

基于智能反射面辅助矿井通信系统信道估计

刘洋^{1,2}, 王希阳^{1,2}, 钱燕芝^{1,2}, 王斌^{1,2}

(1. 西安科技大学通信与信息工程学院, 西安, 710054; 2. 西安市网络融合通信重点实验室, 西安, 710054)

摘要 针对矿井下复杂、随机的无线信道特性所导致的信道估计准确度低的问题, 结合智能反射面 IRS 技术, 提出了井下 IRS 辅助多用户通信系统模型, 通过优化传输路径、重新配置无线传输环境, 提高井下信道估计准确度。首先, 结合 IRS 技术, 建立了井下 IRS 辅助多用户信号传输模型, 基于该模型推导了平行因子分解信道估计算法, 并仿真了该算法在 IRS 辅助矿井通信系统中的性能。仿真结果表明, 与传统的最小二乘 (LS) 算法和正交匹配追踪算法相比, 在归一化均方误差为 10^{-2} 时, PARAFAC 分解算法信噪比可降低约 8 dB, 且算法执行时间略小于 LS 算法。

关键词 矿井无线通信; 信道估计; 智能反射面; 均方误差

DOI 10.3969/j.issn.2097-1915.2024.05.015

中图分类号 TD655 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2024)05-0115-06

A Channel Estimation for Intelligent Reflecting Surface Aided Mine Wireless Communications

LIU Yang^{1,2}, WANG Xiyang^{1,2}, QIAN Yanzhi^{1,2}, WANG Bin^{1,2}

(1. College of Telecommunication and Information Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. Xi'an Key Laboratory of Network Convergence Communication, Xi'an 710054, China)

Abstract Aimed at the problems that mine wireless communications are low-accuracy in channel estimation caused by complicated and random characteristics, a multi-user mine communication system assisted by intelligent reflecting surface (IRS) technique is proposed in this paper to improve the accuracy of channel estimation by optimizing the transmission path and reassigning the wireless transmission environment. First, in combination with IRS technique, a model of the IRS-assisted multi-user information transmission in the mine is established. And then, the parallel factor (PARAFAC) decomposition channel estimation algorithm is derived, and the performances of PARAFAC algorithm in the IRS-assisted mine wireless communications is simulated based on the model. The simulation results show that compared with the traditional least-square (LS) algorithm and orthogonal matching pursuit algorithm, the proposed PARAFAC algorithm can obtain about 8 dB signal-to-noise ratio (SNR) gain at the same normalized mean-square error 10^{-2} while the execution time is slightly less than that of LS algorithm.

Key words mine wireless communications; channel estimation; intelligent reflecting surface; mean-square error

收稿日期: 2023-10-12

基金项目: 国家自然科学基金联合基金重点项目 (U19B2015)

作者简介: 刘洋 (1988-), 女, 河南洛阳人, 讲师, 博士, 研究方向为矿井通信。E-mail: lyang@xust.edu.cn

引用格式: 刘洋, 王希阳, 钱燕芝, 等. 基于智能反射面辅助矿井通信系统信道估计[J]. 空军工程大学学报, 2024, 25(5): 115-120. LIU Yang, WANG Xiyang, QIAN Yanzhi, et al. A Channel Estimation for Intelligent Reflecting Surface Aided Mine Wireless Communications[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2024, 25(5): 115-120.

在矿井通信系统中,由于不同形状巷道的纵横交错、粗糙和不规则的巷道壁表面、空气介质的潮湿和粉尘以及按生产需求布放的各种设备等因素,导致矿井的无线信道传输特性复杂且特殊,信号传输损耗严重,会出现信号衰减、失真以及多径干扰的现象,极大地影响了矿井通信系统的稳定性与可靠性^[1]。高效可靠的井下通信系统是实现矿井下安全生产的重要保障,信道估计技术作为其中的一个关键环节,其估计性能的好坏将直接影响整个系统的通信质量。由于井下复杂多变的环境会增加信道的复杂性和随机性,导致信号衰落严重,造成接收信号判决错误,因此需要通过信道估计,利用已知的接收信号估计出信道的状态信息,在幅度和相位上对接收信号进行补偿,使矿井通信系统信号传输的可靠性得到提升^[2]。

大量的研究工作致力于提高矿井通信系统信道估计的准确度。文献[3]针对煤矿井下无线通信系统提出了一种基于离散余弦变换(discrete cosine transform, DCT)的信道估计算法。该算法具有较低的均方误差和误码率,易于硬件实现,具有较高的实用价值。文献[4]提出了改进的广义正交匹配追踪(orthogonal matching pursuit, OMP)算法,可以提升信道估计性能,并针对系统稀疏度未知的情况,进一步研究了改进的稀疏自适应压缩感知重构算法,在提升信道估计准确度的同时使得系统的频谱利用率更高。文献[5]建立了煤矿井下正交频分复用系统模型,研究了井下正交频分复用信道最小二乘(least-square, LS)算法及最小均方误差估计算法,并提出了利用曲线拟合方法实现数据符号处信道系数的估计算法,在保证估计性能的前提下,大大降低实现复杂度。

近年来,智能反射面(intelligence reflecting surface, IRS)技术因其能够智能地配置无线传播环境、灵活可重构、低功耗低成本、高谱效高能效等特性成为6G潜在使能关键技术之一^[6]。目前,关于IRS辅助无线通信系统的研究大多集中于传统地面无线通信系统,而文献[7]首次指出了IRS技术在地下应用的可能性,而将IRS技术应用于矿井无线通信系统的研究尚未看到。由于矿井中存在大量复杂的设备、工作人员和金属障碍物和干扰源,容易造成无线信号的衰减和阻断,信号覆盖范围有限。而IRS技术一方面能够优化信号传播的路径和幅度,从而增强信号的强度、减少干扰,同时改善多径传播效应,扩大信号的覆盖范围,另一方面,IRS技术还具备调整反射配置的能力,通过精确调节电磁波的传播方向来实现信号的折射和反射,进一步提高信

号在矿井中传输的质量,从而显著提升矿井下信道估计的准确性和整体系统性能。

综上,本文结合IRS技术,建立了IRS辅助的矿井下多用户信息传输模型,基于该模型提出了平行因子(parallel factor, PARAFAC)分解算法,该算法通过将高维的级联信道矩阵分解成多个低秩矩阵的线性组合,完成对IRS辅助矿井通信系统中的发射信道、接收信道和级联信道的信道估计,仿真结果表明本文所提出的PARAFAC算法相较于传统的LS算法和OMP算法,在不增大复杂度的同时有效提升矿井下信道估计的准确度。

1 系统模型

1.1 矿井无线信道模型

由于井下环境特殊,如众多的机电设备、巷道壁的倾斜角、巷道壁的粗糙程度等,会导致矿井下的无线信道与室外的信道环境存在较大差异。井下多径传播现象十分复杂,通常可以把多径传播描述为一个空间和时间上的随机过程。通过大量测量和统计分析发现,如果在收发天线之间不存在直射分量或者支配路径,那么多径信号的衰落幅度可以描述为Nakagami- m 分布^[8]。

Nakagami- m 分布是一种较灵活的信道估计模型,可以通过改变 m 的值来描述多径信号的不同统计特性,其概率密度函数为:

$$p(\alpha) = \frac{2}{\Gamma(m)} \left(\frac{m}{2\sigma^2}\right)^m \alpha^{2m-1} e^{\left(-\frac{m\alpha^2}{2\sigma^2}\right)} \quad (1)$$

式中: $\Gamma(m)$ 为Gamma函数; m 为表征信道衰落程度的形状因子, $m \geq 1/2$, m 越大,信道衰落程度越小, $m = \infty$ 时基本上无衰落; α 为多径信号的幅度; σ^2 为噪声功率。在矿井通信中, m 一般取值范围为 $1 \leq m < 4$ ^[9]。

1.2 IRS辅助矿井通信系统信号传输模型

IRS技术是一种通过对入射信号的定向反射实现重构无线通信传输环境的新技术,它能够有效降低信道损耗,扩大通信范围,提高频谱利用率,优化信号传输质量。与传统的天线技术不同,IRS不能直接发射或接收信号,需要利用介质表面的反射单元被动地调整信号的相位和幅度,以实现信号的聚焦和消除干扰的目的。

IRS是由电磁材料组成的可重构表面,旨在改变无线环境以增强无线网络的性能。IRS典型的结构通常由金属铁片、铜板和控制电路板组成。IRS表面含有多个微小的反射元件,每个反射元件可以通过引入变容二极管、PIN二极管、微机电系统等电

子元件来实现独立地调整入射信号的相位和幅度,实现对信号的控制和优化,反射面由 N 个成本价低且没有配备信号处理能力的反射单元组成,通常呈UPA(uniform planar array)均匀平面排列。

假设 x_n 为入射到 IRS 表面上第 n 个反射单元的入射信号, y_n 为对应的反射信号;定义 $\beta_n \in [0, 1]$ 为第 n 个反射单元对入射信号 x_n 的幅度调节系数, $\varphi_n \in [0, 2\pi)$ 为第 n 个反射单元对入射信号 x_n 的相位调节系数; $n=1, 2, \dots, N$, N 为 IRS 反射单元个数。反射信号 y_n 可表示为:

$$y_n = \beta_n e^{j\varphi_n} x_n \quad (2)$$

IRS 上每一个反射单元反射的反射信号均可以用式(2)表示,通过控制器改变某一特定反射单元的幅度调节系数和相位调节系数,来控制该反射单元对入射信号的幅度和相位调整。

IRS 辅助矿井通信系统模型如图 1 所示。

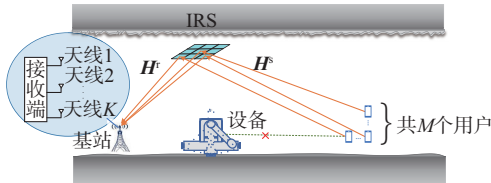


图 1 IRS 辅助矿井通信系统信号传输模型

Fig. 1 Signal transmission model of IRS-assisted mine communication systems

考虑一个配备 K 根天线的基站与 M 个单天线终端之间的上行链路通信,假设直接链路被一采矿机堵塞。IRS 水平布放在终端和基站之间的井下设备的巷道壁顶部,终端和基站之间的通信是通过具有反射单元的 IRS 来实现的^[10]。假设 T 个连续时隙内, M 个终端的发送信号表示为 $\mathbf{X} \in \mathbb{C}^{M \times T}$, IRS 共有 N 个反射单元,总的可用 IRS 相位配置数目为 P ,构成 IRS 相位配置矩阵 $\Phi \in \mathbb{C}^{P \times N}$,那么基于第 p ($p=1, 2, \dots, P$) 个 IRS 相位配置接收信号 $\mathbf{Y}_p \in \mathbb{C}^{K \times T}$ 可简要表示为:

$$\mathbf{Y}_p \triangleq \mathbf{H}^r \mathbf{D}_p(\Phi) \mathbf{H}^s \mathbf{X} + \mathbf{W}_p \quad (3)$$

式中: $\mathbf{D}_p(\Phi) \triangleq \text{diag}([\Phi]_{p,:})$, $[\Phi]_{p,:}$ 为第 p 个 IRS 相位配置,对应 IRS 相位配置矩阵 Φ 的第 p 行; $\mathbf{H}^r \in \mathbb{C}^{K \times N}$ 为 IRS 和基站之间的信道矩阵; $\mathbf{H}^s \in \mathbb{C}^{N \times M}$ 为终端和 IRS 之间的信道矩阵; $\mathbf{W}_p \in \mathbb{C}^{K \times T}$ 为加性复高斯白噪声。

2 基于 PARAFAC 分解的 IRS 辅助矿井系统信道估计

PARAFAC 分解是多用户通信系统中估计多个大信道矩阵的有效方法,它能够将高维矩阵分解

成多个低秩矩阵的线性组合,从而降低信道估计的复杂度^[11]。

首先对 PARAFAC 分解原理进行简单介绍。设二维矩阵 $\mathbf{A} \in \mathbb{C}^{I \times R}$, $\mathbf{B} \in \mathbb{C}^{J \times R}$ 和 $\mathbf{C} \in \mathbb{C}^{K \times R}$, 相应元素分别表示为 $\mathbf{A}_{i,r}$, $\mathbf{B}_{j,r}$ 和 $\mathbf{C}_{k,r}$, $i=1, 2, \dots, I$, $j=1, 2, \dots, J$, $k=1, 2, \dots, K$, $r=1, 2, \dots, R$ 。利用二维矩阵 \mathbf{A} , \mathbf{B} 和 \mathbf{C} 可构造一个三维矩阵 $\mathbf{D} \in \mathbb{C}^{I \times J \times K}$, 如式(4)所示:

$$\mathbf{D}_{i,j,k} \triangleq \sum_{r=1}^R \mathbf{A}_{i,r} \mathbf{B}_{j,r} \mathbf{C}_{k,r} \quad (4)$$

则 \mathbf{D} 的矩阵切片可表示为:

$$\begin{aligned} \mathbf{D}_{i,:,:} &= \mathbf{B} \text{diag}(\mathbf{A}_{i,:}) \mathbf{C}^T, i=1, 2, \dots, I \\ \mathbf{D}_{:,j,:} &= \mathbf{C} \text{diag}(\mathbf{B}_{j,:}) \mathbf{A}^T, j=1, 2, \dots, J \\ \mathbf{D}_{:,:,k} &= \mathbf{A} \text{diag}(\mathbf{C}_{k,:}) \mathbf{B}^T, k=1, 2, \dots, K \end{aligned} \quad (5)$$

接下来,基于上述 PARAFAC 分解原理对 IRS 辅助的矿井通信系统进行信道估计。假设发送的导频信号 \mathbf{X} 为正交导频信号,满足 $\mathbf{X}\mathbf{X}^H = \mathbf{I}_M$, 则式(3)中的接收信号 \mathbf{Y}_p 去除导频符号后,可表示为:

$$\tilde{\mathbf{Z}}_p \triangleq \mathbf{Y}_p \mathbf{X}^H = \underbrace{\mathbf{H}^r \mathbf{D}_p(\Phi) \mathbf{H}^s}_{\triangleq \mathbf{Z}_p} + \tilde{\mathbf{W}}_p \quad (6)$$

式中: $\mathbf{Z}_p \in \mathbb{C}^{K \times M}$ 为基于 IRS 的终端到基站的无噪声版本信道; $\tilde{\mathbf{W}}_p \triangleq \mathbf{W}_p \mathbf{X}^H \in \mathbb{C}^{K \times M}$ 为去掉导频符号后的噪声矩阵。

根据式(4), \mathbf{Z}_p 中第 (k, m) 个元素可表示为:

$$\mathbf{Z}_{p,k,m} = \sum_{n=1}^N \mathbf{H}_{k,n}^r \Phi_{p,n} \mathbf{H}_{n,m}^s \quad (7)$$

构造三维矩阵 $\mathbf{Z} \in \mathbb{C}^{K \times M \times P}$, 在它的第三维中包含了式(7)中全部的 P 个二维矩阵 \mathbf{Z}_p 。根据文献[12], \mathbf{Z} 的 3 种展开形式可依次表示为:

$$\begin{aligned} \mathbf{Z}_1 &\triangleq (\mathbf{H}^s)^T \mathbf{T} \circ \Phi (\mathbf{H}^r)^T \mathbf{T} \in \mathbb{C}^{PM \times K} \\ \mathbf{Z}_2 &\triangleq (\Phi \circ \mathbf{H}^r) \mathbf{H}^s \in \mathbb{C}^{KP \times M} \\ \mathbf{Z}_3 &\triangleq (\mathbf{H}^r \circ (\mathbf{H}^s)^T) \Phi^T \in \mathbb{C}^{MK \times P} \end{aligned} \quad (8)$$

式中: \circ 为 Khatri-Rao 积^[13]; \mathbf{Z}_1 , \mathbf{Z}_2 和 \mathbf{Z}_3 分别为 \mathbf{Z} 的水平切片、侧向切片和正面切片。

令 $\tilde{\mathbf{W}} \in \mathbb{C}^{K \times M \times P}$ 为包含式(6)中所有 P 个噪声矩阵 $\tilde{\mathbf{W}}_p \in \mathbb{C}^{K \times M}$ 的三维矩阵。根据式(6), 三维矩阵 $\tilde{\mathbf{Z}} \in \mathbb{C}^{K \times M \times P}$ 可表示为:

$$\tilde{\mathbf{Z}} \triangleq \mathbf{Z} + \tilde{\mathbf{W}} \quad (9)$$

由式(7)得到的 \mathbf{Z} 为 $\tilde{\mathbf{Z}}$ 的无噪声版本,可按式(8)展开。同理,也可得到 $\tilde{\mathbf{Z}}$ 的 3 种展开形式: $\tilde{\mathbf{Z}}_1 \in \mathbb{C}^{PM \times K}$, $\tilde{\mathbf{Z}}_2 \in \mathbb{C}^{KP \times M}$ 和 $\tilde{\mathbf{Z}}_3 \in \mathbb{C}^{MK \times P}$ 。这里, $\tilde{\mathbf{Z}}_1 \triangleq ((\mathbf{H}^s)^T \circ \Phi) (\mathbf{H}^r)^T + \tilde{\mathbf{W}}_1$, $\tilde{\mathbf{W}}_1 \in \mathbb{C}^{PM \times K}$ 为 $\tilde{\mathbf{W}}$ 的第 1

种展开形式,以此类推,可得 $\tilde{\mathbf{Z}}_2$ 和 $\tilde{\mathbf{Z}}_3$ 。

基于上述 PARAFAC 分解方法,给出信道估计算法,详细步骤如下:

步骤 1 初始化。设 $\hat{\mathbf{H}}_{(0)}^r$ 为包含对应 $\tilde{\mathbf{Z}}_2^H \tilde{\mathbf{Z}}_2$ 的 N 个非零特征值的特征向量的矩阵,其中 $\tilde{\mathbf{Z}}_2 \in \mathbb{C}^{KP \times M}$ 为 $\tilde{\mathbf{Z}}$ 的第2种展开形式,也是式(8)中 \mathbf{Z}_2 的有噪声版本。类似地, $\hat{\mathbf{H}}_{(0)}^s$ 为包含对应于 $(\tilde{\mathbf{Z}}_1)^H \tilde{\mathbf{Z}}_1$ 的 N 个非零特征值的特征向量的矩阵,其中 $\tilde{\mathbf{Z}}_1 \in \mathbb{C}^{PM \times K}$ 是 $\tilde{\mathbf{Z}}$ 的第1种展开形式,也是式(8)中 \mathbf{Z}_1 的有噪声版本。该算法执行的前提是有一个可行的 IRS 相位配置矩阵 $\Phi \in \mathbb{C}^{P \times N}$,这里将 Φ 设计为离散傅里叶变换矩阵,一般取一个 $N \times N$ 的傅里叶变换矩阵的前 P 行。

步骤 2 迭代更新。利用由式(9)得到的接收信号 $\tilde{\mathbf{Z}}$ 和其展开形式,通过交替最小化最小二乘准则迭代得信道 \mathbf{H}^r 和 \mathbf{H}^s 。

先从 \mathbf{H}^r 开始,根据 \mathbf{Z}_1 ,即使用式(8)给出的第1种展开形式 $\mathbf{Z}_1 \triangleq ((\mathbf{H}^s)^T \circ \Phi)(\mathbf{H}^r)^T \in \mathbb{C}^{PM \times K}$ 。第 i 次迭代时, \mathbf{H}^r 的第 i 次估计表示为 $\hat{\mathbf{H}}_{(i)}^r$,可以由最小化下述 LS 目标函数得到:

$$J(\hat{\mathbf{H}}_{(i)}^r) = \|\tilde{\mathbf{Z}}_1 - \hat{\mathbf{E}}_{(i-1)}(\hat{\mathbf{H}}_{(i)}^r)^T\|_F^2 \quad (10)$$

式中: $\tilde{\mathbf{Z}}_1 \in \mathbb{C}^{PM \times K}$ 为三维矩阵 $\tilde{\mathbf{Z}}$ 的第1种展开形式; $\hat{\mathbf{E}}_{(i-1)} = (\hat{\mathbf{H}}_{(i-1)}^s)^T$; $\Phi \in \mathbb{C}^{PM \times N}$ 。

式(10)的闭式解为:

$$(\hat{\mathbf{H}}_{(i)}^r)^T = (\hat{\mathbf{E}}_{(i-1)})^\dagger \tilde{\mathbf{Z}}_1 \quad (11)$$

式中: $(\cdot)^\dagger$ 表示广义逆矩阵。

同理,对 \mathbf{H}^s 进行估计。使用式(8)给出的第2种展开形式 $\mathbf{Z}_2 \triangleq (\Phi \circ \mathbf{H}^r)\mathbf{H}^s \in \mathbb{C}^{KP \times M}$ 。第 i 次迭代时, \mathbf{H}^s 的第 i 次估计表示为 $\hat{\mathbf{H}}_{(i)}^s$,形成如下的 LS 目标函数:

$$J(\hat{\mathbf{H}}_{(i)}^s) = \|\tilde{\mathbf{Z}}_2 - \hat{\mathbf{G}}_{(i)}\hat{\mathbf{H}}_{(i)}^s\|_F^2 \quad (12)$$

式中: $\tilde{\mathbf{Z}}_2 \in \mathbb{C}^{KP \times M}$ 为三维矩阵 $\tilde{\mathbf{Z}}$ 的第2种展开形式; $\hat{\mathbf{G}}_{(i)} = \Phi \circ \hat{\mathbf{H}}_{(i)}^r \in \mathbb{C}^{KP \times N}$ 。

式(12)的闭式解为:

$$\hat{\mathbf{H}}_{(i)}^s = (\hat{\mathbf{G}}_{(i)})^\dagger \tilde{\mathbf{Z}}_2 \quad (13)$$

步骤 3 迭代终止准则。当达到最大次数或相邻两次迭代间归一化均方误差小于阈值 κ 时终止。

3 仿真验证及结果分析

本节对第2节提出的基于 PARAFAC 分解的

IRS 辅助矿井信道估计算法进行仿真验证,评估其性能。假设矿井内基站和终端之间的巷道上方布放单个 IRS,IRS 上的反射单元总数 $N=16$,基站配备16根天线,终端用户数为16,信道为 Nakagami- m 信道, $m=2$ 。信道估计算法中的最大迭代次数设置为20,设置阈值 $\kappa=10^{-5}$ 。所有反射单元的反射幅度 β_n 均为1,相位配置矩阵 Φ 的行数为16。

首先,为了评估引入 IRS 技术对矿井信道估计性能的影响,结合 IRS 技术的 LS 信道估计算法和 OMP 信道估计算法与传统的未引入 IRS 技术的 LS 算法和 OMP 算法进行对比,对比结果如图2所示。图中横坐标为信噪比(signal-to-noise ratio, SNR),纵坐标为归一化均方误差(normalized mean square error, NMSE),虚线为引入 IRS 技术的误差性能线,实线为未引入 IRS 技术的误差性能曲线。在整个 SNR 范围内,引入 IRS 技术的 LS 算法和 OMP 算法的 NMSE 远小于传统的 LS 算法和 OMP 算法,说明 IRS 技术的引入大大提升了矿井通信系统的信道估计性能。

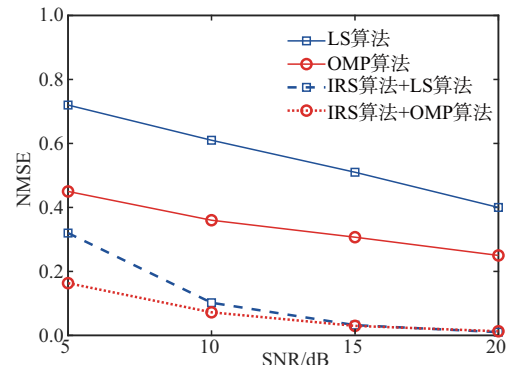


图2 IRS 技术对不同算法的误差性能影响

Fig. 2 Impact of IRS technology on the error performance of different algorithms

然后,对本文所提出的基于 PARAFAC 分解的 IRS 辅助矿井系统信道估计算法进行仿真。由于引入了 IRS 技术,终端和基站之间的上行链路被划分成发送信道和接收信道两部分,传统的 LS 算法和 OMP 算法只能估计出发送信道和接收信道的级联信道,不能估计出独立的发送信道和接收信道,而本文所提出的基于 PARAFAC 分解的信道估计算法可以分别估计出发送信道和接收信道。仿真结果如图3所示,在 NMSE 约为 4×10^{-2} 时,基于 PARAFAC 分解的估计算法对应的 SNR 约为 5 dB,而 LS 算法对应的 SNR 约为 14 dB,OMP 算法对应的 SNR 约为 13 dB,提升超过 8 dB,随着 SNR 增大,提升也随之增加至 10 dB

左右,验证了本文所提出的基于 PARAFAC 分解的信道估计算法的有效性。

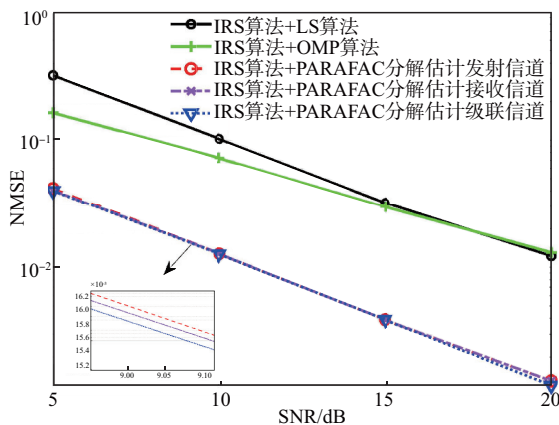


图3 不同算法的性能对比

Fig. 3 Comparison of the performance of different algorithms

接下来对算法的复杂度进行评估,复杂度以算法的有效运行时间为度量标准。本文的实验仿真平台为 MATLAB 2020b, Intel (R) Core i5-11260H 处理器,运行内存 8 G, GPU 使用 NVIDIA 的 RTX 3060 显卡。首先给出不同迭代次数下所提出的基于 PARAFAC 分解的信道估计算法在不同迭代次数下的误差性能,为了方便与 LS 算法和 OMP 算法对比,图中 PARAFAC 算法的性能只显示级联信道的 NMSE。对比结果如图 4 所示,当迭代次数 $i=4$ 时,基于 PARAFAC 分解的算法已远优于 LS 算法和 OMP 算法的估计性能。设 $\text{SNR}=5$ dB,分别对 LS 算法、OMP 算法和基于 PARAFAC 分解算法的执行时间进行统计,结果如表 1 所示。结合图 4 中的仿真结果可以看出,相较于 LS 算法,迭代次数为 4 时,基于 PARAFAC 分解算法的误差性能更优,执行时间略少,相较于 OMP 算法,虽然执行时间略高,但误差性能更优。

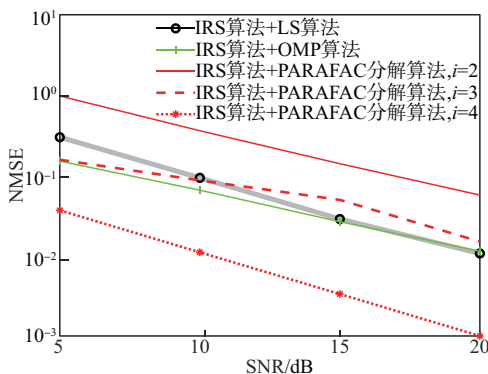


图4 不同迭代次数不同算法的误差性能对比

Fig. 4 Comparison of error performance of different algorithms under different iterations

表1 不同估计算法执行时间

Tab. 1 Execution time under different algorithms

信道估计算法	时间/s
LS 算法	1.200
OMP 算法	0.866
PARAFAC 分解算法 ($i=2$)	0.524
PARAFAC 分解算法 ($i=3$)	0.769
PARAFAC 分解算法 ($i=4$)	1.109

最后,分析 IRS 相位配置对估计性能的影响。在第 2 节的算法实现步骤中,相位配置矩阵 Φ 选自一个 $N \times N$ 的傅里叶变换矩阵的前 P 行,因此 P 的大小是影响估计性能的一个重要因素。图 5 给出了 P 从 1 遍历至最大值 16 时估计的发送信道、接收信道以及级联信道的误差结果,SNR 固定为 5 dB。仿真结果显示,随着 IRS 相位配置矩阵行数的增加,估计误差随之降低,估计性能随之提升。

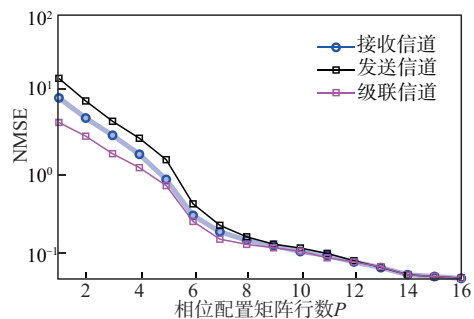


图5 不同 IRS 相位配置数下的估计性能

Fig. 5 Performances with different IRS phase configurations

4 结语

针对矿井通信无线信道传输特性复杂,信号损耗严重导致的信道估计准确度低的问题,本文结合智能可重构的 IRS 技术,搭建了 IRS 辅助的矿井无线通信系统模型,针对该模型提出了基于 PARAFAC 分解的信道估计算法,并对所提的算法进行了仿真验证。仿真结果表明,与传统的 LS 算法和 OMP 算法相比,在同一归一化均方误差下,所提出的基于 PARAFAC 分解的信道估计算法的信噪比可降低约 8 dB,且随着信噪比的增大,提升幅度进一步增大。除此之外,在保证性能提升的前提下,所提出算法的执行时间略低于 LS 算法,略高于 OMP 算法。本文的研究结果表明将 IRS 技术应用至复杂的矿井通信系统中,可以带来性能的有效提升,为未来矿井通信的发展提供了新方向。

参考文献

- [1] 霍振龙. 矿井无线通信系统现状与发展趋势[J]. 工矿

- 自动化, 2022, 48(6): 1-5.
- HUO Z L. Current Situation and Development Trend of Mine Wireless Communication System[J]. Journal of Mine Automation, 2022, 48(6): 1-5. (in Chinese)
- [2] ZHANG L, MA X, QI J. et al. Designing Tensor-Train Deep Neural Networks for Time-Varying MIMO Channel Estimation [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2021, 15(3) :759-773.
- [3] 刘屹东, 陈西宏, 袁迪喆. 基于粒子群优化粒子滤波的 SC-FDE 系统信道估计方法[J]. 空军工程大学学报, 2022, 23(4): 65-69.
- LIU Y D, CHEN X H, YUAN D Z. A Channel Estimation in SC-FDE System Based on Particle Swarm Optimization Particle Filter System[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2022, 23(4): 65-69. (in Chinese)
- [4] 崔丽珍, 刘乃君, 孙瑞璇, 等. 煤矿井下 OFDM 系统信道估计算法研究及 FPGA 实现[J]. 电视技术, 2013, 37(13): 95-97.
- CUI L Z, LIU N J, SUN R X. Study of Channel Estimation Algorithm of OFDM System in Coal Mine Tunnel Environment and Realization on FPGA[J]. Video Engineering, 2013, 37(13): 95-97. (in Chinese)
- [5] 樊佳恒. 基于压缩感知的煤矿井下信道估计技术研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2020.
- FAN J H. Research on Coal Mine Underground Channel Estimation Technology Based on Compressed Sensing[D]. Beijing: China University of Mining & Technology, 2020. (in Chinese)
- [6] 孙翠珍, 毛昕蓉, 马延军. 井下 OFDM 信道估计算法研究[J]. 工矿自动化, 2014, 40(9): 39-43.
- SUN C Z, MAO X R, MA Y J. Research of Underground OFDM Channel Estimation Algorithm[J]. Industry and Mine Automation, 2014, 40(9): 39-43. (in Chinese)
- [7] WU Q, ZHANG S, ZHENG B, et al. Intelligent Reflecting Surface-Aided Wireless Communications: a Tutorial[J]. IEEE Transactions on Communications, 2021, 69(5): 3313-3351.
- [8] STEVEN K, SYMEON C, BJORN O. Reconfigurable Intelligent Surfaces in Challenging Environments: Underwater, Underground, Industrial and Disaster [J]. IEEE Access, 2021, 9: 150214-150233.
- [9] SHI Z, WANG H, FU Y. et al. Outage Analysis of Reconfigurable Intelligent Surface Aided MIMO Communications with Statistical CSI[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022, 21(2) : 823-839.
- [10] YANG Y, ZHANG S, ZHANG R. IRS-Enhanced OFDMA; Joint Resource Allocation and Passive Beamforming Optimization [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2020, 9(6) :760-764.
- [11] PAN C. Multicell MIMO Communications Relying on Intelligent Reflecting Surfaces [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020, 19(8) :5218-5233.
- [12] YAN L, WAYNERT A, SUNDERMAN C. Measurements and Modeling of Through-the-Earth Communications for Coal Mines[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2013, 49(5):1979-1983.
- [13] 李涛, 蒋磊, 陈博文. 独立不同分布 Nakagami- m 衰落信道下最大比合并性能分析[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2018, 19(6):84-89.
- LI T, JIANG L, CHEN B W. A Performance Analysis of Maximal Ratio Combining under Condition of Non-Identically Distributed Nakagami- m Fading Channels[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2018, 19(6) :84-89. (in Chinese)
- [14] CHEN G, ZHANG X, DING E. The Application of Cognitive Radio Spectrum Sensing Technology in the Coal Mine Communication [C]// International Symposium on Intelligent Ubiquitous Computing and Education. Chengdu: IEEE, 2009: 537-540.
- [15] WEI Y, ZHAO M, CAI Y. Channel Estimation for IRS-Aided Multiuser Communications with Reduced Error Propagation[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022, 21(4):2725-2741.
- [16] ANASTASIOS P, PAN C. Intelligent Reflecting Surface-Assisted MU-MISO Systems with Imperfect Hardware: Channel Estimation and Beamforming Design[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022, 21(3) : 2077-2092.
- [17] ZHENG B, YOU C, ZHANG R. A Survey on Channel Estimation and Practical Passive Beamforming Design for Intelligent Reflecting Surface Aided Wireless Communications [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2022, 24(2) :1035-1071.
- [18] WEI L, HUANG C, CHEN D, et al. Channel Estimation for RIS-Empowered Multi-User MISO Wireless Communications[J]. IEEE Transactions on Communications, 2021, 69(6): 4144-4157.
- [19] NICHOLAS D, GEORGIOS B, RASMUS B. Blind PARAFAC Receivers for DS-CDMA Systems [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2000, 48(3) : 810-823.
- [20] TANARA G, BRETT W. Tensor Decompositions and Applications[J]. SIAM Review, 2009, 51(3):455-500.

(编辑:徐楠楠)