



基于轻型机步野战场景的 DTN 通信策略设计与性能分析 *

倪辰辰, 李千目, 姜 怡, 查玄阅

(南京理工大学计算机科学与技术系 南京 210094)

摘 要: 通过对基于轻型机步野战场景的 DTN 通信策略的研究, 提出了一种新的 DTN 通信策略, 根据排队论 G/G/1 模型和切比雪夫不等式对提出的 DTN 通信策略进行了建模和关键参数的理论值推算, 利用 ONES 架构对轻机步 DTN 场景进行了仿真实验, 将得到的实验数据与预期值进行对比和分析, 验证了通信策略的正确性, 确定了影响系统传输效率的关键因素, 并在相同仿真场景下与感染路由策略做了性能比较。

关键词: 时延容忍网络; 轻型机步野战场景; 排队论; 切比雪夫不等式

doi: 10.3969/j.issn.1000-0801.2013.10.022

Strategy Design and Performance Analysis of Delay Tolerance Network Based on Tactical Battlefield

Ni Chenchen, Li Qianmu, Jiang Yi, Zha Xuanyue

(Department of Computer Science and Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Based on the research of the DTN communication strategy in tactical battlefield, a novel DTN communication strategy was proposed. It was modeled and calculated key parameters by using G/G/1 model and Chebyshev inequality. Also the whole DTN process under ONEs simulation tools was simulated. The key factors that affect the system transmission efficiency by comparing the experimental data with the expected value was confined. The performance of the novel strategy compared with epidemic router strategy in the same simulation scenarios.

Key words: delay tolerance network, tactical battlefield, queue theory, Chebyshev inequality

1 引言

近年来, 根据现实的需要, 时延容忍网络(delay tolerance network, DTN)在越来越多的场景中得到了应用。同时, 在军事任务和救灾抢险等重要行动中, 对时延容忍网络通信策略产生了更加严格苛刻的需求。伊拉克战争期间, 美国海军通过对伊拉克国防军的重要通信基站、雷达等战略目标进行精确打击, 使得伊拉克国防军的战场通信指挥能力陷入瘫痪, 由于通信资源极度稀缺, 战场条件恶

劣, 伊拉克国防军并未有效转入 DTN 通信状态, 导致其成为战场上的“聋子”、“瞎子”, 最终土崩瓦解。2008 年汶川地震, 由于震区基础通信设施和进出道路损坏殆尽, 导致黄金救援时间里外部救援力量与震区失去联系, 只能冒险在震区进行空降。在以上两个例子中, 无线通信节点会遭受剧烈毁伤, 使得网络出现割裂, 导致链路切断, 作战单位或救援单位物理上无法直接通信, 需要进入 DTN 路由状态, 可是国内外 DTN 研究中对这类场景并没有提出成熟的解决方案, 也缺少理想的基于该场景的通信策略。

* 国家自然科学基金“信息系统的安全风险跟踪评价与动态预测”资助项目(No.60903027), 江苏省自然科学基金重大科技研究基金“无线传感网的安全感知与全域安全控制”资助项目(江苏“973”项目)(No.BK2011023), 江苏省自然科学基金“无线传感网安全风险的全域感知、评估与控制”资助项目(No.BK2011370)



轻型机步野战场景是应现实需要产生的一种特殊网络应用结构,轻型机步野战部队由装甲输送车或机械化步兵、救援功能车辆组成,战术任务为在复杂环境下进行快速推进、迂回和策应。复杂环境包括局部高密度火力覆盖、信号屏蔽、极端气候等通信条件极度恶劣的一系列特殊环境。在这样的条件下,无线通信节点会遭受毁伤并使得网络出现割裂,导致链路切断,作战单位物理上无法直接通信,需要进入 DTN 路由状态,从而在一定时延容忍的前提下,实现信息的有效传输。基于 DTN 的特殊传输方式,国内外研究机构提出了各种各样的 DTN 研究场景,如 NASA 的“周期性连接的卫星网络”项目^[1],Nikolaos 的“基于时延容忍网络的大数据批量传导”^[2]等。但对轻型机步野战场景这种特殊条件下的 DTN 通信策略的研究并不成熟。

2 轻型机步野战场景概述

在一个轻型机步野战场景中:作战半径内通信资源极度稀缺,行动参与者之间不能进行实时通信,行动参与者分为若干个行动小组,行动小组分散在战场的不同战斗区域。由于军事行动对隐秘性和反侦察性有很高的要求,每一个行动小组都没有携带长距离移动通信设备,而所有的行动小组都处在彼此视距范围之外,因此无法使用旗语等特殊通信手段。行动小组彼此不存在端到端通信链路,因此小组间必须形成 DTN 进行非实时的信息传递^[3]。每一个行动小组都配备一个移动代理节点,该节点满足如下条件。

(1)能够携带若干数据报信息,并了解投递目标和相应的路线,能够到达投递目标。

(2)完成投递后,能够返回数据源(即所属行动小组)。

(3)能在规定时限内完成(1)和(2)。

(4)移动代理节点由无人机、遥控设备或特殊行动人员充当。

DTN 路由可以从原理上分为两大类:不借助辅助节点的 DTN 路由和借助辅助节点的路由。前者的应用实例有:传染路由、喷射等待路由和一系列约束洪泛路由;后者必须引入额外的通信节点,即移动代理节点以协助信息传输,此类的典型实例:“数据骡”路由。在此类路由中,移动代理节点被所有网络中的节点共享,在通信网络中承担类似“信使”的角色。

虽然轻型机步野战场景 DTN(以下简称轻型步 DTN)从原理上属于需要借助辅助节点的 DTN 路由,但是和其他该类路由不同的是:每一个移动代理节点和相应的数据

源节点都有固定且唯一的从属关系,避免了共享移动代理节点时数据源之间由于需求不平衡导致的网络资源争抢和传输效率下降。若每一个数据源都拥有指定的移动通信节点,搭建网络时就可以集中精力在提高单个节点性能上而不必考虑平衡数据源之间的资源竞争。Harras 和 Almeroth 等人曾提出在类似场景中应用移动代理节点^[4],但是在 Harras 构建的模型中,移动代理节点每次只能到达单个目的节点,无法进行多目标顺序传递。轻机步 DTN 对此缺点做出了改进。

3 轻机步 DTN 模型

现对轻机步 DTN 模型进行说明和性能分析,如图 1 所示,在拥有 n 个节点的轻机步 DTN 中,指定一个节点为数据源节点,其余节点皆为参与者节点。为了简化分析过程,做出如下假设:源节点按照平均值为 λ 的泊松分布产生数据信息并将其放入基于先进先出的缓冲队列中。当移动代理节点离开源节点时,它将从缓冲队列中按序提取固定条数据信息放入自身的消息队列中(如图 1 所示,数据信息的目的节点分别为 1、3、4、5、6、9),并以匀速 v 依次到达目的节点,到达目的节点时将数据信息进行投递,所有的投递过程完成后移动代理节点将返回数据源节点。所有的参与者节点都分布在圆心为数据源节点、长度为 l 的圆弧上,因此移动代理节点从数据源出发时,到达任何参与者节点的距离都是一样的。

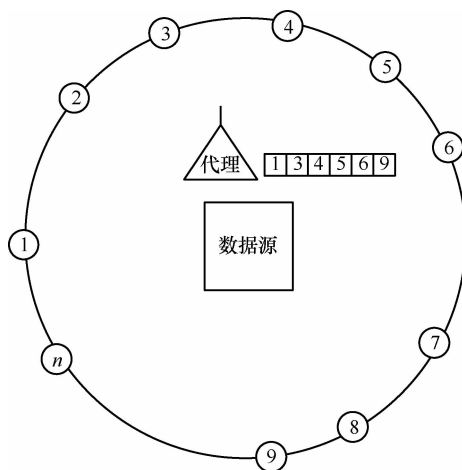


图 1 轻机步 DTN 简易说明

每当数据源生成一条数据信息时,会在现有的 n 个参与节点中随机抽取一个作为发送对象。判断信息是否成功送达主要取决于:

- 信息成功送达目标;

· 送达时间小于最大生存时间,若超时,则丢弃数据报。

直属数据节点将目标信息装填完毕后,从圆弧最左端的目标节点开始进行传递,并沿圆弧顺时针方向移动到一个目标节点。

在性能分析过程中将会阐述各个网络状态对轻机步 DTN 模型的影响,用于衡量轻机步 DTN 模型工作效率的两个主要参数是:信息送达率和信息时延。信息送达率表示一条信息在生存时间内能被传输到目的节点的概率,信息时延表示信息到达目的节点的时间减去信息到达缓冲区的时间。由于信息送达率的提高或降低依赖于信息时延的变化,因此首先需要确定信息时延的平均期望和方差,再将其带入切比雪夫不等式得到信息送达率。对轻机步 DTN 模型进行性能分析时需要进行如下假设:移动代理节点中存在一个批量服务队列,队列特征满足 G/G/1 队列模型的特征^[56],容量为 s (下文中所有的计算和分析都是基于此假设)。根据排队论,为了得到信息时延和信息送达率,必须先得出单条信息的服务时间和等待时间^[5-7],而单条信息的服务时间和等待时间又依赖于批量信息的服务时间和等待时间。

3.1 批量信息服务时间 X

在轻机步 DTN 模型中,批量信息服务时间是:从移动代理节点离开数据源一直到返回数据源所经历的时间,也就是所有信息被传播完成所需的时间。可以看出个体信息时延是由信息服务时间所决定的,因此确认信息服务时间的平均期望和方差有助于进一步确定信息时延的平均期望和方差^[5]。

首先,一个移动代理节点即将携带一批信息离开数据源,目标为 $k(k \geq 1)$ 个不同的目的节点,如上文所述,现有 n 个参与者节点随机地分布在长度为 l 的圆弧上,而作为目标的 k 个节点是从 n 个参与者节点中按概率选取出来的,因此可以得到结论: k 个目标节点随机地分布在长度唯一的圆弧上。

假设 $X_1, X_2, \dots, X_k$ 是 $[0, 1]$ 区间上随机分布的 k 个值,由 X_1 到 X_k 依次递增, $X_i (1 \leq i \leq k)$ 表示圆弧最左端点到第 i 个参与者节点的距离,也就是说, X_1 代表最左端参与者节点, X_k 代表最右端参与者节点, $X_k - X_1$ 代表指数数据节点在圆弧上的最大传输距离。

设 $F(x)$ 为 X_i 的累计分布函数, $f(x)$ 为 X_i 的概率密度函数,由于 X_i 满足均匀分布,易得: $F(x) = x, f(x) = 1$, 进而得到 X_i 的概率密度函数为:

$$f_{x(i)} = k f(x) \binom{k-1}{i-1} F(x)^{i-1} (1-F(x))^{k-i} = k \binom{k-1}{i-1} x^{i-1} (1-x)^{k-i} \quad (1)$$

若圆弧的半径 r 是一个常量,则每一次移动代理节点所经过的路程是: $L(k) = 2r + X(k) - X(1)$, 从式(1)中可得:

$$\overline{X}_{(k)} = \int_0^1 f_{x(k)}(x) x dx = k \int_0^1 x^{k-1} x dx = k / (k+1) \quad (2)$$

$$\overline{X}_{(1)} = \int_0^1 f_{x(1)}(x) x dx = k \int_0^1 x^{k-1} x dx = l / (k+1) \quad (3)$$

$$\overline{X}_{(k)}^2 = k \int_0^1 x^{k-1} x^2 dx = k / (k+2) \quad (4)$$

$$\overline{X}_{(1)}^2 = k \int_0^1 -(x-1)^{k-1} x^2 dx = 2 / [(k+1)^2 (k+2)] \quad (5)$$

因此,指数数据节点的平均传输距离 $\overline{L}_k$ 为:

$$\overline{L}_k = 2r + (\overline{X}_{(k)} - \overline{X}_{(1)}) = 2r + \left(\frac{k}{k+1} - \frac{1}{k+1} \right) = 2r + \frac{k-1}{k+1} \quad (6)$$

设 φ_k 为移动代理节点传输完成 k 个目标的传输任务所需要的时间,当移动代理节点速度为 ν 时,得:

$$\overline{\varphi}_k = \overline{L}_k / \nu = \frac{2r}{\nu} + \frac{k-1}{(k+1)\nu} \quad (7)$$

其二阶矩等于:

$$\overline{\varphi}_k^2 = \overline{L}_k^2 / \nu^2 = \frac{4r^2}{\nu^2} + \frac{4r(k-1)}{(k+1)\nu^2} + \frac{k^3 - 3k + 2}{\nu^2 (k+1)^2 (k+2)} \quad (8)$$

除上述结果外,还需要得到从 n 个参与节点中选取 k 个参与节点(使其作为 s 个消息的目的节点)的函数 $p(k)$, $p(k)$ 依赖于以下两个分量。

- $p(k)$: 从 n 个参与节点中选取 k 个参与节点并使其作为 s 个消息的潜在目的节点的概率。
- $h(k)$: 给定 k 个节点,而这 k 个节点又恰好是 s 个消息的目的节点的概率。

易得:

$$p(k) = q(k) \times h(k) \quad (9)$$

且根据 G/G/1 队列模型,存在:

$$q(k) = \binom{n}{k} \times \left(\frac{k}{n} \right)^s \quad (10)$$

要得到 $h(k)$, 必须知道将 s 个元素分为 k 个非空子集的方法数 $S(s, k)$, $S(s, k)$ 表示如下:

$$S(s, k) = \frac{1}{k!} \sum_{j=1}^k (-1)^{k-j} \binom{k}{j} j^s, \quad (S(s, k) \text{ 不考虑排列顺序}) \quad (11)$$



又因 $h(k) = \frac{S(s,k) \times k!}{k^s}$, 得到:

$$h(k) = \frac{S(s,k) \times k!}{k^s} = \sum_{j=1}^k (-1)^{k-j} \binom{k}{j} \left(\frac{j}{k}\right)^s \quad (12)$$

在得到 $q(k)$ 和 $h(k)$ 后, 可以得到批量信息服务时间 X 的期望为:

$$\bar{X} = \sum_{k=1}^s \bar{\varphi}_k \times p(k) \quad (13)$$

同理可得 X 的二阶矩为:

$$\bar{X}^2 = \sum_{k=1}^s \bar{\varphi}_k^2 \times p(k) \quad (14)$$

则批量信息服务时间 X 的方差为 $\sigma_X^2 = \bar{X}^2 - \bar{X}^2$ 。

3.2 批量信息等待时间 W

批量服务等待时间的意义是: 从数据 m 被数据源节点创建并插入有 s 个成员的服务队列开始, 到被直属数据节点装填, 离开源节点的时间。由于轻机步 DTN 中的队列服务模型与排队论中的 G/G/1 模型相吻合^[5], 在 G/G/1 模型中, λ 表示任务的平均到达率, 任务等待时间 W 的平均值为:

$$\bar{W} = \frac{\sigma_i^2 + \sigma_x^2 + (\bar{t})^2 (1-\rho)^2}{2\bar{t}(1-\rho)} - \frac{\bar{t}^2}{2\bar{t}} \quad (15)$$

其中, t 和 σ_i 分别表示批量信息的分组到达间隔时间的期望与方差, 根据 G/G/1 模型, $\bar{t} = s/\lambda$, $\sigma_i^2 = s/\lambda^2$, ρ 为系统利用率, $\rho = \lambda \bar{X} / s$ 。变量 I 表示队列服务空闲时间, 也就是队列中的信息数小于 s 的时间, 根据 G/G/1 模型, $\bar{I} = s/\lambda$, $\bar{I}^2 = (s + s^2)/\lambda$, 进而得到:

$$\bar{W} = \frac{\rho(sp-s+1)}{2\lambda(1-\rho)} + \frac{\lambda\sigma_x^2}{2s(1-\rho)} \quad (16)$$

W 的二阶矩也随之确定, 表示为:

$$\bar{W}^2 = \frac{s(1-\rho)[2\lambda\bar{W} - s(1-\rho)]}{\lambda^2} \quad (17)$$

得知 W 的期望和二阶矩后, 得到 W 的方差为:

$$\sigma_w^2 = \bar{W}^2 = \frac{s(1-\rho)[2\lambda\bar{W} - s(1-\rho)]}{\lambda^2} - \bar{W}^2 \quad (18)$$

3.3 单条信息服务时间

在轻机步 DTN 模型中, 作为信息时延的一个组成部分, 单条信息服务时间 X' 的定义与批量信息服务时间 X 类似, 即单条信息从离开队列被直属数据节点装填并离开数据源开始, 到抵达目标节点所经历的时间。

因为要从 k 个参与者节点中随机选取单条信息的目的节点, G/G/1 队列中这一批信息服务时间的期望为^[5]:

$$\bar{T}_k = \sum_{i=1}^k \frac{1}{k} \times (r + \bar{X}_{(i)} - \bar{X}_{(1)}) / \nu \quad (19)$$

其二阶矩为:

$$\bar{T}_k^2 = \sum_{i=1}^k \frac{1}{k} \frac{(r + \bar{X}_{(i)} - \bar{X}_{(1)})^2}{\nu^2} \quad (20)$$

同时根据顺序统计量(orderstatistics)的概念^[13], 可得:

$$\bar{X}_{(i)} = \int_0^1 f_{x(i)}(x) x dx = k \binom{k-1}{i-1} \sum_{m=0}^{k-i} \binom{k-i}{m} \frac{(-1)^m}{m+i+1} \quad (21)$$

$$\bar{X}_{(i)}^2 = \int_0^1 f_{x(i)}(x) x^2 dx = k \binom{k-1}{i-1} \sum_{m=0}^{k-i} \binom{k-i}{m} \frac{(-1)^m}{m+i+2} \quad (22)$$

综上所述, 单条信息的服务时间的期望为:

$$\bar{X}' = \sum_{k=1}^s \bar{T}_k \times p(k) \quad (23)$$

其二阶矩为:

$$\bar{X}'^2 = \sum_{k=1}^s \bar{T}_k^2 \times p(k) \quad (24)$$

方差为:

$$\sigma_{X'}^2 = \bar{X}'^2 - \bar{X}'^2 \quad (25)$$

3.4 单条信息等待时间 W'

单条信息等待时间 W' 表示移动代理节点携带一条信息从数据源节点出发并将其成功投递到目标节点所用的时间。如果将从第一条信息被成功传递算起, 到最后一条信息被成功传递后的时间间隔定义为 β , 则 $W' = \beta + W$ 。

为了得到 W' , 在 W 已知的条件下, 必须要得到 β , 在图 2 所示的消息等待过程中, $m_i (1 \leq i \leq s)$ 表示移动代理节点消息队列中的第 i 条消息, η_i 表示 m_{i-1} 和 m_i 的到达间隔, m_0 表示直属传输接待出发前, 最后一条信息进入消息队列的时间。在轻机步 DTN 模型中, $\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_s$ 是独立同分布指数随机变量, 因此 $\bar{\eta}_i = 1/\lambda$, $\sigma_{\eta}^2 = 1/\lambda^2$ 。设 β_i 等于 m_i 和 m_s 的到达间隔, 则 $\beta_i = \eta_{i+1} + \eta_{i+2} + \eta_{i+3} + \dots + \eta_s$, β_i 的期望是:

$$\bar{\beta}_i = \eta_{i+1} + \eta_{i+2} + \dots + \eta_s = (s-i)\bar{\eta} = (s-i)/\lambda \quad (26)$$

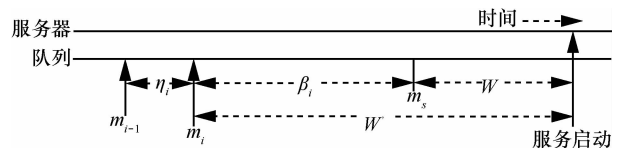


图 2 消息等待过程示意

二阶矩为:

$$\overline{\beta_i^2} = \overline{(\eta_{i+1} + \eta_{i+2} + \dots + \eta_s)^2} = \frac{s^2 + s - (2s+1)i + i^2}{\lambda^2} \quad (27)$$

进而得到 β 的期望为:

$$\overline{\beta} = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s \overline{\beta_i} = \frac{s-1}{2\lambda} \quad (28)$$

β 的二阶矩为:

$$\overline{\beta^2} = \sum_{i=1}^s E(\beta^2 | k=i) P(k=i) = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s \overline{\beta_i^2} = -\frac{s+1}{2\lambda^2} + \frac{1}{s\lambda^2} \sum_{i=1}^s i^2 \quad (29)$$

β 的方差为:

$$\sigma_\beta^2 = \overline{\beta^2} - \overline{\beta}^2 = -\frac{s^2+3}{4\lambda^2} + \frac{1}{s\lambda^2} \sum_{i=1}^s i^2 \quad (30)$$

因为 β 和批量信息等待时间 W 相互独立, 则单条信息等待时间 W' 的期望等于两者期望之和, 方差等于两者方差之和。

综上所述: 第 3.1 节~3.4 节详细描述了计算信息时延需要依赖的过程变量的计算方法, 第 3.5 节、3.6 节将根据前文得到的结果计算出信息时延和信息传达率。

3.5 信息时延

在轻机步 DTN 中, 根据排队论 G/G/1 模型, 信息时延 T 指一条信息在系统中停留的时间^[10]。

$$T = W' + X' \quad (31)$$

T 的期望为:

$$\overline{T} = \overline{W'} + \overline{X'} = \overline{W'} + \overline{X'} \quad (32)$$

因为单条信息的等待时间与单条信息的服务时间互相独立, 因此:

$$\sigma_{T'}^2 = \sigma_W^2 + \sigma_X^2 \quad (33)$$

3.6 信息传递率

为了计算信息传递率的边界值, 将 T 带入切比雪夫不等式^[11], 得:

$$P[T - \overline{T} \geq \varepsilon] \leq P[|T - \overline{T}| \geq \varepsilon] \leq \frac{\sigma_T^2}{\varepsilon^2} \quad (34)$$

经推导, 得:

$$P[T \leq \varepsilon + \overline{T}] \geq 1 - \frac{\sigma_T^2}{\varepsilon^2} \quad (35)$$

设常数 Γ 为所有信息的过期时间, 则一条信息在过期时间内能被传输到目的节点的概率为:

$$P[T \leq \Gamma] \geq 1 - \frac{\sigma_T^2}{(\Gamma - \overline{T})^2} \quad (36)$$

综上, 可以得出信息时延和信息传输率。至此轻机步 DTN 的服务模型建立完毕。下面将通过对仿真实验得到的数据与经模型推导的预期值对轻机步 DTN 的性能进行分析。

4 系统仿真

4.1 准备工作

进行仿真实验的平台是 ONES^[12], 为了得到尽可能准确的分析数据, 将进行 200 次仿真实验以便得到较大的样本空间, 实验进行界面如图 3 所示。

实验参数设置情况如下。

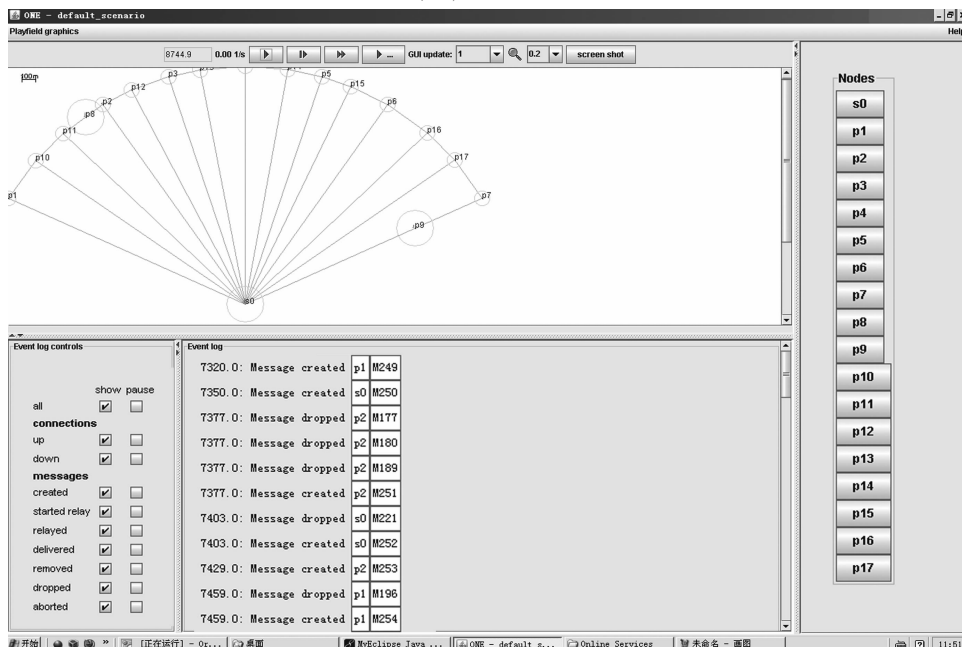


图 3 轻机步 DTN 仿真实验

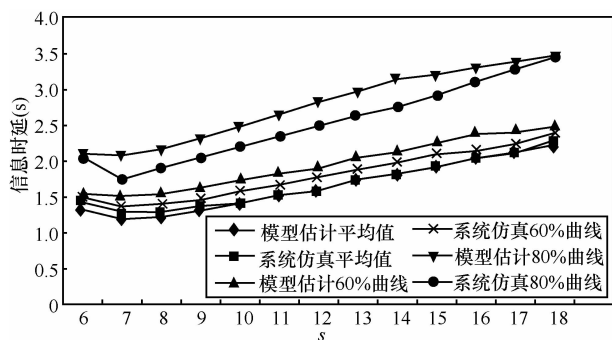


- 实验持续时间:43 200 ms, 代表现实中的 43 200 s, 即 12 h。
- 移动代理节点移动速度:1.5 长度单位/ms。
- 源节点数目为 1;移动代理节点数目为 1;参与者节点数目为 15。
- 弧半径:1/ π 单位长度。
- 参与者节点类型为低功耗节点;源节点、移动代理节点类型为高能节点,通信范围更大。
- 实验完成后数据保存在 jbdtn_scenario_Message DeliveryReport 中^[12]。

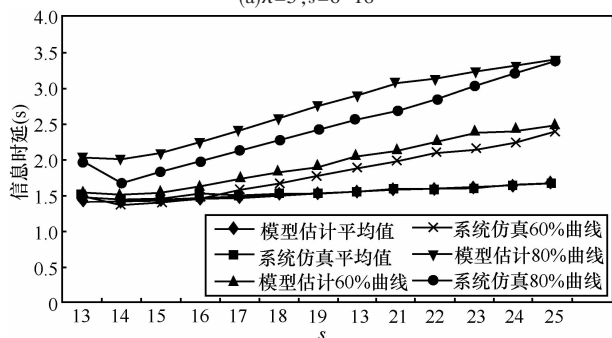
4.2 队列大小对实验结果的影响

在轻机步 DTN 仿真实验中,只有节点移动速度 ν 和队列大小 s 这两个参数是人为可控的。从第 2 节建模过程可得:信息传输率和速度大小 ν 基本成正比,但本实验中队列大小 s 的变化对整个系统的影响尚未明晰,因此需要 ν 为一个固定的常数以便对实验结果进行分析。

图 4 表示在独立采用不同的队列大小 s 时,信息时延的模型估计值和仿真实验结果值,为了使结果更加直观,在进行分析时还对 200 次实验结果进行了统计,得出了系统抽样百分比值。其中 80%、60% 曲线代表在模型估计或仿真实验中有 80% 或 60% 的样本值小于该曲线在队列容量



(a) $\lambda=5, s=6\sim 18$

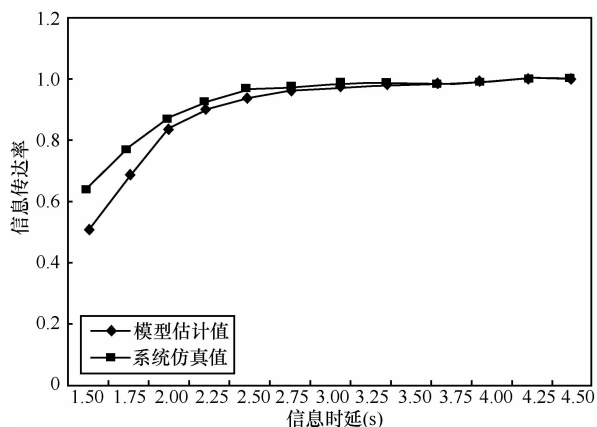


(b) $\lambda=10, s=13\sim 30$

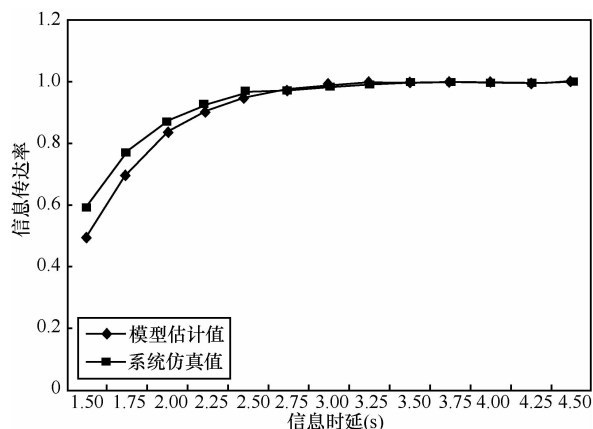
图 4 不同 λ, s 下的信息时延变化曲线

为 s 时所对应的信息时延。任务的平均到达率分别为 5 和 10,可以看出取不同值时,曲线变化趋势基本一致。且仿真实验结果平均值曲线与模型估计值曲线基本吻合,说明轻机步 DTN 模型在原理上是可行的,具有可实施性(另外,模型估计和仿真实验所对应的系统抽样百分比值其差距小于 5%,在可接受范围之内)。

图 5 表示在采用两组不同的 s 和 λ 时,系统信息传达率的变化曲线,观察可得:模型估计值和仿真实验结果值相差很小。



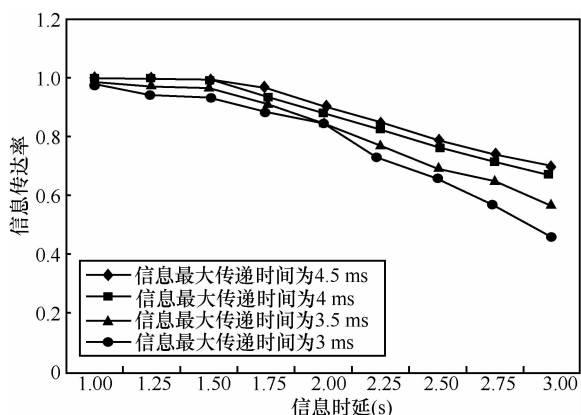
(a) $\lambda=5, s=7$



(b) $\lambda=10, s=13$

图 5 不同 λ, s 下的系统信息传达率变化曲线

通过对比图 4 的几条曲线,发现存在唯一的信息队列大小 s 能够使系统的信息时延最小。即当信息到达率未知时,可以通过确定 s 对轻机步 DTN 进行优化和校正。另外,如图 4 所示, λ 分别等于 5 或 10 时,所对应的曲线都在同样的 s 值获得最小信息时延 ($\lambda=5, s=7; \lambda=10, s=14$)。而最小的信息时延也对应着最小的系统信息传达率。根据第 2 节的计算,系统信息传达率不仅与信

图6 系统信息传达率与信息时延对应关系曲线($\lambda=5, s=630$)

息时延的期望有关,也与其方差大小有关^[13]。图6表示在 $\lambda=5, s=6\sim 25$ 时,系统信息传达率与信息时延的对应关系曲线,可以清晰地看到,系统信息传达率随着信息时延的增大而减小。

综上所述,可以得到结论,在轻机步DTN模型中,为了达到预期的系统信息传达率,必须得到最小的信息时延,方法是选择适当的信息队列大小 s 。也就是说,合适的信息队列大小 s 会使得轻机步DTN达到最理想的传输效率。

4.3 与感染路由策略的性能比较测试

在一般的DTN场景中,经常采用感染路由(epidemic router)策略作为基本的通信策略,为了比较感染路由策略与轻机步DTN通信策略在特殊场景下的通信性能,本节将在同样的实验场景下分别用感染路由策略与轻机步DTN通信策略进行100次仿真实验,并将实验数据进行对比和分析。衡量标准为相同时间系统信息传达率。实验进行界面如图3所示。

实验参数设置情况如下。

- 实验持续时间:21 600 ms,代表现实中的21 600 s,即6 h。
- 移动代理节点移动速度:1.5 长度单位/ms。
- 源节点数目为1,移动代理节点数目为1,参与者节点数目为15。
- 弧半径:1/ π 单位长度。
- 参与者节点类型为低功耗节点;源节点、移动代理节点类型为高能节点,通信范围更大。
- 实验完成后数据分别保存在jbdtn_scenario_MessageDeliveryReport_1与jbdtn_scenario_MessageDelivery_Report_epr中。

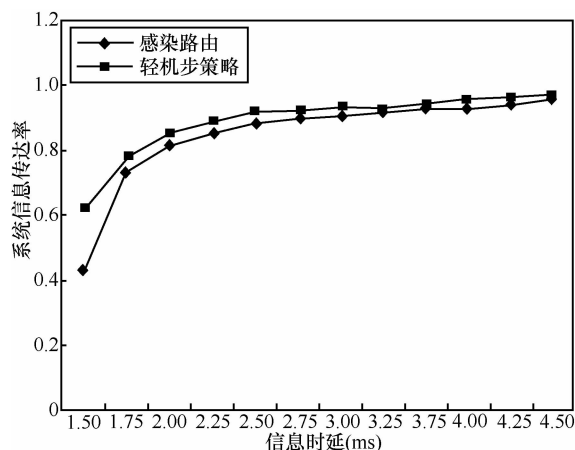


图7 系统信息传达率与信息时延在不同通信策略下的对应关系曲线

• 轻机步DTN策略参数设置为: $\lambda=5, s=7$ 。

图7表示最大传递时间不同时,感染路由策略和轻机步DTN策略在相同的传播时间内的系统信息传达率变化过程,可以看出,当最大传递时间小于2 ms(现实中为2 s)时,感染路由策略的性能明显落后于轻机步DTN通信策略,这也说明在通信资源匮乏、信息生存时间较短的情况下,轻机步DTN策略比感染路由策略有更好的通信性能,在最大传递时间不断增大时,轻机步DTN策略依然具有较高的信息传达率。因此,在仿真场景下,轻机步DTN策略具有较好的通信性能。

5 结束语

本文通过对基于轻型机步野战场景的DTN通信策略的研究,提出了一种新的DTN通信策略,根据排队论G/G/1模型和切比雪夫不等式对其进行了建模和边际估算,利用ONES框架对轻机步DTN场景进行了仿真实验,得到的实验数据与预期值相符,并得出结论,信息队列大小 s 决定着轻机步DTN达到最理想的传输效率。证明了该通信策略在特殊场景下的性能优势。

在今后的研究过程中需要进一步提高的有:进行更加复杂的仿真实验,现有的模型中可控参数还可以增加一些;在移动代理节点数目大于1时,需要进一步改善轻机步DTN的数学模型。

参考文献

- 1 Nichols K, Holbrook M, Pitts R L. DTN implementation and utilization options on the international space station. Proceedings of SpaceOps 2010 Conference, Huntsville, Alabama, 2010

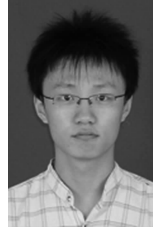


- 2 Nikolaos L, Georgios S, Pablo Rodriguez, *et al.* Delay tolerant bulk data transfers on the internet. Proceedings of the Eleventh International Joint Conference on Measurement and Modeling of Computer Systems, Seattle, USA, 2009:229~238
- 3 Ding B Q, Chen M, Liu X Y, *et al.* Design and realization of an experiment platform of delay/disruption tolerant network. Journal of Military Communications Technology, 2011(2)
- 4 Harras K A, Almeroth K C. Inter-regional messenger scheduling in delay tolerant mobile networks. Proceedings of IEEE WoWMoM 2006, Buffalo-Niagara Falls, USA, 2006
- 5 Atar R, Biswas A. Control of the multiclass G/G/1 queue in the moderate deviation regime. <http://arxiv.org/abs/1205.0351>, 2012
- 6 Seshasayee U R, Rathinam M. Correlated M/G/1 queue modelling of jitter buffer in TDMoIP. The Eighth Advances International Conference on Telecommunications, Stuttgart, Germany, 2012:191~196
- 7 Leahu H, Heidergott B, Hordijk A. Perturbation analysis of waiting times in the G/G/1 queue. Discrete Event Dynamic Systems, 2012, 23(3):277~305
- 8 Ravindar A, Srikant Y N. Estimation of probabilistic bounds on phase CPI and relevance in WCET analysis. Proceedings of the Tenth ACM International Conference on Embedded Software, Montreal, Canada, 2012:165~174
- 9 Gross D, Shortle J F, Harris C M, *et al.* Fundamentals of Queueing Theory. Hoboken: John Wiley & Sons, 2008
- 10 Ohaneme C O, Ohaneme L C, Eneh I I, *et al.* Performance evaluation of queueing in an established petroleum dispensary system using simulation technique. IRACST-International Journal of Computer and Wireless Communication, 2012, 2(2)
- 11 Korshunov D. How to measure the accuracy of the subexponential

approximation for the stationary single server queue. Queueing Systems: Theory and Applications, 2011(3~4)

- 12 Xian Y, Huang C T, Cobb J. Look-ahead routing and message scheduling in delay-tolerant networks. Proceedings of the 2010 IEEE 35th Conference on Local Computer Networks, Denver, USA, 2011
- 13 Yilmaz F, Alouini M. On the computation of the higher-order statistics of the channel capacity over generalized fading channels. IEEE Wireless Communications Letter, 2012, 6(1):573~576

[作者简介]



倪辰辰,男,南京理工大学硕士研究生,主要研究方向为网络与信息安全、可信计算。

李千目,男,博士,南京理工大学教授、博士生导师,主要研究方向为信息安全、物联网系统、人工智能、泛在系统。

姜怡,男,南京理工大学硕士研究生,主要研究方向为机会网络和无线自组织网络。

查玄阅,男,南京理工大学博士研究生,主要研究方向为可信计算与智能网络。

(收稿日期:2013-06-28)

(上接第 118 页)

- 7 Paulraj A J, Gore D A, Nabar R U, *et al.* An overview of MIMO communications-a key to gigabit wireless. Proceedings of the IEEE, 2004(2):198~218
- 8 Liang Y C, Zeng Y, Peh E, *et al.* Sensing-throughput tradeoff for cognitive radio networks. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008(4):1326~1337
- 9 Peh E, Liang Y C, Guan Y L, *et al.* Optimization of cooperative sensing in cognitive networks: a sensing-throughput tradeoff view. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009 (9): 5294~5299
- 10 Liu W, Xiong W, Wang J, *et al.* Optimal spectrum sensing framework in cognitive radio Contexts. IEEE WCSP, Suzhou, China, 2010:1~4
- 11 Zou Y, Yao Y D, Zheng B. Outage probability analysis of cognitive transmissions: impact of spectrum sensing overhead. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010(8): 2676~2688
- 12 Zou Y, Yao Y D, Zheng B. Spectrum sensing and data transmission tradeoff in cognitive radio networks. Proceedings of Wireless and Optical Communications Conference, Shanghai, China, 2010:1~5

[作者简介]



高昊民,男,郑州大学硕士研究生,主要研究方向为认知无线电频谱感知。

赵海峰,男,郑州大学博士研究生,主要研究方向为认知无线电频谱感知。

梁晓,女,郑州大学硕士研究生,主要研究方向为认知无线电频谱接入。

穆晓敏,女,郑州大学教授、博士生导师,主要研究方向为通信信号处理、图像信号处理、数字水印技术、认知无线电技术等。

(收稿日期:2013-05-06)