

Оптимизация параметров фокусирующей магнитной системы для стабилизации пучка заряженных частиц в кильватерном ускорителе

А.Д. Кошкин, А.М. Альтмарк, Н.А. Лесив, С.А. Фёдоров

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Аннотация: В данной работе исследовалась возможность применения оптимизационным методов для автоматического поиска параметров фокусирующей магнитной системы, которые должны удовлетворять заданным значениям дальности пролета пучка в волноводе. Описан способ применения метода кругого подъема для оптимизации системы. Проведён численный эксперимент, показывающий эффективность предлагаемого метода.

Ключевые слова: ускорители, СВЧ, макрочастицы, фокусировка, магниты, квадруполь.

1. Введение

Одной из основных задач ускорительной физики [1] и техники новых терагерцовых источников энергии [2] является задача фокусировки пучков заряженных частиц таким образом, чтобы они пролетели максимальное расстояние внутри волноведущей структуры. Для решения этой задачи обычно используются магнитные квадрупольные фокусирующие системы [3]. Такие системы позволяют фокусировать пучок по двум поперечным координатам.

Квадрупольная фокусирующая система определяется следующими параметрами: длина фокусирующей (дефокусирующей) секции, количество секций, а также сила магнитного поля в каждой секции. При подборе фокусирующей системы важно учитывать поля, создаваемые самим пучком (поля Кулона и Вавилова-Черенкова), что значительно усложняет задачу и делает практически невозможным нахождение аналитического решения уравнения движения пучка. В данных обстоятельствах самым приемлемым исследовательским инструментом является численное моделирование полета пучка внутри волновода на основе известных аналитических выражений для фокусирующего поля, поля Кулона и поля Вавилова-Черенкова.

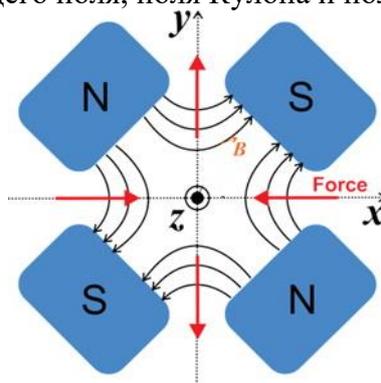


Рисунок 1. Квадрупольная магнитная линза

Компоненты фокусирующей силы \mathbf{F} для квадрупольной секции можно записать следующим образом

$$F_x = -q v_z B_y, F_y = -q v_z B_x, B_x = G y, B_y = G x,$$

где G - градиент величины магнитного поля (G -параметр), B_x, B_y - поперечные компоненты индукции магнитного поля, v_z - продольная компонента скорости, q - заряд частицы, x, y - поперечные координаты.

Так как у данной задачи нет однозначного аналитического решения, но при этом эмпирический подбор параметров фокусировки является слишком сложным из-за большого количества параметров, поэтому необходимо использовать оптимизационные методы компьютерного моделирования.

Полный перебор параметров системы является самым неоптимальным решением данной задачи, так как для решения требуется большое количество компьютерного времени. Очень важно при использовании численных методов моделирования движения пучка в самосогласованном электромагнитном поле контролировать временной шаг, основываясь на результатах предварительного моделирования. Шаг по времени можно будет считать правильным, если результаты предварительного моделирования отличаются от результатов данного моделирования не более наперед заданной величины.

2. Решение задачи с помощью метода Бокса-Уилсона

Как уже было сказано магнитная система имеет много параметров: количество секций, их продольную длину, расстояние между секциями, и G -параметр каждой секции. Можно уменьшить количество параметров, задавая магнитную индукцию текущей фокусирующей (дефокусирующей) с помощью математической функции. В простейшем случае в качестве зависимости G -параметра текущей секции от её координаты z можно взять линейную функцию $G = az + b$. Таким образом для подбора G -параметра необходимо перебирать значения только двух величин a и b . Можно использовать другие функции для получения более сложных магнитных систем, но наиболее эффективной системой считается система, в которой чередуются фокусирующие и дефокусирующие секции, а сила каждой следующей секции ниже, чем у предыдущей, из-за чего функция должны быть монотонной. Чередовать знак можно, используя номер секций.

Для реализации алгоритма оптимизации необходимо подобрать 4 параметра магнитной системы так, чтобы пучок заряженных частиц пролетел в волноводе наибольшее расстояние L до момента касания волновода. Следовательно, нужно искать максимум функции, зависящей от четырех переменных. При этом невозможно использовать стандартный подход, предполагающий взятие производной от функции L , так как получить значение производной можно только из результатов моделирования полета пучка. Исходя из сказанного выше можно сделать вывод, что в данной ситуации подходит метод оптимизации Бокса-Уилсона [4] или метод крутого восхождения, так как он позволяет оптимизировать систему без взятия производной от функции, которую мы оптимизируем. Данный метод основывается на определении градиента функции численным методом, что позволяет определить изменить параметры таким образом, чтобы получить оптимальный результат за минимальное число шагов.

Метод заключается в том, чтобы при небольшом изменении параметров достичь максимального значения функции. Данное значение функции будет являться начальным для следующего шага. Изменение нужно проводить до тех пор, пока функция не начнет убывать. Тогда можно считать точку экстремума достигнутой с наперед заданной точностью.

Для начала можно попробовать применить этот метод только на 2 параметрах, задающих G -параметр и координату начала секции, а размеры секций и количество секций оставить настраиваемыми вручную.

3. Проведение эксперимента

Проверим метод на некотором пучке с помощью программы BD_WF, позволяющей генерировать пучки заряженных частиц и моделировать их распространение в волноводе с учетом полей Вавилова-Черенкова и Кулона. С этой целью в программу были добавлены модули для моделирования магнитного поля и его оптимизации.

Можно показать, что при некоторых параметрах фокусирующей системы дистанция распространения пучка становится больше по сравнению со случаем отсутствия магнитной фокусировки. Для этого можем пустить один и тот же пучок через волновод с включенным и выключенным магнитным полем, подобранным вручную. Перед запуском важно оценить устойчивость численного расчета, которая проверяется путем сравнения траекторий, полученных для разных шагов по времени. Правильный временной шаг определяется по отсутствию значительного изменения траектории движения пучка. Дальнейшее уменьшение временного шага не имеет смысла в связи с увеличением времени расчета.

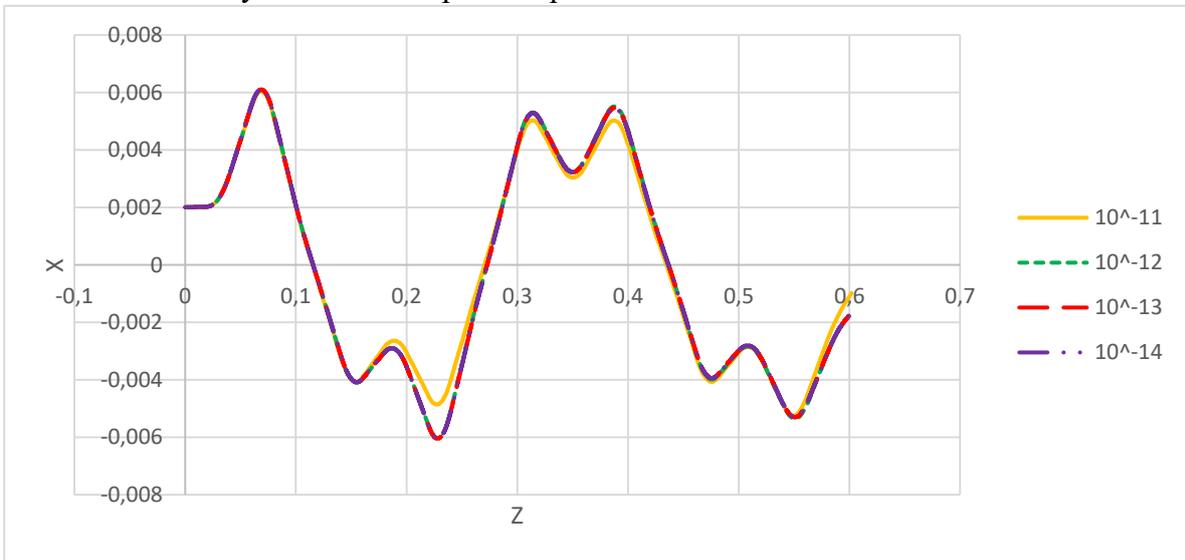


Рисунок 2. График устойчивости

Из графика видно, что при уменьшении шага до 10^{-13} с результат практически не изменяется, значит можно использовать шаг 10^{-12} с для моделирования.

Теперь запустим модель с включенной и выключенной магнитной системой. Убедимся в том, что подобранная вручную магнитная система позволяет пучку лететь дальше, не касаясь волновода.

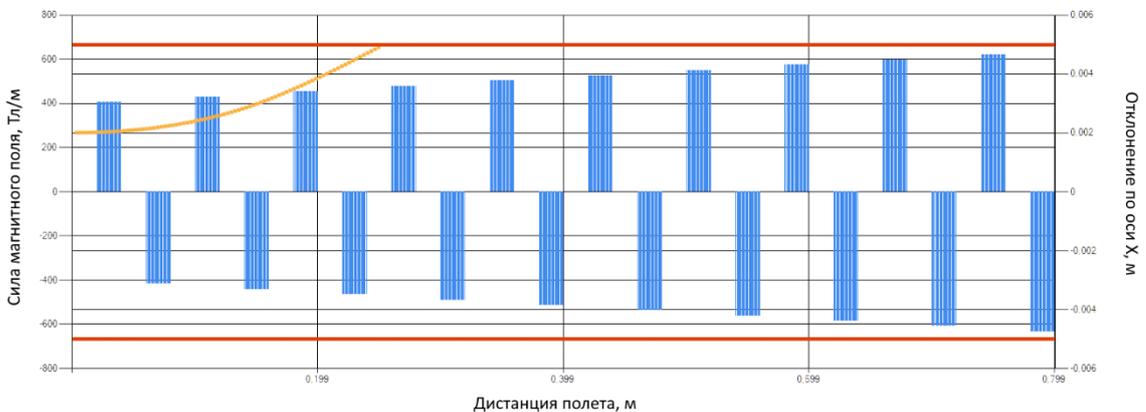


Рисунок 3. Траектория пучка без фокусирующей системы

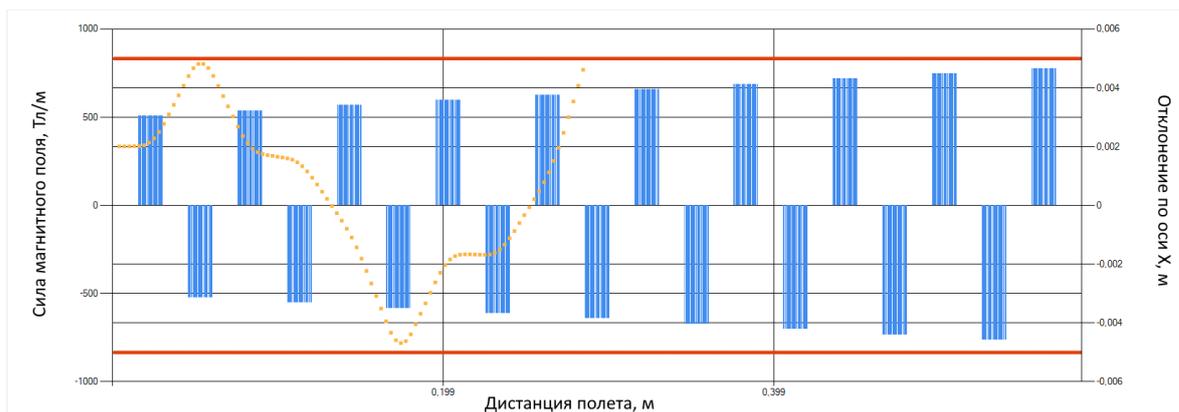


Рисунок 4. Траектория пучка с фокусирующей системой, подобранной вручную

Анализируя результаты, показанные на рисунке 4 можно отметить, что вручную удалось значительно увеличить дальность полета. Теперь запустим оптимизацию для силы магнитного поля (подберем a и b в функции $G = a z + b$) и убедимся в том, что вручную подобранная система была менее эффективна.

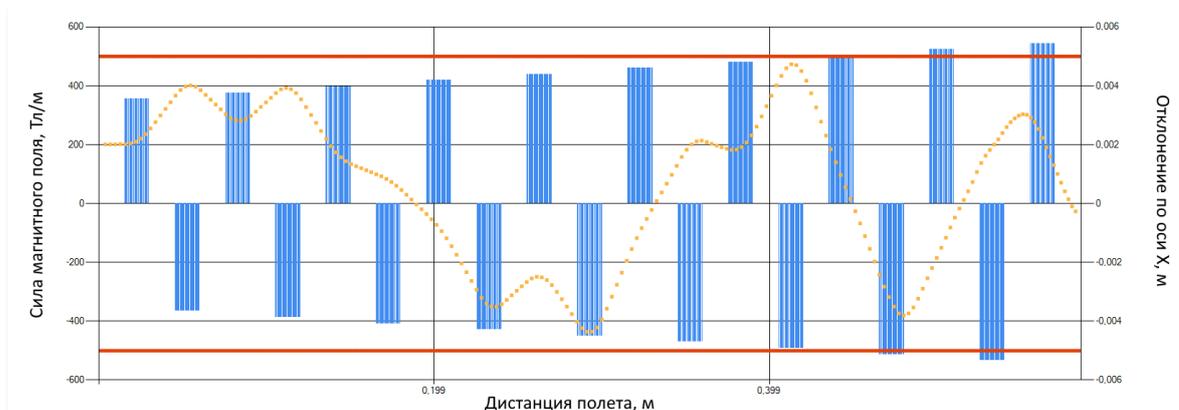


Рисунок 5. Траектория пучка в фокусирующей системе, подобранной автоматически

После проведения численного моделирования удалось подобрать очень эффективную систему, позволяющую пучку пролететь полностью всю магнитную систему, размеры которой оставались неизменными при подборе. Вручную была подобрана функция $G = -500 z + 500$ Тл/м. Полученная автоматически функция имеет следующий вид: $G = -350 z + 350$ Тл/м. При автоматическом подборе использовался шаг 25 Тл/м.

4. Заключение

В результате проведенной работы получилось увеличить дальность полета пучка на 17 сантиметров, можно сделать выводы о том, что подбор параметров магнитной квадрупольной фокусирующей системы является довольно сложной задачей, но благодаря методам оптимизации, проблему можно значительно облегчить и получать необходимую систему (если она существует) за относительно короткое время, которое зависит от точности нашей модели полета, а также шага, который мы выбираем при подборе параметров системы.

Список литературы

1. R. Roussel, G. Andonian, J. B. Rosenzweig, and S. S. Baturin Longitudinal current profile reconstruction from a wakefield response in plasmas and structures //Phys. Rev. Accel. Beams. – 2020 - №. 23. – С. 121303
2. L. Shi, S. L. Johnson, and S. Reiche Compact and powerful THz source investigation on laser plasma wakefield injector and dielectric lined structure //Phys. Rev. Accel. Beams. – 2020 - №. 23. – С. 014701
3. C. Li, W. Gai, C. Jing, J. G. Power, C. X. Tang, and A. Zholents High gradient limits due to single bunch beam breakup in a collinear dielectric wakefield accelerator //PHYSICAL REVIEW SPECIAL TOPICS - ACCELERATORS AND BEAMS. – 2014 - №17 – С. 091302
4. Gülay Özkan Application of Box–Wilson Optimization Technique to the Partially Oriented Yarn Properties //Polymer-Plastics Technology and Engineering. – 2003. – Т.42. - № 3. – С. 459-470