

(при розрахунку складову $\frac{\sigma_{d_{cm}}}{\ell_c}$ не враховуємо).

Після простих обчислень параметр $\sigma_{кд}$ набуває значення $\sigma_{кд} = 0,63$ мм при використанні тільки індикатора лінійних переміщень; $\sigma_{кд} = 0,13$ мм при використанні тільки радіотехнічної системи і $\sigma_{кд} = 0,055$ мм для синтезованої оптимальної схеми, таким чином створена система істотно підвищує точність вимірювання.

Висновки

Синтезована в роботі оптимальна система за критерієм мінімуму дисперсії дозволяє підвищити точність вимірювання коефіцієнта динамічності на 42 % порівняно з кращим результатом вимірювань одним вимірювачем. Отриманий результат досягається за рахунок підвищення точності оцінки динамічного прогину. Таким чином, застосування синтезованої системи не обмежується її використанням для вимірювань коефіцієнта динамічності і може бути використаною при дослідженні динамічних характеристик МС.

Список літератури: 1. *Гибшман, Е. Е.* Методы динамических испытаний мостов: вопросы испытания и освидетельствования мостов / *Е. Е. Гибшман* [Электронный ресурс] – М. : Транспорт, 1941. – 195 с. 2. *Тихонов, В. И.* Оптимальный прием сигналов / *В. И. Тихонов* [Текст] – М. : Радио и связь, 1983. – 320 с. 3. *Архипенко, Ю. В.* Методика расчета динамического воздействия подвижных нагрузок с мостами с применением программных комплексов конечно-элементного анализа [Электронный ресурс] : дис. ... канд. техн. наук / *Ю. В. Архипенко*. – М., 2006. – 176 с. 4. *Редченко, В. П.* Динамічний коефіцієнт автодорожніх мостів: проблеми натурного визначення // Дороги та мости / *В. П. Редченко* [Електронний ресурс] : Зб. наук. ст. – Вип. 6. – К. : ДерждорНДІ, 2006. – С. 122–133. 5. *Редченко В. П.* Визначення структурних параметрів прогонових будов мостів за результатами їх випробувань рухомим навантаженням / *В. П. Редченко* [Електронний ресурс] // Автошляховик України. – 2009. – № 4. – С. 43–46. 6. EVACES'09. Experimental vibration analysis for civil engineering structures : Proceedings of the international conference. – Wroclaw, Poland, 2009. – 208 p. 7. ДБН В.2.3-6:2009 Мости та труби. Обстеження та випробування. – Введ. 2010-03-01 – К. Міненергобуд України, 2009. – 62 с. 8. *Сергеев, А. А.* Методика экспериментальной оценки динамических воздействий подвижной нагрузки на пролетные строения автодорожных мостов [Електронний ресурс] : дис. канд. техн. наук / *А. А. Сергеев*. – М., 2007. – 197 с.

Поступила в редколлегию 11.06.2012

УДК 004.832.38

М.В. ВОЛЧЕНКО, ассис, Институт информатики и искусственного интеллекта «Донецкий национальный технический университет»

ОПТИМИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА РЕЗОЛЮЦИИ В ЛОГИКЕ ВЫСКАЗЫВАНИЙ ПРИ ПОМОЩИ 0,1-НОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ДИЗ'ЮНКТОВ

Роботу присвячено вирішенню задачі перевірки виконаності формул логіки висловлювань, що характеризуються великою потужністю. Запропоновано 0,1-не представлення диз'юнктив і матрична структура представлення зв'язків диз'юнктив, для яких розроблено алгоритм резолюції з евристичної функцією вибору зв'язку для резольвування. Наведено результати експериментальних досліджень, що підтверджують ефективність запропонованого алгоритму.

Ключові слова: перевірка виконуваності, логіка висловлювань, диз'юнкт, алгоритм резолюції.

Работа посвящена решению задачи проверки выполнимости формул логики высказываний, характеризующихся большой мощностью. Предложено 0,1-ное представление дизъюнктов и матричная структура представления связей дизъюнктов, для которых разработан алгоритм резолюции с эвристической функцией выбора связи для резольвирования. Приведены результаты экспериментальных исследований, подтверждающие эффективность предложенного алгоритма.

Ключевые слова: проверка выполнимости, логика высказываний, дизъюнкт, алгоритм резолюции.

The work is devoted to solving the problem of testing the satisfiability of propositional logic formulas, that characterized by a great power. The clauses 0,1-representation and matrix representation of the clauses links structure are proposed. A resolution algorithm with an heuristic function of the links choice for resolution is proposed. The experimental results confirming the effectiveness of the proposed algorithm.

Keywords: satisfiability solving, propositional logic, clause, resolution algorithm.

1. Введение

Булева алгебра находит свое применение во многих направлениях информатики и проектирования цифровых систем. Многие задачи в проектировании и тестировании, искусственном интеллекте и комбинаторике могут быть представлены как последовательность операций на булевых формулах. Такие приложения требуют эффективных алгоритмов представления и обработки булевых функций. Одними из наиболее важных и сложных задач данной области являются задачи проверки выполнимости формулы, когда необходимо доказать, что данное логическое выражение принимает истинное значение при любых наборах входных данных, и проверки эквивалентности двух формул, т.е. доказательство того, что логические выражения обозначают одну и ту же функцию. Такие задачи являются NP-полными, следовательно, число машинного времени, необходимое для выполнения таких операций, экспоненциально возрастает с увеличением объема входных данных. В худшем случае, все известные подходы имеют такую же вычислительную сложность, как и простейшее вычисление с помощью таблиц истинности. На практике зачастую удается избежать экспоненциальных вычислений за счет применения различных эвристических приемов [1].

Для эффективной обработки множеств дизъюнктов большой мощности процедура вывода должна отвечать следующим требованиям [2]: на сколько это возможно, сужать пространство поиска контрарной пары на каждом шаге резольвирования; исключать из дальнейшего рассмотрения дизъюнкты, которые не могут быть использованы в процессе доказательства; в процедуре вывода должен быть реализован эффективный алгоритм выбора контрарных пар для резольвирования.

Процедура вывода на графе связей удовлетворяет всем представленным выше принципам создания эффективных процедур дедуктивного вывода. Граф связей является как способом представления множества дизъюнктов логики высказываний и логики предикатов первого порядка, так и основой для построения алгоритмов последовательной и параллельной резолюции [3].

Целью данной работы является разработка эффективного представления дизъюнктов и соответствующей им КНФ, а также построение оптимизированного алгоритма резолюции для разработанного представления.

2. Постановка задачи

Рассматривается классическая задача проверки выполнимости логических высказываний. Исходными данными является множество дизъюнктов $S = \{C_1, C_2, \dots, C_k\}$. Необходимо проверить выводим ли из множества дизъюнктов S заданного высказывания пустой дизъюнкт \square . Если это так, то S невыполнимо, иначе – выполнимо [2].

Данная задача является NP-полной за счет экспоненциального роста пространства поиска.

3. Вывод на графе связей

Особенностью современных программных комплексов является большой объем входных данных. В системах логического вывода возникает необходимость обработки КНФ, которые могут содержать более миллиона дизъюнктов, состоящих из сотен литералов

Одним из основных методов повышения эффективности процесса вывода является резольвирование на графе связей [2]. При построении графа связей для последовательности дизъюнктов $S = C_1, C_2, \dots, C_k$, состоящих из конъюнктов K_1, K_2, \dots, K_m , каждому дизъюнкту ставится в соответствие вершина графа G . Две вершины соединяются ребром, называемым связью, если они образуют контрарную пару, т.е. по этим дизъюнктам может быть проведено резольвирование. Результат резольвирования узлов добавляется в граф G .

4. Представление дизъюнктов и их связей

Пусть задано множество дизъюнктов S . Пусть $A = (a_1, a_2, \dots, a_n)$ – алфавит всех букв из S . Считаем, что A линейно упорядочен.

На начальном этапе каждый дизъюнкт будем представлять 0,1-ным набором $X_j = (X_{j1}, \dots, X_{jn})$ по правилу [6]:

$$X_{ji} = \begin{cases} 1, & \text{если } a_i \text{ входит в } C_j \text{ без отрицания} \\ 0, & \text{если } a_i \text{ входит в } C_j \text{ с отрицанием} \\ _ & \text{если литерал } \tilde{a}_i \text{ не входит в } C_j \end{cases}$$

В результате такого представления будет получено множество 0,1-ных векторов (наборов), соответствующее исходному множеству S .

Полученные наборы x_j необходимо упорядочить таким образом, чтобы упростить поиск связей для резольвирования, а также избежать роста пространства поиска при добавлении резольвенты. В настоящей работе предлагается разбить наборы x_j на n классов, содержащих соответствующее номеру класса число ‘_’, что соответствует длине дизъюнктов множества S . Такие классы необходимо упорядочить по убыванию числа ‘_’ в наборах (возрастанию длины дизъюнктов множества S). Внутри каждого из классов также необходимо упорядочить наборы x_j по возрастанию номера позиции ‘_’.

Каждой паре наборов x_i и x_j из списка дизъюнктов, ставится в соответствие связь $R(i,j)$ по правилу:

$$R_m(l, j) = \begin{cases} 1, & \text{если } (X_{lm} = X_{jm}) \text{ и } (X_{lm} \neq _') \\ 0, & \text{если } X_{lm} \oplus X_{jm} = 1 \\ _', & \text{если } (X_{lm} = _') \text{ или } (X_{jm} = _') \end{cases}.$$

Далее по построенной матрице R выполняется процедура резольвирования по следующему алгоритму.

5. Описание алгоритма резолюции на матрице связей

Предлагаемый алгоритм состоит из следующих процедур: предобработка матрицы связей, выбор связи для резольвирования, резольвирование дизъюнктов, добавление полученного вектора-резольвенты в матрицу связей.

5.1 Оптимизация матрицы связей

Обработка матрицы осуществляется построчно, начиная с первой строки. Выполняется удаление дизъюнктов-тавтологий, поглощенных и чистых дизъюнктов для всех связей матрицы R.

1) В матрице связей, если для наборов x_i и x_j количество нулей в связи $R(l, j)$ больше одного, то в результате резольвирования соответствующей пары дизъюнктов будет получен дизъюнкт-тавтология, и такую связь необходимо удалить.

2) Если $\forall i: i \in (\overline{1, n}) (R_i(l, j) = R_i(j, j)) \cup (R_i(l, j) = _')$, то дизъюнкт x_i поглощает дизъюнкт x_j , удаляются j-е строка и столбец.

3) Если в текущей строке j отсутствуют связи для резольвирования, то получен чистый дизъюнкт и эта строка удаляется.

Обработка матрицы связей продолжается до тех пор, пока не будут рассмотрены все строки.

Так как поглощающие дизъюнкты имеют меньшую длину, чем поглощаемые, то упорядочивание наборов по числу $_'$ позволяет выполнить процедуру поглощения за меньшее число шагов.

5.2 Выбор связи для резольвирования

Для получения резольвенты минимальной длины в [6] предложена эвристика выбора связи для резольвирования: выбирается связь, число $_'$ которой минимально отличается от числа $_'$ второго дизъюнкта и число единиц максимально. В большинстве случаев такой подход позволяет избежать резкого роста числа обрабатываемых дизъюнктов.

Благодаря способу упорядочивания наборов и построения матрицы связей, предложенных в данной работе, выбор связи с помощью такой эвристики сводится к последовательному выбору связей для резольвирования, что значительно уменьшает число, выполняемых сравнений.

В результате исследований, проведенных на ряде тестовых примеров, было показано, что такое упорядочивание наборов позволяет, анализируя матрицу связей, определять пары наборов, резольвирование которых приведет к поглощению этих наборов. Если $\forall i: i \in (\overline{1, n}) (R_i(l, j) = R_i(j, j)) \cup (R_i(l, j) \oplus R_i(j, j) = 1)$, то наборы x_j и x_i будут удалены.

Так как выбор таких связей приводит к сокращению пространства поиска, предлагается использовать такое свойство на этапе оптимизации матрицы связей, а также при добавлении резольвенты в матрицу связей. Следует отметить, что

такую проверку следует проводить для наборов одного класса, содержащих одинаковое число ' _ ', таким образом, использование такой эвристики существенно не повышает вычислительную сложность алгоритма.

5.3 Операция резольвирования дизъюнктов

Наличие в 0,1-ном наборе связи одного нуля показывает, что дизъюнкты образуют контрарную пару, то есть возможно их резольвирование. Операция резольвирования заключается в получении из векторов X_i и X_j нового вектора – резольвенты T_k , который определяется по правилу:

$$T_k = \begin{cases} X_{jk}, & \text{если } (X_{lk} \neq X_{jk}) \text{ и } (X_{lk} = ' _ ') \\ _ , & \text{если } (X_{lk} \neq X_{jk}) \text{ и } (X_{lk} \neq ' _ ') \\ X_{lk}, & \text{иначе} \end{cases} ,$$

Полученные резольвенты добавляются в соответствующий класс наборов, не нарушая упорядоченности внутри этого класса, что позволит уменьшить количество сравнений при поиске новой связи для резольвирования, а также увеличить вероятность поглощения новым дизъюнктом предыдущих.

Если номер класса нового набора меньше или равен номерам классов наборов-«родителей», то необходимо проверить возможность поглощения ним других наборов дизъюнктов и провести операцию поглощения. Для добавляемой резольвенты необходимо определить связи с другими дизъюнктами, которые набор-резольвента наследует у дизъюнктов-«родителей». В результате резольвирования новых связей не возникает.

Если на некотором этапе выполнения алгоритма получена пустая резольвента, то S выполнимо и алгоритм заканчивает свою работу. Если на некотором этапе выполнения алгоритма невозможно найти пару дизъюнктов для резольвирования, то S невыполнимо.

6. Экспериментальные исследования

Для оценки эффективности предложенного в работе алгоритма была выполнена серия экспериментов. Критериями эффективности метода были выбраны число итераций (резольвирований) и максимальное число дизъюнктов за время работы алгоритма.

Анализ эффективности предложенного алгоритма проводился на множествах дизъюнктов различной мощностью и различной длиной алфавита. Результаты оценки являются средними по результатам 30 экспериментов. В таблице 1 представлен сравнительный анализ алгоритма резолюции при 0,1-ном представлении дизъюнктов в логике высказываний классического алгоритма резолюции на графе связей.

Сравнительный анализ предложенного алгоритма и алгоритма вывода на графе связей на ряде частных случаев показал существенное уменьшение числа выполняемых итераций (20-30%) при незначительном росте пространства поиска (5-10%).

В [6] были предложены следующие эвристики для поиска связи для резольвирования:

1) последовательное резольвирование связей треугольной матрицы связей от столбца с минимальным номером до столбца с максимальным номером;

- 2) резольвирование связей с максимальным количеством единиц;
- 3) резольвирование связей с минимальным количеством единиц;
- 4) выбирается та связь, количество ‘_’ которой минимально отличается от количества ‘_’ второго дизъюнкта.

Таблица - Сравнительный анализ алгоритма резолюции на графе связей и на 0,1-ном представлении дизъюнкторов в логике высказываний

Критерии оценки		Резолюция на графе связей		Резолюция на 0,1-ном представлении	
Длина алфавита	Число дизъюнкторов	Число вершин	Число итераций	Число наборов	Число итераций
5	10	11	7	6	4
	20	23	10	13	4
	50	50	10	36	3
10	10	12	13	11	10
	20	24	25	21	19
	50	56	50	46	43
20	20	22	29	22	23
	50	55	69	52	53
	100	107	131	103	89

Параметрами, по которым возможно характеризовать работу алгоритма, являются число итераций алгоритма и число промежуточных дизъюнкторов. Число итераций определяет время работы алгоритма, а число промежуточных дизъюнкторов показывает рост пространства поиска.

Представим временную характеристику работы алгоритма, как зависимость числа промежуточных дизъюнкторов от шага логического вывода:

$$Y=f(X),$$

где X – номер шага работы алгоритма, а Y – число промежуточных дизъюнкторов на этом шаге.

Такая зависимость позволяет получить подробную информацию о работе алгоритма, в зависимости от выбранных эвристик.

Тестовым примером служила сгенерированная программно КНФ, состоящая из 60 дизъюнкторов, а длина алфавита составила 10 литер. Как показано на рис. 1 резольвирование связей с максимальным числом единиц позволяет получить результат за минимальное число итераций, но при этом наблюдается кратковременный рост количества обрабатываемых дизъюнкторов.

Выбор связи по числу ‘_’ позволяет уменьшить такой рост, но при этом для получения результата требуется большее число итераций. Временная



Рис. 1. Временная характеристика работы алгоритма при выборе связей с максимальным числом единиц

характеристика работы алгоритма с применением такой эвристики представлена на рис. 2.

На основе полученных данных был предложен комплексный подход к выбору связи для резольвирования: выбирается та связь, количество ‘_’ которой минимально отличается от количества ‘_’ второго дизъюнкта; если таких дизъюнктов несколько, то происходит резольвирование связей с максимальным количеством единиц.

Временная характеристика работы алгоритма при таком выборе связей для резольвирования представлена на рис. 3 и показывает, что такая эвристика является наиболее универсальной.

6. Выводы

В настоящей работе предложен алгоритм резолюции в логике высказываний для 0-1-ного представления дизъюнктов, который в отличие от существующих методов позволяет работать не с КНФ высказываний, а со списком 0-1-ных наборов для которых реализованы операции присущие методу резолюции: поглощение дизъюнктов, удаление дизъюнктов-тавтологий, чистых дизъюнктов

На каждой стадии алгоритма предложены эвристики, которые позволяют уменьшить время выполнения алгоритма и число дополнительных дизъюнктов:

- сортировка наборов на стадии построения списка дизъюнктов позволяет разделить дизъюнкты на классы аналогично методу Девиса-Патнема, что позволило снизить вероятность появления резольвенты большей длины, чем длина дизъюнкта-родителя, а также уменьшить число сравнений во время предобработки матрицы связей, за счет того, что поглощаемые дизъюнкты будут находиться внизу матрицы, и не будут участвовать в сравнении;

- предложенные эвристики поиска связи для резольвирования имеют свои преимущества и недостатки в зависимости от ресурсов системы и поставленной задачи; так выбор связи, количество ‘_’ которой минимально отличается от количества ‘_’ второго дизъюнкта позволяет получить результат за минимальное число шагов, но при этом число промежуточных дизъюнктов возрастает до 20%, в то же время для выбора связи с максимальным числом единиц, рост пространства поиска является не значительным, но существенно увеличивается время выполнения алгоритма;

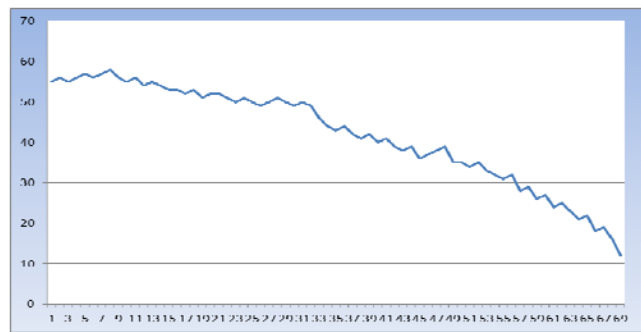


Рис. 2. Временная характеристика алгоритма при выборе связей по числу ‘_’

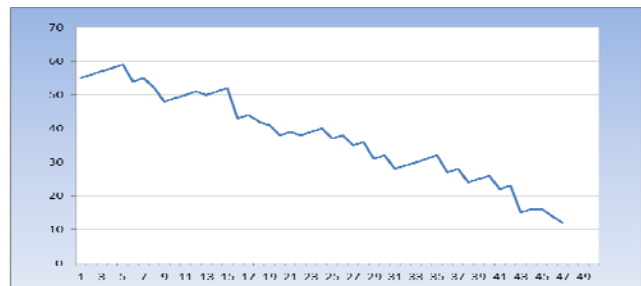


Рис. 3. Временная характеристика алгоритма с комплексной эвристикой выбора связи

– добавлении полученной резолюенты в начало матрицы связей позволяет часто получать ситуацию, когда она поглощает дизъюнкты-«родители», что также приведет к сокращению пространства поиска.

Проведено исследование эффективности работы алгоритма резолюции в логике высказываний для 0-1-ного представления дизъюнктов на ряде частных случаев, которое показало, что

– разработанный алгоритм уменьшает число выполняемых итераций, т. е. время выполнения алгоритма, в среднем на 24%;

– в среднем, рост пространства поиска по сравнению с выводом на графе связей уменьшился на 18%, и составил – 8%.

Результаты данной работы подтверждают эффективность использования 0-1-ного представления дизъюнктов для оптимизации алгоритма резолюции в логике высказываний

Список литературы: 1. *Gomez C.P. Satisfiability Solvers/ C.P.Gomez, H.Kautz, A. Sabharawal, V.Selman // Handbook of Knowledge Representation, 2008. – 301 с.* 2. *Вагин В.Н. Достоверный и правдоподобный вывод в интеллектуальных системах / В.Н. Вагин, Е.Ю. Головина, А.А. Загорянская – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 704 с.* 3. *Аверин А.И. Исследование и разработка алгоритмов параллельного вывода на графовых структурах: Автореферат дис. ... кандидата технических наук / А.И. Аверин – М. : МЭИ, 2004. – 36с.* 4. *Claessen Koen. SAT-solving in practice / Koen Claessen, Niclas Een, Mary Sheeran and Niclas Sorensson // Proceedings of the 9th International Workshop on Discrete Event Systems. – Goteborg, Sweden, 2008. – С. 61-67.* 5. *Поцелуевская Е.А. Теоретическая и практическая сложность задачи о выполнимости булевых формул / Е.А. Поцелуевская // Интеллектуальные системы. - М. – РГГУ, 2009. – Т.13. – С. 455-476.* 7. *Волченко М.В. Алгоритм резолюции в логике высказываний при 0-1-ном представлении дизъюнктов / И.С. Грунский, М.В. Волченко // XII национальная конференция по искусственному интеллекту «КИИ-2010». – М. : Физматлит, 2010. – Т.1. – С.64-71.*

Поступила в редколлегию 11.06.2012

УДК 621.391.25

М.В. ЗАХАРЧЕНКО, докт.техн.наук, проф., прорект, Одеська національна академія зв'язку ім О.С.Попова,

В.Й. КІЛЬДІШЕВ, канд..техн.наук, доц., Одеська національна академія зв'язку ім О.С.Попова,

Ю.В. БЄЛОВА, викл.,асп., Одеська національна академія зв'язку ім О.С.Попова,

С.В. ХОМИЧ, викл.,асп., Одеська національна академія зв'язку ім О.С.Попова

ВПЛИВ КОРЕЛЬОВАНИХ ЗАВАД НА ПРОПУСКНУ ЗДАТНІСТЬ БЕЗПЕРЕРВНОГО КАНАЛУ ЗВ'ЯЗКУ

Одержано аналітичні залежності між пропускну здатністю безперервного каналу та функцією кореляції сигналу при наявності канальних завад, сформульовані умови впливу коефіцієнта кореляції на пропускну здатність і швидкість передачі при обмеженій якості.

Ключові слова: Завада, канал зв'язку.