

УДК 681.325.36

**АНАЛИЗ ФАЗОВЫХ СДВИГОВ М-ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ,
ФОРМИРУЕМОЙ С УДВОЕННОЙ ЧАСТОТОЙ**

И.А. МУРАШКО

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь**Поступила в редакцию 12 января 2005*

Представлен анализ фазовых сдвигов M -последовательности, формируемой с удвоенной частотой при помощи схемы на основе мультиплексора.

Ключевые слова: M -последовательность, фазовый сдвиг, децимация.

Основным элементом любой системы встроенного самотестирования СБИС является источник тестовых воздействий. Большинство подобных систем используют для этой цели псевдослучайные последовательности максимальной длины (M -последовательности) [1]. В качестве генератора M -последовательности используется, как правило, линейный сдвиговой регистр с сумматорами по модулю два в цепи обратной связи. В [2] для снижения энергопотребления источника тестовых воздействий предлагается формировать M -последовательности с удвоенной частотой. В данной работе предлагается замена сумматора по модулю два и элемента задержки из [2] на мультиплексор. Показано, что при этом формируется та же самая M -последовательность, отличающаяся только значением фазового сдвига.

Для анализа будем использовать обозначения из [3]. Пусть $\{a_0\} = a_0 a_1 a_2 \dots a_{L-1}$ — характеристический сдвиг M -последовательности, определяемый порождающим полиномом $\varphi(x)$ степени m . Тогда $\{a_i\} = a_i a_{i+1} a_{i+2} \dots$ — сдвинутая на i тактов копия характеристического сдвига $\{a_0\}$. Запись $\{a_i\}^q$ означает формирование новой последовательности $\{a_j\}$ из q -х элементов $\{a_0\}$, начиная с a_i , т.е. $\{b_j\} = a_i a_{i+q} a_{i+2q} \dots$, или, в общем виде, $b_{j+k} = a_{i+kq}$, где $k=0,1,2,\dots$

В [4] показано, что если просуммировать по модулю два M -последовательности, сдвинутые ровно на половину периода друг относительно друга, то получим некоторый фазовый сдвиг той же самой M -последовательности, но формируемый с удвоенной частотой. На рис. 1,а M -последовательность $\{a_0\}$, определяемая порождающим полиномом $\varphi(x) = x^4 \oplus x \oplus 1$, суммируется со своей сдвинутой ровно на половину периода копией $\{a_{15/2}\}$ (период $L=2^4-1=15$). В результате получаем последовательность $\{a_3\}$, формируемую с удвоенной частотой, т.е. $\{a_0\} \oplus \{a_{15/2}\} = \{a_3\}$.

В работе [3] для формирования сдвинутых ровно на половину периода копий M -последовательности используется следующий подход. Сначала формируются копии, сдвинутые на $[L/2]$ друг относительно друга, где [...] — целая часть числа, L — период M -последовательности. Затем, используя элемент задержки, одна из копий задерживается на половину периода тактовых импульсов. В результате получим сдвинутые ровно на $L/2$ копии. Просуммировав их по модулю два, получим ускоренную в два раза M -последовательность. Схема удвоения частоты представлена на рис.1,б. В общем случае значение фазового сдвига ускоренной последовательности может быть определено на основании теоремы 2 из [3]:

$$j = 2 \cdot i + \left(\frac{\lfloor L/2 \rfloor + s}{\lfloor L/2 \rfloor + 1} - s \right) \bmod L. \quad (1)$$

Здесь i — фазовый сдвиг исходной последовательности, $L=2^m-1$, $\lfloor \cdot \rfloor$ — целая часть числа, $m=\deg \varphi(x)$, $\varphi(x)$ — порождающий полином M -последовательности, s находится из выражения $x^s = x \oplus 1 \bmod \varphi(x)$. Для примера на рис. 1, а: $i=0$, $L=2^4-1=15$, $\lfloor L/2 \rfloor=7$, $\varphi(x)=x^4 \oplus x \oplus 1$, $x^4 = x \oplus 1 \bmod \varphi(x)$, следовательно, $s=4$. Тогда $i = \left(\frac{7+4}{7+1} - 4 \right) \bmod 15 = \left(\frac{-21}{8} \right) \bmod 15 = \left(\frac{9}{8} \right) \bmod 15 = 3$.

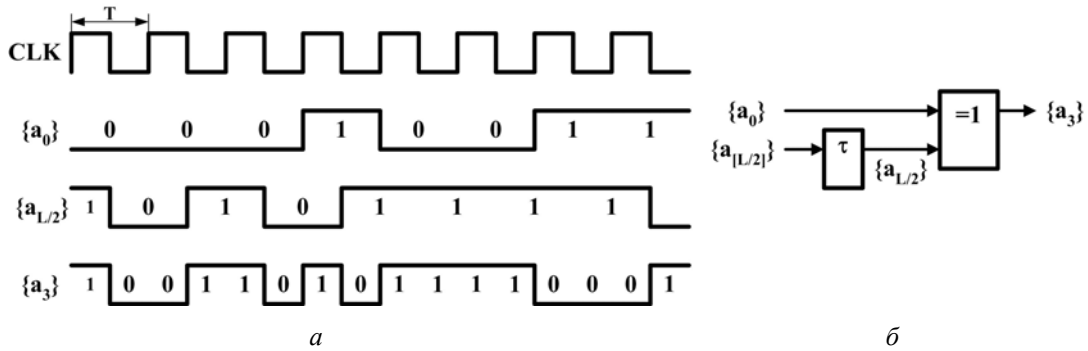


Рис. 1. Пример формирования M -последовательности с удвоенной частотой (а) и схема удвоения частоты на основе элемента "Исключающее-ИЛИ" (б)

Недостатком схемы на рис. 1, б является наличие элемента задержки на половину периода тактового импульса. Это не позволяет изменять тактовую частоту в процессе работы устройства. Сформируем две копии M -последовательности $\{a_0\}$ и $\{a_8\}$, определяемой порождающим полиномом $\varphi(x)=x^4 \oplus x \oplus 1$, и будем поочередно выбирать из них символы (рис. 2, а). В результате получаем последовательность $\{a_0\}$, формируемую с удвоенной частотой. Для выборки символов будем использовать двухвходовый мультиплексор (рис. 1, б). В данном случае для формирования M -последовательности с удвоенной частотой требуется две копии, сдвинутые на целое число тактов друг относительно друга. Методика формирования копий M -последовательности с таким фазовым сдвигом представлена в [5].

Теорема. В результате поочередной выборки символов из сдвинутых на $(\lfloor L/2 \rfloor + 1)$ тактов друг относительно друга копий M -последовательности $\{a_i\}$ и $\{a_{i+\lfloor L/2 \rfloor + 1}\}$ формируется с удвоенной частотой j -я копия исходной M -последовательности, причем

$$j = 2 \cdot i \bmod L. \quad (2)$$

Доказательство. Рассмотрим порядок формирования символов ускоренной M -последовательности (для удобства анализа обозначим ее $\{b_i\}$): $b_j = a_i$, $b_{j+1} = a_{i+\lfloor L/2 \rfloor + 1}$, $b_{j+2} = a_{i+1}$, $b_{j+3} = a_{i+\lfloor L/2 \rfloor + 2}$ и т.д. Таким образом, ускоренная последовательность формируется как выборка (децимация) $(\lfloor L/2 \rfloor + 1)$ -х элементов исходной последовательности, начиная с i -го элемента. В терминах децимации это можно записать $\{b_j\} = \{a_i\}^{\lfloor L/2 \rfloor + 1}$. Но так как $L=2^m-1$, то $\lfloor L/2 \rfloor + 1 = 2^{m-1}$. На основании теоремы 1 из [3] значение фазового сдвига находится из следующего выражения $\{a_i\}^q = \{b_{i/q \bmod L}\}$, где q — коэффициент децимации. Таким образом:

$$\{b_j\} = \{a_i\}^{2^{m-1}} = \{b_{i/2^{m-1} \bmod (2^m-1)}\} = \{b_{2 \cdot i \bmod (2^m-1)}\}.$$

Следовательно, $j=2 \cdot i \bmod L$, что и требовалось доказать.

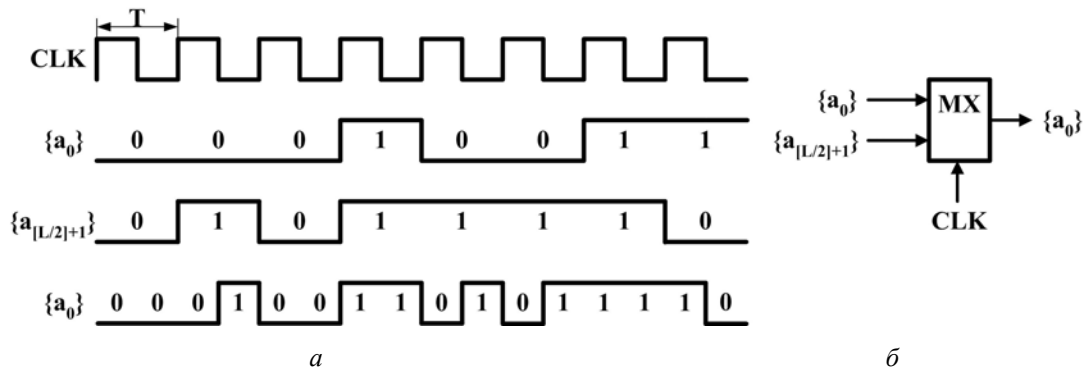


Рис. 2. Пример формирования M -последовательности с удвоенной частотой (а) и схема удвоения частоты на основе мультиплексора (б)

Применение мультиплексора для удвоения частоты формирования M -последовательности является более предпочтительным с точки зрения аппаратных затрат. Кроме того, в схеме на рис.2,б отсутствует элемент задержки, что позволяет изменять тактовую частоту в процессе работы. Трудоемкость вычисления фазовых сдвигов по выражению (1) гораздо выше, чем по (2), так как требует вычисления дискретного логарифма по модулю порождающего полинома.

M-SEQUENCE WITH DOUBLE FREQUENCY GENERATION PHASE-SHIFT ANALYSIS

I.A. MURASHKO

Abstract

This paper presents an analysis of phase-shifts of M -sequence, which is forming with double frequency on the base of multiplexer circuits.

Литература

1. Bardell P.H., McAnney W., Savir J. Built-in self-test for VLSI: pseudorandom techniques. New York, 1987.
2. Мурашко И.А., Ярмолик В. Н. // Автоматика и телемеханика. 2004. Т. 65, № 8. С. 102–114.
3. Мурашко И.А., Ярмолик В.Н. // Микроэлектроника. 2001. Т. 30, № 1. С. 68–76.
4. Chamzas C.C. // IEEE Trans. on Communication. 1978. Vol. COM-26, № 6. P. 922–925.
5. Ярмолик В.Н., Мурашко И.А. // Автоматика и вычислительная техника. 1997. №1. С.44–56.