

# 大规模 MIMO 通信中基于 Jacobi 预迭代的改进 Gauss-Seide 算法

史传胜, 冯 姣, 司 闯, 张 锐

(南京信息工程大学电子与信息工程学院, 南京 210044)

**摘 要:** 在大规模 MIMO 系统中, 现有的高斯-赛德尔 (Gauss-Seide, GS) 算法相较于最小均方误差 (Minimum mean-square error, MMSE) 算法, GS 的复杂度较低, 但其检测性能相比而言较差。本文提出一种适用于大规模 MIMO 系统上行链路检测的基于雅可比预迭代改进的高斯-赛德尔 (Jacobi-improved Gauss-Seide, JA-IGS) 检测算法, 该算法首先通过引入雅可比 (Jacobi, JA) 预迭代器来优化迭代初始解, 然后对传统的 GS 进行线性优化, 在增加较低复杂度情况下, 检测性能和收敛速度有明显提升。仿真结果表明, 与传统 GS 和 JA 检测算法相比, 该算法具有较低的误码率 (Bit error ratio, BER) 和较高的计算效率。

**关键词:** 大规模 MIMO; 高斯-赛德尔; 雅可比; 信号检测

**中图分类号:** TN911.23      **文献标志码:** A

## Improved Gauss-Seide Algorithm Based on Jacobi Pre-iteration in Massive MIMO Communication

SHI Chuansheng, FENG Jiao, SI Chuang, ZHANG Rui

(School of Electronics & Information Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

**Abstract:** In massive MIMO systems, the existing Gauss-Seide (GS) algorithm has lower complexity than the minimum mean-square error (MMSE) algorithm, while the detection performance is worse. This paper proposes a Jacobi-improved Gauss-Seide (JA-IGS) detection algorithm suitable for the uplink detection of massive MIMO systems. The algorithm first optimizes the iterative initial solution by introducing a Jacobi (JA) pre-iterator. Then the traditional GS is optimized linearly. With the increase of lower complexity, the detection performance and convergence speed are significantly improved. Simulation results show that compared with traditional GS and JA detection algorithms, the algorithm has a lower Bit error ratio (BER) and higher computational efficiency.

**Key words:** massive MIMO; Gauss-Seidel (GS); Jacobi (JA); signal detection

## 引言

大规模 MIMO (Massive MIMO) 系统已经成为实现 5G 的一项关键技术,它可以满足 5G 在高数据传输速率、稳定连接和低延迟等各方面的需求<sup>[1]</sup>。massive MIMO 系统指在基站端配置多达几十乃至数百根天线阵列同时为多个单一天线客户端服务,大大提高了系统的存储空间和自由度,同时还可以改善和提高数据传输速率、链路可靠性以及网络通信容量<sup>[2]</sup>。在 massive MIMO 系统中,复杂程度和天线数量是密切相关的,随着天线数量增加,算法的复杂程度随着变高。所以,在接收端需要一种复杂程度低、检测性能高的信号检测算法。

为了提高 MIMO 系统的信号检测性能,学者们提出了多种检测算法,包括线性检测算法与非线性检测算法等。最大似然估计 (Maximum likelihood, ML) 算法被认为是一个比较经典的最优检测算法,其遍历性能能够保证算法获得最佳检测性能<sup>[3]</sup>,但由于其复杂度太高,学者们提出了复杂度低的近似线性最佳检测算法,如迫零 (Zero forcing, ZF) 算法、最小均方误差 (Minimum mean square error, MMSE) 检测算法<sup>[4]</sup>。MMSE 和 ZF 涉及矩阵的求逆问题,当用户数量很大时,这些检测器的复杂度会变得很高。基于此,出现了简化算法,如共轭梯度<sup>[5]</sup> (Conjugate gradient, CG)、高斯-赛德尔 (Gauss-Seide, GS)<sup>[6]</sup>、雅可比<sup>[7]</sup> (Jacobi, JA)、超松弛迭代<sup>[8]</sup> (Successive over-relaxation, SOR)。其中 JA 收敛速度最慢,但更容易实现。GS 是 JA 的一种改进,精度比 JA 高,其复杂度和 JA 差不多。文献[9]提出一种基于雅可比-理查森联合算法,其基本原理是先利用雅可比迭代算法迭代一次,然后利用雅可比迭代的结果作为 RI 的初始解。虽然该算法在性能上有所提高,但是其收敛速度较慢。文献[10]提出了一种加入基于雅可比迭代的高斯-赛德尔 (Jacobi gauss-seide, JA-GS) 方法。JA-GS 算法主要利用雅可比迭代算法和高斯-赛德尔迭代算法进行信号检测,虽然性能较为接近 MMSE,但是收敛速度偏慢,复杂度偏高。

为解决这一问题,本文通过对 GS 算法进行线性变换,提出了一种适用于大规模 MIMO 上行链路系统检测算法。该算法通过引入 JA 预处理器和设计了改进后的高斯-赛德尔 (Improved Gauss-Seide, IGS) 方案,进一步提高了算法的收敛速度和检测性能。仿真结果表明,在 64 个基站天线和 16 个用户天线数的前提下,所提算法检测性能优于传统的 GS 迭代方法和 JA-GS 方法。

## 1 大规模 MIMO 系统模型

为了简化分析过程,用户设备为单天线的单小区大规模 MIMO 上行链路系统模型。假设基站接收天线数量为  $M$  根,用户传输天线数量为  $N$  个<sup>[11]</sup>。通常有  $M \gg N$ ,例如  $M=64$  和  $N=16$ 。系统原型如图 1 所示。其中,发射端信号  $x_m$  经过用户天线  $N$  向基站天线传输,基站端天线  $M$  接收到的信号经过解调后得到  $y_m$ 。

基站接收的上行信号为

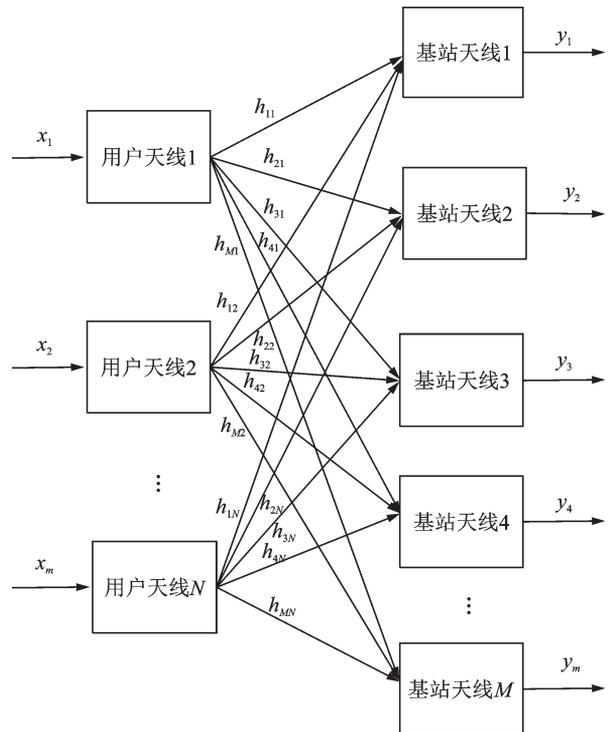


图1 大规模 MIMO 系统模型

Fig.1 Massive MIMO system model

$$\begin{cases} \mathbf{y}_m = \mathbf{h}_m \mathbf{x}_m + \mathbf{z}_m \\ \mathbf{y} = [\mathbf{y}_1, \mathbf{y}_2, \dots, \mathbf{y}_m, \dots, \mathbf{y}_M]^T \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{h}_m$  表示用户  $n$  到基站端的信道列矢量, 信道矩阵  $\mathbf{H} = [\mathbf{h}_1, \mathbf{h}_2, \mathbf{h}_3, \dots, \mathbf{h}_m, \dots, \mathbf{h}_N]^T$ , 维度为  $M \times N$ ;  $\mathbf{x} = [\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \mathbf{x}_3, \dots, \mathbf{x}_m, \dots, \mathbf{x}_N]^T$  为发射信号向量,  $\mathbf{x}_m$  为第  $m$  个用户的传输符号,  $\mathbf{y}_m$  代表接收端第  $m$  根天线接收的接收信号。在本文中  $\mathbf{z}_m$  是服从均值为 0, 协方差矩阵为  $\sigma_z^2 \mathbf{I}$  的高斯分布。本文假设传输信号  $\{\mathbf{x}_m\}$  是平均能量归一化的发射向量。

为避免复数运算, 将模型转换为等效的实值模型为<sup>[12]</sup>

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{z} \quad (2)$$

## 2 信号检测算法

### 2.1 MMSE 检测算法

在 massive MIMO 系统模型中, MMSE 检测算法检测性能较为优异, 即通过简单的线性操作就可将发送信号  $\mathbf{x}$  从接收端接收到的信号  $\mathbf{y}$  中恢复出来。为了恢复发送的信号, 使用加权滤波矩阵  $\mathbf{W}_{\text{MMSE}}$  来实现信道的逆转<sup>[7]</sup>。MMSE 算法中发送信号的接收估计值可以表示为<sup>[13]</sup>

$$\mathbf{W}_{\text{MMSE}} = (\mathbf{H}^H \mathbf{H} + \sigma_z^2 \mathbf{I})^{-1} \quad (3)$$

$$\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{W}_{\text{MMSE}} \mathbf{y}_{\text{MF}} \quad (4)$$

式中:  $\mathbf{I}$  为单位矩阵,  $\mathbf{H}^H$  为  $\mathbf{H}$  的对称转置矩阵,  $\mathbf{W}_{\text{MMSE}}$  为 MMSE 检测算法的滤波矩阵, 匹配滤波器输出可以表示为  $\mathbf{y}_{\text{MF}} = \mathbf{H}^H \mathbf{y}$ 。算法的复杂度主要体现在矩阵的求逆方面。因此在实际的大规模 MIMO 系统中, MMSE 检测算法很少在实际当中应用。大部分 massive MIMO 低复杂度检测算法的原理就是通过降低求矩阵的逆的复杂度来降低 MMSE 整体算法的复杂度。

### 2.2 高斯-赛德尔检测算法

线性检测算法如 GS 等在 massive MIMO 系统中具有更优异的检测性能, 将式 (4) 写成  $\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{y}_{\text{MF}}$ , 通过变换可得  $\mathbf{y}_{\text{MF}} = \mathbf{A} \hat{\mathbf{x}}$ , 这样可以避免矩阵求逆问题, 其中  $\mathbf{A} = \mathbf{H}^H \mathbf{H} + \sigma_z^2 \mathbf{I}$ 。

在 massive MIMO 系统中, 当基站天线数远远超过用户天线数量时, 信道逐渐趋于正交<sup>[14]</sup>, MMSE 滤波矩阵为对称正定矩阵, 且对角占优。因此, 可将  $\mathbf{A}$  分解为

$$\mathbf{A} = \mathbf{D} - \mathbf{L} - \mathbf{U} \quad (5)$$

在高斯-赛德尔检测方法中, 信号可以估计为<sup>[11]</sup>

$$\hat{\mathbf{x}}^{k+1} = (\mathbf{D} - \mathbf{L})^{-1} (\mathbf{U} \hat{\mathbf{x}}^k + \mathbf{y}_{\text{MF}}) \quad (6)$$

式中:  $\mathbf{D}$ 、 $\mathbf{L}$  和  $\mathbf{U}$  分别为  $\mathbf{A}$  的对角矩阵、严格下三角矩阵和严格上三角矩阵。

对于高斯-赛德尔迭代方法, 迭代的初始值在收敛过程中很关键。传统的初始值为零向量, 虽然简单但远非真正的初始化方案, 因此需要一种复杂程度低且性能高的初始化方法。利用矩阵  $\mathbf{A}$  正定, 且对角占优, 可由  $\mathbf{D}^{-1}$  代替  $\mathbf{A}^{-1}$ , 则相比  $\mathbf{A}$  可以减少滤波矩阵求逆的计算复杂度。根据式 (3), 初始解可以写成

$$\hat{\mathbf{x}}^0 = \mathbf{D}^{-1} \mathbf{y}_{\text{MF}} \quad (7)$$

后续的高斯-赛德尔迭代遵循式 (6)。

### 2.3 雅可比算法

雅可比迭代是一种求解线性方程组的迭代求解方法。Jacobi 迭代算法由于在各常见迭代算法中收敛速度比较慢, 相比于 GS, JA 检测算法更容易实现, 但是检测速度没有 GS 快, 雅可比迭代算法的基本原理是通过滤波矩阵  $\mathbf{A}$  进行 LU 分解, 每一次的迭代结果都代入下一次迭代中, 通过 JA 算法进行还

原后接收信号的估计值为

$$\hat{\mathbf{x}}^{k+1} = \mathbf{D}^{-1}((\mathbf{U} + \mathbf{L})\hat{\mathbf{x}}^k + \mathbf{y}_{\text{MF}}) \quad (8)$$

将式(8)写成元素的形式

$$\hat{x}_i^{k+1} = \frac{1}{w_{i,i}} \left( \hat{y}_i - \sum_{j=1}^{i-1} w_{i,j} \hat{x}_j^k - \sum_{j=i+1}^N w_{i,j} \hat{x}_j^k \right) \quad k=0, 1, 2, \dots, K; i=1, 2, 3, \dots, N \quad (9)$$

式中:雅克比滤波矩阵为  $\mathbf{D}^{-1}(\mathbf{U} + \mathbf{L})$ ;  $k$  表示迭代次数。

## 2.4 基于雅克比预迭代的高斯-赛德尔方法

文献[15]利用JA和GS方法设计了一种低复杂度的大规模MIMO上行链路检测器。图2给出了所提出的基于JA预迭代的GS的检测器的一般框图。检测器包括初始化和最终估计两个阶段。JA-GS的原理是利用雅克比容易实现的特点,将JA迭代的结果作为高斯-赛德尔的初始值,这样可以提高高斯-赛德尔的收敛速度和检测性能。当JA-GS的检测性能接近MMSE的检测性能时,需要迭代4次以上。

将式(7)的结果应用到式(8)中:

$$\hat{\mathbf{x}}^1 = \mathbf{D}^{-1}((\mathbf{U} + \mathbf{L})\hat{\mathbf{x}}^0 + \mathbf{y}_{\text{MF}}) \quad (10)$$

将式(10)作为GS的初始解,接下来应用式(6)求出信号的估计值。

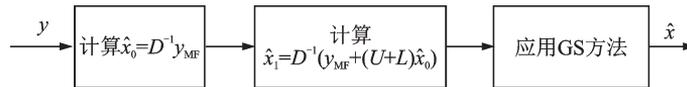


图2 基于JA-GS检测器

Fig.2 Detector based on JA-GS

## 3 基于雅克比预迭代的改进高斯-赛德尔方法

### 3.1 带状矩阵

**定义1** 带状矩阵表示在矩阵  $A$  中,所有的非零元素都集中在以主对角线为中心上下  $w$  元素的带状区域中。其中  $w$  小于矩阵的维度。

由  $A = H^H H + \sigma^2 I$  可知,  $A$  是一个  $N \times N$  的方阵。那么带状矩阵  $D_w$  可以写成

$$D_w = \begin{cases} A_{i,j} & |i-j| \leq w \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

式中  $A_{i,j}$  为  $A$  中的元素。那么式(5)可以写成

$$A = D_w - L_w - U_w \quad (12)$$

式中  $L_w$  和  $U_w$  为  $A_w - D_w$  的严格下三角矩阵和严格上三角矩阵。当  $w=1$  时,  $D_1$  为

$$D_1 = \begin{bmatrix} A_{1,1} & A_{1,2} & 0 & \cdots & 0 \\ A_{2,1} & A_{2,2} & A_{2,3} & 0 & 0 \\ 0 & A_{3,2} & A_{3,3} & \ddots & 0 \\ \vdots & 0 & \ddots & \ddots & A_{N-1,N} \\ 0 & 0 & 0 & A_{N,N-1} & A_{N,N} \end{bmatrix} \quad (13)$$

### 3.2 JA-IGS 算法

JA-IGS 方法主要利用 IGS 来进行信号检测。将第一次雅克比迭代的值作为整个系统的初始解。

改进后的 JA-IGS 方法相比于 GS 和 JA-GS 收敛速度更快,检测性能更优异。

通过线性变换,对传统的 GS 方法做出改进,利用式(12)来更新  $\mathbf{y}_{\text{MF}} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}$ ,接收到的信号  $\mathbf{y}_{\text{MF}}$  可以写成

$$\mathbf{y}_{\text{MF}} = (\mathbf{D}_w - \mathbf{L}_w - \mathbf{U}_w)\hat{\mathbf{x}}^k \quad (14)$$

用式(12)来更新式(14),得到

$$(\mathbf{D}_w - \mathbf{L}_w)\hat{\mathbf{x}}^{k+1} = \mathbf{y}_{\text{MF}} + (\mathbf{D}_w - \mathbf{L}_w - \mathbf{A})\hat{\mathbf{x}}^{k+1} \quad (15)$$

再经过线性变换得到

$$\hat{\mathbf{x}}^{k+1} = \hat{\mathbf{x}}^{k+1} + (\mathbf{D}_w - \mathbf{L}_w)^{-1}(\mathbf{y}_{\text{MF}} - \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}^{k+1}) \quad (16)$$

用式(12)来更新式(16),得到

$$\hat{\mathbf{x}}^{k+1} = (\mathbf{D}_w - \mathbf{L}_w)^{-1}(\mathbf{y}_{\text{MF}} + \mathbf{U}_w\hat{\mathbf{x}}^k) + (\mathbf{D}_w - \mathbf{L}_w)^{-1}(\mathbf{y}_{\text{MF}} - \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}^{k+1}) \quad (17)$$

IGS 方法为

$$\hat{\mathbf{x}}^{k+1} = [(\mathbf{D}_w - \mathbf{L}_w)^{-1}\mathbf{U}_w]^2\hat{\mathbf{x}}^k + [\mathbf{I} + (\mathbf{D}_w - \mathbf{L}_w)^{-1}\mathbf{U}_w](\mathbf{D}_w - \mathbf{L}_w)^{-1}\mathbf{y}_{\text{MF}} \quad (18)$$

利用雅可比预迭代器来优化 IGS 迭代的初始解,其中 IGS 的初始解是  $\hat{\mathbf{x}}^1$ ,这样可以提高 IGS 的收敛速度。

JA-IGS 算法流程图如图 3 所示。综合上文的描述,所提的 JA-IGS 的算法如下。

**算法** JA-IGS 检测方法

输入:  $\mathbf{y}, \mathbf{H}, \sigma^2$

预处理:

- (1)  $\mathbf{A} = \mathbf{H}^H \mathbf{H} + \sigma^2 \mathbf{I}$
- (2)  $\mathbf{y}_{\text{MF}} = \mathbf{H}^H \mathbf{y}$
- (3)  $\mathbf{D}_- = \text{tril}(\mathbf{A}, 1)$
- (4)  $\mathbf{D}_1 = \text{triu}(\mathbf{D}_-, -1)$
- (5)  $\mathbf{L}_1 = -\text{tril}(\mathbf{A} - \mathbf{D}_1, -1)$
- (6)  $\mathbf{U}_1 = -\text{triu}(\mathbf{A} - \mathbf{D}_1, 1)$
- (7) 初值  

$$\hat{\mathbf{x}}^1 = \mathbf{D}_1^{-1}(\mathbf{y}_{\text{MF}} + (\mathbf{U}_1 + \mathbf{L}_1)\hat{\mathbf{x}}^0)$$

(8) 迭代

for  $j = 0: 1: k - 1$  do

$$\text{temp1} = [(\mathbf{D}_1 - \mathbf{L}_1)^{-1}\mathbf{U}_1]^2\hat{\mathbf{x}}^j$$

$$\text{temp2} = [\mathbf{I} + (\mathbf{D}_1 - \mathbf{L}_1)^{-1}\mathbf{U}_1](\mathbf{D}_1 - \mathbf{L}_1)^{-1}\mathbf{y}_{\text{MF}}$$

$$\hat{\mathbf{x}}^{j+1} = \text{temp1} + \text{temp2}$$

End for

输出:  $\hat{\mathbf{x}}^k$

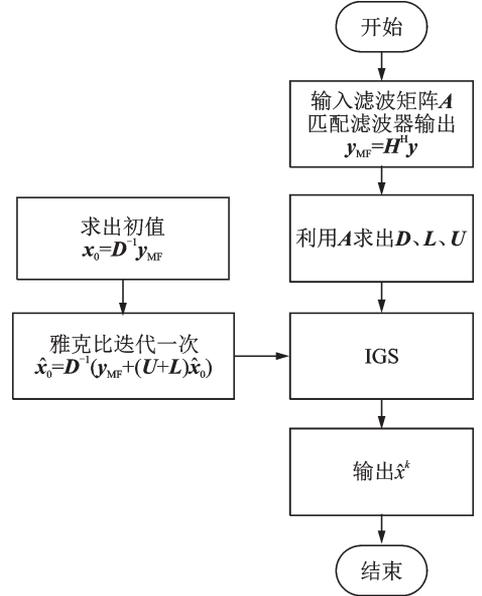


图3 JA-IGS算法流程图

Fig.3 JA-IGS algorithm flow chart

## 4 复杂度分析及收敛性分析

### 4.1 算法复杂度

本文主要比较了 JA-IGS 算法的复杂度和一些线性检测算法的复杂度。相比而言,乘法运算的计

算复杂度远比加法高<sup>[16]</sup>,所以算法的复杂度通常是比较乘法运算的次数和相同迭代次数时所需要做的乘法次数。表1列出了JA-IGS算法、传统的GS、JA和JA-GS算法的复杂度。其中, $N$ 代表用户天线数量, $M$ 代表基站天线数量, $k$ 代表迭代次数。

### 4.2 收敛性分析

**定理** 如果 $A$ 是行严格对角占优矩阵,那么高斯-赛德尔方法的改进对于初始逼近的任意选择都是收敛的。

假设 $x^*$ 为线性系统 $y_{MF} = Ax$ 的实解。因为矩阵 $A$ 是严格对角占优的矩阵,如果 $\hat{x}^{k+1}$ 是第 $k+1$ 次近似解,那么,改进高斯-赛德尔算法的收敛性可以表示为

$$\|\hat{x}^{k+1} - x^*\| = \|x^{k+1} + (D_w - L_w)^{-1}(y_{MF} - Ax^{k+1}) - x^*\| \quad (19)$$

$$\|\hat{x}^{k+1} - x^*\| \leq \|x^{k+1} - x^*\| \|y_{MF} - Ax^{k+1}\| \|(D_w - L_w)^{-1}\| \quad (20)$$

因为 $\|x^{k+1} - x^*\| \rightarrow 0$ 并且 $\|y_{MF} - Ax^{k+1}\| \rightarrow 0$ ,因此 $\|\hat{x}^{k+1} - x^*\| \rightarrow 0$ ,因此改进高斯-赛德尔方法收敛。

## 5 性能仿真

为测试算法的检测性能,本文在MATLAB平台上仿真了JA-IGS和现有算法的误码率(Bit error rate, BER)-信噪比(Signal noise rate, SNR)曲线。本文分析了所提出的JA-IGS算法的检测性能并和GS算法和JA-GS算法以及MMSE的检测性能作了对比。设置仿真时的传输信道为不相关瑞利衰落信道,基带信号调制方式为BPSK、QPSK、QAM,天线规模为 $64 \times 16$ 。模拟参数如表2所示。

图4对比了不同算法在SNR=12 dB时的计算复杂度,可以看出JA算法的复杂程度最低。JA和GS都是迭代3次且复杂度基本相同,为了平衡检测性能与计算复杂度之间的矛盾,本文提到的JA-IGS算法的复杂度要比GS和JA-GS的复杂度稍微高一点。MMSE的复杂度最高,由于MMSE需要矩阵求逆运算,因此MMSE的复杂度最高。

表3对比了不同算法在SNR=12 dB时,每比特实乘运算次数。可以看出,MMSE的每比特实乘次

表2 模拟参数

Table 2 Simulation parameters

参数	方案
系统带宽/MHz	20
用户数量	16
基站天线数量	64/128
噪声方差	由信噪比控制
信噪比/dB	0~20
信道模型	不相关瑞利衰落
调制方案	BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM

表1 不同检测方法计算的复杂度

Table 1 Computational complexity of different detection methods

方法	复杂度
GS	$4kN^2$
JA	$k(4N^2 - 2N)$
JA-GS	$4N^2(k+1) - 2N$
MMSE	$(M+2)N^2 + N$
JA-IGS	$k(8N^2 - 2N) + 4N^2 - 2N$

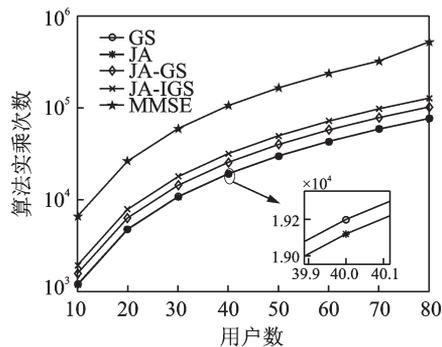


图4 天线数量与算法计算复杂度的关系

Fig.4 Relationship between the number of antennas and the computational complexity of the algorithm

数最高、其次是JA-IGS、JA-GS、GS、JA。表4对比了JA-IGS算法在不同用户天线数下的复杂度。在基站天线数量不变的前提下,随着用户数量不断增加,JA-IGS算法的复杂度不断升高。

表3 SNR=12 dB时,不同算法在64×16天线数量前提下的每比特实乘次数

Table 3 Actual multiplication times per bit under the premise of 64×16 antennas for different algorithms when SNR=12 dB

算法	GS	JA	JA-GS	MMSE	JA-IGS
每比特实乘次数	32.3	31.2	42.333	176.166	7 53.333

表4 在SNR=12 dB时,不同用户天线数JA-IGS算法的实乘次数

Table 4 Actual multiplication times of the JA-IGS algorithm for different user antenna numbers when SNR=12 dB

用户数	4	8	16	32
每比特实乘次数	12.333	3 25.666	7 42.333	105.666

图5展示了massive MIMO系统规模为64×16,在64QAM调制下,所提算法的检测性能比较。其中GS、JA、JA-GS都是迭代3次,JA-IGS迭代次数分别为 $k=1$ 和 $k=2$ ,其中 $k$ 是迭代次数。根据仿真结果表明,JA-IGS算法随着迭代次数的增加,算法的检测性能也在不断提高。以GS算法BER曲线作为对比参照,由图5可知,迭代次数为1时,JA-IGS算法的性能和GS算法的性能相比,传统的GS算法性能更优。当迭代2次时,本文提出的JA-IGS算法的检测性能比迭代3次的JA、GS和JA-GS检测性能有明显的优势,在 $BER=10^{-3}$ 时,相比于GS和JA-GS,分别有2 dB和0.9 dB的优势,在 $BER=10^{-4}$ 时,相比于JA-GS有2 dB的增益。JA-IGS利用了改进后的高斯-赛德尔算法,它的收敛速度和检测性能是更优于JA、GS和JA-GS检测算法。虽然JA-IGS算法检测性能较好,但是JA-IGS算法的复杂度是要比JA、GS和JA-GS要高。

图6展示了massive MIMO系统规模为128×16,在64QAM调制下,所提算法的检测性能比较。可以看出,MMSE算法的性能最好,其次是迭代2次的JA-IGS算法,最差的是JA算法。迭代3次的JA-IGS算法和MMSE算法的性能较为接近图7展示了所提JA-IGS算法在不同基站天线数、16个用户天线数和64QAM调制方式下,且迭代次数都是2时的检测性能比较。由图7可知,在用户天线数量都是16的前提下,随着基站天线数量增加,JA-IGS算法的检测性能也随之提高。当 $SNR=16$  dB时,在128×16的天线配置下,误码率达到 $10^{-5}$ 量级,相比之下, $SNR=16$  dB时,在64×16的天线配置下,误码率只有 $10^{-3}$ 量级,在32×16的天线配置下,误码率只有 $10^{-2}$ 量级,天线配置为16×16的BER只有 $10^{-1}$ 量级。由于基站天线数量变多,空间自由度也随之提高,并且提高信号的传输效率和系统容量。

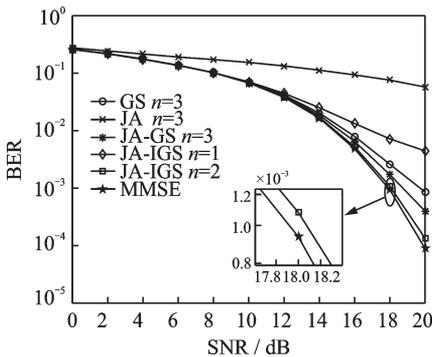


图5 JA-IGS算法误码率性能比较(64×16)

Fig.5 Comparison of BER performance of proposed JA-IGS algorithm (64×16)

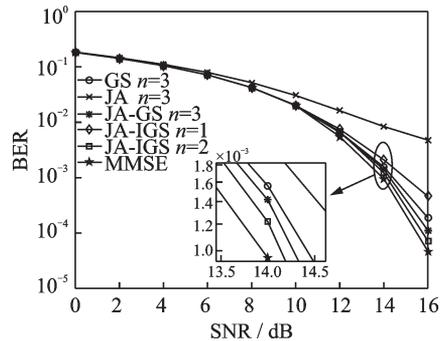


图6 JA-IGS算法误码率性能比较(128×16)

Fig.6 Comparison of BER performance of proposed JA-IGS algorithm (128×16)

图8展示了在64个基站天线、16个用户的配置下,不同调制方式对JA-IGS算法检测性能的影响。仿真结果表明,该算法在BPSK调制下性能表现更优异,其他性能表现依次是QPSK,16QAM,64QAM。在抗加性高斯白噪声方面BPSK性能最好。由于64QAM调制方法的判决,取样点比BPSK、QPSK、16QAM都要多,所以增大了其误码率,导致它性能最差。

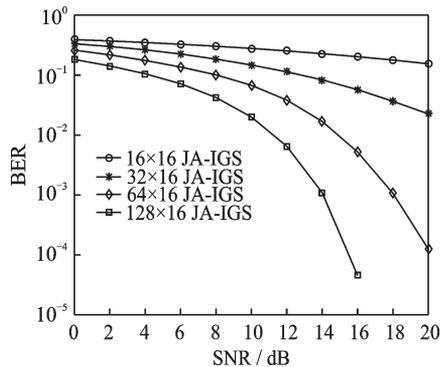


图7 不同基站天线数,JA-IGS算法的误码率性能比较  
Fig.7 Comparison of BER performance of proposed JA-IGS algorithm with different numbers of base station antenna

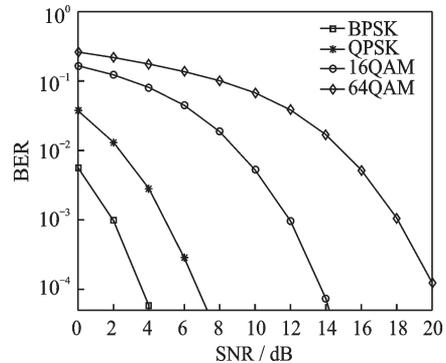


图8 BPSK、QPSK、16QAM和64QAM调制下的JA-IGS性能比较

Fig.8 Comparison of BER performance of proposed JA-IGS algorithm with different modulation schemes (BPSK, QPSK, 16QAM and 64QAM)

## 6 结束语

本文提出了一种新的大规模多输入多输出系统的上行链路用户信号检测算法。为了提高算法的收敛速度,本文采用具有更快收敛速度的JA-IGS迭代算法。该方法通过改进传统的GS迭代方法,且引入JA迭代作为IGS的初始值,仿真结果表明,JA-IGS算法获得了较优的误码率性能,和传统的大规模多输入多输出检测算法相比有明显的优势。随着基站天线数量的增加,该算法的性能得到改善,随着调制阶数的增加,性能也随之下降。

### 参考文献:

- [1] 陈曦,吴天宝,龚奕宇,等.一种低复杂度近最优大规模MIMO检测算法[J].微电子学与计算机,2020,37(10):48-53.  
CHEN Xi, WU Tianbao, GONG Yiyu, et al. A low-complexity near-optimal massive MIMO detection algorithm[J]. *Microelectronics and Computer*, 2020, 37(10): 48-53.
- [2] 申东,赵丹,李强,等.低复杂度大规模MIMO上链路软输出信号检测[J].计算机应用研究,2021,38(5):1524-1528.  
SHEN Dong, ZHAO Dan, LI Qiang, et al. Low-complexity massive MIMO uplink soft output signal detection[J]. *Computer Application Research*, 2021, 38(5): 1524-1528.
- [3] 冯姣,胡冬顺,李鹏.MIMO系统中基于信号可靠性判定的OSIC检测[J].电讯技术,2020,60(9):1020-1027.  
FENG Jiao, HU Dongshun, LI Peng. OSIC detection based on signal reliability judgment in MIMO system[J]. *Telecommunications Technology*, 2020, 60(9): 1020-1027.
- [4] 张维,周围.大规模MIMO系统中全局LAS检测算法[J].南京邮电大学学报(自然科学版),2020,40(4):37-43.  
ZHANG Wei, ZHOU Wei. Global LAS detection algorithm in massive MIMO system[J]. *Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition)*, 2020, 40(4): 37-43.
- [5] ZHOU J, HU J, CHEN J, et al. Biased MMSE soft-output detection based on conjugate gradient in massive MIMO[C]// *Proceedings of 2015 IEEE 11th International Conference on ASIC (ASICON)*. [S.l.]: IEEE, 2015: 1-4.

- [6] MINANGO J, DE ALMEIDA C. Low-complexity MMSE detector based on refinement Gauss-Seidel method for massive MIMO systems[C]//Proceedings of 2017 IEEE 9th Latin-American Conference on Communications (LATINCOM). [S.l.]: IEEE, 2017: 1-5.
- [7] ALBREEM M A M, EL-SALEH A A, JUNTTI M. Linear massive MIMO uplink detector based on joint Jacobi and Gauss-Seidel methods[C]//Proceedings of 2020 16th International Conference on the Design of Reliable Communication Networks DRCN 2020. Milano, Italy: [s.n.], 2020: 1-4.
- [8] 许耀华, 尤扬扬, 胡梦钰, 等. 基于SAOR的Massive MIMO系统信号检测算法[J]. 数据采集与处理, 2020, 35(1): 139-146.  
XU Yaohua, YOU Yangyang, HU Mengyu, et al. Signal detection algorithm for massive MIMO system based on SAOR[J]. Data Acquisition and Processing, 2020, 35(1): 139-146.
- [9] KHOSOET I A. A fast-convergent detector based on joint Jacobi and Richardson method for uplink massive MIMO systems [C]//Proceedings of 2019 28th Wireless and Optical Communications Conference. [S.l.]: WOCC, 2019: 1-5.
- [10] AHMADI A, MANGANIELLO F, KHADEMI A. A parallel Jacobi-embedded Gauss-Seidel method[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2021, 32(6): 1452-1464.
- [11] 蒋晔, 孙文胜. 一种基于Kaczmarz算法的大规模MIMO信号检测方法[J]. 杭州电子科技大学学报(自然科学版), 2020, 40(5): 25-29.  
JIANG Ye, SUN Wensheng. A method of massive MIMO signal detection based on Kaczmarz algorithm[J]. Journal of Hangzhou Dianzi University (Natural Science Edition), 2020, 40(5): 25-29.
- [12] 李晨, 邓炳光, 张治中. 用于大规模MIMO系统的改进CG检测算法[J]. 电讯技术, 2020, 60(7): 839-844.  
LI Chen, DENG Bingguang, ZHANG Zhizhong. Improved CG detection algorithm for massive MIMO systems[J]. Telecommunications Technology, 2020, 60(7): 839-844.
- [13] CHATAUT R, AKL R. Efficient and low-complexity iterative detectors for 5G massive MIMO systems[C]//Proceedings of 2020 16th International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems. [S.l.]: DCOSS, 2020: 442-449.
- [14] 李航伟, 唐加山. 大规模MIMO系统改进MMSE信号检测算法[J]. 软件导刊, 2019, 18(3): 70-72, 77.  
LI Hangwei, TANG Jiashan. Improved MMSE signal detection algorithm for massive MIMO systems[J]. Software Guide, 2019, 18(3): 70-72, 77.
- [15] ALBREEM M A M, EL-SALEH A A, JUNTTI M. Linear massive MIMO uplink detector based on joint Jacobi and Gauss-Seidel methods[C]//Proceedings of 2020 16th International Conference on the Design of Reliable Communication Networks DRCN 2020. Milano, Italy: [s.n.], 2020: 1-4.
- [16] 朱啸豪, 孙超, 姜述超. 基于深度学习和AMP的MIMO检测算法[J]. 微型电脑应用, 2020, 36(5): 96-98.  
ZHU Xiaohao, SUN Chao, JIANG Shuchao. MIMO detection algorithm based on deep learning and AMP[J]. Microcomputer Applications, 2020, 36(5): 96-98.

## 作者简介:



史传胜(1996-), 通信作者, 男, 硕士研究生, 研究方向: 大规模MIMO信号检测, E-mail: 616160753@qq.com。



冯姣(1984-), 女, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向: 信号处理。



司闯(1996-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 卫星通信。



张锐(1997-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 信道编译码。

(编辑: 陈珺)