

基于终端干扰和链路稳定性的多终端协同维护机制

张洁¹, 芮兰兰¹, 郭少勇², 邱雪松¹, 丁一凡¹

(1. 北京邮电大学 网络与交换技术国家重点实验室, 北京 100876; 2. 北京交通大学 高速铁路网络管理教育部工程研究中心, 北京 100044)

摘要: 在泛在末梢环境中, 为了减少协同方案维护代价, 满足一定的业务质量需求, 提出了一种基于终端干扰和链路稳定性的多终端协同维护机制(MDCMM)。该机制建立了协同方案维护模型, 结合终端干扰和链路稳定性确定了维护指标, 并使用动态规划思想优先选择可靠的协同方案, 减少方案切换对用户的干扰, 满足用户多样化的业务质量需求。经 OPNET 和 MATLAB 仿真实验, 该机制具有较低的维护代价, 并且协同方案切换更平滑, 证明该机制能更好地保障用户体验。

关键词: 泛在末梢环境; 多终端协同维护; 动态规划; 终端干扰

中图分类号: TP311.134.3

文献标识码: A

Device interference ability and link stability based on multi-devices cooperation and maintenance mechanism

ZHANG Jie¹, RUI Lan-lan¹, GUO Shao-yong², QIU Xue-song¹, DING Yi-fan¹

(1. State Key Laboratory of Networking and Switching Technology, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China; 2. High Speed Railway Network Management Engineering Research Center of Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: To reduce costs of cooperation solutions maintenance and meet certain demand of service quality, a multi-devices cooperation and maintenance mechanism (MDCMM) based on device interference ability and link stability was proposed. With a multi-devices cooperation model, and an evaluation index considering both the heterogeneous device interference ability and the link stability, MDCMM provides a maintenance mechanism of the ubiquitous service in a certain period based on dynamic planning optimization strategy, aims at reduces interference of cooperation solutions switching and meet users' diverse needs. Simulation results show that, compared with the existing mechanism, MDCMM has lower maintenance costs, smoother cooperation solutions, and better able to guarantee the user experience.

Key words: ubiquitous environment; multi-devices cooperation and maintenance; dynamic planning; device interference ability

1 引言

泛在末梢环境是由处于用户周边终端形成的智能空间, 在移动自组织网(MANET, mobile ad-hoc network)组成的泛在末梢环境中, 常以面向业务的多终端协同的方式为用户提供无处不在的泛在业

务^[1]。然而, 终端移动性造成的网络拓扑动态变化^[2]、有限的终端资源属性^[3]造成协同方案的不确定性, 是协同执行潜在的失败风险, 并且, 失败引起多终端协同方案切换, 对用户产生干扰。因此, 需要构建一个多终端协同维护机制, 保证泛在业务执行的可靠性和持续性, 从而保障用户体验。

收稿日期: 2014-02-21; 修回日期: 2014-09-18

基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体科学基金资助项目(61121061); 国家自然科学基金资助项目(61302078, 61372108); 国家高技术研究发展计划(“863”计划)基金资助项目(2011AA01A102); 北京高等学校青年英才计划项目基金资助项目(YETP0476); 博士后基金资助项目(2014M550605)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation for Creative Research Groups of China (61121061); The National Natural Science Foundation of China (61302078, 61372108); The National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (2011AA01A102); The Excellent Young Teacher Project of Beijing Higher Education (YETP0476); The Post-doctoral Science Foundation of China (2014M550605)

构建多终端协同维护机制面临以下挑战：首先，在动态的网络环境中，如何估计终端移动性，构造可靠的协同方案；其次，在切换多终端协同方案的时候，如何尽可能地减少对用户的干扰；最后，协同方案要在满足有限终端资源的同时，实现多样化的业务质量(QoS, quality of service)需求。

目前，有关多终端协同维护的研究成果不多。通过预估终端移动性的方法可以提高所选协同方案的可靠性^[4-7]。文献[4,5]使用 GPS 等设备提供的位置信息，无需复杂计算，选择可靠的协同方案，但会产生额外的辅助设备负担，在一些特定环境中无法使用(如地下)。文献[6]基于移动模型，使用概率统计的方法进行协同方案的构建，在扩展方面有局限性。文献[7]通过终端当前的属性，如信号强度来预测移动性，没有设备负担，而且扩展性较好。但目前，较多存在于链路层，缺乏面向业务的应用。本文将结合这种方法，在设计面向业务的协同维护时，通过对终端自身属性的计算确定可靠性指标。

采用优化算法可以有效提高协同方案的可靠性^[8,9]。文献[8]基于贪婪路由算法，提出了一个新的预测链路生存期的方法，以便在进行终端协同选择的时候更加高效。文献[9]在贪心算法的基础上，结合执行时间，采用动态规划算法解决终端协同中的开销问题。以上两者均未考虑协同方案在切换时对用户的干扰，在发生多次中断时难以保证最佳用户体验。

针对协同方案切换产生的干扰，文献[10]通过表征节点失败引起的中断，提出了最小化切换代价的协同方案(MDSCR, minimum disruption service composition and recovery)，但是缺乏对链路稳定性和多样化 QoS 需求的考虑。文献[11]利用局部恢复和可靠路径，基于概率分析提出了一个快速计算中断干扰的算法，没有计算终端自身属性对 QoS 的影响。

为了解决上述问题，本文通过在泛在末梢环境中抽象出泛在业务执行问题模型，并结合泛在业务特征，建立了满足个性化用户需求的指标，提出一个新的多终端协同维护机制(MDCMM, multi-devices cooperation maintenance mechanism)。MDCMM 基于容忍干扰和链路稳定性来计算可靠性，并结合持续性指标确定维护评价函数。MDCMM 包括初始化部署、协同构造和协同重构 3 个阶段，具有动态规划最优子结构的特点，并且克服了现有动态规划协同

维护策略的不足。仿真结果表明，MDCMM 能在满足 QoS 的前提下减少整体和局部维护代价，有效保障用户体验。

2 场景及模型

建立以 MANET 为背景的泛在末梢环境下的终端协同场景，包括用户层、业务层和网络层。当用户发起一个泛在业务时，通过起始终端设备将子业务的协同关系发布到网络层中，获取网络层中的可用终端信息，选择执行终端执行对应的子业务，以满足需求用户的要求。如图 1 所示，泛在业务由 S_1 到 S_4 顺序完成，MDCMM 经过协同构造后，使 S_1 的执行终端为 11， S_2 的执行终端为 22，它们之间用 l_1 、转接终端和 l_2 连接。某时刻 l_2 发生失败，MDCMM 将进行协同重构，以最优的全局维护评价指标，维护业务的持续和平滑进行。

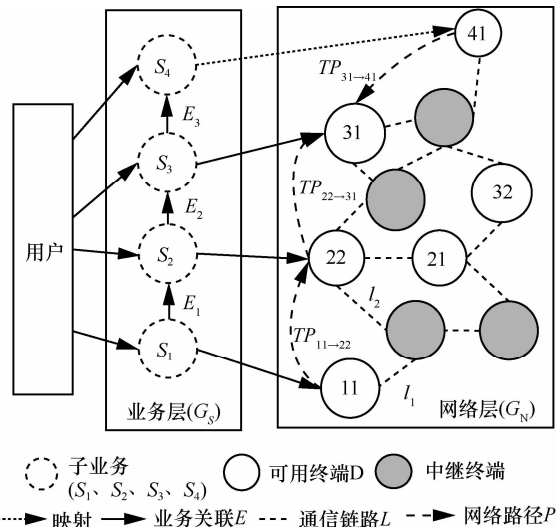


图 1 泛在业务场景

2.1 问题模型

1) 网络模型

网络模型用 $G_N=(D,L,I, TP)$ 表示。由于网络拓扑随时间动态变化，将泛在业务执行时间 T 设置为基于中断时刻的离散变量(t_1, t_2, \dots)，其中 T_i 表示时间段 $[t_i, t_{i+1})$ 。在时间段 T_i 内，网络拓扑保持在 t_i 时刻的状态不变，终端集合 $D=\{d_i | i=1,2, \dots\}$ ，无线链接集合 $L=\{l_i | i=1,2, \dots\}$ ，终端干扰能力集合 $I=\{I_d | i=1,2, \dots\}$ ，以及链路持续时间集合 $TP=\{TP_i | i=1, 2, \dots\}$ 均不变。其中，两终端之间的链路表示为 $P_{(d,d')}(t)=\{d_1, \dots, d_m, d_1=d, d_m=d'\}$ 。如果终端不再满足质量需求，或者移动到通信范围外时，网络

中的节点和边会被删除。

2) 业务模型

业务模型用一个有向无环图 $G_S=(S, E, IS)$ 表示。其中协同关系由一系列子业务构成，第 i 个子业务 S_i 和下一个执行业务 S_{i+1} 之间用有向边 E_i 连接。当网络层中与 S_i 和 S_{i+1} 对应两终端间的链路失败时， E_i 被删除。

2.2 评价指标模型

综合上述网络模型和业务模型，选择终端执行泛在业务的问题，即从 $G_N=(D, L, I, TP)$ 中选取符合 $G_S=(S, E, IS)$ 的子图，包括终端选择 $R_D=(ds_1 \rightarrow ds_2 \rightarrow \dots \rightarrow ds_r)$ 和链路选择 $R_P=(P_{(d_i, d_{i+1})} | i=1, 2, \dots, r-1)$ 。

建立以协同方案评价指标为目标函数的数学模型来解决该问题。为了使用户感知到的干扰最小，保障用户体验，建立指标函数来评价中断干扰对用户的影响，下面给出评价函数的相关计算。

协同方案的不可靠性引起泛在业务的中断。用中断时间所占的比例 C 作为泛在业务持续性指标，如式(1)所示。 C 越小表示协同方案不容易发生中断，持续性越好。

$$C = \sum_{j=1}^{n-1} \frac{\Delta t_j}{T} \quad (1)$$

假设 $R(t_j)$ 是 t_j 时刻的协同方案， $R(t_{j+1})$ 是 t_{j+1} 时刻的协同方案， Δt_j 为中断时间，即从方案 $R(t_j)$ 切换到方案 $R(t_{j+1})$ 花费的恢复时间。在协同维护过程中， Δt_j 是动态的，由于网络拓扑的不确定性等，中断时间很难计算，此过程对用户的干扰很大程度上依赖于终端和链路两方面，可从这两方面来定量计算 Δt_j 。

用 $N^D(\Delta t_j \rightarrow \Delta t_{j+1})$ 表示从方案 $R(t_j)$ 切换到方案 $R(t_{j+1})$ 的替代终端数如式(2)所示。

$$N^D(\Delta t_j \rightarrow \Delta t_{j+1}) = r - |R(t_{j+1}) \cap R(t_j)| \quad (2)$$

其中， r 是子业务数目， $|R(t_{j+1}) \cap R(t_j)|$ 是 2 个集合中的相同节点数目。同样，假设 $P(t_j)$ 是 t_j 时刻的路径， $P(t_{j+1})$ 是 t_{j+1} 时刻的路径，用 $N^P(\Delta t_j \rightarrow \Delta t_{j+1})$ 表示从路径 $P(t_j)$ 切换到路径 $P(t_{j+1})$ 的替代链接数

$$N^P(\Delta t_j \rightarrow \Delta t_{j+1}) = |P(t_{j+1})| - |P(t_{j+1}) \cap P(t_j)| \quad (3)$$

基于以上预测，结合终端和链路的性质，重新定义评价指标。从方案 $R(t_j)$ 切换到方案 $R(t_{j+1})$ 花费的恢复时间 Δt_j 定义如下

$$\begin{aligned} & \rho \sum_{k=1}^{N_D(\Delta t_j \rightarrow \Delta t_{j+1})} Id_k + \delta \sum_{k=1}^{N_P(\Delta t_j \rightarrow \Delta t_{j+1})} \varepsilon \\ \text{s.t. } & \rho + \delta = 1 \quad \rho, \delta \in (0, 1) \end{aligned} \quad (4)$$

其中， ρ 和 δ 是常数，表示终端和链路因素各自所占比重。 Id_k 为终端干扰效益， ε 为链路稳定性。

2.3 MDCMM 问题阐述

基于上述评价指标的定义，下面将描述 MDCMM 问题。根据 2.1 节中离散时间 (t_1, t_2, \dots) 的描述，定义多终端协同维护为一系列协同方案： $R=(R(t_1), R(t_1), \dots, R(t_n))$ ，其中， $0=t_1 < t_2 < \dots < t_n < T$ 。 R 包括最初的协同方案 $R(t_1)$ 和所有的维护方案 $R(t_j) \rightarrow R(t_{j+1})$, $j=1, \dots, n-1$ 。

在网络 $G_M(t_j)$ 中，当且仅当协同方案 $R(t_j)$ 中所有的链路都存在的情况下， $R(t_j)$ 是可行的。进而当且仅当每个协同方案 $R(t_j)$ 在时间段 $[t_j, t_{j+1})$ 内是可行的情况下， R 是可行的。在 $G_M(t)$ 中，定义所有的可行协同方案集合为 $S(G_N)$ 。每个可行的 R 对应一个指标为

$$C(R) = \frac{1}{T} \sum_{j=1}^{n-1} (\rho \sum_{k=1}^{N^D} Id_k + \delta \sum_{k=1}^{N^P} \varepsilon) \quad (5)$$

MDCMM 问题的目标：在集合中 $S(G_N)$ 寻找可行的最优决策 R ，使指标 $C(R)$ 最小化，最终抽象出目标函数(见式(6))，用来评价最佳协同方案。

$$\begin{aligned} \text{MDCMM: } & \min C(R) \\ \text{s.t. } & R \in S(G_N) \end{aligned} \quad (6)$$

3 MDCMM 优化算法

3.1 动态规划算法

由以上阐述可知，MDCMM 问题可表示为多阶段决策最优化问题。为了对 MDCMM 问题进行优化求解，接下来，将分析网络拓扑已知情况下的动态规划算法，以及网络拓扑未知情况下的预测计算。

在网络拓扑已知的情况下， $G_M(t_j)$ 是确定的，MDCMM 是一个动态规划问题。用 $f(R(t_j))$ 表示 t_j 时间段，使用业务组合方案 $R(t_j)$ 情况下的最小代价

$$f(R(t_j)) = \min_{R \in S(G_N)} \frac{1}{T} \sum_{k=j}^{n-1} \Delta t_k \quad (7)$$

其中， $f(R(t_1)) = \min_{R \in S(G_N)} C(R)$ ，给出了最优初始协同方案 $R(t_1)$ 。基于动态规划有

$$f(R(t_j)) = \min_{R(t_{j+1})} \left\{ \frac{\Delta t_j}{T} + f(R(t_{j+1})) \right\} \quad (8)$$

式(8)描述了从 $R(t_j)$ 切换到 $R(t_{j+1})$ 的最优维护方

案，第一部分表示从失败的方案 $R(t_j)$ 到新的方案 $R(t_{j+1})$ 的评价指标，第二部分刻画了新方案的持续性。可采用自底向上的计算方法，逐步构造满足最小维护代价的方案。

在泛在末梢环境中，由于节点移动性造成网络拓扑不确定性。而 t_{i+1} 时刻的维护决策需要知道该中断时刻后的网络拓扑来计算 $f(R(t_{j+1}))$ 。所以接下来，将结合可靠性预测来解决该问题。

3.2 可靠性预测

给出终端干扰。在计算终端干扰效益之前，根据子业务对终端各项属性的要求来确定子业务的容忍干扰效益，作为选择终端的限定条件。

1) 容忍干扰效益 IS_i 。泛在业务具有个性化的资源需求，当终端因为能力受限产生干扰时，子业务 S_i 所能容忍的极限值如式(9)所示，对能量 ES_i 、带宽 BS_i 、执行时间 TS_i 进行归一化处理。

$$IS_i = \alpha \frac{\min(E)}{ES_i} + \beta \frac{BS_i}{\max(B)} + \gamma \frac{TS_i}{\max(T)},$$

$$\text{s.t. } \alpha + \beta + \gamma = 1 \quad \alpha, \beta, \gamma \in (0, 1) \quad (9)$$

其中，能量最小值 $\min(E)$ ，带宽最大值 $\max(B)$ ，服务时间最大值 $\max(T)$ 是子业务所能容忍的各项能力极限值。 α 、 β 和 γ 为相应的权值系数，表示不同的泛在业务对终端自身能力的偏重。如多媒体业务对实时性的要求比较高，因此强调干扰因素执行时间，文件下载业务则更偏重干扰因素带宽，这些偏重决定了 α 、 β 和 γ 的取值。

2) 终端干扰效益 Id_k 。结合受限的终端能力对业务执行产生的干扰效益进行计算，如式(10)所示，对终端 d_k 的属性能量 Ed_k 、网络带宽 Bd_k 、执行时间 Td_k 进行归一化处理。

$$Id_k = \alpha \frac{\min(E')}{Ed_k} + \beta \frac{Bd_k}{\max(B')} + \gamma \frac{Td_k}{\max(T')},$$

$$\text{s.t. } \begin{cases} Ed_k > ES_i, Bd_k < BS_i, Td_k < TS_i \\ \sum_{k=1}^{r-1} Id_k < \sum_{k=1}^{r-1} IS_i \end{cases} \quad (10)$$

其中，能量最小值 $\min(E')$ ，物理带宽最大值 $\max(B')$ ，服务时间最大值 $\max(T')$ 是终端的各项能力极限值。只有当终端的各项能力满足子业务的容忍值，并且终端干扰效益小于容忍干扰效益时，终端才可选。

结合终端属性，采用预测的方法计算链路不稳定性。

3) 预估链路稳定性 LS 。链路持续时间 TP 越长，说明路径失败频率越小，网络路径越稳定。将链路持续时间与其下限的比值作为链路稳定性 LS 测度为

$$LS_{d_i \rightarrow d_{i+1}} = \frac{TP_{d_i \rightarrow d_{i+1}}}{TP_{\text{limit}}} = \frac{vTP_{d_i \rightarrow d_{i+1}}}{2r} \quad (11)$$

通过获取网络中任意时刻的终端接收信号强度，估计链路持续时间 $TP_{d_i \rightarrow d_{i+1}}$ 来表征链路可靠性。 TP_{limit} 表示链路持续时间下限。其中 r 表示网络中终端的通信半径，在初始化时设置， v 表示终端间的相对移动速度，可由计算得出^[7]。

4) 链路失败频率。终端间链路稳定性的倒数。

$$\varepsilon(P_{(d_i, d_{i+1})}) = \frac{1}{LS_{d_i \rightarrow d_{i+1}}} \quad (12)$$

求解过程实际上就是计算所有状态值的过程。根据式(4)，第一部分的计算要枚举网络中的所有能组成协同路径的可用终端，为了在网络规模较大的情况下减少计算量，优先选择具有较高可靠性的终端。在计算终端干扰效益之前，根据子业务对终端各项属性的要求来确定子业务的容忍干扰效益，作为选择终端的限定条件。针对网络 G_N 中，未来时刻的变化无法获悉的情况，按式(11)和式(12)，采用预测的方法预估链路不稳定性，选取与最优子结构最接近的方案。

3.3 MDCMM 流程及说明

以一个泛在业务为例介绍维护机制的工作流程，如图2所示。

1) 初始化部署

用户发起泛在业务 U 请求时，初始化业务模型 $G_S=(S, E, IS)$ 和网络模型 $G_N=(D, L, I, TP)$ ，构造4个数据集 SS 、 DS 、 ADS 和 ODS 。 SS 是泛在业务集合，包括 U 的终端协同信息， S_i 的容忍干扰 DS_i 、 BS_i 、 TS_i 。 DS 是终端集合，包括各个终端 d_k 所能提供的业务 S_k 及其干扰能力。 ADS 是可用协同方案，包括执行每个子业务的终端及其信息，初始时刻为 NULL。 ODS 是最终协同执行方案，包括执行每个子业务的终端及其信息，初始时刻为 NULL，如图3所示。

此外，还要确定质量需求和网络中终端各项能力的极限值。不同的泛在业务，对业务质量有不同的需求，由此需要确定 α 、 β 和 γ 。用户对终端自身的质量和路径的质量有不同需求，由此确定 δ 和 ρ 。

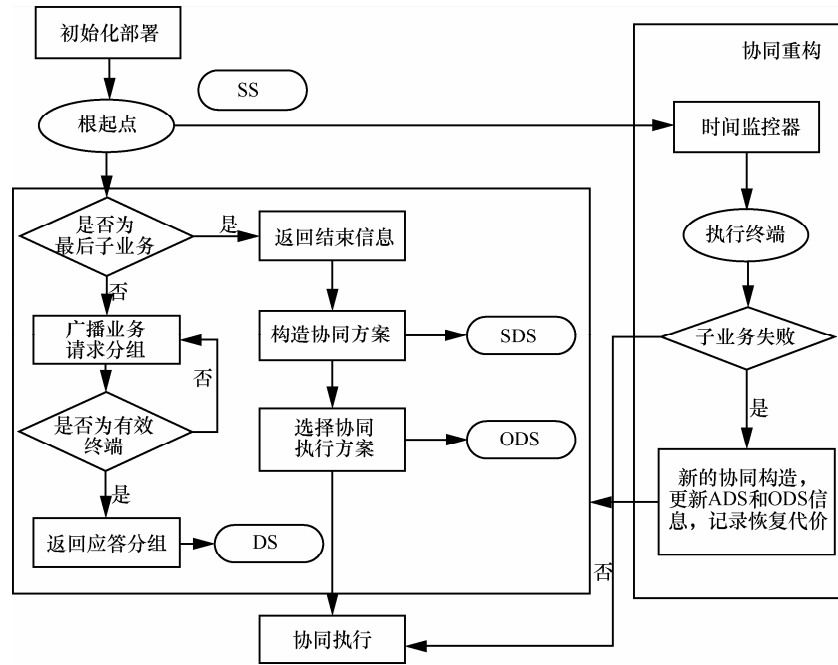


图 2 维护机制工作流程

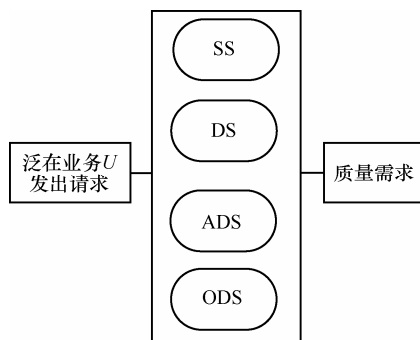


图 3 初始部署

2) 协同构造

包括协同发现、协同选择、协同执行 3 个阶段。协同发现是对复杂的泛在业务请求做出响应，构造子业务协同方案，此阶段得到一个可用协同方案集合 ADS；协同选择是从协同发现阶段的协同方案集合 ADS 中，进行终端选择和网络路径选择，即为每个子业务选择执行终端以及 2 个子业务相邻的执行终端间的链路，构造满足需求的协同执行方案；协同执行即子业务的协同执行过程。具体分为以下几个步骤。

①根起点 d_1 产生源数据流，将初始化协同关系信息封入数据分组内，在网络中进行广播，寻找能提供子业务的终端。

②终端 d_k 接收到请求分组以后，如果该终端能提供终端协同关系中相应的子业务，且满足 $E_k > ES_i$, $B_k < BS_i$, $T_k < TS_i$ ，则发送应答信息给 d_1 ；如果不能提

供则转发该广播信息。

③每个终端 d_k 估计其与各邻居终端的链路稳定性 $LS_{d_i \rightarrow d_{i+1}}$ ，也将这个信息发送给 d_1 ，形成 ADS 信息集合。最终根起点 d_1 计算 $f(R(t_1))$ ，从而确定使其最小的各个子业务的执行终端，存入 ODS 中。同时，根起点 d_1 产生监控分组。

④选择网络路径：根据集合 ODS 中的协同信息，依据 IP 层建立起通信路径。借用按需路由协议 (AODV, ad hoc on-demand distance vector routing) 里的 Hello 分组进行消息广播，综合考虑链路稳定性，选择稳定链路建立端到端路径。

3) 协同重构

①根据根起点 d_1 产生的监控分组，获得执行终端的质量和泛在业务完成情况。

②若发现发生业务失败时，进入到协同重构阶段。从上次决策过程得到的集合 ADS 中，选择最优协同方案，存入 ODS 中。

③如果不存在协同方案则重新发起业务请求，进行一次新的协同构造，计算恢复代价，选择使式 (8) 最小的协同方案 $R(t_{j+1})$ 。确定各个子业务的执行终端，更新 ADS 和 ODS 信息，为下一时刻的维护过程做准备。

4 仿真实验

本文提出的多终端协同维护机制，提高协同方案可靠性的角度保持泛在业务执行的持续性，降低

干扰对用户的影响。为验证本文提出机制的有效性,设计并搭建了实验环境,并对结果进行了比较和分析。

4.1 仿真设置

1) 网络设置。基于现有的面向业务的多终端协同选择框架^[12],以 OPNET 为仿真平台模拟 MANET 组成的泛在末梢环境。在大小为 1 000 m×1 000 m 的网络中,随机分布 30 个移动终端,以支持泛在业务的提供。

为了使网络中的终端更好地提供 MDCMM 中的泛在业务,设置了 3 种属性。①终端移动性:每个终端均使用 manet_station 的移动模型,均具有接收和转发数据分组的功能,终端遵循随机移动模型,以向量路径(VECTOR)方式移动,最大速度默认为 10 m/s。②终端能力:每个终端均能提供电池能量(E)、带宽(B)、服务时间(T)3 种属性。③链路状况:考虑 2 个终端之间存在通信时,链路的稳定性,参数在表 1 中给出。

2) 业务设置。在网络中设置具有由 5 个子业务按照串行顺序组合而成的协同关系的泛在业务请求。每个子业务对应的可用终端数目默认为 3。终端 1a 提供业务 S_1 ,源业务流的到达时间间隔服从指数分布(CBR),使用恒定比特率 CBR 流来模拟数据流量,数据分组长度为 512 bit,数据分组间隔为 1 packet/s。参数的具体说明如表 1 所示。

表 1 泛在环境参数设置

环境参数	设置值
节点数目	30
路由协议	AODV
环境范围	1 000 m×1 000 m
发射功率	0.03 w
流量生成/(packet·s ⁻¹)	CBR 1
最大速度/(m·s ⁻¹)	5,10,15
移动模型	random waypoint model
子业务个数	5
最大可用终端数	1, 2, 3, 4, 5 默认为 3
权值	$\alpha, \beta, \gamma, \rho$ 和 δ 分别设为 $\frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2}$
仿真时间/s	2 000

4.2 实验指标

在仿真过程中,首先从可用终端数和移动速度对目标函数进行影响因子分析;其次为了评价 MDCMM 机制的性能,在多终端协同执行过程中,从切换代价和用户体验方面进行了评价,设置实验

指标如下。

1) 目标函数。是子过程切换代价之和 $C(R)$,表示在发生中断的情况下整体业务质量的优劣。目标函数的值越低,业务可靠性和持续性越好。用于对 MDCMM 机制的分析和比较。

2) 业务平滑性。用 2 个指数来表示业务平滑性,评价用户体验。

一是各个子过程中干扰指数 CI ,根据持续性指标计算(见式(13)), CI 浮动越小,说明相邻子过程的切换具有越平滑的波动,用户体验越好。用于对 MDCMM 机制的分析。

$$CI = \frac{c(R(t_j))}{\sum_{j=1}^n c(R(t_j))} \quad (13)$$

二是各个子过程中目标函数的方差 CS (见式(14))。该值越小,说明维护越稳定,用户体验越好。用于对不同机制进行比较。

$$CS = \frac{\sum_{j=1}^n c(R(t_j)) - \overline{c(R(t_j))}^2}{n-1} \quad (14)$$

3) 预测效益

$$PU = 1 - \frac{|c(R(t_j))_{\text{opt}} - c(R(t_j))|}{c(R(t_j))_{\text{opt}}} \quad (15)$$

PU 表示采用 3.2 节的预测方法后的解决方案和 MDCMM 的最佳解决方案之间的不同。其中, $C(R(t_j))_{\text{opt}}$ 表示从方案 $R(t_j)$ 到方案 $R(t_{i+1})$ 理想的最优化切换代价。

分别对 MDCMM、MDSCR^[10] 和 MPCMM 3 种不同的机制在相同参数设置的场景中进行实验,说明 MDCMM 的优越性。其中 MDSCR 是基于预测的维护机制,选择具有最长预估链路持续时间的终端协同方案;MPCMM 是基于 ad hoc 最短路径路由算法的维护机制,以跳数作为选择标准。实验是比较不同机制对用户的干扰。

4.3 结果分析

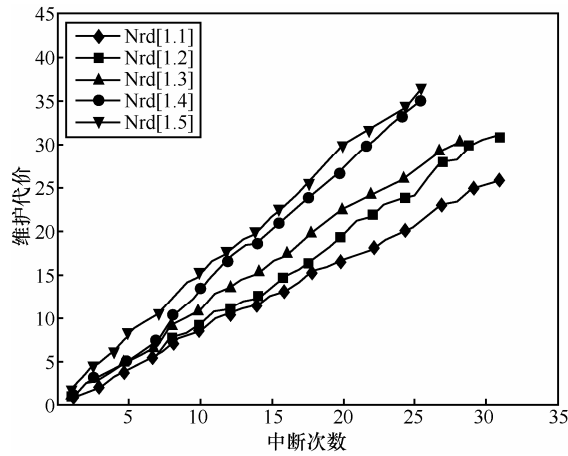
通过以上环境设置,在 OPNET 中进行仿真。将得到的评价指标数据输出到 MATLABR2013a 中,进行比较分析。

1) 目标函数影响因子

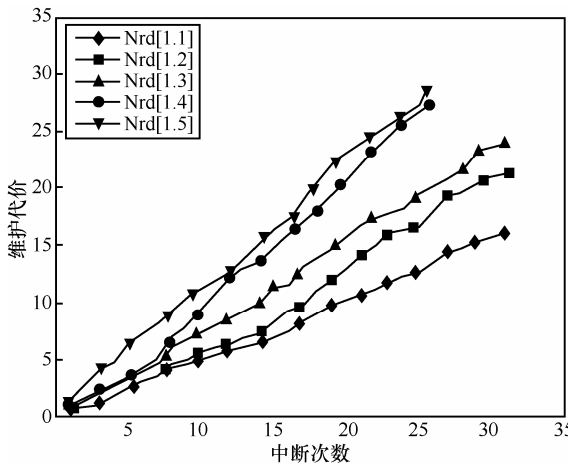
如图 4 所示,设置横坐标为中断次数 n ,纵坐标为评价函数。移动终端的最大速度设置为 5 m/s、10 m/s、15 m/s;网络中的最大可用终端数分别设置为 1~5。

由图可知,评价函数是随中断次数 n 而增加的。

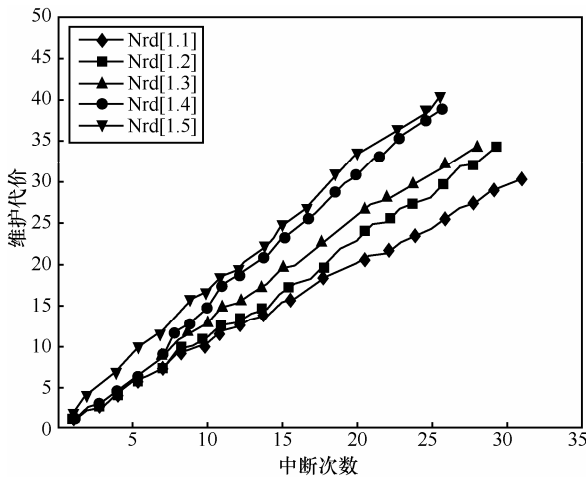
横行对比图，在最大可用终端数固定的情况下，终端移动速度会对评价函数造成影响。在具有较高动态性的 MANET 中，失败率增加，评价函数数值较大，说明维护花费更高。



(a) 最大速度为 10 m/s



(b) 最大速度为 5 m/s



(c) 最大速度为 15 m/s

图 4 目标函数影响因素分析

纵向对比，在网络动态性固定的情况下，分析可用终端数的影响。以图 4(b)为例，终端最大速度为 10 m/s，可用终端数不同，目标函数的曲线发生变化。如果每个子业务具有较多的可用终端，在协同构造过程中，对可用终端的搜索和计算将会更复杂，并且由于不可靠终端增加，因此评价函数更高。可用终端数目为 4 和 5 时，曲线差别不大。另外，可用终端数的影响在中断次数较多时表现得尤其明显。

2) 不同机制目标函数的比较

为了对 MDCMM、MDSCR 和 MPCMM 机制进行比较，在相同的环境和终端参数设置下进行仿真，每次仿真时间为 2 000 s。

图 5 给出了在终端移动速度最大值为 5 m/s、10 m/s、15 m/s 时，3 种机制产生目标函数的比较，可以看出 MDCMM 具有较低数值的目标函数，并且，随着移动速度最大值增加，不同机制之间目标函数的差值也拉大了。因为 MDCMM 优先选择具有较小干扰能力，并且可以稳定执行业务的终端和路径，保证业务执行。而 MDSCR 和 MPCMM 均没有考虑终端干扰给 QoS 带来的不可靠性，前者选择的协同方案具有最长持续时间，后者选择的协同方案具有最少跳数。在这些协同方案中，执行终端可能会因为电量不足，带宽超出等受限的自身能力等，对业务维护产生干扰，不能给用户很好的 QoS 体验。

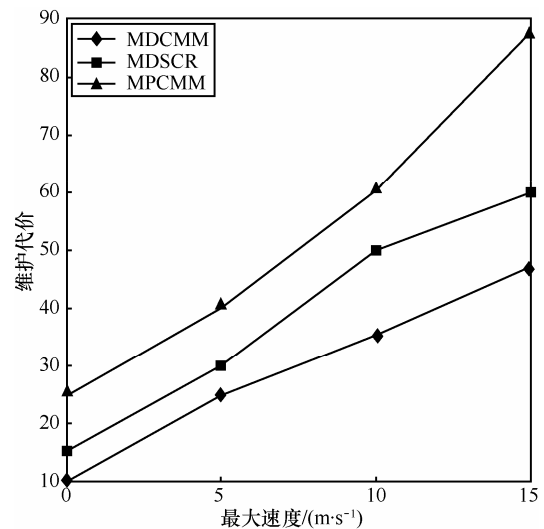


图 5 不同机制目标函数比较

3) MDCMM 平滑性

延长仿真时间，移动终端的最大速度设置为 5 m/s、10 m/s、15 m/s，其他参数取默认值，在 OPNET 中设置随机种子进行多次实验。取前 5 次多终端协

同维护过程，比较泛在业务干扰指数 CI 变化幅度。

依据各子过程的维护代价来计算泛在业务干扰指数 CI ，由图 6 可知，业务的 CI 指数抖动较小且变化平缓。整体看，移动终端的最大速度越小，干扰指数 CI 越大，变化幅度在取值范围内较小，平滑性较好。

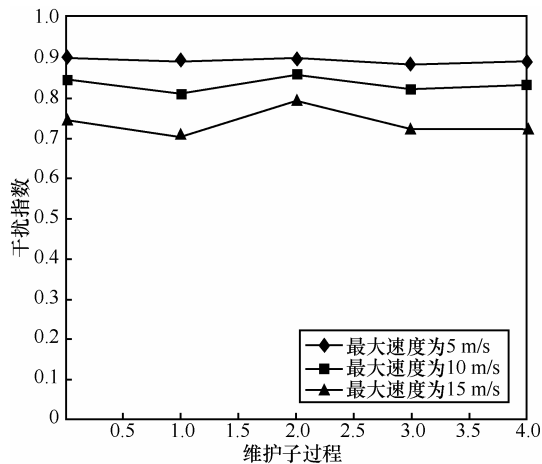


图 6 MDCMM 平滑性

4) 不同机制平滑性比较

设置默认可用终端数目，改变终端移动速度最大值为 5 m/s、10 m/s、15 m/s，分别计算 3 种机制的平滑测度。

如图 7 所示，可以看出 MDCMM 和 MDSCR 的目标函数方差明显低于 MPCMM，因为 MDCMM 和 MDSCR 均采用具有最优子结构的算法，选取维护代价最小的协同方案。而相比 MDSCR，MDCMM 使协同方案的维护更稳定。

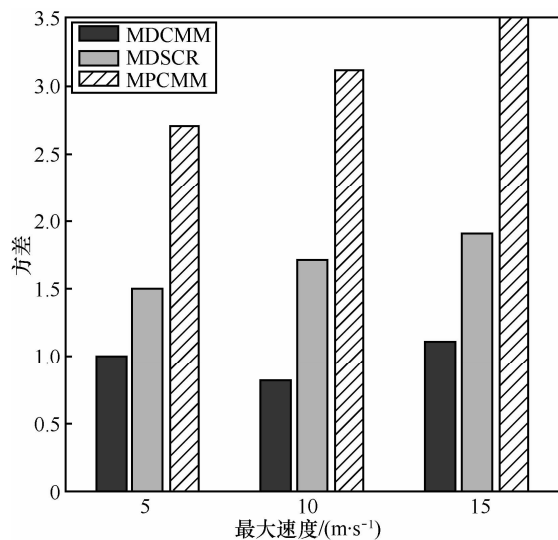


图 7 不同机制平滑性比较

5) 不同机制预测效益比较

从图 8 中可看出，与 MDSCR 和 MPCMM 相比，MDCMM 的预测效益更接近 1。MDCMM 是 0.9~1.0，MDSCR 是 0.80~0.95，MPCMM 是 0.70~0.97。

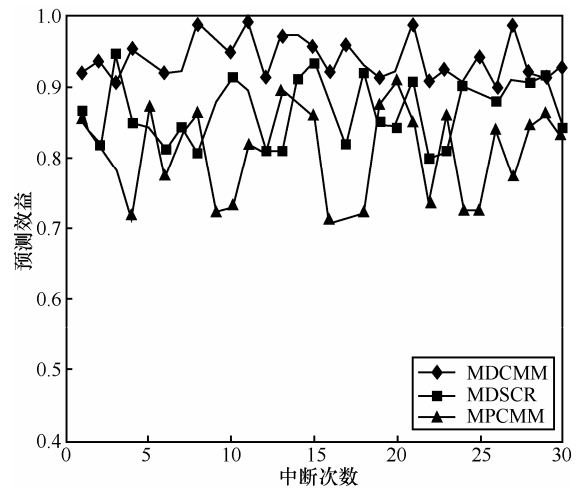


图 8 不同机制预测效益比较

5 结束语

协同维护是泛在网络中的一个重要问题。是泛在网络中，终端的类型得到了扩展，能更好地为用户提供服务。但是由于终端本身的能力受限，以及网络的动态特性，泛在业务会发生中断，从而影响用户体验。

本文提出了维护机制 MDCMM，用维护评价指标将协同构造和协同中断恢复 2 个过程综合起来，采用了动态规划优化策略。实验表明 MDCMM 能减少泛在业务执行时间内中断对用户的干扰，保障用户体验。接下来的工作将在构建协同方案的时候，考虑终端协同需求，如相邻子业务之间的协同意愿、协同时间、协同资源分配等，进一步提升用户体验。

参考文献：

- [1] BRONSTED J, AARHUS U, AARHUS D. Service composition Issues in pervasive computing[J]. IEEE Pervasive Computing, 2010, 9(1): 62-20.
- [2] VASKAR R, CAO J N, WU W G. Reliable service discovery in MANET[J]. Pervasive and Mobile Computing, 2011,7(1):140-158.
- [3] LIU C, CAO J, LE M F. A low-latency service composition approach in mobile ad hoc networks[A]. The 29th Annual ACM Symposium on Applied Computing (SAC'2014)[C]. Korea, 2014.
- [4] JIN L, LI L Y, ZHU X Y. A multi-constraint QoS routing protocol with route-request selection based on mobile predicting in MANET[A]. International Conference on Computational Intelligence and Security Workshops(CIS)[C]. Harbin, China, 2007.342-345.
- [5] CHOUDHURY P. Mobility aware distributed service composition framework in SOA based MANET application[A].The 10th IEEE In-

ternational Conference on Industrial Informatics (INDIN)[C]. 2012. 1016-1021.

[6] WANG J P. Exploiting mobility prediction for dependable service composition in wireless mobile ad hoc networks[J]. IEEE Transactions on Services Computing, 2011, 4(1):44-55.

[7] 吴大鹏, 武穆清. 面向链路稳定性的 MANET 路径建立机制[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(9): 2226-2231.
WU D P, WU M Q. Reliable routing mechanism in MANET towards link stability[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2009, 31(9): 2226-2231.

[8] HADI N, QIANG N, MING Y. A new link lifetime prediction method for greedy and contention-based routing in mobile ad hoc networks[A]. The 10th IEEE International Conference on Computer and Information Technology (CIT 2010)[C]. 2010.2662-2667.

[9] WANG X M, WANG J P, ZENG Z Y. Service composition in service-oriented wireless sensor networks with persistent queries[A]. IEEE Communications Society[C]. Washington, D C, USA, 2009.1-5.

[10] JIANG S S, XUE Y, SCHMIDT D C. Minimum disruption service composition and recovery in mobile ad hoc networks[J]. Computer Networks, 2009, 53(10):1649-1665.

[11] XIAO L, NAHRSTEDT K. Minimum user-perceived interference routing in service composition[A]. Proc of IEEE INFOCDM[C]. 2006.

[12] 郭少勇, 芮兰兰. 面向业务的多终端动态协同构造机制[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(7):2226-2231.
GUO S Y, RUI L L. Service-oriented multi-devices dynamic cooperation mechanism[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2012, 34(7):2226-2231.



芮兰兰 (1979-), 女, 安徽潜山人, 博士, 北京邮电大学副教授, 主要研究方向为网络和业务质量管理、泛在网络、大数据等。



郭少勇 (1985-), 男, 河北隆尧人, 北京交通大学博士后, 主要研究方向为网络管理、泛在末梢网等。



邱雪松 (1973-), 男, 江西上饶人, 博士, 北京邮电大学教授、博士生导师, 主要研究方向为网络管理和通信软件等。

作者简介:



张洁 (1990-), 女, 河南开封人, 北京邮电大学硕士生, 主要研究方向为网络管理等。



丁一凡 (1991-), 女, 湖南株洲人, 北京邮电大学硕士生, 主要研究方向为 QoE 等。