

低轨卫星通信中基于OTFS的信道估计技术综述

赵鑫杰, 刘子威, 张更新

(南京邮电大学通信与信息工程学院, 江苏 南京 210003)

摘要: 随着科技的发展和相关技术的不断完善, 低轨卫星通信已经成为世界各国争相追逐的技术热点。正交时频空技术的优势可以很好地解决高移动速度场景下宽带星地链路的信号传输问题, 有利于卫星、地面之间调制波形的统一, 实现空天地一体化通信。但是, 其传输性能受到信道估计精度影响, 而特殊的调制方式使得其信道估计方法不同于传统技术, 需要着重进行研究。对现有主流的OTFS信道估计方案进行相关介绍, 分析各种方案的优势与不足, 为后续研究奠定基础。

关键词: 信道估计; 正交时频空; 卫星通信

中图分类号: TN927+.2

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2022048

Overview of OTFS Based Channel Estimation Techniques in LEO Satellite Communication

ZHAO Xinjie, LIU Ziwei, ZHANG Gengxin

College of Communication and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications,
Nanjing 210003, China

Abstract: With the development of science and technology and the continuous improvement of related technologies, low earth orbit (LEO) satellite communication has become a hot technology that countries all over the world are chasing. The advantages of orthogonal time frequency spacetechnology can well solve the signal transmission problem of broadband satellite ground link in high moving speed scenarios, which is conducive to the unification of modulation waveforms between satellites and the ground, and the realization of space-based integrated communication. However, its transmission performance is affected by the accuracy of channel estimation, and the special modulation makes its channel estimation method different from the traditional technology, so it needs to be studied. The existing mainstream OTFS channel estimation schemes are introduced, and the advantages and disadvantages of each scheme were analyzed, which laied a foundation for subsequent research.

Keywords: channel estimation, orthogonal time frequency space, satellite communication

0 引言

低轨 (Low-Earth Orbit, LEO) 卫星具有发射成本低、传输损耗小、组网后能够实现全球无缝覆盖等优点, 受到全球诸多互联网、通信、航天航空企业的青睐^[1]。由于其高移动性的特点, 卫星和用户终端之间的相对运动会产生高多普勒频移。同时, LEO卫星通信场景下信道所展现的快变特性以及可能出现的多径, 会使得无线信道受到

快衰落与频率选择性衰落的影响, 二者都会对通信系统的性能造成极大的影响。

正交时频空 (Orthogonal Time Frequency Space, OTFS) 调制是解决这一问题的潜在候选技术。最早参考文献[2]提出OTFS技术, 其在高阶多输入多输出 (Multiple Input Multiple Output, MIMO) 系统和毫米波系统条件下, 证明了高移动性环境中OTFS相比正交

收稿日期: 2022-05-30; 修回日期: 2022-08-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.62171234, No.U21A20450, No.61971440); 江苏省前沿引领技术基础研究专项 (No.BK20192002)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No. 62171234, No. U21A20450, No. 61971440), Jiangsu Province Basic Research Project (No. BK20192002)

频分复用 (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) 具有更优越的性能^[3]。在OTFS中, 引入时延多普勒域中传输的思想^[4], 通过跨越整个时间和频率资源的二维正交基函数复用每个信息符号, 所有信息符号都经历时不变平坦衰落等效信道, 即OTFS可以有效对抗时频选择性衰落。因此, 在低轨卫星场景下对OTFS的研究是十分有意义的。

发送信号经无线信道传输后受到障碍物的影响, 会发生幅度、频率、相位改变。在接收端如果需要获取正确的信息, 需要从接收信号中将信道模型的参数估计出来, 即信道估计。由于在信号检测以及信道均衡时都需要利用信道估计得到的信道状态信息, 所以信道估计性能的好坏直接影响着无线通信系统的性能, 对于接收端是否可以正确地对接收数据进行解调意义重大。本文主要对现有的几种典型的OTFS的信道估计方法进行梳理和总结。

1 OTFS调制解调过程

OTFS波形同样是一种多载波调制技术, 其与OFDM技术有着密切的联系。其核心思想是在时延—多普勒二维空间中放置码元, 而非传统OFDM的子载波作为码元的承载信号。而时延—多普勒二维空间中能够有效分辨衰落信道中统计独立的多径分量, 使得OTFS能够选择最优的信道组合进行信息传输。但这恰恰也是OTFS波形关注信道估计方法的原因之一。下面对调制过程进行介绍。

调制器首先将信源映射为一组信息符号 $x[k, l]$, 放置在时延多普勒网格^[3]中, 通过反辛有限傅里叶变换 (Inverse Symplectic Finite Fourier Transform, ISFFT) 得到时频网格中的信号 $X[n, m]$ 。接下来, 将海森堡变换应

用于 $X[n, m]$, 添加循环前缀并进行串并变换后, 产生时域发射信号 $s(t)$ 。信号 $s(t)$ 通过具有复基带信道冲激响应 $h(\tau, \nu)$ 的无线信道传输, 接收到的信号 $r(t)$ 通过并串变换移除循环前缀后, 进行维格纳变换, 并在时间—频率域中产生 $Y[n, m]$ 。最后, 对 $Y[n, m]$ 应用辛有限傅里叶变换 (Symplectic Finite Fourier Transform, SFFT), 以获得时延—多普勒域中的接收符号 $y[k, l]$ ^[1]。在参考文献[5]中, 推导出整数多普勒条件下 $y[k, l]$ 和 $x[k, l]$ 的关系为

$$y[k, l] = \sum_{k'=-k_0}^{k_0} \sum_{l'=0}^{L_0} b[k', l'] \hat{h}[k', l'] x[k-k']_N [l-l']_M + v[k, l] \quad (1)$$

其中, $\hat{h}[k', l'] = h[k', l'] e^{-j2\pi \frac{k'}{NT} \frac{l'}{MF}}$, $b[k', l'] \in \{0, 1\}$ 是路径指示器, 即 $b[k', l'] = 1$ 时, 表示存在多普勒抽头为 k' 和时延抽头为 l' 的路径, 幅值为 $\hat{h}[k', l']$ 。 $v[k, l] \sim \text{CN}(0, \sigma^2)$ 表示低轨卫星接收机处方差为 σ^2 的加性高斯白噪声, $[\cdot]_N$ 和 $[\cdot]_M$ 分别表示模 N 和模 M 运算。

以单输入单输出 (Simple Input Simple Output, SISO) 为例, SISO-OTFS调制解调架构如图1所示。

2 信道估计

正因为信道估计对OTFS调制的重要性, 信道估计方法一直是OTFS波形设计的重点关注内容之一。本文对基于导频序列自相关特性的信道估计算法、基于嵌入式导频和保护符号的信道估计方案以及基于压缩感知的低导频开销信道估计方案等主流的信道估计方案进行综述, 其中基于压缩感知的低导频开销信道估计方案介绍了贪婪算法和贝叶斯压缩感知算法。在简要介绍各种方案核心算法的基础上, 还分析了它们的优点及不足之处。目

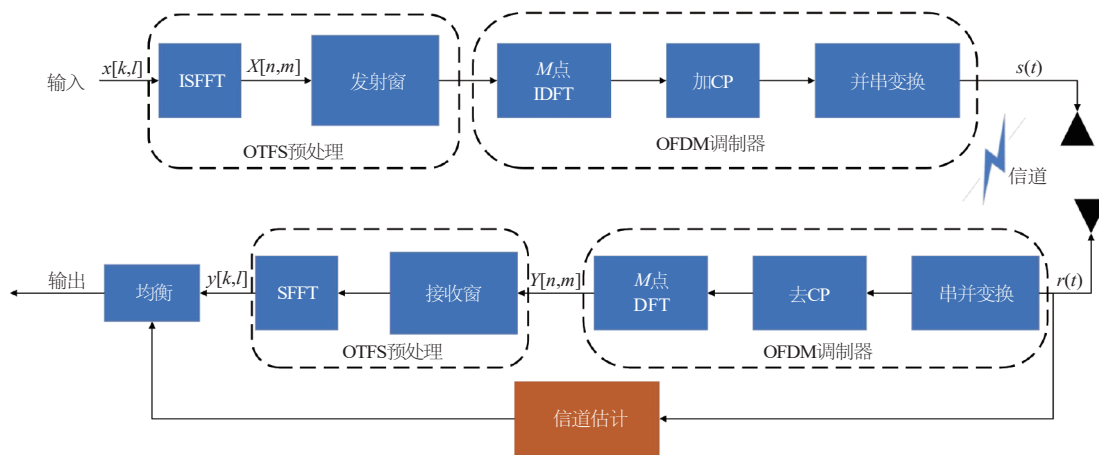


图1 SISO-OTFS调制解调架构

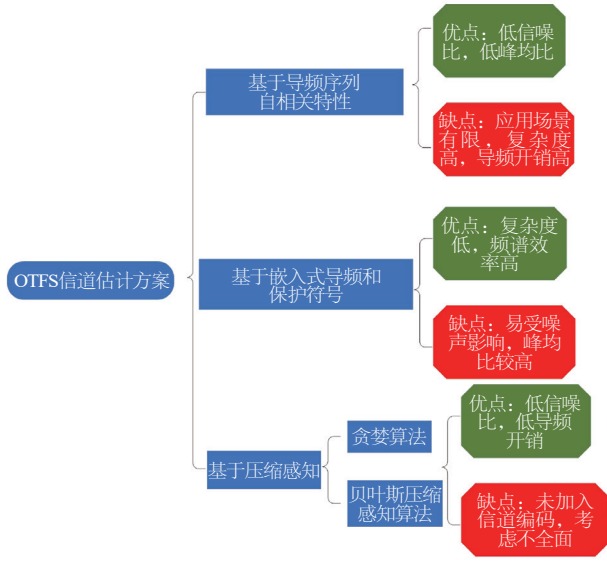


图2 不同信道估计方案的对比分析

前主流的信道估计方案的简要对比分析如图2所示。

2.1 基于导频序列自相关特性的信道估计算法

参考文献[5]提出了一种基于导频辅助的信道估计算法，将PN序列作为导频序列，在接收端使用二维匹配滤波的方法，利用PN序列的自相关特性，对时延—多普勒域信道每一径的信道增益、时延以及多普勒频移进行估计。具体步骤如下：已知长度为 N_p 的导频序列，发送信号 $S_A(t)$ 包含导频序列，经过信道后，接收端信号为

$$R_A(t) = \sum_{i=1}^P h_i e^{j2\pi v_i(t-\tau_i)} S_A(t-\tau_i) + w(t) \quad (2)$$

对其采样并截取 N_p 项可得序列

$$R[n] = R_A((K+n)/B), n=0, \dots, N_p-1 \quad (3)$$

接着定义发送序列 S 和接收序列 R 之间的匹配滤波器矩阵，通过对接收序列的相关参数进行估计来确定信道

中的关键参数，如时延和多普勒频移。此外，通过利用内积运算的双线性特性^[5]对信道增益进行估计，最终实现时延—多普勒域信道估计。

基于PN序列自相关特性的信道估计算法可以在较低的导频信噪比条件下实现良好的信道估计性能，同时由于PN序列的恒包络特性，也不会引入高的峰均功率比。然而，该算法的性能与PN序列长度相关，只有较长的PN序列才能保证较高的信道估计准确性，但较长的序列长度会带来较高的计算复杂度。该信道估计方案假设多个OTFS帧经历的时延—多普勒域的信道是时不变的，使用一个整体OTFS帧来实现信道估计。然而，由于卫星通信场景的高移动性，实际OTFS帧经历的时延—多普勒域信道并非时不变的，需要插入较多的导频帧，这会导致导频开销增加。

2.2 基于嵌入式导频和保护符号的信道估计方案

为了有效降低导频开销，提升频谱利用率，参考文献[7]介绍了一种嵌入式导频信道估计方案，通过在时延—多普勒域OTFS帧中插入导频信号和保护符号，实现了对时延—多普勒域信道的估计。发射机端OTFS帧的导频、保护符号和数据符号的位置设计如图3(a)所示。

接收数据一部分用于信道估计，其他用于数据检测，如图3(b)所示。用于信道估计的部分是信道与导频脉冲二维卷积的结果，对接收信号应用基于阈值的估计方法，当接收信号的能量大于某一个阈值时，即判定存在时延—多普勒域信道脉冲响应，将各个信道响应值估计后，可得到信道矩阵，从而可以进行信号检测。具体步骤如下：基于式(1)，用于信道估计的接收符号可以表示为

$$y[k, l] = \tilde{b}[l-l_p] \tilde{h}[[k-k_p]_N, l-l_p] x_p + v[k, l] \quad (4)$$

其中， $k \in [0, N-1], l \in [l_p, l_p + l_r]$ ，

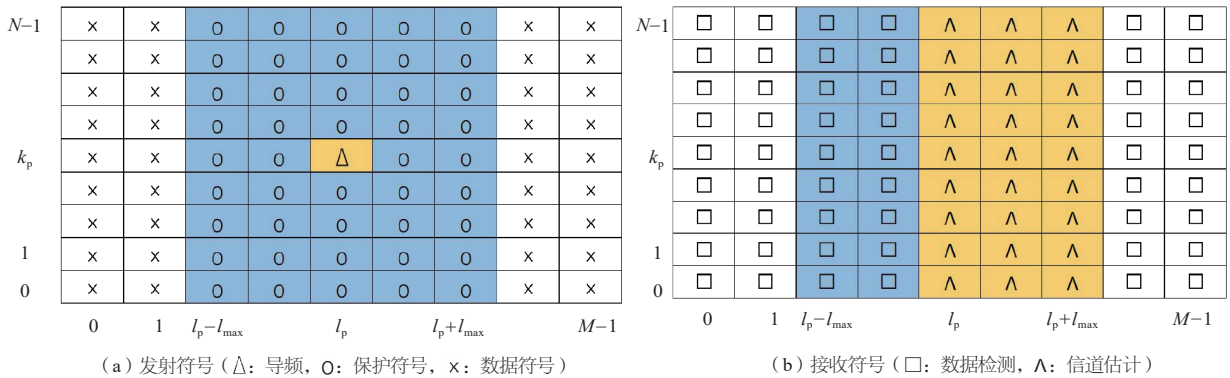


图3 发送端与接收端符号分布

$$\tilde{b}[l-l_p] = \begin{cases} 1, & \sum_{k'=-k_p}^{k_p} b[k', l-l_p] \geq 1 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad \text{是路径指示器,}$$

$$\tilde{h}[[k-k_p]_N, l-l_p] = \sum_{k'=-k_p}^{k_p} b[k', l-l_p] \tilde{y}[k', l-l_p, \kappa', [k_p+k'-k]_N]$$

是从位置 $[k_p, l_p]$ 的导频符号 x_p 到接收符号 $y[k, l]$ 的有效路径增益。 $\tilde{b}[l-l_p]=1$ 表示至少有一条时延抽头为 $l-l_p$ 的路径。应用以下基于阈值的信道估计方法, 对于 $k \in [0, N-1], l \in [l_p, l_p+l_r]$, 如果 $|y[k, l]| \geq \Upsilon$, 则 $\tilde{b}[l-l_p]=1$, $\tilde{h}[[k-k_p]_N, l-l_p] = y[k, l]/x_p$, 其中 Υ 是正的检测阈值, 否则, 就令 $\tilde{b}[l-l_p] = \tilde{h}[[k-k_p]_N, l-l_p] = 0$ 。

在较低的多普勒频移场景下, 可以通过减少 OTFS 帧中的保护符号数量, 增加信息符号的数量, 进一步提升频谱效率, 减少占用的通信资源, 但同时也会引起信息符号与导频符号之间的干扰增加, 因此性能会有一些损失。发射符号和接收符号安排如图4所示。在接收端, 同样可以通过设定阈值来判断是否存在路径, 实现对时延-多普勒域信道的关键参数的估计。

基于嵌入式导频辅助的信道估计算法与参考文献[6]中的信道估计方案相比, 所需的导频开销较小, 具有较高的频谱利用率。采用图3的方案时, 保护符号和导频开销约为8%, 采用如图4所示的方案时, 保护符号和导频开销的值非常小。例如在长期演进 (Long Term Evolution, LTE) 信道下, 导频及保护符号仅占 OTFS 帧内资源的1%^[8]。此外, 该信道估计方案易于实现, 信道估计复杂度较低, 而且很容易扩展至多用户和多天线场景。然而, 该方案易受到噪声的影响, 即对导频信噪比的要求较高, 当导频信噪比较低时, 由于噪声的影响较大, 一些增益较低的路径无法被有效识别, 会导致信道估计性能损失。参考文献[7]的研究结果表明, 通常该方案在导频信噪比在30 dB以上时, 才能实现较高的信道估计准确度, 而增加导频信号信噪比会导致 PAPR 增加, 使功率放

大器效率降低。

2.3 基于压缩感知的低导频开销信道估计方案

在星地通信中, 由于信道中散射体的数量有限, 信道在时延-多普勒域具备稀疏特性, 信道可以被建模为稀疏向量, 信道估计问题被转化为稀疏信号重构问题。因此, 参考文献[9]从利用信道稀疏特性的角度出发, 基于在 OTFS 帧内插入导频符号的思想, 提出了基于压缩感知的低导频开销信道估计方案。

2.3.1 基于贪婪算法的信道估计

贪婪算法是一类经典的稀疏向量重构算法, 常用的贪婪算法包括正交匹配追踪 (Orthogonal Matching Pursuit, OMP)^[10]、压缩采样匹配追踪 (Compressive Sampling Matching Pursuit, CoSaMP)^[11]、广义正交匹配追踪 (generalized OMP, gOMP)^[12]等。贪婪算法的核心原理是: 在迭代过程中不断寻找稀疏向量支撑的子集并不断更新该集合, 直到所有的稀疏向量中的非零元素都被找到 (假设能够全部精确定义), 便可将问题转换为求解具有唯一解的方程组^[13]。

不同贪婪算法在每次迭代过程中寻找非零元素的方式是不同的, 由于 OMP 算法相比其他贪婪算法具有更低的计算复杂度, 而稀疏信号重构性能也与其他贪婪算法接近, 因此采用 OMP 算法进行求解。OMP 算法在迭代过程中, 不断选取与残差相似程度最高的原子, 用选出的原子构成新矩阵, 再利用最小二乘法估计稀疏信道向量, 并利用所有选出的原子构成的矩阵来更新残差, 消除本次迭代过程中选出的原子对残差的影响, 之后进行下一次迭代^[14]。在第 i 次迭代时, 计算第 $(i-1)$ 次迭代时的残差 r^{i-1} 与某一原子的内积, 遍历完所有原子后, 找到内积最大项对应的原子, 并存储其索引, 即

$$l_i = \arg \max_k | \langle X_{p,k}, r^{i-1} \rangle | \quad (5)$$

接下来利用最小二乘法估计求解信道向量

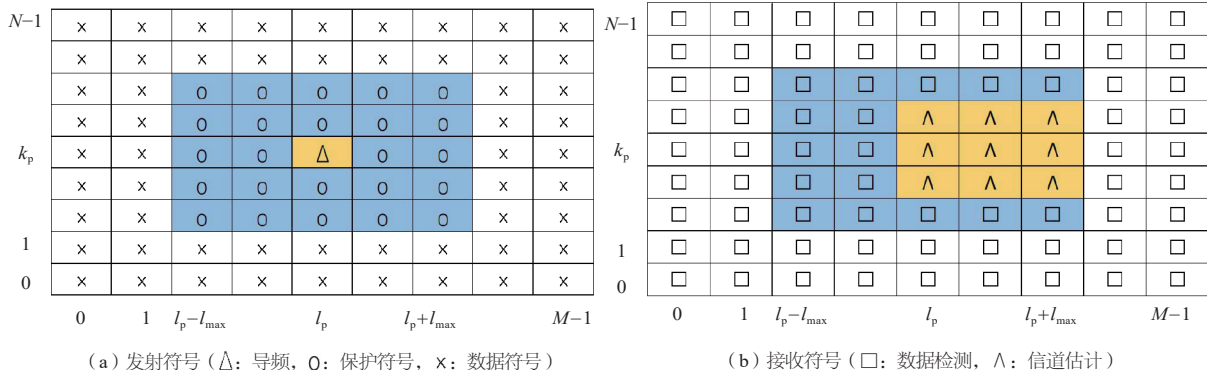


图4 低多普勒频移的发射端符号与接收符号分布

$$\mathbf{h}_w = [(\mathbf{X}_{p,\Omega})^H \mathbf{X}_{p,\Omega}]^{-1} (\mathbf{X}_{p,\Omega})^H \mathbf{y}_p \quad (6)$$

其中, $\mathbf{X}_{p,\Omega}$ 矩阵表示以集合 Ω 中元素为索引的列向量构成的矩阵, $\mathbf{y}_p$ 为接收端信号。存储此时的信道向量估计值后, 计算第 i 次迭代过程的残差

$$\mathbf{r}^i = \mathbf{y}_p - \mathbf{X}_p \mathbf{h}_w \quad (7)$$

重复以上迭代过程, 直至所有的非零元素被估计出来。贪婪算法大多需要使用信道向量的稀疏度作为停止迭代的条件, 可以采用相应的信道稀疏度估计方案获取信道向量稀疏度。

2.3.2 基于贝叶斯压缩感知的信道估计

贝叶斯压缩感知 (Bayesian Compressed Sensing, BCS) 算法在参考文献[14]中被提出, 是一种统计性稀疏信号重构算法, 属于非凸优化算法。BCS算法将信道向量看作一个随机向量, 假设其服从某种分布, 在已知信道的先验分布时, 利用贝叶斯估计对信道向量进行恢复。由于可以利用信道向量的先验分布, 与基于贪婪算法的稀疏信号重构算法相比, BCS算法在信道向量非严格稀疏的情况下, 仍然可以实现较优的信号重构准确度, 其对稀疏信号的恢复性能优于贪婪算法, 因此选择采用了贝叶斯算法来改善信道估计的准确度^[15]。具体步骤如下: 假设信道向量服从均值为零的高斯分布, 其方差由超参数 (hyper-parameter) 参数化, 即信道向量中的每个元素 h_i 服从零均值的高斯分布。假设超参数 Θ 已知, 可以利用最大后验概率准则求解 $\mathbf{h}_w$

$$\mathbf{h}_w = \arg \max p(\mathbf{h}_w | \mathbf{y}_p; \Theta) \quad (8)$$

其中, $\mathbf{h}_w$ 的后验概率可由贝叶斯公式求得

$$p(\mathbf{h}_w | \mathbf{y}_p; \Theta) = \frac{p(\mathbf{y}_p | \mathbf{h}_w; \mathbf{a}_0) p(\mathbf{h}_w; \mathbf{a})}{p(\mathbf{y}_p; \mathbf{a}, \mathbf{a}_0)} \quad (9)$$

$\mathbf{h}_w$ 的后验概率的具体求解过程可参考文献[9]。

参考文献[9]通过设置相应的星地模型参数, 对比了OMP算法和贝叶斯压缩感知两种稀疏信号重构算法的性能。仿真结果表明, 两种算法的性能与信噪比密切相关。当信噪比较低时, 基于BCS的低导频开销的信道估计方案性能更优; 当信噪比较高时, 基于OMP的低导频开销的信道估计方案性能更优。不同方案的性能比较如图5所示。

3 结束语

本文介绍的几种OTFS信道估计方案具有很多的优势, 能够针对不同需求解决导频开销、频谱效率的问题, 但同时面临诸多问题亟待解决。例如, OTFS系统的信道估计和导频设计比OFDM技术更具挑战性, 算法复杂度更高等, 目前的信道估计方案性能仍有进一步提升

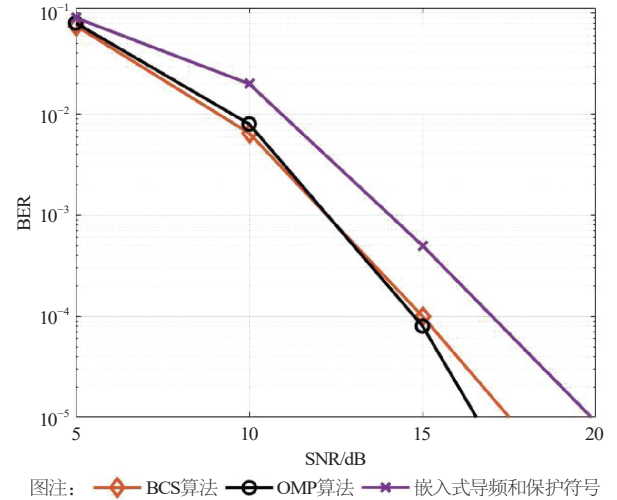


图5 信道估计方案性能比较

空间。鉴于目前的信道估计方案是基于SISO-OTFS系统的, 下一步可开展对MIMO-OTFS系统的信道估计方案的研究, 此外, 现有的OTFS信道估计方案多数是针对整数多普勒的研究, 今后研究可考虑引入分数多普勒的情况, 并对信道估计算法做出相应的改动, 以提升估计的准确性。

近年来, LEO卫星通信已经成为一项发展的技术热点。同时, 卫星信道的动态性、不准确性、大规模终端场景下的分簇估计需求 (如终端多、不可分、难以单独估计等) 为其发展带来了诸多挑战^[16]。本文通过分析LEO卫星通信面临的问题, 对几种解决不同问题的信道估计方案进行了比较总结, 分析了各种方案的优势和不足, 为卫星通信场景下应用OTFS的信道估计方法的进一步研究提供了一定的理论参考。

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] MONK A, HADANI R, TSATSANIS M, et al. OTFS-orthogonal time frequency space[J]. arXiv preprint arXiv:1608.02993, 2016.
- [3] HADANI R, RAKIB S, MOLISCH A F, et al. Orthogonal Time Frequency Space (OTFS) modulation for millimeter-wave communications systems[C]//Proceedings of 2017 IEEE MTT-S International Microwave Symposium. Piscataway: IEEE Press, 2017: 681-683.

- [4] HADANI R, RAKIB S, TSATSANIS M, et al. Orthogonal time frequency space modulation[C]//Proceedings of 2017 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-6.
- [5] RAVITEJA P, PHAN K T, JIN Q Y, et al. Low-complexity iterative detection for orthogonal time frequency space modulation[C]//Proceedings of 2018 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-6.
- [6] MURALI K R, CHOCKALINGAM A. On OTFS modulation for high-Doppler fading channels[C]//Proceedings of 2018 Information Theory and Applications Workshop (ITA). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-10.
- [7] RAVITEJA P, PHAN K T, HONG Y. Embedded pilot-aided channel estimation for OTFS in delay-Doppler channels[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(5): 4906-4917.
- [8] RAVITEJA P, PHAN K T, HONG Y, et al. Embedded delay-Doppler channel estimation for orthogonal time frequency space modulation[C]//Proceedings of 2018 IEEE 88th Vehicular Technology Conference. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-5.
- [9] 李天时. 卫星OTFS通信系统信道估计与信号检测研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
- LI T S. Research on channel estimation and signal detection of satellite OTFS communication system[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.
- [10] SAHOO S K, MAKUR A. Signal recovery from random measurements via extended orthogonal matching pursuit[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2015, 63(10): 2572-2581.
- [11] WANG J, KWON S, SHIM B. Generalized orthogonal matching pursuit[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2012, 60(12): 6202-6216.
- [12] NEEDELL D, TROPP J A. CoSaMP: Iterative signal recovery from incomplete and inaccurate samples[J]. Applied and Computational Harmonic Analysis, 2009, 26(3): 301-321.
- [13] KANG M, ALOUINI M S. Transmission of multiple description codes over wireless channels using channel balancing[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2005, 4(5): 2070-2075.
- [14] JI S, XUE Y, CARIN L. Bayesian compressive sensing[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2008, 56(6): 2346-2356.
- [15] WIPF D P, RAO B D. Bayesian learning for sparse signal reconstruction[C]//Proceedings of 2003 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2003. Proceedings. (ICASSP '03). Piscataway: IEEE Press, 2003: VI-601.
- [16] JAYAPRAKASH A, CHEN H Z, XIAO P, et al. Analysis of candidate waveforms for integrated satellite-terrestrial 5G systems[C]//Proceedings of 2019 IEEE 2nd 5G World Forum (5GWF). Piscataway: IEEE Press, 2019: 636-641.

[作者简介]



赵鑫杰 (1998-), 男, 南京邮电大学通信与信息工程学院博士生, 主要研究方向为卫星通信、空间信息网络等。



刘子威 (1989-), 南京邮电大学通信与信息工程学院副教授, 主要研究方向为卫星通信中的多用户检测、非正交接入技术等。



张更新 (1967-), 男, 南京邮电大学通信与信息工程学院教授, 主要研究方向为空间信息网络、卫星通信等。