

基于波束标记的 M2M 业务建模及性能优化

沈爱国¹, 郑新旺¹, 叶秋波², 胡奕彬¹

(1. 集美大学诚毅学院, 福建 厦门 361021; 2. 集美大学信息工程学院, 福建 厦门 361021)

[摘要] 提出一个在 5G 毫米波场景下基于波束标记的不连续接收(M-DRX)的休眠机制, 以减少不必要的波束赋形。在此基础上, 分别对 M2M 业务数据和波束失准过程进行泊松分布模拟, 评估数据到达率和波束失准率对 DRX 休眠机制的影响。最后, 通过仿真验证了所提方案能缩短系统时延、提升节能性能。

[关键词] 5G; M2M; 基于波束标记的不连续接收(M-DRX); 节能; 时延

[中图分类号] TN 914.53

M2M Service Data Modeling and Performance Optimization Based on Beam Marking

SHEN Aiguo¹, ZHENG Xinwang¹, YE Qiubo², HU Yibin¹

(1. Chengyi University College, Jimei University, Xiamen 361021, China;

2. School of Information Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China)

Abstract: A DRX(discontinuous reception) mechanism based on beam marking(M-DRX) in a 5G millimeter wave scenario is proposed in this paper to reduce unnecessary beam forming. Then, the poisson distribution simulation is carried out for M2M service data and beam misalignment process respectively, and the influence of data arrival rate and beam misalignment rate on the DRX mechanism is evaluated. Finally, the simulation results show that the proposed scheme can improve the system delay performance and energy efficiency.

Keywords: 5G; machine to machine(M2M); DRX(discontinuous reception) mechanism based on beam marking(M-DRX); energy saving; delay

0 引言

M2M 机器类通信在 5G 物联网有着极其广泛的应用, 如应用在工业车联网、自动化、智能电网、远程医疗等网络中。在 M2M 智能设备数量指数级增长、数据流量大爆炸的时代, 在多天线阵列下采用毫米波频谱+波束赋形技术可以支持高速的数据率。高效的波束赋形有助于提升频谱效率^[1], 降低系统干扰, 增强通信安全性^[2]。

5G 新技术的使用, 使得数量不断膨胀的 M2M 智能设备能耗问题日益突出。DRX(discontinuous reception)机制是解决智能设备能耗的方法之一。在 M2M 的智能设备的使用过程中采用休眠机制, 降低智能设备的发射机使用时间, 从而降低智能设备能耗。DRX 休眠机制已经在 3G、4G 通信系统中得到广泛应用, 取得了不错的节能效果^[3-5]。5G 场景下的 DRX 机制, 需要考虑波束赋形等技术带来

[收稿日期] 2020-05-12

[基金项目] 福建省中青年教育科研项目(JAT191159); 诚毅青年科研基金资助项目(CK19061); 福建省自然科学基金项目(2019J01718)

[作者简介] 沈爱国(1984—), 男, 讲师, 工程师, 从事无线网络能量优化、无线宽带网安全技术方向研究。

的不利影响。文献 [6] 提出一种 UM 寻呼机制结合 DRX 的方案, 降低了 5G 基站与智能设备之间的网络负载与信令开销, 进而降低了功耗。文献 [7] 的 DRX 方案是从波束策略上进行优化, 波束赋形时一旦找到最优波束对就停止搜索, 而不是进行全波束搜索, 从而减少波束搜索次数, 降低波束赋形的时间。文献 [8] 采用了 4G/5G 核心网互操作下的混合 H-DRX 机制, 当 4G 核心网发现 5G 数据到达时, 发送波束赋形提示信息给 5G 智能终端, 从而减少不必要的波束赋形并节约能耗, 但是智能设备需要与 4G 和 5G 网络同时保持连接, 无形中也会另外增加一定的功耗。文献 [9] 展示了一种波束感知结合 MAC 层调度的方法, 当基站在进行数据调度时, 该方法充分考虑信道测量与数据传输之间的时间间隔, 采取的策略是根据信道测量结果进行调度, 而不是在每个时隙都进行调度。文献 [10] 在 D2D 结构的无人机场景下, 提出一种快速波束跟踪 DRX 机制, 重点从休眠率和平均分组时延去分析系统性能。文献 [11] 在 5G 的 DRX 机制下, 采用了波束训练加反馈的方法, 并指出 DRX 状态频繁的波束赋形是没有必要的。为此, 本文提出在 M2M 多波束毫米波场景下基于最优波束标记的 DRX 休眠机制 (M-DRX), 以期减少不必要的波束赋形。

1 波束赋形与波束标记

由于频谱资源有限, 5G 设备需要工作在更高的频段。与 3G、4G 的频段相比, 5G 毫米波通信需要克服巨大的路径损耗。而毫米波天线阵列采用波束赋形的技术能够聚焦窄波束, 集中朝目标方向传播, 从而减少路径损失, 降低干扰, 提高空间能力。

波束赋形的目的是通过收发双方的波束搜索, 找到收发双方的一对最优波束, 建立信道连接进行数据和信令的传输。如果直接将 LTE-DRX 休眠机制 (D-DRX) 运用到 5G 毫米波场景中, 系统节能性能会下降。因为每次休眠结束时, 都需要进行波束赋形并建立信道连接, 这是非常耗时的。为了减少不必要的波束赋形, 本文采用的波束策略是: 对 5G 基站 TX (transmitter) 与智能设备 RX (receiver) 双方天线进行波束赋形, 找到最优波束配对 B_i 并建立连接, 同时对该波束对 B_i 打上标记, 以便在 DRX 休眠状态下优先使用该波束对进行数据和信令传输。

2 基于波束标记的不连续接收机制 (M-DRX)

本文配置一种基于波束标记的不连续接收休眠机制 (M-DRX)。如图 1 所示, 在 RX 与 TX 进行毫米波通信时, 首先通过波束赋形寻得 B_i , 建立毫米波信道无线资源连接, 从而进行高速数据传送。在激活期, 无数据传输, RX 启动去激活定时器 t_i 。此时, 当波束无失准时, 若 t_i 超时, 则转入短休眠期, 启动短休眠定时器 t_s , 否则转入激活期; 当波束失准时, 即转入波束赋形状态。在 DRX 短休眠期, 当波束无失准时, 若 t_s 超时, 无数据到达, 则转入长休眠期, 启动长休眠定时器 t_l , 否则转入激活期; 当波束失准时, 即转入波束赋形状态。在 DRX 长休眠期, 若波束无失准, t_l 超时, 无数据到达, 则继续留在长休眠期重启 t_l ; 若波束失准, 则转入波束赋形状态。

在 M2M 的场景下, 本文所述的波束失准有两种情况: 第一种, 各个 RX 是竞争接入 TX 信道中的, 处于休眠时的 RX 的 B_i , 有可能被其他 RX 占用, 造成当前波束失准, 需要进行波束赋形, 寻取最优波束对 B_j ; 第二种, 在 DRX 状态下建立 B_i 连接后, 由于环境的变化, 可能造成当前信道质量急剧下降, 从而造成当前波束失准, 需要波束赋形, 即重新选取最优波束对 B_j 。文献 [12] 描述了 DRX 状态下, 智能设备移动速度与波束失准概率的关系: RX 移动速度为 30 km/h 时, 当 DRX 的短循环休眠间隙为 100 ms, 波束出现失准的概率为 0.1; 当 DRX 的短循环休眠间隙为 400 ms 时, 波束失准概率不到 0.3。RX 速度为 60 km/h 时, 当 DRX 的短循环休眠间隙为 100 ms 时, 波束出现失准的概率约为 0.18; 当 DRX 的短循环休眠间隙为 400 ms 时, 波束失准概率约为 0.45。这说明, 在 DRX 机制下, 智能设备正常移动时出现波束失准的概率是很低的。因此, 如果网络环境稳定, RX 移动性不高, B_i 更新的可能性会很小, 波束失准的概率则更低。

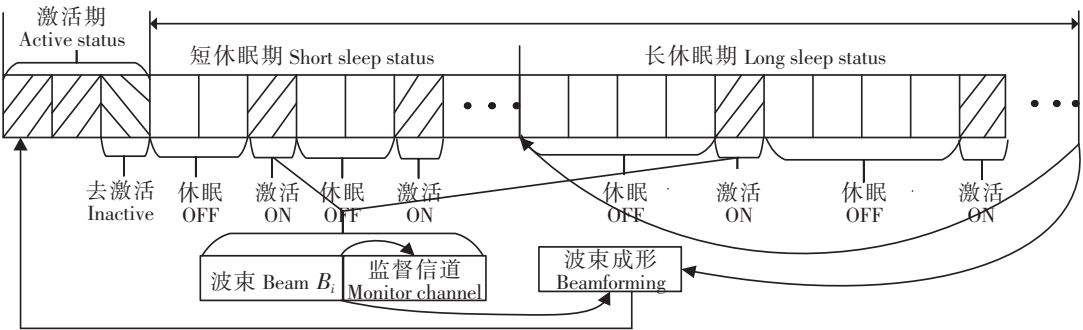


图 1 M-DRX 机制

Fig.1 Mechanism of DRX

3 模型分析

在 M2M 场景下，从 TX 到达 RX 的数据在时间上是随机的，假设业务数据到达 RX 的过程服从参数为 λ 的泊松分布，则参数 λ 称为数据到达率。那么，数据到达 RX 的时间间隔 t_λ 服从均值为 $1/\lambda$ 的指数分布，表示无数据到达。由于 RX 的移动或者通信信道环境的急剧变化，波束失准在所难免。为了便于分析，本文假定波束失准事件的发生过程服从参数为 α 的泊松分布， α 表示波束失准率。波束失准率反映了单位时间内，发生波束失准的次数，它代表的是速率，而不是概率。在 5G 的 M2M 环境中，假设 5G 基站的波束是可以覆盖本小区内所有的智能设备，也就是说波束失准后的波束赋形是可以重新找到波束对来建立上下行信道连接。

基于上述假设，依据 M-DRX 休眠机制，本文建立 4 个状态的半马尔科夫过程模拟 M-DRX，分析在不同参数下休眠机制的节电性能和数据到达时延。如图 2 所示，定义了 4 种马尔科夫状态：S1 表示 RX 处于激活期，S2 表示 RX 处于短休眠期，S3 表示 RX 处于长休眠期，S4 表示 RX 处于波束成形状态。

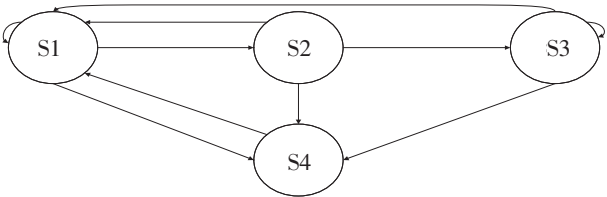


图 2 M-DRX 马尔科夫链

Fig.2 Markov chain of M-DRX

状态 S1 下，RX 处于激活期，当没有数据到达 RX 的时候，开启去激活计时器。在去激活计时器超时前，波束存在失准与校准成功两种可能。如果波束失准，则转移到状态 S4，转移概率为 p_{14} ；如果波束无失准，存在有数据到达和无数据到达 RX 的两种情况。有数据到达，RX 则继续待在 S1，转移概率为 p_{11} ；无数据到达，则转移到短休眠状态 S2，转移概率为 p_{12} 。那么这三个转移概率的计算公式分别为： $p_{11} = (1 - e^{-\lambda t_i})e^{-\alpha t_i}$, $p_{12} = e^{-\lambda t_i}e^{-\alpha t_i} = e^{-(\lambda+\alpha)t_i}$, $p_{14} = 1 - e^{-\alpha t_i}$ 。

状态 S2 下，RX 处于短休眠期，在短休眠定时器 t_s 超时前，同样存在波束失准与无失准两种可能。当波束失准时，则转移到波束赋形状态 S4，转移概率为 p_{24} 。当波束无失准时，若无数据到达 RX，则转移到长休眠状态 S3，转移概率为 p_{23} ；若有数据到达 RX，则转移到状态 S1，转移概率为 p_{21} 。那么， $p_{21} = (1 - e^{-\lambda t_s})e^{-\alpha t_s}$, $p_{23} = e^{-\lambda t_s}e^{-\alpha t_s} = e^{-(\lambda+\alpha)t_s}$, $p_{24} = 1 - e^{-\alpha t_s}$ 。

状态 S3 下，RX 处于长休眠期，在长休眠定时器 t_l 超时前，也存在波束失准与无失准两种可能。一旦波束失准就转移到状态波束赋形 S4，转移概率为 p_{34} 。而在波束无失准状态下，若无数据到达 RX，则继续停留在长休眠期，重启长休眠定时器，转移概率为 p_{33} ；若有数据到达 RX，则转移到状态 S1，转移概率为 p_{31} 。那么， $p_{31} = (1 - e^{-\lambda t_l})e^{-\alpha t_l}$, $p_{33} = e^{-\lambda t_l}e^{-\alpha t_l} = e^{-(\lambda+\alpha)t_l}$, $p_{34} = 1 - e^{-\alpha t_l}$ 。

状态 S4 下，RX 处于波束赋形状态，重新搜索最优波束对，并打上标记，建立毫米波通信信道连接，进入激活状态 S1，转移概率为 p_{41} ，那么 $p_{41} = 1$ 。

根据上述状态转移概率公式, 利用方程
$$\begin{cases} \sum_{i=1}^4 \pi_i = 1, \\ \sum_{j=1}^4 \pi_i p_{ji} = \pi_i, \end{cases}$$
 求出每个状态的平稳分布 π_i 。

RX 的功耗取决于 RX 在每个马尔科夫状态所消耗的时间。激活状态的停留时间越长, 机器消耗的功耗越高。本文用 $T_i (i \in \{1, 2, 3, 4\})$ 表示 DRX 的马尔科夫状态 S1—S4 的停留时间。

状态 S1 下 T_1 为 $\mu_p - 1$ 个数据包的服务时间加上一个去激活时间 t_i^* ($t_i^* \leq t_i$)。 t_i^* 则由波束无失准状态的时间和波束失准的时间构成, 因此状态 S1—S4 的平均逗留时间为:

$$E[T_1] = E[t_a] + E[t_i^*] = (\mu_p - 1)/\lambda + (1 - e^{-\lambda t_i})e^{-\alpha t_i}/\lambda + (t_i + (e^{-\alpha t_i} - 1)/\alpha)(1 - e^{-\alpha t_i}).$$

状态 S2 下, RX 经历的短循环周期 (t_{ds}) 的时间数量和构成了 T_2 。当定时器 t_s 超时, 无数据到达机器, 机器经历了 $N_s = t_s/t_{ds}$ 个短循环周期。在 t_s 超时前, 因为下行数据到达或是波束失准, 机器经历了 N_{s1}^* ($N_{s1}^* < N_s$) 个短循环周期。不同转移概率 p_{41} 和 p_{45} 分别对应 N_{s1}^* 和 N_{s5}^* , 因此

$$E[T_2] = E[n_{ds}]t_{ds} = (p_{23}N_s + p_{21}E[N_{s1}^*] + p_{24}E[N_{s4}^*])t_{ds}.$$

由于 t_λ 和 t_α 服从无记忆性指数分布, 本文假设 N_s^* 服从均值为 $1/p_n$ 的几何分布。因此,

$$E[N_{s1}^*] = (P[t_\lambda \leq t_{ds}])^{-1}, E[N_{s4}^*] = (P[t_\alpha \leq t_{ds}])^{-1},$$

其中, P 表示概率。

状态 S3 和状态 S2 下的分析方法类似, RX 经历的长循环周期 (t_{dl}) 的时间数量和构成了 T_3 。当定时器 t_l 超时, 无数据到达机器, 机器经历了 $N_l = t_l/t_{dl}$ 个短循环周期。在 t_l 超时前, 因为下行数据到达或是波束失准, 机器经历了 N_{l1}^* ($N_{l1}^* < N_l$) 个短循环周期。不同转移概率 p_{31} 和 p_{34} 分别对应 N_{l1}^* 和 N_{l7}^* , 因此,

$$E[T_3] = E[n_{dl}]t_{dl} = (p_{33}N_l + p_{31}E[N_{l1}^*] + p_{34}E[N_{l4}^*])t_{dl},$$

$$E[N_{l1}^*] = e^{-\alpha t_{dl}}/(P[t_\lambda \leq t_{dl}]),$$

$$E[N_{l4}^*] = (P[t_\alpha \leq t_{dl}])^{-1}.$$

状态 S4 表示波束搜索到波束配对成功的过程, 时间 t_m 主要取决于波束对的数量和特定的波束搜索和反馈算法。本研究认为这一过程的时间是确定的, 可得 $E[T_4] = t_m$ 。

定义 DRX 半马尔科夫过程处于状态 S2、S3 的概率为节能参数 P_s 。由于每个 DRX 循环周期都包含一个固定的监督周期 (τ), 因而每个 DRX 周期有效的睡眠时间为: $t_{ds} - \tau$ 或 $t_{dl} - \tau$ 。那么 $E[T_2]$ 、 $E[T_3]$ 分别修正为: $E[T_2^\#] = (p_{23}N_s + p_{21}E[N_{s1}^*] + p_{24}E[N_{s4}^*])(t_{ds} - \tau)$, $E[T_3^\#] = (p_{33}N_l + p_{31}E[N_{l1}^*] + p_{34}E[N_{l4}^*])(t_{dl} - \tau)$ 。

根据上述分析, 可以导出 RX 的节能参数公式为: $P_s = (\pi_2 E[T_2^\#] + \pi_3 E[T_3^\#]) / \sum_{i=1}^4 \pi_i E[T_i]$ 。

整个 DRX 的休眠机制必然会导致一定的传输时延, 使得一些需要发送给机器的数据处于基站的缓存中等待发送, 那么时延主要发生于休眠状态和波束赋形状态。本研究认为基站发送给机器的数据, 机器在激活状态可以及时处理, 那么传输时延就可以理解为: 基站准备发送数据, 而机器处于休眠状态或者波束赋形状态。本文用 $d_i (i \in \{2, 3, 4\})$ 表示 DRX 的马尔可夫链状态 S2—S4 相对应的时延, 那么总的平均等待时延 $E[D] = \pi_2 E[d_2] + \pi_3 E[d_3] + \pi_4 E[d_4]$ 。

在状态 S2, 循环休眠间隔中, 无论波束是否失准, 有数据从核心网侧到达 TR, 必然会在 TR 的缓存中等待发送, 产生数据等待发送时延。因此, $E[d_2] = \int_0^{t_{ds}-\tau} (t_{ds} - \tau - t)P[t_\lambda = t]dt = (t_{ds} - \tau) - (1 - e^{-\lambda(t_{ds}-\tau)})/\lambda$ 。

状态 S3 下的时延分析与 S2 类似, 可得 $E[d_3] = (t_{dl} - \tau) - (1 - e^{-\lambda(t_{dl}-\tau)})/\lambda$ 。

在状态 S4, 因为波束赋形时数据在 TR 的缓存中待发送, 本研究认为波束赋形的时间是相同的, 那么 $E[d_4] = t_m - (1 - e^{-\lambda t_m})/\lambda$ 。

4 仿真分析

本文使用 MATLAB R2016a 进行数值仿真, 仿真参数设置如下: $\mu_p = 25$, $N_s = N_l = 10$, $t_i = 20$ ms, $\tau = 20$ ms, 5G 无线帧结构长度 $L = 10$ ms, 传输时间间隔 (transmission time interval, TTI) 为 1 ms。TR 的发射波束 $M = 16$ 个波束 (波瓣 30°), TX 的发射波束 $N = 4$ 个波束 (波瓣 45°)。进行波束赋形的时候, 收发双方需要扫描 $M \times N = 32$ 个波束对, 从中找到最优波束对, 需要的时间为 $M \times N \times L = 320$ ms。一旦确认了最优波束电平, 波束赋形找到最优波束就停止, 即所需要的统计时间均值为 $M \times N \times L/2 = 160$ ms, 这个值是本文采用的波束赋形时间 $E[T_4] = t_m$ 。

图 3 描述了波束失准率在不同参数设置下对 DRX 节能性能的影响。当数据到达率一定时, DRX 的节能效果是随着失准率的增大而降低, 随着休眠周期长度的增加而提高的。在相同的条件下, M-DRX 的节能性能优于 D-DRX。在低波束失准率下, 不同休眠周期的 M-DRX 的节能效果比较接近, 但是随着波束失准率的增加, 休眠周期长的 M-DRX 的节能效果比较明显优于休眠周期短的 M-DRX。

图 4 分析了数据到达率在不同参数设置下对 DRX 节能性能的影响。在波束失准率一定时, DRX 的节能性能随着数据到达率的增加而急剧降低, 而当到达率增到一定程度时, 节能性能趋于平缓。在相同的参数设置下, M-DRX 的节能性能远优于 D-DRX。

图 5 和图 6 分别展示了波束失准率和数据到达率在不同参数设置下对数据时延的影响。

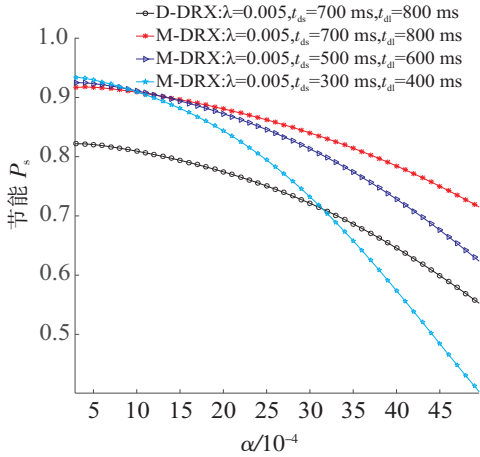


图 3 波束失准率对节能的影响
Fig.3 Effects of beam misalignment rate on energy saving

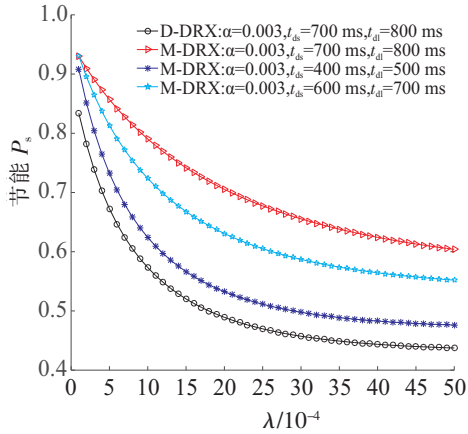


图 4 数据到达率对节能的影响
Fig.4 Effects of data packet arrival rate on energy saving

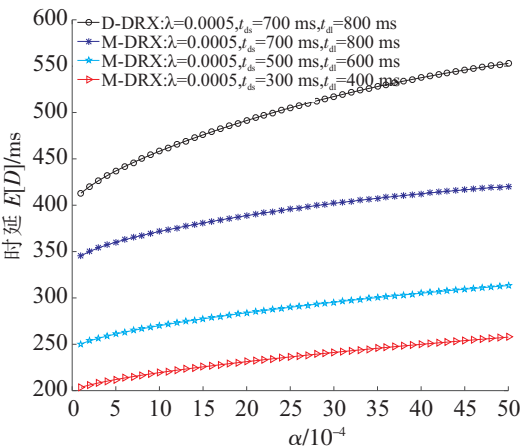


图 5 波束失准率对时延的影响
Fig.5 Effects of beam misalignment rate on delay

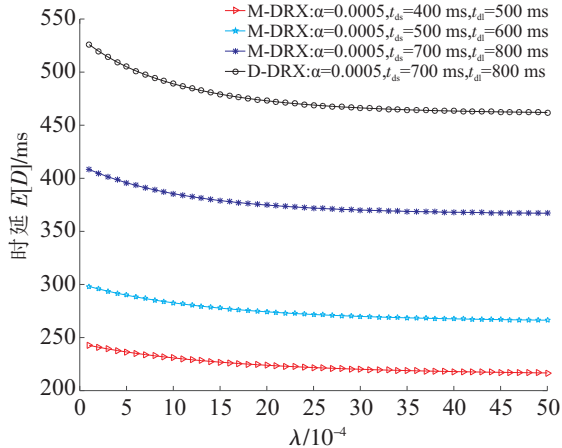


图 6 数据到达率对时延的影响
Fig.6 Effects of packet arrival rate on delay

由图 5、图 6 可知,在数据到达率一定的情况下,数据时延是随着波束失准率的增大而增加,随着休眠周期长度的增加而增加。在相同休眠周期设置下,M-DRX 的时延效果优于 D-DRX。在波束失准率一定的情况下,数据时延随着数据到达率的增加而降低;而当到达率增到一定程度,时延性能趋于平缓。在相同的参数设置下,M-DRX 的数据时延性能优于 D-DRX。

总体而言,M-DRX 时延和省电性能都优于 D-DRX。当波束失准率和数据到达率越大时,对节能越不利。波束失准率越大,时延越长;数据到达率越大,时延越短。时延和节能是对矛盾体,参数的设置要根据具体业务的服务质量要求来定。

5 结论

除了车联网、远程医疗等个别场景有超低时延需求,5G 毫秒级的时延是可以满足绝大多数 M2M 物联网业务服务质量要求的。在毫秒级时延的基础上,能效更需关注。本文给出的毫米波场景下基于波束标记的 DRX 机制,是在出现波束失准时才进行波束赋形,避免了不必要的波束赋形。在低波束失准率和低数据到达率的情况下,本文方案能够有效缩短 DRX 的时延和提升节能性能。下一步的研究方向,将考虑从灵活的 5G 帧结构长度入手,研究降低波束赋形时间,进而降低能耗。

[参 考 文 献]

- [1] AGIWAL M, ROY A, SAXENA N. Next generation 5G wireless networks: a comprehensive survey [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18(3): 1617-1655.
- [2] WENG C, SAHOO B P, WEI H, et al. Directional reference signal design for 5G millimeter wave cellular systems [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(11): 10740-10751.
- [3] YANG S, YAN S, HUNG H, et al. Modeling UMTS power saving with bursty packet data traffic [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2007, 6(12): 1398-1409.
- [4] MIHOV Y Y, KASSEV K, TSANKOV B P. Analysis and performance evaluation of the DRX mechanism for power saving in LTE [C] //IEEE 26th Convention of Electrical and Electronics Engineers. Israel: IEEE, 2010: 520-524. DOI:10.1109/EEEL.2010.5662164.
- [5] 李方伟,沈爱国,朱江. LTE 系统中不连续接收机制的建模研究 [J]. 重庆邮电大学学报 (自然科学版), 2012, 24(6): 746-750.
- [6] CHANG C, CHEN J. UM paging: unified M2M paging with optimal DRX cycle [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2017, 16(3): 886-900.
- [7] AGIWAL M, MAHESHWARI M K, SAXENA N. Directional-DRX for 5G wireless communications [J]. Electronics Letters, 2016, 52(21): 1816-1818.
- [8] MAHESHWARI M K, AGIWAL M, SAXENA N, et al. Hybrid directional discontinuous reception (HD-DRX) for 5G communication [J]. IEEE Communications Letters, 2017, 21(6): 1421-1424.
- [9] WENG C, LIN K, SAHOO B P, et al. Beam-aware dormant and scheduling mechanism for 5G millimeter wave cellular systems [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(11): 10935-10949.
- [10] ZHANG Z, ZHU Q, ZHANG P, et al. Fast beam tracking discontinuous reception for D2D-based UAV mmWave communication [J]. IEEE Access, 2019: 110487-110498.
- [11] LIU D, WANG C, RASMUSSEN L K, et al. Discontinuous reception for multiple-beam communication [J]. IEEE Access, 2019: 46931-46946.
- [12] KWON S W, HWANG J, AGIWAL A, et al. Performance analysis of DRX mechanism considering analogue beamforming in millimeter-wave mobile broadband system [C] //2014 IEEE Globecom workshops. IEEE, 2015: 802-807.

(责任编辑 朱雪莲 英文审校 黄振坤)