

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2412528

基于半马尔科夫链的双模单待终端通信控制方法^{*}

向 敏¹, 周星旺¹, 蒋炳林², 胡坤志¹, 张佳佳¹

(1. 重庆邮电大学工业物联网与网络化控制教育部重点实验室 重庆 400065;

2. 中国电建集团重庆工程有限公司 重庆 400060)

摘 要:针对窄带物联网(NB-IoT)和低功耗蓝牙(BLE)双模单待终端的低功耗、BLE 连接时延和 NB-IoT 下行业务低响应时延的需求,提出一种基于半马尔科夫链的终端通信控制方法以提高终端综合性能。结合 NB-IoT 的扩展型非连续接收(eDRX)模式和省电模式(PSM),其中 PSM 下 BLE 独占射频,构建终端通信状态转换的半马尔科夫链模型,获取功耗节约率和 NB-IoT 下行平均时延的计算模型;基于 BLE 连接和 NB-IoT 下行业务响应的时延要求,结合 NB-IoT 实时业务流量,动态计算 eDRX 的关键参数,再通过优化 BLE 广播时长以获得终端最优综合性能。仿真与实测结果表明,所提方法在低功耗需求场景下的功耗节约率高于 0.96,在低时延需求场景下的 NB-IoT 下行业务平均响应时延低于 10 s,满足通信时延需求的同时降低了终端通信功耗。

关键词: 双模单待;半马尔科夫链;功耗节约率;时延;综合性能

中图分类号: TN929.5 TH86 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.50

Communication control method of dual-mode single-standby terminal based on semi-Markov chain

Xiang Min¹, Zhou Xingwang¹, Jiang Binglin², Hu Kunzhi¹, Zhang Jiajia¹

(1. Key Laboratory of Industrial Internet of Things and Networked Control, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China; 2. Powerchina Chongqing Engineering Corporation Limited, Chongqing 400060, China)

Abstract: Aiming at the low power consumption, bluetooth low energy (BLE) connection delay, and narrow band internet of things (NB-IoT) downlink traffic response delay requirements for NB-IoT and BLE dual-mode single-standby terminals, a terminal communication control method based on semi-Markov chain is proposed to enhance the comprehensive performance of the terminal. By integrating the extended idle mode discontinuous reception (eDRX) and power saving mode (PSM) of NB-IoT, where radio frequency is exclusively dedicated to BLE in PSM, a semi-Markov chain model for terminal communication state transition is constructed. This model is used to derive the power saving rate and the calculation model for the average NB-IoT downlink delay. Based on the delay requirements of BLE connection and NB-IoT downlink traffic, and combined with NB-IoT real-time traffic data, the critical parameters of eDRX are dynamically calculated. Subsequently, the terminal optimal comprehensive performance is achieved through optimizing BLE broadcast duration. Experimental results show that the proposed method achieves a power saving ratio exceeding 0.96 in low-power demand scenarios. Furthermore, in low-delay demand scenarios, the average downlink traffic response delay is less than 10 seconds. This method satisfies the communication delay requirement and reduces the communication power consumption of the terminal.

Keywords: dual-mode single-standby; semi-Markov chain; power saving ratio; delay; comprehensive performance

0 引言

随着物联网应用的迅速推广,在产品的部署过程中经常需要面对复杂的工作环境,很多情况下需要通过低功耗广域网(low power wide area network, LPWAN)和无线局域网(wire local area network, WLAN)相互配合方可确保物联网服务质量。例如,在远程污水监测应用场景中,窄带物联网(narrow band internet of things, NB-IoT)被用于高可靠的本地数据上报,而低功耗蓝牙(blueetooth low energy, BLE)被用于现场无线运维,通过结合两种通信方式可以满足更多样化的污水监测功能需求。NB-IoT相比其他的LPWAN技术具有覆盖广、成本低、功耗低等特点,其在许多严峻环境的应用优势已逐渐显现^[1-3]。在Mesh组网技术被加入蓝牙规范后,BLE的低功耗性、组网灵活性、通信可靠性、通信安全性等特点在当前WLAN技术中具有突出优势,目前BLE相关技术已广泛应用于诸多领域^[4-6]。因此,能在更低成本条件下结合NB-IoT和BLE两者优势的双模单待终端也将在未来低功耗物联网应用中占据重要地位,但需考虑如何对两种不同的通信方式进行切换以满足终端的通信业务需求。

近年来,国内外关于异构网络切换控制方法的研究已有不少成果。文献[7]提出了一种基于多属性决策算法并结合粒子群优化和引力搜索算法的自适应切换方法,该方法考虑了多种网络属性,引入了控制切换参数辅助切换决策,并通过优化的算法来达到参数最优,与多种基于多属性决策的切换方法相比,不必要的切换减少了40%以上并实现了更好的负载分配。文献[8]提出了一种基于隐马尔科夫模型的无线保真网络和可见光通信异构网络切换算法,优化了切换成本和停留时间。文献[9]提出了一种基于位置估计方法的NB-IoT与IEEE 802.11ah网络之间的切换机制,相比于依赖定期侦听信道的切换算法,其极大降低了能耗。目前关于通信切换算法或机制的研究大多是针对密集型异构网络或多模多待终端,需要定期对候选网络进行相关参数采集,这不太适用于功耗敏感的物联网终端,另外也较少考虑在切换过程中由于需要连接新网络而增加的切换时延和能耗。

NB-IoT的两种低功耗技术,即扩展型非连续接收(extended idle mode discontinuous reception, eDRX)和省电模式(power saving mode, PSM),能够实现低功耗休眠及下行监听的快速状态切换^[10],这带来了新的解决思路。文献[11]在eDRX机制中添加了新的辅助状态用于优化小数据传输情景下的终端能耗,在某些参数设置下节能系数大于97%。文献[12]提出四态半马尔科夫链对eDRX和PSM机制进行建模,引入PSM参数优化模

型,根据用户偏好确定PSM参数取值以平衡时延与能耗。文献[13]提出马尔科夫模型评估使用PSM和eDRX的设备性能,根据不同应用场景确定参数集以进行针对性的性能优化。文献[14]提出了一种适用于智能电网应用的基于分组的eDRX参数配置方案,在许多情况下的终端功耗与通信时延均优于标准的非连续接收(discontinuous reception, DRX)机制。

综上所述,多数异构网络切换控制方法难以满足NB-IoT和BLE双模单待终端的需求,而eDRX和PSM的技术特点比较适合应用于该类型终端,因此利用eDRX和PSM技术实现该类型终端的通信高效切换以降低切换时延和功耗。为满足不同业务传输的终端低功耗、BLE连接时延和NB-IoT下行业务低响应时延的需求,本文提出动态eDRX和PSM参数控制方法,根据通信时延要求和业务流量信息动态调控相关参数,提升终端在功耗节约率和NB-IoT下行平均时延的综合性能。

1 基于eDRX和PSM的双模切换过程

NB-IoT低功耗技术包括eDRX和PSM,PSM下用户终端设备(user equipment, UE)可以关闭NB-IoT射频,且在返回无线资源控制层(radio resource control, RRC)连接态时无需重新建立分组数据网络(packet data network, PDN)连接^[10],而在eDRX下则可以实现可调监听频率的低功耗下行信道监听^[15],此外,由于RRC连接态的功耗相对较高,为了能够进一步降低功耗,NB-IoT还允许UE使用释放辅助指示(release assistance indication, RAI)实现快速地退出连接态^[13]。上述机制非常适用于NB-IoT和BLE双模单待终端的通信切换控制,UE可以控制NB-IoT在eDRX下独占射频,而让BLE在PSM下独占射频,通过eDRX和PSM相关参数关联的定时器实现自动切换,利用RAI和PSM快速唤醒机制提高切换效率,并在切换时对冲突和业务数据进行适当处理,以此在低功耗条件下实现双模通信状态的高效切换。

由于NB-IoT中的激活定时器和跟踪区域更新定时器需要向网络侧申请,且不支持设置较小的数值^[16],难以满足更灵活的双模通信应用需求,因此用UE侧维护的持续时间为 T_{IDLE} 的空闲定时器和持续时间为 T_{BLE} 的PSM定时器控制UE进行通信状态的自动切换,终端BLE处于未连接状态时,工作时序图如图1所示。

图1中,UE通信状态包括RRC连接态、eDRX空闲态及PSM态,其中空闲态由若干eDRX寻呼态和通信休眠态组成,基于eDRX和PSM技术实现双模通信切换,UE的通信状态转化逻辑如图2所示。

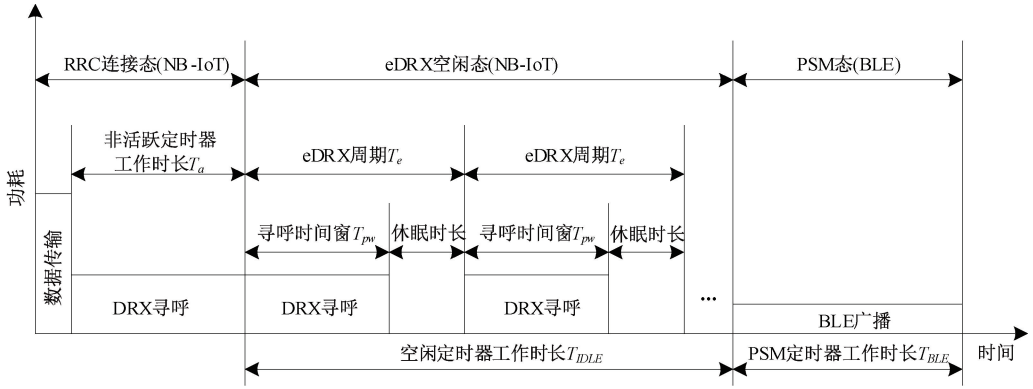


图1 双模单待终端的工作时序图

Fig. 1 Work timing diagram of dual-mode single-standby terminal

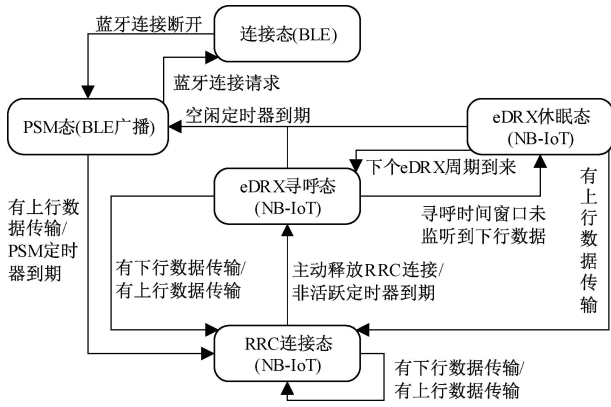


图2 双模单待终端的通信状态转化逻辑

Fig. 2 Communication state transition logic for dual-mode single-standby terminal

下文将结合图1和2介绍双模切换过程。

1) UE处于RRC连接态时:此状态下,空闲定时器和PSM定时器关闭,RRC非活跃定时器开启并持续工作。在非活跃定时器未到期之前,即处于 T_a 时段内,一旦UE需要传输上行或下行数据都会立即重置 T_a ,并在此状态完成业务数据的传输。当非活跃定时器到期或者UE主动释放RRC连接时将进入eDRX空闲态。

2) UE处于eDRX空闲态时:此状态下,空闲定时器开启。当空闲定时器到期且无需传输数据时转移到PSM态,一旦在 T_{idle} 时段内UE需传输任何数据都会优先切换到RRC连接态,其中只有处于eDRX寻呼态时才进行下行监听。处于eDRX寻呼态时,寻呼超时若仍无数据传输则进入当前eDRX周期的休眠态,而处于休眠态时,当下个eDRX周期到来时将再次进入寻呼态。

3) UE处于PSM态时:此状态下,PSM定时器开启。 T_{BLE} 时段内,若UE没有接收到BLE连接请求或无需传输上行数据,则会持续进行BLE广播,而当PSM定时器到期,UE将会主动切换到RRC连接态。

4) UE处于BLE连接态时:此状态下,空闲定时器和PSM定时器皆关闭。在BLE断开连接之前,UE会一直保持在该状态,意味着在此期间若需要传输上行数据则不会得到通信切换响应,而是将数据进行本地保存,防止BLE意外断开而影响用户使用体验。

2 基于半马尔科夫链的终端功耗与时延计算模型

双模切换控制的能耗与时延受eDRX和PSM中相关参数直接影响,对于固定式的eDRX和PSM参数配置方法,往往只适用于特定业务场景,而对于更复杂的业务场景,则难以在功耗与时延上取得更好的平衡。为便于设计本文所提出的双模通信控制方法,需要对兼顾上下行传输业务的双模切换过程进行建模分析以找到终端功耗及通信时延与相关参数之间的联系。

2.1 数据流量模型

为评估双模切换控制的能耗与时延,采用半马尔科夫链建模的方式,原因是当前时刻的终端通信状态只与上一时刻的通信状态有关^[17],且通信切换过程的状态转换和状态保持时间是可以遵循任意分布的,满足建模条件^[18]。另外,由于通信状态切换会同时受上行和下行业务影响,且两种流量特点不同,因此各状态的分析需综合考虑两种数据流量模型。

NB-IoT下行业务流量具有自相似性,表现出了突发性、重尾分布和交互性的特点,因此采用欧洲通信标准化协会(european telecommunications standards institute, ETSI)数据流量模型更符合实际应用情况,ETSI数据流量模型如图3所示。

在图3中,ETSI数据流量模型由若干个服从到达时间为 t_{sa} 的指数分布的会话组成,而每个会话是由多个到达时间服从 t_{ca} 的指数分布的数据包分组呼叫组成。具体模型参数如表1所示。

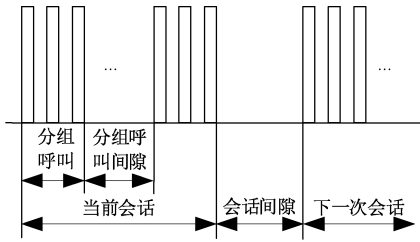


图3 ETSI数据流量模型

Fig. 3 ETSI data traffic model

表1 ETSI数据流量模型参数

Table 1 Parameters of the ETSI data traffic model

参数	分布	均值
数据包到达间隙 t_{pa}	指数	$1/\lambda_{pa}$
会话到达间隙 t_{sa}	指数	$1/\lambda_{sa}$
一次会话中分组呼叫数量 η_{cs}	几何	$\bar{\eta}_{cs}$
分组呼叫之间的间隙 t_{ca}	指数	$1/\lambda_{ca}$
一次分组呼叫中数据包数量 η_{pc}	几何	$\bar{\eta}_{pc}$

在任意时刻,相邻两个数据分组呼叫间的间隙有可能为分组呼叫之间的间隙,也可能为会话到达间隙,其概率分别为 $P_{cs} = 1 - (1/\bar{\eta}_{cs})$, $P_{ns} = 1 - P_{cs}$ [19]。

上行业务使用泊松流量模型,假设上行请求时间间隔为 t_u ,服从均值为 $1/\lambda_u$ 的指数分布 [20]。

2.2 终端通信状态转换的半马尔科夫链模型

由图1可知,空闲态由 N 个 eDRX 周期 T_e 组成,终端通信状态转换的半马尔科夫链模型,如图4所示。

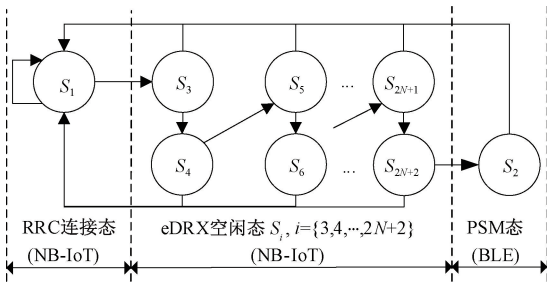


图4 终端通信状态转换的半马尔科夫链模型

Fig. 4 Semi-Markov chain model for terminal communication state transitions

在图4中, S_1 为 RRC 连接态, S_2 为 PSM 态, S_{2i+1} , $i \in [1, N]$ 为 eDRX 寻呼态, S_{2i+2} , $i \in [1, N]$ 为 eDRX 休眠态。用 $P_{x,y}$ 表示从状态 x 转移到状态 y 的概率,其中 $x, y \in [1, 2N+2]$ 。

1) RRC 连接态 S_1

当非活跃定时器到期且 UE 无需传输任何数据时,此时将转移状态到 eDRX 空闲态的第 1 个 eDRX 周期的

寻呼状态 $S_3, P_{1,3}$ 的计算式如式(1)所示。

$$P_{1,3} = (P_{DL}(t_{ca} > T_a)P_{cs} + P_{DL}(t_{sa} > T_a)P_{ns}) \times P_{UL}(t_u > T_a) = P_{cs} e^{-(\lambda_{ca} + \lambda_u)T_a} + P_{ns} e^{-(\lambda_{sa} + \lambda_u)T_a} \quad (1)$$

式中: $P_{DL}(t_{ca} > T_a)$ 表示 $t_{ca} > T_a$ 的概率,即下行业务分组呼叫间隙大于非活跃定时器工作时长的概率,表明在进入空闲态前无下行数据到达;同理 $P_{DL}(t_{sa} > T_a)$ 和 $P_{UL}(t_u > T_a)$ 分别代表下行业务会话和上行数据在 T_a 后才可能到达,此时可认为 UE 无需传输任何数据。

当 UE 需要传输上行或下行数据的时候,将会保持在 S_1 状态并重置 T_a ,根据转移概率的性质,由此可得出 $P_{1,1}$ 的计算式如式(2)所示。

$$P_{1,1} = 1 - P_{1,3} = P_{cs}(1 - e^{-(\lambda_{ca} + \lambda_u)T_a}) + P_{ns}(1 - e^{-(\lambda_{sa} + \lambda_u)T_a}) \quad (2)$$

2) PSM 态 S_2

T_{BLE} 内需要传输上行数据或 PSM 定时器到期后,UE 都会转移状态到 $S_1, P_{2,1}$ 的计算式如式(3)所示。

$$P_{2,1} = 1 \quad (3)$$

3) eDRX 寻呼态 $S_{2i+1}, i \in [1, N]$

由于存在 $(T_{IDLE} < N \times T_e)$, 即当空闲定时器到期之后,最后一个 eDRX 周期可能存在不能被完整利用的情况, eDRX 休眠态引入的 NB-IoT 下行时延可能会累积到 PSM 态,为更严格满足 NB-IoT 下行业务响应时延的要求, BLE 广播保持时长 T_{BLE} 的计算需要确定当前寻呼态的有效监听时长 T_{pwa}, T_{pwa} 的计算式如式(4)所示。

$$T_{pwa} = \min(T_{IDLE} - (i-1)T_e, T_{pw}) \quad (4)$$

式中: T_{pw} 为寻呼窗口长度; $\min(\cdot)$ 为取最小值。

若 T_{pwa} 和上个 eDRX 通信休眠时段 T_{ps} 内都无下行数据传输,并且 T_{pwa} 内 UE 也无需传输上行数据时,转移状态到 S_{2i+2} ,转移概率为 $P_{2i+1,2i+2}$ 。需要说明的是,只有在第 1 个 eDRX 周期内才不存在上个 eDRX 休眠时段,为便于计算,引入变量 m 来判断当前是否为第 1 个 eDRX 周期,变量 m 的计算式如式(5)所示。

$$m = \min(\lfloor i/2 \rfloor, 1) \quad (5)$$

式中: $\lfloor \cdot \rfloor$ 代表对参数进行向下取整。

进一步,可以得到 $P_{2i+1,2i+2}$ 计算式如式(6)所示。

$$P_{2i+1,2i+2} = (P_{cs}P_{DL}(t_{ca} > T_{ea}) + P_{ns}P_{DL}(t_{sa} > T_{ea})) \times P_{UL}(t_u > T_{pwa}) = P_{cs} e^{-\lambda_{ca}T_{ea} - \lambda_u T_{pwa}} + P_{ns} e^{-\lambda_{sa}T_{ea} - \lambda_u T_{pwa}} \quad (6)$$

式中: $T_{ea} = mT_{ps} + T_{pwa}$, T_{ps} 可由当前 T_e 和 T_{pw} 算得。

当寻呼时段 T_{pwa} 内有数据传输时,UE 转移到状态 S_1 ,转移概率 $P_{2i+1,1}$ 的计算式如式(7)所示。

$$P_{2i+1,1} = 1 - P_{2i+1,2i+2} = P_{cs}(1 - e^{-\lambda_{ca}T_{ea} - \lambda_u T_{pwa}}) + P_{ns}(1 - e^{-\lambda_{sa}T_{ea} - \lambda_u T_{pwa}}) \quad (7)$$

4) 前 $(N-1)$ 个 eDRX 周期的通信休眠状态 $S_{2i+2}, i \in [1, N-1]$

当 UE 需传输上行数据时,转移转态到 S_1 ,转移概率 $P_{2i+2,1}$ 的计算式如式(8)所示。

$$P_{2i+2,1} = P_{UL}(t_u < T_{ps}) = 1 - e^{-\lambda_u T_{ps}} \quad (8)$$

当整个休眠时段都无需传输上行数据时,转移状态到 S_{2i+3} , 转移概率 $P_{2i+2,2i+3}$ 的计算式如式(9)所示。

$$P_{2i+2,2i+3} = 1 - P_{2i+2,1} = e^{-\lambda_u T_{ps}} \quad (9)$$

5) 最后一个 eDRX 周期的休眠状态 S_{2N+2}

当前状态面临切换到 BLE, 为满足从 BLE 态唤醒时的 NB-IoT 下行响应时延要求, 同理需考虑 UE 有效休眠时长 T_{psa} , T_{psa} 的计算式如式(10)所示。

$$T_{psa} = \min(T_{IDLE} - (i-1)T_e - T_{pua}, T_{ps}) \quad (10)$$

式中: $i = N$; 有效监听时长 T_{pua} 可由式(4)计算得出。还可知前 $(N-1)$ 个 eDRX 周期的有效休眠时长 $T_{psa} = T_{ps}$ 。

当 UE 需传输上行数据时, 转移状态到 S_1 , 转移概率 $P_{2N+2,1}$ 的计算式如式(11)所示。

$$P_{2N+2,1} = P_{UL}(t_u < T_{psa}) = 1 - e^{-\lambda_u T_{psa}} \quad (11)$$

当 UE 无需传输上行数据时, T_{psa} 之后转移到状态 S_2 , 转移概率 $P_{2N+2,2}$ 的计算式如式(12)所示。

$$P_{2N+2,2} = 1 - P_{2N+2,1} = e^{-\lambda_u T_{psa}} \quad (12)$$

综上, 可得所建半马尔科夫链的状态转移矩阵 P_T 如式(13)所示。

$$P_T = \begin{bmatrix} P_{1,1} & P_{1,2} & \cdots & P_{1,2N+2} \\ P_{2,1} & P_{2,2} & \cdots & P_{2,2N+2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{2N+2,1} & \cdots & \cdots & P_{2N+2,2N+2} \end{bmatrix} \quad (13)$$

由于所建半马尔科夫链是不可约的、非周期的和状态有限的, 因此具有遍历性, 即半马尔科夫链可收敛, 同时存在稳态分布^[21]。使用 π_k 表示半马尔科夫链中处于状态 S_k 的稳态概率, 显然 π_k 满足关系表达式如式(14)所示。

$$\sum_{k=1}^{2N+2} \pi_k = 1 \quad (14)$$

进一步, 根据马尔科夫平衡方程, 可得各状态的稳态概率计算式如式(15)所示。

$$\pi_k = \sum_{j=1}^{2N+2} \pi_j \cdot P_{j,k}, k \in [1, 2N+2] \quad (15)$$

利用式(14)和(15)便可得到所建半马尔科夫链各个状态的稳态概率 π_k ^[22]。

2.3 功耗节约率和 NB-IoT 下行平均时延

为评估终端功耗和 NB-IoT 下行时延, 分别定义功耗节约率 η_{ps} 和 NB-IoT 下行平均时延 T_{ad} ^[11]。 η_{ps} 为 UE 在 eDRX 通信休眠和 PSM 状态的平均保持时间与总时间之比, 该指标越大代表越节能, 而下行时延也是由这两种状态引入, 参考文献[11]的计算方法, 结合不同状态的平均时延, 同理也可算得 T_{ad} 。需要说明的是, 为简化模型和计算, 本文研究的时延忽略了 DRX 寻呼状态引入的时延, 原因是其相对其他状态对于终端整体下行时延的影响较小, 且在实际应用中 DRX 参数一般为定值。 η_{ps} 和

T_{ad} 的计算需要各状态的稳态概率和保持时间, 因此还需对保持时间进行计算。对于状态 S_z 的保持时间, 用 T_z 符号表示, 其中 $z \in [1, 2N+2]$ 。

1) 状态 S_1 的保持时间 T_1

有 2 种情形 UE 会保持在 S_1 : T_a 内无需传输数据, 概率为 $P_{1,3}$, 保持时间为 T_a ; T_a 内第 k 个子帧需要传输数据, 概率为 P_k^1 , 保持时间由子帧数决定。此状态的保持时间 T_1 计算式如式(16)所示。

$$T_1 = P_{1,3} T_a + \sum_{k=1}^{T_a} P_k^1 \times T_k^1 \quad (16)$$

式中: T_k^1 为实际保持时间, 每当 UE 再次传输数据时, 非活跃定时器将重新计时, T_k^1 计算式如式(17)所示。

$$T_k^1 = T_1 + k + t_{sv} \quad (17)$$

式中: t_{sv} 表示一次分组呼叫中传输所有数据包的时间, t_{sv} 计算式如式(18)所示^[19]。

$$t_{sv} = (\bar{\eta}_{pc} - 1) / \lambda_{pa} \quad (18)$$

式(16)中的概率 P_k^1 表示 UE 在第 $k-1 \sim k$ 个子帧之间需要传输数据, P_k^1 的计算式如式(19)所示。

$$P_k^1 = P_{UDL}(k-1 < t < k) = P_{cs}(e^{-(\lambda_{ca} + \lambda_u)(k-1)} - e^{-(\lambda_{ca} + \lambda_u)k}) + P_{ns}(e^{-(\lambda_{sa} + \lambda_u)(k-1)} - e^{-(\lambda_{sa} + \lambda_u)k}) \quad (19)$$

联立式(16)~(19), 可得 T_1 化简式如式(20)所示。

$$T_1 = \left(P_{cs} \frac{1 - e^{-(\lambda_{ca} + \lambda_u)T_a}}{1 - e^{-(\lambda_{ca} + \lambda_u)}} + P_{ns} \frac{1 - e^{-(\lambda_{sa} + \lambda_u)T_a}}{1 - e^{-(\lambda_{sa} + \lambda_u)}} + t_{sv} \right) / (P_{cs} e^{-(\lambda_{ca} + \lambda_u)T_a} + P_{ns} e^{-(\lambda_{sa} + \lambda_u)T_a}) - t_{sv} \quad (20)$$

2) 状态 S_2 的保持时间 T_2

有 2 种情形 UE 会保持在 S_2 : T_{BLE} 内无需传输上行数据, 概率为 $P'_{2,1}$, 保持时间为 T_{BLE} ; T_{BLE} 内第 k 个子帧需要上传数据, 概率为 P_k^2 , 保持时间为 T_k^2 。此状态保持时间 T_2 的计算式如式(21)所示。

$$T_2 = P'_{2,1} T_{BLE} + \sum_{k=1}^{T_{BLE}} P_k^2 \times T_k^2 \quad (21)$$

式中: $P'_{2,1}$ 代表 T_{BLE} 后 UE 才可能需要传输上行数据, $P'_{2,1}$ 的计算式如式(22)所示。

$$P'_{2,1} = P_{UL}(t_u > T_{BLE}) = e^{-\lambda_u T_{BLE}} \quad (22)$$

同理式(21)中 P_k^2 的计算式如式(23)所示。

$$P_k^2 = P_{UL}(k-1 < t < k) = e^{-\lambda_u(k-1)} - e^{-\lambda_u k} \quad (23)$$

联立式(21)~(23), 可得 T_2 计算式如式(24)所示。

$$T_2 = (1 - e^{-\lambda_u T_{BLE}}) / (1 - e^{-\lambda_u}) \quad (24)$$

3) 状态 S_{2i+1} 的保持时间 T_{2i+1}

有 3 种情形 UE 会保持在该状态: 若存在上一个 eDRX 休眠状态 S_{2i} 且有数据到达, 概率为 P_i , 将在下一个子帧切换到状态 S_1 , 保持时间 $T_i = 1$; 在 T_{pua} 内第 k 个子帧需要传输数据, 概率为 P_k^3 , 保持时间为 T_k^3 ; 在 T_{pua} 内无需

传输数据,概率为 $P_{2i+1,2i+2}$,保持时间为 T_{psa} 。保持时间 T_{2i+1} 的计算式如式(25)所示。

$$T_{2i+1} = mP_l T_l + \sum_{k=1}^{T_{psa}} P_k^3 \times T_k^3 + P_{2i+1,2i+2} T_{psa} \quad (25)$$

式中: T_{psa} 由式(4)可算得, P_l 计算式如式(26)所示。

$$P_l = P_{cs}(1 - e^{-(\lambda_{ca} + \lambda_u)T_{ps}}) + P_{ns}(1 - e^{-(\lambda_{sa} + \lambda_u)T_{ps}}) \quad (26)$$

同理式(25)中 P_k^3 的计算式如式(27)所示。

$$P_k^3 = P_{cs}(e^{-\lambda_{ca}(mT_{ps}+k-1)-\lambda_u(k-1)} - e^{-\lambda_{ca}(mT_{ps}+k)-\lambda_u k}) + P_{ns}(e^{-\lambda_{sa}(mT_{ps}+k-1)-\lambda_u(k-1)} - e^{-\lambda_{sa}(mT_{ps}+k)-\lambda_u k}) \quad (27)$$

联立式(25)~(27),可得 T_{2i+1} 计算式如式(28)所示。

$$T_{2i+1} = m[P_{cs}(1 - e^{-(\lambda_{ca} + \lambda_u)T_{ps}}) + P_{ns}(1 - e^{-(\lambda_{sa} + \lambda_u)T_{ps}})] + \left(P_{cs} \frac{e^{-m\lambda_{ca}T_{ps}}(1 - e^{-(\lambda_{ca} + \lambda_u)T_{psa}})}{1 - e^{-(\lambda_{ca} + \lambda_u)T_{ps}}} + P_{ns} \frac{e^{-m\lambda_{sa}T_{ps}}(1 - e^{-(\lambda_{sa} + \lambda_u)T_{psa}})}{1 - e^{-(\lambda_{sa} + \lambda_u)T_{ps}}} \right) \quad (28)$$

4) 状态 S_{2i+2} 的保持时间 T_{2i+2}

有2种情形 UE 会保持在 S_{2i+2} : 休眠时段 T_{psa} 无需上传数据,概率为 $P_{2i+2,2i+3}$,保持时间为 T_{psa} ; T_{psa} 内第 k 个子帧需要上传数据,概率为 P_k^4 ,保持时间为 T_k^4 。同理 T_{2i+2} 的计算式如式(29)所示。

$$T_{2i+2} = P_{2i+2,2i+3} T_{psa} + \sum_{k=1}^{T_{psa}} P_k^4 \times T_k^4 = (1 - e^{-\lambda_u T_{psa}}) / (1 - e^{-\lambda_u}) \quad (29)$$

式中: T_{psa} 可由式(10)计算得出。

结合各状态的稳态概率和保持时间,可以得到功耗节约率 η_{ps} 的计算式如式(30)所示。

$$\eta_{ps}(T_{IDLE}, T_a, T_e, T_{pw}, T_{BLE}) = \frac{\sum_{i=0}^N \pi_{2i+2} T_{2i+2}}{\sum_{i=1}^{2N+2} \pi_i T_i} \quad (30)$$

NB-IoT 下行平均时延 T_{ad} 的计算式如式(31)所示。

$$T_{ad}(T_{IDLE}, T_a, T_e, T_{pw}, T_{BLE}) = \left(\frac{T_{ps}}{2} \sum_{i=1}^{N-1} \pi_{2i+2} T_{2i+2} + \frac{T_{psa}}{2} \pi_{2N+2} T_{2N+2} + \frac{T_{BLE}}{2} \pi_2 T_2 \right) / \sum_{i=1}^{2N+2} \pi_i T_i \quad (31)$$

3 NB-IoT 和 BLE 双模单待通信控制方法

3.1 eDRX 和 PSM 关键参数控制

为满足不同业务传输的终端低功耗、BLE 连接时延和 NB-IoT 下行业务低响应时延的需求,在进行双模通信切换控制时需动态调控 BLE 工作时长和 NB-IoT 的通信休眠时长及下行监听频率,即需要对 PSM 和 eDRX 参数

进行调整。本文所提方法主要控制的 eDRX 参数包括非活跃定时器工作时长 T_a 、eDRX 周期 T_e 、寻呼窗口长度 T_{pw} 和空闲态持续时间 T_{IDLE} , PSM 参数为 PSM 态持续时间 T_{BLE} ,同时 T_{BLE} 也是 BLE 广播的保持时长。

1) 空闲态持续时间 T_{IDLE}

考虑 BLE 连接响应时延只需满足要求即可,且空闲态引入的功耗和时延都可由 eDRX 相关参数进行控制,因此可得 T_{IDLE} 的计算式如式(32)所示。

$$T_{IDLE} = (1 - \alpha) T_{bd} \quad (32)$$

式中: α 为裕量系数,该值越大代表通信切换的预留时间越充足,满足 $\alpha \in [0, 1]$; T_{bd} 为 BLE 最大连接响应时延要求,令 T_{IDLE} 不超过 T_{bd} , UE 只需在 T_{IDLE} 之后及时切换到 BLE 即可满足蓝牙连接时延要求。

2) 非活跃定时器工作时长 T_a

由下行业务采用的 ETSI 数据流量模型特点可知,短期内数据包的到达时间间隔较小,而分组呼叫则稍大,因此对于下行数据到达情况,UE 可以获取短期内的数据平均到达间隔 $\bar{t}_1$ 和相对更长期的数据平均到达间隔 $\bar{t}_2$,此处短期范围定义为 $0 \sim T_{pi}$ s, T_{pi} 代表最小寻呼窗口长度,核心网侧一般默认为 2.56 s,相对更长期的范围定义为大于 T_{pi} s。

当下行数据到达时,为防止 UE 重复进入连接态而导致功耗较高,通过设置合适的 T_a 使得 UE 能尽可能一次性完成较频繁的数据包的传输,因此可以让 T_a 稍大于 $\bar{t}_1$,而当无下行数据到达时, T_a 可取最小值,使得终端能快速地释放 RRC 连接以进入 eDRX 空闲态从而降低功耗, T_a 的计算式如式(33)所示。

$$T_a = \begin{cases} T_{ai}, & Q_{DL} = 0 \text{ 且 } Q_{UL} = 0 \\ T'_a, & Q_{DL} = 0 \text{ 且 } Q_{UL} > 0 \\ \lceil \bar{t}_1 \rceil, & Q_{DL} > 0 \end{cases} \quad (33)$$

式中: T_{ai} 代表 T_a 的最小取值,核心网侧一般默认为 1 s; Q_{DL} 和 Q_{UL} 分别为终端下行和上行接收缓冲区中待处理的数据队列数量,由定义有 $Q_{DL} \geq 0$ 和 $Q_{UL} \geq 0$; T'_a 代表上时刻寻呼窗口长度; $\lceil \cdot \rceil$ 代表对参数向上取整。

3) eDRX 周期 T_e

由于每个 eDRX 周期终端都会进行下行监听,因此让 T_e 在有效范围内接近 t_2 便可更高效降低下行时延,同时还需在时延要求 T_{nd} 内至少监听一次,此外 T_e 取值也无需超过 T_{bd} 。当 Q_{DL} 和 Q_{UL} 皆为零值时认为无数据活跃,终端可合理增大 T_e 以提高休眠时间占比,达到进一步降低功耗的目的。 T_e 的计算式如式(34)所示。

$$T_e = \begin{cases} \min(\beta T'_e, T_{ei} \beta^{\lceil \log_{\beta}(T_{bd}/T_{ei}) \rceil}, T_{ea}), & Q_{DL} = 0 \text{ 且 } Q_{UL} = 0 \\ T'_e, & Q_{DL} = 0 \text{ 且 } Q_{UL} > 0 \\ \min(T_{ea}, T_{ei} \beta^{\max(0, \lceil \log_{\beta} \min(T_{bd}/T_{ei}, T_{ei}^{1/2}/T_{ei}, (1-\psi)T_{nd}/T_{ei}) \rceil)}), & Q_{DL} > 0 \end{cases} \quad (34)$$

式中: β 为 T_e 最小扩大倍数且 $\beta > 1$, T_{ei} 为 T_e 可取的最小值, T_{ea} 为 T_e 可取的最大值, 在核心网侧一般分别默认为 2 倍、20.48 s 和 10 485.76 s; T'_e 为上时刻 eDRX 周期值; T_{nd} 为用户要求的最大下行业务响应时延; 由于下行业务响应时延由上行时延、下行时延、终端的业务流量处理时长等多部分组成, 为更严格达到用户要求, 在考虑终端可容忍的最大下行时延的时候需要留有一定裕度, 用裕量 ψ 进行设计, ψ 取值可根据具体实际应用情况进行确定并满足 $\psi \in [0, 1]$ 。

4) 寻呼窗口长度 T_{pw}

T_e 确定后, 让 eDRX 休眠长度在有效取值范围内略小于 $\bar{t}_2$, 这样处理可让下行数据更大可能落在寻呼时段, T_{pw} 的计算式如式 (35) 所示。

$$T_{pw} = \begin{cases} \max(T_{pi}, T'_{pw} - 2T_{pr}), & Q_{DL} = 0 \text{ 且 } Q_{UL} = 0 \\ T'_{pw}, & Q_{DL} = 0 \text{ 且 } Q_{UL} > 0 \\ \min(T_{pa}, \max(T_e - \lfloor \bar{t}_2 / T_{pr} \rfloor T_{pr}, T_e - \lfloor (1 - \psi) T_{nd} / T_{pr} \rfloor T_{pr}, T_{pi})), & Q_{DL} > 0 \end{cases} \quad (35)$$

式中: T_{pi} 为 T_{pw} 可取的最小值, T_{pr} 为 T_{pw} 支持的最小可调整幅度, T_{pa} 为 T_{pw} 最大值, 在核心网侧一般分别默认为 2.56、2.56 和 40.96 s; T'_{pw} 为旧配置参数。

5) 终端最优综合性能 $G(T_{BLE})$

η_{ps} 和 T_{ad} 都与 eDRX、PSM 和流量模型参数相关, 上述步骤已算得 eDRX 的参数, 数据流量模型中的参数可结合 $\bar{t}_1$ 、 $\bar{t}_2$ 和具体上下行业务进行确定, 故只有 T_{BLE} 是未知变量。 T_{BLE} 的取值同样对功耗和 NB-IoT 下行响应时延有较大影响, 为使终端在 NB-IoT 下行时延和功耗中取得良好的平衡, 利用式 (30) 和 (31) 建立 PSM 参数 T_{BLE} 的控制模型如式 (36) 所示。

$$\begin{cases} G(T_{BLE}) = \max\left(\left(1 - \frac{Q_{DL}}{Q_{DLa}}\right) \times \eta_{ps} - \frac{Q_{DL}}{Q_{DLa}} \times \frac{T_{ad}}{(1 - \psi) T_{nd}}\right) \\ \text{s. t. } T_{Bi} \leq T_{BLE} \leq ((1 - \psi) T_{nd} - T_{psa}^d) \\ 0 \leq \frac{Q_{DL}}{Q_{DLa}} \leq 1 \end{cases} \quad (36)$$

其中, 定义 $G(T_{BLE})$ 为终端最优综合性能, $G(T_{BLE})$ 中 η_{ps} 与 $(T_{ad} / (1 - \psi) T_{nd})$ 都进行了归一化处理, 对两个归一化参数进行相减的原因是二者都关于 T_{BLE} 递增, 而终端性能的优化目标是为了最大化 η_{ps} 和最小化 T_{ad} ; T_{Bi} 为 BLE 有效工作时长最小值, 通常大于 BLE 可靠连接的最小时长; 由于需保障切换到 BLE 时终端通信可正常连接, 且实际应用中一般不会要求下行业务的响应时延为极端低值, 因此 $((1 - \psi) T_{nd})$ 值的设置需大于 $(T_{Bi} + T_{psa}^d)$

值; T_{psa}^d 为最后一个 eDRX 周期的有效休眠时长, 可由式 (10) 计算得出; Q_{DLa} 为终端下行接收缓冲区中可存储的最大数据队列数量, 可根据具体需求进行合理设计并满足 $Q_{DLa} > 0$ 。当 (Q_{DL} / Q_{DLa}) 值越大时, η_{ps} 对于 $G(T_{BLE})$ 的影响就越小, 意味着业务需求和 T_{BLE} 控制模型的参数优化方向此时越倾向于低时延, 反之越倾向于低功耗。在满足 T_{BLE} 取值要求的约束条件下, 当取得最优综合性能 $G(T_{BLE})$ 时, 可计算得到极大值 T_{BLE} , 并以该参数作为 UE 的 BLE 广播保持时长。

3.2 双模通信控制方法实现

先结合通信时延要求和实时业务流量计算 eDRX 的参数, 再基于半马尔科夫链的平稳分布获取最优综合性能从而确定 PSM 参数。NB-IoT 和 BLE 双模单待终端通信控制方法的实现流程如图 5 所示。

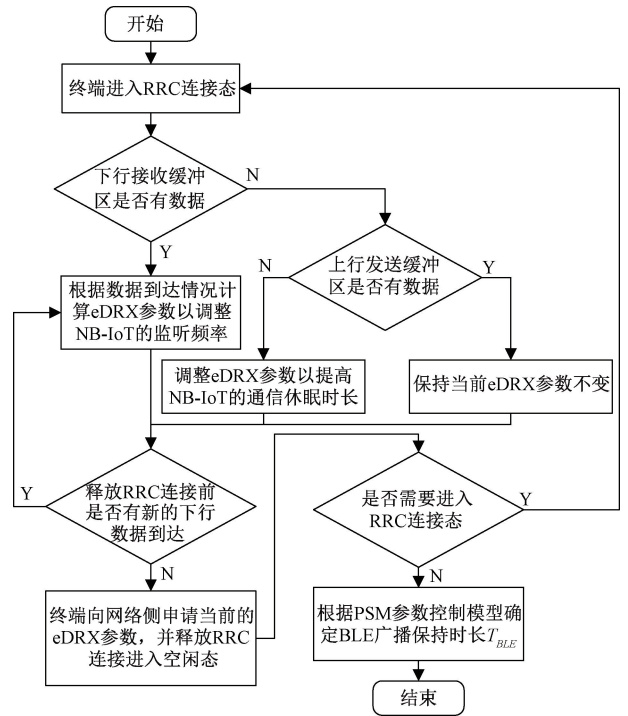


图5 NB-IoT 和 BLE 双模单待终端通信控制方法流程

Fig. 5 Flow chart of communication control method of NB-IoT and BLE dual-mode single standby terminal

终端使用本地的数据收发缓冲区对上下行业务流量进行处理, 且处于连接态时会对缓冲区数据进行统计分析以实时调整 eDRX 的参数。首先终端需要判断下行接收缓冲区中是否有数据, 如有, 则结合数据到达情况和 eDRX 相关参数的计算方法对 eDRX 参数进行调整, 若为空, 则进一步去检查上行发送缓冲区。如果上行发送缓冲区也为空, 则代表本次进入连接态是由于终端进行了一次自主的通信状态切换, 目的是为了检查 PSM 期间是否有下行数据到达, 从而满足 NB-IoT 的下行业务响应时

延要求,这种情况可以适当提高 NB-IoT 的通信休眠时长并立即释放连接以节省功耗,如果上行发送缓冲区非空,由于此时可能会接收下行数据,则可以保持当前的 eDRX 参数不变。在释放 RRC 连接前如果有新的下行数据到达则重新计算 eDRX 参数,否则终端向网络侧申请 eDRX 参数并更新本地相关参数,完成之后便释放 RRC 连接进入空闲态。进入空闲态后,若无需再次进入连接态,则根据 PSM 参数控制模型得到当前最优的 BLE 广播保持时长,且该动作只需完成一次。若终端再次从空闲态或 PSM 态进入 RRC 连接态,则重复上述步骤以重新调整 eDRX 和 PSM 的相关参数。

由于所提通信控制方法在空闲态进行 PSM 参数的计算时能够维持已生效的 eDRX 参数不变,且终端只有在处于连接态时才会统计业务流量信息以更新 eDRX 参数,故此时半马尔科夫链模型的其他参数都是已知且固定的,转移矩阵 P_r 确定以后,存在且有唯一的稳态分布,稳态概率可结合式 (14) 和 (15) 计算得出,再通过 PSM 参数的控制模型即可实时获取 T_{BLE} 取值^[12]。

4 测试与分析

4.1 仿真测试

为验证所提方法的时延与能耗效果,本文参考 3GPP Release 13 中描述的 NB-IoT 业务模型和典型应用场景^[23-24],构建了两种业务场景进行方法性能的仿真验证。第 1 种场景的上行业务请求间隔 (uplink traffic request interval, ULI) 为 30 min,下行业务请求间隔 (downlink traffic request interval, DLI) 不超过 1 min,代表终端可能在进行远程参数配置;第 2 种场景的 ULI = 30 min 和 DLI ≥ 10 min,代表以周期上报为主。

为对比分析本文所提方法的 η_{ps} 和 T_{ad} , 与固定式的定时器配置方法和文献[14]所提的基于分组的 eDRX 参数配置方法进行对比。假设 $T_{nd} = 300$ s, $\psi = 0.02$, $T_{bd} = 200$ s, $\alpha = 0.1$, 可得 $T_{IDLE} = 180$ s, PSM 参数控制模型在偏向低时延优化时 (Q_{DL}/Q_{DLu}) 取 0.7, 偏向低功耗优化时取 0。参考运营商处的 eDRX 参数建议,低时延需求下的固定定时器配置方法 (以下简称固定定时器方法 1) 设置 $[T_a^1, T_e^1, T_{pw}^1] = [1, 20.48, 10.24]$ s, 低功耗需求下的固定定时器配置方法 (以下简称固定定时器方法 2) 设置 $[T_a^2, T_e^2, T_{pw}^2] = [1, 163.84, 10.24]$ s, 由于未给出 PSM 参数的建议值,因此固定式的定时器配置方法根据本文所提方法确定 PSM 参数取值。

1) ULI = 30 min 和 DLI ≤ 1 min 的业务场景

为分析对时延要求较高的场景下各方法的 η_{ps} 和 T_{ad} , 令 $[1/\lambda_{pa}, 1/\lambda_{sa}, \bar{\eta}_{cs}, \bar{\eta}_{pc}, 1/\lambda_u] = [0.1, 60, 5, 10, 1\ 800]$, 不同分组呼叫到达间隔 t_{ca} 的 PSM 参数如表 2 所示。

表 2 不同分组呼叫到达间隔的 PSM 参数
Table 2 PSM parameter for different inter-packet call idle time

参数	参数值/s						
t_{ca}	30	26	22	18	14	10	6
T_{BLE}^1	68.8	69.1	69.4	69.8	70.3	70.8	71.2
T_{BLE}^2	288	288	288	288	288	288	288

在表 2 中, T_{BLE}^1 和 T_{BLE}^2 分别为固定定时器方法 1 和方法 2 的 PSM 态持续时长。对于文献[14]方法,主要思路是为不同组的终端配置多种 eDRX 参数方案以平衡时延与能耗,因此可将上述两种不同需求下的 eDRX 和 PSM 参数加入其方案之中,而本文所提方法则动态计算相关参数。该业务场景下的仿真结果如图 6 所示。

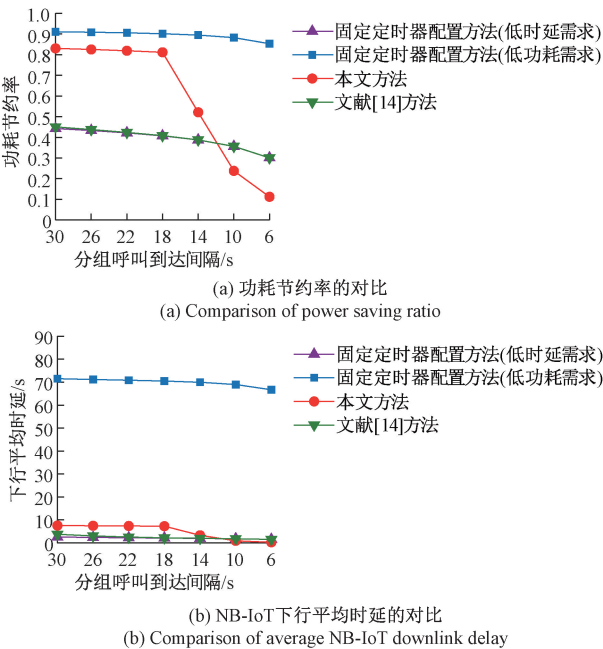


图 6 ULI = 30 min 和 DLI ≤ 1 min 业务场景的仿真结果
Fig. 6 Simulation results for ULI = 30 min and DLI ≤ 1 min scenarios

在图 6 中,随着 t_{ca} 减小,即分组呼叫到达越频繁,4 条曲线在 η_{ps} 和 T_{ad} 方面都在减小,原因在于终端会更频繁进入连接态,使得响应更及时,功耗更高。固定定时器方法 2 在此场景下 T_{ad} 较大,不满足低时延需求,而其他 3 种方法 T_{ad} 都小于 10 s。此外,相较于固定定时器方法 1 和文献[14]方法,本文方法会根据短时间内数据到达情况动态调控寻呼窗口长度和 eDRX 周期大小以获得良好的功耗与时延综合表现。例如,当 t_{ca} 较大时 (图 6 中 $t_{ca} > 14$ s 处),此时下行数据到达相对不是特别频繁,通过适当减小寻呼频率,能在增加较小 T_{ad} 情况下显著降低功

耗,随着 t_{ca} 减小,本文方法还能通过逐渐提高监听频率,从而使 T_{ad} 更小。

2) ULI=30 min 和 DLI≥10 min 的业务场景

为分析对低功耗要求较高的场景下各方法的 T_{ad} 和 η_{ps} ,令 $[1/\lambda_{pa}, \bar{\eta}_{ca}, \bar{\eta}_{pc}, 1/\lambda_u] = [0.1, 1, 10, 1\ 800]$,此时 t_{ca} 取值不影响功耗与时延性能指标的计算,数据到达较稀疏,不同会话到达间隔 t_{sa} 的 PSM 参数如表 3 所示。

表 3 不同会话到达间隔的 PSM 参数

参数	参数值						
t_{sa}/h	168	72	24	12	6	1	1/6
T_{BLE}^1/s	67.7	67.7	67.7	67.7	67.7	67.7	67.7
T_{BLE}^2/s	288	288	288	288	288	288	288

在表 3 中,同理也可得到该仿真场景下的各方法的 PSM 参数取值。该业务场景下的仿真结果如图 7 所示。

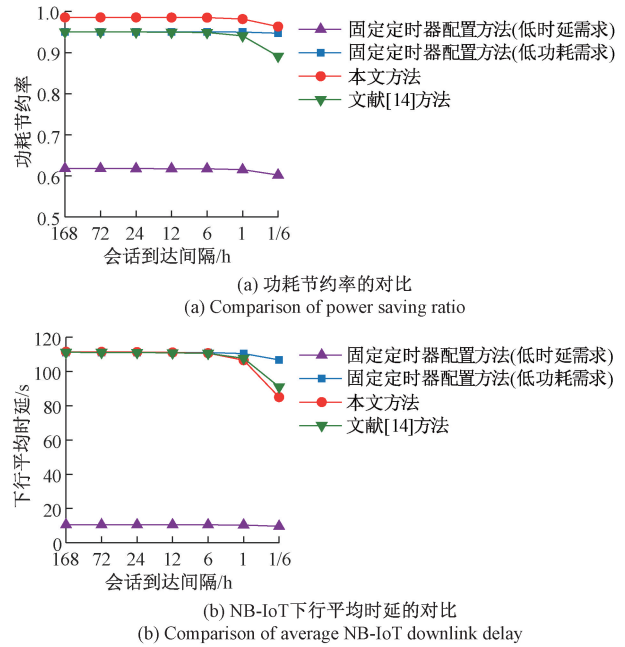


图 7 ULI=30 min 和 DLI≥10 min 业务场景的仿真结果

Fig. 7 Simulation results for ULI=30 min and DLI≥10 min scenarios

在图 7 中,固定定时器方法 2 和本文方法在功耗上的表现相对更理想, η_{ps} 基本都能保持在 0.95 以上,说明终端大部分时间处于低功耗状态,而本文方法的 η_{ps} 始终高于 0.96,相较固定定时器方法 2 还要更优,原因是当判断为无数据活跃时,本文方法会通过逐步提高休眠时间占比以节省能耗,最终能够设置成更加节能的 eDRX 参数,而文献[14]方法由于未能分析业务流量特点,一旦数据到达便会在相对更长时段内处于频繁监听状态,因

此功耗要稍高于上述两种方法。此场景下的固定定时器方法 1 的 η_{ps} 低于 0.62,不能满足通信低功耗需求。此外,由于本文方法在下行数据到达时会动态调控下行监听频率,因此 T_{ad} 的整体表现要稍优于固定定时器方法 2 和文献[14]方法。

4.2 实际应用测试

为验证所提方法的实际应用效果,把该方法部署到 5 个 NB-IoT 和 BLE 双模单待污水监测终端上,并将终端安装在重庆市两江新区九曲河污水监测点进行现场测试。终端安装在井下,外接标压 12 V 的电池进行供电,5 种水质传感器(超声波流量计、化学需氧量传感器、固体悬浮物传感器、电导率传感器和氨氮传感器)连接到终端上,部分现场安装图如图 8 所示。



图 8 九曲河污水监测点的终端安装图

Fig. 8 Terminal installation diagram for Jiuqu river sewage monitoring site

同样设定 $T_{nd}=300\text{ s}$, $\psi=0.02$, $T_{bd}=200\text{ s}$, $\alpha=0.1$,测试中双模单待污水监测终端一直以 30 min 周期进行水质传感器数据的主动采集与上报,测试项包括双模通信响应时延和终端功耗。

通信响应时延测试部分,通过结合服务器相关接口和自定义远程通信协议对 NB-IoT 下行业务响应时延进行计算,并利用移动端 App 相关功能统计 BLE 连接响应时延。经测试,终端 BLE 处于未连接状态时,在任意时刻发送 NB-IoT 下行数据,下行业务响应时延皆不会超过 T_{nd} ,而在终端处于 NB-IoT 通信空闲状态时, T_{bd} 内可搜寻到终端的 BLE 信号,满足了用户要求的最大双模通信响应时延。为测试低时延需求场景的下行业务响应时延,终端成功连上服务器后,在多个时段通过云平台以平均 15 s 的间隔下发多组数据包组,每组中平均包含 10 个数据包,测得终端的 NB-IoT 下行业务平均响应时延约为 9.1 s,略高于仿真结果,原因在于终端接收信号强度波动、平台下发延迟、终端上行时延、终端数据处理耗时等因素都会影响下行业务的响应时延,但仍可表明本文所提方法在下行数据到达较频繁时,能通过动态调控 eDRX 和 PSM 的参数有效调整下行监听频率,从而实现相对更低的下行响应时延。

终端功耗测试部分,把电流表与硬件设计中预留的测试点进行串联以获取终端各模块的工作电流。实际应用中,运维人员利用 NB-IoT 进行远程维护的平均周期为 7 d,连接终端 BLE 进行巡检的周期为 1 d,业务数据传输空闲时终端一直处于双模通信的连接监听或休眠状态。为更准确地评估终端功耗,对不同部分的通信功耗进行分开测试再求和,首先让终端在无下行数据传输的条件下连续运行一个采集周期(30 min),并对测量结果进行取均值处理,12 V 直流供电条件下的功耗测试数据如表 4 所示。

表 4 30 min 采集上报周期内的终端功耗数据
Table 4 Terminal power consumption within a 30 min collection and reporting cycle

终端状态	平均工作 电流/mA	平均持续 时间/s
主控休眠	2. 82	1 740. 7
主控以 80 MHz 主频运行	21. 44	59. 3
传感器数据采集	140. 91	55. 6
NB-IoT 的 RRC 连接态	22. 76	12. 2
NB-IoT 的 RRC 空闲态(开启 eDRX)	0. 31	716. 1
BLE 广播(2 s 广播周期)	0. 06	1 071. 7

当用户不通过 NB-IoT 或 BLE 进行远程运维时,除数据采集上报时段,终端主控都处于休眠状态,NB-IoT 连接态的持续时间包括数据上报和切换到 NB-IoT 时花费的时间。由表 4 数据可算得,每小时主控及其他外设的平均工作电流约为 3. 433 mA,每小时传感器数据采集的平均工作电流约为 4. 353 mA,无下行业务传输时每小时通信的平均工作电流约为 0. 313 mA。通过 NB-IoT 进行远程维护的通信功耗换算成每小时的平均工作电流约为 0. 051 mA,利用 BLE 进行巡检的通信功耗换算成每小时的平均工作电流约为 0. 195 mA。因此,实际应用中终端每小时的平均工作电流约为 8. 345 mA。

可以发现,终端日常运行的通信功耗占总功耗的比例约为 6. 7%,绝大部分功耗来自主控及传感器,且双模通信业务传输空闲时的通信功耗低至约 3. 76 mW,满足通信低功耗设计要求。远程污水监测项目中使用容量为 50 A·h 的外部 12 V 电池进行供电,理论续航约 249 d,实际运行 236 d,满足终端的使用寿命需求。

5 结 论

本文面向 NB-IoT 和 BLE 双模单待终端,提出一种能更好满足不同业务传输的终端低功耗与 NB-IoT 下行业

务低响应时延需求的双模通信控制方法。根据业务流量信息计算 eDRX 参数,利用 PSM 参数的控制模型进一步计算 BLE 广播时长,实现在满足 BLE 连接和 NB-IoT 下行业务响应时延要求的前提下,获得终端最优综合性能。该方法与固定式的定时器参数配置方法和基于分组的 eDRX 参数配置方法相比,在降低终端能耗和 NB-IoT 下行业务响应时延方面具有较好的优势。

参考文献

[1] ROOSIPUU P, ANNUS I, KUUSIK A, et al. Monitoring and control of smart urban drainage systems using NB-IoT cellular sensor networks [J]. Water Science and Technology, 2023, 88(2): 339-354.

[2] WIDODO A M, CHEN H C. An optimization NPUSCH uplink scheduling approach for NB-IoT application via the feasible combinations of link adaptation, resource assignment and energy efficiency [J]. Computer Communications, 2024, 218: 276-293.

[3] ISLAM M, JAMIL H M M, PRANTO S A, et al. Future industrial applications: Exploring LPWAN-Driven IoT protocols [J]. Sensors, 2024, 24(8): 2509.

[4] 陈鸿海, 孙学良, 赵鹤鸣, 等. 高增益蓝牙天线的设计与应用 [J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(2): 197-206.

CHEN H H, SUN X L, ZHAO H M, et al. Design and application of high gain bluetooth antenna [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(2): 197-206.

[5] HOSSEINKHANI Z, NABI M. BMSim: An event-driven simulator for performance evaluation of bluetooth mesh networks [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2023, 11(2): 2139-2151.

[6] XU H, YAN ZH J, LI B, et al. Modeling and analysis of the performance for bluetooth low energy [J]. IEEE Communications Letters, 2024, 28(3): 732-736.

[7] EZZ-ELDIEN N A, ABDEL-ATTY H M, ABDALLA M I, et al. An adaptive optimized handover decision model for heterogeneous networks [J]. Plos One, 2023, 18(11): 0294411.

[8] BABALOLA O P, BALYAN V. Vertical handover prediction based on hidden Markov model in heterogeneous VLC-WiFi system [J]. Sensors, 2022, 22(7): 2473.

[9] SANTI S, LEMIC F, FAMAHEY J. Location-based discovery and network handover management for heterogeneous IEEE 802. 11 ah IoT applications [J].

- IEEE Transactions on Network and Service Management, 2022, 19(3): 3154-3162.
- [10] LIU Q SH, BALL E A. A tractable stochastic geometry model of coverage and an approach to energy efficiency estimation in LPWAN networks[J]. International Journal of Sensor Networks, 2020, 33(4): 211-223.
- [11] RASTOGI E, MAHESHWARI M K, ROY A, et al. Energy efficiency analysis of narrowband internet of things with auxiliary active cycles for small data transmission[J]. Transactions on Emerging Telecommunications Technologies, 2022, 33(1): e4376.
- [12] BELLO H, JIAN X, WEI Y X, et al. Energy-delay evaluation and optimization for NB-IoT PSM with periodic uplink reporting [J]. IEEE Access, 2018, 7: 3074-3081.
- [13] SULTANIA A K, BLONDIA C, FAMAHEY J. Optimizing the energy-latency tradeoff in NB-IoT with PSM and eDRX [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(15): 12436-12454.
- [14] FAN X N, HU Q SH, CAO G J. Grouping-based extended discontinuous reception with adjustable eDRX cycles for smart grid [C]. 2019 IEEE International Conference on Communications, Beijing, China, 2019: 341-345.
- [15] MITTAL N, JAIN V, DHARMARAJA S. Power efficient stochastic modeling for narrowband internet of things devices in 5G networks [J]. Transactions on Emerging Telecommunications Technologies, 2023, 34(9): e4825.
- [16] HERNOWO R, SUHARJONO A, SUPRIYO B, et al. Power consumption optimization for flood monitoring system using NB-IoT [C]. Proceedings of the 2022 5th International Seminar on Research of Information Technology and Intelligent Systems, Yogyakarta, Indonesia, 2022: 58-63.
- [17] 仲心萌, 陈远野, 房方, 等. 国产重型燃气轮机控制系统可靠性分析[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(9): 131-139.
- ZHONG X M, CHEN Y Y, FANG F, et al. Reliability analysis for the domestic control system of the heavy-duty gas turbine[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(9): 131-139.
- [18] DHARMARAJA S, AGGARWAL A, SUDHESH R. Analysis of energy saving in user equipment in LTE-A using stochastic modelling [J]. Telecommunication Systems, 2022, 80(1): 123-140.
- [19] MORADI F, FITZGERALD E, LANDFELDT B. Modeling DRX for D2D Communication [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(4): 2574-2584.
- [20] GARCÍA-MARTÍN J P, TORRALBA A. Energy consumption analytical modeling of NB-IoT devices for diverse IoT applications[J]. Computer Networks, 2023, 232: 109855, 1-11.
- [21] RAMAZANALI H, VINEL A. Performance evaluation of LTE/LTE-a DRX: A Markovian approach [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2015, 3(3): 386-397.
- [22] MAHESHWARI M K, RASTOGI E, ROY A. DRX in NR unlicensed for B5G wireless: Modeling and analysis[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2022, 22(9): 5184-5197.
- [23] 3GPP. TR 45.820, Rel. 13, V.13.1.0, cellular system support for ultra-low complexity and low throughput Internet of things (CIoT) [S]. 2015.
- [24] 3GPP. TR 36.802, Rel. 13, V.13.0.0, evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA); NB-IOT; technical report for BS and UE radio transmission and reception [S]. 2016.

作者简介



向敏(通信作者), 1999 年于武汉工程大学获得学士学位, 2004 年于武汉理工大学获得硕士学位, 2009 年于重庆大学获得博士学位, 现为重庆邮电大学教授, 主要研究方向为工业物联网、智能电网和嵌入式控制。

E-mail: xiangmin@cqupt.edu.cn

Xiang Min (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Wuhan Institute of Technology in 1999, M. Sc. degree from Wuhan University of Technology in 2004, and Ph. D. degree from Chongqing University in 2009. He is currently a professor at Chongqing University of Posts and Telecommunications. His main research interests include industrial internet of things, smart grid and embedded control.



周星旺, 2021 年于九江学院获得学士学位, 现为重庆邮电大学硕士研究生, 主要研究方向为工业物联网。

E-mail: kufinn@163.com

Zhou Xingwang received his B. Sc. degree from Jiujiang University in 2021. He is currently a M. Sc. candidate at Chongqing University of Posts and Telecommunications. His main research interest includes industrial internet of things.



蒋炳林,1999 年于东北电力大学获得学士学位,现为中国电建集团重庆工程有限公司高级工程师,主要研究方向为基础设施工程、工民建筑。

E-mail:jiangbl_cqdj@powerchina.cn

Jiang Binglin received his B.Sc. degree from Northeast Electric Power University in 1999. He is currently a senior engineer at Power china Chongqing Engineering Co. , Ltd. His main research interests include infrastructure project and industrial and civil architecture.



胡坤志,2016 年于重庆邮电大学获得硕士学位,2020 年于重庆大学获得博士学位,现为重庆邮电大学副教授,主要研究方向为物联网通信技术、应用于物联网的小型化与集成化天线技术。

E-mail:hukz@cqupt.edu.cn

Hu Kunzhi received his M.Sc. degree from Chongqing

University of Posts and Telecommunications in 2016, and Ph. D. degree from Chongqing University in 2020. He is currently an associate professor at Chongqing University of Posts and Telecommunications. His main research interests include internet of things communication technology and miniaturized and integrated antenna technology for internet of things applications.



张佳佳,2008 年于重庆大学获得学士学位,2016 年于重庆大学获得博士学位,现为重庆邮电大学讲师,主要研究方向为工业物联网、自供电传感和微纳传感。

E-mail:zhangjj@cqupt.edu.cn

Zhang Jiajia received his B.Sc. degree and Ph. D. degree from Chongqing University in 2008 and 2016. He is currently a lecturer at Chongqing University of Posts and Telecommunications. His main research interests include industrial internet of things, self-powered sensing and micro-nano sensing.