

Санкт-Петербургский государственный университет

Кафедра системного программирования

Программная инженерия

Привалихин Алексей Александрович

**Создание прототипа инструмента для применения
апостериори метода построения компромисса в задаче
FMO и его интеграция в проект RefleXion X1**

Отчет по производственной практике

Научный руководитель:
ст. пр. кафедры
системного программирования
Я. А. Кириленко
Консультант:
глав. инж. RefleXion Medical
Е. С. Вороненко, PhD

Санкт-Петербург
2020

Содержание

Введение	2
1 Постановка задачи	4
2 Обзор	5
3 Ход работы	7
4 Заключение	7

Введение

Компания RefleXion Medical — одна из немногих на рынке аппаратов лучевой терапии. Ее основным продуктом является RefleXion X1 — аппарат, который кроме традиционных для современной радиотерапии методов, таких как IMRT [1] и SBRT [2], поддерживает также находящийся в стадии клинических испытаний метод VgRT [3].

Линейный акселератор аппарата RefleXion X1 расположен на непрерывно вращающемся вокруг продольной оси кушетки кольце. На протяжении одного оборота линейный акселератор проходит 50 позиций (firing position), в каждой из которых может быть выпущено не более 4 импульсов. Форма луча контролируется многолепестковым коллиматором (MLC), имеющим 64 лепестка. Также кушетка может перемещаться вдоль продольной оси, занимая фиксированные положения с интервалом 2.1мм (beam stations). Элементарным лучом (beamlet) называется часть луча, проходящая через конкретный лепесток MLC в конкретной позиции кольца и кушетки.

Одной из важных частей программного обеспечения аппарата RefleXion X1 является планировщик лечения. В режиме IMRT/SBRT, получив на вход заданный врачом набор предписаний и ограничений по дозе для каждого органа и целевой области, планировщик задает оптимальную дозу для каждого элементарного луча, составляя так называемую карту флюенса (fluence map).

Для каждого предписания строится неотрицательная выпуклая функция штрафа, отражающая степень выполнения данного предписания. Задача оптимизации карты флюенса (FMO) в отношении данных функций штрафа является задачей многокритериальной оптимизации (MCO).

Поскольку заданные предписания зачастую являются конфликтующими и одновременное полное их соблюдение невозможно, задача выбора компромисса между различными функциями штрафа является критически важной. Метод, реализованный в текущей версии проекта RefleXion X1, — метод взвешенной суммы — относится к априори методам, то есть решение о компромиссе принимается до запуска процесса оптимизации. Большим недостатком априори методов является невозможность предсказать заранее точные значения тех или иных параметров решения, которое выберет планировщик. Таким образом, построение клинически приемлемого плана зачастую требует многократного ручного изменения весов и запуска оптимизации, что делает данный процесс долгим и трудоемким.

В противовес априори методам, апостериори методы предполагают построение некоторого множества оптимальных (обычно в смысле критерия Парето) планов, из которых можно выбрать приемлемый. Главным преимуществом такого метода является отсутствие необходимости многократно запускать процесс оптимизации вручную.

В рамках развития проекта RefleXion X1 было принято решение рассмотреть различные способы применения апостериори методов построения компромисса в задаче FMO, и возможность их внедрения в проект RefleXion X1 для расширения полезной функциональности планировщика лечения.

Стоит отметить, что согласно соглашению о неразглашении (NDA) с компанией Reflexion Medical некоторые детали реализации и архитектуры проекта Reflexion X1 не могут быть опубликованы.

1 Постановка задачи

В рамках проекта были поставлены следующие задачи.

- Провести обзор возможных способов предоставить врачу способы контроля над точным значением одного или нескольких из параметров генерируемых планировщиком лечения планов и информацию о диапазонах возможных значений этих параметров.
- Исходя из существующих в проекте ограничений выбрать один из методов и реализовать соответствующий алгоритм в среде MATLAB вместе с прототипом интерфейса.
- Провести тестирование реализованного алгоритма на множестве клинических планов для оценки корректности работы и практической полезности выбранного метода.
- Представить вариант интеграции созданного инструмента в проект RefleXion X1, в том числе в пользовательский интерфейс.

2 Обзор

Задача многокритериальной оптимизации (МСО) Многокритериальная оптимизация (МСО) — это процесс одновременной оптимизации двух или более конфликтующих целевых функций в заданной области определения. Эти функции образуют математическое описание критерия приемлемости и, как правило, взаимно конфликтуют. Отсюда, «оптимизировать» означает найти такое решение, при котором значения целевых функций были бы приемлемыми для постановщика задачи.

Задача оптимизации карты флюенса (ФМО) Задача ФМО — это задача выпуклой оптимизации, сформулирована следующим образом: пусть для каждого предписания врача построена выпуклая неотрицательная функция штрафа, принимающая в качестве аргумента карту флюенса, то есть величину флюенса для каждого положения кушетки, линейного ускорителя и лепестков МЛС. Требуется найти приемлемую с точки зрения значений функций штрафа карту флюенса. Таким образом, задача ФМО является задачей многокритериальной оптимизации (МСО).

Компромисс в задаче МСО Существуют различные методы [4] принятия решения о компромиссе между различными критериями в задаче МСО. По времени принятия решения данные методы разделяют на:

- Априори методы — решение принимается до запуска оптимизации. Характерным представителем этой группы является метод взвешенной суммы. Методы данной группы характеризуются сравнительно быстрым временем вычисления для уже заданного компромисса, но само принятие решения о компромиссе является крайне сложной задачей, поскольку по заданным параметрам зачастую сложно предсказать реальные параметры плана, который в итоге будет получен в процессе оптимизации.
- Апостериори методы — решение принимается после окончания работы оптимизации. Оптимизация автоматически запускается неоднократно с различными параметрами, после чего пользователю представляется некоторый набор оптимальных в смысле критерия Парето планов. Большим подспорьем для методов данной группы является выпуклость функций штрафа, что позволяет считать выполнимыми карты флюенса, являющиеся выпуклыми комбинациями полученных в результате работы оптимизации карт флюенса. Такие карты не будут оптимальными в смысле критерия Парето, однако при достаточном качестве построенного приближения поверхности Парето могут быть весьма близки к оптимальным. Стоит отметить, что в практической реализации зачастую строится только та часть поверхности Парето, для которой выполняются некоторые базовые критерии клинической приемлемости для некоторых характеристик плана (например достаточное покрытие целевого объема (PTV) предписанной дозой радиации), и данные характеристики далее не учитываются в списке критериев МСО (таким образом уменьшается размерность задачи). Планы, удовлетворяющие этим базовым критериям

здесь и далее будем называть "базово приемлемыми". Стоит отметить, что благодаря выпуклости функций штрафа базовых критериев, множество базово приемлемых карт флюенса будет выпуклым.

Построение поверхности Парето для полноразмерной задачи FMO Существуют методы построения приближения полноценной поверхности Парето для задачи FMO (например предложенный Д. Крафтом et al в 2006 году [5]).

Существенной проблемой реализации таких методов является необходимость использования алгоритма построения многомерной выпуклой оболочки множества точек. Публично доступным и многократно проверенным инструментом для решения такой задачи является утилита QHull [7] (в частности, она же применяется в алгоритме, описанном в приведенной выше статье), однако ее ограничения (например, согласно документации, утилита не способна построить выпуклую оболочку уже для ста точек в 16-мерном пространстве) требуют максимально сократить количество рассматриваемых в задаче FMO параметров и ввести жесткое разделение между целями и ограничениями, что на данный момент в проекте RefleXion X1 не реализовано.

Среди других сложностей, связанных с использованием такого рода алгоритмов, стоит упомянуть и необходимость в многократном, хотя и автоматическом, запуске оптимизации для достижения удовлетворительной точности приближения.

Построение поверхности Парето для двухмерной версии задачи FMO По тем или иным причинам, например для уменьшения вычислительной сложности, иногда применяется представление задачи FMO в виде компромисса между функцией штрафа одного из параметров карты флюенса (например количества мониторных единиц [6]) и некоторой (составленной априори) общей функции штрафа остальных параметров.

Такое представление задачи предоставляет пользователям дополнительную востребованную функциональность по сравнению с чистыми априори методами, вместе с тем требуя значительно более простых в реализации алгоритмов, которые к тому же производят намного меньше вычислений чем чистые апостериори методы.

Стоит отметить, что в приведенной выше статье подробно не описан сам метод построения поверхности Парето для данной задачи, поскольку статья сосредоточена на исследовании одного конкретного параметра (количества мониторных единиц), его клинической значимости и влиянии на другие характеристики карты флюенса.

Также, из-за различий между целевым оборудованием данной работы и процитированной статьи сам этот параметр не имеет существенного значения в проекте RefleXion X1, и напрямую он в оптимизации не участвует.

3 Ход работы

По итогам исследования апостериори методов истинной МСО был сделан вывод о невозможности их качественной реализации в приемлемые сроки. Поэтому были рассмотрены компромиссные решения в виде смешанного применения априори и апостериори методов для построения приближения поверхности Парето для двухмерного представления задачи FMO.

В рамках такого подхода пользователь выбирает одну характеристику плана (например требуемое для выполнения итогового плана время использования аппарата, для чего потребовалось создать выпуклую функцию штрафа, являющуюся достаточно точным приближением времени лечения для аппарата RefleXion X1) и вручную выставляет веса для остальных, после чего у плана остается лишь две характеристики: функция штрафа выбранной характеристики и взвешенная сумма остальных функций штрафа.

Поверхность Парето в данном случае будет выпуклой кривой в двухмерном пространстве. В качестве метода приближения данной кривой выбрано построение некоторого набора точек, принадлежащих этой кривой, и последующая линейная интерполяция для получения аппроксимации кривой в произвольной точке. Стоит отметить, что благодаря выпуклости множества базово приемлемых планов, полученные с помощью линейной интерполяции карты флюенса будут базово приемлемыми.

Был предложен следующий алгоритм выбора точек для построения описанного выше набора: сперва с помощью запуска априори оптимизации с нулевым весом функции штрафа выбранного параметра определяется худшая граница возможного диапазона по данной характеристике. Затем с помощью запуска априори оптимизации с высоким весом функции штрафа выбранного параметра определяется лучшая граница диапазона. После чего рекурсивно применяется метод бисекции диапазона до тех пор, пока разница между значениями функций штрафа соседних точек не окажется меньше установленной границы чувствительности.

Данный алгоритм был реализован в среде MATLAB вместе с прототипом пользовательского интерфейса, после чего работа алгоритма была проверена на 17 клинических планах, полученные результаты свидетельствуют о том, что алгоритм работает корректно. После этого на языке Typescript с использованием фреймворка Angular и библиотеки RxJS был реализован прототип интеграции созданного инструмента в продукт.

4 Заключение

В ходе данной работы достигнуты следующие результаты.

- Был проведен обзор существующих методов построения компромисса в задаче FMO и их оценка с точки зрения возможности интеграции в проект RefleXion X1 в рамках существующих в нем ограничений.

- Был предложен новый метод (заявка на патент подана в патентное бюро США) построения компромисса в задаче FMO.
- Выполнена реализация соответствующего алгоритма и прототипа интерфейса для использования результатов его работы в среде MATLAB.
- Алгоритм протестирован на 17 клинических планах, ошибок не выявлено. С учетом мнения руководства и пользователей функциональность была оценена как достаточно полезная для включения инструмента в продукт.
- Был создан вариант интеграции созданного инструмента в продукт, результат ожидает оценки и комментариев от команды UX.

Список литературы

- [1] Описание технологии IMRT:
<https://www.radiologyinfo.org/en/info.cfm?pg=imrt>
- [2] Описание технологии SBRT:
<https://www.mskcc.org/cancer-care/diagnosis-treatment/cancer-treatments/radiation-therapy>
- [3] Описание технологии VgRT:
<https://reflexion.com/our-technology/>
- [4] Описание методов МСО в задаче FMO: R. Bokrantz. "Multicriteria optimization for managing tradeoffs in radiation therapy treatment planning".
- [5] Описание одного из методов построения поверхности Парето в задаче FMO: D. Craft, T. Halabi, H. Shih, and T. Bortfeld. "Approximating convex Pareto surfaces in multiobjective radiotherapy planning".
- [6] Описание метода построения компромисса между качеством плана и требуемым количеством мониторинговых единиц в IMRT: D. Craft, P. Süß and T. Bortfeld. "The tradeoff between treatment plan quality and required number of monitor units in intensity-modulated radiotherapy".
- [7] Веб-страница утилиты QHull:
<http://www.qhull.org/>