基站使用天线数为Nbs的ULA阵列，基站服务用户数为Nu，每个用户单天线。对每个用户，共有 Lu 条传输路径，其中1条为Los径，剩余 N-1条为NLoS路径。对第个用户，其对应的时域信道矩阵为：

其中，表示第个用户的第条路径的增益，分别表示该路径的到达角和离开角。

在QuaDRiGa信道模型中，假设第个用户有条传输路径，其中1条为LoS路径，剩余条为NLoS路径。每一条NLoS径都由一个固定的反射体所唯一确定。1条路径相当于1个cluster，即一簇，而每个cluster包含的10条rays，将这些子路径相互叠加，合起来作为该反射体所对应的1条传输路径。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 基站天线数 | 16 |
| 用户高度 | 1.5米 |
| 用户和基站间距离 | 25-250米 |
| 中心频率 | 28GHz |
| 载波间隔 | 120KHz |
| 子载波数 | 2048 |
| 循环前缀点数 | 144 |
| 带宽  用户数  多径数  调制 | 245MHz  4  6  QPSK |

正交频分复用的方式做数据传输，子载波数目为Nc，子载波间隔为Δf，则每个OFDM符号的时间长度为T\_symbol=1/Δf，OFDM采样点长度为：T\_sample=T\_symbol/N\_c。

->4个用户梳分共享1584个数据位置，交替排列，每个用户可传输792个比特数据。

->由QuaDRiGa得到每个用户时延域信道：Nbs\*Lu，将时延单位转为OFDM符号长度：delay\*Δf\*2048，再获得以OFDM符号长度为单位的时延信道：Nbs\*Ncp。

在全连接型混合预编码架构中，基站端的每个射频链路都通过移相器连接到所有天线上。每个用户使用一条射频链路。信道的延时抽头数目为，则每个用户对应的时域信道。模拟权的求解即为 SVD分解以后取最大奇异值对应的右奇异向量。最终设计得到的模拟权矩阵由每个用户对应的模拟权值按列拼接而成。

部分连接型混合预编码架构下每个射频链路连接到相互独立的移相器网络，并在射频域进行模拟预编码，最终连接到发射天线上。对于每一条射频链路只与一个子阵列相连接，每个用户的信道只对应一个子阵列，，因此此时的模拟预编码矩阵是一个块对角形式的矩阵。模拟权的求解即为 SVD分解以后取最大奇异值对应的右奇异向量。最终设计得到的模拟权矩阵由每个用户对应的模拟权值按块对角的形式拼接而成。

部分全连接型混合预编码架构中，基站端的大规模天线阵列被划分成多个天线子阵列，每个射频链路通过两层移相器网络与所有的天线子阵列连接。第一级移相器网络的移相器个数为(全连接)，第二级移相器网络以部分连接的形式，将第一层移相器输出连接到天线上，移相器个数为（部分连接）。由于第一层移相器通过全连接的形式将所有子阵列连接起来，破坏了原本部分连接的块对角形式，这就导致最终的编码矩阵每一列之间的相关性比较强，因此传输给各用户的数据流之间的干扰较大，故考虑对第一层移相器矩阵加上正交性约束，以降低优化得到的模拟权矩阵各列之间的相关性，从而减小传输给各用户的数据流之间的干扰。

由于以上优化问题非凸，故考虑采用黎曼流形优化算法进行优化。优化目标为最小化与全数字编码矩阵误差的F范数：norm(Fopt - Frf2 \* X, 'fro')^2。首先固定第二层移相器，给出以第一层移相器矩阵为变量的误差梯度：-2 \* Frf2' \* (Fopt - F\_rf2 \* X)，对第一层移相器矩阵采用Complex Stiefel流形进行优化满足正交性，其次采用硬逼近的方法满足恒模约束。再固定第一层移相器，利用第二层移相器矩阵的块对角特性，给出以第二层移相器矩阵为变量的误差梯度：2 \* x \* (Frf1\_part \* Frf1\_part') - 2 \* Fopt\_part \* Frf1\_part'，通过Complex Circle流形进行分块优化第二层移相器网络矩阵，交替优化至满足退出条件。

流形约束优化问题是指一类特殊的约束优化问题，它的约束具有流形结构，即在特定流形下的优化问题。由于流形约束通常非凸，传统方法很难保证收敛性，且不能保证每个迭代点均在流形上，故引入了黎曼流形优化。

黎曼流形优化主要有以下几个优点：

1，黎曼流形优化可以将问题看成是一个流形上的无约束优化问题，便于收敛性分析；

2，某些情况下，欧氏空间的非凸问题的约束可以找到对应的流形，放到流形上就是一个凸问题，有助于保证收敛性；

3，流形优化能够使得所有迭代点保持约束可行性，即所有迭代点总在流形上；

工作流程：

->找到某一个点的切空间：流形在点处的切空间定义为包含流形在点处的所有切向量的空间

->找寻黎曼梯度：在所有切向量中，使得目标函数在切空间上变化最快的切向量记为，即黎曼梯度。函数在点处的黎曼梯度可以通过将欧几里得梯度正交投影到切空间上得到

->计算收缩算子：将切空间中黎曼梯度指定方向上的一个向量投影到流形上，得到下一个迭代点

->计算向量转移算子：表示点处的欧式梯度，在更新在处的搜索方向时，由于和分别位于切空间和上，故不能直接进行运算，因此引入向量转移操作将从转移到，得到的黎曼空间中新的搜索方向，进行下一步更新。

多连接架构使用单个2驱4网络为一个基本网络单元，接收两个输入，产生4个输出，其由电桥和移相器实现，满足半酉阵约束。分为两层，第一层的输出交叉互连作为第二层的输入。由于多连接架构的权值矩阵也是两层矩阵耦合得到的，故仍采用交替最小化的优化框架进行优化。由于优化问题非凸，故仍采用黎曼流形算法进行优化。具体而言，优化目标为最小化与全数字编码矩阵误差的F范数，总共有6个2驱4网络需要优化，利用其块对角矩阵特性，固定其余5个2驱4网络，给定待目标函数以优化变量为变量的梯度函数，采用Complex Stiefel流形依次优化至以及，以满足半酉阵约束。

部分全连接架构与多连接架构中模拟预编码部分都划分为两层结构，可以一一对应起来，部分全连接架构下的第一层移相器接收输入4个输入，产生是4个输出，该过程可以等价表述为由第一层编码矩阵的前两列与两列构成的两个矩阵分别接收前两个和后两个输入，得到两个长度为4的输出,再将得到的两个输出对应位置相加得到一个长度为4的输出。所以部分全连接架构的第一层移相器可以等价的表示为两个输出相加的2驱4模块。

对于第二层移相器网络，每一个天线子阵将来自第一层两个2驱4模块的两个输入相加后输入天线子阵，经过移相器处理后传送到4个天线。该过程可以等价表述为：对于每个天线子阵，来自第一层的两个输入不经过相加，直接作为一个向量长度为2的向量，作用在由原先子阵的编码向量按列堆叠而成的矩阵上。由此部分全连接的第二层移相器网络也可以表述多个2驱4模块结构。

两种架构都可以表述为多个2驱4模块的结构，部分全连接的每个天线子阵中来自第一层的两个输入共用一个编码向量，而多连接架构下来自第一层的两个输入拥有独立的两个编码向量。所以多连接架构下每个子阵比部分全连接架构多出4个设计自由，4个子阵总共多出16个设计自由度。

部分全连接架构中使用移相器实现模拟预编码，第一层移相器编码矩阵在通过Stiefel流形优化后具有各列正交的特性，但添加恒模约束会损失一部分的列正交性，各列之间不再严格正交，将导致用户将干扰增大。多连接架构中使用2驱4模块由电桥实现，具有半酉阵约束，而不存在恒模约束，用户间无干扰。

在多连接基础上通过添加额外的约束在自由度、正交性约束上逐渐向部分全连接架构对齐，以验证设计自由度、模拟预编码矩阵各列正交性对多连接架构的影响。通过对多连接的第二层2驱4模块添加列相等的约束，此时第二层模块只存在列归一约束，使用sphere流形优化，使两架构在自由度上对齐。在此基础上对第一、第二层2驱4模块上添加恒模约束，第二层模块使用circle流形优化，第一层模块使用stiefel流形优化以满足半酉阵约束，再添加衡模约束，使两架构在元素幅度约束上对齐，从而在用户间正交性上对齐。

->每个用户的QPSK数据经过IFFT变化到时域：4\*2048

->插入循环前缀：4\*(144+2048)

->经过编码矩阵和信道传输到用户端，每个用户：1\*(144+2048)

->用户端去除前缀，经过FFT变换到频域:1\*2048

->用户根据梳分位置抽取数据，QPSK解调得到原始数据：1\*792，计算BER

仿真结果显示通过不断添加约束，多连接误比特率性能逐渐劣化，最终二者拥有几乎相同的误比特率曲线，验证了更高的设计自由度、更好的模拟预编码矩阵各列间正交性是多连接架构性能优于部分全连接架构的原因。

全连接下第一层编码矩阵，在经过stiefel流形优化后本身正交，只是由于衡摸约束导致正交性受损，考虑使用欧拉公式(exp(jx)=cosx+jsinx)，流形优化移相器角度，再得到移相器值天然满足恒模，正交性由角度间的等价替换满足（x4=f(x1,x2,x3)），将x1,x2,x3,x4表示为x2,x2,x3与变换矩阵的乘积，优化x1,x2,x3，最后再得到x4满足正交性约束。角度间存在个约束关系，用户和天线数增多时，角度间的等价替换方程的个数和复杂度急剧增加，符号方程只有解析解没有数值解。