ИНФОРМАТИКА

2007 январь-март № 1

УДК 621.37

И.А. Мурашко

МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕГО ГЕНЕРАТОРА ПСЕВДОСЛУЧАЙНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ МАКСИМАЛЬНОЙ ДЛИНЫ

Предлагается новый подход к синтезу генератора псевдослучайных тестовых последовательностей, который позволяет формировать на одном генераторе псевдослучайные последовательности с различной частотой. Основная идея подхода заключается в выборке нескольких символов М-последовательности в течение одного такта синхронизации. Это позволяет проводить параллельное тестирование на рабочих частотах функциональных модулей с различным быстродействием.

Введение

Бурный прогресс в микроэлектронике привел к тому, что большинство разрабатываемых цифровых устройств реализуются в виде систем на кристалле (SoC – System-on-a-Chip) [1]. Данный подход позволяет достичь компактности и высокой производительности изделий вычислительной техники. В то же время значительно усложнилась проверка работоспособности таких систем. Как показано в работе [2], наилучшие результаты достигаются при тестировании схемы на рабочих частотах (at-speed testing) при помощи средств встроенного самотестирования, в связи с тем что обнаруживаются как статические (константные), так и динамические неисправности.

Основным элементом любой системы встроенного самотестирования является источник тестовых воздействий. Большинство подобных систем в качестве тестовых воздействий применяют псевдослучайные последовательности максимальной длины или М-последовательности [3]. В качестве генератора М-последовательности используется, как правило, линейный сдвиговый регистр с сумматорами по модулю два в цепи обратной связи. Для увеличения разрядности генератора обычно применяют цепь сканирования.

В работе [4] для удвоения частоты генерации тестовых воздействий предложена методика, основанная на выборке двух символов М-последовательности в течение одного такта синхронизации. В данной работе эта идея распространяется на произвольный случай, когда частота формирования увеличивается в несколько раз. Показано, что при этом формируется М-последовательность, определяемая полиномом той же самой степени, что и исходная. Доказана теорема о взаимосвязи фазовых сдвигов исходной и ускоренной последовательностей.

1. Методика формирования нескольких символов М-последовательности при помощи мультиплексора

Для удобства изложения применим следующие обозначения из работы [5]. Пусть a_i – i-й символ М-последовательности, определяемой порождающим полиномом $\varphi(x)$ степени m. Будем считать, что порождающий полином является примитивным. Саму М-последовательность, начинающуюся с i-го символа, будем обозначать $\{a_i\} = a_i, a_{i+1}, a_{i+2}, \ldots, a_{L-1}, a_0, a_1, \ldots, a_{i-1}$, где $i = \overline{0, L-1}$, $L = 2^m - 1$ – период М-последовательности. Среди этих последовательностей существует характеристическая последовательность [6], для которой справедливо выражение $a_i = a_{2i}$ для любого $i = \overline{0, L-1}$. В дальнейшем будем обозначать ее $\{a_0\}$.

Выборку q-х элементов М-последовательности, начиная с элемента a_i (или децимацию $\{a_i\}$ по индексу q), будем обозначать через $\{a_i\}^q$. В результате децимации формируется некоторая последовательность $\{b_j\} = a_i, a_{i+q}, a_{i+2q}, \ldots, a_{i+(L-1)q}$. Если период исходной М-последовательности L и коэффициент децимации q взаимно просты – $(L, q) = 1$, децимация называется собственной или нормальной. Новая последовательность $\{b_j\}$ является М-последовательностью, определяемой примитивным полиномом той же самой степени, что и исходная [7]. В дальнейшем под децимацией будем подразумевать только собственную (или нормальную) децимацию, в результате которой получается М-последовательность того же периода. Таким образом, можно записать: $\{a_i\}^q = \{b_j\}$, причем $\{a_i\}$ определяется полиномом $\varphi(x)$, $\{b_j\}$ – полиномом $\psi(x)$, $deg\ \varphi(x) = deg\ \psi(x)$.

В данной работе для формирования М-последовательности с увеличенной в d раз частотой (удвоенной, утроенной, учетверенной и т. д.) предлагается использовать следующий подход. Возьмем М-последовательность $\{a_0\}$, определяемую полиномом $\varphi(x)$, и на ее основе сформируем d сдвинутых копии. В течение периода тактового импульса из этих копий выбираются d символов. Последовательность выборки символов определяется следующим образом. Первым выбирается первый символ из характеристического сдвига $\{a_0\}$, т. е. $b_0 = a_0$, затем первый символ из некоторого сдвига $\{a_x\}$, т. е. $b_1 = a_x$. Далее $b_2 = a_{2x}$, $b_3 = a_{3x}$, …, $b_{d-1} = a_{(d-1)x}$. Затем в той же последовательности выбираются вторые символы, т. е. $b_{dx}=a_1$, $b_{dx+1}=a_{x+1}$ и т. д. Таким образом, новая последовательность $\{b_0\}$ формируется как децимация исходной последовательности $\{a_0\}$ по индексу x, т. е. $\{b_0\} = \{a_0\}^x$. Значение x может быть найдено из выражения $b_{dx} = a_1$, откуда $dx = 1\ mod\ L$.

Рассмотрим пример для случая удвоения частоты. Сформируем две копии М-последовательности $\{a_0\}$ и $\{a_x\}$, определяемой порождающим полиномом $\varphi(x) = x^5 \oplus x^2 \oplus 1$, и будем поочередно выбирать из них символы a_0, a_x, a_1, a_{x+1} и т. д. В этом случае $d = 2$, $L = 2^5 - 1 = 31$, поэтому из выражения $2x = 1\ mod\ 31$ находим $x = 16$. Таким образом, новая М-последовательность формируется как децимация $\{a_0\}$ по индексу 16, поэтому она определяется тем же самым порождающим полиномом [8]. В качестве исходной М-последовательности был взят характеристический сдвиг, поэтому новая последовательность также является характеристическим сдвигом [8]. Пример формирования М-последовательности показан на рис. 1. Для поочередной выборки символов может быть использован двухвходовой мультиплексор.

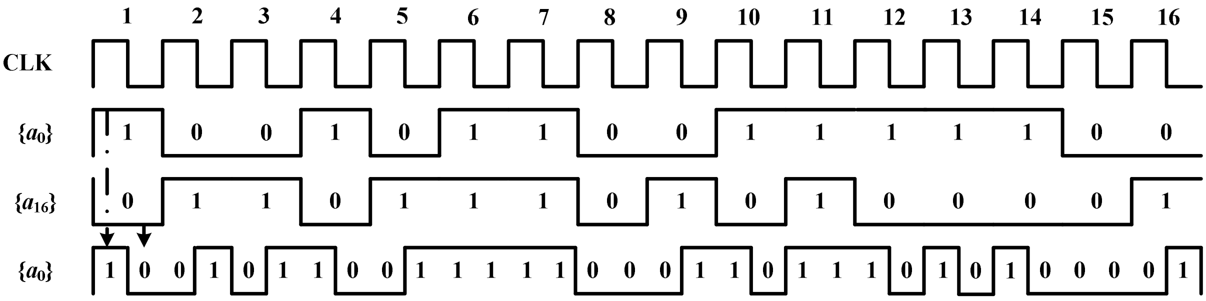

Рис. 1. Пример формирования М-последовательности с удвоенной частотой

Рассмотрим случай утроения частоты формирования М-последовательности. Возьмем М-последовательность $\{a_0\}$, определяемую полиномом $\varphi(x) = x^5 \oplus x^4 \oplus x^3 \oplus x^2 \oplus 1$, сформируем три сдвинутые копии $\{a_0\}$, $\{a_x\}$ и $\{a_{2x}\}$ и будем поочередно выбирать из них символы a_0, a_x, a_{2x}, a_1, … (рис. 2). В этом случае $d = 3$, $L = 2^5 - 1 = 31$, поэтому из выражения $3x = 1\ mod\ 31$ находим $x = 21$. Таким образом, новая М-последовательность формируется как децимация $\{a_0\}$ по индексу 21. Так как в качестве исходной М-последовательности был взят характеристический сдвиг, новая последовательность также является характеристическим сдвигом. Порождающий полином новой М-последовательности $\psi(x)$ может быть найден из следующего выражения [5]:

$$\psi(x) = det\left(V^q \oplus I \cdot x\right), \tag{1}$$

где V – порождающая матрица исходной последовательности; I – единичная диагональная матрица ранга m. Для примера на рис. 2 $\varphi(x) = x^5 \oplus x^4 \oplus x^3 \oplus x^2 \oplus 1$, поэтому $\psi(x) = x^5 \oplus x^2 \oplus 1$.

Докажем теорему для случая увеличения частоты формирования символов М-последовательности в произвольное число раз.

Теорема. *В результате поочередной выборки (начиная с i-го символа) из d сдвинутых на (1/d mod L) тактов копий М-последовательности $\{a_0\}$, определяемой порождающим полино-*

мом $\varphi(x)$ степени m, при выполнении условия $(L, d) = 1$ формируется с увеличенной в d раз частотой М-последовательность $\{b_j\}$, определяемая порождающим полиномом $\psi(x)$ той же степени m, где

$$j = d \cdot i \bmod L\,. \tag{2}$$

Здесь $L = 2^m - 1$, d – коэффициент умножения частоты $(d = 1, 2, 3, \ldots)$; $m = \deg\ \varphi(x) = \deg\ \psi(x)$, $\varphi(x)$ – порождающий полином исходной М-последовательности; $\psi(x)$ – порождающий полином новой М-последовательности.

Доказательство. Последовательность $\{b_j\}$ формируется как выборка (децимация) исходной последовательности по индексу ($1/d$ mod L), начиная с i-го элемента. Поэтому $\{b_j\} = \{a_i\}^{1/d \bmod L}$, но на основании теоремы 1 из работы [5] $\{a_i\}^{1/d \bmod L} = \{b_{i/(1/d) \bmod L}\} = \{b_{id \bmod L}\}$.

Таким образом, $j = i{\cdot}d \bmod L$, что и требовалось доказать.

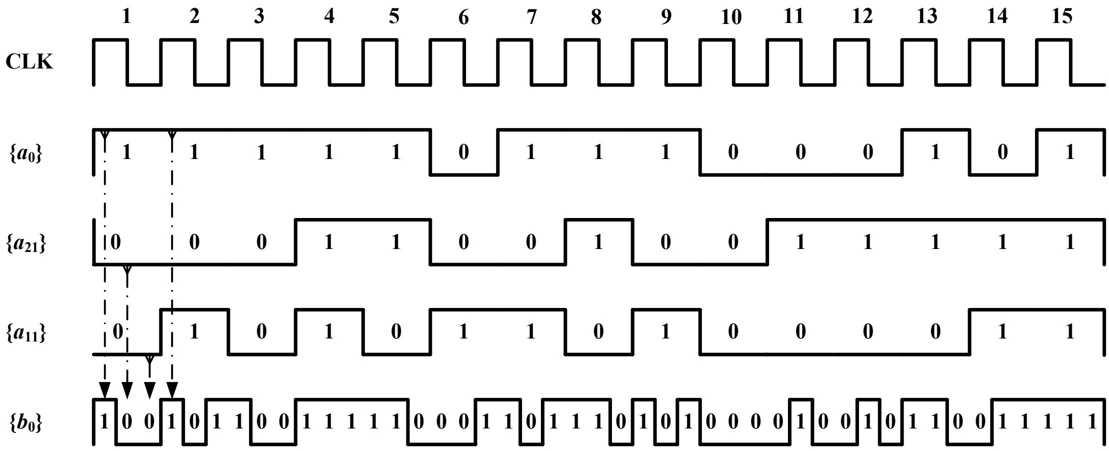

Рис. 2. Пример формирования М-последовательности с утроенной частотой

Порождающий полином новой последовательности находится из формулы (1). Для примера на рис. 2 $m = 5$, $L = 31$, $d = 3$, $I = 0$, $\varphi(x) = x^5 \oplus x^4 \oplus x^3 \oplus x^2 \oplus 1$, $\psi(x) = x^5 \oplus x^2 \oplus 1$, поэтому $j = 0$.

В рассмотренных примерах для формирования М-последовательности с удвоенной и утроенной частотами требуются копии исходной М-последовательности, сдвинутые на целое число тактов друг относительно друга. Методики синтеза генераторов, формирующих ускоренную в несколько раз М-последовательность [8, 9], основаны на суммировании по модулю два d сдвинутых ровно на L/d копий исходной М-последовательности. При этом возникает проблема формирования фазовых сдвигов, величина которых не является целым числом. Рассмотренный подход свободен от этого недостатка.

2. Методика проектирования генератора, формирующего несколько символов М-последовательности за один такт синхронизации

В общем случае при использовании данного подхода можно проектировать генераторы, формирующие последовательность с частотой в d раз выше, чем частота синхронизации LFSR, где $d = 1, 2, 3, \ldots$. Исключением является случай, когда не выполняется условие взаимной простоты периода М-последовательности L и коэффициента ускорения d. Поэтому методика проектирования генератора М-последовательности $\{a_0\}$, определяемой полиномом $\varphi(x)$ степени m, который формирует d символов за один такт синхронизации, может быть записана следующим образом.

1. Проверяется условие взаимной простоты $(L, d) = 1$, где $L = 2^m - 1$. Если условие не выполняется, то выбирается полином другой степени или другой коэффициент умножения частоты d.

2. Строится генератор, на выходах которого формируются d сдвинутых на ($1/d \bmod L$) тактов копии М-последовательности. Для этого строится порождающая матрица V ($\det(V \oplus I{\cdot}x) = \varphi(x)$) и

возводится в d-ю степень. На основании V^d строится структурная схема генератора. Новая М-последовательность $\{b_0\}$ формируется как децимация исходной М-последовательности $\{a_0\}$ (которая определяется порождающим полиномом $\varphi(x)$ степени m) по индексу d.

3. К соседним выходам генератора подключается d-входовой мультиплексор, по выходу которого в течение одного такта работы генератора формируются d символов М-последовательности $\{c_0\}$. М-последовательность $\{c_0\}$ формируется как децимация $\{b_0\}$ по индексу x, где $x = 1/d \; mod \; L$. Так как $\{b_0\} = \{a_0\}^d$, получим $\{c_0\} = \{b_0\}^{1/d \; mod \; L} = \{\{a_0\}^d\}^{1/d \; mod \; L} = \{a_0\}$. Таким образом, ускоренная М-последовательность определяется тем же самым порождающим полиномом $\varphi(x)$ степени m, что и исходная.

Рассмотрим пример. Пусть требуется получить ускоренную в три раза М-последовательность $\{a_0\}$, определяемую порождающим полиномом $\varphi(x) = x^5 \oplus x^2 \oplus 1$. В этом случае $d = 3$, $m = 5$, $L = 2^5 - 1 = 31$,

$$V = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \; \varphi(x) = \det(V \oplus I \cdot x) = \begin{vmatrix} x & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x \end{vmatrix} = x^5 \oplus x^2 \oplus 1 .$$

1. Проверяется условие взаимной простоты (31, 3) = 1.

2. Находится

$$V^3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

На основании V^3 строится структурная схема генератора (рис. 3). На его выходах формируются фазовые сдвиги М-последовательности $\{b_0\}$, определяемой полиномом $\psi(x) = \det(V^3 \oplus I \cdot x) = x^5 \oplus x^4 \oplus x^3 \oplus x^2 \oplus 1$.

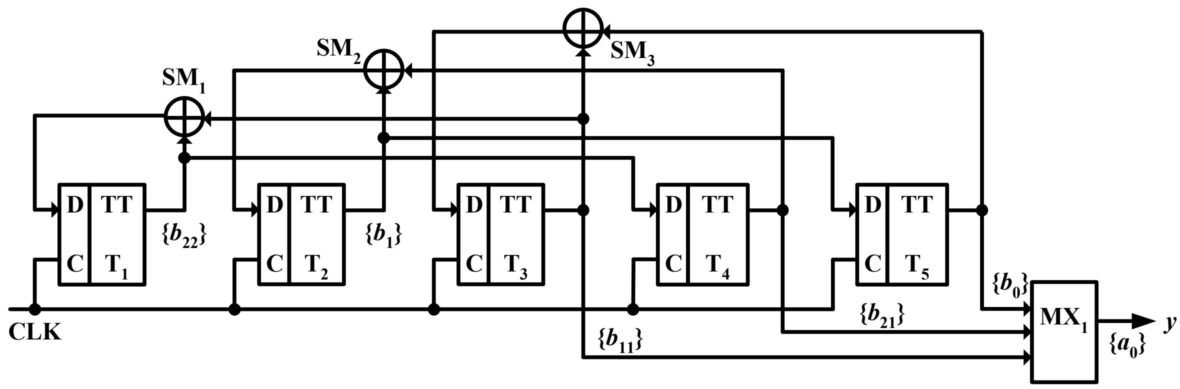

Рис. 3. Пример генератора, формирующего три символа М-последовательности за один такт синхронизации

3. К соседним выходам генератора подключается трехвходовой мультиплексор (MX_1 на рис. 3). Ускоренная М-последовательность $\{c_0\}$ формируется как децимация $\{b_0\}$ по индексу $x = 1/3 \; mod \; 31 = 21$. Так как $\{b_0\}$ формируется как децимация $\{a_0\}$ по индексу три, получим $\{c_0\} = \{\{a_0\}^3\}^{21} = \{a_0\}^{3 \cdot 21 mod 31} = \{a_0\}$. Таким образом, ускоренная М-последовательность определяется исходным порождающим полиномом $\varphi(x) = x^5 \oplus x^2 \oplus 1$.

Рассмотрим работу генератора на рис. 3. Пусть начальное состояние равно [01001]. Тогда на выходе пятого триггера формируется характеристический сдвиг М-последовательности $\{b_0\}$. На выходе четвертого триггера формируется сдвинутая на 21 такт копия этой М-последовательности $\{b_{21}\}$, соответственно, на выходе третьего триггера – $\{b_{42 \ mod \ 31}\} = \{b_{11}\}$. Подавая эти сдвинутые копии на входы мультиплексора MX_1, на его выходе получим характеристический сдвиг $\{a_0\}$. Временная диаграмма работы соответствует примеру на рис. 2.

Заключение

Предложен новый подход к синтезу генератора псевдослучайных тестовых последовательностей, который позволяет формировать на одном генераторе псевдослучайные последовательности с различной частотой. Можно отметить следующие отличительные особенности данного генератора. Во-первых, максимальная частота формирования символов псевдослучайной последовательности ограничивается только быстродействием выходного мультиплексора и практически не зависит от быстродействия остальных элементов генератора. Так, например, для формирования псевдослучайной последовательности с частотой 1 ГГц достаточно использования элементной базы, работающей на частоте 500 МГц, и коэффициента ускорения два. При этом на частоте 1 ГГц должен работать только выходной мультиплексор. Во-вторых, кроме ускоренных М-последовательностей, на выходах генератора формируются и М-последовательности с частотой тактовых импульсов. Это позволяет проводить параллельное тестирование на рабочих частотах модулей с различным быстродействием. В-третьих, анализ фазовых сдвигов М-последовательностей не требует трудоемких вычислений. В целом, предлагаемый подход позволяет значительно повысить эффективность проведения тестового эксперимента без ухудшения качества тестирования.

Список литературы

1. Rajsuman, R. System-on-a-Chip. Design and Test / R. Rajsuman. – Santa Clara: Advantest America R&D Center, Inc., 2000. – 294 p.

2. High-Frequency, At-Speed Scan Testing / X. Lin [et al.] // IEEE Design & Test of Computers. – September-October 2003. – P. 17–25.

3. Bardell, P.H. Built-in self-test for VLSI: pseudorandom techniques / P.H. Bardell, W. McAnney, J. Savir. – New York: John Wiley and Sons, 1987. – 354 p.

4. Мурашко, И.А. Анализ фазовых сдвигов М-последовательности, формируемой с удвоенной частотой / И.А. Мурашко // Доклады БГУИР. – 2005. – № 4 (12). – С. 93–95.

5. Ярмолик, В.Н. Методика проектирования генератора тестовых воздействий, основанного на свойстве децимации М-последовательности / В.Н. Ярмолик, И.А. Мурашко // Автоматика и вычислительная техника. – 1997. – № 1. – С. 44–56.

6. Golomb, S.W. Shift Register Sequences / S.W. Golomb. – San-Francisko: Holden Day, 1967. – 188 p.

7. Мурашко, И.А. Методы минимизации энергопотребления при самотестировании цифровых устройств / И.А. Мурашко, В.Н. Ярмолик. – Минск: Бестпринт, 2004. – 188 с.

8. Мурашко, И.А. Быстродействующий генератор псевдослучайных тестовых наборов / И.А. Мурашко, В.Н. Ярмолик // Микроэлектроника. – 2001. – Т. 30, № 1. – С. 68–76.

9. Chamzas, C.C. Parasitic Spectral Lines in High Speed Generation of Binary Maximum Length Sequences / C.C. Chamzas // IEEE Trans. On Communication. – 1978. – Vol. COM-26, № 6. – P. 922–925.

Поступила 12.09.06

Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники,
Минск, ул. П. Бровки, 6
e-mail: murashko@bsuir.unibel.by

I.A. Murashko

A HIGH-SPEED PSEUDORANDOM TEST SEQUENCE GENERATOR DESIGN TECHNIQUE

A new approach for designing a high-speed pseudorandom test sequence generator was proposed. The key idea of the approach is the design of a new structure to generate more than one new pseudorandom bit per one clock pulse. This allows to make parallel at-speed testing for circuits with different clock frequencies.