

DOI:10.3969/j.issn.1674-7135.2023.01.012

高速星间收发通信机 OFDM 调制解调研究

王彦革,武加纯,张瀚青,张康雷,殷鹏程

(上海航天电子技术研究所,上海 201109)

摘要:目前,国内外针对卫星组网的研究主要集中在卫星之间的星间链路研究方向。为实现卫星组网通信系统中大数据量的信息交互,首次提出了一种利用正交频分复用(orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)技术的高速星间收发通信机的设计方案。相比传统单载波技术,OFDM技术凭借其较高的频谱利用率、良好的抗多径干扰能力以及能够灵活分配资源等特有的优势,可用于实现星间通信的高码速率传输。首先设计了星间收发通信机的总体架构,基于星间通信系统的特点以及16QAM调制解调方式的优点进行了相关的参数设计,然后根据设计参数,采用Verilog HDL硬件描述语言基于ISE开发平台和Modelsim软件完成了16QAM数字调制解调功能和时序的仿真,验证了设计的可行性。首次将OFDM技术应用到星间收发通信机,为其硬件实现奠定了基础,具有一定的参考价值。

关键词:OFDM;高速;收发通信机;调制解调

中图分类号:V443

文献标志码:A

文章编号:1674-7135(2023)01-0070-06

Research on OFDM modulation and demodulation of high speed inter satellite transceiver

WANG Yange, WU Jiachun, ZHANG Hanqing, ZHANG Kanglei, YIN Pengcheng

(Shanghai Aerospace Electronic Technology Institute, Shanghai 201109, China)

Abstract: At present, the studies of satellite networking mainly focus on the Inter-Satellite Link at home and abroad. In order to realize the massive data interaction in the inter-satellite networking communication system, a design scheme of high-speed inter-satellite transceiver using orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) technology is proposed for the first time in this paper. Compared with traditional single carrier technology, OFDM technology can be used to realize high bit rate transmission of inter-satellite communication due to its unique advantages such as higher frequency spectrum utilization, better anti-multipath interference ability and flexible resources allocation. In this paper, the overall architecture of the inter-satellite transceiver is designed firstly, and relevant parameters are designed based on the characteristics of inter-satellite communication system and the advantages of 16QAM modulation and demodulation mode. Then, according to the design parameters, the simulation of the 16QAM digital modulation and demodulation function and timing is completed by using Verilog HDL hardware description language based on ISE development platform and Modelsim software, which verifies the feasibility of the design. In this paper, OFDM technology is applied to inter satellite transceiver for the first time, which lays the foundation for its hardware implementation and has certain reference value.

Key words: OFDM; high-speed; transceiver; modulation and demodulation

收稿日期:2022-04-15; 修回日期:2022-05-29

基金项目:上海航天电子技术研究所自主研发项目基金(编号:DZS-ZY-2018-19)

引用格式:王彦革,武加纯,张瀚青,等. 高速星间收发通信机 OFDM 调制解调研究[J]. 空间电子技术,2023,20(1):70-75.

WANG Y G, WU J C, ZHANG H Q, et al. Research on OFDM modulation and demodulation of high speed inter satellite transceiver[J]. Space Electronic Technology, 2023,20(1):70-75.

0 引言

随着小卫星技术的快速发展,小卫星成本低、发射部署快的优势愈加明显,且多颗小卫星以组网或编队方式形成的星座不仅能完成单个大型空间飞行器的功能,而且可大幅降低成本和风险^[1]。合理的卫星组网设计方案不仅能够达到各方面的综合平衡,实现系统整体性能的最优配置,也能够在系统的长期稳定运行、协同工作等方面发挥作用^[2]。

星间通信是指星座中的卫星与卫星间进行的通信,用于实现星间的信息传输与交换^[3]。卫星通过星间链路相互联系、相互监视、有机地联合在一起,协同完成载荷任务、运行管理和故障检测及处理。星间链路不依赖于地面通信网的支持,可以避免信息传递回地面、减小二次业务的分配,不仅降低了星间通信系统的通信延时和资源开销,还可以提高整个卫星组网通信系统在战时的抗毁性和机动性^[4]。因此,如何在有限的数传时间内,完成大数据量的信息交互,成为星间通信系统亟待解决的问题。

OFDM 技术作为地面 4G 系统的核心技术,仍为 5G 系统的基本传输体制^[5],在地面系统已得到较为广泛的应用。针对星间通信系统,该技术相比于串行的单载波体制,能够将频带利用率提高将近一倍,从而更加充分地利用频带资源,实现高码速率传输;对于衰落或窄带干扰,可能会导致单载波通信系统瘫痪,而 OFDM 系统只影响几个子信道,可采用针对受干扰的子信道降低数据传输速率等方法来保证星间通信系统的通信质量;另外,相比于串行的单载波体制,OFDM 信号可以被分为多个正交的子带,且每个子带可以携带相同或不同的信

号,可以实现资源的动态分配。在工程实现方面,OFDM 调制可以通过快速傅里叶逆变换(inverse fast fourier transform,IFFT)并行结构实现,降低了对调制器和编码器工作速率的要求,设备结构简单,适合星间高速系统^[6]。

1 基本原理

OFDM 技术起源于模拟调制的频分复用(frequency division multiplexing, FDM)和多载波调制(multi-carrier modulation, MCM)。其主要思想是将一个高速串行的数据流通过串并变换转换成 N 个低速并行的子数据流,并调制到多个正交的子载波上进行传输,其中每个子载波承载一个低速子数据流^[7]。

与串行传输相比,串并变换后各子数据流的符号周期扩大,远大于信道的最大延迟扩展,此时信号传输相当于经历了 N 个窄带平坦衰落信道,而不再是宽带频率选择性信道,从而具有很强的对抗多径衰落以及对抗脉冲干扰的能力,适合于高速无线数据传输^[8]。且各个子载波相互正交,子载波间的数据信息不会在进行相关解调时相互影响,从而减小了子载波间的相互干扰。此外,子载波的频谱存在相互重叠的部分,在一定程度上提高了频谱利用率。

2 设计方案

2.1 总体架构设计

高速星间收发通信机 OFDM 系统的基本结构如图 1 所示。

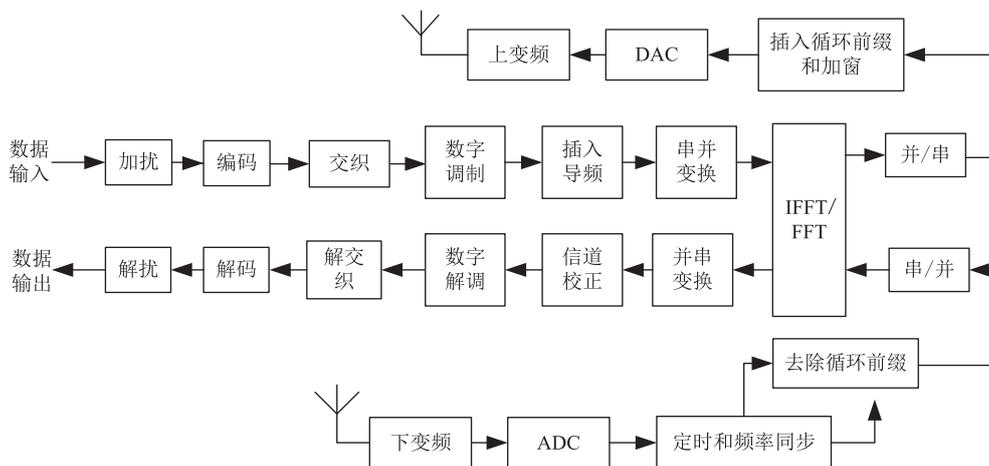


图 1 OFDM 系统收发通信机的基本结构

Fig. 1 Basic structure of transceiver in OFDM system

上半部分是发射部分,通常情况下,发射机在对输入数据进行编码之前,会插入一个扰码器单元。扰码后的数据首先进行编码操作,为了避免传输过程中的突发错误影响接收机解码器的工作,需对编码后的数据进行交织。交织后的编码比特经过调制形成同相、正交两路信号^[9]。然后部分子载波被插入导频信息,作为已知信息用于接收机的频率同步。接着数据经串并变换和 IFFT 处理被调至到各个子载波上,形成时域的 OFDM 符号。经 IFFT 模块输出的数据通过并串变换并添加循环前缀后,还需进行加窗操作,从而使 OFDM 符号处于带宽之外的功率谱密度下降得更快。到此便完成了信号的所有数字基带处理,再将待传输信号通过数模转换器(digital to analog converter, DAC)变为连续波形后,将送往射频前端进行上变频,完成发射过程。

下半部分是接收部分,其信号处理过程基本上是与发射部分相反的逆处理过程。同时,为了能够更加准确地恢复出原始比特信息,接收机需考虑同步问题。首先是定时同步,其目的是用来确定数据分组是否到达以及 OFDM 符号数据部分的起始时刻,从而保证数据部分能够与 FFT 模块的起止位置相对应。然后是载波同步,用来消除多普勒频移以及收发晶振的不完全相同等因素产生的频率偏差的影响。最后由于 OFDM 信号在传输过程中经历了在发送端由 DAC 转换为连续信号,在接收端又由模数转换器(analog to digital converter, ADC)转换为数字信号的过程,而 DAC 与 ADC 晶振的时钟周期和相位不可能完全相同,发射机与接收机的采样间隔会逐渐产生偏差,从而对系统的性能产生严重的影响^[10],因此,还需考虑采样频率同步。为了实现这一系列同步处理,通常会在数据帧头加入前导信号即训练序列,它们是接收机已知的且具有周期性的数据序列,用来对定时、频率偏差和信道状态信息进行估计^[11]。

另外,在进行子载波的数字解调前,需要信道估计与均衡模块来估计和补偿由信道引起的幅度偏差,否则会影响符号的正确解调。于是,信号经同步处理和信道补偿后,就可以进行解调、解交织,最后送入解码器中进行信道解码。

2.2 参数设计

为有效抵抗多颗卫星之间在传输信号过程中

由多径时延造成的 ISI 以及多普勒频移的影响,需对 OFDM 系统中子载波间隔进行合理的设计。

由文献[12-13]可知,为保证在卫星信道下各子载波的实现平坦衰落,需满足:

$$\begin{cases} B_{\text{sub}} \leq \frac{1}{10\tau_m} & \text{其中 } \tau_m \text{ 为最大时延扩展} \\ \frac{1}{B_{\text{sub}}} < \frac{0.423}{f_m} & \text{其中 } f_m \text{ 为最大多普勒频移} \end{cases} \quad (1)$$

本系统考虑最大多普勒频移 f_m 为 10 kHz,最大时延扩展 τ_m 为 62.5 ns,则可得:

$$23.64 \text{ kHz} < B_{\text{sub}} \leq 16000 \text{ kHz} \quad (2)$$

在高速星间收发通信机 OFDM 系统中,由于 M-QAM 的数字调制解调方式将信号的振幅和相位均参与调制,结合了脉冲幅度调制和相移键控调制的优势,使得带宽利用率和噪声容限都得到提升。因此,为了实现数据的高速传输,使得数据传输速率达到 300 Mbps,可以根据式(3)获得:

$$\text{数据传输速率} = \frac{\text{编码效率} \times \text{每子载波编码比特} \times \text{数据子载波数}}{\text{OFDM 符号周期长度 } T} \quad (3)$$

设计子载波总数量为 256,其中数据子载波数为 200,调制方式为 16QAM 且编码效率为 3/4,则 OFDM 符号周期长度 T 为 2 μs 。

通常情况下,OFDM 符号长度 T 是保护间隔长度 T_g 的 5 倍^[14],则可得保护间隔长度 T_g 为 0.4 μs ,有效数据周期长度 T_e 为 1.6 μs 。于是由 $B_{\text{sub}} = 1/T_e$,得子载波间隔为 625 kHz,满足式(2)。

为了无失真地恢复原始信道,导频子载波的插入应满足二维抽样定理。假设导频子载波在频域上的间隔为 N_f ,在时域上的间隔为 N_t ,则根据抽样定理可得:

$$\begin{cases} f_m T N_t \leq \frac{1}{2} \\ \tau_m B_{\text{sub}} N_f \leq \frac{1}{2} \end{cases} \quad (4)$$

将相关参数代入式(4),可得:

$$\begin{cases} N_t \leq 25 \\ N_f \leq 12.8 \end{cases} \quad (5)$$

又因为 N_t 和 N_f 为整数,所以可取 $N_t = N_f = 12$ 。于是,在 200 个数据子载波中可以插入 18 个导频子载波,其余为空闲子载波。根据以上分析,OFDM 系统的主要参数如表 1 所列。

表 1 OFDM 系统的主要参数

Tab.1 Main parameters of OFDM system

参数	数值
数据速率/Mbps	300
调制方式	16QAM
编码效率	3/4
数据子载波数量	200
导频数量	18
OFDM 符号长度/ μ s	2
保护间隔(循环前缀)长度/ μ s	0.4
子载波间隔/kHz	625
信号带宽/MHz	136.25
IFFT/FFT 点数	256
采样频率/MHz	160

3 数字调制解调仿真与实现

数字调制解调基于 ISE 开发平台并采用 Verilog HDL 硬件描述语言,利用 Modelsim 软件完成功能和时序的仿真。

3.1 数字调制模块

根据高速星间收发通信机 OFDM 系统相关参数设计,该系统采用 16QAM 的数字调制方式。在 16QAM 调制过程中,将串行数据流每 4 bit 分成一组进行映射,并乘以归一化因子 $1/\sqrt{10}$ 从而得到调制后的 I 路和 Q 路两路数据^[15]。其星座映射图如图 2 所示。

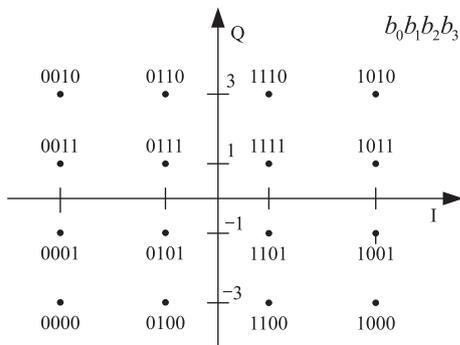


图 2 16QAM 星座映射图

Fig.2 16QAM constellation map

在 Verilog HDL 设计过程中,将输入数据存入一个 4 位缓存中,每存入 4 位数据便进行映射,且映射后的数据格式为 8 位:第一位为符号位,第二位为整数位,其余为小数位,负数则采用补码形式进行表示。硬件实现时,先将映射后的数据写入 ROM,映射时可直接从 ROM 中读取。归一化后的 16QAM

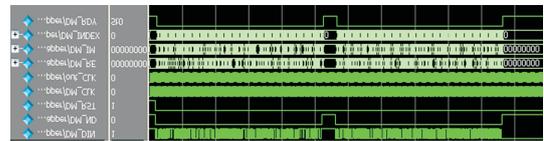
编码表如表 2 所列。

表 2 16QAM 编码表

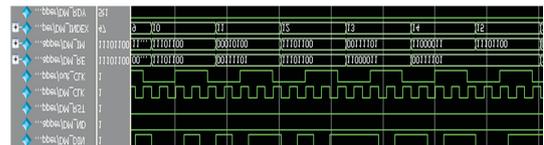
Tab.2 16QAM code table

输入比特 (b_0b_1)	归一化实部 I	归一化虚部 Q	输入比特 (b_2b_3)	归一化实部 I	归一化虚部 Q
00	$-3/\sqrt{10}$	$\sqrt{10}$	00	$-3/\sqrt{10}$	$\sqrt{10}$
01	$-1/\sqrt{10}$	$\sqrt{10}$	01	$-1/\sqrt{10}$	$\sqrt{10}$
11	$1/\sqrt{10}$	$\sqrt{10}$	11	$1/\sqrt{10}$	$\sqrt{10}$
10	$3/\sqrt{10}$	$\sqrt{10}$	10	$3/\sqrt{10}$	$\sqrt{10}$

数字调制模块的实现过程:根据 16QAM 调制原理,将串行数据流每 4 bit 存入 ROM 中,然后按照表 2 中归一化数据转换格式后的数值进行映射,并行输出,其仿真波形图如图 3 所示。



(a) 数字调制模块仿真波形图



(b) 数字调制模块仿真波形放大图

图 3 数字调制模块仿真波形

Fig.3 Simulation waveform of digital modulation module

图 3(a)中共显示了 2 个数据包,每个数据包为 800 bit 数据。经过调制,每 4 bit 数据可以映射成一个复数,则 1 个数据包映射成 200 个复数,对应参数设计中的 200 个数据子载波,并作为下一模块即导频插入模块的输入。图 3(b)是仿真波形的放大图,从图 3(b)中可以看出,由于采用 16QAM 调制方式,4 bit 对应一组调制后的 I/Q 两路数据,为使得调制后输出时钟(out_CLK)为 80 MHz,则输入数据(DM_CLK)需为 4 倍的输出时钟即 320 MHz。另外,从图 3(b)中可以看出,调制后的实部和虚部数据分别转换成了对应的二进制数据格式:11000011、11101100、00111101、00010100,符合要求。

3.2 数字解调模块

由于数据在发射端进行了数字调制,相应的,为了恢复传输的数据,需在接收端对数据进行数字解调。本系统采用的是 16QAM 调制方式,为了简化系统的设计,本模块采用 N 比特量化的硬判决方式。即本模块对接收到的 I/Q 两路的复数信号根据

调制时的映射关系,恢复出原始的数字信息。其解调过程如图 4 所示。

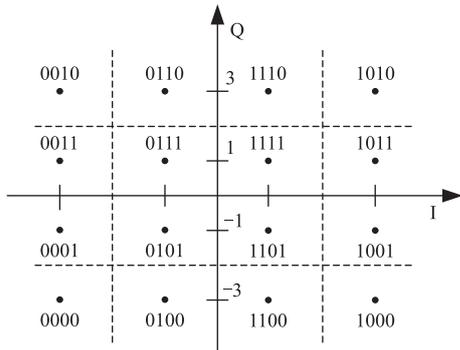


图 4 判决示意图

Fig. 4 Schematic of judgement

在总体架构实现过程中,为了避免复杂的除法结构,信道估计与均衡模块只对信道引起的相位旋转进行了校正,而其幅度的补偿需要在本模块中实现。信道估计与均衡模块输出的能量值被送入本模块中,用于动态调整星座图中 I/Q 路的判断阈值,如图 5 所示。

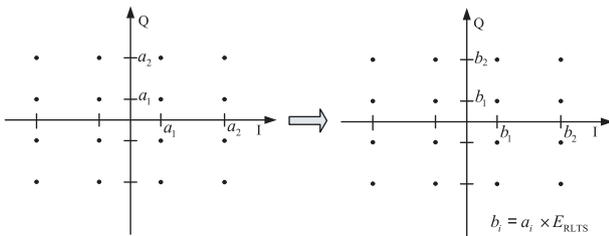


图 5 动态调整星座图 I/Q 的判断阈值示意图

Fig. 5 Schematic of judgement threshold for dynamically adjusting constellation I/Q

因此,在硬件实现时,解调过程需进行式(6)和式(7)的判断。

$$R \times \hat{H}^* > 2 \times K_{MOD} \times E_{RLTS} \quad (6)$$

$$R \times \hat{H}^* < -2 \times K_{MOD} \times E_{RLTS} \quad (7)$$

基于上述分析,数字解调模块的硬件实现结构图如图 6 所示。

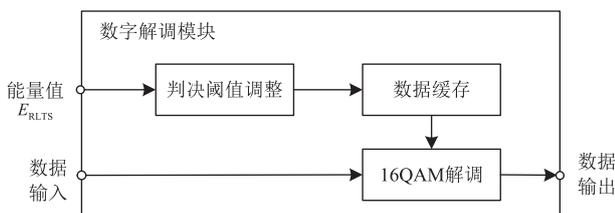


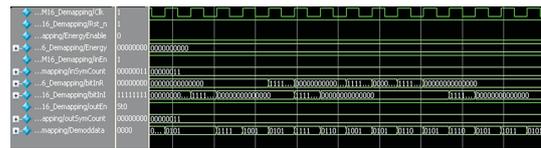
图 6 数字解调模块硬件实现结构图

Fig. 6 Hardware implementation structure diagram of digital demodulation module

数字解调模块的实现过程:当信道估计与均衡模块输出的能量值 E_{RLTS} 被送入数字解调模块时,对星座图的 I/Q 判断阈值进行调整并进行数据缓存。同时,将剩余相位跟踪模块的输出数据输入到本模块中,进行阈值判决后将数据 4 位并行输出。其仿真波形图如图 7 所示。



(a) 数字解调模块仿真波形图



(b) 数字解调模块仿真波形放大图

图 7 数字解调模块仿真波形

Fig. 7 Simulation waveform of digital demodulation module

图 7 中,Energy 是来自信道估计与均衡模块的能量值,用于调整星座图中的判断阈值。bitLnR 和 bitLnI 是来自剩余相位跟踪模块的 200 个复数数据的实部与虚部,对其进行 16QAM 解调后,输出的解调结果为 Demodata,它的 4 bit 对应一组调制的 I/Q 两路数据,每个符号共输出 200 个 4 位的二进制数据,对应数字调制前的 800 bit 数据,验证了结果的正确性。

4 结论

文章以 OFDM 技术的基本原理为基础,首次将 OFDM 技术应用到星间收发通信机,并利用 OFDM 通信系统的特点,对高速星间收发通信机的总体架构和参数进行了设计分析,根据设计方案采用 Verilog HDL 硬件描述语言在 ISE 开发平台及 Modelsim 软件中给出了数字调制解调的仿真波形和参数说明,并结合系统的总体架构通过将数字调制端的输出作为解调的输入对调制端的原始数据进行了还原,证明了本设计的可行性。

参考文献:

[1] 朱振才,杨根庆,余金培,等.微小卫星组网与编队技术的发展[J].上海航天,2004,21(6):46-49.

[2] 刘亚丽娜.面向分布式卫星系统的功率控制型 AODV 协议研究[D].西安:西安电子科技大学,2014:1-52.

[3] 熊群力,姜康林.航天编队飞行星座的星间通信[J].无

- 线电通信技术,2004,30(1):1-5+8.
- [4] 牛国庆. 基于自主认知的空间组网通信系统关键技术研究[D]. 北京:中国科学院大学,2015:1-64.
- [5] 翟华. 融合 5G 的卫星移动通信系统[J]. 空间电子技术,2020,17(5):71-76.
- [6] 李炯卉,熊蔚明,姚辰. 卫星数传 OFDM 信号的多普勒效应影响分析[J]. 系统工程与电子技术,2016,38(12):2849-2854.
- [7] 沈先丽,徐友云,王健,等. OFDM 双向中继系统中的功率分配优化策略[J]. 通信技术,2022,55(11):1394-1402.
- [8] 田清华. 基于 OFDM 的高速移动无线通信系统及宽带卫星通信系统关键技术研究[D]. 北京:北京邮电大学,2013:1-120.
- [9] 陈佳勇,徐湛,职如昕,等. 基于深度学习的 OFDM 系统信道估计方法[J]. 北京信息科技大学学报(自然科学版),2022,37(4):24-28.
- [10] 何小雨. 基于 MATLAB 的 OFDM 系统设计与仿真[J]. 延安大学学报(自然科学版),2018,37(3):51-55.
- [11] 赵迎新,王乐耕,赵婉楠,等. 基于循环前缀频域自相关的 OFDM 信号频谱感知[J]. 电讯技术,2021,61(5):536-541.
- [12] 廖为城,朱立东. 卫星 OFDM 系统参数设计及同步性能仿真[C]//第十二届卫星通信学术年会论文集,2016:245-253.
- [13] 啜钢,王博文,常永宇,等. 移动通信原理与系统[M]. 2 版. 北京:北京邮电大学出版社,2009.
- [14] 于正威. 基于 OFDM 的卫星通信系统设计与软件无线电实现[D]. 南京:南京信息工程大学,2020:6-23.
- [15] 管金新. 基于 OFDM 调制技术的中频数字收发机设计与实现[D]. 南京:南京航空航天大学,2017:1-75.

作者简介:王彦革(1993—),河南商丘人,硕士,工程师。主要研究方向为宇航空通信技术。E-mail:wyg_nuaa@163.com