

ОПТИЧЕСКИЙ ГРЕБЕНЧАТЫЙ ФИЛЬТР ДЛЯ СИСТЕМЫ СТОХАСТИЧЕСКОГО ОХЛАЖДЕНИЯ НА УСКОРИТЕЛЕ НУКЛОТРОН (ОИЯИ, ДУБНА)

*И. Каденко^а, О. Бесшейко^а, Д. Гогов^а,
А. Сидорин^б, Г. Трубников^б, Н. Шурхно^{б, 1}, Р. Штассен^в*

^а Киевский национальный университет им. Т. Шевченко, Украина

^б Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

^в Исследовательский центр FZJ, Юлих, Германия

Для реализации продольного стохастического охлаждения пучков заряженных частиц на нуклотроне (ОИЯИ, Дубна) был разработан и создан уникальный оптический гребенчатый фильтр. Созданный фильтр имеет компактные размеры, малые вносимые потери и дисперсию. Настройка гребенчатого фильтра была автоматизирована с помощью специально разработанного программного обеспечения, что позволило сократить время настройки и повысить ее точность до нескольких Гц. Созданный фильтр с автоматической настройкой успешно прошел проверку во время эксперимента по охлаждению пучка дейтронов. В данной работе приведены характеристики созданного фильтра и рассмотрен алгоритм его автоматической настройки.

New and unique optical comb filter was developed for stochastic cooling system at Nuclotron (JINR, Dubna). The device has a compact size, low insertion loss and dispersion. Comb filter adjustment was automated with developed special software, which sufficiently reduces adjustment time and increases accuracy up to a few Hz. The filter with automatic adjustment was successfully tested in the experiment on cooling of deuteron beam. This report presents the characteristics of the new filter and reviews the automatic adjustment algorithm.

PACS: 29.20.D

ВВЕДЕНИЕ

Необходимость использования стохастического охлаждения в строящемся коллайдере NICA требует проведения предварительных экспериментальных исследований по изучению возможностей метода [1]. Данные исследования проводятся с 2010 г. на ускорителе нуклотрон в Объединенном институте ядерных исследований [2]. Наиболее эффективный тип стохастического охлаждения, который можно использовать на нуклотроне, — продольный метод фильтров. Данный метод основан на применении так называемого гребенчатого фильтра. Его амплитудно-частотная характеристика представляет собой ряд равномерно распределенных минимумов в полосе пропускания, а фаза на каждом минимуме инвертируется. В области частот циркулирующий в ускорителе пучок представляет собой полосы Шоттки, поэтому если минимумы фильтра точно совпадают

¹E-mail: shurkhno@physics.msu.ru

с гармониками частоты обращения пучка, то сигнал после фильтра будет пропорционален отклонению частицы по частоте, следовательно, пучок будет охлаждаться. Для эффективного охлаждения фильтр должен иметь глубокие, одинаковые минимумы и малую дисперсию во всей полосе, которая для стохастического охлаждения составляет, как правило, несколько ГГц. Это предъявляет высокие требования к его устройству и процедуре настройки.

1. СХЕМА И ХАРАКТЕРИСТИКИ СОЗДАННОГО ФИЛЬТРА

Гребенчатый фильтр для стохастического охлаждения — устройство, в котором проходящий сигнал вычитается сам из себя с определенной задержкой, и за счет интерференции амплитудно-частотная характеристика фильтра представляет собой чередующиеся минимумы и максимумы. Конструктивно фильтр устроен так, что входящий сигнал разделяется на два равных сигнала, один из которых задерживается на период обращения пучка, после чего сигналы вычитаются. Задержка линии обратной связи определяет частоту настройки фильтра.

Традиционно в установках по стохастическому охлаждению применяются коаксиальные или коаксиально-оптические (коаксиальный фильтр с оптоволоконной линией задержки) фильтры. Фильтры с коаксиальной линией задержки [3] имеют существенные недостатки, обусловленные характеристиками коаксиальных линий: большие размеры, дисперсию, температурную зависимость. Коаксиально-оптические фильтры [4] лишены подобных недостатков. Из-за того, что скорость распространения сигнала в оптоволокне сравнительно небольшая, а само волокно тонкое, фильтр получается компактным. Дисперсия становится также существенно меньше, так как используемая полоса 2–4 ГГц мала по сравнению с оптическим диапазоном. Сделать фильтр полностью оптическим не получается из-за отсутствия оптического эквивалента гибридного соединителя с инверсией фазы, однако дальнейшее улучшение характеристик можно достигнуть заменой всех остальных компонентов фильтра на оптические. Изначально такой фильтр был предложен в Исследовательском центре FZJ (Юлих, Германия) для системы стохастического охлаждения будущего накопителя HESR. Из-за простоты создания и превосходных характеристик подобный фильтр был выбран и для системы стохастического охлаждения на нуклотроне. Схема созданного гребенчатого фильтра приведена на рис. 1.

С помощью модулятора лазерный свет преобразовывается входным радиочастотным сигналом в оптический. Далее сигнал разделяется на две ветви. В нижней ветви установлена переменная задержка 850–865 нс, обеспечивающая работу в диапазоне энергий

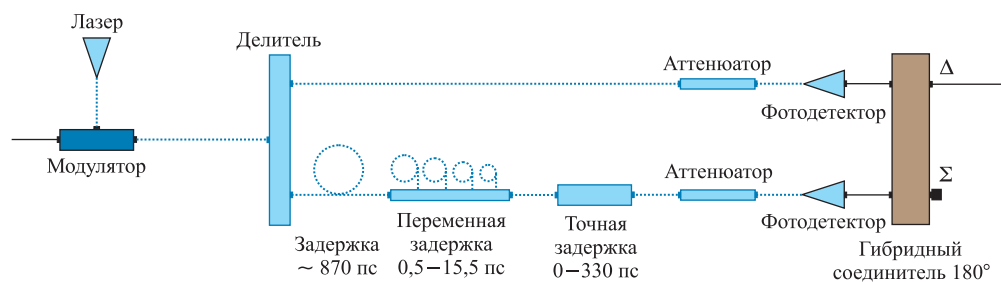


Рис. 1. Схема оптического гребенчатого фильтра

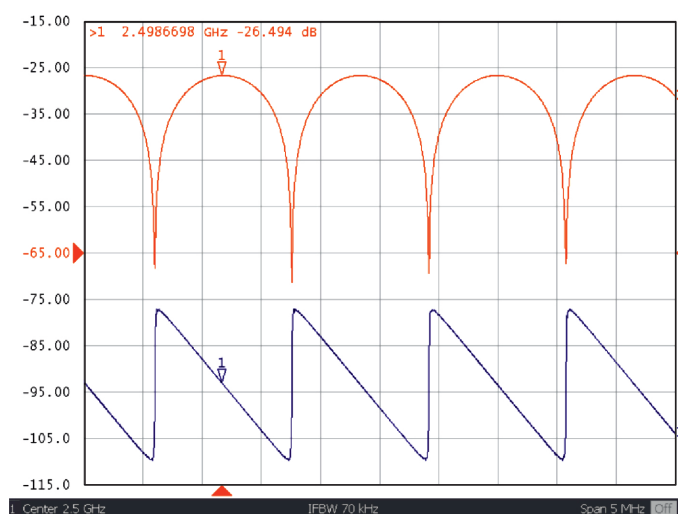


Рис. 2 (цветной в электронной версии). Амплитудно-частотная (красный цвет) и фазочастотная (синий) характеристики фильтра, измеренные в диапазоне $2,5 \text{ ГГц} \pm 5 \text{ МГц}$

$\sim 3\text{--}4 \text{ ГэВ}$. Задержка состоит из катушки оптоволокна, оптического коммутатора $0,5\text{--}15 \text{ нс}$ с шагом $0,5 \text{ нс}$ и модуля прецизионной задержки $0\text{--}650 \text{ пс}$ с точностью $0,01 \text{ пс}$. В обеих ветвях установлены переменные аттенюаторы. Аттенюатор в верхней ветви используется для компенсации потерь линии задержки. Подобные устройства обладают существенными вносимыми потерями, которые превосходят потери в линии задержки, поэтому аналогичный аттенюатор установлен и в линию задержки. В линии задержки он также играет роль ключа — для разрыва линии, что необходимо для настройки системы охлаждения и использования остальных методов стохастического охлаждения. Оптические сигналы в обеих ветвях далее переводятся обратно в радиочастотные с помощью фотодетекторов и вычитаются. Фильтр работает в диапазоне частот $2\text{--}4 \text{ ГГц}$, вносимые потери порядка $25\text{--}27 \text{ дБ}$. Амплитудно-частотная и фазочастотная характеристики созданного фильтра приведены на рис. 2. Важнейшей характеристикой фильтра является средняя величина затухания минимумов в рабочей полосе. Для описываемого фильтра она составляет более 40 дБ , в то время как для коаксиальных фильтров — порядка 25 дБ , а для коаксиально-оптических — около 35 дБ . Максимальное отклонение положений минимумов (дисперсия) — менее 10 кГц , что соответствует сдвигу частоты настройки всего на несколько Гц. Для коаксиально-оптических фильтров дисперсия частоты настройки составляет порядка 25 Гц .

2. АВТОМАТИЗАЦИЯ НАСТРОЙКИ ГРЕБЕНЧАТОГО ФИЛЬТРА

Настройка фильтра на заданную частоту означает, что положения минимумов амплитудно-частотной характеристики будут совпадать с гармониками этой частоты во всей рабочей полосе. В полосе обычно находится несколько тысяч гармоник, и требуется провести большое количество измерений для настройки фильтра с заданной точностью. Процесс настройки фильтра весьма трудоемок и, как правило, занимает много времени. Также невозможно проводить настройку удаленно, что представляет большое неудобство

при работе ускорителя. Для упрощения процедуры настройки фильтра было разработано программное обеспечение, автоматизирующее настройку и позволяющее проводить ее удаленно. Настройка фильтра может быть произведена в полностью автоматическом режиме и занимает 5–10 мин в зависимости от точности начальной настройки. Она состоит из двух этапов — настройки частоты фильтра и настройки затухания прямой ветви. Алгоритм настройки частоты следующий. Сканируя положения минимумов в диапазоне, программа находит текущую частоту, на которую настроен фильтр. Если ее отличие от нужной частоты превосходит допустимый порог, то программа соответственно корректирует задержку нижней ветви и снова проводит измерения до получения требуемой точности. Допустимая точность, оцененная путем моделирования процесса охлаждения с различными отклонениями настройки фильтра, должна быть не менее 50 Гц. Практически же настройка проводится с точностью 5–7 Гц. Изменение длины нижней ветви фильтра (рис. 1) влияет на ее уровень затухания, из-за чего уменьшается глубина минимумов амплитудно-частотной характеристики. Поэтому после настройки частоты фильтра корректируется затухание в нижней ветви. Последовательно изменяя затухание в прямой ветви и вычисляя среднее значение и среднеквадратичное отклонение глубины минимумов в полосе, программа находит оптимальное значение затухания. Автоматическая настройка может производиться удаленно — для этого в схеме системы охлаждения необходимо предусмотреть коммутатор для подключения фильтра к сетевому анализатору, с помощью которого производится настройка.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ФИЛЬТРА

Созданный гребенчатый фильтр был использован в системе стохастического охлаждения на нуклотроне. Удаленная настройка фильтра в течение эксперимента не была предусмотрена, поэтому после автоматической настройки фильтра на заданную частоту в тоннеле без пучка проводились проверка и подстройка фильтра уже с пучком. В эксперименте использовался пучок дейтронов с энергией 3 ГэВ/нуклон и интенсивностью $2 \cdot 10^9$. В ходе эксперимента впервые в ОИЯИ было получено стохастическое охлаждение [5]. На рис. 3 слева приведены сигналы продольного дробового шума пучка до и после включения фильтра, справа показано изменение дробового шума пучка после охлаждения

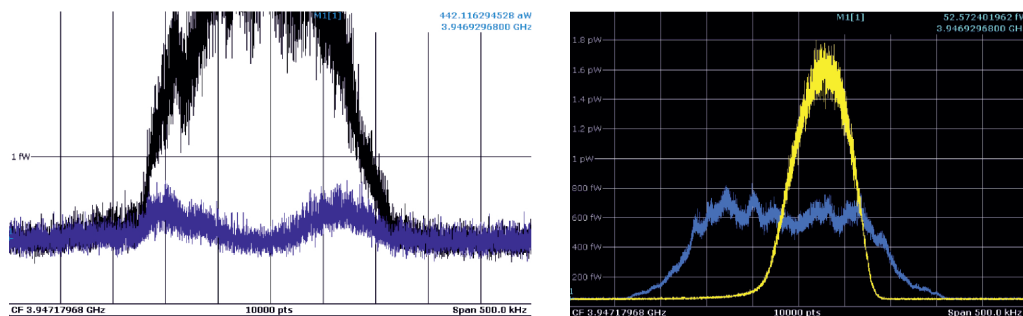


Рис. 3 (цветной в электронной версии). Дробовой шум пучка (полоса Шоттки) на 3048-й гармонике частоты обращения. Слева: сигнал с выключенным фильтром (черный цвет) и включенным (синий). Справа: начальный сигнал (голубой) и сигнал после 480 с охлаждения (желтый)

ждения в течение 480 с. В результате охлаждения среднеквадратичный разброс пучка по импульсам уменьшился примерно в 2,2 раза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создан оптический гребенчатый фильтр для системы стохастического охлаждения на нуклотроне. Характеристики фильтра были улучшены по сравнению с обычными коаксиально-оптическими фильтрами: затухание в минимумах увеличилось в среднем на 5 дБ, дисперсия уменьшилась с 25 Гц до 5–7 Гц. Настройка фильтра автоматизирована с помощью созданного программного обеспечения, что значительно сократило время его настройки. Благодаря созданному фильтру в ОИЯИ впервые было экспериментально получено стохастическое охлаждение.

Разработка фильтра и автоматизация его настройки имеют большое значение для проектирования системы стохастического охлаждения коллайдера NICA, в котором подобный фильтр планируется использовать для подавления синхротронных сигналов, возникающих в сгруппированном пучке. В ближайшее время запланирован ряд экспериментов по стохастическому охлаждению со сгруппированным пучком на нуклотроне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kostromin S. A. et al.* Beam-Cooling Methods in the NICA Project // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2012. V. 9, No. 4–5. P. 322–336.
2. *Кобец А. Г. и др.* О вопросах создания системы стохастического охлаждения пучков ионов на сверхпроводящем ускорительном комплексе нуклотрон ОИЯИ // *Письма в ЭЧАЯ.* 2012. Т. 9, № 4–5(174–175). С. 604–617.
3. *van der Meer S.* Stochastic Cooling in the CERN Antiproton Accumulator // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 1981. V. NS-28, No. 3. P. 1994–1998.
4. *Bechstet U. et al.* Optical Notch Filter for the Stochastic Cooling System of COSY // *Proc. of PAC'99, New York, 1999.* P. 1701–1703.
5. *Shurkhno N. et al.* Study for Stochastic Cooling at Nuclotron, JINR // *Proc. of COOL'13, Muerren, Switzerland, 2013.* P. 73–75.