

mMIMO와 정밀한 빔포밍 기술을 통한 5G 네트워크 잠재력 실현

Bhavesh Rathod

Applications engineer
Wireless Infrastructure

소개

새로운 무선 세대가 등장할 때마다 더 높은 데이터 전송률과 낮은 지연 시간에 대한 요구가 크게 증가합니다. 5G는 증강과 가상 현실, IIoT(산업용 사물 인터넷), 자율 시스템과 같은 애플리케이션에 필수적인 초당 수십 기가비트의 처리량과 밀리초 미만의 지연 시간을 제공하여 이러한 흐름을 발전시킵니다. 특히 밀도가 높은 도시 지역과 고이동성 시나리오에서 성능 목표를 달성하려면 mMIMO(대규모 다중 입출력)와 빔포밍이라는 두 가지 기술이 필요합니다.

5G mMIMO 시스템은 일반적으로 송신 안테나 16개와 수신 안테나 16개에서 송신 안테나 128개와 수신 안테나 128개에 이르는 대규모 안테나 어레이를 사용합니다. 이러한 안테나는 추가 대역폭이나 전력 없이 스펙트럼 효율성과 사용자 용량을 개선하기 위해 동일한 주파수에서 여러 데이터 스트림을 동시에 송신하는 공간 멀티플렉싱을 지원합니다.

위상 어레이 안테나를 통해 구현되는 빔포밍은 공간 필터링을 통해 RF(무선 주파수) 에너지를 의도된 사용자를 향해 조종하고 집중시킴으로써 간섭을 완화하고 신호 대 잡음비를 개선합니다. 빔포밍에는 안테나 전반에 걸쳐 일관된 위상 정렬이 필요합니다. 이는 여유 공간 경로 손실과 신호 차단이 중요한 과제인 더 높은 RF 주파수(예: FR1 및 FR2 대역)에서의 성능을 향상시킵니다.

이러한 과제를 해결하기 위해 빔포밍과 결합된 5G mMIMO는 높은 처리량과 저지연 통신을 가능하게 하고 확장성을 보장합니다. 이렇게 결합된 기술로 네트워크 운영자와 개발자는 정밀한 안테나 제어를 통해 확장된 주파수 대역을 활용하여 혁신적인 무선 애플리케이션을 만들 수 있습니다.

mMIMO와 빔포밍을 실현하려면 RF 트랜시버를 사용하여 비트를 RF로, 또는 RF를 비트로 변환해야 합니다. mMIMO

와 빔포밍 모두 공간 및 타이밍 정확도를 요구하기 때문에 RF 트랜시버의 비트-RF 변환 과정은 정확한 타임 스탬프와 다중 안테나 간 시간 동기화를 갖춰야 합니다.

5G 지원 RF 트랜시버가 장착된 무선 장비는 4G와 5G 모두에서 작동할 수 있습니다. 5G에 대한 3GPP(3rd Generation Partnership Project) 사양에 따르면 5G는 다음과 같은 특정 분야에서 4G를 개선합니다.

- eMBB(향상된 모바일 광대역)
- 산업용 애플리케이션을 위한 CC(중요 통신) 및 URLLC(초고신뢰 저지연 통신)
- mMTC(대규모 사물 인터넷)
- 네트워크 슬라이싱, 클라우드 네이티브 인프라 및 소프트웨어 정의 네트워크를 통해 다양한 애플리케이션과 최종 사용자의 요구를 지원하는 동시에 적응성과 네트워크 최적화를 가능하게 하는 유연한 네트워크 운영

5G mMIMO란?

5G MIMO는 5G 네트워크 시스템에 사용되는 무선 통신 기술입니다. 일반 MIMO 라디오는 16~32개의 송수신 안테나를 탑재하는 데 반해, mMIMO의 경우에는 단일 라디오 유닛에 64개, 128개 또는 그 이상의 안테나를 탑재합니다. 이처럼 많은 안테나를 단일 라디오 유닛에 집적하여 더 많은 사용자에게 더 높은 데이터 전송률을 제공할 수 있습니다.

mMIMO 기반 5G 네트워크의 공간 멀티플렉싱 지원은 추가 대역폭 또는 송신 전력 없이도 채널 용량을 크게 증가시킬 수 있습니다.

업계가 mmWave(밀리미터파)와 같은 더 높은 5G 주파수로 전환함에 따라(24GHz에서 40GHz), 빔포밍의 중요성이 더욱 커지고 있습니다. mmWave 주파수를 사용하면 안테나 크기가 작기 때문에 제한된 공간에 많은 수의 안테나를 배치할 수 있습니다. mMIMO는 처리량과 범위를 개선할

뿐만 아니라, 더 많은 리소스(대역폭, 전력, 라디오)를 추가하지 않고도 여러 사용자를 동시에 지원할 수 있기 때문에 뜻밖의 유용한 기술임을 증명하고 있습니다. 따라서 5G mMIMO는 3GPP가 정의한 5G 네트워크의 고속 데이터 전송, 초저 지연 및 대규모 연결 목표를 달성하기 위한 필수 기술로 자리잡고 있습니다.

5G mMIMO와 빔포밍

빔포밍은 5G 무선 통신 시스템에 필수적인 핵심 기술 중 하나입니다. 5G 초광대역 주파수는 6GHz 미만 주파수 범위와 mmWave 주파수 대역에서 작동합니다. 이 주파수 스펙트럼은 신호 경로상의 장애물로 인한 높은 신호 감쇠와 간섭에 취약하며, mmWave는 4G만큼 쉽게 벽을 통과할 수 없습니다. 따라서 5G가 특히 밀집된 도시 환경에서 높은 데이터 전송 속도를 달성하기 위해서는 특정 지역에 전력을 집중시키는 빔포밍이 필요합니다. **그림 1**을 참조하십시오.

빔포밍의 또 다른 이점은 3GPP 릴리스에 정의된 대로 빔스티어링 및 빔트래킹을 통해 이동하는 차량과 같은 움직이는 목표물과의 연결을 유지할 수 있다는 점입니다. 빔포밍은 디지털, 아날로그 또는 하이브리드 빔포밍 아키텍처로 구현될 수 있습니다. 이 기술의 수학적 원리를 살펴보겠습니다.

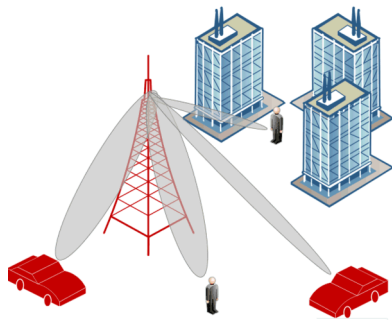


그림 1. 빔포밍이 인구가 밀집된 도시 지역에서 5G 네트워크를 통해 더 많은 사람을 연결하는 방법.

빔포밍의 수학적 원리

방정식 1은 채널을 통한 신호 전파를 모델링하고, **방정식 2**는 상세한 H 매트릭스를 나타냅니다. 매트릭스 H에서 각 요소 h_{mn} 은 각 송신 안테나 n에서 각 수신 안테나 m으로의 복소 계인을 나타냅니다. 여기서 ρ 는 수신 신호, τ 는 송신

신호이며, 매트릭스 H는 채널 특성 매트릭스입니다. 매트릭스 H는 모든 채널의 계인과 위상 응답을 나타냅니다.

$$\rho = H \times \tau \tag{1}$$

$$\rho = \begin{bmatrix} h_{11}h_{12} \cdots h_{1n} \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ h_{m1}h_{m2} \cdots h_{mn} \end{bmatrix} \tau \tag{2}$$

선형 사전 코딩에서 **방정식 3**은 송신 신호 τ 를 다음과 같이 계산합니다.

$$\tau = \Sigma w \times s \tag{3}$$

여기서 s는 전송되는 기호이고 w는 선형 사전 코딩 벡터입니다.

사전 코딩 벡터는 각 전송 채널의 상대적 위상차를 조정하여 빔의 방향을 결정합니다.

사전 코딩 벡터를 계산하려면 H 매트릭스를 추정해야 합니다. 각 송신기는 결정론적 상대 위상차를 갖는 것이 중요합니다. 그렇지 않으면 추정된 H 매트릭스와 계산된 사전 코딩 벡터가 유효하지 않습니다. 빔포밍은 송신된 신호의 위상 정확도에 의존하여 수신기에서 신호를 보강 결합합니다.

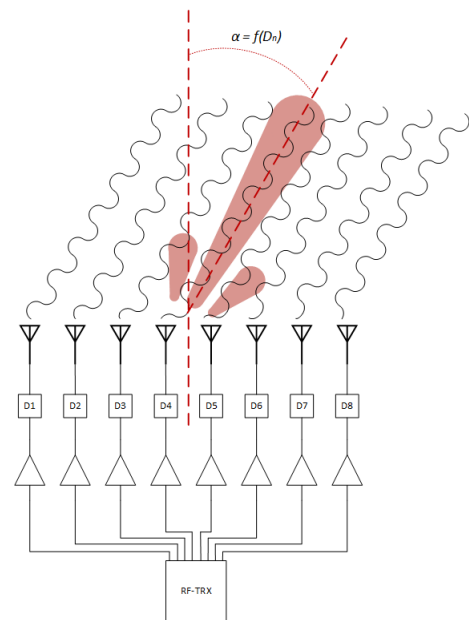


그림 2. 시간 동기식 안테나 간 위상을 조정하여 형성된 빔(8채널 트랜시버 사용).

라디오 유닛에 아날로그 프론트 엔드 장치가 여러 개 있는 경우 하나의 mMIMO에서 여러 송신기의 출력 위상을 동기화하는 것이 까다로워집니다. 128 안테나 mMIMO 시스템에는 8~16채널 아날로그 프론트 엔드 장치가 사용됩니다.

mMIMO 시스템의 현재 과제

일반적인 5G mMIMO 트랜시버의 경우 단일 보드에 여러 RF 트랜시버가 탑재되어 있습니다. 64채널 구성의 경우 8채널 트랜시버 8개 또는 16채널 트랜시버 4개가 보드에 배치될 수 있습니다. 안정적인 빔포밍을 위해서는 초기 구동, 아날로그 프론트 엔드와 ASIC(애플리케이션별 집적 회로) 또는 FPGA(필드 프로그래머블 게이트 어레이) 간의 후속 JESD204B 및 JESD204C 링크 재초기화, 파워 온 리셋 등을 포함하여 전체 시스템 수명 주기에 걸쳐 모든 송신 및 수신 경로의 위상 동기화가 유지되어야 합니다. 이는 모든 무선 시스템 설계자가 직면하는 근본적인 과제입니다. 결정론적 상대 위상 관계는 복합 안테나 어레이가 예측 가능한 방식으로 빔을 형성하고 조종하도록 보장합니다.

트랜시버에 내장된 NCO(수치 제어 오실레이터)의 내부 위상 변이 기능을 활용하면 다중 요소 안테나 어레이에 존재하는 잔류 정적 위상 오프셋만을 보상할 수 있습니다. 이 오프셋은 구동 사이클과 JESD 재링크 이벤트 및 전원 사이클에 걸쳐 불변하기 때문에, 1회의 NCO 보정으로 모든 채널의 위상을 정렬하여 빔포밍 성능을 유지할 수 있습니다. 그러나 라디오의 모든 RF 트랜시버가 시간 동기화되어야 하는 근본적인 요구 사항은 여전히 남아 있습니다.

TI의 AFE80xx 및 AFE81xx RF 집적 회로 제품군에는 설계자가 mMIMO 요구 사항을 충족하는 데 도움이 되는 여러 기능이 포함되어 있습니다.

단일 샷 sysref 모드 사용

대부분의 시스템에서 기본 작동 모드는 연속 sysref 모드이며, 여기서 sysref는 주기적 저주파 신호입니다. 그러나 AFE8092, AFE8030, AFE8128, AFE8190, AFE8192에서 '단일 샷' sysref(시스템 레퍼런스 클럭) 모드를 사용하여 다중 장치 동기화를 구현할 수 있습니다. 단일 샷 모드에서 sysref 신호는 단일 펄스이며, 보드의 모든 아날로그 프론트 엔드에 동시에 제공됩니다. 모든 아날로그 프론트 엔드가 레퍼런스 클럭을 기준으로 정확히 동일한 순간에 sysref를 수신하면 자연스럽게 위상 동기화가 이루어집니다.

이 방법을 구현할 때 해결해야 할 과제 중 하나는 보드의 여러 장치에 sysref 및 레퍼런스 클럭의 차동 라우팅을 구현하는 것입니다. 인쇄 회로 보드 내의 무선 수준에서는 레퍼런스 클럭 대비 피코초 수준으로 sysref 및 레퍼런스 클럭 라우팅의 타이밍을 유지해야 합니다.

그림 3에서 볼 수 있듯이, AFE8092, AFE8030, AFE8128, AFE8190 및 AFE8192를 사용하는 단일 샷 sysref 모드에서는 특정 시퀀싱이 필요합니다.

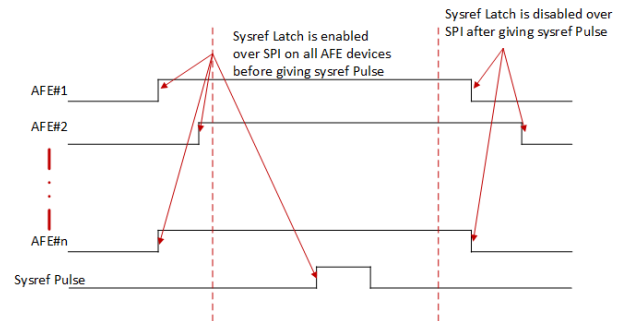


그림 3. 단일 샷 sysref 모드의 타이밍 다이어그램.

GPIO를 통한 공통 타임 스탬프 신호로 RF 집적 회로 시간 정렬하기

또한 GPIO(범용 입력/출력) 기반 제어를 사용하여 sysref 래치를 활성화할 수도 있습니다. 이 모드에서는 sysref가 연속 sysref 모드로 작동할 수 있습니다. 모든 아날로그 프론트 엔드 장치는 GPIO 기반 래치 활성화 신호를 수신한 후 첫 번째 레퍼런스 클럭 상승 에지에 래치됩니다. 이후의 모든 펄스는 무시됩니다.

이 접근 방식은 모든 아날로그 프론트 엔드에 CMOS GPIO 신호만 라우팅하면 되므로, 동일한 길이로 보드의 여러 아날로그 프론트 엔드 장치에 차동 신호를 라우팅하는 것이 어려울 수 있는 단일 샷 sysref 방법에 비해 상대적으로 더 간단하게 구현할 수 있습니다. 다만 이 접근 방식을 사용하려면 호스트의 ASIC에서 장치당 하나의 GPIO를 동기화해야 합니다. 호스트 ASIC 또는 FPGA에 GPIO가 충분하지 않은 경우에는 이 방법이 적합하지 않습니다.

그림 4에서 볼 수 있듯이, GPIO 기반 제어를 사용하여 AFE8092, AFE8030, AFE8128, AFE8190, AFE8192에서 sysref 래치를 활성화하려면 특정 시퀀싱이 필요합니다.

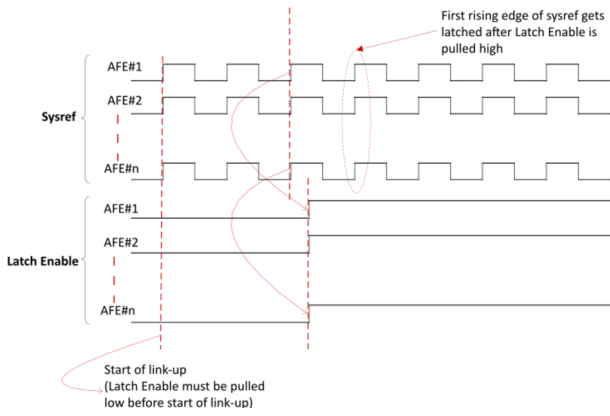


그림 4. GPIO 기반 제어를 사용하여 sysref 래치 모드를 활성화하는 타이밍 다이어그램.

NCO 선택

위상 동기화를 달성하는 가장 간단한 방법은 sysref 주파수의 정수 배수에 해당하는 송신기 및 수신기 NCO를 선택하는 것입니다. 이 방법은 연속 sysref 모드에서도 작동하며, 여러 아날로그 프론트 엔드 장치를 통해 송수신을 위해 NCO를 동기화하는 추가 메커니즘이 필요하지 않습니다.

이 방법은 기존 하드웨어를 변경하지 않고 위상 동기화를 달성할 수 있으므로, NCO 주파수에 대한 제한이 최종 애플리케이션에서 용인되는 경우 가장 적합합니다. 아날로그 프론트 엔드 장치의 재링크나 전원 사이클을 수행하는 경우 특정 소프트웨어 시퀀스를 따라야 합니다. 그림 5에서는 이 모드에서 모든 아날로그 프론트 엔드가 서로 다른 sysref 에지에 래치되어 있어도 문제가 되지 않음을 볼 수 있습니다.

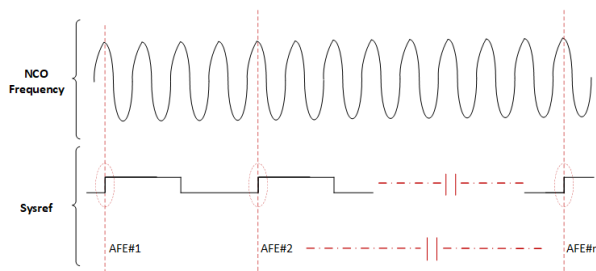


그림 5. NCO 주파수가 sysref 주파수의 4배에 해당하는 예시.

결론

mMIMO와 빔포밍 기술의 통합은 5G 네트워크의 잠재력을 최대한 발휘하여 탁월한 데이터 전송률과 초저지연을 구현하는 데 핵심적인 역할을 합니다. 이러한 기술은 대형 안테나 어레이와 정밀한 공간 필터링을 활용하여 고주파 신호 전파 문제를 극복하고 다양한 시나리오에서 안정적이고 처리량 높은 통신을 보장합니다. 3GPP 사양에 명시된 바와 같이 eMBB, CC, URLLC, mMTC 및 유연한 네트워크 운영 분야에서 5G의 향상된 역량은 mMIMO와 빔포밍의 시너지 효과에 크게 기인합니다.

TI의 AFE8092, AFE8030, AFE8128 및 AFE8190, AFE8192 트랜시버는 네트워크 운영자가 증강 및 가상 현실, IIoT부터 자율 시스템 등에 이르기까지 다양한 무선 애플리케이션을 지원할 수 있도록 돕습니다.

저자 소개

Bhavesh Rathod는 텍사스 인스트루먼트의 애플리케이션 엔지니어로, RF 애플리케이션 및 무선 인프라 솔루션을 전문으로 합니다. Bhavesh는 최첨단 무선 인프라 기술 개발 지원을 위한 포스트 실리콘 검증 및 임베디드 시스템에 대한 실무적인 전문 지식을 보유하고 있습니다. 퍼듀 대학교 (Purdue University)에서 전기컴퓨터 공학 석사 학위를, 푸네 공과대학(College of Engineering Pune)에서 전기공학 학사 학위를 받았습니다. Bhavesh는 수동 안정화 통신 위성 Swayam 관련 연구로 2017년 간디안 청년 기술 혁신상 (Gandhian Young Technological Innovation)을 수상했습니다.

중요 알림: 이 문서에 기술된 텍사스 인스트루먼트의 제품과 서비스는 TI의 판매 표준 약관에 의거하여 판매됩니다. TI 제품과 서비스에 대한 최신 정보를 완전히 숙지하신 후 제품을 주문해 주시기 바랍니다. TI는 애플리케이션 지원, 고객의 애플리케이션 또는 제품 설계, 소프트웨어 성능 또는 특허권 침해에 대해 책임을 지지 않습니다. 다른 모든 회사의 제품 또는 서비스에 관한 정보 공개는 TI가 승인, 보증 또는 동의한 것으로 간주되지 않습니다.

모든 상표는 해당 소유권자의 자산입니다.

IMPORTANT NOTICE AND DISCLAIMER

TI PROVIDES TECHNICAL AND RELIABILITY DATA (INCLUDING DATASHEETS), DESIGN RESOURCES (INCLUDING REFERENCE DESIGNS), APPLICATION OR OTHER DESIGN ADVICE, WEB TOOLS, SAFETY INFORMATION, AND OTHER RESOURCES "AS IS" AND WITH ALL FAULTS, AND DISCLAIMS ALL WARRANTIES, EXPRESS AND IMPLIED, INCLUDING WITHOUT LIMITATION ANY IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE OR NON-INFRINGEMENT OF THIRD PARTY INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS.

These resources are intended for skilled developers designing with TI products. You are solely responsible for (1) selecting the appropriate TI products for your application, (2) designing, validating and testing your application, and (3) ensuring your application meets applicable standards, and any other safety, security, regulatory or other requirements.

These resources are subject to change without notice. TI grants you permission to use these resources only for development of an application that uses the TI products described in the resource. Other reproduction and display of these resources is prohibited. No license is granted to any other TI intellectual property right or to any third party intellectual property right. TI disclaims responsibility for, and you fully indemnify TI and its representatives against any claims, damages, costs, losses, and liabilities arising out of your use of these resources.

TI's products are provided subject to [TI's Terms of Sale](#), [TI's General Quality Guidelines](#), or other applicable terms available either on ti.com or provided in conjunction with such TI products. TI's provision of these resources does not expand or otherwise alter TI's applicable warranties or warranty disclaimers for TI products. Unless TI explicitly designates a product as custom or customer-specified, TI products are standard, catalog, general purpose devices.

TI objects to and rejects any additional or different terms you may propose.

Copyright © 2026, Texas Instruments Incorporated

Last updated 10/2025