

СПОСОБ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЦИКЛОВ В ГРАФАХ ТАННЕРА LDPC КОДОВ НА ОСНОВЕ ПЕРЕСЕЧЕНИЙ КОРОТКИХ ЗАМКНУТЫХ СТРУКТУР В ПРОТОГРАФАХ

*Овинников А.А., научный сотрудник Рязанского государственного радиотехнического университета,
e-mail: ovinnikov.a.a@tor.rsreu.ru.*

IMAGES OF CYCLES OF CYCLIC LIFTINGS IN THE BASE GRAPH OF PROTOGRAPH LDPC CODES

Ovinnikov A.A.

This report describes the problem of identifying the possible intersections of cycles in the protographs of quasi-cyclic LDPC codes. We closely examine the relationships among the subgraphs of the base graph that rise to short cycles in the lifted graph. As a result of this study, we derive relevant rules on the required cycle metric of the protograph. The list of such rules can be used as a part of algorithms of synthesis of quasi-cyclic codes with low density.

Key words: irregular low density parity check (LDPC) codes, quasi-cyclic codes, girth, protograph, cyclic liftings.

Ключевые слова: помехоустойчивое кодирование, итеративное декодирование, низкоплотностные коды, граф Таннера, обхват графа, связанность циклов графа, энергетический выигрыш от кодирования (ЭВК), топология графов.

Введение

В настоящее время постоянно повышаются требования к системам передачи данных, как в области пропускной способности каналов, так и в направлении информационной достоверности. Благодаря внедрению эффективных алгоритмов помехоустойчивого кодирования и декодирования, среди которых следует особенно отметить наиболее перспективные с точки зрения практической реализации турбо и LDPC коды эти задачи частично решаются. Однако, до сих пор открытым остаётся вопрос повышения энергетического выигрыша от кодирования (ЭВК) в области малых шумов, что особенно актуально для систем цифрового телевидения, оптической связи и хранения данных. Разработка методов и алгоритмов синтеза низкоплотностных кодов по некоторому набору критериев [1-4] является одним из возможных способов решения этой проблемы. Стоит отметить, что большинство критериев формирования проверочных матриц опирается на циклы в графах Таннера и их взаимосвязи, что делает актуальной задачу быстрой идентификации циклов. Этому вопросу и посвящена настоящая работа.

Описание протографа LDPC кода

Протограф (базовый граф) $G_r = (V, C, E)$ является двудольным неориентированным мультиграфом, состоящим из множества символьных (V) и проверочных (C) вершин, а также множества ветвей (E), которые соединяют вершины из V и C друг с другом. Пример простого протографа, включающего в себя элементы в количе-

Рассматривается проблема идентификации всех циклов в графах Таннера квазициклических кодов с низкой плотностью проверок на чётность вплоть до некоторого заданного максимального значения. В силу чрезвычайно высокой вычислительной сложности прямого поиска применяется альтернативный подход, смысл которого состоит в переходе от полного графа к базовому (протографу), размер которого в q раз меньше. При этом часть циклов идентифицируется методом прямого поиска. Остальные согласно топологической теории графов образуются на пересечении двух и более циклов. Ключевым результатом работы является набор уравнений, связывающих конкретные пересечения циклов в протографе с расширенным циклом в базовом графе, полученный путём аналитических расчётов, численного моделирования и элементов топологической теории графов.

стве $|V| = 3$, $|C| = 2$ и $|E|$, где оператор $|\cdot|$ – определяет размер (мощность) множества, представлен на рис. 1. Для того, чтобы получить граф Таннера из структуры G_r , необходимо выполнить так называемую процедуру расширения, которая заключается в последовательном выполнении алгоритмов копирования и перестановки вершин, подробно рассмотренных на рис. 2, где коэффициент масштабирования $q = 3$. Отдельного внимания заслуживает алгоритм перестановки вершин в связи с тем, что он опирается на квадратные матрицы π_{ij}^k размером $[q, q]$, где i и j – номера проверочных и символьных вершин соответственно, а k – коэффициент кратности параллельных ветвей.

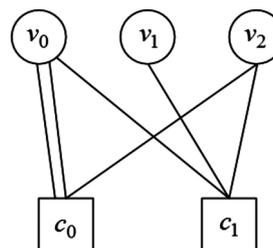


Рис. 1. Протограф

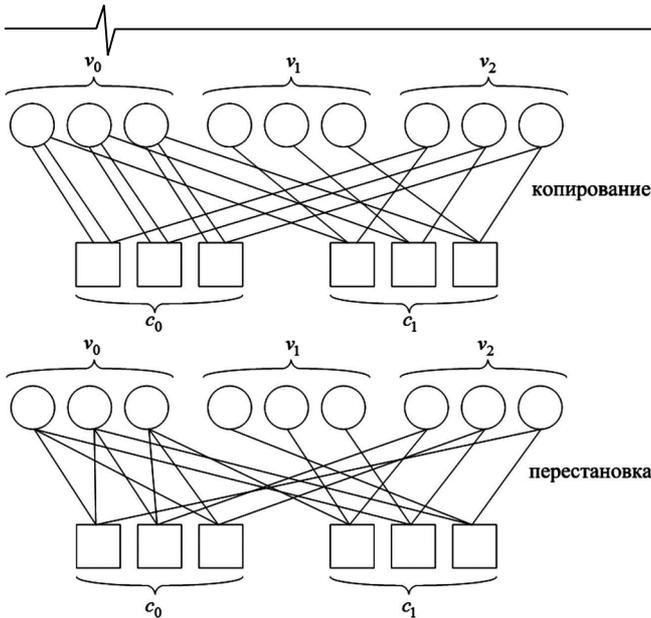


Рис. 2. Процедура расширения протографа

В наиболее простом случае матрица перестановок π_{ij}^k вырождается в единичную диагональную матрицу. Таким образом, полное описание протографа можно получить по структуре, представленной на рис. 3. Компактное и развёрнутое матричное представление G_r дано на рис. 4, где B – базовая или матрица смежности протографа G_r , а H – проверочная матрица LDPC кода, полученная в результате выполнения процедуры расширения.

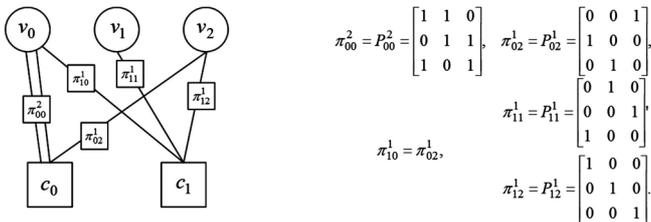


Рис. 3. Развёрнутое представление протографа

$$B = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad H = \begin{bmatrix} P_{00}^2 & P_{01}^0 & P_{02}^1 \\ P_{10}^1 & P_{11}^1 & P_{12}^1 \end{bmatrix}.$$

Рис. 4. Матричные формы

Объектами исследования в настоящей работе выступают проверочные матрицы нерегулярных квазициклических кодов такие, что максимальное значение коэффициента кратности параллельных ветвей для эквивалентных им протографов равно единице. Поэтому далее матрицы перестановок заменяются соответствующими значениями сдвига её главной диагонали, т.е. $\pi_{ij}^k \xrightarrow{k_{\max}=1} c_{ij}$, где c_{ij} – величина сдвига главной диагонали квадранта, расположенного в i -й строке и j -м столбце проверочной матрицы.

Проекция циклов протографа на расширенный граф

Использование протографов значительно упрощает работу алгоритмов анализа циклов, т.к. их сложность нелинейно связана с параметрами $|V|$, $|C|$ и $|E|$, что в свою очередь положительно сказывается на скорости синтеза проверочных матриц LDPC кодов. Однако, связь

циклов в G_r и G_r' оказывается далеко не тривиальной и требует дополнительного исследования.

Известно [5], что цикл длиной g образуется в расширенном графе тогда и только тогда, когда выполняется равенство вида:

$$\left(\sum_{k=0}^{g/2-1} \Delta_{i_k, i_{k+1}}(j_k) \right) \bmod(q) = 0, \quad (1)$$

где $\Delta_{i_x, i_y}(o) = (c_{i_x, j} - c_{i_y, j}) \bmod(q)$. При этом $i_0 = i_{g/2}$; $i_k \neq i_{k+1}$; $j_k \neq j_{k+1}$.

Рассмотрим цикл длиной $g = 4$, представленный на рис. 5. При выполнении процедуры расширения, при условии того, что все коэффициенты c_{ij} одинаковы и равны нулю, получаем кратное q раз увеличение числа циклов в расширенном графе, в тоже время использование различных значений для c_{ij} позволяет увеличить длину цикла в расширенном графе (рис. 5). В силу того, что рассматриваемое преобразование не тривиально, далее путём доказательства соответствующих теорем будут определены его свойства.

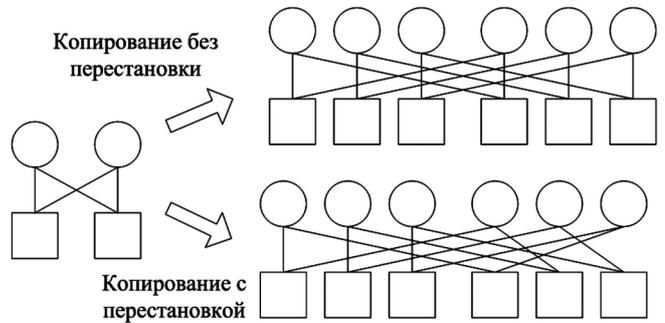


Рис. 5. Расширение циклов протографа

Теорема 1. Если в протографе обнаружен цикл длиной g , то в результате выполнения процедуры расширения он будет преобразован в цикл длиной l , $l \geq g$ при выполнении равенства:

$$\left(\frac{l}{g} \sum_{k=0}^{g/2-1} \Delta_{i_k, i_{k+1}}(j_k) \right) \bmod(q) = 0. \quad (2)$$

Действительно, в соответствии с выражением (1) теорема автоматически выполняется в случае, когда $l = g$. Если $l > g$ тождество не выполняется. Рассмотрим цикл длиной $g = 8$, который можно представить в виде матрицы:

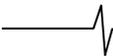
$$H_c = \begin{bmatrix} c_{i_0 j_0} & -1 & -1 & c_{i_0 j_3} \\ c_{i_1 j_0} & c_{i_1 j_1} & -1 & -1 \\ -1 & c_{i_2 j_1} & c_{i_2 j_2} & -1 \\ -1 & -1 & c_{i_3 j_2} & c_{i_3 j_3} \end{bmatrix}.$$

Согласно разностному модульному уравнению (1) получаем следующее выражение для цикла длиной g :

$$\begin{aligned} & ((c_{i_0 j_0} - c_{i_1 j_0}) + (c_{i_1 j_1} - c_{i_2 j_1}) + \\ & + (c_{i_2 j_2} - c_{i_3 j_2}) + (c_{i_3 j_3} - c_{i_0 j_3})) \bmod(q) = 0. \end{aligned} \quad (3)$$

В частном случае некоторые значения сдвигов могут совпадать, что эквивалентно замене вида:

$$\begin{aligned} b_{i_0 j_0} &= c_{i_0 j_0} = c_{i_2 j_2}, & b_{i_0 j_1} &= c_{i_2 j_1} = c_{i_0 j_3}, \\ b_{i_1 j_0} &= c_{i_1 j_0} = c_{i_3 j_2}, & b_{i_1 j_1} &= c_{i_1 j_1} = c_{i_3 j_3}. \end{aligned} \quad (4)$$



При этом модульное уравнение (4) преобразуется к виду:

$$(2((b_{i_0 j_0} - b_{i_1 j_0}) + (b_{i_1 j_1} - b_{i_0 j_1}))) \bmod(q) = 0 ,$$

что эквивалентно (2) при соотношении $l/g = 2$. Таким образом, проводя замены, аналогичные (4) любой цикл длиной l кратной g можно представить в виде (2), что и требовалось доказать.

Теорема 2. Цикл протографа длиной g всегда порождает как минимум один цикл l в расширенном графе, причём его длина всегда кратна g и делит $q \cdot g$ без остатка, а количество таких циклов в графе G_r определяется выражением:

$$n(l) = \frac{q \cdot g}{l} \quad (5)$$

Первое утверждение теоремы является прямым следствием модульного уравнения (1), т.к. в противном случае возникает ситуация нарушающая это правило. Исходя из теоремы 1, циклы длиной l не кратные g не могут быть образованы, т.к. для них выражение (2) всегда не выполняется. Параметр $q \cdot g$ определяет общее количество вершин, которые будут получены в результате процедуры расширения протографа из одного цикла длиной g . Если предположить, что существуют циклы, длина которых не делит $q \cdot g$ без остатка, тогда возникает противоречие. Оно заключается в том, что в этом случае остаются вершины, не задействованные ни в одном цикле. Таким образом, нарушается правило (1). Исходя из всего вышесказанного, можно сделать вывод о том, что выражение (5) истинно.

Следствие: если q – простое число, то цикл базового графа длиной g в результате выполнения процедуры расширения либо не изменяется, либо увеличивается в q раз.

Анализ пересечений циклов протографа

Второй особенностью циклов в протографе является их возможность группирования таким образом, что при расширении в искомом графе образуются циклы относительно большой длины, которых до этого преобразования просто не было. Для начала необходимо определить минимальную длину цикла, который может быть получен путём группирования более коротких экземпляров. Так как коэффициент кратности параллельных ветвей рассматриваемых протографов равен единице, то проекция циклов длиной четыре и шесть в расширенном графе может оставаться не изменой, увеличиваться в q раз, либо кратное число раз согласно теореме 1. В тоже время циклы длиной восемь и более в расширенном графе могут быть получены группированием более коротких замкнутых структур протографа.

Пусть имеется пара наиболее коротких циклов в протографе, объединённых друг с другом двумя общими вершинами. На рис. 6 представлен граф (а) для такого пересечения и соответствующая матрица-прототип (б). Введём краткое обозначение для формулы (1) вида:

$$p = \left(\sum_{k=0}^{g/2-1} \Delta_{i_k, i_{k+1}}(j_k) \right) \bmod(q). \quad (6)$$

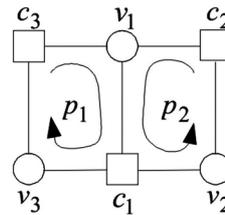
Таким образом, нулевые значения p_1 или p_2 отража-

ют наличие цикла длиной g в протографе, иначе такие циклы отсутствуют. Не сложно обнаружить, что в графе (рис. 6,а) имеется набор вершин, которые в результате процедуры расширения могут потенциально дать цикл длиной 6, а именно $C_6: v_1, c_2, v_2, c_1, v_3, c_3, v_1$. Аналитически, с использованием формулы (6), получим выражение для описания цикла C_6 :

$$\begin{aligned} p_1 &= (c_{11} - c_{01}) + (c_{00} - c_{10}); \\ p_2 &= (c_{22} - c_{02}) + (c_{00} - c_{20}); \\ p_3 &= (c_{22} - c_{02}) + (c_{10} - c_{20}) + (c_{01} - c_{11}). \end{aligned} \quad (7)$$

Рассмотрим линейное уравнение вида:

$$\begin{aligned} p_2 - p_1 &= (c_{22} - c_{02}) + (c_{00} - c_{20}) - (c_{11} - c_{01}) - \\ &- (c_{00} - c_{10}) = (c_{22} - c_{02}) + (c_{10} - c_{20}) + (c_{01} - c_{11}) = p_3 \end{aligned} \quad (8)$$



$$H_c = \begin{bmatrix} v_1 & v_2 & v_3 \\ c_{00} & c_{01} & c_{02} \\ c_{10} & c_{11} & -1 \\ c_{20} & -1 & c_{22} \end{bmatrix} \begin{matrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{matrix}$$

Рис. 6. Граф и матрица-прототип пересечения двух коротких циклов с двумя общими вершинами

Таким образом, необходимым и достаточным условием существования цикла длиной 6 является выражение:

$$p_1 = p_2. \quad (9)$$

Формула (9) подтверждена экспериментальным исследованием, в котором для пересечения двух коротких циклов, согласно рис. 6 а, были определены все возможные замкнутые структуры, образующиеся при расширении протографа. При этом общее количество возможных комбинаций c_{ij} определялось числом перестановок из q по 7 элементов. Результаты эксперимента отражены в табл. 1, где $n_6(q^7)$ и $\eta_6(q^7)$ – абсолютная и относительная доли циклов длиной 6 из всех возможных перестановок.

Стоит отметить, что идентификация циклов длиной 6 возможна и без использования правила (9), т.к. все вершины v_i и c_j входят в C_6 не более одного раза, кроме v_1 , которая является одновременно и началом и концом цикла. Важным аспектом процесса анализа циклов является привязка соотношений между короткими циклами (9) к взаимному направлению обхода, показанному на рис. 6,а стрелкой в графе. Если относительные направления обхода будут совпадать, в отличие от рассматриваемого случая, то правило изменится на диаметрально противоположное.

Рассмотрим последовательно все возможные варианты пересечений наиболее коротких циклов, которые при расширении протографа приводят к появлению замкнутых структур длиной 8. Для определения соотношений между идентификаторами циклов p_1 и p_2 на протяжении всего этапа анализа используются в основном результаты экспериментов, представленные в табличном виде по аналогии с табл. 1. Классификацию таких пересечений можно построить по количеству общих для двух циклов вершин (n_x). Анализ начнём со случая, когда $n_x = 1$. На рис. 7 показаны соответствующий граф и матрица-прототип.

Таблица 1. Оценка абсолютных и относительных долей циклов длиной 6 при переборе всех возможных перестановок из q по 7

q	q^7	$n_6(q^7)$	$\eta_6(q^7)$	Соотношение p_1 и p_2
2	128	32	0,25	$p_1 = p_2$
3	2187	486	0,2(2)	
4	16384	3072	0,1875	
5	78125	12500	0,16	
6	279936	38880	0,13(8)	
7	823543	100842	0,1224	
8	2097152	229376	0,1094	

Один из вариантов цикла длиной 8 описывается набором вершин C_8 : $c_1, v_1, c_2, v_2, c_1, v_3, c_3, v_4, c_1$. Не трудно заметить, что это не что иное, как последовательное соединение циклов с идентификаторами p_1 и p_2 . Так как обход вершин можно выбрать произвольным, то результирующий параметр p_3 фактически принимает четыре различные значения:

$$p_3 = \begin{cases} p_1 + p_2, \\ -p_1 - p_2, \\ p_1 - p_2, \\ -p_1 + p_2, \end{cases} \quad (10)$$

что в модульной арифметике эквивалентно соотношению вида:

$$p_3 = 0, \text{ если } p_1 = \pm p_2. \quad (11)$$

Таким образом, правило идентификации цикла длиной 8 по пересечению с $n_x = 1$ отображено в табл. 2 и экспериментально подтверждено для $3 < q \leq 6$. Согласно формуле (11) направление обхода циклов не имеет при этом никакого значения.

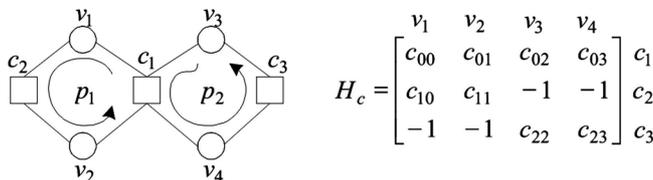


Рис. 7. Граф и матрица-прототип пересечения двух коротких циклов с одной общей вершиной

Таблица 2. Оценка абсолютных и относительных долей циклов длиной 8 при переборе всех возможных перестановок из q по 8

q	q^8	$n_8(q^8)$	$\eta_8(q^8)$	Соотношение p_1 и p_2
3	6561	2916	0,444(4)	$p_1 = \pm p_2$
4	65536	36864	0,5625	
5	390625	125000	0,32	
6	1679616	793152	0,472(2)	

При увеличении количества общих между двумя циклами вершин с одной до двух правило идентификации изменяется в силу наличия формулы (9), что подтверждено практически в табл. 3 для всех случаев на интервале $3 < q \leq 8$. Аналитические выкладки, подтверждающие результаты численного моделирования, схожи с представленными в формуле 10 за исключением тех случаев, которые образуют циклы длиной 6.

И, наконец, последний вариант получения цикла длиной 8 в расширенном графе из пересечения самых ко-

ротких циклов базового графа показан на рис. 8. Экспериментально для этого случая получены соотношения, представленные в табл. 4.

Таблица 3. Оценка абсолютных и относительных долей циклов длиной 8 при переборе всех возможных перестановок из q по 7

q	q^7	$n_8(q^7)$	$\eta_8(q^7)$	Соотношение p_1 и p_2
3	2187	486	0,222(2)	$p_1 = -p_2$
4	16384	6144	0,375	
5	78125	12500	0,16	
6	279936	93312	0,333(3)	
7	823543	100842	0,1224	
8	2097152	589824	0,28125	

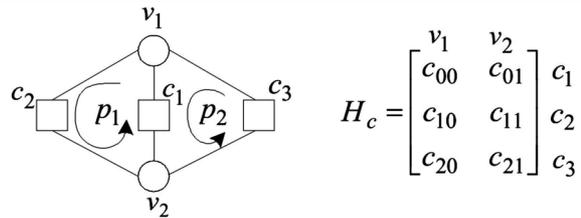


Рис. 8. Граф и матрица-прототип пересечения двух коротких циклов с тремя общими вершинами

Таблица 4. Оценка относительной доли циклов длиной 8 при переборе всех возможных перестановок из q по 6

q	q^6	$n_8(q^6)$	$\eta_8(q^6)$	Соотношение p_1 и p_2
3	729	162	0,222(2)	$p_1 = -p_2$ $2p_1 = -p_2$ $2p_2 = -p_1$
4	4096	1536	0,375	
5	15625	7500	0,48	
6	46656	25920	0,555(5)	
7	117649	43218	0,3673	
8	262144	122880	0,4687	
9	531441	131220	0,2469	
10	1000000	480000	0,48	

В ряде источников [2, 3] упоминается информация о том, что наибольшее влияние на качество итеративного декодирования оказывают относительно короткие циклы длиной до 10 включительно, поэтому целесообразно ограничить рассмотрение пересечения именно на этой отметке. Все результаты на этом этапе получены путём имитационного моделирования для небольших значений q в силу высоких вычислительных затрат, которые фактически определяются общим количеством возможных перестановок. В табл. 5-8 представлены соответствующие соотношения, которые фактически являются правилами для оперативного обнаружения цикла длиной 10. В дальнейшем планируется аналитическое подтверждение полученных результатов.

Таблица 5. Оценка относительной доли циклов длиной 10 при переборе всех возможных перестановок из q по 7 (пересечение циклов длиной 4)

q	q^7	$n_{10}(q^7)$	$\eta_{10}(q^7)$	Соотношение p_1 и p_2
5	78125	25000	0,16	$2p_1 = p_2$ $2p_2 = p_1$
6	279936	31104	0,111(1)	
7	823543	201684	0,2449	
8	2097152	262144	0,125	

Таблица 6. Оценка относительной доли циклов длиной 10 при переборе всех возможных перестановок из q по 10 (p_2 – идентификатор цикла длиной 6)

q	q^{10}	$n_{10}(q^{10})$	$\eta_{10}(q^{10})$	Соотношение p_1 и p_2
3	59049	26244	0,444(4)	$p_1 = \pm p_2$
4	1048576	262144	0,25	
5	9765625	3125000	0,32	

Таблица 7. Оценка относительной доли циклов длиной 10 при переборе всех возможных перестановок из q по 9 (p_2 – идентификатор цикла длиной 6)

q	q^9	$n_{10}(q^9)$	$\eta_{10}(q^9)$	Соотношение p_1 и p_2
3	19689	4374	0,2221	$p_1 = p_2$
4	262144	32768	0,125	
5	1953125	312500	0,16	

Таблица 8. Оценка относительной доли циклов длиной 10 при переборе всех возможных перестановок из q по 8 (p_2 – идентификатор цикла длиной 6)

q	q^8	$n_{10}(q^8)$	$\eta_{10}(q^8)$	Соотношение p_1 и p_2
3	6561	1458	0,222(2)	$p_1 = -p_2$ $2p_1 = p_2$
4	65536	16384	0,25	
5	390625	125000	0,32	
6	1679616	279936	0,166(6)	
7	5764801	1411788	0,2449	

Результаты анализа пересечений циклов протографа

Полученные в предыдущих пунктах результаты можно объединить в одну табл. 9, которая описывает все возможные правила идентификации циклов длиной до 10 включительно в расширенном графе по протографу. Таким образом, по двум входным параметрам – типу пересечения и количеству общих вершин между циклами можно однозначно определить наличие нового цикла, длина которого строго больше g_1 и g_2 . Для этого необходимо первоначально идентифицировать каждый из членов пары пересекающихся циклов, найти число общих вершин пары и решить два модульных уравнения, получив значения p_1 и p_2 , соответственно. После этого остаётся лишь воспользоваться одним или несколькими правилами, согласно табл. 9, которые позволят оперативно оценить искомое значение g .

Заключение

В работе проведено исследование способа идентификации циклов в графах Таннера LDPC кодов на основе пересечений коротких замкнутых структур в прото-

графах. В результате доказаны две теоремы о преобразовании цикла при расширении графа, а также получен набор правил, позволяющих оперативно определять факт наличия или отсутствия циклов длиной до 12 в расширенном графе по протографу.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект 14-19-01263) в Рязанском государственном радиотехническом университете.

Таблица 9. Правила идентификации циклов расширенного графа по пересечениям циклов в протографе

Длина образуемого цикла, g	Тип пересечения, $g_1 \times g_2$	Количество общих вершин, n_x	Правила идентификации
6	4x4	2	$p_1 = p_2$
8	4x0	0	$2p = 0$
		1	$p_1 = \pm p_2$
		2	$p_1 = -p_2$
10	4x4	3	$p_1 = -p_2$ $2p_1 = -p_2$ $2p_2 = -p_1$
		2	$2p_1 = p_2$ $2p_2 = p_1$
		1	$p_1 = \pm p_2$
10	4x6	2	$p_1 = p_2$
		3	$p_1 = -p_2$ $2p_1 = p_2$

Литература

1. Овинников А.А., «Исследование влияния спектра связанности циклов в графе Таннера на энергетический выигрыш кодирования известных LDPC кодов», Цифровая обработка сигналов №4, 2015, – с. 24-29.
2. Ryan W.E. and Lin S. «Channel Codes. Classical and Modern», Cambridge University Press, 2009.
3. Declercq D., Fossorier M., Biglieri E., Channel Coding. Theory, Algorithms, and Applications. Academic Press Library in Mobile and Wireless Communications, 2014.
4. Hu X.-Y., Eleftheriou E. and Arnold D.-M. «Progressive edge-growth Tanner graphs,» in Proc. IEEE GlobeCom, Nov. 2001, vol. 2, – pp. 995-1001.
5. Fossorier M. P. C. Quasi-Cyclic Low-Density Parity-Check Codes From Circulant Permutation Matrices / M. P. C. Fossorier // IEEE Transactions on information theory, vol. 50, no. 8, aug. 2004, – p. 1788-1793.

Уважаемые авторы!

Редакция научно-технического журнала «Цифровая обработка сигналов» просит Вас соблюдать следующие требования к материалам, направляемым на публикацию:

1. Требования к текстовым материалам и сопроводительным документам:

- Текст - текстовый редактор Microsoft Word.
- Таблицы и рисунки должны быть пронумерованы. На все рисунки, таблицы и библиографические данные указываются ссылки в тексте статьи.
- Объем статьи до 12 стр. (шрифт 12). Для заказных обзорных работ объем может быть увеличен до 20 стр.
- Название статьи на русском и английском языках.
- Рукопись статьи сопровождается: краткой аннотацией на русском и английском языках; номером УДК; сведениями об авторах (Ф.И.О., организация, должность, ученая степень, телефоны, электронная почта); ключевыми словами на русском и английском языках; актом экспертизы (при наличии в вашей организации экспертной комиссии).

2. Требования к иллюстрациям:

- Векторные (схемы, графики) - желательно использование графических редакторов Adobe Illustrator или Corel DRAW.
- Растровые (фотографии, рисунки) - М 1:1, разрешение не менее 300dpi, формат tiff.