

Paul Curtis, Eric Lee

추상

확산 스펙트럼 기술은 스위치 모드 컨트롤러와 컨버터에 일반적으로 사용되며 스위처가 생성하는 EMI(전자기 간섭)의 영향을 줄이는 역할을 합니다. 확산 스펙트럼을 구현하는 데에는 다양한 방법이 있으며, 각 방법은 업계 표준 테스트에서 사용되는 여러 분해능 대역폭(RBW)에 따라 보통 저주파 또는 고주파에서 더 우수한 성능을 보입니다. DRSS(듀얼 랜덤 확산 스펙트럼)는 성능 저하 없이 여러 주파수 대역에서 스펙트럼 방출을 분산하도록 특별히 설계된 디지털 알고리즘을 사용합니다.

목차

| | |
|-------------------------|---|
| 1 머리말..... | 2 |
| 2 확산 스펙트럼 검토..... | 3 |
| 2.1 확산 스펙트럼의 목적..... | 3 |
| 2.2 정의..... | 4 |
| 2.3 최적화와 절충점..... | 4 |
| 3 아날로그 및 의사 랜덤 기법..... | 5 |
| 3.1 적응형 랜덤 확산 스펙트럼..... | 5 |
| 3.2 듀얼 랜덤 확산 스펙트럼..... | 5 |
| 4 요약..... | 6 |
| 5 참고 문헌..... | 6 |
| 6 개정 내역..... | 7 |

상표

모든 상표는 해당 소유권자의 자산입니다.

1 머리말

확산 스펙트럼 기법(또는 "디더링")은 수년 동안 다양한 용도로 사용되어 왔으며, 무선 및 유선 통신 목적으로도 사용되고 있습니다. 스위칭 레귤레이터의 맥락에서 확산 스펙트럼은 기본 스위칭 주파수와 고조파에서 모두 고정 주파수 스위칭에 의해 생성되는 EMI의 효과를 줄이는 데 사용할 수 있습니다[1]. 이 EMI는 방사 및 전도 방출의 형태로 나타날 수 있으며, 이 두 가지 모두에 대응하는 것이 중요합니다. 이 애플리케이션 노트에서는 관심 대상인 기본 주파수가 CISPR-25 전도 EMI 테스트 표준에 의해 제어되는 차량용 애플리케이션을 위한 확산 스펙트럼을 최적화하는 데 초점을 맞출 것입니다[2]. 그러나 여기서 설명하는 방법은 다른 테스트 표준에도 적용될 수 있습니다.

확산 스펙트럼을 최적화할 때 가장 큰 과제 중 하나는 대부분의 변조 방식이 한 대역에서 최고의 성능을 보이지만 다른 대역에서는 그렇지 않은 경우가 많기 때문에 여러 주파수 대역에서 잘 작동하는 솔루션을 찾는 것입니다[1]. 이는 산업 표준 EMI 테스트에서 서로 다른 주파수 대역에 대해 서로 다른 스펙트럼 분석기 RBW 설정이 필요하고 RBW가 디더링 성능에 상당한 영향을 미치기 때문입니다[3]. 이 애플리케이션 노트에서는 자동차 전도 EMI 테스트에 사용되는 높은(120kHz)고 낮은(9kHz) CISPR-25 RBW에서 모두 우수한 성능을 발휘하는 새로운 디지털 확산 스펙트럼 방식인 DRSS를 소개합니다[4]. 이 방식은 각각 전류 모드, 프로그래밍 가능 주파수, 비동기식, 부스트/SEPIC/플라이백 컨트롤러 및 컨버터인 LM5156x(-Q1) 및 LM5157x(-Q1)에서 모두 사용됩니다.

확산 스펙트럼을 최적화할 때 직면하는 절충안은 f_c , Δf_c , f_m 과 같은 일반적인 확산 스펙트럼 설계 매개변수와 RBW 필터의 시간 영역 영향에 대한 논의를 사용하여 검토합니다. 애플리케이션 노트는 주로 현재 기술과 확산 스펙트럼 이론을 검토하는 데 중점을 둡니다. 그렇게 하는 이유는 DRSS의 가치는 균형을 이루어야 하는 절충점들에 대한 철저한 이해를 바탕으로 볼 때 가장 확실히 알 수 있기 때문입니다.

2 확산 스펙트럼 검토

2.1 확산 스펙트럼의 목적

확산 스펙트럼의 기본 원리는 협대역 신호를 광대역 신호로 변환하여 EMI의 영향을 줄이는 것이며, 그렇게 하면 에너지가 여러 주파수에 걸쳐 확산됩니다. 스위칭 레귤레이터의 경우 스위칭 주파수를 설정하는 오실레이터를 조작하여 이 작업을 수행할 수 있으며, 대부분의 스위치 모드 전원 공급 장치 토폴로지(벅, 부스트 등)에 대해 수행할 수 있습니다. 에너지를 보존하려면 총 에너지가 일정하게 유지되어야 하지만 이 에너지를 여러 주파수 대역에 분산하면 피크 에너지가 최소화됩니다. 결과적으로 근처의 민감한 회로('피간섭원')에서 간섭에 의해 교란이 줄어듭니다. **그림 2-1**은 일정 시간에 걸쳐 클럭 주파수를 조작하는 것이 스위처에 의해 생성되는 에너지를 확산시키는 효과를 갖는지 보여줍니다.

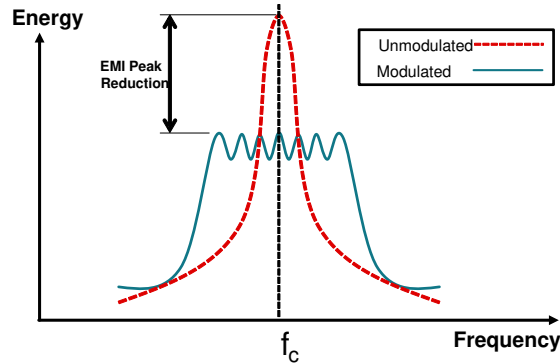


그림 2-1. 확산 스펙트럼, 주파수 및 변조에 의한 EMI의 감소

2.2 정의

확산 스펙트럼을 달성하기 위해 주파수 변조를 사용하는 것은 신호가 반송파 주파수의 변조를 통해 전송되는 FM 라디오 송신의 경우와 유사합니다. 확산 스펙트럼에서는 전송되는 신호는 없지만 양쪽 모두 공통적인 용어를 사용합니다.

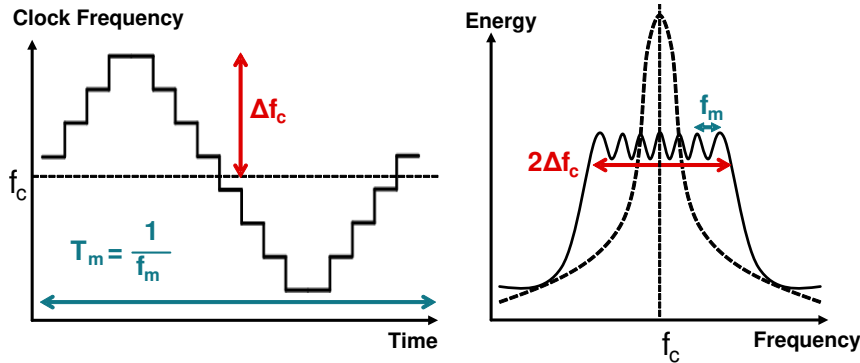


그림 2-2. 시간(좌)과 주파수 영역(우)에서의 삼각 변조

그림 2-2(좌)는 클럭 주파수를 시간의 함수 그래프로 표시한 삼각 형태 확산 스펙트럼의 예시이며, 그림 2-2(우)은 기본 주파수의 결과 스펙트럼 그래프입니다. 시간 영역은 변조 파형의 1개 주기를 나타내며, 여기서 f_c 는 미변조 오실레이터 주파수(반송파), f_m 은 변조 주파수, 그리고 Δf_c 는 스위칭 주파수가 f_c 에서 벗어난 거리를 나타냅니다. 그림 2-2(좌)에 보이는 파형이 불연속 형태이기는 하지만 반드시 디지털 디더링을 의미하는 것은 아니라는 점을 염두에 두어야 합니다. 스위칭 레귤레이터의 클럭 주파수는 스위칭 주기 1회당 한 번만 업데이트될 수 있기 때문에 주파수 대 시간 파형은 변조 방법에 관계 없이 반드시 이산 형태를 가져야 합니다. 삼각 변조 프로파일은 여러 다양한 아날로그 디더 프로파일 중 하나이기는 하지만 생성 용이성과 성능 때문에 상당히 흔합니다[1]. 따라서 본 애플리케이션 노트에서는 다른 유형의 아날로그 디더 프로파일은 분석하지 않습니다.

2.3 최적화와 절충점

확산 스펙트럼을 최적화할 때 가장 중요한 요소는 $\Delta f_c/f_m$ 으로 정의되는 변조 지수 m 입니다[3]. 일반적으로 이 숫자가 클수록 기본 주파수에서 에너지 감소가 더 효과적으로 이루어집니다. Δf_c 를 증가시키면 추가 주파수에 걸쳐 에너지가 확산되고, f_m 을 감소시키면 카슨(Carson)의 대역폭 내에서 추가 주파수 성분인 $2\Delta f_c$ 를 제공하여 기본 주파수에서 에너지가 감소합니다[1]. 그러나, Δf_c 및 f_m 에는 모두 한계가 있습니다. Δf_c 의 경우 시간 영역과 주파수 영역에서 모두 제약 조건이 있습니다. 시간 영역에서 큰 Δf_c 는 출력 리플을 증가시킬 수 있으며 인덕터 전류 리플에서 큰 변동을 초래할 수 있습니다. 주파수 영역에서 Δf_c 가 지나치게 크면 바람직하지 않은 대역으로 에너지를 확산시키기 시작할 수 있습니다.

수학적 관점에서 f_m 을 줄이면 항상 에너지 감소로 이어져야 합니다. 그러나 RBW 필터의 시간 기반 효과로 인해 추가적인 제약 조건이 있습니다. RBW 필터의 안정화 시간은 필터의 대역폭에 대해 역수입니다[3]. 이 필터가 정착되도록 허용되면 스펙트럼 분석기의 피크 검출기가 변조되지 않은 신호와 동일한 에너지를 감지합니다. 반면, RBW 필터의 안정화 시간 대비 매우 빠르게 변조하는 경우 반응할 기회를 주지 않으며, 피크 에너지가 감소되는 것이 허용되지 않습니다. 다시 말해, 변조가 유용하기에는 필터의 대역폭 외부에서 충분한 시간이 소비되지 않습니다. 그림 2-3은 이러한 개념을 설명하는 것으로, RBW 필터 진입과 지출 시 모두 존재하는 한정된 안정화 시간을 보여줍니다. 이러한 제약 조건 때문에 f_m 은 이론적 관점에서 더 작은 f_m 이 선호된다는 사실에도 불구하고 일반적으로 RBW와 거의 동일하게 선택됩니다. 이론적 관점과 시간 기반 필터 관점 모두에서 변조 주파수를 분석하는 것이 확산 스펙트럼 최적화의 열쇠입니다.

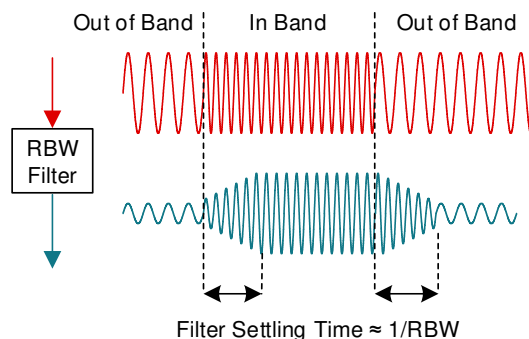


그림 2-3. RBW 필터의 안정화 시간 효과

확산 스펙트럼/디더링으로 달성할 수 있는 최상의 성능은 시스템 주파수(f_c)가 감소함에 따라 감소한다는 점에 유의해야 합니다. 이는 단순히 저주파에서 Δf_c 가 시스템 제약에 의해 제한되고 확산 스펙트럼 피크 감소가 $10\log(RBW/2\Delta f_c)$ 보다 나올 수 없기 때문입니다[3].

3 아날로그 및 의사 랜덤 기법

삼각 아날로그 디더는 9kHz RBW 요구 사항을 갖는 150kHz~30MHz 범위 내 CISPR-25 대역에서 양호한 성능을 보이는 흔히 사용되는 접근법입니다[4]. 넓은 Δf_c 를 쉽게 달성할 수 있고 f_m 을 대략 RBW와 동등하게 설정할 수 있어 여기서 양호한 성능을 보입니다. 아쉽게도, 이 주파수는 가청 범위 내에 존재하기 때문에 아날로그 디더링이 들리지 않게 하려면 주의해야 합니다. 120kHz RBW 요구 사항을 갖는 더 높은 30MHz~108MHz 범위 내 대역에서의 성능은 변조 주파수가 9kHz로 유지되는 경우 최적이지 않습니다. 120kHz RBW 요구 사항을 갖는 더 높은 주파수 대역의 경우[4] 흔히 사용되는 솔루션은 의사 랜덤 확산 스펙트럼(PRSS)을 사용하는 것입니다[1]. 이 변조 방식에서는 주파수가 매번 스위칭 주기에서 의사 랜덤으로 변경되어 120kHz RBW에 더 가까운 빠른 변조를 생성합니다. 의사 랜덤 시퀀스가 매우 드물게 반복되기 때문에 이론적 관점에서 f_m 은 크게 감소하여 EMI와 가청 성능이 모두 향상됩니다. PRSS가 높은 RBW에서는 상당히 우수한 성능을 보이지만 RBW 필터를 떠나 있는 시간이 충분히 길지 않는 빠른 변조로 인해 상대적으로 낮은 RBW에서는 페널티를 수반합니다. 둘째, 출력 리플과 관련된 문제로 Δf_c 는 반드시 작게 유지해야 합니다. 이는 스텝 크기 제한으로 완화할 수 있으나 랜덤 분포를 변경하면 성능이 저하됩니다.

3.1 적응형 랜덤 확산 스펙트럼

최근에 새로 개발된 디지털 확산 스펙트럼 기술은 적응형 랜덤 확산 스펙트럼(ARSS)이라고 하는 기법입니다. ARSS의 기본 원리는 변조 주파수 f_m 를 각 램프 종결 시점에 무작위로 변경하는 것입니다. 그렇게 하는 이유는 고정 주파수에서 디더링에 수반되는 가청음을 줄이기 위한 것입니다. 그림 3-1은(는) 스펙트럼 분석기에서 전도 방출량을 살펴보았을 때 10kHz 음이 어떻게 감소 및 확산되었는지 보여줍니다. 램에서 가청음 감소를 정성적으로 관찰했으나 정량적으로 측정하지는 않았습니다. 기본 주파수에서 성능은 아날로그 디더와 비슷한 수준입니다. RBW에 없는 음이 RBW 관점에서는 성능을 저하시키지만, 이는 의사 랜덤 시퀀스의 매우 낮은 기간에 발생하는 이론적 성능을 향상시키는 것으로 상쇄됩니다.

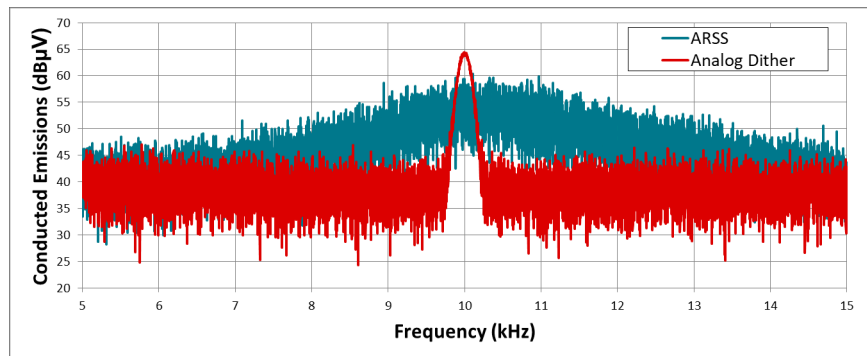


그림 3-1. ARSS는 10kHz 음을 확산시켜 가청 소음을 개선합니다

아쉽게도 스텝 크기가 한정적인 디지털 삼각 변조 방식에서는 고주파에서 대가를 지불하게 됩니다. 오실레이터 주파수 변동이 디지털 방식으로 구현되기 때문에 스위치는 다수 사이클에 걸쳐 동일한 주파수에서 작동할 수 있습니다. 높은 RBW에서 이는 여러 대역에 걸쳐 주파수를 확산시키면서 느리게 움직이는 변조라는 시간 기반 효과를 갖지만 피크 에너지를 감소시키지 않는 데, 이는 확산 스펙트럼의 목표에 반하는 것입니다.

3.2 듀얼 랜덤 확산 스펙트럼

높은 RBW에서 ARSS에 발생하는 문제를 해결하는 방법은 삼각 프로파일 위에 의사 랜덤 주기별 디더링을 추가하는 것입니다. 이러한 의사 랜덤 변조는 120kHz RBW에서 충분히 빠른 속도의 변조를 제공해 고주파 성능을 개선합니다. 저주파와 저 RBW에서 삼각 변조의 포락선은 여전히 ARSS의 낮은 f_m 에 따른 이점을 제공할 수 있습니다. 낮은 RBW와 높은 RBW 간의 절충점은 양쪽을 동시에 해결함으로써 제거됩니다. 그림 3-2은 이것이 시간 영역에서 어떻게 구현되는지 보여줍니다. RBW는 시간 영역에서 윈도우 함수로 표시되며, 이는 주파수 빈 크기가 윈도우 크기에 따라 정해지는 이산 푸리에 변환 이론과 일치됩니다.

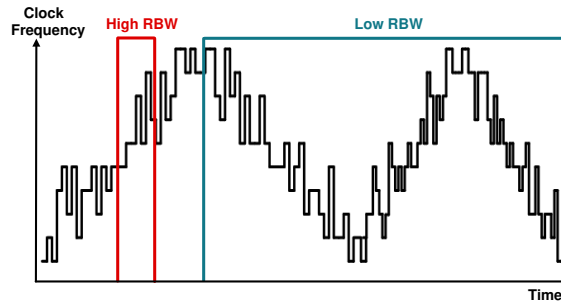


그림 3-2. DRSS의 시간 영역 구현

그림 3-3는 DRSS를 활성화하기 전과 후에 2.2MHz에서 작동하는 LM5156 사용 비동기 부스트 컨버터의 전도 방출을 나타냅니다. 30MHz에서 불연속성은 RBW가 9kHz에서 120kHz로 변경된 데 따른 것입니다. CISPR-25 저주파 대역에서 DRSS는 10~15dB의 피크 감소를 보입니다. CISPR-25 고주파 대역에서 DRSS는 5~7dB의 피크 감소를 보입니다.

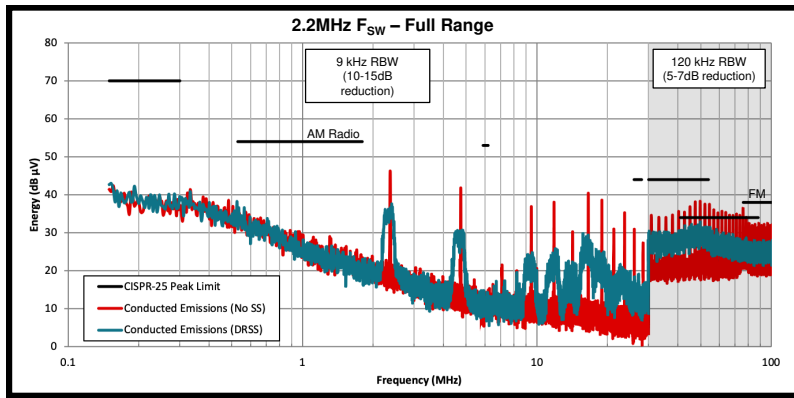


그림 3-3. DRSS에 의한 전도 EMI 감소(LM5156, 2.2MHz에서 스위칭)

LM5156에서 DRSS는 Δf_c 값 $f_c \times 5.5\%$, Δf_{PRSS} 값 $f_c \times 2.3\%$, 그리고 10kHz부터 16kHz 사이에서 랜덤화된 f_m 을 사용해 구현합니다. 이러한 값들은 시간 영역에서 피크 EMI 감소와 레귤레이터 성능 간에 적절한 균형이 이루어지도록 선택한 것입니다. 출력 리플은 스위칭 레귤레이터에서 중요한 관상 사항인 만큼, DRSS를 포함해 확산 스펙트럼 방법을 구현할 때는 반드시 주의를 기울여야 합니다. 전류 모드 레귤레이터에서 오실레이터 주파수에 반비례하는 방식으로 기울기 보상 램프를 변조하는 방법으로 출력 리플을 크게 향상시킬 수 있습니다. 이는 인덕터가 에너지를 공급하는 시간을 조작하는 확산 스펙트럼 변조에 무관하게 평균 인덕터 전류를 유지하는 효과를 갖습니다.

4 요약

이 애플리케이션 노트에서는 확산 스펙트럼 이론, 기법 및 절충에 대한 연구와 더불어 다양한 분해능 대역폭의 다중 주파수 대역에서 스위칭 레귤레이터의 확산 스펙트럼 성능 개선을 위한 새로운 디지털 접근법을 소개합니다. 새로운 디지털 확산 스펙트럼 방식(DRSS)은 무작위로 변경되는 삼각 프로파일 상에 의사 랜덤 주기별 디터링을 더하는 방식으로 여러 주파수 대역에서 피크 EMI를 효과적으로 최소화합니다.

5 참고 문헌

- [1] Rice, John, Dirk Gehrke, and Mike Segal. "SwitchMode 전력 애플리케이션에서 잡음 확산 기법 및 그 효과에 대한 이해(Understanding Noise-Spreading Techniques and their Effects in SwitchMode Power Applications)" TI 전원 공급 장치 설계 세미나(Power Supply Design Seminar) SEM1800, 2008.
- [2] Timothy Hegarty. "DC-DC 컨버터에서 EMI에 대한 엔지니어 가이드(The Engineer's Guide To EMI In DC-DC Converters)(1부: 표준 요구 사항 및 측정 기법(Standards Requirements And Measurement Techniques))" How2Power Today, 2017년 12월.
- [3] Pareschi, F.; Rovatti, R.; Setti, G. "DC/DC 컨버터에서 확산 스펙트럼을 통한 EMI 감소: 첨단, 최적화 및 절충점 (EMI reduction via spread-spectrum in DC/DC converters: State of the art, optimization, and tradeoffs)" IEEE Access. 2015, 3, 2857 - 2874.
- [4] CISPR 25:2016, 4th edition(또는 EN 55025:2017), "차량, 선박 및 내연 엔진 - 전파 교란 특성 - 차량/선박 내 수신기 보호를 위한 측정 한도 및 방법(Vehicles, boats and internal combustion engines - Radio disturbance characteristics - Limits and methods of measurement for the protection of on-board receivers)."

6 개정 내역

Changes from Revision * (June 2020) to Revision A (November 2022)

Page

- 문서 전체에서 표, 그림 및 상호 참조에 대한 번호 매기기 형식이 업데이트되었습니다..... 1

IMPORTANT NOTICE AND DISCLAIMER

TI PROVIDES TECHNICAL AND RELIABILITY DATA (INCLUDING DATA SHEETS), 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 will 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](#) 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.

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

Mailing Address: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
Copyright © 2022, Texas Instruments Incorporated