

D2D辅助的窄带物联网中能耗和传输成功率的最优折中

裴二荣^① 易鑫^{*①} 邓炳光^① 李金艳^② 张蕾^②

^①(重庆邮电大学通信与信息工程学院 重庆 400065)

^②(中国电信股份有限公司技术创新中心 北京 102209)

摘要: 在设备到设备(D2D)通信辅助的窄带物联网(NB-IoT)中,为了尽可能提高传输成功率, D2D接收端需要预留较多的通信时隙(可以允许多次重传)。然而,这显著地增加了用户设备(UE)的能耗,特别是在信道条件较差或者相邻D2D链路干扰较严重的情况下。该文基于中继和能耗模型构造了一个传输成功率和能耗折中的优化问题,进而提出一个基于二分法的通信时隙最优配置算法。数值结果表明较多的预留时隙数量极大地增加了UE的能耗,但是不会显著提高传输成功率,与多中继传输、随机中继传输和100%成功传输等其他算法相比,该文提出的预留时隙最优配置算法获得了最小的能耗和几乎最大的传输成功率(只比100%成功传输方案低)。

关键词: 窄带物联网; 设备到设备通信; 能量消耗; 传输成功率

中图分类号: TN925.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2020)12-2915-08

DOI: 10.11999/JEIT190786

The Optimal Tradeoff between Energy Consumption and Transmission Success Probability in D2D Assisted Narrow Band-Internet of Things

PEI Errong^① YI Xin^① DENG Bingguang^① LI Jinyan^② ZHANG Lei^②

^①(*Institute of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China*)

^②(*China Telecom Technology Innovation Center, Beijing 102209, China*)

Abstract: In the Device-to-Device (D2D) communication assisted Narrow Band Internet of Things (NB-IoT), in order to maximize the transmission success probability, the D2D relay device needs to reserve more communication time slots (multiple retransmissions can be allowed to increase the transmission success probability). However, this increases significantly the power consumption of the User Equipment (UE), especially in the case of poor channel conditions or severe interference. An optimization problem based on the relay and energy consumption models is constructed to seek a compromise between transmission success probability and energy consumption, and a communication slot optimal configuration algorithm based on dichotomy is proposed in this paper. The numerical results show that the larger number of reserved time slots can lead to an excessive increase in energy consumption without significantly increasing the transmission success probability. Compared with other algorithms such as multi-relay transmission, random relay transmission and 100% successful transmission, the proposed reserved time slot optimal configuration algorithm can obtain the least energy consumption and almost the highest transmission success probability (it is only lower than that under 100% successful transmission scheme).

Key words: Narrow Band Internet of Things (NB-IoT); D2D communication; Power consumption; Transmission success probability

收稿日期: 2019-10-16; 改回日期: 2020-05-24; 网络出版: 2020-07-15

*通信作者: 易鑫 18733653533@163.com

基金项目: 国家重大专项(2018zx0301016), 国家自然科学基金(61671096, 61379159), 重庆市基础研究与前沿探索项目(cstc2018jcyjAX0507, cstc2017jcyjBX0005)

Foundation Items: The National Major Project (2018zx0301016), The National Natural Science Foundation of China (61671096, 61379159), Chongqing Basic Research and Frontier Exploration Project (cstc2018jcyjAX0507, cstc2017jcyjBX0005)

1 引言

物联网已经成为一种新的计算模式,它可以提供一个完全连接的智能世界。物联网中具有传感、计算和通信功能的数十亿设备与全球互联网连接,旨在提高资产利用率以及增强生产力^[1,2]。智能交通、智能家居、智能医疗以及智能农业等物联网应用得到了广泛的应用,这些应用正从各个方面促进我们的日常生活^[3,4]。物联网世界存在海量的传感

类、控制类连接需求,且这些需求具有共同的特征要求,即强覆盖、低成本、大连接、低速率和低功耗^[5]。窄带物联网(Narrow Band Internet of Things, NB-IoT)技术是为支持5G时代的连接而引入的新3GPP标准,其正成为一种领先的技术。作为5G系统的一部分,包括爱立信、诺基亚和华为在内的公司对NB-IoT技术表现出极大的兴趣,并且在标准化过程中做出了贡献^[6]。

由于NB-IoT中大多数用户设备(User Equipment, UE)都是采用电池供电并且大规模部署,所以更换电池的成本很高。因此,将能耗保持在最低水平至关重要。在NB-IoT标准中,即使在覆盖条件较差的地方,也要求设备在电池容量为5 Wh的情况下运行10年以上^[7]。为了在覆盖条件差的区域实现低功耗要求,D2D通信也被提出用来扩展NB-IoT路由,即在基站的有限参与下,两个邻近的设备之间直接进行通信^[8,9]。短距离的D2D通信能够从低功耗、负载平衡方面有利于整个网络。

为了及时向基站上传信息,文献^[10]提出一种分配短距离D2D链以降低上传时延的方法。文献^[11]构建了一个时变图模型来描述个体和社会自私性对D2D通信的影响。文献^[12]提出让D2D中继/接收设备(D2D Relay/Receiver Equipment, DRE)从基站收集能量,并用收集到的能量进行D2D通信。进而,作者还提出DRE以D2D和蜂窝模式周期性地通信,以此节省带宽和能量。文献^[13]提出一种实现D2D高连接概率的分布式路由算法。实验结果表明所提算法与穷举搜索法的性能基本相当。文献^[14]引入了可靠度和信誉的概念来模拟所涉及

UE之间的信任级别,这种基于信任级别的方案获得了数据上传时间的增益并有效降低了数据丢失概率。文献^[15]改善了以网络为中心的链路可靠性以及以UE为中心的能量效率和电池寿命。文献^[16]采用D2D扩展NB-IoT路由,基于动态规划的算法提高了连接概率并降低了上行通信时延。文献^[17]提出了一种社会感知的中继选择方法,该方案在中断概率和吞吐量增益方面表明了其优越性。

然而,在现有的文献中,在对NB-IoT下伺机D2D通信进行研究时,并没有考虑到UE的能耗问题。从前文讨论可知,能耗问题在NB-IoT中至关重要,直接关系到UE的生命周期(NB-IoT中的UE常常被要求工作10年以上)。因此,研究NB-IoT下伺机D2D通信时的能耗问题非常有必要。

2 系统模型

场景模型: 本文考虑单个蜂窝小区下,NB-IoT以独立模式部署,只考虑NB-IoT上行链路,且UE始终有数据需要上传到基站。采用D2D通信协助处于较差信道条件下的用户实现上行链路传输。考虑处于小区边缘的UE先与邻近且信道条件较好的UE即DRE建立D2D链路,再由其将接收到的数据上传(中继转发)至基站。其中,每个UE通过最多两跳将数据上传到基站。场景模型如图1所示。

信道模型: 采用自由空间传播模型作为大尺度衰落模型,并使用瑞利衰落为小尺度衰落模型。发射器 x 和接收器 y 之间的信道增益 $h_{x,y}$ 呈指数分布,即 $h_{x,y} \sim \exp(\mu)$ 。因此,与发射器 x 距离为 r 的接收器信号功率可以表示为 $hr^{-\alpha}$,其中 $\alpha > 2$ 是路径损耗指数。

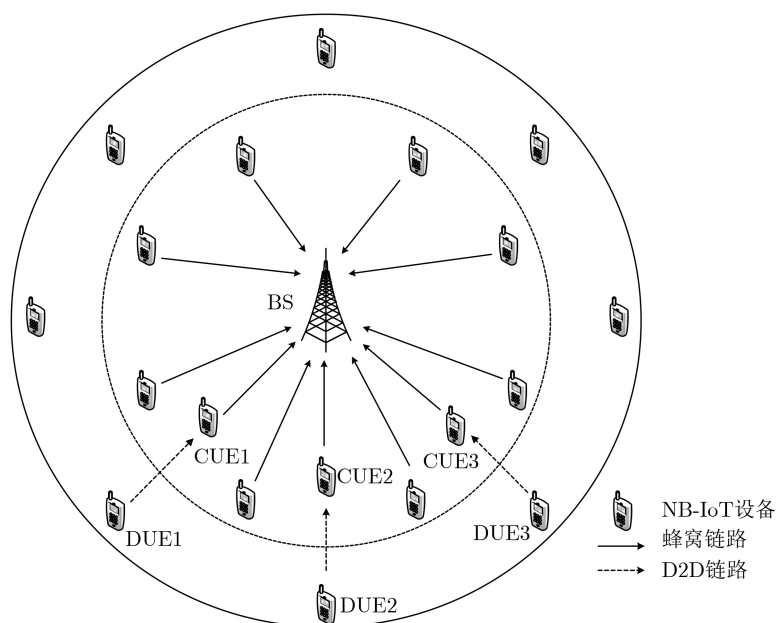


图1 场景模型

信干噪比(Signal to Interference plus Noise Ratio, SINR): 令在距离阈值 d_{th} 内的UE为CUE(Cellular User Equipment, CUE), 需要建立D2D链路进行通信的UE为DUE(D2D User Equipment, DUE), d_{th} 可以根据信道衰落条件动态确定。因为允许D2D复用上行链路资源, 因此使用相同子信道的所有链路之间存在干扰。考虑到D2D的两个UE之间距离较小, 并且通过限制最大D2D发射功率可以有效管理D2D对蜂窝通信链路的干扰。因此, DUE对CUE的干扰可以忽略不计。本文考虑CUE到D2D对之间的跨层干扰以及D2D对之间的共层干扰。从 x 到 y 的链路的SINR为

$$\text{SINR}_{x,y} = \frac{h_{x,y}P_xL_{x,y}^{-\alpha}}{\sum_{t \in \Phi_y, t \neq x} h_{t,y}P_tL_{t,y}^{-\alpha} + \delta^2} \quad (1)$$

其中, P_x 为 x 的传输功率, $L_{x,y}$ 为 x 到 y 的链路的距离, Φ_y 表示对 y 的干扰源集合。

DRE时间表: 使用二元组 $\{\omega_i, \tau\}$ 表示DRE时间表, ω 为二进制串, 1表示为D2D通信和转发数据预留的时间, 0表示蜂窝通信时间。预留的D2D通信时隙用于D2D通信以及DRE到基站的转发。蜂窝通信时隙是指中继过程结束后, DRE自身数据传输的时间。DRE通常预留多个时隙。边缘UE首先在第1时隙尝试将数据发送到DRE。若传输成功, 则DRE在接下来的时隙中进一步将数据包转发至基站。若传输失败, 则边缘UE继续尝试在第2时隙中将数据包重新发送到DRE, 直到所有预留时隙用完。若在所有预留时隙内的传输均失败, UE将寻找新的DRE继续上传。若在预留时隙结束前完成从边缘UE到基站的数据上传, 在蜂窝数据传输完成后进入睡眠状态。为简单起见, 假设1个数据包在传输成功时所花时间为1个时隙。DRE通信时间表如图2所示。

图2表示DRE分组传输过程。边缘终端 u 有一个要上传的数据包并且它的候选DRE为 r , 其二进制串为1111111110。终端 u 发送数据的时刻为 t_1 , 且在第7、第8时隙完成终端 u 到DRE和DRE到基站的传输。如果中继过程结束, 那么剩余时隙用于蜂窝数据的传输, 并且在成功传输后进入睡眠, 此时

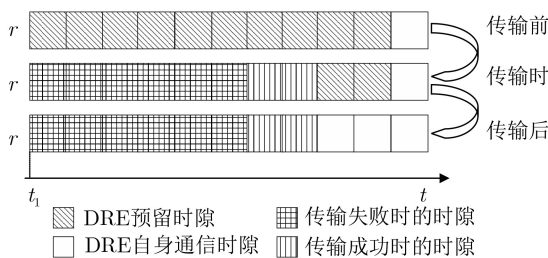


图2 DRE通信时间表

二进制串为11111111000。将DRE预留的通信时隙数量设置为 N_{ts} , 由于第2跳传输至少需要时间 τ , 故D2D传输过程不会超过 $(N_{ts} - 1)\tau$, 否则按传输失败处理, UE寻找其他中继再上传数据。

能耗模型: 传输 L bit数据的能量消耗为

$$E_{tx}(L) = L \cdot E_{elec} + P_{tx} \cdot N_{ts} \cdot \tau \quad (2)$$

其中, E_{elec} 为发送或接收1 bit信息所消耗的电路能量, P_{tx} 为发射器的发射功率, N_{ts} 为传输过程所需的时隙数量, τ 为1个时隙的长度, $N_{ts}\tau$ 是整个传输过程经历的总时间。

中继选择: 候选中继集(Candidate D2D Relay Set, CRS): 用 $R_k^{(u)}$ 表示NB-IoT边缘UE的CRS, 它是终端 u 到基站的路径中点附近的D2D通信范围内的 K 个UE, 用于帮助终端 u 将分组上传到基站。这些候选中继按照中继意愿函数 $E_k \cdot P_{toBS}^k / d_{toBS}^k$ 进行排序, 并且把中继意愿最大的设备 r_k 作为实际DRE r_{opt} , 其中 E_k 为DRE剩余能量, P_{toBS}^k 为该DRE到基站的传输成功率的历史平均值, d_{toBS}^k 为DRE到基站的距离。

3 传输成功率和能耗分析

在正式进行分析前, 首先作出以下定义:

(1) DRE工作时间表(DRE Working Schedule, DWS): 用一个 $(N-1) \times 1$ 的向量 $\Delta_k^{(u)}$ 表示边缘终端 u 的DWS, 如果候选DRE $r_k^{(u)}$ 的第 i 个时隙是为D2D通信预留的, 则判决变量 $\theta_{i,k}^{(u)}$ 为1, 否则为0。

(2) 预期分组传输率(Expected packet Delivery Ratio, EDR): 用 $\text{EDR}(\Delta_k^{(u)})$ 表示具有给定 $\Delta_k^{(u)}$ 的边缘终端 u 的EDR, 是从边缘终端 u 到基站在两跳上的预期分组传输率。

(3) 预期能耗(Expected Energy Consumption, EEC): 用 $\text{EEC}(\Delta_k^{(u)})$ 表示具有给定 $\Delta_k^{(u)}$ 的边缘终端 u 的EEC, 是从边缘终端 u 通过两跳链路发送1个分组到基站的期望能量消耗。

3.1 传输成功率分析

分组传输成功率(Packet Delivery Ratio, PDR)是评估可靠性的重要指标, 用 P 来表示UE的PDR。基于平均SINR, 加性高斯白噪声(Additive White Gaussian Noise, AWGN)中二进制信号检测的误比特率(Bit Error Rate, BER)为^[16]

$$p_b = Q(\sqrt{\text{SINR}}) \quad (3)$$

其中, $Q(*)$ 表示标准高斯误差函数, $Q(x) = (1/\sqrt{2\pi}) \int_x^\infty e^{-t^2/2} dt$ 。

假设比特错误彼此独立发生, 对于 L bit分组, 可以通过考虑正确接收所有单独比特的概率来计算

P 。由于假设瑞利衰落, SINR可能会在分组传输时间内发生变化。为了简化分析, 假设干扰在 l bit的传输时间内缓慢变化, 假定 l 个连续比特的SINR是相同的。在这种情况下, L bit分组的 P 可以表示为

$$P = \prod_{j=1}^{L/l} (1 - p_b(j))^l \quad (4)$$

其中, $p_b(j)$ 是分组的第 j 个 l bit长片段的BER。对于包含 W 个分组的链路的分组传输成功率可以通过式(3)求平均得到

$$P = \frac{1}{W} \sum_{i=1}^W \prod_{j=1}^{L/l} (1 - p_b(j))^l \quad (5)$$

对于给定的DWS $\Delta_k^{(u)}$, 边缘终端 u 的EDR为

$$\text{EDR} = \sum_{i=1}^{N_{ts}-1} P_{\text{toR}}^{(i)} P_{\text{toBS}}^{(N_{ts}-i)} \quad (6)$$

其中, $P_{\text{toR}}^{(i)}$ 是分组在第 i 个时隙被DRE $r_k^{(u)}$ 成功接收的概率, 具体为

$$P_{\text{toR}}^{(i)} = \prod_{j=1}^{i-1} (1 - P_{\text{toR}} \theta_{j,k}^{(u)}) P_{\text{toR}} \theta_{i,k}^{(u)} \quad (7)$$

其中, P_{toR} 是边缘终端 u 和DRE $r_k^{(u)}$ 之间链路的分组传输率估计值。式(6)中的 $P_{\text{toBS}}^{(N_{ts}-i)}$ 是DRE $r_k^{(u)}$ 与基站之间链路的分组传输率估计值, 最大为 $N-i$ 次传输。其值为

$$P_{\text{toBS}}^{(N_{ts}-i)} = 1 - (1 - P_{\text{toBS}})^{N_{ts}-i} \quad (8)$$

因为数据发送的最后期限设置为 $N_{ts}\tau$, 总的传输计数不能超过 N_{ts} 。若D2D通信占用 i 个时隙, 则第2跳的最大传输计数最多为 $N_{ts}-i$ 次。

3.2 能耗分析

对于给定的DWS $\Delta^{(u)}$, 边缘终端 u 的EEC($\Delta^{(u)}$)为

$$\text{EEC} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{ts}-1} P_{\text{toR}}^{(i)} P_{\text{toBS}}^{(N_{ts}-i)} (E_{\text{toR}}^{(i)} + \text{EC}_{\text{toBS}}^{(N_{ts}-i)})}{\text{EDR}} \quad (9)$$

其中, $\text{EC}_{\text{toBS}}^{(N_{ts}-i)}$ 是DRE $r_k^{(u)}$ 将分组传输到基站的预期能量消耗, 且最多传输 $N_{ts}-i$ 次, 即

$$\text{EC}_{\text{toBS}}^{(N_{ts}-i)} = \frac{\sum_{l=1}^{N_{ts}-i} E_{\text{toBS}}^{(l)} (1 - P_{\text{toBS}})^{l-1} P_{\text{toBS}}}{P_{\text{toBS}}^{(N_{ts}-i)}} \quad (10)$$

其中, $E_{\text{toR}}^{(i)}$ 和 $E_{\text{toBS}}^{(l)}$ 是根据能耗模型计算的第1跳及第2跳的能量消耗。 $E_{\text{toR}}^{(i)}$ 为前 $i-1$ 个时隙传输失败及在时隙 i 传输成功产生的能耗。 $E_{\text{toBS}}^{(l)}$ 为 l 次传输所消

耗的能量, 前 $l-1$ 次未成功传输, 第 l 次成功传输, $P_{\text{tx}}^C, P_{\text{tx}}^D$ 分别为CUE, DUE的传输功率。具体为

$$E_{\text{toR}}^{(i)} = L \cdot E_{\text{elec}} + \sum_{j=1}^i P_{\text{tx}}^C \cdot \tau \cdot \theta_{j,k}^{(u)} \quad (11)$$

$$E_{\text{toBS}}^{(l)} = L \cdot E_{\text{elec}} + l(L \cdot E_{\text{elec}} + P_{\text{tx}}^D \cdot \tau) \quad (12)$$

4 问题描述和解决方案

4.1 问题描述

为了提高NB-IoT中边缘数据上传的传输成功率, 直观的感觉是DRE尽可能多地为边缘UE预留通信时隙, 然而这种方法的能量效率很低。大量的预留时隙会允许较多的重传次数, 进而导致更多的能耗。预留较少的D2D通信时隙虽然有助于节省能耗, 但是可能导致较低的传输成功率, 如小尺度衰落正处在波谷等一些偶发因素导致的传输失败也无法进行重传。因此, 需要在节能和传输成功率之间进行折中, 尽可能地节省能量而又能够保证一定的传输成功率。

为了求得这个最优的折中, 首先定义效用函数

$$f(N_{ts}) = \delta \frac{E_{\text{max}}}{E} + (1 - \delta) \frac{P}{P_{\text{min}}} \quad (13)$$

其中, E 和 P 为所求能耗和传输成功率, P_{min} 表示NB-IoT边缘UE能够接受的最低传输成功率, 而 E_{max} 表示NB-IoT边缘UE进行1次数据上传所消耗的最大能量。 N_{ts} 表示DRE的预留D2D通信时隙的数量, 由于完成第1跳和第2跳传输至少需要两个时隙, 故其值为等于或者大于2的整数。 δ 为能耗和传输成功率的权重因子。较大的 δ 值倾向于更加节能, 但导致过低的传输成功率; 较小的 δ 值倾向于提高传输成功率, 但是导致过高的能耗。当 $\delta=0$ 时, 效用函数表示最大化传输成功率, 但是同时带来最大的能耗; 当 $\delta=1$ 时, 表示最小化能耗, 同时获得最小的传输成功率。

本文根据用户的不同偏好需求, 在不同的 δ 取值下, 找到最大化效用函数值的 N_{ts} 值, 获得能耗和传输成功率的最优折中。考虑到场景中的一些限定条件, 将这个效用函数作为目标函数能够得到如式(14)优化问题

$$\left. \begin{array}{l} \text{Max}_{\{N_{ts}\}} f(N_{ts}) \\ \text{s.t. } P \geq P_{\text{min}} \\ E \leq E_{\text{max}} \\ N_{ts} \geq 2 \\ \theta_{i,k} \in \{0, 1\} \end{array} \right\} \quad (14)$$

其中, $\theta_{i,k}$ 为判决变量, 当DRE的时隙是为D2D通信和转发数据所预留时, 其值为1, 否则为0。

4.2 解决方案

由于效用函数式(13)中的EDR和EEC表达式复杂,其中包含有多个累计项的计算,无法直接采用求导的优化方法进行计算,进而需要考虑其他方法求得这个最优值。

推论1 效用函数式(13)是一个具有极大值的函数。

证明: 当 N_{ts} 取值较小时,可得式(14)中的 $\sum_{i=1}^{N_{ts}-1} P_{toR}^{(i)} P_{toBS}^{(N_{ts}-i)} (E_{toR}^{(i)} + EC_{toBS}^{(N_{ts}-i)})$ 较小,使其所在的项较大,但 $\sum_{i=1}^{N_{ts}-1} P_{toR}^{(i)} P_{toBS}^{(N_{ts}-i)}$ 的值远小于 P_{min} ,此时效用函数值较小。随 N_{ts} 的增大, $\sum_{i=1}^{N_{ts}-1} P_{toR}^{(i)} P_{toBS}^{(N_{ts}-i)} (E_{toR}^{(i)} + EC_{toBS}^{(N_{ts}-i)})$ 的值有所增加,其所在的项减小,而 $\sum_{i=1}^{N_{ts}-1} P_{toR}^{(i)} P_{toBS}^{(N_{ts}-i)}$ 随 N_{ts} 的增大显著提高,使得效用函数值增大。随 N_{ts} 持续增大, $\sum_{i=1}^{N_{ts}-1} P_{toR}^{(i)} P_{toBS}^{(N_{ts}-i)}$ 的值趋于平稳,而 $\sum_{i=1}^{N_{ts}-1} P_{toR}^{(i)} P_{toBS}^{(N_{ts}-i)} (E_{toR}^{(i)} + EC_{toBS}^{(N_{ts}-i)})$ 继续增大,使其所在项显著减小,此时效用函数值减小。由此可知式(15)增大后减小,此时函数仅有一个极大值点

$$\begin{aligned}
 f(N_{ts}) &= \frac{\delta E_{max}}{\sum_{i=1}^{N_{ts}-1} P_{toR}^{(i)} P_{toBS}^{(N_{ts}-i)} (E_{toR}^{(i)} + EC_{toBS}^{(N_{ts}-i)})} \\
 &\quad + \frac{(1-\delta) \sum_{i=1}^{N_{ts}-1} P_{toR}^{(i)} P_{toBS}^{(N_{ts}-i)}}{P_{min}} \\
 &= \frac{\delta E_{max} \sum_{i=1}^{N_{ts}-1} P_{toR}^{(i)} P_{toBS}^{(N_{ts}-i)}}{\sum_{i=1}^{N_{ts}-1} P_{toR}^{(i)} P_{toBS}^{(N_{ts}-i)} (E_{toR}^{(i)} + EC_{toBS}^{(N_{ts}-i)})} \\
 &\quad + \frac{(1-\delta) \sum_{i=1}^{N_{ts}-1} P_{toR}^{(i)} P_{toBS}^{(N_{ts}-i)}}{P_{min}} \\
 &= \left(\sum_{i=1}^{N_{ts}-1} P_{toR}^{(i)} P_{toBS}^{(N_{ts}-i)} \right) \cdot \left(\frac{(1-\delta)}{P_{min}} \right. \\
 &\quad \left. + \frac{\delta E_{max}}{\sum_{i=1}^{N_{ts}-1} P_{toR}^{(i)} P_{toBS}^{(N_{ts}-i)} (E_{toR}^{(i)} + EC_{toBS}^{(N_{ts}-i)})} \right) \quad (15)
 \end{aligned}$$

考虑到目标函数是一个具有极大值的函数,采用二分法对DRE最优值进行搜索,详细算法如表1所示。

表1 DRE最优预留通信时隙配置搜索算法

输入: 最小时隙数量 N_1 , 最大时隙数量 N_2 , 迭代终止阈值
输出: 最优时隙数量 N_{opt}
初始化: $N_1=2, N_2, w_{max} = 0;$
for $k=1 : K$
根据 $E_k \cdot P_{toBS}^k / d_{toBS}^k$ 得到 $r_{opt};$
end
Repeat
$mid = \lceil (N_1 + N_2)/2 \rceil;$
若 $f(N_1+mid)/2 > f(mid+N_2)/2$ 则 $N_2 = mid;$
或 $f(N_1+mid)/2 < f(mid+N_2)/2$ 则 $N_1 = mid;$
Until
$(N_2-N_1)/2 < \epsilon;$
$N_{opt} = \arg \max(f(N_{ts})), N_{ts} = N_1, N_2, (N_1+N_2)/2.$

5 性能评估

在本节中,通过仿真验证并评估本文所提出的基于DRE最优通信时隙配置的中继方案,将所提算法与随机中继传输、多中继传输和100%成功传输算法进行比较,得到在不同的发射功率下的EEC,EDR以及效用函数值的性能对比。其中随机中继传输是随机选择一个具有预留D2D通信时隙的设备作为中继,即其预留时隙数量未经优化。多中继方案是由边缘终端附近的空闲设备形成DRE序列,DRE序列按照每个DRE的第1个预留时隙的先后顺序进行排序。100%成功传输方案是指DRE不固定预留时隙,可以无数次重传直到数据从边缘终端传输到基站为止,即不计代价重传数据保证传输成功率为100%。

5.1 参数设定

蜂窝半径设置为150 m,UE随机分布在蜂窝半径内,节点数量为500个,基站位于蜂窝中心。设置用于上行链路传输的信道数为50个,并且资源块随机分配给蜂窝用户设备,UE与DRE之间的通信允许复用上行链路资源。能耗模型参数为: $L = 200$ Byte, $E_{elec} = 50$ nJ, CUE的传输功率 P_{tx}^C 设置为10 dBm, DUE的传输功率 P_{tx}^D 从1 dBm变化至8 dBm,时隙时间 τ 为0.5 ms,它也可以根据实际部署情况取任何值。假定蜂窝边缘UE,因为到基站的直接链路信道条件较差,需要找到DRE以便将数据经过两跳上传到基站。D2D通信范围设置为100 m。以UE到基站的中点为圆心,CRS的选择范围设置为20 m,图3为网络场景的示例。另外,噪声功率 δ^2 为-70 dBm。设置路径损耗指数 $\alpha = 3.5$ 并

且D2D链路的信道增益为 $h \sim \exp(1)$ 。对于每组仿真,生成200个不同的拓扑结构,并且为每个拓扑结构传输50个200 Byte的数据包,以获得传输成功率和能量消耗的平均性能。

5.2 仿真结果

5.2.1 不同DRE预留时隙数量下的性能比较

图4显示了DRE不同预留时隙下的性能对比(发射功率为4 dBm)。权重 δ 分别取0.25, 0.50和0.75, UE发射功率为4 dBm, P_{\min} 为80%, E_{\max} 为536 μJ , 其是依据式(9)的能耗模型计算得到的两跳通信最大能耗。如图5所示,当 $\delta = 0.25$,有最大效用值1.231,此时 N_{ts} 取8;当 $\delta = 0.50$,有最大效用值1.247,此时 N_{ts} 取6。当 $\delta = 0.75$ 时,有最大效用值1.230,此时 N_{ts} 取4。由图4可知,当预留时隙数量较少时, δ 取0.75时的效用值大于其余两种取值下的效用值。预留时隙数量增多时, $\delta = 0.50$ 有最大的效用值。当预留时隙数量继续增多, δ 取0.25将获得大于其余 δ 取值下的效用值。这是因为较大的 δ 值表明优化偏向于能耗,此时时隙数量较少,而较小的 δ 值表明优化偏向于传输成功率,故此时时隙数量较多。

5.2.2 与其他3种方案比较

图5显示了在不同发射功率下4种方案在传输成功率方面的性能对比,该结果是在权重 $\delta = 0.25$,即以消耗更多能量为代价,将优化结果偏向传输成

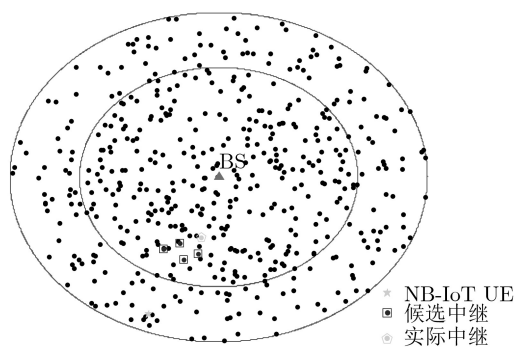


图3 网络场景示例

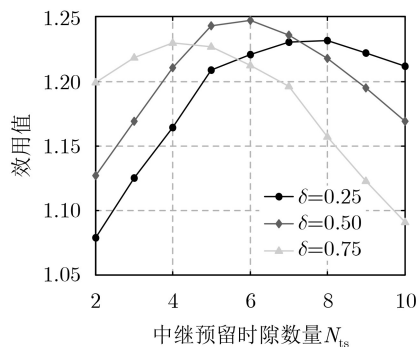


图4 不同预留通信时隙数量下的效用值

功率。可以明显看到,100%成功传输方案在所有发射功率下几乎都达到100%的传输成功率,因为该方案不指定最大重传次数,传输过程直到完成数据从终端到基站的上传为止。所提方案带来的传输成功率增益大于多中继和随机中继方案,特别是在DUE发射功率较低的情况。例如,当DUE发射功率为2 dBm时,所提方案成功交付95.9%的数据包,而多中继方案和随机中继方案分别成功交付87.5%和78.2%的数据包。随着发射功率的提高,3种方案的性能均有提升,本文方案和多中继方案接近100%。

图6表示了4种方案在不同的发射功率下的总能耗。从图中可以看出,本文方案在所有发射功率设置下具有最小的能耗,且在发射功率为5 dBm时取到最小值,此时能耗为45.9 μJ ,而多中继方案、100%成功传输和随机中继方案的能耗分别为58.7 μJ , 57.7 μJ 和55.0 μJ 。还可以看出,随着发射功率的增大,4种方案下的能耗均先下降再升高,其原因是在发射功率较小时,传输失败导致的重传会消耗较多能量,而功率较大时,大功率也会带来额外能耗。

最后考虑传输成功率和能耗的均衡优化,即 δ 取0.5。如图7所示,在不同的发射功率设置下,

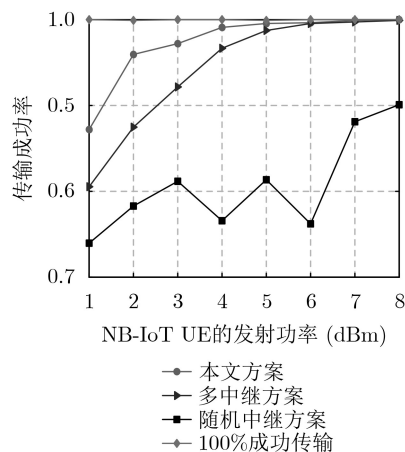


图5 不同传输功率下的传输成功率($\delta = 0.25$)

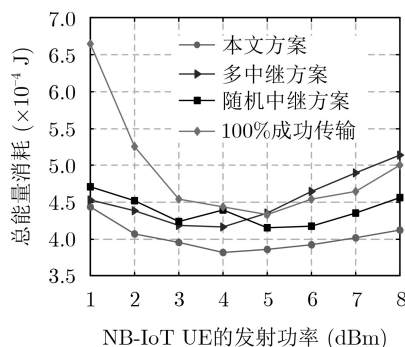


图6 不同传输功率下的总能量消耗($\delta = 0.75$)

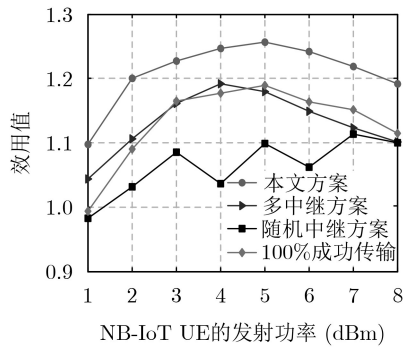


图7 不同NB-IoT UE传输功率下的效用值

所提方案的效用值均大于其它方案,也即所提方案能够达到更好的能耗与传输成功率的均衡。具体地,多中继方案在发射功率为4 dBm时有最大效用值1.192;100%成功传输方案在发射功率为5 dBm时取最大值1.189;随机中继方案在7 dBm时有最大值1.113;而所提算法有最大效用值1.257,此时发射功率为5 dBm,选择的预留时隙数量 N_{ts} 为6。

6 结论

本文首先基于能耗和中继模型推导出了能耗和传输成功率的表达式,然后构造了一个基于加权的能耗和传输成功率的效用函数,并将它作为优化目标函数构建了一个优化问题,提出采用二分法对最优解进行搜索。仿真结果表明,与其它算法相比,本文提出的预留时隙数量选择算法可以提高系统性能,即降低能耗和提高传输成功率,同时保证了系统性能之间的折中,并获得最优的DRE通信预留时隙数量。

参考文献

- [1] NING Zhaolong, HU Xiping, CHEN Zhikui, *et al.* A cooperative quality-aware service access system for social internet of vehicles[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2018, 5(4): 2506–2517. doi: [10.1109/JIOT.2017.2764259](https://doi.org/10.1109/JIOT.2017.2764259).
- [2] 刘素艳, 刘元安, 吴帆, 等. 物联网中基于相似性计算的传感器搜索[J]. *电子与信息学报*, 2018, 40(12): 3020–3027. doi: [10.11999/JEIT171085](https://doi.org/10.11999/JEIT171085).
LIU Suyan, LIU Yuanan, WU Fan, *et al.* Sensor search based on sensor similarity computing in the internet of things[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(12): 3020–3027. doi: [10.11999/JEIT171085](https://doi.org/10.11999/JEIT171085).
- [3] 彭建华, 张帅, 许晓明, 等. 物联网中一种抗大规模天线阵列窃听者的噪声注入方案[J]. *电子与信息学报*, 2019, 41(1): 67–73. doi: [10.11999/JEIT180342](https://doi.org/10.11999/JEIT180342).
PENG Jianhua, ZHANG Shuai, XU Xiaoming, *et al.* A noise injection scheme resistant to massive MIMO eavesdropper in IoT[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(1): 67–73. doi: [10.11999/JEIT180342](https://doi.org/10.11999/JEIT180342).
- [4] YAQOUB I, AHMED E, HASHEM I A T, *et al.* Internet of things architecture: Recent advances, taxonomy, requirements, and open challenges[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2017, 24(3): 10–16. doi: [10.1109/MWC.2017.1600421](https://doi.org/10.1109/MWC.2017.1600421).
- [5] NING Zhaolong, XIA Feng, ULLAH N, *et al.* Vehicular social networks: Enabling smart mobility[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2017, 55(5): 16–55. doi: [10.1109/MCOM.2017.1600263](https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1600263).
- [6] YU Changsheng, LI Yu, WU Yuan, *et al.* Uplink scheduling and link adaptation for narrowband internet of things systems[J]. *IEEE Access*, 2017, 5: 1724–1734. doi: [10.1109/ACCESS.2017.2664418](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2664418).
- [7] CHEN Min, MIAO Yiming, JIAN Xin, *et al.* Cognitive-LPWAN: Towards intelligent wireless services in hybrid low power wide area networks[J]. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 2019, 3(2): 409–417. doi: [10.1109/TGCN.2018.2873783](https://doi.org/10.1109/TGCN.2018.2873783).
- [8] KONG Xiangjie, XIA Feng, WANG Jinzhong, *et al.* Time-location-relationship combined service recommendation based on taxi trajectory data[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2017, 13(3): 1202–1212. doi: [10.1109/TII.2017.2684163](https://doi.org/10.1109/TII.2017.2684163).
- [9] LIU Jiajia and KATO N. Device-to-Device communication overlaying two-hop multi-channel uplink cellular networks[C]. The 16th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing, Hangzhou, China, 2015: 307–316. doi: [10.1145/2746285.2746311](https://doi.org/10.1145/2746285.2746311).
- [10] MILITANO L, ORSINO A, ARANITI G, *et al.* A constrained coalition formation game for multihop D2D content uploading[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2016, 15(3): 2012–2024. doi: [10.1109/TWC.2015.2497682](https://doi.org/10.1109/TWC.2015.2497682).
- [11] GAO Chuhan, ZHANG Haoming, CHEN Xinlei, *et al.* Impact of selfishness in device-to-device communication underlying cellular networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, 66(10): 9338–9349. doi: [10.1109/TVT.2017.2699862](https://doi.org/10.1109/TVT.2017.2699862).
- [12] YANG H H, LEE J, and QUEK T Q S. Heterogeneous cellular network with energy harvesting-based D2D communication[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2016, 15(2): 1406–1419. doi: [10.1109/TWC.2015.2489651](https://doi.org/10.1109/TWC.2015.2489651).
- [13] CHEN Gaojie, TANG Jinchuan, and COON J P. Optimal routing for multihop social-based D2D communications in

- the internet of things[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2018, 5(3): 1880–1889. doi: [10.1109/JIOT.2018.2817024](https://doi.org/10.1109/JIOT.2018.2817024).
- [14] MILITANO L, ORSINO A, ARANITI G, *et al.* Trusted D2D-based data uploading in in-band narrowband-IoT with social awareness[C]. The IEEE 27th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications, Valencia, Spain, 2016: 1–6. doi: [10.1109/PIMRC.2016.7794568](https://doi.org/10.1109/PIMRC.2016.7794568).
- [15] PETROV V, SAMUYLOV A, BEGISHEV V, *et al.* Vehicle-based relay assistance for opportunistic crowdsensing over narrowband IoT (NB-IoT)[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2018, 5(5): 3710–3723. doi: [10.1109/JIOT.2017.2670363](https://doi.org/10.1109/JIOT.2017.2670363).
- [16] LI Yanjun, CHI Kaikai, CHEN Honglong, *et al.* Narrowband internet of things systems with opportunistic D2D communication[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2018, 5(3): 1474–1484. doi: [10.1109/JIOT.2017.2782323](https://doi.org/10.1109/JIOT.2017.2782323).
- [17] NING Zhaolong, WANG Xiaojie, KONG Xiangjie, *et al.* A social-aware group formation framework for information diffusion in narrowband internet of things[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2018, 5(3): 1527–1538. doi: [10.1109/JIOT.2017.2777480](https://doi.org/10.1109/JIOT.2017.2777480).
- 裴二荣: 男, 1976年生, 副教授, 研究方向为无线通信、移动通信.
- 易 鑫: 男, 1996年生, 硕士生, 研究方向为窄带物联网、D2D通信.
- 邓炳光: 男, 1978年生, 副教授, 研究方向为通信网与测试技术.
- 李金艳: 女, 1977年生, 高级工程师, 研究方向为移动通信技术标准.
- 张 蕾: 女, 1993年生, 初级工程师, 研究方向为网移动通信网络切片.

责任编辑: 马秀强