

移动自组织认知网络中的路由选择与信道分配方法

刘 萍^{1,2} 袁培燕¹

(河南师范大学计算机与信息工程学院 新乡 453007)¹ (武汉理工大学信息工程学院 武汉 430070)²

摘 要 针对移动自组织认知网络中路由不稳定的问题,提出了一种路由选择与信道分配方法。首先,设计数据传输花费度量,兼顾路由稳健性和信道干扰;其次,依据认知节点的位置和速度信息计算链路剩余时间,预测路由稳健性;再次,针对不同的信道干扰模式实施信道分配,规避主节点干扰;最后,通过路由发现和路由确认步骤,选择最佳链路。仿真实验表明,与经典的AODV方法相比,所提方法丢包率低、传输时延小。

关键词 移动自组织认知网络,路由选择,信道分配,认知节点,主节点,最佳链路

中图分类号 TP393 文献标识码 A DOI 10.11896/j.issn.1002-137X.2017.03.031

Routing Selection and Channel Assignment Method for Mobile Ad Hoc Cognitive Network

LIU Ping^{1,2} YUAN Pei-yan¹

(College of Computer and Information Engineering, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China)¹

(School of Information Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)²

Abstract In order to solve the routing instability problem in mobile ad hoc cognitive network, a method of routing selection and channel assignment was proposed. First, it develops a data transfer costs measure, taking into account both routing stability and channel interference. Then, the remanding time of a link is calculated according to the position and velocity information of cognitive nodes, and the stability of routing is predicted. And then interference of primary nodes is avoided, through assigning channels according to different channel interference patterns. Finally, the best link is selected through two steps including route discovery and route confirmation. Simulation results show that, by comparing with the classical AODV method, the new method has lower packet loss rate and smaller transmission delay.

Keywords Mobile ad hoc cognitive networks, Routing selection, Channel assignment, Cognitive nodes, Primary nodes, Best link

为高效、机动地应对抗震救灾、军事侦察、围堵逃犯等紧急任务,常需要快速部署和充分使用移动设备,这些移动设备之间的通信需要采用独立和可重复使用的自组织网络。移动自组织网络(Mobile Ad Hoc Network)是一种不需要固定基础设施的无线自组织网络,网内的各个节点可以随意移动,组网灵活、方便,且可重复使用,在军事、民用领域应用得非常广泛^[1-3]。

移动自组网需要移动节点相连接,网络中的节点负责发现路由和传递消息,各节点之间可以通过无线方式进行通信。节点的快速移动使得网络拓扑结构也可能快速变化且不可预知。移动自组织网络可以是小型网络,也可以是大型网络,应用多种多样,因此路由协议的设计是一个关键问题。由于无线介质的性质(如电波传播路径损耗、多用户干扰、带宽限制等)对网络性能的影响很大,常用的分散式静态路由协议难以直接应用于移动自组织网络^[4-5]。为减小这些因素的影响,网络应该能自适应更改路由路径。因此,移动自组织网络的一个基础问题是在任意两个移动节点之间选择最优路径。考虑

到实际应用过程中经常遇到频谱稀缺的问题(如抗震救灾现场),可以在移动自组织网络中引入认知无线电(Cognitive Radio)。认知无线电能够感知无线环境和自适应选择传输参数,提高认知无线电的系统性能并避免主用户受到干扰,同时允许认知用户(如未注册的用户)将空置的频谱操作分配给主用户,克服现有不灵活的频谱分配策略引起的频谱短缺问题^[6]。包含认知无线电的移动自组织网络称为移动自组织认知网络(Mobile Ad Hoc Cognitive Networks),它采用动态频谱接入的方式部分地解决了频谱稀缺的问题,成为了无线自组织网络(Wireless Ad Hoc Networks)领域的研究热点^[7-8]。在移动自组织认知网络中,装备认知无线点的节点称为认知节点(Cognitive Nodes, CNs),这些节点可以智能检测未使用的频谱,然后将其授权给移动自组织网络中的主节点(Primary Nodes, PNs)。而主节点对频谱利用拥有更高的优先级,当主节点激活后,认知节点会立即撤离信道^[9]。然而,与传统的移动自组织网络相比,移动自组织认知网络的路由更不稳定,因为任意一对认知节点的连通性不仅与它们之间的相对运动

来稿日期:2015-12-18 返修日期:2016-02-29 本文受国家自然科学基金(U1404602),河南省高等学校重点科研项目(15A520079),河南省教育厅2015年度教师教育课程改革研究项目(2015-JSJYYB-016),河南师范大学2014年教育科学研究基金(5102079279301)资助。

刘 萍(1979—),女,博士生,工程师,主要研究领域为计算机应用;袁培燕(1978—),男,博士,副教授,主要研究领域为计算机应用。

有关,还与相邻的主节点和认知节点之间的潜在冲突有关。此外,在多跳多数据流的移动自组织认知网络中,由于多链路之间相互干扰,路由的稳定性更差^[10]。在这种情况下,提高路由效率显得更加重要。目前,提高路由效率的方法主要是选择最稳定路径,以减少传输时延和路由重建的开销。在移动自组织认知网络中,路由和信道分配都需要根据节点的运动综合设计和优化。而现有的路由协议或算法主要关注于节点运动和路由选择,没有兼顾信道干扰问题和合理分配信道,路由效率还有待提升^[11-13]。

本文提出了一种新的路由选择与信道分配方法。在路由选择方面,综合考虑链路剩余时间、传输带宽和信道干扰,设计一种新的路由稳健性度量(数据传输花费),其可以用于定量评价链路质量;在信道分配方面,设计了一种新颖的路由分配算法,其可以完全避免主节点受干扰,同时减少数据流内和数据流间的干扰。通过综合设计路由选择与信道分配策略,实现了稳健路由的创建,提高了路由效率。

1 相关模型

1.1 移动自组织认知网络模型

常用的移动自组织认知网络模型是一个无方向的图模型^[14],记为 $G(V, E)$ 。其中,图的顶点 V 是认知节点集(记为 V_C)与主节点集(记为 V_P)的并集,即 $V = V_C \cup V_P$ 。其中,认知节点和主节点的数量分别为 N 和 M ,也即 $\|V_C\| = N$, $\|V_P\| = M$,且 M 远小于 N 。类似地,图模型的边 E 是认知节点上的链路集 E_C 和主节点上的链路集 E_P 的并集,即 $E = E_C \cup E_P$ 。

假设任一主节点与任一认知节点都不连通,当所有 $v \in V_P$ 静止时,任意 $u \in V_C$ 依据随机路标(Random Waypoint, RWP)模型^[15]进行移动。每一个 $u \in V_C$ 装配一台认知无线电(常用GPS设备)。进一步地,假设图的度大于2,不同的认知节点拥有不同的可变信道,当每一个主节点仅保持一个注册信道时,可变信道可随着时间和位置变化。简单地讲,按照相同的固定间隔,将连续的时间划分为一系列离散的时间槽。在任意时间槽 t 上,第 u 个认知节点的可变信号可以定义为 $C_u(t) = \{c_i^u | i=1, 2, \dots, c_u(t)\}$,两个认知节点对 (u, v) 只能在一个通用信道上进行通信,该通用信道定义为 $c_{u,v}(t) \in C_{u,v}(t) = C_u(t) \cap C_v(t)$ 。

不失一般性,假设主节点和认知节点采用相同的传输功率,从而每一个信道拥有相同的传输距离(记为 R_T)和干扰范围(记为 R_I)。对于 V_C 上任意一对节点 (u, v) ,采用 $d_{u,v}(t)$ 来表示 u 和 v 在同一个时间槽 t 上的欧氏距离,即 $d_{u,v}(t) = \|u - v\|$ 。记 $\|C_{u,v}(t)\|$ 表示 $C_{u,v}(t)$ 中信道的总数,当 $\|C_{u,v}(t)\| \geq 1$ 且 $d_{u,v}(t) \leq R_T$ 时,链接可用。这种情况下,认知节点和主节点可以相互通信。

1.2 信道干扰模型

为避免数据流间的干扰,在相同的数据流上仅需要为每一个链路分配一个不同于相邻的两跳网络的信道。但是,就数据流内干扰而言,许多链路是相互干扰的。通常,数据流内干扰可以分为以下4种干扰模式。

1)节点-链路干扰:当一个节点在传输时,邻近的两个链

路存在数据流内干扰。

2)节点-节点干扰:如果不同数据流上只有两个链路,两者会相互干扰。

3)链路-链路干扰:在不同的数据流上,两个中间节点相互干扰。

4)交叉流干扰:当两个数据流在一个中间节点处交叉时,会产生交叉流干扰。

2 路由选择与信道分配

2.1 数据传输花费度量

移动自组织网络中的数据传输可能被两个因素中断:节点移动和信道干扰。后者主要由两个因素产生:1)主节点通信出现;2)认知节点间的共同信道干扰。本文采用一种新的度量准则来描述这两个因素,称之为数据传输花费(Data Transfer Costs, C_d),表示为:

$$C_d(l_{u,v}) = \alpha C_M^{u,v} + \beta C_I^{u,v} \quad (1)$$

其中, $C_M^{u,v}$ 表示由节点移动引起的链路 $l_{u,v}$ 的移动花费, $C_I^{u,v}$ 表示由信道干扰引起的链路 $l_{u,v}$ 的信道干扰花费。 $C_d(l_{u,v})$ 是链路 $l_{u,v}$ 的总的数据传输花费。 α 和 β 都是加权系数,为简便起见,可以都取为1。从节点移动的角度考虑,一对节点之间的链路通信持续时间保持得越长越好。因此,链路 $l_{u,v}$ 的稳定性可以用一个链路剩余时间(记为 $T_{u,v}$)来预测,链路剩余时间越长,说明链路越稳定。

节点的移动花费与节点之间的相对运动关系密切,节点之间的相对运动越大,链路的剩余时间越短,相应地,节点的移动花费就越大。同时,对于一个特定的数据流,链路的带宽越大,传输数据所需的时间越短。于是,节点的移动花费可以定义为:

$$C_M^{u,v} = \frac{1}{T_{u,v} \times \min(w_u^c, w_v^c)} \quad (2)$$

其中, w_u^c 和 w_v^c 分别是节点 u 和 v 在信道 c 上的带宽, $\min(w_u^c, w_v^c)$ 是两者中的最小值,也即节点 u 和 v 之间的有效带宽。

信道干扰花费 $C_I^{u,v}$ 主要来自主节点和认知节点之间的信号干扰,计算公式为:

$$C_I^{u,v} = C_{I,P \rightarrow N}^{u,v} + C_{I,C \rightarrow N}^{u,v} = \sum_{1 \leq i \leq N} C_{I,C \rightarrow N_i}^{u,v} \quad (3)$$

其中, $C_{I,P \rightarrow N}^{u,v}$ 表示来自主节点的信号干扰, $C_{I,C \rightarrow N}^{u,v}$ 表示来自认知节点的信号干扰, $C_{I,C \rightarrow N_i}^{u,v}$ 表示来自第 i 个认知节点的信号干扰。

2.2 链路剩余时间计算

当链路两端的节点位置和移动速度已知时,剩余时间可以表示为:

$$T_{u,v} = \frac{d_{u,v}}{V_{u,v}} \quad (4)$$

其中, $d_{u,v}$ 表示节点 u 和 v 之间的距离, $V_{u,v}$ 表示节点 u 和 v 之间的相对速度。

对于每一个认知节点,都可以求取其与其他认知节点之间的链路剩余时间,计算方法参见算法1。

算法1 链路剩余时间计算

输入:各节点位置和速度

```

1. for( $u=0; u<N; u++$ )
2. {
3.   for( $v=u+1; v<N; v++$ )
4.   {
5.     计算  $d_{u,v}$ ;
6.     计算  $V_{u,v}$ ;
7.     计算  $T_{u,v}$ ;
8.   }
9. }

```

输出: $T_{u,v}$

由于各认知节点都装备了 GPS 设备,各认知节点总是可以采用信标机制与相邻认知节点进行通信,从而可以很容易地知道它的单跳邻居的位置和速度。据此获取节点之间的距离 $d_{u,v}$ 和相对速度 $V_{u,v}$ 。具体方法是:假设节点 u 和 v 当前分别位于位置 $(x_u(0), y_u(0))$ 和 $(x_v(0), y_v(0))$, 在一个时间段 t 后,它们分别移动到位置 $(x_u(t), y_u(t))$ 和 $(x_v(t), y_v(t))$ 。在 t 时刻,节点 u 和 v 的欧氏距离可以表示为:

$$d_{u,v}(t) = \sqrt{(x_u(t) - x_v(t))^2 + (y_u(t) - y_v(t))^2} \quad (5)$$

假设节点 u 和 v 的速度分别为 V_u 和 V_v , 则相对速度 $V_{u,v}$ 可以表示为:

$$V_{u,v} = |V_u - V_v| \quad (6)$$

很明显,链路的剩余时间越长,路由越稳健。

2.3 主节点干扰规避

假设主节点 PN_m 使用的注册信道为 c_{PN_m} , 本文的路由选择与信道分配算法(见算法 2)要求当 $d_{PN_m,v}(t) \leq R_T$ 时任何认知节点 $v \in V_c$ 都不可以使用该注册信道 c_{PN_m} 。为此,首先定位潜在的冲突集,然后有针对性地制定干扰规避策略。

(1) 潜在冲突集

潜在冲突集(记为 CS_v)用于描述哪一个主节点可能会被一个认知节点干扰。节点 v 与 u 相互通信时最长的链路剩余时间为 $T_{u,v}$, 当 $T_{u,v} < T_{PN_m,v}$ 时,链路 $l_{u,v}$ 会在 $d_{u,v}(t) \leq R_T$ 之前消失,于是 v 不会干扰 PN_m 。基于前面介绍的移动预测方法,易求出 $T_{u,v}$ 和 $T_{PN_m,v}$ 。因此,对于任一 $PN_m \in V_p$, 如果 PN_m 正在注册信道 c_{PN_m} 上通信,或者 $T_{u,v} \geq T_{PN_m,v}$, 就将其添加到潜在冲突集 CS_v 。

(2) 潜在冲突集的干扰规避

潜在冲突集中的任一 $PN_m \in CS_v$ 都可能时时使用它们的注册信道 c_{PN_m} 。 CS_v 中主节点使用的信道可以描述为 $\{c_{PN_m} \mid \forall PN_m \in CS_v\}$ 。

当尝试选择一个认知节点 v 作为下一跳时,一个基本的原则是 v 不能中断任一 $PN_m \in CS_v$ 的通信。因此,可用的信道集可以表示为:

$$CS_v^A = C_v \setminus \{c_{PN_m} \mid \forall PN_m \in CS_v\} \quad (7)$$

节点 v 只能使用可用信道集中的信道。这样,当可用信道集为空时, C_{v,PN_m}^A 为无穷大,于是链路 $l_{u,v}$ 的数据传输花费 $C_d(l_{u,v})$ 也将是无限大的,从而 v 不能作为可选路由。采用这种方式后,任一主节点都不会被选择的认知节点影响。相反,在最小化数据流内和数据流间干扰的情况下,算法 2 可以在可用信道集中分配一个信道给 v 。

算法 2 路由选择与信道分配

输入:来自前一跳的 RSP, $\forall v \in N(u, R_T)$

```

1.  $C_{dt}(u) = \infty$ ;
2. 对所有  $v \in R_T^u$ , 初始化  $v$ . visited = false;
3.  $V = R_T^u \{v \mid v \text{ visited} = \text{true}\}$ ;
4. while( $v \in V$ )
5. {
6.   if( $v \in R$ )
7.   {
8.      $V = V - u$ ;
9.   }
10. }
11. while( $V \neq \emptyset$ )
12. {
13.   按顺序取  $V$  中的元素赋予  $v$ ;
14.   计算  $C_M^{l_{u,v}}$ ;
15.   计算  $C_1^{l_{u,v}}$ ;
16.   计算  $C_{dt}(l_{u,v})$ ;
17.   if ( $C_{dt}(l_{u,v}) < C_{dt}(u)$ )
18.   {
19.      $C_{dt}(u) = C_{dt}(l_{u,v})$ ;
20.      $u = v$ ;
21.   }
22. }

```

输出: 累积 RSP

2.4 最佳链路选取

在路由建立过程中,算法 2 是在移向目标节点的每一跳上实施局部优化,总是选取可以同时解决路由稳定性和信道分配问题的最佳链路。考虑到节点的移动性,本文采用按需路由(On-demand Routing)协议,该协议采用泛洪(Flooding)方式选取路由,不需要知道网络的拓扑结构和使用任何的路由算法^[16]。但是,对于大型网络,泛洪方式产生了大量的路由信息。算法 2 充分利用了节点的地理信息,譬如 GPSR。任一节点都可以通过 GPS 设备检测自己的位置和速度。进一步地,任一节点都可以通过 MAC 硬件层的信标通信机制得到它们的单跳邻居的位置、速度及可用信道。算法 2 再对信标机制进行扩展,使得任一节点还可以获得其两跳邻居的可用和已用的信道。算法 2 选取下一跳候选节点的策略是:在以当前节点 u 为中心、 R_T 为半径的区域 R 上,采用分布式方式一跳接一跳地去发现下一跳。

源节点 s_k 和每一个中继节点共同决定下一跳,依据是数据传输花费最小。算法 2 包括两个阶段:路由发现和路由确认。初始状态设置工作节点 $u = s_k$, 当 $v = d_k$ 时搜索终止。其中, d_k 为终止节点。

(1) 路由发现

路由发现包括两个步骤:下一跳选择和消息转发。

Step1 下一跳选择

在节点 u 所在区域 R 内计算每一个相邻节点的数据传输花费,选取对应数据传输花费最小的节点 v 作为下一跳。在计算每一个候选节点的数据传输花费的过程中,基于 v 的

节点类型和干扰类型,调用前述的信道分配算法估算信道干扰花费。之后,确定下一跳节点,同时为链路 $l_{u,v}$ 分配信道 $c_{u,v}$ 。最终,发送路由选择包(Route Selection Packet, RSP),该数据包包含唯一的包ID、流ID、节点坐标和信道 $c_{u,v}$ 上的子路径 $P_{i_k}^u$ 。子路径 $P_{i_k}^u$ 是指从源节点 s_k 到工作节点 u 之间一跳接一跳累积形成的路径。

Step2 消息转发

接收到 RSP 包后,节点 v 变成了新的工作节点,用 u 替代。重复上述步骤,选择该节点的下一跳,并将更新后的 RSP 包传送给下一跳。基于这种方式,中继节点一跳接一跳地进行路由发现,直到到达终止节点 d_k 。

(2) 路由确认

在接收到 RSP 包之后,终止节点 d_k 可以获取稳定的路径 $P_{i_k}^{d_k}$ 和路径为每一个链路分配的信道。然后,它将包含 $P_{i_k}^{d_k}$ 和各分配信道的路由响应包(Routing Response Packet, RRP)通过与 $P_{i_k}^{d_k}$ 相反的路径在相同的信道上传送给源节点 s_k 。在路由确认之后,源节点 s_k 即可通过路径 $P_{i_k}^{d_k}$ 在分配的数据信道上传输数据流 f_k 。事实上,一个节点可能选择多个数据流。

3 实验仿真与分析

采用国际上通用的 NS2^[17] 仿真工具对本文提出的路由选择与信道分配算法进行仿真测试,并与经典的 AODV 路由协议^[18] 进行对比分析,以验证本文方法的性能。具体实验环境为:

- 仿真区域面积:1000m×1000m;
- 总节点数量:100个;
- 主节点数量:10个;
- 节点初始位置:随机;
- 节点初始能量:250J;
- 信道传输距离:250m;
- 节点最小移动速度:5m/s;
- 节点最大移动速度:30m/s;
- 数据流包速率:每秒发送5个;
- 仿真时长:5min。

实验仿真主要从不同速度下的包丢失率和平均时延两个方面来评价算法性能。图1显示了两种算法在不同的节点移动速度下的包丢失率的对比情况,图2显示了两种算法在不同的节点移动速度下的平均时延的对比情况。

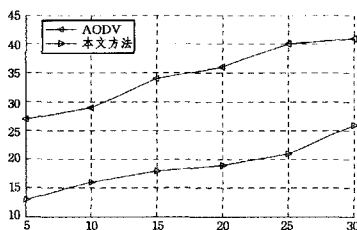


图1 包丢失率

从图1可以看出,节点移动速度越快,包丢失率越高。这

是因为节点移动速度增加后,节点之间的链路稳健性降低,这样在通信过程中链路中断的概率增大,从而引起包丢失率的升高。但是,在相同速度下,本文方法的包丢失率明显低于经典的 AODV 方法,主要原因是本文方法在路由选择时考虑了链路剩余时间和带宽,从而可以选择稳健性更好的路由进行数据通信,并在信道分配上规避了主节点干扰,从而降低了丢包率。

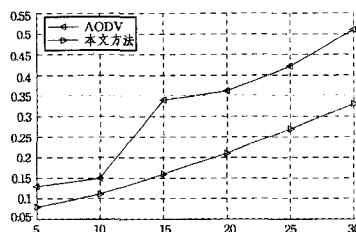


图2 平均时延

从图2可以看出,随着节点移动速度的加快,平均时延也会增大。但在节点移动速度相同的情况下,本文方法的平均时延要小于经典的 AODV 方法。这主要是由于本文方法选取的路由更加稳健,从而减少了路由断裂和修复引起的时间消耗,并最终降低了平均时延。

结束语 针对移动自组织认知网络中节点移动和信道干扰带来的路由不稳定问题,提出了一种路由选择与信道分配算法。在移动自组织认知网络和信道干扰两个模型的基础上设计了数据传输花费度量准则来定量评价路由的稳健性,结合认知节点的认知无线电设备来计算链路剩余时间,结合信道干扰模型来规避主节点干扰,设计路由选择与信道分配策略,通过逐跳运行该策略,在选择稳健路由的同时合理分配信道,规避主节点干扰并降低数据流内和数据流间干扰,降低数据传输时的包丢失率和传输时延,提高路由效率。本文方法可以嵌入到网络层和数据链路层之间使用,实用价值大。

参考文献

- [1] TSENG Y C, NI S Y, CHEN Y S, et al. The broadcast storm problem in a mobile ad hoc network[J]. Wireless Networks, 2002, 8(2/3): 153-167.
- [2] MARTI S, GIULI T J, LAI K, et al. Mitigating routing misbehavior in mobile ad hoc networks[C]//Proceedings of the 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. ACM, 2000: 255-265.
- [3] XIA H, JIA Z P, ZHANG Z Y, et al. A Link Stability Prediction-Based Multicast Routing Protocol in Mobile Ad Hoc Networks[J]. Chinese Journal of Computers, 2013, 36(5): 926-936. (in Chinese)
- [4] MANISH V M, VAJAYANTHIMALA J. Diminution of Packet Drop by Efficient Selection of Network Route in MANET[J]. International Journal of Computer Science & Information Technology, 2014, 5(2): 1852-1855.
- [5] PRIYADHARSHINI C, THAMARAIKUBINI K. Predicting

- route lifetime for maximizing network lifetime in MANET[C]// 2012 International Conference on Computing, Electronics and Electrical Technologies (ICCEET). IEEE, 2012; 792-797.
- [6] YU F R, HUANG M, TANG H. Biologically inspired consensus-based spectrum sensing in mobile ad hoc networks with cognitive radios[J]. IEEE Network the Magazine of Global Internet-working, 2010, 24(3): 26-30.
- [7] YU F R, TANG H, HUANG M, et al. Distributed Cooperative Spectrum Sensing in Mobile Ad Hoc Networks with Cognitive Radios[J]. Mathematics, 2011, 24(3): 26-30.
- [8] GUAN Q, YU F R, JIANG S, et al. Prediction-Based Topology Control and Routing in Cognitive Radio Mobile Ad Hoc Networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, 59(9): 4443-4452.
- [9] CHOWDHURY K R, FELICE M D, AKYILDIZ I F. TP-CRAHN: a Transport Protocol for Cognitive Radio Ad-Hoc Networks[C]// INFOCOM 2009. IEEE, 2009; 2482-2490.
- [10] SI P, JI H, YU F R, et al. Optimal Cooperative Internetwork Spectrum Sharing for Cognitive Radio Systems With Spectrum Pooling[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, 59(4): 1760-1768.
- [11] AKYILDIZ I F, LEE W Y, CHOWDHURY K R. CRAHNs: Cognitive radio ad hoc networks[J]. Ad Hoc Networks, 2009, 7(5): 810-836.
- [12] DING L, MELODIA T, BATALAMA S N, et al. Cross-Layer Routing and Dynamic Spectrum Allocation in Cognitive Radio Ad Hoc Networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, 59(4): 1760-1768.
- [13] WYSOCKI T, JAMALIPOUR A. MAC Framework for Intermittently Connected Cognitive Radio Networks[C]// IEEE 20th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2009. IEEE, 2009; 481-485.
- [14] LI B, PEI Y, WU H, et al. Heuristics to allocate high-performance cloudlets for computation off loading in mobile ad hoc clouds[J]. The Journal of Supercomputing, 2015, 71(8): 3009-3036.
- [15] CHU T, NIKOLAIDIS I. Node density and connectivity properties of the random waypoint model[J]. Computer Communications, 2014, 27(10): 914-922.
- [16] ZHANG Y, LIU W, LOU W, et al. MASK: anonymous on-demand routing in mobile ad hoc networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 5(9): 2376-2385.
- [17] The Network Simulator-ns-2[EB/OL]. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.
- [18] PERKINS, CHARLES E, ROYER, et al. Ad-hoc on-demand distance vector routing[C]// Second IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications, 2009 (WMCSA '99). IEEE, 2009; 90-100.
- [19] ZHENG Y P, HE S B, ZHANG X Y, et al. A Game-based Channel Assignment for Wireless Mesh Networks[J]. Journal of Chongqing University of Technology(Natural Science), 2013, 27(4): 90-95. (in Chinese)
- 郑鹏宇, 何世彪, 张馨月, 等. 一种基于博弈论的无线网状网络信道分配算法[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2013, 27(4): 90-95.

(上接第 136 页)

- 李斗, 姬冰辉, 王峰, 等. 基于混沌预测的宽带 DVB-RCS 卫星接入信道动态分配方案研究[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(3): 607-611.
- [6] DUAN W W, NI G Q, QIU X F, et al. Method of satellite access resource scheduling based on greedy algorithm[J]. Journal of Military Communications Technology, 2013, 34(4): 20-24. (in Chinese)
- 段伟伟, 倪桂强, 仇小峰, 等. 基于贪婪算法的卫星接入资源调度方法[J]. 军事通信技术, 2013, 34(4): 20-24.
- [7] DONG Q J, ZHANG J, ZHANG T, et al. Resource allocation strategies in MF-TDMA satellite systems[J]. Journal of Astronautics, 2009, 30(9): 1718-1726. (in Chinese)
- 董启甲, 张军, 张涛, 等. 高效 MF-TOMA 系统时隙分配策略[J]. 宇航学报, 2009, 30(9): 1718-1726.
- [8] FENG S D, XIE Z D, JIE X, et al. Research and Simulation on Priority Setting Strategy for Calls in Low Earth Orbit Constellation System[J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(2): 485-588. (in Chinese)
- 冯少栋, 谢智东, 揭晓, 等. 低轨星座系统中呼叫优先级策略研究及仿真[J]. 宇航学报, 2010, 31(2): 485-588.
- [9] XU Q L, CHEN J Z, LIU L X. Channel Allocation Algorithm in MF-TDMA GEO Satellite System[J]. Computer Science, 2014, 41(4): 40-43. (in Chinese)
- 徐其乐, 陈建州, 刘立祥. GEO 卫星通信系统中 MF-TDMA 信道分配算法研究[J]. 计算机科学, 2014, 41(4): 40-43.
- [10] WEI S, LIU W, CHEN X H, et al. Distributed Constraint Satisfaction of an Improved Channel Assignment Approach in Cellular Network[J]. Computer Science, 2012, 39(6): 81-83. (in Chinese)
- 韦沙, 刘威, 陈小慧, 等. 蜂窝网中基于分布式约束满足算法的改进信道分配[J]. 计算机科学, 2012, 39(6): 81-83.
- [11] SILVEIRA D, PORTO M, AGOSTINI L. A real time high definition architecture for the variable-length reference frame decoder[C]// IEEE Latin American Symposium on Circuits and Systems, Cusco, Peru, New York; IEEE, 2013; 1-4.
- [12] HALDER N, SONG J B. Game theoretical analysis of radio resource management in wireless networks: a non-cooperative game approach for power control[J]. IJCSNS International Journal of Computer science and Network Security, 2007, 7(6): 84-92.
- [13] ALVAERZ-DIAZ M, LÓPEZ-VALCARCE R, MOSQUERA C. SNR estimation for multilevel constellations using higher-order moments[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010, 58(3): 1515-1526.
- [14] KOUTSAKIS P. Predictive resource reservation access for multimedia integration over GEO satellite networks[C]// Proceedings of the Third International Conference on Wireless and Mobile Communications, 2007.