

文章编号: 2095-4980(2017)04-0575-05

GEO 卫星 LTE 跨层资源调度算法

徐小玲, 段 然, 崔维嘉, 王大鸣

(信息工程大学 信息工程学院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 地球同步轨道(GEO)卫星通信系统具有通信时延长的特点, 适用于GEO卫星长期演进(LTE)通信的资源调度算法非常重要。为提升星上资源分配的高效性, 基于可变最大加权时延优先(M-LWDF)算法, 提出了一种综合考虑媒体接入控制(MAC)层参数和应用层参数的跨层调度算法。该算法在MAC层从数学角度推导, 提出权重更大的时延判决因子及在应用层根据业务优先级不同引入 Q 因子。仿真结果表明, 与M-LWDF算法相比, 不同业务情况下, 跨层资源调度算法减小了通信时延, 提高了系统吞吐量, 但公平性能略有下降并增加了复杂度。

关键词: 地球同步轨道卫星; 跨层设计; 时延因子; Q 因子

中图分类号: TN926⁺.1

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201704.0575

A cross-layer based resource scheduling algorithm for multimedia traffic in GEO satellite LTE networks

XU Xiaoling, DUAN Ran, CUI Weijia, WANG Daming

(Information and System Engineering College, Information Engineering University, Zhengzhou Henan 450001, China)

Abstract: Considering the characteristic of long transmission delay in Geosynchronous Orbit(GEO) satellite communication system, it is very important to put forward an applicable resource scheduling algorithm for GEO satellite Long Term Evolution(LTE) system. Based on the Modified Largest Weighted Delay First(M-LWDF) algorithm, a cross-layer scheduling algorithm is proposed with the comprehensive consideration of parameters in the Media Access Control(MAC) layer and application layer for enhancing the efficiency of resources allocation. Specifically, a greater weight delay factor is put forward from the point of mathematical deduction in the MAC layer, in addition to introducing Q factor into the application layer according to service priorities. Comparing with M-LWDF algorithm, the simulation results show that the cross-layer based resource scheduling algorithm can reduce transmission delay and improve the throughput for different traffics, whereas fair performance decreases slightly and the complexity increases.

Keywords: Geosynchronous Orbit satellite; cross-layer based design; delay factor; factor Q

基于长期演进(LTE)的地球同步轨道(GEO)卫星移动通信系统将 LTE 标准应用到 GEO 卫星通信中, 是陆地蜂窝移动通信系统的扩展和延伸^[1-2]。在提供全球无缝覆盖的通信服务、人类空间探索活动的必要中继通道、越来越多的业务类型方面具有独特的优越性。与地面 LTE 网络不同, 卫星移动通信中存在通信时延长、上下行带宽非对称等严峻问题, 对无线资源调度和保证业务服务质量提出了极大挑战。因此, 如何高效利用系统链路资源, 成为提高系统用户满意度和通信效率的关键。

2015 年国防科学技术大学费长江等在文献[3]提出一种卫星 LTE 移动通信系统的高效资源调度算法, 其主要思想是考虑到星地链路间传播时延长, 导致基站无法及时收到终端上报的信道状态信息问题, 提出基于状态报告预测的资源调度方法。该调度算法能基本准确预测用户缓存状态, 提高无线资源利用率, 但其预测用户状态报告使用的业务模型过于理想化, 与实际情况有一定差距, 且得到状态报告后采用的比例公平资源调度算法仅将吞吐量和公平进行了折衷考虑, 未考虑其他服务质量(Quality of Service, QoS)因子。2013 年南非夸祖鲁纳塔尔大学的 Gbolahan Aiyetoro 等在文献[4]中提出卫星 LTE 移动通信新型资源调度算法, 该算法具有很好的用户公平性

收稿日期: 2016-01-24; 修回日期: 2016-04-05

基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目(2012AA01A502; 2012AA01A505)

能。贝尔实验室提出可变最大加权时延优先算法(M-LWDF), 最大程度地考虑了数据传输时延的影响, 但对通信时延和数据传输速率的变化反应不够敏感^[5]。

上述资源分配算法优化了时延或用户公平性单方面的性能, 从而达到资源调度算法效率提升的目的。但考虑到卫星通信时延长、频谱资源有限的特点, 仅从其中一方面优化资源调度算法的性能远远不能满足卫星通信要求。因此, 本文综合考虑卫星通信特点, 提出一种跨层资源调度算法(Cross-layer Based Resource Scheduling Algorithm, CBSA), 该算法能在动态变化的网络环境中通过整体优化的方式, 保证卫星业务 QoS, 既减少卫星长传输时延的影响, 又提高系统吞吐量。

1 系统模型与问题描述

GEO 卫星 LTE 通信系统将 LTE 标准引入 GEO 卫星通信系统中, 从而实现 GEO 卫星、地面 LTE 的一体化发展, 系统架构如图 1 所示。基站架设在地面, 并与核心网进行通信, 从基站到 GEO 卫星, 再从 GEO 卫星到终端组成下行链路, 终端到 GEO 卫星到基站组成上行链路, 从而形成传输过程的闭环^[6]。

由于应用于实时业务的 M-LWDF 算法最大限度地考虑了数据传输时延的影响, 考虑到 GEO 卫星往返时延约为 540 ms, M-LWDF 算法时延因子无法直接应用于 GEO 卫星通信系统。因此, 本文在现有 M-LWDF 算法的基础上, 对时延因子进行改进, 提出适用于 GEO 卫星通信的资源调度算法。M-LWDF 资源调度算法的思想是综合考虑无线信道质量和分组数据包的传输时延, 使得优先级的判断不仅与信道质量有关, 还与分组数据包的等待时延有关, M-LWDF 调度判决如式(1)所示, 式(2)为其约束条件^[7]。

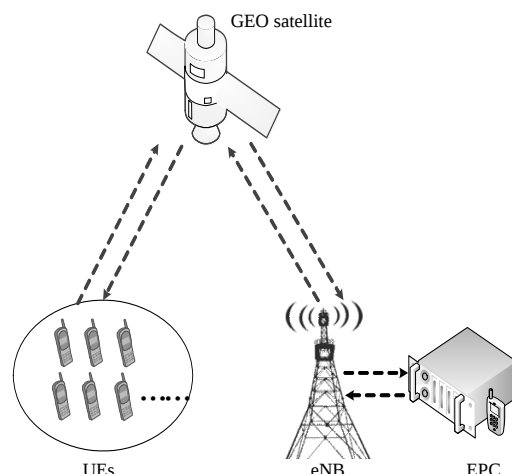


Fig.1 System architecture of a GEO satellite LTE network
图 1 GEO 卫星 LTE 通信系统网络架构

$$U_k[n] = \max_k \left(-\log \delta_k \right) \times \frac{R_k(n)}{T_k(n)} \times \frac{W_k(n)}{T_{k, \text{deadline}}} \quad (1)$$

$$\Pr(W_k > T_{k, \text{deadline}}) \leq \delta_k \quad (2)$$

式中: $U_k[n]$ 代表用户 k 在第 n 个 TTI 的优先级; $R_k(n)$ 是第 n 个 TTI 所支持的最大用户数据速率, 反映了用户的瞬时信道状况, 信道状况越好, 最大数据传输速率越高; $T_k(n)$ 是用户 k 在过去 $n-1$ 个 TTI 时间内的平均吞吐量的估计, 考虑到用户间的公平性, 其与调度优先级成反比, 避免边缘用户饿死现象的发生; $W_k(n)$ 代表用户 k 在第 n 个 TTI 的队列等待时延; $T_{k, \text{deadline}}$ 是用户 k 在队列中等待的时延限制, 当分组数据的等待时间超过该门限时, 分组数据将被丢弃。显然, $T_{k, \text{deadline}}$ 值越大越不易被丢弃, 其调度优先级也越低; δ_k 为发生队列等待时延 $W_k(n)$ 大于队列等待时延限制 $T_{k, \text{deadline}}$ 时的概率, 该值越小, 代表发生该事件的机率越小, 其调度优先级越大。

除了时延因子的改进, M-LWDF 算法也未能考虑到 GEO 卫星 LTE 通信系统中新增不同服务数据流自身优先级不同的因素。因此, 未能很好地适应 GEO 卫星 LTE 系统的业务 QoS 需求, 导致 M-LWDF 算法在卫星 LTE 系统下的性能下降。

2 跨层资源调度算法

跨层指通过模糊卫星 LTE 空中接口各层模式规定的界限, 将层与层之间的参数进行协调处理以及层间信息的联合^[8], 跨层资源调度方法能在动态变化的网络环境中通过整体优化的方式保证 QoS。因此, 针对于 GEO 卫星通信时延长的特点, 本文提出一种 GEO 卫星 LTE 跨层资源调度算法的研究。基于 M-LWDF 算法, 首先将 MAC 层数据包队列等待时延因子作出改进, 提高队列等待时延因子在调度判决式中的权重, 并考虑到应用层不同业务的 QoS, 调度判决中引入“Q 因子”。综合考虑 MAC 层数据包队列等待时延和应用层业务的 QoS, 提出适用于 GEO 卫星通信的跨层资源调度算法。

2.1 基于时延函数的 M-LWDF 算法改进

M-LWDF算法中与数据包分组等待时延有关的因子为 $\frac{W_k(n)}{T_{k,deadline}}$, 为方便分析问题, 此处记 $W_k(n)$ 为 x , 记 $T_{k,deadline}$

为 y , 且具有约束条件 $\begin{cases} y > x \\ x \geq 0 \\ y \geq 0 \end{cases}$ 。则 $s = \left(\frac{1}{x} - \frac{1}{y}\right) - \frac{x}{y}$ 仅在区域 D_1 和 D_2 有效, 如图2所示。处在区域 D_1 时, $s > 0$,

处在区域 D_2 时, $s < 0$, 若进一步采用指数形式 $s = \exp\left(\frac{1}{x} - \frac{1}{y}\right) - \frac{x}{y}$ 可得出 $s > 0$, 如图3所示。因此可将 M-LWDF

算法中的时延因子改进为 $\exp\left(\frac{T_{k,deadline}-W_k(n)}{W_k(n)T_{k,deadline}}\right)$, 从而增强 GEO 卫星 LTE 调度判决中时延因子权重的影响, 改进型资源调度算法判决式如式(3)所示:

$$U_k[n] = \arg \max_k \left(\frac{R_k(n)}{T_k(n)} \exp\left(\frac{T_{k,deadline}-W_k(n)}{W_k(n)T_{k,deadline}}\right) \right) \quad (3)$$

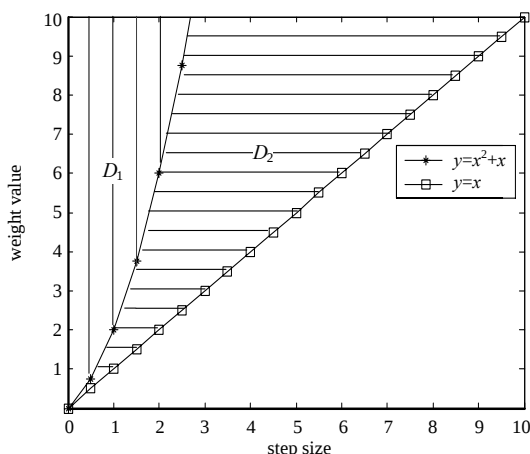


Fig.2 Weight contrast of delay factor in process
图2 过程中时延因子权重对比

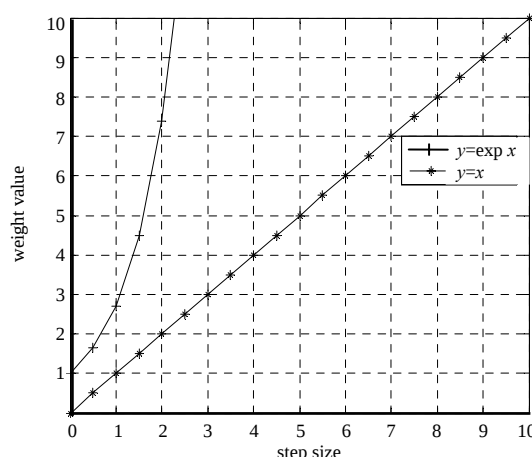


Fig.3 Weight contrast of ultimate delay factor
图3 最终时延因子权重对比

2.2 基于时延函数和业务 QoS 的 M-LWDF 算法

下面从业务优先级角度对 M-LWDF 算法作进一步改进。卫星 LTE 系统中不同类型业务具有不同的 QCI(QoS Class Identifier)等级, 并对应不同的优先级^[9], 为使得资源调度算法更好地适应卫星 LTE 系统的 QoS 机制, 选择被调度的用户时, 重点考虑用户申请的业务类型, 业务类型优先级高的用户优先调度。

3GPP 将业务的种类分为 4 种, 分别是后台业务、交互业务、会话业务和数据类业务^[10]。因此, 卫星 LTE 系统中业务种类较多, 典型的业务有 VoIP 业务、实时视频业务、数据类业务。VoIP 业务是将声音信号进行编码处理, 封装成 IP 数据包, 并通过网络进行传输的业务。VoIP 业务的数据包较小, 大小约为 40 字节, 属于实时业务, 在网络传输时提供较高的优先级来控制业务端到端的时延。视频业务是典型的多媒体业务, 分为可变比特率 (Variable Bit Rate, VBR) 编码和不可变比特率 (Constant Bit Rate, CBR) 编码, 视频业务属于实时性业务, 对时延和抖动敏感。数据业务没有严格的延时和时延抖动指标要求, 不过通常要求较低的误码率。

语音业务的 QCI 优先级参数为 2, 实时视频业务的 QCI 优先级参数为 4, 数据业务的 QCI 优先级参数为 6 或 8。结合卫星 LTE 系统的 QCI 优先级参数, 在现有 M-LWDF 算法的基础上引入“Q 因子”, 由于业务优先级越

高, 优先级参数越小, 本文选取 $\exp\left(\frac{1}{QCI_{priority}}\right)$ 作为其 Q 因子。采用指数的形式可保证 Q 因子为单调递增的非负函数, 不至于出现不同业务调度判决的差距过大现象。结合 MAC 层等待时延函数和应用层业务优先级的跨层资源调度算法判决式如式(4)所示, 其中 $U_k[n], R_k(n), T_k(n), T_{k,deadline}, W_k(n)$ 的含义与 M-LWDF 算法相应参数相同。

$$U_k[n] = \arg \max_k \left[\frac{R_k(n)}{T_k(n)} \left\{ \exp \left(\frac{T_{k, \text{deadline}} - W_k(n)}{W_k(n) T_{k, \text{deadline}}} \frac{1}{QCI_{\text{priority}}} \right) \right\} \right] \quad (4)$$

3 仿真与结果分析

为评估本文提出的卫星 LTE 跨层资源调度算法性能,使用 LTE-Sim 仿真工具^[6]。分别仿真了 M-LWDF 算法和 CBSA 的语音、视频业务随着用户数量的变化,时延和吞吐量性能的变化对比。系统吞吐量和分组时延是在设计卫星资源调度算法时需要重点考虑的 2 个主要指标。系统吞吐量计算方法是在本文设计资源调度算法的调度优先级判决式下,累加单位时间内传送的数据包。而平均时延也在相同条件下,通过计算每个包的平均队首等待时延而得到。此处设定仿真时间为 500 s, GEO 卫星的双跳结构往返时延为 560 ms, 传输时间间隔为 1 ms, 频率复用因子为 7, RLC 层采用确认模式, 设置视频数据包大小为 190 kb/s, 语音数据包大小为 9.3 kb/s, 具体仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

parameter	value
simulation time/s	500
RTD/ms	560
TTI/ms	1
frequency re-use	7
RLC mode	AM
video packet size/(kb/s)	190
audio packet size/(kb/s)	9.3
scheduling algorithm	M-LWDF, cross-layer resource scheduling

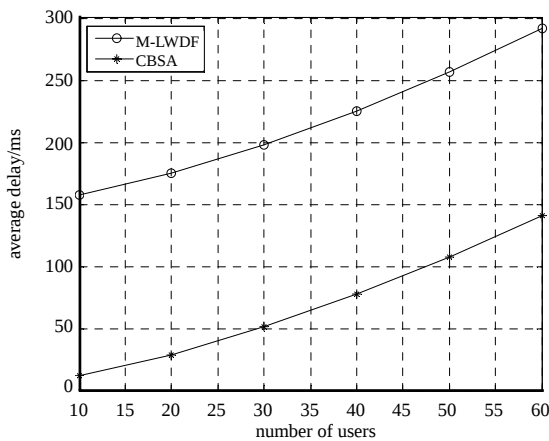


Fig.4 Average delay of voice users

图 4 语音业务平均时延

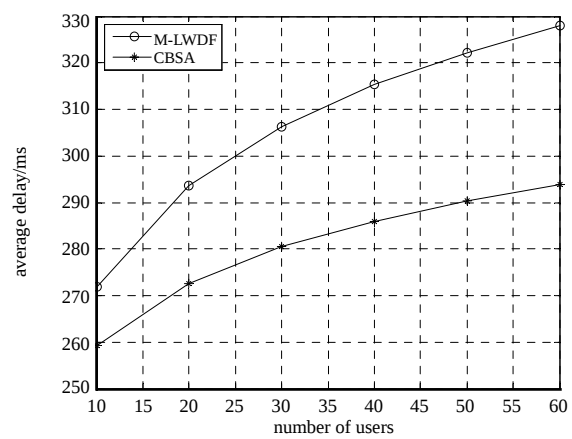


Fig.5 Average delay of video users

图 5 视频业务平均时延

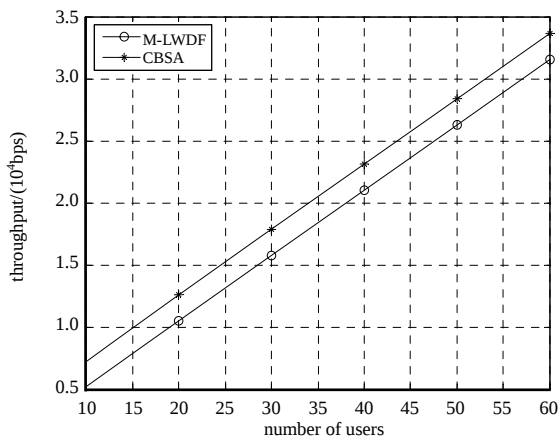


Fig.6 Throughput of voice streamers

图 6 语音业务吞吐量

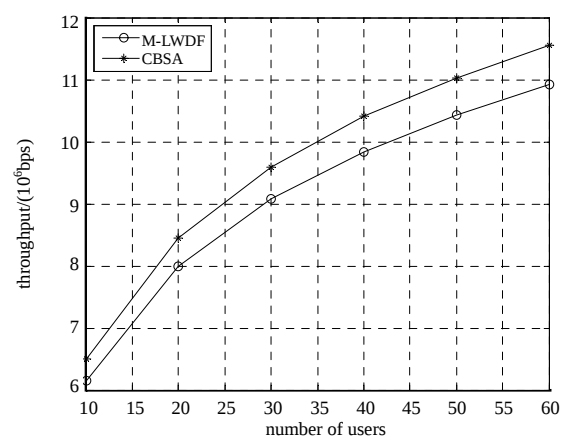


Fig.7 Throughput of video streamers

图 7 视频业务吞吐量

图 4、图 5 为跨层资源调度算法和 M-LWDF 算法调度语音业务、视频业务的平均时延函数曲线。从图中可以看出,不论是语音业务还是视频业务,算法的平均时延均小于 M-LWDF 算法。这是因为跨层资源调度算法在 M-LWDF 算法的基础上引入了权重更大的时延因子,对于实时业务的时延保证具有重大的意义。同时从图 4 与

图 5 中对比发现,语音业务的平均时延小于视频业务的平均时延,这是因为跨层资源调度算法还考虑了应用层的不同业务的优先级,在卫星通信中语音业务的优先级高于视频业务,当承载语音业务的用户和发起视频业务的用户同时接入卫星时,无线资源优先分配给语音业务。

跨层资源调度算法与 M-LWDF 算法调度实时业务的有效系统平均吞吐量如图 6、图 7 所示。从图中可以看出,相对于 M-LWDF 算法,语音业务和视频业务在跨层资源调度算法的调度判决下吞吐量性能均有提高。2 种业务吞吐量性能提高比例相当,视频业务的吞吐量较大是因为语音数据包数据量较小,而视频业务传输的数据量大。当 2 个用户同时接入系统时,系统优先为语音业务调度资源,视频业务需等待资源的配送,将导致视频业务的吞吐量性能略有下降。

4 结论

在 GEO 卫星通信系统中,由于通信时延长,星上资源有限,提出适用于 GEO 卫星 LTE 通信的资源调度算法很重要。为减少卫星通信时延的影响,基于现有的 M-LWDF 算法,提出了一种跨层资源调度算法。通过仿真分析可知,该算法可以根据时延因子和 Q 因子,灵活调度系统资源,与 M-LWDF 资源调度算法相比,减少了通信时延,同时提高了系统吞吐量。当然该算法也会带来公平性能下降和复杂度的增加。

参考文献:

- [1] 陈坤汕,王大鸣,徐尧. 面向 LTE 的静止轨道卫星通信系统随机接入方式[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013,11(5):707-711. (CHEN Kunshan,WANG Daming,XU Yao. Random access method for GEO satellite communication system oriented LTE[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013,11(5): 707-711.)
- [2] 费长江,吴纯青,赵宝康,等. 一种卫星移动通信语音业务半持续调度机制[J]. 湖南大学学报:自然科学版, 2015,42(8):108-115. (FEI Changjiang,WU Chunqing,ZHAO Baokang,et al. A semi-persistent scheduling mechanism for voice service in satellite mobile communication[J]. Journal of Hunan University:Natural Sciences Edition, 2015,42(8):108-115.)
- [3] FEI C J,ZHAO B K,WU C Q,et al. Towards efficient radio resource scheduling in LTE-based satellite mobile communication system[C]// 2015 IEEE Conference on Computer Communications Workshops. Hong Kong,China:IEEE, 2015:167-172.
- [4] AIYETORO G,GIAMBENE G,TAKAWIRA F. A new packet scheduling algorithm in satellite LTE networks[C]// AFRICON, 2013. Pointe-Aux-Piments,Mauritius:IEEE, 2013:1-6.
- [5] AMEIGEIRAS P,WIGARD J,MOGENSEN P. Performance of the M-LWDF scheduling algorithm for streaming services in HSDPA[C]// IEEE 60th Vehicular Technology Conference, 2004. Los Angeles,CA,USA: IEEE, 2004:999-1003.
- [6] AIYETORO G,TAKAWIRA F. A cross-layer based packet scheduling scheme for multimedia traffic in satellite LTE networks[C]// 2014 6th International Conference on New Technologies,Mobility and Security. Dubai: IEEE, 2014:1-6.
- [7] 杨俊蓉,樊自甫. 基于时延和速率效用函数的 LTE 无线资源调度算法研究[J]. 数字通信, 2011,38(2):57-60. (YANG Junrong,FAN Zifu. Based on the utility function of delay and rate for LTE resource scheduling algorithms[J]. Digital Communication, 2011,38(2):57-60.)
- [8] 张馨月. 卫星通信系统跨层资源管理技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2014. (ZHANG Xinyue. Research on resource management of cross-layer design technology over satellite system[D]. Harbin,China:Harbin Institute of Technology, 2014.)
- [9] 赵立群. LTE 中基于业务分类的调度算法[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2012. (ZHAO Liqun. Scheduling algorithm based on differentiated service in LTE[D]. Harbin,China:Harbin Institute of Technology, 2012.)
- [10] 姚丹,崔维嘉,季仲梅. 基于 QCI 优先级的分组调度算法[J]. 计算机工程, 2011,37(9):141-143. (YAO Dan,CUI Weijia,JI Zhongmei. A QCI-based priority algorithm of packet scheduling[J]. Computer Engineering, 2011,37(9):141-143.)

作者简介:



徐小玲(1990-),女,福建省龙岩市人,在读硕士研究生,主要研究方向为卫星与移动通信.email:xu014xiaoling@163.com.

段然(1979-),男,沈阳市人,副教员,主要研究方向移动通信。

崔维嘉(1976-),男,山东省蓬莱市人,副教授,主要研究方向为卫星与移动通信。

王大鸣(1971-),男,辽宁省大连市人,教授,博士生导师,主要研究方向为卫星与移动通信。