

一种基于簇内中继转发的 D2D 协作通信算法

马 克¹, 吴 洋²

(1 青海师范大学 网络中心, 青海 西宁 810008; 2 国家数字交换系统工程技术中心, 河南 郑州 450002)

摘 要: 终端直通技术(Device-to-Device, D2D)能够提升蜂窝系统的通信容量,但未能充分考虑 D2D 链路的差异,限制了频谱资源的利用和数据传输速率. 为此,提出了一种基于中继转发的 D2D 协作通信算法,在多播过程中基于簇内的数据包和邻居节点分布引入中继转发策略,从而为簇内用户链路质量较差的用户提供高速中继服务. 经仿真试验和分析表明,该算法能够克服链路差异性导致的多播效率下降问题,从而提升 D2D 通信的传输速率,改善网络整体的通信性能.

关键词: D2D; 分簇; 中继; 协作通信

中图分类号: TN929. 5

文献标识码: A

文章编号: 1000—7180(2017)01—0048—05

A Device-to-Device Forwarding Algorithm Based on Relay in Cluster

MA Ke¹, WU Yang²

(1 Network Center, Qinghai Normal University, Xining 810008, China;

2 National Digital Switching System Engineering & Technological Center, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Device to device (D2D) communications help to improve the efficiency of data dissemination services in cellular networks, but the differences between D2D links are not considered fully, thus it limited spectrum resource utilization and the data transmission rate. In this paper, it proposed a device-to-device forwarding algorithm based on relay in cluster. By introducing relaying and forwarding during the multicast process, our method can provide the high-speed data services for the users with poor link quality. The simulation results and analysis show that our algorithm can effectively solve the problem of link difference which leads to the decrease of multicast efficiency, accelerate the data rate of D2D links, and improve the communication performance of the D2D network.

Key words: D2D; clustering; relay; cooperative communication

1 引言

当前,随着云计算、物联网、多媒体等无线应用的广泛使用,需要更为高速、高效的无线通信技术作为支撑. D2D (Device-to-Device) 通信^[1-2] 技术作为 5G 通信的候选技术之一,有着巨大的技术优势和应用前景,能够大幅度提升无线传输速率,是当前无线通信技术研究热点之一.

在 D2D 多播通信中,向基站请求相同数据的用户可以构成一个簇,基站以组播方式向簇内用户发

送数据. 由于基站与各个用户之间的信道质量存在差异,使得为簇内所有用户同时提供高速的传输服务成为一项巨大挑战. 最基本的解决方案是根据信道质量最差的链路确定组播速率,以保证簇内用户都能成功接收基站数据. 但这也使得 D2D 多播速率完全取决于发送端和多个接受端的最差链路状态. 针对上述问题,文献[3]提出一种 D2D 簇内多播算法,由簇头充当服务器,当簇头获得共享资源后,向簇内用户完成数据分发. 文献[4]进一步提出了支持可靠 D2D 多播的算法,然而由于多播效率受到链路

差异性的影响^[5],多播效率仍然取决于最差链路质量用户.文献[6]中提出一种基于中继的D2D传输算法,此方法假设中继节点到用户终端的距离是固定的,然而在实际应用中中继节点难以按照固定距离进行部署.文献[7]提出一种选定用户充当中继的中继选择方案,由选定的中继节点为链路质量差的用户提供重传服务.然而在该算法中,需要遍历所有子簇和所有用户节点以获取适合的中继节点,使得算法复杂度会急剧增加.

基于此,本文提出了一种基于中继转发的D2D协作通信算法,以提高网络整体的通信性能.

2 系统模型和问题描述

2.1 系统模型

蜂窝系统中D2D协作转发的通信过程如图1所示.隶属于同一蜂窝系统且地理位置上彼此接近的终端1、终端2和终端3组成了一个D2D协作簇;其中,簇内任意两个终端可进行点到点直接通信.基站将待分发的数据包D切分为3个小数据包D₁、D₂和D₃,通过下行链路将它们分别发送给终端1、终端2和终端3.在正确接收到各自的小数据包后,终端1向终端2和终端3转发D₁,终端2向终端1和终端3转发D₂,终端3向终端1和终端2转发D₃.最后,每个终端将分别从基站和簇内其他终端处获得的数据包合并,以重新生成完整的数据包D.

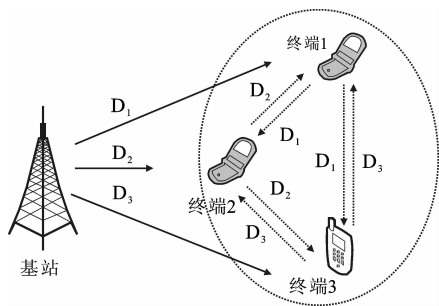


图1 基于簇内中继转发的D2D协作通信模型

在D2D网络中,数据包和邻居节点的簇内分布情况是D2D协作通信的基础和依据.本地用户在基站辅助控制下,获得邻居节点信息及网络数据包分布,并根据这些本地信息进行分布式的中继寻找和转发.用户发送数据共享请求的同时将持有数据包的情况告知基站,并在基站控制下进行链路探测,将能够进行D2D通信的用户加入到对应簇中.用户接入簇后,在基站控制下发送探测信息,据此通知邻居用户自身的存在,使得邻居用户更新本地信息.在此

过程中,还可以获得用户多播控制的数据包分布和簇内用户间的接受信噪比等消息^[8].

在本文场景中,将D2D协作通信视为一个数据共享问题,针对性地提出一种基于中继转发的算法,主要有三大特点:第一,用户能够基于簇内的数据包和邻居用户分布,由选定的用户向簇内请求用户多播指定的数据包,使得簇内节点能够互通有无,最大限度地提升了D2D传输效率;第二,若直传链路质量较差,可在两跳范围内选择链路质量最优的中继链路传输数据包,以提升传输速度;第三,簇内多个用户可能需要相同的数据包,可通过多播一次实现.而传统的D2D多播过程,无论是蜂窝模式还是D2D模式,所有数据必须选定的终端统一发送.相比之下,基于中继转发的D2D协作通信能够有效利用簇内的数据包分布和邻居节点信息,减少重复的D2D转发,在提升资源利用率的同时,从而使得系统整体吞吐量达到最优.

2.2 问题描述

定义1 (邻居用户) 在D2D网络中,若用户探测到某邻近节点的信号功率大于设定阈值 φ 时,则该节点即为当前用户的邻居用户.

定义2 (邻居矩阵) 在D2D网络中,若用户 i 与 j 是邻居关系,则 $N_{ij} = 1$,否则 $N_{ij} = 0$.邻居矩阵 $\mathbf{N} = [N_{ij}]_{n \times n}$ 表示网络中所有用户的邻居节点关系.

定义3 (数据包分布矩阵) 假设在D2D网络某分簇中,若用户 i 有第 j 个数据包,则 $d_{ij} = 1$,否则 $d_{ij} = 0$.由此,得到矩阵 $\mathbf{D} = [D_{ij}]_{n \times m}$ 关于簇内数据包的分布信息.

假设D2D网络簇中有 n 个用户和 m 个不同的数据包,基站需要将所有数据包分发至簇内各用户.为了提高频谱效率,D2D用户可以实现蜂窝用户信道的多复用:即在干扰容限下,一个D2D用户复用多个蜂窝用户的资源.以最大化系统吞吐量为目标,可以将问题描述如下:

$$\max \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (C_{ij}^d + C_{ij}^c) x_{ij} \quad (1)$$

$$\begin{cases} 1 \leq \sum_{j=1}^m x_{ij} \leq t, i = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, j = 1, 2, \dots, m \end{cases} \quad (3)$$

式(1)表示通过中继或直传,使得簇内 n 个用户都能获取 m 个不同的数据包,使得系统吞吐量最大, $x_{ij} \in \{0, 1\}$.式(2)表示每个D2D用户对最多可

以复用 t 个蜂窝用户资源,同时,为了保证簇内 D2D 用户的通信质量,式(3) 要求每个蜂窝信道最多只能被一个 D2D 用户复用.

在传输过程中,用户的邻居节点可以直接接收和转发数据,而非邻居节点则需要通过邻居节点的数据中继和转发获得完整数据包,以实现信息传输和数据共享. 因此,邻居用户的功率阈值 φ 决定了 D2D 通信可接受的最低功率值. 阈值 φ 越大,则要求直通链路质量越好,但对非邻居节点间的通信而言,则可能需要引入更多的中继重传. 由于 D2D 簇的覆盖范围比较有限,一般对多跳跳数的上限要求是 3 跳,更多的时候 2 跳通信便足以实现数据的传输^[9]. 因此,本文在多播过程中引入两跳的中继转发重传.

3 基于中继转发 D2D 协作通信算法

本文提出了一种基于簇内中继转发的 D2D 协作通信算法,通过引入中继转发策略将数据分包转发,在提高多播效率的同时,也为链路质量较差的用户提供了更多的数据传输通道,从而有效提升了无线网络的资源利用率和传输速率,并改善 D2D 协作通信的整体性能. 其主要内容包括以下两个方面:一是设计合理有效的中继策略,保证簇内的中继转发能够实现协同;二是基于中继转发策略,设计可行高效的 D2D 协作通信算法.

3.1 中继策略

根据数据包分布矩阵 $\mathbf{D}$ 和邻居矩阵 $\mathbf{N}$ 的信息辅助,簇内用户可以通过用户间的信令交互实现中继寻找和转发,从而完成多播过程的分布式控制. 具体而言,簇内用户根据网络辅助信息计算得到数据包的分布信息和发送顺序,即分布式选择最佳的数据包的多播顺序及发送用户. 由于本算法重点关注簇内数据共享过程,因而假定信道是慢衰落信道,簇内用户的邻居关系在数据传输过程中保持不变^[10-11]. 在多播过程中,簇内不需要数据的用户保持静默.

在中继转发过程中,若中继节点只收到一个数据请求信息,则提供 D2D 单播服务;若接收到多个数据请求信息,则发送 D2D 多播服务. 用户收到数据包后,向发送端发送 ACK 信息;如果仍未收到数据包,则向发送端发送 NACK 信息,并返回到最初的数据发送请求阶段,在下一时隙继续寻求中继转发. 经过 2 次中继请求后,若仍得不到数据信息,该用户可向发送端请求增大数据的发射功率. 发送方

收集到所有非邻居用户的 ACK 反馈后,以信令通知发送用户启动下一轮多播进程. 当获取所有数据包后,则多播过程结束.

基于此,基于 D2D 协作通信的中继策略设计如下(如图 2 所示).

策略 1:发送用户首先发出信息接入请求,接收方探测接收信噪比,大于功率阈值 φ 的用户(即邻居用户)选择直接接收,并反馈链路情况. 其余的用户(即非邻居用户)不反馈. 由此,簇内用户构建了数据分布矩阵 $\mathbf{D}$ 和邻居信息矩阵 $\mathbf{N}$ 等本地信息.

策略 2:每个发送用户根据数据分布矩阵 $\mathbf{D}$ 和邻居信息 $\mathbf{N}$ 决定自己的接收状态:若是当前数据发送用户的邻居节点,直接接受数据包;若直传链路质量较差,可在两跳范围内选择链路质量最优的中继链路传输得到数据包.

策略 3:发送方根据用户反馈的链路信息确定中继节点,并调整多播传输速率,默认每个邻居用户都可以准确接受到信息.

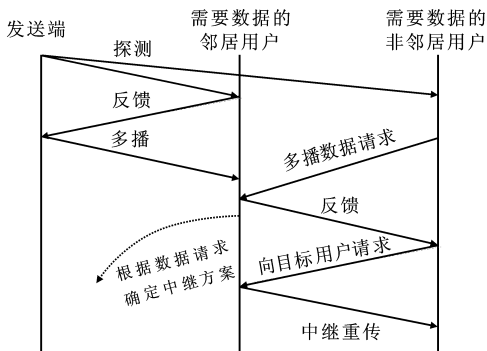


图 2 基于中继的 D2D 通信示意图

需要指出的是,中继的选择基于链路质量和数据请求数量,如果同时存在多个中继节点备选时(其链路容量都大于最低传输速率容限),选择可以服务最多邻居用户的节点作为中继. 当多个中继重传同时发生的时候,可以为其分配正交的复用资源,以避免 D2D 用户之间的干扰.

3.2 一种基于簇内中继转发的 D2D 协作通信算法

基于中继转发的 D2D 协作通信算法的基本思想是:在保证信噪比前提下,通过中继转发最大化服务用户数量,以提升传输效率和资源利用率. 当用户节点链路质量较好时,可以与发送节点直传;当用户节点的链路质量下降时,用户通过中继转发共享数据. 即当用户不能直接从多播过程得到信息时,在两跳范围内向邻居节点请求数据转发,并通过持有数据包的邻居用户的重传得到信息.

假定信道是慢衰落信道,用户的链路状态信息能够在接入簇的过程中获知,邻居关系在数据传输过程中保持不变.由于通过矩阵 $\mathbf{D}$ 可获得所需要数据包的用户,通过矩阵 $\mathbf{N}$ 可感知邻居节点分布,因而目标用户可得到两跳范围内所有可中继转发的用户节点集合.

基于中继转发的 D2D 协作通信算法的具体步骤如下所示.

步骤 1. 已知 $\mathbf{D}, \mathbf{N}, U$ 和节点 i , 初始化 $j = 1, R = \emptyset$;

步骤 2. 向节点 i 的邻居节点遍历发送关于数据包 j 的请求信息;

步骤 3. 根据邻居节点反馈的可中继转发的最大数量值,获取请求节点 i 关于数据包 j 的中继节点集 R ;

步骤 4. 若节点 $\rho \in R$ 能够提供最多中继服务,则选 ρ 作为中继节点,并向其发送链路信息;

步骤 5. 中继节点 ρ 根据所有的数据包请求,调整单播或多播的速率发送相应的数据包;

步骤 6. 若节点 i 没有收到数据包 j , 返回步骤 2;

步骤 7. 若节点 i 收到数据包 j , 向中继节点 ρ 发送 ACK 信息;

步骤 8. 更新待请求的数据包 j , 返回步骤 2;

步骤 9. 更新待请求的节点 i , 返回步骤 1, 直至所有节点获得请求的数据包.

一般情况下, D2D 通信为保证所有用户的正确接收, 传输速率必须基于最差链路的链路情况. 根据香农定理可得到传输速率为

$$C_j = B * \log_2(1 + \frac{\min(g_{kl}P_d)}{N_0B + P_cInf_{\arg(\min(g_{kl}P_d))}}),$$
$$l \in U \tag{4}$$

式中, U 表示需要某数据包 j 的用户集合, k 为选择的发送端, 考虑信道增益 g_{kl} , D2D 用户、蜂窝用户发射功率分别为 P_d 和 P_c , D2D 用户收到的干扰为 Inf , 高斯白噪声频谱密度 N_0 及信道带宽 B .

引入中继转发后, 发送端无需再因网络中存在链路质量差的用户而降低传输速率. 相反, 可以从 $Neigh_j$ 与 U 的合集中挑选信道最佳的 D2D 节点进行中继转发, 从而极大地提升网络的多播速率, 并得到传输速率为

$$C_j = B * \log_2(1 + \frac{\max(g_{kl}P_d)}{N_0B + P_cInf_{\arg(\min(g_{kl}P_d))}}),$$
$$l \in Neigh_j \cup U \tag{5}$$

式中, $Neigh_j$ 表示能够为目标节点提供数据包 j 的邻居节点集. 由式(5)可以看出, 通过基于中继转发的 D2D 协作, 需要数据包 j 的用户可以挑选最优的中继节点, 在干扰受限范围内可获取最大的传输速率.

3.3 算法分析

本算法为了使得簇内节点获得网络中各个分簇的本地信息, 需要进行本地链路探测. 此外, 在多播传输过程中, 链路质量差的用户需要向邻居节点请求数据, 同时邻居节点反馈请求数量等信息, 也会增加用户间的信令开销.

但相比传统集中于基站的信令控制, 本算法采用了分布式的信令交互策略, 并设计出相应的中继策略避免传输干扰, 从而能够有效地减少信令负载. 在传统的遍历寻找算法中, 即使只有两个用户需要中继重传服务, 这类算法也需要比较所有的可行方案, 才能选出最优的传输方案, 其算法复杂度是 $O(n^2)$, 且随着网络用户递增而剧增. 而本文算法通过簇内分布式的信令交互, 使得用户能够根据簇内的网络状况寻找最优的中继节点, 减小了后续中继转发的复杂度, 使得其复杂度仅为 $O(\log^2 n)^{[12]}$, 并提升了系统的通信性能.

4 仿真结果与分析

为了验证本所提出的资源分配算法的有效性, 可以考虑在 LTE-FDD 蜂窝系统单小区场景下, 建立链路级的仿真程序对算法进行测试, 并与蜂窝传输^[1]、D2D 多播^[2]和中继遍历^[7]等方案进行对比. 单 LTE-FDD 蜂窝小区内, 用户簇中心距基站 400 m 远, 簇内随机均匀的分布着 20 个 D2D 数据共享用户. 目标文件分为 30 个数据包, 并随机分布在簇内的 D2D 用户中. 仿真参数和链路增益模型如表 1 所示, 每次信道仿真运行 5 000 次取其平均值作为最终结果.

表 1 仿真参数

参数	取值
小区部署	独立单小区
小区半径	500 m
蜂窝链路路损模型	$128.1 + 37.6 \lg 10(d \text{ [km]})$
D2D 链路路损模型	$127 + 30 \lg 10(d \text{ [km]})$
阴影衰落标准方差	D2D 用户: 6 dB; 蜂窝用户: 8 dB
噪声频谱密度	-174 dBm/Hz
系统带宽	5 MHz
天线增益	BS: 14 dBi; Device: 0 dBi
基站发送功率	46 dBm
蜂窝用户最大发送功率	24 dBm
用户最大发送功率	20 dBm
功率阈值 φ	-100 dBm

图 3 展示了不同算法对应的传输速率 CDF 曲线. 其中,基于中继转发的协作算法要明显优于蜂窝传输和 D2D 多播,该方法与采用中继遍历策略的 D2D 多播算法具有近似的系统吞吐量,且二者的吞吐量都远高于蜂窝传输和 D2D 直接多播的方案.这说明基于中继转发的 D2D 多播网络性能明显优于蜂窝传输和 D2D 多播.而中继遍历的 D2D 多播方案需要重复迭代的遍历,才能选择出最优中继的方案,使得算法复杂度大增,同时也增加了信令交互的冗余度,造成了新的信号干扰.

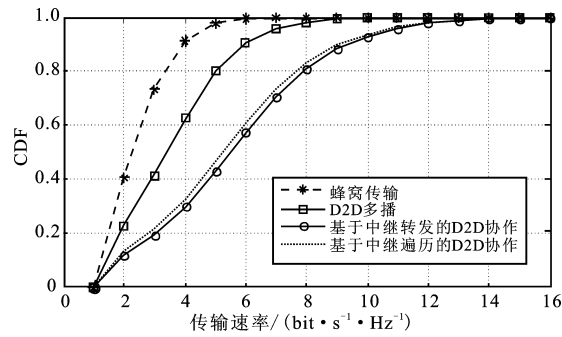
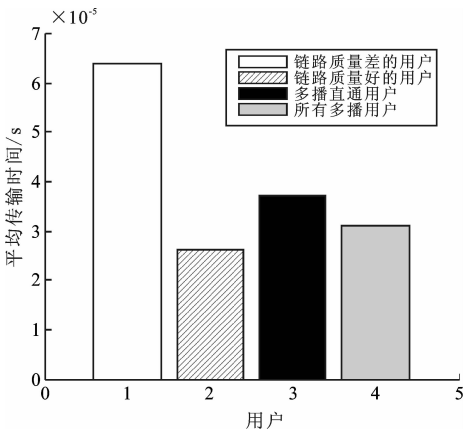


图 3 四种算法的系统通信性能对比

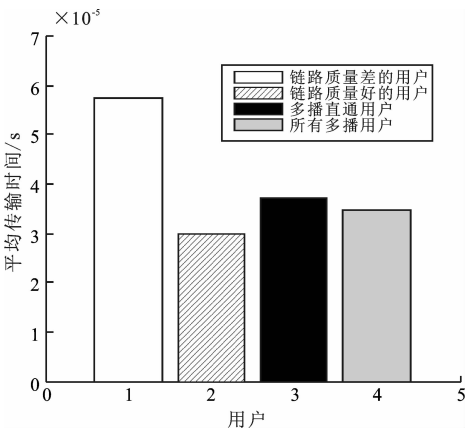
从图 4 中可以看出,相比于 D2D 多播方案,本文算法中占多数的链路质量好的用户的服务时间提升了 12.9%,而占少数的链路质量差的用户的服务时间有所下降,降低了 9.6%.这说明基于数据包和邻居节点分布,D2D 多播可以选择链路质量更好的用户进行中继转发,从而不必将传输时间消耗在链路质量较差的用户上.同时,多数用户(链路质量好的用户)可以在尽早获取到数据后停止等待,避免信号干扰和能量损耗.另外,综合网络中所有多播用户进行比较,本文算法将所有用户的平均传输提高了 10.3%,即本方案从优化服务大多数用户的角度提高了网络的整体性能.

5 结束语

本文将 D2D 协作通信应用于簇内多播场景中,基于中继转发进行 D2D 协作多播传输,使得簇内每个拥有独立信息的用户通过数据多播交互,选择邻近两跳范围内质量较好的链路以获得高速的传输服务,其实质是提供了一种根据簇内链路状态和距离特征进行簇内信息传输和共享的解决方案.仿真结果表明,该算法在提升用户传输速率的同时,能够实现簇内用户的数据有效覆盖,并有效地提升系统的吞吐量和频谱利用率.



(a)D2D 多播



(b)基于中继转发的 D2D 多播

图 4 D2D 多播与基于中继转发的 D2D 多播各用户传输时间的对比

参考文献:

[1] Doppler K, Rinne M, Wijing C, et al. Device-to-device communication as an underlay to LTE-advanced networks [J]. IEEE Communications Magazine, 2009, 47(12): 42-49.

[2] Du Jinling, Zhu Wensheng, Xu Jing, et al. A compressed HARQ feedback for device-to-device multicast communications [C]// Vehicular Technology Conference (VTC Fall) . Quebec City: IEEE, 2012: 1-5.

[3] Timo Koskela, Sami Hakola, Tao Chen, et al. Clustering concept using Device-to-Device communication in cellular system [C]// IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Sydney: IEEE, 2010:1-6.

[4] Seppala J, Koskela T, Tao Chen, et al. Network controlled device-to-device (D2D) and cluster multicast concept for LTE and LTE-A networks [C]// IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Cancun Quintana Roo: IEEE, 2011: 986-991.

LSB 水印算法进行了改进,提出一种基于模板矩阵来选择符合一定条件的像素点,把处理后的水印信息分别隐藏到载体图像的 R、G、B 三个色彩空间,从而提高了水印容量。实验结果表明,本文算法对各种常见的攻击均具有一定的抵抗能力,能够满足实际应用中的需求,有效地解决数字作品的版权保护问题和为信息完整性提供保证。

参考文献:

- [1] Huang Zhanping, Liu Jinxing, Lv Qing, et al. Digital watermarking algorithm based on spread spectrum and fourier transform[C]//3rd International conference on Management, Education, Information and Control. Shenyang, 2015.
- [2] Cedillo-Hernandez, Garcia-Ugalde, Nakano-Miyatake, Perez-Meane. Robust hybrid color image watermarking method based on DFT domain and 2D histogram modification[J]. Signal image and video Processing, 2014, 8 (1):49-63.
- [3] Deepti Shukla, Nirupama Tiwari, Deepika Dubey. Survey on digital watermarking technologies[J]. International Journal of Signal Processing, Image Process-
- ing and Pattern Recognition, 2016, 9(1):239-244.
- [4] Ingemar J Cox, Linnartz J P. Some general methods for tampering with watermarks[J]. IEEE Journal on Selected Area in Communication, 1998, 16 (4): 587-593.
- [5] 李刚. 一种改进的 LSB 数字水印技术研究[J]. 现代计算机, 2015, 32(2):69-73.
- [6] 马刚,蒋志新,卫红春. 一种基于 LSB 的易碎性数字盲水印算法[J]. 微电子学与计算机, 2008, 25(8):49-50.
- [7] 和煦,常淑娟. Arnold 变换在 LSB 算法中的应用研究[J]. 通信与信息技术, 2008, 31(19):77-79.
- [8] 章毓晋. 图像处理和分析技术[M]. 北京:高等教育出版社, 2008.
- [9] 于万波. 基于 matlab 的图像处理[M]. 北京:清华大学出版社, 2008:1-201.
- [10] 江营,周萍. 基于混沌和 LSB 的盲水印算法研究[J]. 仪器仪表与分析监测, 2009, 26(4):16-18.

作者简介:

李树全 男, (1971-), 硕士, 高级工程师. 研究方向为信息安全、数字水印等. E-mail: shuquanli@uestc.edu.cn.

(上接第 52 页)

- [5] Sen S, Xiong J, Ghosh R, et al. Link layer multicast with smart antennas: No client left behind [C] // IEEE International Conference on Network Protocols. Orlando: IEEE, 2008:53-62.
- [6] Donghoon Lee, Sung-Il Kim, Jaeyoung Lee, et al. Performance of multihop decode-and-forward relaying assisted Device-to-Device communication underlaying cellular networks [C] // Information Theory and its Applications. Hawaii: IEEE, 2012: 455-459.
- [7] Zhou B, Hu H, Huang S, et al. Intra-cluster device-to-device relay algorithm with optimal resource utilization [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, 62(5): 2315-2326.
- [8] 王俊义, 巩志帅, 符杰林, 等. 基于多跳 D2D 转发的簇内数据共享方案[J]. 计算机科学, 2015, 42(8): 124-127.
- [9] Kaufman Brett, Azhang Behnaam. Cellular networks with an overlaid device to device network[C]//Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. Pacific Grove: IEEE, 2008: 1537-1541.
- [10] 文凯, 卢彦博, 刘敏, 等. D2D 通信系统中一种资源分配算法的研究[J]. 南京邮电大学学报, 2015, 35(6): 31-38.
- [11] 李方健. D2D 通信系统中的最优中继选择及功率分配策略研究[J]. 重庆邮电大学学报, 2015, 26(5): 605-610.
- [12] Li Zhou, Feng Yan. The complexity of routing algorithm in small world networks [C] // International Conference on Computer Science and Electronics Engineering. Hangzhou: IEEE, 2012:423-427.

作者简介:

马 克 男, (1964-), 硕士, 教授. 研究方向为网络通信技术. E-mail: makelucky@tom.com.

吴 洋 男, (1988-), 博士, 讲师. 研究方向为无线通信技术、无线网络安全防护.