

# 用于无线卫星通信网络系统的抑噪分频 频率综合器设计

黄宇, 陈建国, 严南

(成都理工大学 工程技术学院, 成都 614000)

**摘要:** 为改善传统综合器在噪声影响下分频效果差的问题, 设计了用于无线卫星通信网络系统的抑噪分频频率综合器; 根据抑噪分频频率综合器总体架构, 设计压控振荡器, 并选用 MAOC-114850 芯片作为压控振荡器核心芯片, 依据 LC 压控振荡器原理电路, 将压控可变电抗元件插入输入频率原件中, 控制输入控制电压和振动频率, 通过改变电容器的充电速率, 使产生的电流源在电压控制之内; 选用 MB506 直插/DIP8 超高频预分频器芯片作为预分频器的核心芯片, 经过多次 4 分频操作定制数字电路; 根据环路滤波器的片上集成设计要求, 采用三阶无源环路滤波器, 改善电阻与电容间的相位裕度, 抑噪制声; 增加控制模块, 限定压控振荡器的最小振荡频率范围, 根据晶振参考频率确定跳频间隔, 并将结果保存到分频频率综合器中, 由此完成抑噪分频频率综合器设计; 实验结果表明, 该综合器最高分频效率可达到 98%, 为无线卫星通信网络系统稳定运行提供保障。

**关键词:** 无线卫星; 通信网络; 抑噪分频; 频率综合器

## Noise Suppression Frequency Synthesizer Design for Wireless Satellite Communication Network System

Huang Yu, Chen Jianguo, Yan Nan

(Engineering & Technical College, Chengdu University of Technology, Chengdu 614000, China)

**Abstract:** In order to improve the problem of poor frequency division of traditional synthesizer under the influence of noise, a noise suppression frequency synthesizer for wireless satellite communication network system is designed. According to the overall architecture of the noise suppression frequency synthesizer, the voltage controlled oscillator is designed, and the MAOC-114850 chip is selected as the core of the voltage controlled oscillator. According to the LC voltage controlled oscillator principle circuit, the voltage controlled variable reactance component is inserted into the input. In the frequency original, the input control voltage and the vibration frequency are controlled, and the generated current source is within the voltage control by changing the charging rate of the capacitor. The MB506 in-line/DIP8 UHF prescaler chip is selected as the core chip of the prescaler, and the digital circuit is customized after many times of frequency division. According to the on-chip integrated design requirements of the loop filter, a third-order passive loop filter is used to improve the phase margin between the resistor and the capacitor, and to suppress noise. The control module is added to define the minimum oscillation frequency range of the voltage controlled oscillator, the frequency hopping interval is determined according to the crystal reference frequency, and the result is saved to the frequency division frequency synthesizer, thereby completing the noise suppression frequency division synthesizer design. The experimental results show that the maximum frequency division efficiency of the synthesizer can reach 98%, which provides guarantee for the stable operation of the wireless satellite communication network system.

**Keywords:** wireless satellite; communication network; noise suppression and frequency division; frequency synthesizer

### 0 引言

无线卫星通信网络快速发展, 越来越多设备进入到人们日常生活之中, 在该背景下, 为了追求更高频谱使用效率, 增加可携带性, 多模通信芯片集成了人们研究的重点。频率综合器是无线卫星通信网络系统中重要组成部分, 可为无线卫星通信网络系统提供稳定频率输出, 其性能直接

影响通信设备整体性能。由于市场对无线卫星通信网络系统要求较高, 就需调整整个协调器使用工艺成本, 采用传统协调器中的频率综合器需要有较高相位噪声性能, 才能满足人们对高效率无线通信的要求<sup>[1]</sup>。然而, 传统系协调器不具备高品质协调设备, 无法抑制噪声<sup>[2]</sup>。当前应用于移动数字多媒体广播标准频率综合器则需要依据不同调制方式调整振动信号, 并在保证相位噪声足够低的情况下, 接收恶化信号, 因此, 低相位抑噪分频频率综合器设计成为研究热点<sup>[3]</sup>。

用于无线卫星通信网络系统的抑噪分频频率综合器设计中给出具体思路, 针对传统频率综合器缺点提出改进方法, 并依据综合器特点分析其在无线卫星通信网络系统中

收稿日期: 2019-10-24; 修回日期: 2019-11-20。

基金项目: 四川省教育厅科研项目(17ZB0066); 成都理工大学工程技术学院院级基金项目(c122016001)。

作者简介: 黄宇(1975-), 男, 四川夹江人, 硕士, 讲师, 主要从事嵌入式系统及电路设计方向的研究。

的应用。

## 1 无线卫星通信网络系统

无线卫星是指利用人造卫星作为中转站，在两个或多个中转站间进行通信。依据卫星运行轨迹，可将同步卫星与非同步卫星通过地球站、中转站以及卫星上下行链路，获取传输信号，由于非同步卫星信号覆盖范围是受到限制的，因此，无线通信卫星之间需依靠星际链路连接，以此扩大通信范围。无线卫星通信网络系统如图 1 所示。

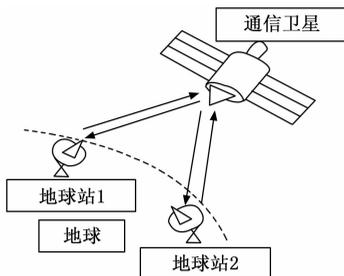


图 1 无线卫星通信网络系统

## 2 抑噪分频频率综合器架构及关键模块电路设计

分频频率综合器是无线卫星通信网络系统重要组成部分，是实现整个网络系统小型化的重要环节，同时具有良好相位噪声性能指标。锁相环路的基本组成是经过鉴相器相位比较后，添加环路滤波器，输出分频频率增和它的期望值<sup>[4]</sup>。由于锁相环电路简单，具有窄带滤波特性，因此，采用多层板进行处理，可以更高效率利用有效空间，实现较高相位噪声，避免不必要干扰影响指标。兼容多种协议多模无线、方便携带的无线卫星通信网络系统成为市场主流，根据通信协议要求，给出所需设计频率综合器各项指标和结构<sup>[5]</sup>。

设计的抑噪分频频率综合器是应用在高度集成的无线卫星通信网络系统协调器芯片之中的，因此，整个抑噪分频频率综合器架构如图 2 所示。

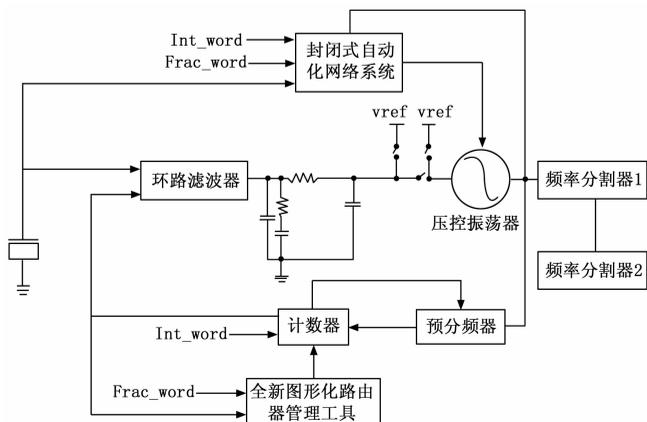


图 2 抑噪分频频率综合器架构

整个架构包括锁相和自动频率校准两个部分，其中锁相环路包括频率分割器、计数器、预定标器和管理工具。

压控振荡器工作在输出频率频段上，通过频率分割器产生正交信号<sup>[6]</sup>。具体表现为：频率分割器的输出信号经过二分频提供给结构不同等频段，经过四分频后，扩展频率分割器。充分考虑可能会存在的振动频率范围偏差，综合分析噪声整形效果以及结构复杂程度，相应环路滤波器也是三阶的<sup>[7]</sup>。

### 2.1 压控振荡器

压控振荡器负责电压输入元件参数输入时，在工作状态下对输出频率与输入电压函数产生对应关系的振荡电路 (VCO)，进行频率振荡的有效控制，压控振荡器对电压输出频率与输入电压起到了良好的稳定作用<sup>[8]</sup>。课题研究选用 MAOC-114850 型号压控振荡器，主要负责为高容量数字无线电应用提供点到某个点或多个点的无线电，无需任何外部组件匹配。压控振荡器在输出过程中，具有噪声低、输出量少的特点，MAOC-114850 型号振荡器采用 5 mm 符合 RoHS 标准的无铅封装，该封装具有低引脚电感，封装内兼容 260℃ 回流温度具有良好的热路径，被广泛地应用到无线电通信结构当中<sup>[9]</sup>。LC 压控振荡器原理电路如图 3 所示。

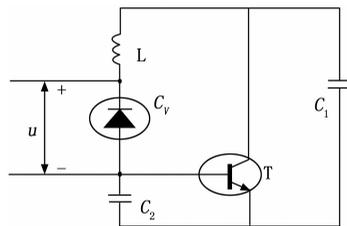


图 3 LC 压控振荡器原理电路

LC 压控振荡器电路形成原理是将压控可变电抗元件插入输入频率原件中，振荡回路图中 T 是晶体管，具有谐振频率的作用；L 是回路电感与变容二极管 C 连接而成谐振电路； $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_v$  为回路电容， $C_v$  为变容二极管反向偏置时呈现出的容量； $C_1$ 、 $C_2$  通常比  $C_v$  大得多。当输入控制电压  $u$  改变时， $C_v$  随之变化，振荡频率发生改变<sup>[10]</sup>。

压控振荡器通过控制输入电压来稳定振荡频率，在实际应用中十分广泛，可以应用在讯号产生器、频率合成器和锁相回路等。高频压控振荡器通过压控振荡器的输入产生不同的调制信号，电压控制频率部分在可变电容 C 和电感 L、电感形成谐振电路<sup>[11]</sup>。如果提高反向偏置造成变容二极管电容变小，并改变两导体表面的长度距离，形成 LC 电路的谐振频率，不利于电压控制；相反，当反向偏置电压降低时，二极管的电容变大，谐振频率降低。低频压控振荡器的频率可以通过改变电容器的充电速率，使产生的电流源在电压控制范围之内。

### 2.2 预分频器

使用洛捷 MB506 直插/DIP8 超高频预分频器芯片作为预分频器的核心芯片，8-bit 控制计数器的分频比覆盖范围较大，而无线卫星通信网络系统在实际应用过程中，对频率综合器整个分频效果要求较高，预分频器满足了结构通信要

求。高速同步数字电路在工作时最高频率为 1.6 GHz, 而相同频率下, 电路经过多次 4 分频操作, 降低了频率综合器的频率效果, 为减小功耗和面积, 需定制数字电路<sup>[12]</sup>。

在高速应用中为减少功耗, 预分频器使用了电流模式逻辑结构的方式, 采用非逻辑的电阻负载 D 触发器, 有效减小了电容, 使该频率提高响应速度。为控制输出摆幅大小, 采用有尾电流源非逻辑设计结构, 加快了整个 4/5 预分频器速度<sup>[13]</sup>。由于预分频器存在固有的自谐振频率, 因此在设计时需将预分频器自谐振频率设定在 500 MHz 左右, 促进该频率综合器快速输出摆幅驱动的频率。频率综合器设计不仅降低了功耗, 还对综合器频率起到了稳定作用。

### 2.3 环路滤波器

在无线卫星通信网络系统应用中, 由于需要全集成的分频频率综合器, 根据环路滤波器的片上集成设计要求, 采用三阶无源环路滤波器如图 4 所示。

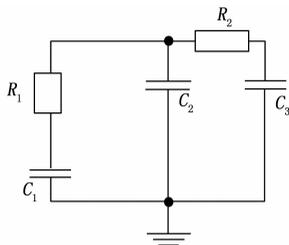


图 4 三阶环路滤波器

图 4 中,  $C_1$  是环路滤波器的第一个极点,  $R_1$  与  $C_1$  起到共同改善相位裕度的作用;  $C_2$  是环路滤波器的第二个极点; 抑制整数和分数的杂散分布;  $C_3$  是环路滤波器的第三个极点, 由于无线卫星通信网络系统运行过程中所产生的高通相位噪声, 造成整个分频综合器所输出噪声程度达到极点, 因此结构在设计时应先针对环路滤波器的噪声问题, 尽可能地增加  $R_1$  的值, 这样可以有效地减小  $C_1$  的值, 进而抑噪制声, 提高整个频率综合器性能。

## 3 抑噪分频频率综合器性能设计

抑噪分频频率综合器的主要性能就是消除抑制噪声, 在设计过程中对于频率综合器的抑制相位噪声和其他杂散音波要求比较高, 需要能快速抑制噪声, 而对于频率切换时间以及体积等指标要求较少, 因此在设计时抑噪分频频率综合器的就是满足相噪、杂散和频率步进的作用。

频率综合器输出功能主要有两种: 一种为整数分频频率综合器, 通过参考时钟频率, 最后输出的频率是时钟频率的整数倍, 被广泛地应用到 M 收音机、TV 接收机等类似设备中; 另一种为分数分频频率综合器, 在输出频率中是参考频率的  $N \cdot f$  倍, 其中  $N$  是整数部分,  $f$  是分数部分, 分数分频频率综合器与整数分频相反, 需要参考时钟信号的频率。

分频实现方式波形示意图如图 5 所示。

分频频综在功能设计上, 采用控制模块控制分频器的分频比, 采用多种类的分频比得到优异的分频效果。频率

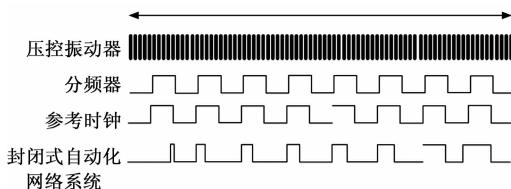


图 5 分频实现方式波形示意图

综合器的频率范围由相同的通信协议确定, 但在实际设计过程中存在工序误差, 因此得出的频率调谐范围大于通信协议中的范围, 且定压控振荡器的最小振荡频率也由实际频率调谐范围确定。对于不同架构的接收发射机, 它们的频率范围也不相同, 例如零中频接收机的工作频带范围符合协议规定, 而超外差接收机需要根据工作频率作出相应调整, 以实现频率调谐<sup>[14]</sup>。

根据通信协议中的信道间隔及晶振参考频率确定整数分频频率综合器的跳频间隔, 根据数字 Sigma-Delta 调制器的位数以及晶振频率来确定小数分频频率综合器的调频间隔。通信协议还规范了频率的精度, 且允许中频率综合器, 例如发射机的频率精度出现存在较小的误差<sup>[15]</sup>。在 PLL 锁定时间的确定中, 跳频的通信标准通过数据传输给频率综合器, 锁定时间的确定以跳频的开始为确定时间, 跳频结束则按照输出频率进入频率精度所要求范围。

整数分频锁相环的锁定过程需要满足分频时钟和输入参考时钟的频率相等、相位对齐等。分数分频锁相环在环路锁定之后, 输出时钟和参考时钟的频率固定不变。分频器时钟在分频比受到调制器控制下, 促使分频器时钟不停改变, 造成其边沿难以与分频器时钟边沿保持一致。因此环路锁定之后, 分频器时钟边沿在参考时钟边沿附近不停摆动, 使分频器时钟边沿平均值与参考时钟边沿对齐。因此, 分数分频在锁定过程与整数分频锁定过程不同, 是一种频率相等、相位对齐动态锁定方式。依据该方式, 实现分频频率综合器抑噪效果设计。

## 4 测试结果

用 ADI 公司提供的 SIMPLL3.0 软件测试用于无线卫星通信网络系统的抑噪分频频率综合器, 通过分析相位噪声, 可研究综合器分频效果。

### 4.1 频率综合器技术规格

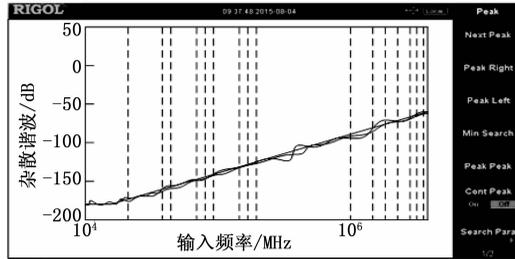
频率综合器技术规格如表 1 所示。

表 1 频率综合器技术规格

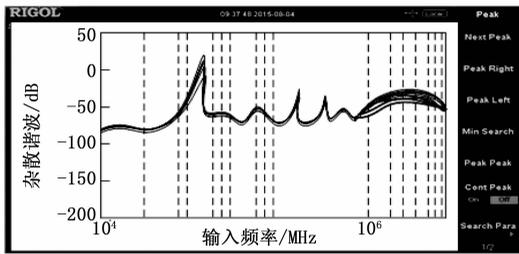
频率范围	5~11 GHz
频率步进	250 kHz
相位噪声	1 kHz
谐波抑制	小于 25 dBc
输入频率	150 MHz
切换时间	25 ms
输出功率	15 dBm
杂散谐波	小于 50 dBc

### 4.2 杂散谐波调制

杂散谐波是分频频率综合器主要问题，对于分频频率综合器的分频频综，其杂散谐波成因主要有两个，分别是综合器非线性和寄生耦合。虽然综合器具有随机和噪声整形作用，但其输出量化噪声谐波基本没有明显分频毛刺，如图 6 (a) 所示；然而其平方项却有可能存在丰富分频毛刺，如图 6 (b) 所示。



(a) 正常状态下



(b) 平方项下

图 6 非线性引起的杂散谐波

分频频率综合器稳定性需从非线性引起的杂散谐波方面进行考虑，正常状态下所有极点都在一定范围内，平方项下稳定性是指综合器中累加器不能饱和溢出。

### 4.3 相位噪声

调制杂散谐波后设置相位噪声，分别对 2 GHz 和 2.5 GHz 锁相环相位噪声进行分析，如表 2 和表 3 所示。

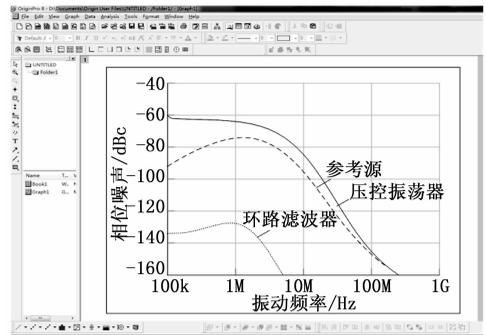
表 2 2 GHz 锁相环相位噪声

偏移频率	总噪声输出	压控振荡器	参考源	环路滤波器
120 MHz	-95.65	-185.1	-98.92	-155.0
1.00 kHz	-105.5	-165.1	-115.8	-155.2
10.0 kHz	-115.5	-145.1	-125.5	-145.8
120 kHz	-105.5	-125.5	-143.5	-120.5
1.05 MHz	-125.0	-125.0	-105.5	-115.2

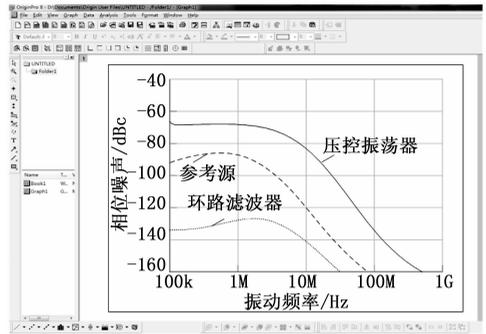
表 3 2.5 GHz 锁相环相位噪声

偏移频率	总噪声输出	压控振荡器	参考源	环路滤波器
115 MHz	-105.5	-185	-98.88	-158
1.20 kHz	-95	-166	-116	-160
9.0 kHz	-105.5	-145	-128	-165
110 kHz	-103	-126	-149	-134
1.00 MHz	-125	-125	-110	-156

7 所示。



(a) 2 GHz



(b) 2.5 GHz

图 7 2 GHz 和 2.5 GHz 锁相环相位噪声基底

由图 7 (a) 可知：当振动频率为 1 M 时，环路滤波器的相位噪声为 -133 dBc；参考源的相位噪声为 -75 dBc；压控振荡器的相位噪声为 -69 dBc。当振动频率为 100 M 时，环路滤波器的相位噪声为 0；参考源的相位噪声与压控振荡器的相位噪声一致，都为 -155 dBc。由图 7 (b) 可知：当振动频率为 100 k 时，环路滤波器的相位噪声为 -135 dBc；参考源的相位噪声为 -91 dBc；压控振荡器的相位噪声为 -67 dBc。当振动频率为 10 M 时，环路滤波器的相位噪声为 -140.5；参考源的相位噪声为 -120 dBc；压控振荡器的相位噪声为 -83 dBc。

综上所述：随着振动频率增加，环路滤波器的相位噪声会消失，而参考源与压控振荡器相位噪声随着振动频率增加而逐渐下降。为了对比两种综合器在不同相位噪声下的分频效果，需选择 100 K 和 10 M 下的压控振荡器相位噪声下进行对比分析。

2 GHz 和 2.5 GHz 下压控振荡器相位噪声最高点是在振动频率为 100 K 时，最高相位噪声依次为 -60 dBc、-67 dBc；最低点是在振动频率为 10 M 时，相位噪声依次为 -85 dBc、-83 dBc。以该数据为基础，将两种综合器的分频效果进行对比分析，结果如表 4、表 5 所示。

由表 4、5 可知，在不同振动频率下抑噪分频频率综合器分频效果较好，始终维持在 90% 以上，而传统综合器分频效果较差，始终低于 50%，由此可知，用于无线卫星通

针对 2 GHz 和 2.5 GHz 锁相环相位噪声基底研究如图

信网络系统的抑噪分频频率综合器具有良好分频效果。

表 4 2 GHz 振动频率下两种综合器的分频效果

实验次数/次	传统综合器		抑噪分频频率综合器	
	-60 dBc	-85 dBc	-60 dBc	-85 dBc
1	0.29	0.42	0.91	0.95
2	0.47	0.45	0.92	0.98
3	0.38	0.39	0.92	0.95
4	0.28	0.41	0.93	0.96
5	0.35	0.38	0.94	0.97

表 5 2.5 GHz 振动频率下两种综合器的分频效果

实验次数/次	传统综合器		抑噪分频频率综合器	
	-67 dBc	-83 dBc	-67 dBc	-83 dBc
1	0.41	0.34	0.92	0.98
2	0.45	0.35	0.93	0.95
3	0.39	0.26	0.91	0.94
4	0.38	0.28	0.94	0.94
5	0.35	0.29	0.95	0.93

### 5 结束语

对应用于无线卫星通信网络系统的抑噪分频频率综合器进行研究与设计, 从结构、功能两方面对频率综合器设计, 实现从通信协议到电路性能指标转换, 确定频率综合器各项性能指标。对比和总结已有分频频率综合器, 由对比结果可知, 该综合器抑噪效果好, 能够通过环路扩展输出频率范围。从稳定性角度出发, 分析环路中掺杂原因, 使相位噪声满足结构设计性能设计要求。

随着无线卫星通信网络系统不断优化, 需对设计的抑噪分频频率综合器展开深入研究。可以从以下几个方面改进结构:

- 1) 采用片外滤波器, 增加设计自由度;
- 2) 分数杂散抑制, 提高整个结构线性度;
- 3) 保证各级之间驱动电路和输出消耗电流一致, 保证结构具有低功耗优势。

(上接第 260 页)

### 参考文献:

[1] 解立新. 成人经鼻高流量湿化氧疗临床规范应用专家共识 [J]. 中华结核和呼吸杂志, 2019, 42 (2): 83-91.

[2] 梁锡铭, 陈雪丽, 王 丹. AIRO2 型呼吸湿化治疗仪慢性阻塞性肺疾病合并 II 型呼吸衰竭的临床效果研究 [M]. 中国医学装备, 2017, 14 (11): 81-84.

[3] 黄庭龙. 经鼻高流量湿化氧疗在成人重症监护病房病人中的应用 [D]. 福建: 福建医科大学, 2016.

[4] 左晓菲. 热分析炉温度控制算法设计与实现 [D]. 杭州: 中国计量学院, 2015.

[5] 周黎英, 赵树国. 模糊 PID 控制算法在恒速升温系统中的应用 [J]. 仪器仪表学报, 2008, 29 (2): 406-409.

### 参考文献:

[1] 韩 宾, 谷 江, 丁理想. 卫星通信结构 CMOS 分数分频频率综合器设计 [J]. 半导体技术, 2019, 44 (2): 26-30.

[2] 田荣倩, 李浩明, 刘家瑞, 等. 一种低相位噪声的 UHF 频段小数分频频率综合器 [J]. 半导体技术, 2018, 18 (1): 24-30.

[3] 冯向明, 曲 明, 刘林海. 基于级联结构的低抖动小数分频频率综合器研究 [J]. 微电子学与计算机, 2019, 36 (1): 90-94.

[4] 李建伟. 适用于超宽带结构的低功耗 CMOS 频率合成器研究 [J]. 电子器件, 2017, 40 (6): 1348-1353.

[5] 赵庆生, 谢运华, 郭贺宏. 过零检测和曲线拟合的电力结构频率算法 [J]. 电力结构及其自动化学报, 2017, 29 (2): 21-26.

[6] 章坚武, 屠贺嘉琦. 异步卫星协同通信结构中的双采样差分空时编码方案 [J]. 电信科学, 2017, 33 (11): 9-16.

[7] 李 怡, 庞友嘉, 易克初, 等. 大容量宽带卫星通信结构的下行高效传输方法 [J]. 西安交通大学学报, 2017, 51 (3): 98-104.

[8] 刘庆利, 姚俊飞, 刘治国. 基于多业务的卫星光网络波长路由算法研究 [J]. 结构仿真学报, 2017, 29 (8): 1780-1787.

[9] 张 波. 一种用于卫星通信的自适应编码调制信号接收方法 [J]. 电讯技术, 2017, 57 (3): 296-299.

[10] 曹 舟. Ka 频段双模航空客舱宽带卫星通信结构总体设计 [J]. 电讯技术, 2017, 57 (12): 1376-1382.

[11] 周桂莉, 李有明, 余明宸, 等. 水声通信结构中基于迭代自适应的脉冲噪声抑制方法 [J]. 电信科学, 2017, 33 (11): 66-72.

[12] 薛 晶, 张 蕊, 于广亮, 等. 基于稀疏贝叶斯学习算法的电力线通信脉冲噪声抑制方法 [J]. 电网与清洁能源, 2017, 33 (4): 87-91.

[13] 鲁伟鑫, 袁 灿, 张宇阳, 等. 混合卫星-地面无线网络中的波束形成算法 [J]. 信号处理, 2017, 33 (1): 36-42.

[14] 常浏凯, 张 衡, 刘 硕. 基于 5 GHz 无线局域网的车地无线通信系统测试与分析 [J]. 城市轨道交通研究, 2017, 20 (11): 50-54.

[15] 李永亮, 李许安, 全 杰. 面向全球能源互联网的天空地协同卫星通信网络架构 [J]. 电信科学, 2018, 34 (12): 53-64.

[6] 样世铭. 传热学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2016.

[7] 金 雾. 气液传质过程中界面对流的实验研究 [D]. 天津: 天津大学, 2015.

[8] 高学伟. SCR 脱硝系统 PCA-HPSO-SVR 大数据建模研究 [J]. 自动化仪表, 2017, 38 (7): 16-19.

[9] 唐胜年, 李会琼. 应用回归分析 [M]. 北京: 科学出版社, 2014.

[10] 梁 鲜. 基于 BIM 的桥梁工程建模及数据分析 [J]. 桥路工程管理, 2019, 16 (317): 155-156.

[11] 汪天飞. 数学建模与数学实验 [M]. 北京: 科学出版社, 2013.

[12] 常 盛, 朱亚玲. 基于 spss 的多元线性回归算法建模的实例研究 [J]. 数据技术与应用, 2011 (10): 120.