DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201703030

Massive MIMO 3D 空间相关信道超松弛检测算法

王 琳, 周毅刚, 郑黎明, 毛 宇

(哈尔滨工业大学 电子与信息工程学院,哈尔滨 150001)

摘 要: 为降低 Massive multiple-input multiple-output(MIMO)信号检测算法的计算复杂度,采用迭代方法进行信号检测. 在采用矩阵分解的迭代方法基础上,逐步推导引入超松弛迭代检测算法,利用行列式计算推导出松弛因子范围,同时采用几何方法,在二维空间相关信道模型基础上,构建三维空间相关信道模型并给出相应三维空间几何模型,同时忽略高阶项,推导出相应的空间相关信道相关性近似解析形式解,给出相关性近似解析表达式. 仿真表明,三维空间相关信道模型会加剧信道的相关性,降低检测算法的误比特率检测性能. 当迭代算法的迭代次数 N=8,在一定误比特率条件下,采用优化松弛因子的超松弛迭代算法所需的信噪比有所下降. 在一定信噪比下,误比特率能下降约两个数量级,接近迭代次数 N=16 的误比特率,同时分集增益有所提升,计算复杂度也有所下降. 通过权衡分析信噪比和计算复杂度,选用优化松弛因子迭代检测算法能在较少的迭代次数下实现较低的误比特率检测性能,超松弛迭代检测算法能获得较优的算法检测性能.

关键词: massive mimo; 三维空间相关信道; 检测算法; 超松弛迭代; 优化松弛因子

中图分类号: TN919　　**文献标志码**: A　　**文章编号**: 0367-6234(2018)05-0012-06

Successive overrelaxation iterative detection algorithm for 3D spatially correlated massive MIMO channel

WANG Lin, ZHOU Yigang, ZHENG Liming, MAO Yu

(School of Electronics and Information Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: To reduce the complexity of Massive multiple-input multiple-output (MIMO) signal detection, the iterative method is used for signal detection. Based on the implementation of the iterative method with matrix decomposition, the successive over relaxation algorithm is introduced and the range of relaxation factor is deduced by determinant calculation. Simultaneously, a three-dimensional spatially correlated channel model is built based on two-dimension with geometric method and the analytic form solution of spatially correlated channel is introduced by neglecting the high order. The simulation results show the three-dimensional spatially correlated channel model aggravates channel correlation and decreases detection performance. Under 8 times iteration and certain bit error rate, the signal-to-noise ratio of successive over relaxation iteration decreases with the optimal relaxation factor. In a definite signal-to-noise ratio, bit error rate decreases approximate two orders of magnitude, diversity gain promotes and detection algorithm performs equally 16 times iteration, which can also decrease computational complexity. The successive over relaxation detection algorithm can perform better in less iteration and achieve better detection performance with optimal relaxation factor by considering the signal-to-noise ratio and the complexity.

Keywords: massive mimo; three-dimension spatially correlated channel; detection algorithm; successive over relaxation iteration; optimal relaxation factor

Massive multiple-input multiple-output (MIMO) 无线技术[1-3]被视为是未来无线通信的关键技术之一. Massive MIMO 系统通过在基站部署大规模的天线阵列能够极大提高频谱利用率[4-5]. Massive MIMO 技术带来的系统性能提升固然可观[6],但寻求低复杂度的检测算法需要亟待解决[7]. 最大似然检测算法(MLD)[8],可以使误比特率达到最小,但其复杂度随着发送端数据流的数目呈指数增长,尤其在 Massive MIMO 系统中复杂度将极其庞大. 传统 MIMO 线性检测算法[9],诸如迫零检测算法、最小均方误差检测算法(Minimum Mean Square Error, MMSE)、最小均方误差串行相消算法[10],虽然能一定程度上降低复杂度,但由于算法检测过程存在矩阵求逆,使得检测算法复杂度仍是制约检测性能的瓶颈,尤其在 Massive MIMO 系统中,检测算法复杂度极大地增加了系统实现难度[11].

超松弛迭代方法[12-14]是解决大型稀疏矩阵问题的优良方法. 本文将此迭代方法引入信号检测中,利用迭代求解而规避矩阵求逆带来的高复杂度,并通过适当选取优化松弛因子,保证在一定检测性

收稿日期: 2017-03-06
基金项目: 国家自然科学基金(61401120)
作者简介: 王 琳(1990—),男,硕士研究生
通信作者: 周毅刚,zhouyg@ hit.edu.cn

能下,减少迭代次数,降低计算复杂度. 同时考虑信道存在相关性,数学构建三维空间相关信道模型,推导出相关性解析解,通过计算机仿真,定量分析三维空间信道相关性影响和算法检测性能.

1　Massive MIMO 系统模型

1.1　系统模型

如图 1 所示 Massive MIMO 系统模型,发射天线数目为 N_T, 接收天线数目为 N_R. 假定信道在一帧内为准静态时不变平坦衰落信道. 因此,第 l 根接收天线的接收信号 y_l 可以表示为

$$y_l = \sum_{k=1}^{N_T} h_{lk} s_k + n_l. \tag{1}$$

式中: h_{lk} 表示第 l 根接收天线与第 k 根发射天线间的信道系数, n_l 表示第 l 根接收天线收到的加性高斯噪声. 将式(1)简化为矢量形式

$$\boldsymbol{y} = \boldsymbol{Hs} + \boldsymbol{n}. \tag{2}$$

式中: $\boldsymbol{y}$ 为接收信号, $\boldsymbol{H}$ 为信道矩阵, $\boldsymbol{s}$ 为发射信号, $\boldsymbol{n}$ 为噪声.

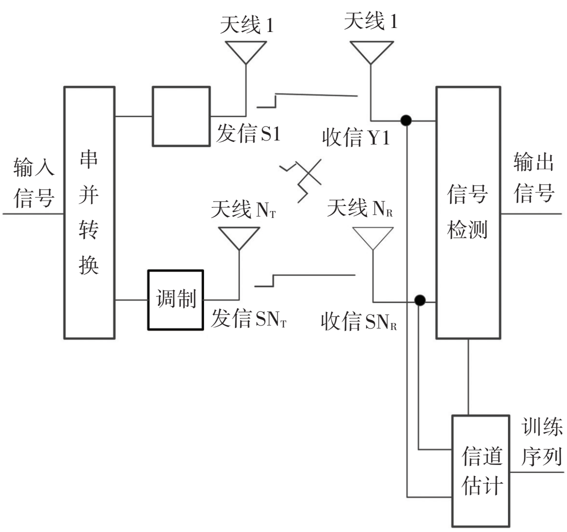

图 1　Massive MIMO 系统模型

Fig.1　Massive MIMO system model

1.2　三维空间相关信道模型

使用相关信道模型[15]分析信道相关性:

$$\boldsymbol{H} = \boldsymbol{H}_w \boldsymbol{R}^{1/2}. \tag{3}$$

Massive MIMO 信道的相关性主要表现为不同天线间出入射波的相位差,如图 2 均匀线性阵列天线所示.

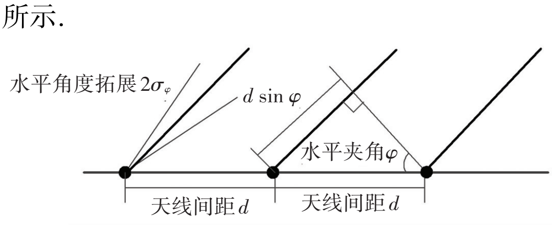

图 2　Massive MIMO 空间相关信道

Fig.2　Massive MIMO spatially correlated channel

MIMO 发射天线间相关性由式(4)计算数学期望得到:

$$R = E(\exp(-\mathrm{j}2\pi d\sin\varphi/\lambda)). \tag{4}$$

式中: d 为 MIMO 天线阵列阵元间距, λ 为信号波长, φ 为平面波与天线单元对之间夹角,且为高斯分布分布的随机变量,均值为 $\bar{\varphi}$, 方差为 σ_φ^2, 推导出相关性近似解析形式的解[16].

$$R \approx \exp(-\frac{\sigma_\varphi^2\hat{\theta}^2\cos^2\bar{\varphi}}{2}) \times \exp\left[-j(1-\frac{\sigma_\varphi^2}{2})\hat{\theta}\sin\bar{\varphi}\right]. \tag{5}$$

但其信道模型只在水平方向上具有角度拓展,将同时考虑在水平和垂直两个方向上角度扩展进行三维空间相关信道建模. 信道模型见图 3.

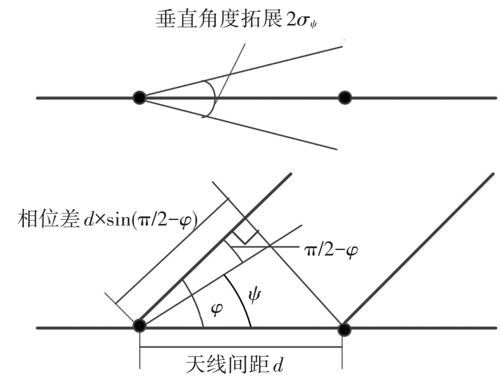

图 3　Massive MIMO 3D 空间相关信道

Fig.3　Massive MIMO 3D spatially correlated channel

图 3 中上部分为天线出射波在垂直方向的角度拓展,下部分为水平和垂直方向都有角度拓展的三维空间相关信道建模. 图 3 中角度关系为

$$\cos\varphi = \cos(\pi/2-\varphi) \times \cos\psi, \tag{6}$$

代入式(4)得

$$R = E(\exp(-\mathrm{j}2\pi d\sin(\pi/2-\varphi)/\lambda)). \tag{7}$$

再由式(5)得出 Massive MIMO 三维空间相关信道近似解析形式解为

$$R \approx \exp(-\frac{\sigma_\varphi^2\hat{\theta}^2\cos^2(\pi/2-\bar{\varphi})}{2}) \times \exp\left[-\mathrm{j}(1-\frac{\sigma_\varphi^2}{2})\hat{\theta}\sin(\pi/2-\bar{\varphi})\right]. \tag{8}$$

2　线性检测算法

线性检测算法利用一个加权矩阵实现逆转信道的作用,基本的线性检测算法包括迫零检测算法和最小均方误差(MMSE)检测算法.

$$\boldsymbol{x} = \boldsymbol{H}^+\boldsymbol{y}. \tag{9}$$

式中 $\boldsymbol{H}^+$ 为信道矩阵的伪逆矩阵.

当接收天线数目大于发射天线数目时. 信道矩阵的秩为发射天线数目,伪逆矩阵可以表示为

$$\boldsymbol{H}^{+} = (\boldsymbol{H}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{H})^{-1}\boldsymbol{H}^{\mathrm{H}}, \tag{10}$$

代入式(9)得:

$$\boldsymbol{x} = (\boldsymbol{H}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{H})^{-1}\boldsymbol{H}^{\mathrm{H}}y. \tag{11}$$

上式即为迫零检测算法表达式.

当 $\boldsymbol{H}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{H}$ 为奇异矩阵时,伪逆矩阵可由下式得出:

$$\boldsymbol{H}^{+} = \lim_{\delta\to\infty} (\boldsymbol{H}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{H} + \delta\boldsymbol{I})^{-1}\boldsymbol{H}^{\mathrm{H}}. \tag{12}$$

式中 $\boldsymbol{I}$ 为单位矩阵,将 δ 用信号噪声 σ_n^2 定义,则得下式为

$$H^{+} = \lim_{\delta\to\infty} (H^{\mathrm{H}}H + \sigma_n^2 I)^{-1}H^{\mathrm{H}}, \tag{13}$$

代入式(9)即得

$$x = (H^{\mathrm{H}}H + \sigma_n^2 I)H^{\mathrm{H}}y. \tag{14}$$

上式即为最小均方误差(MMSE)检测算法表达式.

3 迭代检测算法

3.1 权重矩阵对称正定性证明

由 MMSE 检测算法表达式(14)得

$$\hat{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{P}^{-1}\hat{\boldsymbol{y}}, \tag{15}$$

$$\boldsymbol{P} = \boldsymbol{H}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{H} + \sigma_n^2\boldsymbol{I}. \tag{16}$$

式中:$\boldsymbol{P}$ 为权矩阵,$\boldsymbol{H}^{\mathrm{H}}$ 为信道矩阵的复共轭转置,由矩阵乘积性质,则矩阵 $\boldsymbol{H}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{H}$ 为对称矩阵.

$$\hat{\boldsymbol{y}} = \boldsymbol{H}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{y}. \tag{17}$$

设存在任意复数域非零列向量 $\boldsymbol{X}$ 有

$$\boldsymbol{X} \neq 0 \Rightarrow \boldsymbol{H}\boldsymbol{X} \neq 0. \tag{18}$$

根据矩阵二次型理论则有

$$(\boldsymbol{H}\boldsymbol{X})^{\mathrm{H}}\boldsymbol{H}\boldsymbol{X} = \boldsymbol{X}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{H}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{H}\boldsymbol{X} > 0. \tag{19}$$

且由于噪声能量大于零,则权矩阵:

$$\boldsymbol{P} = (\boldsymbol{H}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{H} + \sigma_n^2\boldsymbol{I}) > 0. \tag{20}$$

权矩阵 $\boldsymbol{P}$ 为对称正定矩阵,矩阵的对称正定性为利用迭代算法检测信号奠定了数学基础.

3.2 矩阵分解及迭代推导

将式(15)变形为

$$\boldsymbol{P}\hat{\boldsymbol{x}} = \hat{\boldsymbol{y}}. \tag{21}$$

将权矩阵 $\boldsymbol{P}$ 分解为

$$\boldsymbol{P} = \boldsymbol{D} + \boldsymbol{L} + \boldsymbol{U}. \tag{22}$$

式中:$\boldsymbol{D}$ 为对角矩阵,$\boldsymbol{L}$ 为下三角矩阵,$\boldsymbol{U}$ 为上三角矩阵. 代入式(21)得

$$(\boldsymbol{D} + \boldsymbol{L} + \boldsymbol{U})\hat{\boldsymbol{x}} = \hat{\boldsymbol{y}}. \tag{23}$$

将公式逐步变形得

$$\boldsymbol{D}\hat{\boldsymbol{x}} = -(\boldsymbol{L} + \boldsymbol{U})\hat{\boldsymbol{x}} + \hat{\boldsymbol{y}}. \tag{24}$$

$$\hat{\boldsymbol{x}} = -\boldsymbol{D}^{-1}(\boldsymbol{L} + \boldsymbol{U})\hat{\boldsymbol{x}} + \boldsymbol{D}^{-1}\hat{\boldsymbol{y}}. \tag{25}$$

由此可得迭代公式为

$$\hat{\boldsymbol{x}}^{(i+1)} = -\boldsymbol{D}^{-1}(\boldsymbol{L} + \boldsymbol{U})\hat{\boldsymbol{x}}^{(i)} + \boldsymbol{D}^{-1}\hat{\boldsymbol{y}}. \tag{26}$$

式中 i 为迭代次数,将矩阵写成分量形式为

$$\hat{x}_j^{(i+1)} = \frac{1}{P_{jj}}(\hat{y}_j - \sum_{m=1}^{j-1} p_{jm}\hat{x}_m^{(i)} - \sum_{m=j+1}^{n} p_{jm}\hat{x}_m^{(i)}). \tag{27}$$

分析式(27),在迭代过程中,每次迭代都是使用前一次迭代的全部分量 $\hat{x}_j^{(i)}$,而在计算 $\hat{x}_j^{(i+1)}$ 时,最新的分量 $\hat{x}_1^{(i+1)}, \hat{x}_2^{(i+1)}, \cdots, \hat{x}_{j-1}^{(i+1)}$ 已经算出,但是没有被利用. 事实上,最新算出的分量一般都比前一次分量更加逼近精确解,因此,若在迭代求解 $\hat{x}_j^{(i+1)}$ 时,充分利用计算出的新分量 $\hat{x}_1^{(i+1)}, \hat{x}_2^{(i+1)}, \cdots, \hat{x}_{j-1}^{(i+1)}$ 便可对上式迭代公式加以修正,可得迭代公式为

$$\hat{x}_j^{(i+1)} = \frac{1}{P_{jj}}(\hat{y}_j - \sum_{m=1}^{j-1} p_{jm}\hat{x}_m^{(i+1)} - \sum_{m=j+1}^{n} p_{jm}\hat{x}_m^{(i)}). \tag{28}$$

加快迭代收敛速度,引入松弛因子 ω,首先将上式改写为

$$\hat{x}_j^{(i+1)} = \hat{x}_j^{(i)} + \frac{1}{P_{jj}}(\hat{y}_j - \sum_{m=1}^{j-1} p_{jm}\hat{x}_m^{(i+1)} - \sum_{m=j}^{n} p_{jm}\hat{x}_m^{(i)}), \tag{29}$$

并记误差项为

$$r_j^{(i+1)} = \frac{1}{P_{jj}}(\hat{y}_j - \sum_{m=1}^{j-1} p_{jm}\hat{x}_m^{(i+1)} - \sum_{m=j+1}^{n} p_{jm}\hat{x}_m^{(i)}). \tag{30}$$

当迭代收敛时,所有的误差趋于零.

使用松弛因子对误差项加以修正,得公式

$$\hat{x}_j^{(i+1)} = \hat{x}_j^{(i)} + \omega \times r_j^{(i+1)}. \tag{31}$$

将式(30)代入式(31)即得

$$\hat{x}_j^{(i+1)} = \hat{x}_j^{(i)} + \frac{\omega}{P_{jj}}(\hat{y}_j - \sum_{m=1}^{j-1} p_{jm}\hat{x}_m^{(i+1)} - \sum_{m=j+1}^{n} p_{jm}\hat{x}_m^{(i)}). \tag{32}$$

将式(32)写成矩阵向量形式有

$$\hat{x}^{(i+1)} = (\boldsymbol{D} + \omega\boldsymbol{L})^{-1}[(1-\omega)\boldsymbol{D} - \omega\boldsymbol{U}]\hat{\boldsymbol{x}}^{(i)} + \omega(\boldsymbol{D} + \omega\boldsymbol{L})^{-1}\hat{\boldsymbol{y}}. \tag{33}$$

通过适当选取松弛因子,可以使式(33)迭代收敛更快.

3.3 松弛因子选取范围确定

令式(33)的迭代矩阵为

$$\boldsymbol{B} = (\boldsymbol{D} + \omega\boldsymbol{L})^{-1}[(1-\omega)\boldsymbol{D} - \omega\boldsymbol{U}]. \tag{34}$$

设迭代矩阵的特征值为依此为 $\lambda_1, \lambda_1, \cdots, \lambda_n$ 则迭代矩阵行列式为

$$|\boldsymbol{B}| = |\lambda_1\lambda_1\cdots\lambda_{\mathrm{n}}| \leqslant [\rho(\boldsymbol{B})]^n. \tag{35}$$

式中 $\rho(\boldsymbol{B})$ 为迭代矩阵的谱半径,同时由迭代方法收敛的充要条件为谱半径小于 1[8] 固有:

$$|\boldsymbol{B}|^{\frac{1}{n}} = \rho(\boldsymbol{B}) < 1. \tag{36}$$

迭代矩阵的行列式为

$$
\begin{aligned}
|\boldsymbol{B}| &= |(\boldsymbol{D}+\omega\boldsymbol{L})^{-1}|\,|[(1-\omega)\boldsymbol{D}-\omega\boldsymbol{U}]| = \\
&|(\boldsymbol{D}+\omega\boldsymbol{L})^{-1}|\,|(1-\omega)\boldsymbol{D}-\omega\boldsymbol{U}| = \\
&|\boldsymbol{D}+\omega\boldsymbol{L}|^{-1}\,|(1-\omega)\boldsymbol{D}-\omega\boldsymbol{U}| = \\
&\left(\prod_{j=1}^{j=n} p_{jj}\right)^{-1} \times (1-\omega)^n \times \left(\prod_{j=1}^{j=n} p_{jj}\right) = \\
&(1-\omega)^n.
\end{aligned} \tag{37}
$$

所以成立关系式有

$$|\boldsymbol{B}|^{\frac{1}{n}} = |(1-\omega)^n|^{\frac{1}{n}} < 1. \tag{38}$$

即得松弛因子的范围为

$$0 < \omega < 2. \tag{39}$$

当松弛因子等于 1.0 时，即为式(28)．通常希望选择一个优化的松弛因子加快收敛速度，但是，目前尚无确定优化松弛因子的一般理论．必须结合具体实际工程确定一个优化超松弛因子．因此，通过仿真分析给出优化松弛因子便有了工程意义．

4　性能仿真

4.1　仿真条件

计算机仿真验证算法性能，仿真参数见表 1．

表 1　仿真参数

Tab.1　Simulation parameters

仿真条件	参数设定
调制方式	64QAM
发射天线数目配置	64
接收天线数目配置	128
信道	瑞利衰落信道
迭代次数	8，12，16
松弛因子	间隔 0.2

4.2　误比特性能分析

图 4 所示为不同松弛因子迭代算法及 MMSE 检测算法的误比特率性能，迭代次数分别设定为 8 和 16，按间距设定不同松弛因子，由图可见，在松弛因子为 1.4 时，误比特率性能接近迭代次数 16 时的误比特率检测性能和 MMSE 检测算法性能．迭代次数减少 50%，信噪比 10 dB 到 20 dB 分集增益为 3.96，分集增益较松弛因子为 1.0 提升 1.71，在信噪比为 20 dB 时，误比特率下降近两个数量级．由此可见，优化松弛因子 1.4 能实现较少迭代次数下较低误比特率，同时说明的是此仿真帧数为十万次，所得结论不失一般性．分析原因是，在数学处理上引入优化松弛因子能减少迭代次数的同时尽可能逼近真值解，故而能实现少迭代次数低误比特率性能．

图 5 所示 Massive MIMO 三维空间相关信道下超松弛检测算法的检测性能．由图可见，相关信道与非相关信道误比特率下降曲线相距较大，说明信道相关性对误比特率影响较大，且相关信道下误比特率曲线下降缓慢，则相关信道下分集增益较差，同时，在水平方向和垂直方向上都有角度扩展的三维空间相关信道，相比只有在水平方向上有角度扩展的二维空间相关信道，误比特率曲线更高，则其误比特率性能更差，这是因为在三维建模空间相关信道下其天线阵元间入射波相位差减小，等效阵元天线间距变小，信道相关性增大．因此，在实际性能分析时，要加以考虑信道相关性，更应注意由三维角度拓展造成的信道相关性加剧影响．

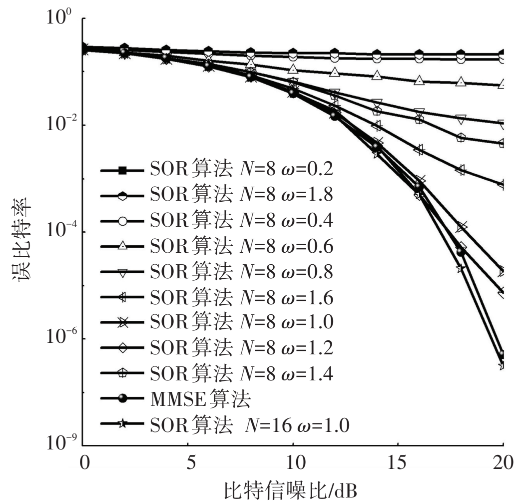

图 4　不同松弛因子下算法检测性能

Fig. 4　The performance of detection algorithm for different relaxation factor

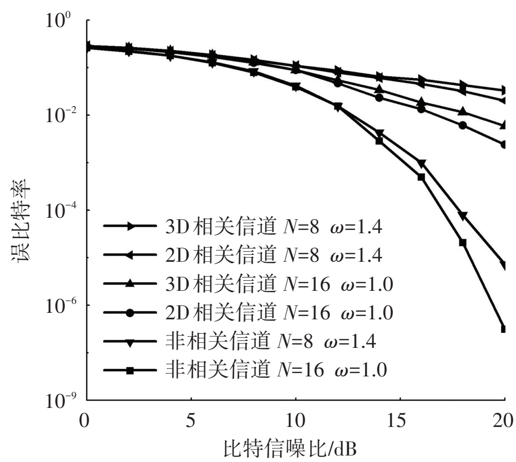

图 5　Massive MIMO 空间相关信道下检测性能

Fig. 5　The performance of detection for Massive MIMO in spatially correlated channel

4.3　计算复杂度分析

计算复杂度主要分析算法检测过程中复数乘法的运算次数．假定信道在一帧内时不变，同时将计算复杂度分为起始部分和过程部分．其中，起始部分是指权矩阵的计算部分，过程部分是指后续检测部分．MMSE 检测算法起始部分包括信道矩阵伪逆

过程和权矩阵求逆过程,后续检测部分是指信号检测矩阵运算部分. 迭代算法起始部分是权矩阵的得出过程,后续部分是迭代检测部分,其中,未引入松弛因子迭代算法按式(28)分析,引入松弛因子按式(32)分析.

计算复杂度分析见表 2,其中 M 为调制阶数,N_T 为发射天线数目, N_R 为接收天线数目, N 为迭代次数.

表 2 计算复杂度

Tab.2 Computational complexity

检测算法	过程	复数乘法次数
MLD	过程	$M^{N_T}(N_T N_R + N_T)$
MMSE	起始	$> N_T{}^2(N_T + 1) + N_T N_R + N_T$
	后续	$N_T{}^2 + N_T N_R$
迭代算法	起始	$N_T N_R + N_T$
	后续	$N_T{}^2 + N_T N_R$
迭代算法（松弛因子）	起始	$N_T N_R + N_T$
	后续	$N(N_T(N_T + 2)) + N_T N_R$

图 6 所示为检测算法的计算复杂度. 由图可见 MMSE 检测算法的复杂度高出迭代次检测算法近一个数量级. 迭代检测算法中,迭代次数为 8 时,其计算复杂度处于较低位置. 迭代算法的计算复杂度主要是由迭代次数引起,显然,随着迭代次数的增加,计算复杂度逐渐增加,第 8 次迭代产生的计算复杂度约占总复杂度的 8.32%,而第 16 次迭代产生的计算复杂度,只占总复杂度的 5.00%,可见,由迭代产生的计算复杂度占比逐渐下降,这是因为每次迭代产生的复杂度保持不变,而总复杂度在逐渐增加,但总复杂度增加比率在下降. 同时注意到无论是 MMSE 检测算法,还是迭代检测算法其计算复杂度不随信噪比变化而变化,能一定程度保证检测算法的稳定性.

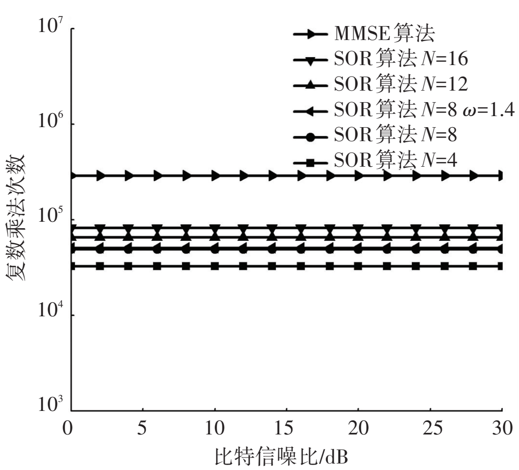

图 6 检测算法计算复杂度

Fig.6 The computational complexity of detection algorithm

4.4 信噪比与计算复杂度权衡分析

图 7 所示在误比特率为10^{-3}下,信噪比与计算复杂度权衡分析图. 由图可见,优化松弛因子为 1.4 相比较正常松弛因子 1.0,当迭代次数为 8 时,所需信噪比下降近 4 dB,误比特率性能与迭代次数 16 相近,且计算复杂度低近 20%,优化松弛因子 1.4 超松弛迭代算法能在计算复杂度和信噪比综合下实现较优检测.

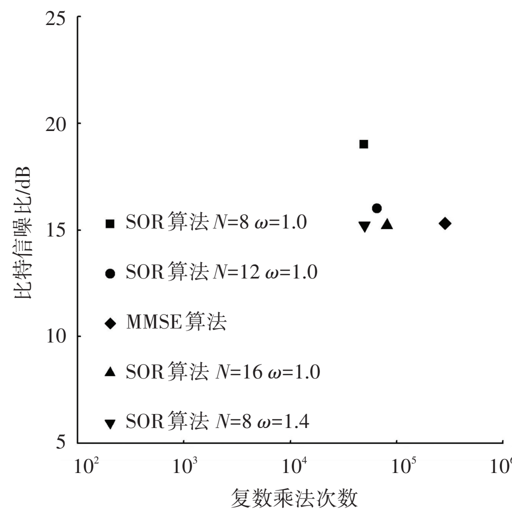

图 7 信噪比与复杂度权衡分析

Fig.7 The trade-off between the signal-to-noise ratio and the computational complexity

5 结 论

本文首先以只在水平方向上具有角度拓展空间相关信道为基础,构建在水平和垂直两个方向上都具有角度扩展的三维空间相关信道模型,推导出信道相关性解析形式表达式. 同时采用低复杂度的优化松弛因子超松弛迭代方法进行信号检测. 仿真结果表明:三维空间相关信道模型相比较二维空间相关信道模型加剧信道相关性,在优化松弛因子为 1.4 下,相比较同等迭代次数为 8、松弛因子为 1.0、误比特率10^{-3}时,所需信噪比降低约 4 dB,分集增益提升 1.71,接近迭代次数为 16 的误比特率检测性能,计算复杂度降低近 20%,在权衡分析信噪比和计算复杂度情况下,能获得较优检测性能.

参考文献

[1] MARETTAT L. Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas[J]. IEEE Transactions on Wireless Communication, 2010, 9(11): 3590-3600. DOI: 10.1109/TWC.2010.092810.091092.

[2] RUSEKF, PERSSON D, LAU B K, et al. Scaling up MIMO opportunities and challenges with very large arrays[J]. Signal Processing Magazine, 2013, 30(1): 40-60. DOI: 10.1109/TWC.2010.092810.091092.

[3] LU L, LI Y G, ASHIKGMIN A, et al. An overview of massive MIMO benefits and challenges[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2014, 8(5): 742-758. DOI: 10.1109/JSTSP.2014.2317671.

[4] NGO H, LARSSON E, MARZETTA T. Energy and spectral efficiency of very large multiuser MIMO systems[J]. IEEE Transactions on Communication, 2012, 61(4): 1436-1449. DOI: 10.1109/TCOMM.2013.020413.110848.

[5] HOYDIS J, BRINK T S, DEBBAH M. Massive MIMO in the UL/DL of cellular networks how many antennas do we need[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2013, 31(2): 160-171. DOI: 10.1109/JSAC.2013.130205.

[6] ISHIHARA K, TAKATORI Y, KUBOTA S, et al. Multiuser detection for asynchronous broadband single-carrier transmission systems [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(6): 3066-3071. DOI: 10.1109/TVT.2009.2012716.

[7] WU M, YIN B, WANG Guohui, et al. Large-scale MIMO section for 3GPP LTE algorithms and FPGA implementations[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2014, 8(5): 916-929. DOI: 101109/JSTSP. 2014.2313021.

[8] ZHU X, MURCH R D. Performance analysis of maximum likelihood detection in a MIMO antenna system[J]. IEEE Transactions on Communication, 2002, 50(2): 187-191. DOI: 10.1109/26.983313.

[9] YIN B, WU M, STUDER C, et al. Implementation trade-offs for linear detection in large-scale MIMO systems[C]// International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing Vancouver: IEEE Press, 2013: 2679-2683. DOI: 10.1109/ICASSP.2013.6638142.

[10] TSUNG L. Some results for fast MMSE-SIC detection in spatially multiplexed MIMO systems[J]. IEEE Transaction on Wireless Communication, 2009, 8(11): 5443-5448. DOI: 10.1109/TWC.2009.090196.

[11] BAI D, PARK C, LEE J, et al. LTE-advanced modem design: challenges and perspectives[J]. IEEE Communications Magazine, 2012, 50(2): 178-186. DOI: 10.1109/MCOM.2012.6146497.

[12] HACKBUSCHW. Iterative solution of large linear systems[M]. Leipzig: Springer Nature, 1994: 78-83.

[13] 吴勃英. 数值分析原理[M]. 北京：科学出版社，2003：76-79.
WUBoying. Numerical analysis principle[M]. Beijing: Science Press, 2003: 76-79.

[14] GOLUB G H, WANLOAN C F. Matrix computations[M]. Baltimore: Johns Hopkins University Press, 2012: 441-443.

[15] KERMOAL J P, SCHUMACHER L, PEDERSENK I, et al. A stochastic MIMO radio channel model with experimental validation[J]. IEEE Areas Communication, 2002, 20(6): 1211-1226. DOI: 10.1109/JSAC.2002.801223.

[16] ZHENG Liming, FUKAWA K, SUZUKI H, et al. Low-complexity signal detection by multi-dimensional search for correlated MIMO channels[C]// International Conference on Communications. Kyoto: IEEE Press, 2011: 1-5. DOI: 10.1109/icc.2011.5962771.

(编辑　苗秀芝)

封面图片说明

封面图片来自本期论文"低密度烧蚀材料研究进展",是哈尔滨工业大学张幸红教授课题组开展的超轻质烧蚀材料及其防/隔热性能的展示. 该课题组提出了一种"雾凇"仿生结构的低密度纤维预制体/树脂气凝胶纳米复合材料并对纳米复合材料设计、微结构调控、性能优化以及地面模拟环境考核及烧蚀机理和评价开展研究工作. 首先,根据我国新一代多用途载人飞船特殊的服役环境要求,确定了防热材料的气动外形保持能力、轻量化、防热效率、隔热性能以及有效服役时间等综合要求;其次,提出了"雾凇"仿生结构的低密度纤维预制体/树脂气凝胶纳米复合材料,通过纳米复合材料设计及微结构构筑、性能优化及服役性能考核,建立了涵盖成型-性能-服役环境匹配性良好的飞船防热结构与材料方案;然后,利用电弧风洞、高频等离子体风洞等模拟飞船典型再入环境对超轻质烧蚀材料进行了考核;最后,对超轻质烧蚀材料的烧蚀性能和烧蚀行为进行了研究,通过建立和求解烧蚀行为本征数学模型阐明了其极端环境下防热/隔热机制.

(图文提供:张幸红,洪长青,程海明。哈尔滨工业大学 航天学院)