

doi:10.13756/j.gtxyj.2024.230023.

无线通信技术

王宇琦, 江诗禹, 刘子威, 等. 基于低轨卫星PCMA信号的信道估计算法研究[J]. 光通信研究, 2024(3):230023.

Wang Y Q, Jiang S Y, Liu Z W, et al. Research on Channel Estimation Algorithm based on LEO Satellite PCMA Signal[J]. Study on Optical Communications, 2024(3):230023.

# 基于低轨卫星 PCMA 信号的信道估计算法研究

王宇琦, 江诗禹, 刘子威, 张更新

(南京邮电大学通信与信息工程学院, 南京 210003)

**摘要:**【目的】随着天地一体化信息网络的发展,低轨卫星通信系统迎来发展热潮,成对载波多址(PCMA)技术凭借其节省带宽资源的优点也逐渐向低轨卫星通信发展。然而,传统PCMA技术多用于高轨卫星中,无法适应低轨卫星信道高动态的衰落信道特性,使得PCMA接收端误码性能大大降低,其中的瓶颈在于重叠信号的信道估计与均衡技术。【方法】针对低轨卫星信道特点,文章提出了一种联合训练序列估计与自回归(AR)模型预测的信道估计方案。借鉴叠加训练序列信道估计的思想,引入了适用于PCMA混合信号信道估计的迭代方法,通过迭代提升训练序列信道估计的精确度;并利用AR模型实时预测数据序列的信道状态信息(CSI),同时也通过AR模型预测达到降低训练序列信道估计频次的目的,以适应低轨卫星信道的动态性。【结果】仿真结果表明,叠加训练序列信道估计的思路可以适用于PCMA信号中,经过迭代可以获得精确信道估计值。文章所提方法可以有效提高信道估计的精确性,且经过信号分离以及解调后,在信噪比 $>9$  dB时误码率可以达到 $10^{-3}$ 量级。【结论】文章所提信道估计方案并入PCMA接收方案中后,误码率损失在可接受范围内,可以支持PCMA技术在低轨卫星通信中的应用,算法结构简单,复杂度低,具有实际可行性。

**关键词:**低轨卫星;成对载波多址;信道估计;自回归模型

**中图分类号:**TN927 **文献标志码:**A

## Research on Channel Estimation Algorithm based on LEO Satellite PCMA Signal

WANG Yuqi, JIANG Shiyu, LIU Ziwei, ZHANG Gengxin

(School of Communications and Information Engineering, NJUPT, Nanjing 210003, China)

**Abstract:** 【Objective】With the development of the space-ground integrated information network, the Low Earth Orbit (LEO) satellite communication system is ushering in a development boom. The Paired Carrier Multiple Access (PCMA) technology is gradually developing to the low-orbit satellite communication due to its advantages of saving bandwidth resources. However, traditional PCMA technology is mostly used in high-orbit satellites, and cannot adapt to the highly dynamic fading channel characteristics of low-orbit satellite channels, which greatly degrades the bit error performance of the PCMA receiver. The bottleneck lies in the channel estimation and equalization technologies for overlapping signals. 【Methods】Aiming at the channel characteristics of LEO satellites, this paper proposes a channel estimation scheme that combines training sequence estimation and Autoregressive (AR) model prediction. Based on the idea of superimposed training sequence channel estimation, an iterative method suitable for PCMA mixed signal channel estimation is introduced to improve the accuracy of training sequence channel estimation through iteration. The AR model is used to predict the Channel State Information (CSI) of the data sequence in real time. The use of AR model can also reduce the frequency of channel estimation in training sequences, so as to adapt to the dynamics of LEO satellite channels. 【Results】The simulation results show that the idea of superimposed training sequence channel estimation can be applied to the PCMA signals, and accurate channel estimation can be obtained after iterations. The method proposed in this paper can effectively improve the accuracy of channel estimation. After signal separation and demodulation, the bit error rate can reach the order of  $10^{-3}$  when the signal-to-noise ratio is greater than 9 dB. 【Conclusion】A channel estimation method for PCMA signal is proposed in this paper. The simulation results show that the bit error rate loss is within an acceptable range, which can support the application of PCMA technology in low-orbit satellite communication. The proposed algorithm has the advantages of simple structure, low complexity, and high practical value.

**Key words:** LEO satellite; PCMA; channel estimation; AR model

## 0 引言

卫星通信具有通信容量大、通信距离远以及全球无缝覆盖等特点,近年来逐渐受到重视,尤其是低

轨(Low Earth Orbit, LEO)卫星通信系统。随着卫星互联网产业的布局,以SpaceX、OneWeb等企业为代表,均在打造LEO互联网星座,并引发全球LEO卫星互联网星座的积极布局<sup>[1-2]</sup>。目前限制卫

收稿日期:2023-02-19; 修回日期:2023-02-27; 纸质出版日期:2024-06-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(62171234, U21A20450, 61971440);江苏省前沿引领技术基础研究专项资助项目(BK20192002)

作者简介:王宇琦(1999-),男,安徽阜阳人。硕士,主要研究方向为卫星通信。

通信作者:刘子威,副教授。E-mail:lzw@njupt.edu.cn

© Editorial Office of *Study on Optical Communications*. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

星通信发展的主要问题是通信带宽容量受限,一般通过多址技术可以在一定程度上改善系统容量受限问题,但是目前地面通信中常用的多址技术<sup>[3]</sup>并不能有效解决卫星通信容量受限的问题。1998年,成对载波多址(Paired Carrier Multiple Access, PCMA)技术<sup>[4]</sup>被提出,该技术允许通信双方在同一频点同时工作,经过卫星接收转发后通信双方均收到相同的混叠后的信号,地球站根据合适的信号分离方法来得到有用信号。因此采用PCMA技术可以节省一半的带宽资源,将容量提升一倍。而对于接收到的PCMA信号来说,正确分离解调的前提在于能否从时频混叠信号中估计出信道参数信息。

在PCMA技术中,通信双方接收到的是混叠后的信号,训练序列会受到数据信号的干扰而严重降低信道估计性能。针对这个问题,文献[5-7]研究了叠加训练序列的信道估计技术,其使用一阶统计量进行估计运算,计算简单。文献[8]提出了基于结构总体最小二乘法的叠加训练序列迭代信道估计,通过迭代运算提高叠加训练序列信道估计性能。文献[9-10]提出了基于岭回归的迭代信道估计算法来提高信道估计的精度。文献[11]提出使用模拟信道数据训练长短期记忆(Long Short-Term Memory, LSTM)神经网络来自动确定信道状态信息(Channel State Information, CSI)。上述研究是关于地面移动通信中一种以提高频带利用率为目的而采用的叠加导频训练序列的信道估计方法,该方法训练序列与信息序列完全重叠,其估计结果仅仅应用于当前接收,并未考虑信道连续变化时的应用问题,主要针对短突发信号。PCMA系统主要针对连续通信,在本文LEO卫星通信的场景下,信道状况会随着时间快速改变,为此常规通信系统中就需要频繁插入导频进行信道估计,而由于LEO卫星的运动速度远大于一般地面网络考虑的场景,根据信道模型基本理论,其需要极其频繁地导频插入,大大降低了信道利用率。

综上,本文针对PCMA信道估计问题进行了研究,提出了一种联合训练序列估计与自回归(Autoregressive, AR)模型<sup>[12]</sup>预测的信道估计方案。通过间隔插入训练序列,进行训练序列信道估计与信道预测来解决LEO通信场景下PCMA信道估计问题。

## 1 PCMA系统与信号模型

PCMA系统中接收信号由通信双方发送的信号混叠而成,需要消除干扰信号的影响后才能对通

信方发送的信号进行解调。PCMA系统传输示意图如图1所示,图中, $y_1(t)$ 和 $y_2(t)$ 分别表示通信双方发送的信号,下行信号 $y_1(t)+y_2(t)$ 表示接收到的PCMA混合信号。

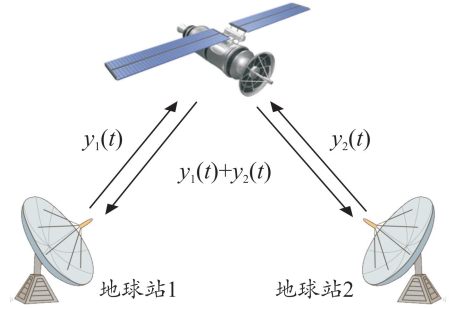


图1 PCMA系统传输示意图

Figure 1 Schematic diagram of PCMA transmission system

基于LEO卫星通信的PCMA接收方案如图2所示。以地球站1为例,由于在接收端本地中存有干扰信号 $y_1(t)$ 的信息序列作为参考,对混合信号的分离工作主要集中在对干扰信号参数估计以及抵消中。由于衰落信道等各种因素影响,使得参数估计的结果可能存在一定的误差。根据参数估计结果,重构干扰信号,再通过自适应抵消<sup>[13]</sup>的方法消除干扰信号的影响,完成PCMA混合信号的分离,得到有用信号 $y_2(t)$ 。最后结合参数估计得到的信道估计值 $\hat{h}$ 对有用信号进行均衡、同步处理,解调后获得有用信号的信息序列。

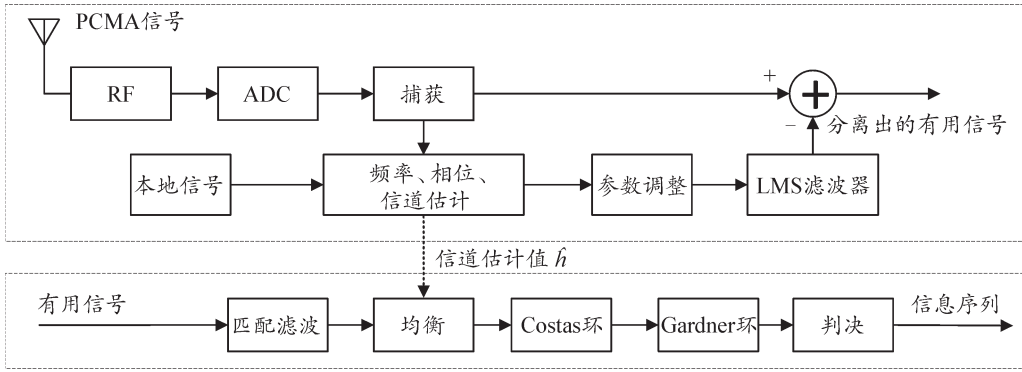
接收机接收到的下行PCMA信号的等效基带模型可以写成

$$z(t) = y_1(t) + y_2(t) = \sum_{k=1}^2 \sum_{l=0}^{N(t)} \alpha_{k,l}(t) e^{j2\pi f_{k,l}(t)t} s_k(t - \tau_{k,l}(t)) + v(t), \quad (1)$$

式中: $\alpha_{k,l}(t)$ 为经过信道传输后的衰落; $f_{k,l}(t)$ 为信号由于卫星运动造成的多普勒频移而产生的载波频率偏差; $N(t)$ 为信道可分辨多径数目; $\tau_{k,l}(t)$ 为各径对应的时延; $v(t)$ 为加性高斯白噪声(Additive White Gauss Noise, AWGN); $k$ 为PCMA中通信双方序号; $s_k(t)$ 为接收到的PCMA信号中的通信双方发送的数字调制复基带信号。 $s_k(t)$ 可以表示为

$$s_k(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} d_k(m) g_k(t - mT_k), \quad (2)$$

式中: $d_k(m)$ 为两路信号发送的符号; $T_k$ 为两路信号周期; $g_k$ 为升余弦成型滤波器的冲激响应。接收机收到的信号可以由等效基带发送信号 $s_k(t)$ 与时变信号冲激响应 $h(t, \tau)$ 卷积得到,因此 $h(t, \tau)$ 可以表示为



注:RF为射频;ADC为模/数转换器;LMS为最小均方。

图 2 衰落场景 PCMA 接收方案

Figure 2 PCMA reception scheme in fading scenario

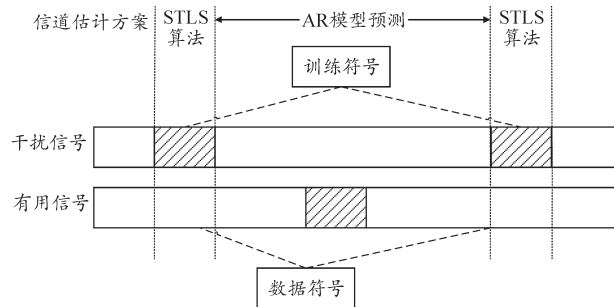
$$h(t, \tau) = \sum_{l=0}^{N(t)} \alpha_l(t) e^{j2\pi f_l(t)\tau} \delta(t - \tau_l(t)). \quad (3)$$

对接收到的信号  $z(t)$  按照采样速率  $M/T$  进行采样, 则  $z(n) \triangleq z(t) \Big|_{t=nT_s}$ , 其中,  $M$  表示过采样倍数,  $T_s$  为采样周期。

下文将基于以上 PCMA 信号模型探讨 LEO 卫星通信场景下 PCMA 接收端的信道估计问题, 假设接收端其他模块均理想。

## 2 具体算法

本文提出了一种适用于 LEO 卫星通信 PCMA 接收端, 联合训练序列估计与 AR 模型预测的信道估计方案。如上节所述, 在衰落场景下, 多径效应和多普勒频移对参数估计的准确性造成了很大的影响, 进而影响了 PCMA 信号的分离与解调结果。在这种情况下, 本文采用两阶段方法处理, 方案示意图如图 3 所示。



注:STLS为结构总体最小二乘法。

图 3 信道估计方案示意图

Figure 3 Schematic diagram of channel estimation scheme

首先利用训练序列获取当前时刻的信道估计值, 同时作为下一阶段预测的初值; 而在数据部分利用第一阶段处理得到的信道估计值, 基于时间相关性采用 AR 模型进行信道预测。由于在 LEO 卫星场景的信道特性下, AR 模型预测值随着时间推移

会出现准确性下降的问题, 所以插入训练序列的间隔与衰落程度有关, 也就是说, 在不同的仰角下工作需要设置不同的训练序列间隔。

### 2.1 基于训练序列的信道估计

接收序列中训练序列部分可以表示为

$$x(n) = \sum_{l=0}^{L-1} h(l)s(n-l) + v(n), n=0, 1, \dots, N-1, \quad (4)$$

式中:  $N$  为训练序列的长度;  $L$  为信道阶数;  $h(l)$  为信道系数;  $s(n)$  为卫星端转发序列, 可表示为

$$s(n) = b(n) + c(n), \quad (5)$$

式中:  $b(n)$  为通信方发送的数据, 是期望的目标数据;  $c(n)$  是我方发送的数据中训练序列部分, 为一周期序列, 满足  $c(n) = c(n+kP)$ , 其中  $P$  为周期,  $k$  为任意整数。假设数据序列部分均取自有限符号集, 且均值为 0, 方差为  $\sigma_b^2$ 。式(4)的系统模型可以写成矢量形式

$$\mathbf{x} = \mathbf{S}\mathbf{h} + \mathbf{v}, \quad (6)$$

式中:  $\mathbf{x} = [x(0)x(1)\dots x(N-1)]^T$ ,  $\mathbf{v} = [v(0)v(1)\dots v(N-1)]^T$ , 上标 T 表示转置运算;  $\mathbf{S}$  为  $N \times N$  维循环 Toeplitz 矩阵的前  $L$  列组成的矩阵, 即

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} s(0) & s(N-1) & \dots & s(N-L+1) \\ s(1) & s(0) & \dots & s(N-L+2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s(N-1) & s(N-2) & \dots & s(N-L) \end{bmatrix}. \quad (7)$$

根据式(5), 式(6)可以写成

$$\mathbf{x} = (\mathbf{B} + \mathbf{C})\mathbf{h} + \mathbf{v}, \quad (8)$$

式中:  $\mathbf{B}$  和  $\mathbf{C}$  具有与  $\mathbf{S}$  相同的结构; 由于已知本地训练信号  $c(n)$ , 则矩阵

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} c(0) & c(N-1) & \dots & c(N-L+1) \\ c(1) & c(0) & \dots & c(N-L+2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c(N-1) & c(N-2) & \dots & c(N-L) \end{bmatrix}. \quad (9)$$

由于  $E[b(n)]=0, E[v(n)]=0$ , 可以认为  $B=0$ 。最小二乘(Least Squares, LS)信道估计值为

$$\hat{h}_0 = C^T x, \quad (10)$$

式中, 上标  $T$  代表伪逆运算。

针对 PCMA 系统, 误差不仅存在于观测值中, 同时由于通信双方信号的叠加而存在于数据矩阵中, 此时 PCMA 问题可以近似为一个总体最小二乘(Total Least Squares, TLS)<sup>[14]</sup>问题, TLS 方法可以得到比 LS 方法更加合理的结果。由于  $S$ 、 $B$  和  $C$  具有 Toeplitz 结构, 所以针对 PCMA 系统的信道估计问题可以采用结构总体最小二乘法(Structured Total Least Squares, STLS)<sup>[15-16]</sup>来提高信道估计性能。STLS 算法中需要的初始信道估计值为  $\hat{h}_0$ , 数据矩阵  $A=C$ 。代入 STLS 算法中, 计算训练序列时刻的高精度信道估计值, 迭代步骤如下:

输入: 矢量  $x$ , 确定性矩阵  $A$ , 初始估计值  $\hat{h}_0$ , 容错值  $\eta$ , 循环次数  $i=1$ 。设  $\alpha$  为  $E$  的第一列,  $H$  由  $\hat{h}_0$  构造。令  $\alpha=0$ , 则  $E=0$ , 误差向量  $\beta=x-(A+E)\hat{h}_0$ 。

输出: 精确信道估计值  $\hat{h}_i$ , STLS 问题的误差  $\|\beta^T, \alpha^T\|_2$

(1) 根据 STLS 问题  $\min_{\alpha, h} \|\beta\|_2$  构造  $\min_{\Delta\alpha, \Delta h} \left\| \begin{bmatrix} H & A+E \\ I & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \Delta\alpha \\ \Delta h \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -\beta \\ \alpha \end{pmatrix} \right\|_2$ , 解超定方程得  $\begin{pmatrix} \Delta\alpha \\ \Delta h \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} H & A+E \\ I & 0 \end{bmatrix}^+ \begin{pmatrix} \beta \\ -\alpha \end{pmatrix}$ ;

(2) 令  $\alpha = \alpha + \Delta\alpha, \hat{h}_i = \hat{h}_{i-1} + \Delta h$ ;

(3) 通过  $\alpha$  重构  $E, \hat{h}_i$  重构  $H$ 。计算  $\beta = x - (A+E)\hat{h}_i$ ,

直到满足条件  $\|\Delta\alpha\|_2, \|\Delta h\|_2 \leq \eta$  或者循环次数  $i$  达到实验设定的值。此时的  $\hat{h}_i$  即为 STLS 算法迭代得到的精确信道估计值。

## 2.2 信道预测

信道预测基于连续时刻的 CSI 所具有的相关性, 采样点距离间隔不同时相关情况不同, 进而产生不同的预测效果。LEO 卫星信道被建模为延迟抽头线(Tap Delay Line, TDL)模型, 每个抽头上服从瑞利或莱斯分布。其可以视为一个多元时间序列, 即一个抽头的信道特征在时域上的变化为一个时间序列。本文采用 AR 模型进行时间序列预测, 对每个抽头信道特征进行独立预测。

对于时变信道  $t_T$  时刻的预测, 第  $l$  个抽头的信道特征 AR 模型可以表示为

$$h_l(t_T) = \sum_{p=1}^P \chi_{l,p} h_l(t_{T-p}) + \varepsilon_l(t_T), \quad (11)$$

式中:  $h_l(t_T)$  为  $t_T$  时刻信道延迟抽头线模型中的第  $l$  个抽头的信道特征成分;  $P$  为 AR 模型阶数;  $\chi_{l,p}$  为第  $l$  个抽头的信道特征成分的模型系数,  $p=1, 2, \dots, P$ ;  $\varepsilon_l(t_T)$  为随机且不完美的预测项。

在式(11)的两端同时乘以  $h_l(t_{T-p}), p=1, \dots, P$ , 得到  $P$  个方程并对每个方程取均值得到 Yule-Walker 方程组

$$\begin{cases} E[h_l(t_T)h_l(t_{T-1})] = \sum_{p=1}^P \chi_{l,p} E[h_l(t_{T-p})h_l(t_{T-1})] \\ E[h_l(t_T)h_l(t_{T-2})] = \sum_{p=1}^P \chi_{l,p} E[h_l(t_{T-p})h_l(t_{T-2})] \\ \vdots \\ E[h_l(t_T)h_l(t_{T-P})] = \sum_{p=1}^P \chi_{l,p} E[h_l(t_{T-p})h_l(t_{T-P})] \end{cases}, \quad (12)$$

令  $r_{l,ij} = E[h_l(t_{T-i})h_l(t_{T-j})], \chi_{l,p}$  可以通过以下方程估计得到:

$$\chi_l = R_l^{-1} u_l, \quad (13)$$

$$R_l = \begin{bmatrix} r_{l,11} & r_{l,21} & \cdots & r_{l,P1} \\ r_{l,12} & r_{l,22} & \cdots & r_{l,P2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{l,1P} & r_{l,2P} & \cdots & r_{l,PP} \end{bmatrix}, \quad (14)$$

$$u_l = [r_{l,01} \quad r_{l,02} \quad \cdots \quad r_{l,0P}]^H, \quad (15)$$

式中, 上标 H 表示共轭转置。

利用上文 STLS 算法对训练序列获取的 CSI 精确估计作为初值, 以及上述计算所得 AR 模型系数来预测数据段的 CSI 样本。对模型各个抽头信道特征成分均进行时间序列预测后, 即可得到  $t_T$  时刻的预测 CSI。

## 3 仿真分析

LEO 卫星星座大部分是面向宽带通信, 但仍然兼顾窄带通信。宽带通信信号的高载波频率、高符号速率特性会对估计性能造成影响。本文面向窄带低速场景, 为了测试文中提出的信道估计方案对 PCMA 可靠接收性能的提升, 实验通过两路同调制方式的信号叠加来模拟 PCMA 混合信号, 仿真的信道模型<sup>[17-19]</sup>参考国际电信联盟无线电通信部门 (ITU-Radiocommunication Sector, ITU - R) M. 1225 协议内容, 生成信道的系统参数以及窄带

信号产生的参数汇总如表 1 所示。

表 1 参数设定

Table 1 Parameter setting

仿真参数	参数值
信道模型	TDL 模型
功率谱仿真方法	莱斯正弦和算法
抽头数	4
通信仰角/ $^{\circ}$	{80, 60, 45}
多普勒频移/kHz	{8, 24, 34}
调制方式	BPSK
采样率/MSample/s	16
符号速率/MBaud	2
载波频率/GHz	2
滚降系数	0.35

注: BPSK 为二进制相移键控。

信道信息估计值  $\hat{h}$  与实际信道信息  $h$  的误差可以利用归一化均方误差 (Normalized Mean Squared Error, NMSE) 衡量, 其定义如下:

$$NMSE: e = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\sum_{l=0}^{L-1} \|\hat{h}(l) - h(l)\|^2}{\sum_{l=0}^{L-1} \|h(l)\|^2}, \quad (16)$$

式中,  $N$  为仿真实验的 Monte Carlo 次数, 这里取  $N = 500$ 。

实验 1: 仿真了第 1 阶段训练序列部分的信道估计性能, 主要是 STLS 算法对叠加训练序列处信道估计初值的性能提高程度。图 4 对比了叠加训练序列处基于 LS、STLS 的信道估计 NMSE。仿真结果表明, STLS 算法优于 LS 算法, 随着 STLS 的迭代次数的增加, 信道估计 NMSE 降低, 信道估计精度提高, 且 STLS 算法经过两次迭代后即可有效提高信道初值的估计精确度。

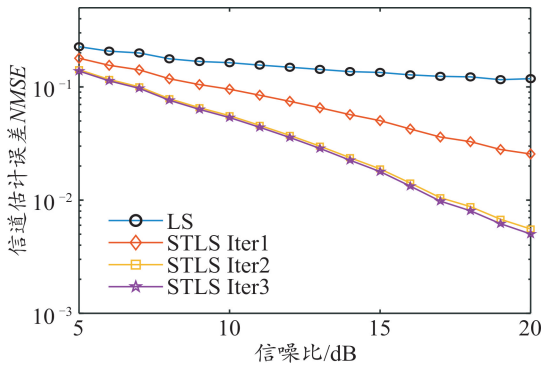


图 4 训练序列信道估计 NMSE 对比

Figure 4 Comparison of NMSE of training sequence-based channel estimation

实验 2: 仿真了第 2 阶段数据序列部分的信道

预测性能。图 5 分别展示了工作在仰角 80、60 和 45 $^{\circ}$  下的 PCMA 系统, 以训练序列处 STLS 算法得到的信道估计初值为时间样本进行信道预测, 所得到的数据序列部分的实时信道信息。仿真结果表明, AR 模型信道预测可以在一定程度上跟踪信道的变化, 且随着时间的增加信道预测的精确度下降。在高仰角情况下, 由于相对较小的多普勒频移, 信道预测可以工作更长时间。以  $e = 10^{-1}$  为再次插入训练序列重复两阶段处理的条件, 理想情况下仰角 80、60 和 45 $^{\circ}$  下插入的训练序列间隔分别相差 7.5、4.6 和 2.5  $\mu$ s。另外, 卫星过境期间, 变化的仰角会改变预测对象统计分布。随着仰角的变化, 信号在空中传播的路径会发生改变, 传输路径中实际的多径合成情况会发生变化, 导致信道时变, 进而信道的宽平稳特性只能看作短时平稳处理, 这种变化会影响 AR 模型的预测精度。所以在实际工作中要考虑多种因素, 以此调整训练序列的插入时间间隔来获取信道估计复杂度与准确性的折中。

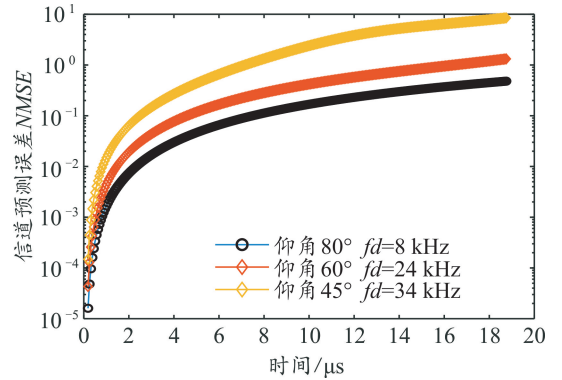


图 5 不同仰角下 AR 模型信道预测 NMSE 对比

Figure 5 Comparison of channel prediction NMSE of AR model at different elevation angles

实验 3: 仿真了 PCMA 接收方案在加入了文中所提的信道估计方案后接收端的信息误码率。图 6 所示为在仰角 80 $^{\circ}$  时未进行信道估计的 PCMA 接收误码率和加入了本文信道估计方案的 PCMA 接

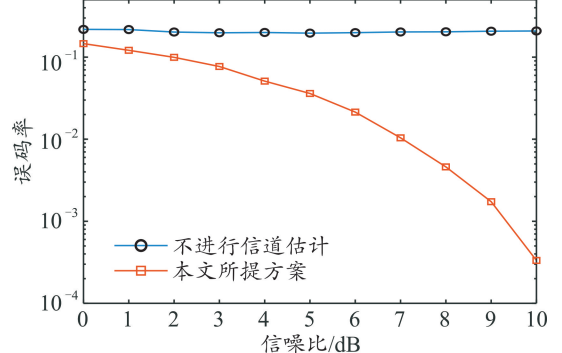


图 6 PCMA 接收方案误码率对比

Figure 6 Comparison of BER of PCMA receiving schemes

收误码率对比。仿真结果表明,本文所提算法可以在很大程度上解决 LEO 卫星场景下的衰落信道问题,当信噪比 $>9$  dB 时,误码率可以达到  $10^{-3}$  量级,本文所提算法使得误码率随信噪比下降较为明显,证明了算法的有效性。

## 4 结束语

本文在 LEO 卫星通信的背景下,为实现 PCMA 系统的可靠接收,提出了联合训练序列估计与 AR 模型预测的信道估计方案。通过仿真确定了将 STLS 应用在 PCMA 信号的训练序列信道估计中,并通过卫星过境仰角来确定训练序列的插入间隔,AR 模型预测来降低训练序列估计的频次,最终将该方案运用在 PCMA 接收中。仿真实验表明,该方案可以有效解决窄带场景下信道估计的问题,并实现 PCMA 接收方案的可靠接收。算法复杂度低,具有实际意义。而宽带场景所带来的复杂信道结构和设计复杂度问题,在后续的研究中会进一步考虑。

### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] Qu Z, Zhang G, Cao H, et al. LEO Satellite Constellation for Internet of Things [J]. *IEEE Access*, 2017, 5: 18391–18401.
- [3] Zhang X, Zhu L, Li T, et al. Multiple-user Transmission in Space Information Networks: Architecture and Key Techniques [J]. *IEEE Wireless Communications*, 2019, 26(2): 17–23.
- [4] Dankberg M. Paired Carrier Multiple Access (PCMA) for Satellite Communications [C]//17th AIAA International Communications Satellite Systems Conference and Exhibit. Yokohama, Japan: AIAA, 1998: 1398.
- [5] Orozco-Lugo A G, Lara M M, McLernon D C. Channel Estimation Using Implicit Training [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2004, 52(1): 240–254.
- [6] Zhou G T, Viberg M, McKelvey T. A First-order Statistical Method for Channel Estimation [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2003, 10(3): 57–60.
- [7] Ghogho M, McLernon D, Alameda-Hernandez E, et al. Channel Estimation and Symbol Detection for Block Transmission Using Data-dependent Superimposed Training [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2005, 12(3): 226–229.
- [8] 李大超,马珂. 总体最小二乘的改进与信道估计应用 [J]. *舰船电子工程*, 2014, 34(03): 44–47.
- Li D C, Ma K. Total Least Squares' Improvement and Application in Channel Estimation [J]. *Ship Electronic Engineering*, 2014, 34(03): 44–47.
- [9] Jing X, Li M, Liu H, et al. Superimposed Pilot Optimization Design and Channel Estimation for Multiuser Massive MIMO Systems [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67(12): 11818–11832.
- [10] Jiao J, Zhou J, Wu S, et al. Superimposed Pilot Code-domain NOMA Scheme for Satellite-based Internet of Things [J]. *IEEE Systems Journal*, 2020, 15(2): 2732–2743.
- [11] AbdelMoniem M, Gasser S M, El-Mahallawy M S, et al. Enhanced NOMA System Using Adaptive Coding and Modulation based on LSTM Neural Network Channel Estimation [J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(15): 3022.
- [12] Kim H, Kim S, Lee H, et al. Massive MIMO Channel Prediction: Kalman Filtering vs. Machine Learning [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2020, 69(1): 518–528.
- [13] Panse V, Jain T K, Sharma P K, et al. Digital Self-interference Cancellation in the Era of Machine Learning: A Comprehensive Review [J]. *Physical Communication*, 2022, 50: 101526.
- [14] Golub G H, Van Loan C F. An Analysis of the Total Least Squares Problem [J]. *SIAM Journal on Numerical Analysis*, 1980, 17(6): 883–893.
- [15] Rosen J B, Park H, Glick J. Total Least Norm Formulation and Solution for Structured Problems [J]. *SIAM Journal on Matrix Analysis and Applications*, 1996, 17(1): 110–126.
- [16] Lemmerling P, Mastronardi N, Van Huffel S. Fast Algorithm for Solving the Hankel/Toeplitz Structured Total Least Squares Problem [J]. *Numerical Algorithms*, 2000, 23: 371–392.
- [17] ITU-R M. 1225-1998, Guideline for Evaluation of Radio Transmission Technologies for IMT-2000 [S].
- [18] Zheng S, Liu W, Deng Z, et al. A Modified S-Band Satellite Channel Simulation Model [C]//2021 IEEE 4th International Conference on Electronics Technology (ICET). Chengdu, China: IEEE, 2021: 722–726.
- [19] Zheng Y R, Xiao C. Improved Models for the Generation of Multiple Uncorrelated Rayleigh Fading Waveforms [J]. *IEEE Communications Letters*, 2002, 6(6): 256–258.