

디지털 비디오의 시작 - 3

지터 측정에 대한 이해 - I

시작하기 앞서

지난 시간 디지털 비디오 화상을 전송하려면 디지털 콘텐츠를 직렬 디지털 비디오 신호로 변환해야 하고 이렇게 변환된 SDI 신호의 기본 구성에 대하여 알아보았다. 이 SDI 신호의 Bit serial 특성인 Jitter에 대해서 조금 더 자세하게 알아보고자 Tektronix 비디오 입문서의 내용을 다시 한 번 발췌하여 설명함을 밝히며, 지면 관계상 2회에 나누어 지터에 대하여 서술하도록 하겠다.

시리얼 디지털 비디오 신호의 개념 및 지터

시간 간격 오류, 지터, 지터 파형, 지터 스펙트럼

SDI 신호에서 전이 간 시간 간격이 단위 간격의 정수배가 되는 것이 이상적이다. 하지만 실제 시스템에서는 SDI 신호에서의 전이가 얼마 지나지 않아 이상적인 위치와는 차이를 보이게 된다. 이런 편차를 TIE(time interval error, 시간 간격 오류)라고 하며 이를 보통 지터라 부르는데 이런 타이밍 편차는 다양한 주파수, 진폭 및 위상 관련 효과에 의해 생길 수 있다. 지터는 기본적으로 어떤 신호 전이에 있어서의 위상 편차, 즉 직렬 데이터 신호의 위상 변조로 생각할 수 있다.

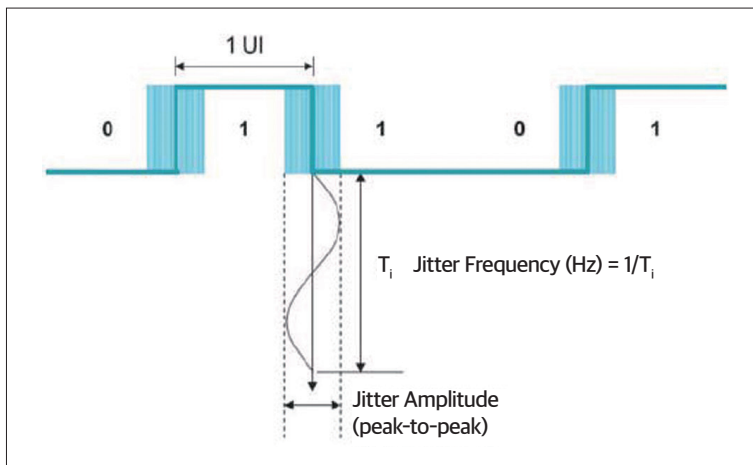


그림 1. 정현파 에지 편차가 있는 SDI 신호

간단한 예로, SDI 신호의 에지가 기준 클럭에 대한 이상적인 위치 주위에서 정현파 편차를 보인다고 가정하자. 기준 클럭에서 트리거된 오실로스코프에서 이 SDI 신호를 본 경우 실제 에지는 [그림 1]에 나타난 바와 같이 이상적인 위치 주위에 흐린 얼룩으로 나타난다. 이 간단한 정현파 지터는 편차 주파수와 첨두치(peak-to-peak) 진폭이라는 두 가지 파라미터로 완전히 정의할 수 있다. 실제 SDI 신호에는 이 예에서 보여준 단순한 정현파 특성이 거의 나타나지 않을 것이다. 실제 시스템에서는 매우 다양한 요인이 신호 전이 타이밍에 영향을 미치고 다양한 주파수 및 진폭에 편차를 일으킨다. 임의의 특정 에지가 이상적인 위치를 앞서거나 뒤서는 피크 양이 달라지고 큰 첨두치 편차가 있는 에지 간에 시간 간격이 길어진다. 지터 파형은 시간 함수로 나타낸 신호 전이의 편차량이고 지터 스펙트럼은 시간 영역 지터 파형을 주파수 영역에 나타낸 것이다. 실제 신호에서 지터 파형은 일반적으로 다양한 소스가 어우러진 복합적 효과에 의해 만들어진 복잡한 형태를 띠고 지터 스펙트럼에는 주파수와 진폭이 제각기 다른 다양한 스펙트럼 성분이 포함된다.

디코딩 오류, 표준화된 지터 진폭

디코딩 프로세스에서 SDI 수신기는 기준 클럭을 사용하여 입력 SDI 신호를 샘플링할 시기를 결정한다. 입력 SDI 신호에서의 전이가 적절한 클럭 에지에서 발생하고 샘플링은 단위간격의 중간 시점에서 발생하는 것이 이상적이다.

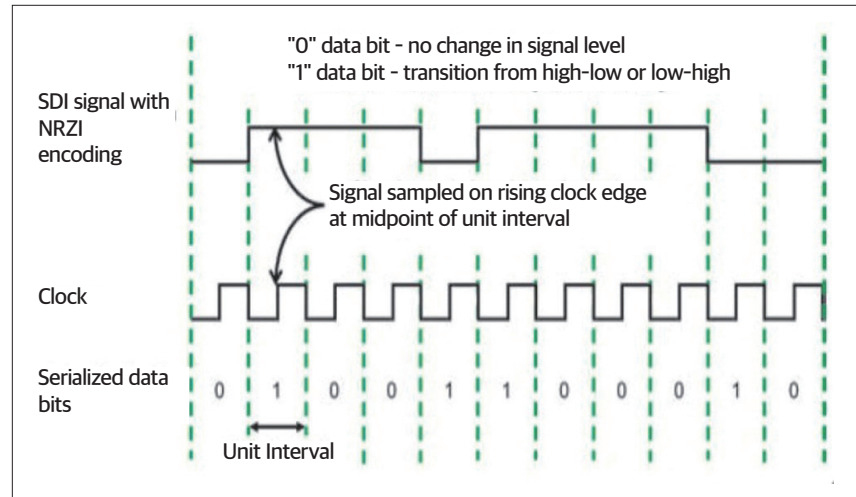


그림 2. 단위 간격과 인코딩

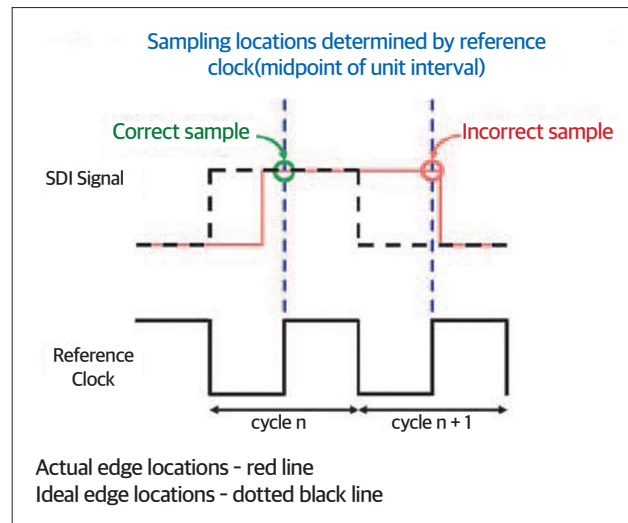


그림 3. 에지 위치에서의 큰 진폭 편차에 의한 디코딩 오류

[그림 2]에 나타난 이상적인 상황에서는 신호 전이가 클럭의 하강 에지에 맞춰지고 샘플링은 클럭의 상승 에지에서 발생한다. 하지만 실제 SDI 신호에는 에지에 얼마간의 지터가 있다. 따라서 진폭이 충분히 큰 지터가 샘플링 오류의 원인이 된다. [그림 3]은 이런 상황을 나타낸 것이다. 이 그림에는 n 과 $n+1$ 의 두 클럭 주기 중 2개의 비트 값을 인코딩하는 SDI 신호가 나타나 있다. 실제 상황에서는 샘플링 프로세스가 클럭 주기 n 에서는 높은 신호 값을, 클럭 주기 $n+1$ 에서는 낮은 신호 값을 캡처한다. 실제 신호에서는 전이가 기준 클럭에 대한 이상적 위치로부터 상당한 차이로 벌어진다. 클럭 주기 n 중에 실제 에지는 기준 클럭 주기의 $1/2$ 미만으로 변한다. 기준 클럭에 의해 결정되는 샘플링 시간에서 샘플링 프로세스는 이상적 상태에 있을 것이므로 높은 신호 값을 캡처한다. 하지만 클럭 주기 $n+1$ 중에 실제 전이는 기준 클럭에 대한 이상적 위치로부터 클럭 주기의 $1/2$ 이상으로 발생한다. 실제 에지는 기준 클럭에 의

해 결정되는 샘플링 시간 이후에 발생하므로 샘플링 프로세스는 이상적 상태에서 샘플링한 낮은 신호 값 대신 높은 신호 값을 캡처한다. 초 단위로 표현하는 경우 디코딩 오류를 발생시키는데 필요한 타이밍 편차량은 클럭 주기, 즉 단위 간격의 크기에 따라 다르다. 1.485Gb/s HD-SDI 신호의 경우 340ps의 편차는 단위 간격인 673ps의 1/2 이상이지만 270Mb/s SD-SDI 신호의 경우에는 같은 편차라도 이 신호의 단위 간격인 3.7ns의 1/10 미만이다. 특정 신호 데이터 전송률을 언급하지 않고 이런 타이밍 편차를 설명하기 위해 일반적으로 단위 간격을 사용하여 진폭을 표현한다. 이 표준화된 단위에서는 클럭 주기 $n+1$ 에 대해 [그림 3]에 나타난 편차가 0.5UI 보다 약간 높은 진폭 값을 가진다. 0.5UI의 진폭 값은 SD-SDI 신호에서는 1.85ns와 같고, HD-SDI 신호에서는 337ps와 같다.

원더, 타이밍 지터, 정렬 지터

앞서 설명한 예들에서는 지터가 없는 이상적인 기준 클럭, 즉 딱 맞는 시간에 이상적인 위치에서 모든 에지가 발생하는 클럭 신호에 관해 신호 전이의 위치에 발생하는 편차에 대해 설명했다. 하지만 디코딩에 사용되는 실제 기준 클럭에는 지터가 있다. 디코딩 프로세스에서는 일반적으로 수신된 SDI 신호로부터 추출되는 복구된 클럭을 사용한다. 클럭 복구 프로세스는 복구된 클럭을 입력 신호로 잠그고 클럭은 복구 프로세스의 대역폭 이내에 있는 입력 신호의 타이밍 편차를 따른다. 따라서 SDI 신호의 타이밍 편차는 복구된 클럭의 전이에 편차를 유발한다. 복구된 클럭의 전이는 디코더가 SDI 신호를 샘플링하는 시기를 결정하므로 복구된 클럭을 사용하면 저주파 편차와 관련된 디코딩 오류 수가 실제로 줄어든다. 샘플링 시간은 단위 간격 내의 정확한 위치에서 이들 편차와 샘플을 추적(Tracking)한다. 복구된 클럭은 편차 주파수가 클럭 추출 프로세스 대역폭 이상인 경우에는 신호 전이의 편차를 추적하지 않는다. 이런 높은 주파수에서는 신호 전이 위치가 복구된 클럭의 에지에 대해 변할 수 있고 이런 편차가 디코딩 오류를 발생시킬 수 있다. 실제 SDI 신호의 지터 스펙트럼에는 일반적으로 다양한 스펙트럼 성분이 있다. 복구된 클럭은 일반적으로 클럭 복구 대역폭 이하의 성분을 추적하지만 이 대역폭 이상의 스펙트럼 성분은 추적하지 않는다. 따라서 디코딩에 미치는 지터의 영향은 지터의 진폭과 지터의 주파수 성분 모두에 좌우된다. 이점으로 인해 주파수를 기반으로 지터를 분류할 수 있게 되었다.

관습적으로 “지터”라는 용어는 단기적인 시간 간격 오류, 즉 어떤 저주파 임계값 이상의 스펙트럼 성분을 가리키는 말이다. SDI 신호의 경우 SMPTE 표준에서는 이 한계값을 10Hz로 정하고 있으며 이 주파수 이상의 스펙트럼 성분을 타이밍 지터(Timing Jitter)라 한다. 원더(wander)라는 용어는 장기적인 시간 간격 오류를 지칭한다. SDI 신호의 경우 10Hz 미만의 지터 스펙트럼 성분을 원더로 분류한다. 비디오 장비는 일반적으로 이런 장기적 편차를 추적할 수 있으므로 이상적 위치에 대한 실제 에지 위치의 측면에서 원더를 특성화해서는 의미 있는 정보를 얻지 못한다. 그 대신 원더는 주파수 오프셋과 주파수 드리프트 레이트로 환산하여 계속된다. 정렬 지터(Alignment Jitter)란 클럭 복구 프로세스의 전형적인 대역폭과 관련하여 지정된 주파수 임계값 이상의 지터 스펙트럼 성분을 가리킨다. 즉 정렬 지터는 클럭 복구 프로세스에서 추적할 수 있는 스펙트럼 성분을 제외하는 타이밍 지터에 포함되는 부분 집합이다. 지정된 주파수 임계값은 SD-SDI 및 HD-SDI 신호에 대해 서로 다르며 관련 SMPTE 표준에 정의되어 있다. SD-SDI 신호의 경우 정렬 지터는 1kHz 이상의 스펙트럼 성분을 가리킨다. HD-SDI 신호의 경우 100kHz 이상의 스펙트럼 성분이 정렬 지터로 분류된다.

일부 장비가 어떤 저주파 정렬 지터를 추적할 수는 있겠지만 일반적으로 비디오 장비는 정렬 지터를 추적하지 않는다. 따라서 진폭이 높은 정렬 지터는 일반적으로 디코딩 오류를 유발한다. 비디오 장비는 원더와 저주파 타이밍 지터를 추적할 수 있으므로 이런 스펙트럼 성분들이 신호 디코딩에는 별로 영향을 주지 못하는 경우가 많다. 저주파 변동이 신호 디코딩에는 영향을 덜 주지만 다른 영역에는 상당히 큰 영향을 미칠 수 있다. 예를 들어 디지털-아날로그 변환 단계와 같은 다른 프로세스에서는 이런 복구된 클럭이나 이 클럭의 약수를 사용한다. 이 클럭은 입력 SDI 신호의 저주파 지터를 추적하므로 클럭 에지가 이상적인 위치와는 차이를 보인다. 클럭 신호의 이런 지터는 예컨대 디지털-아날로그 변환에 있어서의 비선형성과 같은 오류를 유발할 수 있다. 리클러킹 비디오 장비는 복구된 클럭을 사용하여 SDI 신호를 재생한다. 복구된 클럭은 정렬 지터를 잘 추적하지 않으므로 리클러킹으로 정렬 지터를 상당히 줄일 수

있다. 하지만 복구된 클럭은 이런 변동을 추적하므로 원더나 저주파 타이밍 지터는 크게 줄이지 못한다. 따라서 저주파 변동이 비디오 시스템을 통해 누적될 수 있다. 그래서 마침내는 클럭 복구 프로세스의 추적 기능이 감당할 수 없을 정도로 진폭이 커지게 되고, 바로 이 시점에 디코딩 오류가 나타나고 클럭 복구 하드웨어가 입력 신호에 대해 잠긴 상태를 유지하지 못하게 된다.

랜덤 지터, 결정성 지터

비디오 시스템에서 지터가 미치는 영향을 완벽히 이해하려면 지터의 진폭 및 스펙트럼 관련 정보 외에도 그 통계적 특성을 고려할 필요가 있다. 이런 특성을 특성화하여 모델링 하는데 흔히 사용되는 접근 방식에서는 두 가지 기본적인 지터 유형을 구분한다. 랜덤 지터는 본질적으로 식별 가능한 패턴을 가지지 않는다. 랜덤 지터를 특성화하는 가장 좋은 방법은 확률 분포와 평균 및 편차와 같은 통계적 특성을 이용하는 것이다. 결정성 지터는 보다 쉽게 예측 가능하며 종종 결정 가능한 침투치 크기와 함께 몇 가지 정의 가능한 주기적 패턴 또는 반복 가능한 패턴으로 특성화된다.

① 랜덤 지터

열 잡음(thermal)이나 산탄 잡음(shot noise)과 같은 랜덤 프로세스는 SDI 신호에 랜덤 지터를 끌어들이다. 일반적으로 가우시안 확률 분포를 이용하여 이런 지터 동작을 모델링하고 지터 진폭의 척도로 이런 분포의 표준 편차(RMS 값과 같음)를 사용할 수 있다. 하지만 침투치 지터 진폭과 RMS 지터 진폭은 같지 않다. 특히 침투치 진폭 값은 관찰 시간에 따라 다르다. 랜덤 지터를 모델링 하는데 사용되는 가우시안 분포에서는 예지 위치에서 작은 진폭 변동이 발생할 가능성이 가장 크지만 매우 큰 진폭 변동도 가끔 발생할 수 있다. 짧은 시간 동안 이루어진 진폭 기록에 큰 진폭 값이 포함될 수도 있겠지만 그렇지 않을 가능성이 크다. 반대로, 오랜 시간 동안 이루어진 진폭 기록에 큰 진폭 값이 포함되지 않을 수도 있겠지만 최소한 하나 정도는 있을 가능성이 크다. 따라서 평균적으로 긴 시간 동안 이루어진 침투치 진폭 계측 결과에는 짧은 시간 동안 이루어진 침투치 진폭 계측 결과보다 더 큰 값이 있으리라 예상해볼 수 있을 것이다. 가우시안 분포의 꼬리는 임의의 큰 진폭에 이를 수 있다. 따라서 충분히 긴 시간 간격에 걸쳐 관찰함으로써 이론적으로는 임의의 큰 침투치 지터 진폭을 계측할 수 있어야 할 것이다. 랜덤 지터는 무한정한 침투치 진폭을 가진다는 표현으로서 이런 특성을 설명한다. 기술적으로는 이런 설명이 랜덤 지터에 대한 수학적 모델에만 적용된다. 하지만 모든 실용적 목적을 위해 가우시안 분포는 실제 시스템에서 랜덤 지터를 적절히 모델링한다. 따라서 임의의 관심 영역에 대해 실제 SDI 신호의 랜덤 지터는 무한정한 침투치 진폭을 가지고 있다고 할 수 있다.

② 결정성 지터

다양한 소스로부터 SDI 신호에 결정성 지터가 유입될 수 있다. 예를 들면, 전원 장치를 켜거나 끌 때 발생하는 노이즈는 주기적인 결정성 지터를 일으킬 수 있고, 케이블이나 장치의 주파수 응답은 SDI 신호의 비트 시퀀스와 상관된 데이터 종속성 지터를 일으킬 수 있다. 또한, 전이의 상승 및 하강 시간 차이는 듀티 사이클 종속성 지터를 일으킬 수 있다. 이런 결정성 지터의 일반적 소스 외에도 SDI 신호에는 비디오 특성과 상관된 결정성 지터가 포함될 수 있다. 예를 들면 다음과 같다. 비디오 데이터의 라인 및 필드 구조는 래스터 종속성 지터라는 주기적 결정성 지터를 일으킬 수 있다. 디지털 비디오에 사용되는 10비트 워드와 직렬 비트 시퀀스 간의 변환으로 인해 일반적으로 워드 상관 지터라고 하는 클럭 속도의 1/10에서 발생하는 고주파 데이터 종속성 지터가 발생할 수 있다. 결정성 지터는 결정 가능한 시간 간격 내에서 최대 침투치 진폭을 달성한다. 이 시간 간격 이상으로 관찰 시간을 늘리더라도 침투치 지터 진폭 계측 결과는 증가하지 않는다. 랜덤 지터와는 달리, 반복 가능한 결정성 지터는 침투치 지터 진폭에 결정 가능한 상한이 있다. 결정성 지터에 가끔 장기적으로 결정 가능한 동작이 있을지라도 이 지터는 침투치 진폭을 제한해온 예측 가능한 패턴으로 적절히 모델링 될 수 있다. 따라서 모든 실용적인 목적을 위해 결정성 지터는 침투치 진폭을 제한해왔고 랜덤 지터는 침투치 지터 진폭을 제한하지 않았다.

심벌간 간섭, 균등화

실제 직렬 디지털 신호에서 한 전압 레벨에서 다른 전압 레벨로의 전이는 즉시 일어나지 않는다. 실제 직렬 디지털 신호의 상승 및 하강 시간은 유한하다. 또한 장치와 통신 채널의 주파수 종속적 응답은 이런 전이에서 일시적인 확산의 원인이 된다. 심벌간 간섭(InterSymbol Interference)은 초기 비트에서의 전이 확산이, 이후 비트의 전이에 영향을 미칠 때 발생한다. 이런 효과로 인해 전이가 그 이상적인 형태와 위치와 차이가 나게 된다. 다시 말해 ISI가 신호에 지터를 유발하게 된다. 특히, ISI는 크기가 장치와 채널의 주파수 응답과 신호의 데이터 패턴에 달려 있는 예측 가능하고 반복 가능한 지터를 만들어낸다. 따라서 ISI는 데이터 종속적인 결정성 지터를 만들어낸다. 특히, 1dB 이상의 케이블 감쇠는 상당한 심벌간 간섭을 일으킬 수 있다. 이 ISI로 인한 데이터 오류를 피하기 위해 일반적으로 수신기에는 케이블의 $1/\sqrt{f}$ 주파수 응답을 보상하는 케이블 이퀄라이저가 있다. [그림 4]는 케이블 및 이퀄라이저의 일반적인 주파수 응답을 나타낸 것이다.

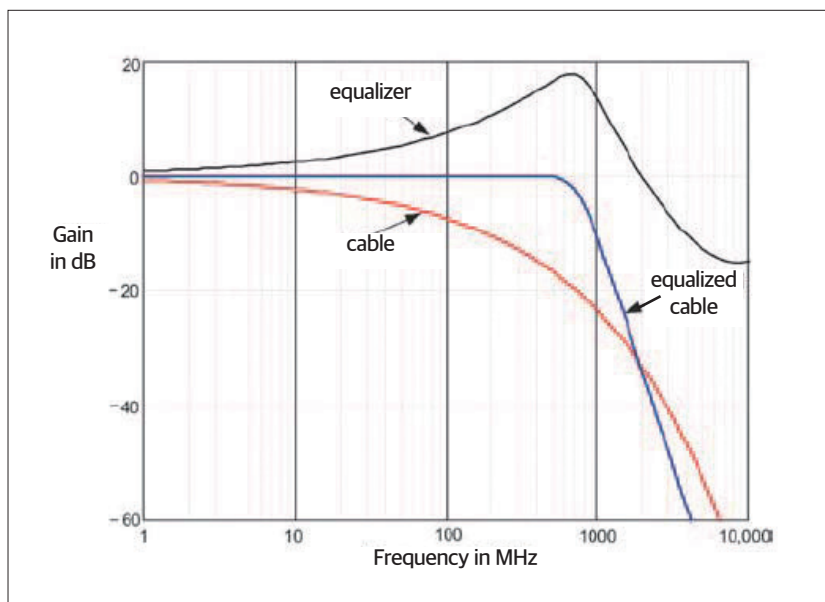


그림 4. 300m 길이의 케이블에 대한 주파수 응답과 보상 이퀄라이저의 일반적 응답

임상(Pathological) 신호, SDI 체크필드

클럭을 복구하려면 자주 신호를 전이해야 한다. 즉 신호의 전이 밀도가 충분해야 한다. 또한 케이블의 $1/\sqrt{f}$ 주파수 응답을 보상하는 주파수 종속적인 이득을 결정하고 유지하기 위해 케이블 균등화 알고리즘에는 신호에 수많은 에지가 필요하다. 일정한 신호 레벨의 간격이 길다는 것이 이런 프로세스에 스트레스를 가하여 디코딩 오류나 동기화 문제로 이어질 수 있다. 더 나아가, 교류 결합은 입력 신호가 상당한 비율의 시간 동안 같은 전압 레벨로 유지되는 경우 디코딩의 노이즈 마진을 줄일 수 있다. 대부분의 경우 스캔블링 및 NRZI 인코딩을 통해 SDI 신호에 많은 전이를 수행할 수 있다. 일반적인 SDI 신호에는 클럭 복구, 균등화 또는 디코딩 프로세스에 스트레스를 주는 일정 전압의 긴 간격이 없다. 하지만 디지털 비디오 콘텐츠의 특정한 위드 패턴은 긴 일정 전압의 간격을 가진 SDI 신호를 만들어낼 수 있다. 스캔블링 프로세스에 사용되는 시프트 레지스터에 특정 상태가 있고 스캔블러가 여러 개의 특별한 입력 비트 시퀀스 중 하나를 받는 경우 NRZI 인코딩 후의 결과 SDI 신호에는 [그림 5]에 표시된 것과 같은 패턴 중 하나가 있다.

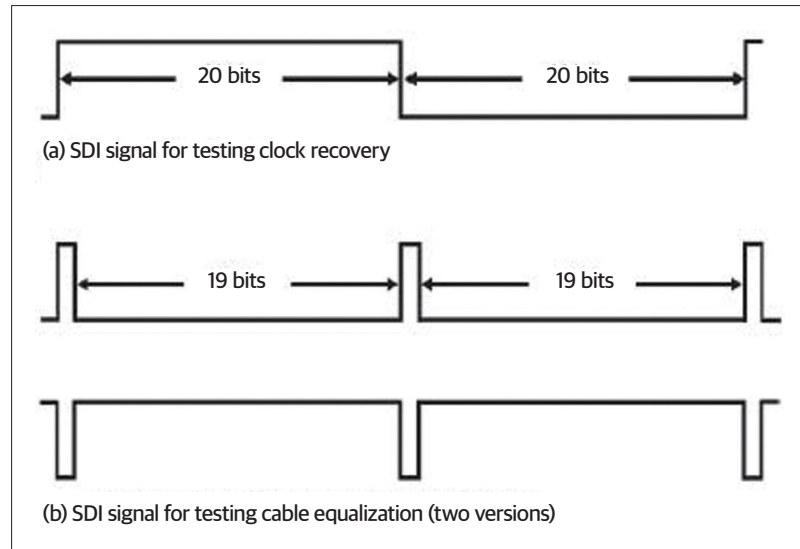


그림 5. 스트레스 테스트 클럭 복구 및 케이블 균등화를 위한 SDI 신호

이런 패턴을 가진 SDI 신호를 임상(pathological) SDI 신호라 부른다. 비디오 반도체 및 장비 설계자는 이런 신호를 이용하여 클럭 복구와 균등화 프로세스에 대한 스트레스 테스트를 실시하여 올바른 클래핑 작동 또는 교류 결합 효과를 보상하는 DC 복원 회로를 검증할 수 있다. 그림과 같이, 균등화 테스트에 필요한 패턴은 클럭 복구 PLL에 대한 스트레스 테스트를 실시하는 데 필요한 패턴과 다르다. 임상 SDI 신호의 스트레스 패턴이 시작된 후에는 작동 중인 비디오 라인의 끝에서만 발생한다. SDI 신호 형식은 작동 중인 비디오 콘텐츠(예 : SAV(start-of-active-video) 및 EAV(end-of-active-video) 동기화 워드) 라인 사이에 정보를 삽입한다. 이렇게 추가된 정보는 이러한 긴 일정 전압 간격을 만드는 특수한 시프트 레지스터 상태와 비트 시퀀스를 분해한다. 작동 중인 다음 라인에 같은 특수 비트 시퀀스가 있더라도 시프트 레지스터에는 일반적으로 적절한 초기 상태가 없고 SDI 신호에는 스트레스 패턴이 없게 된다. 여러 비디오 라인에서 특수 비트 시퀀스를 반복하면 스트레스 패턴이 다시 나타나게 된다. 결국, 스캔블러의 시프트 레지스터는 비트 시퀀스의 적당한 위치에서 알맞은 초기 상태로 들어가게 된다. 이런 일이 발생할 때 스트레스 패턴이 다시 나타나고 작동 중인 비디오 라인의 끝까지 계속된다. 스트레스 패턴을 시작하는 데 필요한 조건은 가끔 발생한다. 따라서 임상 SDI 신호는 전형적인 SDI 신호처럼 보이는 많은 비디오 라인 중에서 통계적으로 산재된 스트레스 패턴이 포함된 비디오 라인이 가끔 발생하는 형태로 나타난다. 일부 비디오 테스트 신호 제너레이터는 이런 신호를 전체 필드 형식이나 클럭 복구와 이퀄라이저 스트레스 패턴을 합친 분할 필드 형식 중 하나로 이런 신호를 만들 수 있다. SDI 입력이 있는 비디오 장비에서 복구와 균등화를 테스트하기 위해 SMPTE는 SDI 체크필드라고 하는 특정 분할 필드 형식을 정의하는 권장 실행 방법 2가지(RP 178과 RP 198)를 개발했다.

지금까지 시리얼 디지털 비디오 신호의 개념 및 지터에 관련된 6가지 사항에 관해서 알아보았고, 다음 호에 나머지 5가지 사항을 설명하도록 하겠습니다. 📺