

# OneWeb 低轨星座信号结构解析与思考

柴凌云<sup>1</sup>, 张 程<sup>1</sup>, 龚思龙<sup>1</sup>, 白 桐<sup>2</sup>, 王 程<sup>3</sup>, 崔高峰<sup>3</sup>

(1. 中国航天科技集团商业卫星有限公司, 北京 100190;

2. 北京航空航天大学网络空间安全学院, 北京 100191;

3. 北京邮电大学电子工程学院, 北京 100876)

**摘 要:** 作为地面移动通信网络的补充, 低轨卫星互联网已成为全球航天和通信领域的重要发展方向, 以 Starlink 和 OneWeb 为代表的国外低轨星座已率先提供商用服务。面对建设天地一体化信息网络的重大机遇和挑战, 能够兼容地面移动通信和卫星通信的信号波形是实现星地融合通信的关键技术之一。针对 OneWeb 低轨星座信号波形, 研究解析其帧结构和细节要点, 由此分析 OneWeb 信号波形的关键设计参数和核心设计思路, 并将 OneWeb 信号波形与 4G/5G、数字视频广播 (digital video broadcasting, DVB) 等典型信号波形进行对比分析, 这对我国卫星互联网星座的信号波形设计和工程实现具有一定参考价值。

**关键词:** OneWeb; 低轨星座; 卫星互联网; 信号波形; 星地融合

**中图分类号:** TN927.2

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.1000-0801.2025043

## Signal Structure Analysis and Thought of OneWeb LEO Constellation

CHAI Lingyun<sup>1</sup>, ZHANG Cheng<sup>1</sup>, GONG Silong<sup>1</sup>, BAI Tong<sup>2</sup>, WANG Cheng<sup>3</sup>, CUI Gaofeng<sup>3</sup>

1. Commercial Satellite Group Co., Ltd., CASC, Beijing 100190, China

2. School of Cyber Science and Technology, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China

3. School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

**Abstract:** As a supplement to terrestrial mobile communication networks, low earth orbit (LEO) satellite Internet has become an important development direction in the global aerospace and communications fields. Foreign LEO constellations represented by Starlink and OneWeb have begun to provide commercial services. Faced with important opportunities and challenges in building a space-integrated-ground information network, the signal waveform that can be compatible with both terrestrial mobile communication and satellite communication is one of the key technologies for achieving satellite-terrestrial integrated communication. Aiming at the signal waveform of the OneWeb LEO constellation, its frame structure and key details are studied and analyzed. Based on this, the key design parameters and core design ideas of the OneWeb signal waveform are analyzed. Furthermore, a comparative analysis is conducted between the OneWeb signal waveform and typical signal waveforms such as 4G/5G and DVB. The analysis provides certain reference and application value for the signal waveform design and engineering implementation of China's satellite internet constellations.

**Keywords:** OneWeb, LEO constellation, satellite Internet, signal waveform, satellite-terrestrial integrated

### 0 引言

近年来, 低轨卫星互联网已成为全球航天和通信领

域的重要发展方向, 正迎来高速发展的关键时期。作为地面移动通信网络的补充, 低轨卫星互联网能够提供覆盖全球的宽带互联网接入服务, 低轨卫星星座建

收稿日期: 2025-08-04; 修回日期: 2025-11-11

基金项目: 中国科协青年人才托举工程 (No.2022QNRC001)

Foundation Item: Young Elite Scientists Sponsorship Program by CAST (No.2022QNRC001)

设也已成为各国航天发展战略的重点。目前,以 Starlink 和 OneWeb 为代表的国外低轨星座已率先提供商用服务。我国已于 2020 年将卫星互联网建设纳入新型基础设施建设范畴,目前 GW(国网)星座和千帆星座两大大型低轨星座项目正在加速建设。这些星座建设项目不仅具有重要战略意义,还将持续推动我国商业航天产业链的快速发展,显著提升我国在全球航天与通信领域的竞争实力。

面对建设天地一体化信息网络的重大机遇和挑战,文献[1]指出,低轨卫星通信在 5G 时代是地面移动通信的重要补充,到 6G 时代则实现地面移动通信与高中低轨卫星通信的有机融合。文献[2-4]也对卫星互联网与 5G/6G 融合发展的技术路线和关键技术进行了研究探讨。能够兼容地面移动通信和卫星通信的信号波形是实现星地融合通信的关键技术之一。传统的卫星通信基于欧洲电信标准化协会(ETSI)制定的第 3 代数字卫星电视广播标准(DVB-S2/S2X)<sup>[5-6]</sup>,其与地面移动通信的兼容性较差。文献[7]对 Starlink、OneWeb、Telesat 3 个低轨星座的系统架构和技术指标进行了对比分析。文献[8]对 Starlink 星座 Ku 频段下行信号结构进行解析,并指出 Starlink 星座前向链路下行信号采用正交频分复用(orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)传输体制。文献[9-11]均提及 OneWeb 星座前向链路采用单载波时分复用(single carrier-time division multiplexing, SC-TDM)体制、反向链路则采用 4G LTE 协议标准的单载波频分多址接入(single carrier-frequency division multiple access, SC-FDMA)方案,巧妙融合了数字视频广播(digital video broadcasting, DVB)和 3GPP 两个协议体系的成果。文献[12-13]对 OneWeb 低轨星座的系统组成、技术指标、工作方式等基本信息进行了相应介绍。美国联邦通信委员会(federal communications commission, FCC)<sup>[14-15]</sup>在 OneWeb 相关报告中也明确指出,OneWeb 前向链路在 250 MHz 单载波上采用 TDM 传输方式,反向链路则采用 SC-TDM/FDMA 传输方式。文献[16]对 OneWeb 星座 Ku 频段下行信号数据进行采集,通过应用盲导航信标估计结合自相关函数分析指出 OneWeb 信号信标周期为 10 ms。文献[17]通过对 OneWeb 星座用户下行信号的频谱分析也证实 OneWeb 前向链路采用 SC-TDM 传输体制。文献[18]指出 OneWeb 卫星波束以每 10 ms 为周期发送一帧数据,且其同步序列包括 400 个符号。德国 CTC advanced GmbH 公司在 OneWeb OW70L 用户终端的测试报告<sup>[19]</sup>中提到,用户终端发射信号的信道间隔为 20 MHz,接收

信号的信道间隔为 250 MHz。此外,罗德与施瓦茨公司提供了 SMW-K130 和 SMW-K355 选件,并宣称可通过 R&S SMW200A 矢量信号发生器实现 OneWeb 兼容信号模拟<sup>[20]</sup>。

目前国内尚未见到明确公开的 OneWeb 低轨星座信号结构相关文献。本文通过研究罗德与施瓦茨公司 SMW-K130 和 SMW-K355 选件的产品手册<sup>[21]</sup>,解析 OneWeb 低轨星座信号波形的帧结构和细节要点,由此分析 OneWeb 信号波形的关键设计参数和核心设计思路,并将 OneWeb 信号波形与 4G/5G、DVB 等典型信号波形进行对比分析,这对我国卫星互联网星座的信号波形设计和工程实现具有一定参考应用价值。

## 1 OneWeb 信号结构解析

### 1.1 OneWeb 低轨星座构型及通信频率规划

OneWeb 已于 2024 年 10 月完成了第一阶段所有卫星的组网部署。根据 CelesTrak 网站公布的 OneWeb 低轨卫星轨道参数,该星座目前共由 651 颗运行卫星组成,分布在高度约 1 200 km、倾角为 87.9°的 12 个近极轨道面上,且每个轨道面部署约 54 颗卫星。

OneWeb 低轨星座通信频率规划见表 1。OneWeb 星座前向链路用户下行信号采用 Ku 频段(10.7~12.7 GHz)进行传输。OneWeb 星座采用弯管透明转发体制,卫星可通过前向链路上行信道接收信关站发送的信号,并通过下行信道将信号转发到服务区域内的用户终端。前向链路下行信道被分割成 8 个 250 MHz 的连续信道。每颗 OneWeb 卫星有 16 个静态高椭圆波束,且每个波束在任意特定时间内只在 8 个信道中的一个传输,每个信道可以由同一颗卫星上两个地理上分开的波束使用。因此,如图 1 和图 2 所示,OneWeb 每颗卫星能够通过频域(8×250 MHz 信道)和空域(16 波束)中进行多路复用,同时为多个用户提供服务<sup>[14]</sup>。

表 1 OneWeb 低轨星座通信频率规划<sup>[14]</sup>

| 链路类型和传输方向      | 频率范围                           |
|----------------|--------------------------------|
| 信关站到卫星(前向链路上行) | 27.5~29.1 GHz<br>29.5~30.0 GHz |
| 卫星到信关站(反向链路下行) | 17.8~18.6 GHz<br>18.8~19.3 GHz |
| 用户侧到卫星(反向链路上行) | 14.0~14.5 GHz                  |
| 卫星到用户侧(前向链路下行) | 10.7~12.7 GHz                  |

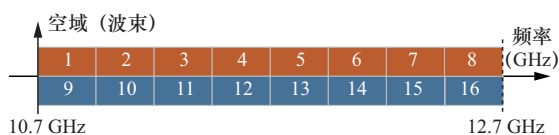
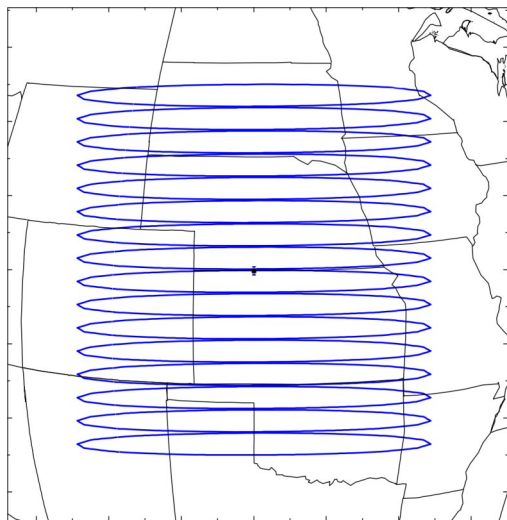


图1 OneWeb星座前向链路下行信号频率分配示意

图2 OneWeb单颗卫星Ku频段波束分布示意<sup>[14]</sup>

## 1.2 前向链路下行帧结构

根据现有公开资料<sup>[14-15]</sup>, OneWeb前向链路采用SC-TDM传输体制, 与卫星电视广播传输中常用的DVB-S2X信号波形类似。每个用户波束支持单个250 MHz宽带载波传输, 波束中的各用户终端接收并解调该载波后, 仅提取由数据头确定的专属数据。同时研究发现, OneWeb前向链路下行帧结构是由4G移动通信信号帧结构演化而来的, 其通过特殊设计的帧结构, 将大部分4G下行物理信号和信道以时分复用的方式传输在单载波上<sup>[21]</sup>。

每个单载波信道带宽为 $B=250$  MHz, 均方根升余弦滤波器滚降系数为 $\alpha=0.085$ , 符号速率为 $R_{\text{sym}} = B/(1 + \alpha) = 230.4$  Msps。每个子帧中包含1 152个时域上的资源块(resource block, RB), 每个资源块中包含200个资源元素(resource element, RE)。每个RE中有一个符号, 因此一个子帧共包含230 400个符号, 即传输每个子帧需要的时间为 $T_{\text{subframe}}=1$  ms, 这和4G协议标准帧结构的一个子帧传输时间是一致的。需要注意的是, 这里的RB和

RE概念与4G协议标准有所不同: RE是频域占用250 MHz单载波的最小时间单元, 即时域上的一个符号; RB则是频域占用250 MHz单载波、时域上包含200个符号的时频资源块, 可以理解为OneWeb前向链路自定义的一种时频资源单位。

OneWeb前向链路帧结构如图3所示。其中小区特定参考信号(cell-specific reference signal, CRS)、物理控制格式指示信道(physical control format indicator channel, PCFICH)、主同步信号(primary synchronization signal, PSS)以及物理广播信道(physical broadcast channel, PBCH)占用的RB位置是固定的, 且PBCH信道只存在于子帧1中。在前144个RB范围内, 物理下行控制信道(physical downlink control channel, PDCCH)和物理下行共享信道(physical downlink shared channel, PDSCH)占用的RB位置是不固定的, PDSCH信道会填充PDCCH信道尚未占用的RB。在后面的 $144 \times 7$ 个RB范围内, 采用“CRS占用2个RB, PDSCH占用142个RB”周期排列方式。由于本场景为单天线传输模式, PDSCH信道用户使用CRS即可进行信道估计和相干解调。一帧中总共包含10个子帧, 总时长为10 ms。除第1个子帧包含PBCH信道外, 其余的第2~10个子帧所有物理信号和信道均按照分配好的RB进行周期性填充。以子帧1, 控制格式指示(control format indicator, CFI)=12为例, 不同物理信号和信道占用的RB范围见表2。

PCFICH信道中的CFI参数决定了PDCCH信道在子帧中占用的RB数量和范围。不同CFI对应的PDCCH RB分配范围见表3。CFI的取值范围为1~12, 当CFI=12时, 占用的RB数量为108个, 共包含 $108 \times 200 = 21\ 600$ 个RE。按照4G协议标准, PDCCH传输一个下行控制信息(downlink control information, DCI)需占用一个或多个连续的控制信道元素(control channel element, CCE), 且每个CCE需占用36个RE, 那么当CFI=12时, 1 ms时长内可用于进行用户资源调度的CCE数量为600个。OneWeb支持的PDCCH信道包括0、1、2、3、4共5种类型, 每种PDCCH信道类型占用的CCE数量分别为2、4、8、16、40个。



图3 OneWeb前向链路帧结构

表2 OneWeb前向链路帧结构中不同物理信号和信道占用的RB范围(以子帧1, CFI=12为例)

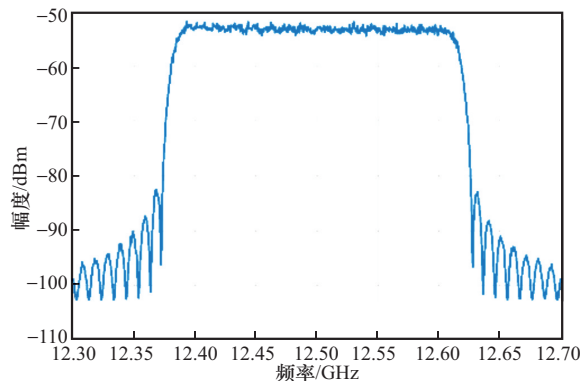
| 信号与信道分类 | 占用的RB范围         |
|---------|-----------------|
| CRS     | 1~2             |
| PCFICH  | 3               |
| PDCCH   | 4~18            |
| PSS     | 19~20           |
| PBCH    | 21~22(只存在于子帧1中) |
| PDCCH   | 23~72           |
| CRS     | 73~74           |
| PDCCH   | 75~117          |
| PDSCH   | 118~144         |
| CRS     | 145~146         |
| PDSCH   | 147~288         |
| CRS     | 289~290         |
| PDSCH   | 291~432         |
| CRS     | 433~434         |
| PDSCH   | 435~576         |
| CRS     | 577~578         |
| PDSCH   | 578~720         |
| CRS     | 721~722         |
| PDSCH   | 723~864         |
| CRS     | 865~866         |
| PDSCH   | 867~1008        |
| CRS     | 1009~1010       |
| PDSCH   | 1011~1152       |

表3 不同CFI对应的PDCCH RB分配范围

| 控制格式指示(CFI) | PDCCH分配RB情况  |                   |                   |
|-------------|--------------|-------------------|-------------------|
|             | RB<br>占用数量/个 | 子帧1中<br>RB范围      | 子帧2~10中<br>RB范围   |
| 1           | 9            | 4~12              |                   |
| 2           | 18           | 4~18和23~25        | 4~18和21~23        |
| 3           | 27           | 4~18和23~34        | 4~18和21~32        |
| 4           | 36           | 4~18和23~43        | 4~18和21~41        |
| 5           | 45           | 4~18和23~52        | 4~18和21~50        |
| 6           | 54           | 4~18和23~61        | 4~18和21~59        |
| 7           | 63           | 4~18和23~70        | 4~18和21~68        |
| 8           | 72           | 4~18和23~72和75~81  | 4~18和21~72和75~79  |
| 9           | 81           | 4~18和23~72和75~90  | 4~18和21~72和75~88  |
| 10          | 90           | 4~18和23~72和75~99  | 4~18和21~72和75~97  |
| 11          | 99           | 4~18和23~72和75~108 | 4~18和21~72和75~106 |
| 12          | 108          | 4~18和23~72和75~117 | 4~18和21~72和75~115 |

公开资料<sup>[21]</sup>中显示, OneWeb前向链路下行信号采用的DCI格式共6种: 0、10W、1A、20W、3及3A。由于无须支持多天线传输, 因此OneWeb信号传输需要的DCI格式数量较4G协议标准少了很多。6种DCI格式均由4G协议标准中的DCI格式0、1、1A、2、3、3A修改而来, 具体对应关系为: DCI格式0主要用于物理上行共享信道(physical uplink shared channel, PUSCH)的调度, DCI格式10W、1A、20W主要用于PDSCH的调度, DCI格式3、3A主要用于上行链路功率控制。

虽然前向链路下行信号具体的物理层处理过程尚未得知, 但基于上述的帧结构分析可推测, OneWeb大概率采用“多复用4G协议标准下行物理层处理过程”的方案: 各类下行物理信号和信道传输的比特信息在经过4G协议标准规定的信道编码、加扰及星座调制处理后, 直接进行RE上的符号映射, 无须进行OFDM调制。然后按各自分配的RB范围将所有符号进行组帧, 再经过成型滤波和正交调制后输出基带信号。OneWeb前向链路下行信号在250 MHz带宽下的波形频谱示意如图4所示。

图4 OneWeb前向链路下行信号在250 MHz带宽下的波形频谱示意<sup>[21]</sup>

### 1.3 反向链路上行帧结构

OneWeb反向链路上行信号采用与4G协议标准上行相同的SC-FDMA接入方式, 但其使用的最小带宽只有20 MHz一种。该上行链路采用与4G协议标准相同的15 kHz子载波间隔, 以及相同的时频资源定义方式, 20 MHz带宽对应包含100个4G协议标准定义的RB, 对应的采样率为30.72 MHz。由于其各类物理信号和信道的时频资源分布与4G协议标准无异, 相关细节在此不再赘述。OneWeb反向链路上行信号在20 MHz带宽下的波形频谱示意如图5所示。

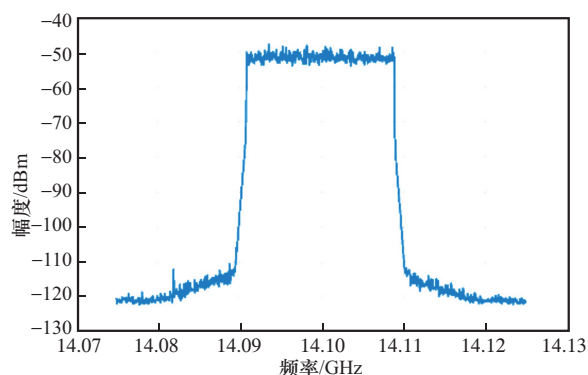


图5 OneWeb反向链路上行信号在20 MHz带宽下的波形频谱示意<sup>[21]</sup>

#### 1.4 OneWeb与DVB-S2X帧结构数据信道传输效率对比分析

CFI参数决定了PDCCH信道在子帧中占用的RB数量和范围。根据对帧结构的分析可知,在前144个RB范围内,PDSCH信道会填充PDCCH信道尚未占用的RB,因此一个子帧中PDSCH占用的RB数量会随着CFI值的增大而减少,同时PDSCH传输效率 $\eta_{\text{PDSCH}}$ 也会随着CFI值的增大而减小。OneWeb前向链路下行信号PDSCH传输效率见表4。PDCCH信道占用的RB数量决定了可以传输CCE的数量,即决定了单子帧传输时间1 ms内可以调度的用户数量,因此用户容量会随着CFI值的增大而增加。基于此,通过选择合适的CFI参数可以实现数据信道传输效率与系统用户容量的折中。

表4 OneWeb前向链路下行信号PDSCH传输效率(以包含PBCH的子帧1为例)

| 控制格式指示(CFI) | PDCCH中可用的CCE数量/个 | 一个子帧中PDSCH占用的RB数量/个 | PDSCH传输效率 $\eta_{\text{PDSCH}}$ |
|-------------|------------------|---------------------|---------------------------------|
| 1           | 50               | 1 120               | 97.22%                          |
| 2           | 100              | 1 111               | 96.44%                          |
| 3           | 150              | 1 102               | 95.66%                          |
| 4           | 200              | 1 093               | 94.88%                          |
| 5           | 250              | 1 084               | 94.10%                          |
| 6           | 300              | 1 075               | 93.32%                          |
| 7           | 350              | 1 066               | 92.53%                          |
| 8           | 400              | 1 057               | 91.75%                          |
| 9           | 450              | 1 048               | 90.97%                          |
| 10          | 500              | 1 039               | 90.19%                          |
| 11          | 550              | 1 030               | 89.41%                          |
| 12          | 600              | 1 021               | 88.63%                          |

DVB-S2X物理帧在加扰前的帧结构如图6所示。其中XFECFRAME是经低密度奇偶校验码(low-density parity check code, LDPC)纠错编码后的帧:对于常规帧来说, $n_{\text{LDPC}}=64\ 800$ 个比特;对于短帧来说, $n_{\text{LDPC}}=16\ 200$ 个比特。DVB-S2X物理帧总符号数为 $90 \times (S+1) + 36 \times \lfloor (S-1)/16 \rfloor$ ,其中 $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示向下取整<sup>[5]</sup>。DVB-S2X物理帧总符号数会随着不同的调制方式采用而变化,因此每一帧的时长也会随之变化。DVB-S2X物理层帧结构XFECFRAME传输效率见表5。DVB-S2X帧结构设计不区分数据信道和控制信道,信令和数据业务同时封装在XFECFRAME中进行传输,其数据业务的传输效率实际上会比XFECFRAME的传输效率低。

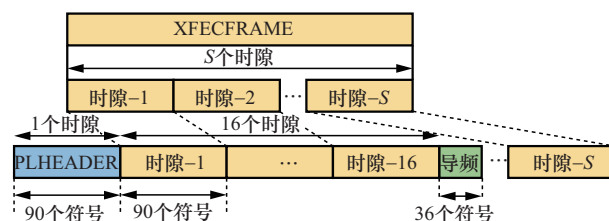


图6 DVB-S2X物理帧在加扰前的帧结构<sup>[5]</sup>

表5 DVB-S2X物理层帧结构XFECFRAME传输效率

| 调制阶数 $\eta_{\text{MOD}}/(\text{bit} \cdot \text{symbol}^{-1})$ | $n_{\text{LDPC}}=64\ 800$ (常规帧) |                                | $n_{\text{LDPC}}=16\ 200$ (短帧) |                                |
|----------------------------------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
|                                                                | XFEC帧时隙数S/个                     | 加导频后的传输效率 $\eta_{\text{XFEC}}$ | XFEC帧时隙数S/个                    | 加导频后的传输效率 $\eta_{\text{XFEC}}$ |
| 2                                                              | 360                             | 97.35%                         | 90                             | 96.77%                         |
| 3                                                              | 240                             | 97.32%                         | 60                             | 96.46%                         |
| 4                                                              | 180                             | 97.09%                         | 45                             | 96.15%                         |
| 5                                                              | 144                             | 97.17%                         | 36                             | 95.24%                         |

通过对比OneWeb与DVB-S2X的帧结构数据信道传输效率可以看出,仅当OneWeb的CFI取值为1、2、3时,其数据传输效率与DVB-S2X相当;而当CFI取其他值时,OneWeb的传输效率均低于DVB-S2X。然而,OneWeb的1 ms用户调度周期较DVB协议更灵活,OneWeb能够在数据信道传输效率和可容纳用户容量之间进行灵活调整,这一机制也优于DVB协议。

## 2 OneWeb前向链路信号关键设计分析

### 2.1 滤波器滚降系数和符号速率

从上述分析可以看出,OneWeb前向链路下行信号在250 MHz的单载波带宽分配下采用了 $\alpha=0.085$ 的滤波器滚降系数,不同于DVB-S2X中常见的滚降系数0.05、0.1或0.2,OneWeb前向链路下行信号设计则采用不常见的滚降

系数 $\alpha=0.085$ ，旨在实现 $R_{\text{sym}}=230.4$  Msps的符号速率，或可以理解为：该设计选择的符号速率 $R_{\text{sym}}=230.4$  Msps决定了滚降系数 $\alpha=0.085$ 。对于采样率来说，不论采用2倍采样460.8 MHz还是4倍采样921.6 MHz，均为反向链路上行信号20 MHz带宽下使用的30.72 MHz采样率的整数倍。对于信关站和用户侧两端，可以采用相同的晶振生成不同的采样时钟，通过分频或倍频收发信号实现成倍数的采样率，该设计能够最大程度减少由收发信号采样率不一致带来的时序漂移和信号失真问题，从而能够减少对于接收端频率同步带来的影响，由此可知，保持收发信号系统采样时钟的整数倍关系是一个关键设计。

## 2.2 帧结构时序设计

OneWeb前向链路上行信号采用在一个子帧中传输1152个RB，且每个RB传输200个符号的帧结构设计，由此实现了每个子帧的时长 $T_{\text{subframe}}=1$  ms。一帧由10个时长均为1 ms的子帧组成，这与4G协议标准的信号帧结构是一致的。尽管OneWeb前向链路采用SC-TDM传输体制，与4G移动通信采用的OFDM传输体制存在差异，但OneWeb通过特殊设计的帧结构，仍保持了与4G相同的时序结构，从而能够使OneWeb较好地复用现有4G协议标准中成熟的接入同步过程框架，减小对下行信号接收频率同步、帧同步和符号同步的影响；同时也可以利用4G协议标准中成熟的定时提前机制，在网络侧实现上行信号的定时对齐。对于多普勒效应较明显的LEO卫星，用户还需要根据自身位置和卫星星历对传输时延和多普勒频偏进行估计和预补偿；网络侧还需要将估算得到的上行定时偏差反馈给用户端，该步骤可以参考5G非地面网络（non-terrestrial network, NTN）的上行定时同步机制进行改进优化。

## 2.3 对通信协议栈的影响

根据上述分析可知，OneWeb前向链路上行物理层采用SC-TDM传输体制，其基于4G下行物理层演化而来，保留了大部分4G下行物理信号和信道；OneWeb反向链路上行物理层采用SC-FDMA传输体制，与4G上行物理层基本一致。由此可以推测OneWeb的协议栈会尽可能复用4G中成熟的协议栈，对比4G协议栈，OneWeb的用户面和控制面协议栈如图7和图8所示。除物理层改动较大外，高层几乎不需要改动，下行链路仍可以保留原有逻辑信道、传输信道与物理信道之间的映射，但对于MAC层来说，则需要对下行链路时频资源重新定义，使其与OneWeb的前向链路帧结构时频资源定义保持一致，以实现资源的动态分配与调度。

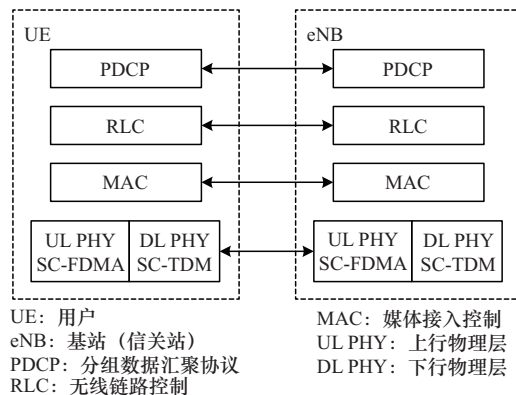


图7 OneWeb用户面协议栈

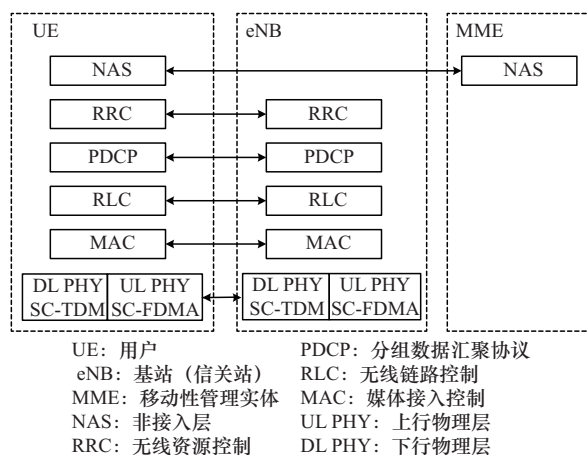


图8 OneWeb控制面协议栈

在“尽可能复用4G成熟协议栈、只改动下行物理层”的设计考量下，一个值得思考的问题是OneWeb为何未在前向链路物理层直接使用DVB-S2X物理层帧结构设计。应当注意到，4G LTE网络必须保持高度同步，整个系统运行基于一个统一的10 ms无线帧结构开展。如果OneWeb前向链路采用类似DVB-S2X的可变子帧时长设计，则会对下行同步、上行定时对齐和上下行控制信道的协同都产生较复杂影响。用户需要精确掌握每个子帧、符号甚至采样点的开始和结束时间，才能正确解调信号、执行测量、进行切换、监听控制信道等，而可变子帧时长会破坏全网严格的时序同步，既会导致上行定时对齐混乱、无法维持全网同步，又会打乱PDCCH控制信道的位置关系，导致用户无法预知下一个控制信道何时出现、在什么位置出现，无法保证控制信息在正确时间的监听和发送。同时，实现可变子帧时长还需要复杂的动态信令机制来通知所有用户当前子帧的长度和相关资源的重新定位规则，这将大幅增加信令开销，显著提高用户和网络侧的实现复杂度，这也进一步解释了OneWeb仍需通

过特殊设计的帧结构保持与 4G 相同时序结构的原因。

3 OneWeb 与 4G/5G、DVB 信号波形对比分析

由上文可知，OneWeb 的信号波形设计既保留了类似 DVB 前向链路采用 SC-TDM 实现低峰均比的优势，又继承了 4G 协议标准上行链路采用 SC-FDMA 具备频谱效率高和灵活性好的特点。不同的信号波形设计体现出不同通信系统对信道环境和自身业务的适配性：对于地面移动通信，OFDM 不仅频谱利用率高，还具有抗多径效应优势，结合多天线技术能实现频谱效率的成倍增长；对于宽带卫星通信，由于星地传输信道以直射径分量为主，多天线技术在卫星场景中适用受限，且卫星功率资源宝贵，因此直接采用 OFDM 波形，其带来的高峰均比特性会导致功率放大器进入非线性区而引起波形畸变。特别是低轨卫星，其高动态性带来的多普勒效应也会破坏 OFDM 波形子载波的正交性。目前高轨高通量卫星通信系统中普遍使用 DVB-S2X/RCS2 协议：其中，前向链路 DVB-S2X 协议针对数字卫星视频广播设计，以提高带宽利用率为设计目标，其采用的 SC-TDM 具有低峰均比的优势，更适用于功率受限的卫星通信系统；而反向链路 DVB-RCS2 协议作为数字卫星视频广播系统的一个扩展标准，旨在满足宽带卫星通信中数据业务的交互需求，但其采用的多频时分多址接入（multi frequency time division multiple access，MF-TDMA）技术的频谱效率不如 SC-FDMA。综上，将 OneWeb 与 4G/5G、DVB 信号波形及其优劣势进行对比分析，见表 6。

OneWeb 的信号波形设计是在 4G LTE 协议标准已冻结、5G NR 协议标准尚未成熟之际完成的，其工程师创新性地 将原属于 4G 下行的物理信号和信道以 SC-TDM 方式传输在单载波上，是一种典型的星地融合通信方案设计思路。随着 5G NR 协议标准的成熟商用，OneWeb 信号

波形的这一设计思路还可以进一步优化。5G NR 相比 4G LTE 引入参数集的概念，可以灵活调整子载波间隔和时隙时长。例如在反向链路中采用更大的带宽和子载波间隔，实现更短的时隙时长，以时隙或微时隙为单位的动态调度机制能实现更灵活的资源分配，同时对多普勒频偏的容忍能力也更好，这为星地融合通信波形设计和工程实现提供了一种新方案。

4 对我国卫星互联网星座建设的启示

OneWeb 低轨星座采用透明转发处理模式，其优势在于结构简单、核心技术成熟、总体成本可控，能够以适度规模的星座构型实现全球范围覆盖，通过 4G 信号波形演化而来的特殊波形设计也能够充分利用地面移动通信成熟的产业生态；其缺点在于透明转发处理模式通过地面信关站进行信息处理转发，需要在全球范围内建设大量信关站完成组网。相比而言，Starlink 低轨星座采用具备星间链路的星上处理模式，卫星搭载星上数据处理单元与激光通信终端，通过星间链路即可直接在星上完成数据解析与路由转发操作，能够显著降低通信时延；但星上载荷相对复杂，对技术水平要求更高，其大规模的星座构型依赖于强大的火箭运载能力进行持续部署实现全球覆盖。同时，大规模卫星数量大幅提高了系统的总功率，也提升了对采用 OFDM 波形高峰均比的容忍度。OneWeb 和 Starlink 这两种具有代表性的低轨卫星互联网星座也体现出两家运营商不同的商业模式和抗风险能力。

对于我国低轨卫星互联网星座建设信号波形的选择，不同星座的技术路线呈现差异化特征：GW 星座一期卫星采用星上处理模式，信号波形基于 5G 协议构建定制化的宽带演进体制，前向链路使用 OFDM 波形，而在保证较高频带利用率的同时降低信号峰均比，仍是信号波形设计中需要解决的重要问题。千帆星座一期卫星则采用透

表 6 OneWeb 与 4G/5G、DVB 信号波形对比分析

| 对比项  | OneWeb                                                                                                                                                                                   | 4G/5G                                                                                                                                      | DVB                                                                                                                                                                    |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 信号波形 | 前向链路 SC-TDM<br>反向链路 SC-FDMA                                                                                                                                                              | 下行链路 CP-OFDM<br>上行链路 SC-FDMA                                                                                                               | 前向链路 SC-TDM<br>反向链路 MF-TDMA                                                                                                                                            |
| 优劣   | 前向 SC-TDM 具有较低峰均比，数据传输效率较 DVB-S2X 不具优势，但可实现传输效率和用户容量的灵活折中调整。<br>前向 SC-TDM 通过特殊的帧结构设计能够高效复用 4G 成熟的协议栈。<br>反向 SC-FDMA 比 MF-TDMA 更灵活高效。传输层基于 4G 体制，采用 AES-128 加密算法，具有内生安全优势 <sup>[22]</sup> | 下行 CP-OFDM 频谱利用率高，但峰均比较高，会降低功率放大器效率，造成卫星功率资源浪费；此外，低轨卫星显著的多普勒效应会影响子载波的正交性。<br>上行 SC-FDMA 较 OFDMA 具有更低峰均比，频谱效率和灵活性优于 MF-TDMA <sup>[23]</sup> | 前向 DVB-S2X 采用的 SC-TDM 具有低峰均比优势，频谱效率相比于 4G 和 5G 更有优势 <sup>[24-25]</sup> ，但调度灵活性不如 4G 和 5G。<br>反向 DVB-RCS2 采用的 MF-TDMA 频谱效率不如 4G 和 5G <sup>[24-25]</sup> ，灵活性有限，上行容量相对受限 |

明转发处理模式,除采用基于 DVB 协议改进的信号传输体制外,采用类似 OneWeb 的信号波形设计方案也可以作为一种升级方案。此外,高轨高通量卫星通信大多采用透明转发处理模式,OneWeb 的信号波形设计也为高轨卫星互联网组网波形提供可参考的设计范例,可推动高轨卫星互联网与地面移动通信网络的信号体制兼容,同时也有助于推动高低轨卫星融合网络的发展。

## 参考文献

- [1] 陈山枝.关于低轨卫星通信的分析及我国的发展建议[J].电信科学, 2020, 36(6): 1-13.  
CHEN S Z. Analysis of LEO satellite communication and suggestions for its development strategy in China[J]. Telecommunications Science, 2020, 36(6): 1-13.
- [2] 郑重, 缪中宇, 郑寒雨, 等. 卫星通信与地面 5G 融合发展路线探讨[J]. 航天器工程, 2021, 30(5): 115-124.  
ZHENG Z, MIAO Z Y, ZHENG H Y, et al. Discussion of integrated development roadmap for satellite communications and ground 5G[J]. Spacecraft Engineering, 2021, 30(5): 115-124..
- [3] 徐冰玉, 李侠宇. 卫星互联网与 5G/6G 融合发展探析[J]. 国际太空, 2022(12): 28-32.  
XU B Y, LI X Y. Analysis on the integration development of satellite Internet and 5G/6G[J]. Space International, 2022(12): 28-32.
- [4] 陈山枝, 孙韶辉, 康绍莉, 等. 6G 星地融合移动通信关键技术[J]. 中国科学: 信息科学, 2024, 54(5): 1177-1214.  
CHEN S Z, SUN S H, KANG S L, et al. Key technologies for 6G integrated satellite-terrestrial mobile communication[J]. Scientia Sinica (Informationis), 2024, 54(5): 1177-1214.
- [5] ETSI. Digital video broadcasting (DVB); second generation framing structure, channel coding and modulation systems for broadcasting, interactive services, news gathering and other broadband satellite applications; part 1: DVB-S2 (V1.4.1): EN 302 307-1 [S]. 2014.
- [6] ETSI. Digital video broadcasting (DVB); second generation framing structure, channel coding and modulation systems for broadcasting, interactive services, news gathering and other broadband satellite applications; part 2: DVB-S2 extensions (DVB-S2X) (V1.4.1): EN 302 307-2 [S]. 2024.
- [7] DEL PORTILLO I, CAMERON B G, CRAWLEY E F. A technical comparison of three low earth orbit satellite constellation systems to provide global broadband[J]. Acta Astronautica, 2019, 159: 123-135.
- [8] HUMPHREYS T E, IANNUCCI P A, KOMODROMOS Z M, et al. Signal structure of the starlink ku-band downlink[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2023, 59(5): 6016-6030.
- [9] 汪春霆, 李宁, 翟立君, 等. 卫星通信与地面 5G 的融合初探(二)[J]. 卫星与网络, 2018(11): 22-26.  
WANG C T, LI N, ZHAI L J, et al. Discussion on the integration of satellite communication and ground 5G (II)[J]. Satellite & Network, 2018(11): 22-26.
- [10] 孙晨华. 与 5G/6G 融合的低轨星座思考[J]. 卫星与网络, 2019(10): 26-33.  
SUN C H. Thoughts on LEO constellation combined with 5G/6G [J]. Satellite & Network, 2019(10): 26-33.
- [11] 翟立君, 潘沐铭, 汪春霆. 卫星 5G 技术的发展和展望[J]. 天地一体化信息网络, 2021, 2(1): 1-9.  
ZHAI L J, PAN S M, WANG C T. Development and prospect of satellite 5G technology[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2021, 2(1): 1-9.
- [12] 王学宇, 武坦然. OneWeb 低轨道卫星系统及其军事应用分析[J]. 航天电子对抗, 2022, 38(4): 59-64.  
WANG X Y, WU T R. Analysis on OneWeb LEO satellite system and its military application[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2022, 38(4): 59-64.
- [13] 张静, 张珣. 对 OneWeb 卫星星座系统发展的思考[J]. 中国无线电, 2025(3): 40-43.  
ZHANG J, ZHANG X. Overview of the development of one web satellite constellation system and related thoughts[J]. China Radio, 2025(3): 40-43.
- [14] FEDERAL COMMUNICATIONS COMMISSION. OneWeb non-geostationary satellite system[R]. 2016.
- [15] FEDERAL COMMUNICATIONS COMMISSION. OneWeb non-geostationary satellite system (LEO) Phase 2: modification to authorized system[R]. 2016.
- [16] KOZHAYA S, KASSAS Z M. A first look at the OneWeb LEO constellation: beacons, beams, and positioning[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2024, 60(5): 7528-7534.
- [17] BLÁZQUEZ-GARCÍA R, CRISTALLINI D, UMMENHOFER M, et al. Capabilities and challenges of passive radar systems based on broadband low-Earth orbit communication satellites[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2024, 18(1): 78-92.
- [18] KOMODROMOS Z M, MORGAN S C, CLEMENTS Z L, et al. Network-aided pseudorange-based LEO PNT from OneWeb[C]// Proceedings of the 2025 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS). Piscataway: IEEE Press, 2025: 439-449.
- [19] CTC ADVANCED GMBH. OneWeb OW70L UT test report FCC ID: XXZ-INTOW70LDAC[R]. 2021.
- [20] ROHDE & SCHWARZ. Generate OneWeb compliant signals for receiver tests[EB]. 2018.
- [21] ROHDE & SCHWARZ. R&S® SMW-K130/-K355 OneWeb user-defined signal generation, OneWeb reference signals user manual [EB]. 2023.
- [22] HUGHES. OneWeb and Hughes managed LEO broadband security [EB]. 2025.
- [23] ETSI. Satellite earth stations and systems (SES); SC-FDMA based radio waveform technology for Ku/Ka band satellite service

(V1.1.1): TR 103 297 [EB]. 2017.

- [24] SORMUNEN L, HUIKKO T, RÖNTY V, et al. Simulative comparison of DVB-S2X/RCS2 and 3GPP 5G NR NTN technologies in a geostationary satellite scenario[C]//Proceedings of the 2025 12th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference and the 18th Signal Processing for Space Communications Workshop (ASMS/SPSC). Piscataway: IEEE Press, 2025: 1-8.
- [25] CHAMAILLARD B, TRAORÉ A, BORIOS N, et al. Physical layer simulative comparison of DVB-S2X/RCS2 and 3GPP 5G NR-NTN technologies over Geostationary Satellite Scenario[C]//Proceedings of the 2025 12th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference and the 18th Signal Processing for Space Communications Workshop (ASMS/SPSC). Piscataway: IEEE Press, 2025: 1-8.

#### [作者简介]



柴凌云 (1992-), 男, 博士, 中国航天科技集团商业卫星有限公司工程师, 主要研究方向为卫星互联网、星地融合网络。



张程 (1990-), 女, 博士, 中国航天科技集团商业卫星有限公司高级工程师, 主要研究方向为卫星通信系统设计。



龚思龙 (1995-), 男, 硕士, 中国航天科技集团商业卫星有限公司工程师, 主要研究方向为卫星总体设计。



白桐 (1992-), 男, 博士, 北京航空航天大学网络空间安全学院副教授, 主要研究方向为航空通信、低空通信、机载网络。



王程 (1992-), 男, 博士, 北京邮电大学电子工程学院副教授, 主要研究方向为卫星互联网、空天地一体化网络、频谱电磁兼容。



崔高峰 (1987-), 男, 博士, 北京邮电大学电子工程学院副教授, 主要研究方向为卫星互联网、天地一体化网络。