УДК 681.32

Я.Ю. Королева[1], М.А. Мирошник[2]

[1] *Национальный технический университет «ХПИ», Харьков*
[2] *Украинская государственная академия железнодорожного транспорта, Харьков*

СИНТЕЗ ПРОВЕРЯЮЩИХ ТЕСТОВ ДЛЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЕЙ НА ОСНОВЕ ЦИКЛИЧЕСКИХ ОТЛИЧИТЕЛЬНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ

Проведен анализ методов синтеза проверяющих тестов однородной сети с наблюдаемыми выходами. Получены оценки нижних и верхних границ длины проверяющей последовательности для однородных сетей класса неисправностей F_1. Разработана методика проектирования С-тестируемых однородных сетей.

Ключевые слова: *телекоммуникационные системы и сети, однородная сеть, длина проверяющего теста, циклическая отличительная последовательность.*

Введение

Телекоммуникационные системы и сети являются частью инфраструктуры экономики государства и играют важную роль в жизни общества, определяя степень его развития. Анализируя тенденции в развитии телекоммуникационных сетей и систем, следует отметить их стремительное совершенствование, а, следовательно, совершенствование технологий изготовления радиоэлектронных компонентов и интеграции техники связи и вычислительной техники. Объединение средств телекоммуникаций со средствами обработки и хранения информации создает техническую основу информационного общества, призванного многократно увеличить интеллектуальные возможности человека. Информационные интеллектуальные системы, ядром которых являются сети связи, дают возможность в реальном масштабе времени обмениваться информацией любого объема, любого содержания потребителям, находящимся в любых точках мирового пространства.

С развитием беспроводных телекоммуникационных систем, мобильной аудио-видео, компьютерной техники проблема маршрутизации между отдельными узлами сети с минимальными временными и энергетическими затратами становится очень актуальной, а использование эффективных процедур маршрутизации в телекоммуникационной сети позволит дополнительно повысить характеристики отказоустойчивости и надежности.

Так как по своему происхождению понятия «телекоммуникационные сети» близки к «однородным структурам или сетям» и обозначают их гомогенную аппаратную реализацию, то в дальнейшем в статье будет использоваться аббревиатура «однородная сеть».

Анализ работ в области тестового диагностирования однородных сетей показал, что во всех работах определены необходимые и достаточные условия L и C тестируемости сети, получены оценки длины проверяющих экспериментов, предложены методы преобразования ячейки сети, упрощающие процедуру тестового диагностирования [1 – 5].

Целью данной статьи является разработка метода синтеза проверяющих тестов однородной сети с наблюдаемыми выходами x_i', у которых автоматные модели ячеек имеют отличительные последовательности и являются сильносвязными автоматами.

Получить оценки нижних и верхних границ длины проверяющей последовательности для однородных сетей рассматриваемого класса и разработать методику проектирования С-тестируемых однородных сетей [6, 7].

Постановка задачи

В данной статье рассмотрим одномерную однородную сеть с наблюдаемыми выходами x_i', которая состоит из p ячеек комбинационного типа, рис. 1.

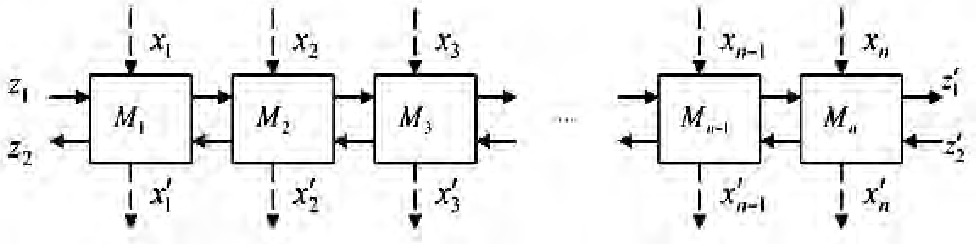


Рис. 1. Структура одномерной сети

Входы однородной сети $z(1), x(1), x(2), ... x(p)$ запитываются логическими переменными, а реакция на их приложение наблюдается непосредственно на выходах $x'(1), x'(2), ... x'(\eth), z'(p)$.

Основные обозначения и определения

Пусть $\alpha_1 \sim x(1)$ обозначает приложение логической переменной (набора логические переменных при наличии нескольких входных полюсов x в ячейке сети) к входному полюсу (полюсам) $x(1)$.

Вектор $V_j = \{z_1, \alpha_1, \alpha_2, ..., \alpha_p\}$ представляет двоичный входной набор, в котором $z_1 \sim z(1)$, $\alpha_1 \sim x(1)$, $\alpha_2 \sim x(2)$, …, $\alpha_p \sim x(p)$.

Вектор $V_i = \{z_1, (\alpha_1, \alpha_2, ..., \alpha_k)^*\}$ представляет двоичный входной набор, в котором $z_1 \sim z(1)$, $\alpha_1 \sim x(1)$, $\alpha_2 \sim x(2) \ldots \alpha_k$, $\alpha_1 \sim x(k+1)$. Таким образом, входные полюсы однородной сети записываются циклическими повторяющимися логическими переменными (или наборами переменных) $\alpha_1, \alpha_2, ... \alpha_k$.

Пусть необходимо проверить правильность перехода $\delta_{ij}(z_i, x_j) = z_a$ в ячейке M(1) сети, которая имеет отличительную последовательность X_0. Проверяющий входной набор построим в следующем виде

$$V(\delta_{ij}) = \{z_i, (x_j X_0 T(z_i))^*\}, \tag{1}$$

где $T(z_i)$ – переводящая последовательность, которая переводит автомат из состояния $\delta(z_i, x_j x_0) = q_0$ в состояние z_i.

Действительно, состояние z_a на выходе ячейки M(1) различается от множества других состояний Z/z_a по реакции последующих ячеек, к которым приложена отличительная последовательность X_0, что обеспечивается наличием в сети наблюдаемых выходов x_i' и свойствами отличительных последовательностей.

Пусть входной набор $x_j X_0 T(z_i)$, прикладываемый к входам x сети, состоит из «k» входных символов. Так как этот набор циклически повторяется и состояние k-й ячейки

$$z'_k = \delta(x_j, X_0 T(z_i)) = z_i,$$

то приложение $V(\delta_{ij})$ к входам сети позволяет проверить правильность переходов δ_{ij} в ячейках

$$M(1), M(k+1), M(2k+1), M(3k+1).$$

Определение 1. Входной набор $V(\delta_{ij})$, определяемый выражением (1), будем называть циклической отличительной последовательностью одномерной однородной сети с наблюдаемыми выходами x_i'.

Известно, что в любом сильносвязном автомате с n состояниями существует множество переводящих последовательностей $T(z_i), i = \overline{1, n}$, длина которых не превышает $(n-1)$ [8].

Учитывая, что минимальная верхняя граница длины отличительной последовательности не превышает $\frac{n \cdot (n-1)}{2}$, а минимальная нижняя граница $\left\lceil \frac{\log_2 n}{\log_2 r} \right\rceil$, где $r = |y|$ [8], из (1) верхняя граница длины циклической отличительной последовательности $|V(\delta_{ij})|$ определяется неравенством:

$$|V(\delta_{ij})| \le 1 + \frac{n(n-1)}{2} + (n-1) \le \frac{n}{2}(n+1). \tag{2}$$

Минимальная нижняя граница длины циклической отличительной последовательности $|V(\delta_{ij})|$ равна

$$|V(\delta_{ij})| \ge \left\lceil \frac{\log_2 n}{\log_2 r} \right\rceil + n, \tag{3}$$

где $r = |y|$ – число выходных символов ячейки сети.

Как было рассмотрено выше, тест $V(\delta_{ij})$ проверяет правильность перехода δ_{ij} в ячейках сети $M(1), M(k+1), M(2k+1), \ldots$. Свойство сильносвязности автоматной модели ячейки сети упрощает процедуру нахождения множества тестов, проверяющих этот переход во всех ячейках сети. Эта процедура сводится к циклическому сдвигу входного слова $x_j X_0 T(z_i)$. Циклический сдвиг вправо на один символ обеспечивает во второй ячейке переход $z_i \xrightarrow{x_j} z_a$ и приложение X_0 к последующим ячейкам сети. Следовательно, переход δ_{ij} в этом случае проверяется в ячейках $M(2), M(k+2), M(2k+2), \ldots$. Циклический сдвиг $(|V(\delta_{ij})| - 1)$ раз теста $V(\delta_{ij})$ позволяет получить $|V(\delta_{ij})|$ входных циклических отличительных последовательностей, проверяющих правильность перехода во всех ячейках сети. Тогда верхняя и нижняя граница длины полного теста, проверяющего правильность всех $(m \times n)$ переходов ячейки сети, с учетом неравенств (2) и (3) равны, соответственно:

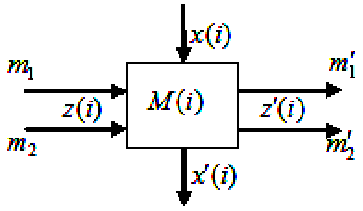
$$\ell(T) \le \frac{1}{2} mn^2 (n+1) \approx mn^3, \tag{4}$$

$$\ell(\mathrm{T}) \ge \mathrm{mn}\left(\left\lceil \frac{\log_2 \mathrm{n}}{\log_2 \mathrm{r}} \right\rceil + \mathrm{n}\right) \approx \mathrm{mn}^2. \qquad (5)$$

Из (3) следует, что длина проверяющего теста не зависит от размерности сети (числа p ячеек сети). Таким образом, сети рассматриваемого класса являются С-тестируемыми.

Разработка процедуры синтеза проверяющих тестов для однородной сети с наблюдаемыми выходами

На рис. 2 приведен пример сети из 8 ячеек с наблюдаемыми выходами, описываемый ТПВ (табл. 1).



а – структура ячейки сети

$$m_1' = x$$
$$m_2' = x m_1 m_2 + \bar{m}_1 \bar{m}_2 + \bar{x}\bar{m}_1$$
$$x' = x\bar{m}_2$$

б – реализуемые булевые функции

Рис. 2. Ячейка однородной сети

Таблица 1

ТПВ ячейки сети

m_1m_2	$Z(t)$	$Z(t+1),\ x'(t)$	
		$x_1=0$	$x_2=1$
00	z_1	z_2, 0	z_4, 1
01	z_2	z_2, 0	z_3, 0
10	z_3	z_1, 0	z_3, 1
11	z_4	z_1, 0	z_4, 0

Из ТПВ ячейки (табл. 1) видно, что автоматная модель ячейки имеет отличительную последовательность, $X_0 = x_2x_2$ и является сильносвязным автоматом. Следовательно, для каждого перехода ТПВ ячейки сети существует циклическая отличительная последовательность. В соответствии с (1) циклическая отличительная последовательность $V_1(\delta_{10})$ для перехода $\delta_{10}(z_1,0)=z_2$ представляется в виде

$$V_1(\delta_{10}) = \{z_1,(0110)^*\},$$

где «11» – отличительная последовательность X_0;

«0» – переводящая последовательность $T(z_1)$.

Получаем множество циклических отличительных последовательностей, проверяющих переходы δ_{10} во всех ячейках сети в виде

$$\begin{aligned} &V_1(\delta_{10}) = \{z_1,(0110)^*\},\\ &V_2(\delta_{10}) = \{z_3,(00110)^*\},\\ &V_3(\delta_{10}) = \{z_3,(00110)^*\},\\ &V_4(\delta_{10}) = \{z_3,(00110)^*\}. \end{aligned} \qquad (6)$$

Прикладывая тесты (6) к сети из 8 ячеек, получим

$$\begin{aligned} &V_1: z_1 \overset{(0)}{—} z_2 \overset{1}{-} z_3 \overset{1}{-} z_3 \overset{0}{-} z_1 \overset{(0)}{—} z_2 \overset{1}{-} z_3 \overset{1}{-} z_3 \overset{0}{-} z_1;\\ &V_2: z_3 \overset{0}{-} z_1 \overset{(0)}{—} z_2 \overset{1}{-} z_3 \overset{1}{-} z_3 \overset{0}{-} z_1 \overset{(0)}{—} z_2 \overset{1}{-} z_3 \overset{1}{-} z_3;\\ &V_3: z_3 \overset{1}{-} z_3 \overset{0}{-} z_1 \overset{(0)}{—} z_2 \overset{1}{-} z_3 \overset{1}{-} z_3 \overset{0}{-} z_1 \overset{(0)}{—} z_2 \overset{1}{-} z_3;\\ &V_4: z_2 \overset{1}{-} z_3 \overset{1}{-} z_3 \overset{0}{-} z_1 \overset{(0)}{—} z_2 \overset{1}{-} z_3 \overset{1}{-} z_3 \overset{0}{-} z_1 \overset{(0)}{—} z_2. \end{aligned} \quad . \qquad (7)$$

Проверяемые переходы в (7) взяты в скобки. Таким образом, переход $z_1 \overset{0}{-} z_2$ проверяется во всех ячейках сети четырьмя циклическими отличительными последовательностями независимо от числа ячеек, составляющих сеть.

Аналогично находятся циклические отличительные последовательности для всех переходов ячейки.

На рис. 3 представлено множество циклических тестов, проверяющих все переходы в ячейке, заданной табл. 1, из которого можно определить длину полного проверяющего теста $\ell(\mathrm{T}) = 32$.

Процесс генерации тестовых последовательностей для однородной сети с наблюдаемыми выходами x_i', ячейка которой описывается ТПВ сильносвязного автомата, имеющего отличительную последовательность, можно представить следующим ниже алгоритмом.

$$\begin{aligned} &V(\delta_{10}) = \{z_1,(0110)^*\},\\ &V(\delta_{11}) = \{z_1,(10)^*\},\\ &V(\delta_{20}) = \{z_2,(0100)^*\},\\ &V(\delta_{21}) = \{z_2,(1100)^*\},.\\ &V(\delta_{30}) = \{z_3,(0001)^*\},\\ &V(\delta_{31}) = \{z_3,(1001)^*\},\\ &V(\delta_{40}) = \{z_4,(01)^*\},\\ &V(\delta_{41}) = \{z_4,(10001101)^*\}. \end{aligned}$$

Рис. 3. Множество циклических отличительных последовательностей сети

Алгоритм 1.

1. Построить таблицу переходов-выходов автомата Мили по заданной логической схеме ячейки сети. Пусть ТПВ имеет n строк и m столбцов.

2. Построить отличительное дерево-преемников автомата и найти отличительную последовательность X_0.

3. Для каждого перехода ТПВ $\delta_{ij}(z_i, x_j) = z_a$, $i = \overline{1,n}$, $j = \overline{1,m}$, найти множество конечных состояний $\delta(z_a, x_0) = z_k$.

4. Найти множество переводящих последовательностей $T(z_k, z_i)$ по ТПВ для каждого перехода, где множество состояний $\{z_k\}$ определено на шаге 3.

5. Построить множество циклических отличительных последовательностей $V(\delta_{ij})$ для каждого перехода автоматной диаграммы, используя X_0 и $T(z_k, z_i)$. Пусть длина циклической отличительной последовательности $|V(\delta_{ij})| = t$.

6. Для каждого проверяющего теста $V(\delta_{ij})$ заполнить $(t-1)$ циклических сдвигов, которые определяют циклические отличительные последовательности, проверяющих правильность всех $(m \times n)$ переходов ТПВ в каждой ячейке сети.

7. Конец алгоритма.

Рассмотрим схему многоразрядного параллельного сумматора с последовательным переносом. Такая схема представляет однородную сеть с наблюдаемыми выходами x_i', у которой каждая ячейка выполняет функцию полного одноразрядного сумматора. В табл. 2 представлена ТПВ ячейки полного одноразрядного сумматора, где x – входы суммируемых переменных, x_i' – выход суммы, z – функция переноса.

Из табл. 2 легко определить, что автомат является сильносвязным и каждый входной символ – отличительная последовательность.

В соответствии с процедурой алгоритма 1 можно найти для каждого перехода циклические отличительные последовательности, представленные на рис. 4, а, по которым легко построить 8 тестов, проверяющих схему сумматора любой размерности (рис. 4, б).

Таблица 2

ТПВ ячейки полного одноразрядного сумматора

$Z(t)$	x	$Z(t+1)$, $x'(t)$			
		$x_1 = 00$	$x_2 = 01$	$x_3 = 10$	$x_4 = 11$
z_1	0	0 , 0	0 , 1	0 , 1	1 , 0
z_2	1	0 , 1	1 , 0	1 , 0	1 , 1

В отличие от предложенной выше процедуры в [2] для проверки однородной сети многоразрядного сумматора построен тест, представляющий собой эйлеров цикл графа автомата, заданного табл. 2.

Циклический сдвиг тестовой последовательности

$$z_1 \xrightarrow{00} z_1 \xrightarrow{01} z_1 \xrightarrow{10} z_1 \xrightarrow{11} z_2 \xrightarrow{01} z_2 \xrightarrow{10} z_2 \xrightarrow{11} z_2 \xrightarrow{00} z_1 \xrightarrow{00} \ldots \quad (8)$$

позволяет также получить 8 тестов, проверяющих все переходы в каждой ячейке сети [2]. Однако, как показано в [9], в случае кратной неисправности сети, которая иллюстрирована ТПВ двух первых неисправных ячеек сети $M(1)$ и $M(2)$ (таблица 3 и 4) тест, генерируемый по (8), не обнаруживает эту неисправность. Таким образом, приведенный пример опровергает утверждение Диаза [2] о том, что предложенные им тестовые последовательности обнаруживают класс неисправностей F_k.

С другой стороны, проверяющий тест, построенный по алгоритму 1 (рис. 4), обнаруживает кратную неисправность, задаваемую таблицами 3 и 4. В частности, циклический тест $V(\delta_{12})$ для исправной и неисправной сети вызывает различную реакцию на наблюдаемых выходах x_i' ячеек $M(2)$, $M(3)$,….

$$V(\delta_{1,1}) = \{z_1, (x_1)^*\}, \quad V(\delta_{2,1}) = \{z_2, (x_1 x_4)^*\},$$
$$V(\delta_{1,2}) = \{z_1, (x_2)^*\}, \quad V(\delta_{2,2}) = \{z_2, (x_2)^*\},$$
$$V(\delta_{1,3}) = \{z_1, (x_3)^*\}, \quad V(\delta_{2,3}) = \{z_2, (x_3)^*\},$$
$$V(\delta_{1,4}) = \{z_1, (x_4 x_1)^*\}; \quad V(\delta_{2,4}) = \{z_2, (x_4)^*\}.$$

а – множество циклических отличительных последовательностей

$$V_1 : z_1 \xrightarrow{00} z_1 \xrightarrow{00} z_1 \xrightarrow{00} z_1 \xrightarrow{00} z_1 \ldots$$
$$V_2 : z_1 \xrightarrow{01} z_1 \xrightarrow{01} z_1 \xrightarrow{01} z_1 \xrightarrow{01} z_1 \ldots$$
$$V_3 : z_1 \xrightarrow{10} z_1 \xrightarrow{10} z_1 \xrightarrow{10} z_1 \xrightarrow{10} z_1 \ldots$$
$$V_4 : z_1 \xrightarrow{11} z_2 \xrightarrow{00} z_1 \xrightarrow{11} z_2 \xrightarrow{00} z_1 \ldots$$
$$V_5 : z_2 \xrightarrow{00} z_1 \xrightarrow{11} z_2 \xrightarrow{00} z_1 \xrightarrow{11} z_2 \ldots$$
$$V_6 : z_2 \xrightarrow{01} z_2 \xrightarrow{01} z_2 \xrightarrow{01} z_2 \xrightarrow{01} z_2 \ldots$$
$$V_7 : z_2 \xrightarrow{10} z_2 \xrightarrow{10} z_2 \xrightarrow{10} z_2 \xrightarrow{10} z_2 \ldots$$
$$V_8 : z_2 \xrightarrow{11} z_2 \xrightarrow{11} z_2 \xrightarrow{11} z_2 \xrightarrow{11} z_2 \ldots$$

б – множество циклических тестов

Рис. 4. Полный проверяющий тест однородной сети многоразрядного сумматора

Таблица 3

ТПВ ячейки M(1)

Z(t)	x	Z(t+1), x'(t)			
		$x_1 = 00$	$x_2 = 01$	$x_3 = 10$	$x_4 = 11$
z_1	0	0,0	1,1	1,1	1,0
z_2	1	0,1	0,0	0,0	1,1

Таблица 4

ТПВ ячейки M(2)

Z(t)	x	Z(t+1), x'(t)			
		$x_1 = 00$	$x_2 = 01$	$x_3 = 10$	$x_4 = 11$
z_1	0	0,0	0,1	1,0	1,1
z_2	1	0,1	1,0	0,1	1,0

Выводы

В данной статье предложен алгоритм синтеза проверяющих тестов для однородной сети с наблюдаемыми выходами x_i'. В предложенном алгоритме автоматная модель ячейки имеет отличительную последовательность и является сильносвязным автоматом. Что позволяет получить множество тестовых наборов, которые обнаруживают любую неисправность, приводящую к искажению автоматной диаграммы ячейки, при ограничении, что в момент проверки допускается неисправной только одна ячейка сети (класс неисправностей F_1).

Список литературы

1. *Friedman A.D. Fault detection in digital circuits / A.D. Friedman, P.R. Menon. – New Jersey: Prentice Hall, 1971. – 220 p.*
2. *Dias F.J. Truth-table verification of an iterative logic array / F.J. Dias // IEEE Trans. Computers. – 1976. – № 6. – P. 605 – 613.*
3. *Синтез проверяющих тестов для сетей клеточных автоматов с наблюдаемыми выходами / Я.Ю. Королева, М.А. Бережная, О.Н. Замирец [та ін.] // Технология приборостроения. – 2008. – № 2. – С. 20 – 25.*
4. *Тестовое диагностирование одномерных однородных структур / Л.В. Дербунович, М.А. Бережная, Я.Ю. Королева [та ін.] // Вісник Національного технічного університету „Харківський політехнічний інститут”. Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Автоматика та приладобудування. – Х.: НТУ „ХПІ”, 2008. – № 31. – С. 49 – 57.*
5. *Синтез проверяющих тестов для однородных структур на основе циклических отличительных последовательностей / Л.В. Дербунович, М.А. Бережная, Я.Ю. Королева [та ін.] // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. – 2008. – № 4(72). – С. 29 – 33.*
6. *Тестовое диагностирование телекоммуникационных систем на базе одномерных однородных клеточных сетей / Я.Ю. Королева, М.А. Мирошник Г.И. Загарий // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. – 2011. – № 2. – С. 68 – 72.*
7. *Королева Я. Однородные вычислительные сети с реконфигурируемой структурой / Я. Королева, М. Бережная // Технология приборостроения. – 2008. – № 1. – С. 44 – 48.*
8. *Гилл Н. Введение в теорию конечных автоматов / Гилл Н. – М.: Наука, 1966. – 272 с.*
9. *Королева Я.Ю. Синтез проверяющих тестов для однородных схем / Я.Ю. Королева, М.А. Бережная, Г.Г. Четвериков // Бионика интеллекта. – 2009. – № 2(71). – С. 123 – 127.*

Поступила в редколлегию 30.06.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Г.И. Загарий, Украинская государственная академия железнодорожного транспорта, Харьков.

СИНТЕЗ ПЕРЕВІРЯЮЧИХ ТЕСТІВ ДЛЯ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ НА ОСНОВІ ЦИКЛІЧНИХ ВІДМІТНИХ ПОСЛІДОВНОСТЕЙ

Я.Ю. Королева, М.А. Мирошник

Проведено аналіз методів синтезу перевіряючих тестів однорідної мережі з виходами, що спостерігаються. Отримано оцінки нижньої та верхньої межі довжини перевіряючої послідовності для однорідних мереж класу несправності F_1. Розроблена методика проектування С-тестованих однорідних мереж.

***Ключові слова**: телекомунікаційні системи та мережі, однорідна мережа, довжина перевіряючого тесту, циклічна відмінна послідовність.*

SYNTHESIS OF TEST GENERATION FOR TELECOMMUNICATIONS NETWORK BASED ON CYCLIC DISTINGUISHING SEQUENCES

J.Y. Klimenko, M.A. Muroshnuk

The analysis methods for the synthesis validation tests of a homogeneous network with the observable outputs is presented. Estimates are obtained for the lower and upper bounds for the length of the relying sequence of homogeneous networks class of faults F_1. A method for designing S-homogeneous test networks is proposed.

***Keyword:** telecommunication systems and networks, a homogeneous network, the length of checking test, cyclic distinctive sequence.*