

# 고속 USB 아이솔레이터의 이퀄라이저 설정을 이용해 채널 손실을 보 상합니다



Alfred Chong

## 추상

ISOUSB211DP 리피터는 리시버와 트랜스미터에 이퀄라이저가 내장되어 있습니다. 이 이퀄라이저는 자주 종속성을 보이는 PCB 트레이스 손실 특성에 의해 야기되는 ISI(상호 기호 간 간섭)를 줄임으로써 신호 무결성을 개선하는 데 중요한 역할을 합니다. 본 애플리케이션 노트에서는 PCB 트레이스 손실과 트랜스미터 프리엠퍼시스, 리시버 이퀄라이제이션에 대한 개괄적인 정보를 전달하고 ISOUSB211 프리엠퍼시스와 이퀄라이저를 사용해 보드 트레이스와 케이블 손실을 보상하는 방법을 설명합니다.

## 목차

1 PCB 트레이스 삽입 손실과 기호 간 간섭(ISI)	3
2 트랜스미터 프리엠퍼시스와 리시버 이퀄라이저	6
3 내 시스템에 맞는 최적의 프리엠퍼시스 선택하기	7
4 USB 2.0 근단 아이 마스크에 대한 9개 프리엠퍼시스 설정이 모두 있는 상태에서 6인치에서 4피트 트레이스에 대한 아이 다이어그램(Eye-Diagram)	8
5 USB 2.0 원단 아이 마스크에 대한 9개 프리엠퍼시스 설정이 모두 있는 상태에서 6인치에서 4피트 트레이스와 5m 케이블에 대한 아이 다이어그램(Eye-Diagram)	10
6 리시버 이퀄라이저와 트랜스미터 프리엠퍼시스를 동시에 이용한 채널 손실 보상	12
7 요약	13

## 그림

그림 1-1. 절연 리피터 vs. 리드라이버	3
그림 1-2. USB 2.0 리셉터클이 포함된 FR4 보드	3
그림 1-3. SMA 커넥터가 포함된 FR4 보드	3
그림 1-4. 차동 트레이스의 삽입 손실	4
그림 1-5. 이상적 및 실제 USB 2.0 파형	4
그림 1-6. 실행 길이가 긴 이상적 및 실제 USB 2.0 파형	4
그림 1-7. 6인치부터 4피트까지 트레이스에 대한 아이 다이어그램	5
그림 2-1. 보상됨, 실제 및 이상적 파형	6
그림 2-2. 보상됨, 실제 파형 및 실행 길이가 긴 이상적 파형	6
그림 2-3. ISOUSB211 트랜스미터 프리엠퍼시스 측정치	6
그림 3-1. NE 셋업 1	7
그림 3-2. NE 셋업 2	7
그림 4-1. NE TX_PE 6인치 트레이스	8
그림 4-2. NE TX_PE 1피트 트레이스	8
그림 4-3. NE TX_PE 2피트 트레이스	8
그림 4-4. NE TX_PR 3피트 트레이스	8
그림 4-5. NE TX_PE 4피트 트레이스	8
그림 4-6. NE TX_PE 6인치~4피트 트레이스를 위한 EH*EW 측정 기준 요약	8
그림 4-7. NE RX_EQ 6인치 트레이스	9
그림 4-8. NE RX_EQ 1피트 트레이스	9
그림 4-9. NE RX_EQ 2피트 트레이스	9
그림 4-10. NE RX_EQ 3피트 트레이스	9
그림 4-11. NE RX 4피트 트레이스	9
그림 4-12. NE RX_EQ 6인치~4피트 트레이스를 위한 EW 측정 기준 요약	9
그림 5-1. 원단 아이 측정 셋업	10
그림 5-2. FE TX_PE 6인치 + 5m	10

**상표**

그림 5-3. FE TX_PE 1피트 + 5m.....	10
그림 5-4. FE TX_PE 2피트 + 5m.....	10
그림 5-5. FE TX_PE 3피트 + 5m.....	10
그림 5-6. FE TX_PE 4피트 + 5m.....	11
그림 5-7. FE TX_PE 6인치~4피트 트레이스를 위한 EH*EW 측정 기준 요약.....	11
그림 6-1. RXEQ 및 RX PE를 이용한 트레이스 손실 보상.....	12

**상표**

모든 상표는 해당 소유권자의 자산입니다.

## 1 PCB 트레이스 삽입 손실과 기호 간 간섭(ISI)

리드라이버와 절연 리피터는 신호를 균등화하고 증폭함으로써 신호 무결성을 향상시키는 장치입니다. 두 장치 사이의 주요한 차이는 리드라이버의 경우 출력 파형이 이퀄라이제이션을 적용하지 않은 상태에서 입력 파형에 대해 선형적으로 비례하는 데 반해, 절연 리피터의 경우 입력 신호의 로직을 바탕으로 절연 강벽 전체에 걸쳐 새로운 신호 사본을 생성하는 디지털 절연기로 구성되어 있습니다. 리드라이버와 절연 리피터의 이퀄라이저에 의해 보상되지 않은 입력 지터는 트랜스미터 출력 시점에 반영됩니다. 절연 리피터에는 추가적인 온-오프 키잉 회로가 있기 때문에 절연 리피터의 전체 출력 지터는 절연 회로에서 생성되는 지터와 미보상 입력 지터의 RSS(제곱평균제곱근) 값입니다.

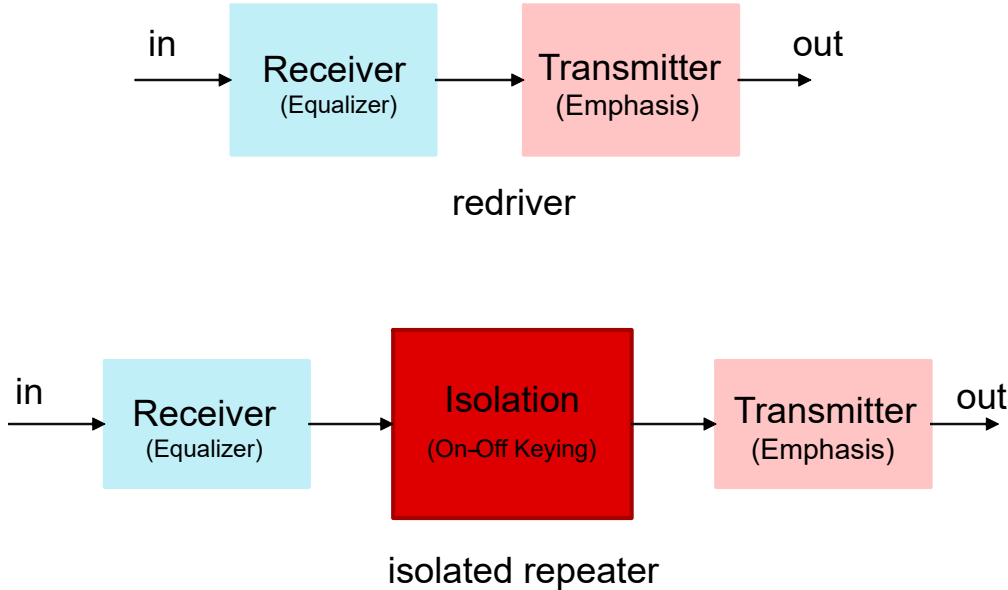


그림 1-1. 절연 리피터 vs. 리드라이버

그림 1-2은 5쌍의 차동 트레이스로 이루어진 PCB(인쇄회로기판)입니다. 이 트레이스들의 양쪽 끝에 배치된 USB 2.0 타입 A 부터 타입 B 리셉터클은 USB 케이블을 통해 이러한 트레이스들을 ISOUUSB211DPEVM에 연결합니다. 이러한 차동 트레이스들의 차동 임피던스(ZDiff)는 트랙 폭을 50밀, 트랙 간격을 9밀, 트랙 높이를 0.4밀, 절연 높이를 59.2밀, 그리고 유전 상수를 4.9로 설정함으로써 달성되는 90옴이 되도록 설계했습니다. 그림 1-3을 보면 이러한 차동 트레이스들의 삽입 손실을 측정할 수 있도록 VNA(벡터 네트워크 분석기)에 올바르게 연결하기 위해 USB 리셉터클을 SMA(서브미니어처 버전 A)로 교체했음을 알 수 있습니다.



그림 1-2. USB 2.0 리셉터클이 포함된 FR4 보드

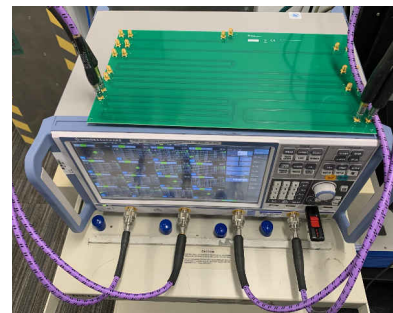


그림 1-3. SMA 커넥터가 포함된 FR4 보드

그림 1-4은 6인치부터 4피트까지 차동 트레이스 5개에 대해 측정된 차동 삽입 손실을 보여줍니다. 첫 번째 관찰된 사실은 트레이스 길이가 더 길수록 DC 손실이 더 크다는 것입니다. 두 번째 관찰된 사실은 PCB 트레이스의 삽입 손실값은 전송 빈도에 비례해 상승한다는 것입니다. 세 번째 관찰된 사실은 트레이스를 따라 임피던스 비연속성에 의해 곡선 상에 링잉이 발생한다는 것입니다. 일반적으로, DC 손실은 저항기 효과와 마찬가지로 신호 진폭의 감소를 초래합니다. 고주파수(작동 주파수)에서

발생하는 삽입 손실과 반사는 ISI(기호 간 간섭)를 초래하며, 그 결과 리시버의 드라이브 길이는 크게 감소하고 BER(비트 오류율)은 증가하게 됩니다.

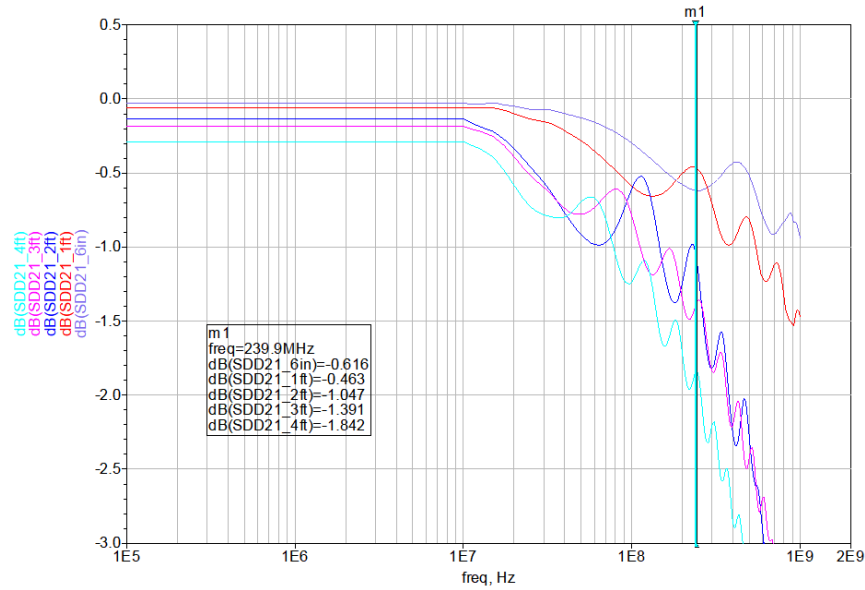


그림 1-4. 차동 트레이스의 삽입 손실

초전도체 같은 이상적인 전송 매체를 통해 이동하는 신호는 그림 1-5에 보이는 것처럼 일정한 기호 간격 내에서 전환을 완료합니다. 하지만 신호가 앞서 말한 것처럼 손실이 발생하는 백플레인을 통해 이동하는 경우 전환은 인접 간격으로 확장됩니다. 그 결과 신호는 클럭 패턴 같은 활발한 인자 데이터를 전송할 때 전환을 완료하기도 전에 반대편 레일로 전환될 수 밖에 없으며, 이러한 동작을 ISI라고 합니다. 그림 1-6은 최악의 경우는 실행 길이가 긴 여러 개의 0에 이어 1이 하나 따라오거나 그 반대의 경우로, 신호가 레일 중 하나에 도달할 만한 충분한 시간이 있지만 이로 인해 다음 반대 전환의 피크 전압이 최저가 되고 눈 높이를 직접적으로 감소시키게 되는 경우 발생한다는 것을 보여줍니다. 그림 1-7은 6인치, 1피트, 2피트, 3피트, 4피트까지 FR4 트레이스에 대한 아이 다이어그램에서 ISI의 영향을 보여줍니다. 눈 높이와 눈 너비는 손실이 발생하는 FR-4 트레이스의 삽입 손실에 비례해 줄어듭니다.

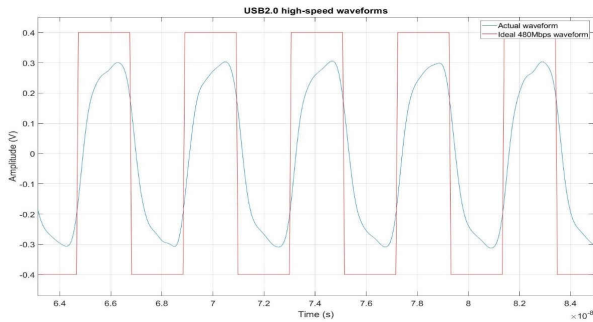


그림 1-5. 이상적 및 실제 USB 2.0 파형

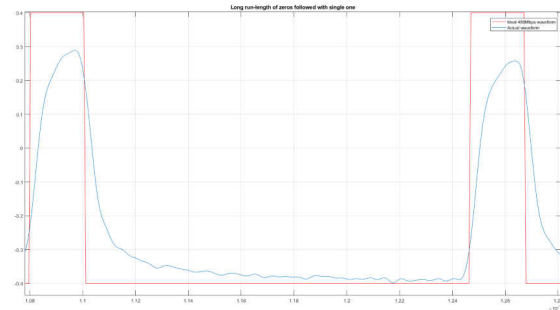


그림 1-6. 실행 길이가 긴 이상적 및 실제 USB 2.0 파형

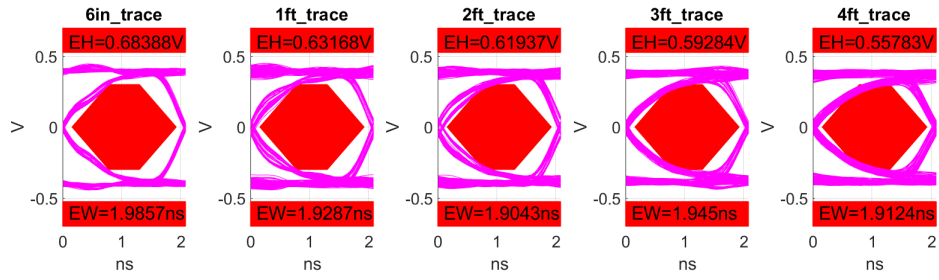


그림 1-7. 6인치부터 4피트까지 트레이스에 대한 아이 다이어그램

## 2 트랜스미터 프리엠퍼시스와 리시버 이퀄라이저

ISOUSB211 트랜스미터는 9개의 프로그래밍 가능한 프리엠퍼시스 설정으로 구성되어 있으며, 리시버는 CTLE(연속 시간 선형 이퀄라이저) 아키텍처로 구현한 9개의 프로그래밍 가능한 이퀄라이저 설정으로 구성되어 있습니다. 0.25 dB부터 4 dB 까지 240 MHz에서 피크를 이루는 1제로, 2폴 시스템을 사용해 이러한 9개의 프리엠퍼시스/이퀄라이저의 특성을 1차 근사치 까지 추정할 수 있습니다. CTLE는 저주파 신호는 변동 없이 그대로 유지하면서 240 MHz 주변의 고주파 신호를 증폭시킵니다. 프리엠퍼시스/이퀄라이저는 고주파 신호를 증폭시키며, 이는 상승과 하락 시간을 감소시키는 효과를 가져와 신호가 전원 레일에 더 가까워지고 **그림 2-1**와 **그림 2-2**에서 보드시피 기호 간격 내에서 전환을 완료할 수 있게끔 합니다.

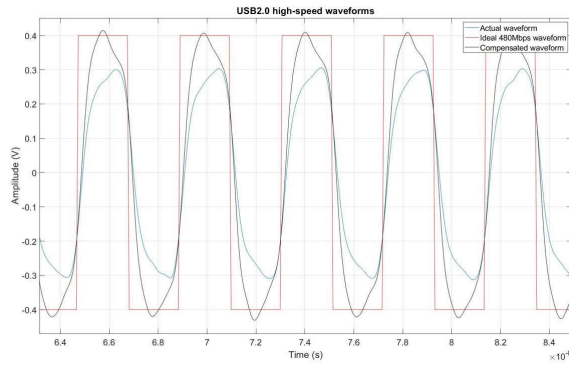


그림 2-1. 보상됨, 실제 및 이상적 파형

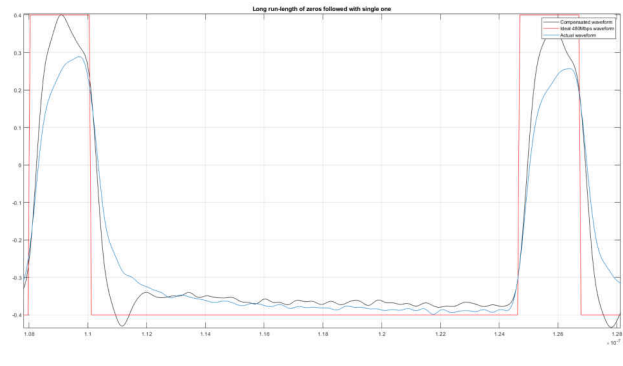


그림 2-2. 보상됨, 실제 파형 및 실행 길이가 긴 이상적 파형

**그림 2-3**은 1과 0으로 이루어진 긴 실행 길이의 데이터 패턴을 가진 9개의 ISOUSB211 트랜스미터 프리엠퍼시스의 시간 영역 파형입니다. 강조된 신호는 너비가 단일 비트(1/480 Mbps)로 고정되어 있고, 그 강도는 00부터 11까지 비례적으로 높아 집니다. 프리엠퍼시스 설정이 다양하기 때문에 트레이스와 케이블 손실을 보상하기에 가장 적합한 프리엠퍼시스 설정을 선택 할 수 있습니다.

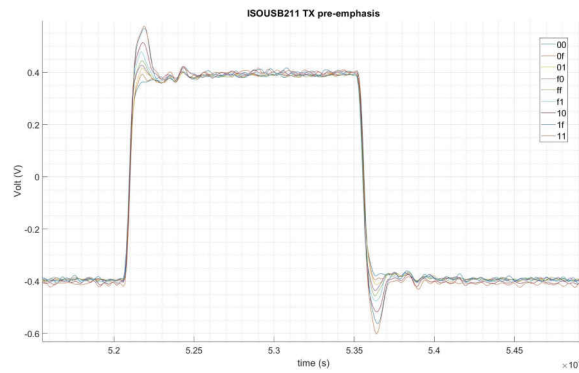


그림 2-3. ISOUSB211 트랜스미터 프리엠퍼시스 측정치

### 3 내 시스템에 맞는 최적의 프리엠퍼시스 선택하기

아이 다이어그램에서 EH(눈 높이)와 EW(눈 너비)는 인터페이스 시스템에서 신호 무결성을 계량화하는 데 사용되는 두 가지 측정 기준입니다. USB 2.0 표준에서는 USB 장치가 근단과 원단 아이 마스크를 준수할 것을 요구합니다. 따라서 시스템 트레이스 손실을 보상할 수 있는 최적의 프리엠퍼시스를 선택함으로써 USB 2.0 아이 마스크 요건에 부합하도록 눈 너비와 눈 높이를 개선할 수 있습니다. [그림 3-1](#)과 [그림 3-2](#)는 USB 2.0 근단 아이 마스크를 준수할 수 있도록 [그림 1-2](#)에서 보다시피 FR4 차동 트레이스의 삽입 손실에 따른 ISI를 감소시키기 위한 2개의 ISOUSB211 배치를 보여줍니다. 이러한 삽입 손실은 [그림 3-1](#)에서처럼 ISOUSB211의 업스트림에 트레이스를 배치하는 방법으로 트랜스미터 프리엠퍼시스를 사용해서, 또는 [그림 3-2](#)에서처럼 ISOUSB211의 다운스트림에 트레이스를 배치하는 방법으로 리시버 이퀄라이저를 사용해서 보상할 수 있습니다.

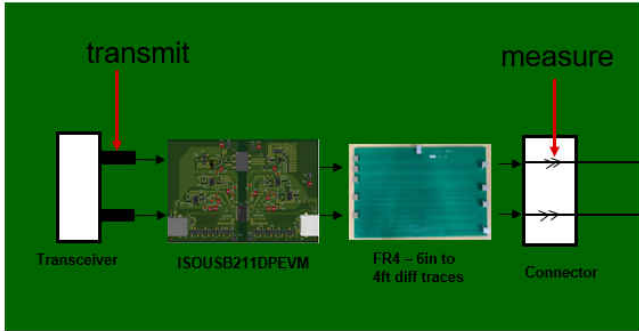


그림 3-1. NE 셋업 1

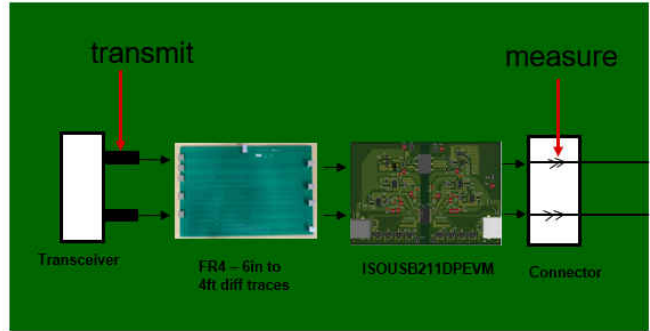


그림 3-2. NE 셋업 2



## 4 USB 2.0 근단 아이 마스크에 대한 9개 프리엠퍼시스 설정이 모두 있는 상태에서 6인치에서 4피트 트레이스에 대한 아이 다이어그램(Eye-Diagram)

그림 4-1부터 그림 4-6까지는 트레이스 손실을 보상하기 위해 트랜스미터 프리엠퍼시스를 사용하는 그림 3-1 셋업 상태의 아이 다이어그램 측정치입니다. 트랜시버와 ISOUSB211DPEVM 간의 손실은 무시할 수 있는 수준이어서 측정 내내 리시버 이퀄라이저는 00으로 설정했습니다. 각 그림에서 첫 번째 서브플롯은 ISOUSB211DPEVM을 포함하지 않고 측정된 FR-4 트레이스의 아이 다이어그램을 보여줍니다. 시스템이 트레이스 길이가 6인치인 상황에서도 근단 아이 마스크에 실패하는 것을 확인할 수 있습니다. 그림 4-6에서와 같이 트랜스미터 프리엠퍼시스 성능을 정당화하기 위해 EH에 EW를 곱한 값을 측정 기준으로 사용합니다.

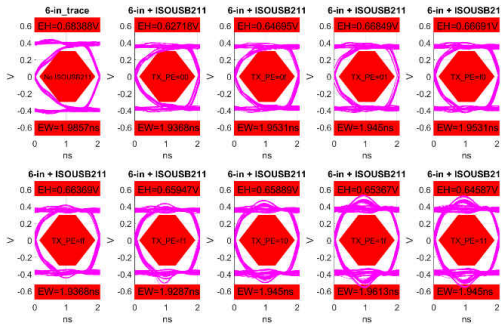


그림 4-1. NE TX\_PE 6인치 트레이스

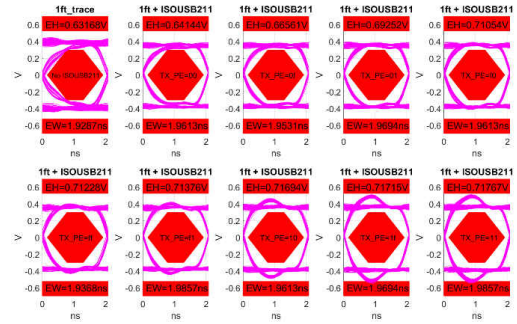


그림 4-2. NE TX\_PE 1피트 트레이스

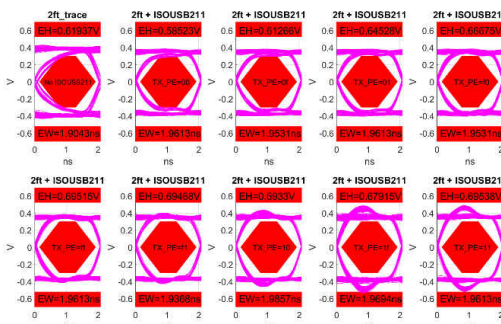


그림 4-3. NE TX\_PE 2피트 트레이스

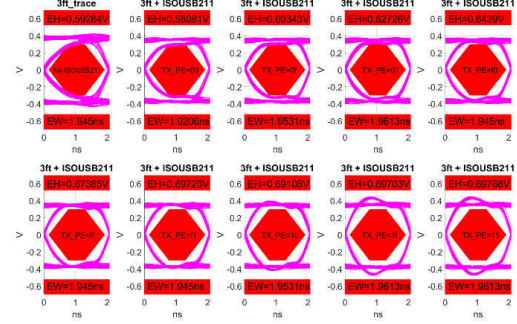


그림 4-4. NE TX\_PR 3피트 트레이스

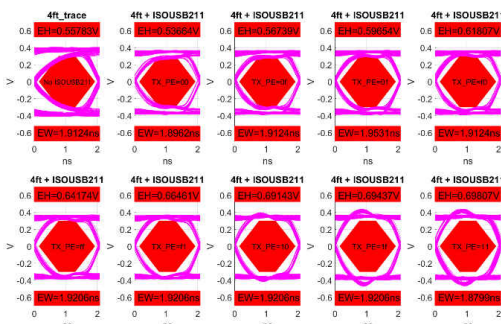


그림 4-5. NE TX\_PE 4피트 트레이스

	00	0f	01	f0	ff	f1	10	1f	11
6inch	1.2148	1.2636	1.3002	1.3026	1.2855	1.2719	1.2813	1.282	1.2562
1ft	1.25	1.3	1.3639	1.3936	1.9368	1.9857	1.9613	1.9694	1.9829
2ft	1.1478	1.1966	1.2656	1.3022	1.3694	1.3455	1.3767	1.3375	1.3638
3ft	1.1155	1.1786	1.2302	1.2524	1.3106	1.3561	1.3498	1.3671	1.3688
4ft	1.0176	1.0851	1.1653	1.182	1.2325	1.2764	1.3275	1.3336	1.312

fail = red, marginal = yellow, pass = green, optimal = blue

fail = EH and/or EW violate eye-mask  
 marginal = EH < 5mV or EW < 0.05UI from eye-mask  
 pass = meet eye-mask  
 optimal = best performance setting

그림 4-6. NE TX\_PE 6인치~4피트 트레이스를 위한 EH\*EW 측정 기준 요약

그림 4-7부터 그림 4-12까지는 트레이스 손실을 보상하기 위해 리시버 이퀄라이저를 사용하는 그림 3-2 셋업 상태의 아이 다이어그램 측정치입니다. 트랜스미터 프리엠퍼시스는 측정 내내 00으로 설정합니다. 언급했다시피, ISOUSB211 아이솔레이터 내 온-오프 키잉 회로는 입력 신호 로직을 바탕으로 새로운 신호 사본을 생성하기 때문에 이는 EH(눈 높이)를 측정하는 방식으로는 리시버 이퀄라이저 성능을 정당화할 수 없습니다. ISOUSB211의 출력 지터는 미보상 상태의 입력 지터와 온-오프 키잉 회로에서 생성되는 지터에서 나오는 가산 지터입니다. 그림 4-12에서 보듯이 더 넓은 EW(눈 폭) 또는 최저 지터를 보이는 아이 다이어그램을 바탕으로 각 트레이스 길이에 대해 최적의 리시버 이퀄라이저 설정을 정확하게 찾아낼 수 있습니다.



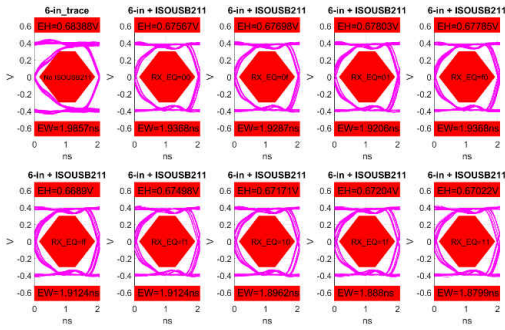


그림 4-7. NE RX\_EQ 6인치 트레이스

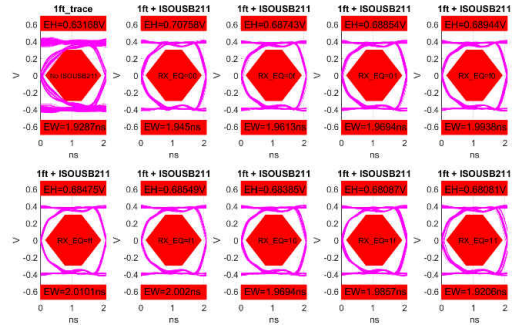


그림 4-8. NE RX\_EQ 1피트 트레이스

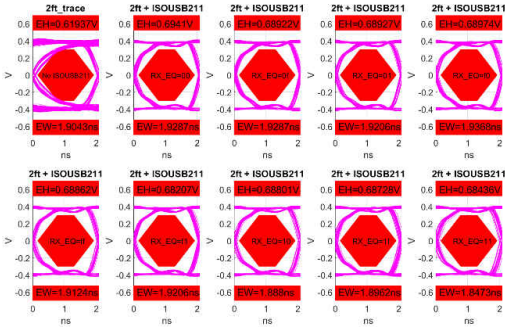


그림 4-9. NE RX\_EQ 2피트 트레이스

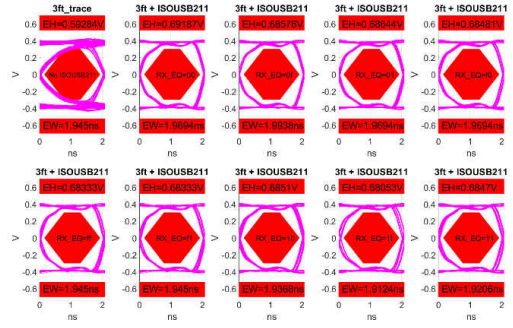


그림 4-10. NE RX\_EQ 3피트 트레이스

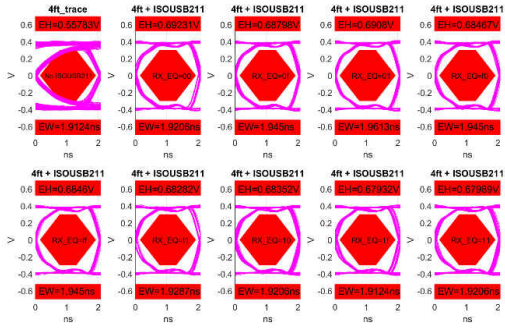


그림 4-11. NE RX 4피트 트레이스

	00	0f	01	f0	ff	f1	10	1f	11
6inch	1.9368	1.9287	1.9206	1.9368	1.9124	1.9124	1.8962	1.888	1.8799
1ft	1.945	1.9613	1.9694	1.9938	2.0101	2.002	1.9694	1.9657	1.9206
2ft	1.9287	1.9287	1.9206	1.9368	1.9124	1.9206	1.888	1.8962	1.8476
3ft	1.9694	1.9938	1.9694	1.9694	1.945	1.945	1.9368	1.9124	1.9206
4ft	1.9206	1.945	1.9613	1.945	1.945	1.9287	1.9206	1.9124	1.9206

fail marginal pass optimal

fail = EH and/or EW violate eye-mask  
 marginal = EH < 5mV or EW < 0.05UI from eye-mask  
 pass = meets eye-mask  
 optimal = best performance setting

그림 4-12. NE RX\_EQ 6인치~4피트 트레이스를 위한 EW 측정 기준 요약

## 5 USB 2.0 원단 아이 마스크에 대한 9개 프리엠퍼시스 설정이 모두 있는 상태에서 6인치에서 4피트 트레이스와 5m 케이블에 대한 아이 다이어그램(Eye-Diagram)

그림 5-1은 USB 2.0 표준에서 정하는 대로 원단 아이 마스크를 측정하는 셋업입니다. ISOUSB211은 트랜스미터 옆에 배치되어 있고, USB 리셉터클이 FR4 트레이스를 5m USB 케이블에 연결합니다. 여기서는 USB 2.0 표준에서 정하고 있는 최악의 경우 케이블 손실을 반영하기 위해 5m 길이 케이블을 사용했습니다. 신호는 5m 케이블의 반대편 끝에서 원단 아이 성능을 측정했습니다.

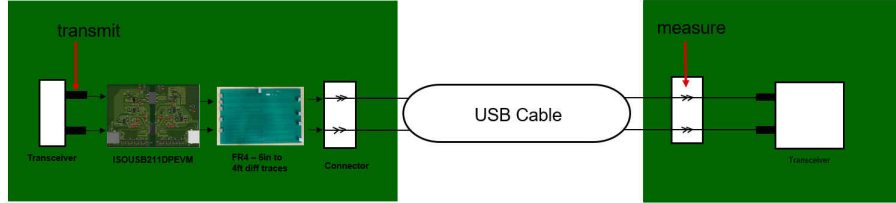


그림 5-1. 원단 아이 측정 셋업

그림 5-2부터 그림 5-7까지는 트레이스 및 케이블 손실을 보상하기 위해 트랜스미터 프리엠퍼시스를 사용하는 그림 5-1 셋업 상태의 아이 다이어그램 측정치입니다. 리시버 이퀄라이저는 측정 내내 00으로 설정합니다. 그림 5-7에서 보는 것처럼 트랜스미터 프리엠퍼시스 성능은 EW에 EH를 곱하는 방법으로 평가합니다.

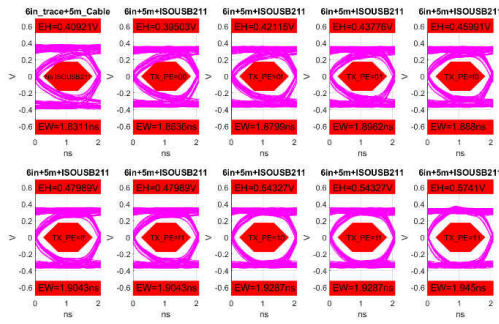


그림 5-2. FE TX\_PE 6인치 + 5m

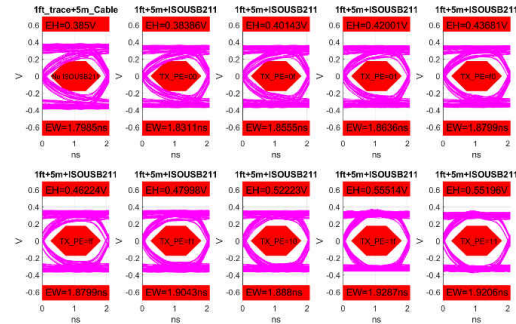


그림 5-3. FE TX\_PE 1피트 + 5m

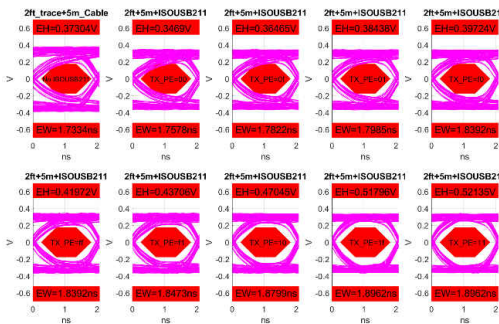


그림 5-4. FE TX\_PE 2피트 + 5m

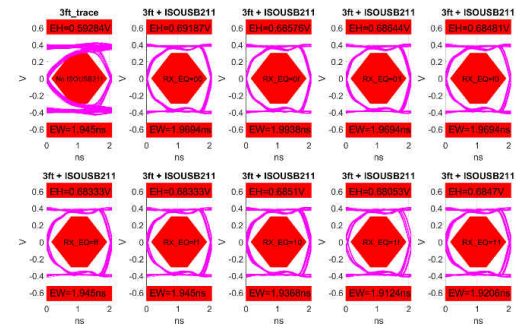


그림 5-5. FE TX\_PE 3피트 + 5m

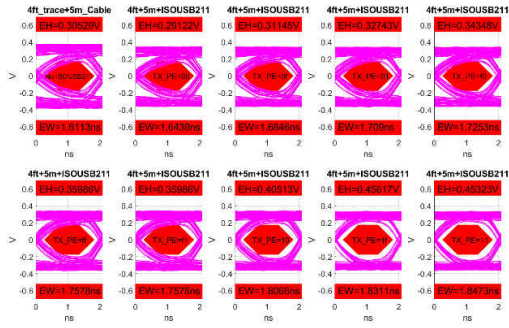


그림 5-6. FE TX\_PE 4피트 + 5m

	00	0f	01	f0	ff	f1	10	1f	11
6inch	0.7381	0.7917	0.83006	0.8686	0.91386	0.91386	1.0478	1.0478	1.1166
1ft	0.70288	0.7448	0.7827	0.82115	0.8689	0.914	0.9859	1.0707	1.0832
2ft	0.6097	0.6498	0.6913	0.7306	0.7719	0.8078	0.8843	0.9821	0.9885
3ft	0.577	0.618	0.6334	0.6802	0.7102	0.738	0.8188	0.929	0.9411
4ft	0.4787	0.5246	0.5595	0.59239	0.6325	0.63256	0.73192	0.8352	0.8372

fail marginal pass optimal

fail = EH and/or EW violate eye-mask  
marginal = EH < 5mV or EW < 0.05UI from eye-mask  
pass = meet eye-mask  
optimal = best performance setting

그림 5-7. FE TX\_PE 6인치~4피트 트레이스를 위한 EH\*EW 측정 기준 요약

## 6 리시버 이퀄라이저와 트랜스미터 프리엠퍼시스를 동시에 이용한 채널 손실 보상

앞 섹션에서 트레이스는 ISOUSB211 절연 리피터의 업스트림 또는 다운스트림에 위치해 있었습니다. 따라서 이 경우 트레이스 손실 보상을 위해 리시버 이퀄라이저 또는 트랜스미터 프리엠퍼시스를 사용합니다. 트레이스 차동 손실이 2 dB를 초과하는 시스템의 경우, 손실을 ISOUSB211의 업스트림과 다운스트림으로 분산시키고 트랜스미터 프리엠퍼시스와 리시버 이퀄라이저를 동시에 사용해 트레이스 손실을 보상하도록 합니다. **그림 6-1**에 보면 ISOUSB211EVM이 FR-4 트레이스들 사이에 위치해 있습니다. 이 셋업에서는 리시버 이퀄라이저와 트랜스미터 프리엠퍼시스가 동시에 작동해 전체 트레이스 손실을 보상합니다. 리시버 이퀄라이저는 업스트림 트레이스 손실을 보상하고, 트랜스미터 프리엠퍼시스는 다운스트림 트레이스 손실을 보상합니다.

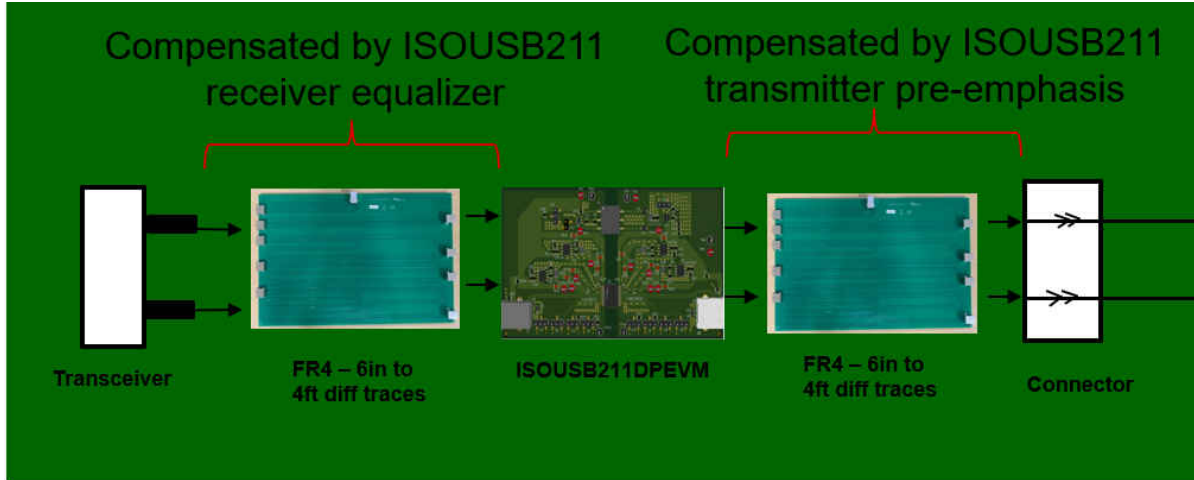


그림 6-1. RXEQ 및 RX PE를 이용한 트레이스 손실 보상

## 7 요약

ISOUSB211DP는 차동 트레이스와 케이블 손실을 보상해 시스템 신호 무결성을 향상시킬 수 있도록 9개의 트랜스미터 프리엠퍼시스 설정과 9개의 이퀄라이저 설정으로 구성되어 있습니다. ISI 문제가 있어 절연이 필요한 USB 2.0 시스템의 경우 ISOUSB211DP 이퀄라이저와 프리엠퍼시스를 사용해 EH와 EW를 향상시켜주면 USB 2.0 근단 아이 마스크와 원단 아이 마스크 요건을 충족할 수 있습니다. 실제로 ISOUSB211 트랜스미터 프리엠퍼시스와 리시버 이퀄라이저가 최대 4피트 길이까지 FR4 차동 트레이스, 또는 각각 2dB 차동 손실을 보상하는 것이 확인되었습니다. 손실이 더 높은 시스템의 경우, 손실을 트랜스미터와 리시버 측면으로 분산시켜 트랜스미터 프리엠퍼시스와 리시버 이퀄라이저가 더 높은 손실을 보상하도록 할 수 있습니다.

## 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](http://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