ПОЛИТЕХ
Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

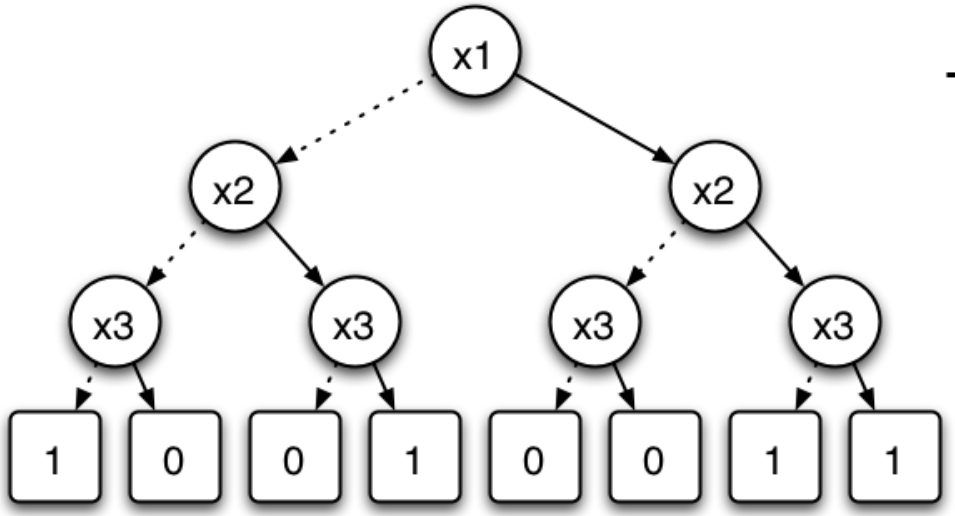
Верификация и анализ программ Bounded Model Checking

2018

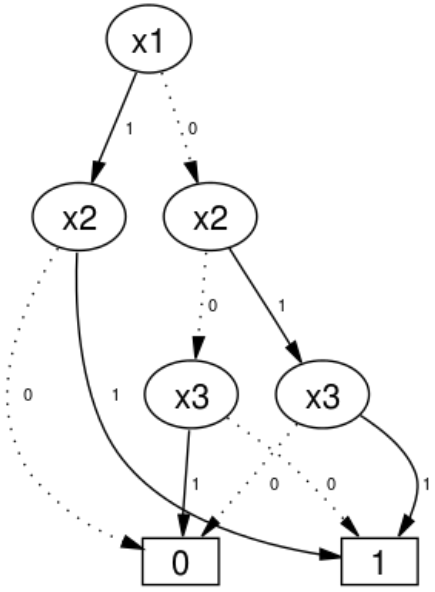
Bounded Model Checking

- Bounded Model Checking (BMC) – ограниченная проверка модели
- Метод, изобретенный в 1999 году
- “Bounded” – ограниченный, подразумевает ограничение пространства состояний
- Наиболее эффективные алгоритмы классического Model Checking:
  - Используют символьную верификацию
  - Используют BDD для представления логических формул

Бинарные решающие диаграммы (BDD)



x1	x2	x3	*f*
0	0	0	1
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	1
1	0	0	0
1	0	1	0
1	1	0	1
1	1	1	1

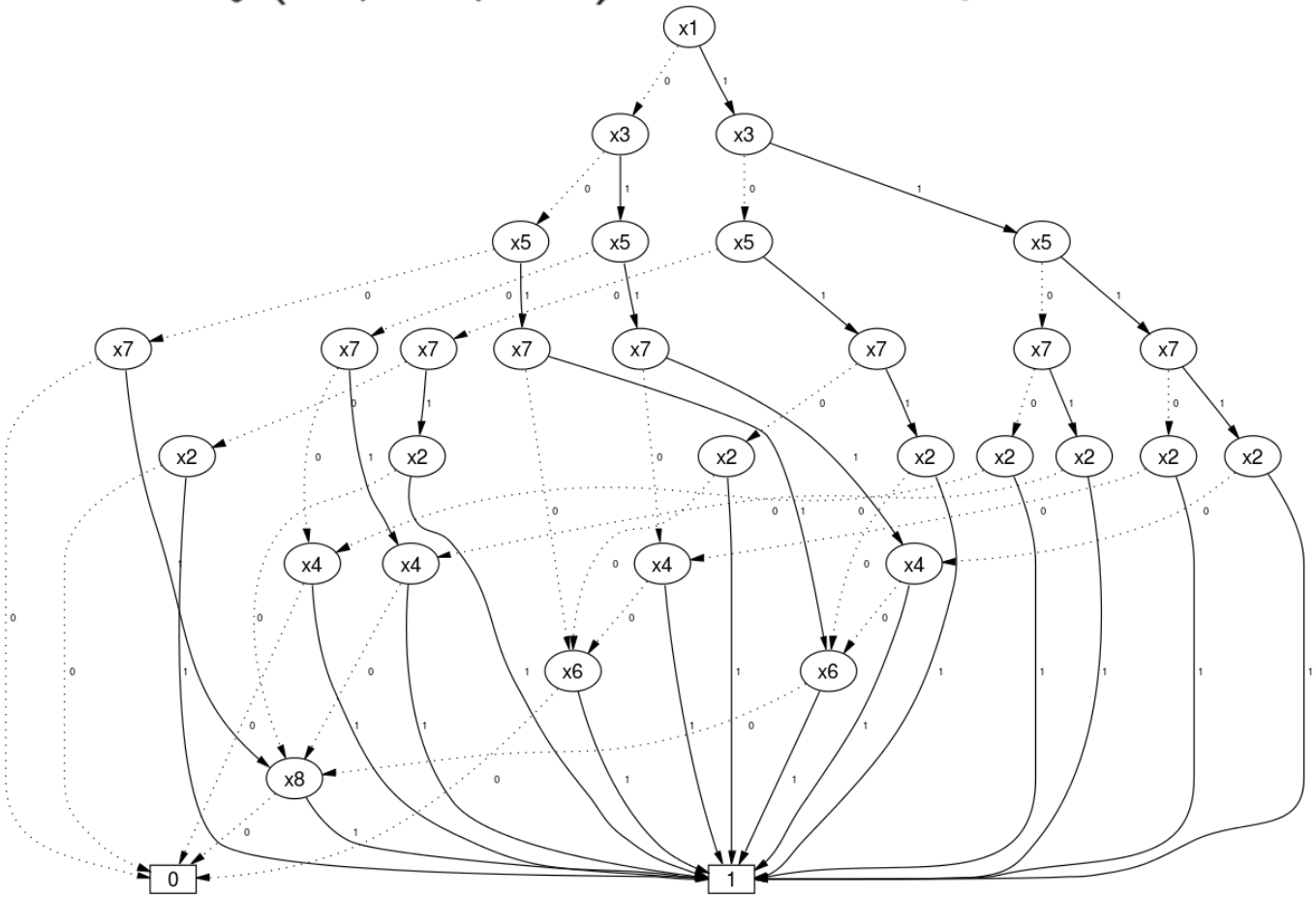


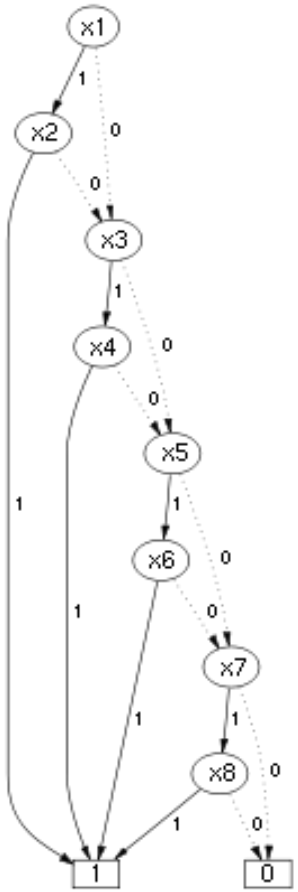
Bounded Model Checking

- Проблемы Model Checking
  - Эффективность очень зависит от “правильного” порядка переменных в BDD
  - Алгоритм выбора “правильного” порядка переменных - NP-полный
  - Часто требуется вмешательство человека для определения порядка переменных
  - Размер пространства состояний часто неприемлем для современных средств

Примеры BDD с разным порядком переменных

$$f(x_1, \ldots, x_{2n}) = x_1 x_2 + x_3 x_4 + \cdots + x_{2n-1} x_{2n}$$





Bounded Model Checking

- Основные идеи:
  - Сократить пространство состояний
  - Просматривать ограниченное число шагов
  - Использовать вместо BDD и символьной верификации методы решения задачи SAT-выполнимости
- Не страдает проблемой взрыва пространства состояний
- Существуют очень эффективные реализации

Особенности классического BMC

- BMC использует процедуру SAT вместо BDD

1. Фиксируется глубина (граница) k, например k=1
2. Формируется конечное (глубиной k) дерево решений
3. Строится формула, которая выполняется тогда и только тогда, когда имеется контрпример длины k
4. Если контпример найден – алгоритм завершается
5. Если контрпример не найден, то k := k+1
6. Граница достигнута? Нет - переход к поиску более длинного контрпримера (шаг 2)
7. После определенного числа итераций можно убедиться, что контрпримера не существует и спецификация выполняется

Особенности классического BMC

- Поиск доказательства формулы Ef сводится к поиску контрпримера для формулы A¬f и наоборот
- Благодаря особенностям алгоритма поиска контрпример находится быстро
- BMC находит контрпример **минимальной длины**
  - удобно для отладки и быстрого поиска ошибок
  - после нахождения контрпримера нет смысла анализировать дальше

Использование BMC для поиска ошибок в программах

- Проверяемая функция программы переводится в CFG в форме SSA
- Все циклы раскручиваются на предопределенную глубину путем подстановки (loop unrolling)
- Получившаяся модель без циклов превращается в логическую формулу:
  - Присваивание переменным в SSA встречается один раз
  - Каждый узел SSA заменяется логической формулой
  - В итоге вся модель функции превращается в гигантскую формулу P
- Проверяемые обобщенные свойства программы кодируются предикатами (C) в точках проверки:
  - Выход за границу массива, корректность указателя и т.п.
  - Истинность предиката показывает нарушение правила корректности программы

Использование BMC для поиска ошибок в программах

- Результирующая формула $F = P \wedge C$ проверяется на разрешимость с помощью SMT-солвера
- Если F – разрешима (sat), то программа некорректна, а вектор решений – контрпример
- Если F – неразрешима (unsat), то операция повторяется для модели с увеличенной глубиной раскрутки циклов и рекурсий, до тех пор, пока не будет достигнут максимум. В итоге, если осталось unsat – программа корректна, относительно свойства C

Использование BMC для поиска ошибок в программах

- BMC позволяет дополнительно поверять:
  - Выполнение контрактов
  - Выполнение assertion
- Для контрактов:
  - Пред- и постусловия записываются в форме предикатов логики первого порядка
  - Проверяется разрешимость формулы f’(Pred, P, Post)
  - Если формула разрешима – контракт не выполняется
- Для assertion – аналогично

Использование BMC для поиска ошибок в программах

- Основные сложности BMC при анализе программ:
  - Представление сложных структур данных
  - Потенциальная незавершаемость запуска SMT-решателя
  - Межпроцедурность
  - Вопросы определения глубины раскрутки циклов и рекурсий
- Анализаторы, основанные на BMC:
  - LLBMC (Karlsruhe Institute of Technology)
  - CBMC (Oxford)
  - ESBMC (Университет Саутгемптона, Университет Штелленбош и Федеральный Университет Амазонии)
  - SMT-BMC
  - Borealis (СПбПУ)