

基于时延的动态非连续接收周期调整机制

黄波, 田辉, 徐海博

(北京邮电大学泛网无线通信教育部重点实验室, 无线新技术研究所, 北京 100876)

摘要: 针对 LTE 系统的下行非连续接收(DRX)机制, 提出了一种基于业务时延要求的动态非连续接收周期配置算法. 首先网络侧按照正常的非连续接收机制对终端侧进行节能配置, 然后利用实时的时延大小对非连续接收周期进行动态控制. 数值分析表明, 业务时延与网络负载有密切的关系, 用户 DRX 周期配置需要与网络当前负载相结合; 仿真结果表明, 基于时延的动态周期调整机制, 能够即时的适应网络状况以及自身需求的变化, 与固定非连续接收周期相比, 在用户满意度以及节能性上都有更好的表现.

关键词: 非连续接收(DRX); 时延要求; 动态周期

中图分类号: TN929.5 **文献标识码:** A

A delay based dynamic discontinuous reception cycle adjusting scheme

HUANG Bo, TIAN Hui, XU Hai-bo

(Key Laboratory of Universal Wireless Communications, Ministry of Education, Wireless Technology Innovation Institute, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: A novel dynamic configuration scheme for discontinuous reception (DRX) cycle based on the delay requirement of service is proposed for the LTE downlink system. First, the eNB configures the UEs with the power saving mechanism according to the DRX specifications. Then, the delay parameters are used to control the DRX cycle dynamically. Numerical analysis shows that, there is a close relationship between service delay and network load. Therefore, the configuration of the DRX cycle should be combined with the current network load. Simulation results show that the delay based dynamic cycle adjusting mechanism can adapt to the current network situation as well as their own requirements. Compared with the DRX mechanism with a fixed cycle, the performance of the proposed scheme has a great improvement in terms of user satisfaction and power efficiency.

Key words: discontinuous reception (DRX); delay requirement; dynamic cycle

0 引言

随着社会的不断进步, 绿色环保、节能减排的思想不断深入人心. 在个人通信不断发展普及的今天, 在提供更高频谱利用率、更高速率、更丰富多媒体业

务的同时, 终端功耗问题显得尤为严重^[1]. 为了最大程度支持终端移动性, 保证优良的用户业务体验, 需要在保证用户服务质量的前提下, 尽可能的延长终端续航时间. 无论是 3G UMTS (universal mobile telecommunications systems) 系统还是 LTE (long

收稿日期: 2009-05-11; 修回日期: 2009-05-26

基金项目: 中国高技术研究发展(863)计划(2009AA01Z262)和国家自然科学基金(60971125)资助.

作者简介: 黄波, 男, 1985年生, 硕士生. 研究方向: 宽带移动无线新技术研究. E-mail: yellowhuangbo@gmail.com

通讯作者: 田辉, 博士/教授. E-mail: tianhui@bupt.edu.cn

term evolution)系统,都对节能机制进行了标准化工作^[2],从一定程度上说明了节能的重要性.同样,在广泛关注的 802.16e 协议里,终端的功率节省机制也成为了一个重要组成部分.

非连续接收机制(DRX)作为从无线通信系统链路层优化能量效率的一项重要方法被大多数的无线通信系统所采纳.其基本思想是允许终端在没有数据传输的时刻关闭无线收发单元进入休眠模式,以降低额外能量开销.

在 2G 系统中,终端就已经采用了这种方式以增加待机时间.在 GSM 系统中,移动台每隔几帧(大约相当于八分之一秒的时间段)醒来一次,其他时间一直处于睡眠状态以关闭接收器降低功耗.然而 GSM 作为以语音为主体的系统,其呼叫接入时延要求很低而接入建立后的时延要求很高,其业务特征明显,因此非连续接收机制较为简单.

在 UMTS 系统^[3]中,终端的 DRX 机制划分为三个阶段:激活阶段、去激活阶段与休眠阶段.在数据传输时期,终端处于激活阶段,一直保持收发机开启以接收下行数据.当下行数据发送完毕,终端进入去激活状态并启动去激活计时器,仍旧保持收发机的开启状态,在去激活计时器溢出之前若有新的下行数据到达则终端重新进入激活阶段,否则进入休眠阶段.休眠阶段由周期的唤醒时期以及睡眠时期组成.睡眠时期的终端关闭收发机进行节能,而在睡眠时期的末尾进入唤醒时期,监听下行信道信息.文献[4]和文献[5]对 UMTS 的 DRX 机制进行了仿真和分析;文献[6]提出了一种基于两比特信令开销的 UMTS 系统 DRX 周期自适应的变化机制;文献[7]定义了能量参数与时延参数,通过这两个参数的计算实现 UMTS 系统 DRX 周期与去激活计时器动态配置,优化节能与时延性能.

在 IEEE 802.16e 系统^[8]当中,配置了 DRX 的终端有两种操作模式:激活模式与睡眠模式.激活模式下的终端保持收发机开启持续接收下行数据.睡眠模式下的终端每隔一段时间唤醒一次监听下行信道,若有数据到达则进入激活模式,否则重复睡眠模式.在该系统当中的唤醒间隔时间可以有多种配置方案以适应不同的业务需求.文献[9]权衡了 IEEE 802.16e 系统的节能性与 QoS (Quality of Service),提出了一种最小唤醒帧数的 DRX 策略;文献[10]基于业务模型为 IEEE 802.16e 系统实现了自适应 DRX 配置.

文献[12]证明了 LTE 系统有着比上述两类系

统更为节能的 DRX 机制. LTE 系统的终端被划分为 3 个基本进程:周期睡眠进程、去激活进程与重传进程.周期睡眠进程是指终端每隔一个固定的周期唤醒一次打开无线收发单元以监听下行信道信息,该周期定义为 DRX 周期,由 DRX 周期计时器进行控制,一个终端可以配置 1~2 个周期;唤醒后打开无线收发单元的持续时间称为开启时间,由开启时间计时器(on duration timer)进行控制.去激活进程是指终端一旦接收到新的下行数据,则开启或重启该去激活进程,去激活进度的长度由去激活计时器(inactivity timer)进行控制.重传进程是指终端接收到下行出错数据后,经过一个往返时延计时器的长度,再次开启收发器接收重传数据的过程,接收到重传数据的时刻则停止该进程,开启无线收发单元等待接收重传数据的最长时间由重传计时器(retransmission timer)进行控制.在上述的进程中,一旦出现开启时间计时器、去激活计时器或者重传计时器在运行,则都要保证无线收发单元处于开启状态.文献[12]对 LTE 的 DRX 机制进行了深入的分析,并建立了仿真模型;文献[13]提出了一种灵活的 DRX 构架,在该构架下的终端能够达到几乎最好的节能效果.

本文通过分析 LTE 系统非连续接收机制的业务时延与用户数量的关系,提出了一种动态的非连续接收周期调整机制.仿真表明,该机制能够在高度节能的同时保证良好的用户体验.

1 LTE 系统非连续接收机制分析

迄今为止,在 DRX 机制的节能性以及其 QoS 保证方面已有部分建模分析.其分析参数集中在配置有 DRX 机制的用户的能量利用率、吞吐量以及唤醒时延而忽略了网络负载对用户的确切的包时延的影响.本节基于 LTE 的 DRX 机制,详细分析了多用户条件下,业务时延与用户数量之间的关系.

如图 1 所示,配置有 DRX 机制的终端通信过程可由一个四状态的马尔可夫链来表示.

A 状态:用户处于周期性的唤醒与睡眠状态,网络侧对应于该用户的缓存为空;

B 状态:用户处于周期性的唤醒与睡眠状态,网络侧对应于该用户的缓存有数据待发送;

C 状态:去激活计时器控制用户处于激活状态,等待接收下行数据,并且网络侧对应于该用户的缓存不为空;

D 状态:去激活计时器控制用户处于激活状态,等待接收下行数据,并且网络侧对应于该用户的缓存为空,即该组下行数据已经发送完毕.

图中的 $P_{X,Y}, X, Y \in \{A, B, C, D\}$ 表示本时刻处于 X 状态,经过一个 TTI 的下一时刻处于 Y 状态的转移概率.

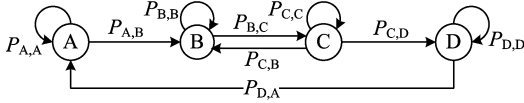


图 1 马尔可夫 DRX 分析模型

Fig. 1 Markov chain for DRX analysis

若用户的业务到达率为 λ , DRX 周期为 T_C , 开启时间计时器长度为 T_O , 去激活计时器长度为 T_I , 每次业务的数据需要调度 k 次发送完毕, k 为一随机变量, 其均值为 \bar{K} . 在业务量不大的情况下, 即下一次业务包到达时刻一定在本次业务包发送完毕后, 并且采用等概率调度模型, 则各状态转移概率可以按下述分析求得.

由于业务到达率 λ 为从 A 到 B 的转移概率, 因此

$$P_{A,B} = \lambda, P_{A,A} = 1 - \lambda \quad (1)$$

B 状态的用户, 虽然下行数据包待发送, 由于未受调度, 仍然处于周期性的睡眠与唤醒过程中. 若受到调度, 则进入 C 状态. 受到调度有如下需求: B 状态的用户处于唤醒时期, 并且在唤醒期间受到调度. B 状态用户处于唤醒时期的概率为 $\frac{T_O}{T_C}$, 唤醒后受到调度的概率为 $\frac{1}{N}$, N 表示处于激活状态并且有下行数据等待调度的用户总数. 待调度用户总数 N 是一个随机变量, 其均值 \bar{N} 为处于 C 状态的所有用户数以及 B 状态用户中处于唤醒期间的用户数之和, 即

$$\bar{N} = 1 + (n-1) \left(P_C + \frac{T_O}{T_C} P_B \right) \quad (2)$$

式中 P_B 与 P_C 分别表示用户处于 B 状态与 C 状态的概率, n 表示系统用户总数. 故 B 状态中的用户唤醒后受到调度的概率为

$$\frac{1}{N} = \frac{1}{1 + (n-1) \left(P_C + \frac{T_O}{T_C} P_B \right)} \quad (3)$$

因此有

$$P_{B,C} = \frac{T_O}{T_C} \times \frac{1}{N} = \frac{T_O}{T_C} \times \frac{1}{1 + (n-1) \left(P_C + \frac{T_O}{T_C} P_B \right)} \quad (4)$$

B 状态的用户, 若下一时刻仍处于 B 状态, 有下

述可能: ①本时刻处于睡眠状态, 不可能受到调度, 其概率为 $\frac{T_C - T_O}{T_C}$; ②本时刻处于唤醒状态, 但是未能收到调度, 即该时刻调度的是其他的用户, 其概率为

$$1 - \frac{1}{N} = \frac{T_O}{T_C} \times \frac{(n-1) \left(P_C + \frac{T_O}{T_C} P_B \right)}{1 + (n-1) \left(P_C + \frac{T_O}{T_C} P_B \right)} \quad (5)$$

因此有

$$P_{B,B} = \frac{T_C - T_O}{T_C} + \frac{T_O}{T_C} \times \frac{(n-1) \left(P_C + \frac{T_O}{T_C} P_B \right)}{1 + (n-1) \left(P_C + \frac{T_O}{T_C} P_B \right)} \quad (6)$$

C 状态的用户处于激活状态, 若下一时刻处于 D 状态, 则要求本时刻受到调度, 并且调度后缓存为空. 受到调度的概率仍为 $\frac{1}{N}$, 而缓存调度后为空的概率为 $\frac{1}{k}$. 因此有

$$P_{C,D} = \frac{1}{k} \times \frac{1}{1 + (n-1) \left(P_C + \frac{T_O}{T_C} P_B \right)} \quad (7)$$

C 状态的用户下一时刻处于 B 状态, 则要求本时刻未受调度并且本时刻后去激活计时器溢出. 未受调度的概率为 $1 - \frac{1}{N}$, 去激活计时器溢出的概率为 $\frac{1}{T_I}$, 因此有

$$P_{C,B} = \frac{1}{T_I} \times \frac{(n-1) \left(P_C + \frac{T_O}{T_C} P_B \right)}{1 + (n-1) \left(P_C + \frac{T_O}{T_C} P_B \right)} \quad (8)$$

C 状态的用户下一时刻仍处于 C 状态, 则要求本时刻受到调度但是缓存并未空, 或者本时刻未受调度并且去激活计时器未溢出, 因此有

$$P_{C,C} = \frac{T_I - 1}{T_I} \times \frac{(n-1) \left(P_C + \frac{T_O}{T_C} P_B \right)}{1 + (n-1) \left(P_C + \frac{T_O}{T_C} P_B \right)} + \frac{k-1}{k} \times \frac{1}{1 + (n-1) \left(P_C + \frac{T_O}{T_C} P_B \right)} \quad (9)$$

D 状态的用户, 去激活计时器溢出则回到 A 状态, 未溢出则停留在 D 状态, 因此有

$$P_{D,A} = \frac{1}{T_I}, P_{D,D} = \frac{T_I - 1}{T_I} \quad (10)$$

至此式(1)、(4)、(6)、(7)、(8)、(9)和(10)已经列出

了所有状态转移概率的值,马尔可夫过程完全确定.

下面分析时延(以调度周期为计量单位)与 DRX 参数以及网络负载之间的关系. 用户时延在此状态图中可以表示为用户自业务发起时刻(状态 A 至 B)到业务结束(状态 C 至 D)的时延. 这一过程中,用户必将经历状态 B、C 到 D. 总时延 D 就可以由 $D_{B,C} + D_{C,D}$ 来表示,即用户由状态 B 转移到状态 C 的时延与用户由状态 C 转移到状态 D 的时延.

首先分析用户由刚进入 B 状态至转移到 C 状态的平均时延 $D_{B,C}$. 转移到 C 状态的时间点一定是用户处于开启时间计时器运行期间. 由于业务的到来与 DRX 进程不相关,则业务到来时刻与第一次唤醒时刻的平均间隔为 $T_C/2$. 其 B 状态第一次唤醒受到调度进入 C 状态的概率 P_{Y1} 以及其第一次唤醒未受到调度继续停留在 B 状态的概率 P_{N1} 可以由下述式子表示:

$$P_{Y1} = 1 - \left[\frac{(n-1)\left(P_C + \frac{T_O P_B}{T_C}\right)}{1 + (n-1)\left(P_C + \frac{T_O P_B}{T_C}\right)} \right]^{T_O} \quad (11)$$

$$P_{N1} = 1 - P_{Y1} = \left[\frac{(n-1)\left(P_C + \frac{T_O P_B}{T_C}\right)}{1 + (n-1)\left(P_C + \frac{T_O P_B}{T_C}\right)} \right]^{T_O} \quad (12)$$

故第 i 次唤醒进入 C 状态的概率为

$$P_{Yi} = P_{N1}^{(i-1)} \times P_{Y1} = P_{N1}^{(i-1)} - P_{N1}^i \quad (13)$$

第 i 次唤醒进入 C 状态的时延为

$$d_i = (2i-1)T_C/2 \quad (14)$$

由此可以计算出 B 状态至 C 状态的平均时延:

$$\begin{aligned} D_{B,C} &= \sum_{i=1}^{\infty} d_i \times P_{Yi} = \\ &= \sum_{i=1}^{\infty} \frac{(2i-1)T_C}{2} \times (P_{N1}^{(i-1)} - P_{N1}^i) = \\ &= \frac{T_C}{2} + T_C \times \left(\frac{P_{N1}}{1 - P_{N1}} \right) \end{aligned} \quad (15)$$

下面研究用户由第一次进入 C 状态至完成下行数据传输进入 D 状态的平均时延 $D_{C,D}$. 由于 C 状态进入 D 状态有可能不止经过一次调度,因此首先需要得出 C 状态下的平均调度间隔 Δt_s , 即从该次调度结束到下次受到调度所经历的时间的期望值.

$$\begin{aligned} \Delta t_s &= \sum_{i=1}^{\infty} i \times \left[\frac{(n-1)\left(P_C + \frac{T_O P_B}{T_C}\right)}{1 + (n-1)\left(P_C + \frac{T_O P_B}{T_C}\right)} \right]^{i-1} \times \\ &= \frac{1}{1 + (n-1)\left(P_C + \frac{T_O P_B}{T_C}\right)} = \end{aligned}$$

$$1 + (n-1)\left(P_C + \frac{T_O P_B}{T_C}\right) \quad (16)$$

从 C 状态到 D 状态,需要经过 k 次调度,由此带来的时延为

$$D_{CD1} = k\Delta t_s = \bar{K} + \bar{K}(n-1)\left(P_C + \frac{T_O P_B}{T_C}\right) \quad (17)$$

C 状态的终端还有可能再次回到 B 状态,从而产生第二次的 $D_{B,C}$ 时延,并且这次 $D_{B,C}$ 时延由于起始时刻确定在开启时间计时器溢出时刻,导致有 $T_C/2$ 的时延扩展,此时的平均 B 至 C 状态转移时延变为

$$D'_{B,C} = T_C + T_C \times \left(\frac{P_{N1}}{1 - P_{N1}} \right) = \frac{T_C}{1 - P_{N1}} \quad (18)$$

根据图 1 所示,C 状态在某个 TTI 回到 B 状态的概率为 $P_{C,B}$,那么在 $k\Delta t_s$ 个 TTI 内回到 B 状态的概率为

$$P_{\text{back}} = \sum_{i=1}^{k\Delta t_s} (1 - P_{C,B})^i \times P_{C,B} = 1 - (1 - P_{C,B})^{k\Delta t_s} \quad (19)$$

由于出现两次从 C 状态回到 B 状态,即用户在有数据尚未发送情况下连续两次出现去激活计时器溢出现象概率极低,因而忽略不计. 因此,由 C 状态回到 B 状态所带来的时延开销可以如下表示:

$$D_{CD2} = P_{\text{back}} \times D'_{B,C} = [1 - (1 - P_{C,B})^{k\Delta t_s}] \frac{T_C}{1 - P_{N1}} \quad (20)$$

因此有

$$\begin{aligned} D_{C,D} &= D_{CD1} + D_{CD2} = \bar{K} + \bar{K}(n-1) \cdot \\ &= \left(P_C + \frac{T_O P_B}{T_C} \right) + [1 - (1 - P_{C,B})^{k\Delta t_s}] \frac{T_C}{1 - P_{N1}} \end{aligned} \quad (21)$$

于是,业务的平均时延 D 可以由 DRX 配置参数、业务到达率、用户数目唯一地表征,即

$$\begin{aligned} D &= D_{B,C} + D_{C,D} = \frac{T_C}{2} + T_C \times \left(\frac{P_{N1}}{1 - P_{N1}} \right) + \\ &= \bar{K} + \bar{K}(n-1)\left(P_C + \frac{T_O P_B}{T_C}\right) + \\ &= [1 - (1 - P_{C,B})^{k\Delta t_s}] \frac{T_C}{1 - P_{N1}} \end{aligned} \quad (22)$$

考查式(21),当用户数 n 增加,则有以下分析:

$$\begin{aligned} n \uparrow &\Rightarrow \begin{cases} P_{N1} \uparrow \\ \Delta t_s \uparrow \\ P_{C,B} \uparrow \end{cases} \Rightarrow \\ &\begin{cases} T_C \times \left(\frac{P_{N1}}{1 - P_{N1}} \right) \uparrow \\ \bar{K}(n-1)\left(P_C + \frac{T_O P_B}{T_C}\right) \uparrow \\ [1 - (1 - P_{C,B})^{k\Delta t_s}] \frac{T_C}{1 - P_{N1}} \uparrow \end{cases} \Rightarrow D \uparrow \end{aligned} \quad (23)$$

可见,用户数量的增加,在配置了 DRX 机制后,会对业务时延带来进一步的影响.而缩短用户的 T_C 可以减小时延,因此,对用户 DRX 周期 T_C 的配置不能仅仅根据业务的时延要求,还应考虑实时的网络状况.

2 动态非连续接收周期调整机制介绍

本文所提的动态非连续接收周期调整机制是基于 LTE 系统^[11]的.在 LTE 的 DRX 机制当中存在若干需要权衡的因素^[12].出于节能性考虑,则需要配置长的 DRX 周期计时器、短的去激活计时器.而出于调度的灵活性、资源利用率以及业务 QoS 考虑,则需要配置短的去激活计时器;因为过长的 DRX 周期会影响业务的接入时延,过短的去激活计时器会影响业务的一次接入资源竞争成功率,导致有下行数据尚未受到调度之前终端再次进入睡眠状态,过短的去激活计时器会影响已接入业务的时延抖动.针对上述问题,本文提出了一种由时延参数控制的动态非连续接收机制,以解决增加 DRX 周期、提高节能性与延长业务接入时延之间的矛盾.其基本出发点包括:

(I) 不同的业务运行在不同的终端上有不同的时延要求,在满足时延要求的前提下,应尽可能地增加终端的 DRX 周期以实现节能最大化.

(II) 时延要求高的业务终端配置较短的 DRX 周期,时延要求低的业务终端配置较长的 DRX 周期.

(III) 由本文第二部分分析可知,时延的大小还与网络当前的负载有关,网络负载越大则时延会相应增大,因此网络内的终端的 DRX 周期都应该减小以增加激活时间的比例,减少时延,给予网络侧更多的调度选择,增大全网的吞吐量,保证业务的 QoS.

鉴于上述分析,终端 DRX 周期需要进行动态配置,根据短期内统计的接收包的时延,确定 DRX 周期长短的调整方法.具体执行过程可由如图 2 所

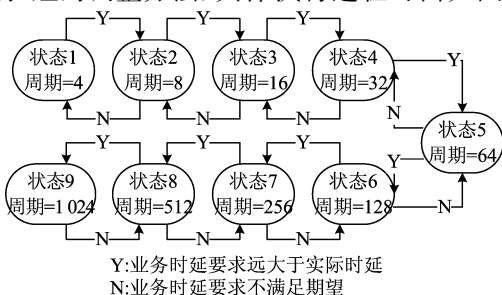


图 2 动态非连续接收周期调整机制

Fig. 2 Dynamic DRX cycle adjusting mechanism

示的马尔可夫状态转移过程表示.

Step 1 由 RRC 层为终端配置 DRX 功能.初始化过程中,不配置开启持续时间计时器的启动偏移时间(on duration starting offset)^[11],取而代之,在其配置空间添加一个 $0 \sim C_m - 1$ 之间的随机值 t_1 ,其中 C_m 为最大 DRX 周期的长度.若当前的 DRX 周期为 C ,则实际的开启持续时间计时器的启动偏移时间为 $t_{\text{offset}} = \left\lfloor \frac{C \times t_1}{C_m} \right\rfloor$. 以此保证启动偏移时间处于 $(0, \text{DRX Cycle})$ 范围内.

Step 2 每隔一段固定的时间 Δt ,统计该时间段内的所有数据包的时延,对比于该业务用户的时延期望值,分为三种可能:

N:该用户前段时间包的时延过大,不能满足业务的时延期望需求;

Normal:该用户前段时间包的时延能够满足业务的时延期望需求;

Y:该用户前段时间包的时延较小,完全满足业务的时延期望需求;

Step 3 状态 $i, i=2, 3, \dots, 9$ 中的用户,若处于 N 条件下,其 DRX 周期在这次统计结束后自动减半,进入状态 $i-1$;状态 $i, i=1, 2, \dots, 9$ 中的用户,若处于 Normal 条件下,其 DRX 周期保持不变,继续停留在状态 i ;状态 $i, i=1, 2, \dots, 8$ 中的用户,若处于 Y 条件下,其 DRX 周期在这次统计结束后增加一倍,进入状态 $i+1$.其中状态 1 中的用户处于 N 条件下与状态 9 中的用户处于 Y 条件下,其 DRX 周期不发生变化,仍停留原状态.

Step 4 每次统计结束后,清除原有的统计信息,使得该段时间内的业务数据时延表现不影响后一段时间内的统计结果.

3 仿真分析

为了比较动态 DRX 周期配置方案与固定 DRX 周期配置方案的性能优劣,本文对这两种算法在 LTE 系统下的表现进行了系统级仿真.仿真参数如表 1 所示.

为了比较两个算法的能量消耗,需要建立能量消耗模型.文献[14]给出了 LTE 非连续接收系统的能量消耗参考值(图 3).其中终端被划分为三种状态:

(I) 深度节能状态:指终端处于较长 DRX 周期的睡眠状态.该状态下,终端的空口功耗为 0 mW/TTI ;

(II) 轻度节能状态:指终端处于较短 DRX 周期的睡眠状态.该状态下,终端的空口功耗为 11 mW/TTI ;

表 1 系统仿真参数

Tab. 1 System level simulation parameters

小区拓扑	正六边形小区, 19 小区一簇, 3 扇区
站间距	500 m
传输时间间隔(TTI)	1 ms
路径损耗	$L=128.1+37.6\log_{10}(R)$, R 单位 km
阴影衰落	均值为 0, 标准差为 8 dB
信道模型	TU6:
基站用户间最小距离	35 m
运动速率	3 m/s
OFDM 描述	10 MHz 总带宽, 15 kHz 子载波间隔, 12 个子载波组成一个资源块, 共 180 kHz, 666 个子载波中有 601 个用于传送数据, 组成 50 个资源块
业务模型	HTTP
基站功率	46 dBm
噪声功率	-174 dBm/Hz

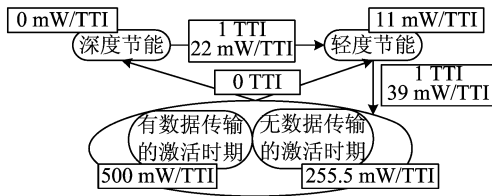


图 3 能量消耗模型

Fig. 3 Power consumption model

(Ⅲ) 激活状态: 指终端无线收发单元开启的状态。该状态下, 若无数据传输, 则终端空口功耗为 255.5 mW/TTI, 否则为 500 mW/TTI;

补充说明, 终端在这三种状态之间的转换也需要消耗能量与时间。其中, 从深度节能状态转换至轻度节能状态, 需消耗 1 ms 与 22 mW/TTI 的能量; 从轻度节能状态转换至激活状态需消耗 1 ms 与 39 mW/TTI 的能量。

同样的, 仿真还需要比较两个算法对终端业务时延保证的表现。由于终端对时延的需求是不一致的, 终端的平均时延低并不能反映终端的时延得到了保证, 因而如果用所有终端发送数据的平均时延来定义时延表现是不合适的。类似于文献[15]中所述, 本文定义一个终端时延不满意度:

$$W_{\text{unsat}} = \text{avr} \left(\sum_i L_i \right) \quad (24)$$

其中, L_i 为时延要求不满足期望值的包的大小, 这里需要一个期望值以区别于 QoS 时延保证值, 同时期望值应低于保证值, 是用户能得到良好体验的一个时延值。对所有这类包的大小进行求和, 包括时延远远超过期望值、达不到 QoS 保证值的丢弃的包的

大小, 然后求其时间平均值, 作为终端时延不满意度。即不满意度最终反映的是平均每个用户在每秒内无法达到期望值的传输比特数。

图 4 示出了在不同的 DRX 周期配置方式下终端平均功耗的表现。从图 4 中可以看出, 随着 DRX 周期的增长, 终端的平均功耗在下降。而根据图 2 以及表 2 所规定的状态转移条件的动态周期调整机制, D-DRX1 的终端空口平均功耗介于 512~1 024 的周期配置之间, D-DRX2 的终端空口平均功耗介于 256~512 的周期配置之间。图 5 示出了在不同的

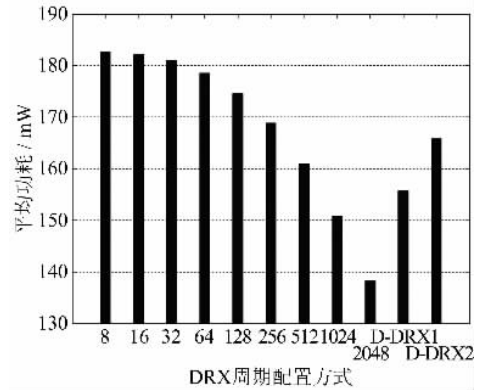


图 4 平均功耗比较

Fig. 4 Comparison of average power consumption

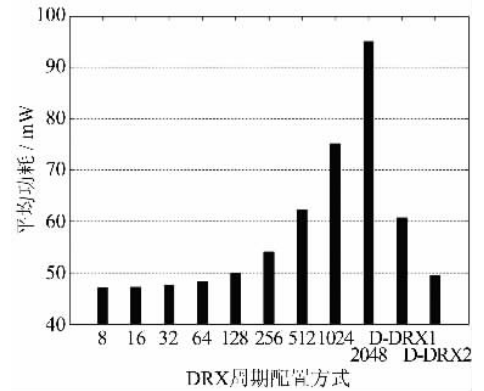


图 5 不满意度比较

Fig. 5 Comparison of unsatisfaction

DRX 周期配置方式下的终端的平均不满意度。随着 DRX 周期的增长, 终端的平均不满意度在上升, 其中 D-DRX1 配置方式的终端平均不满意度介于 256~512 的周期配置之间, D-DRX2 配置方式的终端平均不满意度介于 64~128 之间。由此可以得出, D-DRX1 动态配置方案在功耗低于固定 DRX 周期 512 配置下, 得到了不满意度低于固定 DRX 周期 512 配置的表现; D-DRX2 动态配置方案在功耗低于固定 DRX 周期 256 配置下, 得到了不满意度低于

固定 DRX 周期 128 配置的表现. 因此, 在平均功耗与终端不满意度的表现上, D-DRX1 完全优于周期为 512 的固定 DRX 配置机制, D-DRX2 完全优于周期为 256 与 128 的固定 DRX 配置机制. 同样的, 对于其他周期的固定 DRX 配置机制, 通过对状态转移条件的设定, 都可以有更优的动态周期配置机制相对应, 这里不再赘述.

另外, 本方案还具有以下两方面的优势: ①通过不满意度的计算调整, 可以对不同等级的用户实现不同等级的 QoS 保证; ②通过对条件 N 的定义方式, 可以改变对终端的时延保障程度(N 条件能容忍的不满意度上限值越低则终端功耗增加而不满意度下降), 增加了网络的灵活性.

表 2 周期动态配置参数

Tab. 2 Configuration parameters of dynamic cycle

	D-DRX1	D-DRX2
N	$W_{\text{unsat}} > 70$	$W_{\text{unsat}} > 60$
Normal	$0 < W_{\text{unsat}} \leq 70$	$0 < W_{\text{unsat}} \leq 60$
Y	$W_{\text{unsat}} = 0$	$W_{\text{unsat}} = 0$

4 结论

本文提出了一种基于业务时延要求的动态非连续接收周期配置算法. 这种配置机制针对 LTE 系统提出, 具有良好的后向兼容性. 灵活的配置机制能够满足不同用户的即时需求, 并且不受网络负载变化的影响. 在节能性方面, 该配置方法保持了 LTE 非连续接收机制中高度节能的特性, 能够有效降低终端空口平均功率. DRX 机制仍然存在节能性与吞吐量等需要权衡的方面, 这是今后的研究方向.

致谢 本项目的研究得到 DoCoMo 北京研究所的资助, 在此表示感谢.

参考文献(References)

- [1] 戴凌龙. TD-SCDMA 终端的低功耗研究及设计 [J]. 电子技术应用, 2007, 33(3): 97-99
- [2] 3GPP. Technical Specification Group Service and System Aspects; 3GPP System to Wireless Local Area Network (WLAN) Interworking; System Description; 3GPP TS 23. 234 [S]. 3GPP, 2004.
- [3] 3GPP. 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; UE Procedures in Idle Mode and Procedures for Cell Reselection in Connected Mode; 3GPP TS 25. 304 [S]. 3GPP, 2002.
- [4] Yang S R, Lin Y B. Modeling UMTS Discontinuous Reception Mechanism [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2005, 4(1): 312-319.
- [5] Yang S R, Yan S Y, Hung H N. Modeling UMTS Power Saving with Bursty Packet Data Traffic [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2007, 6(12): 1 398-1 409.
- [6] Yang S, Yoo M, Shin Y. An Adaptive Discontinuous Reception Mechanism Based on Extended Paging Indicator for Power Saving in UMTS [C]// Proceedings of 2006 IEEE 64th Vehicular Technology Conference. New York: IEEE, 2006: 831-835.
- [7] Yang S R. Dynamic Power Saving Mechanism for 3G UMTS System [J]. Mobile Networks and Applications, 2007, 12(1): 5-14.
- [8] Part 16; Air interface for fixed and mobile broadband wireless access systems - Amendment for physical and medium access control layers for combined fixed and mobile operation in licensed bands; IEEE 802. 16e/D5-2004 [S]. New York: IEEE, 2004.
- [9] Liu Z, Almhana J, McGorman R. A Traffic Modeling Based Power Saving Mechanism for Mobile Devices in Wireless Systems [C]// Proceedings of the 6th annual communication networks and services research conference. Los Alamitos, CA: IEEE Computer Soc, 2008: 107-114.
- [10] Lin C Y, Chao H L. Energy-Saving Scheduling in IEEE 802. 16e Networks [C]// Proceedings of 33rd IEEE conference on Local Computer Networks. New York: IEEE, 2008: 130-135.
- [11] 3GPP. Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Medium Access Control (MAC) protocol specification; 3GPP TS 36. 321 [S]. 3GPP, 2008.
- [12] Zhou L, Xu H B, Tian H, et al. Performance Analysis of Power Saving Mechanism with Adjustable DRX Cycles in 3GPP LTE [C]// Proceedings of IEEE 68th Vehicular Technology Conference. New York: IEEE, 2008: 1-5.
- [13] Kolding T, Wigard J, Dalsgaard L. Balancing Power Saving and Single User Experience with Discontinuous Reception in LTE [C]// Proceedings of 2008 IEEE International Symposium on Wireless Communication Systems. New York: IEEE, 2008: 713-717.
- [14] Nokia. DRX parameters in E-UTRAN; 3GPP R2-071285[R]. 3GPP, 2007.
- [15] Xing B, Venkatasubramanian N. Multi-Constraint Dynamic Access Selection in Always Best Connected Networks [C]// Proceedings of 2nd Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems; Networking and Services. Los Alamitos, CA: IEEE Computer Soc, 2005: 56-64.