

ОТЗЫВ

официального оппонента Николенко Сергея Игоревича, к.ф.-м.н.,
на диссертационную работу Осокина Антона Александровича
на тему «Субмодулярная релаксация в задаче минимизации энергии
марковского случайного поля»,
представленную на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук по специальности
01.01.09 – дискретная математика и математическая кибернетика

Диссертация А.А. Осокина посвящена задаче минимизации функции энергии, заданной на гиперграфе посредством потенциалов, заданных на вершинах и гиперрёбрах этого гиперграфа. Эта задача является одной из основных задач байесовского вывода, поскольку на ней основаны алгоритмы вывода в ненаправленных графических моделях: марковских случайных полях (MRF) и условных случайных полях (CRF). Дело в том, что для определённого вида функций энергии их минимизация эквивалентна поиску максимума распределения (совместного или условного), заданного ненаправленной графической моделью. Марковские случайные поля – это один из важных и часто используемых инструментов для анализа данных, MRF особенно часто используются при анализе изображений и видеопоследовательностей: распознавание объектов, обработка изображений, удаление шумов, сглаживание, восстановление изображений и т.п. Таким образом, любые продвижения в алгоритмической стороне этой задачи являются крайне важными для практических приложений, и актуальность темы диссертации не вызывает сомнений.

Первая глава диссертации посвящена постановке задачи и обзору существующих методов минимизации энергии. Формально вводится энергия на гиперграфе, задача оптимизации, рассматриваются частные случаи, в которых возможно точное решение (граф без циклов и алгоритм передачи сообщений, парно-сепарабельная субмодулярная энергия и алгоритм, основанный на поиске разреза), приближённые алгоритмы (шагающие алгоритмы, основанные на поиске разреза). Подробно рассмотрены разные виды релаксаций для базовой дискретной задачи оптимизации.

Вторая глава вводит один из основных результатов диссертации: предложенный диссертантом метод субмодулярной релаксации. Идея метода состоит в том, чтобы представить общую энергию системы в виде суммы субмодулярных функций и записать нижнюю оценку как сумму нижних оценок на слагаемые, которые, в свою очередь, можно эффективно вычислить при помощи алгоритмов, основанных на поиске разреза. В главе 2 полученная оценка уточняется при помощи перехода к двойственной функции, метод обобщается на случай потенциалов высоких порядков, рассматривается случай несубмодулярного лагранжиана (в этом случае метод всё равно применим, но должен использовать приближённые алгоритмы минимизации энергии), отдельно рассматривается случай линейных ограничений.

Третья глава посвящена теоретическому исследованию метода, предложенного во второй главе: чтобы оценить качество предложенных аппроксимаций, нужно оценить точность полученных нижних оценок на глобальный минимум функции энергии. В главе 3 доказаны основные теоретические результаты работы: доказано, что результат субмодулярной релаксации для ассоциативных парных потенциалов совпадает с оценкой, полученной при помощи стандартной линейной релаксации, а также релаксации Кляйнберга–Тардош; доказано, что результат субмодулярной релаксации для потенциалов высокого порядка не лучше нижней оценки, полученной при помощи релаксации Комодакиса и Параджиоса, а в случае перестановочных потенциалов Поттса совпадает с ней.

Четвёртая глава посвящена анализу свойств алгоритма субмодулярной релаксации: изучены теоретические свойства точек максимума двойственной функции, рассмотрен ряд методов оптимизации для решения двойственной задачи, а для метода усреднения мин-маргиналов Уэйнрайта построена его модификация для случая субмодулярной релаксации. Таким образом, в четвёртой главе разработан алгоритм по координатного подъёма для максимизации нижней оценки, построенной в рамках подхода субмодулярной релаксации, применимый в случае ассоциативных парно-сепарабельных энергий. Разработанный алгоритм, в отличие от методов выпуклой оптимизации, позволяет найти значение множителей Лагранжа, гарантированно обладающее свойством слабой согласованности. Кроме того, рассмотрена задача оценки прямого решения задачи минимизации энергии.

Пятая глава посвящена экспериментальному исследованию и сравнению методов, рассматриваемых в диссертации. Для парно-сепарабельных ассоциативных энергий проведён эксперимент на реальных данных (изображений), изучена чувствительность к выбору параметров и быстродействие разных алгоритмов. Для энергий с потенциалами высоких порядков проведён эксперимент на синтетических данных. Применимость метода на реальных данных иллюстрирована при помощи задач сегментации изображений, сегментации магнитограмм, сегментации изображений с глобальными ограничениями. Результаты экспериментов показывают, что метод субмодулярной релаксации превосходит существующие аналоги (в частности, алгоритм CWD, реализующий метод релаксации Комодакиса и Параджиоса) как по времени работы, так и по качеству получаемого решения исходной задачи.

В целом диссертационная работа А.А. Осокина – это научное исследование высочайшего уровня, которое безусловно значимо как теоретически, так и практически. Теоретическая значимость состоит в том, что закрыт целый ряд теоретических вопросов, возникающих при появлении нового метода поиска наиболее точной нижней оценки методами релаксации Лагранжа: охарактеризовано значение наиболее точной нижней оценки, получаемой в рамках субмодулярной релаксации, описаны свойства точки максимума двойственной функции. Практическая значимость работы состоит в том, что разработанный подход более эффективен, чем аналоги, основанные на

двойственной декомпозиции, и обладает более широкой областью применимости, чем аналоги, основанные на алгоритме альфа-расширения.

Тем не менее, к предложенной диссертационной работе можно сделать ряд замечаний. Во-первых, эксперименты с разреженными потенциалами высоких порядков проведены только на модельных данных; проведение аналогичных экспериментов на реальных данных могло бы существенно увеличить прикладное значение работы. Во-вторых, утверждения 2, 3, и 4 сопровождаются ссылками на источники; включение данных доказательств в работу облегчило бы её чтение. Наконец, в работе встречаются опечатки и небольшие неточности; например, на с. 16 говорится, что «примером моделей-цепочек являются скрытые марковские модели (НММ)», хотя на самом деле граф НММ имеет более сложную структуру (цепочка с разветвлением в каждой вершине). Тем не менее, указанные замечания не ставят под сомнение ценность основных результатов и не снижают общей высокой оценки диссертационной работы.

Диссертация Осокина Антона Александровича «Субмодулярная релаксация в задаче минимизации энергии марковского случайного поля» является законченной научно-квалификационной работой на актуальную тему, выполненной автором самостоятельно на высоком научном уровне. Основные этапы работы, её выводы и результаты полностью отражены в автореферате. Представленные в работе результаты обоснованы, имеют теоретическую и практическую ценность, опубликованы в научной печати в достаточной степени (7 изданий, включенных в список ВАК). Результаты диссертационной работы рекомендуются к использованию в исследованиях по дискретной математике в МГУ, ПОМИ РАН, МИАН, СПбГУ и других научных и учебных организациях, как российских, так и зарубежных. Результаты работы могут быть использованы в учебных курсах «Машинное обучение», «Байесовский вывод», «Обработка изображений» и других специальных курсах.

Тематика и содержание диссертационного исследования соответствуют специальности 01.01.09 – «Дискретная математика и математическая кибернетика». Работа отвечает всем требованиям, предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям, а её автор, Осокин Антон Александрович, заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук.

Научный сотрудник
лаборатории математической логики
Санкт-Петербургского отделения
Математического института им. В.А. Стеклова,
ПОМИ РАН,
к.ф.-м.н. Николенко Сергей Игоревич

