

基于粒子群算法的 D2D 内容边缘缓存架构策略



孟利民¹ 王 锬¹ 郑增乾¹ 蒋 维²

1 浙江工业大学信息工程学院 杭州 310000

2 浙江树人大学信息科技学院 杭州 310000

(mlm@zjut.edu.cn)

摘 要 在通信网络基础设施瘫痪的极端情况下,如何保证救援终端设备网络的互联互通以及高效集中控制,解决指挥现场各类信息汇聚、共享是关键问题。为了延续信息传输,减小中断概率,研究边缘缓存辅助的终端直通(device-to-device, D2D)通信覆盖网,通过内容预置的方式,建立 D2D 通信边缘缓存架构,以缓存指数最大化为优化方式,通过检测终端节点的缓存架构构建 D2D 覆盖网虚拟逻辑映射通道,提出了应急条件下基于自适应惯性权重二进制粒子群算法的单兵终端设备 D2D 内容边缘缓存架构策略。实验结果表明,该算法边缘缓存预置策略具有较高的缓存指数且有利于信息更好的传输。

关键词 D2D 通信;边缘缓存;缓存指数;自适应;粒子群算法

中图分类号 TP301

Architecture Strategy of D2D Content Edge Cache Based on Particle Swarm Optimization

MENG Li-min¹, WANG Kun¹, ZHENG Zeng-qian¹ and JIANG Wei²

1 College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310000, China

2 College of Information Science and Technology, Zhejiang Shuren University, Hangzhou 310000, China

Abstract In the extreme case that the communication network infrastructure is paralyzed, how to ensure the interconnection and efficient centralized control of the rescue terminal equipment network, and how to solve the problem of gathering and sharing all kinds of information on the command site are the key problems. In order to continue the information transmission and reduce the probability of interruption, this paper studies the edge cache-assisted device-to-device (D2D) communication overlay network. Method, establish a D2D communication edge cache architecture, optimize the cache index, and construct a virtual logical mapping channel of the D2D overlay network by detecting the cache architecture of the terminal nodes. A single particle based on adaptive inertial weight binary particle swarm algorithm under emergency conditions Strategy of D2D content edge cache architecture for soldier terminal equipment. Experimental results show that the algorithm's edge cache preset strategy has a higher cache index and is conducive to better information transmission.

Keywords D2D communication, Edge cache, Cache index, Self-adaption, Particle swarm algorithm

1 引言

当发生极端的自然灾害如地震时,传统的基础网络通信设施可能会发生损坏故障,甚至产生大面积的网络瘫痪,给救援工作带来很大阻碍。应急情况下,如何保证救援单兵终端设备网络的互联互通以及高效集中控制,解决指挥现场各类信息汇聚、共享是关键问题。D2D 通信是第三代合作计划(3rd Generation Partnership Project, 3GPP)在 R12 定义的基于长期演进(long Term Evolution, LTE)技术体制的一种在通信系统的控制下,允许 LTE 终端之间在没有基础网络设施的情况下,利用小区资源直接进行通信的新技术,显然 D2D 通信模式将会被应急保障通信模式所采纳。如基础网络通信

设施因极端灾害被损坏,单兵终端仍然能够基于 D2D 连接建立无线通信网络,保证终端之间无线通信的畅通,为灾难救援提供保障。现有对 D2D 通信技术的研究主要集中于如何利用移动终端的信息交互能力,从干扰感知传输的角度展现所特有的邻近特性和数据直通特性。

Asadi 等^[1-2]在移动蜂窝网络中通过 D2D 通信来提升覆盖网的吞吐量性能和能耗效率。Asadi 等^[3]在文献[2]的基础上设计了提升覆盖网性能的操作协议,实现了无线局域网和蜂窝网络的高效切换调度,他们提出的协议考虑到了信道安全、均衡调度等方面。Golrezaei 等^[4-5]提出一种能利用蜂窝覆盖网用户热门视频文件请求相似性的策略。该策略在终端设备中缓存流行视频内容文件并利用 D2D 协议互联进行通

本文已加入开放科学计划(OSID),请扫描上方二维码获取补充信息。

基金项目:国家自然科学基金(61871349);浙江省自然科学基金(LQ19F010013, LY18F010024);2019 年金华市科技计划项目(公益类)(2019-4-176)

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (61871349), Natural Science Foundation of Zhejiang Pvince, China(LQ19F010013, LY18F010024) and Science and Technology Program of Jinhua in 2019(Public Welfare)(2019-4-176).

通信作者:王锬(2111803016@zjut.edu.cn)

信分享。基站将蜂窝网络中相关用户分成多个群体,群内的用户可以进行 D2D 协议互联,各个群体缓存互不重叠的视频文件。如果其中某一用户向邻近基站请求视频文件,基站会先检查该视频文件是否被缓存在该用户所在的群体中,其目标是在保证中断概率的同时最大化每个用户的吞吐量。文献[6]考虑了蜂窝网络中缓存小基站和缓存终端都各自有相同的缓存空间以及各自服从参数不同的泊松分布(Poisson Point Process, PPP),通过确定文件分别在缓存小基站和缓存终端的缓存比例来得到最优的缓存策略。上述研究都是在基站辅助的正常情况下进行的,没有考虑应急极端条件下的基站损毁。文献[7]提出了用于集群间协作的 D2D 体系架构,缓存和请求用户服从相互独立的齐次泊松过程,以平均吞吐量为目标设计了一种目标效率较高的贪婪算法。文献[8]以最大化流量卸载量为目标,将其建模为 NP 难题,用近似算法转换优化值,提出了利用移动终端与其他缓存终端的机会性相遇来调整终端缓存文件的分布式缓存的调整算法。但该方法采用近似算法来求解并不能完全反映缓存辅助 D2D 内容的布设优化方案且没有单独考虑 D2D 自身缓存的情况。

为了适应基站失效的极端情况,减小中断概率,本文研究边缘缓存辅助的 D2D 通信覆盖网架构,通过内容预置的方式,建立 D2D 通信边缘缓存覆盖网,以缓存指数最大化为优化方式,通过检测终端节点的缓存架构构建 D2D 覆盖网虚拟逻辑映射通道,提出了应急条件下基于自适应惯性权重二进制粒子群算法(Adaptive inertia weight Binary Particle Optical Swarm, ABPSO)的单兵设备 D2D 内容边缘缓存架构策略。

2 边缘缓存模型

本文提出的应急条件下基于改进二进制粒子群算法的 D2D 内容边缘缓存系统架构模型如图 1 所示,在该模型中,由一个瘫痪基站和在移动工作的单兵终端设备构成覆盖网资源区域,通信方式可分为 D2D 通信、基站蜂窝通信、自卸载缓存,由于应急条件下基站瘫痪,基站蜂窝通信受阻。

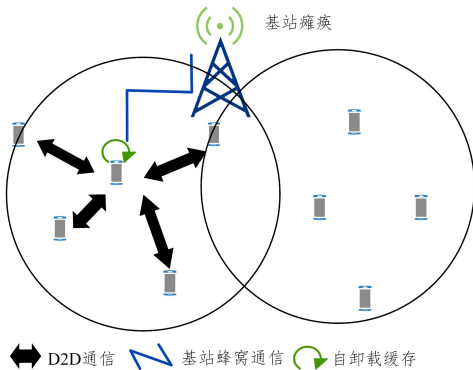


图 1 D2D 边缘缓存系统框架

Fig.1 Framework of D2D edge caching system

资源区域内,单兵终端设备的移动区域位置分布满足概率密度为 λ 的齐次泊松过程(Homogeneous Poisson Point Process, HPPP),假设覆盖网资源区域内单兵终端设备为 N ,用集合 $\{i | i \in N\}$ 表示,且设备存储容量为 V ,这里选择的单兵终端设备型号相同,则存储容量大小一致。在该网络中,所需缓存文件总数为 D ,并且每个文件占用缓存的资源大小 s_d 相同,根据文献[9]可知,用户独立请求内容文件的概率分布

满足 Zipf 分布,在该覆盖网资源网络架构内,灾害救援相关内容文件 $\{F_1, F_2, \dots, F_D\}$ 请求概率采用了 Zipf 的请求分布,热度值排名为 d 的文件 F_d 的被请求概率为:

$$Q_d = \frac{1}{d^{-z} \sum_{j=1}^D j^{-z}} \quad (1)$$

其中, z 为热度指数,文件请求越频繁表示热度指数越高。

在该资源物理区域内,单兵终端设备之间可以发生 D2D 通信的极限距离为 R ,这里信道质量用误比特率 SER 表示,对于单兵终端设备 i 和 j ,假设他们的位置为 (X_i, Y_i) 和 (X_j, Y_j) ,根据距离公式,两个终端设备之间的距离用 L_{ij} 表示:

$$L_{ij} = [(X_i - X_j)^2 + (Y_i - Y_j)^2]^{1/2} \quad (2)$$

L_{ij} 可表示单兵终端设备是否具有连通性:

$$T_{ij} = \begin{cases} 1, & L_{ij} \leq R \\ 0, & L_{ij} > R \end{cases} \quad (3)$$

当 $T_{ij} = 1$ 时,表示单兵终端设备自缓存请求和 D2D 通信请求均可发生,当 $T_{ij} = 0$ 时,则认为不发生。在应急条件下,由于基站损毁,这里考虑单兵终端设备自缓存请求和 D2D 通信请求两种情况。

(1) 自缓存请求。单兵终端设备可直接在本地获取需要请求的文件。

(2) D2D 通信请求。当单兵终端设备本地获取需要请求的文件失败时,向覆盖网传输距离 R 以内的其他在线单兵终端设备 i 获取需要请求的文件。

缓存指数表示设备请求文件在以上两种情况下成功的机率,下文设计该缓存覆盖网架构的优化指标缓存指数模型。根据密度 λ 为 HPPP 的特性^[10]可知,在资源区域 R 内有 n 个单兵设备的概率可表示为:

$$F(n, R, \lambda) = (\pi R^2 \lambda)^n \frac{e^{-\pi R^2 \lambda}}{n!} \quad (4)$$

分析自缓存指数的情况,单兵终端设备自缓存指数可表示为:

$$H_{\text{self}} = \sum_{d=1}^D Q_d F \sum_{i=1}^N X_{i,d} \quad (5)$$

$$X = \{X_{i,d} | i \in N, d \in D\}$$

其中, X 为覆盖网中的缓存布设, $X_{i,d} = 1$ 表示单兵终端设备 i 缓存了文件 d , $X_{i,d} = 0$ 表示不缓存。当 $X_{i,d} = 0$ 时,单兵设备 i 不能在自设备获取需求的文件 d ,则向资源区域内 $T_{ij} = 1$ 的单兵终端设备发送文件 d 的请求,因此 D2D 通信请求的缓存指数可表示为:

$$H_{\text{D2D}} = (1 - \text{SER}) \sum_{d=1}^D Q_d F (1 - X_{i,d}) \left(1 - \prod_{l \neq i, l \in N, T_{il}=1} (1 - X_{l,d})\right) \quad (6)$$

则该覆盖网内的系统总缓存指数为:

$$\begin{aligned} H_{\text{all}} &= H_{\text{self}} + H_{\text{D2D}} \\ &= \sum_{d=1}^D Q_d F \sum_{i=1}^N X_{i,d} + (1 - \text{SER}) \sum_{d=1}^D Q_d F (1 - X_{i,d}) \times \\ &\quad \left(1 - \prod_{l \neq i, l \in N, T_{il}=1} (1 - X_{l,d})\right) \\ \text{s. t. } &\sum_{d=1}^D s_d X_{i,d} \leq V, \forall i \in N, d \in D \\ X_{i,d} &= \{0, 1\} \end{aligned} \quad (7)$$

3 粒子群算法边缘缓存策略

根据以上结论,以缓存指数为最优化目标,本文采用逐个

设备改变边缘缓存策略的方法使缓存指数最大化,设计了基于自适应惯性权重的二进制粒子群来解决模型的组合优化问题。对于缓存文件总数为 D 的单兵设备 i , 设置单兵设备 i 拥有粒子群总群数为 K , K 个粒子组成单兵设备 i 的粒子群体为 $g = (g_1, g_2, \dots, g_k, \dots, g_K)$, 每个维度下粒子都可以用其位置向量和速度向量表示, 在 $K \times D$ 维空间中, $x_k = (x_{k1}, x_{k2}, \dots, x_{kD})$ 为微粒 k 的当前位置, $v_k = (v_{k1}, v_{k2}, \dots, v_{kD})$ 为当前飞行速度, $p_k = (p_{k1}, p_{k2}, \dots, p_{kD})$ 表示该微粒 k 所经历的最好位置, 在此边缘缓存模型中, 以 $H(x)$ 为优化函数, 微粒 k 的当前最好位置由式(8)确定:

$$p_k(t+1) = \begin{cases} p_k(t), & H(x_k(t+1)) \geq H(p_k(t)) \\ x_k(t+1), & H(x_k(t+1)) \geq H(p_k(t)) \end{cases} \quad (8)$$

所有微粒经过的最好位置为全局极值 $p_g(t)$, t 为现迭代次数, 微粒的速度和位置通过式(9)来更新:

$$\begin{aligned} v_{kd}(t+1) &= \omega v_{kd}(t) + c_1 r_1 (p_{kd}(t) - x_{kd}(t)) + c_2 r_2 \\ &\quad (p_g(t) - x_{kd}(t)) x_{kd}(t+1) \\ &= x_{kd}(t) + v_{kd}(t+1) \end{aligned} \quad (9)$$

其中, c_1, c_2 为交流因子, 影响种群微粒间的信息分享程度, c_1 调节微粒靠近个体极值方向的角度, c_2 调节微粒靠近全局极值飞行的角度, r_1, r_2 是 $[0, 1]$ 间的相互独立的随机函数, $v_{kd}(t)$ 表示微粒 k 在 t 次迭代中的第 d 维的速度, $x_{kd}(t)$ 表示微粒 k 在 t 次迭代中的第 d 维的位置, ω 为惯性权重。在离散问题中, 采用二进制粒子群(Binary Particle Optical Swarm, BPSO)算法^[11]描述粒子位置的更新公式:

$$x_{kd}(t+1) = \begin{cases} 1, & rand() \leq s(v_{kd}(t+1)) \\ 0, & rand() > s(v_{kd}(t+1)) \end{cases} \quad (10)$$

$$s(v_{kd}(t+1)) = \frac{1}{1 + e^{-v_{kd}(t+1)}}$$

其中, $rand$ 是 $[0, 1]$ 间的相互独立随机函数, $s(v_{id})$ 是 sigmoid 函数。在 BPSO 粒子速度的更新公式中, 惯性权重 ω 是 BPSO 全局与局部搜索能力的影响因子, ω 的取值较小, 则 BPSO 局部寻优能力大于全局寻优能力, 易陷入局部最优; 影响因子 ω 较大, 全局寻优强于局部, 使得解的精度降低。针对此问题, 本文提出了一种自适应惯性权重的算法^[12]:

$$\omega(t) = \frac{\omega_s - \omega_e}{iter}(iter - t) + \omega_e + 0.1rand() \quad (11)$$

其中, $iter$ 为迭代总数, t 为当前迭代次数, ω_s 为惯性权重 ω 的初始值, ω_e 是权重 ω 的终值。在运行计算过程中此算法保证了迭代初期有更大的全局搜寻能力, 后期局部寻优能力提高, 提升了所求解的精度。经过优化的自适应惯性权重二进制粒子群的具体步骤如下:

Step1 初始化单兵设备 i 的粒子总群 K , 在定义 $K \times D$ 维空间中, 初始化各微粒的速度、位置、全局极值、最大迭代数等。

Step2 计算微粒的目标函数值 $H(x)$ 。

Step3 根据微粒目标函数所得值通过式(9)更新个体极值。

Step4 各微粒的个体极值与全局极值的目标函数值进行比较更新全局极值。

Step5 通过式(10)和式(11)更新自适应惯性权重, 同时实现微粒速度与位置的更新。

Step6 判断是否满足算法的终止条件(足够好的位置或者最大迭代次数), 若满足, 则输出设备 i 的优化解, 开始轮询下一设备, 否则返回 Step2 继续迭代。

4 算法仿真与性能分析

本文为了证明 ABPSO 算法在此系统模型的可行性和有效性, 对该算法进行了分析与验证, 实验计算机采用 Core(TM) i7-9750H @ 2.60 GHz, 内存 16 GB, 64 位 Windows10 操作系统, 实验软件为 matlab2016b。在覆盖网边缘缓存系统模型中, 假设内存为 1GB 单兵终端设备, 按照 HPPP 分布在 D2D 用户密度为 $0.001(\text{user}/\text{m}^2)$ 的资源区域内, 随机独立以 $[0, 15](\text{m}/\text{s})$ 移动, 单兵终端的通信距离是 40 m, 误比特率 SER 为 1×10^{-6} , 各终端设备参照 Zipf 分布对 18 个文件进行请求, 文件大小均为 100 mb, Zipf 分布的热度指数 z 为 0.8。在自适应惯性权重二进制粒子群中, 最大迭代次数为 500, 微粒种群总数 K 为 30, 惯性权重初始值 ω_s 的值为 0.95, 终值 ω_e 为 0.1, 交流因子 c_1, c_2 为 0.5。下面通过仿真的方式来评估 ABPSO 算法的有效性, 基准算法如下。

(1) 等概率随机缓存策略^[13] (Random Caching, RC)。不同热度值的文件按照相同的概率被独立随机存储在边缘缓存网络的设备中, 且终端尽量填满边缘缓存空间。

(2) 流行度缓存策略^[14] (Adaptive Cache Placement, ADA)。该算法把文件请求热度值作为主要影响因子, 热度值越高对应的文件请求越频繁, 边缘缓存网络中优先缓存文件请求热度值高的文件。

(3) 传统贪婪遍历策略^[7] (Greedy Traversal, GT)。对于每一个单兵设备 i , 在其他终端单兵设备缓存网络不变的前提下, 采用传统贪心选择遍历其边缘缓存内容, 将所求目标函数值的整体最优解通过一系列局部最优的贪心选择来达到。

图 2 显示了 4 种算法得到的缓存策略下系统缓存指数随 Zipf 分布文件热度指数 z 的变化情况。因为当热度指数较小时, 热度值高的文件的请求频率与热度值低的文件的请求频率相差不大, ADA 策略使设备优先缓存文件请求热度值高的文件, 热度值低的文件很少存储, 在单兵设备动态移动的资源区域内, 随机缓存会存在比 ADA 缓存更好的整个系统缓存指数表现, 但当热度指数 z 提高, 两者文件请求频率相差变大, 使得 ADA 缓存指数优于随机缓存。在需求文件数量 D 较小时, 可通过贪婪遍历得到与 ABPSO 相同的最优解, 在当前的实验环境下, 以及相同的迭代次数下, 在需求文件较大时, 贪婪遍历的遍历效率值较低, ABPSO 得到的结果优于贪婪遍历策略。同时我们也可以观察到, ABPSO 得到的缓存策略在 z 变化过程中都优于另外两种算法, 说明了本文算法的有效性。

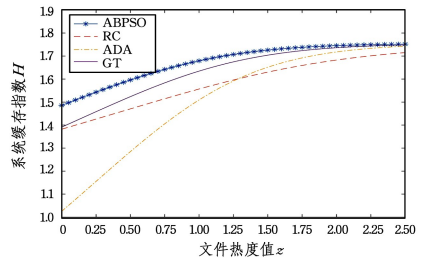


图 2 不同热度指数 z 下的性能对比

Fig. 2 Performance comparison with different heat index z

图 3 给出了 4 种算法得到的缓存策略下系统缓存指数随 D2D 通信缓存距离 R 的变化对比。由于该覆盖网边缘缓存系统模型中单兵终端设备移动区域位置分布满足概率密度为

λ 的齐次泊松过程,变化函数图像呈现泊松分布凸函数性质,随着通信缓存距离 R 递增,缓存指数先变大后变小,在此模型中通信距离在 40 左右时取得极值。对比可知,本文算法的性能优于基准算法。

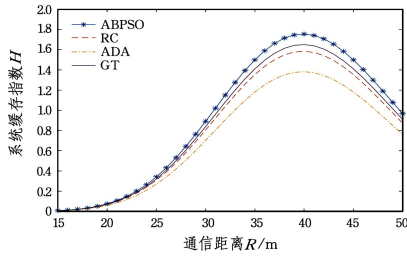


图3 不同缓存通信距离 R 的性能对比

Fig. 3 Performance comparison of different cache communication distance R

结束语 针对应急条件下 D2D 终端设备通信边缘缓存策略,以缓存指数最大化为优化方式,本文提出了基于自适应惯性权重二进制粒子群算法 (ABPSO) 的单兵设备 D2D 内容边缘缓存架构策略。仿真实验结果表明,本文算法得到的缓存策略相比另外两种对比算法具有更优越的性能表现。但是,本文算法的仿真仍具有一定局限性,在复杂的网络通信传输中,存在信道衰落^[15]以及链路冲突等复杂因素,在今后的研究中需要考虑在这些因素综合干扰下造成的信道受阻等情况。

参考文献

- [1] ASADI A, MANCUSO V. Energy efficient opportunistic uplink packet forwarding in hybrid wireless networks[C]// Proceedings of ACM International Conference on Future Energy Systems. Berkeley, CA, USA, 2013: 261-262.
- [2] ASADI A, MANCUSO V. On the compound impact of opportunistic scheduling an D2D communications in cellula networks [C]// Proceedings of ACM International Conference on Modeling, Analysis & Simulation of Wireless and Mobile Systems. Berkeley, CA, USA, 2013: 279-288.
- [3] ASADI A, MANCUSO V. WiFi Direct and LTE D2D in action [C]// Proceedings of the 2013 IFIP Wireless Days (WD). Valencia, 2013: 1-8.
- [4] GOLREZAEI N, MOLISCH A F, DIMAKIS A G. Base-station assisted device-to-device communications for high-throughput wireless video networks[C]// Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Communications (ICC). Ottawa, ON, 2012: 7077-7081.
- [5] GOLREZAEI N, DIMAKIS A G, MOLISCH A F. Device-to-device collaboration through distributed storage[C]// Proceedings of the 2012 IEEE Global Communications Conference (GLOBE-COM). Anaheim, CA, 2012: 2397-2402.
- [6] RAO J, FENG H, YANG C C, et al. Optimal caching placement for D2D assisted wireless caching networks[C]// Proceedings of

the 2016 IEEE International Conference on Communications (ICC). Kuala Lumpur, 2016: 1-6.

- [7] KANG H J, PARK K Y, CHO K M, et al. Mobile caching policies for device-to-device content delivery networking[C]// Proceedings of the 2014 IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS). Toronto, 2014: 299-304.
- [8] LAN R N. Edge caching technology in terminal to cell system [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
- [9] BRESLAU L, PEI C, LI F, et al. Web caching and Zipf-like distributions: Evidence and implications[C]// Proceedings of the Eighteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communication Societies. New York, USA, 1999: 126-134.
- [10] BACCELLI F, BLASZCZYSHYN B. Stochastic geometry and wireless networks: Volume II applications [J]. Foundations and Trends in Networks, 2010(4): 1-132.
- [11] WANG Y, QIU F Y, GUO H D. An adaptive inertial weighted binary particle swarm optimization algorithm with mutation operator [J]. Journal of Computer Systems, 2019, 40(4): 733-737.
- [12] ZHAO J X, GAO Y L, CHEN Q L. A particle swarm optimization algorithm for solving nonlinear programming problems [J]. Journal of ningxia university (natural science edition), 2017, 38(1): 15-18, 22.
- [13] KONSTANTION S P, BALAJI P. Arandomized Web-cache replacement scheme[C]// Proceedings of the Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Society. Anchorage, AK, USA, 2001: 1407-1415.
- [14] SONG X S, GENG Y T, MENG X B. Cache-enabled device to device networks with contention-based multimedia delivery[J]. IEEE Access, 2019, 5: 3228-3239.
- [15] MALAK D, AL-SHALASH M. Device-to-Device content distribution: optimal caching strategies and performance bounds[C]// Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Communications Workshop. Piscataway, NJ, 2015: 664-66.



MENG Li-min, born in 1963, Ph.D, professor, Ph.D supervisor, is a member of China Computer Federation. Her main research interests include wireless communication and network, streaming media transmission and IoT communications.



WANG Kun, born in 1995, postgraduate. His main research interests include D2D edge caching and real-time streaming media communication.