

DOI: 10.7652/xjtuxb201706011

业务迁移场景下利用信誉值的拓扑构造激励算法

张晖, 任文辉, 娄亚翔

(南京邮电大学江苏省无线通信重点实验室, 210003, 南京)

摘要: 针对无线泛在环境下的面向最佳业务迁移的节点快速激励问题, 提出一种利用信誉值的新型拓扑构造激励(TCI)算法。首先, 建立分层选择模型, 为需求节点选择最佳业务迁移小区及中继; 然后, 提出改进的信誉值计算方法, 以准确地反映各协作节点的信誉度; 最后, 借助拓扑构造算法, 实现网络拓扑的自适应调整, 从而有效地激励节点参与中继协作。仿真结果表明: TCI算法在业务迁移和节点激励2个方面均表现优异, 具有显著的综合优势; 与基于随机概率选择的协作激励算法和基于最短距离选择的协作激励算法相比, 其业务迁移成功率分别提高了43%和106%; 与基于直接信誉值的协作激励算法和基于综合信誉值的协作激励算法相比, 其能够促使非合作节点更早(即前3个周期)采用协作态度。

关键词: 无线泛在环境; 业务迁移; 信誉值; 节点协作; 节点激励

中图分类号: TN915 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)06-0066-07

Topology Construction Incentive Algorithm Using Reputation for Service Migration Scenario

ZHANG Hui, REN Wenhui, LOU Yaxiang

(Jiangsu Key Laboratory of Wireless Communications, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: A novel topology construction incentive algorithm (TCI) using reputation is proposed to solve the service migration oriented node incentive problem in wireless ubiquitous environment. First, a hierarchical selection model is established to select the optimal service migration cell and relay for a demand node. Then, an improved method is proposed to accurately calculate the reputation of each cooperation node. Finally, the topology construction algorithm is used to adaptively adjust the topology of the entire network and to effectively promote the node cooperation. Simulation results and comparisons with the random probability selection based incentive algorithm and the shortest distance selection based incentive algorithm show that the service migration rate of TCI improves respectively by 43% and 106%. Comparisons with the direct reputation based incentive algorithm and the integrated reputation based incentive algorithm show that TCI motivates noncooperation nodes to change their attitudes before the 3rd period. These results indicate that TCI performs outstandingly in terms of service migration and node incentive.

收稿日期: 2016-11-01。 作者简介: 张晖(1982—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61471203); 江苏省“青蓝工程”资助项目(2016); 南京邮电大学“1311 人才计划”资助项目(2015); 江苏省计算机信息处理技术重点实验室开放课题资助项目(KJS1518)。

网络出版时间: 2017-03-13

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20170313.2136.020.html>

Keywords: wireless ubiquitous environment; service migration; reputation; node cooperation; node incentive

随着通信技术的迅猛发展,带来了各种制式各异、能力互补的无线网络和智能终端的并存,从而共同构成了重叠覆盖的无线泛在环境^[1-2]。在此环境下,业务流量的幂率重尾特性愈加明显,同一时段内不同小区的业务流量分布异常不均,从而导致拥塞小区已无可利用资源而空闲小区的资源大量闲置。因此,将拥塞小区的新到达业务需求迁移到临近的空闲小区,即业务迁移接入^[3],可有效解决业务分布不均衡问题。在业务迁移场景中,如果不在空闲小区覆盖范围或者与其采用不同通信制式,需求节点均需相邻节点的协作中继才能实现业务迁移接入。然而,中继节点固有的自私特性往往导致协作失败,故而有必要研究节点协作激励算法,以有效促进节点之间协作。

当前,节点激励算法的相关研究不断涌现,大致可分为 3 类:基于博弈论的激励算法^[4]、基于虚拟货币的激励算法^[5]和基于信誉值的激励算法^[6]。上述 3 类算法各有优劣,基于信誉值的激励算法因实现简单且成本较低,吸引了更多关注。该类算法由某节点参与协作的历史信息对其信誉评价,进而依据评价的高低,决定是否为其提供中继服务,以激励节点积极参与协作转发。文献[7]认为信誉值定义应体现主观性、可能性预期和上下文相关性等 3 个特征。文献[8]通过定义并融合主观信誉值、间接信誉值和功能信誉值,以准确描述节点的整体信誉度。基于节点信誉值,业界提出了多种算法用于节点激励的具体执行,其中拓扑构造算法^[9]通过拓扑优化,可动态且分布式地实现节点协作激励。然而,上述研究均无法实现最佳的业务迁移,导致其实际效果不佳。为此,本文针对面向最佳业务迁移的节点快速激励问题,提出一种利用信誉值的新型拓扑构造激励(TCI)算法,通过分层选择模型和拓扑构造算法,实现最佳的业务迁移与高效的节点激励。

1 网络场景

无线泛在环境是由各种类型的无线网络(如 3G/4G/WiFi/WiMAX 等)重叠覆盖形成的泛在通信环境。在未来无线泛在环境下,业务迁移场景将变得非常普遍,以解决日益严重的业务流量分布不均衡问题。在典型的业务迁移场景中,业务需求节点所在的网络小区因流量过载已无可利用资源供其接

入,故而需要借助相邻节点的中继转发,以实现业务需求到临近空闲小区的迁移接入。无线泛在环境的业务迁移场景如图 1 所示。

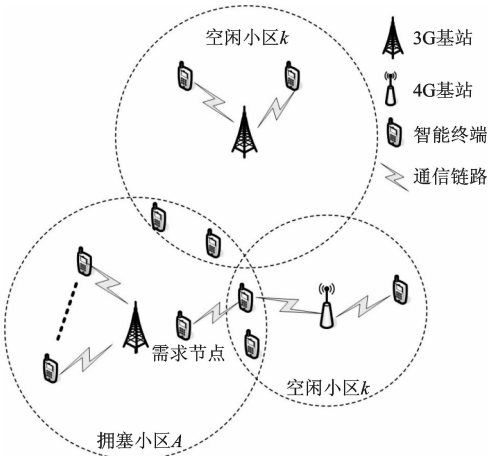


图 1 无线泛在环境的业务迁移场景图

需求节点置身无线泛在环境,周围存在大量中继节点可供协作转发,亦存在许多(同构或异构)空闲小区可供业务迁移。设业务需求节点 s 位于拥塞小区 A 之中,小区 A 周围存在 N 个(同构或异构)空闲小区,记为 $\mathbf{K} = \{k_1, k_2, \dots, k_N\}$;若某节点可与节点 s 通过 WiFi 直连或蓝牙等技术形成 Ad-hoc 式连接,并可同时连接附近的空闲小区,则称之为节点 s 的中继节点;若某中继节点或者属于节点 s 的邻居节点集 Ω_s (由拓扑构造生成,参见 2.3 节)或者从未与节点 s 有过协作交互(即陌生节点),则称之为节点 s 的有效中继节点;所有接入到网络小区 $k_i \in \mathbf{K}$ 的有效中继节点称为节点 s 的有效中继节点子集 $\mathbf{R}_{k_i} = \{r_{k_i,1}, r_{k_i,2}, \dots, r_{k_i,L_i}\}$, L_i 为相应中继节点的数量,则节点 s 的有效中继节点总集为 $\mathbf{R} = \{\mathbf{R}_{k_1}, \mathbf{R}_{k_2}, \dots, \mathbf{R}_{k_N}\}$ 。

由于需求节点所面临的多中继节点、多空闲小区的泛在环境特点,故应区分非合作中继、合作非最佳中继、合作且最佳中继(以及最佳迁移小区),以此为基础计算更新中继节点的信誉值。这里,信誉值被定义为:根据节点的历史协作行为而希望在将来一段时间内与其合作的期望程度。需求节点需要获取并存储中继节点相关的信誉信息。为减轻存储压力,需要设定信誉信息的存储时限,时间过于久远的信誉信息将被丢弃。此外,各节点均以某一概率决定协作与否,称之为协作概率 ρ ;节点协作概率若大

于某一阈值,则视为合作节点,反之则视为非合作节点,将此阈值称为协作概率阈值 ρ_{th} 。并且,网络中合作节点数占节点总数的比例为合作比例,设初始合作比例为 γ ,节点会因某些原因而改变协作概率,从而导致网络中合作比例不断变化。

根据现实情况,合理地给出本文的理论假设:①节点的身份标识在其生存时间内保持不变且不可伪造;②借助环境感知技术,业务需求节点对有效中继节点和空闲小区等信息具有完全认知;③所有节点均是自私且理性的^[10]。

2 本文算法描述

2.1 分层选择模型

首先,节点 s 从空闲小区集合 $\mathbf{K}$ 中选择最佳迁移小区 k^* (记为 B)。设空闲小区 k^i 的业务容量为 c_{k^i} ,已接入业务流量为 l_{k^i} ,则其负载率定义为

$$\eta_{k^i} = l_{k^i} c_{k^i}^{-1}, k^i \in \mathbf{K} \quad (1)$$

η_{k^i} 反映了小区 k^i 的负载程度。在此基础上,建立最佳迁移小区优化模型

$$k^* = \arg \max_{k^i \in \mathbf{K}} (1 - \eta_{k^i}) \quad (2)$$

式中: k^* 即为最佳迁移小区。

接着,节点 s 向 $\mathbf{R}$ 中所有中继节点广播中继协作请求,根据反馈信息,可将 $\mathbf{R}$ 分为非合作中继节点集 $\mathbf{R}'$ (拒绝合作的中继集合) 和合作中继节点集 $\mathbf{R}''$ (愿意合作的中继集合)。 $\mathbf{R}' \cup \mathbf{R}'' = \mathbf{R}$ 且 $\mathbf{R}' \cap \mathbf{R}'' = \emptyset$ 。由此可得,最佳迁移小区 k^* 内非合作中继节点集 $\mathbf{R}'_{k^*}$ 与合作中继节点集 $\mathbf{R}''_{k^*}$, 即

$$\mathbf{R}'_{k^*} = \mathbf{R}_{k^*} \cap \mathbf{R}'; \mathbf{R}''_{k^*} = \mathbf{R}_{k^*} \cap \mathbf{R}'' \quad (3)$$

进而,建立最佳迁移中继优化模型

$$\left. \begin{aligned} r_{k^*}^* &= \arg \max_{r_{k^*}^* \in \mathbf{R}'_{k^*}} \left\{ \frac{e_{r_{k^*}^*}}{p_{r_{k^*}^*}} \right\} \\ e_{r_{k^*}^*} &\geq E_{th} \\ p_{r_{k^*}^*} &\leq P_{th} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: $e_{r_{k^*}^*}$ 表示中继节点 $r_{k^*}^*$ 的剩余电池能量; $p_{r_{k^*}^*}$ 表示中继节点 $r_{k^*}^*$ 的 CPU 占用率; E_{th} 是节点剩余电池能量最小门限; P_{th} 是节点 CPU 占用率最大门限; $r_{k^*}^*$ 即为最佳迁移中继。由上,从 $\mathbf{R}''$ 中剔除 $r_{k^*}^*$, 可得节点 s 的合作非最佳中继集 $\mathbf{R}'''$ 即未被用于业务迁移的中继集合。由于节点 s 的非合作中继 $\mathbf{R}'$ 、合作非最佳中继 $\mathbf{R}'''$ 和最佳迁移中继 $r_{k^*}^*$ 具有不同的合作意愿及合作贡献,故应相应采用不同信誉值更新方法。

2.2 改进的信誉值计算方法

为全面真实地计算任一节点的信誉值,本文一

方面建立直接信誉值,以反映节点间的协作交互历史;另一方面建立间接信誉值,以融入邻居节点的相关信誉评价。

2.2.1 直接信誉值 节点 s 一旦需要业务迁移,则执行一次双层选择模型,进而确定当前的 $\mathbf{R}'$ 、 $\mathbf{R}'''$ 和 $r_{k^*}^*$,即完成了一次与中继节点的协作交互。对于非合作中继,应降低其信誉值以示惩罚;对于最佳迁移中继,应提升其信誉值以示奖励;对于合作非最佳中继,应保持其信誉值不变。节点 s 与中继节点 x 在第 θ 次交互后, s 对 x 的直接信誉值 $V_{sx}^{DR}(\theta)$ 更新式为

$$V_{sx}^{DR}(\theta) = \begin{cases} \min \{1, V_{sx}^{DR}(\theta-1) + \kappa_g\}, & x = r_{k^*}^* \\ \max \{0, V_{sx}^{DR}(\theta-1) - \kappa_m\}, & x \in \mathbf{R}' \\ V_{sx}^{DR}(\theta-1), & x \in \mathbf{R}''' \end{cases} \quad (5)$$

式中: κ_g 是激励因子; κ_m 是惩罚因子。考虑到节点的非合作性会对网络性能造成更严重影响,故 $0 < \kappa_g < \kappa_m < 1$ 。显然, $0 \leq V_{sx}^{DR}(\theta) \leq 1$,可设节点 s 对节点 x 的初始直接信誉值为 $V_{sx}^{DR}(0) = 0.5$ 。

为准确评估中继节点 x 的历史协作行为,应记录并融合节点 s 与节点 x 交互的各次直接信誉值,以得到 s 对 x 的最终直接信誉值。由于各次信誉值的重要性随着时间推移而递减,故采用二次递减函数定义各次直接信誉值的权重

$$\omega(t(\theta)) = \left(1 - \frac{t(\theta)}{\Gamma_{STL}}\right)^2, 0 \leq t(\theta) \leq \Gamma_{STL} \quad (6)$$

式中: Γ_{STL} 为信誉信息的存储时限,超出该时限的信誉信息将被丢弃,以保障对中继评价的实时准确性; $t(\theta)$ 表示第 θ 次交互距离当前时间的的时间间隔;当 $t(\theta) = 0$ 时, $\omega(t(\theta)) = 1$;当 $t(\theta) = \Gamma_{STL}$ 时, $\omega(t(\theta)) = 0$; $\omega(t(\theta))$ 即为第 θ 次直接信誉值的权重。利用加权平均法,可得 s 对 x 的最终直接信誉值

$$V_{sx}^{DR} = \sum_{0 \leq t(\theta) \leq \Gamma_{STL}} \left(V_{sx}^{DR}(\theta) \frac{\omega(t(\theta))}{\sum_{0 \leq t(\theta) \leq \Gamma_{STL}} \omega(t(\theta))} \right) \quad (7)$$

因 $0 \leq V_{sx}^{DR}(\theta) \leq 1$,对其归一化加权可得 $0 \leq V_{sx}^{DR} \leq 1$ 。

2.2.2 间接信誉值 进一步地,考虑邻居节点与中继节点之间的历史协作行为,融入邻居节点对中继节点的信誉评价(直接信誉值),以防止需求节点因自身原因而导致对中继节点信誉评价的主观偏见问题。对于需求节点 s 而言,(直接)信誉值高的邻居节点的信誉评价更有价值亦更加可信,因此综合其所有邻居节点对中继节点 x 的信誉评价,可得 s 对 x 的基本间接信誉值为

$$V_{sx}^{\text{IDR}} = \sum_{n_i \in \Omega_s} \left(\frac{V_{si}^{\text{DR}}}{\sum_{n_i \in \Omega_s} V_{si}^{\text{DR}}} V_{n_i x}^{\text{DR}} \right) \quad (8)$$

式中: Ω_s 表示节点 s 的邻居节点集; $V_{n_i x}^{\text{DR}}$ 是邻居节点 n_i 对中继 x 的直接信誉值(间接信誉评价);

$\frac{V_{si}^{\text{DR}}}{\sum_{n_i \in \Omega_s} V_{si}^{\text{DR}}}$ (依据节点 n_i 在节点 s 的信誉值大小而得到的)表示 $V_{n_i x}^{\text{DR}}$ 的归一化权值。

然而,若邻居节点处于异常(比如具有欺骗行为、信息记录出错等),即便其在需求节点的信誉值很高,但对中继节点的信誉评价将不再真实可信。另一方面,由于节点行为具有一致性(即节点对于不同节点具有相同的合作及非合作概率),故不同的正常节点对于同一节点的信誉评价亦应具有一致性。设需求节点 s 处于正常且所有节点行为具有一致性,并设 $\mathbf{A}(s, n_i)$ 为与 s 和 n_i 都有过协作交互的节点集,故利用基于余弦的相似度计算方法^[11]可得

$$H(s, n_i) = \frac{\sum_{j \in \mathbf{A}(s, n_i)} V_{sj}^{\text{DR}} V_{n_i j}^{\text{DR}}}{\left(\sum_{j \in \mathbf{A}(s, n_i)} (V_{sj}^{\text{DR}})^2 \right)^{1/2} \left(\sum_{j \in \mathbf{A}(s, n_i)} (V_{n_i j}^{\text{DR}})^2 \right)^{1/2}} \quad (9)$$

式中: $H(s, n_i)$ 为 s 和 n_i 对共有中继节点的信誉评价的相似度。基于前面假设, n_i 应与 s 具有相似的信誉评价行为,否则表明 n_i 处于异常。因此, $H(s, n_i)$ 越大,则表明 n_i 越正常,其对节点 x 的信誉评价 $V_{n_i x}^{\text{DR}}$ 越真实可信;反之亦然。故而,在 $V_{n_i x}^{\text{IDR}}$ 基础上,可得 s 对 x 的改进的间接信誉值 V_{sx}^{BIDR} 为

$$V_{sx}^{\text{BIDR}} = \frac{1}{\sum_{n_i \in \Omega_s} V_{si}^{\text{DR}}} \sum_{n_i \in \Omega_s} V_{si}^{\text{DR}} H(s, n_i) V_{n_i x}^{\text{DR}} \quad (10)$$

因 $0 \leq H(s, n_i) \leq 1$ 且 $0 \leq V_{n_i x}^{\text{DR}} \leq 1$, 故 $0 \leq V_{sx}^{\text{BIDR}} \leq 1$ 。

2.2.3 综合信誉值 综上,得到节点 s 对节点 x 的综合信誉评价值为

$$V_{sx}^{\text{IR}} = \alpha V_{sx}^{\text{DR}} + (1 - \alpha) V_{sx}^{\text{BIDR}} \quad (11)$$

式中:权值 $\alpha \in [0, 1]$, 由于信誉评价本质仍为节点主观行为,故直接信誉值 V_{sx}^{DR} 应更重要,因此 $\alpha \geq 0.5$ 。

2.3 节点拓扑构造激励机制

在上述基础上,引入拓扑构造激励机制,周期性重构节点的网络拓扑,使得合作节点处于网络中心(拥有大量邻居连接),并将非合作节点孤立至网络边缘(仅有极少邻居连接),从而达到激励节点协作之目的。设拓扑调整周期为 T ,各节点采用异步方式进行拓扑构造,拓扑构造激励机制由节点连接控

制和节点连接请求验证 2 部分组成。下面分别予以详述。

2.3.1 节点连接控制 节点连接控制部分负责删除低信誉值节点的连接并向高信誉值节点发起连接请求。设 Ψ_s 表示与节点 s 有过协作交互的节点集合; Φ_s 表示节点 s 信誉评价高的节点集合,其中任意节点满足 $V_{sx}^{\text{IR}} \geq V_{\text{th}}^{\text{IR}}$ ($V_{\text{th}}^{\text{IR}}$ 为信誉值最小阈值); Ω_s 表示节点 s 的邻居节点集合,用于更新节点 s 的有效中继节点(R_{s_i} 和 R); $\Phi_s \subset \Psi_s$ 且 $\Omega_s \subset \Psi_s$; $\tau_{\max}$ 表示节点 s 受自身能力所限可维护的最大邻居节点数,其取值取决于节点 s 当前的存储空间大小。在最新计算的交互节点信誉值基础上,连接控制部分步骤如下。

(1)由 Ψ_s 生成 Φ_s :选择 Ψ_s 中所有信誉值高于 $V_{\text{th}}^{\text{IR}}$ 的节点更新 Φ_s 。

(2)将 Ω_s 中信誉值低于 $V_{\text{th}}^{\text{IR}}$ 的节点删除。

(3)由 Φ_s 更新 Ω_s 。①若 Ω_s 节点数目 $|\Omega_s| < \tau_{\max}$ ($|\cdot|$ 表示取集合阶数),则选择 Φ_s 中信誉值最高且不在 Ω_s 中的节点,向其发送连接请求,若请求通过验证,则将该节点添加进 Ω_s 并从 Φ_s 中删除,若请求未通过,则直接该节点从 Φ_s 中删除。重复步骤①,直到 $|\Omega_s| = \tau_{\max}$ 或者 Φ_s 变为空集为止。②若 Ω_s 节点数目 $|\Omega_s| = \tau_{\max}$,则将 Φ_s 中信誉值最高(且不在 Ω_s 中)的节点 x 与 Ω_s 中信誉值最低的节点 y 相比,若 x 信誉值更高,则向 x 发送连接请求,若请求通过验证,则将 x 添加进 Ω_s 且从 Φ_s 中删除,并从 Ω_s 删除 y ,若请求未通过,则直接从 Φ_s 中删除 x 。重复步骤②,直到 Ω_s 所有节点信誉值均高于 Φ_s 所有节点信誉值或者 Φ_s 变为空集为止。

2.3.2 节点连接请求验证 节点连接请求验证部分负责评估发起连接请求的节点信誉值并基于自身邻居节点集决定是否通过连接请求。设发起连接请求的节点为 s ,被请求节点为 x ,节点 x 维护的最大邻居数亦为 $\tau_{\max}$,则 x 根据自身邻居节点数 $|\Omega_x|$ 执行如下步骤。

(1)当 $|\Omega_x| = \tau_{\max}$ 时,如果节点 x 没有 s 的信誉评价信息(s 对 x 而言为陌生节点),则拒绝 s 的连接请求;否则,寻找 x 邻居节点集 Ω_x 的最低信誉值节点 y ,比较 x 对 s 的信誉评价 V_{xs}^{IR} 和 x 对 y 的信誉评价 V_{xy}^{IR} ,若 $V_{xs}^{\text{IR}} > V_{xy}^{\text{IR}}$,则通过 s 的连接请求,并将 Ω_x 中节点 y 替换为节点 s ,反之,则拒绝连接请求。

(2)当 $|\Omega_x| < \tau_{\max}$ 时,如果节点 x 没有 s 的信誉评价信息,则以概率 P_r 通过 s 的连接请求,将其添加到 Ω_x 并初始化相应的直接信誉值为 0.5,以为新

到节点提供协作机会;否则,比较 x 对 s 的信誉评价 V_{xs}^{IR} 和 V_{th}^{IR} ,若 $V_{xs}^{\text{IR}} \geq V_{th}^{\text{IR}}$,则通过 s 的连接请求,并将 s 添加到 Ω_x ,反之则拒绝连接请求。另外, P_r 可由式(12)计算得到

$$P_r = 1 - \frac{|\Omega_x|}{\tau_{\max}} \quad (12)$$

式(12)表明:现有邻居节点数越少,越有可能通过新的连接请求。

2.4 算法流程

综上所述,本文算法流程如下。

(1)初始化网络参数 Ψ_s 、 Φ_s 、 Ω_s 、 $\Lambda(s, n_i)$ 均设为空集;初始化各节点的 $V_{sr}^{\text{DR}}(0) = 0.5$;初始化系统参数 $E_{th} = 20\%$ 、 $P_{th} = 80\%$ 、 $\kappa_g = 0.075$ 、 $\kappa_m = 0.1$ 、 $\Gamma_{\text{STL}} = 24 \text{ h}$ 、 $\alpha = 0.75$ 、 $T = 0.5 \text{ h}$ 、 $V_{th}^{\text{IR}} = 0.35$ 、 $\tau_{\max} = 20$ 个。

(2)节点 s 一旦需要业务迁移,则感知获得有效中继节点信息 R_{k_i} 和 R 、空闲小区信息 K 、 c_{k_i} 和 l_{k_i} 以及各中继节点性能指标信息 $e_{r_{k_i j}}$ 和 $p_{r_{k_i j}}$;进而向 R 中节点广播中继协作请求,根据反馈信息得到 R' 和 R'' 。

(3)执行分层选择模型:根据式(1)、式(2),得到最佳迁移小区 k^* ;接着根据式(3)得到 R''_{k^*} ;进而根据式(4)得到最佳迁移中继 $r_{k^*}^*$ 以及 R'' 。

(4)计算更新信誉评价:根据式(5)~(7),计算直接信誉值 V_{sr}^{DR} ;根据式(8)~(10),计算间接信誉值 V_{sr}^{BIDR} ;根据式(11),得到综合信誉评价 V_{sr}^{IR} 。将相应信息进行存储并更新 Ψ_s ,一旦业务迁移,再次执行步骤(2)~步骤(4)。

(5)一旦拓扑调整周期到来,节点 s 执行拓扑构造的节点连接控制,由 Ψ_s 生成 Φ_s ,进而由 Φ_s 更新 Ω_s ;更新 Ω_s 过程中, s 需向高信誉值节点发送连接请求,相应节点执行拓扑构造的节点连接请求验证,决定是否通过连接请求;调整的 Ω_s 将用于更新节点 s 的有效中继节点集 R_{k_i} 和 R 。存储相应信息,一旦拓扑调整周期到来,再次执行步骤(5)。

2.5 算法分析

拓扑构造过程会从需求节点的邻居集中去除低信誉值节点,以此形成分层选择模型的可行解集。这样,即便上述低信誉值节点愿意协作且性能指标更优,本文算法亦无法选择其为最佳中继。显然,这在一定程度上会影响本文算法性能,使之无法达到最优。然而,由于上述低信誉值节点愿意协作且性能最优的概率很小,故对本文算法在业务迁移性能的影响不大,而拓扑构造过程可提升算法节点的激励性能。因此,从业务迁移和节点激励 2 个方面考

量,本文算法具有显著综合优势。

3 仿真实验

将本文算法与随机概率选择的协作激励算法(RPS-CIA)和基于最短距离选择的协作激励算法(SDS-CIA)^[12]比较以评估其业务迁移性能;与基于直接信誉值的协作激励算法(DRV-CIA)和基于综合信誉值的协作激励算法(IRV-CIA)^[8]比较以评估其节点激励性能。其中,RPS-CIA 算法通过随机方式为需求节点选择最佳业务迁移中继及小区,SDS-CIA 算法根据需求节点、中继、小区总距离最短的准则选择最佳业务迁移中继及小区,且两者均采用传统方法计算直接信誉值;DRV-CIA 算法和 IRV-CIA 算法不执行拓扑构造流程,直接依据信誉值大小决定是否协作(比较阈值仍为 0.35),前者计算直接信誉值,后者则计算综合信誉值。仿真中:在 $1\,000 \text{ m} \times 1\,000 \text{ m}$ 区域内设置 25 个异构网络小区,异构小区重叠覆盖,平均通信半径为 150 m;500 个节点均匀分布其间且不具移动性(拓扑固定),每个节点均可与临近的若干异构小区连接,节点之间的最大通信距离亦为 150 m;依据 γ 随机划分合作节点和非合作节点,其协作概率分别初始化为 0.9 和 0.1。初始化网络参数 Ψ_s 、 Φ_s 、 Ω_s 、 $\Lambda(s, n_i)$ 均设为空集; $\rho_{th} = 0.6$;初始化所有节点的 $V_{sr}^{\text{DR}}(0) = 0.5$ 。初始化系统参数 $E_{th} = 20\%$ 、 $P_{th} = 80\%$ 、 $\kappa_g = 0.075$ 、 $\kappa_m = 0.1$ 、 $\Gamma_{\text{STL}} = 24 \text{ h}$ 、 $\alpha = 0.75$ 、 $T = 0.5 \text{ h}$ 、 $V_{th}^{\text{IR}} = 0.35$ 、 $\tau_{\max} = 20$ 个;各空闲小区和中继节点的性能指标初始值(c_{k_i} 、 l_{k_i} 、 $e_{r_{k_i j}}$ 、 $p_{r_{k_i j}}$)均在合理区间随机产生;随机选取 20% 小区作为拥塞小区,其中 20% 的节点产生业务迁移需求,业务到达的平均间隔为 0.25 h,且业务负载大小在合理区间随机产生。本仿真基于蒙特卡罗方法实现。

图 2 给出了 3 种算法合作节点数比较。如图 2 所示,随着拓扑周期增加,基于 RPS-CIA 或 SDS-CIA 的合作节点数均呈递减趋势,而基于本文算法的合作节点数并无变化,显然性能更优。这是由于 RPS-CIA 和 SDS-CIA 采用传统的直接信誉值计算方法,基于相同标准提高对各合作中继的信誉评价。显然,选择用于业务迁移的合作中继从自私性出发,将认定上述方法对其不够公平,导致其协作意愿降低,故会在后续进程中降低其协作概率(仿真中每次降低 0.1)。

图 3 给出了 3 种算法业务迁移成功率比较。图 3 结果表明:在各种初始合作比例情况下,本文算法

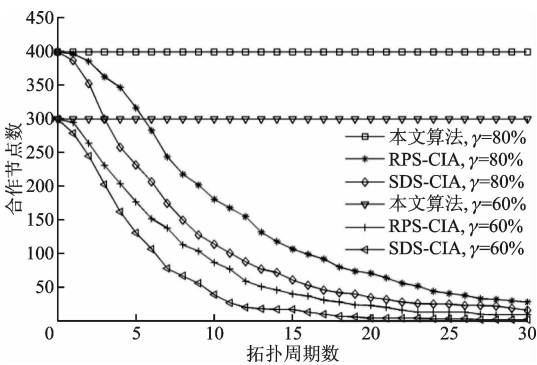


图 2 3 种算法的合作节点数随拓扑周期的变化比较

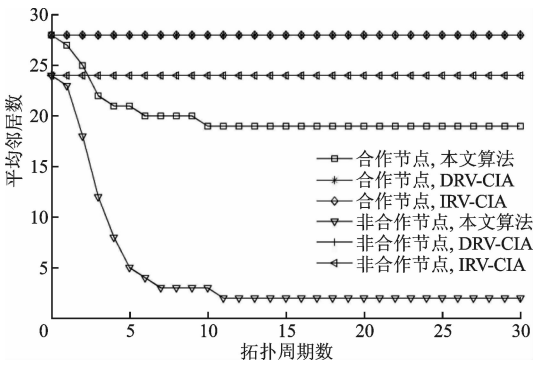


图 4 平均邻居数随拓扑周期的变化比较($\gamma=80\%$)

的业务迁移成功率始终优于另外 2 种算法;而且,随着初始合作比例的增加,本文算法选择空间更大,相应的业务迁移成功率随之提高。这是由于本文算法采用分层选择模型,得到具有最佳业务承载能力的中继及小区,相应的业务迁移成功率较高。

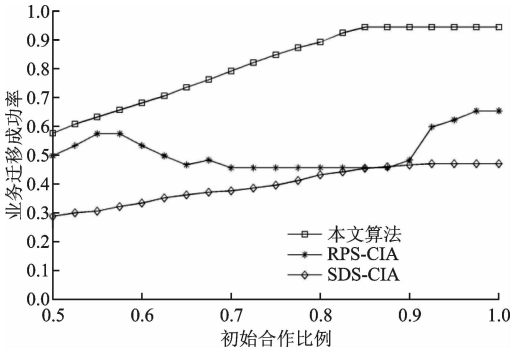


图 3 3 种算法的业务迁移成功率比较

图 4 给出了 3 种算法平均邻居数比较。图 4 结果表明:随着拓扑周期增加,采用本文算法的合作节点的平均邻居数小幅减小(将非合作节点逐步去除)后呈平稳状态;采用本文算法的非合作节点的平均邻居数逐步减小并趋于 0;采用 DRV-CIA 和 IRV-CIA 的合作(及非合作)节点的平均邻居数因网络拓扑未变,均始终不变。这是由于 DRV-CIA 和 IRV-CIA 未有拓扑构造,故凡与需求节点 1 跳可达的中继节点,均为其邻居节点,而本文算法在上述基础上,还需借助拓扑构造并根据信誉值大小从中筛选相应邻居节点。

图 5 和图 6 给出了对应于 3 种算法在不同初始合作比例下非合作节点的平均信誉值随拓扑周期的变化比较。这里,非合作节点在拓扑周期数达到一定阈值(对应于本文算法,其平均邻居数降到一定阈值)时,将协作概率统一提高到 0.9(仍将此类节点视作非合作节点统计)。其中,图 5 对应于拓扑周期数阈值为 10 个(平均邻居数阈值为 2 个)的结果;图

6 对应于拓扑周期数阈值为 3 个(平均邻居数阈值为 10 个)的结果。可以看出,不同于 DRV-CIA 和 IRV-CIA 算法,本文算法只有在算法运行早期,非合作节点改变态度,才有机会重新获得中继服务。这是由于需求节点仅向邻居节点发送中继请求,对于本文算法,非合作节点将从各节点的邻居集中逐步去除,故对其信誉评价一旦降低到一定程度,即便非合作节点改变态度(提高协作概率),亦难以逆转其信誉评价,从而永久丧失获得中继服务的机会。因此,在本文算法的激励下,非合作节点从理性出发,将倾向于尽早采用协作态度,其激励效果更佳。

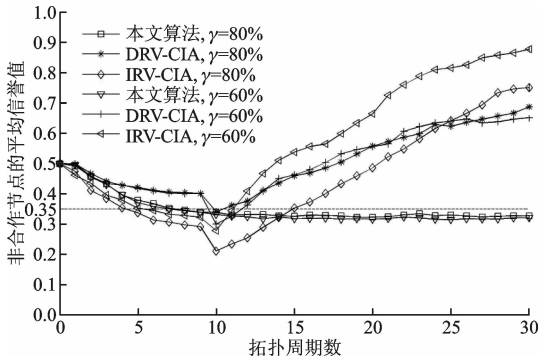


图 5 周期数阈值为 10 时 3 种算法的平均信誉值随拓扑周期的变化比较

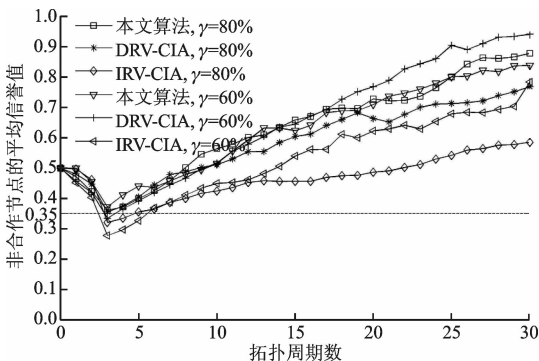


图 6 周期数阈值为 3 时 3 种算法的平均信誉值随拓扑周期的变化比较

4 结束语

针对无线泛在环境特点,本文提出一种新型节点激励算法。首先,建立基于性能指标的分层选择优化模型,以确定需求节点的最佳迁移小区及中继。接着,提出改进的信誉值计算方法,以全面真实地反应出节点的协作信誉度。进而,引入拓扑构造算法,实现网络拓扑的自适应调整,从而有效激励节点协作。最后,仿真结果证明了本文算法的有效性。

参考文献:

- [1] REINA D G, TORAL S L, ASIMAKOPOULOU E, et al. The role of congestion in probabilistic broadcasting for ubiquitous wireless multi-hop networks through mediation analysis [J]. *Pervasive and Mobile Computing*, 2015, 24: 16-29.
- [2] 朱洪波, 杨龙祥, 朱琦. 物联网产业化发展思路与泛在无线通信技术研究 [J]. *中兴通讯技术*, 2012, 18(2): 1-4.
ZHU Hongbo, YANG Longxiang, ZHU Qi. The industrial development of IoT and ubiquitous wireless communications [J]. *ZTE Technology Journal*, 2012, 18(2): 1-4.
- [3] KIM D Y, PARK T J, KIM S G. Load balancing in two-tier cellular networks with open and hybrid access femtocells [J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2016, 24(6): 3397-3411.
- [4] LI Ze. Game-theoretic analysis of cooperation incentive strategies in mobile Ad Hoc networks [J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2012, 11(8): 1287-1303.
- [5] 刘风华. 无线泛在环境下面向协作的节点激励理论研究 [D]. 南京: 南京邮电大学, 2015: 36-51.
- [6] DIMITRIS C P, MAHDIEH A M, SOKOL K, et al. Have you asked your neighbors? A hidden market approach for device-to-device offloading [C] // *Proceedings of 17th International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2016: 1-9.
- [7] GAMBETTA D. Trust: making and breaking cooperative relations [M]. Oxford, UK: Blackwell Pub, 1990: 142-157.
- [8] MICHIARDI P, MOLVA R. Core: a collaborative reputation mechanism to enforce node cooperation in mobile ad hoc networks [EB/OL]. [2016-09-16]. [https://link.springer.com/book/10.1007/978-0-387-](https://link.springer.com/book/10.1007/978-0-387-35612-9)

35612-9.

- [9] SIMONE B, SENA E C, SEYED S M, et al. A survey on energy efficiency in P2P systems [J]. *ACM Computing Surveys*, 2015, 48(3): 1-37.
- [10] SAMIAN N, ZURIATI A Z, WINSTON K G S, et al. Cooperation stimulation mechanisms for wireless multihop networks [J]. *Journal of Network and Computer Applications*, 2015, 54(C): 88-106.
- [11] ANDRES F R H, NANCY Y G G. Distributed processing using cosine similarity for mapping big data in Hadoop [J]. *IEEE Latin America Transactions*, 2016, 14(6): 2857-2861.
- [12] ANDRES F M. Relaying, multihop, and cooperative communications [M]. Hoboken, NJ, USA: Wiley-IEEE Press, 2011: 521-563.

[本刊相关文献链接]

- 戴慧珊, 曲桦, 赵季红. 利用非精确参数的移动互联网业务感知多目标优化 QoS 路由算法. 2014, 48(02): 86-92. [doi:10.7652/xjtuxb201402015]
- 杨阳, 廖学文, 高贞贞, 等. 多小区终端直通异构网络中利用图论的资源分配方案. 2014, 48(10): 22-28. [doi:10.7652/xjtuxb201410004]
- 李巍, 李国兵, 朱世华, 等. 一种采用空时网络编码的多向中继通信方案. 2014, 48(2): 80-85. [doi:10.7652/xjtuxb201402014]
- 宋佳润, 苏洪磊, 杨付正. 网络视频质量包层评估模型研究. 2013, 47(6): 37-43. [doi:10.7652/xjtuxb201306007]
- 脱立恒, 倪宏, 刘学. 一种网络冗余流量消除算法. 2013, 47(4): 22-27. [doi:10.7652/xjtuxb201304005]
- 刘辉, 李晖. 采用群组密钥管理的分布式车联网信息认证方案. 2013, 47(2): 58-62. [doi:10.7652/xjtuxb201302010]
- 刘阳, 冯志勇, 尉志清, 等. Nakagami- m 信道下认知中继网络的中断概率上界闭式解模型. 2012, 46(10): 95-100. [doi:10.7652/xjtuxb201210017]
- 李彬, 王文杰, 殷勤业, 等. 无线传感器网络节点协作的节能路由传输. 2012, 46(6): 1-6. [doi:10.7652/xjtuxb201206001]
- 苏洪磊, 李兵兵, 杨付正. H. 264/AVC 网络视频编码失真评估的比特流层模型. 2012, 46(6): 36-41. [doi:10.7652/xjtuxb201206007]
- 梁庆伟, 姚道远, 巩思亮. 一种保障时延能量高效的无线传感器网络路由协议. 2012, 46(6): 48-52. [doi:10.7652/xjtuxb201206009]
- 吕政, 余志军, 刘海涛. 协作通信中联合信道-网络编码的性能分析与资源分配. 2012, 46(4): 83-87. [doi:10.7652/xjtuxb201204014]

(编辑 刘杨)