

# 基于时隙捆绑预处理的LTE上行自适应传输

杨帆, 李洋, 谭佳佳, 邵怀宗

(电子科技大学通信与信息工程学院 成都 611731)

**【摘要】** 3G长期演进(LTE)上行链路中, 基于时隙捆绑(transmission time interval bundling, TTI bundling)技术的IP语音业务(VoIP)可以显著提高小区覆盖范围。目前, 一种覆盖增强方案可以使用户在50 ms时延限制下最多传输5捆相同的数据包。然而, 由于该方案不能及时处理反馈信号, 一旦出现不必要的重传, 会导致系统吞吐量降低, 并造成用户设备(UE)额外的能量损耗。为此, 该文提出了一种基于误块率(BLER)与信噪比(SNR)映射机制的时隙捆绑预处理传输方案, 该方案使得UE可以根据信道情况的变化以及期望的性能指标, 预先设定传输捆绑数据包的最大值, 从而减少了不必要的重传, 节省了UE的能量消耗, 提高系统的吞吐量。

**关键词** 自适应覆盖增强; 混合自动重传(HARQ); LTE上行链路; 时隙捆绑; IP语音业务  
**中图分类号** TN929.5 **文献标志码** A **doi**:10.3969/j.issn.1001-0548.2017.01.003

## Preprocessing of TTI Bundling for Adaptive Transmission in LTE Uplink

YANG Fan, LI Yang, TAN Jia-jia, and SHAO Huai-zong

(School of Communication and Information Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 611731)

**Abstract** In order to improve the cell coverage performance, transmission time interval (TTI) bundling technique is employed in long term evolution (LTE) uplink for the voice over internet protocol (VoIP) service. Recently, a coverage-enhanced scheme makes user equipment (UE) transmitting up to five bundles under the same delay budget. However, the coverage-enhanced scheme lacks time for feedback processing, in which the UE transmitting power may be wasted for an unnecessary retransmission. Taking the issue into account, we propose a scheme based on preprocessing of TTI bundling for adaptive transmission in LTE uplink. Our scheme uses block error rate (BLER) versus signal-to-noise ratio (SNR) mapping mechanism to reduce unnecessary retransmission bundles and save UE power consumption, yielding higher throughput.

**Key words** adaptive coverage enhancement; hybrid automatic repeat request (HARQ); LTE uplink; time interval (TTI) bundling; VoIP

IP语音业务VoIP是通过IP数据包发送实现的语音业务, 由于VoIP广泛采用Internet和全球IP互连的环境, 可以很容易地嵌入LTE框架体系中, 实现廉价的语音、视频和数据等业务的传输, 具有广阔的实用价值。近年来, LTE技术的日趋成熟加速了移动网络端到端的VoIP业务商用部署。在LTE上行链中, 相对于LTE基站(evolved node, eNB)而言, UE往往具有较低的发射功率, 这种不对称性使得LTE的覆盖能力严重受限于上行信道<sup>[1-4]</sup>。在上行覆盖受限的情况下(如处于小区边缘的用户上行传输VoIP包), 即使在一个传输时间间隔(TTI)内传输较短的单个数据包也很难满足BLER的要求<sup>[5]</sup>。因此, 有效提高LTE上行覆盖是LTE系统的关键技术之一。

对于同一UE而言, 由于设备最大传输功率受到限制, 发送单一的数据包往往导致接收端解码失败并需要多次重传, 尤其是对小区边缘用户, 大量的重传和反馈增加了系统负担和控制信令的开销。LTE Release8(R.8)提出了TTI bundling的概念, 它首先将需要传输的单个数据包通过编码、调制和速率匹配后, 生成不同的冗余版本(redundancy version, RV), 然后将这些RV组成一捆TTI数据包实现连续捆绑发送<sup>[5-6]</sup>, 上行传输的TTI捆绑机制, 通过发送多捆相同的数据包, 可以大幅提高数据解码成功的概率。由于每次重传的RV及传输格式预先设定, 从而有效地减少了系统大量的控制信号及信令开销。这种时隙捆绑方案在一捆数据包中使用相同的调制编

收稿日期: 2014-06-03; 修回日期: 2015-09-01

基金项目: 国家自然科学基金(61675040); 国家自然科学基金联合基金(U1633129); 四川省基础研究计划(2014JY0037)

作者简介: 杨帆(1982-), 男, 博士, 副教授, 主要从事无线通信、信号处理与检测方面的研究。

码方式(modulation and coding scheme, MCS)和频谱带宽,如果整捆数据包解码正确,eNB向UE发送一个肯定确认(acknowledgment, ACK)信号;反之,发送否定信号(negative-acknowledgment, NACK),此时,整捆数据包重传。LTE R.8协议规定LTE系统的传输时延为1ms,假设eNB和UE的最大处理时延为3ms,一捆数据包占用4个TTI,其环回传输时间(round trip time, RTT)为16ms。因此,如果系统的延迟严格限制在50ms内,R.8中的时隙捆绑方式最多只能传输3捆相同的数据包。文献[3-4]提出了一种覆盖增强方式,它采用无条件地重传整捆数据包,而不需要等待前一次重传后的ACK/NACK反馈信号的处理结果。因此,这种方案可以最大传输5捆数据包,从而增强了LTE系统的覆盖范围<sup>[6-7]</sup>。然而,该方案是以整捆数据包为重传单位,当信道条件良好时,不必要的重传将会严重降低LTE系统吞吐量,并导致UE额外的能量消耗,减小电池的使用周期。

为了降低UE的能量消耗,提高系统吞吐量,并兼顾LTE上行链路服务覆盖范围,本文提出一种基于时隙捆绑预处理的LTE上行自适应传输方案(时隙捆绑预处理方案),该方案首先离线生成BLER与信噪比SNR匹配的映射关系表,UE根据传输信道条件SNR和用户期望的BLER性能,通过在线查表预先设定所需传输的捆绑数据包的最大数量(小于等于5),从而可以实现增强LTE覆盖范围的目的,并较大程度的避免不必要的重传来降低移动终端的能耗。其

中,BLER与信噪比SNR匹配的映射关系表可以离线仿真或者理论近似生成。

## 1 传统时隙捆绑方案

### 1.1 LTE R.8时隙捆绑方案

LTE上行链路采用同步HARQ操作,即每次重传的信道编码RV和传输格式都是预先定义好的,不需要额外的信令支持,减小了额外的开销,提高系统的吞吐量。在LTE R.8中,4个连续的TTI捆绑传输(每个TTI对应一个RV),使得单个数据包在接收端的能量产生累积,提高解码的成功率。与对每个TTI数据包单独添加控制和传输信令相比,TTI捆绑数据包需要的信令大幅减少。

如图1所示,根据LTE R.8知,UE在第0~3个TTI持续时间内向eNB发送由4个不同RV组成的一捆数据包。eNB需要3ms时间(第4~6个TTI)处理该数据包,然后在第7个TTI(1ms内)发送ACK/NACK反馈信号到UE,此时完成一个HARQ过程,其最小持续时间为8ms。类似地,UE需要3ms(第8~10个TTI)处理反馈信号,如果UE接收到的是NACK信号,数据包将在第16个TTI进行重传,因此LTE R.8时隙捆绑方案的RTT为16ms。当系统最大承受的时延严格限制在50ms内,导致同一个UE最多只能传输3捆相同的数据包(即对应于TTI序号0~3、16~19和32~35)。

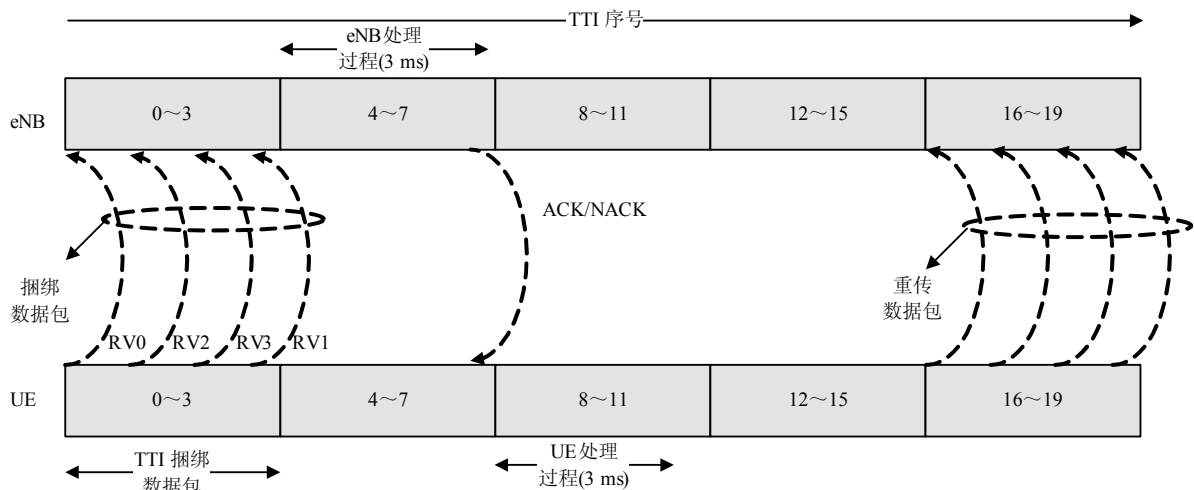


图1 LTE R.8中的时隙捆绑方案

### 1.2 覆盖增强时隙捆绑方案

在LTE上行链路中,由于UE最大发射功率受限,以单个TTI为单位发送数据包会导致接收端出现较高的差错概率,限制了上行覆盖范围。一种提高LTE上行覆盖范围的方法是通过数据多次重传来实现,

但这种方法由于需要耗费大量的开销用于重传控制(如每一个数据包都需要一个帧头和控制信令),严重降低系统吞吐量,并且会导致系统处理时延增加和网络拥塞。文献[6]提出了一个基于时隙捆绑的覆盖增强方案,它采用无条件地重传整捆数据包,而不

需要等待前一次重传后的ACK/NACK反馈信号的处理结果。因此, 这种方案可以最大传输5捆数据包, 从而有效地增强了LTE系统的覆盖范围。然而, 该方案是以整捆数据包为重传单位, 当信道条件良好时, 不必要的重传将会严重降低LTE系统吞吐量, 并导致UE额外的能量消耗, 缩短电池的使用周期。

如图2所示, 在覆盖增强方案中, 第0~3个TTI分别发送4个不同的RV组成的一捆数据包。eNB需要3 ms(第4~6个TTI)处理该数据包且UE在第7个TTI

接收eNB发送的ACK/NACK信号, 并在第8~10个TTI处理该信号。与此同时, 不管UE接收到的是ACK还是NACK, UE在第8~11个TTI重传整捆数据包, 如果接收到的是ACK信号, 那么第8~11个TTI的重传则是不必要的, 导致UE浪费额外的发送能量及HARQ处理时间。当系统最大承受的时延严格限制在50 ms内, 导致同一个UE最多只能传输5捆相同的数据包(即对应于TTI序号0~3、8~11、16~19、24~27和32~35)。

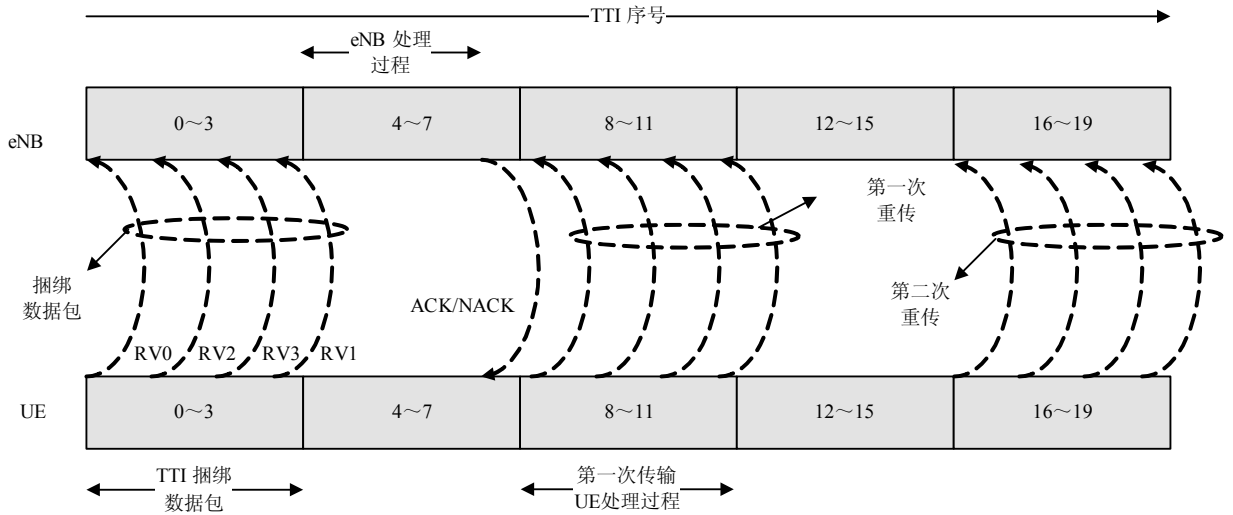


图2 覆盖增强的时隙捆绑方案

## 2 时隙捆绑预处理方案

覆盖增强方案在50 ms系统时延要求内增加系统的最大TTI捆绑数据包数, 然而一旦出现不必要的重传, 将严重降低系统的吞吐量, 消耗UE额外的能量, 影响UE电池的使用寿命。为此本文提出了一种时隙捆绑预处理方案, 该方案可以根据信道条件, 自适应地预先设定传输的最大TTI捆绑数据包数  $\lambda_\alpha \leq 5$ , 从而可以减少不必要的重传。  $\lambda_\alpha$  可以通过估计的SNR值  $\hat{\rho}$  及协议需要保障的BLER值  $\beta$  再通过查找表(LUT)获得, 即:

$$F(\lambda_\alpha, \hat{\rho}) \leq \beta \quad (1)$$

式中, 函数  $F(\cdot)$  表示LUT操作。然而, 同一个HARQ过程中相邻的两捆TTI数据包间的传输时延是4 ms。在这段时间内, 实际的信噪比  $\rho$  相对于其统计平均值  $\bar{\rho}$  可能会有一定的波动。假设  $\rho$  是一个服从  $[\bar{\rho} - \delta, \bar{\rho} + \delta]$  的连续均匀分布的随机变量, 其中  $\bar{\rho}$  为  $\rho$  的统计平均,  $\delta$  表示实际SNR变化的范围。于是,  $\rho$  的概率密度函数可以表示为:

$$f(\rho) = \begin{cases} \frac{1}{2\delta} & \bar{\rho} - \delta \leq \rho \leq \bar{\rho} + \delta \\ 0 & \rho > \bar{\rho} + \delta \text{ or } \rho < \bar{\rho} - \delta \end{cases} \quad (2)$$

### 2.1 BLER与SNR匹配的映射关系表生成

BLER与SNR匹配的映射关系可通过系统仿真或者解析表达式获得。文献[9-11]得出了静态信道和平坦块衰落信道下, 各次反馈重传的解析表达式。这里以静态信道为例, 考虑AWGN噪声下BLER性能与SNR以及迭代次数的关系, 通过仿真生成BLER与SNR匹配的映射关系表。

图3表示的是BLER与SNR的关系曲线。其中VoIP包长  $N = 328$ , Turbo译码迭代次数  $\eta = 5$ , MCS=1(BPSK调制, 码率为1/2)。为了生成BLER与SNR匹配的映射关系表  $B_i(\cdot)$ , 令  $\gamma = \{\rho_j\}_{j=1}^J$  ( $\rho_1 < \rho_2 < \dots < \rho_j$ ) 作为一组所关心的SNR值, 这一组SNR值可以是满足系统正常工作的数据, 如图3所示的  $[-14, -12, \dots, -4, -2]$  dB。于是BLER与SNR匹配的映射关系  $B_i(\cdot)$  可由所关心的SNR值仿真而得, 其中  $B_i(i, j)$  为映射关系表  $B_i(\cdot)$  中的一个元素, 表示发送

TTI捆绑数据包数为  $i$  ( $i=1,2,\dots,5$ ) 以及接收信噪比为  $\rho_j$  对应的BLER数值。

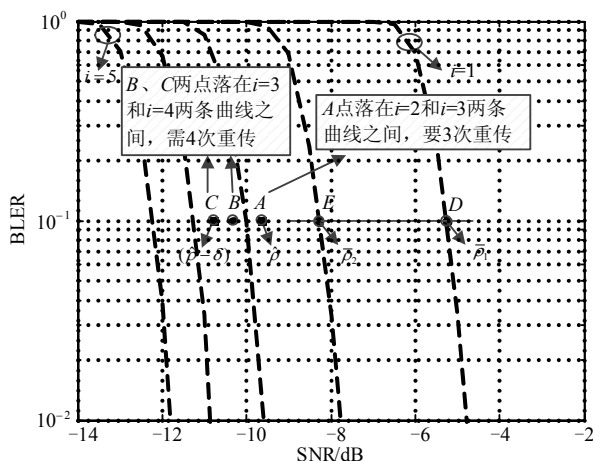


图3 BLER与SNR的关系曲线

## 2.2 LUT操作

查表操作目的在于根据估计的SNR值  $\hat{\rho}$  和要求的通信质量(对应于BLER值  $\beta$ ) 来得出需要发送的最大TTI捆绑数据包数  $\lambda_\alpha$ ，它根据式(1)中  $F(\lambda_\alpha, \hat{\rho}) \leq \beta$  求逆变换  $\lambda_\alpha \geq F^{-1}(\beta, \hat{\rho})$  得到。在自适应传输系统中，通常会预先估计SNR值  $\hat{\rho}$  来获取信道质量信息，然后选择合适的调制方式和码率来传输信息比特流。结合估计出的  $\hat{\rho}$ ，如何由BLER与SNR匹配的映射关系从查找表中自适应地选取合适的最大TTI捆绑数据包数是时隙捆绑预处理方案的核心问题。

由式(2)可知  $\bar{\rho} - \delta \leq \rho \leq \bar{\rho} + \delta$ ，用  $\hat{\rho} - \xi$  取代预估信噪比  $\hat{\rho}$ ，来抑制由于信道瞬时变化引起的传输时实际信噪比  $\rho$  的波动。其中，容忍系数  $\xi = \max|\hat{\rho} - \rho|$ ，表示预估的SNR值  $\hat{\rho}$  相对于真实值  $\rho$  可能产生的最大偏移，当  $\xi \geq \delta$  时，表示系统包含了信道最差的情况，反之没有包含，在查表过程中根据  $\hat{\rho} - \xi$  来设置最大TTI捆绑数据包数。图3中，假设系统要求的通信质量BLER为  $\beta = 0.1$ ，且估计出的SNR瞬时值  $\hat{\rho} = -9.6$  dB大于-10 dB(图3中A点所示)，若根据SNR预估值  $\hat{\rho} = -9.6$  dB，UE只需要传输3捆数据包或3次重传。然而，考虑到实际传输过程中信道的变化，实际传输时的信噪比  $\rho$  可能会小于-10 dB(如图3中的B点，及最差情况下的C点对应于  $\rho = \hat{\rho} - \delta$ )。所以，根据图3的BLER与SNR的关系曲线或映射关系表  $B_i(\cdot)$ ，最终设定UE连续传输4捆数据包来保证通信质量。

考虑到存储在移动终端的BLER与SNR匹配的

映射关系可能会消耗大量的内存。从图3可以看出，随着  $i$  的增加，传输  $i$  或  $i+1$  捆数据包的两条BLER曲线性能增益会随着  $i$  的增大而减小，因此本文的算法可以简化为只考虑最初的两次传输，即采用  $i=1$  和  $i=2$  的两条BLER曲线进行自适应传输。此时，对于  $\beta = 0.1$ ，只需要存储两个SNR平均值  $\bar{\rho}_1$  和  $\bar{\rho}_2$  (分别对应于图3的D点和E点)，存储消耗几乎可以忽略，于是可计算获得：

$$\lambda_\alpha = \begin{cases} 5 & \hat{\rho} - \xi < \bar{\rho}_2 \\ 2 & \bar{\rho}_2 \leq \hat{\rho} - \xi < \bar{\rho}_1 \\ 1 & \bar{\rho}_1 < \hat{\rho} - \xi \end{cases} \quad (3)$$

综上所述，考虑到估计的信道SNR值  $\hat{\rho}$  相对于真实值  $\rho$  的偏离，引入容忍系数  $\xi$  并根据信噪比  $\hat{\rho} - \xi$  来确定  $\lambda_\alpha$ 。如图3所示，已知的BLER性能值  $\beta$  (图3中实线)与各次反馈重传曲线有一些交叉点(如D、E点)，当信噪比  $\hat{\rho} - \xi$  落在第  $i$  和  $i+1$  条重传曲线的中间时，采用第  $i+1$  次重传。

以上定性讨论了查表的方法，下面从定量的角度进行说明。对于任意要求的BLER值，通过下面给出的伪代码来获得需要传输的TTI捆绑数据包数  $\lambda_\alpha$ ，即：

```

初始化  $\lambda_\alpha = \lambda = 5$ 
if  $(\hat{\rho} - \xi) < \rho_1$ 
     $k = 1$ ;
else if  $(\hat{\rho} - \xi) > \rho_J$ 
     $k = J$ ;
else
    找出最大值的信噪比  $\rho_j$ ，使其满足
     $\rho_j \leq \hat{\rho} - \xi$ ；然后令  $k = j$ ；
end if
for  $(i = 1; i++; i \leq \lambda)$  do
    if  $\beta > B_i(i, k)$ 
         $\lambda_\alpha = i$ ；
        Break;
    end if
end for

```

## 3 仿真结果

根据文献[12]中3GPP LTE协议规范，对覆盖增强方案和时隙捆绑预处理方案进行仿真。对于覆盖增强方案和时隙捆绑预处理方案，在AWGN信道中分别评估了两种方案的吞吐量和BLER性能。

图4给出了  $\xi = \delta$ 、 $\eta = 5$ 、MCS=1、SNR为  $\delta = 0.2$  dB、 $\delta = 0.5$  dB、 $\delta = 1$  dB和  $\delta = 2$  dB的4种信

道条件下两种方案的吞吐量曲线。从图中可以看出时隙捆绑预处理方案(实线)相对于覆盖增强方案具有更大的吞吐量, 尤其是当SNR大于-4 dB时。这主要是因为时隙捆绑预处理方案可以根据信道条件自适应地选择合适的TTI捆绑数据包数, 而覆盖增强方案的TTI捆绑数据包数始终为5(即 $\lambda = 5$ ), 一旦出现不必要的重传, 会浪费额外的资源和能量。同时, 可以观察到时隙捆绑预处理方案对应的 $\xi = 0.2$  dB、 $\xi = 0.5$  dB及 $\xi = 1$  dB这3条吞吐量曲线几乎重叠, 而 $\xi = 2$  dB的曲线的吞吐量较低。这是因为当SNR为-4 dB时( $\xi = \delta$ ,  $\beta = 0.1$  dB), 分别对应于 $\xi = 0.2$  dB、 $\xi = 0.5$  dB及 $\xi = 1$  dB最差的SNR值, 均大于-5 dB,  $\lambda_\alpha = 1$ ; 而 $\xi = 2$  dB对应的最差SNR值为-6 dB,  $\lambda_\alpha = 2$ , 这说明适当减少TTI捆绑数据包数有利用提高系统吞吐量。因此, 时隙捆绑预处理方案自适应地选择最大TTI捆绑数据包数, 减少不必要的重传, 可以有效提高系统吞吐量并节省UE能量。

图5给出了 $\xi = \delta$ 、 $\eta = 5$ 、MCS=1、SNR为 $\delta = 0.2$  dB、 $\delta = 0.5$  dB、 $\delta = 1$  dB和 $\delta = 2$  dB的4种信道条件下两种方案的BLER曲线, 这里 $\delta = 0.2$  dB、 $\delta = 0.5$  dB及 $\delta = 1$  dB的 $\lambda_\alpha$ 相同, 即 $\lambda_\alpha = 5$ 。从图中可以看出两种方案的 $\delta = 1$  dB比 $\delta = 0.5$  dB出错率高。说明两种方案在相同的最大TTI捆绑数据包数情况下, SNR变化范围越大, BLER性能越差, 尽管如此, 两种方案仍然可以满足所要求的BLER性能。当SNR小于-12 dB时, 两种方案的性能都比较差, 这是因为在信道及其恶劣的情况下, 即使传输5捆相同的数据包(4次重传)仍具有较高的译码错误概率(从图3可以看出)。

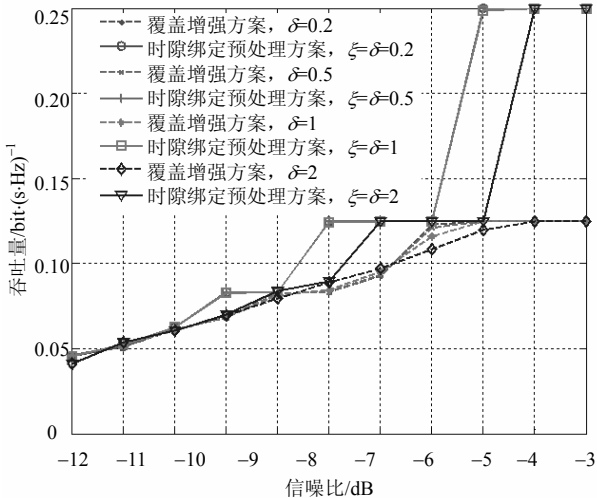


图4 两种方案的吞吐量曲线

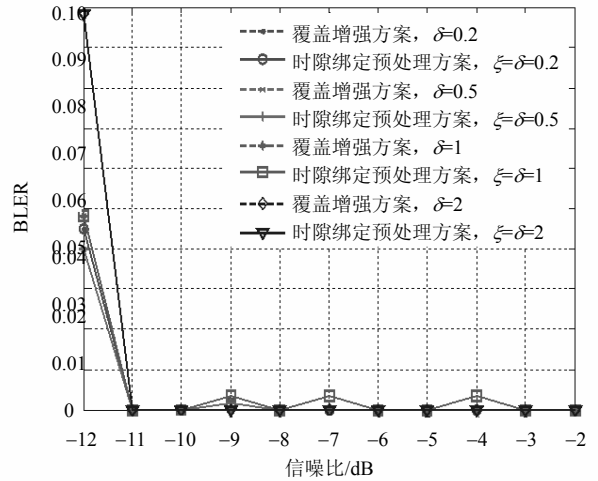


图5 两种方案的BLER曲线

图6给出了传输码率 $\gamma = 3/4$ 、 $\xi = 0.8$  dB、 $\eta = 5$ 、MCS=2条件下两种方案的吞吐量曲线。从图中可以看出, 随着SNR变化范围的增大, 两种方案具有相似的吞吐量性能损失趋势。然而, 相对于覆盖增强方案, 尤其当SNR大于-6 dB时, 时隙捆绑预处理方案的吞吐量更大。而且当SNR大于-2 dB时, 时隙捆绑预处理方案的吞吐量约为覆盖增强方案的两倍。这主要是因为当SNR大于-2 dB时, 一个VoIP包在时隙捆绑预处理方案中只需要一捆数据包就能成功地实现, 而覆盖增强方案需要传送其他额外的捆数据包, 严重降低了吞吐量。

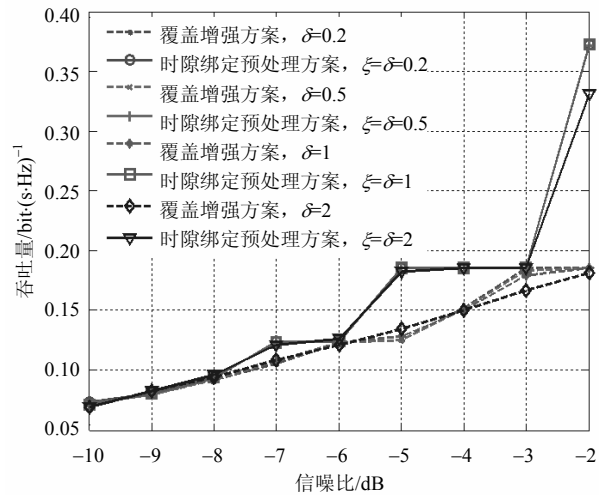


图6 两种方案的吞吐量

### 4 结束语

本文提出了一种基于时隙捆绑预处理的LTE上行自适应传输方案。LTE上行链路采用同步HARQ且支持相同的MCS, 对于不同的TTI捆绑数据包数,

通过线下仿真生成BLER与SNR匹配的映射关系并通过LUT操作和较小的存储可以预先设定合适的最大TTI捆绑数据包数。此外,引入信噪比容忍机制来有效地抑制数据传输过程中信道变化的影响。计算仿真表明,时隙捆绑预处理方案通过自适应地预先设定合适的最大TTI捆绑数据包数,可以减少不必要的重传,降低资源消耗和网络时延,提高LTE系统吞吐量,从而节省UE的传输能量,延长电池的使用周期。

### 参 考 文 献

- [1] BILJANA B, NICOLA B. A new channel and QoS aware scheduler to enhance the capacity of voice over LTE systems[C]//Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD). Spain: [s.l.], 2014: 1-6.
- [2] SABAGH M R, DIANATI M, IMRAN M A, et al. A heuristic energy efficient scheduling scheme for VoIP in 3GPP LTE networks[C]//Communications Workshops (ICC). Budapest: IEEE, 2013: 413-418.
- [3] DECHENE D J, SHAMI A. Energy-aware resource allocation strategies for lte uplink with synchronous harq constraints[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2014, 13(2): 422-433.
- [4] AVI R, LIU Wei-ming, MA Liang-ping, et al. Adaptive HARQ and scheduling for video over LTE[C]//Asilomar: Conference on Signals, Systems and Computers. Pacific Grove, CA, USA: [s.n.], 2013: 1584-1588.
- [5] WANG Hai-ming, HAN Jing, XU Shao-yi. Performance of TTI bundling for VoIP in EUTRAN TDD mode[C]//IEEE Vehicular Technology Conference. Barcelona, Spain: IEEE, 2009: 1-5.
- [6] HAN Jing, WANG Hai-ming. Principle and performance of TTI bundling for VoIP in LTE FDD mode[C]//IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Budapest, Hungary: IEEE, 2009: 1-6.
- [7] ZHOU Yu, ZHANG Tian-kui, ZENG Zhi-ming, et al. LTE uplink coverage enhancement techniques based on enhanced TTI bundling[C]//International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM). Shanghai: [s.n.], 2012: 1-4.
- [8] SUSITAIVAL R, MEYER M. LTE coverage improvement by TTI bundling[C]//IEEE Vehicular Technology Conference. Barcelona, Spain: IEEE, 2009.
- [9] CHENG J. Coding performance of HARQ with BICM Part I: Unified performance analysis[C]//21st IEEE International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). Istanbul, Turkey: IEEE, 2010: 976-981.
- [10] CHENG J. Coding performance of HARQ with BICM Part II: LTE circular buffer rate matching and extension[C]//21st IEEE International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). Istanbul, Turkey: IEEE, 2010: 982-987.
- [11] DECHENE D J, SHAMI A. Energy-aware resource allocation strategies for LTE uplink with synchronous HARQ constraints[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2014, 13(2): 422-433.
- [12] 3rd Generation Partnership Project. Technical specification group radio access network, evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA), physical channels and modulation: 3GPP TS 36.211 V11.4.0[S]. [S.l.]: ATIS, 2013.
- [13] CIPRIANO A M, GAGNEUR P, VIVIER, G, et al. Overview of ARQ and HARQ in beyond 3G systems[C]//21st IEEE International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications Workshops (PIMRC). Istanbul, Turkey: IEEE, 2010: 424-429.

编辑 叶芳