

ANTSDR에서 PlutoSDR 펌웨어 및 IIO 오실로스코프를 이용한 AD9361 DC 오프셋 보정 활성화 및 검증을 위한 7단계 절차 가이드

섹션 1: 기초 환경 구성

모든 소프트웨어 정의 라디오(SDR) 플랫폼의 성공적인 운영은 올바르게 구성된 호스트 컴퓨터 환경에 달려 있습니다. 이 초기 단계에서는 ANTSDR과의 안정적인 통신 및 Analog Devices IIO 소프트웨어 제품군의 적절한 기능을 보장하기 위해 Windows 및 Linux 운영 체제에 대한 고유한 설치 경로를 다루며 필요한 소프트웨어 기반을 구축합니다.

1.1. IIO 에코시스템 개요

IIO(Industrial I/O) 프레임워크는 아날로그-디지털 변환기(ADC)와 디지털-아날로그 변환기(DAC)를 통합하는 장치에 대한 표준화된 인터페이스를 제공하도록 설계된 Linux 커널 하위 시스템입니다.¹ 이 프레임워크와의 사용자 공간 상호 작용의 핵심에는 libiio 라이브러리가 있습니다. 이 크로스 플랫폼 C 라이브러리는 로컬, 네트워크 또는 USB 연결을 통해 연결된 IIO 장치와 통신하기 위한 일반적이고 추상화된 API를 제공합니다.¹ 이 라이브러리를 기반으로 구축된 IIO 오실로스코프는 캡처된 데이터를 시각화하고 ANTSDR의 핵심인 AD9361 트랜시버와 같은 연결된 IIO 장치의 매개변수를 제어하기 위한 가상 계측기 패널 역할을 하는 강력한 GTK+ 그래픽 애플리케이션입니다.³

1.2. Windows 사용자를 위한 호스트 구성

Windows에서의 설정 프로세스는 최종 사용자를 위해 간소화되어 있으며, 사전 컴파일된 바이너리 및 설치 프로그램을 통해 사용 편의성을 우선시합니다.

1.2.1. 드라이버 설치

가장 중요하고 첫 번째 단계는 PlutoSDR-M2k USB 드라이버를 설치하는 것입니다. 이 드라이버 패키지는 Windows 운영 체제가 USB를 통해 연결될 때 ANTSDR 장치를 올바르게 인식하는 데 필수적입니다. 이를 통해 장치는 펌웨어 업데이트를 위한 대용량 저장 장치(Mass Storage Device)와 IP 기반 통신을 위한 가상 네트워크 어댑터(일반적으로 RNDIS 또는 ECM)로 동시에 나타날 수 있습니다.⁶

1.2.2. IIO 오실로스코프 설치

Windows용으로 Analog Devices는 IIO 오실로스코프 애플리케이션을 위한 사전 컴파일된 설치 프로그램을 제공합니다. 이 실행 파일은 공식 IIO 오실로스코프 GitHub 저장소의 "Releases" 섹션에서 직접 다운로드할 수 있습니다.⁵ 설치의 표준 마법사 기반 프로세스를 따릅니다. 이 접근 방식은

libiio 라이브러리, GTK+ 그래픽 런타임 및 FFTW 라이브러리를 포함한 모든 필요한 종속성을 단일의 편리한 설치로 패키징하므로 적극 권장됩니다. 네이티브 Windows 시스템에서 소스로부터 애플리케이션을 빌드하는 것은 공식적으로 지원되지 않으며, 일반적으로 Linux 환경 내에서 실행되는 복잡한 교차 컴파일 도구 체인이 필요합니다.⁸

1.3. Linux 사용자를 위한 호스트 구성 (Ubuntu/Debian 기반)

Linux 설정 경로는 더 큰 투명성과 제어 기능을 제공하여 개발자 및 고급 사용자에게 선호되는 환경입니다. 일반적으로 소스에서 필요한 도구를 컴파일하는 과정이 포함됩니다.

1.3.1. 필수 라이브러리

IIO 제품군을 컴파일하기 전에 여러 개발 라이브러리와 빌드 도구를 설치해야 합니다. 이는

시스템의 패키지 관리자를 사용하여 수행됩니다. Ubuntu와 같은 Debian 기반 시스템을 위한 포괄적인 명령어는 다음과 같습니다.

```
sudo apt-get install git build-essential cmake libiio-dev libglib2.0-dev libgtk2.0-dev  
libfftw3-dev libxml2-dev bison flex libavahi-client-dev libcurl4-openssl-dev
```

이 명령어는 핵심 빌드 시스템, libiio 자체, 그리고 IIO 오실로스코프가 의존하는 다양한 그래픽, 수학 및 네트워킹 라이브러리를 설치합니다.¹⁰

1.3.2. IIO 오실로스코프 빌드

Linux에서 IIO 오실로스코프를 설치하는 표준 방법은 최신 소스 코드에서 빌드하는 것입니다. 이를 통해 최신 기능과 버그 수정에 접근할 수 있습니다. 이 과정은 공식 `iio-oscilloscope git` 저장소를 복제하고 `cmake` 및 `make` 빌드 시스템을 사용하여 애플리케이션을 컴파일하는 것을 포함합니다.³ Windows 설치 프로그램보다 더 복잡하지만, 이 방법은 사용자 정의 및 디버깅을 위한 최대의 유연성을 제공합니다.

Windows 또는 Linux 호스트 환경 간의 선택은 사용자 의도의 근본적인 차이를 반영합니다. Windows 경로는 신속한 배포 및 애플리케이션 수준 사용에 최적화되어 있으며, 기본 복잡성을 추상화합니다. 반면 Linux 경로는 저수준 제어, 드라이버 또는 애플리케이션 수정 기능, 또는 PlutoSDR 펌웨어 자체의 네이티브 빌드 환경에 대한 접근이 필요한 개발자에게 맞춰져 있습니다.¹⁰ 장기적인 개발 목표를 가진 사용자는 처음부터 Linux 환경을 고려해야 합니다.

섹션 2: ANTSDR 펌웨어 준비 및 설치 (PlutoSDR v0.39)

이 단계는 프로세스에서 가장 중요하고 하드웨어에 특화된 부분입니다. ANTSDR 장치는 PlutoSDR 펌웨어와 호환되지만 직접적인 복제품은 아니며, E200, E310과 같은 다른 변형으로 제공되며 각각 고유한 펌웨어 플래싱 절차를 가집니다.¹⁴ 하드웨어 모델을 정확하게 식별하고 해당 업데이트 방법을 적용하는 것은 장치를 작동 불능 상태로 만들지 않기 위해 가장 중요합니다.

2.1. 대상 펌웨어 획득

공식 Analog Devices PlutoSDR 펌웨어는 공개 GitHub 저장소에서 유지 관리됩니다.¹¹ 이 절차의 대상 버전인 v0.39는 이 저장소의 "Releases" 섹션에서 찾아 다운로드할 수 있습니다. 릴리스는

일반적으로

plutosdr-fw-v0.39.zip이라는 ZIP 아카이브로 배포됩니다.¹⁶

이 특정 펌웨어 버전은 Linux 5.15.0 커널을 사용하고 Xilinx Vivado 2022.2 도구 체인으로 빌드되었다는 점에서 주목할 만합니다.¹⁶ 또한 이전 v0.38 릴리스에는 없었던 중요한 타이밍 수정 사항을 포함하고 있어 정말 측정 애플리케이션에 중요할 수 있습니다.¹⁷ 아카이브를 추출한 후, 이 절차에서 가장 중요한 파일은 간단한 대용량 저장 장치 업데이트 방법을 위해 설계된 주 펌웨어 이미지인

pluto.frm입니다.¹¹

2.2. 하드웨어 식별: ANTSDR E200 대 E310

진행하기 전에 사용자는 ANTSDR을 물리적으로 검사하여 모델 번호를 확인해야 합니다. 이것이 올바른 플래싱 절차를 선택하기 위한 주요 결정 지점입니다. ANTSDR E310 및 E200 모델에는 주요 물리적 차이점이 있습니다. 특히 E310은 전용 푸시 버튼과 USB OTG 포트를 통해 DFU(Device Firmware Upgrade) 모드를 지원하지만, 이 기능은 일반적으로 SD 카드 또는 사전 플래시된 QSPI 부팅 방법에 더 의존하는 E200에는 없습니다.¹⁰

2.3. 플래싱 절차 (방법 선택)

펌웨어 플래싱 프로세스는 단순한 소프트웨어 업데이트가 아니라 장치의 U-Boot 부트로더 및 종종 물리적 하드웨어 점퍼에 의해 제어되는 부팅 모드 구성과의 직접적인 상호 작용입니다. 이는 부트로더의 동작이 소프트웨어를 로드하기 전에 물리적 설정에 의해 결정된다는 것을 의미합니다. 이 하드웨어-소프트웨어 연결은 표준 ADALM-PLUTO 장치와의 주요 차이점이며 업데이트 프로세스 중에 존중되어야 합니다. 따라서 모든 문제 해결에는 소프트웨어 단계와 물리적 점퍼 구성을 모두 확인하는 것이 포함되어야 합니다.¹⁰

다음 표는 사용 가능한 방법을 요약한 것입니다.

방법	적용 가능한 ANTSDR 모델	호스트 PC 요구 사항	절차 요약	복잡성/위험
대용량 저장 장치	기존 Pluto 호환 QSPI	표준 USB 포트	USB를 통해 연결하고,	낮음

에뮬레이션	펌웨어가 있는 E200/E310		pluto.frm을 드라이브로 드래그한 다음, OS를 사용하여 드라이브를 안전하게 꺼냅니다.	
SD 카드 부팅	E200/E310	SD 카드 리더, 펌웨어 빌드 환경	SD 카드 이미지(make sdimg)를 빌드하고, 부팅 파일을 포맷된 SD 카드로 복사한 다음, 부팅 점퍼를 "SD"로 설정합니다.	중간
DFU 업데이트	E310 / E316 전용	dfu-util 도구 설치, USB OTG 포트	부팅 점퍼를 "Flash"로 설정하고, 전원을 켤 때 DFU 버튼을 누른 다음, 호스트 PC에서 dfu-util 명령을 실행합니다.	높음

2.3.1. 방법 A: 대용량 저장 장치 업데이트

이것은 표준 ADALM-PLUTO 업데이트 절차와 유사한 가장 간단하고 일반적인 방법입니다.

1. 기본 데이터 USB 포트를 사용하여 ANTSDR을 호스트 PC에 연결합니다. 장치가 자동으로 마운트되어 이동식 대용량 저장 드라이브로 나타나야 합니다.¹⁴
2. v0.39 펌웨어 zip에서 추출한 pluto.frm 파일을 이 드라이브의 루트 디렉터리로 드래그 앤 드롭합니다.¹⁹
3. 중요하게, 운영 체제의 "꺼내기" 또는 "하드웨어 안전하게 제거" 기능을 사용하여

드라이브를 마운트 해제합니다. 이 단계에서 **USB** 케이블을 물리적으로 뽑지 마십시오. 이 소프트웨어 꺼내기 신호는 장치가 펌웨어 업데이트를 시작하도록 하는 트리거입니다.²⁰

4. 성공적으로 꺼내면 장치의 **LED1**이 빠르게 깜박이기 시작해야 합니다. 이는 새 펌웨어가 내부 **QSPI** 플래시 메모리에 기록되고 있음을 나타냅니다. 이 과정은 약 1분 정도 소요되며, 깜박임이 멈추고 장치가 자동으로 재부팅되면 완료됩니다.¹⁹

2.3.2. 방법 B: SD 카드 부팅 이미지

이 방법은 장치가 SD 카드에서 부팅하도록 구성되었거나 대용량 저장 장치 방법이 실패한 경우에 사용됩니다.

1. 이를 위해서는 전체 PlutoSDR 펌웨어 빌드 시스템이 구성된 **Linux** 환경이 필요합니다.
2. 펌웨어 소스 디렉터리에서 **make sdimg** 명령을 실행합니다. 이렇게 하면 **build_sdimg** 폴더에 **BOOT.bin**, **ulmage**, **devicetree.dtb**와 같은 부팅 파일 모음이 생성됩니다.¹⁰
3. 이 출력 폴더의 모든 파일을 **FAT32**로 포맷된 **microSD** 카드의 루트에 복사합니다.
4. **ANTSDR PCB**에서 부팅 모드 선택 점퍼를 찾아 "**SD**" 위치로 설정합니다.¹³
5. **microSD** 카드를 삽입하고 장치의 전원을 켭니다. 이제 **SD** 카드의 **v0.39** 펌웨어를 사용하여 부팅됩니다.

2.3.3. 방법 C: DFU 모드 (ANTSDR E310 전용)

이것은 장치를 플래싱하거나 복구하기 위한 고급 방법입니다.

1. **ANTSDR E310**의 부팅 모드 점퍼를 "**Flash Boot**" 위치로 설정합니다.¹⁰
2. **USB** 케이블을 **OTG** 포트에 연결합니다. 장치의 전원을 켜 다음, 장치의 **LED**가 녹색으로 켜질 때까지 "**DFU**" 버튼을 즉시 길게 누릅니다.¹⁰
3. 호스트 **PC**에서 **dfu-util** 명령줄 도구를 사용하여 필요한 펌웨어 구성 요소를 플래싱합니다. 특정 명령어는 다음과 유사합니다.

```
sudo dfu-util -a firmware.dfu -D./ant.dfu  
sudo dfu-util -a boot.dfu -D./boot.dfu
```

정확한 파일 이름(**ant.dfu**, **boot.dfu**)은 펌웨어 컴파일 과정에서 생성됩니다.¹⁰

섹션 3: 하드웨어 및 소프트웨어 상호 연결 검증

펌웨어를 성공적으로 설치한 후에는 호스트 컴퓨터가 ANTSDR의 임베디드 Linux 시스템 및 그 위에서 실행되는 IIO 데몬 서비스와 제대로 통신할 수 있는지 체계적이고 다층적인 검증을 수행하는 것이 필수적입니다. 이 구조화된 접근 방식은 물리적 계층에서 애플리케이션 계층까지 순차적으로 연결을 테스트하여 잠재적인 연결 문제를 정확하게 격리할 수 있는 강력한 진단 도구 역할을 합니다.

3.1. 계층 1: 물리적 및 네트워크 인터페이스 검증

먼저, 데이터 USB 포트를 통해 ANTSDR을 호스트 PC에 연결합니다. 호스트 운영 체제는 장치를 인식하고 새로운 가상 네트워크 인터페이스를 자동으로 구성해야 합니다. Windows 시스템에서는 일반적으로 네트워크 연결 패널에 "PlutoSDR" 또는 일반 RNDIS/ECM 이더넷 어댑터로 나타납니다. Linux 시스템에서는 보통 usb0 또는 유사한 인터페이스로 열거됩니다.

통신이 가능하려면 새로 생성된 이 인터페이스의 호스트 IP 주소가 ANTSDR과 동일한 서브넷에 있도록 구성해야 합니다. 기본적으로 PlutoSDR 펌웨어는 장치에 고정 IP 주소 192.168.2.1을 할당합니다. 따라서 호스트의 인터페이스는 192.168.2.10과 같은 호환 가능한 고정 IP 주소와 서브넷 마스크 255.255.255.0으로 수동 구성해야 합니다.¹⁹

3.2. 계층 2: IP 연결 테스트

네트워크 인터페이스가 구성되면 다음 단계는 기본 IP 수준 연결을 확인하는 것입니다. 호스트 컴퓨터에서 명령 프롬프트(Windows) 또는 터미널(Linux/macOS)을 열고 ANTSDR의 기본 IP 주소를 대상으로 ping 명령을 실행합니다.

ping 192.168.2.1

성공적인 테스트는 장치로부터 일련의 응답을 보여주며, 이는 호스트와 ANTSDR 모두의 네트워크 스택이 작동 중이고 네트워크 계층에서 유효한 양방향 통신 경로가 존재함을 확인합니다.⁶ 이 단계에서의 실패는 일반적으로 호스트의 잘못된 IP 주소 구성, 연결을 차단하는 방화벽 규칙 또는 네트워크 인터페이스가 올바르게 작동하지 못하게 하는 근본적인 드라이버 문제를 나타냅니다.

3.3. 계층 3: IIO 애플리케이션 계층 검증

성공적인 ping은 네트워크 연결을 확인하지만 필수 IIO 소프트웨어 서비스가 장치에서

올바르게 실행되고 있음을 보장하지는 않습니다. 결정적인 테스트는 IIO 클라이언트 애플리케이션을 사용하여 장치를 쿼리하는 것입니다. 명령줄 유틸리티 `iio_info`가 이 목적에 이상적입니다. 호스트 터미널에서 다음 명령을 실행하고 `-u` 플래그를 사용하여 대상 장치의 네트워크 URI를 지정합니다.

`iio_info -u ip:192.168.2.1`

성공적인 응답은 ANTSDR에서 실행되는 `iiod`(IIO 데몬)에 의해 감지된 모든 IIO 장치 및 해당 속성의 상세 목록이 될 것입니다. 이 목록에는 관련 채널 및 설정과 함께 `ad9361-phy` 장치가 눈에 띄게 포함되어야 합니다.¹² 이 출력은 임베디드 시스템에서

`iiod` 서비스가 활성 상태일 뿐만 아니라 호스트의 `libiio` 라이브러리가 원격 컨텍스트를 성공적으로 설정하고, 인증하고, 애플리케이션 수준 데이터를 교환할 수 있음을 확인합니다. 성공적인 `ping`에도 불구하고 이 단계에서 오류가 발생하면 ANTSDR 자체의 `iiod` 서비스에 문제가 있음을 강력하게 나타내며, 이는 손상된 펌웨어 설치 때문일 수 있습니다.

섹션 4: 기준선 분석: 보정되지 않은 DC 오프셋 정량화

보정 조치를 적용하기 전에 문제의 명확하고 반복 가능한 기준 측정을 설정하는 것이 필수적입니다. 이는 DC 오프셋 아티팩트의 가시성을 최대화하는 방식으로 수신기를 구성하여 정량적 특성화를 가능하게 합니다. 이 "이전" 스냅샷은 보정 메커니즘의 효과를 판단하는 기준이 될 것입니다.

4.1. 기준선 측정을 위한 물리적 설정

측정이 내부적으로 생성된 아티팩트만 캡처하고 외부 RF 신호에 의해 오염되지 않도록 하려면 수신기 입력을 적절하게 중단해야 합니다.

조치: ANTSDR의 주 RX 입력 포트(RX1 또는 유사한 레이블)에 50옴 종단기를 연결합니다. 보정된 종단기를 사용할 수 없는 경우, 이 특정 테스트에서는 포트에서 안테나를 분리하는 것만으로도 충분한 대안이 됩니다. 이는 강한 주변 신호가 수신기 체인에 들어오는 것을 방지하기 때문입니다.

4.2. IIO 오실로스코프로 실행 및 연결

호스트 컴퓨터에서 IIO 오실로스코프 애플리케이션을 실행합니다. 초기 연결 창에서 "Network" 컨텍스트 유형을 선택합니다. URI 필드에 ANTSDR의 IP 주소를 `ip: 접두사와 함께`

입력합니다(예: ip:192.168.2.1). "Connect" 버튼을 클릭한 다음 "Refresh"를 클릭합니다. 이제 AD9361 장치가 사용 가능한 하드웨어 목록에 나타나야 합니다.

4.3. 최대 아티팩트 가시성을 위한 수신기 구성

주 데이터 플로팅 창으로 이동합니다. 플롯 유형 드롭다운에서 "Frequency Domain"을 선택하여 수신된 신호의 고속 푸리에 변환(FFT)을 봅니다. 트랜시버의 핵심 매개변수를 직접 제어할 수 있는 "AD9361-PHY" 플러그인 탭에 액세스합니다.²⁴

- **RF 주파수(LO) 설정:** RX LO Frequency를 장치의 작동 범위 중심점(예: 1,000,000,000 Hz (1 GHz))으로 구성합니다.
- **샘플 속도 및 대역폭 설정:** 적당한 샘플 속도(예: 5 MSPS (5×10⁶ 샘플/초))를 선택하고 해당 RF Bandwidth를 3 MHz와 같은 값으로 설정합니다.
- **중요 단계 - 이득 제어:** 이것이 이 기준선 측정에서 가장 중요한 구성 단계입니다. Gain Mode 컨트롤을 찾아 기본값(fast_attack 또는 slow_attack)에서 manual로 변경합니다. 이 조치는 자동 이득 제어(AGC) 회로를 비활성화합니다.

AGC는 ADC 포화를 방지하기 위해 전체 신호 레벨을 관리하도록 설계된 AD9361 내의 별도 하위 시스템입니다.²⁶ 이는 큰 DC 오프셋 아티팩트를 강한 바람직하지 않은 신호로 해석하고 이를 완화하기 위해 수신기의 프런트엔드 이득을 자동으로 줄입니다. 이는 근본적인 문제의 실제 크기를 효과적으로 가릴 수 있습니다. AGC를 비활성화함으로써 우리는 의도적으로 이 자동화된 응답을 우회하여 감쇠되지 않은 전체 DC 오프셋을 정확하게 관찰하고 측정할 수 있습니다.

이득 모드를 manual로 설정한 상태에서 Hardware Gain (dB) 슬라이더를 사용하여 수신기 이득을 높입니다. 이득이 증가함에 따라 FFT 플롯의 정확한 중앙, 즉 0 Hz 주파수 오프셋에 해당하는 매우 크고 날카로운 스펙트럼 스파이크가 보이게 됩니다. 이 스파이크가 주변 잡음 플로어보다 최소 30~40 dB 이상 두드러질 때까지 이득을 계속 높입니다.

4.4. 기준선 데이터 캡처

수신기가 구성되면 플롯 창의 "Start" 버튼을 눌러 데이터 수집을 시작합니다.

1. FFT 플롯의 스크린샷을 캡처합니다. 이 시각적 기록은 0 Hz에서 지배적인 DC 스파이크를 명확하게 보여주어야 합니다.
2. 플롯의 측정 도구나 마커를 사용하여 DC 스파이크의 피크 진폭을 dBFS(데시벨 대 풀 스케일) 단위로 찾습니다.
3. 중앙 스파이크에서 떨어진 잡음 플로어의 평균 진폭을 측정합니다.

4. 이 두 값을 기록합니다. 이 값들은 시스템의 정상적인 "이전" 상태를 나타내며, 모든 개선 사항을 측정하는 기준이 됩니다.

섹션 5: DC 오프셋 보정 메커니즘 활성화 및 튜닝

이 섹션은 실험의 핵심을 이루며, IIO 오실로스코프 인터페이스를 사용하여 AD9361의 내장 하드웨어 보정 루틴을 활성화하고 튜닝하는 데 중점을 둡니다. 이 트랜시버의 DC 오프셋 보정은 단일 켜기/끄기 스위치가 아니라 신호 체인의 다른 부분에 대한 별개의 메커니즘을 포함하는 다각적인 프로세스라는 점을 이해하는 것이 중요합니다.

5.1. AD9361 고급 플러그인 탭으로 이동

트랜시버의 고급 제어는 IIO 오실로스코프 애플리케이션 내의 별도 디버그 창에 있습니다. ANTSDR이 연결된 상태에서 주 메뉴 표시줄로 이동하여 **View -> DMM/Debug Window**를 선택합니다. 연결된 모든 IIO 장치에 대한 일련의 탭이 포함된 새 창이 열립니다. **ad9361-phy** 장치에 해당하는 탭을 선택하여 고급 제어판에 액세스합니다.

5.2. 이중 메커니즘 보정 이해

AD9361과 같은 직접 변환(Zero-IF) 수신기 아키텍처에서 DC 오프셋 아티팩트는 두 가지 주요 소스에서 발생합니다. 첫 번째는 국부 발진기(LO) 주파수에 크게 의존하는 RF 프런트엔드 구성 요소(LNA, 믹서) 내의 LO 누설 및 자체 혼합입니다. 두 번째 소스는 후속 아날로그 기저대역 증폭기 및 필터의 작고 정적인 전압 불균형입니다. AD9361 트랜시버는 참조 설명서에 자세히 설명된 대로 이 두 소스를 모두 해결하기 위해 별도의 독립적인 보정 루틴을 제공합니다.²⁸

- **RF DC 보정:** 이 루틴은 RF 도메인에서 생성된 오프셋을 구체적으로 대상으로 하고 보정합니다.
- **기저대역(BB) DC 보정:** 이 루틴은 주로 이득 및 필터 설정에 의해 영향을 받는 아날로그 기저대역 도메인에서 생성된 오프셋을 보정합니다.

5.3. 원샷 보정 루틴 실행

고급 ad9361-phy 플러그인 탭 내에서 보정 또는 수정 전용 섹션을 찾습니다. 이 섹션은 하드웨어의 내부 내장 자체 테스트(BIST) 보정 알고리즘을 트리거하는 확인란을 제공합니다.

1. **BIST RF DC Offset**(또는 유사한 이름)이라는 확인란을 찾아 활성화합니다. 이 작업은 원샷 RF DC 오프셋 보정을 실행합니다. 이 보정은 초기화 중에 수행되어야 하며 LO 주파수가 상당한 양(일반적으로 > 100 MHz)으로 변경될 때마다 다시 실행해야 합니다.²⁸
2. **BIST BB DC Offset**이라는 확인란을 찾아 활성화합니다. 이것은 원샷 기저대역 DC 오프셋 보정을 실행합니다. 이 루틴은 일반적으로 초기 장치 구성 중에 한 번 실행됩니다.²⁸

5.4. 연속 추적 활성화 ("BaseBand Offset Tuning")

원샷 보정으로 초기 거친 오프셋이 제거된 후, 온도 변화와 같은 요인으로 인해 느리게 드리프트하는 오프셋을 보정하기 위해 연속 추적 메커니즘을 활성화할 수 있습니다. 이것이 사용자 쿼리에서 "BaseBand Offset Tuning"이라고 하는 기능입니다.

동일한 고급 설정 탭에서 **HW DC Offset Tracking** 또는 유사한 레이블이 붙은 드롭다운 메뉴나 확인란 세트와 같은 컨트롤을 찾습니다. RF 및 기저대역 도메인 모두에 대해 추적을 활성화합니다. 이러한 추적 루프는 디지털 고역 통과 필터 및 기타 알고리즘을 사용하여 신호 경로의 잔여 또는 드리프트 DC 구성 요소를 지속적으로 모니터링하고 무효화합니다.²⁸

GUI 컨트롤과 기본 기능 간의 관계를 명확히 하기 위해 다음 표를 참조로 사용합니다.

IIO 오실로스코프 컨트롤 (예상 레이블)	기본 기능 (UG-570 기준)	목적	사용 시기	유형
BIST RF DC Offset	RF DC 오프셋 보정	RF 프런트엔드에 서 LO 자체 혼합을 보정합니다.	초기화 시 및 LO 주파수 변경 > 100 MHz 후.	원샷
BIST BB DC Offset	기저대역 DC 오프셋 보정	아날로그 기저대역 필터 및 증폭기의 정적 오프셋을 보정합니다.	초기화 시.	원샷

HW DC Offset Tracking	RF/BB DC 오프셋 추적	동적 오프셋 변화(예: 온도로 인한)를 지속적으로 조정합니다.	연속 작동을 위해 초기 원샷 보정 후 활성화합니다.	연속
------------------------------	-----------------	------------------------------------	------------------------------	----

이러한 컨트롤을 순서대로—먼저 원샷 보정, 그 다음 연속 추적 활성화—적절하게 적용하는 것이 최적의 DC 오프셋 억제를 달성하는 열쇠입니다.

섹션 6: 검증 및 성능 평가

DC 오프셋 보정 메커니즘이 활성화되면 다음 단계는 섹션 4의 측정을 동일한 조건에서 반복하는 것입니다. 이는 보정 루틴의 효능을 검증하고 결과적인 성능 향상을 평가하기 위한 직접적이고 정량적인 비교를 제공합니다.

6.1. 신호 재캡처

IIO 오실로스코프의 주 FFT 플롯 창으로 돌아갑니다. 유효한 전후 비교를 위해 모든 수신기 설정이 기준선 측정에 사용된 것과 동일해야 합니다. RX LO Frequency, Sample Rate, RF Bandwidth, Gain Mode(여전히 manual로 설정됨) 및 Hardware Gain (dB) 값이 섹션 4와 정확히 동일한지 확인합니다. 확인되면 "Start" 버튼을 눌러 하드웨어 보정이 활성화된 상태에서 데이터 수집을 시작합니다.

6.2. 정성적 분석

검증의 첫 번째 수준은 FFT 플롯의 시각적 검사입니다. 이전에 0 Hz 중심 주파수에서 스펙트럼을 지배했던 크고 날카로운 스파이크는 이제 상당히 감쇠되거나 이상적으로는 완전히 사라져 주변 잡음 플로어와 구별할 수 없어야 합니다. 플롯의 새로운 "이후" 스크린샷을 캡처합니다. 이 스크린샷을 섹션 4의 "이전" 스크린샷과 나란히 놓으면 보정 효과를 극적으로 시각적으로 확인할 수 있습니다.

6.3. 정량적 분석

더 엄격한 평가에는 정량적 측정이 필요합니다.

1. 플롯의 마커를 사용하여 0 Hz 중심 주파수에서 새로운 피크 진폭을 측정합니다. 이 값은 기준선 측정보다 훨씬 낮아야 합니다.
2. 평균 잡음 플로어를 다시 측정합니다. 이 값은 이전과 거의 같아야 합니다.
3. 기록된 값을 사용하여 개선 정도를 계산합니다. 핵심 지표는 DC 오프셋 억제이며, 이는 아티팩트가 잡음 플로어에 비해 얼마나 감소했는지를 정량화합니다. 다음과 같이 계산할 수 있습니다.

$$\text{DC억제(dB)} = (\text{피크이전} - \text{잡음플로어이전}) - (\text{피크이후} - \text{잡음플로어이후})$$

이러한 온칩 보정으로 30dB에서 50dB의 억제 값을 달성하는 것이 일반적이며, 이는 수신기 성능의 상당한 향상을 나타냅니다.

그러나 진정한 성공의 척도는 단순히 아티팩트를 제거하는 것을 넘어섭니다. 주된 이점은 0 Hz 표시 및 그 주변에서 기본 수신기 잡음 플로어를 "드러내는" 것입니다. 이전에는 거대한 DC 스파이크가 통과 대역의 중앙에서 수신기를 효과적으로 가려 높은 국부적 잡음 플로어를 생성했습니다. 스파이크가 제거되면 수신기의 실제 열 잡음 플로어가 드러납니다. 이는 반송파 주파수에 매우 가까운 신호에 대한 사용 가능한 동적 범위 및 감도의 실질적인 향상으로 직접 이어집니다. 검증 프로세스는 원치 않는 신호를 제거하는 것을 확인하는 것뿐만 아니라 이전에 손실된 수신기 성능의 복구를 증명하는 것입니다.

섹션 7: 결과 해석 및 고급 고려 사항

이 절차의 마지막 단계는 실험 결과를 실용적이고 운영적 지식으로 종합하는 것입니다. 여기에는 성능 향상 분석, 보정이 유효하게 유지되는 조건 이해, 실제 애플리케이션에서 ANTSDR을 사용하기 위한 모범 사례 수립이 포함됩니다.

7.1. 달성된 보정 분석

섹션 6의 정량적 결과는 DC 오프셋 억제가 30-50dB임을 보여줄 가능성이 높습니다. 이는 Zero-IF(직접 변환) 애플리케이션의 실행 가능성에 직접적인 영향을 미치는 상당한 성능 향상입니다. 도플러 레이더, 특정 디지털 통신 방식 또는 CW 수신과 같은 시스템에서는 관심

신호가 DC에 있거나 매우 가깝습니다. 효과적인 오프셋 보정 없이는 원하는 신호가 내부 아티팩트에 완전히 묻힐 것입니다. 성공적인 보정은 이러한 신호의 수신을 가능하게 합니다.

7.2. 보정 지속성 및 무효화

원샷 루틴에 의해 생성된 보정 데이터는 모든 작동 조건에서 보편적으로 유효하지 않습니다. 최적의 성능을 유지하려면 재보정이 필요한 시점을 이해하는 것이 중요합니다.

- 주파수 호핑: RF DC 오프셋 보정은 LO 주파수에 크게 의존합니다. AD9361 참조 설명서 및 관련 문서는 애플리케이션이 LO 주파수를 100 MHz 이상 변경해야 하는 경우, 새로운 주파수 대역에 대한 새로운 보정 값을 계산하기 위해 RF DC 보정 루틴(BIST RF DC Offset)을 다시 실행해야 한다고 명시적으로 언급합니다.²⁸ 연속 추적 알고리즘은 느린 드리프트를 처리하도록 설계되었으며, 크고 즉각적인 주파수 변경을 처리하도록 설계되지 않았습니다.
- 이득 및 필터 변경: 기저대역 DC 오프셋은 주로 아날로그 기저대역 필터 및 증폭기의 설정에 따라 달라집니다. RF Bandwidth 또는 기타 필터 관련 매개변수가 크게 변경되면 최적의 성능을 보장하기 위해 BB DC 오프셋의 재보정이 필요할 수 있습니다.²⁸
- 온도: 일부 소스는 초기 보정이 온도 변화에 강하다고 제안하지만, 아날로그 구성 요소의 특성이 온도로 인해 필연적으로 드리프트하기 때문에 고성능 애플리케이션에서는 종종 그렇지 않습니다.²⁹ 연속 HW DC Offset Tracking 기능은 이러한 느린 열 드리프트를 완화하도록 특별히 설계되었으므로 장치가 온도 변동을 겪을 모든 애플리케이션에 사용하는 것이 적극 권장됩니다.²⁸

보정 루틴은 단순히 일회성 "수정"이 아니라 트랜시버의 상태 관리의 기본 구성 요소입니다. 최적의 성능은 보정 상태가 트랜시버의 작동 상태(LO 주파수, 이득, 필터 설정)와 동기화될 때만 달성됩니다.

7.3. 모범 사례 및 권장 사항

이러한 이해를 바탕으로 다음과 같은 모범 사례를 권장합니다.

1. 정적 주파수 애플리케이션의 경우: 단일 고정 반송파 주파수에서 작동하는 애플리케이션의 경우 장치 초기화 중에 전체 원샷 보정 시퀀스(BB DC 오프셋, 그 다음 RF DC 오프셋)를 수행합니다. 그 후 장기적인 안정성을 위해 연속 추적 메커니즘을 활성화합니다.
2. 주파수 민첩 애플리케이션의 경우: 스펙트럼 스캐닝 또는 주파수 호핑을 포함하는 애플리케이션의 경우 보정 프로세스를 애플리케이션의 제어 논리에 통합해야 합니다.

호스트 소프트웨어는 100 MHz 임계값을 초과하는 주파수 변경이 발생할 때마다 새로운 RF DC 오프셋 보정을 자동으로 트리거하도록 프로그래밍되어야 합니다. 이를 위해서는 IIO 오실로스코프와 같은 수동 GUI를 넘어 장치의 프로그래밍 방식 제어로 전환해야 합니다.

3. 프로그래밍 방식 제어: 모든 고급 애플리케이션의 경우 libiio 라이브러리를 통한 프로그래밍 방식 제어가 필수적입니다. pyadi-iio 래퍼가 있는 Python 또는 C/C++와 같은 언어를 사용하면 개발자가 이러한 중요한 보정 및 상태 관리 작업을 스크립트로 작성하여 트랜시버가 항상 최적의 상태에서 작동하도록 보장할 수 있습니다.⁶

이 7단계 프로세스를 완료함으로써 사용자는 기본 설정에서 AD9361의 내부 보정 메커니즘에 대한 미묘한 이해로 발전했습니다. 이 지식은 수동 GUI 기반 검증에서 자동화된 고성능 SDR 애플리케이션 개발로 나아가는 기반을 제공합니다.

참고 자료

1. the libIIO documentation, 9월 25, 2025에 액세스, <https://analogdevicesinc.github.io/libiio/v0.21/index.html>
2. the libIIO documentation, 9월 25, 2025에 액세스, <https://analogdevicesinc.github.io/libiio/v0.24/index.html>
3. A GTK+ based oscilloscope application for interfacing with various IIO devices - GitHub, 9월 25, 2025에 액세스, <https://github.com/analogdevicesinc/iio-oscilloscope>
4. Using the IIO Ecosystem — Precision Converters Firmware documentation - Repositories, 9월 25, 2025에 액세스, https://analogdevicesinc.github.io/precision-converters-firmware/source/tinyiiod/iio_ecosystem.html
5. Lab 2 - Getting Started on PlutoSDR - Codinghub, 9월 25, 2025에 액세스, <https://codinghub.sellfy.store/p/lab-2-getting-started-on-plutosdr/>
6. PlutoSDR in Python | PySDR: A Guide to SDR and DSP using Python, 9월 25, 2025에 액세스, <https://pysdr.org/content/pluto.html>
7. Releases · analogdevicesinc/iio-oscilloscope - GitHub, 9월 25, 2025에 액세스, <https://github.com/analogdevicesinc/iio-oscilloscope/releases>
8. Any IIO Oscilloscope Building Instructions for Windows Platform? - Q&A - EngineerZone, 9월 25, 2025에 액세스, <https://ez.analog.com/linux-software-drivers/f/q-a/162731/any-iio-oscilloscope-building-instructions-for-windows-platform>
9. IIO Oscilloscope make for Microsoft Windows - Q&A - EngineerZone - Analog Devices, 9월 25, 2025에 액세스, <https://ez.analog.com/sw-interface-tools/f/q-a/552873/iio-oscilloscope-make-for-microsoft-windows>
10. MicroPhase/antsdr-fw-patch: Repository of antsdr firmware ... - GitHub, 9월 25, 2025에 액세스, <https://github.com/MicroPhase/antsdr-fw-patch>
11. analogdevicesinc/plutosdr-fw - GitHub, 9월 25, 2025에 액세스, <https://github.com/analogdevicesinc/plutosdr-fw>
12. PlutoSDR Environment Setup on Linux as of 2022 | regymm's blog, 9월 25, 2025에

엑세스,

<https://www.ustcpetergu.com/MyBlog/experience/2022/01/13/plutosdr-setup.html>

13. bkerler/antsdr_new: Latest firmware for antsdr E310 based on PlutoSDR - GitHub, 9월 25, 2025에 액세스, https://github.com/bkerler/antsdr_new/
14. Installation - Maia SDR, 9월 25, 2025에 액세스, <https://maia-sdr.org/installation/>
15. Substituting a MicroPhase ANTSDR E200 for an Analog Devices Pluto, 9월 25, 2025에 액세스, <https://forums.radioreference.com/threads/substituting-a-microphase-antsdr-e200-for-an-analog-devices-pluto.492331/>
16. Releases · analogdevicesinc/plutosdr-fw - GitHub, 9월 25, 2025에 액세스, <https://github.com/analogdevicesinc/plutosdr-fw/releases>
17. Pluto firmware version v0.39 in new PhaserRadarLabs updated programs - EngineerZone, 9월 25, 2025에 액세스, <https://ez.analog.com/adieducation/university-program/f/q-a/588013/pluto-firmware-version-v0-39-in-new-phaseradarlabs-updated-programs>
18. Getting Started with AntSDR - Crowd Supply, 9월 25, 2025에 액세스, <https://www.crowdsupply.com/microphase-technology/antsdr-e200/updates/getting-started-with-antsdr>
19. OpenCPI Plutosdr Getting Started Guide, 9월 25, 2025에 액세스, https://opencpi.gitlab.io/releases/v2.3.4/docs/osp_plutosdr/Plutosdr_Getting_Started_Guide.pdf
20. Back to Basics with Pluto - BATC Forum, 9월 25, 2025에 액세스, <https://forum.batc.org.uk/viewtopic.php?t=8011>
21. Customizing the Pluto configuration [Analog Devices Wiki], 9월 25, 2025에 액세스, https://www.gods69.com/download/Pluto_SDR/Customizing%20the%20Pluto%20configuration%20%5BAnalog%20Devices%20Wiki%5D.pdf
22. ADALM-PLUTO firmware update fails - Q&A - Virtual Classroom for ADI University Program, 9월 25, 2025에 액세스, <https://ez.analog.com/adieducation/university-program/f/q-a/91484/adalm-pluto-firmware-update-fails>
23. How to Update the Firmware of Adalm Pluto - gpspatron, 9월 25, 2025에 액세스, <https://support.gpspatron.com/support/solutions/articles/101000536910-how-to-update-the-firmware-of-adalm-pluto>
24. jonkraft/PlutoSDR_Labs: Hands on labs for the ADALM Pluto SDR - GitHub, 9월 25, 2025에 액세스, https://github.com/jonkraft/PlutoSDR_Labs
25. FMCOMMS3 & IIO Scope introduction - YouTube, 9월 25, 2025에 액세스, <https://www.youtube.com/watch?v=LfCX8KOMNTg>
26. AD9361 | datasheet and product info RF Agile Transceiver - Analog Devices, 9월 25, 2025에 액세스, <https://www.analog.com/en/products/ad9361.html>
27. Data Sheet - AD9361 - Analog Devices, 9월 25, 2025에 액세스, <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad9361.pdf>
28. AD9361 Reference Manual (Rev. 0) - Analog Devices, 9월 25, 2025에 액세스, https://ez.analog.com/cfs-file/__key/telligent-evolution-components-attachments

[/00-441-00-00-00-07-91-97/AD9361_5F00_Reference_5F00_Manual_5F00_UG_2D00_570.pdf](#)

29. AD9361 DC offset calibration - Q&A - EngineerZone - Analog Devices, 9월 25, 2025에 액세스, <https://ez.analog.com/wide-band-rf-transceivers/design-support/f/q-a/80494/ad9361-dc-offset-calibration>
30. AD9361 Setup and Interfacing - Ian P. Roberts, 9월 25, 2025에 액세스, <https://ianproberts.com/notes/ad9361setup.html>
31. Enable Dual Receive and Dual Transmit for the new revision of Pluto - YouTube, 9월 25, 2025에 액세스, <https://www.youtube.com/watch?v=ph0Kv4SgSul>