

基于多跳 D2D 转发的簇内数据共享方案

王俊义^{1,2} 巩志帅¹ 符杰林¹ 仇洪冰¹

(桂林电子科技大学认知无线电与信息处理重点实验室 桂林 541004)¹

(桂林电子科技大学广西信息科学实验中心 桂林 541004)²

摘要 为提高簇内数据分发效率,可优先选择信道质量良好、可实现较高数据速率的 D2D 链路,于是提出了多跳 D2D 转发方案。该方案根据预先设定的数据速率阈值和 D2D 链路质量,自适应选择最优的中继、路由和转发跳数,提高了时频资源的利用率。逐步深入地给出了 3 个阈值的设定规则,并推导了对应算法的资源成本表达式。仿真结果表明,3 个算法的资源效率依次得到改善,其中优化速率算法与现有单跳传输方案相比获得了良好的性能。

关键词 蜂窝网络, D2D, 多跳, 数据转发, 资源效率

中图分类号 TN929.5 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2015.8.026

Data Sharing Scheme Based on Multi-hop Device-to-Device(D2D) Forwarding

WANG Jun-yi^{1,2} GONG Zhi-shuai¹ FU Jie-lin¹ QIU Hong-bing¹

(Key Laboratory of Cognitive Radio & Information Processing, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)¹

(Guangxi Experiment Center of Information Science, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)²

Abstract The D2D links with good quality and high achievable data rates can be preferentially selected to improve the efficiency of data dissemination in a cluster. Therefore, a multi-hop D2D data forwarding scheme was induced. The proposed scheme can adaptively select the proper relays, routing and hop count according to the pre-defined data rate threshold and D2D links quality. In the paper, three rules were designed to set the threshold, and the formulas of resource cost for the corresponding algorithms were derived. Simulation results show that the three algorithms gradually gain an improvement of resource utilization and the best of them achieves a significant performance compared to the existing single-hop schemes.

Keywords Cellular network, D2D, Multi-hop, Data forwarding, Resource efficiency

1 引言

随着多媒体等业务需求和用户容量的持续增长,移动通信面临着严重挑战。在传统蜂窝网络中,用户之间的通信过程由基站转接分为上行链路和下行链路。这种集中式工作方式的显著优点是便于对资源和干扰的管理与控制,其最大缺点是资源利用率低。为了提高频谱效率, D2D 技术被提出并受到广泛关注^[1-6]。D2D 通信是一种在蜂窝系统的控制下,允许终端用户通过共享小区资源进行直接通信的新型技术。这种端到端的直接通信,不仅可以减轻基站负担^[1,3],而且减小了通信时延^[1,6]。与蜂窝上、下行链路相比, D2D 链路仅占用一半的信道资源,因此极大地提高了资源效率^[4,5]。距离较近的用户以 D2D 模式进行通信可减小传输功率^[2,3],节约能耗。此外, D2D 通信能够支持新服务^[3,6],提供良好的用户体验。鉴于这些优点, D2D 通信有望成为未来移动通信的关键技术^[7]。

蜂窝网络中,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信道质量的差异,使得同时为簇内所有用户提供满意的服务成为一大挑战。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。如果大多数用户的信道质量良好,只有极少数用户的信道质量较差,这种方法的效率显然很低。然而,采用较大的组播速率,信道质量差的用户也许不能成功接收数据。为此,文献[8]提出了一种分段传输的方法,即第一阶段基站以较大速率向簇内用户组播数据,第二阶段成功接收者以 D2D 通信方式向其他用户转发数据。该方案中所有成功接收者都将作为发射机,并以最差的信道质量确定共同的组播速率进行数据转发,这不利于资源利用率的提高。文献[9,10]提出了一种自适应簇转发方案,其可根据簇内 D2D 链路质量自适应选择发射机,然后划分子簇,实现了良好的资源效率。遗憾的是,以上方案均没有充分考虑 D2D 链路的差异,信道质量差的 D2D 链路可能会成为提高资源效率的瓶颈。为此,本文提出了多跳 D2D 转发方案,自适应选择信道质量良好的传

到稿日期:2014-09-11 返修日期:2014-11-23 本文受国家自然科学基金(61261017,61172054,61362006,61371107),广西自然科学基金(2013GXNSFAA019334),广西无线宽带通信与信号处理重点实验室基金(11107),广西信息科学实验中心基金(20130310)资助。

王俊义(1977-),男,博士,副教授,主要研究方向为无线通信网络的性能分析与优化, E-mail: wangjy@guet.edu.cn; 巩志帅(1988-),男,硕士生,主要研究方向为无线通信技术; 符杰林(1975-),男,硕士,副教授,主要研究方向为信号处理; 仇洪冰(1963-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为移动通信、超宽带无线通信、宽带通信网络和通信信号处理。

输路径,实现了较高的数据速率。该方案通过预先设定的数据速率阈值优先选择信道质量良好的 D2D 链路进行数据转发,此时成功接收用户数目增加,接收失败用户数目减少,重复上述操作,经过多跳传输即可实现簇内数据共享。本文逐步深入地给出了 3 个阈值的设定规则,并分别推导了对应算法的资源成本表达式。为了验证该方案的有效性,本文做了大量仿真实验,不仅对比了 3 个算法的资源效率,而且还与 2 个现有单跳传输方案作了对比。

2 问题描述

蜂窝网络中,向基站请求相同数据的用户可组成一个簇。假设簇内用户既可以与基站通信,也可以通过 D2D 链路相互之间通信。基站以某一速率向簇内用户组播数据,但由于簇内用户与基站之间信道质量的差异,导致部分用户成功接收数据,而剩余用户未能成功接收数据。本文把成功接收和未能成功接收数据的用户分别记作 ACK 用户和 NACK 用户,并分别组成集合 U_{ACK} 和 U_{NACK} 。

为了使簇内用户均获得基站数据,可利用 ACK 用户作为中继节点,通过 D2D 链路向 NACK 用户转发数据。假设 R_{mn} (bit/s) 是用户 m 和 n 之间 D2D 链路在带宽 BW_{mn} (Hz) 上可实现的最大数据速率(即信道容量),则链路质量可由单位带宽的信道容量即频谱效率来描述^[9],即

$$e_{nm} = R_{nm} / BW_{nm} \quad (1)$$

其单位为 bit/(s·Hz)。为了方便起见,本文对其做归一化处理,即令 $BW_{mn} = 1$ Hz,则 e_{nm} 在数值上与 R_{mn} 是等价的。

举例:设想一个包括 7 用户的簇,如图 1 所示,基站以某一组播速率向簇内用户发送数据,结果 3 个用户成功接收,记为 $U_{ACK} = \{m_1, m_2, m_3\}$; 4 个用户未能成功接收,记为 $U_{NACK} = \{n_1, n_2, n_3, n_4\}$ 。令 ACK 用户和 NACK 用户的数目分别为 N_{ACK} 和 N_{NACK} ,则有 $N_{ACK} = 3$ 和 $N_{NACK} = 4$ 。假设簇内用户两两之间的信道质量是已知的,则对于 $m \in U_{ACK}$ 和 $n \in U_{NACK}$,可构造链路质量矩阵

$$E \triangleq [e_{nm}] = \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} & e_{14} \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} & e_{24} \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} & e_{34} \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中,矩阵 E 中任一元素 e_{nm} 表示用户 m 和 n 之间 D2D 链路的频谱效率,也等价于该 D2D 链路的可实现数据速率。令 C 为要传输的信息比特数,不难发现, C/e_{nm} (s·Hz) 表示相应的 D2D 链路传输数据时所消耗的时频资源。

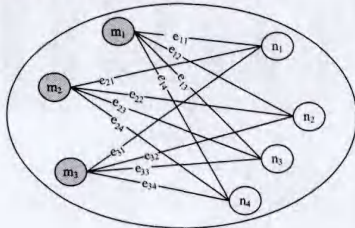


图 1 示例

本文所要解决的问题就是如何在 ACK 用户和 NACK 用户之间选择路由进行数据转发,并有效节约时频资源,提高资源效率。

3 多跳 D2D 转发方案

正如前面文献所述,可以把 ACK 用户当作中继节点通

过 D2D 链路向 NACK 用户转发数据以实现簇内数据共享。为了提高数据转发效率,本文提出了多跳 D2D 转发方案,通过设定数据速率阈值自适应选择信道质量良好的传输路径,接收到数据的 NACK 用户将会转变为 ACK 用户,经过多跳传输即可实现簇内数据共享。该方案的具体实现过程可描述为如下 4 个步骤。

第 1 步 构造链路质量矩阵 E ,如等式(2),并初始化资源成本,即 $cost^{(0)} = 0$ 。

第 2 步 根据预先定义的规则(将在后面介绍),设置数据速率阈值 e_0 。

第 3 步 搜索矩阵 E 中所有满足 $e_{nm} \geq e_0$ 的元素,以用户 m 为发射机,对应的用户 n 为接收机,进行数据转发。

该步骤存在 3 种情形:1)搜索得到的所有满足条件的 e_{nm} 中,每个发射机 m 只对应一个接收机 n ,这种情况下只含单播模式;2)每个发射机 m 都对应多个接收机 n ,这种情况下只含组播模式;3)有些发射机 m 只对应一个接收机 n ,有些发射机 m 对应多个接收机 n ,这种情况下既含单播也含组播。不妨把单播当作特殊的组播,则每个组播组都需要一块时频资源。为了避免两个组播组之间的干扰,可为其分配正交的资源。这时,该过程中资源成本可表示为

$$cost = \sum_{m \in U_{ACK}} \left\{ \frac{C}{\min_{\substack{n \in U_{NACK} \\ e_{nm} \geq e_0}} (e_{nm})} \right\} \quad (3)$$

其中,约束条件为“ $n \in U_{NACK}$ 和 $e_{nm} \geq e_0$ ”的最小化过程表示,对于任意给定的 ACK 用户,满足 $e_{nm} \geq e_0$ 的 D2D 链路被选择用来转发数据,并且组播速率取决于其中最差的链路;约束条件为“ $m \in U_{ACK}$ ”的求和过程表示,资源成本等于每个 ACK 发射机的资源消耗之和。

于是,累加资源成本为

$$cost^{(k)} = cost^{(k-1)} + cost \quad (4)$$

其中, k 表示 D2D 转发跳数。

第 4 步 经过第 3 步,部分 NACK 用户变为 ACK 用户,集合 U_{ACK} 中元素增加,集合 U_{NACK} 中元素相应减少。判断 U_{NACK} 是否为空集,若为空集,则簇内所有用户都已成功接收数据,完成数据共享;若为非空集,则更新矩阵 E ,返回第 2 步,直到 $U_{NACK} = \emptyset$ 。

根据第 2 步中数据速率阈值的设定规则,有如下 3 个算法。

(1)最大速率算法。顾名思义,就是根据信道条件最好的 D2D 链路设置数据速率阈值,即 $e_0 = e_{\max}$ (其中 e_{\max} 为矩阵 E 中元素的最大值)。此时,每跳的资源成本也可表示为

$$cost = N_m \times \frac{C}{e_{\max}} \quad (5)$$

其中, N_m 表示作为发射机的 ACK 用户的数目,并且所有发射机以共有的数据速率 e_{\max} 转发数据。

(2)中值速率算法。就是选取矩阵 E 中元素的中值作为数据速率阈值,即 $e_0 = (e_{\max} + e_{\min})/2$ (其中 e_{\max} 和 e_{\min} 分别为矩阵 E 中元素 e_{nm} 的最大值和最小值)。

(3)优化速率算法。通过优化 D2D 链路的平均资源成本获得最优数据速率阈值,即

$$cost = \left\{ \sum_{m \in U_{ACK}} \frac{C}{\min_{\substack{n \in U_{NACK} \\ e_{nm} \geq e_0}} (e_{nm})} \right\} / N_n \quad (6)$$

$$e_{opt} = \arg \min_{e_{\min} \leq e_0 \leq e_{\max}} cost$$

其中, N_n 表示作为接收机的 NACK 用户的数目, 等价于 D2D 链路的数量; \overline{cost} 表示平均资源成本, e_{opt} 表示使 \overline{cost} 取得最小值的优化数据速率。

这里, 每跳的资源成本也可表示为

$$cost = N_n \times \min\{\overline{cost}\} \quad (7)$$

其中, $\min\{\overline{cost}\}$ 表示 \overline{cost} 的最小值。

稍作分析, 不难发现这 3 个算法有一个共同的缺陷, 就是有可能出现一个接收机同时接收多个发射机的数据, 即满足条件的 e_{nm} 中存在多个不同的 m 对应一个 n 的情况, 这样难免会造成资源的浪费。为了进一步提高资源利用率, 可在上面提出的算法基础上作如下处理:

将搜索得到的所有满足条件的 e_{nm} (假设 m 有 i 个值, n 有 j 个值) 以发射机 m 进行分组, 并按元素数目降序排列, 如果元素数目相同, 则按组播速率降序排列, 分别记为 U_1, U_2, \dots, U_i ; 然后依次取并集 $U_1 \cup U_2 \cup \dots \cup U_k (1 \leq k \leq i)$, 直到其中元素所包含的 n 的数目恰好为 j , 则分别以组播组 U_1, U_2, \dots, U_k 进行数据转发, 舍弃剩余的 $U_{k+1}, U_{k+2}, \dots, U_i$ 。改进之后的算法很大程度上减少了数据的重复传输, 进一步提高了资源效率。综上, 本文提出的多跳 D2D 转发方案流程, 如图 2 所示。

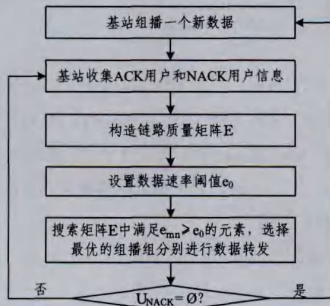


图2 簇内多跳 D2D 转发方案流程

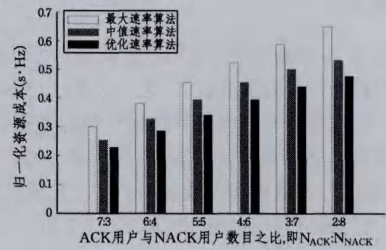
4 仿真结果

上节逐步深入地提出了 3 个 D2D 转发算法。这里, 首先对 3 个算法的资源效率做对比, 以直观地观察其性能的改善。本文对资源成本做归一化处理, 即在资源成本表达式中令 $C=1\text{bit}$ 。假设簇内用户均匀分布, 并采用自适应调制和编码技术。信道质量矩阵 E 中的元素可随机取集合 $\{1, 2, 4, 6, 8\}$ 中的值, 集合中的数值分别对应调制方式 BPSK、QPSK、16QAM、64QAM 和 256QAM^[9,10]。以包含 10 个用户的簇为例, 分别考虑 ACK 和 NACK 用户不同比例时的情形, 重复 50000 次仿真, 取其平均值作为仿真结果, 如图 3 所示。

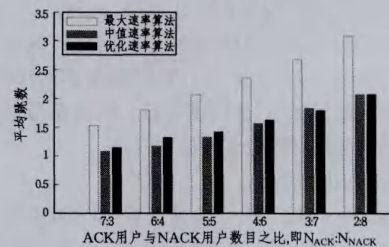
由图 3(a)可知, 3 个算法依次实现了递减的资源成本, 换句话说, 资源利用率依次提高。这是因为在最大速率算法中, 高的数据速率诱导了更多的转发跳数(见图 3(b)), 并且传输方式以单播为主, 导致资源低效; 而在后两个算法中, 折衷的数据速率不仅减少了转发跳数, 还使得组播占据优势, 资源利用率大幅度提高, 尤其是优化速率算法优化了每跳中平均资源的消耗, 因此实现了最好的资源效率。

接下来, 本文将上述最佳算法(即优化速率算法)与两个现有的数据共享方案进行了对比, 两个现有方案分别命名为方案 I 和方案 II。方案 I 为传统组播方案, 即只有一个 ACK 用户参与数据转发, 组播速率根据信道质量最差的 D2D 连接

确定, 其中发射机是 ACK 用户中可实现最大组播速率的用户。方案 II 是文献[9]中提出的算法, 该方案可自适应选择发射机数目, 并依此划分子簇进行数据重传。这里的仿真条件如前所述, 分别就 5 用户、10 用户和 15 用户的簇进行了仿真, 以便更好地比较 3 个方案的性能。虽然方案 II 中重传发射机的数目可从 1 到 $L \leq N_{\text{NACK}}$ 自适应变化, 但较大 L 获得的额外增益却微乎其微。所以, 在仿真中, 对于 5 用户和 10 用户情形, L 只取 1 和 2; 对于 15 用户情形, L 可取 1、2 和 3^[9,10]。仿真结果如图 4 所示。

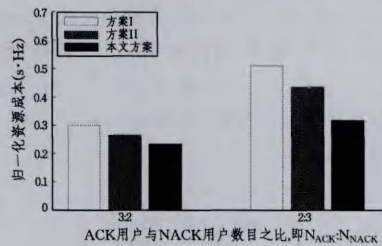


(a) 资源效率对比

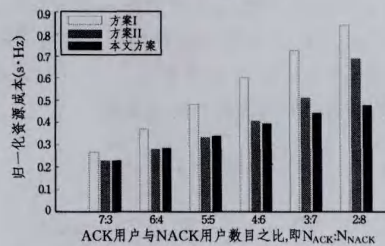


(b) 平均跳数对比

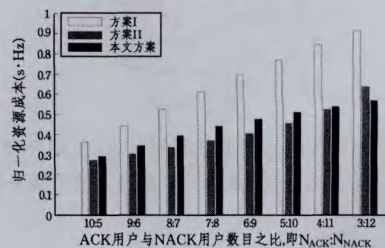
图3 本文中 3 个算法的性能对比



(a) 5 用户情形



(b) 10 用户情形



(c) 15 用户情形

图4 本文方案与现有方案对比

由仿真结果可知,本文提出的方案不论簇内用户多少,在资源利用率方面都明显优于方案 I,并且随着 NACK 用户数量的增加,优势更佳明显。例如,当 ACK 用户与 NACK 用户的比例为 $N_{ACK} : N_{NACK} = 7 : 3$ 时,本文方案的资源成本是方案 I 的 85%,而当 $N_{ACK} : N_{NACK} = 2 : 8$ 时,该比例甚至为 57%,如图 4(b)所示。这是因为在方案 I 中信道质量最差的 D2D 链路会成为组播速率的瓶颈,并且 NACK 用户数量越多,出现瓶颈的可能性越大;而本文方案优化了每跳的平均资源成本,由此获得了良好的资源效率。从图 4 中还可以发现,当 ACK 用户与 NACK 用户的比例较大时,本文方案与方案 II 相比实现了几乎平行或者略差的性能;而当该比例较小时,如 $2 : 3$, $3 : 7$, $2 : 8$ 和 $3 : 12$,本文方案优于方案 II,并且 ACK 用户数目越少,优势越明显。这是因为方案 II 能够自适应地选择重传发射机的数目以优化利用组播增益和多信道分集增益,而当 ACK 用户较少时,发射机的选择范围变窄,该优势丧失;本文方案通过设置数据速率阈值自适应选择最优的中继、路由和转发跳数,充分利用了多信道分集增益,于是实现了良好的资源利用率。

结束语 为了提高簇内数据分发效率,本文提出了多跳 D2D 转发方案,通过设置数据速率阈值自适应选择信道质量良好的转发路径,实现了较高的数据速率,因此提高了时频资源的利用率。本文逐步深入地给出了 3 个阈值的设定规则,并相应地提出了 3 个 D2D 转发算法,依次实现了资源效率的改善。通过与现有单跳方案的仿真对比,证明了本文多跳方案的有效性。

参考文献

- [1] Doppler K, Rinne M, Wijting C, et al. Device-to-device communication as an underlay to LTE-advanced networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2009, 47(12): 42-49
- [2] Fodor G, Dahlman E, Mildh G, et al. Design aspects of network assisted device-to-device communications[J]. IEEE Communications Magazine, 2012, 50(3): 170-177

- [3] Doppler K, Rinne M P, Janis P, et al. Device-to-Device communications; functional prospects for LTE-Advanced networks[C]// International Conference on Communications Workshops, 2009. Dresden: IEEE, 2009: 1-6
- [4] Yu C H, Doppler K, Ribeiro C B, et al. Resource sharing optimization for device-to-device communication underlying cellular networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(8): 2752-2763
- [5] Kaufman B, Lilleberg J, Aazhang B. Spectrum sharing scheme between cellular users and ad-hoc Device-to-Device Users[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(3): 1038-1049
- [6] Seppala J, Koskela T, Chen T, et al. Network controlled device-to-device(D2D) and cluster multicast concept for LTE and LTE-A networks[C]// Wireless Communications and Networking Conference, 2011. Quintana Roo: IEEE, 2011: 986-991
- [7] 王俊义, 巩志帅, 符杰林, 等. D2D 通信技术综述[J]. 桂林电子科技大学学报, 2014, 34(2): 114-119
Wang Jun-yi, Gong Zhi-shuai, Fu Jie-lin, et al. A survey on device-to-device communication[J]. Journal of Guilin University of Electronic Technology, 2014, 34(2): 114-119
- [8] Hou F, Cai L X, Ho P H, et al. A cooperative multicast scheduling scheme for multimedia services in IEEE 802.16 networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(3): 1508-1519
- [9] Zhou Bin, Hu Hong-lin, Huang Sheng-qiang, et al. Intracluster device-to-device relay algorithm with optimal resource utilization[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, 62(5): 2315-2326
- [10] 周斌, 胡宏林. 提高蜂窝系统多播效率的 D2D 自适应协作重传[J]. 应用科学学报, 2013, 31(3): 221-227
Zhou Bin, Hu Hong-lin. Adaptive device-to-device cooperative retransmission for improving multicast efficiency in cellular systems[J]. Journal of Applied Sciences, 2013, 31(3): 221-227

(上接第 89 页)

参考文献

- [1] 张笙, 李郁峰, 严云洋, 等. 面向鲁棒视觉监控的热红外与可见光视频融合运动目标检测[J]. 红外技术, 2013(12): 773-779
Zhang Sheng, Li Yu-feng, Yan Yun-yang, et al. Moving Target Detection Using Fusion of Visual and Thermal Video for Robust Surveillance[J]. Infrared Technology, 2013(12): 773-779
- [2] Zhu Z, Huang T S. Multimodal surveillance; an introduction[C]// Proceedings of the 2007 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition(CVPR 2007). Washington DC, USA: IEEE Computer Society, 2007: 1-6
- [3] Davis J W, Sharma V. Fusion-based background-subtraction using contour saliency[C]// Proceedings of the 2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition(CVPR 2005). Washington DC, USA: IEEE Computer Society, 2005: 11-18
- [4] Torresan H, Turgeon B, Ibarra-Castanedo C, et al. Advanced surveillance systems: combining video and thermal imagery for pedestrian detection[C]// Defense and Security, International Society for Optics and Photonics. Bellingham, USA: SPIE, 2004: 506-515

- [5] Snidaro L, Foresti G L, Niu R, et al. Sensor fusion for video surveillance[C]// Proceedings of the 7th International Conference on Information Fusion. New York, USA: Electrical Engineering and Computer Science, 2004: 739-746
- [6] Stauffer C, Grimson W E L. Learning patterns of activity using real-time tracking[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(8): 747-757
- [7] 黄文丽, 范勇, 李绘卓, 等. 改进的混合高斯算法[J]. 计算机工程与设计, 2011, 32(2): 592-595
Huang Wei-li, Fan Yong, Li Hui-zhuo, et al. Improved Mixture Gaussian Algorithm[J]. Computer Engineering and Design, 2011, 32(2): 592-595
- [8] 姚会, 苏松志, 王丽, 等. 基于改进的混合高斯模型的运动目标检测方法[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2008, 47(4): 505-510
Yao Hui, Su Song-zhi, Wang Li, et al. Moving Object Detection Method Based on the Improved Mixture Model[J]. Journal of Xiamen University(Natural Science), 2008, 47(4): 505-510
- [9] 李鸿. 基于混合高斯模型的运动检测及阴影消除算法研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2013
Li Hong. The Research of Motion Detection Based on Gaussian Mixture Model and Shadow Elimination Algorithm[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2013