doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2015.08.013
引用格式:王明月,周围,景小荣.基于格基约减辅助的低复杂度 MIMO 信号检测算法[J].电讯技术,2015,55(8):901-905.[WANG Mingyue, ZHOU Wei, JING Xiaorong. A Low Complexity MIMO Detection Algorithm Based on Lattice Reduction[J]. Telecommunication Engineering, 2015,55(8):901-905.]

基于格基约减辅助的低复杂度 MIMO 信号检测算法*

王明月**,周　围,景小荣

(重庆邮电大学 移动通信技术重点实验室,重庆 400065)

摘　要:在多输入多输出(MIMO)系统中,常规的格基约减辅助信号检测算法由于复杂度高而难以在实际工程中应用。为了解决这一问题,基于 Brun 算法提出了一种低复杂度的信号检测算法。该算法首先通过奇异值分解(SVD)得到信道矩阵奇异向量和转换矩阵之间的近似整数关系,进而采用 Brun 算法对信道矩阵的对偶格基进行约减优化,最后将约减后的新对偶格基用于传统线性信号检测。仿真结果表明:该方法的复杂度约为基于常规 Lenstra Lenstra Lovasz(LLL)格基约减辅助的 MIMO 信号检测算法的 0.1 倍;同时,与线性检测算法相比,检测性能提升非常明显,特别在较高信噪比(SNR)范围内。因此,该算法能够在检测性能与计算复杂度之间取得较好的折衷。

关键词:MIMO 系统;信号检测;格基约减;LLL 算法;Brun 算法

中图分类号:TN911.23　　**文献标志码:**A　　**文章编号:**1001-893X(2015)08-0901-05

A Low Complexity MIMO Detection Algorithm Based on Lattice Reduction

WANG Mingyue, ZHOU Wei, JING Xiaorong

(Key Laboratory of Mobile Communication Technology, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: In Multiple Input Multiple Output(MIMO) systems, it is difficult to use conventional lattice basis reduction for signal detection in reality due to its high complexity. In order to solve this problem, a low-complexity algorithm based on Brun's algorithm is proposed. First, the algorithm uses Singular Value Decomposition(SVD) to obtain the integer relationship between channel matrix's singular vector and converted matrix. Then, it uses Brun's algorithm to reduce the dual basis of channel matrix. Finally, the algorithm uses the new dual basis to perform linear detection. Simulation results indicate that the algorithm's complexity is one tenth of Lenstra Lenstra Lovasz(LLL) aided signal detection algorithm, and it can achieve the performance gains over the conventional linear detection, especially for high signal-to-noise ratio(SNR) range. So, the algorithm can get a better tradeoff between detection performance and computational complexity.

Key words: MIMO system; signal detection; lattice reduction; LLL algorithm; Brun's algorithm

1　引　言

已有理论研究表明,发送端和接收端采用多根天线的多输入多输出(Multiple Input Multiple Output, MIMO)技术,无需增加带宽和天线发送功率即可提高信道容量,并且还可有效地降低误码率。容量的提高是通过 MIMO 技术所提供的空间复用增益

* 收稿日期:2015-02-12;修回日期:2015-04-10　Received date:2015-02-12; Revised date:2015-04-10
基金项目:国家科技重大专项(2014ZX03001009-003)
Foundation Item: The National Science and Technology Major Special Project of China(2014ZX03001009-003)
** 通讯作者:wangmy19901029@163.com　**Corresponding author:** wangmy19901029@163.com

获得,误码率的降低则是通过 MIMO 技术所提供的空间分集增益获得。也正是由于 MIMO 技术具有如此显著的优势,使其成为第 4 代移动通信系统(4G)物理层的关键技术之一。

随着人们对宽带无线通信业务需求的增长,要求无线通信系统能够提供相应增长的高数据传输率。在当前时频资源有限的情况下,MIMO 空间复用技术为该需求的实现提供了可能。其基本思想是:同一时刻不同发送天线上发送不同的数据,接收端的每一根天线接收到的信号为各发送天线所发送数据的混合,并附加接收噪声。在这种情况下,如何以尽可能低的复杂度有效地恢复出发送信号,是一项具有挑战性的研究任务。

为了恢复发送信号,可采用基于最大似然(Maximum Likelihood,ML)准则的理想检测器,尽管该检测器可获得最优的性能,但其复杂度随天线数目的增加而呈指数增长,限制了其在实际中的应用。为此,Foschini 等人提出了排序串行干扰消除(Ordered Successive Interference Cancellation,OSIC)算法[1],该算法在检测时需要多次排序和求解信道矩阵的伪逆,但检测性能适中。在实际工程应用中,通常采用线性检测算法,比如迫零(Zero Forcing,ZF)检测算法和最小均方误差(Minimum Mean Square Error,MMSE)检测算法[2]等,它们与基于 ML 准则的检测算法相比,复杂度相对较小,但性能相差甚远,有时难以满足特殊场合对检测性能的要求。基于此,文献[3]提出了球形译码检测(Sphere Decoding,SD)算法,随后文献[4]对其进行改进,提出了一种低复杂度 SD 算法。SD 算法性能接近 ML 算法,但其复杂度在低信噪比(Signal-to-Noise Ratio,SNR)条件下依然具有指数级复杂度。因此,综合考虑复杂度和性能,设计切实可行的、适用于 MIMO 系统的信号检测算法就显得尤为重要。

文献[5]将格基约减算法引入 MIMO 线性检测算法中并获得了近似最优的检测性能。为了降低复杂度,文献[6]提出了一种复数对偶格基约减多用户检测算法;文献[7]提出了一种近似基向量重排序准则的低复杂度格基约减检测算法。同时,将格基约减用于预编码也能有效提高系统性能,具有一定的实用价值。文献[8]提出了一种基于格基约减辅助的几何均值分解 Tomlison Harashima 预编码算法,文献[9]提出了一种基于块对角化的格基约减几何均值分解向量预编码算法。然而,以上算法均基于常规 Lenstra Lenstra Lovasz(LLL)[10]格基约减算法,而在 MIMO 系统中,当信道矩阵变化加快后,LLL 算法因存在复杂度过高的问题而无法适应于实际工程。

为此,文献[11]中提出了一种基于 Brun 算法的高效预编码算法,主要思想是对信道矩阵的伪逆进行格基约减,进而将其用于预编码处理。随后,文献[12]对其进行了硬件实现。鉴于 Brun 算法的高效性,考虑到 MIMO 系统本身信道条件的特性,本文基于 Brun 算法约减信道矩阵的对偶格基,进而将其用于信号检测处理,基于此,提出了一种低复杂度格基约减辅助信号检测算法。仿真结果表明:与线性检测算法相比,该算法能够取得非常明显的性能增益,同时可以有效地降低格基约减辅助信号检测算法的复杂度。

2 系统模型

考虑一个 MIMO 空间复用系统,发送端配置 N_t 根天线,接收端配置 N_r 根天线($N_r \geq N_t$)。首先,信源数据经串并变换分成 N_t 个数据子流,每层的数据经过调制由 N_t 根不同的发送天线同时发送出去。

令 $\boldsymbol{x}=[x_1,x_2,\cdots,x_{N_t}]^{\mathrm{T}}$ 表示发送信号向量,考虑平坦衰落信道,则对应的接收信号 $\boldsymbol{y}=[y_1,y_2,\cdots,y_{N_r}]^{\mathrm{T}}$ 可表示为

$$\boldsymbol{y}=\boldsymbol{H}\boldsymbol{x}+\boldsymbol{n}。\tag{1}$$

式中,$\boldsymbol{H}$ 表示信道矩阵,假设 $\boldsymbol{H}$ 在一帧中保持不变,帧与帧之间独立变化;$\boldsymbol{n}$ 表示接收噪声向量,其元素为满足均值为 0、方差为 σ_n^2 的独立同分布复高斯随机变量。

3 基于格基约减辅助的线性检测算法

3.1 传统格基约减辅助线性信号检测

传统的格基约减辅助信号检测首先约减优化信道矩阵(或者信道矩阵的对偶矩阵),减小矩阵列向量之间的相关性,进而对变换后的矩阵采用传统的线性检测算法,最后将估计值恢复成原矩阵中的点。其具体结构如图 1 所示,主要包括两类:原始格基约减辅助信号检测和对偶格基约减辅助信号检测。

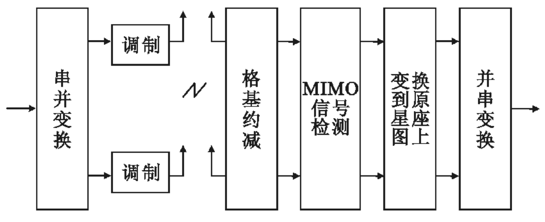

图 1 格基约减辅助 MIMO 信号检测

Fig. 1 Lattice basis reduction aided MIMO signal detection

3.1.1 原始格基约减辅助信号检测

该算法根据信道矩阵 $\boldsymbol{H}$ 生成一个转换矩阵 $\boldsymbol{T}$,则式(1)可以改写为

$$\boldsymbol{y}=\boldsymbol{H}\boldsymbol{T}\boldsymbol{T}^{-1}\boldsymbol{x}+\boldsymbol{n}=\widetilde{\boldsymbol{H}}\boldsymbol{z}+\boldsymbol{n}。\tag{2}$$

式中,$\widetilde{\boldsymbol{H}}=\boldsymbol{H}\boldsymbol{T}$ 为格基约减的新基矩阵,$\boldsymbol{z}=\boldsymbol{T}^{-1}\boldsymbol{x}$ 为格基约减等效的发送信号。基于格基约减处理的 ZF 和 MMSE 检测如下:

$$\tilde{\boldsymbol{z}}_{\mathrm{LR\_ZF}}=\widetilde{\boldsymbol{H}}^{\dagger}\boldsymbol{y}=\boldsymbol{z}+\widetilde{\boldsymbol{H}}^{\dagger}\boldsymbol{n}=\boldsymbol{T}^{-1}\boldsymbol{x}_{\mathrm{ZF}},\tag{3}$$

$$\tilde{\boldsymbol{z}}_{\mathrm{LR\_MMSE}}=(\widetilde{\boldsymbol{H}}^{\mathrm{H}}\widetilde{\boldsymbol{H}}+\sigma_n^2\boldsymbol{I}_{N_t})^{-1}\widetilde{\boldsymbol{H}}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{y}。\tag{4}$$

若采用式(4)的扩展形式,MMSE 检测与 ZF 检测等价,即

$$\tilde{\boldsymbol{z}}_{\mathrm{LR\_MMSE}}=(\underline{\widetilde{\boldsymbol{H}}}^{\dagger})\boldsymbol{y}。\tag{5}$$

3.1.2 对偶格基约减辅助信号检测

对偶格基约减是对 $(\boldsymbol{H}^{\dagger})^{\mathrm{H}}$ 进行处理,得到 $\widetilde{(\boldsymbol{H}^{\dagger})^{\mathrm{H}}}$,再将信道模型左右两边同乘 $(\widetilde{(\boldsymbol{H}^{\dagger})^{\mathrm{H}}})^{\mathrm{H}}$ 可得对偶格基约减的 ZF 检测为

$$(\widetilde{(\boldsymbol{H}^{\dagger})^{\mathrm{H}}})^{\mathrm{H}}\boldsymbol{y}=(\widetilde{(\boldsymbol{H}^{\dagger})^{\mathrm{H}}})^{\mathrm{H}}\boldsymbol{H}\boldsymbol{x}+(\widetilde{(\boldsymbol{H}^{\dagger})^{\mathrm{H}}})^{\mathrm{H}}\boldsymbol{n}=$$

$$\boldsymbol{z}+(\widetilde{(\boldsymbol{H}^{\dagger})^{\mathrm{H}}})^{\mathrm{H}}\boldsymbol{n}。\tag{6}$$

式中,$\widetilde{(\boldsymbol{H}^{\dagger})^{\mathrm{H}}}=(\boldsymbol{H}^{\dagger})^{\mathrm{H}}\boldsymbol{T}$,$\boldsymbol{z}=\boldsymbol{T}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{x}$。

式(6)可等价为

$$\tilde{\boldsymbol{z}}_{\mathrm{DLR\_ZF}}=\boldsymbol{z}+(\widetilde{(\boldsymbol{H}^{\dagger})^{\mathrm{H}}})^{\mathrm{H}}\boldsymbol{n}=\boldsymbol{T}^{\mathrm{H}}\tilde{\boldsymbol{x}}_{\mathrm{ZF}}。\tag{7}$$

同理,对偶格基约减的 MMSE 检测为

$$\tilde{\boldsymbol{z}}_{\mathrm{DLR\_MMSE}}=(\underline{\widetilde{(\boldsymbol{H}^{\dagger})^{\mathrm{H}}}})^{\mathrm{H}}\boldsymbol{y}。\tag{8}$$

3.2 基于 Brun 算法的格基约减辅助线性信号检测算法

目前,大多数格基约减辅助信号检测算法基于 LLL 算法设计,该算法通过多次尺寸约减和列交换,使得经过 LLL 格基约减后的信道矩阵 $\widetilde{\boldsymbol{H}}=\boldsymbol{Q}\boldsymbol{R}$ 满足如下关系:

$$\|r_{l,k}\|\leqslant\frac{1}{2}\|r_{l,l}\|,1\leqslant l\leqslant k\leqslant N_t,\tag{9}$$

$$\delta\|r_{k-1,k-1}\|\leqslant\|r_{k,k}\|+\|r_{k-1,k}\|,k=1,2,\cdots,N_t。\tag{10}$$

式中,$1/4\leqslant\delta\leqslant1$,$r_{l,k}$ 表示 $\boldsymbol{R}$ 中第(l,k)个元素。

由此可以看出,基于 LLL 格基约减辅助信号检测算法需要多次尺寸约减以及列交换,因此,其复杂度相对较高。

本小节将给出一种比常规 LLL 格基约减辅助信号检测算法更简单、更高效的算法,其基本思想是:

(1)对信道矩阵进行奇异值分解(Singular Value Decomposition,SVD),得到信道矩阵奇异向量和转换矩阵之间的近似整数关系;

(2)采用 Brun 算法对信道矩阵的对偶格基进行约减优化;

(3)将约减后的基矩阵用于传统线性信号检测。

下面给出具体分析。

首先对信道矩阵 $\boldsymbol{H}$ 进行奇异值分解 SVD,即

$$\boldsymbol{H}=\boldsymbol{U}\boldsymbol{\Sigma}(\boldsymbol{H})^{-\mathrm{H}}。\tag{11}$$

式中,$\boldsymbol{\Sigma}=\mathrm{Diag}\{\sigma_1,\sigma_2,\cdots,\sigma_{N_t}\}$,满足 $\sigma_1\geqslant\sigma_2\geqslant\cdots\geqslant\sigma_{N_t}$,$\boldsymbol{U}=[\boldsymbol{u}_1,\boldsymbol{u}_2,\cdots,\boldsymbol{u}_{N_r}]^{\mathrm{T}}$ 表示 $\boldsymbol{H}$ 的左奇异矩阵,$\boldsymbol{V}=[\boldsymbol{v}_1,\boldsymbol{v}_2,\cdots,\boldsymbol{v}_{N_t}]^{\mathrm{T}}$ 表示 $\boldsymbol{H}$ 的右奇异矩阵。

约减信道矩阵的对偶格基就是通过左乘或右乘一个转换矩阵,使其成为新的对偶格基矩阵,基矩阵的向量变成正交性更好或长度更短的向量。将对偶格基 $\boldsymbol{P}=(\boldsymbol{H}^{\dagger})^{\mathrm{H}}$ 用列向量表示,即

$$\boldsymbol{P}=[\boldsymbol{p}_1,\boldsymbol{p}_2,\cdots,\boldsymbol{p}_{N_t}]。\tag{12}$$

如果将对偶格基约减的新基矩阵表示为 $\widetilde{\boldsymbol{P}}=[\tilde{\boldsymbol{p}}_1,\tilde{\boldsymbol{p}}_2,\cdots,\tilde{\boldsymbol{p}}_{N_t}]$,则对矩阵 $\boldsymbol{P}$ 进行格基约减的实质就是要找到转换矩阵 $\boldsymbol{B}=[\boldsymbol{b}_1,\boldsymbol{b}_2,\cdots,\boldsymbol{b}_{N_t}]$,使得 $\|\tilde{\boldsymbol{p}}_k\|^2$ 尽可能小,其中 $\tilde{\boldsymbol{p}}_k=\boldsymbol{P}\boldsymbol{b}_k$。进一步,$\|\tilde{\boldsymbol{p}}_k\|^2$ 可表示为

$$\|\widetilde{\boldsymbol{P}}_k\|^2=\|(\boldsymbol{H}^{\dagger})^{\mathrm{H}}\boldsymbol{b}_k\|^2=\boldsymbol{b}_k^{\mathrm{H}}(\boldsymbol{H}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{H})^{-1}\boldsymbol{b}_k=$$

$$\boldsymbol{b}_k^{\mathrm{H}}(\boldsymbol{V}\boldsymbol{\Sigma}\boldsymbol{V}^{\mathrm{H}})^{-1}\boldsymbol{b}_k=\sum_{j=1}^{N_t}\frac{1}{\sigma_j^2}\left|\boldsymbol{v}_j\boldsymbol{b}_k\right|^2。\tag{13}$$

式中,$\boldsymbol{v}_j$ 表示信道矩阵 $\boldsymbol{H}$ 的右奇异矩阵的行向量。定义信道矩阵的条件数为

$$c_H=\frac{\sigma_1}{\sigma_{N_t}}。\tag{14}$$

在 MIMO 系统中,尤其是当发送天线数(或者用户数)总和与基站端天线数相当时,此时,信道条件数 $c_H>1$。在这种情况下,信道矩阵有一个非常小的奇异值 σ_{N_t},即$\frac{1}{\sigma_j^2}\ll\frac{1}{\sigma_{N_t}^2}$,此时,式(14)可近似为

$$\|\tilde{\boldsymbol{p}}_k\|^2=\|(\boldsymbol{H}^{\dagger})^{\mathrm{H}}\boldsymbol{b}_k\|^2\approx\frac{1}{\sigma_{N_t}^2}|\boldsymbol{v}_{N_t}\boldsymbol{b}_k|^2。\tag{15}$$

由式(16)可知,使 $\|\tilde{\boldsymbol{p}}_k\|^2$ 尽可能小等价于找到一个与 $\boldsymbol{v}_{N_t}$ 近似正交的整数矩阵 $\boldsymbol{B}$,对于该矩阵的形成可参见文献[13]。

下面给出基于 Brun 算法的格基约减算法步骤:

步骤 1:初始化 $\boldsymbol{v}^{(0)}$,$\boldsymbol{P}^{(0)}=\boldsymbol{P}$,$\boldsymbol{B}^{(0)}=\boldsymbol{I}$;

步骤 2:选出 $\boldsymbol{v}^{(i)}$ 中模值最大的两个值:

$$s=\underset{k\in\{1,2,\cdots,N_t\}}{\arg\max}\left|v_k^i\right|,\tag{16}$$

$$t=\underset{k\in\{1,2,\cdots,N_t\}/\{s\}}{\arg\max}\left|v_k^i\right|;\tag{17}$$

步骤 3:计算

$$\beta^{(i)}=\text{round}\left(\frac{v_s^{(i)}}{v_t^{(i)}}\right) \tag{18}$$

并且更新变量:

$$\begin{aligned}\boldsymbol{v}^{(i+1)}&=[v_1^{(i)},\cdots,v_{s-1}^{(i)},v'_s,v_{s+1}^{(i)},\cdots,v_{N_t}^{(i)}],\\ \boldsymbol{P}^{(i+1)}&=[\boldsymbol{p}_1^{(i)},\cdots,\boldsymbol{p}_{s-1}^{(i)},\boldsymbol{p}'_s,\boldsymbol{p}_{s+1}^{(i)},\cdots,\boldsymbol{p}_{N_t}^{(i)}],\\ \boldsymbol{B}^{(i+1)}&=[\boldsymbol{b}_1^{(i)},\cdots,\boldsymbol{b}_{s-1}^{(i)},\boldsymbol{b}'_s,\boldsymbol{b}_{s+1}^{(i)},\cdots,\boldsymbol{b}_{N_t}^{(i)}],\end{aligned} \tag{19}$$

式中,$v'_s=v_s^{(i)}-\beta^{(i)}v_t^{(i)}$,$\boldsymbol{p}'_s=\boldsymbol{p}_s^{(i)}-\beta^{(i)}\boldsymbol{p}_t^{(i)}$,$\boldsymbol{b}'_s=\boldsymbol{b}_s^{(i)}-\beta^{(i)}\boldsymbol{b}_t^{(i)}$;

步骤 4:检测是否满足终止条件:

$$\|\boldsymbol{p}'_s\|>\|\boldsymbol{p}_s\|。 \tag{20}$$

4 仿真与分析

4.1 性能仿真及分析

为了验证本文所提算法的性能,在 MATLAB 下对算法进行了蒙特卡罗仿真。仿真参数为:发送端和接收端各有 6 根天线,即 $N_r=N_t=6$。信道为准静态平坦衰落信道,信道矩阵的元素为独立同分布的零均值单位方差的复高斯随机变量,发送端采用 QPSK 调制。本节给出了传统线性检测、基于 Brun 算法的对偶格基约减辅助线性检测和基于 LLL 算法的对偶格基约减辅助线性检测算法的误码率随 SNR 变化的曲线,如图 2 所示。

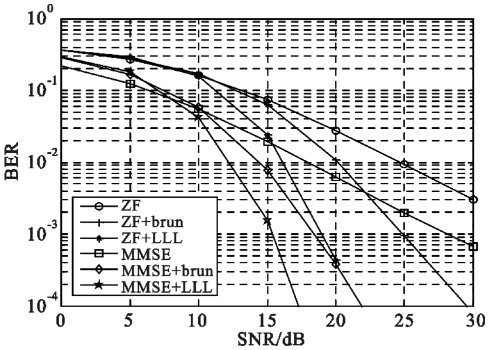

图 2 天线配置为 6×6 时检测性能

Fig. 2 BER performance comparison for $N_r=N_t=6$

由于经过格基约减的新基矩阵的正交性有了明显提高,因此,相比对应的线性检测算法,基于新基矩阵做检测得到的结果更加准确;同时又因为基于 Brun 算法的辅助信号检测只使用了一个奇异向量,所以其性能与基于 LLL 算法辅助信号检测算法相比性能有所下降。

从图 2 可看出:在BER$=10^{-2}$时,基于 Brun 算法的对偶格基约减辅助线性 ZF 检测算法相比传统 ZF 算法,可获得约5 dB的性能增益,尽管与基于 LLL 算法的对偶格基约减辅助线性 ZF 检测算法在性能上相差约4 dB增益,但是复杂度却大幅度降低(具体分析见下小节)。同样地,在BER$=10^{-3}$时,基于 Brun 算法的对偶格基约减辅助线性 MMSE 检测与基于 LLL 算法的对偶格基约减辅助线性 MMSE 检测算法相比相差约3 dB,而它与传统线性 MMSE 检测算法则相差了10 dB,同样地,复杂度却有大幅度降低。

4.2 复杂度仿真及分析

本节首先分析可以避免奇异值分解求解 $\boldsymbol{v}_{N_t}$ 减小本文提出算法的计算复杂度。因为 $\boldsymbol{v}_{N_t}$ 是信道矩阵 $\boldsymbol{H}$ 最小的奇异值对应的右奇异向量,同时,它也是$(\boldsymbol{H}^{\rm H}\boldsymbol{H})^{-1}$最大特征值对应的特征向量。在 MIMO 系统中,$\boldsymbol{H}$ 只有一个特别小的奇异值,相对应的$(\boldsymbol{H}^{-\rm H}\boldsymbol{H})^{-1}$ 只有一个特别大的特征值,此时有 $(\boldsymbol{H}^{\rm H}\boldsymbol{H})^{-1}\approx\frac{1}{\sigma_{N_t}^2}(\boldsymbol{v}_{N_t})^{\rm H}\boldsymbol{v}_{N_t}$,因此,$\boldsymbol{v}_{N_t}$ 可以用$(\boldsymbol{H}^{\rm H}\boldsymbol{H})^{-1}$的任一行向量来表示。由于在求解$(\boldsymbol{H}^{\dagger})^{\rm H}=(\boldsymbol{H}^{\rm H}\boldsymbol{H})^{-1}\boldsymbol{H}$ 的过程中就可以得到 $\boldsymbol{v}_{N_t}$,所以不需要通过奇异值分解来初始化 $\boldsymbol{v}_{N_t}$,由此可以降低本文提出算法的计算复杂度。

由于基于 Brun 算法的对偶格基约减辅助信号检测算法和基于 LLL 算法(取 $\delta=0.75$)的对偶格基约减辅助信号检测的复杂度只在格基约减时计算复杂度不同,因此本节只对 LLL 格基约减信道矩阵对偶格基和 Brun 格基约减信道矩阵的对偶格基的复杂度进行对比;同时本节只对格基约减辅助线性 ZF 信号检测的复杂度进行了分析,因为格基约减辅助线性 MMSE 信号检测能得出相同的结论。

LLL 算法的复杂度由初始化 QR 分解、为满足式(9)进行尺寸约减以及满足式(10)进行的列交换共同决定,其中列交换需要进行多次迭代,每一次迭代又包含计算 Givens 旋转矩阵和向量更新;而 Brun 算法则不需要任何初始化复杂度,其迭代次数也远小于 LLL 算法,并且每次迭代的复杂度也比 LLL 算法小,它的复杂度包含 $\beta^{(i)}$ 的计算、更新 $\boldsymbol{v}^{(i+1)}$、$\boldsymbol{p}'_s$、$\boldsymbol{b}'_s$ 和判断终止条件。

表 1 给出了两种算法复杂度的比较。表中数值产生的基本过程如下:首先随机生成 10 000 个信道,随后计算约减信道矩阵的对偶格基总迭代次数和总浮点数,最后得出平均每个信道对偶格基约减所需的迭代次数和浮点数。

表 1 6×6 MIMO 信道格基约减平均复杂度

Table 1 The average complexity of lattice basis reduction MIMO channel for $N_r=N_t=6$

算法	迭代次数	浮点数
LLL 算法	8	2675
Brun 算法	3	365

从表中可以得出:Brun 算法的迭代次数远小于 LLL 算法的迭代次数;在 6×6 的天线配置下,Brun 算法的总浮点数是 LLL 算法的 0.1 倍左右,因此相比常规 LLL 格基约减辅助信号检测算法,本文所提算法复杂度大幅度降低。

5 结束语

本文提出了一种基于 Brun 算法格基约减辅助的 MIMO 信号检测算法,仿真结果表明:本文算法能有效改善传统线性检测算法的性能,并且复杂度显著低于常规 LLL 格基约减辅助信号检测算法。该算法能够在检测性能与计算复杂度之间取得较好的折衷,因此具有一定的实用价值。同时,本文目前只通过信道矩阵最大的奇异值对应的右奇异向量近似信道矩阵对偶格基的约减基,而没有考虑剩余右奇异向量对其的影响,因此与 LLL 算法仍有一定的差距。下一步可同时考虑多个右奇异向量与信道矩阵对偶格基的约减基的整数关系,提高该算法的性能。

参考文献:

[1] Wolniansky P W, Foschini G J, Golden G D, et al. V-BLAST: An Architecture for Realizing Very High Data Rates over the Rich-scattering Wireless Channel [C] //Proceedings of 1998 URSI International Sympiumon on Signals, Systems, and Electronics. Pisa: IEEE, 1998: 295-300.

[2] Pauiajr A, Nabar R, Dhananjay G. Introduction to Space-time Wireless Communications [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2003: 1-270.

[3] Hochwald B M, Brink S T. Achieving Near-capacity on a Multiple-antenna Channel [J]. IEEE Transactions on Communications, 2003, 51(3): 389-399.

[4] Xu T Y, Grammenos R C, Marvasti F, et al. An Improved Fixed Sphere Decoder Employing Soft Decision for the Detection of Non-orthogonal Signals [J]. IEEE Communications Letters, 2013, 17(10): 1964-1967.

[5] Wubben D, Bohnke R, Kuhn V, et al. Near Maximum Likelihood Detection of MIMO Systems Using MMSE-based Lattice Reduction [C] //Proceedings of 2004 IEEE Conference on Communication. Paris, France: IEEE, 2004: 798-802.

[6] Rajib M R U D, Chung J G, Lee M H. Complex Lattice Reduction Aided Detection for Multiuser MIMO Systems in Dual Basis [C]//Proceedings of the 18th IEEE International Symposium on Consumer Electronics. JeJu Island: IEEE, 2014: 1-4.

[7] Zhao K L, Du S D. Full-Diversity Approximated Lattice Reduction Algorithm for Low-Complexity MIMO Detection [J]. IEEE Communications Letters, 2014, 18(6): 1079-1082.

[8] 芮国胜,张海波,李廷军,等. 基于格规约辅助的 MIMO 系统 GMD-TH 预编码方案 [J]. 电讯技术, 2012, 52(11): 1715-1718.
RUI Guosheng, ZHANG Haibo, LI Tingjun, et al. A GMD-TH Precoding Scheme Based on Lattice Reduction for MIMO Systems [J]. Telecommunication Engineering, 2012, 52(11): 1715-1718. (in Chinese)

[9] 耿烜,孙作雷,刘锋,等. 基于块对角化的格基规约 GMD 向量预编码 [J]. 电讯技术, 2013, 53(8): 1012-1017.
GENG Xuan, SUN Zuolei, LIU Feng, et al. Lattice Reduction GMD Vector Precoding Based on Block Diagonalization [J]. Telecommunication Engineering, 2013, 53(8): 1012-1017. (in Chinese)

[10] Taherzadeh M, Mobasher A, Khandani A K. LLL Reduction Achieves the Receive Diversity in MIMO Decoding [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2007, 53(12): 4801-4805.

[11] Seethaler D, Matz G. Efficient Vector Perturbation in Multi-antenna Multi-user Systems Based on Approximate Integer Relations [C] //Proceedings of 14th European Signal Processing Conference. Florence: IEEE, 2006: 1-4.

[12] Burg A, Seethaler D S, Matz G. VLSI Implementation of a Lattice-reduction Algorithm for Multi-antenna Broadcast Precoding [C]//Proceedings of 2007 IEEE International Conference on Circuits and Systems. New Orleans, LA: IEEE, 2007: 673-676.

[13] Clarkson V L. Approximation of Linear Forms by Lattice Points with Applications to Signal Processing [D]. Canberra, Australia: Australian National University, 1997.

作者简介:

王明月(1990—),女,重庆九龙坡人,硕士研究生,主要研究方向多天线通信系统中的信号处理;

WANG Mingyue was born in Jiulongpo, Chongqing, in 1990. She is now a graduate student. Her research concerns signal processing in multiple antennas system.

Email: wangmy19901029@163.com

周 围(1971—),男,重庆合川人,2008 年于电子科技大学获博士学位,现为重庆邮电大学教授,主要研究方向为无线通信系统及其信号处理;

ZHOU Wei was born in Hechuan, Chongqing, in 1971. He received the Ph. D. degree from University of Electronic Science and Technology of China in 2008. He is now a professor. His research concerns wireless communication systems and signal processing.

景小荣(1974—),男,甘肃平凉人,2009 年于电子科技大学获博士学位,现为重庆邮电大学副教授,主要研究方向为多天线系统中的信号处理。

JING Xiaorong was born in Pingliang, Gansu Province, in 1974. He received the Ph. D. degree from University of Electronic Science and Technology of China in 2009. He is now an associate professor. His research concerns signal processing in multiple antennas system.