

白皮书

探索 5G 系统的混合波束成形架构

本白皮书演示如何使用 MATLAB® 和 Simulink®:

1. 设计 MIMO 相控阵列, 包括复杂的子阵列结构
2. 跨 RF 和基带域智能划分混合波束成形系统
3. 对多输入多输出 (MIMO) 无线通信系统建模
4. 探索架构选项和权衡
5. 评估您做出的划分设计选择的质量

背景

5G New Radio (NR) 无线通信系统使用 MIMO 波束成形技术实现信噪比 (SNR) 增强和空间多路复用, 提高具有丰富散射体环境中的数据吞吐量。在散射体丰富的环境中, 发射天线和接收天线之间并不总是存在视距 (LOS) 路径。

为获得所需的吞吐量, MIMO 波束成形在发射机端实现预编码, 在接收机端实现组合, 从而增加 SNR 并分隔空间信道。完整的数字波束成形结构需要每个天线都有专用的射频到基带链路, 这会增加总体硬件成本, 增大功耗。

为解决这一问题, 使用混合波束成形可以减少射频到基带链路的数量。经过审慎选择预编码和组合的权重, 混合波束成形可达到与完全 (全数字化) 波束成形相媲美的性能级别。

使用基带等效模型作为起点, 进而实现系统建模。这种类型的模型得以快速开发, 并可提供最快的仿真速度选项。获得用来设计无线子系统的构建模块。这些子系统可进行集成, 形成物理层仿真。可以使用结果模型促成射频与数字域之间的波束成形划分决定。

要推进向多域 (射频和基带) 建模的方向发展, 可以使用基带 Simulink 模型与混合 MIMO 波束成形相结合, 帮助您开始进行系统级设计。本白皮书中所述的框架包括两个混合波束成形算法示例: 量化稀疏混合波束成形 (QSHB) 和峰值搜索混合波束成形 (HBPS)。纳入模型的 API 是开放的, 所以您也可以集成自己的混合波束成形自定义算法。

Simulink 基带模型还提供一个起点, 使用 RF Blockset 向带有 RF 组件的多域模型移动。

在本白皮书中, 相关的工作流程中使用了 Phased Array System Toolbox™、RF Blockset™、Communications Toolbox™ 和 5G Toolbox™。

混合波束成形架构

图 1 显示含有发射机、信道和接收机的混合波束成形系统的模块图。

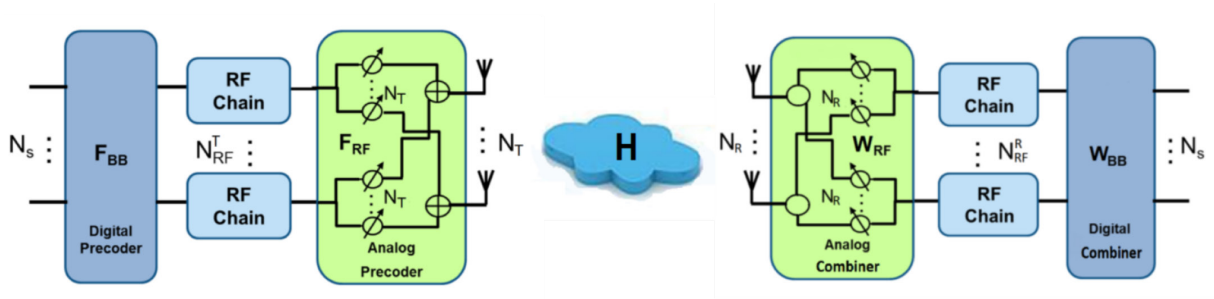


图 1. 混合波束成形系统结构: 发射机、信道和接收机。

图 1 中显示的参数定义如下:

F_{RF} 大小为 $N_T \times N_{RF}^T$ 的模拟预编码器	N_T 发射天线数量
F_{BB} 大小为 $N_{RF}^T \times N_s$ 的数字预编码器	N_R 接收天线数量
W_{RF} 大小为 $N_R \times N_{RF}^R$ 的模拟组合器	N_s 信号流数量
W_{BB} 大小为 $N_{RF}^R \times N_s$ 的数字组合器	N_{RF}^T 发射 RF 链路数量
H 大小为 $N_R \times N_T$ 的 MIMO 信道矩阵	N_{RF}^R 接收 RF 链路数量

在下面所述的框架中，您可以探索图 1 中显示的参数值的不同组合。特别是可以估计天线的数量和 RF 链路的数量。RF 链路数量十分重要，因为可在此实现硬件成本节约。通过在多个 RF 信道间“共享”数字权重，减少所需的硬件数量。在硬件数量减少的同时，又不影响系统性能则是所面临的一大挑战。

构建模型

使用大规模 MIMO 系统的 Simulink 模型,可以在系统实施之前开发和测试混合波束成形算法。您还可以为每个配置直接生成 RF 相移和数字权重。虽然这里所述的系统是基于 QSHB 和 HBPS,但您也可以将此模型扩展到您开发的自定义算法。

系统的模型包含以下四个主要组件,如图 2 所示:

- MIMO 发射机
- MIMO 信道
- MIMO 接收机
- 混合权重计算

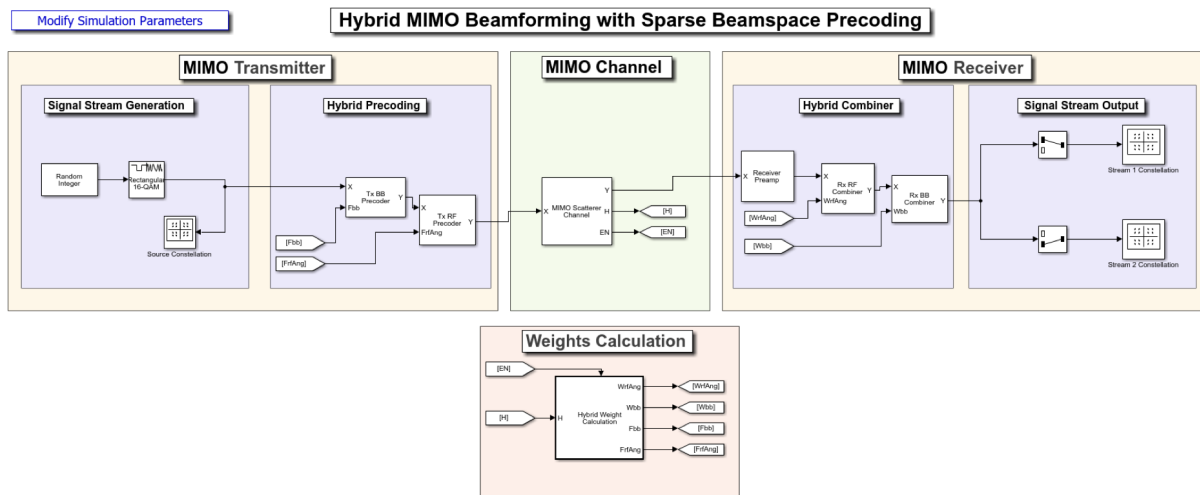


图 2. 混合波束成形系统的 Simulink 模型。

对于此工作流程,您可以集成特定的 MIMO 信道矩阵 H 。根据使用的时分复用或频分复用 (TDD 或 FDD) 模式,可以在发射机或接收机中估算矩阵 H 。

发射机、接收机和 MIMO 信道模块的结构独立于预编码和权重矩阵生成。QSHB 和 HBPS 算法在模型的权重计算模块中实现,可以查看或针对您的系统进行自定义。

生成的 MIMO 信道矩阵 H 不随所传输符号的数量变化而变化,所以,预编码和组合器矩阵对于所有的符号都相同。

MIMO 发射机生成信号流,然后应用预编码,以利用空间多路复用。调制的信号通过 MIMO 信道中定义的散射信道进行传播,然后在接收机端进行解码和解调。

为什么采用空间多路复用？

5G 系统中的挑战不止是 SNR。为实现更高的信道容量，系统必须在多径衰落环境中运行，而不只是简单的视距路径。

空间多路复用的深层含义是，在多径信道和富散射体环境中，MIMO 系统可以跨信道同时发送多个数据流。空间多路复用的目标不单纯是增加 SNR，更多的是要增加信息吞吐量。

采用空间多路复用，信道矩阵分离成多个模式，以便发射阵列中不同阵元发送的数据流能够分别从接收的信号中恢复。为达到这一结果，每个数据流在传输前进行预编码，然后在接收后进行组合和恢复。每个接收机阵元收集的信息只是每个发射阵列阵元上的缩减信号，这类似于原始信道内的多个正交子信道。第一个子信道与主导发射和接收方向相对应，但是可以使用信号处理技术对子信道进行均衡化。另外，也可以使用其他子信道承载信息。可以对每阵元分配的功率运用智能方法；业界在这个领域的研究仍非常活跃。

在此背景下，下一个问题是，您的阵列设计选择如何影响您的系统级性能？这一问题的答案则是取决于信道的性质。即可以使用阵列通过阵列增益或分集增益提高 SNR，或者通过空间多路复用提高容量。

图 3 演示一个多散射体信道的抽象视图。在图 3 中，您还可以看到单个 LOS 数据流的吞吐量，与多径环境中多个数据流（本例中为两个）的吞吐量相比较。注意，虽然第二个数据流提供的增益不像第一个数据流那么高（因为它使用不占主导的子信道），但是，总体信息吞吐量提高了。再次重申，可以运用均衡化技术来改进非主导信道。而且，此概念很容易扩展到更多的信道。

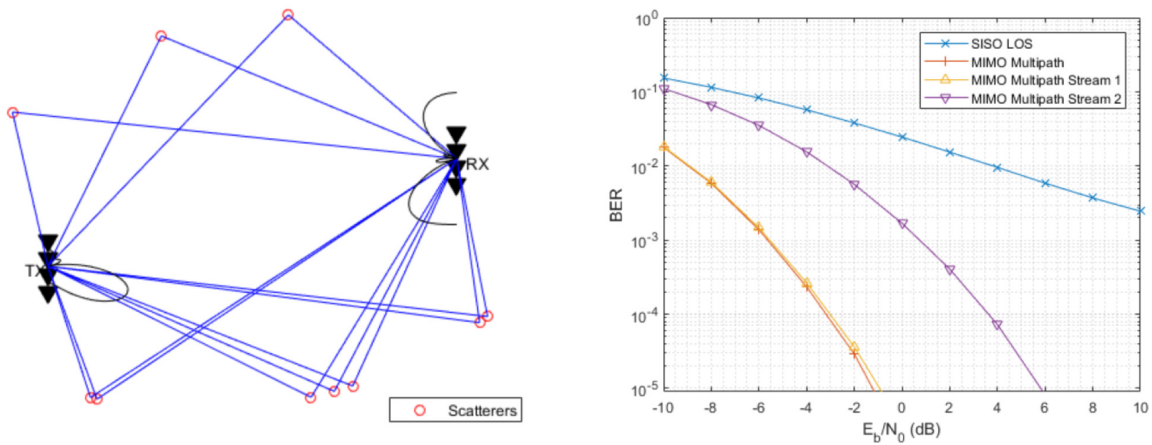


图 3: 多散射体情形 (左) 和多径情形下相对于 LOS 的 BER 改进 (右)。

MIMO 发射机和接收机

对于发射机和接收机子系统，工程权衡的侧重点是成本与性能。这转而推动射频域和基带域之间的波束成形架构划分。划分则又把我们带到子阵列的主题，其中多个天线单元映射到特定的 RF 信道。对子阵列进行集成，建立完整的天线阵列。有时，单元信源在子阵列间共享，以创建虚拟阵列。在这种情况下，发射/接收模块的总数少于每个子阵列的天线单元数，从而导致大型系统中的硬件数量减少。

从成本和功率角度看，硬件数量较少的确是优势所在，但是没有全数字化波束成形设计，在波束控制的 RF 部分则牺牲了一些灵活性。当相同的 RF 相移值应用于子阵列的每个信道时，就会发生这种情况。这与全数字化情况形成对比，在全数字化情况下，每个信道的相位和幅度加权都可能是唯一值。

在本白皮书的示例中，生成两个信号流。发射机系统由具有四个发射 RF 链路的 64 个发射天线组成。有 16 个接收天线，供给四个接收 RF 链路。这两个阵列如图 4 中所示。

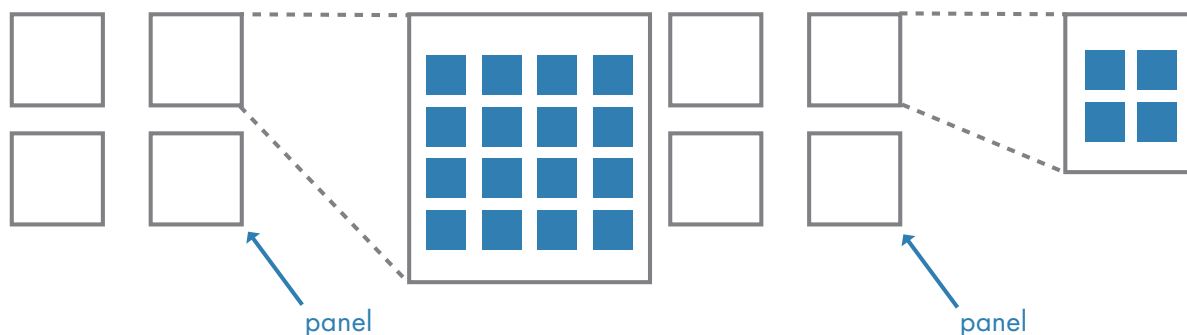


图 4. 具有四个 RF 链路的 64 阵元发射阵列 (左)，以及具有四个 RF 链路的 16 阵元接收阵列 (右)。

除了划分以外，还可以考虑最大化频谱效率，以增加信道容量。实现此目标的一个方法是要求每个 RF 链路都发送独立的数据流。假设信道已知，可通过对角化信道矩阵并提取主导模式，获得无约束的最优预编码权重。

波形生成

可以使用一系列的调制方案, 包括 5G 上行链路和下行链路波形。为演示波形构建模块的示例, 考虑一下 5G New Radio (NR) 下行链路波形, 它是 5G Toolbox 的一部分。可以定义的数量十分广泛, 涵盖同步信号定义、载波配置和控制资源集。

一开始, 需要参数化和生成多个带宽部分 (BWP)。在给定载波上共享一个参数集的一组连续资源形成一个 BWP。每个 BWP 可以有不同的子载波间隔 (SCS), 使用不同的循环前缀 (CP) 长度, 横跨不同的带宽; 不同的 BWP 可以相互重叠。

在载波配置中设置了所有的参数集后, 可直接生成波形。

图 5 显示以子载波和符号的函数形式表示的示例波形。

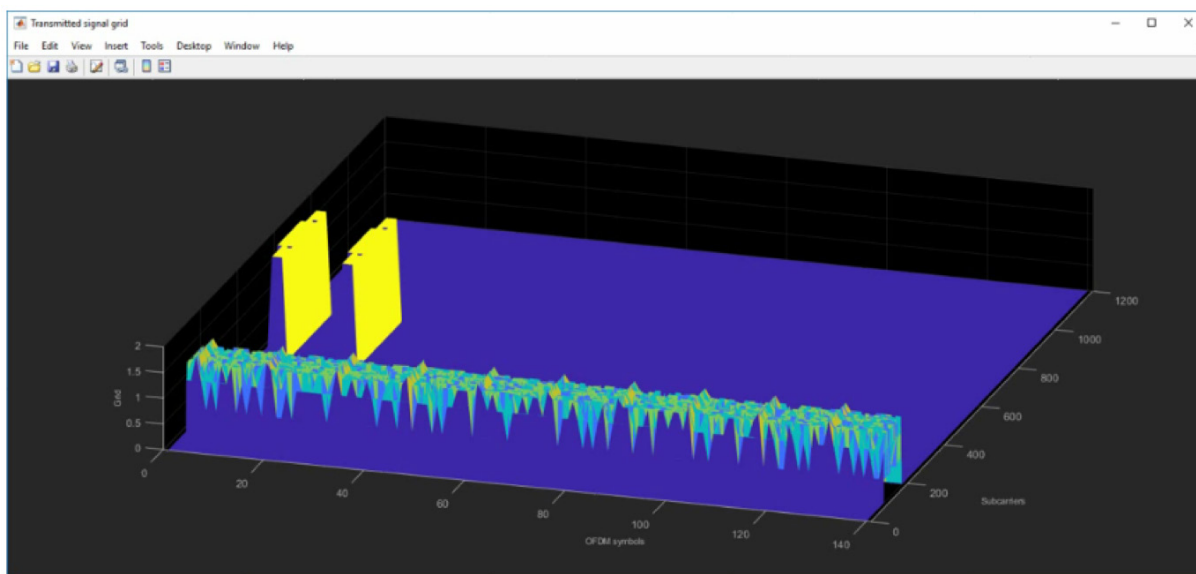


图 5. 5G New Radio (NR) 下行链路波形。

下面显示 MATLAB 中的一个结构，其中包含与示例 BWP 相对应的信息。

与 BWP 1 相关联的信息：

```
SamplingRate: 61440000
Nfft: 4096
Windowing: 10
CyclicPrefixLengths: [1x14 double]
SymbolLengths: [1x14 double]
NSubcarriers: 2400
SubcarrierSpacing: 15
SymbolsPerSlot: 14
SlotsPerSubframe: 1
SymbolsPerSubframe: 14
SamplesPerSubframe: 61440
SubframePeriod: 1.0000e-03
Midpoints: [1x141 double]
WindowOverlap: [10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10]
```

为简化该模型，为本白皮书中的示例实现了基本 16 QAM 调制方案。
此调制方案的星座图如图 6 中所示。

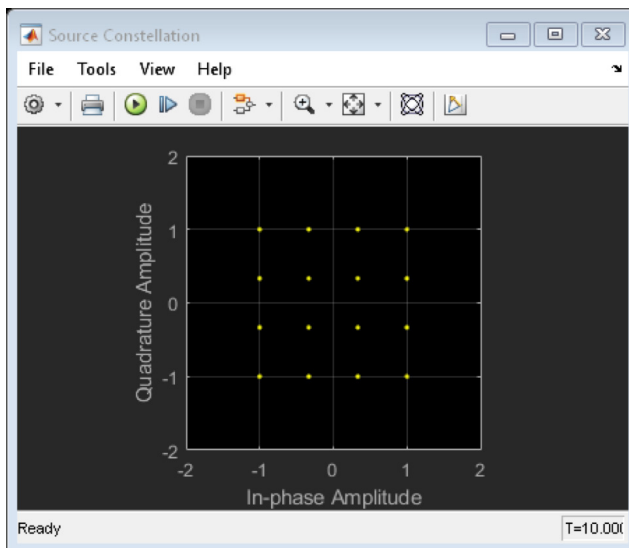


图 6. QAM16 调制的星座图。

混合波束成形权重计算

在混合波束成形系统中，预编码和相应的组合处理均跨基带和射频进行。一般来说，射频中实现的波束成形涉及相移。因此，工作流程的一个关键环节是确定如何根据信道在基带和 RF 带之间分配权重。

在权重计算模块中完成该操作（回顾图 2），其中，预编码权重、Fbb 和 FrfAng 以及组合权重、Wbb 和 WrfAng 都基于信道矩阵 H 进行计算。图 7 提供用来计算 MIMO 信道的预编码和组合权重的模块参数的一个视图。可以直接配置这些参数来探索其他系统组合。

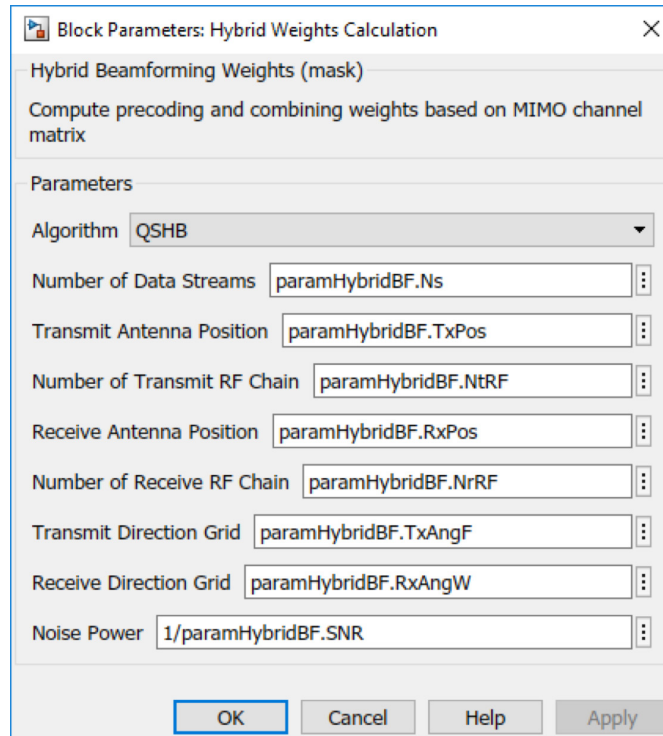


图 7. 用来基于 MIMO 信道矩阵计算预编码和组合权重的混合权重掩码。

量化稀疏混合波束成形

给出 MIMO 散射信道的信道矩阵 H ，可以计算混合波束成形权重。

使用正交匹配追踪算法，得出的模拟预编码和组合权重正好是与信道矩阵的主导模式对应的指向向量。

QSHB 算法产生以下信息：

1. 预编码矩阵 F_{RF} 和 F_{BB}
2. 组合矩阵 W_{RF} 和 W_{BB}

在解出混合波束成形矩阵后， N_s 信号流的估计值 \hat{s} 可以表示为：

$$\hat{s} = \sqrt{\rho} W_{BB}^* W_{RF}^* H F_{RF} F_{BB} s + W_{BB}^* W_{RF}^* n$$

其中， s 是维度 N_s 的信号流， n 是维度 N_R 的信道噪声向量。

使用峰值搜索的量化稀疏混合波束成形

HBPS 是 QSHB 的简化版。与反复搜索信道矩阵的主导模式不同，HBPS 将所有数字权重投射到一个方向网格，并找出 N_{RF}^T 和 N_{RF}^R 峰值，以形成相应的模拟波束成形权重。取得的效果良好，尤其对于大型阵列，比如大规模 MIMO 系统中使用的阵列。这是因为对于大型阵列，方向更可能是正交的。

因为信道矩阵可能随时间而改变，还需要定期执行权重计算，以适应信道变化。

QSHB

您可以使用 QSHB 算法在接收机上恢复 16 QAM 符号流。产生的星座图 (图 8) 显示，与源星座相比，两个流恢复的符号正确位于星座图中。这就证明，利用混合波束成形技术，可通过同时发送两个流来增加系统容量。此外，星座图还显示，第一个恢复流的方差好于第二个恢复流的方差，因为点分散较少。这是因为第一个流使用 MIMO 信道的最主导模式，使之具有最佳 SNR。

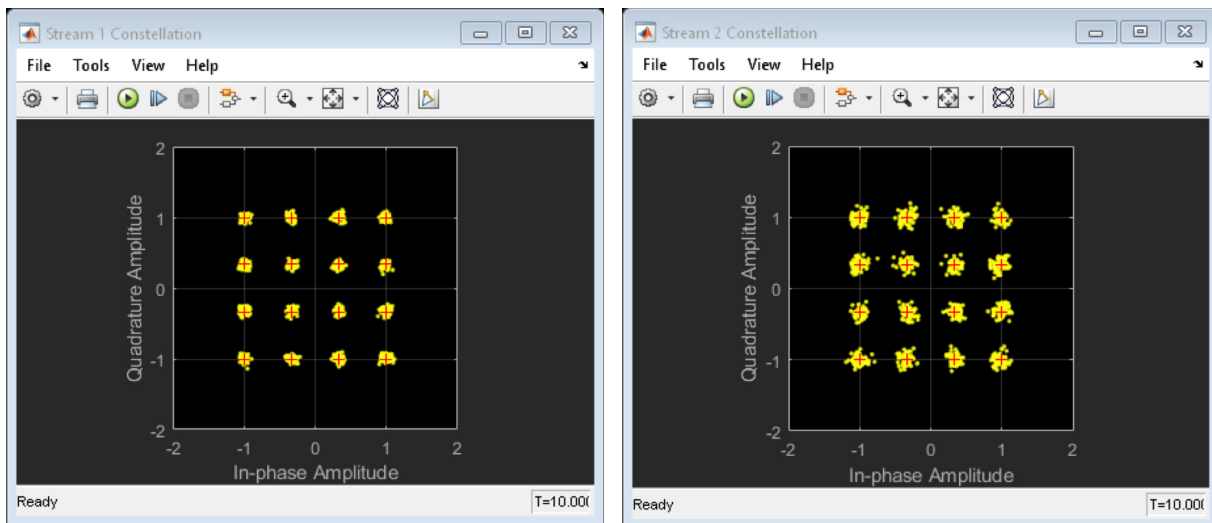


图 8. QSHB 的流 1 和流 2 星座图。

HBPS

HBPS 的结果如图 9 中所示。星座图显示,它达到与 QSHB 类似的性能。这表示 HBPS 是模拟 64x16 MIMO 系统的一个不错选择。

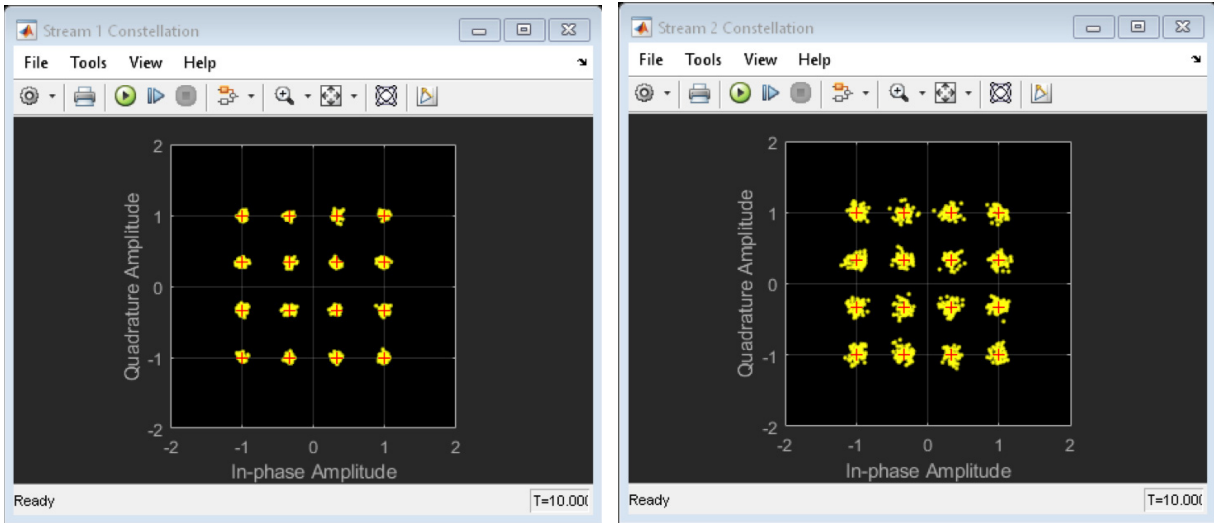


图 9. HBPS 的流 1 和流 2 星座图。

两个算法的频谱效率比较

有多种方法来测量划分的效果。频谱效率常用作 MIMO 系统性能指标。您可以比较使用最优权重（全数字化权重）与使用提议的混合波束成形算法（QSHB 和 PSHB）所达到的频谱效率。

为易于理解,仿真使用的是一个信号流和两个信号流,但这也可以进行扩展,以匹配您的系统。发射机天线阵列也可以进行定义,以匹配您的系统要求。

对于本系统,阵列方向图在方位上覆盖 80 度,在仰角上覆盖 40 度,接收机天线在方位上覆盖 120,在仰角上覆盖 80 度。对每个 SNR 值进行 50 次 Monte Carlo 试验,从而得出频谱效率曲线。在图 10 的绘图中,QSHB 的频谱效率大约与最优全数字波束成形相差 1dB。

虽然 PSHB 算法提供更好的计算效率,但与 QSHB 相比,在频谱效率上多损失了最高 1.5 dB。

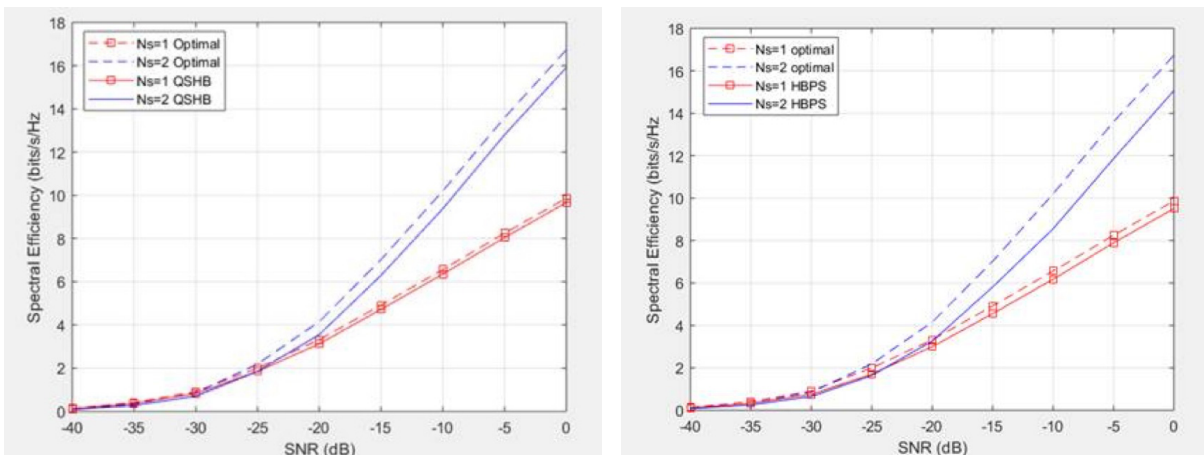


图 10. QSHB (左) 和 PSHB (右) 的效率比较。

比较其他划分选项

系统参数在图 2 中显示的 Simulink 模型的系统设置部分给出。Nt、NtRF、Nr 和 NrRf 的值控制此示例中的划分。图 11 显示这些系统参数不同组合下的星座图。

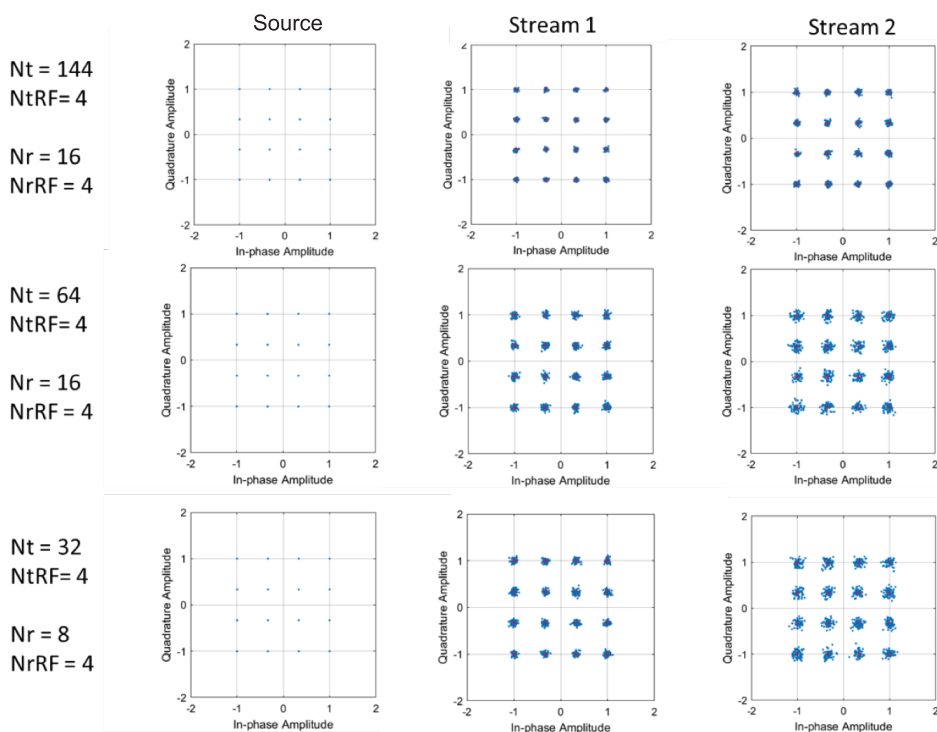


图 11. 使用不同划分选项的系统配置和相应的星座图。

提高逼真度: 集成 RF Blockset

有了混合波束成形系统的 Simulink 模型后, 可以推进到更高级别的逼真度。这种情况下可以直接使用 RF Blockset 创建系统的多域仿真。可以使用非线性射频放大器和模型效果, 以预估增益、噪声、奇数和偶数阶互调失真。射频模型可以使用数据表规范或测得数据得出, 然后可用来精确仿真自适应体系结构, 包括自动增益控制 (AGC) 和数字预失真 (DPD) 算法。

可借助 RF Blockset 针对不同抽象等级的射频系统进行建模。电路包络仿真可用于针对具备任意拓扑结构的网络进行高逼真度、多载波仿真。等效基带库用于针对单载波串联系统进行快速的离散时间仿真。图 12 显示系统已划分的混合系统示例。这里的基带加权应用于供给每个发射/接收模块的数字化流。其余权重以相移的形式应用于供给天线单元的射频信号。

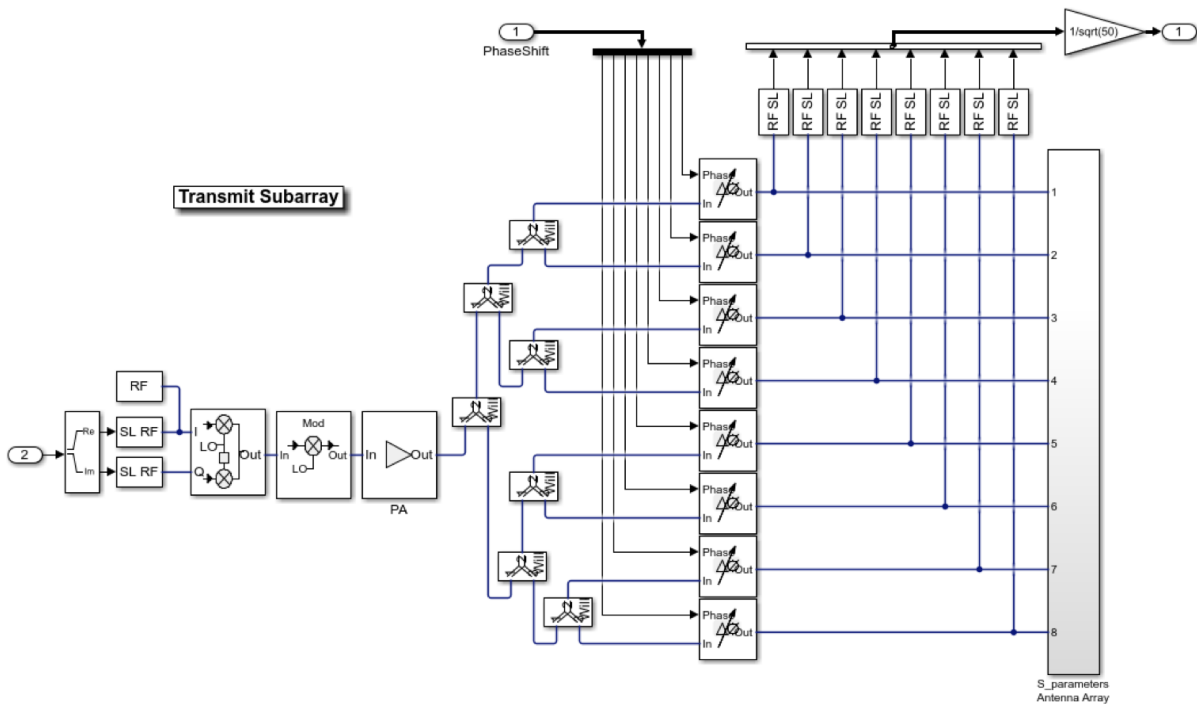


图 12. 具有基带和射频加权的 RF Blockset 混合结构的示例。

小结

使用 MATLAB 和 Simulink, 您可以在单一环境中设计天线、射频和信号处理系统。建模有助于定义混合波束成形的架构。您可以:

- 设计 MIMO 相控阵列, 包括复杂的子阵列结构
- 跨 RF 和基带域智能划分混合波束成形系统
- 对 MIMO 无线通信系统建模
- 探索架构选项和权衡
- 评估您做出的划分设计选择的质量

现在开始

浏览以下示例, 将此方法应用于您的下一个混合波束成形项目:

- [混合波束成形简介](#)
- [使用 QSHB 和 HBPS 算法实现混合 MIMO 波束成形](#)
- [大规模 MIMO 混合波束成形](#)
- [建模使用混合波束成形的射频毫米波发射机](#)