

电力物联网 D2D 通信中模式预选的多播重传技术

徐江涛¹, 姜海波², 刘 洋¹, 胡成博¹, 路永玲¹

(1. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103; 2. 国网江苏省电力有限公司, 江苏 南京 210024)

摘 要:针对电力物联网 D2D 通信中的模式预选问题, 提出多播重传机制。首先, 通过分析 D2D 传输的集中式和分布式 2 种重传方案的优势和不足, 提出一种新的基于重传模式预选的 D2D 多播重传方案。新方案通过簇头汇总 D2D 多播 ACK 状态和簇内链路质量, 避免了集中式方案中上行汇报信令开销太大的问题; 同时, 通过让簇头来决定重传方案后再上报基站的方式, 避免了分布式重传方案中预留资源带来的资源浪费问题。簇头充分考虑 D2D 链路差异, 根据 D2D 链路质量自适应地选择最优传输节点, 可充分利用 D2D 链路的多信道分集增益。理论分析和计算机仿真验证方案在信令开销和传输效率方面的有效性。

关 键 词:电力物联网; 5G; D2D 通信; 终端直通; 多播重传

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2021.04.025 中图分类号: TM76 文章编号: 1673-9140(2021)04-0196-07

A multicast retransmission scheme based on the pre-selected mode for D2D communications of electric internet of things networks

XU Jiangtao¹, JIANG Haibo², LIU Yang¹, HU Chengbo¹, LU Yongling¹

(1. Electric Power Science Research Institute, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 211103, China;
2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210024, China)

Abstract: This article presents a novel multicast retransmission scheme for wireless communication network in the ubiquitous electric internet of things. Firstly, the advantages and disadvantages of two retransmission schema, the centralized and distributed, are analyzed. Then, a new method is consequently proposed based on retransmission mode pre-selection. Instead of the approach of the UEs in the centralized scheme, the proposed method's signaling cost is significantly reduced through reporting ACK/NACK and link quality by the cluster head UE. The proposed method can avoid resource waste of the base station to reserve wireless resource for retransmission. In addition, the cluster head can exploit the multicast gain and multi-channel diversity gain jointly. Finally, the computer simulations verify the effectiveness of both the cost and the efficiency of the proposed method.

Key words: electric internet of things; 5G; D2D communication; device-to-device; multicast retransmission

为顺应能源革命和数字革命融合发展的趋势, 中国提出建设泛在电力物联网, 作为坚强智能电网的补充, 也是构建能源互联网的重要内容^[1]。为实现泛在电力物联网中发、输、变、配、用、调各类设备

收稿日期: 2019-11-17; 修回日期: 2020-05-22

基金项目: 国家电网公司总部科技项目(5210EF180009)

通信作者: 徐江涛(1992-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事电力无线通信网络技术研究; E-mail: 136933974@qq.com

及人员全景感知和泛在接入,需要高性能的电力通信网络作为重要支撑^[2],对此国内外学者已经开展了广泛的研究^[3-8]。第五代移动通信(5G)因具有高带宽、低时延、低功耗等优势,受到各行各业青睐,也将与泛在电力物联网深度融合。文献[7-8]分析了 5G 通信在泛在电力物联网中的应用场景。5G 电力物联网典型业务总体上分为控制和采集两大类,采集类包括低压集抄、站所内外场景的智能电网大视频应用等,未来采集对象趋于多媒体化,采集内容趋于视频化、高清化,采集频次趋于准实时,从单向采集向双向互动演进。

要满足这些发展趋势的需求,很有必要研究相应的 5G 通信新技术。其中,终端直通(device to device,D2D,)即是一种颇具潜力的性能增强技术,可支持泛在物联网对海量测量、音视频维检作业甚至电力虚拟现实等应用。D2D 是解决无线网络数据量快速增长带来的频谱资源紧张、网络负担加重等问题的一种重要技术途径,它不需要基站作为中继,允许终端之间通过复用基站的无线资源直接进行通信。D2D 技术的优点主要有减轻基站负担、增加网络吞吐量、能提供更可靠和更大容量的数据传输通道等^[9-11]。

鉴于 D2D 的技术优势,已经在多个行业领域得到了应用。文献[12]研究了 D2D 在地铁控制系统中的应用,提出了一种基于 D2D 技术的车—车通信与列控系统相结合的新型列车控制系统。在电力无线通信领域,文献[13-14]先后研究了能源互联网信息系统和通信系统的总体架构、关键技术等,提出以 D2D 为代表的 5G 关键技术在电力天地互联中的应用前景。电力部门在处置突发公共事件或自然灾害时,需要电力应急通信系统能及时传输现场语音视频等大容量信息,以便快速做出应对处理方案。文献[15]研究了 4G(LTE)宽带无线通信系统在应急无线通信系统中的应用,探索了单基站无线实验网对语音、视频业务的承载能力与实时性。文献[16]研究了 D2D 自组网通信系统在公网盲区建立高效稳定的电力应急通信网,验证了 D2D 技术能够更高效地传输突发事件现场的数据信息,更好满足电力应急通信的需求。

视频的多播/广播业务可借助无线信道天然的广播特性高效实现,同时,还可利用 D2D 的特性优化重传流程、降低基站负担、节约无线频谱资源。因此,研究 D2D 多播/广播业务的高效传输有很强的现实意义。文献[17-18]研究了网络编码技术在 D2D 通信中提高传输效率的若干方案。其中,文献[17]研究了 LTE 系统中 D2D 多播传输方案,提出基于网络编码的自动重传请求重传算法,减少了重传次数;文献[18]研究了网络编码在 D2D 多媒体广播中的重传策略,设计了一种面向批次传输和滑动窗口传输的最优广播重传算法。文献[19]提出了一种基于 D2D 通信的包接收率和包平均转发次数可控的多播方案,优化了中继节点最大转发次数。该方案虽可降低基站的多播负载,但需要新的信令支持,所需交互的链路质量评估信息也会占用一定的无线资源。

在 LTE 标准中,无线资源分配与调度有动态和半静态调度 2 种模式^[20]。动态调度在每个调度周期中做一个调度决定并将调度信息通过控制信令通知被调度的所有终端;半静态调度在一定的半静态调度周期内,为同一终端分配相同的无线资源,直到该次传输结束。

该文分析这 2 种调度模式在 D2D 多播重传中存在的问题,从信令效率的角度研究多播重传和反馈机制,在分析多种多播重传机制的信令效率的基础上,提出一种重传模式预选择的多播重传机制。

1 应用场景和已有方案

1.1 应用场景

该文考虑图 1 所示的一个现场维检作业场景。一队现场维检工作人员配备有音视频通信终端,在维检现场区域组成一个 D2D 簇,设由队长担任簇头,队员之间可互相直接通信。维检工作人员处于一个 5G 基站覆盖之下,通过由 5G 基站和 5G 核心网中配置的专属通道与智能电网应用平台中的控制中心连接,维检小队通过音视频向控制中心报告现场情况,并接受控制中心维检专家的远程指挥和作业指导。

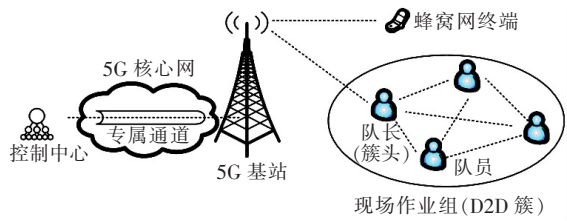


图 1 5G 网络 D2D 技术支持的现场维检作业场景

Figure 1 Scene of field maintenance and inspection with D2D in 5G network

1.2 D2D 多播重传问题

在上述场景中,音视频数据的传输需要大量带宽,适宜使用多播/广播将控制中心数据传输给 D2D 簇中每个维检队员。

在 D2D 多播中,基站可以用较高的速率向全簇终端多播相同的数据包,该多播速率不必确保簇内所有终端的正确接收。簇中成功接收的终端可用直接通信的方式向未能成功接收的终端重传该数据包。这样不但可大大增加多播吞吐量,而且由于短距离的链路具有较好的信道质量可以支持高速率重传,从而大幅提升多播传输的频谱效率。

对于未能正确接收数据的簇内终端,需要重传相应的数据:①基站向小区内多播用户传输一组数据;②未正确接收到多播数据的终端向基站反馈 NACK;③簇头向 NACK 节点重传所需数据包。上述 D2D 簇内重传有多种实现方式,涉及到的问题:所有簇内的 ACK 设备参与重传还是只有簇头向 NACK 设备重传数据;仅选择一个 ACK 设备向 NACK 设备重传还是多个 ACK 设备协作向 NACK 设备重传等。例如,可选定多个设备采用空时编码或网络编码来提高重传成功率。

D2D 多播重传是一个资源调度问题,基于 LTE 的 2 种调度模式,即动态和半静态调度模式,从重传决策的角度来看,相应的重传方案有集中式和分布式重传 2 种。

1.3 集中式重传

在集中式重传中,重传的决策和资源分配由基站集中处理,信令过程如图 2 所示。簇头或簇中的 UE 向基站报告 ACK/NACK 和 CQI 信息,基于这些信息基站决定簇内 D2D 重传模式。基站为 D2D 分配重传资源并通过 PDCCH 通知所有 UE。这种方式的优点是可以复用蜂窝网的控制信道,D2D 与

蜂窝网的 UE 兼容;另外信令延时很小。但是,基站需要 D2D 簇的 UE 提供每个 UE 的 ACK/NACK 状态、每对 UE 间的 CQI,这对蜂窝网上行信令是很大的负担。设 D2D 簇有 N 个 UE,簇头收集 D2D 链路的 CQI 和 ACK/NACK 状态并向基站上报,假定 ACK/NACK 状态用 1 bit 表示,CQI 用 3 bit 表示。所需 D2D 信令和蜂窝网信令的比特数如表 1 所示。

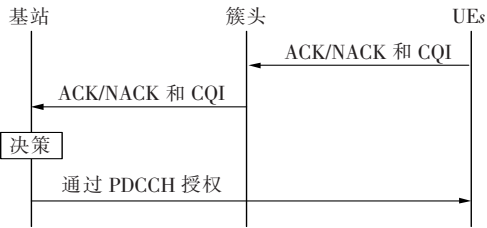


图 2 集中式重传的信令过程

Figure 2 Signaling process of centralized retransmission

表 1 集中式重传的信令开销

Table 1 Signaling cost of centralized retransmission		
信令类型	信令	比特数
D2D 信令	ACK/NACK	$N-1$
D2D 信令	D2D 链路 CQI	$3 \times N(N-1)/2$
蜂窝网上行信令	ACK/NACK	$N-1$
蜂窝网上行信令	D2D 链路 CQI	$3 \times N(N-1)/2$

1.4 分布式重传

在分布式重传中,簇内 UE 向簇头报告 ACK/NACK 和 CQI 信息,由簇头来决定重传的方式,信令过程如图 3 所示。该方案的优点是无需额外的蜂窝网上行信令。但该方案有 2 个主要的缺点:①簇头与簇内 UE 之间需要额外的控制信道;②无论重传是否必要,基站都要为 D2D 重传预留资源,导致较严重的资源浪费。如果所有多播都成功则无需重传,如果所有多播都失败则需要基站重新多播,预留资源都没有必要。更重要的是,因为 D2D 重传资源不是根据 ACK/NACK 和 D2D 链路的 CQI 信息来分配的,所以 D2D 重传的 MCS 应该根据最差的 D2D 链路来决定,以确保重传成功。例如,D1、D2 和 D3 是簇内的 3 个设备,D1 和 D2 是 ACK 设备,D3 是 NACK 设备,假如 D1-D2 链路最差,则 D2D 重传只能发生在 D1-D3 或 D2-D3 链路上。那么,由 D1-D2 来确定的 MCS 显然会导致传输效率的损失。

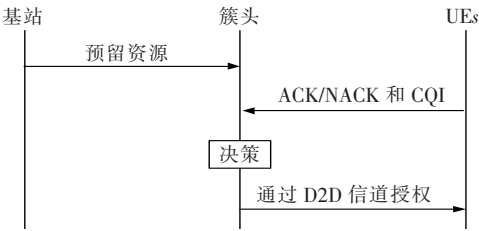


图 3 分布式重传的信令过程

Figure 3 Signaling process of distributed retransmission

2 一种新的 D2D 多播重传方案

针对上述集中式重传方案信令开销太大,而分布式重传方案又存在预留资源浪费的问题,该文提出一种新的重传方案。新方案考虑 D2D 簇内链路状态,由簇头确定相应的重传模式,并将预选的重传方案反馈到基站进行重传。新提出方案的信令流程如图 4 所示,具体步骤如下。

- 1)基站为 D2D 簇内所有 UE 多播数据。
- 2)UE 向簇头反馈接收状态。正确接收数据的 UE 反馈 ACK,否则反馈 NACK 和 CQI。
- 3)簇头根据各 UE 的反馈估计所有 D2D 链路的状况。
- 4)簇头根据 D2D 链路的状态,确定重传模式、重传 MCS 和重传收发终端等参数。
- 5)簇头向基站反馈重传模式、MCS 等参数。
- 6)基站根据簇头的反馈为重传分配资源,并通过 PDCCH 向参与重传的 UE 发送信令。

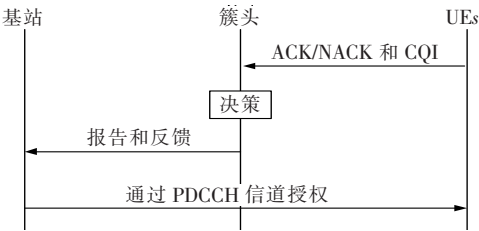


图 4 提出的重传方案

Figure 4 Scheme of proposed retransmission method

重传 MCS 是重传时 MCS 格式的索引,在 LTE 系统中可用 5 bit 表示;重传收发终端位图是用来指定重传的发送方和接收方。用一个包含 N 位的位图来表示,其中 N 是 D2D 簇中终端的数量,第 n 位数值为 1,则表示第 n 个终端重传多播数据。例如,

在有 6 个 UE 的 D2D 簇中,UE1 是簇头,UE1~UE3 是 ACK 终端,UE4~UE6 是 NACK 终端。假如由 UE2 重发多播数据给 UE4~UE6,则对应的位图为‘010000’。

在该方案中,基站和簇头维护一张重传模式表,表中每个重传模式有相应的索引值,并保持两方的表完全相同。簇头确定重传模式,并通过蜂窝网上行控制信道将选择结果反馈给基站。反馈结果包括 3 项内容:重传模式索引、重传 MCS 和一个基于 UE 的收发设备位图。基站为重传分配资源并通过蜂窝控制信道 PDCCH 调度相应的 UE。

在该方案中,定义 4 种重传模式,具体重传模式如表 2 所示。

表 2 重传模式定义

Table 2 Definition of retransmission mode

重传模式	重传方式	是否需要位图
0	全部 ACK,无需重传	不需要
1	全部 NACK,需要基站重发	不需要
2	由位图指定的 ACK 终端进行 D2D 簇内重传	需要
3	保留,可用于扩展	需要

特别地,在步骤 4 中,簇头根据各 UE 反馈的链路状态可对重传参数在簇内进行全局优化配置,通过合理选择重传模式、重传 MCS 和重传收发终端等参数,避免传输瓶颈,充分利用簇内多信道的分集增益,从而进一步提升重传效率。

3 性能分析和仿真验证

3.1 信令开销分析

与分布式方式相比,该文方案由簇头进行 D2D 重传的链路自适应,无需预先为 D2D 重传分配资源,避免了资源浪费。另外,基站是通过蜂窝网控制信令进行资源调度,无需设计额外的 D2D 簇头与 UE 间的信令。与集中式方法相比,该方案的额外代价是需要基站和簇头维护一个重传模式表,由于表规模很小,对内存几乎没有影响。该文方法最大的优势在于在蜂窝网上行信令方面有很大的减少。新方案与集中式重传的信令开销对比如表 3 所示。

表 3 信令开销对比

Table 3 Comparison of the signaling cost bit		
重传方案	蜂窝网上行信令	D2D 信令
集中式方案	$3 \times N(N-1)/2 + N$	$3 \times N(N-1)/2 + N - 1$
新方案	$7 + N$	$3 \times N(N-1)/2 + N - 1$

2 种方案所需的 D2D 信令开销相同,用于终端向簇头汇总 ACK 状态和链路状态。由于仅由簇头向基站反馈重传模式等参数,故新方案的蜂窝网上行信令开销比集中式重传方案有很大的降低。在集中式方案中,蜂窝网上行信令的比特数与簇内节点数的平方成正比,而新方案的蜂窝网上行信令开销与簇内节点数成正比,簇内节点数越多,新方案在信令开销上的优势越明显。

新方案与集中式方案的蜂窝网信令开销对比如图 5 所示。例如, $N=4$ 时集中式方式的上行信令需要 22 bit,而新方案只需要 11 bit,开销仅为集中式方案的一半。若 $N=8$,则集中式方案的信令开销有 92 bit,而新方案只有 15 bit,仅为集中式方案的 16%。若 $N=10$,则集中式方案的信令开销有 145 bit,而新方案只有 17 bit,仅为集中式方案的 12%。簇内节点数越多,新方案的信令开销优势越明显。

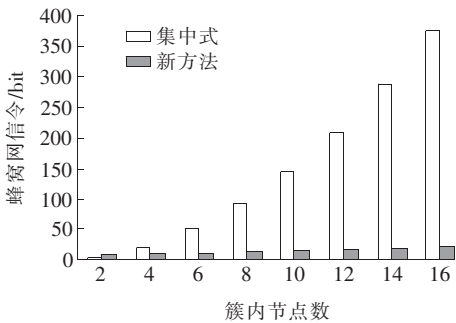


图 5 新方案与集中式方案的信令开销对比
Figure 5 Signal comparison of two methods

3.2 仿真模型

为了验证新方案的重传效率,采用 Matlab 进行仿真实验。不失一般性,假设所有的终端在 D2D 协作簇内均匀分布,D2D 链路的小尺度衰落为慢变平坦瑞利衰落模型,终端间的 D2D 通信采用自适应编码调制技术以充分利用信道容量;编码调制格式共分为 15 级。

在仿真中,D2D 协作簇的大小分别设定为 4、6、10 和 16,以观察协作簇的大小对算法性能的影响。

对于每一种进行仿真簇的大小,随机产生 D2D 协作簇(包括终端位置和链路质量)10 000 次,统计性能参数。

3.3 仿真结果及分析

重传效率的性能指标为归一化资源消耗,定义为完成向簇内所有 NACK 终端成功重传 1 bit 信息所需的时频资源量,单位为 $\text{Hz} \cdot \text{s}$ 。3 种重传方案的资源消耗性能对比如图 6 所示,簇中节点数为 10。横坐标是基站多播时 NACK 节点所占的比例,从 10%到 90%不等。从图 6 中可以看出,该文提出的新方法明显优于集中式和分布式 2 种重传方案。随着 NACK 终端的增加,集中式方式由于需要上报的数据量较大导致资源消耗增加较多,分布式方案由于预留资源的影响,资源消耗也会随着 NACK 节点数的增加而增加。而该文所提方法由于克服了集中式和分布式中的资源消耗的主要因素,因此,资源消耗量是 3 个方案中最少的。另外,由于所提方案在文 2 步骤 4 中自适应地选择最优重传参数,也进一步提升了重传效率。

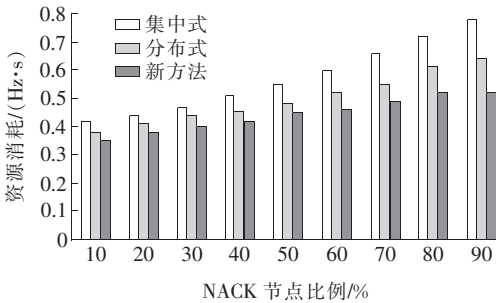


图 6 资源消耗性能对比
Figure 6 Performance comparison of retransmissions

3 种重传方案在簇内节点分别为 4、6、10 和 16 时的平均重传次数(完成传输 100 个数据包时发生重传的平均次数)对比如图 7 所示,可以看出,集中式的重传次数最多,分布式次之,该文所提的方案的重传次数最少。原因在于该文方法具有更高的资源利用率,即降低了信令开销,又借助 D2D 节点间更好的链路进行数据重传,提高了重传成功率,总体上降低了重传次数。从图 7 中还可以看到,随着簇内节点数的增加,重传次数相应地减少,体现了 D2D 通信的优势。另外,3 种方案的平均传输时延与重传次数具有相同的趋势,这从平均传输时延与重传次数之间的关系不难理解。

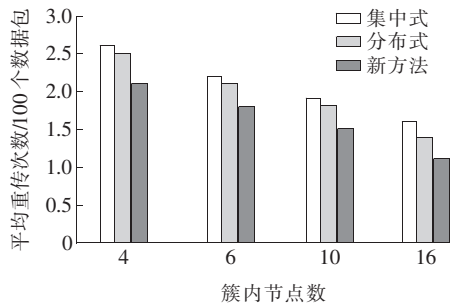


图 7 重传次数对比

Figure 7 Comparison of retransmissions times

4 结语

该文研究了适用于电力物联网的 D2D 多播重传和反馈方案。基于 LTE 中的动态调度和半静态调度模式,分析了对应的集中式和分布式重传方案的不足,进而提出一种新的基于重传模式预选的方案。新方案通过簇头汇总 D2D 多播 ACK 状态和簇内链路质量,避免了集中式方案中上行汇报信令开销太大的问题。同时,通过让簇头来决定重传方案后再上报基站的方式,避免了分布式重传方案中预留资源带来的资源浪费问题。簇头充分考虑了 D2D 链路差异,根据 D2D 链路质量自适应地选择最优传输节点的方法,可充分利用 D2D 链路的多信道分集增益。理论分析和计算机仿真验证了方案在信令开销、传输效率、平均重传次数和传输时延方面的有效性。该方案对设计 5G 网络 D2D 传输技术有一定参考意义。

参考文献:

- [1] 国家电网有限公司. 泛在电力物联网白皮书 2019[EB/OL]. <http://www.chinasmartgrid.com.cn/news/20191014/633935.shtml>, 2019-10-14.
- [2] 曹一家,何杰,黄小庆,等. 物联网技术在输变电设备状态监测中的应用[J]. 电力科学与技术学报, 2012, 27(3): 16-27.
CAO Yijia, HE Jie, HUANG Xiaoqing, et al. Application of the internet of things technology in power transmission equipment condition monitoring[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2012, 27(3): 16-27.
- [3] 张立静,盛戈皞,江秀臣. 泛在电力物联网在变电站的应

用分析与研究展望[J]. 高压电器, 2020, 56(9): 1-10.

ZHANG Lijing, SHENG Gehao, JIANG Xiuchen. Application analysis and research prospects of ubiquitous power internet of things in substation[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(9): 1-10.

- [4] 王哲,赵宏大,朱铭霞,等. 电力无线专网在泛在电力物联网中的应用[J]. 中国电力, 2019, 52(12): 27-38.
WANG Zhe, ZHAO Hongda, ZHU Mingxia, et al. Application of power wireless private network in ubiquitous power internet of things[J]. Electric Power, 2019, 52(12): 27-38.
- [5] 曾鸣,王雨晴,李明珠,等. 泛在电力物联网体系架构及实施方案初探[J]. 智慧电力, 2019, 47(4): 1-7+58.
ZENG Ming, WANG Yuqing, LI Mingzhu, et al. Preliminary study on the architecture and implementation plan of widespread power internet of things[J]. Smart Power, 2019, 47(4): 1-7+58.
- [6] 何奉禄,陈佳琦,李钦豪,等. 智能电网中的物联网技术应用与发展[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(3): 58-69.
HE Fenglu, CHEN Jiaqi, LI Qin hao, et al. Application and development of internet of things in smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(3): 58-69.
- [7] 陈皓勇,李志豪,陈永波,等. 基于 5G 的泛在电力物联网[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(3): 1-8.
CHEN Haoyong, LI Zhihao, CHEN Yongbo, et al. Ubiquitous power internet of things based on 5G[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(3): 1-8.
- [8] 王毅,陈启鑫,张宁,等. 5G 通信与泛在电力物联网的融合:应用分析与研究展望[J]. 电网技术, 2019, 43(5): 1575-1585.
WANG Yi, CHEN Qixin, ZHANG Ning, et al. Fusion of the 5G communication and the ubiquitous electric internet of things: Application analysis and research prospects[J]. Power System Technology, 2019, 43(5): 1575-1585.
- [9] 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 Junyi, GONG Zhishuai, FU Jieli, et al. A survey on device-to-device communication[J]. Journal of Guilin University of Electronic Technology, 2014, 34(2): 114-119.
- [10] 范康康,董颖,钱志鸿,等. D2D 通信的干扰控制和资源

- 分配算法研究[J]. 通信学报, 2018, 39(11): 199-206.
- FAN Kangkang, DONG Ying, QIAN Zhihong, et al. Research on the interference control and resource allocation in D2D communication[J]. Journal on Communications, 2018, 39(11): 199-206.
- [11] 颜学文, 董超, 屈毓铤. 基于 D2D 通信的流量卸载技术综述[J]. 计算机科学, 2018, 45(11): 45-51.
- YAN Xuewen, DONG Chao, QU Yuben. Survey of D2D-based traffic offloading[J]. Computer Science, 2018, 45(11): 45-51.
- [12] 陈耀华, 贾鸿. D2D 技术应用于地铁控制系统中的方案研究[J]. 铁道通信信号, 2018, 54(8): 12-14.
- CHEN Yaohua, JIA Hong. Study on application of D2D technology in subway control system[J]. Railway Signalling and Communication, 2018, 54(8): 12-14.
- [13] 王继业, 郭经红, 曹军威, 等. 能源互联网信息通信技术综述[J]. 智能电网, 2015, 3(6): 473-485.
- WANG Jiye, GUO Jinhong, CAO Junwei, et al. Review on information and communication key technologies of energy internet[J]. Smart Grid, 2015, 3(6): 473-485.
- [14] 王继业, 孟坤, 曹军威, 等. 能源互联网信息技术研究综述[J]. 计算机研究与发展, 2015, 52(5): 1109-1126.
- WANG Jiye, MENG Kun, CAO Junwei, et al. Information technology for energy internet: A survey[J]. Journal of Computer Research and Development, 2015, 52(5): 1109-1126.
- [15] 徐长福, 王小波, 周超, 等. 面向应急通信的 LTE 电力无线专网应用研究[J]. 电力信息与通信技术, 2015, 13(1): 27-31.
- XU Changfu, WANG Xiaobo, ZHOU Chao, et al. Application research of the LTE electric power wireless communication private network for emergency communication[J]. Electric Power ICT, 2015, 13(1): 27-31.
- [16] 黄浦, 李宏军, 刘重阳, 等. 融合小波的 D2D 技术在电力应急通信中的应用[J]. 信息技术, 2019(5): 71-75.
- HUANG Pu, LI Hongjun, LIU Chongyang, et al. Application of D2D technology of fusion wavelet in power emergency communication[J]. Information Technology, 2019(5): 71-75.
- [17] 王静, 刘向阳, 杨洋, 等. LTE 通信系统中 D2D 多播传输方案设计[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2016, 43(3): 101-107.
- WANG Jing, LIU Xiangyang, YANG Yang, et al. Design of the D2D multicast transmission scheme in the LTE communication system[J]. Journal of Xidian University, 2016, 43(3): 101-107.
- [18] 牛腾, 张冬梅, 许魁, 等. 基于 D2D 的无线多媒体网络编码广播重传策略[J]. 中国科学: 信息科学, 2018, 48(2): 205-220.
- NIU Teng, ZHANG Dongmei, XU Kui, et al. Video distortion reduction with instantly decodable network coding and device-to-device communications[J]. Scientia Sinica(Informationis), 2018, 48(2): 205-220.
- [19] 池凯凯, 汤泽锋, 祝驿楠, 等. 无线蜂窝网中用于 D2D 多播簇的高效多播方案[J]. 计算机科学, 2019, 46(1): 169-174.
- CHI Kaikai, TANG Zefeng, ZHU Yinan, et al. Efficient multicast schemes for D2D multicast cluster in wireless cellular network[J]. Computer Science, 2019, 46(1): 169-174.
- [20] 3GPP TS 36.321. Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA)-Medium access control (MAC) protocol specification[S].