

12장. 복잡한 신호 및 디지털 신호 분석



1. 학습개요

목표

1. 복잡한 신호(Complex Signal)의 개념과 구성 요소를 이해한다.
2. 디지털 신호가 본질적으로 아날로그 특성을 가진다는 점을 인식한다.
3. 시간 영역에서 디지털 신호의 품질을 평가하는 핵심 포인트(에지, 지터, 링잉 등)를 이해한다.
4. 오실로스코프를 이용해 디지털 신호 이상 현상(왜곡, 클리치, 타이밍 문제)을 분석하는 방법을 익힌다.
5. 실제 디지털 시스템(클럭, 데이터, 버스)분석 시 실무적인 접근 방법을 학습한다.

2. 이론

현대 전자 시스템에서 다루는 신호는 더 이상 단순한 사인파나 구형파가 아니다. 고속 디지털 시스템, 임베디드 시스템, 통신 시스템에서는 여러 신호 성분이 동시에 얹혀 있는 복잡한 파형이 일반적이다.

특히 디지털 신호는 논리적으로 0과 1로 표현되지만, 실제 물리 세계에서는 전압·시간·노이즈·임피던스 영향을 모두 받는 아날로그 신호로 존재한다.

오실로스코프는 이러한 복잡한 신호를 시간 영역에서 직접 눈으로 확인할 수 있는 거의 유일한 도구이며, 디지털 오류의 상당수는 아날로그 관점에서 보면 명확한 원인을 찾을 수 있다.

2.1 복잡한 신호(Complex Signal)의 개념



그림 12-1. 변조된 통신 신호의 예시 - FM(Frequency Modulation) 신호

A. 복잡한 신호란?

복잡한 신호란 하나의 단일 주파수 또는 단일 파형으로 설명할 수 없는 신호를 의미한다. 다음과 같은 특징을 가진다.

- 여러 주파수 성분이 동시에 포함됨

- 신호 위에 또 다른 신호(Envelope, Noise, Ripple)가 얹혀 있음
- 시간에 따라 특성이 변함(비정상 신호, 버스트 신호 등)

대표적인 예시로는 디지털 데이터 스트림, 클럭과 노이즈가 섞인 신호, PWM과 리플 전원 신호, 변조된 통신 신호 등을 들 수 있다.

B. 디지털 신호

디지털 신호는 흔히 “사각파”로 단순화해서 생각하지만, 실제로는 다음 요소가 모두 포함된 복잡한 신호이다.

- 유한한 상승/하강 시간
- 고조파 성분
- 전송선 효과
- 반사(reflection), 링잉(ringing)
- 노이즈, 지터, 크로스토크

즉, 디지털 신호는 이상적인 논리 신호가 아니라 복잡한 아날로그 파형이라고 생각할 수 있다.

2.2 디지털 신호의 아날로그적 특성 이해



그림 12-2. 실제 디지털 신호의 예시

C. 이상적인 디지털 신호 vs. 실제 신호

보통 생각하는 이상적인 디지털 신호의 특징은 무한히 빠른 에지와 정확히 0V와 Vdd를 가지고, 노이즈가 없다. 하지만 실제 디지털 신호는 에지는 유한한 시간에 걸쳐서 변화하고, 언더슈트와 오버슈트가 발생하고 전압 레벨에 노이즈가 중첩되어 있으며 에지 타이밍이 매번 달라질 수 있다.

D. 왜 아날로그 관점이 중요한가?

디지털 오류의 상당수는 다음과 같은 아날로그 문제에서 시작된다.

1) Setup/Hold Violation(셋업 타임, 홀드 타임에 대한 규칙 위반)

디지털 회로에서 데이터는 클럭의 특정 순간에 저장된다. 이 때, 데이터는 클럭 에지 이전(Setup)과 이후(Hold)에 일정 시간동안 안정되어 있어야 한다.

- Setup violation: 데이터가 클럭 에지 이전까지 안정되지 못한 상태
- Hold violation: 클럭 에지 직후 데이터가 너무 빨리 변하는 상태

이 문제가 발생하면 플립플롭은 데이터를 정확히 0과 1로 판단하지 못하고, 잘못된 값이 저장될 수 있습니다. 이 현상은 단순히 타이밍 설정 오류가 아니라 에지 지터, 노이즈, 상승/하

강 시간의 열화 같은 아날로그 파형 품질 문제로 인해 발생하는 경우가 대부분입니다.



그림 12-3. 클럭이 흔들리는 파형의 예시

2) 클럭 지터 증가(Clock Jitter)

클럭 지터란 클럭 에지가 시간 축에서 흔들리는 현상입니다. 이론적으로 클럭은 완벽하게 일정한 주기로 발생해야 하지만, 실제 전원 노이즈, PLL/오실레이터 내부 노이즈, EMI 결합, 온도와 전압 변화 등의 요인에 의해 흔들립니다. 이런 지터가 증가하면 클럭 기준 시점이 불확해지고, Setup/Hold 마진이 감소하고, 고속 인터페이스에서 데이터 오류 발생 확률이 증가합니다. 따라서 클럭이 흔들리면 모든 디지털 타이밍 기준이 무너질 수 있습니다.



그림 12-4. 아이 다이어그램이 닫힌 신호(좌측)와 열린 신호(우측)의 비교

3) 아이 다이어그램 열림 감소

아이 다이어그램은 디지털 신호의 품질을 한눈에 보여주는 통계적 파형이다. 아이(Eye)가 잘 열린다는 것은 전압 여유가 충분하고, 타이밍 여유가 크며 노이즈와 지터가 적다는 의미이다. 반대로 아이가 닫히면 전압 노이즈가 증가하고, 지터가 증가하고, 에지 품질이 저하된다는 의미이다. 결과적으로 샘플링 타이밍이 조금만 어긋나도 오류가 발생하고 데이터 BER(Bit Error Rate)가 급증하기 때문에 아이 다이어그램의 열림 감소는 Setup/Hold violation, 지터, 노이즈가 누적된 결과 지표로도 볼 수 있다.

4) EMI 증가

디지털 신호의 에지가 빨라질수록, 신호는 더 많은 고주파 성분(빠른 에지, 링잉, 오버슈트, 전류 스파이트)을 포함하게 된다. 이러한 성분들은 케이블, PCB 패턴, 그라운드를 안테나처럼 동작하게 만들고 방사 또는 전도 노이즈로 외부에 방출된다. 이렇게 EMI가 증가하면 다른 회로에 간섭이 가고 인증이 실패하고 오동작을 유발할 수 있다.

5) 간헐적 오동작

가장 위험한 디지털 오류는 항상 재현되지 않는 오류이다. 실온에서는 정상이었으나 고온/저온에서 오류가 난다거나, 전원 전압이 조금만 바뀌어도 오류가 난다거나, 특정 보드에서만 발생한다거나 하는 오류이다. 이런 현상의 공통점은 타이밍 마진이 이미 경계선에 걸쳐있거나 아날로그 파라미터 변화로 마진이 무너진다는 것이다. 회로는 원래부터 불안정했지만 조건이 바뀌면서 숨겨진 아날로그 문제가 표면화 되는것으로 볼 수 있다.

따라서 디지털 오류는 결과이고 이 원인은 대부분 아날로그로 볼 수 있다.

2.3 시간 영역에서 디지털 신호 분석

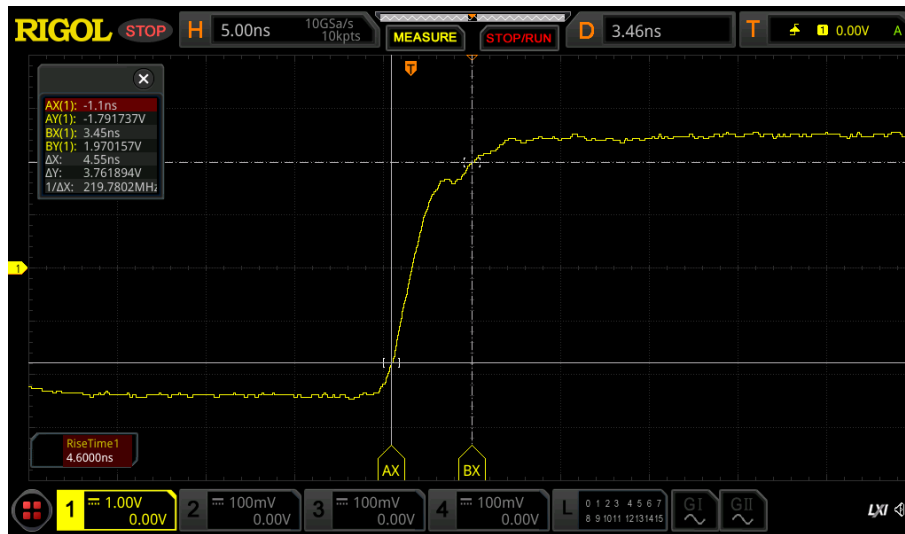


그림 12-5. 디지털 에지(Edge) 분석 예시

A. 에지(Edge) 분석

디지털 신호에서 가장 중요한 부분은 에지이다. 상승 시간(Rise Time), 하강 시간(Fall Time), 에지의 기울기 변화를 중요하게 본다. 이 에지가 느려지면, 타이밍 마진이 감소하고 고속 데이터 오류가 증가하게 된다. 에지가 너무 빨라지면 링잉이 증가하고 EMI 문제가 발생할 수 있다.

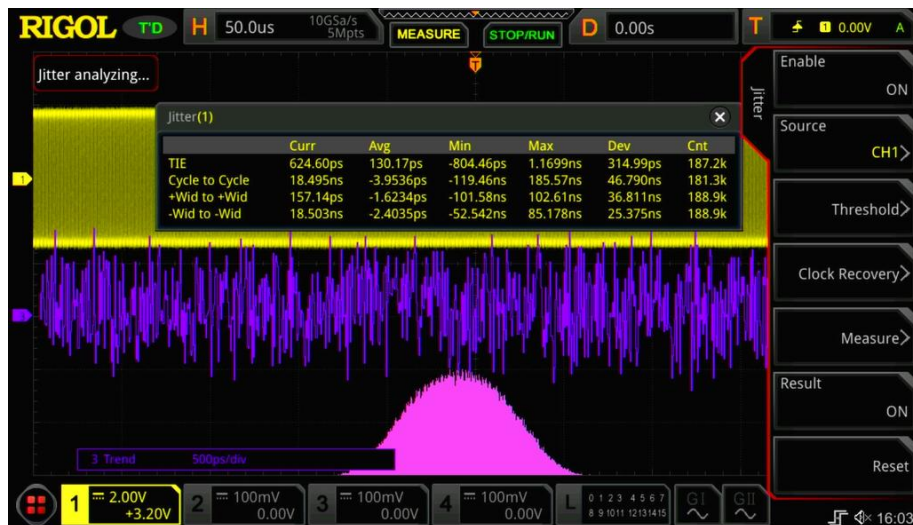


그림 12-6. 지터(Jitter) 관찰 예시

B. 지터(Jitter) 관찰

지터는 에지가 시간 축에서 흔들리는 현상이다. 전압 노이즈는 타이밍 지터로 변환될 수 있고, 클럭 품질 저하의 직접적인 원인이 되고 이는 고속 인터페이스에서는 매우 치명적이다. 이 지터는 시간영역에서 볼 때 에지가 좌우로 퍼져 보이고 트레이스가 두꺼워지는 경향을 가진다.

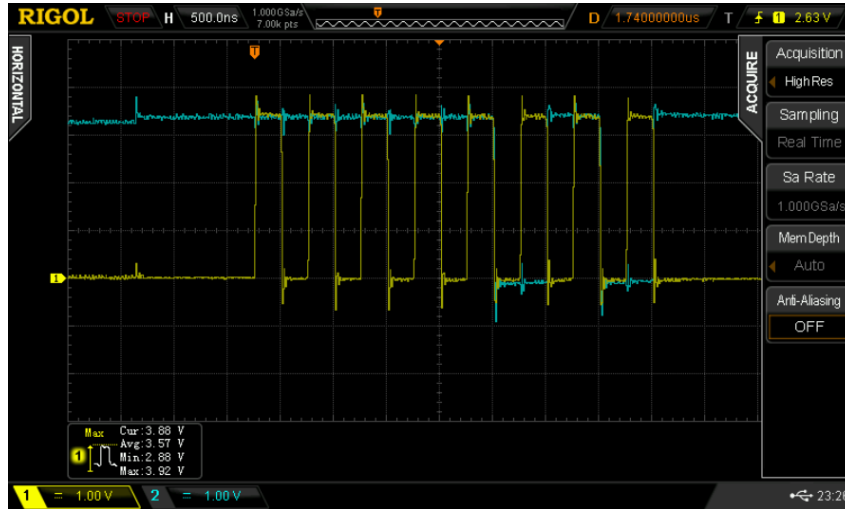


그림 12-7. 링잉과 오버슈트의 예시

C. 링잉(Ringing)과 오버슈트(Overshoot)

링잉과 오버슈트는 임피던스 불일치와 전송선 효과의 결과이다. 오버슈트는 목표 전압을 초과하는 것이고, 언더슈트는 목표 전압 아래로 하강하는 것이고, 링잉은 감쇠 진동 형태의 흔들림이다. 이 현상은 입력 보호 다이오드의 스트레스를 주고 로직을 오동작하게 표현하고 장기적인 신뢰성을 저하시킬 수 있다.

2.4 복잡한 디지털 파형의 해석 관점

A. 체크 포인트

디지털 파형을 볼 때 흔히 할 수 있는 실수가 '파형이 예쁘면 괜찮다'라는 판단이다. 실제로 체크해야 할 포인트는 다음과 같다.

- 임계 전압을 안정적으로 통과하는가?
- 타이밍 마진이 충분한가?
- 노이즈에 취약하지는 않은가?
- 간헐적으로 오류가 발생하지는 않은가?

다음 내용들을 미리 체크하여 문제를 줄일 수 있다.

3. 기본 실습

준비물: 오실로스코프, DS6000 데모보드, 패시브 프로브

3.1 디지털 신호 관찰 실습



그림 12-8. DS6000 보드에서 MANU_AN 핀 위치

- ① DS6000 데모보드에서 출력되는 MANU_AN 핀에 프로브를 연결하여 CH1에 연결합니다.

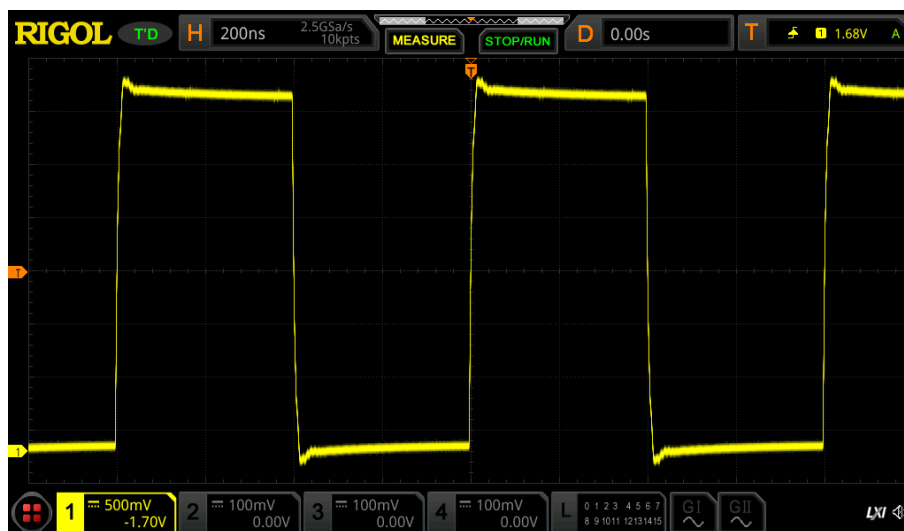


그림 12-9. 오실로스코프에서 찍은 MANU_AN 신호

- ② 오실로스코프에서 AUTO 버튼을 누릅니다.
- ③ 시간축을 조절하여 에지를 확대합니다.
- ④ 에지의 두께, 흔들림, 링잉 여부를 확인합니다.
- ⑤ Measure 기능을 이용하여 Rise Time을 확인합니다.

⑥ Cursor를 이용하여 Rise Time을 관찰해 봅니다.

4. 결과 확인

MANU_AN 파형의 주파수는 어떻게 되나요?

MANU_AN 파형의 Rise Time은 어떻게 되나요?

Measure를 이용해서 Rise Time을 찍은 화면과 Cursor를 이용해서 분석한 Rise Time의 화면을 캡처하여 제출하세요.

5. 확인 문제

1. 디지털 신호에서 에지가 흔들리는 이유는 무엇인가요?

2. 링잉이 발생하는 원인은 무엇인가요?

3. 시간 영역에서 지터가 커질 때 시스템에 미치는 영향은 무엇인가요?

6. 핵심요약

- 디지털 신호는 본질적으로 아날로그 신호이다.
- 복잡한 신호는 시간 영역에서 먼저 관찰해야 한다.
- 에지, 지터, 링잉은 디지털 품질의 핵심 지표이다.
- 오실로스코프는 디지털 문제의 근본 원인을 보여주는 도구이다.

7. 참고 및 부록

용어집:

- Complex Signal: 여러 성분이 결합된 신호
- Edge: 디지털 신호의 전환 구간
- Jitter: 타이밍 변동
- Ringing: 감쇠 진동
- Overshoot/Undershoot: 전압 초과/미달 현상