

Институт систем информатики им. А.П. Ершова Сибирского отделения РАН

Авторы результата:

- Емельянов Павел Геннадьевич, к.ф.-м.н., с.н.с.
- Пономарев Денис Константинович, к.ф.-м.н., с.н.с.

Методы и программные средства декомпозиции сложных комбинаторных систем, моделируемых булевыми функциями

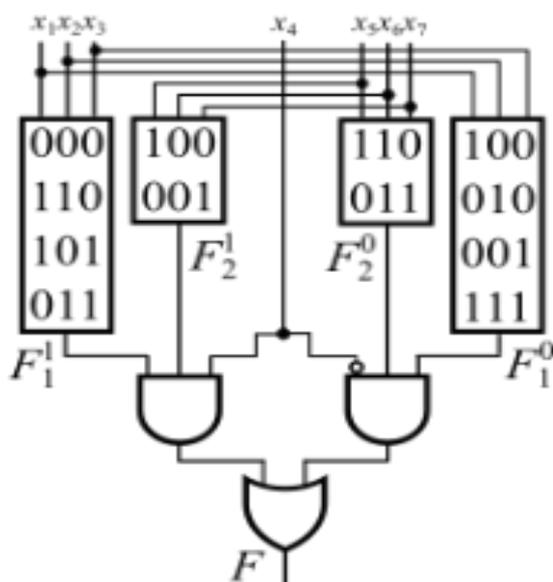


Рисунок 1. Декомпозиция таблицы единиц функции F с одной разделяемой переменной x_4 . Булевы таблицы описывают единицы соответствующих функций

Декомпозиция сложных объектов/систем является важнейшим методологическим приемом математики. Выявление посредством декомпозиции компонент, составляющих систему, позволяет снизить сложность их анализа и преобразований, найти более компактные способы ее представления, эксплицитировать ее внутреннюю структуру. Понимание сложности задачи декомпозиции систем демонстрирует алгоритмические перспективы исследования данных систем.

Для развития микроэлектроники важнейшее прикладное значение имеет задача декомпозиции булевых функций, лежащих в основе логических схем. Задача усложняется тем обстоятельством, что эти функции, могут специфицироваться в различных форматах. Оптимизация схемы состоит в отыскании представления булевых функций, удовлетворяющего тем или иным критериям: скорость срабатывания, компактность, энергоэффективность. Появление новых технологий создания компонентной базы электроники (например, на основе наноструктур) также требует появления новых методов оптимизации. Декомпозиция булевых функций – пример оптимизации, которая может быть использована для решения этих задач. Декомпозиция, примененная до шага минимизации, позволяет проводить более глубокую оптимизацию за счет минимизации компонент меньшего размера.

Оптимизация схемы состоит в отыскании представления булевых функций, удовлетворяющего тем или иным критериям: скорость срабатывания, компактность, энергоэффективность. Появление новых технологий создания компонентной базы электроники (например, на основе наноструктур) также требует появления новых методов оптимизации. Декомпозиция булевых функций – пример оптимизации, которая может быть использована для решения этих задач. Декомпозиция, примененная до шага минимизации, позволяет проводить более глубокую оптимизацию за счет минимизации компонент меньшего размера.

Кроме того, декомпозиция позволяет эксплицировать скрытые функциональные модули, что важно при компонентном дизайне схем. Программирование в системах на основе ПЛИС/ППВМ является по сути отысканием декомпозиции с заданными свойствами. Эффективное тестирование относительно малых компонент, составляющих схему, вместо схемы целиком позволяет повысить надежность вычислительных систем и избежать возможных потерь.

Был разработан полиномиальный алгоритм конъюнктивной декомпозиции на компоненты без общих переменных для булевых функций в форме ANF. На основе него был построен обобщенный алгоритм, настраиваемый на конкретную форму представления. На данный момент реализованы алгоритмы конъюнктивной и дизъюнктивной декомпозиции для функций, заданных в PDNF/PCNF (по сути, для таблиц истинности и их вариантов), posDNF/posCNF, ROBDD, OKFDD, AIG. Далее указанный алгоритм был обобщен на декомпозицию на компоненты с предписанными общими переменными, что является важным для реальных приложений случаем. Было обнаружено очень сильное оптимизирующее преобразование булевых функций: существуют функции, которые имеют от половины и более несущественных переменных (переменные, не влияющие на результат вычислений) и эти переменные могут быть вычисленных эффективно.

Еще одной областью применения рассмотренных алгоритмов декомпозиции является декомпозиция таблиц/деревьев принятия решений, используемых в системах поддержки принятия решений, в том числе в машинном обучении.

Публикации:

1. Factorization of Boolean Polynomials: Parallel Algorithms and Experimental Evaluation / Emelyanov P., Krishna M., Kulkarni V., Nandy S.K., Ponomaryov D., Raha S. // *Programming and Computer Software*. 47:2 (2021). pp. 15–26. DOI: 10.31857/S0132347421020059
2. Emelyanov P. and Ponomaryov D. The Complexity of AND-decomposition of Boolean Functions // *Discrete Applied Mathematics*. 280 (2020). pp. 113–132. DOI: 10.1016/j.dam.2019.07.005.
3. Emelyanov P. and Ponomaryov D. On a Polytime Factorization Algorithm for Multilinear Polynomials over F_2 // *Proceedings of the 20th International Workshop on Computer Algebra in Scientific Computing (CASC 2018) / Lecture Note in Computer Science*. – Vol. 11077, 2018. – P. 164-176. DOI: 10.1007/978-3-319-99639-4_11.
4. Emelyanov P. On Two Kinds of Dataset Decomposition // *Proceedings of the 18th International Conference on Computational Science (ICCS 2018) / Lecture Note in Computer Science*. – Vol. 10861, 2018. – P. 171-183. DOI: 10.1007/978-3-319-93701-4_13.

5. Emelyanov P. AND-Decomposition of Boolean Polynomials with Prescribed Shared Variables // Proceedings of the Second International Conference on Algorithms and Discrete Applied Mathematics (CALDAM 2016) / Lecture Note in Computer Science. – Vol. 9602, 2016. – P. 164-175. DOI: 10.1007/978-3-319-29221-2_14.

6. Emelyanov P. and Ponomaryov D. Algorithmic Issues of AND-Decomposition of Boolean Formulas // Programming and Computer Software. 41:3 (2015). pp. 162–169. DOI: 10.1134/S0361768815030032.