

페이지 쉬프터를 갖는 LFSR기반의 PRPG

조성진* · 최언숙** · 황윤희* · 권민정* · 김진경* · 임지미* · 허성훈***

*부경대학교 · ** 동명대학교 · ***김해대학

LFSR-based PRPG with phase shifters

S.J. Cho* · U.S. Choi** · Y.H. Hwang* · M.J. Kweon* · J.G. Kim* · J.M. Yim* · S.H. Heo***

*Pukyong National University · ** Tongmyong University · ***Gimhae College

E-mail : sjcho@pknu.ac.kr

요 약

패턴생성기로 LFSR은 기계 자체에 고유의 선형의존성이 있어 패턴을 생성할 때 bit의 위치를 이동시켜 수열을 생성하기 때문에 생성되는 패턴들의 상관관계가 높고 따라서 오류 검출률이 낮아지게 된다. 이런 문제점을 해소하기 위하여 LFSR은 scan chain 사이에 XOR 게이트의 조합으로 구성된 페이지 쉬프터를 장착하여 출력 테스트 패턴의 난수성을 높임으로써 LFSR 고유의 선형의존성을 줄이고 오류검출률을 높이는 연구가 활발히 진행되어 왔다. 본 논문에서는 PRPG로서 LFSR의 난수성을 높이기 위하여 LFSR에 장착할 수 있는 새롭고 효과적인 페이지 쉬프터를 구성하는 방법을 제안한다.

ABSTRACT

Since an LFSR as a pattern generator has solely linear dependency in itself, it generates sequences by moving the bit positions for a pattern generation. So the correlation between the generated patterns is high and thus reduces the possibility of fault detection. To overcome these problems many researchers have studied to have goodness of randomness between the output test patterns. In this paper, we propose the new and effective method to construct phase shifter as PRPG.

키워드

페이지 쉬프터, 위상이동차, LFSR, BIST, PRPG

1. 서 론

BIST(Built-in Self Test)는 디지털 시스템을 검사하는데 있어 그동안 사용되던 외부장착 검사기에 대한 대안이다. 이는 자체검사회로를 내장하므로 소요면적이 커지는 단점이 있지만 검사에 따른 복잡도가 크게 줄고 모듈별로 가장 적합한 검사가 가능하다. 또한 비용면에 있어서도 비싼 외부 검사장치를 쓰지 않고서도 빠른 시간 내에 검사를 완료할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 그런데 패턴생성기로 LFSR은 기계 자체에 고유의 선형의존성이 있어 패턴을 생성할 때 난수성

이 떨어진다[1]. LFSR은 bit의 위치를 이동시켜 수열을 생성하기 때문에 생성되는 패턴들의 상관관계가 높고 따라서 오류 검출률이 낮아지게 된다. 이런 문제점을 해소하기 위하여 LFSR은 scan chain 사이에 XOR 게이트의 조합으로 구성된 페이지 쉬프터를 장착하여 출력 테스트 패턴의 난수성을 높임으로써 LFSR 고유의 선형의존성을 줄이고 오류검출률을 높이는 연구가 활발히 진행되어 왔다[2,3]. Rajski와 Tyszer는 조직적인 페이지 쉬프터를 자동으로 합성하는 방법을 처음으로 제안하였다[2]. 페이지 쉬프터는 패턴생성기와 scan chain 사이에 장착된 XOR 게이트들의 네트워크이다. 페이지 쉬프터의 주된 기능은 (1) 각 채널에서 출력되는 이진 수열간의 원하는 최소 위상 이동차 값을 보장하는 것 (2) 패턴생성기의 구조적인 의존성을 제거하는 것 (3) 어떤 입의 두 채널에서 출력되는 이진 수열의 선형의존성을 줄이는 것이다. Kagaris는 페이지 쉬프터에서 사용

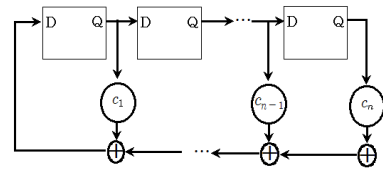
본 연구는 2009년도 정부재원(교육과학기술부 인문사회 연구역량강화사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원(KRF-2009-371-B00008)에 의해 수행하였습니다.

되는 탭 수의 상한선과 패턴생성기로 만들어진 단계들 사이의 위상이동차의 하한선을 정하고 선형유한상태기계의 종류에 상관없이 사용될 수 있는 페이지 쉬프터를 제시했다[4].

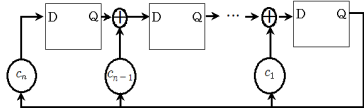
본 논문에서는 PRPG로서 LFSR의 난수성을 높이기 위하여 LFSR에 장착할 수 있는 새롭고 효과적인 페이지 쉬프터를 구성하는 방법을 제안한다. 이 방법은 기존의 방법에 비해 구현하는 것이 상당히 능률적이고 빠르다.

II. 배경지식 및 기존 연구

BIST기법을 이용하여 회로를 검사하기 위해서는 검사입력을 자체 생성해 내어야 한다. LFSR은 플리플롭과 XOR 게이트로 구성되는데 특성다항식을 원시다항식으로 갖는 LFSR을 사용하면 모든 검사입력이 같은 확률로 생성되며 반복되지 않도록 하는 의사 임의의 검사입력(pseudo random test pattern)을 생성할 수 있다. 이러한 LFSR은 XOR의 위치에 따라 2가지로 나타내는데 그림 1과 같다. 여기서 c_i 는 이진 상수로 $c_i = 0$ 은 끊어짐 상태를 1은 연결된 상태를 나타낸다. LFSR은 입력순서에 따라 출력순서와 출력부호를 결정하는 특성다항식을 갖는데 그림 1(a)에서 특성다항식은 $c(x) = 1 + c_1x + c_2x^2 + \dots + c_nx^n$ 으로 정의된다.



(a) 외부 XOR를 이용한 LFSR



(b) 내부 XOR를 이용한 LFSR

그림 1. LFSR구조

n 개의 플리플롭으로 구성된 n 차 LFSR의 상태전이는 동반행렬과 초기 상태벡터를 이용하여 표현할 수 있다. n 차 원시다항식 $c(x) = 1 + c_1x + c_2x^2 + \dots + c_{n-1}x^{n-1} + x^n$ 를 특성다항식으로 갖는 외부 XOR LFSR의 동반행렬 M_e 와 내부 XOR LFSR의 동반행렬 M_i 는 다음과 같다.

$$M_e = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \\ c_0 & c_1 & c_2 & \dots & c_{n-2} & c_{n-1} \end{bmatrix}, M_i = \begin{bmatrix} c_{n-1} & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ c_{n-2} & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ c_{n-3} & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ c_1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \\ c_0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

X_i 가 시간 i 에서의 LFSR의 상태벡터라 하면 다음 상태 X_{i+1} 은 $X_{i+1} = M_e X_i$ 또는 $X_{i+1} = M_i X_i$ 이다. 예를 들어 특성다항식이 $c(x) = x^4 + x + 1$ 인 LFSR의 동반행렬은 다음과 같다.

$$M = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

M 에 의한 $(1, 0, 0, 0)^t$ 의 다음 상태는 $M(1, 0, 0, 0)^t = (0, 0, 1, 1)^t$ 이다. 여기서 이렇게 얻어진 상태들을 행벡터로 나열하면 다음과 같다.

[표 1] 4차 LFSR의 상태전이

	0	1	2	3
0	0	0	1	1
1	0	1	1	0
2	1	1	0	0
3	1	0	1	1
4	0	1	0	1
5	1	0	1	0
6	0	1	1	1
7	1	1	1	0
8	1	1	1	1
9	0	1	0	1
10	1	0	0	1
11	0	0	0	1
12	0	0	1	0
13	0	1	0	0
14	1	0	0	0

여기서 각 열은 같은 4차 원시다항식에 의해 생성되는 최대주기 의사난수열이다. 임의의 두 열에서 출력된 수열을 비교하면 한 출력수열은 다른 출력수열의 위치를 이동함으로써 얻을 수 있다. 이것을 **위상이동차**라고 한다. 즉, 시간 t 에서 i 번째 열의 출력수열을 s_i^t 라 할 때, $s_j^{t+h} = s_i^t$ 를 만족하면 i 열에 대한 j 열의 위상이동차는 h 이다. 표 1의 열들 사이의 위상이동차는 첫째 열에 대한 둘째 열의 위상이동차는 1이고, 셋째 열에 대한 넷째 열의 위상이동차는 12이다. 이와 같이 LFSR은 구조적으로 각 셀에서 출력되는 출력수열 사이에 강한 상관관계를 가진다. 이러한 문제를 해결하기 위해 Kagaris는 페이지 쉬프터에서 사용되는 탭 수의 상한선과 패턴생성기로 만들어진 단계들 사이의 위상이동차의 하한선을 정하고 선형유한상태기계의 종류와 상관없이 적용할 수 있는 페이지 쉬프터 구성 알고리즘을 제안했다[4]. 주어진 LFSR에서 출력되는 수열사이에 최소한의 위상이동차(L)를 보장하면서 적절한 수준의 탭 수(B)로 이루어진 페이지 쉬프터를 설계하기 위해 Kagaris는 LFSR에 상태벡터(X_i)를 가지고 상태를 L 단 계만큼 전이시킨다. 이 때 얻은 상태벡터(X_L)의 1의 수가 B 이하이면 X_L 은 페이지 쉬프터(H)의 한 행이 된다. 그런데 X_L 의 1의 수가 B 를 초과하면 상태를 한 단계씩 전이시키면서 1의 수가 B 이하가 되는 상태벡터를 H 의 한 행으로 선택한다. 그러나 Kagaris가 제안한 방법은 원하는 페이지 쉬프터 H 를 구성하기 위하여 적절한 벡터를 선택하는 과정에서 부적합 벡터를 너무 많이 전이시키며 확인하는 과정을 거치게 된다. 따라서 이러한 문제점을 효과적으로 해결하는 방법을 다음 절에서 소개한다.

III. 페이지 쉬프터의 설계

LFSR은 구조적으로 선형의존성이 높기 때문에 페이지 쉬프터를 장착해서 출력 수열간의 상관관계를 낮춘다. 다음 정리는 행렬 H 가 기준 수열에 대해 L 이상의 위상이동차를 갖게 하는 페이지 쉬프터가 됨을 보인다.

<정리1[13]> 상태전이행렬 M 을 갖는 n 셀 LFSR이 B 이하의 탭 수와 연속적인 상태전이를 통해 얻은 연속된 열의 위상이동차가 L 이상 되게 하는 페이지 쉬프터는 다음의 $n \times n$ 행렬 H 이다.

$$H = \begin{bmatrix} h_{p_0} \\ h_{p_1} \\ \vdots \\ h_{p_{n-1}} \end{bmatrix}$$

여기에서 $h_{p_i} = x_0 M^{p_i}$ ($0 \leq i \leq n-1$), $p_0 = 0$, $x_0 = (100 \dots 0)$, $p_i - p_{i-1} \geq L$, $|h_{p_i}| \leq B$ 이다. 또한 p_i 는 1열과 $i+1$ 열 사이의 위상이동차이고, $|h_{p_i}|$ 는 h_{p_i} 의 탭 수이다. 즉, H 는 p_0, p_1, \dots, p_{n-1} 을 위상이동차로 갖는 페이지 쉬프터이다. □

n 차 원시다항식 $c(x) = x^n + c_{n-1}x^{n-1} + \dots + c_1x + 1$ 를 특성다항식으로 갖는 LFSR에 대해서 페이지 쉬프터의 탭 수는 B 이하, 연속된 열의 위상이동차는 L 이상이 되도록 하는 H 를 찾는 새로운 방법을 제안한다. 먼저 외부 XOR LFSR의 동반행렬은 다음과 같다.

$$M = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 0 \\ 1 & c_1 & c_2 & \dots & c_{n-2} & c_{n-1} \end{bmatrix}$$

특성다항식 $c(x)$ 와 M 을 이용하여 $M^L = c_{n-1}M^{n-1} + \dots + c_1M + d_0I$ ($c_i \in \{0, 1\}$, $0 \leq i \leq n-1$)로 나타낼 수 있다. M^L 을 구하기 위해 $x_0 = (100 \dots 0)$ 라 두면

$$M^2 = \begin{bmatrix} x_0 M^2 \\ x_0 M^3 \\ \vdots \\ x_0 M^{n+1} \end{bmatrix}, M^3 = \begin{bmatrix} x_0 M^3 \\ x_0 M^4 \\ \vdots \\ x_0 M^{n+2} \end{bmatrix}, \dots, M^{n-1} = \begin{bmatrix} x_0 M^{n-1} \\ x_0 M^n \\ \vdots \\ x_0 M^{2n-2} \end{bmatrix}$$

이다. 따라서 행렬의 곱셈을 하지 않더라도 $x_0 = (100 \dots 0)$ 를 초기값으로 하여 $2n-2$ 번의 상태전이를 통해 M^2, M^3, \dots, M^{n-1} 을 얻을 수 있고 이것으로 M^L 을 쉽게 구할 수 있다.

예제1 $c(x) = x^5 + x^2 + 1$ 을 특성다항식으로 하는 외부

XOR LFSR에 대한 전이행렬은 $M = \begin{bmatrix} 01000 \\ 00100 \\ 00010 \\ 00001 \\ 10100 \end{bmatrix}$ 이다. 특

성다항식에 의해 $M^5 = M^2 + I$ 이고 $M^7 = M^4 + M^2$ 이다. 상태벡터 $x_0 = (10000)$ 을 8번 상태전이 시키면 $x_1 = (01000)$, $x_2 = (00100)$, $x_3 = (00010)$, $x_4 = (00001)$, $x_5 = (10100)$, $x_6 = (01010)$, $x_7 = (00101)$, $x_8 = (10110)$

이므로 $M^2 = \begin{bmatrix} x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 00100 \\ 00010 \\ 00001 \\ 10100 \\ 01010 \end{bmatrix}$, $M^4 = \begin{bmatrix} x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 00001 \\ 10100 \\ 01010 \\ 00101 \\ 10110 \end{bmatrix}$ 이

고 $M^7 = \begin{bmatrix} 00101 \\ 10110 \\ 01011 \\ 10001 \\ 11100 \end{bmatrix}$ 이다.

□

그림2는 32차 원시다항식 $x^{32} + x^{16} + x^7 + x^2 + 1$ 을 특성다항식으로 갖는 LFSR의 상태전이를 나타낸 것이다. 여기서 LFSR은 구조적으로 선형의존성이 높아서 난수성이 낮은 패턴을 생성함을 확인할 수 있다.



그림2. 32차 원시다항식을 특성다항식으로 갖는 LFSR의 상태 전이

이러한 LFSR의 구조적 약점 때문에 LFSR에 페이지 쉬프터를 장착하는 연구가 이루어졌다. 특히 Kagaris는 [4]에서 선형유한상태기계의 종류에 상관없이 사용할 수 있는 통합된 방법을 제시 하였다. 그러나 Kagaris의 방법을 LFSR에 적용함에 있어 선택된 벡터의 1의 수가 B 를 초과하면, 1단계씩 상태전이를 시키면서 생성되는 벡터가 원하는 조건을 충족시키는지 확인한다. 그러나 LFSR은 그림2와 같이 다음 상태에서 각 비트의 값들이 한 비트씩 이동되면서 상태가 전이되기 때문에 조건을 충족하지 않는 벡터가 연이어 발생하게 된다. 그런데 표2에서 제안된 알고리즘에 따라 H 를 구성하면, Kagaris의 방법에 따라 H 를 구성하는 것보다 충족되지 않는 벡터를 선택하게 되는 단계를 효과적으로 줄일 수 있으므로 페이지 쉬프터를 훨씬 빨리 구성할 수 있다. 다음은 주어진 n 셀 LFSR에 대하여 위상이동차 L 과 탭수 B 가 주어질 때 H 를 구성하는 알고리즘이다.

[표2] phase shifter H 구성 알고리즘

입력: B, L, M^L , 출력: H
Step1) 초기벡터 x_0 를 H 의 1행으로 둔다.
Step2) $x_0 = x_0 M^L$ 을 계산한다.
Step3) x_0 의 1의 수가 B 이하이고 H 에 이미 선택된 벡터가 아니면 H 의 다음 행으로 선택한다.
Step4) H 의 선택된 벡터수가 n 보다 작으면 Step2로 간다.

예제2 $c(x) = x^5 + x^2 + 1$ 를 특성다항식으로 갖는 외부

XOR LFSR에 대하여 $M = \begin{bmatrix} 01000 \\ 00100 \\ 00010 \\ 00001 \\ 10100 \end{bmatrix}$ 이다.

$B=2, L=7$ 을 만족하는 5×5 페이지 쉬프터 H 를 구성

하자. 먼저 예제1에 의해서 $M^T = \begin{bmatrix} 00101 \\ 10110 \\ 01011 \\ 10001 \\ 11100 \end{bmatrix}$ 이다. Step1에

의해서 (10000)을 H 의 1행으로 둔다. Step2에 의해서 $(10000)M^T = (00101)$ 이다. 이것은 1의 수가 2 이하이고 H 에 이미 선택된 행이 아니므로 Step3에 의해서 H 의 2행으로 채택한다. Step4에 의해서 Step2로 간다. Step2 의해서 $(00101)M^T = (10111)$ 이고 이것은 1의 수가 4 이므로 조건을 만족하지 않는다. 그러면 다시 Step2로 돌아가서 $(10111)M^T = (00011)$ 을 얻는다. 이는 주어진 조건을 만족하므로 3행으로 둔다. 이러한 방법으로 5행까지 구하면 7, 21, 4, 18번째 벡터가 사용되는 페이지 쉬

프터 $H = \begin{bmatrix} 10000 \\ 00101 \\ 00011 \\ 00001 \\ 11000 \end{bmatrix}$ 가 얻어진다. □

$c(x) = x^5 + x^2 + 1$ 를 특성다항식으로 갖는 외부 XOR LFSR에 대하여 제안된 방법으로 구성된 페이지 쉬프터를 H_1 , Kagaris의 방법에 의해 7, 18, 29, 5번째 벡터로 구성된 페이지 쉬프터를 H_2 라 하면 H_1, H_2 는 다음과 같다.

$$H_1 = \begin{bmatrix} 10000 \\ 00101 \\ 00011 \\ 00001 \\ 11000 \end{bmatrix}, \quad H_2 = \begin{bmatrix} 10000 \\ 00101 \\ 11000 \\ 10010 \\ 10100 \end{bmatrix}$$

표3에서 보는 것과 같이 H_1 에 의해서는 부적합벡터가 3번 발생하고, H_2 에 의해서는 부적합벡터가 8번 발생한다. 표3은 제안된 방법이 Kagaris의 방법과 비교하여 부적합벡터 수가 적음을 보여준다.

그림3은 제안한 방법에 의하여 특성다항식이 $c(x) = x^{32} + x^{16} + x^7 + x^2 + 1$ 인 LFSR에 탭 수가 3이하이고 위상이동차가 3000이상인 페이지 쉬프터를 장착하여 전이시킨 출력수열의 그림이다. 여기서 검은 점은 상태가 1이고, 흰 점은 상태가 0임을 나타낸다. 이는 페이지 쉬프터에 의하여 각 출력 값의 선형 의존성이 낮아지고 상대적으로 난수성이 높아졌음을 알 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 특성다항식을 원시다항식으로 갖는 LFSR을 사용하여 의사 임의의 검사입력을 생성하는데 있어 어떤 임의의 두 채널에서 출력되는 이진 수열의 선형 의존성을 줄이기 위한 방법으로 적절한 탭 수를 유지하며 최소의 위상이동차를 보장하는 페이지 쉬프터를 갖는 LFSR 기반의 PRPG를 제안했다. 제안된 알고리즘에 따라 페이지 쉬프터를 구성하면, Kagaris의 방법에 따라 페이지 쉬프터를 구성하는 것보다 충족되지 않는 벡터를 선택하게 되는 단계를 효과적으로 줄일 수 있으므로 페이지 쉬프터를 훨씬 빨리 구성할 수 있다.

[표3] 부적합벡터의 수 비교

Cyc	$x_0^T M^k$	제안한 방법	Kagaris의 방법
0	10000	←1	←1
1	01000		
2	00100		
3	00010		
4	00001	←4	
5	10100		←5
6	01010		
7	00101	←2	←2
8	10110		
9	01011		
10	10001		
11	11100	부적합벡터3	
12	01110		
13	00111		
14	10111	부적합벡터1	부적합벡터1
15	11111		부적합벡터2
16	11011		부적합벡터3
17	11001		부적합벡터4
18	11000	←5	←3
19	01100		
20	00110		
21	00011	←3	
22	10101		
23	11110		
24	01111		
25	10011		부적합벡터5
26	11101		부적합벡터6
27	11010		부적합벡터7
28	01101	부적합벡터2	부적합벡터8
29	10010		←4
30	01001		

*←i : H의 i번째 행

*부적합벡터i : 1의 갯수가 B보다 큰 i번째 벡터



그림3. 페이지 쉬프터를 장착한 32차 LFSR의 상태 전이

참고문헌

- [1] P.H. Bardell, and W.H. McAnney, "Pseudorandom arrays for built-in tests," IEEE Trans. Comput., vol. C-35, no. 7, pp. 653-658, 1986.
- [2] J. Rajski, and J. Tyszer, "Design of phase shifters for BIST applications," in Proc. VLSI Test Symp., pp. 218-224, 1998.
- [3] J. Rajski, N. Tamarapalli, and J. Tyszer, "Automated synthesis of large phase shifters of large phase shifters for built-in self-test," in Proc. Int. Test Conf., pp. 1047-1056, 1998.
- [4] D. Kagaris, "A Unified Method for Phase Shifter Computation," ACM Trans. on Des. Auto. Electron. Syst., vol. 10, no. 1, pp. 157-167, 2005.