

백서

# 5G 시스템의 하이브리드 빔포밍 아키텍처 살펴보기

이 백서에서는 MATLAB® 및 Simulink®를 사용하여 다음과 같은 작업을 수행할 수 있는 방법을 다룹니다.

1. 복잡한 부배열 구조를 비롯한 MIMO 위상 배열 설계
2. RF 및 기저대역 영역에서 하이브리드 빔포밍 시스템의 지능적 분할
3. MIMO(다중 입출력) 무선 통신 시스템 모델링
4. 아키텍처 선택지 및 장단점 살펴보기
5. 선택한 분할 설계의 품질 평가

## 배경

5G NR(New Radio) 무선 통신 시스템은 SNR(신호 대 잡음비) 개선 및 공간 다중화를 위해 MIMO 빔포밍 기술을 사용하여 산란체가 풍부한 환경에서 데이터 처리량을 개선합니다. 산란체가 풍부한 환경에서는 송신 안테나와 수신 안테나 사이에 LOS(가시선) 경로가 항상 존재하지는 않습니다.

필요한 처리량을 확보하기 위해 MIMO 빔포밍은 송신기 측에서 프리코딩을 구현하고 수신기 측에서 결합을 구현하여 SNR을 높이고 공간 채널을 분리합니다. 전디지털 빔포밍 구조에서는 각 안테나에 전용 RF와 기저대역 간 체인이 필요하며, 이로 인해 전체 하드웨어 비용이 상승하고 전력 소비가 증가할 수 있습니다.

이에 대한 해결책으로 하이브리드 빔포밍을 사용하면 RF와 기저대역 간 체인 수를 줄일 수 있습니다. 프리코딩과 결합에 대한 가중치를 신중하게 선택하면 하이브리드 빔포밍은 완전한(완전디지털) 빔포밍의 성능과 유사한 수준의 성능을 달성할 수 있습니다.

시스템 모델링은 기저대역 등가 모델로 시작하여 구현할 수 있습니다. 이러한 유형의 모델은 신속하게 개발할 수 있으며 가장 빠른 시뮬레이션 속도 옵션을 제공합니다. 구성 블록을 사용하여 무선 서브시스템을 설계할 수 있습니다. 이러한 서브시스템을 통합하여 물리 계층 시뮬레이션을 구성할 수 있습니다. 이렇게 만들어진 모델을 사용하여 RF 영역과 디지털 영역 간 빔포밍 분할을 결정할 수 있습니다.

궁극적으로 멀티도메인(RF 및 기저대역) 모델링으로 갈 수 있도록 하이브리드 MIMO 빔포밍이 포함된 기저대역 Simulink 모델을 사용하여 시스템 수준 설계를 시작할 수 있습니다. 이 백서에서는 QSHB(양자화된 희소 하이브리드 빔포밍) 및 HBPS(피크 탐색을 사용한 하이브리드 빔포밍)라는 두 가지 하이브리드 빔포밍 알고리즘의 예를 통해 프레임워크를 설명합니다. 모델에 대한 API는 개방형이므로, 여러분의 사용자 지정 하이브리드 빔포밍 알고리즘을 통합할 수도 있습니다.

또한 Simulink 기저대역 모델은 RF Blockset을 통해 RF 성분이 포함된 멀티도메인 모델로 갈 수 있는 출발점이 될 수 있습니다.

이 백서에서는 Phased Array System Toolbox™, RF Blockset™, Communications Toolbox™ 및 5G Toolbox™가 관련 워크플로에서 사용됩니다.

## 하이브리드 빔포밍 아키텍처

그림 1은 송신기, 채널, 수신기가 포함된 하이브리드 빔포밍 시스템의 블록 다이어그램을 보여줍니다.

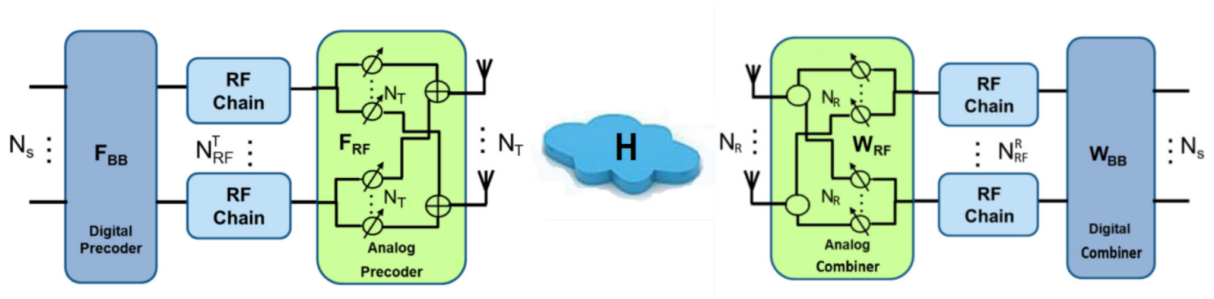


그림 1. 하이브리드 빔포밍 시스템 구조: 송신기, 채널 및 수신기.

그림 1에 표시된 파라미터는 다음과 같이 정의됩니다.

$F_{RF}$ $N_T \times N_{RF}^T$ 크기의 아날로그 프리코더	$N_T$ Tx 안테나 수
$F_{BB}$ $N_{RF}^T \times N_s$ 크기의 디지털 프리코더	$N_R$ Rx 안테나 수
$W_{RF}$ $N_R \times N_{RF}^R$ 크기의 아날로그 결합기 <sup>R</sup>	$N_s$ 신호 스트림 수
$W_{BB}$ $N_{RF}^R \times N_s$ 크기의 디지털 결합기	$N_{RF}^T$ Tx RF 체인 수
$H$ $N_R \times N_T$ 크기의 MIMO 채널 행렬	$N_{RF}^R$ Rx RF 체인 수

아래에서 다루는 프레임워크에서 그림 1의 파라미터에 대한 다양한 값의 조합을 살펴볼 수 있습니다. 구체적으로 말하자면 안테나 수와 RF 체인 수를 평가할 수 있습니다. RF 체인의 수가 중요한 이유는 이를 통해 하드웨어 비용을 줄일 수 있기 때문입니다. 여러 RF 채널에 걸쳐 디지털 가중치를 “공유”하면 더 적은 수의 하드웨어가 필요하게 됩니다. 문제는 시스템 성능에는 영향을 미치지 않으면서 하드웨어를 줄이는 것입니다.

## 모델 구축

대규모 MIMO 시스템의 Simulink 모델을 사용하여 시스템을 구현하기 전에 하이브리드 빔포밍 알고리즘을 개발하고 테스트할 수 있습니다. 또한 각 구성에 대해 RF 위상 변위 및 디지털 가중치를 직접 생성할 수도 있습니다. 여기에서 설명되는 시스템은 QSHB 및 HBPS 기반이지만, 이 모델을 여러분이 개발한 사용자 지정 알고리즘으로 확장할 수도 있습니다.

이 시스템의 모델은 그림 2와 같이 다음의 4가지 주요 컴포넌트로 구성됩니다.

- MIMO 송신기
- MIMO 채널
- MIMO 수신기
- 하이브리드 가중치 계산

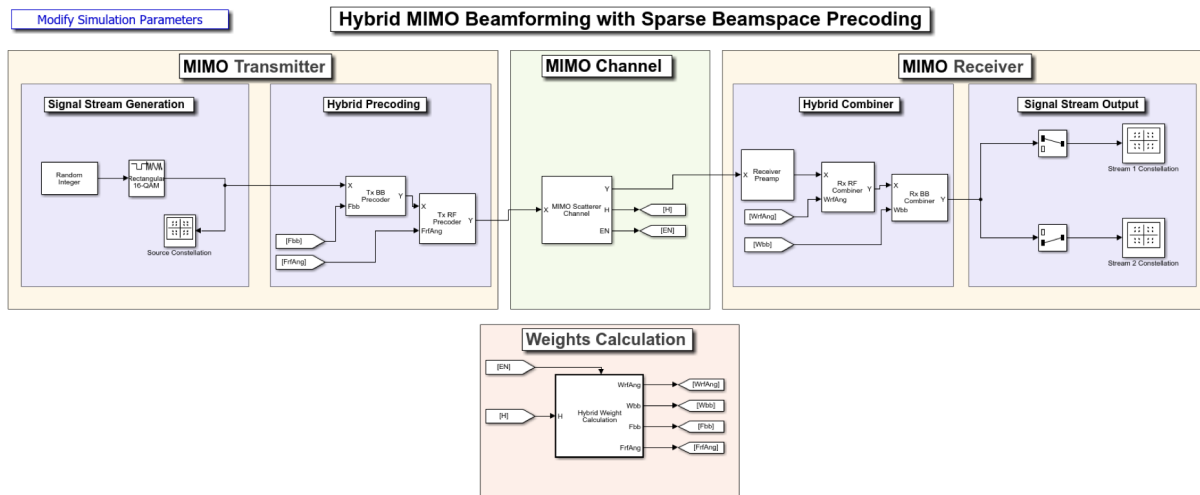


그림 2. 하이브리드 빔포밍 시스템의 Simulink 모델.

이 워크플로에서는 특정 MIMO 채널 행렬  $H$ 를 통합할 수 있습니다. 행렬  $H$ 는 사용된 TDD(시분할 복신) 또는 FDD(주파수 분할 복신) 모드에 따라 송신기 또는 수신기에서 추정할 수 있습니다.

송신기, 수신기 및 MIMO 채널 블록의 구조는 프리코딩 및 가중치 행렬 생성과는 독립적입니다. QSHB 및 HBPS 알고리즘은 모델의 가중치 계산 블록에서 구현되며 시스템에 대해 보거나 사용자 지정할 수 있습니다.

생성된 MIMO 채널 행렬  $H$ 는 송신된 심볼 수와 무관하게 일정하므로 프리코딩 및 결합기 행렬은 모든 심볼에 대해 동일합니다.

MIMO 송신기는 신호 스트림을 생성한 후 프리코딩을 적용하여 공간 다중화를 활용합니다. 변조된 신호는 MIMO 채널에 정의된 산란 채널을 통해 전파된 후 수신기 측에서 디코딩되고 복조됩니다.

## 왜 공간 다중화인가?

5G 시스템의 도전 과제는 SNR 이외에도 여러 가지가 있습니다. 더 높은 채널 용량을 달성하기 위해서는, 시스템이 단순한 가시선 경로를 넘어 다중경로 페이딩 환경에서 작동해야 합니다.

공간 다중화의 개념은 다중경로 채널 및 산란체가 풍부한 환경 내에서 MIMO 시스템이 여러 데이터 스트림을 채널 전체에 동시에 송신할 수 있다는 것입니다. 공간 다중화의 목표는 SNR을 높이는 것이라기 보다는 정보 처리량을 늘리는 것입니다.

공간 다중화에서는 송신 배열의 서로 다른 소자에서 송신된 데이터 스트림을 수신된 신호에서 독립적으로 복원할 수 있도록 채널 행렬이 여러 모드로 분리됩니다. 이러한 결과를 얻기 위해, 각 데이터 스트림은 송신 전에 프리코딩되고 수신 후에 결합되고 복원됩니다. 각 수신기 소자에서 수집된 정보는 각 송신 배열 소자에서의 신호의 확장된 버전이므로, 원래 채널 내에서 여러 직교 부채널처럼 동작합니다. 첫 번째 부채널은 우세한 송신 및 수신 방향에 해당하지만, 신호 처리 기법을 사용하여 부채널을 등화할 수 있습니다. 또한 다른 부채널을 사용하여 정보를 전달할 수도 있습니다. 소자 별로 할당된 전력에 인텔리전스를 적용할 수 있으며, 이 분야에 대한 업계의 연구는 여전히 활발하게 진행 중입니다.

이러한 상황에서 다음 물을 수 있는 질문은 여러분의 배열 설계 선택이 시스템 수준 성능에 어떤 영향을 미치는가입니다. 이에 대한 답은 채널의 특성에 따라 달라집니다. 즉, 배열을 사용하여 배열 이득 또는 다이버시티 이득을 통해 SNR을 개선하거나 공간 다중화를 통해 용량을 개선할 수 있다는 의미입니다.

그림 3은 다중산란체 채널의 추상화된 모습을 보여줍니다. 또한 그림 3은 다중경로 환경에서 단일 LOS 데이터 스트림의 처리량과 다중 데이터 스트림(이 사례에서는 2개)의 처리량을 비교하여 보여줍니다. 두 번째 스트림은 덜 우세한 부채널을 사용하므로 첫 번째 스트림만큼 높은 이득을 제공하지 않지만 전체 정보 처리량은 향상된다는 점을 유의하십시오. 다시 말해, 등화 기법을 적용하여 우세하지 않은 채널을 개선할 수 있다는 의미입니다. 또한 이 개념을 더 많은 채널로 쉽게 확장할 수도 있습니다.

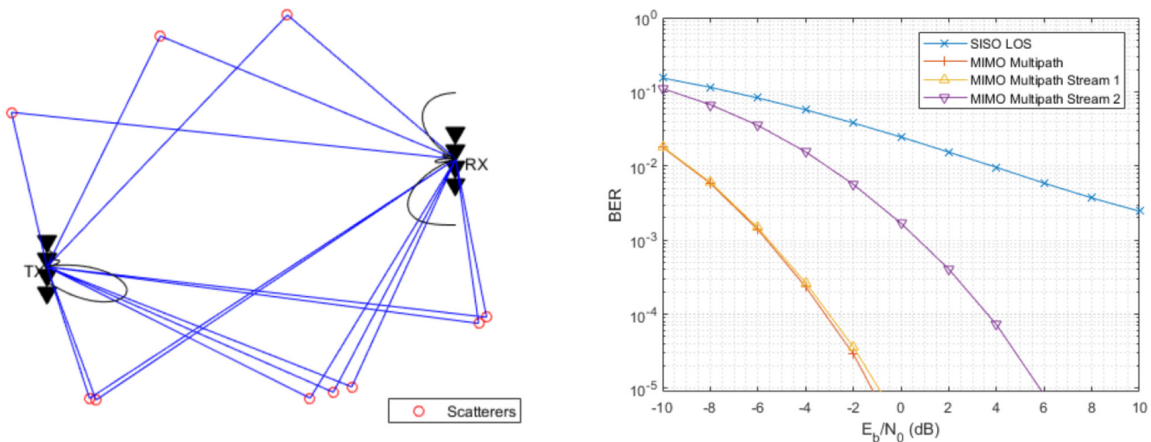


그림 3: 다중산란체 시나리오(왼쪽) 및 다중경로 시나리오 및 LOS에서의 BER 개선 정도 비교(오른쪽).

## MIMO 송신기 및 수신기

송신기 및 수신기 서브시스템에서 비용과 성능은 공학적 상충관계가 있습니다. 이는 RF 영역과 기저대역 영역 간 빔포밍 아키텍처의 분할로 이어집니다. 분할은 여러 안테나 소자가 특정 RF 채널로 매핑되는 부배열의 문제로 이어집니다. 부배열은 통합되어 전체 안테나 배열을 구축하게 됩니다. 어떤 경우에는 소자 피드는 여러 부배열에 걸쳐 공유되어 가상 배열을 생성하기도 합니다. 이 시나리오에서는 송신/수신 모듈의 총 개수는 각 부배열의 안테나 소자 수보다 적으며, 이는 대규모 시스템에서 더 적은 수의 하드웨어라는 결과로 이어집니다.

하드웨어 수가 감소하면 비용과 전력의 측면에서 이점이 있지만, 완전디지털 빔포밍 설계 없이는 빔 조향의 RF 영역에서 유연성이 일부 희생됩니다. 이는 부배열의 각 채널에 동일한 RF 위상 변위 값을 적용할 때 발생합니다. 이는 위상 및 진폭 가중치가 각 채널마다 고유한 값이 될 수 있는 완전디지털 설계의 경우와는 대조적인 것입니다.

이 백서의 예에서는 두 개의 신호 스트림이 생성됩니다. 송신기 시스템은 64개의 송신 안테나로 구성되며 4개의 송신 RF 체인이 있습니다. 그리고 4개의 수신 RF 체인에 16개의 수신 안테나가 공급되고 있습니다. 이 두 배열은 그림 4에서 볼 수 있습니다.

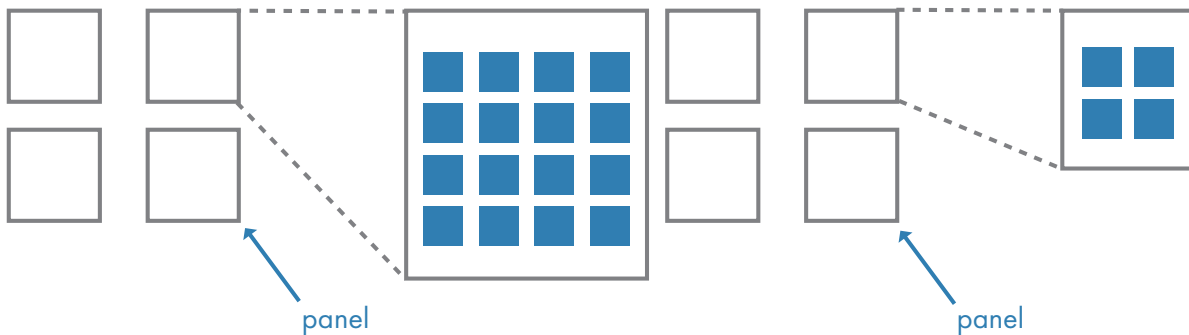


그림 4. 4개의 RF 체인과 64개 소자로 구성된 송신 배열(왼쪽) 및 4개의 RF 체인과 16개 소자로 구성된 수신 배열(오른쪽).

분할과 더불어, 채널 용량의 개선을 위해 스펙트럼 효율을 극대화하는 것 역시 바람직합니다. 이를 달성할 수 있는 한 방법은 각각의 RF 체인이 하나의 독립적인 데이터 스트림을 송신하도록 하는 것입니다. 채널이 알려져 있다고 가정하면, 채널 행렬을 대각화하고 우세한 모드를 추출하여 제약 없는 최적의 프리코딩 가중치를 얻을 수 있습니다.

## 파형 생성

5G 업링크 및 다운링크 파형을 비롯한 다양한 변조 방식을 사용할 수 있습니다. 파형 구성 블록의 예를 설명하기 위해 5G Toolbox의 5G NR(New Radio) 다운링크 파형을 살펴보겠습니다. 정의할 수 있는 파라미터의 수는 광범위하며 동기화 신호 정의, 반송파 구성 및 제어 리소스 세트 등을 포괄합니다.

시작하려면 여러 BWP(부분 대역폭)를 파라미터화하고 생성해야 합니다. BWP는 주어진 반송파에서 뉴머몰로지를 공유하는 인접 리소스 세트로 구성됩니다. 각 BWP는 SCS(부반송파 간격)가 서로 다를 수 있고, 서로 다른 CP(순환 전치) 길이를 사용하며, 서로 다른 대역폭에 걸쳐 있을 수 있고, 서로 다른 BWP가 서로 중첩될 수 있습니다.

반송파 구성에서 모든 파라미터를 설정하면 파형이 바로 생성됩니다.

그림 5는 부반송파 및 심볼의 함수로서 예시 파형을 보여줍니다.

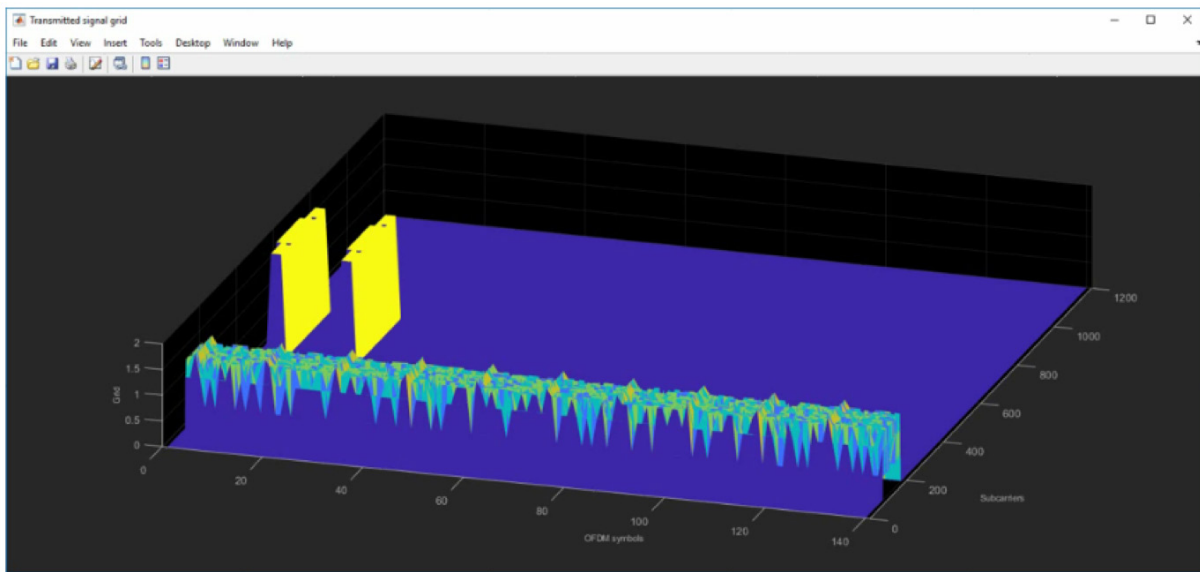


그림 5. 5G NR(New Radio) 다운링크 파형.

예시 BWP에 해당하는 정보를 포함하는 MATLAB의 구조체는 아래와 같습니다.

Information associated to BWP 1:

```

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]
    
```

모델을 단순화하기 위해 이 백서의 예시에는 기본 16 QAM 변조 방식이 구현되었습니다. 이 변조 방식의 성상도는 그림 6에서 볼 수 있습니다.

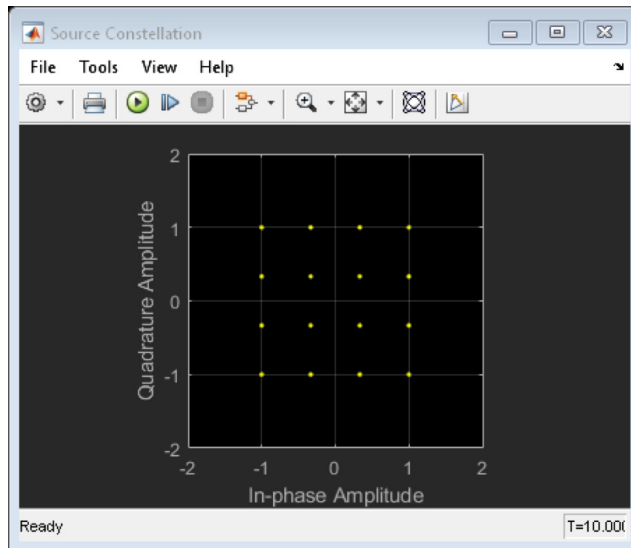


그림 6. QAM16 변조의 성상도.



## 하이브리드 빔포밍 가중치 계산

하이브리드 빔포밍 시스템에서는 프리코딩 및 해당 결합 과정이 모두 기저대역 및 RF에서 수행됩니다. 일반적으로 RF에서 수행되는 빔포밍에는 위상 변이를 포함합니다. 그러므로 채널에 기반하여 기저대역과 RF 대역 간에 가중치를 분배하는 방법을 결정하는 것이 이 워크플로에서 매우 중요한 부분입니다.

이는 채널 행렬  $H$ 를 기반으로 프리코딩 가중치인  $F_{bb}$  및  $F_{rfAng}$ 와 결합 가중치인  $W_{bb}$  및  $W_{rfAng}$ 를 계산하는 가중치 계산 블록(그림 2 참조)에서 수행됩니다. 그림 7에서 MIMO 채널의 프리코딩 및 결합 가중치를 계산하는 데 사용되는 블록 파라미터를 볼 수 있습니다. 이러한 파라미터를 직접 구성하여 다른 시스템 조합을 살펴볼 수 있습니다.

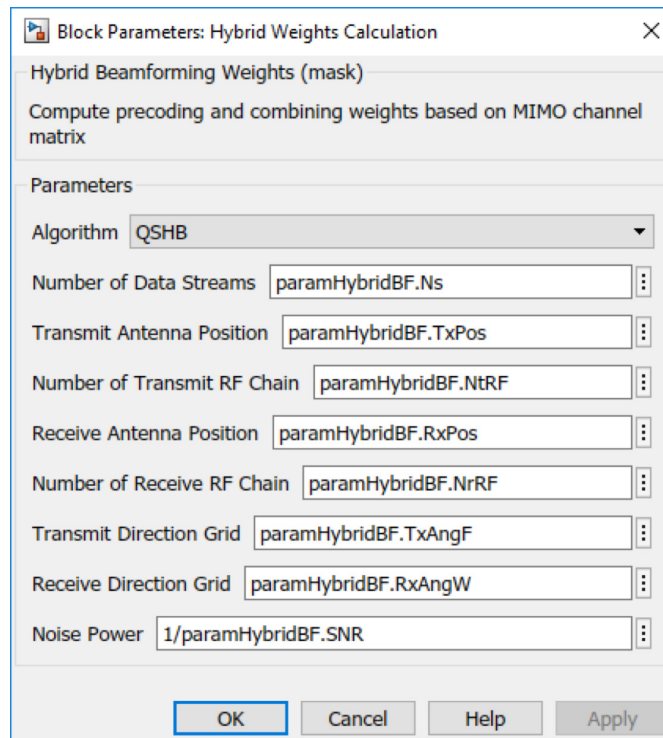


그림 7. MIMO 채널 행렬을 기반으로 프리코딩 및 결합 가중치를 계산하는 하이브리드 가중치 마스크.

## 양자화된 희소 하이브리드 빔포밍

MIMO 산란 채널의 채널 행렬  $H$ 가 주어지면 하이브리드 빔포밍 가중치를 계산할 수 있습니다.

직교 매칭 추구 알고리즘을 사용하는 경우 결과로 얻을 수 있는 아날로그 프리코딩 및 결합 가중치는 채널 행렬의 우세한 모드에 대응하는 조향 벡터에 불과합니다.

QSHB 알고리즘은 다음과 같은 정보를 생성합니다.

1. 프리코딩 행렬  $F_{RF}$  및  $F_{BB}$

2. 결합 행렬  $W_{RF}$  및  $W_{BB}$

계산된 하이브리드 빔포밍 행렬을 얻으면,  $N_s$  신호 스트림의 추정치  $\hat{s}$ 는 다음과 같이 표현할 수 있습니다.

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

여기서  $s$ 는  $N_s$  차원의 신호 스트림이고,  $n$ 은  $N_R$  차원의 채널 잡음 벡터입니다.

### 피크 탐색을 사용한 양자화된 희소 하이브리드 빔포밍

HBPS는 QSHB의 단순화된 버전입니다. HBPS는 채널 행렬의 우세한 모드를 반복적으로 탐색하는 대신 모든 디지털 가중치를 방향 그리드에 투영하고  $N_{RF}^T$  및  $N_{RF}^R$  피크를 파악하여 대응하는 아날로그 빔포밍 가중치를 형성합니다. 이 알고리즘은 특히 대규모 MIMO 시스템에서 사용되는 배열과 같은 대규모 배열에서 원활하게 작동합니다. 그 이유는 대규모 배열의 경우 방향이 직교할 가능성이 더 높기 때문입니다.

채널 행렬은 시간 경과에 따라 변경될 수 있으므로 채널 변동을 반영할 수 있도록 주기적으로 가중치 계산도 수행해야 합니다.

### QSHB

QSHB 알고리즘을 사용하여 수신기에서 16개의 QAM 심볼 스트림을 복원할 수 있습니다. 결과로 나타나는 성상도 (그림 8)는 소스 성상도와 비교하여 복원된 심볼이 두 스트림 모두에 적절하게 위치함을 보여줍니다. 이는 하이브리드 빔포밍 기법을 사용함으로써 2개의 스트림을 동시에 송신하여 시스템 용량을 개선할 수 있음을 보여줍니다. 또한 성상도는 첫 번째 복원된 스트림의 분산이 두 번째 복원된 스트림의 분산보다 점들이 덜 분산되어 있어 결과가 더 우수함을 보여줍니다. 그 이유는 첫 번째 스트림은 MIMO 채널의 가장 우세한 모드를 사용하기 때문에 SNR이 가장 우수하기 때문입니다.

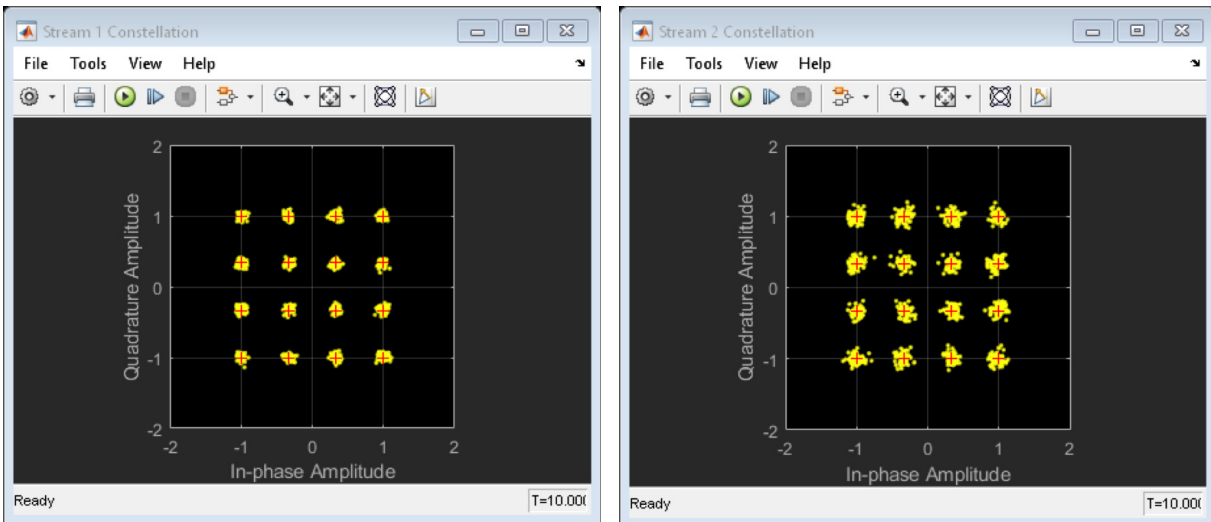


그림 8. QSHB의 스트림 1 및 2 성상도.

## HBPS

HBPS의 결과는 그림 9에서 볼 수 있습니다. 정상도는 QSHB와 비교하여 HBPS가 유사한 성능을 달성한다는 것을 보여줍니다. 즉, HBPS는 시뮬레이션된 64x16 MIMO 시스템에 적합한 선택이라는 것을 의미합니다.

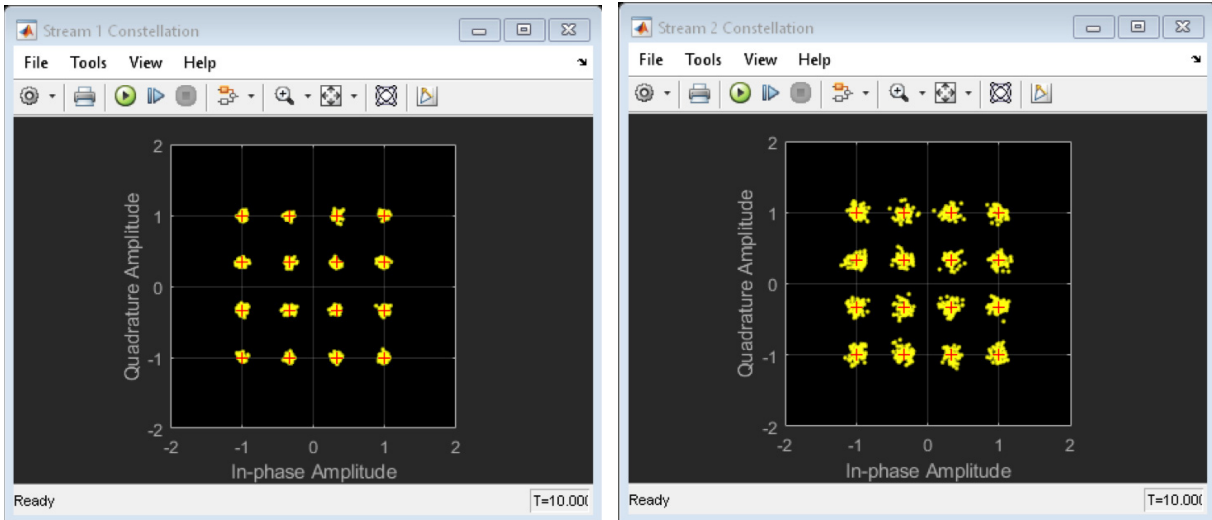


그림 9. HBPS의 스트림 1 및 2 정상도.

## 알고리즘의 스펙트럼 효율 비교

분할의 효율은 여러 방법으로 측정할 수 있습니다. 스펙트럼 효율은 MIMO 시스템 성능 메트릭으로 흔히 사용됩니다. 최적의 가중치(완전디지털 가중치)를 사용하여 달성한 스펙트럼 효율과 제안된 하이브리드 빔포밍 알고리즘인 QSHB 및 PSHB를 사용하여 달성한 스펙트럼 효율을 비교할 수 있습니다.

이해를 돕기 위해 이 시뮬레이션에서는 1개 신호 및 2개 신호 스트림을 사용하지만, 여러분의 시스템에 맞도록 확장할 수도 있습니다. 송신기 안테나 배열도 시스템 요구사항에 맞도록 정의할 수 있습니다.

이 시스템의 경우 배열 패턴은 방위각 80도 및 고도 40도를 커버하고 수신기 안테나는 방위각 120도 및 고도 80도를 커버합니다. 결과로 나타나는 스펙트럼 효율 곡선은 각 SNR 값에 대해 50회의 몬테카를로 시행을 통해 얻은 곡선입니다. 그림 10의 플롯에서 QSHB의 스펙트럼 효율과 최적의 전디지털 빔포밍 간 차이는 1dB 정도 나는 것을 볼 수 있습니다.

PSHB 알고리즘이 더 우수한 계산 효율을 제공하지만, QSHB에 비해 스펙트럼 효율에서 최대 1.5dB의 추가 손실이 발생합니다.

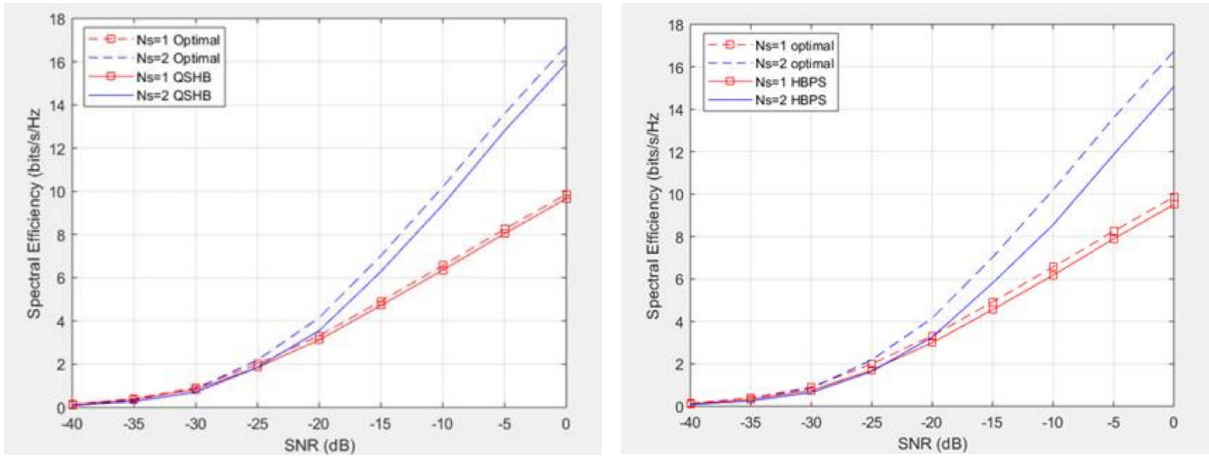


그림 10. QSHB(왼쪽)와 PSBH(오른쪽)의 효율 비교.

### 기타 분할 옵션 비교

시스템 파라미터는 그림 2에서 보여지는 Simulink 모델의 시스템 설정 섹션에서 볼 수 있습니다. 이 예시에서는  $N_t$ ,  $N_t R_f$ ,  $N_r$  및  $N_r R_f$ 의 값이 분할을 제어합니다. 그림 11은 이러한 시스템 파라미터의 다양한 조합을 사용한 성상도를 보여줍니다.

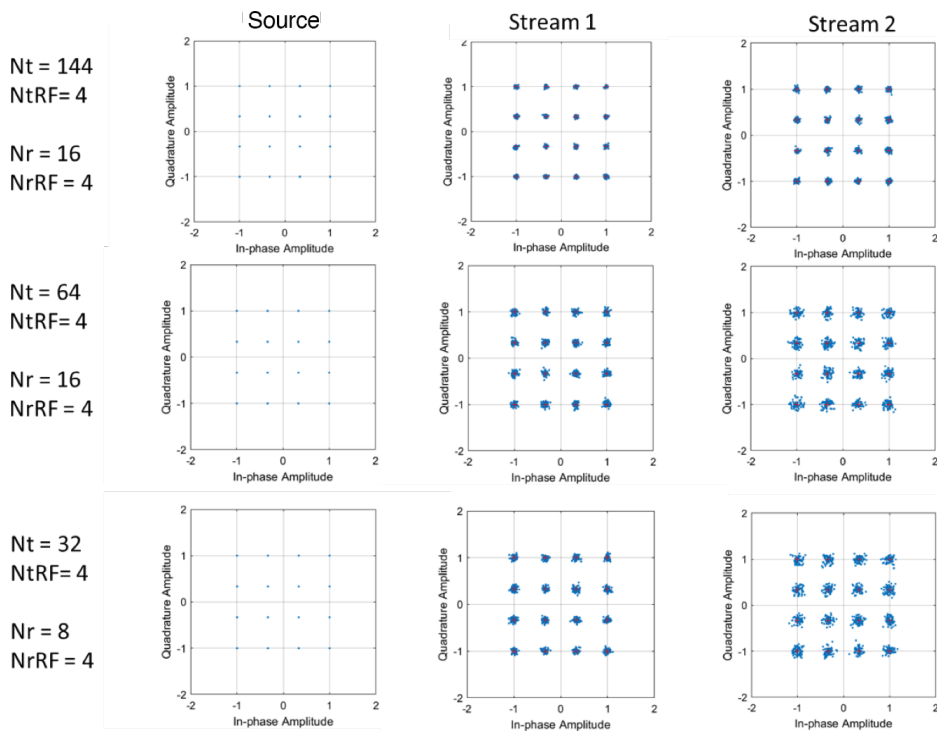


그림 11. 다양한 분할 옵션을 사용한 시스템 구성 및 해당 성상도.

### 총실도의 확장: RF Blockset 통합

하이브리드 빔포밍 시스템의 Simulink 모델을 구축한 후에는 더 높은 총실도를 목표로 할 수 있습니다. 이때 RF Blockset을 사용하여 시스템의 멀티도메인 시뮬레이션을 직접 생성할 수 있습니다. 비선형 RF 증폭기와 모델 효과를 사용하여 이득, 잡음, 짝수차 및 홀수차 상호변조 왜곡을 추정할 수 있습니다. RF 모델은 데이터시트 사양 또는 측정된 데이터를 사용하여 나타낼 수 있으며, AGC(자동 이득 제어) 및 DPD(디지털 전치왜곡) 알고리즘을 비롯한 적응형 아키텍처를 정확하게 시뮬레이션하는 데 사용할 수 있습니다.

RF Blockset을 사용하면 다양한 추상화 수준에서 RF 시스템을 모델링할 수 있습니다. 회로 포락선 시뮬레이션을 통해 임의의 토폴로지를 갖는 네트워크의 다중 반송파 시뮬레이션이 가능합니다. Equivalent Baseband 라이브러리를 통해 단일 반송파 캐스케이드 시스템의 신속한 이산시간 시뮬레이션을 수행할 수 있습니다. 그림 12에서는 분할된 시스템이 포함된 하이브리드 시스템의 예를 볼 수 있습니다. 여기서 기저대역 가중치는 각 송신/수신 모듈에 공급되는 디지털 스트림에 적용됩니다. 나머지 가중치는 안테나 소자에 공급하는 RF 채널에 대한 위상 변위로 적용됩니다.

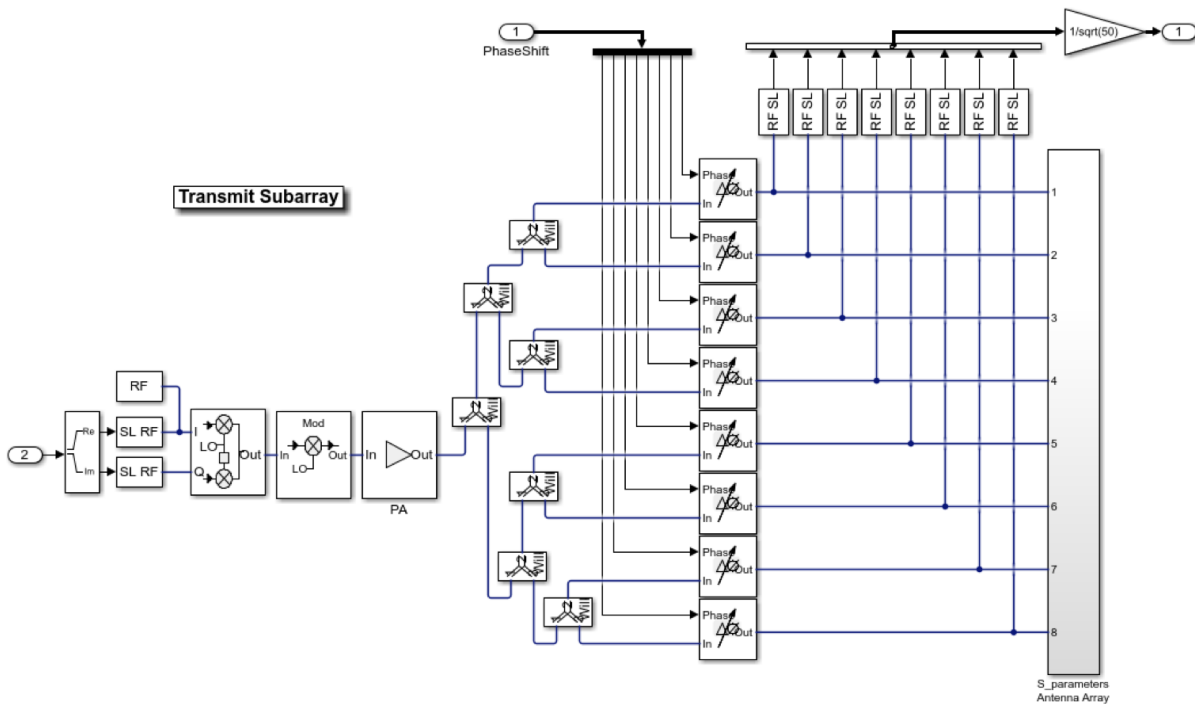


그림 12. 기저대역 및 RF 가중치가 적용된 RF Blockset 하이브리드 구조의 예.

## 요약

MATLAB 및 Simulink를 사용하여 단일 환경에서 안테나, RF 및 신호 처리 시스템을 설계할 수 있습니다. 모델링을 통해 하이브리드 빔포밍의 아키텍처를 정의할 수 있습니다. 다음과 같은 작업을 수행할 수 있습니다.

- 복잡한 부배열 구조를 비롯한 MIMO 위상 배열 설계
- RF 및 기저대역 영역에서 하이브리드 빔포밍 시스템의 지능적 분할
- MIMO 무선 통신 시스템 모델링
- 아키텍처 선택지 및 장단점 살펴보기
- 선택한 분할 설계의 품질 평가

## 시작하기

여러분의 하이브리드 빔포밍 프로젝트에 이 접근법을 적용하려면 다음 예제를 살펴보세요.

- [하이브리드 빔포밍 개요](#)
- [QSHB 및 HBPS 알고리즘을 사용한 하이브리드 MIMO 빔포밍](#)
- [대규모 MIMO 하이브리드 빔포밍](#)
- [하이브리드 빔포밍을 사용한 RF mmWave 송신기 모델링](#)