



# 아이 다이어그램(Eye Diagram)을 통한 신호 무결성 분석 솔루션 : MSO8000 활용 가이드

## Application Note

## 서론: 디지털 통신과 신호 무결성(Signal Integrity)

현대의 고속 직렬 데이터 통신 환경에서 신호 품질 분석의 궁극적인 목표는 트랜시버 링크의 데이터 오류(Bit Error)를 최소화하는 것입니다. 타이밍은 전체 신호 품질에 기여하는 여러 특성 중 하나일 뿐이며, 실제 현장에서는 다음과 같은 복합적인 요인들이 비트 해석에 영향을 미칩니다.

- 타이밍 및 클럭 문제: 지터(Jitter) 및 클럭 불확실성.
- 물리적 환경: 대역폭 제한, 부적절한 접지(Grounding), 회로 노이즈.
- 전송로 특성: 임피던스 불일치로 인한 반사파, 크로스토크(Crosstalk)

이러한 복잡한 신호 품질 상태를 직관적으로 시각화하고 검증할 수 있는 가장 표준적인 방법이 바로 아이 다이어그램(Eye Diagram) 테스트입니다.

## 1. 아이 다이어그램의 기본 개념 및 생성 원리

### 1-1. 아이 다이어그램의 정의

아이 다이어그램은 디지털 신호의 수천 개 비트 시퀀스를 중첩하여 하나의 화면에 표현한 것입니다. 중앙에 형성되는 빈 공간이 사람의 눈(Eye)과 닮았기 때문에 아이 패턴이라고 불립니다.

### 1-2. 생성 단계

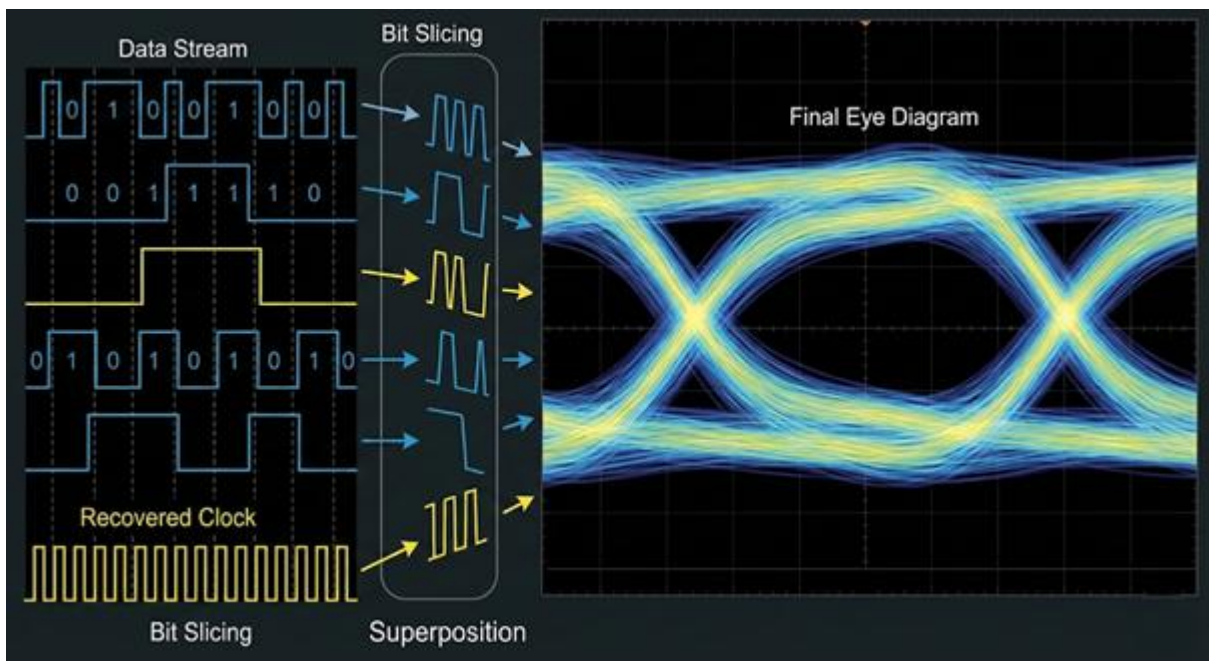


그림 1. 아이 다이어그램 생성 과정

- ① 데이터 수집: 고속 샘플링을 통해 연속적인 비트 스트림을 획득합니다.
- ② 클럭 복구(Clock Recovery): 입력 신호에서 비트 타이밍을 결정할 기준 클럭을 추출합니다.  
(MSO8000은 소프트웨어 및 하드웨어 PLL 기반 클럭 복구 지원)
- ③ 비트 중첩: 복구된 클럭을 기준으로 각 비트 파형을 일정한 간격으로 자른 뒤, 화면상에 동일한 위치에 겹쳐 쌓습니다.
- ④ 밀도 표시: 데이터가 겹치는 빈도를 색상이나 밝기로 표현하여 신호의 변동성을 시각화합니다.

## 2. 아이 다이어그램의 주요 측정 지표 분석

아이 다이어그램 분석의 핵심은 "눈이 얼마나 깨끗하게 열려 있는가"를 측정하는 것입니다.

### 2-1. 눈 높이(Eye Height)와 노이즈 마진

아이 다이어그램의 눈의 높이는 노이즈 마진과 관련이 있으며, 눈의 수직 열림 정도로 파악 할 수 있습니다. 높이가 높을수록 진폭 노이즈에 강하며, 수신기에서 0과 1을 전압 차이로 구분하기 쉽습니다.

### 2-2. 눈 너비(Eye Width)와 지터(Jitter)

아이 다이어그램의 눈의 너비는 지터와 관련이 있으며, 눈의 너비가 넓을수록 타이밍 지터가 적음을 의미하며, 데이터 샘플링 시점에서 오류가 발생할 확률이 낮아집니다.

### 2-3. 상승/하강 엣지(Rise/Fall Edge)와 대역폭

아이 다이어그램의 상승 및 하강 엣지는 신호가 전이되는 기울기를 의미하며, 기울기가 가파르지 못하고 완만하다면(약 45°), 시스템의 대역폭 제한으로 신호가 최고 혹은 최저점에 도달하기 전에 다음 비트로 넘어가는 문제가 발생할 수 있습니다.

### 3. MSO8000 시리즈의 아이 다이어그램 분석

RIGOL MSO8000 시리즈는 최대 2GHz 대역폭과 10GSa/s 샘플링 속도를 기반으로 전문적인 아이 다이어그램 분석 툴킷을 제공합니다.

#### 3-1. 기반 실시간 아이 다이어그램

MSO8000시리즈는 강력한 처리 성능을 통해 수천 개의 비트를 실시간으로 중첩합니다. 이는 간헐적으로 발생하는 신호 이상(Anomaly)을 포착하는 데 매우 유리합니다.

#### 3-2. 클럭 복구 옵션 (Clock Recovery)

지터 분석 툴킷과 연동되어 다양한 클럭 복구 옵션을 제공합니다.

- Constant Clock: 고정된 주파수 기반.
- PLL(Phase Locked Loop): 실제 수신기의 동작 방식을 모사하여 주파수 변동을 추적하며 아이를 형성합니다.

#### 3-3. 마스크 테스트(Mask Test) 및 히스토그램

- 마스크 테스트: 설정된 '허용 영역'을 신호가 침범하는지 자동으로 판별하여 Pass/Fail 결과를 도출합니다.
- 히스토그램: 엣지의 교차점이나 진폭의 분포를 통계적으로 분석하여, 노이즈가 가우시안 분포인지 혹은 특정 인과 관계에 의한 비무작위 노이즈인지 판단하도록 돕습니다.

## 4. 실전 디버깅 사례: 아이 패턴을 통한 문제 진단

### 4-1. 초기 상태 - 심각한 신호 왜곡

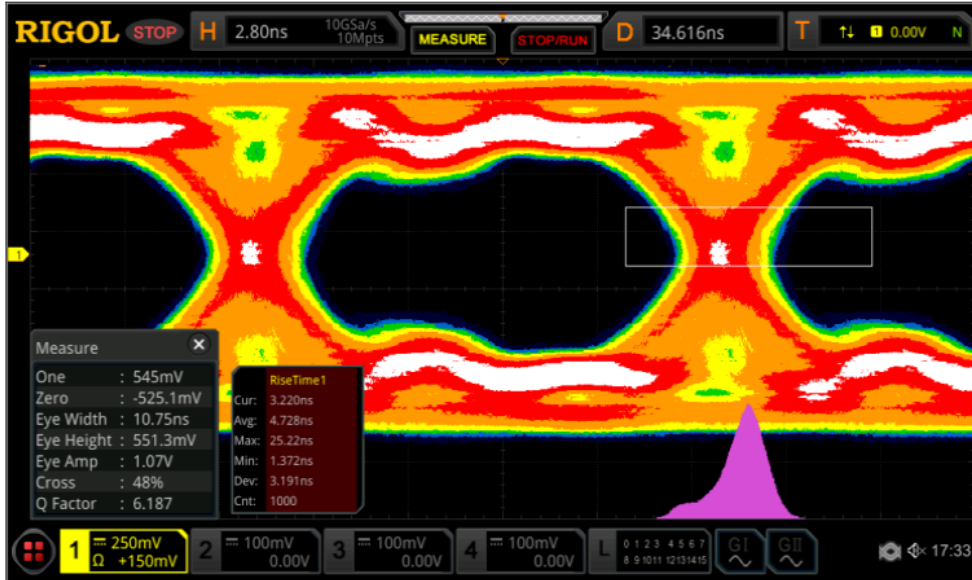


그림 2. 노이즈와 지터를 포함한 초기 신호의 아이 다이어그램

- 현상: 눈이 거의 감겨 있고, 엣지가 두꺼우며 히스토그램 분포가 불규칙
- 진단: 주파수 불확실성(지터)과 진폭 노이즈가 동시에 존재함. 특히 히스토그램이 가우시안 형태가 아닌 것은 특정 간섭원(Deterministic Jitter)이 있음을 암시합니다.

### 4-2. 타이밍 최적화 후



그림 3. 랜덤 성분의 지터가 개선된 아이 다이어그램

- 조치: 주파수 변동을 일으키는 신호 간섭 제거
- 결과: 보라색 히스토그램이 대칭을 이루기 시작하며 엣지 교차점이 선명해집니다. 눈 너비(Eye Width)가 눈에 띄게 개선됩니다.

4-3. 노이즈 제거 후



그림 4. 랜덤 성분의 지터와 노이즈가 개선된 아이 다이어그램

- 조치: 크로스토크 및 레이아웃 상의 잡음원 제거
- 결과: 진폭 변동이 줄어들어 눈 높이(Eye Height)가 확보됩니다. 하지만 여전히 엣지의 기울기가 완만하여 수직적으로 완전히 열리지 않은 상태입니다.

4-4. 최종 디버깅 완료 - 대역폭 개선



그림 5. 시스템의 Deterministic 지터 성분을 개선한 아이 다이어그램

- 조치: 송신기 회로 수정 및 대역폭 제한 요소 제거
- 결과: 상승/하강 시간이 단축되어 엷지가 가파르게 서게 됩니다. 신호가 비트 중간에 최고/최저점에 확실히 도달하며, 완전히 열린 아이 패턴이 형성됩니다. 비트 오류율(BER)이 획기적으로 낮아지며, 히스토그램 분포를 통해 타이밍 오차(Outlier)가 제거되어 신호의 안정성이 극대화되었음을 확인할 수 있습니다.

## 5. 결론: 최적의 신호 품질 확보를 위한 제언



MSO8000 시리즈를 활용한 정밀한 분석은 다음과 같은 이점을 제공합니다.

- ① 시각적 디버그: 레이아웃 문제, 크로스토크, 방출(Emission) 문제를 즉각 포착.
- ② 설계 검증: 설계 문서상의 상승 시간 및 전압 레벨 기준과 실제 파형을 비교 분석.
- ③ 신뢰성 확보: 통계적 히스토그램과 마스크 테스트를 통해 장기적인 데이터 링크의 안정성을 보장.

성공적인 고속 데이터 링크 설계를 위해서는 아이 다이어그램의 '눈'을 가장 크게 열기 위한 대역폭 확보와 지터 억제가 필수적입니다.