Научная статья

УДК 621.384.6 DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-1-34-42

Регулировка выходной энергии в течение ВЧ-импульса в линейном ускорителе протонов для медицины*

Любовь Юрьевна Овчинникова¹, Александр Павлович Дуркин² Александр Сергеевич Курилик³, Валентин Витальевич Парамонов⁴

¹⁻⁴Институт ядерных исследований РАН Москва, Россия

¹АО "НИИ "Феррит-Домен" Санкт-Петербург, Россия

¹lubovch@inr.ru, https://orcid.org/0000-0002-7382-2705 ²durkinap@inr.ru ³a.s.kurilik@yandex.ru ⁴paramono@inr.ru

Аннотация

В протонной терапии сканирование объекта облучения по глубине производится изменением выходной энергии (ВЭ) ускоренного пучка. В импульсных линейных ускорителях принята регулировка ВЭ за счет изменения амплитуды и/или фазы поля в ускоряющих элементах от одного СВЧ-импульса к другому. Применение являющихся безынерционными ускоряющих секций на бегущей волне позволяет быстрее изменять фазу ускоряющего поля в течение ВЧ-импульса. Фаза и амплитуда поля в секции определяется как фазой и амплитудой входного СВЧ-сигнала, так и процессом его распространения в дисперсной структуре. Результаты расчета распространения бегущей волны в ускоряющей структуре при изменении фазы СВЧ-сигнала и результаты моделирования динамики частиц подтверждают изменение ВЭ-ускорителя в процессе СВЧ-импульса. Предлагаемая методика регулировки ВЭ позволяет многократно повысить скорость сканирования объекта облучения по глубине.

Ключевые слова

протонная терапия, линейный ускоритель на бегущей волне

Для цитирования

Овчинникова Л. Ю., Дуркин А. П., Курилик А. С., Парамонов В. В. Регулировка выходной энергии в течение ВЧ-импульса в линейном ускорителе протонов для медицины // Сибирский физический журнал. 2024. Т. 19, № 1. С. 34–42. DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-1-34-42

^{*}Статья подготовлена по материалам конференции Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC'23), Budker INP, 11–15 September 2023.

© Овчинникова Л. Ю., Дуркин А. П., Курилик А. С., Парамонов В. В., 2024

Output Energy Regulation During RF Pulse in Proton Linac for Medicine

Liubov Yu. Ovchinnikova¹, Alexander P. Durkin² Alexander S. Kurilik³, Valentin V. Paramonov⁴

¹Ferrite Domen Co., St. Petersburg, Russian Federation ¹⁻⁴INR RAS Moscow, Russian Federation ¹lubovch@inr.ru, https://orcid.org/0000-0002-7382-2705 ²durkinap@inr.ru ³a.s.kurilik@yandex.ru ⁴paramono@inr.ru

Abstract

In proton therapy, depth scanning of the irradiated object is performed by changing the Output Energy (OE) of the accelerated beam. In pulsed linear accelerators, adjustment of the OE is usually by changing the amplitude and/or phase of the field in the accelerating elements from one RF pulse to another. The application of non-inertial traveling wave accelerating sections makes it possible to change quickly the phase of the accelerating field during the RF pulse. The phase of the field in the constant gradient section is determined both by the phase of the input RF signal and by the process of wave propagation in the dispersive structure. The calculation results of the traveling wave propagation in the accelerating structure when the phase of the input RF signal changes and the results of simulation the dynamics of particles confirm the change in the linac's OE during the RF pulse. The proposed method for regulation the OE makes it possible to increase in orders the speed of scanning the irradiated object by depth.

Keywords

proton therapy, traveling-wave linear accelerator

For citation

Ovchinnikovs L. Yu., Durkin A. P., Kurilik A. S., Paramonov V. V. Output Energy Regulation During RF Pulse in Proton Linac for Medicine. *Siberian Journal of Physics*, 2024, vol. 19, no. 1, pp. 34–42 (in Russ.). DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-1-34-42

Введение

Предложение разрабатываемого импульсного линейного ускорителя (ЛУ) протонов с выходной энергией частиц до 230 МэВ изложено в [1]. Ускоряющими элементами в основной части ЛУ являются секции структуры на бегущей волне (Traveling Wave – TW) с постоянным градиентом. Регулировка ВЭ ЛУ, необходимая для сканирования объекта по глубине, за счет изменения амплитуды ускоряющего поля ведет к необходимости управлять параметрами мощного высоковольтного оборудования. Это возможно от одного СВЧ-импульса к другому, но технически не реализовано в течение одного короткого ВЧ-импульса длительностью не более десятков мкс.

Изменение фазы ВЧ-поля можно производить на низком уровне СВЧ-мощности. Моделирование выходного СВЧ-импульса клистрона КИУ-286¹, рассматриваемого для ЛУ, при скачкообразном изменении фазы входного сигнала показало в выходном сигнале отслеживание изменения с незначительным переходным процессом длительностью ~0,3 мкс.

В ускоряющей структуре на стоячей волне изменение амплитуды или фазы поля происходит за время ~ 3τ , где τ – постоянная времени резонатора. Для структур *S* частотного диапазона ~ $3\tau \approx 4,5$ мкс, что практически определяет возможность изменения ВЭ только от одного СВЧ-импульса к другому.

В отличие от резонаторов, TW-структура является безынерционной. Принцип регулировки ВЭ-пучка в TW-структуре при скачкообразном изменении фазы входного СВЧ-импульса сформулирован в работе [2]. Используется возможность иметь в TW-структуре на различных

¹ AO «НПП «Торий», https://www.toriy.ru

участках СВЧ-поля с одинаковой амплитудой, но разными фазами колебаний. Граница раздела между участками перемещается вдоль структуры с групповой скоростью волны. При этом обеспечивается плавное и быстрое изменение ВЭ.

Характерным масштабом времени процесса регулировки становится время заполнения TW-структуры. Для разрабатываемого ЛУ это ~1 мкс. Возможность дискретного изменения фазы входного СВЧ-сигнала на небольшую величину на низком уровне СВЧ-мощности за такой промежуток времени доказана результатами работы [3].

В данной работе прямым численным моделированием движения протонов в CBЧ-поле распространяющейся вдоль ТW-структуры составной волны подтверждена возможность быстрого изменения ВЭ ЛУ в течение CBЧ-импульса и определены особенности и количественные характеристики выходного пучка. Приведены особенности поля дозы облучения при таком способе регулировки ВЭ ЛУ.

Исследование проведено на примере регулировки СВЧ-поля в выходной, 12-й ТW-структуре ЛУ.

Моделирование распространения СВЧ-сигнала в ТW-структуре

Методика и основные результаты моделирования распространения СВЧ-импульса в дисперсной ТW-структуре с постоянным градиентом описана в работе [4]. Рассматриваемая TW-структура работает на волне вида $2\pi/3$, содержит 102 ячейки и имеет отрицательную дисперсию [2]. Устройство ввода СВЧ-мощности (УВМ) располагается в последней 102-й ячейке и СВЧ-волна движется навстречу пучку. Структура рассчитана на ускорение протонов от 200 до 230 МэВ. На вход в УВМ подается СВЧ-сигнал, фаза которого меняется скачкообразно на 8° каждую 1 мкс, общая длительность моделируемого процесса 7 мкс. Поле в структуре можно описать соотношением

$$E = E_0 \cos(\omega t + \varphi_r(n, t)), \tag{1}$$

где E_0 – амплитуда ускоряющего поля; $\varphi_r(n,t)$ – изменяющаяся во времени для каждой ячейки с номером *n* фаза, описывающая распространение волны от УВМ.

На рис. 1 для трех ячеек иллюстрируется процесс распространения волны в дисперсной TW-структуре. Серый фон на рисунках соответствует амплитуде поля E_0 , а черные линии – эффективной напряженности поля (1) для выбранных ячеек, обусловленной скачкообразным изменением фазы на входе в УВМ.



Рис. 1. Эффективная напряженность поля в ячейке 1 – вход пучка (*a*), в ячейке 51 (б) и в ячейке 102 – с УВМ (в)

Fig. 1. Effective field strength in cell 1 – beam input (a), in cell 51 (b) and in cell 102 with RF Power Input (b)

Из приведенных рисунков видно, что первоначально скачкообразный фронт распространения изменения фазы вблизи ячейки с УВМ (рис. 1, *в*), расплывается при распространении по структуре (рис. 1, *б*). При этом амплитуда поля не меняется. А рис. 1, *а* подтверждает ожидаемое время заполнения структуры – фронт изменения фазы доходит до первой ячейки после первой микросекунды. Это подтверждается и обобщенной двумерной диаграммой на рис. 2. Для обеспечения постоянства ускоряющего градиента групповая скорость изменяется по длине структуры, и в левой части рис. 2 отчетливо видна нелинейная зависимость времени прихода фронта изменения фазы от номера ячейки.





Приведенные на рис. 1 и 2 зависимости полностью соответствуют физическим представлениям о распространении узкополосного сигнала в дисперсной структуре.

Динамика протонного пучка в СВЧ-импульсе протонного ускорителя

Движение протонов в ускоряющем СВЧ-поле описывается уравнениями (2):

$$\left(\frac{d\varphi}{dz} = \frac{2\pi}{\lambda} \left[\frac{1}{\beta} - \frac{1}{\beta_c}\right] + \frac{d\beta}{dz} = \frac{eE_0 \cos(\varphi + \varphi_s + \varphi_r(n, t'))}{W_0 \beta \gamma^3}\right)$$
(2)

где λ , β_c , – длина и относительная фазовая скорость волны в ячейке; W_0 – энергия покоя протона; β , γ – относительная скорость и Лоренц-фактор частицы; $\varphi_s = -10^\circ$ – расчетное значение синхронной фазы; $\tau = ct$, $\varphi = \omega \tau/c - 2\pi z/\lambda \beta_c$ – нормированное время и фаза частицы.

Расчетная величина ускоряющего поля E_0 для рассматриваемой структуры равна 14,67 МВ/м. Система (2) решается последовательно от ячейки к ячейке. $\varphi_r(n,t')$, следующая

из результатов расчета распространения волны, однозначно связана с номером ячейки n и временем t' от начала изменения фазы.

Продольные фазовые портреты пучка на входе в структуру [1] и выходе в режиме номинального ускорения, т. е. без изменения фазы СВЧ-сигнала, показаны на рис. 3.



Puc. 3. Продольные фазовые портреты пучка на входе (*a*)
 и выходе (*б*) структуры в режиме номинального ускорения
 Fig. 3. Longitudinal phase portraits of beam at input (*a*) and exit (*δ*) of structure in nominal acceleration mode

Моделирование регулировки энергии пучка проведено решением во времени методом Рунге – Кутта системы уравнений (2) с использованием полученных ранее распределений поля распространяющейся волны.



 Рис. 4. Продольные фазовые портреты пучка на выходе структуры, при сдвиге фазы СВЧ-поля на входе УВМ на 30° (a) и 40° (б)
 Fig. 4. Longitudinal phase portraits of beam at output of structure, with RF field phase shift at RF Power Input by 30° (a) and 40° (б)

Для существенной регулировки ВЭ необходимо нарушить условия устойчивого продольного движения частиц в структуре, т. е. создать условия, когда принцип автофазировки выполняться не может. При этом продольное движение частиц качественно отличается от номинального режима. На рис. 4 показаны продольные фазовые портреты частиц на выходе структуры при значительном изменении фазы СВЧ-сигнала. Следует обратить внимание на различие шкал этих рисунков. В единой шкале на одном из рисунков распределение выродится в пятно.

При расчетной синхронной фазе структуры -10° для нарушения автофазировки необходимо ввести изменение фазы поля не менее чем $\sim 20^{\circ}$ Это подтверждается приведенными ниже данными моделирования на рис. 5 и 6 – до 2 мкс выбранного закона изменения фазы поля на входе в УВМ действует режим автофазировки – при изменении фазы поля на 8° и 16° энергия ускоренного пучка существенно не меняется. Начиная с 2,5 мкс виден выход из области устойчивого продольного движения, что соответствует 16° изменения фазы поля, выходная энергия ускоренного пучка начинает меняться.

Как видно из приведенных на рис. 4 распределений, при значительном изменении фазы входного сигнала изменяется не только средняя энергия частиц в сгустке, но и значительно увеличивается разброс частиц по энергии.



Рис. 5. Распределение количества частиц на выходе ЛУ по времени и энергии Fig. 5. Distribution of particles quantity at output of linear accelerator in time and energy



Рис. 6. Зависимости от времени средней энергии пучка (*a*) и среднеквадратичного разброса энергии частиц в сгустке (*б*)

Fig. 6. Time dependence of average beam energy (a) and root-mean-square spread of particle energy in bunch (δ)

ISSN 2541-9447 Сибирский физический журнал. 2024. Том 19, № 1 Siberian Journal of Physics, 2024, vol. 19, no. 1 При выбранном законе изменения входной фазы распределение числа частиц по времени и энергии показано на рис. 5.

Графики зависимостей средней энергии частиц в сгустке и среднеквадратичного разброса частиц по энергии для выбранного закона изменения фазы СВЧ-поля приведены на рис. 6.

Полученные результаты моделирования движения протонов в меняющемся в течение CBЧ-импульса поле совпадают и независимо подтверждают, поскольку получены с помощью вновь разработанного специализированного программного обеспечения, полученные ранее в [1] характеристики пучка при изменении фазы поля от одного CBЧ-импульса к другому. Но это следует рассматривать как утверждение, что при реализации изменения фазы в течение CBЧ-импульса будут получены аналогичные параметры пучка, но на несколько порядков быстрее по времени и с более широкими и гибкими возможностями формирования поля облучения.

Дозовые поля, сформированные ускоренными сгустками

С использованием Geant4 [5] было выполнено моделирование распределения поглощенной дозы в воде по глубине от серии ускоренных сгустков (рис. 7).

Рассчитанное с применением Geant4 распределение дозы облучения по глубине от серии ускоренных сгустков, соответствующей временному промежутку регулирования ВЭ от 3 до 6 мкс (см. рис. 5), приведено на рис. 7. Область облучения расположена на глубине от 280 до 320 мм.



Puc. 7. Распределение поглощенной дозы в воде по глубине *Fig.* 7. Distribution of absorbed dose in water by depth

Существуют различия в формировании дозы при регулировке ВЭ в течение СВЧ-импульса от рассмотренного в [6] формирования при регулировке ВЭ от СВЧ-импульса к СВЧ-импульсу.

За время 1 мкс через структуру пролетает 476 сгустков. При регулировке ВЭ от импульса к импульсу все эти сгустки формируют одну достаточно узкую зону [6] с незначительно размытым пиком Брэгга из-за разброса по энергии частиц в сгустке. При регулировке ВЭ в течение импульса все сгустки различаются по средней энергии, и это различие, как можно оценить по графикам на рис. 5 и 6, меньше или соизмеримо с разбросом по энергии частиц в сгустке. Поэтому размытые разбросом по энергии частиц в сгустке пики Брэгга от соседних сгустков перекрываются. Это позволяет получить более равномерное распределение дозы по глубине в отличие от набора пиков Брэгга, соответствующих отдельным значениям энергии. Набор величины дозы может осуществляться за счет повторения импульсов.

Неравномерность распределения дозы в области облучения, показанная на рис. 7, – выбросы по краям области, обусловлена выбором временного промежутка отбора частиц.

Для решения обратной задачи – определения закона изменения фазы в течение СВЧ-импульса по заданному в плане облучения распределению дозы – применима изложенная в [7] методика. Обеспечивая изначально более плавное распределение дозы, регулировка ВЭ в течение СВЧ-импульса по крайней мере не снижает эффективности применения этой методики.

Заключение

Разработаны и реализованы в вычислительных программах методики моделирования как распространения СВЧ-волны в дисперсной ТW-структуре, так и динамики частиц в поле этой волны. Результаты проведенных расчетов подтверждают возможность регулировки выходной энергии ускорителя в течение СВЧ-импульса. По сравнению с регулировкой от импульса к импульсу при аналогичных параметрах пучка такая регулировка обеспечивает на порядки более высокую скорость сканирования по глубине при более равномерном распределении дозы облучения. При этом, как минимум, не усложняется задача планирования распределения дозы при облучении.

Авторы признательны А. А. Коломийцу за предоставленные данные о характеристиках пучка ЛУ в режиме номинального ускорения.

Список литературы

- 1. **Paramonov V. V., Durkin A. P., Kolomiets A. A.** A linear accelerator for proton therapy // Proc. RuPAC'21. 2021. P. 117–119. DOI: 10.18429/JACoW-RuPAC2021-FRB04
- Paramonov V. V. et al. Main part of proton therapy linac // Phys. Part. Nucl. Lett. 2023. Vol. 20, no. 4. P. 850–853. DOI: 10.1134/S1547477123040544
- 3. Xiao C.-C. et al. Design and preliminary test of the LLRF in C band high-gradient test facility for SXFEL // Nucl. Sci. Tech. 2020. Vol. 31. P. 100. DOI: 10.1007/s41365-020-00806-6
- 4. **Овчинникова Л. Ю., Парамонов В. В.** Методика моделирования распространения СВЧсигнала в ТW-структуре ускорителя протонов для медицины // Сб. тр. ЛаПлаз-2023. 2023. С. 300. URL: https://conf.laplas.mephi.ru
- Allison J. et al. Recent developments in Geant4 // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2016. Vol. 835. P. 186–225. DOI: 10.1016/j.nima.2016.06.125
- Ovchinnikova L. Yu. et al. Effect of a proton beam from a linear accelerator for radiation therapy // Proc. RuPAC'21. 2021. P. 182–185. DOI: 10.18429/JACoW-RuPAC2021-MOPSA41
- Ovchinnikova L. Yu., Kurilik A. S. Machine learning for depth dose distribution forming in proton therapy // Physics of Atomic Nuclei. 2022. Vol. 85, no. 10. P. 1658–1660. DOI: 10.1134/ S1063778822100404

References

- 1. **Paramonov V. V., Durkin A. P., Kolomiets A. A.** A linear accelerator for proton therapy. Proc. RuPAC'21, 2021, pp. 117–119. DOI: 10.18429/JACoW-RuPAC2021-FRB04
- 2. **Paramonov V. V. et al.** Main part of proton therapy linac. *Phys. Part. Nucl. Lett.*, 2023, vol. 20, no. 4, pp. 850–853. DOI: 10.1134/S1547477123040544

- 3. Xiao C.-C. et al. Design and preliminary test of the LLRF in C band high-gradient test facility for SXFEL. *Nucl. Sci. Tech.*, 2020, vol. 31, p. 100. DOI: 10.1007/s41365-020-00806-6
- 4. **Ovchinnikova L., Paramonov V.** Simulation method of the RF signal propagation in a TW structure for medical proton linac". In *Proc. LaPlas-2023*, 2023, p. 300. URL: https://conf.laplas. mephi.ru (in Russ.)
- 5. Allison J. et al. Recent developments in Geant4. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, 2016, vol. 835, pp. 186–225. DOI: 10.1016/j.nima.2016.06.125
- 6. **Ovchinnikova L. Yu. et al.** Effect of a proton beam from a linear accelerator for radiation therapy. *Proc. RuPAC'21*, 2021, pp. 182–185. DOI: 10.18429/JACoW-RuPAC2021-MOPSA41
- Ovchinnikova L. Yu., Kurilik A. S. Machine learning for depth dose distribution forming in proton therapy. *Physics of Atomic Nuclei*, 2022, vol. 85, no. 10, pp. 1658–1660. DOI: 10.1134/ S1063778822100404

Сведения об авторах

Овчинникова Любовь Юрьевна, кандидат физико-математических наук Дуркин Александр Павлович, кандидат физико-математических наук Курилик Александр Сергеевич, кандидат физико-математических наук Парамонов Валентин Витальевич, доктор физико-математических наук

Information about the Authors

Liubov Yu. Ovchinnikova, Candidate of Physical and Mathematical Sciences Alexander P. Durkin, Candidate of Physical and Mathematical Sciences Alexander S. Kurilik, Candidate of Physical and Mathematical Sciences Valentin V. Paramonov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences

> Статья поступила в редакцию 06.09.2023; одобрена после рецензирования 11.12.2023; принята к публикации 23.12.2024

The article was submitted 06.09.2023; approved after reviewing 11.12.2023; accepted for publication 23.12.2024