

논문 2012-49-12-27

수 Gbps 고속 인터페이스의 오류검출을 위한 자가내장측정법의 가속화 연구

(A Study on Accelerated Built-in Self Test for Error Detecting in
Multi-Gbps High Speed Interfaces)

노 준 완*, 권 기 원**, 전 정 훈**

(Jun-Wan Roh, Kee-Won Kwon, and Jung-Hoon Chun)

요 약

본 논문에서는 고속 인터페이스 비트오류율(BER, Bit Error Rate)의 수학적 모델을 기반으로, 간단하고 정확하게 시간마진을 추정할 수 있는 '선형 근사화 추정법(linear approximation method)'을 제안하였다. 기존의 Q-factor를 이용한 추정법과 제안한 선형 근사화 추정법을 이용하여 10^{-13} 이하의 BER을 얻기 위한 시간마진을 추정한 결과는 실측한 값과 비교할 때 약 0.03UI 정도의 작은 오차를 갖는다. 이 중 선형 근사화를 이용한 가속 자가내장측정법(built-in self test)을 내부 BERT(BER Tester)를 포함한 하드웨어로 구현하였다. 3Gbps, 95% 신뢰 수준에서 10^{-13} BER 기준의 시간마진을 직접 측정하는데 소요되는 시간이 약 5.6시간인데 반해, 가속 자가내장측정법은 0.6초 이내에 유사한 정확도로 시간마진을 추정한다. 시간마진 추정치는 시간마진을 내부 BERT로 직접 측정된 값과 0.045UI 이하의 작은 오차를 보였다.

Abstract

In this paper, we propose a 'linear approximation method' which is an accelerated BER (Bit Error Rate) test method for high speed interfaces, based on an analytical BER model. Both the conventional 'Q-factor estimation method' and 'linear approximation method' can predict a timing margin for 10^{-13} BER with an error of about 0.03UI. This linear approximation method is implemented on a hardware as an accelerated Built-In Self Test (BIST) with an internal BERT (BERT Tester). While a direct measurement of a timing margin in a 3Gbps interface takes about 5.6 hours with 10^{-13} BER requirement and 95% confidence level, the accelerated BIST estimates a timing margin within 0.6 second without a considerable loss of accuracy. The test results show that the error between the estimated timing margin and the timing margin from an actual measurement using the internal BERT is less than 0.045UI.

Keywords : BER, linear approximation method, BIST, built-in self test, timing margin

I. 서 론

외부 BERT(Bit Error Rate Tester)를 사용하여 고속

인터페이스의 BER(Bit Error Rate)을 측정하는 경우, 여러 가지 문제가 발생 할 수 있다. 수 Gbps 데이터를 전송하는 상황에서 수신기 칩의 실제 입력 신호와 BERT를 통해 관측된 신호가 서로 다를 수 있고, 장비의 기생 성분으로 인해 실제 링크의 상태를 정확하게 감지하지 못 할 수 있다. 고속 인터페이스의 BER를 측정할 수 있는 자가내장측정(BIST, Built-In Self Test) 기능을 칩 상에 구현함으로써 이러한 문제점들을 효율적으로 극복할 수 있다.^[1]

* 학생회원, ** 정회원, 성균관대학교 정보통신대학
(College of Information & Communication
Engineering, Sungkyunkwan University)

※ 본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음
(NIPA-2012-H0301-12-5002)

접수일자: 2012년9월3일, 수정완료일: 2012년11월26일

일반적으로 메모리 등의 고속 인터페이스에서 요구하는 BER은 10^{-15} 이하이다. 10^{15} 개의 데이터를 1Gbps의 속도로 전송을 할 때 걸리는 시간은 10^6 초(~ 28 시간)이므로, 신뢰 수준 95%에서 10^{-15} 수준의 BER 측정을 위해서는 약 34.6일이 소요된다.^[2, 3] 또한, BER에 근거한 eye 다이어그램을 추출하기 위해서 시간 오프셋(timing offset)과 전압 오프셋(voltage offset)을 옮기면서 BER을 측정하는 경우^[4], 수 년 정도의 시간을 소요한다. 따라서 측정을 이용하여 측정 시간을 단축시키는 가속 측정법이 필요하다.

본 논문은 다음과 같은 순서로 이루어져 있다. II장에서 BER의 수학적 모델을 소개하고^[4], 기존의 시간마진 측정시간을 단축할 수 있는 Q-factor를 이용한 추정법^[5]을 소개한다. III장에서는 새로운 가속 추정법인 선형 근사화 추정법을 제안한다. IV장에서는 칩 외부 BERT를 이용한 측정 데이터와 두 가속 추정법을 적용하여 얻은 추정값을 비교하여 제안한 근사화 추정법의 정확성을 검증한다. 칩 상에서 BER을 측정할 수 있는 오류감지회로를 설계하고, 이를 이용하여 선형 근사화 추정법을 실제 하드웨어로 구현하였다. 칩 상의 BERT를 이용하여 실측한 결과와 근사화를 통해 얻은 결과를 비교하였다. 마지막 장에서는 논문의 결과를 정리한다.

II. BER 관련 기존 연구

1. BER의 수학적 모델링

BER의 수학적 모델링을 위해서는 먼저 지터(jitter)에 대한 이해가 필요하다. 전체 지터 TJ(Total Jitter)는 DJ(Deterministic Jitter)와 RJ(Random Jitter)로 분류할 수 있다. DJ는 유한 경계(bounded)의 특성을 가지며, peak-to-peak 값으로 정량화한다.^[4] 높은 BER 영역에서는 DJ의 영향이 상대적으로 크고, 낮은 BER 영역의 BER은 주로 RJ에 의해서 결정된다. 따라서 bathtub 그래프 상의 낮은 BER 영역에서는, DJ는 단지 시간축으로의 오프셋(offset)만 인가하고 전반적인 모양에는 영향을 주지 않는다.^[5] 즉, BER이 어느 정도 낮은 영역에서는 RJ만을 고려하여 BER을 모델링할 수 있다. RJ는 통계적으로 가우시안 분포(gaussian distribution)로 표현될 수 있다. 가우시안 확률밀도함수(PDF, Probability Density Function)는 식 (1)과 같이 표현할 수 있다. 이때 σ 는 표준편차이고 μ 는 평균이다.

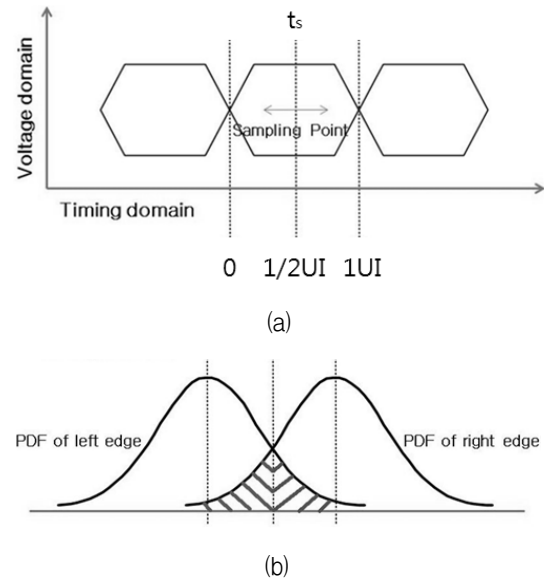


그림 1. (a) 수신기의 입력 신호 (b) random jitter 분포
Fig. 1. (a) An input signal for a receiver and (b) PDF of random jitter.

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

이상적인 통신의 경우에 수신기(receiver)는 그림 1(a)와 같이 데이터 신호 정중앙에서 입력신호를 샘플링한다. 반면에, 수신기 입력신호가 RJ에 의해 방해받는 경우 데이터 변이가 0과 1UI 외의 지점에서 발생하여서 에러가 발생할 확률이 높아진다. 왼쪽 데이터 변이와 오른쪽 데이터 변이가 시간 t 에서 일어날 확률은 각각 식 (2)와 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$p_{left}(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}} \quad (2)$$

$$p_{right}(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-UI)^2}{2\sigma^2}} \quad (3)$$

왼쪽 데이터 변이가 샘플링 시간 t_s 보다 나중에(오른쪽에) 발생한다면 에러가 발생한다(그림 1(b)의 '/' 방향 사선 부분). 이와 마찬가지로 오른쪽 데이터 변이가 샘플링 시간 t_s 보다 전에(왼쪽에) 발생한다면 에러가 발생한다(그림 1(b)의 '\ ' 방향 사선 부분). 일반적인 NRZ(Non Return to Zero)신호 전송 방식에서 데이터 변이가 일어날 확률은 50%임을 고려하여 식 (4)와 같이 BER을 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 BER(t_s) &= \frac{1}{2} \times \left\{ \int_{t_s}^{\infty} P_{left}(t) dt + \int_{-\infty}^{t_s} P_{right}(t) dt \right\} \\
 &= \frac{1}{2} \times \left\{ \int_{t_s}^{\infty} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-t^2/2\sigma^2} dt + \int_{-\infty}^{t_s} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-(t-UI)^2/2\sigma^2} dt \right\} \\
 &= \int_{t_s}^{\infty} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-t^2/2\sigma^2} dt = \frac{1}{2} \times \left(\frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{\frac{t_s}{\sigma\sqrt{2}}}^{\infty} e^{-t^2} dt \right) \\
 &= \frac{1}{2} \times \operatorname{erfc}\left(\frac{t_s}{\sigma\sqrt{2}}\right) \tag{4}
 \end{aligned}$$

여기서 σ 는 RJ의 RMS(Root-Mean-Square) 값으로 대체할 수 있고, 따라서 식 (4)는 식 (5)과 같이 표현할 수 있다.

$$BER(t_s) = \frac{1}{2} \times \operatorname{erfc}\left(\frac{t_s}{RJ_{RMS}\sqrt{2}}\right) \tag{5}$$

따라서 RJ_{RMS} 와 BER이 직접적으로 관계가 있음을 알 수 있고, 이는 뒤에 나오는 가속 추정법에서 활용된다.

2. 기존의 시간마진 가속 추정법

식 (6)의 Q-factor를^[5] 도입하면 식 (5)의 BER을 식 (7)과 같이 하나의 변수로 표현 할 수 있다.

$$Q_s = \frac{t_s}{RJ_{RMS}} \tag{6}$$

$$BER(Q_s) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{Q_s}{\sqrt{2}}\right) \tag{7}$$

식 (7)을 변형하여 BER을 독립변수로 Q_s 를 식 (8)과 같이 표현할 수 있다.

$$Q_s(BER) = \sqrt{2} \times \operatorname{erfc}^{-1}(2 \times BER) \tag{8}$$

그림 1과 같이 샘플링 지점이 데이터의 이상적 변이 지점간의 정중앙에 위치함을 가정할 때, 즉 t_s 가 $UI/2$ 임을 가정할 때, 특정 BER 이하의 오류율을 가질 수 있는 조건을 식 (9)와 같이 표현할 수 있다.

$$UI \geq 2Q_s(BER) \times RJ_{RMS} \tag{9}$$

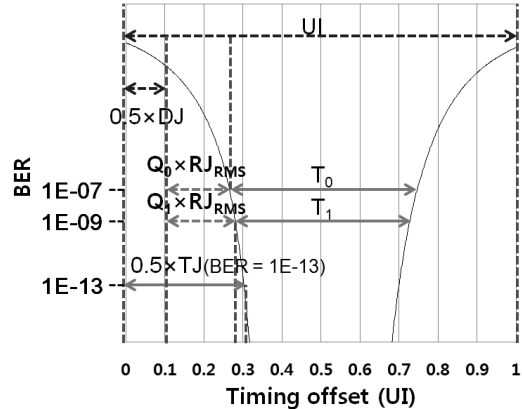


그림 2. Q-factor를 이용한 시간마진 추정법
 Fig. 2. Timing margin estimation using Q-factor.

식 (9)는 DJ의 영향을 무시한 가정으로 도출된 식이다. 하지만, 앞서 말한 대로 DJ는 BER이 낮은 영역에서는 시간축 상에서 오프셋 효과를 줌으로, 이를 고려하면 식 (9)는 아래와 같이 수정되어야 한다.

$$UI \geq DJ + 2Q_s(BER) \times RJ_{RMS} \tag{10}$$

따라서 DJ , RJ_{RMS} 가 주어진 상황에서 특정 BER을 만족시키기 위한 시간마진 T 는 다음과 같다.

$$T(BER) = UI - DJ - 2Q_s(BER) \times RJ_{RMS} \tag{11}$$

$Q(BER)$ 과 $T(BER)$ 은 특정 BER에 따라 정해지는 값들이기 때문에 상대적으로 측정시간이 적게 걸리는 높은 BER 영역 두 지점을 통해 DJ값과 RJ_{RMS} 값을 구하면, 측정시간이 오래 걸리는 낮은 BER 영역의 시간마진을 추정할 수 있다. 이러한 과정을 그림 2와 식 (12)-(15)를 이용하여 설명할 수 있다. 10^{-7} , 10^{-9} 의 BER영역에서의 시간마진 T_0 , T_1 을 각각 측정하고 각각의 Q-factor Q_0 , Q_1 을 이용하여 RJ_{RMS} 를 추정할 수 있고 (식 12, 식 13), DJ역시 식 (14)를 통해서 추정 가능하다. 그림 2에서는 BER 10^{-13} 지점의 TJ값을 계산하는 예를 보여주고 있다.

$$RJ_{RMS}Q_1 - RJ_{RMS}Q_0 = \frac{1}{2} |T_1 - T_0| \tag{12}$$

$$RJ_{RMS} = \frac{1}{2} \left| \frac{T_1 - T_0}{Q_1 - Q_0} \right| \tag{13}$$

$$DJ = UI - T_0 - Q_0 \times RJ_{RMS} \quad (14)$$

$$TJ(BER) = DJ + 2Q_s(BER) \times RJ_{RMS} \quad (15)$$

III. 선형 근사화(linear approximation) 추정법

BER을 선형 근사식으로 표현할 수 있으면 보간을 통해 추정하기가 수월해진다^[2]. 식 (4)는 식 (16)과 같이 다르게 표현할 수 있다.

$$BER(t_s) = \frac{1}{2} - \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^{\frac{t_s}{\sigma\sqrt{2}}} \sqrt{2\sigma} e^{-x^2} dx \quad (16)$$

식 (16)에서 적분표현을 제거하고 정확한 해를 구하는 것은 불가능하다. 하지만, 식 (17)과 같이 근사 계수 α 를 도입하여 $10^{-15} \sim 10^{-6}$ 의 낮은 BER영역에서 비교적 정확하게 근사할 수 있다. 근사 계수 α 의 값은 약 0.73이 적절하다.

$$BER(t_s) \cong \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{1 - e^{-(\alpha t_s)^2 / \sigma^2}} \quad (17)$$

식 (17) 자체가 낮은 BER영역에 대한 근사식이므로, ' $t_s \gg \sigma$ '의 관계를 가정하여, 식 (17)을 식 (18)과 같이 한 번 더 근사할 수 있다.

$$BER(t_s) \cong \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \left(1 - \frac{1}{2} e^{-(\alpha t_s)^2 / \sigma^2}\right) = \frac{1}{4} e^{-(\alpha t_s)^2 / \sigma^2} \quad (18)$$

그림 3에서는 $\sigma=1$ 일 때의 상황에서 식 (16), (17), (18)을 비교하였다. $10^{-15} \sim 10^{-6}$ BER영역에서 특정 BER에 대응하는 각각의 t_s 를 근사식인 식 (17) 과 식 (18)로 추정 한 값은 원식인 식 (16)을 통해 계산된 값과 0.2% 이하의 차이를 보인다. 또한, 식 (18)은 식 (19)와 같이 t_s 에 대해 선형적으로 표현 할 수 있다.

$$\begin{aligned} f_{LIN}(BER(t_s)) \\ &= \sqrt{-\text{Log}_{10}[BER(t_s)] \times \text{Ln}(10) + \text{Ln}(1/4)} \\ &= \frac{t_s}{\sigma/\alpha} \end{aligned} \quad (19)$$

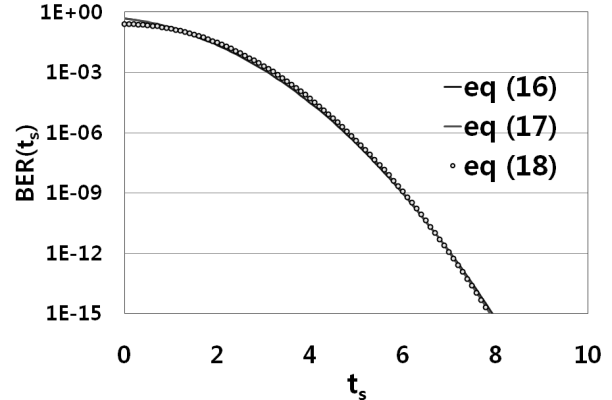


그림 3. BER 근사식, 식 (16), (17), (18)의 정확도 비교
Fig. 3. Comparison between approximate BER expressions, Eqs. (16), (17), (18)

식 (19)와 같이 간단하게 표현하기 위해 BER을 변수로 하는 함수 $f_{LIN}(BER)$ 을 도입하고, 식 (10)과 같이 DJ의 효과를 고려하면 시간마진 $T(BER)$ 은 식 (21)와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} UI &\geq DJ + \frac{\sigma}{\alpha} f_{LIN}(BER) \\ &= DJ + \frac{RJ_{RMS}}{\alpha} f_{LIN}(BER) \end{aligned} \quad (20)$$

$$T(BER) = UI - DJ - \frac{RJ_{RMS}}{\alpha} f_{LIN}(BER) \quad (21)$$

$T(BER)$ 과 $f_{LIN}(BER)$ 과의 관계가 선형적으로 근사된 식 (21)을 사용하여 측정 시간이 적게 걸리는 높은 BER 두 지점을 통해 DJ값과 RJ_{RMS} 를 구하면 측정 시간이 많이 걸리는 낮은 BER 지점의 시간마진을 추정할 수 있다. 이 근사식 역시 앞에서 기술한 Q-factor를 이용한 근사식과 마찬가지로, DJ가 단순한 오프셋 정도의 영향을 주는 낮은 BER 구간에서 사용할 수 있다. 인터 페이스의 환경에 따라 이러한 구간은 달라질 수 있으나, 보통 10^{-6} 이하의 영역에서 정확한 근사가 가능하다. 이러한 근사식을 이용하여 낮은 BER영역의 시간마진을 추정하는 데에 필요한 데이터를 추출하는 알고리즘을 그림 4를 통해 제안한다^[2]. 그림 5의 동작 과정의 예를 통해 알고리즘을 설명할 수 있다. 시작 조건으로 시작 측정 지점, t_{init} 을 '0'로 설정하였으며, 최초 측정 간격, $tstep_{init}$ 을 'UI/8'로 하였다. 측정 시작과 함

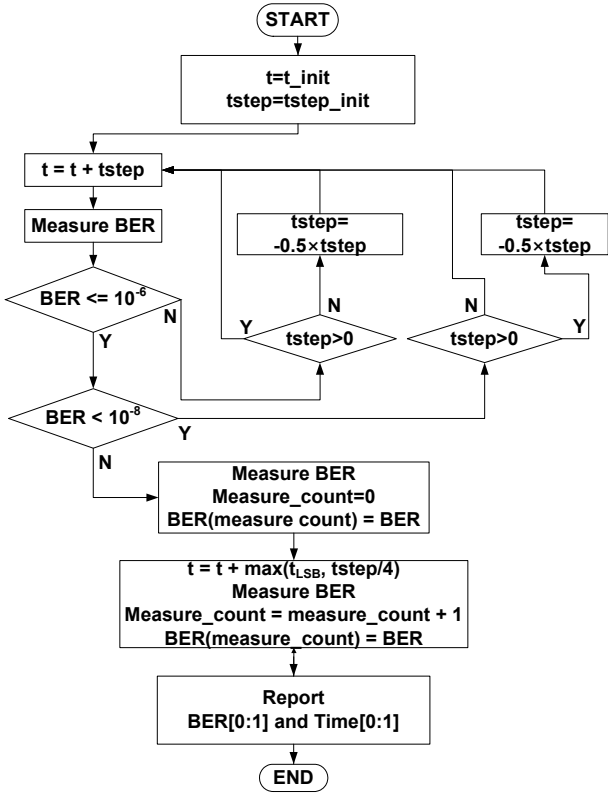


그림 4. 선형 근사화를 위한 BER, 샘플 지점 추출 알고리즘

Fig. 4. An algorithm of extracting BER and sampling timing for linear approximation.

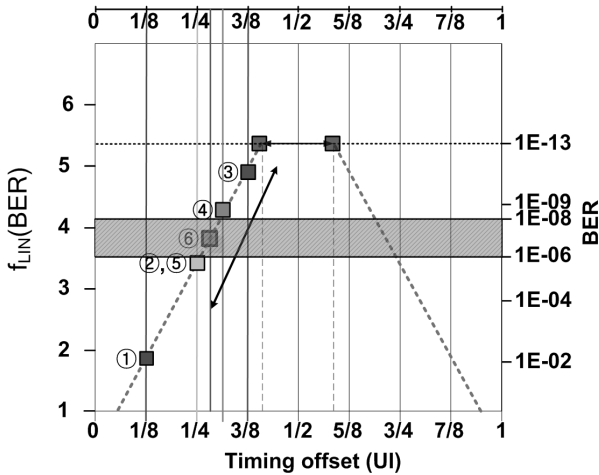


그림 5. 선형 근사화를 위한 데이터 추출 알고리즘 동작의 예

Fig. 5. An example of data extraction procedure for linear approximation.

계 측정 지점을 '0'에서 tstep 'UI/8'만큼 증가시키면 지점 ①에 도달한다. 이 지점에서 BER을 측정하면 10^6 보다 높기 때문에 같은 tstep으로 움직여 지점 ②로 측정

위치를 변경한다. 지점 ②에서 BER을 측정하면 여전히 10^6 보다 높기 때문에 역시 같은 tstep으로 지점 ③까지 움직인다. 지점 ③에서는 BER이 10^8 보다 낮기 때문에 tstep의 부호를 변경하고, 크기는 1/2 배로 감소시킨다. 즉, tstep이 '-UI/16'로 변경된다. 이러한 조건 하에 움직이면 지점 ④로 이동하게 된다. 지점 ④에서 BER을 측정하면 10^8 보다 낮기 때문에, tstep은 이전의 '-UI/16' 상태를 유지하여, 지점 ⑤로 움직이게 된다. 지점 ⑤에서는 BER이 다시 10^6 보다 높기 때문에 tstep의 부호가 다시 양으로 변경되고 그 절대값은 1/2배 되어 'UI/32'가 된다. 지점 ⑥으로 움직인 후, 측정된 BER이 $10^6 \sim 10^8$ 사이라면, 이때부터 지점 ⑥($t=9UI/32$)에서 tstep 'UI/128' 간격으로 추가로 한 지점의 BER을 측정한다. 이렇게 $10^6 \sim 10^9$ 인 구간 두 지점의 BER 측정치를 확보한 후, 보간법(extrapolation)을 사용하여 BER이 10^{13} 일 때의 시간마진을 추정한다.

IV. 검증 및 분석

1. 외부 BERT를 이용한 검증 및 분석

20 inch 채널을 이용하여 6Gbps의 속도로 데이터를 송수신하는 경우, BER을 외부 BERT로 측정된 결과와 가속추정법의 결과를 그림 6과 그림 7에 함께 나타내었다. 송신 데이터 패턴은 $2^{23}-1$ PRBS(Pseudo-Random Binary Sequence)를 사용하였다. 그림 6은 Q-factor를 이용한 추정법을 이용한 근사선과 실측정치의 그래프이다. 앞서 언급한 바와 같이 BER이 $10^6 \sim 10^9$ 인 두 지점을 선택하고, 그 지점의 측정치를 이용하여 $R_{J,RMS}$, DJ

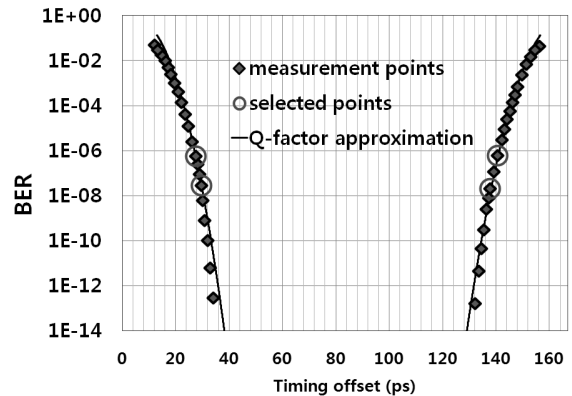


그림 6. Q-factor를 이용한 시간마진 추정

Fig. 6. Timing margin estimation using Q-factor.

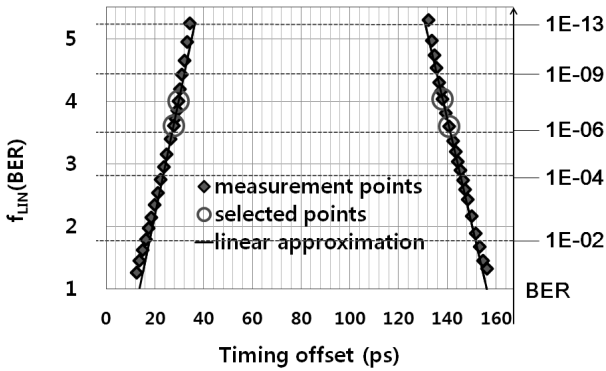


그림 7. bathtub 곡선의 선형 근사화
Fig. 7. Linear approximation of a bathtub curve.

표 1. Q-factor를 이용한 추정법과 선형 근사화 추정법의 시간마진 추정 결과 (BER = 10⁻¹³)
Table 1. Comparison of timing margin prediction results of Q-factor approximation and linear approximation (BER = 10⁻¹³).

	RJ _{RMS} (ps)	DJ (ps)	Timing margin (ps)	Error (ps)	Error (UI)
BERT measurement results	-	-	98	0	0
2-point Q-factor	8.06	14.19	92.69	5.31	0.032
Linear approximation	8.28	12.27	93.24	4.76	0.029

를 구한다. 이 두 값과 함께 BER에 따른 Q-factor값을 이용하면 식 (15)과 같이 낮은 BER 지점에서의 TJ와 시간마진을 추정할 수 있다. 그림 7에서는 선형 근사화하여 시간마진을 계산한 직선과 실측값을 비교하였다. 전반적으로 선형 근사선의 추정 시간마진과 측정치가 유사하게 관찰되었다. 기존의 Q-factor를 이용한 추정법과 제안한 선형 근사선을 이용한 추정법 모두 비교적 정확하게 시간마진을 추정하는 것을 확인하였다.

BER이 10⁻¹³일 때, 외부 BERT로 직접 측정된 시간마진과 두 가속 추정법의 시간마진 추정치 및 지터 성분들의 추정치를 표 1에 정리하였다. 본 실험에서는 선형 근사화 추정법의 오차 0.029UI가 Q-factor를 이용한 추정법의 오차 0.032UI와 비교하여 다소 작게 관찰되었다.

2. 가속 추정법의 하드웨어 구현

그림 8은 앞의 실험에서 단순하면서도 정확도가 상대적으로 더 우수한 선형 근사화 추정법을 하드웨어로 구현한 구성도이다. 동작은 I²C(Inter-Integrated Circuit)를 이용하여 컨트롤 하였다. 하드웨어 외부에 존재하는 I²C master는 serial data(SDA), serial clock(SCL) 두 신호를 이용하여 하드웨어 안의 I²C slave를 통해 특정 주소의 레지스터에 데이터를 저장하거나 읽는다^[6]. 또한 레지스터의 컨트롤 신호를 클록에 동기화된 신호로 변환시켜주는 동기화기(synchronizer)를 설계하였다. 송신기와 수신기는 같은 주파수의 클록(Ref CLK)에 동기 되게 하였고, 송신 데이터 패턴은 pattern generator에서 형성된 2²³-1 PRBS를 사용하였다. 수신기에는 위상 보간기(phase interpolator)가 있어서 샘플링 지점을 'UI/128'의 간격으로 조정할 수 있다. 온칩 BERT 안의 에러 탐지기는 송신 데이터와 동일한 패턴의 신호를 수신된 신호와 비교하여 에러를 탐지한다. BERT 안의 비트 카운터는 특정 개수의 에러가 쌓일 때까지의 통과 비트 수를 계산하여 BER을 검출한다. 이러한 기능들을 통해 특정 샘플링 지점에서의 BER을 측정할 수 있다. 가속 추정을 위한 데이터 추출 알고리즘은 BER/timing sampler에 구현되었다. 외부에서 synchronizer를 통해 시작 측정 지점과 최초 시간 간격을 BER/timing

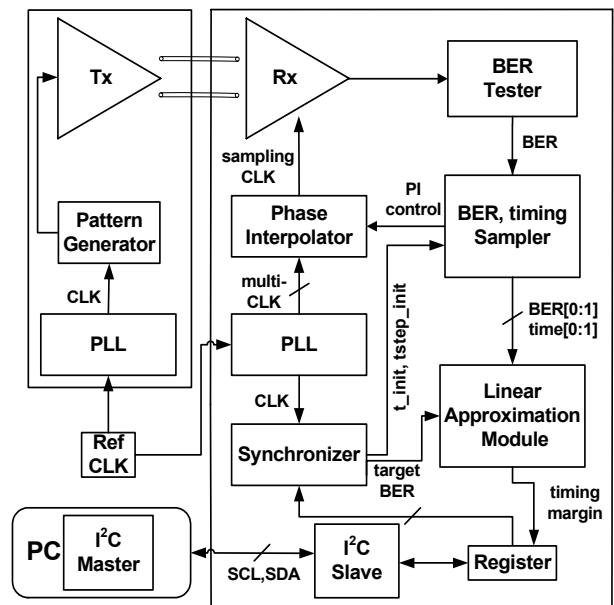


그림 8. 가속 자가내장측정법의 하드웨어 구현
Fig. 8. Implementation of the accelerated BIST on a hardware.

sampler에 입력하면, 그림 4의 알고리즘 동작대로, 위상 보간기로 들어가는 신호를 만들고, 특정 샘플링 지점에 대한 BER 정보를 BERT로부터 받아 다음 행동을 결정한다. 알고리즘의 동작이 끝나면, 결과 데이터인 시간과 BER의 정보는 선형 근사화 모듈(linear approximation module)로 들어간다. 추출 데이터를 분석하여 목표 BER에 해당하는 시간마진을 최종적으로 추정한다. 이러한 하드웨어를 FPGA를 사용하여 구현하였다. 사용한 보드^[7]의 송수신 최대 속도는 3.75GHz이고, 안정적인 속도인 3GHz를 선택하여 실험을 진행 하였다. 그림 9에서는 앞서 언급한 하드웨어 중 온칩 BERT를 이용하여 측정한 전구간의 시간마진과 선형 근사화를 이용한 시간마진 추정치를 비교하였다. BER이 10^{-13} 일 때, 실측정한 시간마진과 선형 근사를 이용한 시간마진 추정치 및 지터 성분 추정치들을 표 2에 정리하였다. 표에 기재된 바와 같이, 가속된 자가내장측정법의 시간마진 추정치는 직접 측정한 값과 0.044UI의 미세한 오차를 갖는다. 본 실험에서 BER이 $10^{-6} \sim 10^{-8}$ 사이 값을 갖는 시간지점을 탐지하는 과정은 다음과 같았다. 시작측정 지점은 UI의 양 끝인 '0', '1U'로 설정하고, 최초 시간 간격은 'UI/16'으로 정하였다. 이 때 왼쪽은 5번 만에, 오른쪽은 3번 만에 BER이 $10^{-6} \sim 10^{-8}$ 사이인 지점을 추출하였다. 탐지 시간은 왼쪽 약 0.0345초, 오른쪽 약 0.006초가 소요되었다. 선형 근사화를 위한 추가적인 데이터 추출을 위해 정해진 시간간격만큼 움직인 뒤 다시 BER을 측정하였고, 이는 약 0.56초가 소요된다. 이들을 다 더한 총 소요 시간은 약 0.6초이다. 가속된 자

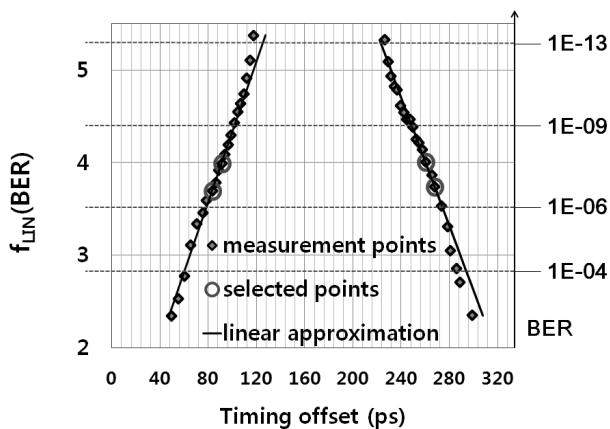


그림 9. 자가내장측정법의 하드웨어 구현을 통한 bathtub곡선 추출과 선형 근사화

Fig. 9. A bathtub curve from the implemented BIST and its linear approximation results.

표 2. 직접 측정한 결과와 선형 근사화 추정 결과의 비교 (BER = 10^{-13})

Table 2. Comparison between direct measurement and linear approximation results (BER = 10^{-13}).

	RJ _{RMS} (ps)	DJ (ps)	Timing margin (ps)	Error (ps)	Error (UI)
BERT measurement results	-	-	109.2	0	0
Linear approximation	40.5	58	94.6	14.6	0.044

가내장측정법의 소요시간은 bathtub의 기울기와 최초 측정 간격에 따라 달라 질 수 있지만, 낮은 BER영역에서 다수의 지점을 실측정하는 시간과 비교하면 매우 짧다. 3Gbps 신호를 전송하는 가운데, 95% 신뢰 수준에서 BER 10^{-13} 에 대한 시간마진을 직접 측정하는데 걸리는 시간이 약 5.56시간인데 비해, 제안한 자가내장측정법을 통해 시간마진을 추정하는 경우 추정시간을 수 초 이내로 단축시킬 수 있다.

지금까지 설명한 시간마진 측정법은 기본적으로 높은 BER영역의 측정 결과를 기반으로 낮은 BER영역의 시간마진을 추정하는 방법이다. 낮은 BER영역의 시간마진을 실측해야하는 요구 사항이 있을 경우, 추정된 시간지점에서 BER을 직접 측정할 필요가 있다. 하지만, 제안한 추정법을 이용하여 목표 BER의 샘플링 지점을 추정된 후에 그 지점에서 BER을 측정하여 시간마진을 확인하는 것은, 전반적인 bathtub에 관한 정보가 없는 상태에서 목표 BER를 찾아 시간마진을 측정하는 경우보다 일반적으로 10분의 1 이하의 시간이 소요된다.

V. 결 론

본 논문에서는 기존의 고속 인터페이스에서의 데이터 신호 BER 관련 이론과 시간마진 가속 추정법을 기반으로, 간단하고 정확하게 시간마진 추정이 가능한 선형 근사화 추정법을 제안하였다. 선형 근사화 추정법은 기존의 가속 추정법인 Q-factor를 이용한 추정법과 같은 기반 이론에서 비롯하지만, 시간마진 추정에 필요한 보간을 하기에 적합한 형태이다. 이러한 가속 추정법의 신뢰성과 시간 단축 효과를 검증하기 위해, 데이터 추출과 보간을 위한 알고리즘을 하드웨어로 구현하였

다. 실험은 3Gbps, 95% 신뢰 수준에서 오류율 10^{-13} 의 시간마진을 측정하는 것을 목표로 진행하였다. 가속 자가내장측정법의 선형 근사화 추정법을 이용하여 추정된 결과 값은 하드웨어 내부 BERT로 직접 측정된 결과 값과 0.044UI의 작은 오차를 가지면서, BER 10^{-13} 의 시간마진을 직접 측정하는데 걸리는 시간 약 5.56시간을 수초 이내로 단축 시켰다. 결과적으로 고가의 외부 BERT 없이, 낮은 BER 영역대의 시간마진 측정을 고속으로 할 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] Jung-Hoon Chun, "High speed interface circuit design and test schemes for memory systems," *Korea Information and Communications Society*, December 2008.
- [2] Seong-Won Kang, Jung-Hoon Chun, Young-Hyun Jun and Kee-Won Kwon, "A Study on Accelerated Built-in Self Test of Multi-Gb/s High Speed Interfaces," *IEEE Networked Embedded Systems for Enterprise Applications (NESEA)*, Dec. 2011.
- [3] "J-BERT N4903B High-Performance Serial BERT User Guide," Agilent, pp. 27-28 <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/N4903-91021.pdf>
- [4] Yongquan Fan, "Accelerating Jitter and BER Qualifications of High Speed Serial Communication Interfaces," *Ph.D. Thesis, McGill University*, February 2010.
- [5] Y. Cai, S. Werner, G. Zhang, M. Olsen, and R. Brink, "Jitter Testing for Multi-Gigabit Backplane SerDes - Techniques to Decompose and Combine Various Types of Jitter," *Proceedings of IEEE International Test Conference*, pp. 700-709, 2002.
- [6] Frédéric Leens, "An Introduction to I2C and SPI Protocols," *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, pp. 8-13, February 2009.
- [7] "Virtex-5 FPGA RocketIO Characterization Platform," *XILINX ML52x User Guide*, UG225 (v2.1) August 4, 2010.

저 자 소 개



노 준 완(학생회원)
2011년 성균관대학교 전자전기
공학부 학사 졸업
2011년~현재 성균관대학교
정보통신공학부 석사과정

<주관심분야 : High-speed serial link, 아날로그/
디지털 Mixed mode 설계>



전 정 훈(정회원)
2006년 Stanford Univ.
전기공학과 박사 졸업.
2006년~2008년 Rambus Inc.
2008년~현재 성균관대학교
정보통신공학부 부교수

<주관심분야 : High-speed serial link,
Mixed-signal 설계, ESD 및 신뢰성 연구>



권 기 원(정회원)
2001년 Stanford Univ.
재료공학과 박사 졸업.
2001년~2006년 삼성전자(주)
DRAM개발실 수석연구원
2007년~현재 성균관대학교
정보통신공학부 부교수

<주관심분야 : 메모리IP, 아날로그/디지털 Mixed
mode 설계>