

基于 D2D 的电力物联网及其组播重传技术

黄 强, 秦剑华, 胡成博, 路永玲, 陶风波, 王 真
(国网江苏省电力有限公司 电力科学研究院, 南京 211103)

摘 要:针对基于资源竞争与应答重传的传统自组网无法满足电力物联网需求的问题,提出了一种新型的基于蜂窝基础设施的无线自组网架构。该方案融合终端间直接通信(D2D)与自组网技术,利用集中式资源调度与终端间互相协作的优点,可以大幅缩短网络部署时间,提升网络鲁棒性。同时,考虑 D2D 簇内各终端的蜂窝网链路的阴影衰落具有强相关性,从而在某些场景中存在接收节点都译码失败的情况,现有重传方案效率不高。为解决此问题设计了协作簇内快速重传方案。新方案无需基站重传,而由终端间的协作传输和软信息合并完成组播重传,从而极大地提升了电力自组网的传输效率和鲁棒性。仿真结果表明,所提方案在这种场景中平均重传次数和传输时延性能都得到了改善。

关键词:无线自组网;蜂窝网络;电力物联网;终端直接通信;D2D

DOI:10.15938/j.jhust.2021.05.016

中图分类号: TM76 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2683(2021)05-0124-06

D2D-based Electric Internet of Things and its Retransmission Scheme of Multicast

HUANG Qiang, QIN Jian-hua, HU Cheng-bo, LU Yong-ling, TAO Feng-bo, WANG Zhen
(Research Institute, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 211103, China)

Abstract: A novel wireless ad hoc network architecture based on cellular infrastructure is proposed for electric internet of things to address the problem in traditional wireless Ad hoc networks. The proposed scheme combines D2D with Ad Hoc network, benefiting from the advantage of centralized resource scheduling and cooperation mechanism, the deployment time and robustness of the network can be greatly improved. At the same time, considering the strong correlation of shadow fading of cellular links in a D2D cluster, the probability of decoding failure for all receiving nodes could dramatically increases in a specific scenario. To address the problem, a fast retransmission and error correction scheme is designed. The proposed scheme exploits the soft information combine technique. Therefore, the base station does not need to retransmit the error packages. Consequently, the capacity of self-healing and robustness of electric internet of things is enhanced. Simulation results show that the proposed cellular D2D ad hoc network and retransmission scheme can achieve better performance in terms of both average number of retransmission and network delay.

Keywords: wireless ad hoc; cellular network; electric internet of things; device to device communication; D2D

收稿日期: 2021-03-05

基金项目: 国家电网指南项目(5500-202018068A)。

作者简介: 秦剑华(1975—),男,博士,高级工程师;

胡成博(1984—),男,硕士,高级工程师。

通信作者: 黄 强(1974—),男,硕士,高级工程师, E-mail: huangqiangnj@163.com.

0 引言

智能电网是电力系统发展的必然趋势,而电力物联网是智能电网中的关键技术,围绕电力系统各环节充分应用先进通信技术,实现发、输、变、配、用、调等各类设备和人员的全景感知、泛在接入^[1-2]。这要求高性能的电力通信网络作为支撑,对网络的可靠性和鲁棒性有很强要求。以无中心无基础设施为特征的无线自组网(Ad hoc)技术,例如基于 WiFi、ZigBee、蓝牙等的 Mesh 网络^[3],在电力设备监控等应用中已经有了广泛的研究。

除了 Ad hoc 网络,有基础设施的蜂窝移动通信网络(如 GSM、WCDMA、LTE 等)是另一种广泛应用的构架。这两种架构的设计思想完全不同,因此具有各自的特征和适用场景。针对这两种网络架构各自的优势与不足,一种可行的方案是将 Ad hoc 网络与蜂窝网络相融合。机会驱动多路访问(ODMA)技术^[4-5]是 3GPP 在 3G 时代提出的一种传统蜂窝网与 Ad hoc 结合的接入技术。在 ODMA 网络中既有基站接入,也允许用户互相中继,终端可以灵活选择蜂窝单跳工作方式或终端间多跳工作方式。文[6]在研究应急通信自组网技术时,也提出了集成蜂窝网和 Ad hoc 网络的混合式无线通信网络的构想,在基站受损时终端自动转换到 Ad hoc 模式工作。文[7]探讨了宽带蜂窝网络在安全领域的局限性,进而提出在无基础设施时通过终端间中继的方式实现自组网。但是现有文献都没有涉及具体的方案,而且所提构想仅是两种网络的简单结合,不能完全利用两者的优势。

在 Ad hoc 自组网与蜂窝网融合方面,终端直通(D2D, Device-to-Device)是一种很有潜力的 5G 增强技术,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^[8-13]。D2D 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。

D2D 已经在电力无线通信领域获得了较多应用。文[2]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 关键技术电力天地互联中的应用前景,特别是 D2D 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。视频的广播或组播业务可借助无线信道天然的广播特性来高效地实现,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^[11-12]。无线组播将同一内容同时传播给多个接收者,非常适合数据分发和音视频播报等应急通信应用。

本文以一个电力物联网音视频巡检场景为例,研究蜂窝无线网络中采用 D2D 实现自组网的融合架构,并在此基础上,针对此架构中的组播重传提出一种优化方案。

1 新型蜂窝 D2D 自组网及模型

1.1 新型蜂窝 D2D 自组网

考虑一个电力物联网中的维检现场作业场景:一队工作人员配备音视频通信终端,在现场区域构建一个自组网,队员之间可互相直接通信,亦可多跳传输,自组网终端亦可由队员遥控的巡检无人机。维检工作人员处于一个蜂窝基站覆盖之下,通过由基站和 5G 核心网中配置的专属通道与智能电网应用平台的控制中心连接。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。这种下行数据流适合使用组播业务进行传输。

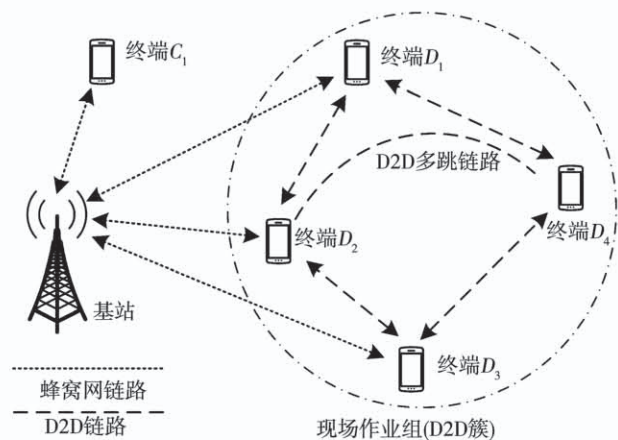


图1 新型基于蜂窝 D2D 的自组网

Fig. 1 A novel cellular D2D-based ad hoc network

针对上述场景,本文提出一种新的蜂窝 D2D 自组网。如图1所示,由基站、蜂窝网终端 C₁ 和 D2D 簇构成,其中 D2D 簇由地理上彼此接近的终端 D₁、D₂、D₃ 和 D₄ 组成,簇内终端可以互相直接通信,或经多跳通信(如图中 D₂ 与 D₄ 之间经 D₁ 通信)。簇内终端可处于蜂窝基站覆盖范围之外(如图中 D₄) ,

通过 D2D 实现覆盖扩展。当某终端与 D2D 簇地理上较远无法加入 D2D 簇时(如图中 C_1),其通过基站间的蜂窝链路与其他终端通信。

1.2 新型蜂窝 D2D 自组网模型

在上述蜂窝 D2D 自组网中,定义 D2D 协作簇由 N 个终端构成集合 $V = \{D_1, D_2, \dots, D_N\}$,终端位置随机分布,空间位置服从泊松点分布,满足密度为 λ 的 λ 泊松点过程。

设终端 D_i 接收基站下行信号的 SINR 为

$$\gamma_i = P_t PL_i / (I_i + \sigma_i^2) \quad (1)$$

其中: P_t 、 I_i 和 σ_i^2 分别为基站发射功率、干扰功率和噪声功率; PL_i 为路径损耗,可表示为 $PL_i = Ad_i^{-\alpha} X_i \psi_i$,在对数域可写为 $PL_i = Y_i + \psi_i + X_i$, $Y_i = A + \alpha \ln d_i$,其中 Y_i 是大尺度传播损耗, ψ_i 为阴影衰落, X_i 是小尺度瑞利衰落效应,且 X_i 、 Y_i 与 ψ_i 相互独立。 A 和 α 是确定传播模型的常数: A 与参考点的位置选择有关, α 是衰减指数的 10 倍, d_i 表示终端与基站间的距离。小尺度瑞利衰落 X_i 服从负指数分布。阴影衰落 ψ_i 主要受地貌和障碍物影响,服从对数正态分布,在对数域,其概率密度函数为

$$p_\psi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2)$$

其中 σ 为阴影效应标准差。

1.3 新型蜂窝 D2D 自组网优势

新型蜂窝 D2D 自组网充分利用了 5G 通信网络“三高两低”的优势,即高速率、高容量、高可靠性、低时延与低能耗^[2],完全匹配泛在电力物联网的需求,为实现智能电网提供了技术保障。从上述的蜂窝 D2D 自组网模型,易知 D2D 簇内终端间距离大幅减小,提升了接收信号能量;另一方面,借助蜂窝网时频资源集中控制分配的优势,减少终端间干扰,可避免 Ad hoc 中分布式资源竞争机制存在的干扰管理效果不佳的问题。因而,在蜂窝 D2D 自组网中,无线信号的 SINR 有很大改善,即可提升终端间传输速率,又可通过降低发射功率达到节能的效果。

新型蜂窝 D2D 自组网在网络拓扑管理方面 also 具有很强的优势。在 Ad hoc 网络中,分布式的网络拓扑和路由机制使得拓扑管理和路由维护变得特别低效、繁琐和复杂^[11]。但是,在所提的蜂窝 D2D 自组网中,利用蜂窝网集中管理的优势,由基站实现全局优化的资源分配、调度与路由,避免了 Ad hoc 在拓扑和路由管理方面的难题,简化了网络设计,提高了资源利用率。

2 蜂窝 D2D 自组网中的组播优化

无线组播将同一内容同时传播给多个接收者,非常适合数据分发和音频视频播报等应急通信应用。当某些接受者未能正确接收组播数据包时,需要重传该数据包。本节在所提蜂窝 D2D 自组网架构下提出一种改进组播效率的方案。

2.1 已有组播重传方案

在 3GPP 中,定义了一种基本的重传方案。在该方案中,当某终端未能正确接收组播数据包时,由基站向该终端重传数据^[8]。此方案为基准方案,效率较低。以下简称为方案 1。

在 D2D 组播中,基站可以用较高的速率向全簇终端组播相同的数据包,该组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 D2D 链路由未能成功接收的终端重传该数据包。这样不但可大幅增加组播吞吐量,而且,由于短距离的 D2D 链路具有更好的信道质量,能支持高速率重传,从而大幅提升组播传输的效率^[8]。以下将此方案称为方案 2,过程如下:

第 1 步:基站向小区内组播用户传输一组数据;

第 2 步:正确接收的终端反馈确认标识 ACK,未正确接收的终端反馈出错标识 NACK;

第 3 步:D2D 簇内的 ACK 终端向 NACK 终端重传数据,直到所有终端都正确接收,或超过最大重传次数,请求基站重传。

在此方案中,利用 D2D 链路可实现 D2D 自组网中高效的组播数据重传。但是,在此方案中,重传只能由 ACK 终端向 NACK 终端发送,未能利用 NACK 终端接收数据中的信息,因此效率仍有提升空间。

2.2 D2D 簇阴影衰落强相关性

对于地理上互相接近的 D2D 终端,它们到基站的路径上可能存在相同的障碍物遮挡,因此经历相同的阴影衰落,即基站到同一 D2D 簇的链路间阴影衰落具有很强的相关性。阴影衰落相关系数主要取决于角度和距离:链路间的夹角越小则相关系数越大;终端间的距离越近则相关系数也越大^[12]。

考察一个蜂窝无线链路,根据编码方案和误块率(BLER)目标,存在 SINR 门限 $\gamma_{\min}$,当其信干噪比 γ 小于 $\gamma_{\min}$ 时发生中断,即 D2D 终端不能正确解码数据包。结合式(1)与式(2)有中断概率

$$P_{\text{out}}(\gamma_i, \gamma_{\min}) = \Pr\left(\frac{P_t A d_i^{-\alpha} X_i \psi_i}{I_i + \sigma_i^2} < \gamma_{\min}\right) \quad (3)$$

对 D2D 簇内的多个终端,由于它们的蜂窝链路间阴影衰落具有强相关性,特别是当基站与簇之间有较大障碍物或建筑物时。此时,在式(3)中,终端与基站间距离 d 、衰减指数 α 、阴影衰落影衰落 ψ 都有十分相近的特性和取值,决定终端的中断概率。因此,在 D2D 簇内,当其中一个链路中断时,另一链路中断概率并不独立,有

$$\begin{aligned} P_{\text{out}}(\gamma_i, \gamma_j, \gamma_{\min}) &= \Pr(\gamma_i < \gamma_{\min} | \gamma_j < \gamma_{\min}) \geq \\ P_{\text{out}}(\gamma_i, \gamma_{\min}) P_{\text{out}}(\gamma_j, \gamma_{\min}) \end{aligned} \quad (4)$$

簇内所有终端同时中断的情况可从上式扩展,虽然此时不易得出其闭合表达式,但可以通过数值仿真的方法得出中断概率。图2为一组仿真结果,仿真检验了阴影衰落对簇内多个终端都不能正确接收基站组播包(NACK)的概率,比较了自由传播为主(场景1)与 D2D 簇与基站间存在遮挡物(场景2)时终端发生全 NACK 的中断概率。调整 MCS 格式使得单个终端 NACK 的概率为 50%。仿真传输 10 000 个组播数据包,统计数据包传输时发生 NACK 的终端的比率。

由仿真结果可以看出,与场景1相比,在场景2中,多终端发生 NACK 的概率有较大幅度的增加。其中,3 终端全 NACK 的概率由 18% 增加到了 27%;5 终端全部 NACK 的概率由 6% 增加到 19%。

上述分析及仿真结果表明,在某些条件下 D2D 簇易发生所有终端都无法正确接收蜂窝组播数据的情况。此时,方案1和2都不可避免地要从基站进行重传,导致额外的资源消耗,从而降低了网络吞吐量。因此,有必要研究在阴影衰落相关性较强的场景中提升组播重传优化方法。

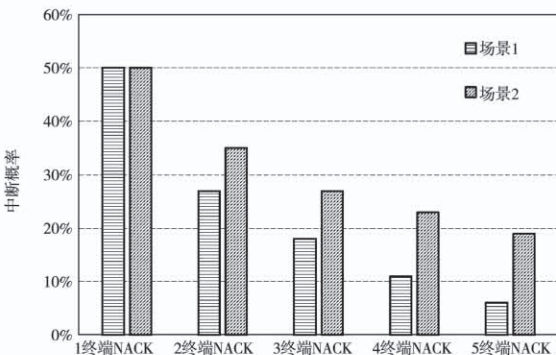


图2 在两种场景下多终端 NACK 的概率

Fig. 2 Probability of multiple NACKs in two scenarios

2.3 D2D 簇阴影衰落强相关性

为解决上述问题,本文提出一种改进的组播重传方案。该方案的基本原理是,利用软信息合并机制,在 D2D 簇中进行协作传输,充分利用簇内终端已经接收到的数据中的信息,提升组播效率。当接收数据在解码失败的情况下,其中依然包含有一定的信息。软信息合并利用这部分信息,将错误数据包保存在存储器中,并与后续接收到的重传数据包进行合并,得到一个比单独解码更可靠的数据包,即“软合并”过程,然后对此数据包进行解码。而且,由于多个重传副本经历不同的信道条件,使得软信息合并解码获得了部分分集增益,进一步提高了传输的可靠性。

新方案的优化重传过程如下:

第1步:基站向组播用户传输一组数据;

第2步:未正确解码的终端反馈 NACK;

第3步:簇内终端向 NACK 终端组播自己收到的数据包,包括 NACK 终端也将自己未正确解码的数据包向其他 NACK 终端组播;

第4步:NACK 终端接收到多个组播数据包后,使用软信息合并,解码组播数据包;

第5步:如果解码成功,则结束;否则返回第3步,直到所有终端都正确接收,或超过最大重传次数。

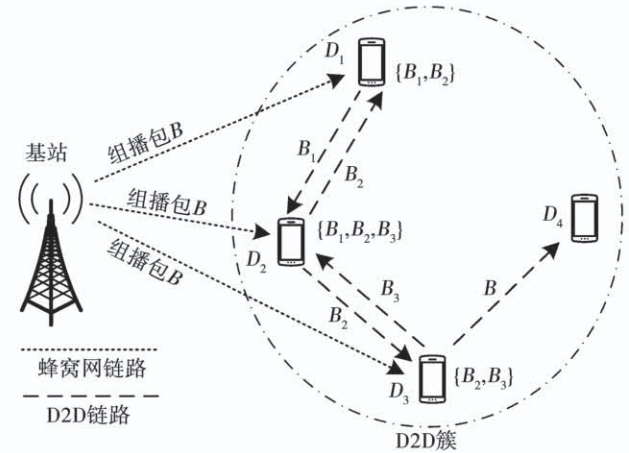


图3 基于软信息合并的组播重传示例

Fig. 3 An example of multicast retransmission based on soft information combination

图3为改进的蜂窝 D2D 自组网组播重传方案通信过程的一个示例。基站将组播数据包 B 通过下行链路发送给 D2D 簇内终端 D_1 、 D_2 和 D_3 ,设这3个终端都未能正确解码组播包 B ,它们接收数据包分别记为 B_1 、 B_2 和 B_3 。此时, D_1 将 B_1 发送给 D_2 ,

D_3 将 B_3 发送给 D_2 。经过 D2D 簇内数据交互之后,每个终端具有了组播包 B 的多个副本,如: D_1 拥有 $\{B_1, B_2\}$, D_2 拥有 $\{B_1, B_2, B_3\}$, D_3 拥有 $\{B_2, B_3\}$ 。然后,各终端利用软信息合并技术,从中解码出组播包 B 。额外地,在 D_3 正确解码出 B 之后,可通过 D2D 链路 $D_3 - D_4$ 将 B 发送给 D_4 。至此,在无需基站重传的情况下,组播包 B 被簇中的各个终端正确接收。如果经上述过程仍未能正确解码组播包 B ,则可请求基站重传。

3 计算机仿真

3.1 仿真模型参数

为了验证新方案的重传效率,采用 MATLAB 进行仿真实验。终端分布服从密度为 $\lambda = 5$ 的泊松点分布,D2D 链路的阴影衰落服从对数正态分布,小尺度衰落采用慢变平坦瑞利衰落模型。其他参数见表 1。

表 1 仿真模型参数	
Tab. 1 Parameters of simulation model	
参数	值
小区半径 /m	≤ 500
系统带宽 /MHz	20
载频 /GHz	2
基站发射功率 /dBm	≤ 24
终端发射功率 /dBm	≤ 15
蜂窝链路中断门限 /dB	10
D2D 链路中断门限 /dB	5
路损指数 α	2.5
阴影效应标准差	5

在距离基站 400 m 处布放由 5 个终端组成的 D2D 簇。设置两个仿真场景,场景 1:基站与 D2D 簇之间以自由空间路损为主,阴影衰落相关性弱;场景 2:基站与 D2D 簇之间设置一幢大楼,阴影衰落相关性强。仿真传输 10 000 个组播数据包后进行统计分析。

3.2 仿真结果及分析

首先,在上述阴影衰落相关性较强的场景 2 下,仿真检验本文所提基于软信息合并的 D2D 簇内重传的效率,仿真结果如图 4 所示。从中可以看到,在 SINR 为 5 dB 时,一次传输的 BLER 约 20%,但是经与一个 D2D 包合并后 BLER 大幅降低,重传成功率接近 100%;在 SINR 为 0 dB 时,首次传输 BLER 达 80%,2 个数据包合并解码后 BLER 降低到 56%,

3 个数据包合并解码的 BLER 降低到 10% 左右,4 数据包合并解码的成功率达 99%。这表明,即便在低信噪比条件下,最多接收 3 个簇内协作传输的数据包进行 4 包合并,即可实现数据包的正确解码。

在上述两种场景下,对比了 3 种方案的成功传输一个组播数据包时通过基站进行的平均重传次数,结果如图 5 所示。由图可见,方案 1 在两种场景下的平均重传次数都是最高的,主要原因是该方案中只要有一个终端未能成功接收组播包就需要基站重传。相比而言,方案 2 的重传次数有大幅度的降低,这得益于 D2D 簇内终端间协作传输降低了基站重传发生的次数。在场景 2 下,方案 2 的重传次数略小于场景 1,但是两者相差不多。新方案的平均重传次数比方案 2 有改善,其中在场景 1 时与方案 2 性能接近。在场景 2 中,新方案的平均重传次数比方案 2 有明显的改善,原因在于此场景下发生 D2D 簇内所有终端 NACK 的概率较高,方案 2 频繁地需要基站重传,而新方案可借助簇内终端协作传输和软信息合并,在无需基站重传的情况下完成组播的正确接收。

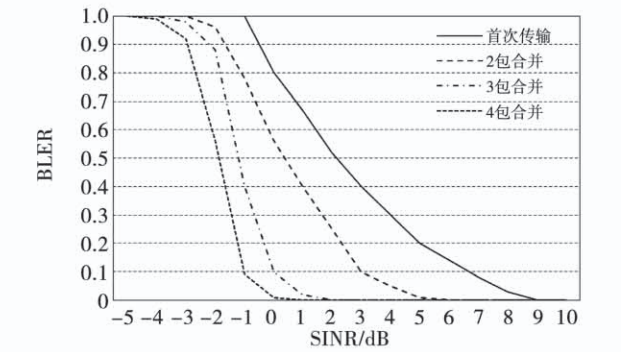


图 4 软信息合并重传的 BLER
Fig. 4 BLER of retransmission based on soft information combination

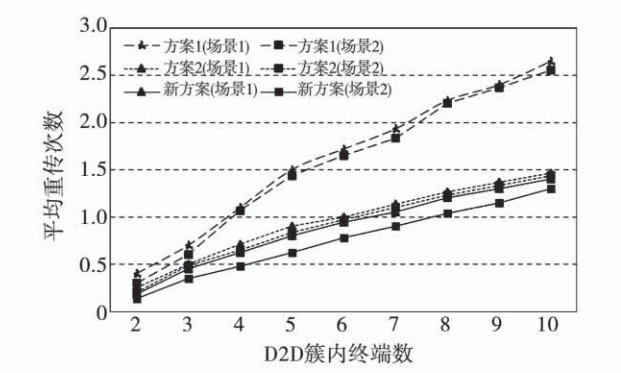


图 5 基站的平均重传次数对比
Fig. 5 Comparison of average retransmission number of BS

表 2 平均传输时延对比

Tab. 2 Comparison of average transmission delay

	场景 1 /ms	场景 2 /ms
方案 1	6.25	8.32
方案 2	5.21	5.47
新方案	4.17	3.59

最后,仿真对比了 3 种方案的平均传输时延,结果如表 2 所示。各方案在场景 1 时传输时延皆较低,方案 2 比方案 1 有明显改善,而新方案性能接近方案 2。这主要是由于在场景 1 中发生多终端全 NACK 的概率较小,新方案适用的机会少。在场景 2 中,方案 1 和方案 2 的平均传输时延比场景 1 都有较大增加,而新方案虽然也比场景 1 有所增加,但是与其他两个方案相比,平均传输时延有较大幅度的降低。这主要是由于新方案避免了绝大多数基站的数据重传。从另一个角度来看,由于传输时延与重传次数有近似正比的关系,这从传输时延与重传次数之间的关系也不难理解。因此,新方案具有更优的传输时延性能。

4 结 语

研究了电力物联网场景下的一种新型蜂窝 D2D 自组网及其组播优化方案。通过结合蜂窝网集中控制与 D2D 簇内通信的优点实现自组网通信,有效避免传统 Ad hoc 网络在拓扑和路由管理方面面临的难题,实现高效可控的低延迟传输。基于此组网方案,利用 D2D 组内协作通信的优势,通过软信息合并,降低蜂窝组播重传次数,提升自组网传输效率和鲁棒性。计算机仿真验证了方案在平均重传次数和传输时延等方面的有效性。

参 考 文 献:

[1] 孙毅,黄婷,崔晓昱,等. 互联网视角下的泛在电力物联网[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(4):3.
SUN Yi, HUANG Ting, CUI Xiaoyu, et al. Ubiquitous Power Internet of Things from the Perspective of Internet[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(4):3.

[2] 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.
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.

[3] 唐孝舟,翟剑华,王建锋,等. 蓝牙 5.0 mesh 组网技术及其在

光伏电站中的应用[J]. 电力工程技术, 2019, 38(6): 31.
TANG Xiaozhou, ZHAI Jianhua, WANG Jianfeng, et al. Bluetooth 5.0 Mesh Technology and Its Application in Photovoltaic Power Station[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(6):31.

[4] 3GPP, Opportunity Driven Multiple Access, Technical Specification Group Radio Access Network [S]. 3G TR 25. 924, Dec. 1999.

[5] 瞿谨. 蜂窝 ad hoc 网络概述[J]. 中国新通信, 2014, 16(4): 40.
QU Jin. Overview of Cellular Ad Hoc Networks[J]. China New Telecommunications, 2014, 16(4): 40.

[6] 帅金泉. 电力应急通信保障中无线自组网技术的应用研究[J]. 无线互联科技,2019,16(14): 1.
SHUAI Jinquan. Study on Application of Wireless Ad Hoc Network Technology in Power Emergency Communication Support[J]. Wireless Internet technology. 2019, 16(14): 1.

[7] SHEKALIM Peretz, HADAD Zion. Mobile Ad-hoc Mesh for Cellular Networks: Mobile Ad-hoc and Mesh Routing Solutions Based on OFDMA Technologies for Public Safety and Defense Applications[C]//IEEE International Conference on Microwaves, Communications, Antennas and Electronic Systems (COMCAS 2011), Tel Aviv, 2011:1.

[8] SHENXuemin. Device-to-device Communication in 5G Cellular Networks[J]. IEEE Network, 2015, 29(2): 2.

[9] 钱志鸿,王雪. 面向 5G 通信网的 D2D 技术综述[J]. 通信学报, 2016, 37(7): 1.
QIAN Zhihong, WANG Xue. Reviews of D2D Technology for 5G Communication Networks[J]. Journal on Communications. 2016, 37(7): 1.

[10] 3GPP Technical Specification Group Services and System Aspects: Proximity-based Services (ProSe): Stage 2 Release 12[S]. TS 23.303 V12.7.0, 2015.

[11] YAOHaiping, YANG Zhian, JIANG Hao, et al. A Scheme of Ad-hoc-based D2D Communication in Cellular Networks[J], Ad Hoc and Sensor Wireless Networks, 2016, 32(1/2): 115.

[12] 王一丹,冀保峰,韩琰琰. 超密集网络中 D2D 通信的高效传输协议设计[J]. 计算机应用与软件, 2018(6): 129.
WANG Yidan, JI Baofeng, HAN Congcheng. Design of High Efficient Transmission Protocol for d2d Communication in Ultra-dense Network [J]. Computer Application and Software, 2018 (6): 129.

[13] LEEJuhyun, LEE Jae. Performance Analysis and Resource Allocation for Cooperative D2D Communication in Cellular Networks with Multiple D2D Pairs[J], IEEE Communications Letters, 2019, 23(5): 909.

[14] RAJESWARIAIagan. A Mobile Ad Hoc Network Routing Protocols: A Comparative Study[M]. Recent Trends in Communication Networks. July 2020.

[15] 顾少翔. 阴影衰落相关性及其对分布式天线系统下行中断性能的影响分析[D]. 重庆:重庆大学, 2017.

(编辑:温泽宇)