基于误差建模的位宽联合优化

**第一阶段报告**

**鲍开轩，夏美东，凌国晟，缪杰豪，许威**

**东南大学移动通信全国重点实验室**

**目录**

[第一章 研究背景与总体框架 2](#_Toc163292877)

[1.1 现有低位宽存储及计算研究背景（754，eBFP。。。；凌国晟） 2](#_Toc163292878)

[1.2 通信系统中低位宽的应用（低位宽接收机，低位宽信道建模。。。注意相关应用中“低位宽”概念的不同，夏美东） 3](#_Toc163292879)

[1.2.1 低位宽接收机 3](#_Toc163292880)

[1.2.2 低位宽信道模型 6](#_Toc163292881)

[第二章 矩阵算子低位宽实现方法（注意突出针对低位宽的工程改进） 10](#_Toc163292882)

[2.1 求逆算子低位宽实现（缪杰豪） 10](#_Toc163292883)

[2.2 SVD算子低位宽实现（凌国晟） 11](#_Toc163292884)

[第三章 低位宽预编码基线分析 12](#_Toc163292885)

[3.1 系统模型 12](#_Toc163292886)

[3.2 仿真流程与参数设置 13](#_Toc163292887)

[3.3 仿真结果与分析 15](#_Toc163292888)

[3.3.1 不同位宽下SVD预编码仿真结果与分析 15](#_Toc163292889)

[3.3.2 SVD/ZF预编码仿真结果与分析 17](#_Toc163292890)

[3.3.3 不同流数下SVD预编码仿真结果与分析 18](#_Toc163292891)

[第四章 低位宽存算新方案（自行分块，缪杰豪） 20](#_Toc163292892)

[第五章 基于误差建模的可变位宽计算新设计（鲍开轩） 21](#_Toc163292893)

[5.1 前言 21](#_Toc163292894)

[5.2 基于置信区间的误差传播设计 21](#_Toc163292895)

[5.3 单步优化问题求解 21](#_Toc163292896)

[5.4 算法整体优化设计 21](#_Toc163292897)

[5.5 数值仿真 21](#_Toc163292898)

[第六章 总结与下一阶段展望（鲍开轩） 23](#_Toc163292899)

[参考文献 24](#_Toc163292900)

# 研究背景与总体框架

## 现有低位宽存储及计算研究背景（754，eBFP。。。；凌国晟）

## 通信系统中低位宽的应用

随着无线通信技术的快速发展，MIMO天线数量也在不断增加，随之而来的是信道规模的快速扩大和传输算法计算复杂度的快速增加，这导致现有的硬件条件逐渐难以满足算法部署要求。因此，低复杂度传输算法和信道模型的设计与优化一直无线通信系统中的一个研究热点，具有十分重要的现实意义。下面将简要介绍通信系统中低计算复杂度、低精度和低分辨率等与低位宽概念相关的接收机和信道模型的设计和优化。

### 低位宽接收机

大规模MIMO天线技术可以在空间上形成高分辨率的波束，是提高无线通信系统性能表现的关键技术。然而，高昂的射频链路硬件开销和功率消耗是大规模MIMO系统面临的一个棘手的问题，为了解决这一问题，一种解决方案是在发送和接收端使用混合架构替代全数字架构，即使用成本低廉的模拟移相器设备替代成本高昂的数字射频链路，另一种解决方案是在接收端使用低精度的数字模拟转换器（Analog-to-Digital Converter, ADC）替代高精度的ADC。下面，将介绍几种基于有限精度移相器或低精度ADC的低位宽接收机设计方案。

文献[1]针对移相器的低精度限制，提出一种基于本地搜索的发送接收机联合设计算法。具体而言，考虑个配置个天线一个射频链路的用户和一个配置个天线个射频链路的基站组成的上行MIMO通信系统，令表示所有可能的比特分辨率发送与接收波束成形向量的集合：

接收端的基站收到的信号可以表示为：

其中表示平均发送功率，表示信道矩阵，表示发送端接收波束成形矩阵，表示接收端波束成形矩阵，需要注意的是其需要满足移相器的恒模约束和有限精度约束。该无线通信系统的和速率可以表示为：

系统的设计目的是最大化系统和速率，即：

暴力搜索算法的计算复杂度为，由于庞大的MIMO天线数量，暴力搜索算法难以应用于上述问题的求解，作者提出了一种基于本地搜索的迭代联合发送接收机设计算法。下面简要地介绍本地搜索，定义近邻点集合为：

本地搜索的含义即为不直接从全部集合搜索可以获得最大系统和速率的解，而是从上一个迭代点的近邻点集合中进行搜索，并且不断迭代，其具体算法如下：

|  |
| --- |
| 算法1：基于本地搜索的有限精度发送接收机联合设计 |
| 1：输入：  2：  3：初始化：  4：  5：  6：  7：  8：当时执行循环  9：  10： 解出  11： 解出  12：  13：结束循环  14：输出：  15： |

本地搜索的计算复杂度为，其中表示迭代次数，对比暴力搜索和本地搜索的计算复杂度表示式可以发现，本地搜索的计算复杂度远低于暴力搜索。

相比之下，另外一个更直接的方案是使用简单的最近邻算法应对发送接收机移相器的有限精度约束，在初始计算接收波束成形矩阵时假定接收机的移相器是无限分辨率的，然后再将计算得到的接收波束成形矩阵量化到满足分辨率条件的最近邻点，这种计算方法具有简单便捷的优势，但是性能不佳。为了在低计算复杂度的限制下，获得较为优异的性能表现，文献[2]提出一种逐元素求解的启发性算法。具体而言，考虑下列接收机设计问题：

其中，矩阵已知，集合，表示要求解的接收矩阵，其需要满足恒模约束和有限精度约束。当天线数量足够大时，满足，此时优化问题变为：

对上述问题的目标函数进行一系列数学运算，可以得到下列逐元素求解问题：

其中：

表示去除第列后形成的矩阵。当与角度相同时，上述优化问题可以达到最优解，换句话说，当不考虑移相器有限精度约束时，的最优解应满足：

将移相器有限精度约束考虑在内，一个比较好的次优解可以是：

其中表示量化函数，其作用是将量化到集合中的最近邻点。

除了在发送接收端使用有限精度的移相器以外，在接收端使用低分辨率（1~3比特）的ADC也是降低大规模MIMO系统硬件开销和功率消耗的重要方法。文献[3]推导了基于低精度ADC的上行大规模MIMO系统在使用最大比合并时的可达速率解析表达式，并且证明当接收天线数量足够大时，低精度ADC导致的性能损失可以被多天线增益补偿。文献[4]在莱斯衰落信道环境下进一步分析了使用低精度ADC的大规模MIMO通信系统的频谱效率，并给出了渐进解析表达式，同时还分析了ADC量化比特位数、天线数和莱斯因子对系统性能的影响。该文还指出当天线数逐渐增加到一定数量后，频谱效率会变成一个恒定值，此时即使继续增加天线数量，频谱效率也不会在提高。为了尽可能地降低大规模MIMO系统的硬件开销和功率消耗，文献[5]同时使用了混合架构和低精度ADC，提出一种贝叶斯最优数据接收器，并给出了低复杂度检测器的具体实现方案和用于接收机性能评估的解析表达式。

### 低位宽信道模型

在无线通信系统中，良好的信道模型不仅可以准确可靠地表征收发天线之间的无线信道环境，还有利于无线通信系统的性能分析评估与传输设计，具有十分重要的意义。大规模MIMO信道模型可以大致分为确定信道模型和随机信道模型两大类。常见的确定信道模型包括信道测量模型和基于射线追踪的信道模型等，这类信道模型的特点是信道参数是确定的，它们对于特定的信道场景是非常精确的，但是通常复杂度比较高。而常见的随机信道模型包括基于相关性的随机信道模型和基于几何的随机信道模型等，这两种信道模型的复杂度均小于确定信道模型。随着无线通信系统的不断演进，天线的数量不断增加，信道矩阵的规模也随之不断扩大，传输设计优化和性能评估的计算复杂度也因此不断提高，这使得相比于传统高复杂度的信道模型，新型低复杂度信道模型将更具实际应用前景，下面将介绍一些低复杂度的信道模型。

基于几何的随机信道模型根据概率分布随机生成干扰簇的位置，适用于MIMO系统的系统级仿真和性能分析，其复杂度远低于传统的确定信道模型。文献[6]提出一种宽带多环球面波MIMO信道模型，在该信道模型中，干扰簇的位置坐落在以基站为中心的不同半径的圆环上，并且每个干扰簇都会反射个不同角度的射线。该信道模型的关键特征包括初始干扰簇集合、初始信道脉冲响应和信道脉冲响应时间转移三部分，下面依次进行介绍。首先，令集合和分别表示发送端第个天线和接收端第个天线在时刻可见的干扰簇集合，干扰簇集合在不同天线间的演化可以表示为：

两个天线同时可见一个相同的干扰簇的概率可以建模为指数分布，即：

其中表示天线间隔，表示单位阶跃函数。因此，每个干扰簇在集合中存活的概率为：

相应地，新的干扰簇出现的概率为：

接着，MIMO信道脉冲响应可以被表示为：

其中和分别表示接收和发送天线的数量，并且可以被表示为：

其中表示干扰簇的总数，表示第个干扰簇带来的时延。当时，第个干扰簇同时不被基站和用户可见，此时复信道增益，否则：

其中和分别表示直射路径的多普勒频移和相位偏移，表示第根发送天线经过第个干扰簇的第个信号的多普勒偏移，表示第根发送天线和第根接收天线之间经过第个干扰簇的第个信号的相位偏，表示莱斯因子。最后，当基站和用户之间的位置相对变化时，信道模型也会相应的变化，这种变化同样可以使用指数分布进行建模，进而推导出信道模型在不同时刻之间的演化关系。

然而，上述基于几何的信道模型的复杂度仍然较高，为了进一步地降低信道模型的复杂度，基于虚拟表示的信道模型得到了越来越多的研究。文献[7]将上述基于几何的多环信道模型从天线域转换到波束域，使用虚拟角度进行信道建模，将第个簇和接收天线阵列之间的虚拟角度表示为，并基于上述虚拟角度，将波束域信道模型表示为：

其中，分别表示接收端和发送端的响应分量，表示第条路径上发送端天线中心到第个干扰簇的距离，表示第条路径上发送端第个天线到第个干扰簇的距离。将信道模型写成下列矩阵形式：

其中和分别由接收和发送响应向量构成，表示波束域信道，其由直射分量和非直射分量两部分组成：

波束数量越多，上述波束域信道模型的精度越高，当波束数量足够大时，上述波束域信道模型的精度与传统天线域信道模型类似。在实际应用场景中，可以灵活调整波束数量，从而达到信道模型精度和计算复杂度之间的折衷。

除了上述两种普适性的信道模型以外，在特定的信道场景中，可以利用信道的特性进行简化设计，从而达到降低信道模型复杂度的目的。在可移动天线系统中，天线的位置不是固定的，而是在一定范围内自由移动，相关研究已经表明天线的移动可以大幅提高无线通信系统的性能表现[8]。但是由于天线位置的不固定，可移动天线系统的信道模型相较于传统的固定天线系统更为复杂，这是因为可移动天线系统的信道模型不仅取决于无线信道环境，还和天线的位置有关。如果使用传统的信道模型，那么收发天线在不同位置处的信道均要被估计，这会带来巨大的信道估计计算复杂度和导频开销。为了避免上述问题，文献[9]在可移动天线场景中，提出一种低复杂度的基于场响应的角度域信道模型。具体而言，将发送端第条信道传播路径的方位角和俯仰角分别表示为和，接收端第条信道传播路径的方位角和俯仰角分别表示为和。一个重要的简化是，假设天线移动到不同的位置时，信号的到达角和离开角不变。这样，收发天线分别在位置和的信道可以表示为：

其中表示场响应矩阵，和分别表示发送端和接收端的场响应向量，它们可以分别被写成：

其中，表示多径数量。通信感知一体化(Integrated sensing and communication, ISAC)被认为是未来第六代（Sixth-Generation, 6G）移动通信系统的一个关键应用场景[10]，其中的一个重要的问题是构建通信和感知的信道模型，为ISAC系统的性能评估和系统优化设计奠定基础。在传统的ISAC系统设计中，通信和感知使用不同的信道模型，这导致在一个ISAC系统中需要同时构建两套信道模型，增加了信道估计复杂度和系统优化设计难度。文献[11]通过分析通信和雷达感知之间相互干扰的关系，通过复用通信互干扰信道信息，统一了通信和雷达感知信道模型，大大减少了雷达互干扰信道估计的开销。

# 矩阵算子低位宽实现方法（注意突出针对低位宽的工程改进）

## 求逆算子低位宽实现（缪杰豪）

## SVD算子低位宽实现（凌国晟）

# 低位宽预编码基线分析

预编码技术利用信道先验信息在发送端对信号进行预处理，可以消除发送信号在经过信道时产生的数据间干扰，从而达到提高系统通信速率和可靠性的目的，是大规模MIMO系统的一项关键技术。本章将基于第二章介绍的低位宽求逆算子和低位宽SVD算子，进行低位宽预编码仿真和分析，为项目后续工作提供基线。

本章首先将简要介绍仿真使用的系统模型和预编码算法，接着描述具体仿真流和仿真参数设置，最后将给出不同位宽、不同预编码算法、和不同流数场景下的仿真结果并做分析。

## 系统模型

本节介绍低位宽预编码基线仿真中使用的系统模型。考虑一个配备根天线的基站和一个配备个天线的用户组成的单用户MIMO系统，用户收到的信号可以表示为：

其中表示基站的个发送数据流，表示基站和用户之间的信道，和分别表示发送端预编码矩阵和接收端均衡矩阵，是满足均值为0，协方差均值为的循环对称复高斯随机噪声向量。

使用经典的多径传播模型，信道矩阵可以被建模为：

其中表示多径数目，表示第条路径的信道增益，和分别表示第条路径的信号到达角和离开角，和分别表示接收端和发送端的阵列响应矢量。当基站端和用户端均使用线性均匀平面天线阵列时，阵列响应矢量可以被表示为：

其中表示信号波长，表示天线间隔，并且满足。

下面首先介绍用于基线仿真的经典的SVD预编码，具体而言，信道矩阵的SVD分解可以表示为：

其中和分别表示左右奇异矩阵，是一个除主对角线之外全为0的矩阵。基于上述SVD分解，发送端预编码矩阵和接收端均衡矩阵可以被设置为：

其中和分别表示和的前列，和都是对角矩阵，用于发送端用户功率分配**，**。这样，用户侧的接收信号就可以表示为：

其中是前个最大对角线元素构成的对角矩阵，当满足时，接收端可以较好的恢复出基站发送信号。

接着介绍迫零（Zero-Forcing, ZF）预编码，当使用ZF预编码时，发送端预编码矩阵和接收端均衡矩阵分别为：

为了体现出计算位宽对预编码性能的影响，在本项目的SVD预编码基线仿真中，发送端使用的是低位宽的SVD算子，而接收端使用的是高位宽的SVD算子。下面将详细介绍仿真流程和参数设置。

## 仿真流程与参数设置

在基线蒙特卡洛仿真中的每个信噪比环境下，系统都会遍历若干个信道实现，对于每一个信道，都会进行若干个数据块的性能仿真，最后系统会统计每个信噪比下的误块率（Block Error Rate, BLER）并将其作为性能指标。

具体而言，在每一个块的仿真中，系统都会首先生成随机比特，并对这些比特进行低密度奇偶校验（Low-density parity-check，LDPC）编码，LDPC编码采用的是IEEE 802.11n标准。LDPC编码后的比特将会被正交幅度调制（Quadrature Amplitude Modulation， QAM），调制后的信号会被低位宽SVD（包括基于household和基于lanczos两种实现方式）或ZF预编码预处理并由天线发出，为了不失一般性，仿真中使用的是标准的瑞利信道模型，信号经过瑞利衰落信道后被接收端接收，接收端会对收到的信号进行均衡、解调和LDPC解码操作以恢复出发送信号，最后系统将判断该次数据块传输是否存在错误，并根据判断的结果统计BLER，预编码基线仿真的具体流程示意图见图3.1，仿真中的具体参数设置见表3.1。

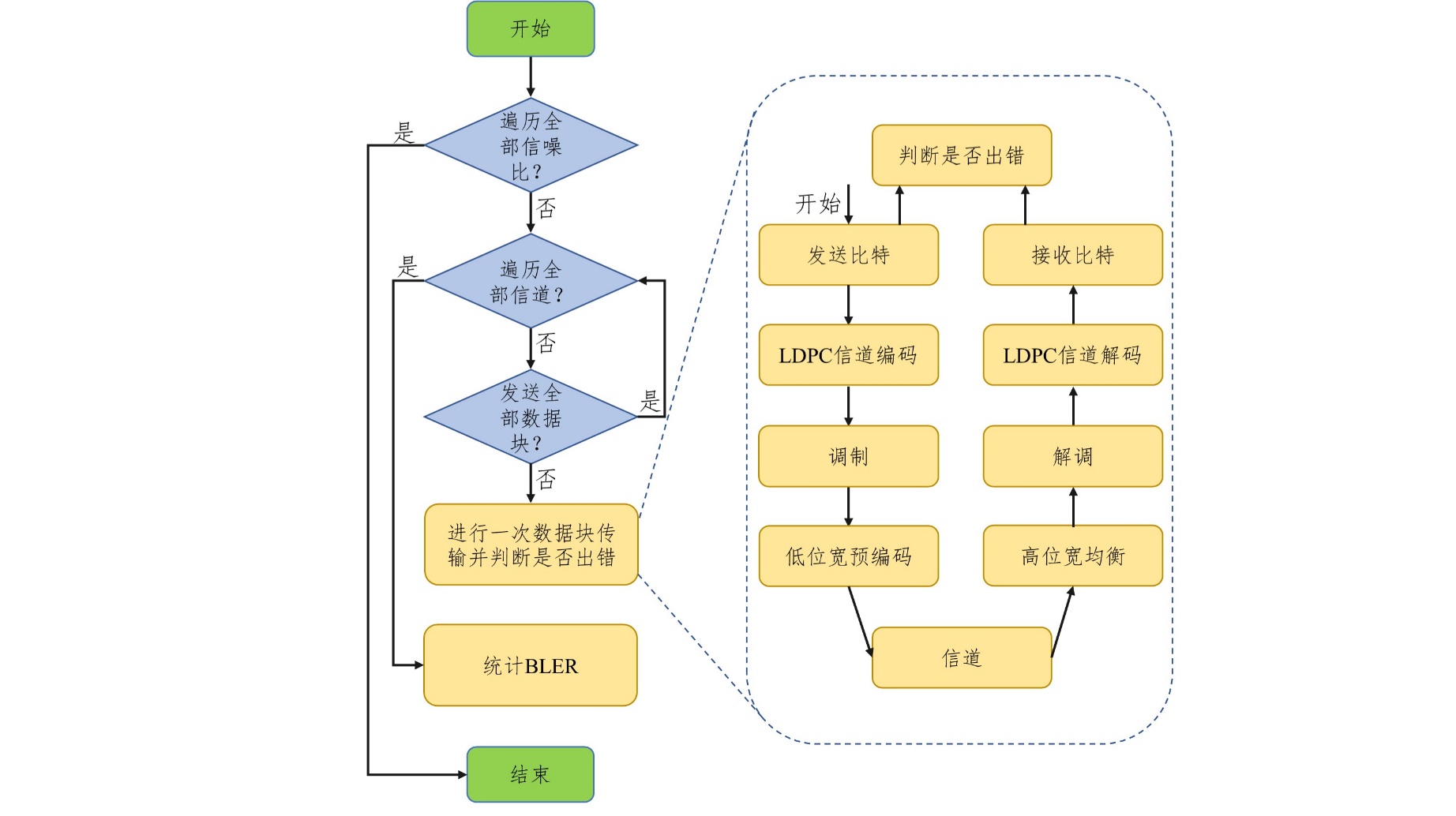


图3.1：仿真流程图

表3.1：仿真参数设置表

|  |  |
| --- | --- |
| 码长 | 648 |
| 码率 | 3/4 |
| 调制方式 | 64QAM |
| 信道模型 | 瑞利信道 |
| 信道维度 | 8×64 |
| 用户数 | 单用户 |
| 数据流数 | 1/2/4/8 |
| 预编码算法 | SVD/ZF预编码 |
| 计算位宽 | 16/32/64bit |
| 信道实现数 | 1e4 |
| 信道数据块数 | 1e2 |
| 性能指标 | BLER |

## 仿真结果与分析

基于上述两节描述的系统模型、仿真流程和参数设置，本节进一步介绍不同计算位宽、不同预编码和不同流数下的仿真结果与分析得到的结论。需要说明的是，预编码基线仿真中涉及的SVD预编码包括基于household和基于lanczos的两种实现方式，均已在仿真结果图的图例中标注。

### 不同位宽下SVD预编码仿真结果与分析

在1、2、4和8数据流传输场景中，不同位宽的SVD预编码的BLER性能仿真结果分别如图3.2所示。从图中可以看出，在所有的流数下，64比特位宽下的BLER性能与32比特位宽相近，但是明显优于16比特位宽，这说明随着计算位宽的下降，BLER性能会加速下降；同时，从图3.2b~图3.2d中还可以看出，在2、4和8流下，16比特计算位宽的SVD预编码会存在1e-3~1e-4的BLER下界，BLER下界的存在也进一步说明低计算位宽对系统性能的影响是显著且持续存在的，并不会随着信噪比的提高而被消除。最后，从仿真中可以看出，基于household的SVD预编码的性能与基于lanczos的SVD预编码的性能相似。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| a | b |
|  |  |
| c | d |

图3.2：不同位宽下SVD预编码BLER性能仿真结果

为了更直观的在低信噪比区间表现出计算位宽下降带来的BLER性能损失，在1、2、4和8数据流传输场景中，我们计算了16比特计算位宽SVD预编码BLER性能相对于64比特计算位宽SVD预编码BLER性能的相对误差，结果如图3.3所示，其中相对误差定义为：

其中和分别代表16比特计算位宽和64比特计算位宽下SVD预编码的BLER性能。从图3.3a~图3.3d可以观察到的一个重要的现象是：随着信噪比的升高，相对误差线性升高，即计算位宽在高信噪比条件下带来的BLER性能损失要大于低信噪比条件。产生上述现象的原因是，在高信噪比条件下，计算误差将取代信噪比成为决定BLER性能的最主要的因素，因此，计算位宽在高信噪比条件下将会对系统的BLER性能造成更加显著的影响。最后，从相对误差的角度同样可以看出，SVD预编码的两种不同实现方式的性能大致相当，无明显区别。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| a | b |
|  |  |
| c | d |

图3.3：不同位宽下SVD预编码相对误差仿真结果

### SVD/ZF预编码仿真结果与分析

为了比较不同的预编码算法在低位宽下的性能损失，在8数据流传输场景中，我们仿真了SVD预编码和ZF预编码的BLER性能，仿真结果如图3.6所示。从图中可以看出，不同计算位宽对ZF预编码的BLER性能几乎没有影响，但是对SVD预编码却有着明显的负面影响，尤其是在16比特计算位宽下，SVD预编码的BLER性能会严重下降。这种现象的原因是，SVD预编码存在大量的迭代，这些迭代会造成误差的传播和累积，进而不同计算位宽会明显影响SVD预编码的BLER性能；而ZF预编码存在一个闭式解，只需要计算一次，无需迭代，不存在误差传播和累积的问题，因此不同的计算位宽对ZF预编码性能的影响可以忽略。从上述仿真结果，我们还可以得到一个合理的推论，即SVD预编码的性能损失主要来自于低位宽SVD算子，而不是低位宽求逆算子。换句话说，奇异矩阵的低位宽计算对SVD预编码性能的影响较大，而功率分配矩阵的低位宽计算对SVD预编码性能的影响则较小。

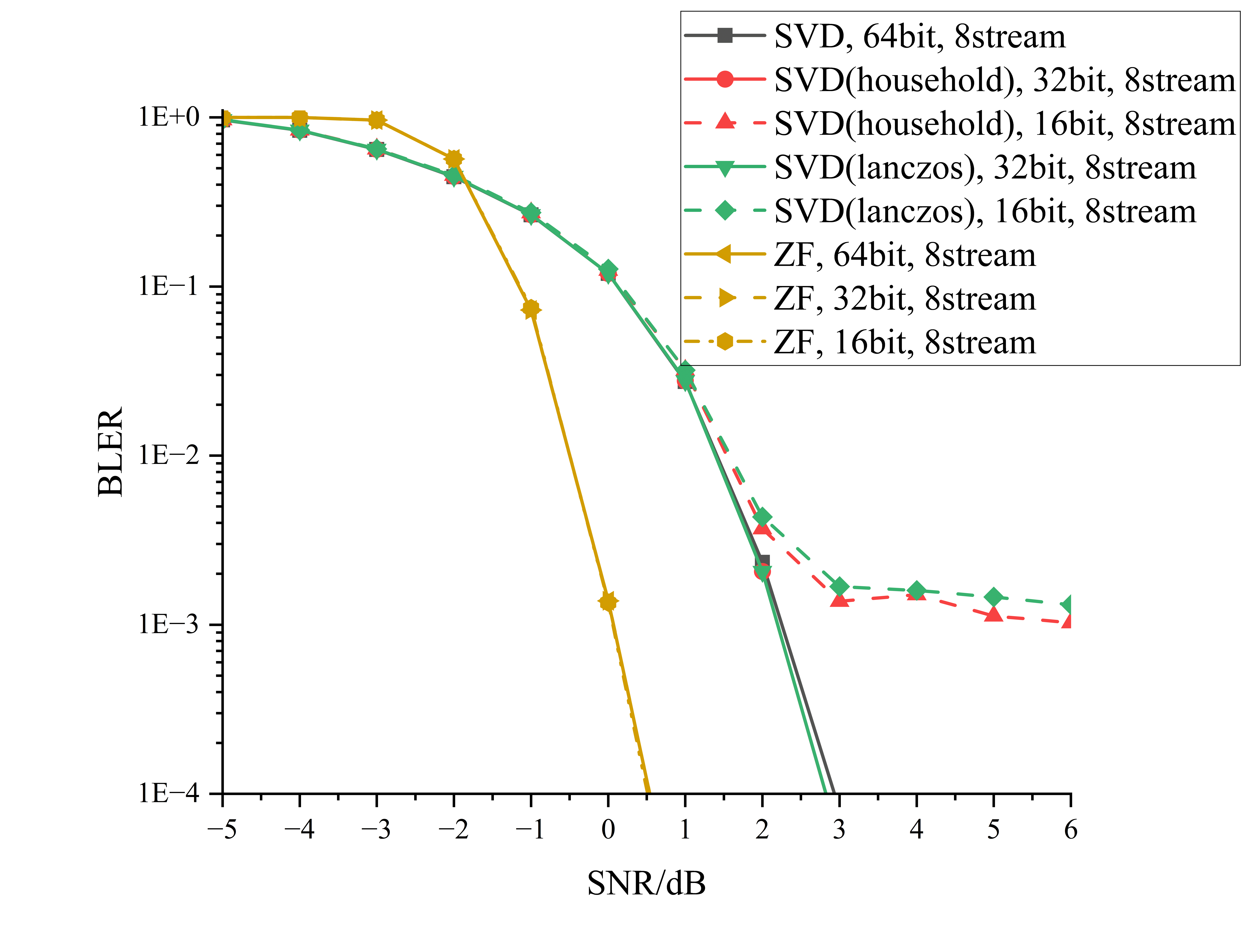


图3.6：SVD/ZF预编码BLER性能仿真结果

### 不同流数下SVD预编码仿真结果与分析

为了观察不同的数据流传输数目对SVD预编码算法性能的影响，我们在不同流数下，分别对基于household和基于lanczos的两种SVD预编码算法在64比特计算位宽和16比特计算位宽下进行BLER性能仿真，仿真结果如图3.7所示。从仿真结果图中，我们可以得出一个明显的结论，即相比于高流数传输场景，低流数传输场景下64比特计算位宽和16比特计算位宽下的SVD预编码BLER性能均要更好。这其中的原因在于，在低流数传输条件下，SVD预编码可以挑选出比较好的子信道进行数据传输，系统整体的信噪比较大，因此BLER性能会表现出更好的情况。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| a | b |

图3.7：不同流数下SVD预编码BLER性能仿真结果

# 低位宽存算新方案（自行分块，缪杰豪）

# 基于误差建模的可变位宽计算新设计（鲍开轩）

## 前言

## 基于置信区间的误差传播设计

## 单步优化问题求解

## 算法整体优化设计

## 数值仿真

# 总结与下一阶段展望（鲍开轩）

参考文献

1. P. Raviteja, Y. Hong, and E. Viterbo, “Millimeter Wave Analog Beamforming With Low Resolution Phase Shifters for Multiuser Uplink,” IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 67, no. 4, pp. 3205–3215, Apr. 2018.
2. F. Sohrabi and W. Yu, “Hybrid Digital and Analog Beamforming Design for Large-Scale Antenna Arrays,” IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, vol. 10, no. 3, pp. 501–513, Apr. 2016.
3. L. Fan, S. Jin, C.-K. Wen, and H. Zhang, “Uplink Achievable Rate for Massive MIMO Systems with Low-Resolution ADC,” IEEE Communications Letters, vol. 19, no. 12, pp. 2186–2189, Dec. 2015.
4. J. Zhang, L. Dai, S. Sun, and Z. Wang, “On the Spectral Efficiency of Massive MIMO Systems with Low-Resolution ADCs,” IEEE Communications Letters, vol. 20, no. 5, pp. 842–845, May 2016.
5. H. He, C.-K. Wen, and S. Jin, “Bayesian Optimal Data Detector for Hybrid mmWave MIMO-OFDM Systems with Low-Resolution ADCs,” IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, vol. 12, no. 3, pp. 469–483, Jun. 2018.
6. H. Wu, S. Jin, and X. Gao, “Non-stationary multi-ring channel model for massive MIMO systems,” in 2015 International Conference on Wireless Communications & Signal Processing (WCSP), Oct. 2015, pp. 1–6.
7. F. Lai, C.-X. Wang, J. Huang, X. Gao, and F.-C. Zheng, “A Novel Beam Domain Channel Model for B5G Massive MIMO Wireless Communication Systems,” IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 72, no. 4, pp. 4143–4156, Apr. 2023.
8. L. Zhu, W. Ma, and R. Zhang, “Modeling and Performance Analysis for Movable Antenna Enabled Wireless Communications.” arXiv, Mar. 24, 2024. doi: 10.48550/arXiv.2210.05325.
9. W. Ma, L. Zhu, and R. Zhang, “Compressed Sensing Based Channel Estimation for Movable Antenna Communications,” IEEE Communications Letters, vol. 27, no. 10, pp. 2747–2751, Oct. 2023.
10. F. Liu et al., “Integrated Sensing and Communications: Toward Dual-Functional Wireless Networks for 6G and Beyond,” IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 40, no. 6, pp. 1728–1767, Jun. 2022.
11. W. Jiang, Z. Wei, F. Liu, Z. Feng, and P. Zhang, “Collaborative precoding design for adjacent integrated sensing and communication base stations.” arXiv, Oct. 12, 2023. doi: 10.48550/arXiv.2310.08246.