由瓶颈区域 B2 的节点来转发。在单轮次传输数据中,瓶颈区域 B1 需承担的数据量为 $pN(N(B1) + qN(NB))$,由式(7)可得,瓶颈区域 B1 中每个节点每秒发送数据所消耗的能量为 E_{d1} ,则瓶颈区域 B1 所有节点每秒发送数据所消耗的总能量为:

$$E_1 = p(N(B1) + qN(NB))E_{d1} \quad (9)$$

同理,瓶颈区域 B2 需承担的数据量为 $pN(N(B2) + (1-q)N(NB))$,根据式(8)可得,瓶颈区域 B2 中每个节点每秒发送数据所消耗的能量为 E_{d2} ,则瓶颈区域 B2 所有节点每秒发送数据所消耗的总能量为:

$$E_2 = p(N(B2) + (1-q)N(NB))E_{d2} \quad (10)$$

因此,瓶颈区域每个节点平均每秒消耗的能量可表示为:

$$\begin{aligned} E_{avg} &= \frac{N(B)E + p[N(NB)E_r + E_1 + E_2]}{N(B)} \\ &= E + \frac{p}{N(B)}[N(NB)E_r + (N(B1) + qN(NB))E_{d1} + \\ &\quad (N(B2) + (1-q)N(NB))E_{d2}] \\ &= E + pR_d[\frac{1}{4}(4\alpha_{11} + \alpha_2 r^k(\frac{1}{2^k} + 3)) + (\frac{R^2}{r^2} - 1)(\alpha_{11} + \\ &\quad \alpha_{12} + \alpha_2 r^k(\frac{q}{2^k} + 1 - q))] \end{aligned} \quad (11)$$

由 TRNC 策略可得,我们在瓶颈区域 B1 和 B2 中都使用了网络编码,即都使用了 XOR 编码操作,编码节点每次能将两个数据包编码成一个发送给汇聚节点。此外,不论在瓶颈区域 B1 中还是在瓶颈区域 B2 中,其网络编码节点和直接转发节点的个数都相同。假设发送相同个数的数据包给汇聚节点,则在瓶颈区域中每个节点平均每秒能节省的能量为:

$$\begin{aligned} E_{save} &= \frac{1}{2} \frac{p}{N(B)}[(N(B1) + qN(NB))E_{d1} + (N(B2) + \\ &\quad (1-q)N(NB))E_{d2}] \\ &= \frac{1}{2} pR_d[\frac{1}{4}(4\alpha_{11} + \alpha_2 r^k(\frac{1}{2^k} + 3)) + (\frac{R^2}{r^2} - 1)(\alpha_{11} + \\ &\quad \alpha_2 r^k(\frac{q}{2^k} + 1 - q))] \end{aligned} \quad (12)$$

TRNC 策略是基于多路径路由方式的,它不仅可以通过多条路径将同一个数据包发送给汇聚节点(虽然会在一定程度上造成数据包的冗余,但是大大提高了数据包的传输成功率),而且在瓶颈区域使用了网络编码技术,可以大幅度缓解瓶颈区域的通信压力,提高网络的传输效率。因此,TRNC 策略可以提高网络传输的可靠性,改善网络的吞吐量。

数据包的传输延迟主要有两个方面的原因:数据包重传和传输等待,数据包重传是指目的节点接收到错误的数据包或者在规定的时间内没有接收到数据包,则源节点需要重新发送该数据包。而传输等待是指通信链路上的节点对数据包进行相应操作而所需要等待的一定时间。TRNC 策略采用的是多路径的传输方式,它将一个数据包从多条路径发送给目的节点,大大减少了数据包重传的几率,从而减少了重传导致的传输延迟。网络编码 XOR 需要两个数据包才能进行编码,当节点的缓冲队列只有一个数据包时,只能进行等待。但是我们提出的 TRNC 策略网络编码使用在传输数据流最集中的瓶颈区域,缓冲队列中只有一个数据包的概率会比较低,则网络编码节点与转发节点的传输等待时间相差较小,此外,相对于数据包重传的延迟,传输等待时间基本可以忽略。因此,TRNC 策略可以适当地降低网络的传输延迟。

5 数值模拟

我们通过数值模拟实验,对 TRNC 策略的能耗进行分析。实验的参数设置参照 MICA 传感器^[13],其参数设置如下,节点总个数(N):2000,区域半径(R):200m,瓶颈区域半径(r):60m,路径衰减指数 k :2, α_{11} : 0.937×10^{-6} J/bit, α_{12} : 0.787×10^{-6} J/bit, α_2 : 0.0172×10^{-6} J/bit,节点每秒感知信息产生的能量(E): 0.197×10^{-6} J/s,节点每秒转发的比特数(R_d):20bit/s。为了测试传输范围和网络编码分别对节点能耗的影响,我们用 TRNC 表示瓶颈区域不使用分层但使用网络编码的方案,TRNNC 表示瓶颈区域使用分层但不使用网络编码的方案。

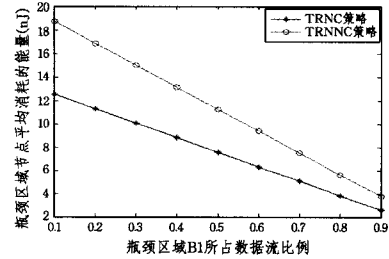


图3 使用相同分层时平均能耗随 B1 所占数据流比例的变化

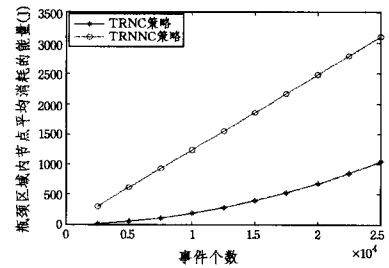


图4 使用相同分层时平均能耗随事件个数的变化

由图3和图4可得,通过对比 TRNNC 策略和 TRNC 策略瓶颈区域节点平均每秒消耗的能量都随着节点负责将数据包发送给汇聚节点,事件 p 在瓶颈区域 B1 转发数据包的比例 q 的变化情况,在都使用分层策略的情况下,当发送相同数目的数据包给汇聚节点时,使用网络编码的 TRNC 策略的瓶颈区域内节点平均消耗的能量明显小于不使用网络编码的 TRNNC 策略,因此,使用网络编码能够提高无线传感器网络瓶颈区域的吞吐量,从而节省瓶颈区域内节点的能耗。此外,由于我们提出的 TRNC 策略主要针对瓶颈区域进行了改进,

因此假设 TRNC 策略和 TRNNC 策略中瓶颈区域之外节点的数据传输模型和能量消耗模型是相同的,因而使用网络编码能够提高整个无线传感器网络的吞吐量,改善网络的能量利用率。

由图 5 和图 6 可得,通过对比 NTRNC 策略和 TRNC 策略瓶颈区域节点平均每秒消耗的能量随着节点负责将数据包发送给汇聚节点,事件 p 在瓶颈区域 $B1$ 转发数据包的比例 q 的变化情况,在都使用了网络编码的情况下,使用根据节点传输范围进行分层的 TRNC 策略的瓶颈区域内节点平均消耗的能量明显小于不分层的 NTRNC 策略,因此,合理减少节点的传输范围有助于节省瓶颈区域内节点的能耗。同理,我们假设 TRNC 策略和 NTRNC 策略中瓶颈区域之外节点的数据传输模型和能量消耗模型是相同的,因而合理地减少节点的传输范围有利于节省无线传感器网络的能量消耗,提高网络的能量利用率。

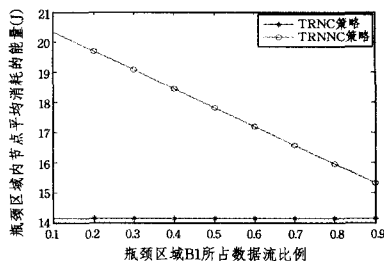


图 5 使用相同网络编码时平均能耗随 B1 所占数据流比例的变化

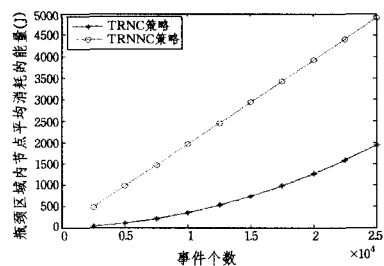


图 6 使用相同网络编码时平均能耗随事件个数的变化

结束语 本文通过分析无线传感器网络节点传输范围对能耗的影响,并结合网络编码技术,提出了在瓶颈区域中使用双层网络编码的 TRNC 策略。TRNC 策略不仅提高了网络的能量效率和可靠性,还改善了网络的吞吐量,降低了网络的传输延迟。理论分析和数值模拟显示,TRNC 策略节能效率比较高。

参考文献

[1] Wang Qing-hua, Zhang T. Bottleneck zone analysis in energy-constrained wireless sensor networks[J]. IEEE communications

letters, 2009, 13(6): 423-425

[2] Padmanabh K, Roy R. Bottleneck around Base Station in Wireless Sensor Network and its Solution[C]//Proc of Third Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Networking & Services. San Jose: IEEE Press, 2006: 1-5

[3] 卢先领, 王莹莹, 王洪斌, 等. 无线传感器网络能量均衡的非均匀分簇算法[J]. 计算机科学, 2013, 40(5): 78-81

[4] Mihail L S, Rudra D. Benefits of Multiple Battery Levels for the Lifetime of Large Wireless Sensor Networks[C]//Proc of 4th International IFIP-TC6 Networking Conference. Berlin: Springer Verlag Press, 2005: 1440-1444

[5] Padmanabh K, Gupta P, Roy R. Transmission range management for lifetime maximization in wireless sensor network[C]//Proc of 2008 International Symposium on Performance Evaluation of Computer and Telecommunication Systems. Edinburgh: IEEE Press, 2008: 138-142

[6] Cheng Rei-heng, Huang Chi-ming. The impact of the transmission power range on energy consumption for wireless sensor networks[C]//Proc of Fifth International Conference on Ubiquitous and Future Networks. Danang: IEEE Press, 2013: 77-81

[7] Ahlswede R, Cai Ning, Li S Y R, et al. Network Information Flow[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2000, 46(4): 1204-1216

[8] Sachin K, Hariharan R, Hu Wen-jun, et al. XORs in the air: practical wireless network coding[C]//Proc of the 2006 Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications. New York: ACM Press, 2006: 243-254

[9] Hou I H, Tsai Yu-en, Abdelzaher T F, et al. Adapcode: adaptive network coding for code updates in wireless sensor networks[C]//Proc of The 27th Conference on Computer Communications. Phoenix: IEEE Press, 2008: 13-18

[10] Lorenzo K, Emre A, Katerina A, et al. Sensecode: network coding for reliable sensor networks[J]. ACM Transactions on Sensor Networks, 2013, 9(2): 1-13

[11] Rout R R, Ghosh S K. Enhancement of Lifetime using Duty Cycle and Network Coding in Wireless Sensor Networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(2): 656-667

[12] Heinzelman W R, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy-efficient communication protocol for wireless micro sensor networks [C]//Proc of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences. Phoenix: IEEE Press, 2000: 4-7

[13] Hill J L, Culler D E, Mica: a wireless platform for deeply embedded networks[J]. IEEE MICRO, 2002, 22(6): 12-24

(上接第 257 页)

参考文献

[1] Yanni P. Modeling Comm Planning and Advanced Datalinks in the DIS Environment[C]//Simulation Interoperability Workshops. 1997

[2] Air Land Sea Application Center. Introduction to Tactical Digital Information Link J and Quick Reference Guide[R]. 2000

[3] Ni S, Tseng Y, Chen Y, et al. The Broadcast Storm Problem in a

Mobile Ad Hoc Network[C]//ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking. 1999: 151-162

[4] JTIDS/MIDS. Spectrum users guide (Version 1. 1)[R]. United States of America Department of Defense, 2000

[5] Jacquet P, Muhlethaler P, Clausen T, et al. Optimized Link State Routing Protocol for Ad Hoc Networks[C]//IEEE International Multi Topic Conference, 2001. 2001: 62-68

[6] Clausen T, Jacquet P. Optimized link state routing protocol (OLSR)[M]. IETF RFC3626, 2003