基于张量 SRSCPD-ALS 算法车地无线信号接收机

师嘉晨 韩 曦 刘 芹 虞 欣 李安然
北方工业大学信息学院，北京 100144

[摘要]谱调制、谱编码(Spectrally Modulated Spectrally Encoded，SMSE)技术已经被应用在了多输入多输出(Multiple-Input Multiple-Output，MIMO)无线通信系统，文章提出了一种基于张量的 SRSCPD-ALS 算法，实现车地 MIMO 无线信号接收。仿真结果表明，与 CP-ALS 算法相比，此文采用方法迭代次数少，且在秩比较大的情况下误码性能要更好。
[关键词]MIMO；谱调制谱编码；SRSCPD-ALS 算法；车地无线通信
DOI：10.33142/sca.v4i5.4918 中图分类号：O441;TP212 文献标识码：A

Vehicle Ground Wireless Signal Receiver Based on Tensor SRSCPD-ALS Algorithm

SHI Jiachen, HAN Xi, LIU Qin, YU Xin, LI Anran
School of Information, North University of Technology, Beijing, 100144, China

Abstract: Spectral modulated spectral encoded (SMSE) technology has been applied to multiple input multiple output (MIMO) wireless communication system. This paper proposes a tensor based SRSCPD-ALS algorithm to realize vehicle ground MIMO wireless signal reception. Simulation results show that compared with CP-ALS algorithm, this method has less iterations and better bit error performance in the case of large rank ratio.
Keywords: MIMO; spectral modulation and spectral coding; SRSCPD-ALS algorithm; train ground wireless communication

引言

随着无线通信业务的迅猛增长，用户对无线通信的数据传输速率的要求越来越高，导致频谱资源消耗增大，现有频谱资源在时间和空间上存在闲置的问题，因此，1999 年 Joseph Mitola Ⅲ博士提出了认知无线电通信系统的概念和基本原理，可以通过实时改变某些操作参数(比如传输功率、载波频率和调制技术等)，使其内部状态适应接收到的无线信号的统计性变化，以达到以下目的：实现任何时间任何地点的高度可靠通信并对频谱资源进行有效利用。2006 年，Roberts M.L 等提出了谱编码，谱调制技术，该模型成功完成从系统参数到具体波形的映射，被应用在了认知无线电系统当中[1]。2020 年，Zheng Dou 提出将 SMSE 技术应用在 MIMO 无线通信系统中，并将波形设计为高阶张量模型，通过 CP-ALS 算法，可以在不借助导频序列的情况下联合估计用户符号和信道状态信息[2]。2017 年，Jian Li 提出对 SRSCPD-ALS 算法，在一定的秩和信噪比范围内均优于多起点交替最小二乘(Alternating Least Square，ALS)算法，且计算量小[3-4]。

本文提出将软件无线通信技术应用在车地通信当中，由地面设备发送信息与列车车载设备完成信息交互工作。提出基于 SRSCPD-ALS 算法的车地 MIMO 无线通信系统，并在此系统中通过空时编码(Space-Time Code，STC)提高系统的鲁棒性[5-6]。本文将基于 CP-ALS 算法的车地 MIMO 无线通信系统与所提接收机进行了性能对比，仿真结果显示，所提接收机具有更好的接收性能。

1 系统模型

本文考虑的系统模型是基于 MIMO 的车地无线通信系统[7-8]，为了尽可能充分的提升信号频谱利用率及抵抗多径衰落，信号调制采用 BPSK 调制方式[9]，假设列车环路信号通过空时频编码[10]分配给不同的发射天线，经由 BPSK 调制发送给无线通信信道，车载设备通过接收天线将得到的接收信号对应进行 BPSK 解调及相应的空时频译码。为了研究方便，本文暂时不考虑噪声的影响。模型如图 1 所示，其中 $\boldsymbol{D}\in £^{N\times R}$，$\boldsymbol{C}\in £^{R\times L}$，$\boldsymbol{U}\in £^{R\times L}$，$\boldsymbol{A}\in £^{M\times R}$，$\hat{\boldsymbol{D}}\in £^{N\times R}$，$N$、$R$、$L$、$M$、$K$ 分别代表符号个数、空时编码组数、载波个数、发射天线数、接收天线数。

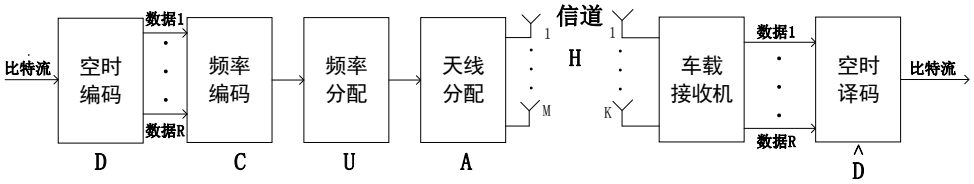

图 1 车地 MIMO 无线通信系统

Copyright © 2021 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

第 l 个子载波和第 m 根天线传输的第 n 个张量通信符号可以建模为：

$$x_{m,l,n}=\sum_{r=1}^{R}a_{m,r}u_{r,l}c_{r,l}d_{n,r} \tag{1}$$

其中，$a_{m,r},u_{r,l},c_{r,l}$ 和 $d_{n,r}$ 分别是矩阵 $\boldsymbol{A}\in\{0,1\}^{M\times R}$，$\boldsymbol{U}\in\{0,1\}^{R\times L}$，$\boldsymbol{C}\in £^{R\times L}$ 和 $\boldsymbol{D}\in £^{N\times R}$ 的元素，上式可以进一步扩展将发射信号用张量形式进行表达：

$$\chi=\sum_{r=1}^{R}a_{:r}\circ(u_{r:}\ \mathrm{e}\ c_{r:})\circ d_{:r}\in ?^{M\times L\times N} \tag{2}$$

当对接收信号进行建模的时候需要考虑信道衰落的影响，在 MIMO 通信系统中引入信道矩阵 $\boldsymbol{H}\in £^{K\times M}$，因此，接收信号张量 $\boldsymbol{Y}\in £^{K\times L\times N}$ 的元素 $y_{k,l,n}$ 可以表示为：

$$y_{k,l,n}=\sum_{m=1}^{M}h_{k,m}x_{m,l,n} \tag{3}$$

对应第 n 个符号的接收信号张量 $\boldsymbol{Y}_{:,:,n}$ 可以表示为：

$$\boldsymbol{Y}_{:,:,n}=\boldsymbol{HA}diag(d_{n:})(\boldsymbol{U}*\boldsymbol{C}) \tag{4}$$

为了简化表达式，令 $\boldsymbol{P}=\boldsymbol{HA}\in £^{K\times R}$，$\boldsymbol{Q}=(\boldsymbol{U}*\boldsymbol{C})^T\in £^{L\times R}$，则有

$$\boldsymbol{Y}_{:,:,n}=\boldsymbol{P}diag(d_{n:})\boldsymbol{Q}^T \tag{5}$$

2 多维矩阵模型

张量接收信号可以进一步进行 PARAFAC 建模：

$$\boldsymbol{Y}_{(1)}=[\boldsymbol{I}_{3,R}\times_1\boldsymbol{P}\times_2\boldsymbol{D}\times_3\boldsymbol{Q}]_{(1)}=(\boldsymbol{D}\ \mathrm{e}\ \boldsymbol{P})\boldsymbol{Q}^T\in ?^{NK\times L} \tag{6}$$

$$\boldsymbol{Y}_{(2)}=[\boldsymbol{I}_{3,R}\times_1\boldsymbol{P}\times_2\boldsymbol{D}\times_3\boldsymbol{Q}]_{(2)}=(\boldsymbol{D}\ \mathrm{e}\ \boldsymbol{Q})\boldsymbol{P}^T\in ?^{NL\times K} \tag{7}$$

$$\boldsymbol{Y}_{(3)}=[\boldsymbol{I}_{3,R}\times_1\boldsymbol{P}\times_2\boldsymbol{D}\times_3\boldsymbol{Q}]_{(3)}=(\boldsymbol{P}\ \mathrm{e}\ \boldsymbol{Q})\boldsymbol{D}^T\in ?^{KL\times P} \tag{8}$$

其中，$\boldsymbol{I}_{3,R}$ 表示矩阵维度为 $R\times R\times R$ 的三维矩阵。

3 接收机算法

本文所使用的算法模型 SRSCPD-ALS 算法是在 CP-ALS 算法的基础上延伸得来，具体算法步骤如下：

第一步：初始化 $\boldsymbol{D}$、$\boldsymbol{P}$、$\boldsymbol{Q}$，利用 CP-ALS 算法对接收信号张量 $\boldsymbol{Y}$ 进行秩 $r=1$ 分解，得到 $\boldsymbol{D}^1$、$\boldsymbol{P}^1$、$\boldsymbol{Q}^1$；

第二步：将接收信号张量 $\boldsymbol{Y}$ 与估计得到的张量因子 $\boldsymbol{Y}^1$ 重构而成的 $\boldsymbol{Y}^{\%}$ 进行相差，得到张量残差 $\boldsymbol{Y}_{res}$；

第三步：对张量残差 $\boldsymbol{Y}_{res}$ 进行秩 $r=1$ 分解，得到张量残差 $\boldsymbol{Y}_{res}$ 对应的张量因子 $\boldsymbol{D}'$、$\boldsymbol{P}'$、$\boldsymbol{Q}'$；

第四步：将估计得到的秩 $r=1$ 张量因子 $\boldsymbol{D}^1$、$\boldsymbol{P}^1$、$\boldsymbol{Q}^1$ 与对应的张量残差因子 $\boldsymbol{D}'$、$\boldsymbol{P}'$、$\boldsymbol{Q}'$ 合并作为秩 $r=2$ 的初始化因子矩阵；

第五步：当秩 r 小于 R 时，将初始化矩阵应用 CP-ALS 算法求得对应秩 r 的张量因子，重复第二至第五步，直到 $r=R$。

其中，CP-ALS 算法流程如下：

第一步：初始化 $\boldsymbol{D}^1\in £^{N\times 1}$，$\boldsymbol{P}^1\in £^{K\times 1}$，$\boldsymbol{Q}^1\in £^{L\times 1}$；

第二步：当 $\boldsymbol{D}^1$、$\boldsymbol{P}^1$、$\boldsymbol{Q}^1$ 没有达到收敛条件时，令

$$\boldsymbol{Q}^1\leftarrow\|\arg\min_{\boldsymbol{Q}^1}\boldsymbol{Y}_{(1)}-(\boldsymbol{D}^1\mathrm{e}\ \boldsymbol{P}^1)(\boldsymbol{Q}^1)^T\|_F \tag{9}$$

$$\boldsymbol{P}^1\leftarrow\|\arg\min_{\boldsymbol{P}^1}\boldsymbol{Y}_{(2)}-(\boldsymbol{D}^1\mathrm{e}\ \boldsymbol{Q}^1)(\boldsymbol{P}^1)^T\|_F \tag{10}$$

$$\boldsymbol{D}^1\leftarrow\|\arg\min_{\boldsymbol{D}^1}\boldsymbol{Y}_{(3)}-(\boldsymbol{P}^1\mathrm{e}\ \boldsymbol{Q}^1)(\boldsymbol{D}^1)^T\|_F \tag{11}$$

其中，收敛条件为两次迭代矩阵因子均方误差差值小于 10^{-5}。

Copyright © 2021 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

4 仿真结果

本节使用 MATLAB 仿真对算法进行测试，图 2 给出了经 BPSK 调制的 SRSCPD-ALS 和 CP-ALS 算法在 $R=5$ 情况下信号的估计精度，图 3 给出了在 $R=15$ 情况下信号的估计精度。其中，蒙特卡罗仿真次数为 3000 次，发射天线数为 8，接收天线数为 8，符号个数为 20，载波个数为 20。

通过下图可以看出，$R=5$ 和 $R=15$ 情况下，2 种算法的 NMSE 值都随着 SNR 值的增加逐渐减小，其信号估计能力增强。SRSCPD-ALS 算法在 $R=5$ 时精度与 CP-ALS 算法接近，在 $R=15$ 时精度优于 CP-ALS 算法。这表明 SRSCPD-ALS 算法在低秩的情况下精度与 CP-ALS 算法接近，在高秩的情况下优于 CP-ALS 算法。

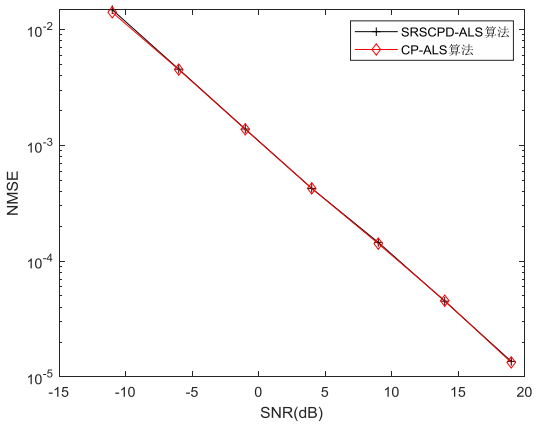

图 2　R=5 时 NMSE 随 SNR 的变化趋势

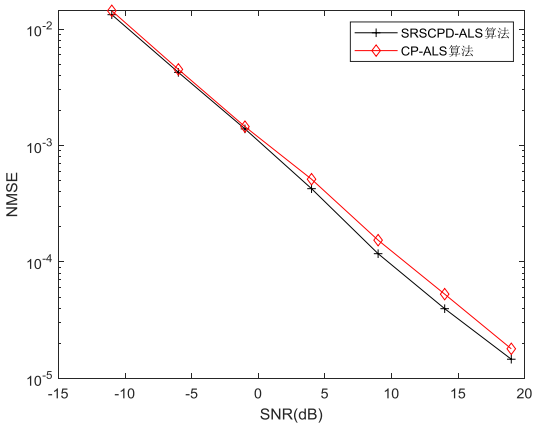

图 3　R=15 时 NMSE 随 SNR 的变化趋势

5 结论

本文采用 SRSCPD-ALS 算法完成对车载设备接收信号的估计工作，在原有 CP-ALS 算法的基础上，通过不断进行秩递归操作，将张量分解因子与张量残差因子进行合并作为热启动值，通过仿真结果可以看出，在秩较大情况下，该算法能够有效减少算法迭代次数，提升误码性能，保证信号接收质量的同时减少了计算量。

基金项目：北京市自然基金项目(L182039，L192034)，北京市教育委员会科技计划一般项目（KM201910009011）；北方工业大学科研启动基金资助项目；2020 年北京高等学校高水平人才交叉培养“实培计划”项目“高铁信号中的多用户干扰消除算法技术研究”。

[参考文献]

[1]Roberts M L.A General Framework for Analyzing, Characterizing, and Implementing Spectrally Modulated, Spectrally Encoded Signals[D].State of Alabama:Air Force Institute of Technology,2006.
[2]Z Dou,C Li,C Li,X Gao,L Qi.Tensor Communication Waveform Design With Semi-Blind Receiver in the MIMO System[J].in IEEE Transactions on Vehicular Technology,vol,2020,69(2):1727-1740.
[3]J Li,J P Haldar,J C Mosher,D R Nair,J A.Gonzalez-Martinez and R. M. Leahy, "Scalable and Robust Tensor Decomposition of Spontaneous Stereotactic EEG Data[J].in IEEE Transactions on Vehicular Technology,vol,2020,66(6):1549-1558.
[4]J Li,J C Mosher,D R Nair,J Gonzalez-Martinez,R M Leahy.Robust tensor decomposition of resting brain networks in stereotactic EEG[J].2017 51st Asilomar Conference on Signals Systems and Computers,2017,3(1):1544-1548.
[5]李星,苏佳.MIMO 系统中的空时分组分组码技术研究[J].电子世界,2018(2):120-121.
[6]李苗,邵朝,赵国库.不同信道条件下 MIMO 空时编码技术的特性分析[J].传感器与微系统,2016,35(6):48-51.
[7]高翔.5G 移动通信技术在城市轨道交通车地无线通信系统中的应用[J].城市轨道交通研究,2018,21(2):61-64.
[8]刘苗.高速车地无线通信 MIMO 技术研究[D].四川:西南交通大学,2013.
[9]刘文龙,裴莹莹,金明录.BPSK 通信系统的部分最优 MIMO 检测算法[J].信号处理,2013,29(10):1315-1322.
[10]张詠.基于空时频发射分集技术分析与设计[J].信息通信,2020(2):122-124.

作者简介：师嘉晨（1995-），所属院校：北方工业大学，所学专业：电子与通信工程，研究方向：无线通信技术。

Copyright © 2021 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.