doi:10.14132/j.cnki.1673-5439.2023.01.005

# 基于空域滤波的抗干扰信号同步算法

姚远翔[1],马文峰[2],王 聪[2],田 辉[2],朱 熠[2],吴 霞[3],赵几航[4]

(1.陆军工程大学 通信工程学院,江苏 南京 210007
2.陆军工程大学 野战工程学院,江苏 南京 210007
3.31131 部队,江苏 南京 210007
4.31603 部队,江苏 徐州 221000)

**摘要**:信号同步是无线通信中最为关键的一步。同步质量的好坏,决定了通信能否建立。针对存在较强有色干扰的通信环境,提出了基于空域滤波的采用雅可比旋转法实现奇异值分解的信号抗干扰同步算法。具有较强的抗干扰性能,减少了计算量,有利于工程实现。在实际环境中对算法进行了验证。

**关键词**:抗干扰;信号同步;奇异值分解;雅可比旋转法

**中图分类号**:TN929.53 **文献标志码**:A **文章编号**:1673-5439(2023)01-0038-006

# An anti-jamming signal synchronization algorithm based on spatial filtering

YAO Yuanxiang[1], MA Wenfeng[2], WANG Cong[2], TIAN Hui[2], ZHU Yi[2], WU Xia[3], ZHAO Jihang[4]

(1.College of Communications Engineering, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, China
2.College of Field Engineering, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, China
3.Unit 31131 of PLA, Nanjing 210007, China
4.Unit 31603 of PLA, Xuzhou 221000, China)

**Abstract**: Signal synchronization is the most critical step in wireless communication. The quality of synchronization determines whether the communication can be established. For the communication environment with strong colored interference, a signal anti-interference synchronization algorithm based on spatial filtering is proposed. This algorithm uses the Jacobi rotation method to realize singular value decomposition. It can reduce the amount of calculation and has strong anti-interference performance. Experiments are conducted in practical scenarios and the results demonstrate that this algorithm can benefit the engineering implementation.

**Keywords**: anti-jamming; signal synchronization; singular value decomposition; Jacobi rotation method

随着近年来战争形式日趋信息化、无人化。无线通信成为了战场决胜的关键一环,但是通信信号极有可能遭到敌方干扰。能否在干扰环境下确保通信质量就变得十分重要。无线通信中接收端解调的首要步骤就是信号同步。信号同步分为定时同步和频率同步,定时同步的目的是捕获目标信号,频率同步的目的是纠正载波频率偏移,使信号能够正确解调。但是在存在较强人为干扰的情况下,传统的同步算法无法正常工作,使得信息无法正确传输。因此,需要对干扰混合信号进行预滤波。文献[1]提出了在一个 OFDM 符号内利用两个重复的恒包络零自相关序列作为同步序列,并进行时域加窗滤波的方法,减小了干扰的影响,但只能抑制 20%频段的部分频带干扰。文献[2]提出了基于 FFT 的伪码并行捕获方法,在频域进行相关,减少了计算量。时域滤波算法和频域滤波算法对于带有方向性的强干

**收稿日期**:2022-06-21;**修回日期**:2022-08-30 **本刊网址**:http://nyzr.njupt.edu.cn
**基金项目**:国家自然科学基金(62001515,61771486,62103441)和江苏省博士后科研资助计划(2019K090)资助项目
**作者简介**:姚远翔,男,硕士研究生;马文峰(通信作者),男,博士,副教授,13913945193@139.com
**引用本文**:姚远翔,马文峰,王聪,等.基于空域滤波的抗干扰信号同步算法[J].南京邮电大学学报(自然科学版),2023,43(1):38-43.

扰往往滤除效果不佳[3]。文献[4]提出了一种基于频谱感知的抗干扰方案。文献[5]提出了基于 Q 学习和随机自动学习机的双阶段分层学习中继选择算法,选择诱导中继主动吸引干扰攻击。文献[4-5]都引入了其他机制来抑制或消除干扰,增加了处理难度,不利于实现。空域滤波技术引入了空间维度,可以对有向干扰进行特定方向上的滤除,抗干扰能力较强。文献[6]提出了一种采用特征值分解进行空域滤波的方法,仅针对双天线系统,实用性不强。文献[7]提出一种针对多天线的抗干扰算法,基于奇异值分解(SVD)来滤除干扰信号,但是计算量大,耗时长,不满足信号同步对实时性的要求,且不利于工程实现。对此本文提出了一种基于空域滤波的采用雅可比旋转法实现奇异值分解的信号抗干扰同步算法。在不牺牲抗干扰性能的前提下,优化了滤波算法,减少了计算量,并进行了实验验证。

## 1　空域滤波技术

设一个有 $M$ 个发射天线,$N$ 个接收天线的 MIMO-OFDM 系统,接收信号可表示为

$$\boldsymbol{y} = \boldsymbol{hs} + \boldsymbol{r} + \boldsymbol{n}$$

式中:$\boldsymbol{y}$ 为接收信号,$\boldsymbol{h}$ 为信道矩阵,$\boldsymbol{s}$ 为发射信号,$\boldsymbol{r}$ 为干扰信号,$\boldsymbol{n}$ 为加性高斯白噪声。$\boldsymbol{h} \in \mathbb{C}^{M\times N}$,代表了天线阵列间的所有子信道。

接收信号的自相关矩阵可表示为

$$\boldsymbol{R}_{yy} = \boldsymbol{E}\{\boldsymbol{y} * \boldsymbol{y}\}^{\mathrm{H}}$$

$$\boldsymbol{R}_{yy} \in \mathbb{C}^{N\times N}$$

自相关矩阵反映了每个接收天线所接收到的信号之间存在的相关性,干扰信号的特征也隐藏在其中,为了分解出干扰信号,通常可以采用奇异值分解的方法。

奇异值分解是处理矩阵的一种常见方式。它可以将一个比较复杂的矩阵用更小更简单的几个子矩阵的相乘来表示,这些子矩阵描述的是矩阵的重要的特性[8]。

$$[\boldsymbol{U}\quad \boldsymbol{\Sigma}\quad \boldsymbol{V}] = \mathrm{svd}(\boldsymbol{R}_{yy})$$

奇异值分解可将矩阵分解为 3 个矩阵相乘,$\boldsymbol{\Sigma}$ 为对角矩阵,对角线上的值为矩阵的奇异值,$\boldsymbol{U}$ 为左酉矩阵,每一列向量为奇异值对应的奇异向量,$\boldsymbol{V}$ 为右酉矩阵[9-11]。

$$\boldsymbol{U} * \boldsymbol{\Sigma} * \boldsymbol{V}^{\mathrm{H}} = \boldsymbol{R}_{yy}$$

对角阵 $\boldsymbol{\Sigma}$ 中的奇异值是由大到小排列的,这些奇异值所对应的奇异向量描述了矩阵变化方向(从主要的变化到次要的变化排列)。左酉矩阵中的每一列奇异向量又是相互正交的,所以将矩阵朝其中一列奇异向量方向变换时,就相当于将其他方向的特征进行了压缩。当矩阵是高维的情况下,这个矩阵就是高维空间下的一个线性变换,可以想象,这个变换也同样有很多的变换方向,通过奇异值分解得到的前 $N$ 个奇异向量,就对应了这个矩阵最主要的 $N$ 个变化方向。利用这前 $N$ 个变化方向,就可以近似这个矩阵。也就是提取这个矩阵最重要的特征。总的来说,奇异值分解可以得到奇异值与奇异向量,奇异值表示的是这个特征到底有多重要,而奇异向量表示这个特征是什么,可以将每一个奇异向量理解为一个线性的子空间。

所以将 $\boldsymbol{R}_{yy}$ 奇异值分解后得到的各奇异值就代表了接收端接收信号的主要特征,其中有目标信号,也有干扰。

$$\boldsymbol{y}_d = \boldsymbol{U}(i) * \boldsymbol{y},\ 1 \leqslant i \leqslant N$$

$\boldsymbol{U}(i) * \boldsymbol{y}$ 就代表将接收信号往其中一个特征方向变换,对其余特征方向进行了滤除。$\boldsymbol{U}(i)$ 为左酉矩阵的第 $i$ 列向量。

变换后的 $\boldsymbol{y}_d$ 可以看作是经过各个独立子空间信道传输后得到的信号。对所有 $\boldsymbol{y}_d$ 分别进行传统相关同步,可以认为峰值最高的就是目标信号。在矩阵 $\boldsymbol{A}$ 的 SVD 计算过程中,要分别求出 $\boldsymbol{AA}^{\mathrm{T}}$,$\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}$ 的奇异值与奇异向量,也就是需要计算两个 $n$ 阶行列式以及两个 $n$ 阶线性方程组,行列式与线性方程组的计算复杂度都属于 $o(n^3)$ 级别[12]。

实际应用中,随着天线数 $N$ 的增加,矩阵维度也会随之增大,使得矩阵奇异值分解难以实现,并且每一路信号都要进行自相关同步,计算量大,难以进行工程实现。

## 2　基于雅可比旋转法的抗干扰同步算法

本文提出了基于雅可比旋转法的抗干扰同步算法,在保证抗干扰性能的前提下,减少了计算量,有利于工程实现。

雅可比算法最早被提出用于实对称矩阵求解特征值。因为 $\boldsymbol{R}_{yy}$ 为复 Hermitian 矩阵,所以利用 Hermitian 矩阵的性质首先将 $\boldsymbol{R}_{yy}$ 转换成实矩阵[13]。

设 $\boldsymbol{R}_{yy} = \boldsymbol{A} + \mathrm{i}\boldsymbol{B}$,易得 $\boldsymbol{A}$、$\boldsymbol{B}$ 为实矩阵且满足 $\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}} = \boldsymbol{A}$,$\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}} = -\boldsymbol{B}$。

若 $\boldsymbol{R}_{yy}$ 的奇异值 $\sigma$ 所对应的奇异值向量为 $\boldsymbol{u} + \mathrm{i}\boldsymbol{v}$,则满足 $(\boldsymbol{A} + \mathrm{i}\boldsymbol{B})(\boldsymbol{u} + \mathrm{i}\boldsymbol{v}) = \sigma(\boldsymbol{u} + \mathrm{i}\boldsymbol{v})$,由此得

$$\begin{cases}\boldsymbol{Au} - \boldsymbol{Bv} = \sigma\boldsymbol{u}\\ \boldsymbol{Av} + \boldsymbol{Bu} = \sigma\boldsymbol{v}\end{cases}$$

用矩阵可表示为

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{A} & -\boldsymbol{B} \\ \boldsymbol{B} & \boldsymbol{A} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{u} \\ \boldsymbol{v} \end{bmatrix} = \sigma \begin{bmatrix} \boldsymbol{u} \\ \boldsymbol{v} \end{bmatrix}$$

易得由 $\boldsymbol{A}$、$\boldsymbol{B}$ 组成的分块矩阵为实对称矩阵,满足

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{A} & -\boldsymbol{B} \\ \boldsymbol{B} & \boldsymbol{A} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{A} & -\boldsymbol{B} \\ \boldsymbol{B} & \boldsymbol{A} \end{bmatrix}$$

由此可将 $N \times N$ 的复矩阵转化为 $2N \times 2N$ 的实对称矩阵,再使用雅可比旋转法对矩阵进行分解。

雅可比旋转法是利用旋转矩阵不断地对实对称矩阵进行正交相似变换,通过变换将方阵中所有非主对角线元素都消去,在迭代次数足够高的情况下,最后得到近似的对角阵就近似原矩阵的奇异值矩阵[14]。

首先定义旋转矩阵 $\boldsymbol{Q}_{ij}(1 \leqslant i < j \leqslant 2N)$。

$$\boldsymbol{Q}_{ij} = \begin{bmatrix} 1 & & & & & & \\ & \ddots & & & & & \\ & & \cos\theta & & \sin\theta & & \\ & & & \ddots & & & \\ & & -\sin\theta & & \cos\theta & & \\ & & & & & \ddots & \\ & & & & & & 1 \end{bmatrix}$$

它的第 $i$ 行 $i$ 列,$j$ 行 $j$ 列为 $\cos\theta$,第 $i$ 行 $j$ 列为 $\sin\theta$,第 $j$ 行 $i$ 列为 $-\sin\theta$,其余元素与单位矩阵相同。

令 $\boldsymbol{R}_0 = \boldsymbol{R}_{yy}, \boldsymbol{R}_1 = \boldsymbol{Q}_0 \boldsymbol{R}_0 \boldsymbol{Q}_0^{\mathrm{T}}$

该旋转本质上就是对指定的坐标 $(i,j)$,用旋转矩阵,在平面内以 $\theta$ 角进行旋转,通过公式计算合适的 $\theta$,就可以使原 $(i,j)$ 坐标的点变换成 0,通过不停地迭代可使原矩阵变成对角矩阵,该对角阵即为原矩阵的奇异值矩阵。旋转矩阵的乘积即为原矩阵的奇异向量。

$$\theta = \frac{1}{2}\arctan\frac{2r_{ij}^{(0)}}{r_{ii}^{(0)} - r_{jj}^{(0)}}$$

$$\boldsymbol{U} = \boldsymbol{Q}_0^{\mathrm{T}} \boldsymbol{Q}_1^{\mathrm{T}} \cdots \boldsymbol{Q}_n^{\mathrm{T}}$$

为了减少迭代次数加快计算量,本文提出了双阈值判别分解算法。

具体步骤如下:

(1) 首先根据接收信号 $\boldsymbol{y}$ 得到自相关矩阵 $\boldsymbol{R}_{yy}$,再将 Hermitian 矩阵 $\boldsymbol{R}_{yy}$ 转化成实对称矩阵 $\boldsymbol{R}$。

(2) 定义矩阵 $\boldsymbol{U}$,并赋予初值,$\boldsymbol{U} = \boldsymbol{I}, \boldsymbol{I} \in \mathbb{C}^{2N \times 2N}$。

(3) 顺序将矩阵 $\boldsymbol{R}$ 上三角部分的值与设置的阈值进行比较,若大于阈值,则根据找出的值计算旋转角,并进行第 4 步。当没有值大于阈值时,则跳转到第 6 步。

$$\theta = \frac{1}{2}\arctan\frac{2r_{ij}^{(0)}}{r_{ii}^{(0)} - r_{jj}^{(0)}}$$

(4) 根据旋转角 $\theta$ 的值计算三角函数,求出旋转矩阵 $\boldsymbol{Q}$。

(5) 计算旋转后的矩阵 $\boldsymbol{R}$,求出矩阵 $\boldsymbol{U}$。然后跳转到第 3 步。

(6) 输出奇异值矩阵 $\boldsymbol{R}$,奇异向量矩阵 $\boldsymbol{U}$。

(7) 顺序将奇异值矩阵 $\boldsymbol{R}$ 主对角线上的值 $r_{ii}$ 与阈值进行比较,若大于阈值,则进行第 8 步,若不大于阈值,则跳转到第 10 步。

(8) 将奇异值 $r_{ii}$ 对应的奇异向量 $\boldsymbol{U}_i$ 与接收信号通过计算得到独立子空间信号 $\boldsymbol{y}_d$。

(9) 将 $\boldsymbol{y}_d$ 与本地同步序列进行互相关,寻找峰值 $p_i$。跳转到第 7 步。

(10) 比较各独立子空间信号峰值 $p_i$ 大小,找出最大值 $\hat{p}_i$。若 $\hat{p}_i$ 大于阈值,则其所对应独立子空间信号,即为目标信号,其余信号则为干扰信号。跳转到 11 步。若没有值大于阈值,则说明此时目标信号角度与干扰角度较小,或信干比较小,超过算法极限性能。结束循环,终止算法。

(11) 输出目标信号,进行传统信号载波频率同步。

该算法时间复杂度属于 $o(n)$ 级别,主要由迭代次数决定,通过设置阈值,可以很好地控制时间复杂度,易于仿真及工程实现。

## 3 仿真

本文首先在 MATLAB 环境下进行了仿真验证,目标信号采用带有 16 个短训练符号(STS),2 个长训练符号(LTS)的 OFDM 信号。16 个 STS 用来定时同步,2 个 LTS 用来载波频率同步。接收机采用 4 天线,天线阵列为均匀线阵,干扰信号为 3 个。

参数设置为目标信号信噪比(SNR)为 20 dB,信干比(SIR)为 -20 dB,3 个干扰信号方向分别为 20°、50°、80°,信号方向为 0°。通过图 1 可以非常明显地看出不经过空域滤波算法的同步峰值完全淹没在噪声和干扰信号中,无法完成定时同步及目标信号捕获。相对地,图 2 为使用滤波算法的同步效果,16 个用于定时同步的 STS 峰值明显,且没有旁瓣、错位,可以很好地捕捉到目标信号。

为了证明本文提出的利用雅可比矩阵实现 SVD 分解的空域抗干扰同步改进算法,在大幅度减

少计算量的前提下,抗干扰性能没有损失,本文和JammingBird[3]算法进行了对比。其中 JammingBird 算法中的 SVD 分解使用 MATLAB 自带的 SVD 函数。在 SNR=-16~0 dB 区间,针对同步成功率进行了对比,如图 3 所示。

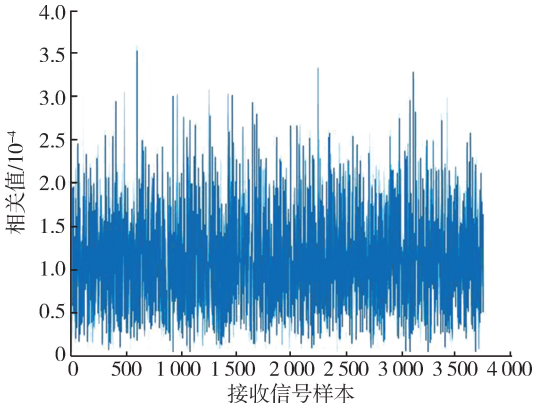



**图 1　直接同步峰值**

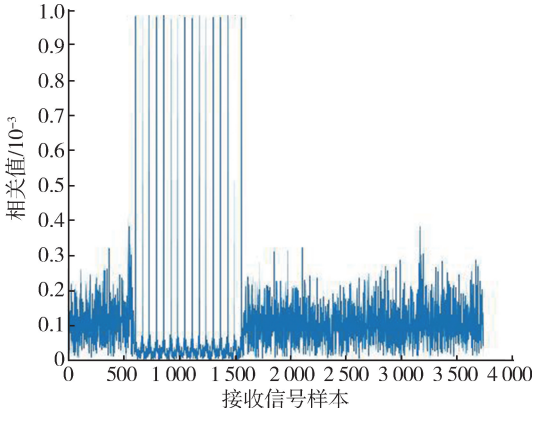



**图 2　经过空域滤波后同步峰值**

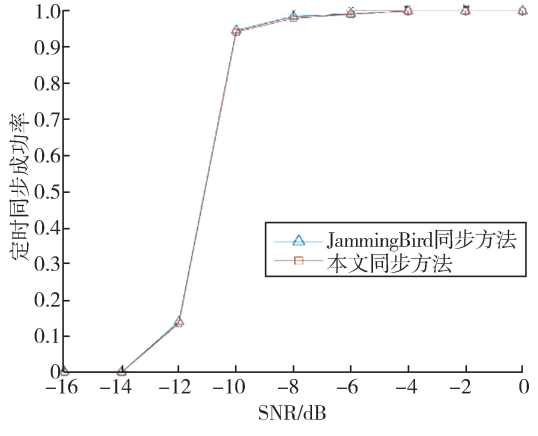



**图 3　本文算法与 JammingBird 算法定时同步成功率对比**

通过比较矩阵乘法、角度计算和复数相关运算的次数对两个算法的计算量进行了对比,如表 1 所示。

**表 1　本文提出算法与 JammingBird 算法计算量对比**

| 方法 | 本文提出的算法 | JammingBird 算法 |
|---|---|---|
| 矩阵乘法 | 24 | 84 |
| 角度计算 | 16 | 56 |
| 复数相关运算 | 3 | 4 |

通过图 3 和表 1 可以看出,本文与 JammingBird 算法在仿真层面性能几乎没有差异。但是避免了大量的 4 阶行列式求解和 4 阶线性方程组求解,并且通过双阈值判别,大幅减少了上三角最大值遍历时间以及旋转迭代次数,避免了大量矩阵乘法与角度运算,极大减少了计算量。

## 4　实验验证

本文通过信号发生器和 2x2-MIMO 接收机对算法进行了实际验证。实验环境如图 4 所示。信号发生器作为干扰源,两块双天线通信板卡作为发射机和接收机。发射机天线垂直于接收机水平阵列天线放置。



**图 4　实验环境**

将接收机置于圆心,发射机所在角度为 0°。信号发生器作为干扰,绕接收机转动。针对两天线接收机应对单个干扰源在不同干扰角度和干扰强度下,信号同步的抗干扰性能做了实验验证。

图 5 为不同角度和信干比下,接收机抗干扰同步成功率。横坐标为信干比 SIR,单位为 dB,百分比代表了同步成功率。

可以看出干扰源与信号源相隔角度变小时,抗干扰能力会下降,在角度为 5.6°,信干比为-25 dB 时有 80%的同步成功率。角度越大,抗干扰能力越

强,可以做到信干比为-36 dB 时有接近 100%的同步成功率。在 90°时,因干扰源与天线接收阵列处于水平状态,接收天线无法有效分辨干扰源方向,抗干扰能力有所下降。但是仍然在信干比为-25 dB 时可以达到 100%的同步成功率。

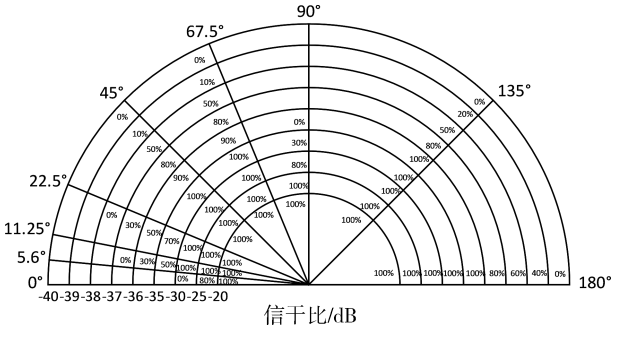



**图 5 抗干扰信号同步成功率**

## 5 结束语

本文利用自相关矩阵为 Hermitian 矩阵的特性,提出了一种基于雅可比旋转法求解 SVD 的抗干扰信号同步方法。具有较强的抗干扰性能,且减少了计算量,易于工程实现。并在仿真的基础上,通过真实环境实验验证了算法性能。

**参考文献:**

[1] 甘华强,王军,周鹏,等.复杂多径信道下的 OFDM 抗干扰同步算法[J].信号处理,2015,31(11):1461-1466.
GAN Huaqiang, WANG Jun, ZHOU Peng, et al. An anti-jaming OFDM synchronization algorithm under complicated multipath fading channels [J]. Journal of Signal Processing, 2015, 31(11): 1461-1466.(in Chinese)

[2] 何骥, 周建人. 面向抗干扰的突发数据帧同步算法改进[J]. 无线电通信技术, 2017, 43(2): 16-20.
HE Ji, ZHOU Jianren. Improvement of frame synchronization algorithm for burst data in anti-interference network[J]. Radio Communications Technology, 2017, 43(2): 16-20.(in Chinese)

[3] 丁可, 康博, 张新帅, 等. 基于特征值分解的多阵元空频抗干扰技术研究[J]. 舰船电子对抗, 2021, 44(5): 72-74, 89.
DING Ke, KANG Bo, ZHANG Xinshuai, et al. Research into the space-frequency anti-jamming technology of multi-array element based on eigenvalue decomposition[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2021, 44(5): 72-74, 89.(in Chinese)

[4] 周文杰. 面向 5G 的宽带集群系统中同步与抗干扰技术的研究及实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2021.
ZHOU Wenjie. Research and implementation of synchronization and anti-interference technology in 5G-oriented broadband trunking system[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021. (in Chinese)

[5] 张晓博, 王海, 冯智斌, 等. 基于主动诱导机制的中继通信智能抗干扰方法[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2021, 41(5): 15-22.
ZHANG Xiaobo, WANG Hai, FENG Zhibin, et al. Intelligent anti-jamming relay communication method based on active induction mechanism[J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2021, 41(5): 15-22.(in Chinese)

[6] PIRAYESH H, SANGDEH P K, ZHANG S C, et al. JammingBird: jamming-resilient communications for vehicular ad hoc networks[C]// 18th Annual IEEE International Conference on Sensing, Communication, and Networking (SECON). 2021: 1-9.

[7] ZENG H C, CAO C, LI H X, et al. Enabling jamming-resistant communications in wireless MIMO networks[C]// IEEE Conference on Communications and Network Security (CNS). 2017: 1-9.

[8] EZRI D, TSODIK G. The impact of synchronization on receive beamforming with null steering in OFDM MIMO systems[C]// IEEE 27th Convention of Electrical and Electronics Engineers in Israel. 2012: 1-4.

[9] 马亚峰. 基于 FPGA 的矩阵奇异值分解加速方案的设计与实现[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
MA Yafeng. Design and implementation of singular value decomposition acceleration scheme[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017. (in Chinese)

[10] 应俊,朱云鹏.基于 CORDIC 矩阵奇异值分解的 FPGA 实现[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2020, 32(3): 434-440.
YING Jun, ZHU Yunpeng. FPGA implementation of matrix singular value decomposition based on CORDIC [J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2020, 32(3): 434-440.(in Chinese)

[11] 许乔, 巩玉振, 蔡惠智. 基于 FPGA 的大矩阵奇异值分解的实现[J]. 电子测量技术, 2014, 37(6): 68-72.
XU Qiao, GONG Yuzhen, CAI Huizhi. Implementation to solve singular value decomposition of large matrix size in FPGAs[J]. Electronic Measurement Technology, 2014, 37(6): 68-72.(in Chinese)

[12] 韩锞. Massive MIMO 中矩阵 SVD 分解算法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2016.

HAN Ke. Reseach on matrix SVD in massive MIMO system[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016. (in Chinese)

[13] 张艺凡. LTE-A 下行预编码的研究及 FPGA 实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2015.
ZHANG Yifan. Research and implementation of the precoding technology of downlink LTE-advanced systems [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2015. (in Chinese)

[14] 黄家俊, 王建新. 矩阵特征值分解的算法研究与 FPGA 实现[J]. 电子设计工程, 2021, 29(16): 50-54.
HUANG Jiajun, WANG Jianxin. Algorithm research and FPGA implementation of matrixeigenvalue decomposition [J]. Electronic Design Engineering, 2021, 29(16): 50-54.(in Chinese)

(责任编辑:李小溪)