

基于 5G 的低轨道卫星通信系统传输技术研究

张 颖¹, 李婷婷¹, 解瑞云²

(1. 河南工学院 电子信息工程学院, 河南 新乡 453003; 2. 河南工学院 电缆工程学院, 河南 新乡 453003)

摘要: 传输是低轨道卫星通信系统运行过程中的重要环节, 但是现行传输技术应用效果并不理想, 不仅误码率比较高, 而且传输吞吐量较低。针对现行技术存在的不足, 提出基于 5G 的低轨道卫星通信系统传输技术。利用频域均衡方法对低轨道卫星通信上行链路用户信号进行检测, 补偿误差信号, 利用 5G 技术估计通信系统下行链路信道, 消除信号干扰, 实现基于 5G 的低轨道卫星通信系统传输。实验证明: 该技术低轨道卫星通信系统传输误码率不足 1%, 系统吞吐量超过 40 Mbps。该技术在低轨道卫星通信领域具有良好的应用前景。

关键词: 5G; 低轨道卫星通信系统; 传输技术; 频域均衡方法

中图分类号: TN927.23

文献标志码: A

文章编号: 2096-7772-(2024)02-0017-04

0 引言

随着全球信息社会的快速发展, 人们对通信的需求日益增长, 对通信质量的要求也越来越高。传统的地面通信网络^[1]在覆盖范围和传输速率等方面存在一定的局限性, 无法满足某些特定区域或特定应用场景的通信需求。低轨道卫星通信系统是一种利用低轨道卫星进行无线通信的系统, 具有覆盖范围广、传输速率高、可靠性高等优点。与传统的地面通信网络相比, 低轨道卫星通信系统^[2]可以实现对海洋、荒漠、高山等地区的覆盖, 为这些地区的用户提供高速、可靠的通信服务。此外, 低轨道卫星通信系统还可以用于军事、应急救援等领域。然而, 低轨道卫星通信系统也存在一些挑战和限制, 如信号衰减、多普勒频移、卫星寿命短等。此外, 低轨道卫星通信系统的传输时延较长, 且存在较高的误码率。因此, 如何克服这些挑战和限制, 提高低轨道卫星通信系统的传输性能和可靠性, 是当前研究的重点和难点。5G 技术作为新一代移动通信技术, 是当前全球通信领域的研究热点。与 4G 技术相比, 5G 技术在带宽、时延、可靠性等方面有了质的飞跃, 能够满足人们对高速、低时延、大容量、高可靠性的通信需求。同时,

5G 技术还具有支持大规模设备连接、低功耗等优点, 为物联网、边缘计算等新兴技术的发展提供了有力支撑。因此, 基于 5G 的低轨道卫星通信系统传输技术具有广阔的应用前景和巨大的市场潜力。

1 低轨道卫星通信上行链路用户信号检测

低轨道卫星通信系统^[3]传输分为上行链路用户信号检测与下行链路信道估计两个部分, 为了确保卫星通信传输过程中的信号质量, 在系统传输前需要对上行链路用户信号进行检测。考虑到低轨道卫星通信系统传输的用户信号是经过离散傅里叶变换后的频域数据, 因此, 本文采用频域均衡方法对卫星通信上行链路用户信号进行检测。卫星通信上行链路频域均衡方法是在正交频分复用技术的基础上发展而来的一种带宽无线通信信号检测技术。频域均衡是利用频域均衡器的频谱特征来补偿信号的频谱损耗, 保证信号在通过频域均衡器后趋近零失真。

低轨道卫星移动速度比较快, 频繁的波束切换会造成通信信道发生时变, 因此利用调解后的信号修正频域均衡器参数, 以此满足系统传输过程中上行链路用户信号的精准检测需求, 具体检测过程如图 1 所示。

收稿日期: 2024-01-05

基金项目: 河南省高等学校重点科研项目 (23B510006); 河南工学院科研反哺教学专项课题 (XJ2023006302); 河南省科技攻关项目 (242102210119)

第一作者简介: 张颖 (1989—), 女, 河南商丘人, 讲师, 博士, 主要从事信号处理、空间通信系统研究。

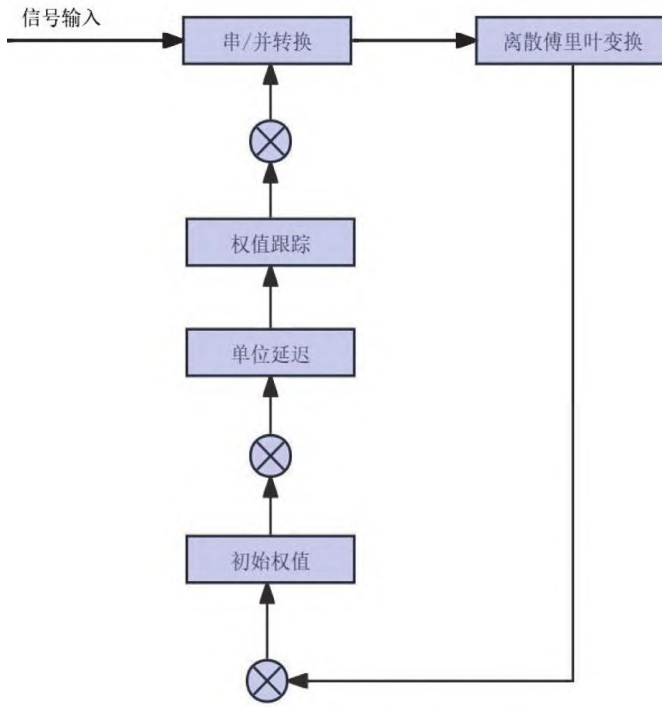


图1 低轨道卫星通信上行链路用户信号检测示意图

通信用户终端以块状形式发送训练序列,在解调第1个数据帧的基础上,利用离散傅里叶变换更新频域均衡器参数,并根据训练样本的判定结果校正信道参数,然后根据均衡后的参数重新更新频域均衡器权重,并与信道参数相结合,得到下一组发送信号的频域均衡权值,从而实现对时变信道的追踪。假设低轨道卫星接收到的多径信道干扰频域信号为 x ,用户发送训练序列,训练目标代价函数

$$J = \sum_{i=1} \lambda |d - y|^2 + \sigma \lambda \cdot W x h \quad (1)$$

式中: J 表示用户发送训练块训练目标代价函数; i 表示低轨道卫星通信系统上行链路载波数量; λ 表示小于单位向量的遗忘因子; d 表示用户发送的训练序列; y 表示频域均衡器输出信号; σ 表示正规化参数; W 表示通信系统信道均衡系数,即信道权值向量; h 表示信号传输信道的频域响应。信道均衡系数

$$W = \frac{y}{Kc} \quad (2)$$

式中: K 表示接收干扰信号频域形式, c 表示通信传输第 i 个载波接收的干扰信号与载波对应的参考信号的误差。对信道均衡系数求梯度,通过迭代计算将均衡系数与干扰信号做比值,得到均衡后的信号为

$$x_o = xJ/W \quad (3)$$

通过迭代计算补偿误差,以实现低轨道卫星通信上行链路用户信号的准确检测。

2 基于5G的卫星通信传输实现

低轨道卫星通信系统的信号在传输过程中必然会受到高山、建筑物等障碍物的干扰,使其幅值、相位、频率发生改变。因此,在完成对系统上行链路用户的信号检测后,还需要进行精确的信道估计,从而实现低轨道卫星通信系统传输。信道估计依据一个特定的信道模型,根据接收到的信号估计信道。为了实现对信道信息的快速、精确估计,可在低轨道卫星通信系统引入5G技术^[4-5]。

低轨道卫星通信系统下行链路采用时分多路复用(Time-Division Multiplexing, TDM)/频分复用(Frequency-Division Multiplexing, FDM)相结合的导频结构,该导频结构具有很好的导频负载可扩展性,且其导频开销与发送序列的阶次有关,因此在低秩性条件下仍能满足用户的要求。但是,该方法在切换多输入多输出模式时存在一定的局限性,并且还需要附加信号的支持。然而,尽管码分复用(Code Division Multiplexing, CDM)导频方案能够灵活地支持多种多输入多输出方案,但其在时、频域选择性信道中的导频资源消耗很大。低轨道卫星通信系统的下行链路对多输入多输出提出了更高的要求,因此,基于5G的系统传输下行链路采用TDM、FDM、CDM相结合的导频方式。低轨道卫星通信系统采用5G系统的导频结构,在该导频结构中5G通信协议TS30.151定义参考信号为相位追踪信号、调解参考信号以及信道状态参考信号,通信系统下行链路共享信道的参考信号实际是一种恒模导频信号,其用公式表示为

$$s(m) = \frac{1}{\sqrt{2(1-2c(n))}} \quad (4)$$

在5G通信传输中,将伪随机序列定义为

$$c(n) = (M + g) + ld \quad (5)$$

式中: M 表示第一个参考信号序列初始值, g 表示一个无线帧中的时隙号, l 表示时隙号中的导频符号, d 表示高层参数。

5G下行链路导频采用多种方式映射,针对不同的5G传输场景定义相应的参考信号,参考信号由映射方式、天线端口数量等因素决定,其导频映射形式采用低轨道卫星通信系统基站端使用的分布式映射模式发射信号,参考信号在一个时隙资源块内的放置方式为散列导频。在以上导频结构基础上,估计通信系统下行链路信道。5G下行链路估计过程中,在卫星通信系统基站端,通过信道编码、调制、层映射、增加导频等方式分配发送的信号给各天线端口,再经

过预编码、添加循环前缀 (Cyclic Prefix, CP) 后, 最终发送到信号接收端, 以此实现低轨道卫星通信系统传输。假设低轨道卫星基站具有根发射天线, 被分为多个导频占用相同资源块的天线端口集合, 如果天线端口的导频符号中含有导频信息, 为了方便将其定义为

$$x_o(4k+2s+s(m),l)\triangleq\varphi \tag{6}$$

式中: s 表示天线端口数量, l 表示导频占用相同资源块的天线端口集合数量, φ 表示导频符号数量。低轨道卫星通信系统基站按照映射矩阵映射含有导频的数据符号, 串并转换映射得到信号时域信息, 添加 CP, 再发射信号到信号接收端, 其用公式表示为

$$X=[x_o(f,l)E+XC-MK] \tag{7}$$

式中: X 表示通信系统载波上发送的信号, f 表示天线端口发射信号预编码, E 表示通信系统信道长度, XC 表示通信系统频域信道冲击响应矩阵, MK 表示载波信号上独立不相关的高斯白噪声。

通过以上对通信系统下行链路的估计运算, 消除了通信系统传输信道中的噪声干扰, 得到载波发送的信号, 将其发送到信号接收端, 信号接收端再快速进行傅氏变换, 并映射信号到信道矢量, 得到传输信息, 从而实现基于 5G 的低轨道卫星通信系统传输。

3 实验验证

3.1 实验准备与设计

低轨道卫星通信系统采样频率为 15.36 MHz, 通信信道模型采用改进的空间信道模型 (Spatial Channel Model, SCM), 天线配置 128Tx 4Rz, 每 5 个子帧构成一个无线帧, 每个基本的仿真步长为 1 个子帧, 表 1 为低轨道卫星通信系统仿真参数。

表 1 低轨道卫星通信系统仿真参数

序号	参数	数值
1	星载设备有效全向辐射功率 /dBW	34.15
2	星载设备噪声温度 /dBK	23.14
3	移动终端有效全向辐射功率 /dBW	-4.65
4	移动终端噪声温度 /dBK	28.46
5	卫星接收天线增益 /dB	3.45
6	接收机功率检测门限 /dBW	-152.36
7	大气、雨衰等损耗 /dB	0.42
8	通信带宽 /MHz	10
9	载频 /GHz	13.25
10	数据载波	600
11	子载波个数	1024

启用 8 个用户, 每个用户只装备 1 个天线, 低轨道卫星通信系统基站装备 8 个天线, 用户的速度为 25 km/h, 利用本文技术实现用户在低轨道卫星通信系统中信息和传输。

3.2 实验结果与讨论

此处使用误码率和吞吐量来衡量技术的性能, 误码率是衡量通信系统传输可靠性的一个重要指标, 它表示在传输过程中发生误码的比率。误码通常由信道噪声、干扰或其他信号质量下降的因素引起。通信系统传输误码率计算公式为

$$Pe=(N_{ry}/N_{wte})\times100\% \tag{8}$$

式中: Pe 表示低轨道卫星通信系统传输误码率, N_{ry} 表示信息传输错误比特数, N_{wte} 表示系统传输总比特数。

吞吐量是衡量通信系统传输数据速率的指标, 它表示在单位时间内成功传输的数据量, 其计算公式为

$$TH=K/T \tag{9}$$

式中: TH 表示低轨道卫星通信系统吞吐量; K 表示系统传输的数据量, 即成功传输的比特、字节或者帧的数量; T 表示系统传输时间。

误码率值越高, 吞吐量越低, 则表示低轨道卫星通信系统传输质量越低, 效果越差, 将本文技术与基于频谱动态控制的传输技术和基于边缘缓存的传输技术进行对比分析, 三种技术在低轨道卫星通信系统传输误码率与吞吐量两个方面的对比数据分别如表 2、表 3 所示。由表 2 可以看出本文技术误码率最低, 在 1% 以下, 相较于基于频谱动态控制的传输技术, 误码率降低了 6% 左右, 相较于基于边缘缓存的传输技术, 误码率降低了 11% 左右。由表 3 可以看出基于频谱动态控制的传输技术吞吐量最低, 其次为基于边缘缓存的传输技术, 本文技术吞吐量最高, 在 40 Mbps 以上。

表 2 低轨道卫星通信系统传输误码率 单位: %

传输量 /Byte	本文技术	基于频谱 动态控制传输	基于边缘 缓存传输
1000	0.26	5.62	10.26
2000	0.28	5.76	10.35
3000	0.29	5.95	10.25
4000	0.27	6.15	10.56
5000	0.26	6.25	10.42
6000	0.25	6.35	10.52
7000	0.28	6.24	10.62
8000	0.29	6.35	11.24

表 3 低轨道卫星通信系统传输吞吐量 单位: Mbps

用户数量	本文技术	基于频谱 动态控制传输	基于边缘 缓存传输
1	42.15	28.16	31.02
2	42.26	27.26	31.01
3	41.25	26.35	30.36
4	40.36	25.35	29.46
5	41.25	24.16	28.53
6	41.65	23.64	27.16
7	40.25	22.64	26.35
8	42.36	22.15	25.77

通过以上对比,证明了本文技术能够实现低轨道卫星通信系统的精准、快速传输,有效提高了低轨道卫星通信系统传输性能。由于采用了 5G 对卫星下行链路进行信道估计,可根据下行链路信道实际情况实现资源分配,从而保证了系统传输质量,本文设计具有良好的适用性与可行性。

4 结束语

为了解决卫星通信系统传输存在的误码率高、吞吐量低等问题,结合频域均衡方法,本文提出了一种基于 5G 技术的低轨道卫星通信系统传输技术。实验结果表明:该技术在传输速率、可靠性等方面均表现出优异性能。后续工作会优化本文所提出的技术方案,提高其适用性和鲁棒性,以推动基于 5G 的低轨道卫星通信系统的可持续发展。

参考文献:

[1] 张静,黄庭培,李世宝.反向散射通信网络中的能量优化路由协议[J].计算机工程与设计,2023,44(5):1281-1287.

[2] 刘洋,李长青,李炯,等.面向 Massive MIMO 低轨卫星通信系统的鲁棒高效波束成形设计[J].电讯技术,2023,63(7):947-955.

[3] 吉雪,陈艳,万千.国际搜救卫星系统中轨道卫星地面接收站的设计研究[J].现代雷达,2021,43(11):34-38.

[4] 朱昂立,方旭明.基于 5G 上下行解耦架构的服务轨道交通低轨卫星网络性能分析[J].铁道学报,2023,45(6):80-86.

[5] 梁震,崔高峰,王卫东.5G 低轨卫星两步随机接入方案及其 FPGA 实现[J].电讯技术,2022,62(12):1758-1765.

Research on Transmission Technology of Low-Orbit Satellite
Communication System Based on 5G

ZHANG Ying¹, LI Tingting¹, XIE Ruiyun²

(1. Electronic Information Engineering College of Henan Institute of Technology, Xinxiang 453003, China;
2. Cable Engineering College of Henan Institute of Technology, Xinxiang 453003, China)

Abstract: Transmission is an important link in the operation process of low-orbit satellite communication system, but the application effect of the current transmission technology is not ideal. Not only the bit error rate is relatively high, but also the transmission throughput of the communication system is low. Aiming at the shortcomings of the current technology, the transmission technology of the low-orbit satellite communication system based on 5G is proposed. The frequency domain equalization method is used to detect the user signal of the uplink of low-orbit satellite communication, and compensate the error signal. The downlink channel of the communication system is estimated by using 5G technology, signal interference is eliminated, and the transmission of the low-orbit satellite communication system based on 5G is realized. The experimental results show that the transmission error rate of low-orbit satellite communication system is less than 1%, and the system throughput is more than 40Mbps. The design technology has a good application prospect in the field of low-orbit satellite communication.

Key words: 5G; low orbit satellite communication system; transmission technology; frequency domain equalization method

(责任编辑 王 磊)