

Application Note

대규모 위상 배열 안테나 시스템용 AFE7769D를 사용한 멀티 AFE 동기화

Shaily Jain, Neeraj Kumar Sharma, Srinivas Murthy

추상

빔포밍은 대형 위상 배열 안테나 시스템이 전파를 특정 사용자를 향하는 빔에 집중시켜 범위와 신호 대 잡음비를 개선하는 동시에 간섭을 최소화하는 고급 신호 처리 기술입니다. 빔포밍에는 예측 가능한 방식으로 빔을 조향하고 형성하기 위해 일관된 위상 정렬이 필요합니다. 위상의 편차는 빔포밍 성능을 직접적으로 저하시키고, 신호 강도를 감소시키고, 빔의 폭을 넓히고, 궁극적으로 시스템 범위와 용량이 감소합니다.

위상 배열의 확장성은 본질적으로 시스템의 모든 요소에 걸쳐 정밀하고 결정론적인 위상 제어를 유지하는 능력과 관련이 있습니다. 이러한 문제는 제조 프로세스 변형 및 온도 드리프트로 인해 수많은 데이터 컨버터에서 위상 일관성을 유지하는 것이 점점 더 어려워지는 대규모 다중 요소 위상 배열에서 특히 더 심각합니다.

AFE7769D RF 트랜시버는 시스템 레퍼런스(Sysref) 신호를 통해 여러 장치에서 결정론적인 위상 제어를 보장하여 이러한 주요 제한을 해결합니다. Sysref는 로컬 오실레이터와 샘플링 클록을 동기화하여 전체 배열에 대한 공통 타이밍 및 위상 레퍼런스를 효과적으로 설정합니다.

목차

1 소개.....	2
2 아키텍처 이해하기.....	3
3 위상 변이 분석.....	5
4 장치 구성.....	7
5 결정론적 위상을 사용한 주파수 호핑.....	7
6 요약.....	7
7 참고 자료.....	8

상표

모든 상표는 해당 소유권자의 자산입니다.

1 소개

제로 IF 샘플링 아키텍처를 기반으로 하는 AFE7769D는 신호 품질을 개선하기 위한 DPD(Digital Pre-Distortion) 알고리즘을 제공합니다. 또한 이 장치는 차세대 기지국 및 인접 통신 인프라에 대한 입증된 결과를 제공하기 때문에 대규모 MIMO 및 빔포밍 기술에 선호됩니다.

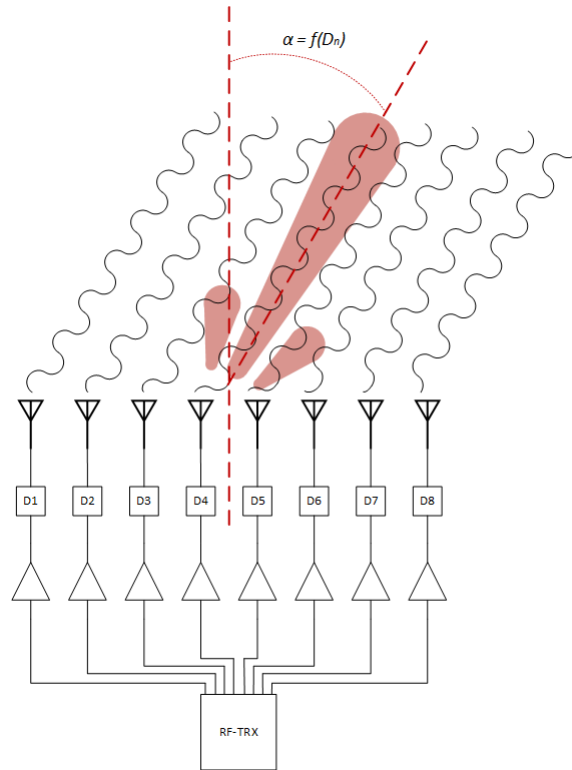


그림 1-1. 시간-동기식 안테나 사이의 위상을 조정하여 형성되는 빔

AFE7769D는 핀 호환을 지원하는 고성능 멀티 채널 트랜시버 제품군으로, 4개의 직접 상향 변환 트랜스미터 체인, 4개의 직접 하향 변환 리시버 체인, 2개의 광대역 RF 샘플링 디지털화 보조 체인(피드백 경로) 및 PA(전력 증폭기) 선형화를 위한 저전력 DPD(Digital Pre-Distortion) 엔진을 통합합니다. 통합 DPD 엔진은 PA 비선형성으로 인한 왜곡을 보정하여 최대 300MHz의 순간 대역폭 및 730MHz의 DPD 확장 대역폭 신호를 제공합니다. 트랜스미터 및 리시버 체인의 높은 동적 범위를 통해 무선 기지국은 2G, 3G, 4G 및 5G 신호를 전송하고 수신할 수 있습니다.

또한 이 장치는 특정 신호를 주입하거나 오프라인 보정을 수행할 필요 없이 I 및 Q 불균형 불일치를 지속적으로 모니터링하고 수정할 수 있는 통합 QMC(직교 비정합 보상) 알고리즘을 지원합니다.

신시사이저 섹션은 4개의 서로 다른 RF LO를 생성할 수 있는 4개의 분수형-N RF PLL을 통합하여 장치가 최대 3개의 다른 대역을 지원할 수 있습니다.

위상 배열 애플리케이션의 경우 이 장치는 Sysref를 사용하여 결정론적이고 신뢰할 수 있는 위상을 검증합니다. Sysref는 여러 AFE를 동기화하도록 지원하므로 지상 기지국, 위성 통신 및 무선 인프라 같은 애플리케이션에서 유용합니다.

2 아키텍처 이해하기

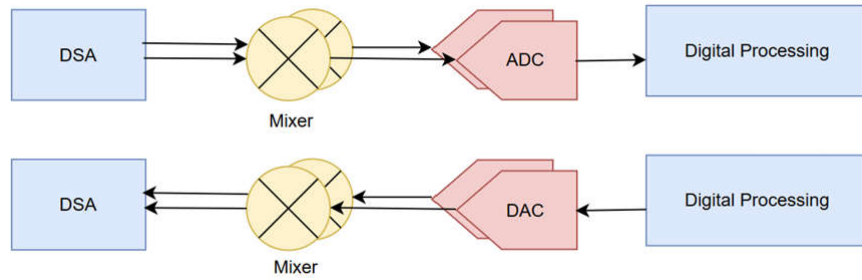


그림 2-1. 데이터 경로 아키텍처

그림 2-1에서 볼 수 있듯이 데이터 경로를 따라 I 및 Q 데이터 스트림을 위한 두 개의 아날로그 믹서가 있고, 디지털 처리 전에 각 스트림을 위한 두 개의 데이터 컨버터가 있습니다. 디지털 NCO(수치 제어 오실레이터)와 달리 아날로그 PLL은 매번 무작위 위상에서 시작할 수 있습니다. 아날로그 PLL은 부품 불일치, 온도 변화, 공급 전압 변화, 아날로그 잡음의 영향을 본질적으로 받는 연속 시간 회로(충전 펌프, 전압 제어 오실레이터, 루프 필터)에 의존하여 아날로그 결함을 유발합니다. 이러한 불완전성은 매번 정확히 동일한 위상 관계를 보장하는 것을 어렵게 만듭니다.

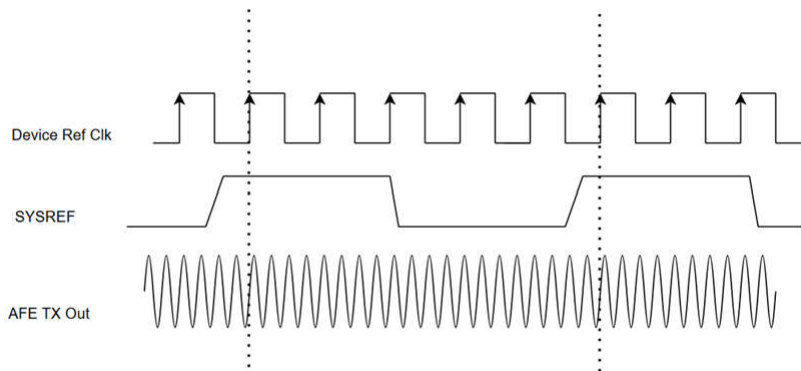


그림 2-2. Sysref를 통한 위상 리셋 타이밍 다이어그램

AFE7769D는 수신 또는 전송에 사용되는 믹서 주파수가 Sysref 주파수의 정수 배수인 경우 그림 2-2에 표시된 것처럼 Sysref를 사용하여 결정론적 위상을 달성할 수 있습니다. Sysref 신호는 RF PLL 믹서 내의 모든 블록과 하위 블록에 제공되어 경로의 모든 분할기를 정렬하여 항상 결정론적 위상에서 시작할 수 있도록 합니다. Sysref는 재구성/전원 사이클을 사용하는 장치 내 모든 채널에서 결정론적 위상을 달성하기 위해 RF PLL 블록이 리셋 및 정렬되도록 합니다.

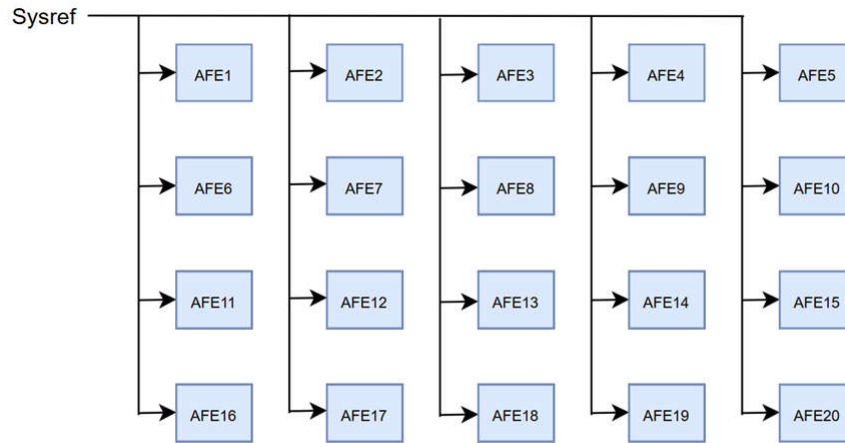


그림 2-3. 여러 AFE를 사용하는 대규모 위상 배열 설정의 예

그림 2-3에 표시된 것처럼 여러 장치를 사용하는 대규모 위상 배열 애플리케이션의 경우 Sysref 신호는 장치 내부와 장치 간에 결정론적인 위상 정렬을 제공하여 분산 시스템에서 위상 일관성을 보장합니다. 이를 통해 Sysref를 사용하여 각 장치가 결정론적 위상에서 가동되는 경우와 같이 전원이 투입될 때마다 위상 보정에 대한 추가 작업이 필요하지 않습니다.

3 위상 변이 분석

설정에는 여러 재구성과 다양한 온도 범위에 걸쳐 위상 동기화를 관찰하기 위한 AFE7769D 평가 모듈(EVM) 2개가 포함되어 있습니다. 장치 레퍼런스 클록(Fref) 및 시스템 레퍼런스(Sysref)는 [그림 3-1](#)에 나와 있는 것처럼 두 장치 모두에 대해 동일한 소스에서 가져왔습니다.

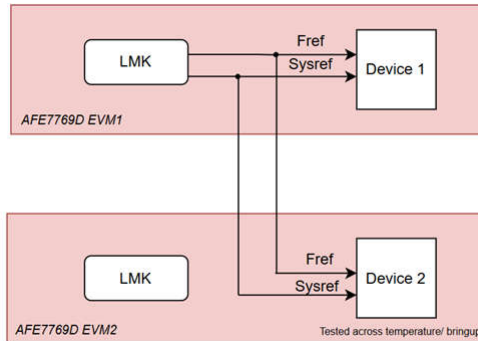


그림 3-1. 위상 동기화를 위한 클로킹 구조

RF PLL 주파수는 Sysref 주파수의 정수 배수로 설정되었습니다. 이 경우 모든 관찰과 플롯은 RF PLL 주파수를 1,728MHz로 설정하여 수행되었습니다. 두 장치를 한 번 구성한 후 여러 재구성 및 다양한 온도를 사용하여 EVM2에서 관찰을 실시했습니다.

장치는 [그림 3-2](#) 및 [그림 3-3](#)에 나와 있는 것처럼 외부 레퍼런스 및 여러 재구성/전원 사이클을 사용하는 다른 장치와 관련하여 모든 채널에서 일관된 위상을 유지합니다.

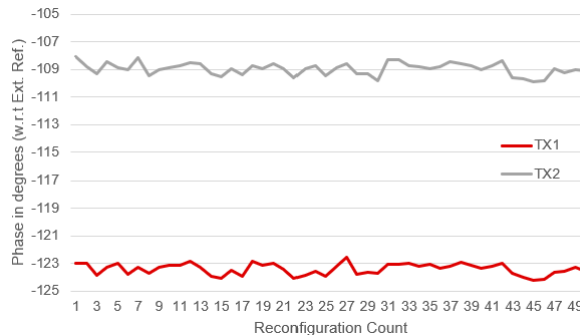


그림 3-2. 여러 재구성을 사용한 채널 간 위상 변이

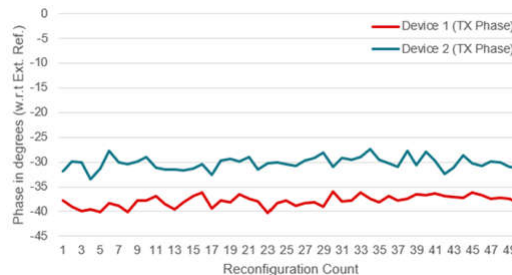


그림 3-3. 여러 재구성을 사용한 장치 간 위상 변이

위상은 또한 100°C의 범위에서 다양한 온도로 관찰되었습니다. TX의 경우 위상이 약 0.4° 저하됩니다([그림 3-4](#)). RX의 경우 0.208° 상승합니다([그림 3-5](#)). 사용자는 필요에 따라 온도 변화에 따라 이러한 변화를 보정에 고려할 수 있습니다.

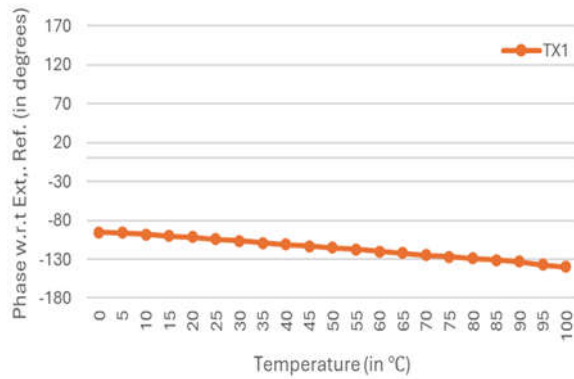


그림 3-4. PLL 주파수 1,728MHz에서의 온도에 따른 위상 드리프트(TX)

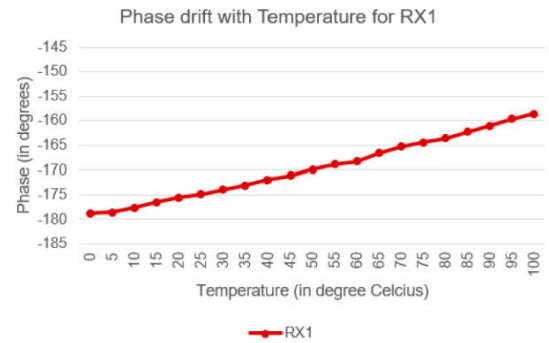


그림 3-5. PLL 주파수 1,728MHz에서의 온도에 따른 위상 드리프트(RX)

그러나 그림 3-6 및 그림 3-7과 같이 장치는 온도에 따라 채널에서 위상을 일관되게 유지합니다(예: 채널 간 상대적 위상이 일정하게 유지됨).

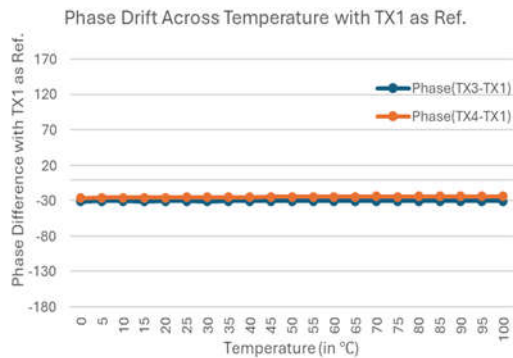


그림 3-6. 온도에 따른 위상 변이(TX)

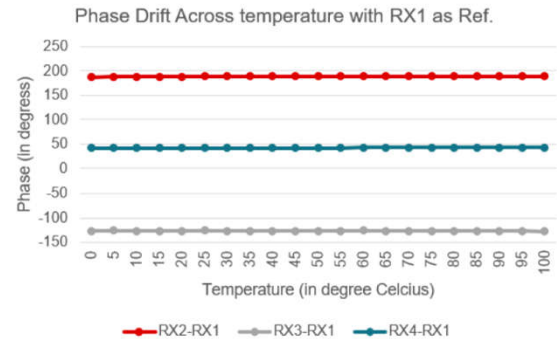


그림 3-7. 온도에 따른 위상 변이(RX)

4 장치 구성

시스템 설계자가 장치를 구성할 때는 PLL 주파수가 Sysref 주파수의 배수인지 확인해야 합니다. 아래 단계를 참조하십시오.

1. 사용 사례에 따라 *pllMuxMode* 매개 변수를 설정합니다.
2. 매개 변수 *plLo*를 사용하여 PLL 주파수를 작동 주파수로 설정합니다. 참조로 PLL 주파수는 Sysref 주파수의 정수 배수여야 합니다.
3. 원하는 모드에 대한 다른 필수 구성 매개 변수를 설정합니다. 정확한 매개 변수에 대한 자세한 내용은 AFE77xxD 구성 가이드(SBAU405A)를 참조하십시오.
4. 장치 가동을 완료합니다.

모든 가동/재구성을 통해 장치는 Sysref와 관련하여 여러 채널과 장치 간에 일정한 위상을 유지합니다. AFE77xxD Latte 소프트웨어를 사용하여 장치를 가동하는 방법에 대한 자세한 내용은 다음 [비디오](#)를 참조하십시오.

5 결정론적 위상을 사용한 주파수 호핑

주파수 호핑은 트랜스미터 및 리시버가 다양한 애플리케이션에서 작동 주파수를 전환하는 기술입니다. 이 방법은 통신 시스템에서 간섭을 최소화하고 혼선을 피하기 위해 널리 사용됩니다. 주파수 간에 전환할 때는 위상 일관성을 유지하는 것이 중요합니다. 위상 관계는 무작위로 변동하지 않고 예측 가능하고 제어되어야 합니다.

이러한 위상 결맞음은 특히 여러 장치가 올바르게 작동하기 위해 서로 정확하고 결정론적인 위상 관계를 유지해야 하는 대규모 위상 배열 시스템에서 매우 중요합니다. 위상의 결이 맞지 않으면 배열이 빔을 정확하게 조향하거나 대상을 감지하지 못합니다. 위상 결맞음 주파수 호핑은 각 주파수 전환 후에 재보정을 필요로 하지 않습니다. 이를 통해 시스템은 빔포밍 기지국 같은 응용 분야에 필수적인 지속적이고 정확한 작동과 안전한 통신을 유지하면서 주파수 간에 빠르게 호핑할 수 있습니다.

전환 목표 주파수가 Sysref 주파의 정수 배수이기도 한 경우 PLL 주파수는 위상 일관성 손실 없이 장치 가동 후 동적으로 전환할 수 있습니다. 주파수 호핑 중에 PLL이 재구성되고 위상 정렬을 보장하기 위해 다음 시퀀스를 실행해야 합니다.

```
CAFE.dynamicLOChangewrapper(0, rx12Lo, rx34Lo, tx12Lo, tx34Lo, iqmcDelayArr, dpdDelayArr)1
```

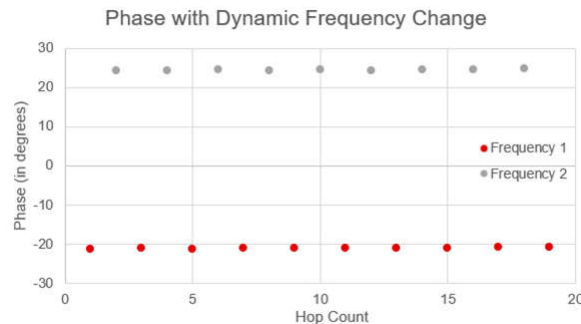


그림 5-1. 동적 주파수 변경 시의 장치 위상

따라서 시스템은 위 [그림 5-1](#)에 표시된 것처럼 여러 주파수 간에 전환할 때에도 일정한 위상을 유지합니다.

6 요약

새로운 통신 세대가 등장할 때마다 더 높은 데이터 전송률과 낮은 지연 시간에 대한 요구가 크게 증가합니다. 빔포밍과 결합된 5G Massive MIMO는 높은 처리량과 저지연 통신을 가능하게 하고 확장성을 보장합니다. AFE7769D는 정밀한 안테나 제어 및 공간 필터링을 위해 위상 일관성이 중요한 대규모 MIMO 애플리케이션에 사용할 수 있습니다. 여러 장치 내부와 여러 장치 간에 위상 결맞음을 제공합니다. AFE7769D는 재구성/전원 사이클 및 주파수 호핑 기술로 예측 가능한 위상 관계를 유지함으로써 재보정 요구 사항을 제거하고 시스템 복잡성을 줄이고 애자일 빔포밍 애플리케이션을 지원합니다.

¹ IqmcDelayArr and DpdDelayArr can both be set to zero when DPD is not triggered. Whenever DPD is triggered, set them to appropriate delay values.

7 참고 자료

1. 텍사스 인스트루먼트, [AFE77xxD CFR/DPD를 통합한 듀얼 피드백 경로를 지원하는 쿼드/듀얼 채널 RF 트랜시버](#), 데이터시트.
2. 텍사스 인스트루먼트, [mMIMO와 정밀한 빔포밍 기술을 통한 5G 네트워크 잠재력 실현](#), 아날로그 디자인 학술지.

중요 알림 및 고지 사항

TI는 기술 및 신뢰성 데이터(데이터시트 포함), 디자인 리소스(레퍼런스 디자인 포함), 애플리케이션 또는 기타 디자인 조언, 웹 도구, 안전 정보 및 기타 리소스를 "있는 그대로" 제공하며 상업성, 특정 목적 적합성 또는 제3자 지적 재산권 침해에 대한 묵시적 보증을 포함하여(그러나 이에 국한되지 않음) 모든 명시적 또는 묵시적으로 모든 보증을 부인합니다.

이러한 리소스는 TI 제품을 사용하는 숙련된 개발자에게 적합합니다. (1) 애플리케이션에 대해 적절한 TI 제품을 선택하고, (2) 애플리케이션을 설계, 검증, 테스트하고, (3) 애플리케이션이 해당 표준 및 기타 안전, 보안 또는 기타 요구 사항을 충족하도록 보장하는 것은 전적으로 귀하의 책임입니다.

이러한 리소스는 예고 없이 변경될 수 있습니다. TI는 리소스에 설명된 TI 제품을 사용하는 애플리케이션의 개발에만 이러한 리소스를 사용할 수 있는 권한을 부여합니다. 이러한 리소스의 기타 복제 및 표시는 금지됩니다. 다른 모든 TI 지적 재산권 또는 타사 지적 재산권에 대한 라이선스가 부여되지 않습니다. TI는 이러한 리소스의 사용으로 인해 발생하는 모든 청구, 손해, 비용, 손실 및 책임에 대해 책임을 지지 않으며 귀하는 TI와 그 대리인을 완전히 면책해야 합니다.

TI의 제품은 [TI의 판매 약관](#), [TI의 일반 품질 지침](#) 또는 [ti.com](https://www.ti.com) 이나 해당 TI 제품과 함께 제공되는 기타 조건의 적용을 받습니다. TI가 이러한 리소스를 제공한다고 해서 TI 제품에 대한 TI의 해당 보증 또는 보증 부인 정보가 확장 또는 기타의 방법으로 변경되지 않습니다. TI가 명시적으로 제품을 사용자 정의 또는 고객 정의용으로 지정하지 않는 한, TI 제품은 범용의 표준 카탈로그 장치입니다.

TI는 사용자가 제안할 수 있는 어떠한 추가적이거나 상이한 조건도 반대하며 이를 거부합니다.

Copyright © 2026, Texas Instruments Incorporated

최종 업데이트: 2025/10/25

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](https://www.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