

基于远洋渔船作业场景的机会网络移动模型

陈成明^{1,2,3}, 虞丽娟¹, 凌培亮¹, 曹守启^{2,3}

(1. 同济大学 机械与能源工程学院, 上海 201804; 2. 上海海洋大学 工程学院, 上海 201306; 3. 国家远洋渔业工程技术研究中心, 上海 201306)

摘要: 在分析现有移动模型性能的基础上, 针对远洋渔船机会网络中节点运动作业时的特点, 提出了一种符合远洋渔船移动特征的平滑转弯半马尔科夫移动模型(Smooth Turn Semi-Markov Smooth Mobility Model, 简称 STSMS 模型)。从节点运动方程和平均稳态速率两方面进行了理论分析, 并对节点运动轨迹和平均稳态速率进行了仿真实验。仿真结果表明, 构建的 STSMS 模型能较好地反映节点的运动特点, 并具有速率不随时间延长发生衰减的特性, 适用于远洋渔船机会网络的模拟仿真。

关键词: 机会网络; 移动模型; 远洋渔船; 平均稳态速率

中图分类号: TN915.04

文献标志码: A

Mobility Model of Opportunistic Networks Based on Ocean Fishing Vessel Operation Scenarios

CHEN Chengming^{1,2,3}, YU Lijuan¹, LING Peiliang¹, CAO Shouqi^{2,3}

(1. College of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. School of Engineering Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 3. National Center for Ocean Fishing Engineering Technology Research, Shanghai 201306, China)

Abstract: Based on the analysis of the performance of the classical mobility models and the characteristic in Ocean Fishing Vessel Opportunistic Networks (OFVON), this paper presents a Smooth Turn Semi-Markov Smooth Mobility Model (STSMS). An analysis is also made of the equation of node motion and stationary average speed, and then the trajectories and stationary average speed of nodes are proved by simulation. The results of simulation show that STSMS the established STSMS well coincides with the characteristic of node mobility and has not the attenuation characteristics as time increases. Thus, STSMS model can be applied to

simulation of OFVON.

Key words: opportunistic networks (ON); mobility model; ocean fishing vessel; stationary average speed

机会网络(Opportunistic Networks, 简称 ON)作为一种间歇式联通网络环境下依靠节点移动带来接触机会进行信息通信的手段, 更适合实际的自组网需求, 对未来的普适计算具有重大影响, 近几年来受到越来越多学者的关注^[1-6]。机会网络利用节点移动形成的通信机会以“存储-携带-转发”的路由模式实现通信, 能够处理网络分裂、时延等已有无线网络技术难以解决的问题, 主要应用于缺乏通信基础设施、网络环境恶劣的场合^[7], 如偏远地区网络传输、车载通信、野生动物追踪、便携式设备组网、紧急突发场合等^[8]。由于机会网络的传输机会依赖于节点移动, 不同移动模型对机会网络的网络性能有着不同的影响^[9]。文献^[10]研究了不同类型移动模型的适用场景及对机会网络路由协议仿真的影响, 同一路由协议在不同移动模型下的消息传输率和平均时延有大幅变化, 需要根据路由协议应用场景选择合适的移动模型。在远洋渔船机会网络(Ocean Fishing Vessel Opportunistic Network, 简称 OFVON)中, 渔船节点稀疏、节点移动规律复杂、场景范围大, 对网络的性能要求更高, 为保证网络稳定、高效的运行, 需对网络进行运行前的静态规划和运行中的动态拓扑重构。而实际的网络运行数据很难获得, 静态规划只能通过模拟仿真完成, 仿真中的移动模型是否符合实际的场景, 将直接影响静态规划结果。而现有的移动模型主要针对野生动物、人群和车辆组网建立的, 无法准确描述渔船节点移动的特性。事实上, 很难找到一个合适的移动模型完全适合远洋渔

收稿日期: 2017-07-13

基金项目: 上海市科委 2015 科技创新行动计划(15DZ1202202); 国家远洋渔业工程技术研究中心开放基金(A1-0203-00-2007-2)

第一作者: 陈成明(1978—), 男, 博士生, 主要研究方向为物联网工程、机械电子工程、人因工程。E-mail: cmchen@shou.edu.cn

通讯作者: 虞丽娟(1963—), 女, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为物联网工程、人因工程、体育工程。

E-mail: lju@shou.edu.cn

船作业时移动的场景,现有的这些移动模型只适用于一种或几种场景,无法适应所有场景.如果将这些模型直接应用于 OFVON 中,不仅无法表示 OFVON 中渔船节点移动的特征,而且直接影响仿真结果的合理性.因此,移动模型是否合理对路由协议中相关参数的设计具有举足轻重的作用.

现有移动模型分为个体移动模型和群组移动模型两类,文献^[11]对机会网络的移动模型进行了详细的分类和阐述.对于移动模型的研究主要有两种途径,一是基于解析模型进行理论或仿真分析,经典的移动模型主要有 RW(Random Walk)模型^[12]、RWP(Random Way Point)模型^[13]、RD(Random Direction)模型^[14]、SRM(Smooth Random Mobility)模型^[15]、GM(Gauss-Markov)模型^[16]和 SMS(Semi-Markov Smooth)模型^[17]等;另一种研究途径是基于真实运动轨迹集来进行统计分析,比较著名的项目有 MIT 的 Reality Mining 项目^[18],UCSD 的 Wireless Topology Discovery 项目^[19]等.

在上述这些用于仿真的移动模型中,SMS 模型目前应用最为广泛,它融合了 SRM 模型和 GM 模型的特征,认为节点一次完整的运动由加速、匀速、减速和静止 4 种状态组成,并在匀速状态中增加了高斯扰动,但不能很好地描述速率变化较小且有较大转弯的场合,对于加速结束后运动规律变化复杂的场合也很难描述.

一种好的移动模型要具有两个重要的特征:① 实体节点的运动为平滑运动,即节点的速率和方向具有时间相关性,不会发生大的突变;② 平均速率平稳,不会随着时间的延长发生衰减.

因此,本文研究了一种考虑渔船移动特征的平滑转弯的半马尔科夫移动模型(Smooth Turn Semi-Markov Smooth Mobility Model,简称 STSMS 模型),使其仿真结果更接近现实的渔船作业时的运动情形.

1 SMS 模型

SMS 模型是对 RD 模型进行了改进,使之更符合现实的移动场景. SMS 模型基于平稳运动的物理规律进行建模,一个典型的 SMS 模型移动由 3 个连续的移动阶段和一个暂停阶段(p -阶段)组成,移动阶段包括加速阶段(α -阶段)、匀速阶段(β -阶段)和减速阶段(γ -阶段).连续时间的 SMS 随机过程可用一个迭代的 4 状态转换过程(Transition Process)来表

示,如图 1 所示.

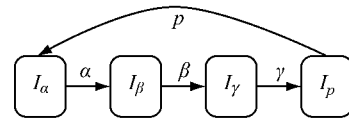


图 1 SMS 模型 4 状态

Fig.1 Four stages of SMS

用 I 表示 SMS 模型的状态空间,即 $I = \{I_\alpha, I_\beta, I_\gamma, I_p\}$,这里 $I(t)$ 表示节点在时刻 t 所处的状态.在 SMS 移动的随机过程中, $\{Z(t), t \geq 0\}$ 表示各个阶段进行转移的过程,由于在两个连续的移动状态之间的转移时间服从离散的均匀分布,且该移动过程符合平滑移动的物理法则,因此称之为半马尔科夫模型.在 SMS 模型中,虽然在匀速状态增加了高斯扰动,但对于速率变化缓慢且经常有大转弯的场合没有描述,因此,OFVON 中的移动模型需要在 SMS 模型的基础上进行改进.

2 STSMS 模型描述

根据渔船运动特点,将渔船节点移动模型的运动分为加速、高速稳速、减速、低速稳速、转弯、减速和暂停 7 个阶段,7 个阶段用来描述一次完整渔船作业过程的 7 种状态.与原 SMS 模型不同的是,本文提出的 STSMS 模型,渔船在上一作业结束后开始加速航行,当速度达到目标经济航速时,渔船开始以较高的航速稳速航行,由于海域面积广,短时间内渔船近似以某一方向(航向)直线航行.当发现鱼群(或某一计划作业海域)开始作业时,渔船开始减速,直到速度达到作业航速(某一较低的航速)时,开始以较低的航速稳速航行进行作业,作业一段时间后,如需要拖网、拉网等作业时,将进入转弯阶段,在整个作业过程中,可能需要多次转弯.当作业结束后,渔船进入短时间的减速和暂停状态,进行休整,然后开始加速航行,进行下一个循环.定义:STSMS 模型包括加速、高速稳速、减速、低速稳速、转弯、减速和暂停 7 个运动状态.则该移动模型的随机过程可看成是一个迭代的 7 状态转移过程.用 I 表示模型的状态空间, $I = \{I_\alpha, I_\beta, I_\gamma, I_\delta, I_\epsilon, I_\eta, I_p\}$, $I(t)$ 表示节点在时刻 t 所处的状态.7 个运动阶段的移动模型如图 2 所示.

7 个阶段的集合定义为 $S = \{\alpha, \beta, \gamma, \delta, \epsilon, \eta, p\}$, Δt 表示时隙,时间以 Δt 进行划分,为了简单,将 Δt 标准化为 1.下面对各个阶段进行具体描述.

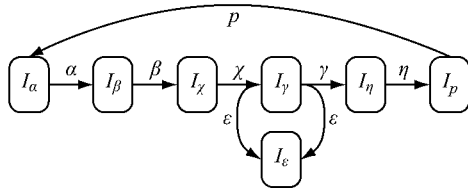


图 2 远洋渔船作业过程的 STSMS 模型

Fig.2 STSMS during ocean fishing vessel operation

2.1 加速航行阶段(α-阶段)

在初始时刻,渔船节点选择目标航速 $v_a \in U[v_{min}, v_{max}]$,航向 $\phi_a \in U[0, 2\pi]$, U 表示服从均匀分布. 在时间段 $[t_0, t_a] = [t_0, t_0 + \alpha\Delta t]$ 内,也就是加速到 v_a 时刻,这一阶段的时隙数 $\alpha = \frac{t_a - t_0}{\Delta t}$,加速度

$$a_a = \frac{v_a - v_0}{\alpha\Delta t}$$

这里的 v_a, ϕ_a 和 α 3 个变量之间相互独立. 通常渔船节点在加速航行过程中会沿着一条直线运动,方向不变,所以在 α -阶段节点运动方向 ϕ_a 保持不变.

2.2 高速稳速航行阶段(β-阶段)

渔船节点在加速完成后,在 t_a 时刻,进入了高速稳速航行阶段,即 β -阶段. 在该阶段渔船的航速和航向大致稳定,但是由于风浪等原因会有一定程度的高斯扰动,该阶段持续的时间可以表示为 $[t_a, t_\beta] = [t_a, t_a + \beta\Delta t]$, $\beta \in U[\beta_{min}, \beta_{max}]$. 在 β -阶段内,渔船节点在每个 Δt 中的移动方式和 GM 模型的移动方式是类似的. 也就是说 β -阶段的航速和航向初始值分别是 v_a 和 ϕ_a ,每个时隙 Δt 中,节点始终围绕 v_a 和 ϕ_a 进行扰动. 假定 $\zeta \in [0, 1]$ 为记忆水平系数,表示当前时隙与前一时刻在航速上的时间相关性,在每个时隙中,对航速和航向而言,该值是常量. 通过调整 ζ 的值,可以方便地控制在两个连续时隙之间航速的相关程度. 当 $\zeta=0$ 时,节点类似做布朗运动;当 $\zeta=1$ 时,节点运动相关性最强,做匀速直线运动. 为了保证渔船在 β -阶段的运动更接近直线运动, ζ 要更接近 1,因此,标准方差 σ_v 和 σ_ϕ 设定不大于 $\frac{v_a}{8}$ 和 $\frac{\pi}{36}$. 因此,

在 β -阶段,渔船节点在第 j 个时隙的航速和航向分别为

$$v_j = v_a + \sqrt{1 - \zeta^2} \sum_{m=0}^{j-1} \zeta^{j-m-1} \tilde{v}_{m,\beta} \quad (1)$$

$$\phi_j = \phi_a + \sqrt{1 - \zeta^2} \sum_{m=0}^{j-1} \zeta^{j-m-1} \bar{\phi}_{m,\beta} \quad (2)$$

在 β -阶段结束时,渔船节点的航速和航向分别为

$$v_\beta = v_a + \sqrt{1 - \zeta^2} \sum_{m=0}^{\beta-1} \zeta^{\beta-m-1} \tilde{v}_{m,\beta} \quad (3)$$

$$\phi_\beta = \phi_a + \sqrt{1 - \zeta^2} \sum_{m=0}^{\beta-1} \zeta^{\beta-m-1} \bar{\phi}_{m,\beta} \quad (4)$$

式中: $\tilde{v}_{m,\beta}$ 和 $\bar{\phi}_{m,\beta}$ 表示航速 v_a 和航向 ϕ_a 的渐进平均值.

2.3 减速航行阶段(χ-阶段)

和 SMS 移动模型不同,在该阶段速度不是减速到 0 的过程,而是减速到一个较低的目标航速 v_χ 进行捕捞作业. χ -阶段的初始时刻为 β -阶段的结束时刻 t_β ,在时间段 $[t_\beta, t_\chi] = [t_\beta, t_\beta + \chi\Delta t]$ 内,也就是减速到 v_χ 时刻,这一阶段的时隙数 $\chi = \frac{t_\beta - t_\chi}{\Delta t}$,加速度

$$a_\chi = \frac{v_\chi - v_\beta}{\chi\Delta t}$$

$\chi\Delta t$ 反映了渔船节点的减速能力. 减速航行阶段,通常会沿着直线进行减速,因此在 χ -阶段航向 ϕ_χ 保持不变.

2.4 低速稳速航行阶段(γ-阶段)

渔船节点在减速完成后,在 t_χ 时刻,进入了低速稳速航行阶段(捕捞作业阶段),即 γ -阶段. 在该阶段渔船的航速和航向大致稳定,由于航速较低,受风浪等原因的影响程度造成高斯扰动程度会加大,该阶段持续的时间可以表示为 $[t_\chi, t_\gamma] = [t_\chi, t_\chi + \gamma\Delta t]$, $\gamma \in U[\gamma_{min}, \gamma_{max}]$. 在 γ -阶段内,渔船节点在每个 Δt 中的移动方式和 GM 模型的移动方式类似. 也就是说 γ -阶段的航速和航向初始值分别是 v_χ 和 ϕ_χ ,每个时隙 Δt 中,节点始终围绕 v_χ 和 ϕ_χ 进行扰动. 为了保证渔船在 β -阶段的运动接近直线运动,且由于低速时航速和航向受风浪影响较大,因此标准方差 σ_v 和 σ_ϕ 设定不大于 $\frac{v_\chi}{10}$ 和 $\frac{\pi}{18}$. 因此,在 γ -阶段,渔船节点在第 j 个时隙的航速和航向分别为

$$v_j = v_\chi + \sqrt{1 - \zeta^2} \sum_{m=0}^{j-1} \zeta^{j-m-1} \tilde{v}_{m,\gamma} \quad (5)$$

$$\phi_j = \phi_\chi + \sqrt{1 - \zeta^2} \sum_{m=0}^{j-1} \zeta^{j-m-1} \bar{\phi}_{m,\gamma} \quad (6)$$

在 γ -阶段结束时,渔船节点的航速和航向分别为

$$v_\gamma = v_\chi + \sqrt{1 - \zeta^2} \sum_{m=0}^{\gamma-1} \zeta^{\gamma-m-1} \tilde{v}_{m,\gamma} \quad (7)$$

$$\phi_\gamma = \phi_\chi + \sqrt{1 - \zeta^2} \sum_{m=0}^{\gamma-1} \zeta^{\gamma-m-1} \bar{\phi}_{m,\gamma} \quad (8)$$

式中: $\tilde{v}_{m,\gamma}$ 和 $\bar{\phi}_{m,\gamma}$ 表示航速 v_χ 和航向 ϕ_χ 的渐进平均值.

2.5 转弯阶段(ε-阶段)

渔船在作业过程中,需要进行转弯运动. 由于海域广阔,所以其转弯过程具有一定的平滑性,而不像 RWP 模型中存在方向的突变. 在转弯初始时刻 t_γ ,

渔船节点根据选定的航向 ϕ_ϵ 进行转弯,航向差 $\Delta\phi_\epsilon = \phi_\epsilon - \phi_\gamma$, $\Delta\phi_\epsilon \in U[-\pi, -\sigma_\phi] \cup [\sigma_\phi, \pi]$, 当 $\Delta\phi_\epsilon \in U[-\pi, -\sigma_\phi]$ 表示右转, 当 $\Delta\phi_\epsilon \in U[\sigma_\phi, \pi]$ 表示左转.

转弯阶段时隙数 $\epsilon = \frac{t_\epsilon - t_\gamma}{\Delta t}$, 角加速度 $\omega_\epsilon = \frac{\phi_\epsilon - \phi_\gamma}{\epsilon \Delta t}$, 持续时间 $\epsilon \in U[\epsilon_{\min}, \epsilon_{\max}]$. 在转弯阶段航速 $v_\epsilon = v_\gamma$ 保持不变. 渔船从 χ -阶段进入 γ -阶段, 航行 $\gamma\Delta t$ 时间后进入 ϵ -阶段, 经过 $\epsilon\Delta t$ 并锁定 ϕ_ϵ 后向转到下一次的 γ -阶段. 假定 γ -阶段结束后进入转弯阶段的概率为 $P_{\gamma-\epsilon}$, 进入 η 阶段的概率为 $P_{\gamma-\eta}$, $P_{\gamma-\epsilon} + P_{\gamma-\eta} = 1$. 渔船在结束捕捞作业前, 可能要进行 M 次 γ -阶段和 ϵ -阶段的转换, 这时, γ -阶段的执行次数为 $M+1$ 次, ϵ -阶段的执行次数为 M 次的期望值如下:

$$E[M] = \sum_{M=0}^{\infty} M(P_{\gamma-\epsilon})^M(1 - P_{\gamma-\epsilon}) = \frac{P_{\gamma-\epsilon}}{1 - P_{\gamma-\epsilon}} \quad (9)$$

2.6 减速航行阶段 (η -阶段)

渔船在捕捞作业结束后, 一般继续减速至接近 0 的航速, 该阶段的运动情况与 χ -阶段类似, 只不过初始航速为作业航速. η -阶段的初始时刻为 γ -阶段的结束时刻 t_γ , 这一阶段的时隙数 $\eta = \frac{t_\eta - t_\gamma}{\Delta t}$. 减速航行阶段, 通常会沿着直线进行减速, 因此在 η -阶段航向 ϕ_η 保持不变.

3 STSMS 模型节点运动方程

渔船在海面上航行, 渔船节点的运动属于二维平面运动, 通过建立节点的数学运动方程来详细描述渔船节点的运动状态, 运动方程包括航速和航向的数学方程. 根据上一节建立的渔船移动模型, 把 7 个不同的阶段分成两组, 航速不变的一组 and 航速一直发生变化的一组: ① $\{\alpha, \chi, \eta\}$, 速率一直发生变化; ② $\{\beta, \gamma, \epsilon, \rho\}$, 速率不变.

首先建立笛卡尔直角坐标系, 如图 3 所示.

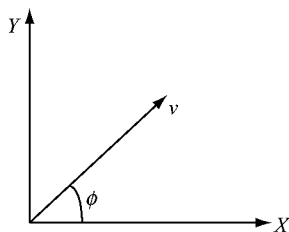


图 3 渔船节点运动直角坐标系

Fig. 3 Rectangular coordinates of ocean fishing vessel nodes motion

渔船节点的航速为 v , 航向为 ϕ , 可得

$$\begin{cases} v_x = v \cos \phi \\ v_y = v \sin \phi \end{cases} \quad (10)$$

那么, 对于①组, 假设节点处在 $\{\alpha, \chi, \eta\}$ 中某阶段的某个初始时刻 t_0 , 此时所处的位置为 (x_0, y_0) , 节点的航速大小为 v_0 , 航向为 ϕ_0 , 节点的加速度为 a , 那么, 经过 l 个时隙, 节点在时刻 t_l 的位置如下:

$$\begin{cases} x(l) = x_0 + (v_0 l + 1/2 a l^2) \cos \phi_0 \\ y(l) = y_0 + (v_0 l + 1/2 a l^2) \sin \phi_0 \end{cases} \quad (11)$$

式中, $a > 0$ 表示节点处于加速航行阶段; $a < 0$ 表示节点处于减速航行阶段. 对于第②组, 节点处在 $\{\beta, \gamma, \epsilon, \rho\}$ 中的某个状态下, 假设已知节点在第 l 个时隙的运动状态参数, 位置为 (x_l, y_l) , 航速为 (v, ϕ_l) , 那么第 $l+1$ 个时隙对应的节点位置为

$$\begin{cases} x(l+1) = x(l) + v \int_0^T \cos(\phi_k + \omega t) dt \\ y(l+1) = y(l) + v \int_0^T \sin(\phi_k + \omega t) dt \end{cases} \quad (12)$$

当 $\omega = 0$ 时, 节点以固定航速匀速航行; 当 $\omega \neq 0$ 时, 节点以固定航速在海面上匀速转弯, ω 的大小和正负表示转弯的大小和左转右转.

4 STSMS 模型平均速率稳定性分析

由于 RWP 模型无法进入平稳状态, 即节点的平均速率会随着时间而不断地衰减^[20], 为了实现渔船移动模型具有平均稳态速率不随时间改变的特性, 这里设定渔船移动模型的初始速率 $E[v_{\text{ini}}]$ 与平均稳态速率 $E[v_{\text{ss}}]$ 相等.

假定各个阶段速度的期望用 $E_{I_m}[v]$, $m \in S$ 表示, 各个阶段的时间期望用 $E_{I_m}[t]$, $m \in S$ 表示, 令 $\pi = (\pi_\alpha, \pi_\beta, \pi_\chi, \pi_\gamma, \pi_\epsilon, \pi_\eta, \pi_\rho)$ 为 STSMS 移动模型下的各状态时间平稳分布, 则

$$\pi_m = \lim_{t \rightarrow \infty} \Pr\{I(t) = I_m \in S\} = \frac{E[T_m]}{E[T] + E[T_p]} \quad (13)$$

式中: $E[T_m]$ 表示渔船节点一次作业过程中 m 阶段的期望时长; $E[T]$ 表示一次作业过程中运动的全部时长; $E[T_p]$ 表示暂停阶段的时长. 对于 m 取 $\{\alpha, \beta, \chi, \eta, \rho\}$ 中的某个阶段, 渔船节点一次完整作业过程这些阶段出现的次数智能为 1, 对于 m 取 γ -阶段和 ϵ -阶段, 根据之前分析, γ -阶段和 ϵ -阶段的次数分别为 $M+1$ 次和 M 次. 可得

$$E[T] + E[T_p] = \sum_{m \in S} E[T_m] \quad (14)$$

$$E[T] + E[T_p] = E\{\alpha\} + E\{\beta\} + E\{\chi\} + (M+1)E\{\gamma\} + ME\{\epsilon\} + E\{\eta\} + E\{\rho\} \quad (15)$$

4.1 初始状态下的平均速率 $E[v_{ini}]$ 分析

$E[v_{ini}]$ 可以表示为

$$E[v_{ini}] = E[E(v_{ini}) | I_m] = \pi_\alpha E_{I_\alpha}(v) + \pi_\beta E_{I_\beta}(v) + \pi_\chi E_{I_\chi}(v) + \pi_\gamma E_{I_\gamma}(v) + \pi_\epsilon E_{I_\epsilon}(v) + \pi_\eta E_{I_\eta}(v) + \pi_\rho E_{I_\rho}(v) \quad (16)$$

由 STSMS 模型描述可得

$$E_{I_\alpha}(v) = \frac{1}{2}E(v_\alpha) \quad E_{I_\beta}(v) = E(v_\alpha)$$

$$E_{I_\chi}(v) = \frac{1}{2}[E(v_\alpha) - E(v_\chi)] \quad E_{I_\gamma}(v) = E(v_\chi)$$

$$E_{I_\epsilon}(v) = E(v_\chi) \quad E_{I_\eta}(v) = \frac{1}{2}E(v_\chi) \quad (17)$$

由式(13)~式(17)可得

$$E[v_{ini}] = \frac{\frac{1}{2}E(v_\alpha)(E\{\alpha\} + 2E\{\beta\}) + \frac{1}{2}[E(v_\alpha) - E(v_\chi)]E\{\chi\}}{E[T] + E[T_p]} + \frac{\frac{1}{2}E(v_\chi)(2(M+1)E\{\gamma\} + 2ME\{\epsilon\} + E\{\eta\})}{E[T] + E[T_p]} \quad (18)$$

4.2 平均稳态速率 $E[v_{ss}]$ 分析

定义 $W(t)$ 表示渔船节点从初始时刻 t_0 到时刻 t 期间渔船运动的时隙数, $W_p(t)$ 表示渔船节点处于暂停状态的时隙数. $T(i)$ 表示第 $i-1$ 次运动到第 i 次运动转换所需要的时间, $N(t)$ 表示模型的更新次数, $T_p(i)$ 表示暂停的时间.

当 $t \rightarrow \infty$ 时, 有 $N(t) \rightarrow \infty$, 其累计分布函数可通过 $v_{ss} < v$ 的极限求出, 如下:

$$\Pr\{v_{ss} \leq v\} = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\sum_{n=1}^{Y(t)} 1_{\{v_{ss} \leq v\}} + \sum_{n=1}^{Y_p(t)} 1_{\{v_{ss} \leq v\}}}{W(t) + W_p(t)} = \lim_{N(t) \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^{N(t)} (\sum_{j=1}^{T(i)} 1_{\{v(i,j) \leq v\}} + T_p(i))}{W(t) + W_p(t)} \quad (19)$$

式(19)中, $1\{\}$ 表示满足大括号内的条件时取 1, 不满足取 0.

其中

$$\sum_{j=1}^{T(i)} 1_{\{v(i,j) \leq v\}} = \sum_{j=1}^{\alpha(i)} 1_{\{v(i,j) \leq v\}} + \sum_{j=\alpha(i)+1}^{\alpha(i)+\beta(i)} 1_{\{v(i,j) \leq v\}} + E[M+1] \sum_{j=\alpha(i)+\beta(i)+1}^{\alpha(i)+\beta(i)+\gamma(i)} 1_{\{v(i,j) \leq v\}} + E \sum_{j=\alpha(i)+\beta(i)+\gamma(i)+\epsilon(i)}^{\alpha(i)+\beta(i)+\gamma(i)+\epsilon(i)} 1_{\{v(i,j) \leq v\}} + \sum_{j=\alpha(i)+\beta(i)+\gamma(i)+\epsilon(i)+1}^{\alpha(i)+\beta(i)+\gamma(i)+\epsilon(i)+1} 1_{\{v(i,j) \leq v\}} + \sum_{j=\alpha(i)+\beta(i)+\gamma(i)+\epsilon(i)+\eta(i)}^{\alpha(i)+\beta(i)+\gamma(i)+\epsilon(i)+\eta(i)} 1_{\{v(i,j) \leq v\}} \quad (20)$$

$W(t)$ 和 $W_p(t)$ 满足关系如下:

$$\sum_{i=1}^{N(t)} T(i) \leq W(t) \leq \sum_{i=1}^{N(t)+1} T(i) \quad (21)$$

$$W_p(t) = \sum_{i=1}^{N(t)} T_p(i) \quad (22)$$

定义 $R_i(v) = \sum_{j=1}^{T(i)} 1_{\{v(i,j) \leq v\}}$, 则

$$E[R(v)] = \frac{1}{\alpha_{max} - \alpha_{min} + 1} \sum_{l=\alpha_{min}}^{\alpha_{max}} \sum_{j=1}^l \int_0^v f_{v_\alpha}(v) dv + \frac{1}{\beta_{max} - \beta_{min} + 1} \sum_{l=\beta_{min}}^{\beta_{max}} \sum_{j=1}^l \int_0^v f_{v_\beta}(v) dv + \frac{1}{\chi_{max} - \chi_{min} + 1} \sum_{l=\chi_{min}}^{\chi_{max}} \sum_{j=1}^l \int_0^v f_{v_\chi}(v) dv + \frac{E[M+1]}{\gamma_{max} - \gamma_{min} + 1} \sum_{l=\gamma_{min}}^{\gamma_{max}} \sum_{j=1}^l \int_0^v f_{v_\gamma}(v) dv + \frac{E[M]}{\epsilon_{max} - \epsilon_{min} + 1} \sum_{l=\epsilon_{min}}^{\epsilon_{max}} \sum_{j=1}^l \int_0^v f_{v_\epsilon}(v) dv + \frac{1}{\eta_{max} - \eta_{min} + 1} \sum_{l=\eta_{min}}^{\eta_{max}} \sum_{j=1}^l \int_0^v f_{v_\eta}(v) dv \quad (23)$$

$$P_r\{v_{ss} \leq v\} = \frac{E[R(v)] + E[T_p]}{E[T] + E[T_p]} \quad (24)$$

式(23)、式(24)对 v 求导, 可以得出平均稳态速率实际是由各个状态下的稳态速率组成, 即

$$E[v_{ss}] = E_\alpha[v_{ss}] + E_\beta[v_{ss}] + E_\chi[v_{ss}] + E_\gamma[v_{ss}] + E_\epsilon[v_{ss}] + E_\rho[v_{ss}] \quad (25)$$

$$E_\alpha[v_{ss}] = \frac{\sum_{m=\alpha_{min}}^{\alpha_{max}} \sum_{j=1}^m P_r\{\alpha = m\} E\{v_\alpha(j)\}}{E[T] + E[T_p]} =$$

$$\frac{E\{v_\alpha\}E\{\alpha\}}{E[T] + E[T_p]}$$

$$E_\beta[v_{ss}] = \frac{\sum_{m=\beta_{min}}^{\beta_{max}} \sum_{j=1}^m P_r\{\beta = m\} E\{v_\beta(j)\}}{E[T] + E[T_p]} =$$

$$\frac{E\{v_\beta\}E\{\beta\}}{E[T] + E[T_p]}$$

$$E_\chi[v_{ss}] = \frac{\sum_{m=\chi_{min}}^{\chi_{max}} \sum_{j=1}^m P_r\{\chi = m\} E\{v_\chi(j)\}}{E[T] + E[T_p]} =$$

$$\frac{E\{v_\chi\}E\{\chi\}}{E[T] + E[T_p]}$$

$$E_\gamma[v_{ss}] = \frac{\sum_{m=\gamma_{min}}^{\gamma_{max}} \sum_{j=1}^m P_r\{\gamma = m\} E\{v_\gamma(j)\}}{E[T] + E[T_p]} =$$

$$\frac{E\{v_\gamma\}E\{\gamma\}}{E[T] + E[T_p]}$$

$$E_\epsilon[v_{ss}] = \frac{\sum_{m=\epsilon_{min}}^{\epsilon_{max}} \sum_{j=1}^m P_r\{\epsilon = m\} E\{v_\epsilon(j)\}}{E[T] + E[T_p]} =$$

$$\frac{E\{v_\epsilon\}E\{\epsilon\}}{E[T] + E[T_p]}$$

$$E_{\eta}[v_{ss}] = \frac{\sum_{m=\eta_{min}}^{\eta_{max}} \sum_{j=1}^m P_r\{\eta = m\} E\{v_{\eta}(j)\}}{E[T] + E[T_p]} = \frac{E\{v_{\eta}\}E\{\eta\}}{E[T] + E[T_p]} \quad (26)$$

由式(25)、(26)推得

$$E[v_{ss}] = \int_v v f_{v_{ss}} dv = \frac{\frac{1}{2}E(v_{\alpha})(E\{\alpha\} + 2E\{\beta\})}{E[T] + E[T_p]} + \frac{\frac{1}{2}[E(v_{\alpha}) - E(v_{\chi})]E\{\chi\}}{E[T] + E[T_p]} + \frac{\frac{1}{2}E(v_{\chi})(2(M+1)E\{\gamma\})}{E[T] + E[T_p]} + \frac{\frac{1}{2}E(v_{\chi})(2ME\{\epsilon\} + E\{\eta\})}{E[T] + E[T_p]} \quad (27)$$

$E[v_{ini}] = E[v_{ss}]$, 从而说明 STSMS 模型不会随时间发生衰减.

5 仿真与分析

通过使用 NS-2 网络仿真工具,对渔船机会网络的节点移动模型进行仿真,并与 RWP 模型的性能进行比较. 主要仿真参数设置如表 1 所示.

表 1 STSMS 模型参数设置

Tab.1 The parameters setting of STSMS

参数	数值	参数	数值
仿真场景	50×50 km ²	仿真时间/min	120
α 阶段目标速率/(m·s ⁻¹)	$v_{\alpha} \in U[5,7]$	节点数	30
χ 阶段目标速率/(m·s ⁻¹)	$v_{\chi} \in U[1,2]$	记忆水平系数	$\zeta = 0.5$
α/min	$\alpha \in [2,6]$	节点间最小距离/m	300
β/min	$\beta \in [2,6]$	传输距离/m	5
χ/min	$\chi \in [1,3]$	η/min	$\eta \in [1,3]$
γ/min	$\gamma \in [6,12]$	$P_{\gamma-\epsilon}$	0.5
ε/min	$\epsilon \in [2,6]$	$P_{\gamma-\eta}$	0.5

5.1 运动轨迹线

个体的随机移动模型能否较好地反映节点的运动规律关系到移动模型本身的可信度,同时也影响网络协议的仿真性能. 因此,下面通过在仿真环境中验证所建立的移动模型具有和渔船节点运动轨迹相似的特性.

仿真过程中随机截取了不同节点运动时的位置,运动轨迹线如图 4 所示.

图 4a 描述了渔船从加速阶段到高速稳速航行阶段;图 4b 描述了渔船从低速稳速阶段结束后,进

入了减速阶段,然后进入了短暂的暂停阶段;图 4c 描述了渔船的转弯航行状态. 从图 4 可以看出,移动模型仿真了渔船从开始加速到暂停 7 个阶段的完整运动过程,实现了渔船真实航行运动轨迹的模拟.

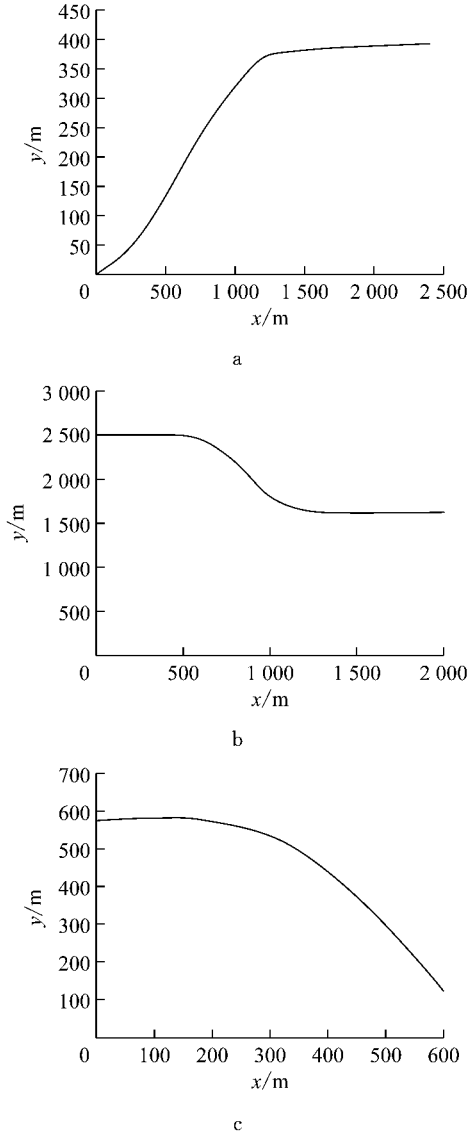


图 4 节点运动轨迹线

Fig.4 The trajectories of node

另外,从图 4 可以看出,渔船节点运动轨迹平滑,没有拐点和断点出现,基本符合远洋渔船机会网络节点移动模型的要求.

5.2 平均稳态速率

选择速率范围 $v \in [0,7] \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, 平均速率的期望值为 $3.5 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,对 RWP 模型的平均稳态速率进行仿真,结果如图 5 所示,随着仿真时间的延长,仿真的平均速率不断减小,与期望值的偏差越来越大,呈衰减的趋势,说明了 RWP 模型不能提供一个平稳速率而且有衰减.

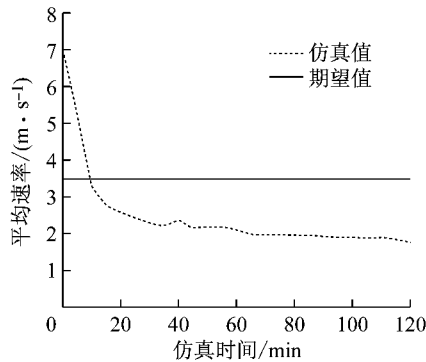


图 5 STSMS 模型平均稳态速率

Fig. 5 Stationary average speed of STSMS

同样,对提出的 STSMS 模型的平均稳态速率进行仿真实验,实验参数配置按照表 2 所示.模型中所有节点都从 α -阶段的第一步开始加速航行,每个阶段的持续时间范围 $[1-12]$ min,假定暂停时间为 0,通过式 27 可知,STSMS 模型的理论结果 $E[v_{ss}] = 3.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

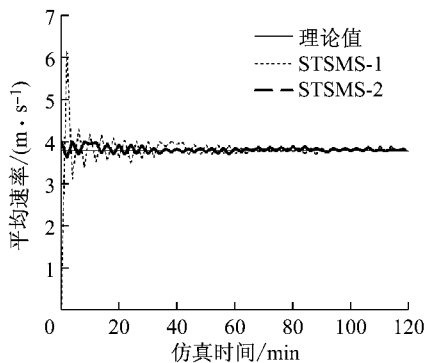


图 6 RWP 模型平均稳态速率

Fig. 6 Stationary average speed of RWP

图 6 给出了 120 min 的仿真时期内,理论值和 STSMS-1 的仿真值,在开始 20 min 时期内,由于所以节点都是从 α -阶段开始加速,因此初始速率很小,在到达稳态速率前,有一个震荡的预热期.在 20 min 以后,STSMS 模型的收敛于 $3.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 附近,并保持稳定.

如果节点的初始阶段是在 β -阶段或 χ -阶段后的某一阶段,那么渔船节点将选择一个随机的初始步速度,在 β -阶段的第一步为 $v_{\alpha+1}$,在 χ -阶段的第一步为 $v_{\beta+1}$ 等,它们都均匀地分布在范围 $[v_{\min}, v_{\max}]$ 上,由图 6 可以看出,STSMS-2 仿真的平均速率从仿真一开始进很稳定.正如期望的那样,不管 STSMS 模型初始速率如何,其平均速率都不存在速率衰减问题.仿真的结果与 STSMS 模型基本吻合,从一个方面证明了该模型的合理性.

6 结语

由于机会网络的发展目前还处在研究阶段,网络性能的评估还都依赖于移动模型进行仿真.本文分析了几种典型的移动模型,在此基础上,根据远洋渔船的移动特征提出了一种 STSMS 移动模型,具有加速、高速稳速、减速、低速稳速、减速和暂停 7 个状态,通过仿真,该模型与渔船的移动表现的特征非常相似,并且具有不随时间延长速度衰减的稳速特性,优于 RWP 移动模型.模型中的各个状态定义参数可以独立调整,以适合不同作业类型的渔船和其它运动场景.本文提出的移动模型仅仅对运动轨迹和平均稳态速率进行了仿真,下一步将对模型的时间平稳分布和点空间分布均匀性进行研究,同时将该模型应用于机会网络路由协议中.

参考文献:

- [1] RAMANATHAN R, HANSEN R, BASU P, *et al.* Prioritized epidemic routing for opportunistic networks [C]//Proceedings of the 1st International Mobisys Workshop on Mobile Opportunistic networking. New York: ACM Press, 2007: 62-66.
- [2] GUERRIERI A, CARRERAS I, DEPELLEFRINI F, *et al.* Distributed estimation of global parameters in delay-tolerant networks [C]//Proceedings of Autonomic and Opportunistic Communication Workshop. New York: IEEE Press, 2009: 1-7.
- [3] CONTI M, KUMAR M. Opportunities in opportunistic computing [J]. Computer, 2010, 43(1):42.
- [4] SADIQ U, KUMAR M, PASSARELLA A, *et al.* Service composition in opportunistic networks: a load and mobility aware solution [J]. IEEE Transactions on Computers, 2015, 64(8):2308.
- [5] ZHU Jia. Exploiting opportunistic network coding for improving wireless reliability against co-channel interference [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2016, 12(5): 1692.
- [6] 熊永平,孙利民,牛建伟. 机会网络[J]. 软件学报,2009,20(1):124.
XIONG Yongping, SUN Limin, NIU Jianwei. Opportunistic networks [J]. Journal of Software, 2009, 20(1): 124.
- [7] 胡四泉,汪红兵,王俊峰. 机会型网络研究综述[J]. 计算机科学,2009,36(10):32.
HU Siqian, WANG Honbing, WANG Junfeng. Survey on opportunistic networks [J]. Computer Science, 2009, 36(10): 32.
- [8] NIU J W, ZHOU X, WANG K Q, *et al.* A data transmission scheme for community-based opportunistic networks [C]//Proceeding of the 5th International Conference on Wireless

- Communications, Networking and Mobile Computing. Beijing: IEEE Press, 2009: 3009-3013.
- [9] MUSOLESI M, MASCOLO C. Designing mobility models based on social network theory [J]. ACM Sigmobile Mobile Computing & Communications Review, 2007, 11 (3): 59.
- [10] 蒋凌云,冯莹,孙力娟. 移动模型对机会网络路由协议的影响研究[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版),2015,35(5):33. JIANG Lingyun, FENG Ying, SUN Lijuan. Impact analysis of movement model on opportunistic network routing protocols [J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2015, 35 (5): 33.
- [11] MOTA F S, CUNHA F D, MACEDO D F, *et al.* Protocols, mobility models and tools in opportunistic networks: a survey [J]. Computer Communications, 2014, 48 (8): 5.
- [12] HONG X, GERLA M, PEI G, *et al.* A group mobility model for ad hoc wireless networks [C]//Proceedings of the 2nd ACM International Workshop on Modeling Simulation of Wireless and Mobile System. New York: ACM Press, 1999: 53-60.
- [13] JOHNSON D B, MALTZ D A. Dynamic source routing in ad hoc wireless networks [J]. Mobile Computing, 1996, 353 (1):153.
- [14] ROYER E M, MELLIER-Smith P M, MOSER L E. An analysis of the optimum node density for ad hoc mobile networks [C]// Proceedings of the IEEE International Conference on Communications. Helsinki: Information Sciences Institute, 2001: 1-7.
- [15] BETTSTETTER C. Smooth is better than sharp: a random mobility model for simulation of wireless networks [C]// Proceedings of the 4th ACM International Workshop on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile System. New York: ACM Press, 2001: 19-27.
- [16] LIANG B, HASS Z J. Predictive distance-based mobility management for PCS networks [C]//The 18th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. New York: IEEE Infocom, 1999: 1377-1384.
- [17] ZHAO M, WANG W. A novel semi-Markov smooth mobility model for ad hoc networks [C]//IEEE Global Telecommunications Conference. San Francisco: IEEE Press, 2006:1-5.
- [18] EAGLE N, PENTLAND A. Reality mining: sensing complex social systems [J]. Personal and Ubiquitous Computing, 2006, 10(4): 255.
- [19] MCNETT M, VOELKER G M. Access and mobility of wireless PDA users [J]. ACM Sigmobile Mobile Computing and Communications Review, 2005, 9(2): 40.
- [20] BETTSTETTER C, RESTA G, SANTI P. The node distribution of the random waypoint mobility model for wireless ad hoc networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2003, 2(3): 257.