

无线传感器网络中确保端到端传输质量的自适应调制缩放技术^{*}

袁 勇 杨宗凯 何建华

(华中科技大学电子与信息工程系 武汉 430074)

摘 要 在满足数据收集任务的时延要求及可靠性要求的前提下最小化能量消耗是传感器网络设计中的一个关键问题。选取不同的调制级数(即调制时的星座图大小,每符号位数)可以获得不同程度的能量节省,但引入不同程度的时延的同时也会造成不同程度的丢包。本文提出了一种优化模型在满足数据收集任务的时延要求及可靠性要求的前提下,最优选取各节点的调制级数以最小化网络能耗延长网络生命期。并在此基础之上提出了一个集中式控制算法以根据网络状况自适应地调节各节点的调制级数。实验表明本算法在所考查的各种网络环境下都能明显减少能耗,可以用该模型来确定时延及丢包率对能耗影响的敏感区。另外我们发现,如果将节点的服务率设置为与节点的包到达率近似成比例,在大多数情况下都能够获得好的节能效果。

关键词 无线传感器网络,自适应调制缩放技术

The Adaptive Modulation Scaling Technology Ensuring End-to-End Transmission Quality in Wireless Sensor Networks

YUAN Yong YANG Zong-Kai HE Jian-Hua

(Department of Electronics and Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

Abstract To minimize the energy consumption without violating the end-to-end transmission latency constraint and reliability requirement of application is a key concern of data gathering in wireless sensor networks. Adaptively adjusting modulation level (number of bits per symbol) of each node will save energy significantly but introducing some latency and packet loss. This paper provides an optimization model to minimize energy consumption and prolong the lifetime of network under the transmission requirement of application by optimally choose the modulation level of each node. A centralized optimization mechanism is developed based on this model, which adaptively adjusts the modulation levels according to the state of network. Experimental results show that the management mechanism saves significant energy in all the investigated scenarios. And the model can be used to determine the sensitive ranges of constraints on latency and packet loss, which have large impacts on the overall energy consumption. Another interesting finding is that the optimal packet service rate of each node is proportional to the packet arrival rate in most scenarios.

Keywords Wireless sensor network, Adaptive modulation scaling

1 引言

数据收集是传感器网络的主要任务,不同应用的数据收集任务所需质量是不同的。由于传感器网络很难考虑节点的充电问题,节省能量以延长网络的生命期是传感器网络设计时必须考虑的一个关键问题。数据收集应该以一个能量有效的方式进行,在满足应用要求的前提下尽可能地节省能量^[1~4]。传感器网络的节能设计可以从单个节点,节点间的链路以及整个网络的角度来考虑^[4]。在单个节点上可以考虑诸如动态电压缩放(DVS),节能算法设计,功率管理等技术来实现节能。从整网的角度来看,可以通过拓扑控制等技术实现节能的目的。无线通信是能耗的主要部分,考虑节点间链路上无线通信的节能技术往往能获得显著的能量节约。有一项关键技术就是调制缩放技术(Modulation Scaling),可以根据瞬时通信负载对节点调制级数进行动态改变获得明显的能量节约,但同时会引入不同程度的时延。

现已有很多工作利用调制缩放技术达到节能的目的^[1~3],它们所关心的是权衡能耗与传输时延之间的关系,在满足时延要求的情况下最优选取节点的调制级数以最小化能耗。它们所考虑的时延大多数都是传输时延而没有考虑数据包在每个节点排队造成的时延,这在节点的数据包到达率比较低,而节点的传输带宽又比较大的情况下是合理的,在这种

情况下,排队造成的时延可以忽略。但对于传感器网络而言,节点的传输带宽是有限的,而传感器网络的应用非常广泛,在很多应用中,数据源的包到达率是很高的,比如:现在传感器网络上越来越多的 Video 监测应用^[5],因此传感器网络中数据包的排队时延是必须考虑的。另外,由于节点的缓冲容量是有限的,还存在由于缓冲区溢出所造成的丢包问题。为了在传感器网络中采用调制缩放技术进行节能,有必要分析各节点不同调制级数的设置对整网时延、丢包率性能的影响。本文利用排队论分析各节点不同调制级数设置在不同的缓冲区大小、包到达率的情况下对整网的时延、丢包率性能的影响,提出了一个最优选取各节点调制级数的优化模型,并依此设计出一种集中式机制控制源节点以及传输节点的调制级数的设置。具体分析结果将在第 4 节给出。

在以本文研究相关的工作中^[1~3],Prabhakar 等人根据权衡传输时延与传输能量的思想,设计了一对节点间(一个发送者一个接收者)通信时的最优包调度的算法,在满足通信时延的要求下,显著地节省了能量的消耗^[1]。Gamal 等人分析了一对多的通信情况下的节能问题,提出了一个称为 MoveRight 的算法进行包传输的最优调度^[2]。但他们都只是从单跳的通信问题出发来寻求在满足单跳时延的前提下节省能量。而事实上,对传感器网络而言,整网传输的时延和传输的可靠性才是应用最关心的问题,我们应该寻求整网传输时延和传输可

^{*} 本项研究受国家自然科学基金项目支持,项目编号:60202005。

靠性与节能之间的协调问题。Yang Yu 等人深入考虑了传感器网络中“数据聚合树”拓扑结构中源到 sink 的整体时延与“数据聚合树”各段链路传输能量之间的问题,提出了一个优化模型以最优选取各节点的传输速率以在保证整体时延的前提下最小化整体能量的消耗^[3]。本文所考虑的问题与文[3]比较相似,所不同之处在于本文考虑了数据包在各节点排队时造成的时延及由于有限容量所造成的丢包问题,在此基础上,考虑了如何在满足应用的时延要求及可靠性要求的前提下,采用调制缩放技术的思想,最优地选取节点的调制级数以最小化能量消耗。

本文在第 2 节提出了问题的定义,进行了模型的假设并将问题抽象成对应的数学问题,第 3 节建立了模型并给出了相应的集中式控制策略,第 4 节给出了实验结果并进行了讨论,最后总结全文并给出了今后的研究方向。

2 问题定义

本文所要解决的问题是,在保证整网传输时延和传输可靠性满足应用要求的前提下,最优地选取每个节点的调制级数以最小化能量消耗。为了解决问题,我们必须将问题抽象成对应的数学问题,并在一定的假设条件下建立分析模型以研究各节点调制级数与整网能耗,传输时延及传输可靠性之间的关系。我们在 2.1 节给出了问题求解的一些假设条件,在 2.2 节中抽象出对应的数学问题。

2.1 模型假设

为了进行求解,我们做了下面的假设:

- 节点的无线模块可以选择多种调制级数;
- 每个节点的缓冲区最多能缓存 N 个包;
- 网络传输以“数据聚合树”为拓扑结构^[6],并忽略聚合操作所用的时间和能量;
- sink 端计算能力和能量无限, sink 端知道整网的“数据聚合树”的拓扑结构,并有每个数据源节点的包到达率的信息;
- 假设冲突已通过空分,或者码分多址的方法得到解决^[7],因此模型中不考虑冲突的问题;
- 假设“数据聚合树”中的任一段链路都是可靠的;
- 当数据包到达每个节点时,如果该节点的缓冲区已经占满,该包既被丢弃,不考虑重传的情况,因为这样会造成能量消耗的恶化;
- 假设源节点数据包的到达服从泊松过程,数据包的长度服从负指数分布且均值为 s 。

2.2 抽象出对应的数学问题

为了解决问题,我们必须将问题抽象成对应的数学问题。设节点集为:

$$V = V_s \cup V_r \cup \{sink\} = \{S_1, S_2, \dots, S_m\}, \{r_1, r_2, \dots, r_n\}, sink$$

其中 V_s 是源节点集, V_r 是中间节点集。

由于假设了源节点的数据包的到达服从泊松过程,数据包的长度服从负指数分布,节点能缓存包的容量是有限的,因此数据包在源节点的排队问题可以看作是一个有限容量 $M/M/1$ 排队系统的排队问题^[8]。

对源集中的节点 $j \in V_s$, 设包的到达率为 λ_j , 包的服务率为 u_j , 包的输出率为 O_j 。定义源节点队列中包的数目为节点的排队系统状态, 则状态集为 $\{S_0, S_1, \dots, S_N\}$, 设各状态相应的平稳概率分布为 $\{P_0, P_1, \dots, P_N\}$ 。 S_0 为队列中没有数据包的状态, 节点除了处于这一状态外都有包在发送, 因此其包的输出率为 $O_j = (1 - P_0) u_j$ 。根据排队论, 节点数据包的输出仍

服从泊松过程。设包的平均逗留时间为 W_j , 丢包率为 $P_{Lj} = P_N$, 在服务率为 u_j 的情况下服务一个包需要的平均能量为 $E(u_j)$ 。

对中间节点集中的节点, $j \in V_r$, 设其在“数据聚合树”中的子节点集合为 V_{rj} 。对中间节点 j 而言, 其到达的数据包是其子节点输出的数据包之和。由于前面已论述节点数据包的输出仍然服从泊松过程, 因此中间节点 j 的数据包的到达仍然满足泊松过程, 其到达率为 $\lambda_j = \sum_{k \in V_{rj}} O_k$ 。设其服务率为 u_j , 输出率为 O_j , 同样, 数据包在中间节点的排队问题也可以看作是一个有限容量 $M/M/1$ 系统的排队问题。类似于源节点的情形, 设其排队系统状态为 $\{S_0, S_1, \dots, S_N\}$, 各状态相应的平稳概率分布为 $\{P_0, P_1, \dots, P_N\}$ 。则 $O_j = (1 - P_0) u_j$ 。设包的平均逗留时间为 W_j , 丢包率为 $P_{Lj} = P_N$, 在服务率为 u_j 的情况下服务一个包需要的平均能量为 $E(u_j)$ 。

对源集中的每一个节点 $j \in V_s$, 定义 L_j 为源节点 j 到 sink 通信在聚合树 T 中的路径。则每个源节点的总时延为 $W_{A_j} = \sum_{k \in L_j} W_k$, 丢包率为 $P_{LA_j} = 1 - \prod_{k \in L_j} (1 - P_{Lk})$

因此本模型所考虑的问题可以抽象成一个数学优化问题:

$$\text{优化目标为: } \min_{j \in V_s, UV_r} \sum E(u_j)$$

约束条件为: a) 对每个源节点 $j \in V_s$, 而言, 总的时延 $W_{A_j} \leq T$; b) 对每个源节点 $j \in V_s$, 而言, 总的丢包率 $P_{LA_j} \leq P_{loss}$ 。

由于节点的服务速率取决于节点的调制级数, 因此一旦确定出最优的服务速率就可以得到最优的调制级数, 从而最小化能耗。

抽象出了对应的数学问题后, 下面就可以在假设的情况下进行建模并求解了。

3 模型建立及优化算法设计

根据上一节抽象出的数学问题, 我们将分析数据包在每个节点所经历的时延及丢包率以节点不同的服务率与能耗的关系, 并根据分析得到的结果在上一节的假设条件下建立确定最优调制级数的优化模型。然后利用模型设计一种集中式优化算法, 根据数据产生的流量自适应调整各节点调制级数, 达到在满足应用要求的前提下最小化能耗的目的。

在第 2 节中我们已经假设了每个节点可以看成是一个有限容量的 $M/M/1$ 排队系统。数据包在每个节点所经历的时延及丢包率与节点服务率之间的关系在有限容量 $M/M/1$ 排队系统的研究中已经有现成的结果^[8]。本文将不列出具体的推导, 我们将在 3.1 节中研究节点不同服务率与能耗之间的关系, 在 3.2 节中建立优化模型。最后, 我们在 3.3 节中根据所建立的优化模型设计了一个集中式优化算法。

3.1 服务率—能量表达式: $E(u)$

为了研究节点在服务率为 u 的情况下服务一个包需要的平均能量, 我们需要研究节点在发送时的能量消耗的情况。文[9]将无线模块在传输数据时所花费能量归纳为两个部分, 即为保证传输质量所花费的输出能量和电路部分所花费能量, 其功耗分别如下计算:

$$P_o = C \cdot R \cdot (2^b - 1) \quad (1)$$

$$P_c = F \cdot R \quad (2)$$

其中 R 为符号率 (Symbol rate), b 为 Modulation level (Constellation size), C 是一个常数取决于所要求的传输质量, F 是一个常数取决于输出电路。对 Berkeley Mote, $R = 10\text{kbps}$ 。当 $P_c = 10\text{mw}$, P_o 在 $b = 4$ 的时候为 1mw , 利用上述两个公式可

以推出: $F=1e-6, C=6.67e-9$ 。

若传输一个数据包的平均时间为 τ , 则其对应的能量消耗为:

$$E=[C \cdot (2^b-1)+F] \cdot \tau \cdot R \quad (3)$$

对于源节点而言, 一个数据包的平均服务时间即为传输 s 位数据量所需要的时间。即

$$\frac{1}{u} = \tau = \frac{s}{b \cdot R}, \text{由此可推出 } b = \frac{su}{R}, \text{代入式(3)可得:}$$

$$E(u)=[C \cdot (2^{\frac{su}{R}}-1)+F] \cdot \frac{1}{u} \cdot R \quad (4)$$

对于中间节点而言, 一个数据包的平均服务时间除了取决于该节点传输数据位的速率外, 还取决于该包经过聚合后需要传输的数据量。聚合后数据的输出量取决于待聚合数据之间的相关性, 文[3]提出使用“聚合因子”来描述待聚合数据之间的相关性。设各节点间数据的“聚合因子”为 $k \in [0, 1]$, 若节点有 d 个子节点, 每个节点发出一个大小为 s 的数据包, 则节点收到 d 个大小为 s 的数据包, 聚合后需发送的数据量为 $s' = \frac{ds}{dk-k+1}$, 平均下来, 相当于每个数据包在聚合后需要传送的数据量为 $\frac{s'}{d} = \frac{s}{dk-k+1}$ 。

因此每个包的平均服务时间为 $\frac{1}{u} = \frac{s}{(dk-k+1)bR}$, 由此可推出服务率为 u 时的调制级数为 $b = \frac{su}{(dk-k+1)R}$, 对应的能量函数为:

$$E(u)=[C \cdot (2^{\frac{su}{(dk-k+1)R}}-1)+F] \cdot \frac{1}{u} \cdot R \quad (5)$$

图 1 给出了 $d=2$ 和 $k=0.5$ 条件下 $E(u)$ 的曲线。从图 1 可见, $E(u)$ 并不是 u 的单调函数, 而是一个在 u_{\min} 处取最小值的上凹函数。 u 的选取若小于 u_{\min} 是没有意义的, 因为如果选取一个小于 u_{\min} 的服务率, 其对应的能量消耗大于 $E(u_{\min})$ 。这种情况下降低服务速率反而增加了能量消耗。因此 u 可选的范围是 $u \geq u_{\min}$ 。

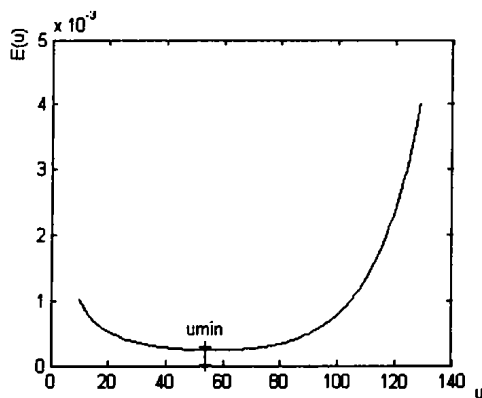


图 1 $E(u)$

另外, 节点的调制级数 b 一般只能选择为 2 的整数倍, 如 4-QAM, 8-QAM 等, 且在诸如传感器网络节点这样的低端设备上一般不会超过 $16^{[4]}$ 。所以 u 的选取范围为 $\{u_b; b=2, 4 \dots 16, u_b=(dk-k+1)bR/s\}$ 。

3.2 优化模型

根据上面的分析, 得出了下面的优化模型。

Definitions:

$$V=V_s \cup V_r \cup \{sink\} = \{S_1, S_2, \dots, S_m\}, \{r_1, r_2, \dots, r_n\}, sink$$

j 节点的包到达率:

$$\lambda_j = \begin{cases} \sum_{i \in V_{ij}} O_i, & j \in V_r \\ \lambda_j, & j \in V_s \end{cases}$$

j 节点的包输出率:

$$O_j=(1-P_0(u_j, \lambda_j))u_j$$

j 节点队列为空的概率: $P_0(u_j, \lambda_j)$

j 节点队列满的概率: $P_{L_j}(u_j, \lambda_j)=P_N(u_j, \lambda_j)$

j 节点的平均队长: $L_j(u_j, \lambda_j)$

j 节点包的平均逗留时间: $W_j(u_j, \lambda_j)$

j 节点服务率为 u_j 的情况下, 平均服务一个包的所需能量(对源节点 $d=1, k=0$):

$$E(u_j)=[C \cdot (2^{\frac{su_j}{(dk-k+1)R}}-1)+F] \cdot \frac{1}{u_j} \cdot R$$

Find the optimal set: $\{u_j^*\}$

Minimize: $\sum_{j \in V_s \cup V_r} E(u_j)$

Subject to:

a) 所有源站的数据包到达 *sink* 的时延 $\leq T$, 即 $\forall j \in V_s,$

$$W_{A_j} = \sum_{i \in L_j} W_i(u_i, \lambda_i) \leq T$$

b) 所有源站的数据包总丢包率 $\leq P_{loss}$, 即 $\forall j \in V_s, P_{IA_j} =$

$$1 - \prod_{i \in L_j} (1 - P_{N_i}(u_i, \lambda_i)) \leq P_{loss}$$

c) 各站服务率的可能取值范围为 $\{u_b; b=2, 4, \dots, 16, u_b=(dk-k+1)bR/s\}$

求解上面的优化问题, 得出的最优解既是可以满足应用时延、丢包率要求, 且最小化总能量消耗的各节点服务速率, 从而可以进一步定出各节点最优的调制级数。又由于各节点的调制级数一般只能选取为偶数且小于 16, 另外能量函数是服务速率 u 的一个上凹函数, u 的选取只可能大于其最小值处的 u 值, 这样就大大限制了 u 的搜索范围, 使优化问题容易求解。

3.3 集中式优化算法

为了在传感器网络中使用这一模型我们设计了下面的集中式控制算法, 由 *sink* 根据网络的状况、应用的要求确定出各节点的调制级数设置。

a) 网络在初始化构建“数据聚合树”时, 各节点将自己在“数据聚合树”中的父节点信息传递给 *sink*。*sink* 根据收集到的这些信息构建“数据聚合树”结构。各节点测量其数据包到达率并传递给 *sink*, 这样 *sink* 就有了“数据聚合树”的拓扑结构、各节点的数据包到达率, 再根据应用的时延要求及丢包率要求通过 3.2 节的优化模型确定出最优的各节点调制级数。*sink* 将得到的各节点最优调制级数传递给相应节点由其设置成为调制时使用的调制级数。

b) 在通信的过程中数据源节点周期性地测量其包到达率, 若前后两次包到达率的变化超过一定阈值的话, 就将新的包到达率传递给 *sink*, *sink* 重新根据模型计算出各节点的最优调制级数并通知各节点改变其调制级数。这样就可以根据数据产生的流量自适应调整各节点调制级数。

4 实验及讨论

根据上一节提出的模型, 我们在 Matlab 中进行了仿真实验, 以研究不同时延、丢包率要求对总能量消耗的影响及对各站点的最优调制级数选取的影响, 我们对实验结果以及它们对传感器网络设计的指导进行了分析和讨论。本节将论述实验的过程, 实验中观察得到的结果并讨论本模型在传感器网络设计中具有指导意义的结论。

4.1 实验的设置及参数的选取

为了简化问题, 实验中我们假设了如图 2 所示的“数据聚合树”结构:

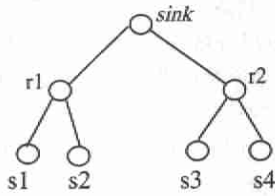


图2 聚合树的拓扑结构

实验中节点传输的符号率 $R=10\text{kbps}$ 。能耗模型中, $F=1e-6, C=6.67e-9$ 。包长 $s=1\text{kbit}$ 。“聚合因子” $k=0.5$ 。数据源的数据产生率如下所示: S_1 数据产生率为 40kbps , 相当于包到达率 $\lambda_1=40$ 包/s; S_2 数据产生率为 50kbps , 相当于包到达率 $\lambda_2=50$ 包/s; S_3 数据产生率为 70kbps , 相当于包到达率 $\lambda_3=70$ 包/s; S_4 数据产生率为 30kbps , 相当于包到达率 $\lambda_4=30$ 包/s。

4.2 时延以及丢包率要求对能耗和节点最优调制级数选取的影响

通过改变时延和丢包率要求, 我们可以观察总能量消耗和节点最优调制级数选取随时延和丢包率要求而变化的规律。实验中时延变化范围为 20ms 到 200ms , 丢包率变化范围为 $6e-8$ 到 $3e-4$ 。图3给出了在时延要求和丢包率要求变化的情况下总能量的变化趋势。

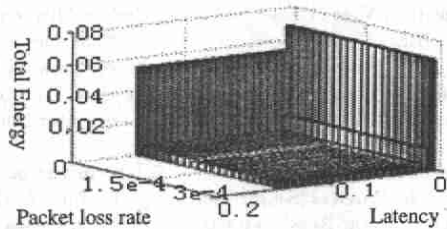


图3 Total energy versus QoS requirement

图4至图9分别给出了源节点 S_1, S_2, S_3, S_4 , 中间站 r_1, r_2 在时延要求和丢包率要求变化的情况下的最优调制级数选取的变化趋势。

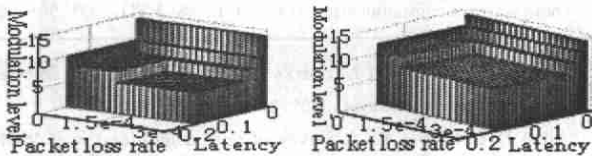


图4 Modulation Level of S1 图5 Modulation Level of S2

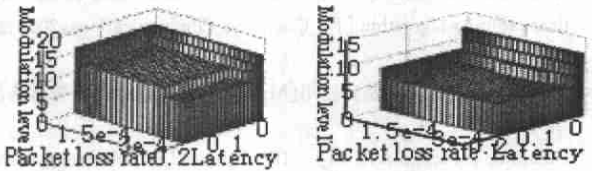


图6 Modulation Level of S3 图7 Modulation Level of S4

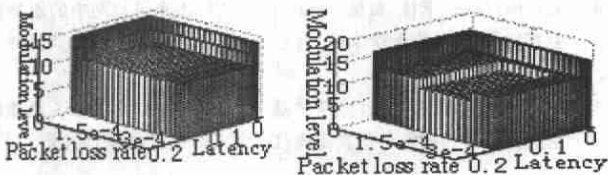


图8 Modulation Level of r1 图9 Modulation Level of r2

由图3可见, 在源节点的数据包到达率一定的情况下, 时延要求只在一定范围内对总能量消耗有显著影响, 在本实验设置的情况下, 这个范围大约在 $(0, 80\text{ms})$ 。当时延要求不在这个范围时, 总能量消耗受时延要求的影响不大。我们定义这个时延区域为模型的“时间敏感区”, 这个区域内的总能量消耗主要受限于时延的要求。

同样, 在源节点的数据包到达率一定的情况下丢包率要求也只在一定范围内对总能量消耗有显著影响, 在本实验设置的情况下, 这个范围大约在 $(0, 1.2e-4)$ 。当丢包率要求不在这个范围时, 总能量消耗受丢包率要求的影响不大。我们定义这个时延区域为模型的“丢包率敏感区”。这个区域内的总能量消耗主要受限于丢包率的要求。

从图4到图9可以观察到, 时延要求与丢包率要求对各节点的调制级数的选取的影响是不同的。一般而言都只在一定范围内对节点的最优调制级数的选取有明显影响, 超过这一范围后, 各节点的最优调制级数的选取都趋向于恒定。而且时延要求和丢包率要求对包到达率大的节点的最优调制级数选取的影响比较大, 如 S_3 和 r_2 , 这说明在满足应用的时延和丢包率要求的前提下, 这些节点的调制级数的选取对整个系统的影响很大, 模型倾向于调节这些节点的参数。

另外, 在实验中, 我们观察到在大多数时延和包到达率要求的情况下, 源节点和中间节点最优选取的包服务率是和该节点上包的到达率近似成正比的。

图10给出了反映各节点到达率比例关系的饼图, 其中中间节点 j 的到达率近似用下式估计:

$$\lambda_j = (\sum_{i \in S_j} \lambda_i) / (dk + k - 1) \quad (6)$$

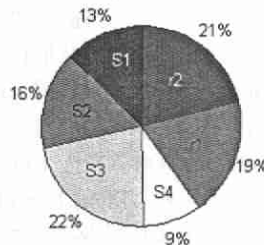


图10 Pie of arrival rate

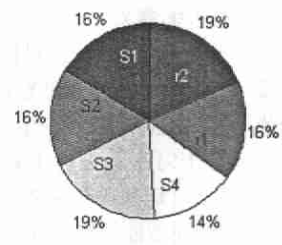


图11 Pie of service rate

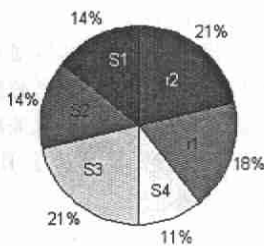


图12 Pie of service rate

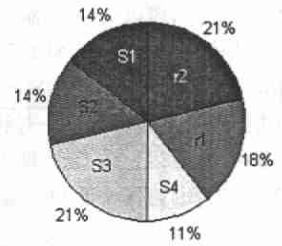


图13 Pie of service rate

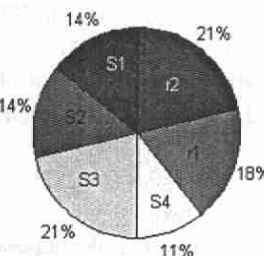


图14 Pie of service rate

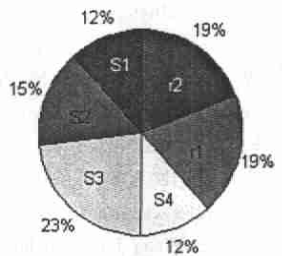


图15 Pie of service rate

图 11 到图 15 分别给出了反映各节点最优包服务率比例关系的饼图。从图 10 到图 15 可以看出各站的包服务率的比例和各站的包到达率的比例很相似。这说明在传感器网络设计时,一种简单可行的办法是将各个节点的服务率设置为其包到达率成正比,这样往往能获得更小的时延和丢包率,而且整网也能够节省能量。虽然这不是最优的设置方法,但在大多数情况下都能得到性能的改善。

4.3 实验结论

经过上述实验,我们可以得出下面的结论:

a)模型在各项参数发生变化时均能得到合理的结果并明显地减少了能量的消耗。

b)发现在一定的源节点包到达率的情况下,能量的消耗对时延要求而言,只在一定范围类受限于时延,当所要求的时延不在这一范围内时,可以不需重点考虑时延要求带来的问题。

c)发现在一定的源节点包到达率的情况下,能量的消耗对丢包率要求而言,只在一定范围类受限于丢包率要求,当所要求的丢包率要求不在这一范围内时,可以不需重点考虑丢包率要求带来的问题。

d)经观察发现,最优的节点服务率在大多数时延及丢包率要求下都近似和其包到达率成正比,这样在网络设计时可以通过设定包服务率与其包到达率成正比,来得到性能的改善。

结论 本文提出了一个优化模型,并利用该模型设计了一种集中式优化算法,该模型在保证整网传输时延和丢包率满足应用要求的前提下,最优地选取各节点的调制级数以最小化能量消耗延长网络的生命期。本模型综合考虑了节点能量,计算能力,带宽及存储量受限的情况下,因为排队而造成的时延及丢包的问题,采用排队论和优化理论对问题进行了建模。经实验表明本模型在各种情况下都能够明显地减少能量的消耗,并且发现:在一定的网络结构及各源节点的包到达率的情况下时延及丢包率要求对能耗的影响存在一个敏感区,只有当时延和丢包率要求处于敏感区内对能量消耗的影响才显著,模型能够确定这一区域;节点的最优服务率在大多

数情况下都和其包到达率近似成比例,这样在一般的传感器网络设计中可以设定各站的服务率与其到达率成正比来得到性能的改善。这些结论对传感器网络的设计都是很有意义的。

今后的研究工作将主要从下面几个方面入手:

a)考虑集中控制与分布式自治相结合的策略,进一步改进该模型,使其考虑各节点能够根据自身周围环境对其调制级数的调整问题,并分析其对整体性能的影响。

b)考虑有多个 sink 的情况。当有多个 sink 时,每个 sink 提出的信息收集任务的质量要求是不一样的,需要综合考虑不同质量要求的数据包流在各节点的调度问题。

c)分析并采用更多的节能技术来达到满足任务质量要求的前提下最小化能量消耗。

参考文献

- 1 Prabhakar B, Uysal-Biyikoglu E, Gamal A E. Energy-efficient Transmission over a Wireless Link via Lazy Packet Scheduling. In: Proc. of IEEE INFOCOM, Anchorage, Alaska, March 2001, 1: 386~394
- 2 Gamal A E, et al. Energy-efficient scheduling of packet transmissions over wireless networks. In: Proc. of IEEE INFOCOM, New York: USA, June 2002, 3: 1773~1782
- 3 Yu Y, Krishnamachari B, Prasanna V K. Energy-Latency Trade-offs for Data Gathering in Wireless Sensor Networks. to appear in IEEE INFOCOM 2004
- 4 Raghunathan V, et al. Energy-Aware Wireless Microsensor Networks. IEEE Signal Processing Magazine, 2002, 40~50
- 5 Foresti G L, Snidaro L. A distributed sensor network for video surveillance of outdoor environments. In: Intl. Conf. on Image Processing, (ICIP '02), New York, USA, September 2002, 1: 22~25
- 6 Krishnamachari B, Estrin D, Wicker S. The Impact of Data Aggregation in Wireless Sensor Networks. In: Intl. Workshop on Distributed Event-Based Systems, (DEBS '02), Vienna, Austria, July 2002. 575~578
- 7 Roy S, Wang H Y. Performance of CDMA slotted ALOHA multiple access with multiuser detection. In: Wireless Communication and Networking Conf. 1999, 2: 839~843
- 8 Takacs L. Introduction to the Theory of Queues. Oxford University Press, New York, 1962
- 9 Schurgers C, Aberborne O, Srivastava M. Modulation scaling for energy-aware communication systems. In: ISLPED, 2001. 96~99

(上接第 27 页)

改进得到的,所以 AIA 的解在整体上优于 GA。

结论 本文基于 AIA 和波长图思想,构造 QoS 组播路由算法,以支持 IP/DWDM 光因特网中的组应用。波长分配和构造组播路由树在同一过程中完成,既考虑了费用,又兼顾了端到端延迟。仿真结果表明,该算法较好地解决了 IP/DWDM 光因特网中的 QoS 组播路由问题。

参考文献

- 1 Hadrien L, Anes H, Klaus P. Analytical model for the performance evaluation of DWDM transmission systems [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2003, 15(9): 1219~1221
- 2 Wittmann R, Zitterbart M. Multicast communication: protocols, programming, and applications [M]. San Francisco, CA: Morgan Kaufman, 2000
- 3 Xiao X P, Ni L M. Internet QoS: the big picture [J]. IEEE Network, 1999, 13(2): 1~13
- 4 Chen B, Wang J P. Efficient routing and wavelength assignment for multicast in WDM Networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2002, 20(1): 97~109
- 5 Aijun D, Gee-Swee P. A survey of optical multicast over WDM networks [J]. Computer Communications, 2003, 26(2): 193~200
- 6 Kuipers F, Mieghem P V. MAMCRA: a constrained-based multicast routing algorithm [J]. Computer Communications, 2002, 25(8): 802~811
- 7 王凌. 智能优化算法及其应用[M]. 清华大学出版社, 施普林格出版社, 2001
- 8 Chlamtac I, Farago A, Zs [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1996, 14(5): 909~913
- 9 王兴伟, 程辉, 李佳, 黄敏. 一种 IP/DWDM 光因特网中的组播路由算法[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2003, 24(12): 1165~1168
- 10 程辉. IP/DWDM 光因特网中基于智能计算方法的 QoS 组播路由选择机制的研究与仿真实现[D]. 沈阳: 东北大学, 2004