

无线多媒体传感器网络视频流多路径路由算法*

曹 啸^{1,2+}, 王汝传^{1,2,3}, 黄海平^{1,2,3}, 孙力娟^{1,2,3}, 肖 甫^{1,2,3}

¹(南京邮电大学 计算机学院, 江苏 南京 210003)

²(南京邮电大学 江苏省无线传感网高技术研究重点实验室, 江苏 南京 210003)

³(南京邮电大学 宽带无线通信与传感网技术教育部重点实验室, 江苏 南京 210003)

Multi-Path Routing Algorithm for Video Stream in Wireless Multimedia Sensor Networks

CAO Xiao^{1,2+}, WANG Ru-Chuan^{1,2,3}, HUANG Hai-Ping^{1,2,3}, SUN Li-Juan^{1,2,3}, XIAO Fu^{1,2,3}

¹(Department of Computer Science and Technology, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

²(High Technology Research Key Laboratory of Wireless Sensor Networks of Jiangsu Province, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

³(Key Laboratory of Broadband Wireless Communication and Sensor Network Technology, Ministry of Education, Nanjing 210003, China)

+ Corresponding author: E-mail: tsaoxiao@gmail.com, http://www.njupt.edu.cn

Cao X, Wang RC, Huang HP, Sun LJ, Xiao F. Multi-Path routing algorithm for video stream in wireless multimedia sensor networks. Journal of Software, 2012, 23(1): 108-121. http://www.jos.org.cn/1000-9825/4070.htm

Abstract: A variety of QoS guarantee is to be needed in the real-time transmission of video stream in wireless multimedia sensor networks. A multi-path routing algorithm ACMRA (ant colony based multipath routing algorithm) based on improved ant colony algorithm is proposed in this paper to find the paths set which includes paths according to different priorities. It also takes the importance of video data into consideration when making path choice. The improved ant colony algorithm enjoys faster finding and convergence speed by optimizing the initial distribution of artificial pheromone on network link. By introducing the multi-path mechanism throughput, the network and video transmission performance are both enhanced, while it also balances network resources and prolongs the network life cycle. Compared with the other classic routing algorithm, the experimental results illustrate that ACMRA has obvious advantages in terms of raising network, video transmission performance, and extending the network life cycle.

Key words: wireless multimedia sensor networks; ant colony algorithm; multi-path; video stream; QoS routing

* 基金项目: 国家自然科学基金(60973139, 60903181, 61003039, 61003236); 江苏省科技支撑计划(工业)(BE2010197, BE2010198); 江苏省现代服务业发展专项资金与江苏省高校自然科学基金基础研究项目(10KJB520013, 10KJB520014); 高校科研成果产业化推进工程项目(JH10-14); 江苏省科技创新计划(CX09B-153Z, CX10B-197Z, CX10B-200Z); 教育部博士点基金(20103223120007); 江苏省六大高峰人才项目(2008118); 江苏省计算机信息处理技术重点实验室基金(KJS1022); 南京邮电大学引进人才项目(NY210077); 东南大学计算机网络和信息集成教育部开放研究基金(K93-9-2010-13); 江苏高校优势学科建设工程项目(yx002001)

收稿时间: 2010-08-18; 定稿时间: 2011-01-20

摘要: 无线多媒体传感器网络中的视频流传输,需要提供多样 QoS 保障.提出一种基于改进蚁群算法多路径路由算法 ACMRA(ant colony based multipath routing algorithm),以寻找具有多种优先级路径的路径集,并对重要性不同的视频数据进行相应路径的选择.通过优化网络链路上人工信息素的初始分布,改进后的蚁群算法具有更快的可行路径发现速度及收敛速度.多路径机制的引入提高了网络数据吞吐量与视频传输性能,同时可均衡网络资源,延长网络生命.实验结果表明,算法 ACMRA 在网络性能、视频传输性能与网络生命周期方面,较之其他路由算法具有明显优势.

关键词: 无线多媒体传感器网络;蚁群算法;多路径;视频流;QoS 路由

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A

无线多媒体传感器网络^[1,2]由具有处理能力、存储能力与无线通信能力的多媒体传感器节点构成,其通过集成于节点上的多媒体传感器,如 CMOS 摄像头、微型麦克风协作地感知外部环境,将图像、音频、视频等多媒体信息传输给终端用户.视频流传输是无线多媒体传感器网络中的典型应用,视频传感器节点(video sensor node,简称 vsn)经过多跳将视频数据传输至汇聚节点 sink.无线多媒体传感器网络中视频流传输应考虑如下两点因素^[3]:

- (1) 流媒体数据对 QoS 有严格要求,如带宽、时延、时延抖动、丢包率等.
- (2) 均衡全网能量,延长网络生命.

经典无线传感器网络路由协议,如 Directed Diffusion^[4]等,由于利用单路径传输数据且没有对网络 QoS 参数加以保障,能耗过于集中,需要频繁且周期性地通过“洪泛”方式维护网络路由信息,不适于视频流应用.本文提出一种基于改进蚁群优化算法的多路径路由算法 ACMRA(ant colony based multipath routing algorithm),以保障视频流传输质量,优化全网资源.

1 研究现状

无线多媒体传感器网络中,用于视频数据传输的路由协议主要是基于 QoS 感知路由协议^[5].早期 QoS 感知的路由算法仅仅考虑单个 QoS 参数要求,如网络传输的实时性或是数据传输的可靠性.SAR 路由协议^[6]是传感器网络中第一个 QoS 感知多路径路由,其在选择路由时不仅要考虑每条链路的端到端时延,还需考虑路径的能耗以及数据包优先级,但是路由维护算法极为复杂,需维护多个树结构,因此并不适合拓扑变化频繁的无线传感器网络.SPEED 路由协议^[7]是一种实时路由协议,其通过链路延迟估计机制,以预测网络拥塞,利用节点局部地理信息和传输速率做出路由决定.MMSPEED^[8]在 SPEED 的基础上增加多路径传输机制,以提高路由算法的可靠性.文献[9]中,Deb 等人提出了一种多路径路由 ReInForM,其通过发送数据包的多份副本,以确保数据传输的可靠性.文献[10]中,孙岩等人提出了一种多 QoS 保障的路由算法 ASAR,通过加权平均网络 QoS 参数并设置相应权重因子,利用蚁群算法进行路由选择,但其针对每种多媒体服务仍是单路径路由,对视频传输并没有加以特殊保障.ASAR 算法仿真时仅用 20 个节点,对于规模较大的网络,其可行性并没有给出分析.

随着无线多媒体传感器网络研究的不断深入,出现了专门针对多媒体数据传输的路由机制.文献[11]中, Kandris 等人设计了一种利用视频失真预测模型机制的 QoS 路由算法 PEMuR,其缺点在于失真预测需额外地计算开销,这对资源有限的传感器网络而言是不现实的.文献[12]中,Dai 等人提出了一种基于视频图像相关性的 QoS 感知路由算法 CARQ,基于图像相关性的编码策略,通过负载均衡策略将视频数据分配到不同路径上进行传输.Fonoage 等人在文献[13]中提出一种基于数据包优先级的地理信息路由算法,但地理信息的获取需额外的定位设备或定位算法加以辅助.QoSNET^[14]是一种基于多路径的 QoS 网络,其将网络分为两部分以建立多路径:一部分节点偶尔做出一些路由选择,而另一部分节点则完全用于路由选择.EQSR^[15]是基于服务区分的多路径 QoS 路由协议,通过区分不同服务的数据,将较为重要的数据通过分片编码的方式分散到多条路径中进行传输,以增强网络的整体吞吐量,但对数据重新编码同样增加了网络的额外开销.在实验仿真中,Yahya 等人给出了相关实验结果.Cobo 等人提出了一种基于分簇结构的多 QoS 保障路由协议 AntSensNet^[16],其通过建立多 QoS 参

数的数学模型,利用蚁群算法寻找使得目标函数值最大的路径,但在大规模网络中,算法的收敛性退化得较为明显.视频编码能够有效压缩原始视频数据的数据量,当视频传感器节点采集到视频数据后,视频通过编码后进入到网络中.由视频编码相关文献^[17-19]可以看出,视频数据通过编码后具有不同的重要性,如 MPEG-4, *I* 帧是关键帧, *P* 帧与 *B* 帧是非关键帧,在一个 GOP(group of picture)中, *P* 帧与 *B* 帧的解码依赖于 *I* 帧,若 *I* 帧丢失,则 *P* 帧与 *B* 帧将成为无用数据,这不仅影响视频解码质量,且会造成网络资源浪费.因此,不区分优先级多径传输是不可取的.

2 多径路由模型与问题定义

2.1 网络模型

假设无线多媒体传感器网络的部署环境是二维平面拓扑,汇聚节点 sink 能量与处理能力无限.为了简化问题,本文仅考虑 1 个 sink 与 1 个视频采集节点的情况.无线多媒体传感器网络的拓扑可抽象成带权有向图 $G(V,E)$,其中: V 为节点集合,节点个数 $n=|V|$; E 为单跳通信链路集合,对任意单跳通信链路 $e_{ij}=e(v_i,v_j) \in E, v_i, v_j \in V, i \neq j, i, j=1, 2, \dots, n$, 当且仅当 v_i 与 v_j 在单跳通信范围内可通信. G 中每条链路 e_{ij} 包含时延、带宽、时延抖动、丢包率等通信代价参数.根据视频流应用特点,如实时性、图像质量等,仅考虑时延、带宽与丢包率这 3 个参数,其中:时延包括中继节点上的排队时延与链路传输时延,丢包率包括节点缓冲区溢出丢包与信道间干扰丢包,带宽即为链路数据传输速率.对应于每一单跳通信链路 $e_{ij} \in E$, 其权值用一个三元组 $(b(v_i, v_j), d(v_i, v_j), l(v_i, v_j))$ 表示,分别表示链路带宽、链路时延与链路丢包率.

2.2 能耗模型

采用文献[20]中的能耗模型,网络节点的能耗主要来自无线通信模块与数据处理模块.当无线通信模块发射器发送数据时,其能耗模型为

$$E_T(m, d) = E_{T\text{-elec}}(m) + E_{T\text{-amp}}(m, d) = mE_{elec}(m) + md^r, 2 \leq r \leq 4 \quad (1)$$

其中, $E_{T\text{-elec}}$ 与 $E_{T\text{-amp}}$ 分别表示发射器中的数据处理能耗与功率放大器能耗; m 为发送数据比特数; d 为每个节点的通信覆盖范围; r 为可调系数,根据具体网络环境而定,通常设为 2.

由于接收器无需考虑功率放大器,因此在接收数据时,其能耗模型为

$$E_R(m) = E_{R\text{-elec}}(m) = mE_{elec} \quad (2)$$

2.3 问题定义

在上述模型的基础上,我们给出以下多路径路由问题定义.

定义 1(可行路径). 给定网络 G , 如果从源节点 v_{sn} 到汇聚节点 sink 通过多跳存在一条路径 $p = \{v_{sn}, \dots, \text{sink}\}$, 能够将数据从 v_{sn} 传输到 sink 节点, 则称 p 为一条可行路径.

定义 2(路径 QoS 参数). 给定一条可行路径 $p = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$, 设其路径包括节点的个数为 n , 则路径 p 的 QoS 参数为路径带宽、路径时延、路径丢包率.根据参数凹性特征^[21], 其定义如下:

$$B(p) = \min_{i=1}^{n-1} b(v_i, v_{i+1}) \quad (3)$$

$$D(p) = \sum_{i=1}^{n-1} d(v_i, v_{i+1}) \quad (4)$$

$$L(p) = 1 - \prod_{i=1}^{n-1} (1 - l(v_i, v_{i+1})) \quad (5)$$

其中, $B(p), D(p), L(p)$ 分别表示路径带宽、路径时延与路径丢包率.

定义 3(路径优先函数). 对于给定一条路径 p , 其优先级函数综合考虑定义 2 中路径的 3 个 QoS 参数, 优先函数 $f(p)$ 定义如下:

$$f(p) = \alpha \frac{B(p) - B_{\min}}{B_{\min}} + \beta \frac{D_{\max} - D(p)}{D_{\max}} + \gamma(1 - L(p)) \quad (6)$$

其中, B_{\min} 与 D_{\max} 分别是视频流应用所能容忍的最小带宽与最大路径时延, α, β, γ 分别是 3 种 QoS 参数的权重因子, 三者的范围为 $[0, 1]$, $\alpha + \beta + \gamma = 1$. 通过公式(6)的处理, 路径优先函数的取值范围为 $[0, 1]$.

定义 4(可行路径集与路径相似度). 若网络 G 中存在多条可行路径, 则其构成一个可行路径集合 \mathbf{P} , 对路径集 \mathbf{P} 的任意一个子集 $\mathbf{P}_{\text{sub}} \subseteq \mathbf{P}$, 其路径数 $m = |\mathbf{P}_{\text{sub}}|$, 路径间的相似度 $X(\mathbf{P}_{\text{sub}})$ 定义为

$$X(\mathbf{P}_{\text{sub}}) = \left| \bigcap_{i=1}^m (p_i \setminus \{\text{vsn}, \text{sink}\}) \right| \quad (7)$$

相似度即为路径集间的路径与路径相交节点的个数.

定义 5(多路径路由的多目标优化问题). 设视频流应用请求路径数为 r , 若寻找到路径数为 $m, m \geq r$, 则满足条件的路径集个数为 C_m^r , 算法需要寻找一个路径集 \mathbf{P} , 优化目标函数为

$$\max g_1(\mathbf{P}) = \sum_{i=1}^r f(p_i) \quad (8)$$

$$\min g_2(\mathbf{P}) = X(\mathbf{P}) = \left| \bigcap_{i=1}^r (p_i \setminus \{\text{vsn}, \text{sink}\}) \right| \quad (9)$$

满足 $2r$ 个约束条件:

$$B_{\min} - B(p_i) \leq 0, i = 1, 2, \dots, r \quad (10)$$

$$D(p_i) - D_{\max} \leq 0, i = 1, 2, \dots, r \quad (11)$$

公式(10)表示路径集 \mathbf{P} 中每条路径的路径时延不大于 D_{\max} , 公式(11)表示 \mathbf{P} 中每条路径的带宽不小于 B_{\min} , 公式(8)、公式(9)分别表示求得路径集 \mathbf{P} , 使其集合中路径优先级函数值之和最大, 路径集相似度最小.

定义 6(路径集目标函数). 将定义 5 中的多目标问题转换成单目标问题, 定义路径集 \mathbf{P} 目标函数为

$$\max F(\mathbf{P}) = \frac{g_1(\mathbf{P})}{g_2(\mathbf{P}) + 1} \quad (12)$$

公式(12)表示从满足要求的路径集中求得一个路径集 \mathbf{P} , 使得路径集目标函数值最大. 由于 $g_2(\mathbf{P})$ 可能为 0, 即路径集相似度为 0, 故公式(12)的分母作加 1 处理.

3 基于改进蚁群算法的多径路由算法 ACMRA

3.1 经典蚁群算法及其弊端

蚁群算法^[22]是基于概率的分布式启发优化算法, 人工蚂蚁通过信息素间接通信, 协作地获得最优解. 无线多媒体传感器网络是分布式网络, sink 节点无法获得全网信息. 与此同时, 网络拓扑动态变化与节点不稳定使静态路由算法不适用此类网络. 而蚁群算法具有鲁棒性、分布式的特点, 使其适用于无线多媒体传感器网络的路由寻找.

但是, 经典蚁群算法应用于无线多媒体传感器网络路由存在如下问题: 一是每个单跳通信链路初始分配相同信息素值 τ , 前向寻路蚂蚁寻找可行路径时, 每条链路被选择的概率相同, 易产生不满足约束的路径或回路, 增加了算法的迭代次数; 二是经典蚁群算法仅能寻找一条路径, 而单路径路由吞吐量有限, 不能保证视频流数据传输的实时性. 同时, 能量消耗不均, 过早产生“死亡”节点. 即使其余节点的剩余能量还很多, 网络也可能不存在从源节点到 sink 的一条可行路径. ACMRA 从信息素初始分布优化与基于优先函数的路径集选择两部分, 对经典蚁群算法进行改进.

3.2 ACMRA 算法描述

3.2.1 链路信息素初始分布优化

无线多媒体传感器网络部署完毕, 每个节点并不知道其一跳通信范围内的邻居节点信息, 网络必须初始化

每个节点的邻居表.邻居表的建立如图 1 所示,设网络中含有 n 个节点,由 sink 节点产生邻居建立请求 REQ,REQ 中包含其节点号 0.当邻居节点收到 REQ 后,记录下该 REQ 中的节点号,并产生一个相同 REQ,REQ 中包含其节点号.以此类推.为了避免一个节点发送多次 REQ 造成能量消耗,每个节点中设置一个标志位,记录该节点是否已发过 REQ;若已发过,当再次接收到 REQ 时仅更新邻居表而不产生 REQ.邻居表的邻居登记按照 REQ 的时间顺序排列.在邻居表建立过程中,利用 REQ 估计链路间带宽 $b(v_i,v_j)$ 、节点剩余能量:若 $b(v_i,v_j) < B_{min}$,则不建立邻居关系,以简化网络拓扑,缩小算法搜索规模.

利用邻居表建立过程中获得的邻居表记录顺序为每个链路初始化不同的信息素,有利于前向搜索蚂蚁快速发现可行路径.如图 2 所示,邻居表建立后,设源节点 vsn 的邻居表为 $N_{vsn}=\{k_1,k_2,\dots,k_m\}$,邻居节点个数为 m,k_1,k_2,\dots,k_m 按照时间顺序从小到大排列.对每一个邻居节点 k_i ,设其邻居表为 $N_{k_i}=\{k_{i1},k_{i2},\dots,k_{im_i}\}$, $i=1,2,\dots,m$.邻居节点个数为 m_i .由于 REQ 从 sink 节点产生,如果能够通过节点 k_i 到达源节点 vsn,显然存在可行路径 p_i ,使得 vsn 能够到达 sink.考虑邻居表中每条可行路径时延 $D(p_i)$,其表示为

$$D(p_i) = D(p_{subij}) + d(v_{k_i}, v_n), i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, m_i \tag{13}$$

其中, p_{subij} 表示从 sink 到节点 k_i 的 m_i 条可行路径.由于邻居表的建立过程存在最优子结构,根据动态规划原理, $D(p_i)$ 的最小值 $D(p_i)_{min}$ 为

$$D(p_i)_{min} = \min_{i=1}^m \left\{ \min_{j=1}^{m_i} D(p_{subij}) + d(v_{k_i}, v_n) \right\} \tag{14}$$

公式(14)可以推广至任意一个节点.从源节点反推至 sink 节点,可知最先被邻居表记录的邻居节点 k_1 满足公式(14)中最小值的要求.同时,拥有较短路径时延的可行路径跳数少的概率较大,因此链路间丢包率较小.综合考虑上述因素及节点剩余能量,信息素初始化时对邻居表中记录时间越早,剩余能量越多的节点分配到越多的信息素值.设任意节点 $v_i \in V$,其邻居表按时间顺序排序后的邻居表为 $N_i=\{k_1,k_2,\dots,k_m\}$,邻居节点剩余能量集合为 $\{e_1,e_2,\dots,e_m\}$.为了保证解的收敛性,对邻居顺序与节点剩余能量进行量化处理.设量化区间分别为 σ_x 和 σ_e ,量化后的区间集合分别为 $\{K_1,K_2,\dots,K_{M_1}\},\{E_1,E_2,\dots,E_{M_2}\}$,其中, $M_1=\lceil m/\sigma_x \rceil, M_2=\lceil m/\sigma_e \rceil$.若邻居节点 $v_j \in N_i$ 分别落在区间 $K_x, E_y, x=1,2,\dots,M_1, y=1,2,\dots,M_2$,则链路 $e(v_i,v_j)$ 所对应的初始信息素 τ_{ij} 为

$$\tau_{ij} = \left(\alpha \frac{M_1+1-x}{\sum_{i=1}^{M_1} i} + \beta \frac{M_2+1-y}{\sum_{i=1}^{M_2} i} \right) \tau \tag{15}$$

其中, α 与 β 为权重因子, $\alpha+\beta=1$ 且 $\alpha, \beta \in [0,1]$.在新部署的网络中,由于节点剩余能量充足,因此 β 所占比重较小.当网络处在维护更新阶段时,由于节点的能量消耗,应根据需求增大 β 值.距离 sink 节点越近的节点具有更短的路径时延,从而在其他节点的邻居表中排序较前,信息素初始值大,被选择的概率就大.因此,前向蚂蚁的搜索方向趋向于 sink,从而尽可能地避免了产生偏离 sink 节点搜索方向的可能性.

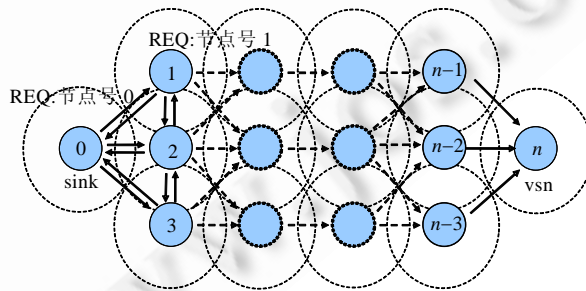


Fig.1 Establishment of neighbour table

图 1 网络节点邻居表建立

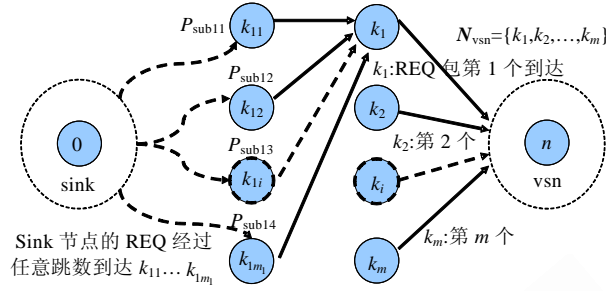


Fig.2 Record sequence of neighbour table

图2 邻居表构建排序

3.2.2 人工蚂蚁数据结构设计

ACMRA 采用前向局部寻路蚂蚁 fant(forward ant)与反向全局优化蚂蚁 bant(backward ant),数据结构见表 1.

Table 1 Data structure of forward and backward ant

表 1 前向蚂蚁与反向蚂蚁数据结构

fant	源节点	目的节点	当前跳数 H	禁忌表 $\text{Tab}[H_{\max}]$	$B(p)$	$D(p)$	$L(p)$
bant	源节点	目的节点	返回路径表 $B[H_{\max}]$	路径优先函数 f	优先级 $\text{Pri}(p)$	$X(P)$	

fant 负责前向路径搜索,以搜索可行路径.源节点为生成 fant 的节点,即 vsn 节点号.目的节点为该 fant 所寻路径的目的节点号,这里为 sink 节点号.跳数 H 为 fant 当前跳数,在大规模网络中,为了避免 fant 在网络中长时间寻路,设定 fant 的最大跳数,当 fant 的当前跳数 H 达到指定最大跳数 H_{\max} 且仍未到达目的节点时,则丢弃该前向蚂蚁.禁忌表 $\text{Tab}[H_{\max}]$ 保存 fant 已访问的节点以判断是否产生回路. $B(p)$, $D(p)$, $L(p)$ 分别记录当前路径 p 的路径带宽、时延、丢包率,当到达 sink 节点后作为路径优化参考.

bant 根据可行解路径信息进行全局信息素更新,以优化路径信息素值.源节点号为 sink 节点号,目的节点号为 vsn 节点号,返回路径表 $B[H_{\max}]$ 保存可行路径的返回路径节点号, f 表示可行路径 p 的优先函数值,作为全局信息素更新依据, $\text{Pri}(p)$ 为该路径的优先级, f 越大,优先级越高, $X(P)$ 中保存路径集 P 的相交节点号.当 bant 到达源节点 vsn 时,其生命周期终止.

3.2.3 多径选择机制

sink 节点根据视频流应用需求向无线多媒体传感器网络发出 r 条路径请求, sink 节点中保存当前可行路径集,设为 P_{cur} , 路径个数 $m=|P_{\text{cur}}|$, 初始时, $P_{\text{cur}}=\emptyset$. 信息素更新分 $m < r$ 与 $m \geq r$ 两种情况讨论.为避免某条链路的信息素值过大或过小,造成算法迭代过早收敛,利用 MAX-MIN 蚁群算法^[23]思想,设定每条链路的信息素值的取值范围为 $[\tau_{\min}, \tau_{\max}]$.

当 $m < r$ 时,当前路径集 P_{cur} 不包含满足要求的 r 条路径.因此在此阶段,信息素更新采用启发搜索新路径原则,不加强某一条路径的信息素值.第 k 只 fant 从节点 v_i 选择 v_j 作为下一跳的概率 Pr_{ij}^k 为

$$\text{Pr}_{ij}^k = \begin{cases} \frac{\tau_{ij}^{\kappa} \eta_{ij}^{\lambda}}{\sum_{s \in \text{Tab}[H_{\max}]} \tau_{is}^{\kappa} \eta_{is}^{\lambda}}, & j \in N_i \setminus \text{Tab}[H_{\max}] \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (16)$$

其中, $\eta_{ij} = e_j / e_{\text{init}}$ 为期望函数, e_{init} 为节点的初始能量,期望函数以启发得到剩余能量较多的下一跳; κ 与 λ 分别为剩余信息素值与期望函数的权重因子.在选择下一跳节点时,并不是选择概率最大的下一跳节点,而是在 0~1 之间随机产生一个数,通过从小到大累加邻居节点的概率值 Pr_{ij}^k , 当累加值第 1 次超过这个随机数时,则选择当前节点作为下一跳节点. fant 对链路进行局部更新,挥发该链路的一半信息素值,以减小其他 fant 经过该条链路的概率,即使得当前可行路径集 P_{cur} 的相似度尽可能最小,同时更新 fant 中的 $B(p)$, $D(p)$, $L(p)$. 当 fant 到达 sink 节点时,

若 $D(p) \leq D_{\max}$, 则将该路径添加至 P_{cur} , 对 P_{cur} 中的可行路径按照公式(6)进行优先排序, 仅将 P_{cur} 中各路径的返回路径与优先级记录在 bant 的 $B[H_{\max}]$ 与 $\text{Pri}(p)$ 中, 发送 m 只 bant 更新节点路由表与所属路径优先级, 不改变链路的信息素值。

当 $m \geq r$ 时, fant 的寻路策略与 $m < r$ 的情况一样. 此时, P_{cur} 已保存至少 r 条路径且均满足约束(10)、约束(11). 每当 P_{cur} 添加一条新路径时, 则重新计算路径集目标函数 F , 选择使得 F 最大的路径集 P^* . 由于 m 条可行路径均满足约束, 由组合原理可知, P_{cur} 的元素个数为 r 的子路径集 P_{sub} 的个数为 C_m^r , 依次计算每个路径集 P_{sub_i} , $i=1, 2, \dots, C_m^r$ 的目标函数 $F(P_{\text{sub}_i})$, 得到使 F 值最大的当前最优解 P^* . 由 sink 产生 r 只反向更新蚂蚁 bant , 分别代表根据优先函数值排序的 r 条可行路径 $p_i \in P^*$, $i=1, 2, \dots, r$, 每条路径的反向路径记录于 bant 的 $B[H_{\max}]$ 中, 同时记录于路径优先函数值 $f(p_i)$, 优先级 $\text{Pri}(p_i)$ 中. 相交节点号 $X(P^*)$, 若 bant 经过的节点包含在 $X(P^*)$ 中, 则使该链路的信息素为 τ_{\min} , 避免 fant 再次搜索该节点, 其余链路则根据公式(17)更新链路的信息素同时更新路由表与优先级.

$$\tau \leftarrow \tau + f(p_i) \quad (17)$$

3.2.4 ACMRA 算法描述

算法(ACMRA).

1. sink 向全网发送邻居建立请求 REQ , 建立节点间的邻居关系, 将链路带宽小于 B_{\min} 的链路从图 G 拓扑中删除, 并给出所要寻找的路径数量 r ;
2. 每个节点根据邻居节点在邻居表中的排序顺序与剩余能量, 根据公式(15)对链路进行信息素初始化, 将路由表置空, sink 节点内部的当前路径集 P_{cur} 置空, 初始化节点内定时器, 设定发送蚂蚁的时间间隔为 Δt ;
3. 源节点 vs_n 内设置蚁群算法的最大迭代次数为 N_{\max} 与当前迭代次数 $N_c \leftarrow 0$, 迭代周期内前向蚂蚁计数器 $Q \leftarrow 0$, 一个搜寻周期 fant 的最大个数为 Q_{\max} 只;
4. vs_n 每隔 Δt 产生一只 fant , $Q \leftarrow Q + 1$, 若 $Q = Q_{\max}$, 则 $N_c \leftarrow N_c + 1$ 且 $Q \leftarrow 0$; 若 $N_c = N_{\max}$, 则转至步骤 8, 否则转至步骤 5;
5. 第 k 只前向蚂蚁按照公式(16)选择下一跳节点并挥发掉该链路一半的信息素值. 当发生如下两种情况之一时, 则丢弃该 fant , 转至步骤 4; 否则, 转至步骤 6:
 - 1) 探测到该节点已经存在于 $\text{Tab}[H_{\max}]$ 中, 即产生回路;
 - 2) 探测到其当前跳数 H 大于最大跳数 H_{\max} , 即 fant 超过生命周期;
6. 当 fant 到达下一跳节点时, 若为普通节点, 则转至步骤 5; 若为 sink 节点, 当 fant 中保存路径时延 $D(p)$ 大于 D_{\max} 时, 则丢弃该 fant , 转至步骤 4, 否则转至步骤 7;
7. 将 p 添加至 P_{cur} , $m \leftarrow m + 1$, 若 $m < r$, 则发送一只 bant , 更新路径 p 上节点的路由表与优先级, 转至步骤 4; 否则计算 C_m^r 个路径集的目标函数值, 从中选取使得路径集目标函数值最大的最优解 P^* , 产生代表 P^* 中 r 条路径的 bant 进行反向更新, 若为相交节点, 则信息素置为 τ_{\min} , 其余则根据公式(17)进行全局信息素更新, 转至步骤 4;
8. 通知 vs_n 开始传输视频流数据, 将不同重要性的数据选择相应的优先级路径进行转发, 等待下一个路由维护周期的到来.

3.3 算法性能分析

命题 1. ACMRA 算法邻居建立后, 从源节点 vs_n 开始, 每个节点沿其邻居表第 1 表项回溯必能到达汇聚 sink 节点.

证明: 显然, REQ 从 sink 节点到达节点 v_i , 必存在反向路径 p 从 v_i 到 sink , 但路径可能存在回路, 利用数学归纳法. 路径 p 仅有一个节点, 则不可能存在回路, 因为节点不会向其自身发送数据包. 路径 p 有两个节点 v_1 与 v_2 , 如果存在回路 $v_1 \rightarrow v_2 \rightarrow v_1$, 因为 $v_1 \rightarrow v_2$, 因此节点 1 与节点 2 接收到 REQ 的时间顺序为 $t_2 < t_1$; 同理, $v_2 \rightarrow v_1$. 因此, 接收到 REQ 的时间顺序为 $t_1 < t_2$, $t_2 < t_1$ 与 $t_1 < t_2$ 矛盾, 因此不存在回路.

设路径 $p: v_1 \rightarrow v_2 \rightarrow \dots \rightarrow v_n$ 没有回路. 将节点 v_{n+1} 加入到路径 p 中, 如果有回路, 则必有 $v_{n+1} = v_i, i=1, 2, \dots, n$. 因为 p 没有回路, 因此前 n 个节点接收到 REQ 的时间顺序是 $t_n < t_{n-1} < \dots < t_1$. 不妨假设 $v_{n+1} = v_k, k=1, 2, \dots, n$, 则 $n+1$ 个节点接收到 REQ 的时间顺序是 $t_k < t_n < t_{n-1} < \dots < t_k < t_{k-1} < \dots < t_1, k=1, 2, \dots, n$. 但这种时间顺序是不会发生的, 因此当处于 $n+1$ 个节点状况时, 路径不存在回路.

综上, 原命题证毕. \square

命题 2. ACMRA 算法最优路径集 P^* 中的路径必满足约束(10)、约束(11).

证明: 首先, 节点邻居建立阶段, 将链路带宽小于 B_{\min} 的链路从网络拓扑中删除, 构成子图 $G_{\text{sub}} \subseteq G, \forall e_{ij} \in E_{\text{sub}}, E_{\text{sub}}$ 为子图 G_{sub} 的边集, 则 $b(v_i, v_j) \geq B_{\min}$. 由公式(3)可知, G_{sub} 中任意一条可行路径的路径带宽均不小于 B_{\min} , 因此最优路径集 P^* 中的可行路径的带宽均不小于 B_{\min} . 其次, 生成的可行路径需在 sink 判断路径时延是否小于等于 D_{\max} , 若大于, 则舍弃该路径, 因此 P^* 路径集中不含有路径时延大于 D_{\max} 的解. 综上, P^* 满足约束条件(10)、约束(11). 证毕. \square

命题 3. ACMRA 算法求得的最优路径集 P^* 不含有回路.

证明: fant 蚂蚁内部保存已访问的节点数组 $\text{Tab}[H_{\max}]$, 当发现当前节点号与已访问的节点号相同时, 则舍弃该 fant. 因此, sink 中保存的当前可行路径集 P_{cur} 中路径必不包含回路; 又 $P^* \subseteq P_{\text{cur}}$, 因此 P^* 不含回路. 证毕. \square

在 ACMRA 算法中, 由于 fant 与 bant 都为寻路数据包, 因此在寻路过程中会给网络带来一定的额外开销. 但是由于每只蚂蚁中仅保存路径节点号与网络局部信息, 而不保存全网拓扑信息, 因此开销较小. 同时, ACMRA 算法采用多路径, 因此对于数据量相同的信息, 能够将能耗均摊到更多节点上.

4 仿真实验与分析

4.1 仿真环境与实验方法

仿真实验采用 NS2 仿真软件与 MyEvalvid^[24] 视频评价工具集, 视频测试用例文件为 foreman_qcif.yuv. 视频编码方式采用 MPEG-4, 经编码, 共有 400 帧, 帧格式为 IBBPBBPBBP..., GOP 长度为 12, 视频数据在 UDP 层分片大小为 1 024 Byte. 网络测试场景大小为 500m×500m 的二维平面, 每个节点的初始能量设为 36J. 公式(1)、公式(2)中, $E_{\text{elec}}=50\text{nJ/bit}, r=2$. 链路采用随机丢包模型 ErrorModel, 链路丢包率变化范围设定为 0~0.6. 链路带宽, 即数据发送速率, 随机值范围为 500Kb/s~1.5Mb/s. 视频流应用中, 容许路径最大时延 D_{\max} 设为 5s, 容许最小路径带宽 B_{\min} 设为 800Kb/s. 默认信息素初始值 $\tau=1$. NS2 参数配置见表 2.

Table 2 Configuration of NS2

表 2 NS2 仿真参数配置

参数名	参数值
Mac 层协议	Mac/802_11
无线传输模型	Propagation/TwoRayGround
信道类型	Channel/WirelessChannel
物理层协议	Phy/WirelessPhy
链路层协议	LL
天线类型	Antenna/OmniAntenna
队列类型	Queue/DropTail/PriQueue
队列长度	50

仿真实验分为两个部分: 首先, 比较算法 ACMRA 在与经典蚁群算法的算法收敛性. 采用重复随机实验的方法, 在不同网络规模的仿真场景下进行实验, 评价指标为算法达到收敛后的迭代次数; 其次, 利用 MyEvalvid 视频工具集, 将真实的视频流文件数据放入到 NS2 中仿真, 在两种不同视频应用场景中对网络与视频传输性能进行比较, 评价指标包括丢帧率、时延、视频传输质量 PSNR 值以及网络能耗.

4.2 算法收敛性比较

由于仅考察算法收敛性, 本实验只考虑路径时延与能量两个参数, sink 节点发送的请求路由数 $r=1$. 公式(6)

中, $\alpha=0, \beta=1, \gamma=0$. 在对公式(15)的信息素初始分布进行优化的过程中, $\alpha=1, \beta=0$. 公式(16)中的权重因子 $\kappa=1, \lambda=0$. 设置网络规模分别为 40 个节点、60 个节点、80 个节点, 直到 180 个节点. 设 N 个节点随机均匀部署在网络场景中, 设节点通信半径 d 所构成的圆内节点个数均值为 M , 则 $M=N\pi d^2/2500$; 设节点的邻居节点期望为 5 个, 则 $M=6$. 因此, 对于 8 个不同的仿真场景, 设节点通信半径 d 分别为 09.25m, 89.21m, 77.25m, 69.09m, 63.08m, 58.39m, 54.63m, 51.50m. 公式(15)中对应的邻居表量化区间分别为 $\sigma_s=2$, 每轮迭代中发送前向蚂蚁的个数 $Q=50$ 个, 网络的最大跳数 H_{\max} 设置为 20. 两种算法在每一种场景中分别运行 50 次后求均值, 每次测试的迭代次数不设上限, 达到收敛后的迭代次数均值如图 3 所示.

从图中结果可以看出: 在网络规模较小的情况下, 如当网络节点个数为 40~80 个节点时, 两种算法的迭代次数相差不是十分明显; 当网络节点个数超过 100 个时, ACMRA 算法的迭代次数增长得较为缓慢, 而经典蚁群算法的迭代次数呈迅速增长趋势. 从分析 NS2 网络跟踪 trace.tr 文件可以看出: 经典蚁群算法中, 存在着大量因为超过最大预定跳数 H_{\max} 与产生“回路”后丢弃的前向寻路蚂蚁; 而 ACMRA 算法则较少发生该类情况, 其迭代次数增加主要来源于信息素的挥发策略, 以启发搜索到优先函数值更大的新路径. 从最优解的结果来看, ACMRA 算法的优先函数值比经典蚁群算法要高.

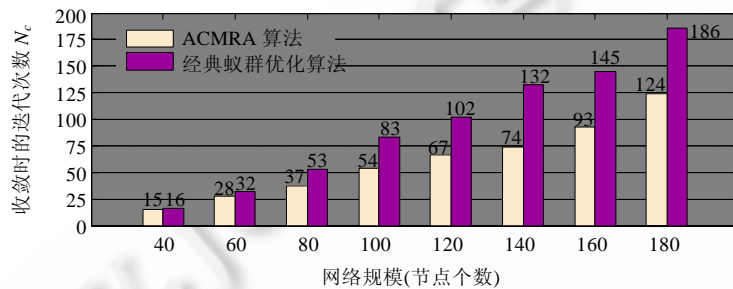


Fig.3 Comparison of iterations between classic ant colony algorithm and ACMRA

图 3 经典蚁群算法与 ACMRA 算法迭代次数比较

在上述网络规模与设置条件下, 考察网络部署密度对 ACMRA 算法的性能影响. 设置每个节点的邻居节点期望个数为 4, 6, 8, 10, 按照上述计算方法计算节点通信半径, 则 ACMRA 算法迭代次数比较如图 4 所示.

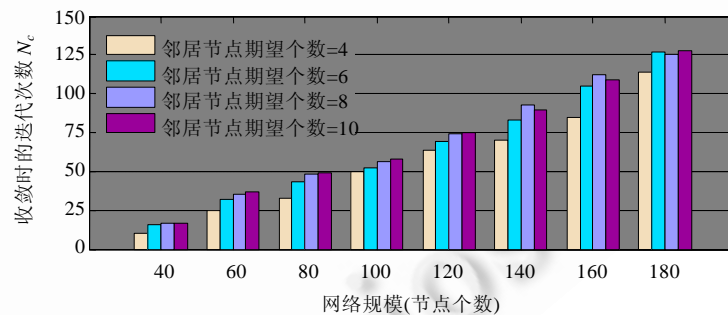


Fig.4 Comparison iterations among different size of neighbour table

图 4 ACMRA 算法在不同邻居节点个数下的迭代次数比较

从图 4 的结果可以看出, 随着网络邻居节点个数的增加, 即网络密度的增加, ACMRA 算法仍能保持较为良好的算法收敛性. 根据信息素初始化的优化方法, 当邻居节点的个数很大时, 邻居表中排序较后的邻居节点所分配到的初始信息素值相当小. 例如邻居节点个数为 8 和 10 的节点, 根据公式(15), 其与邻居表中最后一个邻居节点构成的链路所分配到的初始信息素值分别为 $1/10$ 和 $1/15$, 其被选作下一跳节点的概率非常小. 因此, 即便网络密度增加, 算法的收敛性也不会急剧退化.

4.3 网络及视频传输性能比较

网络规模设置为 200 个节点,随机均匀部署,网络密度为邻居节点个数期望值为 5.由于采用 MPEG-4 编码,因此需请求 3 条不同优先级的路径为 3 种不同视频帧 I 帧, P 帧, B 帧提供不同的传输路径. sink 节点在发送路径数请求时设置 $r=3$,其中,用于 I 帧传输的路径优先级最高, P 帧其次, B 帧最低.仿真分别采用两种视频应用场景:(1) 保障实时性;(2) 保障图像质量.公式(15)中的 $\alpha=0.8, \beta=0.2$,每轮网络维护更新 α 减少 0.04, β 增加 0.04;在应用场景所对应的公式(6)中,3 种 QoS 的权重因子的设置见表 3.在两种应用场景下,ACMRA 算法分别与 Directed Diffusion 算法、QoS 感知的多路径路由算法 MMSPEED 进行比较.限定 MMSPEED 路由协议的路径个数为 3 并设定第 1 种场景优化数据实时性,其路径时延上限为 3s,可达概率下界为 0.2;第 2 种场景优化数据可靠性,其路径时延上限为 10s,可达概率下界为 0.8.

Table 3 Configuration of QoS parameter factors

表 3 QoS 参数权重因子配置

	α	β	γ
场景 1:保障实时性	0.3	0.5	0.2
场景 2:保障图像质量	0.3	0.2	0.5

通过实验,ACMRA 算法在两种场景下的路径集目标函数值 F 分别为 2.63 和 2.71(F 的理论最大值为 3),所搜索到的路径集的相似度均为 0;而 MMSPEED 路由算法尽管路径数也为 3,但其路径相似度在两种场景下分别为 7 和 5.由此可以看出,ACMRA 算法所搜索的路径均为不相交路径.视频帧在 sink 节点解码后所得到图像的 PSNR 值在两种场景下的对比,如图 5(a)、图 5(b)所示.

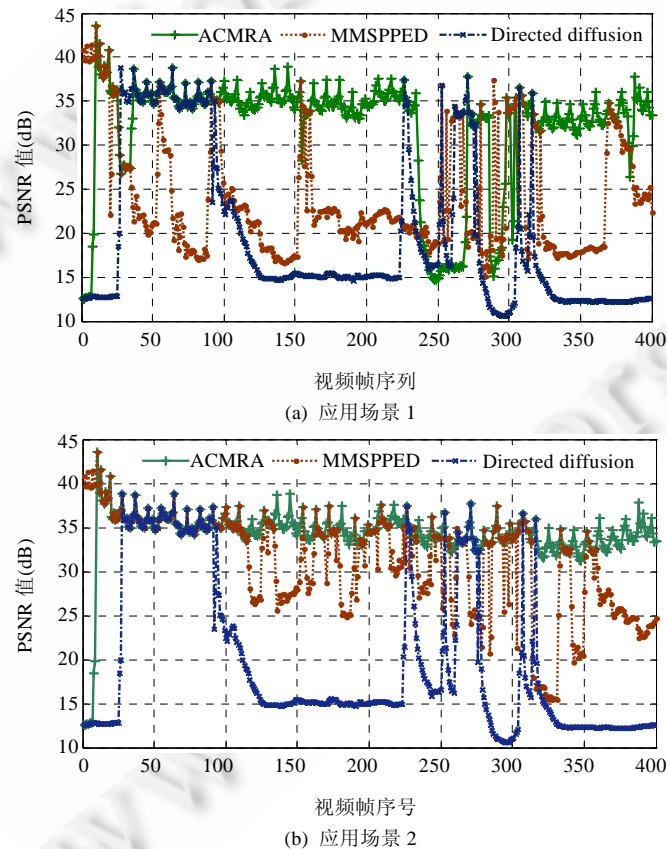


Fig.5 Comparison of PSNR in the two application scenarios

图 5 两种应用场景视频解码 PSNR 值比较

由图5可以看出:不论是在应用场景1还是在场景2,Directed Diffusion由于没有对QoS参数加以任何保障,因此视频除了开始阶段网络拥塞较小的情况下能够在sink节点处正确解码外,在网络传输后期,视频帧基本上不能被正确解码,通过分析网络跟踪文件,其大部分的数据包都在节点发送缓冲区溢出;而对于MMSPEED路由协议,在应用场景1中,在保障视频实时性的前提下,由于没有对不同视频帧加以区分,而仅仅考虑到网络的实时性,因此尽管一些视频数据能够传输到sink节点,但是由于缺失关键帧I帧,因此不能被正确解码.然而在应用场景2中,尽管其对视频数据加以可靠性保障,其视频质量比应用场景1要有所提高,但从网络跟踪文件分析可得,其过多的相交节点导致在某些局部节点处造成数据拥塞,造成发送缓冲区溢出;ACMRA算法在应用场景1中因为考虑到视频的实时性,因此在视频质量上略差于应用场景2的结果,尤其是在网络传输到一部分之后,由于所选择路径并不是丢包率最小的路径,因此造成部分数据的丢失.图6(a)、图6(b)分别显示了两种场景中帧号为200的解码视频图像.从图中可以看出,缺失I帧的视频帧解码存在大量的“马赛克”失真,并且画面滞留在上一帧图像上.



Fig.6 Comparison of video frame 200 quality in the two application scenarios

图6 两种应用场景视频帧200图像质量比较

两种场景中,视频帧的平均路径时延与I帧丢包率如图7、图8所示,其中,I帧一共有45个.

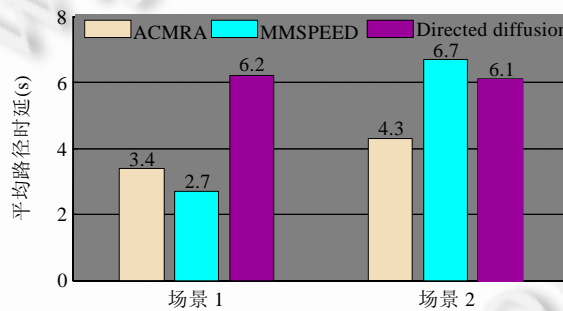


Fig.7 Comparison of average delay

图7 平均路径时延比较

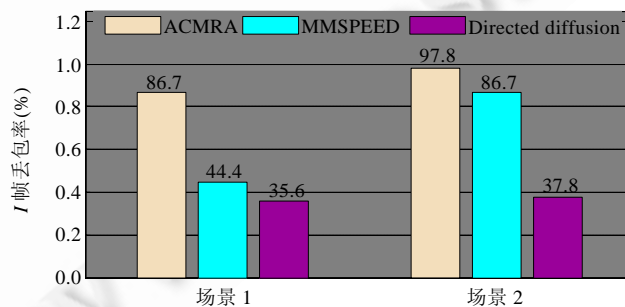


Fig.8 Comparison of I frame loss rate

图8 I帧丢包率比较

在路径时延方面,ACMRA 与 MMSPEED 采用多径路由,减少了数据包在节点上的排队时延,数据能够并行传输,有效降低了时延;但是 MMSPEED 是具有相交节点的多路径路由,因此在性能上略差于 ACMRA 算法.而从 I 帧丢包率可以看出,在两种应用场景中, I 帧丢包率是不同的,由于不区分数据重要行的数据传输,尽管在场景 2 中 MMSPEED 的丢包率很小,但其数据的时延性却很高.

在场景 1 中,对 3 种算法的网络能耗进行实验,图 9 与图 10 分别显示了网络存活节点个数与网络节点能耗方差.其中:网络生命周期通过存活节点的个数来判断;网络节点能量消耗的均匀性通过所有节点的剩余能量方差来衡量,方差越大,说明网络中的节点能量消耗越不均匀.从图中结果可以看出,在相同数据量的前提下,ACMRA 算法与 MMSPEED 路由协议均采用了多路径的传输机制,因此能够将网络能耗分摊在更多的网络节点上,其能耗性能远比 Directed Diffusion 要好.然而 MMSPEED 路由协议存在相交节点,因此在某些节点上能量消耗过大,因而性能要略次于 ACMRA 算法.

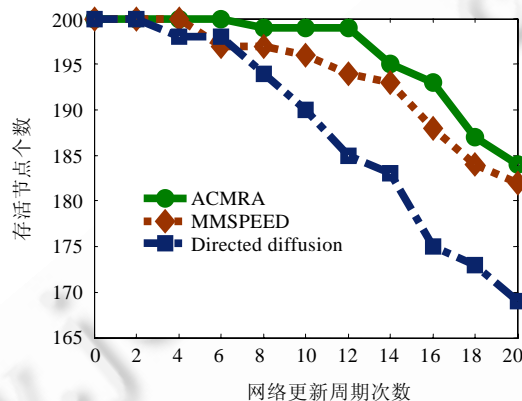


Fig.9 Number of the alive nodes

图 9 网络存活节点数

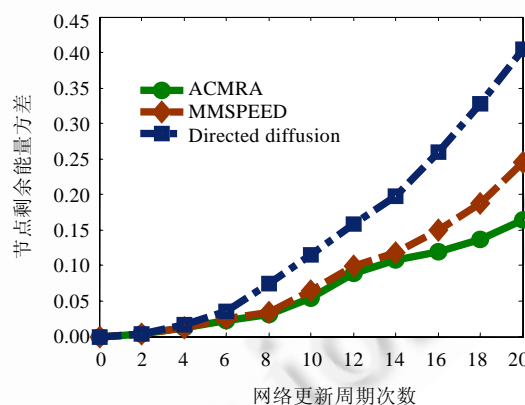


Fig.10 Variance of the reserved energy in each node

图 10 网络节点剩余能量方差

5 结束语

本文针对无线多媒体传感器网络中的视频传输,提出了一种基于改进蚁群算法的多路径路由算法 ACMRA.在经典蚁群算法的基础上,根据无线多媒体传感器网络邻居表建立时的信息,对信息素初始化分布进行优化,以加快算法的收敛速度.通过多路径路由机制,为不同重要性的视频编码数据选择相应优先级的路径转

发,尽可能保障重要数据的有效传输.由于基于蚁群算法的路由协议较为灵活,其可以根据网络的规模以及具体情况设定算法的迭代次数,并根据具体的多媒体应用需求设定相应 QoS 参数的权重因子.因此,将 ACMRA 算法一次性烧入至节点存储器中将导致算法配置不够灵活.因此,在下一步工作中,我们将利用无线传感器网络移动 Agent 中间件软件的方式,在 TinyOS 2.x 操作系统上实现 ACMRA 算法.路由算法通过移动 Agent 的可解释型代码形式从 sink 注入到网络,以提高路由算法的灵活性.

致谢 在此,我们向南京邮电大学无线传感器网络研究实验室的同学与老师表示感谢.

References:

- [1] Akyildiz IF, Melodia T, Chowdhury KR. A survey on wireless multimedia sensor networks. *Computer Networks*, 2007,51(4): 921–960. [doi: 10.1016/j.comnet.2006.10.002]
- [2] Ma HD, Tao D. Multimedia sensor network and its research progresses. *Journal of Software*, 2006,17(9):2013–2028 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/2013.htm> [doi: 10.1360/jos172013]
- [3] Almalkawi IT, Zapata MG, Al-Karaki JN, Morillo-Pozo J. Wireless multimedia sensor networks: Current trends and future directions. *Sensors*, 2010,10(7):6662–2717. [doi: 10.3390/s100706662]
- [4] Intanagonwiwat C, Govindan R, Estrin D, Heidemann J, Silva F. Directed diffusion for wireless sensor networking. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 2003,11(1):2–16. [doi: 10.1109/TNET.2002.808417]
- [5] Shafiullah GM, Gyasi-Agyei A, Wolfs PJ. A survey of energy-efficient and QoS-aware routing protocols for wireless sensor networks. In: *Proc. of the Int'l Conf. on Telecommunications and Networking/Int'l Conf. on Industrial Electronics, Technology and Automation*. Univ Bridgeport: IEEE, 2008. 352–357. [doi: 10.1007/978-1-4020-8737-0_63]
- [6] Sohrabi K, Gao J, Ailawadhi V, Pottie GJ. Protocols for self-organization of a wireless sensor network. *IEEE Personal Communications*, 2000,7(5):16–27. [doi: 10.1109/98.878532]
- [7] Tian H, Stankovic JA, Lu CY, Abdelzaher T. SPEED: A stateless protocol for real-time communication in sensor networks. In: *Proc. of the 23rd Int'l Conf. on Distributed Computing Systems Workshops*. Providence: IEEE Computer Society, 2002. 46–55. [doi: 10.1109/ICDCS.2003.1203451]
- [8] Felemban E, Lee CG, Ekici E. MMSPEED: Multipath multi-SPEED protocol for QoS guarantee of reliability and timeliness in wireless sensor networks. *IEEE Trans. on Mobile Computing*, 2006,5(6):738–754. [doi: 10.1109/TMC.2006.79]
- [9] Deb B, Bhatnagar S, Nath B. ReInForM: Reliable information forwarding using multiple paths in sensor networks. In: *Proc. of the 28th Annual IEEE Int'l Conf. on Local Computer Networks Held in Conjunction with Workshop on High-Speed Local Networks/Workshop on Wireless Local Networks*. Bonn Konigswinter: IEEE Computer Society, 2003. 406–415. [doi: 10.1109/LCN.2003.1243166]
- [10] Sun Y, Ma HD, Liu L. An ant-colony optimization based service aware routing algorithm for multimedia sensor networks. *Chinese Journal of Electronics*, 2007,35(4):705–711 (in Chinese with English abstract).
- [11] Kandris D, Tsagkaropoulos M, Politis I, Tzes A, Kotsopoulos S. Energy efficient and perceived QoS aware video routing over wireless multimedia sensor networks. *Ad Hoc Networks*, 2011,9(4):591–607. [doi: 10.1016/j.adhoc.2010.09.001]
- [12] Dai R, Wang P, Akyildiz IF. Correlation-Aware QoS routing for wireless video sensor networks. In: *Proc. of the IEEE Global Telecommunications Conf. on Globecom (GLOBECOM 2010)*. Miami: IEEE, 2010. 1–5. [doi: 10.1109/GLOCOM.2010.5684202]
- [13] Fonoage M, Cardei M, Ambrose A. A QoS based routing protocol for wireless sensor networks. In: *Proc. of the IEEE 29th Int'l Performance Computing and Communications Conf. (IPCCC)*. Albuquerque: IEEE Computer Society, 2010. 122–129. [doi: 10.1109/PCCC.2010.5682321]
- [14] Hounghbadji T, Pierre S. QoSNET: An integrated QoS network for routing protocols in large scale wireless sensor networks. *Computer Communications*, 2010,33(11):1334–1342. [doi: 10.1016/j.comcom.2010.03.017]
- [15] Yahya B, Ben-Othman J. An energy efficient and QoS aware multipath routing protocol for wireless sensor networks. In: *Proc. of the IEEE 34th Conf. on Local Computer Networks*. Zurich: BBN Technologies, 2009. 93–100. [doi: 10.1109/LCN.2009.5355184]
- [16] Cobo L, Quintero A, Pierre S. Ant-Based routing for wireless multimedia sensor networks using multiple QoS metrics. *Computer Networks*, 2010,54(17):2991–3010. [doi: 10.1016/j.comnet.2010.05.014]

- [17] Vetro A, Wiegand T, Sullivan GJ. Overview of the stereo and multiview video coding extensions of the H.264/MPEG-4 AVC standard. Proc. of the IEEE, 2011,99(4):626–642. [doi: 10.1109/JPROC.2010.2098830]
- [18] Dufaux F, Gao W, Tubaro S, Vetro A. Distributed video coding: Trends and perspectives. Eurasip Journal on Image and Video Processing, 2009,2009(4):1–13. [doi: 10.1155/2009/508167]
- [19] Wiegand T, Sullivan GJ, Bjontegaard G, Luthra A. Overview of the H.264/AVC video coding standard. IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology, 2003,13(7):560–576. [doi: 10.1109/TCSVT.2003.815165]
- [20] Heinzelman WB, Chandrakasan AP, Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks. IEEE Trans. on Wireless Communications, 2002,1(4):660–670. [doi: 10.1109/TWC.2002.804190]
- [21] Wang Z, Crowcroft J. Quality-of-Service routing for supporting multimedia applications. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1996,14(7):1228–1234. [doi: 10.1109/49.536364]
- [22] Dorigo M, Birattari M, Stutzle T. Ant colony optimization. IEEE Computational Intelligence Magazine, 2006,1(4):28–39. [doi: 10.1109/MCI.2006.329691]
- [23] Stützle T, Hoos HH. MAX-MIN ant system. Future Generation Computer Systems, 2000,16(8):889–914. [doi: 10.1016/S0167-739X(00)00043-1]
- [24] Ke CH, Shieh CK, Hwang WS, Ziviani A. An evaluation framework for more realistic simulations of MPEG video transmission. Journal of Information Science and Engineering, 2008,24(2):425–440.

附中文参考文献:

- [2] 马华东,陶丹.多媒体传感器网络及其研究进展.软件学报,2006,17(9):2013–2028. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/2013.htm> [doi: 10.1360/jos172013]
- [10] 孙岩,马华东,刘亮.一种基于蚁群优化的多媒体传感器网络服务感知路由算法.电子学报,2007,35(4):705–711.



曹啸(1986—),男,江苏南京人,硕士,主要研究领域为无线传感器网络路由机制,数据融合技术.



孙力娟(1963—),女,博士,教授,博士生导师,CCF 会员,主要研究领域为无线传感器网络,计算机软件在网络通信中的应用.



王汝传(1943—),男,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为无线传感器网络,普适计算与移动 Agent 技术.



肖甫(1980—),男,博士,副教授,CCF 会员,主要研究领域为无线多媒体传感器网络中拓扑控制技术.



黄海平(1981—),男,博士,副教授,CCF 会员,主要研究领域为无线传感器网络,分布式计算与信息安全.