

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2014.07.015

引用格式:王俊飞,崔维嘉,王大鸣. 基于 LMS 估计的卫星移动通信定时同步优化[J]. 电讯技术,2014,54(7):945-950. [WANG Jun-fei, CUI Wei-jia, WANG Da-ming. Timing Synchronization Optimization for Satellite Mobile Communication Based on LMS Estimation[J]. Telecommunication Engineering, 2014, 54(7): 945-950.]

基于 LMS 估计的卫星移动通信定时同步优化*

王俊飞**,崔维嘉,王大鸣

(解放军信息工程大学,郑州 450002)

摘 要:针对采用长期演进(LTE)通信标准的地球静止轨道(GEO)卫星移动通信系统上行定时误差会影响单载波频分多址技术正交性的问题,在 LMS 线性估计算法的基础上提出了一种适用于大时延环境下单载波频分多址定时同步优化方法。该方法对用户与卫星之间传输时延的变化进行估计,通过闭环控制补偿减小上行定时误差。仿真表明:该方法在使用 LTE 标准帧结构时,能保护用户上行信号正交性,避免符号间干扰,且传输速率损失约为 9%,远低于传统拓展帧结构方法带来的损失,验证了方法的优越性。

关键词:卫星移动通信;地球静止轨道;长期演进;上行干扰;定时误差;定时同步优化

中图分类号:TN927 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2014)07-0945-06

Timing Synchronization Optimization for Satellite Mobile Communication Based on LMS Estimation

WANG Jun-fei, CUI Wei-jia, WANG Da-ming
(PLA Information Engineering University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: The uplink timing error using Long Term Evolution (LTE) communication standards will affect the orthogonality of single-carrier frequency division multiple access technology (SC-FDMA) in Geostationary Earth Orbit (GEO) satellite mobile communication system. To solve this problem, an SC-FDMA timing synchronization optimization method based on LMS linear estimation algorithm is proposed. The method estimates the changes in transmission delay between the user and the satellite, and reduces uplink timing error through closed-loop control compensation. The simulation results show that the method can protect user uplink signal orthogonality and avoid intersymbol interference with about 9% transmission rate loss when the LTE standard frame structure is used, which is much lower than that of traditional method in which the frame structure is expanded. The advantages of the method are demonstrated.

Key words: satellite mobile communication; GEO; LTE; uplink interference; timing synchronization error; timing synchronization optimization

1 引 言

卫星移动通信系统具有覆盖面广、室外信道质量高、抗毁性强等优点,被广泛应用于偏远地区通信网络建设、抢险救灾应急通信、军事通信等领域^[1]。伴随着我国 LTE 商用化的进一步推广,地面移动通

信网络正逐步完成由 3G 向 4G 时代的演进,以 LTE 技术体制为基础的新一代卫星移动通信系统演进也成为了当前移动通信的重要研究热点。

LTE 标准应用在卫星移动通信系统中面临着诸多问题,其中 OFDM (Orthogonal Frequency Division

* 收稿日期:2014-01-08;修回日期:2014-04-08 Received date:2014-01-08;Revised date:2014-04-08

** 通讯作者:305784932@qq.com Corresponding author:305784932@qq.com

• 945 •

Multiplexing) 在 GEO 卫星大时延传输环境下受定时误差影响会引发严重的符号干扰,造成信号幅值衰减和相位旋转从而导致通信性能的大幅降低。

本文采用 LMS(Least Mean Square)线性估计算法,通过设计闭环控制机制,提出了一种适用于 GEO 卫星移动通信环境的定时估计方法,利用用户与卫星之间相对距离变化的统计特性,能优化算法中数据的相关性,提高估计准确性,减小卫星系统的通信性能损失。

2 技术方案

2.1 卫星移动通信系统定时误差分析

卫星用户终端到达卫星的传输距离时刻在发生着变化,其原因主要有两方面:一方面由于在卫星移动通信覆盖区域内不同用户终端所处位置散布范围广(单波束覆盖半径 200 ~ 350 km)且移动特性各异,例如飞机(速度约 900 km/h,高度约 10 km)、船舶(速度约 40 km/h)、车辆(速度约 80 km/h)和行人(速度约 7 km/h);另一方面同步轨道上的静止卫星会受地球的不规则形状和地月引力等因素影响而发生位置的变化。因此,用户设备与卫星之间的传输时延也随时发生着变化,引起较大的定时误差。

以卫星系统覆盖中国区域为例,最远端波束覆盖最高纬度的漠河地区用户设备最大传输距离差约为 372.2 km,最大传输时间差^[2] $|\Delta t_{\max}| = 1.2407\text{ ms}$,因此系统最大定时误差值为 1.24 ms。与此同时,卫星系统中链路传输的大时延特点(单跳传输时延约 270 ms),使得基站无法实时将终端定时误差反馈给用户终端。用户终端在没有得到实时调度的情况下,会发生上行定时误差的不断累加,当累加超过循环前缀和保护间隔长度时,基站无法确定信号何时到达基站,引发符号间干扰,如图 1 所示,图中 X 表示定时误差, T 表示 OFDM 符号长度;同时,在准确的解调信号上产生相位旋转因子,在星座逆映射过程中产生误码。

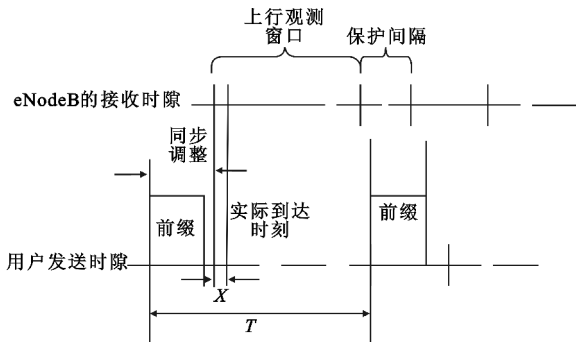


图 1 上行信号干扰
Fig. 1 Uplink signal interference

2.2 现有定时同步技术分析

在现行 LTE 标准中,为保证终端间上行信号的正交性,用户终端的上行信号达到基站的时间要求时隙对齐,系统的时隙对齐由定时同步过程完成,同步过程中存在空口时延。当用户接入完成随机接入后,用户设备(User Equipment, UE)会发送探测参考信号(Sounding Reference Signal, SRS)或者数据信号的参考信号(Reference Signal, RS),基站会利用接收到信号的 ZC(Zadoff-Chu)序列相关性计算出 UE 的上行空口时延,并实时反馈给 UE 调整该设备的时间提前量,完成定时同步过程。在该过程中,系统使用 UE 发送侧的 TA(Timing Advance)调整提前量消除 UE 之间不同的传输时延^[3]。在现有标准中,TA 的取值范围为 0 ~ 0.67 ms,粒度为 0.52 μs ,对应小区半径为 100 km,UE 根据响应信息的 TA 值调整上行时间 $NTA = TA \times 16$ ^[4]。北京大学段荷香等人在文献[5]中指出卫星系统中的长时延使得新的时间偏差出现,当用户高速移动时,系统可能出现严重的不同步,使得系统性能明显下降,为解决这一问题,必须对上行定时提前量 NTA 进行调整以适应卫星传输信道环境。

针对以上问题,国内外研究人员提出了一些方法^[6],虽然能避免大部分的上行信号干扰,但同时又带来了传输速率大幅降低和与地面系统兼容性差的新问题,因此我们考虑将地面原有的定时误差估计方法引入卫星系统。

针对地面 OFDM 定时误差估计技术目前主要有以下 3 种方法。

(1) SCHMIDL T 和 COXT D 算法^[7]

该算法以定时测度最大的点即是接收数据符号的起始时刻。但该方法实现的定时测度函数会出现一个峰值平台,导致定时模糊,影响判决。

(2) 部分窗相关算法^[8]

该算法利用循环前缀中无多径干扰部分来做定时估计,在多径(3)最大时延已知的条件下有较好估计性能,但在实现中牺牲传输效率换取定时的准确性,且卫星环境下多径效应影响较小,并不具备实现环境。

(3) 最大似然算法^[9]

该算法受循环前缀与数据部分的相关性影响,估计抖动较大,虽然该算法有大量优化改进方案,但

需要较大的存储和运算资源开销,不适用于卫星载荷资源有限的实际情况。

2.3 方法设计思路

针对原有定时误差估计方法在卫星大时延环境下的适应性问题,考虑到卫星移动通信用户与卫星之间距离变化的统计特性,我们引入 LMS 线性估计算法,通过对数据进行优化,设计一种闭环控制方法,提高卫星系统定时同步精度。

首先,卫星大时延环境下透明转发模式的卫星通信最起码需要 270 ms 的传输时间才能将 TA 值反馈给 UE,为此设立 270 ms 为一个闭环周期。假设 GEO 卫星系统接入用户上行帧数量为 N ,单向传输时延为 ∂ ,并假定各用户上行定时误差 X_i 为服从用户与卫星间距离变化的概率统计分布,则上行信号达到基站,观测窗口开始时间为

$$W = \partial + X_i + NTA \tag{1}$$

为消除 X_i 对到达时间的影响,我们尝试通过对定时误差 X_i 周期性的估计补偿以提高上行定时同步精度。假定引入补偿值 Y_i 的观测窗口开始时间为

$$W = \partial + X_i + NTA - Y_i \tag{2}$$

当使用 LTE 标准 10 ms 帧长时,带来的传输速率损失率为

$$\varphi = \frac{\sum |Y_i|}{10N} \tag{3}$$

依据该定时误差补偿模型,可以发现定时误差补偿值的设立虽然能避免上行信号间干扰,但与此同时,补偿值的设立也会带来系统容量下降的问题。为控制补偿值 Y_i 对卫星移动通信系统容量的影响,本文所提算法能在一个环路周期内提供自适应调节补偿值 Y_i 的能力,该算法利用了 LMS 估计算法对周期内的定时误差进行估计,通过检测传输时延变化快慢来自适应调整算法更新速率,为系统提供定时误差补偿值,当补偿值 Y_i 超过 CP 和 GT 长度时,则认为下一时隙信号有可能受到干扰,通知上层同步丢失,通过定时同步调整后重传,使得卫星移动通信系统能在传输速率有限降低的条件下能完成上行定时同步,避免上行符号干扰。

2.4 方法步骤

根据设计思想,设计基于 LMS 估计算法的 GEO 卫星移动通信上行定时同步方法步骤见图 2。

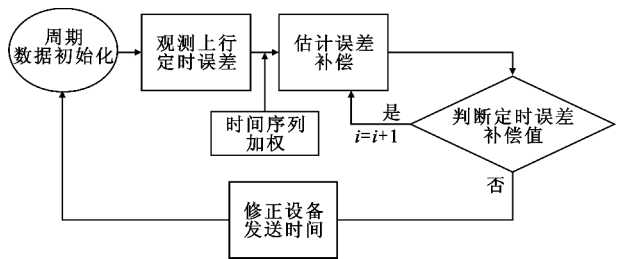


图 2 GEO 卫星移动通信系统上行信号定时误差补偿算法流程

Fig.2 Flow chart of uplink signal synchronization error compensation algorithm for GEO satellite mobile communication system

具体步骤如下:

(1)周期数据初始化

提供周期计数器初始化,使得 $i=n$,调节更新速率 μ 。

(2)观测上行定时误差

通过已到达的 n 个信号的 ZC 序列相关性计算出上行定时误差观测值序列 $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ 。

(3)时间序列加权

依据平稳时间序列邻近分类准则^[10]设置加权序列初值 α_n ,即有

$$\alpha_n \in R^+, \sum \alpha_n = 1, \alpha_{n-1} < \alpha_n \tag{4}$$

(4)估计定时误差补偿

在本文中拟定单一用户的定时误差服从平稳时间序列邻近准则,该序列准则认为距离预测时间越近的观测值对预测值影响越大,该误差具有线性特征,因此使用 LMS 线性估计算法通过观测 n 个上行帧的定时误差值 $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ 预测第 $n+1$ 个上行帧的定时误差补偿值 Y_{n+1} 。

$$\begin{cases} Y_{n+1} = \sum_{i=1}^n \alpha_i (X_{i+1} - X_i) + Y_i \\ \alpha_{n+1} = \alpha_n + \mu X_n e^*(n) \\ e(n) = d_n - Y_n \\ 0 < \mu < \frac{2}{\text{tr}(R)} \end{cases} \tag{5}$$

其中, μ 为加权值更新速率, $e(n)$ 为估计误差, d_n 为上一周期时间补偿值期望, R 为定时误差 $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ 的自相关矩阵,根据公式(5)可知根据用户移动状态会限定 μ 值,该值越大算法收敛速度越快。

(5)判断定时误差补偿值

判断预测补偿值是否符合 $T_{CP} < Y_i < T_{GT}$,其中 T_{CP} 为循环前缀长度, T_{GT} 为保护间隔长度,当 $-T_{CP} < Y_i < T_{GT}$ 时,令 $n=n+1$ 继续预测下一补偿值并调整接收

窗口开始时间,否则转入第 6 步。

(6)修正设备发送时间

通告上层失步重传,通过已预测补偿值序列 $\{Y_1,Y_2,\cdots,Y_n\}$ 期望修正 NTA 值,周期重置,重新观测调整后的定时误差,且通过期望的变化能自适应调节算法更新速率 μ 的取值。

$$X_T=X-E[Y] \tag{6}$$

依据以上步骤,设 UE 第 i 个 OFDM 时域发送符号表示为

$$s_i(t)=\frac{1}{\sqrt{T_u}}\sum_{k=\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}-1}S_i^ke^{j2\pi\frac{k}{T_u}(t-iT_i-T_g)}*g(t-iT_i) \tag{7}$$

其中,OFDM 有效符号长度为 T_u ,保护间隔长度为 T_g ,总的符号长度为 $T_i=T_u+T_g$ 。

通过对定时误差的补偿,去间隔后接收到的信号为

$$r_i[t-E(Z)]=[s_i[t-E(Y)]*h[t-E(Y)]+n(t)]*g[t-iT_i-T_g-E(Y)] \tag{8}$$

3 性能仿真与分析

仿真中系统模型采用透明转发模式 TDD 单载波频分多址 GEO 卫星移动通信系统架构,由于卫星环境下定时误差属于线性变化,符号干扰通常产生于用户之间相邻帧之间,因此本文仿真使用相邻用户帧的干扰数量比较性能。假设系统需要完成两个用户 A、B 随机接入后1 000个相邻上行10 ms长度标准帧的接收任务,观测步长次数 $n=3$,加权初值 $\alpha_n=[0.2,0.3,0.5]$,时间保护间隔采用地面系统最大长度 $T_{GT}=714\ \mu\text{s}$ 。以中国地理位置为例,透明转发模式的 GEO 移动通信卫星需要使用 109 个点波束覆盖中国全境,卫星单波束覆盖半径为 $R=200\ \text{km}$,GEO 卫星距离赤道35 786 km,以北纬 53° 地区覆盖波束为参考,设定地面波束中心点至卫星距离 $D=37\ 425\ \text{km}$,波束内用户设备(UE)达到 eNodB 的单向传输时延 $\vartheta=270\ \text{ms}$,最大传输时延差 $d_s=1.24\ \text{ms}$ 。

当用户持续远离或接近波束中心位置时,定时误差持续增加,属于累加过程近似认为输入的误差分布服从泊松分布;当用户在在某固定位置附近随机游动时,定时误差在特定值附近抖动,近似认为输入的误差分布服从正态分布,分布均值均设为零,仿真场景设置见表 1。

表 1 仿真场景设置
Table 1 Simulation scenarios set

仿真场景	输入误差分布	分布函数与取值
用户持续远离波束中心位置	误差服从泊松分布	$P(X=k)=\frac{\lambda^k}{k!}e^{-\lambda}$ $\lambda=0.5$
用户在固定位置附近随机游动	误差服从正态分布	$f(x)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}}$ $\sigma=0.5,a=0$

场景条件 1:当用户上行帧到达定时误差服从泊松分布时,比较使用和不使用本算法完成样本数 $N=1\ 000$ 的上行帧重传次数和补偿值估计的收敛性,结果如图 3 和图 4 所示。

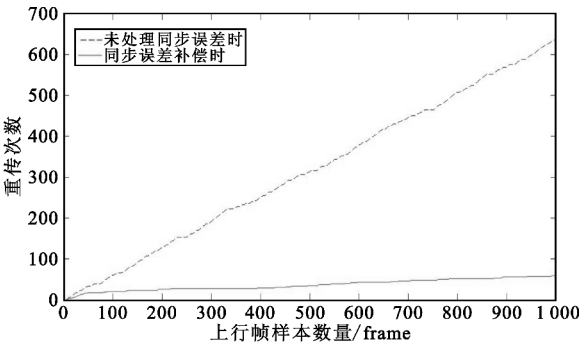


图 3 输入服从泊松分布时的抗干扰性能比较
Fig. 3 Anti-jamming performance comparison in Poisson distribution

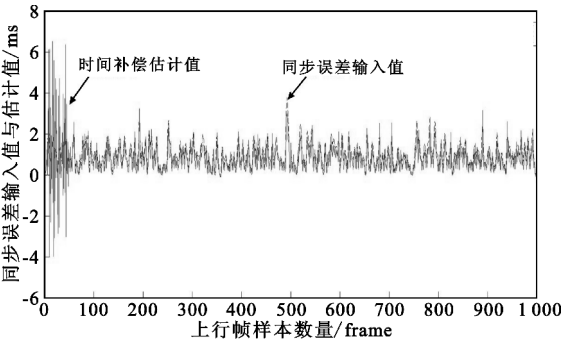


图 4 输入误差服从泊松分布时的时间补偿估计
Fig. 4 Time compensation estimation in Poisson distribution

场景条件 2:当用户上行定时误差服从正态分布时,比较使用和不使用本算法完成样本数量 $N=1\ 000$ 的上行帧重传次数和补偿值估计的收敛性,结果如图 5 和图 6 所示。

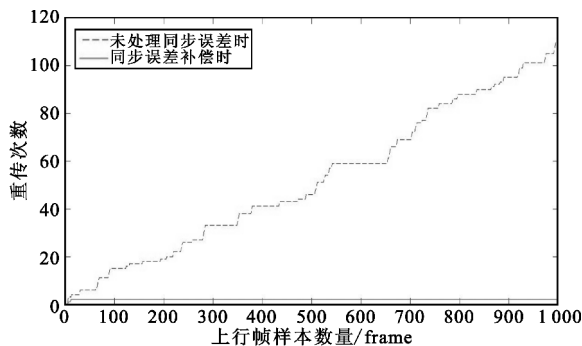


图 5 输入服从正态分布时的抗干扰性能比较
Fig. 5 Anti-jamming performance comparison in Normal distribution

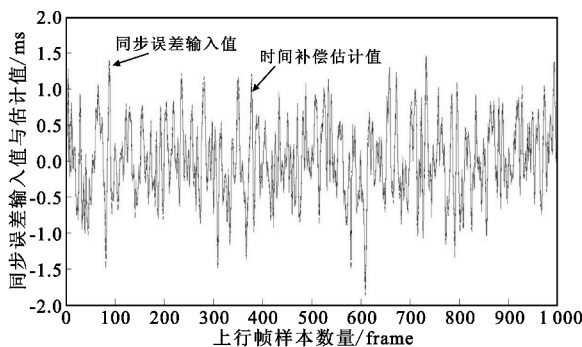


图 6 输入误差服从正态分布时的时间补偿估计
Fig. 6 Time compensation estimation in Normal distribution

通过仿真结果可以看到,在用户 A、B 的定时误差分别服从相互独立泊松分布和服从正态分布时,与传统处理方式相比,本文所提算法减少了 90% 左右的干扰重传次数,能为 GEO 卫星系统提供有效的上行同步手段,且所带来的传输速率损失仅为 8.9% 左右,而且随着迭代次数的增加,定时误差估计值的收敛性越好。

4 结 论

通过对仿真数据的分析,在卫星大时延环境下,针对本文所提基于 LMS 估计的上行定时同步优化方法,我们可以得出以下结论:

- (1) 在定时误差服从泊松分布和正态分布时,本文所提定时同步优化方法可以减少由于失同步和符号干扰带来的上行信号重传次数,适用于卫星大时延环境下的单载波频分多址技术^[11];
- (2) 本文方法会导致时隙的变相扩展,牺牲部分传输速率,但能通过迭代调整的自适应控制,将速率损失控制在 8.9% 左右,优于直接扩展帧结构长

度而带来的 60% 传输速率损失,且对地面 LTE 通信系统具有更好的兼容性;

(3) 伴随着用户设备移动速度的增加,定时误差的自相关性逐步降低,本文所提方法能通过调整更新速率自适应高速移动平台,保证了算法快速收敛;

(4) LMS 线性估计算法存在漏检和误检概率,会影响算法性能,通过对更新速率的合理预设和算法优化能控制该部分对性能的影响,性能影响不超过 0.1%,所以本文所提算法在仿真设定条件下传输速率损失最高约为 9%。

文中算法依靠两种随机分布的仿真数据对算法进行了分析,在概率统计的层面上能反映 GEO 卫星系统上行定时误差情况,在后续研究工作将结合实测数据,为各不同速度的用户设备平台提供自匹配的更新速率取值,进一步验证算法的性能和可靠性。

参考文献:

- [1] 孟文超,段红光. GEO 多波束卫星移动通信系统多址方式选择的研究[J]. 现代电信科技,2013(10):20-23.
MENG Wen-chao, DUAN Hong-guang. Study on the Selection of Multiple Access for GEO Multi-beam Satellite Mobile Communication System[J]. Modern Telecommunications Technology, 2013(10):20-23. (in Chinese)
- [2] 王嘉佳,李成梅,李斌,等. 卫星移动通信中的 OFDM 参数优化选择[C]//第九届卫星通信学术年会论文集. 北京:中国通信学会,2013:1-5.
WANG Jia-jia, LI Cheng-mei, LI Bin, et al. Mobile satellite communications OFDM parameter optimization choice [C]//Proceedings of the 9th Satellite Communications Annual Conference. Beijing: China Institute of Communications, 2013:1-5. (in Chinese)
- [3] 王文娟. LTE-Advanced 上行链路 MIMO SC-FDMA 系统的定时同步算法研究[D]. 广州:广东工业大学,2013.
WANG Wen-juan. Timing synchronization algorithm LTE-Advanced uplink MIMO SC-FDMA system[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2013. (in Chinese)
- [4] 栾西,徐晓燕,任术波,等. 多波束卫星移动通信系统的传输时延特性分析[C]//2010 年通信理论与信号处理学术年会论文集. 大连:中国通信学会,2010:135-141.
LUAN Xi, XU Xiao-yan, RENG Shu-bo, et al. Transmission delay characteristics multibeam satellite mobile communication system analysis [C]//Proceedings of 2010 Communication Theory and Signal Processing Annual Conference. Dalian: China Institute of Communications, 2010:135-141. (in Chinese)

- [5] 段荷香,杨旭,李宇阳,等. LTE 信令消息传输格式的卫星通信适用性分析[C]//第九届卫星通信学术年会论文集. 北京:中国通信学会,2013:1-7.
DUAN Hexiang, YANG Xu, LI Yuyang, et al. Applicability Analysis of satellite communications LTE signaling message transmission format [C]//Proceedings of the 9th Satellite Communications Annual Conference. Beijing: China Institute of Communications, 2013:1-7. (in Chinese)
- [6] 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(5):51-55.
CHEN Kun-shan, WANG Da-ming, XU Yao. Satellite in geostationary orbit for LTE random access communication system[J]. Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013(5):51-55. (in Chinese)
- [7] 王可. OFDM 系统同步技术的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2006.
WANG Ke. OFDM system synchronization technology [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006. (in Chinese)
- [8] Takahashi K, Saba T. A novel symbol synchronization algorithm with reduced influence of ISI for OFDM systems [C]//Proceedings of 2001 Global Telecommunications Conference. Antonio, Texas: IEEE, 2001:524-528.
- [9] 赵江锋,张会生,李立欣. 一种改进的 OFDM 定时同步算法[J]. 现代电子技术, 2011, 34(3):31-34.
ZHAO Jiang-feng, ZHANG Hui-sheng, LI Li-xin. Improve algorithm for OFDM timing synchronization [J]. Modern Electronic Technology, 2011, 34(3):31-34. (in Chinese)
- [10] 范金城,吴可法. 平稳时间序列的最近邻分类准则及其应用[J]. 工程数学学报, 1984(1):11-13.

FAN Jin-cheng, WU Ke-fa. Nearest neighbor classification criteria and application of stationary time series[J]. Journal of Engineering Mathematics, 1984(1):11-13. (in Chinese)

- [11] 赵亚红,李伟华. 正交多载波调制(OFDM)技术及其应用[J]. 电讯技术, 2001, 41(1):92-95.
ZHAO Ya-hong, LI Wei-hua. Orthogonal multi-carrier modulation(OFDM) technology and its applications[J]. Telecommunication Engineering, 2001, 41(1):92-95. (in Chinese)

作者简介:



王俊飞(1986—),男,江西南昌人,2007年于解放军理工大学获网络工程专业工学学士学位,现为解放军信息工程大学通信与信息系统专业硕士研究生,主要研究方向为卫星移动通信;

WANG Jun-fei was born in Nanchang, Jiangxi Province, in 1986. He received the B. S. degree in 2007. He is now a graduate student. His research concerns satellite mobile communication.

Email:305784932@qq.com

崔维嘉(1976—),男,山东蓬莱人,博士,讲师,主要从事移动通信、卫星移动通信等方面的研究工作;

CUI Wei-jia was born in Penglai, Shandong Province, in 1976. He is now a lecturer with the Ph. D. degree. His research concerns mobile communications, mobile satellite communications.

王大鸣(1971—),男,辽宁大连人,博士,教授,主要从事移动通信、卫星移动通信、卫星定位等方面的研究工作。

WANG Da-ming was born in Dalian, Liaoning Province, in 1971. He is now a professor with the Ph. D. degree. He is engaged in mobile communications, mobile satellite communications, satellite positioning.