

基于 MRLS 的低轨卫星移动通信随机接入前导检测系统设计

韩芳¹, 郭文明^{1,2}, 陈晓飞¹

(1. 新疆工程学院 信息工程学院, 乌鲁木齐 830023; 2. 北京邮电大学 计算机学院, 北京 100876)

摘要: 由于现有低轨卫星移动通信发送的信号在随机接入前导检测系统时存在检测延时过长、检测准确率较低的问题, 提出基于 MRLS 的随机接入前导检测系统的设计研究; 分别对前导格式器、前导序列器、前导信号持续时间计算器和随机信号发送器进行优化; 根据 MRLS 算法进行差分检测和相关性检测, 利用共轭运算计算加入子载波偏移频率参数, 完成随机接入前导检测系统; 实验结果表明: 所设计的检测系统延时时间始终不超过 0.002 m, 最低误检率为 10^{-4} %, 误检率低于对比系统, 检测效果能够更好地适应低轨卫星移动通信系统。

关键词: MRLS; 低轨卫星; 移动通信; 随机接入; 前导检测; 检测系统

Design of Random Access Preamble Detection System for LEO Satellite Mobile Communication Based on MRLS

HAN Fang¹, GUO Wenming^{1,2}, CHEN Xiaofei¹

(1. College of Information Engineering, Xinjiang Institute of Engineering, Urumqi 830023, China;

2. School of Computer Science, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: Due to the problems of long detection delay and low detection accuracy when the signal sent by the existing LEO satellite mobile communication is randomly connected to the preamble detection system, the design and research of the random access preamble detection system based on MRLS is proposed. The preamble formatter, preamble sequencer, preamble duration calculator and random signal transmitter are optimized respectively. Differential detection and correlation detection are carried out according to MRLS algorithm, and the subcarrier offset frequency parameters are calculated and added by conjugate operation to complete the random access preamble detection system. The experimental results show that the delay time of the designed detection system is always less than 0.002 m, the minimum false detection rate is 10^{-4} %, and the false detection rate is lower than that of the comparison system. The detection effect can better adapt to the LEO satellite mobile communication system.

Keywords: MRLS; low-orbit satellite; mobile communication; random access; preamble detection; detection system

0 引言

卫星移动通信是近年来通信领域发展最快的技术, 目前专业领域的研究人员不断完善低轨卫星移动通信技术的功能设置。在传统研究中, 用于卫星通信系统的随机接入技术主要包括基于时间层面的时分多址 (TDMA), 基于频率层面的频分多址 (FDMA), 基于功率层面的码分多址 (CDMA) 以及基于空间层面的空分多址 (SDMA)^[1]。前导序列是有效信号发送之前的一串信号, 前导序列的检测能够测试通信是否能够有效接收, 因此前导序列检测系统的设计至关重要。相关研究人员为了提高技术的前导检测系统的校验有效度, 设计了低轨卫星移动通信随机接入前导检测系统。现有系统的前导序列设计根据子载波间隔和多段 ZC 序列重复的特征进行循环移位, 得到检测窗口的峰

值, 但在数据传输时延时较大, 影响检测效果; 还有在前导序列上进行时隙扩展的研究, 减少了随机接入的必要流程, 实现快速检测的目的, 但是由于步骤的减少同时也降低了束波覆盖要求, 误检率不稳定, 影响前导检测^[2]。

因此, 为了解决现有系统设计的不足, 降低随机接入前导检测系统的误检率, 缩短检测延时, 本文突破传统的设计理念, 重新设计检测系统硬件区域结构和软件区域结构, 完善低轨卫星移动通信随机接入前导检测系统。最后对检测系统检测延时和误检率性能的测试和测试数据分析, 证明了基于 MRLS 的低轨卫星移动通信随机接入前导检测系统具有意义, 达到文章的设计目的。

1 基于 MRLS 的低轨卫星移动通信随机接入前导检测系统硬件设计

基于 MRLS 的低轨卫星移动通信随机接入前导检测系统

收稿日期: 2021-06-16; 修回日期: 2021-09-22。

基金项目: 教育厅教育改革项目 (PT-2021063)。

作者简介: 韩芳 (1978-), 女, 甘肃武威人, 硕士研究生, 副教授, 主要从事物联网工程、计算机网络方向的研究。

引用格式: 韩芳, 郭文明, 陈晓飞. 复杂装备健康度评估方法研究综述[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(11): 61-64, 83.

硬件主要由前导格式器、前导序列器、前导信号持续时间计算器和随机信号发送器组成，系统硬件结构如图 1 所示。

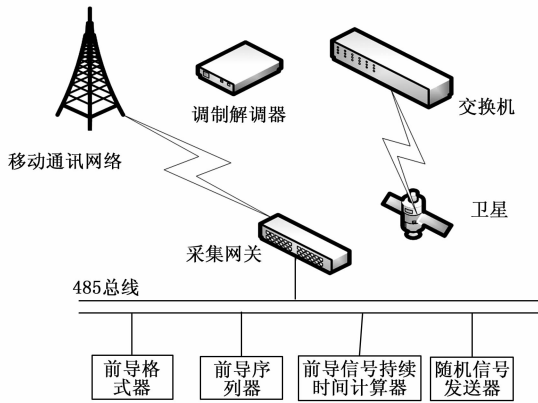


图 1 基于 MRLS 的低轨卫星移动通信随机接入前导检测系统硬件结构

1.1 前导格式器设计

检测系统硬件区域的前导格式器在 LTE 系列的前导格式器基础上进行创新，自带随机入前导列格式，根据低轨卫星移动通信的实际情况进行自动格式的变更，使系统的检测结果更加准确^[3]。主要由 3 部分组成，分别是循环前缀、前导 ZC 序列、保护间隔，器件的每个部分对于整个检测系统都具有特殊的意义^[4-5]。前导格式器结构如图 2 所示。

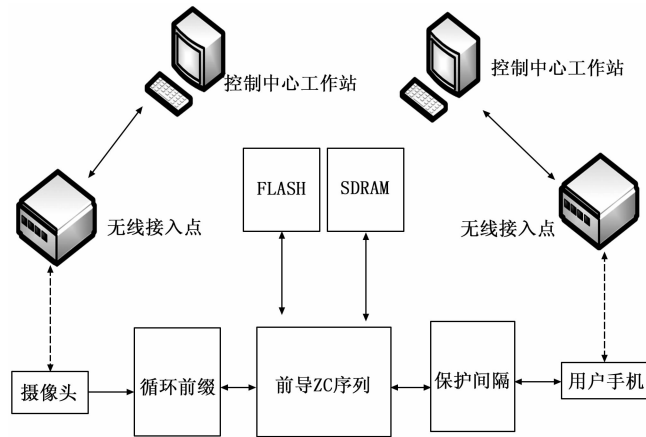


图 2 前导格式器结构

根据图 2 可知，前导格式器的 3 个组成零件不是同时工作，而是衔接工作，每个序列区域的持续工作时间根据检测系统面对的工作对象具体情况进行决定^[6-7]。对于本文设计的基于 MRLS 的低轨卫星移动通信模式和应用场景的特点，最终设定器件的子载波间隔频率始终保持 1.25 kHz，将前导格式器的 ZC 序列持续时间和保护间隔距离间隔设计为倒数的关系，循环前缀的工作持续时间设定为 0.8 倍的工作持续时间，共同组成一个新的前导格式器^[8-9]。

1.2 前导序列器设计

在新的前导格式器基础上，将器件的运行核心更新为多根长序列 MRLS，优化前导序列器的序列结构，更新的

意义在于将系统的前导序列内的物理根序号附属的序列类型进行独立限制，使每个序列具有唯一性特点，这样就保证前导序列器在工作过程中接收到的根序列峰值是唯一的，提高了检测系统校验速度，实现提高系统工作效率的目的^[10-12]。前端序列器结构如图 3 所示。

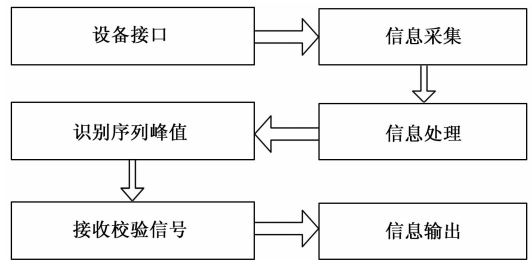


图 3 前端序列器结构

具体的器件工作序列调用顺序的确定由下述公式和计算模型完成：

$$ZC(n) = \frac{e^{-j\mu(n+1)}}{N_x} \quad (1)$$

$$x(n) = \begin{cases} ZC_1(n), & 0 \leq n \leq N_x - 1 \\ ZC_2(n - N_x), & N_x \leq n \leq 2N_x - 1 \\ ZC_k(n - (k-1)N_x), & (k-1)N_x \leq n \leq k2N_x \end{cases} \quad (2)$$

式中， μ 表示 ZC 序列的物理根序号； N_x 表示每个 ZC 序列的长度； ZC_k 表示第 k 个短 ZC 根序列， μ_k 表示所对应的根序列号。

1.3 前导信号持续时间计算器设计

低轨卫星移动通信随机接入前导检测系统的工作原理是通过识别各个器件之间的信号。为了保证系统的工作效果，根据前导格式器的结构，本文设计了新型前导信号持续时间计算器，该器件是系统硬件区域的核心器件，主要的工作是调控前导器件之间的持续工作时间，从而使系统的检测精度得到保障^[13]。前导信号持续时间计算器的计算准则是区域信号持续的时间大于等于区域内通信信号的往返时延差和信号扩展间隔的和，低轨卫星在信号通信过程中，卫星将信号通过基站转发，此时新型计算器就能够包容卫星通信的时延差、信号序列长度、通信消耗等其他变量的能耗和误差。前导信号持续时间计算器的计算精度也十分重要，差之微毫检测系统的误差率就会增大，精度衡量公式如下所示：

$$S = 1.25 * \sum_{n=1}^j \sigma T_{\max} \quad (3)$$

式中， T_{\max} 表示持续时间的规定值； σ 表示时间精度系数。

1.4 随机信号发送器设计

随机信号发送器的工作任务是在低轨卫星移动通信随机接入前导检测系统工作过程中，在出现信号发生不完全的情况下及时的将信号进行补发，本文设计发送器可以减少 DFT 点数的运算点数、降低系统的检测复杂度并保证系统随机接入的载波间隔在规定范围内波动。随机信号发送器的工作精度可以达到 0.01%FS，DC24 V/45 mV 电压的

输出模式, 根据低轨卫星移动通信的特殊性, 信号发送器的通信协议采用 MODBUS RTC 协议, 保证信号的通信质量。随机信号发送器结构如图 4 所示。

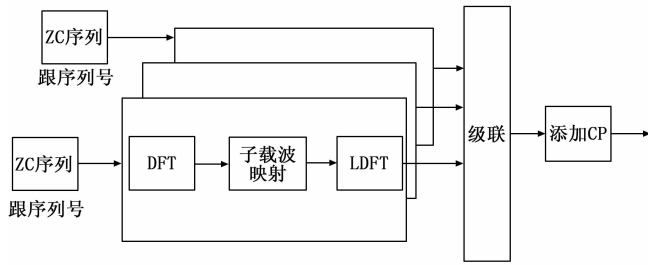


图 4 随机信号发送器结构

根据图 4 可知, 此信号发生器采用 RS232 通信无线接口, 既可以满足通信信号的校验, 又可以保证识别信号的灵敏度, 内置存储内存空间为 128 G, 64 组常用数据存储语言, 提高信号发送器的工作速度。随机信号发生器的脉冲极值为 1 000 MHz, 低电平控制为 0 V, 器件工作分辨率为 0.1 MHz^[14]。随机信号发生器的工作负载必须超过 100 kΩ, 保证电阻占空比为 50%, 因为卫星通信信号的持久性特点, 次信号发生器采用双电源工作模式, 电池的本质是锂电池供电, 不会出现突然黑屏的情况, 保证工作效率^[15]。

2 基于 MRLS 的低轨卫星移动通信随机接入前导检测系统软件设计

基于 MRLS 的低轨卫星移动通信随机接入前导检测系统软件设计, 需要根据低轨卫星移动通信波束对通信信息进行序列设定。随机接入流程如图 5 所示。

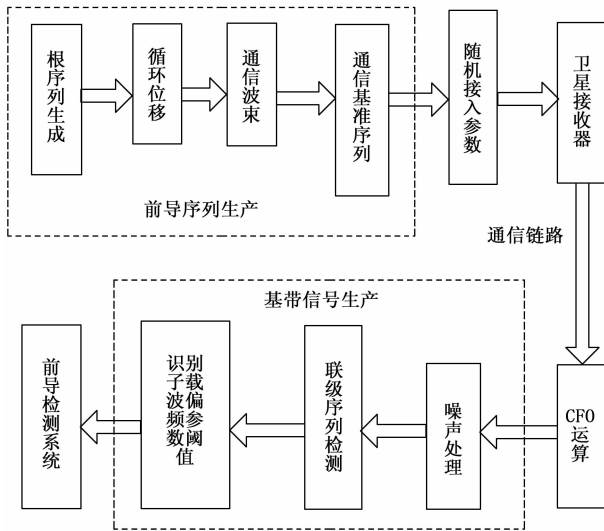


图 5 随机接入流程

基于随机接入流程, 选取一个计算机通信序列作为基准序列, 信号序列沿着通信链路发送到对应的卫星接收器中, 会受到多方面因素影响, 包括通信过程的延时问题、子载波归一化偏频问题、信号通信链路的增益问题等。因此要综合通信过程中的各项因素对信号序列进行分析:

$$r(n) = \rho x(n - \tau)\epsilon^n + w(n) \quad (4)$$

式中, $r(n)$ 为低轨卫星移动通信随机接收到的信号序列, ρ 指该信号序列的子载波偏移频率参数, $x(n)$ 表示初始的基准信号序列, τ 表示信号序列传输的延时参数, ϵ 为信号传输过程中的信道增益参数, $w(n)$ 为均值为 0 状态下的序列数值。经过综合参数运算得到关于传输路径中的信号序列特性分析, 一般情况下还要考虑高斯白噪声的处理问题。

基于 MRLS 的低轨卫星移动通信随机接入前导检测系统对信号通信的检测受信号子载波影响较大, 因此在设计前导检测系统程序时要在前导序列检测算法中加入子载波偏移频率 CFO 的运算步骤。在对信号进行综合参数分析后, 得到根序列 ZC, 根据 MRLS 算法, 对根序列进行共轭相乘运算, 即选取选定根序列相邻的序列依次进行差分检测和相关性检测, 检测基本公式为:

$$C(n) = \sum_{k=1}^{K-1} \sum_{m=0}^{N_n-1} [ZC_k[n]ZC_{k+1}(n)] \quad (5)$$

式中, $C(n)$ 表示根序列运算得到的共轭序列。对根序列 ZC 和其相邻序列进行联列检测, 前提是待检测的前导序列的序列信道延时和增益参数是相同的, 才可以同时进行联级序列检测。由于这一运算过程是针对根序列及相邻序列进行运算的, 得到的是某一段序列的共轭序列, 因此要将所有运算序列样本分别进行共轭相乘, 再将分段的共轭运算结果进行整合, 同时加入子载波偏移频率参数进行运算:

$$C_p(n) = C(n) \times \left[\sum_{n=0}^{N_n-1} |ZC_k(n)|^2 |ZC_{k+1}(n)|^2 \right] \times \rho^2 \quad (6)$$

根据上式可以看出, 整合的前导序列 $C_p(n)$ 是对分段的前导序列共轭相乘检测结果进行序列级联运算, 再加入了子载波偏频参数 ρ 的处理, 此时的偏频参数为该时刻的信号序列通信偏移频率 ZR。经过分段序列差分检验和联合序列运算能够得到该时段低轨卫星随机通信前导序列为:

$$Tz^n = C_p(n)(\rho - ZR)kl \quad (7)$$

式中, kl 为识别偏频参数阈值, 当该时刻基准信号序列 cl 低于该时刻的信号序列通信时, 加入子载波偏移频率参数进行多方面数据归一化处理结果为:

$$K^v = \frac{kl(nt) - cl(kl - ZR)}{\rho Tz^n} \quad (8)$$

式中, nt 为子载波传输延时参数, 增益参数与其相邻序列进行联列检测后, 计算得到的子载波偏移情况和信噪比检测结果:

$$W^n = (nt - kl)\rho \quad (9)$$

$$V^n = K^v \frac{(nt - kl)}{Tz^n} \quad (10)$$

基于 MRLS 的低轨卫星移动通信随机接入前导检测系统软件设计实现流程图如图 6 所示。

3 实验结果与分析

3.1 实验参数及指标设置

为了验证所设计的基于 MRLS 的低轨卫星移动通信随机接入前导检测系统软件的应用效果, 进行实验研究, 主

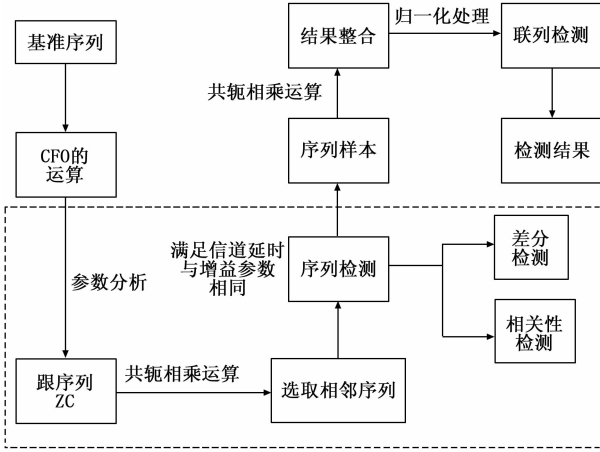


图 6 软件设计实现流程图

要针对前导检测系统对发送信号有效性的检测误检率和延时时长两个方面进行重点研究。误检率是随机接入前导检测的一个检测水平衡量指标，与子载波偏频有直接关系，偏频数值越大，误检率就越高；检测延时时长主要是指信号序列通信过程中产生的延时情况，延时越短越能够及时的与信号通讯相匹配。设定实验参数如表 1 所示。

表 1 实验参数

参数	取值
信噪比	-20dB~0
前导序列格式	级联序列
根序列数	≥2 个
跟序列值	129,710,140,699
最大多普勒频移扩展/kHz	50 kHz
CP 长度	420
GT 长度	420
DFT 点数	8 234
信道模型	莱斯信道
归一化频偏	0.2/0.5/1.2/1.5
初始根序列 ZC 长度	6 500
通信延时参数	500 μs/800 μs
子载波间隔	1.25 kHz

基于上述实验参数的设定，对传统系统与本文系统进行系统检测的延时时长和系统误检率的对比分析。运用两种系统进行低轨卫星移动通信随机接入前导检测，得到检测误检率与通信延时实验结果。误检率及通信延时检测指标如下。

误检率：

$$N = \frac{C_p(n)}{C_p(n) + T_z^n} \times 100\% \quad (11)$$

通信延时检测：

$$T = \frac{\tau - (nt - kl)\rho}{ZR} \times 100\% \quad (12)$$

3.2 实验步骤和方法

3.2.1 误检率对比

一般情况下，检测的误检率会随着归一化子载波偏频

的增大而增大，而级联序列是将序列分成多个序列段分别进行运算，提高了对归一化子载波偏频的对抗能力，减小了偏频问题对前导检测的影响程度，因此提高了检测结果的精准度，降低了误检率。此外，级联序列的误检率能够随着信噪比的增加而减小，说明这种系统具有很强的抗噪能力，极大地降低了高斯白噪声对随机接入前导检测造成的影响，进一步保证了前导检测的准确性、真实性。

经过共轭运算的级联序列进行随机接入前导检测，运用两种系统对低轨卫星随机接入前导检测的发送信号的有效性进行分析，得到误检率的实验结果如图 7 所示。

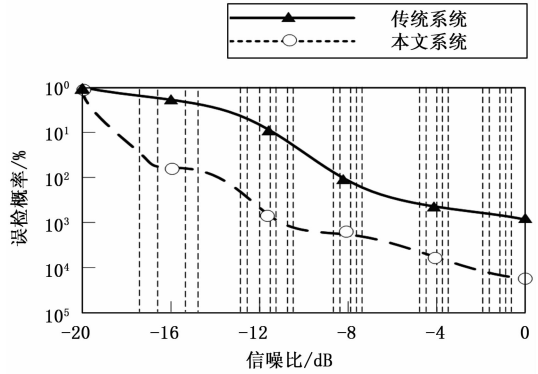


图 7 误检率实验结果

根据图 7 的结果表明，两种检测系统的误检率都随着信噪比的增加而减少，但是本文系统减少的幅度更大；传统系统最低误检率为 $10^{-3}\%$ ，本文系统的最低误检率为 $10^{-4}\%$ ，本文系统的误检率与另一系统的检测结果相比较低，说明本文系统在对发送信号进行检测时，具有较强的抗噪能力，误检率小，准确率高，检测结果更加准确，不易受到卫星运行和通信信道的环境的影响，避免了通信过程中受环境因素的干扰，提高了通信过程对发送信号检测的精准度。

3.2.2 通信延时检测对比

选取通信延时参数 $500 \mu s/800 \mu s$ 作为通信延时检测对比的对应值，在信号序列通信过程中产生的延时情况关系着随机接入前导检测系统的发送信号能否及时匹配，延时长会影响系统信号匹配的效果，降低对发送信号是否有效的准确性。

运用两种系统对低轨卫星随机接入前导检测的通信延时时长进行分析，得到的实验结果如图 8 所示。

根据图 8 的结果表明，现有检测系统延时时间一般在 $0.004 m$ 上下波动，而本文研究的检测系统在检测时的延时时间始终不超过 $0.002 m$ ，与现有检测系统相比，检测延时的时间较低，加快了信号通讯匹配时间，提高了对发送信号是否有效的判断时间。

综上所述，本文研究的基于 MRLS 的低轨卫星移动通信随机接入前导检测系统和软件应用的算法相较于传统检测系统具有准确率高、延时时短的性能，在对低轨卫星的

(下转第 83 页)