基于鱼群优化的车载自组织网络路由算法

罗　龙[1]，胡凯文[1]，盛　丽[1]，孙　罡[1*]，曹可建[2]，虞红芳[1]

(1. 电子科技大学光纤传感与通信教育部重点实验室　成都　611731；2. 国家计算机网络应急技术处理协调中心　北京 海淀区　100089)

【摘要】该文提出了一种基于鱼群优化且适用于城市道路环境的车载自组织网络路由算法。针对车载自组织网络中车辆的高速移动导致网络状态和拓扑频繁变化的特点，利用鱼群优化模型辅助搜索，及时为车辆找到新的最优中继节点，以保障网络中消息传输的性能。该文提出的鱼群路由优化算法 (fish swarm routing, FSR)，具有收敛速度快、效率高等优点。实验结果表明，相较于已有的车载自组织网络路由算法，该算法具有更低的传输时延和更高的传输成功率。

关　键　词　时延；　鱼群优化；　路由；　车载自组织网络

中图分类号　TN915.9　　**文献标志码**　A　　doi:10.12178/1001-0548.2021038

Routing Algorithm Based on Fish Swarm Optimization for Vehicular Ad Hoc Networks

LUO Long[1], HU Kai-wen[1], SHENG Li[1], SUN Gang[1*], CAO Ke-jian[2], and YU Hong-fang[1]

(1. Key Lab of Optical Fiber Sensing and Communications, University of Electronic Science and Technology of China　Chengdu　611731;
2. National Computer Network Emergency Response Technical Team/Coordination Center of China　Haidian Beijing　100089)

Abstract　This paper proposes a routing algorithm based on fish swarm optimization for vehicular Ad Hoc network (VANET) in urban road environment. In vehicular Ad Hoc networks, the high-speed movement of vehicles leads to frequent changes of network conditions and topology. This paper uses fish swarm optimization model to assist the search and find a new optimal relay node for vehicles to ensure the message transmission in VANET. This paper proposes the fish swarm routing (FSR) optimization algorithm, which has the advantages of fast convergence and high efficiency. Experimental results show that the proposed algorithm has lower transmission delay and higher packet delivery ratio compared to existing approaches.

Key words　delay;　fish swarm optimization;　routing;　vehicular Ad Hoc networks

车载自组织网络 (vehicular Ad Hoc networks, VANET) 是由车辆和路边基础设备 (road side units, RSU) 组成的新一代移动多跳自组织网络。VANET[1] 中的各节点通过信息交互，为系统提供包括道路状况 (车祸、道路损坏、车辆拥堵等)、可用资源 (可充电电源、空闲停车位等)、周期信标 (车辆节点基本必要通信消息) 等在内的多种消息。近年来，车载自组织网络得到了快速发展，已成为智能交通系统的关键技术之一[2]。

VANET 在安全、运输效率和信息娱乐方面都存在大量潜在的应用[3]。VANET 的早期应用大多是为了提高交通安全。近年来，在专用短程通信技术[4] (dedicated short range communication, DSRC) 频谱上，美国联邦通信委员会 (federal communications commission, FCC) 预留的频段在被交通安全相关应用使用后仍有大量剩余，于是许多其他应用相继出现[5]。如 VANET 在交通控制和道路维护系统中的实时数据收集[6]、自动化控制、智能收费、增强导航[7] 以及一些特定的位置服务、音视频传输、各种移动端的娱乐服务[5] 等各方面都发挥了至关重要的作用。因此，优化 VANET 通信技术对更安全、更方便智能的交通具有重要意义。

然而，VANET 中的节点具有高速移动的特性，网络拓扑时变性强，使用传统路由方法将导致极低的数据包传输成功率[8-9]。如文献 [10] 已经证实在车辆通信半径为 250 m、平均速度为 100 km/h

收稿日期：2021－02－04；修回日期：2021－03－26
基金项目：国家重点研发计划 (2019YFB1802800)
作者简介：罗龙 (1989－)，女，博士，主要从事软件定义网络、网络路由算法方面的研究.
通信作者：孙罡，E-mail: gangsun@uestc.edu.cn

的道路上，节点间的通信链路存在 15 s 的概率仅为 57%。此外，在发生交通事故、路面损坏等紧急情况时，消息无法及时传输将带来非常严重的后果[11]。因此，研究适用于 VANET 的可靠高效路由算法很有必要。

针对 VANET 中对时延敏感的消息的传输需求，本文提出一种基于鱼群优化的车载自组织网络路由算法。面对 VANET 动态变化的网络拓扑和网络拥塞情况，节点通过及时感知邻居节点当前发送队列是否拥塞、邻居节点是否可靠、邻居节点位置等周围环境的变化进行判断，选择消息传输的最优中继。

1　相关工作

随着万物智联的发展，VANET 的需求越来越多[12]，其路由算法研究成为了近年来网络领域的热点话题。在早期的移动自组织网络 (mobile Ad Hoc network, MANET) 研究中，研究者们提出了基于位置的路由算法 GPSR[13]、动态源路由算法 DSR[14]、源驱动路由算法 AODV[15] 等经典协议。近年来，越来越多的研究者将仿生学模型应用到 VANET 中，提出了基于蛛网模型的路由算法[16-17]、基于蚁群优化模型的路由算法[18]、基于微生物的启发式路由算法[19] 等很多性能优越的算法。

文献 [16] 提出以源节点所在路口为中心建立蛛网模型，在消息传输前发送探测消息探索蛛网，找到通往目的地的最优路径。在此基础上，文献 [17] 使用路边停驻车辆作为辅助进一步优化了蛛网模型的性能。文献 [18] 利用蚁群优化模型，通过蚁群探测消息让网络中的节点能够及时感知到周围路段情况，从而选出到达目的地的最优路径。文献 [19] 基于微生物模型对传输的历史反馈消息进行学习。文献 [13] 提出了 VANET 中一种经典的路由算法，该算法主要以贪心思想让当前节点在选择下一跳中继时总是选择距离目的节点最近的邻居节点作为中继。目前，很多研究工作仍以该算法为基准进行对比和参考。

在最近的研究中，研究者们考虑了 VANET 拓扑动态变化的特征，并针对该特征设计出了许多模型来提升路由性能。本文基于鱼群优化这一仿生模型，面向 VANET 中时延敏感类消息的传输提出一种新颖的路由算法，能够在保证消息传输成功率的同时，进一步优化传输时延，提升 VANET 的路由性能。

2　鱼群优化模型

人工鱼群算法 (artificial fish swarm algorithm，AFSA)[20] 是通过模仿鱼类觅食、跟随、聚集行为的智能优化算法，具有收敛速度快、效率高等优点。

觅食行为 (prey)：如图 1 所示，鱼类通过视觉感知水中食物浓度决定移动方向进行觅食行为。

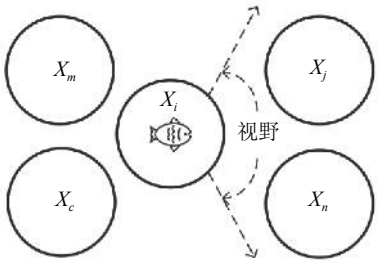

图 1　鱼类觅食示意图

在觅食行为中，假设某条鱼所在环境当前状态为 X_i，食物浓度为 $F(X_i)$，在其视野范围 ($D_{i,j}$<Visual) 内随机寻找环境状态为 X_j：

$$X_j = X_i + \text{Visual} \times \text{Rand}() \tag{1}$$

如果 $F(X_i)<F(X_j)$，则按照式 (2) 朝 X_j 的方向前进一步。

$$X_i^{(t+1)} = X_i^{(t)} + \frac{X_j - X_i^{(t)}}{\left|X_j - X_i^{(t)}\right|} \times \text{Step} \times \text{Rand}() \tag{2}$$

否则，重新随机选择状态 X_j，并判断是否满足前进条件。如果多次搜索后仍未找到合适的 X_j，则按照式 (3) 随机移动一步。

$$X_i^{(t+1)} = X_i^{(t)} + \text{Step} \times \text{Rand}() \tag{3}$$

跟随行为 (follow)：在鱼类觅食的过程中，当一条鱼或者几条鱼找到食物时，其他伙伴会跟随而来。假设当前一条鱼所在环境状态为 X_i，在其视野范围内 ($D_{i,j}$<Visual) 探索邻域伙伴所在位置 X_j 的食物浓度 $F(X_j)$，寻找使得 $F(X_j)$ 最大的 X_j(即该伙伴已找到食物浓度较高的区域)。如果 $F(X_j)<F(X_i)$ 且 $N_j/N_i<\delta$(N_j 为 X_j 区域内鱼的数量，N 为鱼的总数，δ 为拥挤因子)，表示 X_j 食物浓度较高且不太拥挤，鱼将按照式 (2) 向位置 X_j 前进一步；否则找寻次优的 X_j，多次尝试后仍无法找到时，执行觅食行为。

聚集行为 (swarm)：描述了鱼群会聚集在食物附近的现象。设鱼当前所在环境为 X_i，在其视野范围内 ($D_{i,j}$<Visual) 探索伙伴数量 N_c 及其中心位置 X_c。如果 X_c 所在位置的食物浓度 $F(X_c)<F(X_i)$ 且

$N_c/N_i<\delta$，表示该伙伴群中心食物浓度较高且不太拥挤，鱼将按照式 (4) 向位置 X_c 前进一步；否则找寻次优的 X_c，当多次尝试后仍无法找到时，执行觅食行为。

$$X_i^{(t+1)} = X_i^{(t)} + \frac{X_c - X_i^{(t)}}{\left|X_c - X_i^{(t)}\right|} \times \text{Step} \times \text{Rand}() \tag{4}$$

随机行为 (random)：当鱼群无法找到食物浓度较高的邻域时会在视野内随机移动，是觅食行为的一个缺省行为。

3 系统模型及路由算法设计

3.1 VANET 系统建模

本模型将一片区域内由车辆组成的自组织网络类比作一片水域，并将负载较轻、传输成功率高的车辆视为食物。网络中车辆会定时产生包含通信范围的消息，这些消息看作鱼群辅助消息 (fish message, FM)。鱼类前进的每一步视作 FM 从当前节点到下一个节点之间的一跳传输。每辆车有设备负载状态 θ 和传输成功率 μ 两个状态参数。食物浓度可以由式 (5) 计算得到，其中 α 和 β 分别为设备负载情况和设备传输成功率的权重。

$$F(S_i) = \alpha\theta + \beta\mu \tag{5}$$

当 $F(S_i)$ 大于阈值 γ 时，车辆 S_i 为食物车辆。

3.1.1 觅食行为

当网络中各车辆设备状态空闲、传输成功率高时，如图 2 所示，以 S_1 为例，根据鱼群算法，FM 在 S_1 处执行觅食行为。根据其邻居状态表 1：$\theta_2=\theta_3$，$\mu_2=\mu_3$。在 S_1 处，根据式 (5) 得到 $F(S_2)=F(S_3)>\gamma$，S_2 和 S_3 均为食物节点。S_1 处的 FM 认为找到了两个食物节点，将 S_2 和 S_3 添加到优先集合 P 当中。

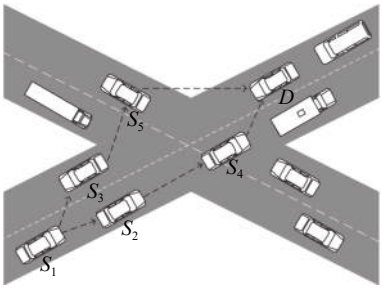

图 2 网络空闲时道路车辆情况

表 1 S_1 邻居状态表

	θ	μ
S_2	θ_2	μ_1
S_3	θ_3	μ_2

此时，FM 会以式 (6) 给出的概率游向找到的某一食物节点：

$$P(S_i) = \frac{\delta_i F(S_i)}{\sum\limits_{S_j \in N_p} \delta_i F(S_i)} \tag{6}$$

式中，N 为所有满足 $F(S_j)>\gamma$ 的邻居车辆组成的集合；N_p 为优先集合；δ_i 为 S_i 对应的拥挤因子，δ_i 由式 (7) 计算得到：

$$\delta_i = \frac{N - N_F}{N} \tag{7}$$

FM 在到达食物节点后会判断当前区域是否拥挤。若不拥挤，则停留在此处；反之，执行随机行为，并携带当前车辆是食物节点的消息，随机游向任意邻居。概率由均匀分布的概率密度函数式给出：

$$P(S_i) = \frac{1}{N_{\text{nei}}} \tag{8}$$

式中，N_{nei} 为邻居数量。

拥挤因子有助于避免所有 FM 聚集在一个食物节点上。如果车辆周边有多个食物节点，受拥挤因子的影响，FM 会平衡地流向这些食物节点，为正常消息的传输提供更多选择，避免正常消息全部流向同一个食物节点，浪费其他食物节点的资源，造成算法的局限性。同时，在聚集了一定的 FM 后，食物节点会将后续 FM 携带其相关信息后随机转发出去，从而使周围的邻居都能感知到该食物节点，并将后续的业务消息交由该食物节点转发。

当网络发生拥塞时，如图 3 所示，假定车辆 S_3 设备负载较高，FM 在执行觅食行为时发现 $\theta_3<\theta_2$，$F(S_3)<\gamma<F(S_2)$。S_1 更新优先集合，S_2 仍为食物节点，S_3 退出优先集合。此时 S_1 处的 FM 会游向 S_2。为了提升模型容错率，如果 S_1 还有其他邻居的食物浓度比较高且大于 γ，那么 FM 会以式 (6) 的概率来选择前进方向。

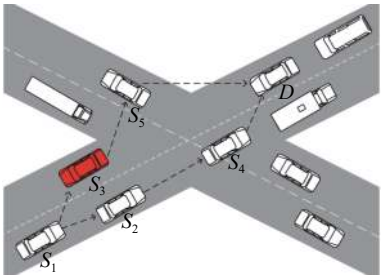

图 3 网络拥塞时道路车辆情况

在网络拓扑发生变化时，如图 4 所示，车辆 S_5 在行驶过程中导致 S_3->S_5 链路中断，S_3 的丢包

率增加，此时 $\mu_2>\mu_3$，$F(S_2)>\gamma>F(S_3)$。更新优先集合，S_2 仍为食物节点，S_3 退出优先集合。如果在 S_1 处还有其他邻居处的食物浓度大于 γ，FM 仍以式 (6) 的概率选择前进方向。

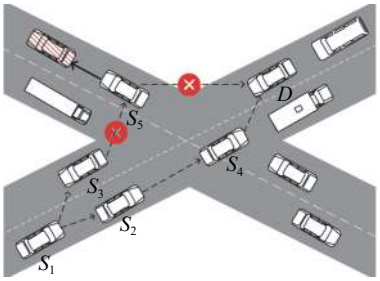

图 4　网络拓扑变化时情况

算法 1：FM 的觅食行为

车辆 S_0、鱼群消息 FM、优先集合 P、S_0 邻居集合 $N(S_1,S_2,\cdots,S_j)$、拥挤因子 δ、食物浓度和拥挤因子阈值 γ、σ

for($S_j\in N$)

　　if($F(S_j)>F(S_0)$&&$F(S_j)>\gamma$)

　　S_j 加入 P

　　else if($F(S_j)<\gamma$)

　　S_j 退出 P

　　end if

end for

if($P\neq\phi$)

　　以式 (6) 给出的概率游向某一邻居 S_j

else if($\delta<\sigma$)

　　停留在 S_0 处

else

　　携带当前车辆信息，以式 (8) 给出的概率游向某一邻居 S_j

end if

3.1.2　跟随行为和聚集行为

跟随行为描述的是鱼类会跟随已找到食物的伙伴的轨迹的现象。聚集行为则是指鱼类会聚集在食物浓度较高的区域，其本质也是跟随行为导致的。因此，本模型将两种行为统一称作跟随行为。

如前文所述，FM 在 S_1 处通过觅食行为成功找到一个或多个食物节点后，会将食物节点添加到优先集合中并为其设置拥挤因子 δ。对于后续到达 S_1 处的 FM，直接根据优先集合判断前进方向。在优先集合中，元素是伙伴已选择的方向，往往食物浓度比较高，且元素数量远小于邻居表，因此，跟随行为在提高搜索效率的同时，可以让后续 FM 更快地发现食物节点。如算法 2 所示，如果优先集合里有一个或者多个方向可供选择，FM 会根据式 (6) 给出的概率来选择前进方向。如果优先集合中没有元素，表示之前没有伙伴找到食物，无法跟随，此时执行觅食行为。

算法 2：FM 的跟随行为

车辆 S_0、鱼群消息 FM、优先集合 P、S_0 邻居集合 $N(S_1,S_2,\cdots,S_j)$

if($P\neq\phi$)

　　FM 以式 (6) 给出的概率游向某一邻居 S_j

else

　　执行觅食行为

end if

3.1.3　扩散行为

为更好地适应 VANET 动态变化的网络环境，本模型在鱼群优化的基础上增加一个仿生学行为：扩散行为。该行为描述的是在食物浓度较高的区域内，食物由于鱼群的聚集很快被消耗殆尽后，鱼群扩散并重新寻找食物的行为。本模型中，食物节点在未来一段时间内会承载当前区域内大部分的中继任务，导致设备负载增加和传输效率降低。另外，当网络拓扑改变时 (邻居车辆驶离食物节点的通信范围)，食物节点在接收消息后无法转发，也会导致传输成功率降低。在这些情况下，聚集的 FM 认为食物被消耗殆尽，执行扩散行为并重新寻找食物。周围节点收到扩散的 FM 后获知该食物节点已失效，将更新自身优先集合并重新选择业务消息的中继。

算法 3：FM 的扩散行为

车辆 S_0、鱼群消息 FM、优先集合 P、食物浓度阈值 γ

if($F(S_0)<\gamma$)

　　聚集在 S_0 处的所有 FM 携带 S_0 的状态执行觅食行为并扩散

end if

3.2　路由算法描述

基于 3.1 节中的 VANET 系统模型，本文的路由算法的主要步骤如下：当通信需求产生时，源车辆 S_0 首先判断目的车辆 D 是否在通信范围内，若是，则直接将消息发给目的点，路由结束；反之，执行以下步骤进行路由。

1) 选择第一代候选节点：为使消息每一跳传输都在向目的节点靠近的方向上进行，当某邻居节点 S_j 与目的节点之间的距离 dis_{S_jD} 小于源节点和目的节点之间的距离 dis_{SD} 时，将 S_j 添加到第一代候

选节点集合 $Q(S_1,S_2,\cdots)$ 中。若 Q 为空，为避免消息向远离目的节点的方向传输而出现回传和成环的问题，将直接丢弃数据包；若 Q 不为空，执行步骤 2)。

2) 选择第二代候选节点：为使消息传输经过的跳数尽量小，每次选择时应满足以下两个原则：1) 邻居节点 S_j 和目的节点 D 之间的距离dis_{S_jD}尽量小。如图 5 所示，S_0 向 D 发送消息时将选择 S_2 以避免增加不必要的跳数；2) 源节点 S_0 往邻居节点 S_j 的方向 $S_0\rightarrow S_j$ 与源节点 S_0 往目的节点 D 的方向 $S_0\rightarrow S_D$ 之间的夹角 ω 尽量小。如图 6 所示，S_0 在向目的车辆 D 发送消息时，将在通信半径范围内选择 S_2 或者 S_3，从而避免传输方向扩散和偏离目标车辆。

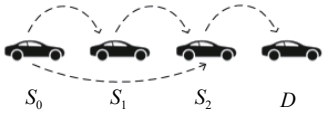

图 5 原则 1 示意图

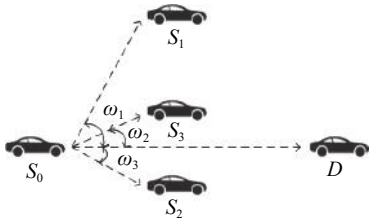

图 6 原则 2 示意图

本文综合考虑dis_{S_jD}和 ω 两个因素，使用 TOPSIS 方法[21] 从集合 $Q(S_1,S_2,\cdots,S_m)$ 中选出第二代候选节点集合 $T(S_1,S_2,\cdots,S_n)(n<m)$。TOPSIS 是一种通过对现有的对象进行相对优劣评价而逼近理想解的排序法。假设集合 Q 中有 m 辆车，各车辆的距离夹角参数如表 2 所示。

表 2 距离夹角参数表

节点	距离	夹角
S_1	dis_{S_1D}	ω_1
S_2	dis_{S_2D}	ω_2
⋮	⋮	⋮
S_m	dis_{S_mD}	ω_m

对于dis_{S_jD}和 ω 两个评价指标，建立如下特征矩阵：

$$\boldsymbol{D}=\begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} \\ x_{21} & x_{22} \\ \vdots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} \end{bmatrix}$$

对特征矩阵进行规范化处理，利用式 (9) 计算得到规范化矩阵元素 r_{ij}：

$$r_{ij}=\frac{r_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m} r_{ij}^2}} \tag{9}$$

为以上两个评价指标分别设置权重 τ_1 和 τ_2，由式 (10) 计算权重规范化矩阵元素：

$$v_{ij}=\tau_j r_{ij} \tag{10}$$

式中，$i=1,2,\cdots,m$；$j=1,2$。

根据权重规范化矩阵，计算每个指标的最优解和最劣解。由于距离更短和夹角更小的目标更优，因此，权重规范化矩阵中各列的最小值即为最优解：

$$\begin{cases} A^*=\{\min\{v_{i1}\},\min\{v_{i2}\}\} \\ A^-=\{\max\{v_{i1}\},\max\{v_{i2}\}\} \end{cases} \tag{11}$$

式中，$i=1,2,\cdots,m$。

可以根据式 (12) 计算出集合 Q 中车辆的两个评价指标与其对应的最优解和最劣解的距离：

$$\begin{cases} S_i^*=\sqrt{\left(v_{i1}-a_1^*\right)^2+\left(v_{i2}-a_2^*\right)^2} \\ S_i^-=\sqrt{\left(v_{i1}-a_1^-\right)^2+\left(v_{i2}-a_2^-\right)^2} \end{cases} \tag{12}$$

式中，$a_i^*\in A^*$；$a_i^-\in A^-$。

集合 Q 中每辆车的最终得分为：

$$S_i=\frac{S_i^-}{S_i^-+S_i^*} \tag{13}$$

将选择得分较大的前 n 位加入到第二代候选集合 $T(S_1,S_2,\cdots,S_n)$ 中。这些候选节点能够较好地避免消息传输中的无意义传输，同时保证每一次传输都尽量向目的节点靠近。

3) 选择最优中继：引入鱼群优化模型后，算法得到优先集合 P，通过选择 $T\cap P$ 中的元素可找到通往目的节点方向上的食物节点，将消息交给负载较轻、传输成功率高的食物节点进行中继，从而提升路由性能。若 $T\cap P=\phi$，查询邻居状态表，根据式 (5) 计算邻居食物浓度，选出当前非食物节点中食物浓度最大的节点。若 $T\cap P\neq\phi$，计算 $S_i\in T\cap P$，根据式 (5) 选出 S_i 中食物浓度最大的节点。最后，将业务消息交给选出的邻居 S_j，S_j 收到消息后执行新一轮路由算法选择下一跳中继。

算法 4：消息路由算法

车辆 S_0 收到需要转发业务消息 MSG

目的车辆 D、优先集合 P

S_0 邻居集合 $N(S_1,S_2,\cdots,S_j)$

if(D 不在 S_0 的通信半径内)

for($S_j \in N$)

if($\mathrm{dis}_{S_jD}<\mathrm{dis}_{S_0D}$)

将 S_j 加入集合 Q

end if

end for

if($Q\neq\phi$)

基于 TOPSIS 方法，从集合 Q 中选出候选节点集合 T

else

丢弃 MSG，算法结束

end if

if($T\cap P\neq\phi$)

在 $S_i\in T\cap P$ 中选择 $F(S_j)_{\max}$ 的邻居 S_j 作为 MSG 的中继

else

在所有邻居中选择 $F(S_j)_{\max}$ 的邻居 S_j 作为 MSG 的中继

end if

else

将 MSG 直接交给目的车辆 D

end if

4　仿真实验与结果分析

4.1　仿真实验设计

本文在 SUMO[16, 22-23] 上建立道路车辆模型，使用 Veins[22-23] 框架在网络仿真平台 OMNET[22-23] 上搭建实验环境。表 3 给出了实验中使用的主要参数。仿真实验采用图 7 中所示的 2 km × 2 km 地图[15]。

4.2　结果分析

为了评估算法性能，实验将本文算法 FSR 与基于仿生学的 VANET 路由算法 PASRP[17]、URAS[19] 及经典的 VANET 路由算法 GPSR[13] 进行了对比。

4.2.1　消息平均到达时延

图 8 展示了消息平均到达时延随车辆密度变化的结果。这部分实验中的控制业务消息产生速率为 10(个/s)。仿真结果显示，本文算法 FSR 优于其他 3 种对比算法。总体而言，随着车辆密度增加，时延呈上升趋势。这是因为更多的消息能够到达目的点，不会在中途被丢弃。另外，在车辆密度低时，PASRP 的平均到达时延略高于 GPSR，这是因为 PASRP 需要等待探测消息的回馈才能为业务消息规划路由。

表 3　仿真实验参数设置

参数名	参数值
仿真范围/km	2×2
车辆通信半径/m	250
MAC协议	IEEE802.11p
仿真时间/s	4 000
车辆移动速度/km·h^{-1}	50
基础信标消息周期/Hz	2
信标消息大小/bytes	20
鱼群消息产生周期/Hz	5
鱼群生存周期/hops	20
鱼群消息大小/bytes	28
业务消息大小/bytes	128
业务消息流数/对	24

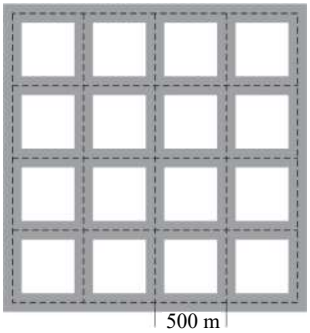

图 7　仿真地图

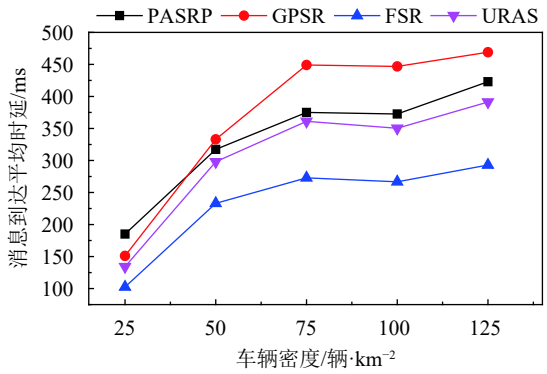

图 8　消息平均到达时延对比

图 9 展示了消息平均到达时延随业务消息产生速率变化的结果。这部分实验中的控制车辆密度为 75 辆/km^2。仿真结果显示，本文算法 FSR 优于其他 3 种对比算法。随着业务消息的增多，时延呈递增趋势。

以上两组实验结果都展示了 FSR 在降低 VANET 的消息传输时延方面的性能最优，这得益于基于鱼群优化的设计。

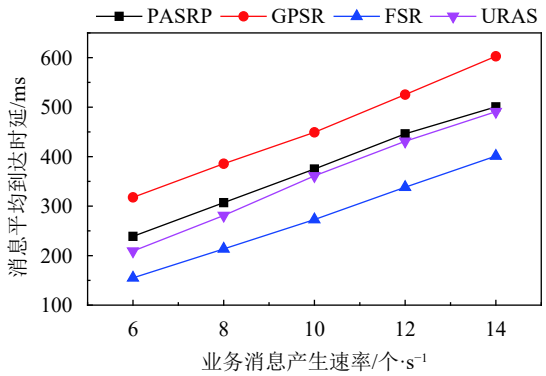

图 9　消息平均到达时延对比

4.2.2　消息到达率

图 10 展示了控制业务消息产生速率为 10 个/s 时，消息到达率随车辆密度改变的实验结果。FSR 的消息到达率略高于其他对比算法。这是因为 FSR 引入了鱼群优化模型，节点可以动态找到周围传输成功率高的节点转发消息，从而更有效地保证了消息到达率。当车辆密度足够大的时候，FSR 的性能略差于 PASRP，这是因为 PASRP 建立了完整路由，能够更好地保证消息到达率。

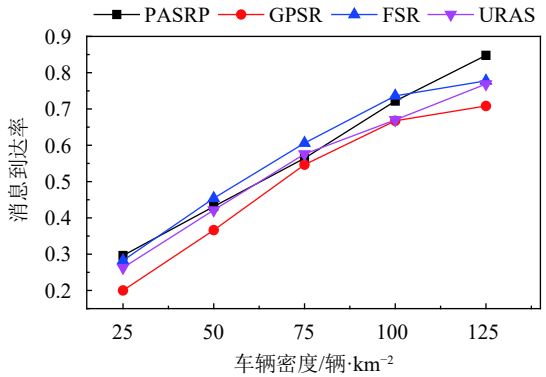

图 10　消息到达率对比

图 11 展示的是控制车辆密度为 75 辆/km^2 时，消息到达率随业务消息产生速率变化的实验结果。以上两组仿真实验结果显示，FSR 能够保证较高的消息传输成功率。

4.2.3　通信开销

通信开销定义为传输一个业务消息所需辅助控制消息的平均字节数。图 12 展示了控制业务消息产生速率为 10 个/s 时，通信开销随车辆密度变化的情况。总的来说，FSR 和 PASRP 的通信开销高于 GPSR 和 URAS。这是因为 FSR 需要网络中存在一定数量的鱼群消息，而 PASRP 则需要发送一定的蛛网探测消息以建立完备的路由。当车辆密度较低时，产生的辅助控制消息较少，成功到达的业务消息也较少。随着车辆密度增加，周期消息与辅助消息增加，成功到达的业务消息增加，此时通信开销会短暂上升。但随着车辆数量进一步增加，成功传输的业务消息增长速率将高于辅助控制消息的增长速率，此时通信开销会呈现递减趋势。

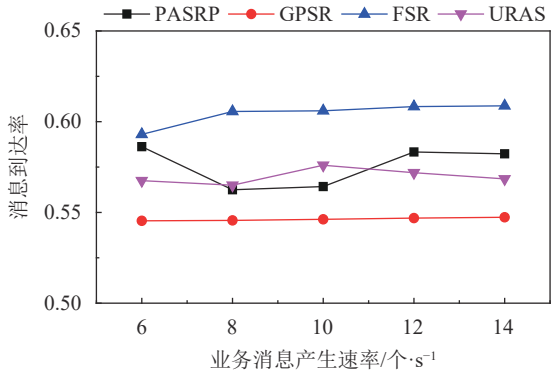

图 11　消息到达率对比

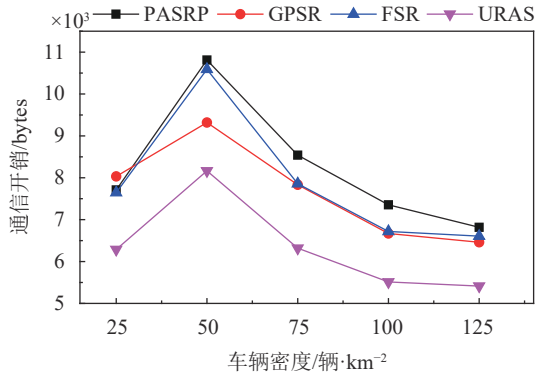

图 12　通信开销对比

图 13 展示了控制车辆密度为 75 辆/km^2 时，通信开销随业务消息产生速率变化的情况。实验结果显示，FSR 与 PASRP 的开销大致相当。当业务消息数量较少时，FSR 的通信开销低于 GPSR 和 PASRP，这是由于此时网络拥塞情况较少，需要的鱼群辅助消息较少。当业务消息数量增多时，网络拥塞情况随之变严重，为了保持传输性能需要的鱼群辅助消息也会增加，此时 FSR 的通信开销会高于 GPSR 和 PASRP。

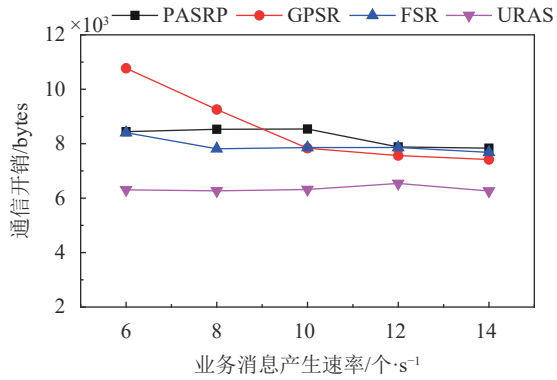

图 13　通信开销对比

以上实验结果表明，本文所提的 FSR 算法能够在增加少量通信开销的前提下，显著改善 VANET 中消息到达的平均时延和消息到达率。

5 结 束 语

本文将鱼群优化模型嵌入到车载自组织网络当中，提出了基于鱼群优化的 VANET 路由算法 FSR。FSR 通过鱼群快速搜索到节点附近区域内传输性能较好的邻居，在正常业务消息传输时及时利用这些节点提高传输性能。同时，在 VANET 网络情况和拓扑频繁改变下，鱼群优化模型也能够以较快的速度再次搜索到新的食物节点。本文提出的方案能够契合车载自组织网络的特点，提升路由性能。

参 考 文 献

[1] SUN Gang, ZHANG Yi-jing, YU Hong-fang, et al. Intersection fog-based distributed routing for V2V communication in urban vehicular Ad Hoc networks[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2020, 21(6): 2409-2426.

[2] CONTI M, GIORDANO S. Mobile ad hoc networking: Milestones, challenges, and new research directions[J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(1): 85-96.

[3] HARTENSTENIN H, LABERTEAUX K P. A tutorial survey on vehicular Ad Hoc networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2008, 46(6): 164-171.

[4] SUN Gang, SONG Liang-jun, YU Hong-fang, et al. V2V routing in a VANET based on the autoregressive integrated moving average model[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(1): 908-922.

[5] YAN Gong-jun, OLRIU S. A probabilistic analysis of link duration in vehicular Ad Hoc networks[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2011, 12(4): 1227-1236.

[6] DU Rong, CHEN Cai-lian, YANG Bo, et al. Effective urban traffic monitoring by vehicular sensor networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64(1): 273-286.

[7] ZEADALLY S, HUNT R, CHEN Y, et al. Vehicular Ad Hoc networks: Status, results, and challenges[J]. Telecommunication Systems, 2010, 50(4): 1-25.

[8] 陈立家, 江昊, 吴静, 等. 车用自组织网络传输控制研究[J]. 软件学报, 2007, 18(6): 1477-1490.
CHEN Li-jia, JIANG Hao, WU Jing, et al. Research on transmission control on vehicle Ad Hoc network[J]. Journal of Software, 2007, 18(6): 1477-1490.

[9] JIANG Hao, HOU K M, LI Jian-jin, et al. The capacity and packets delivery of MANET on road: MANETOR[C]// Proceedings of the Global Mobile Congress (GMC2005). Las Vegas: CSREA Press, 2005: 553-558.

[10] RUDACK M, MEINCKE M, LOTT M. The dynamic of ad-hoc networks for intervehicle communications[C]// Proceedings of Internation Conference on Wireless Networks. Las Vegas: [s.n.], 2002: 44-48.

[11] ZHOU Huan, XU Shou-zhi Z, REN Dong, et al. Analysis of event-driven warning message propagation in vehicular Ad Hoc networks[J]. Ad Hoc Networks, 2017, 55(2): 87-96.

[12] SUN Gang, YU Ming-yue, LIAO Dan, et al. Analytical exploration of energy savings for parked vehicles to enhance VANET connectivity[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019, 20(5): 1749-1761.

[13] KARP B, KUNG H. GPSR: Greedy perimeter stateless routing for wireless networks[C]//Proceedings of the 6th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking. Boston: [s.n.], 2000: 243-254.

[14] JOHNSON D, MALTZ D, BROCH J. DSR: The dynamic source routing protocol for multi-hop wireless Ad Hoc networks[J]. Ad Hoc Networks, 2001, 5(1): 139-172.

[15] PEKINS C, BELDING-ROYER E. Ad-Hoc on-demand distance vector routing[C]//Proceedings of Second IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications (WMCAS'99). New Orleans: [s.n.], 1999: 1-11.

[16] QIU Tie, WANG Xin, CHEN Chen, et al. TEMD: A spider-web-like transmission mechanism for emergency data in vehicular Ad Hoc networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(9): 8682-8694.

[17] LIU Ha, QIU Tie, ZHOU Xiao-bo, et al. Parking-area-assisted spider-web routing protocol for emergency data in urban VANET[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(1): 971-982.

[18] GOUDARZI F, ASGARI H, AI-RAWESHIDY H S. Traffic-aware VANET routing for city environments-a protocol based on ant colony optimization[J]. IEEE Systems Journal, 2019, 13(1): 571-581.

[19] TIAN Da-xin, ZHENG Kun-xian, ZHOU Jian-shan, et al. A microbial inspired routing protocol for VANETs[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2018, 5(4): 2293-2303.

[20] 李晓磊. 一种新型的智能优化方法——人工鱼群算法[D]. 杭州: 浙江大学, 2003.
LI Xiao-lei. A new intelligent optimization method - artificial fish school algorithm[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2003.

[21] HWANG C, YOON K. Multiple attribute decision making[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1981.

[22] SUN Gang, YU Ming-yue, LIAO Dan, et al. Bus trajectory-based street-centric routing for message delivery in urban vehicular Ad Hoc networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(8): 7550-7563.

[23] LI He, DONG Mian-xiong, OTA K. Control plane optimization in software-defined vehicular Ad Hoc networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(1): 7895-7904.

编　辑　刘飞阳