

# СРАВНЕНИЕ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ ОПТОВОЛОКОННОГО ДАТЧИКА ПОТЕРЬ ПУЧКА С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ

*Ю. И. Мальцева<sup>1</sup>, К. В. Астрелина*

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

Рассматривается принцип работы распределенного датчика потерь пучка на основе черенковского излучения в оптоволокне. Это устройство в режиме реального времени позволяет получить распределение потерь вдоль всего ускорителя. Построена численная модель датчика при различных сценариях потерь пучка, описывающая его пространственное разрешение, и рассмотрены способы улучшения последнего. Показано хорошее согласие результатов моделирования с экспериментальными данными, полученными на электрон-позитронном инжекционном комплексе в Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН.

This paper describes a distributed beam loss monitor based on the Cherenkov effect in an optical fiber. Such a device allows one to obtain real-time beam loss distribution along the accelerator. Numerical model of the monitor describing its spatial resolution was created. Methods to improve monitor spatial resolution are discussed. Numerical results are in good agreement with experimental data obtained at the BINP  $e^-e^+$  Injection Complex.

PACS: 29.27.Bd; 29.27.Ac; 29.20.db; 34.80.-i

## ВВЕДЕНИЕ

Для диагностики потерь пучка на электрон-позитронном инжекционном комплексе [1] в Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (ИЯФ СО РАН) было предложено использовать распределенный датчик потерь пучка на основе излучения Вавилова–Черенкова в оптоволокне.

Данный датчик обладает рядом преимуществ. Использование отрезков оптоволокна длиной  $\sim 40$  м позволяет экономить пространство возле вакуумной камеры ускорителя и количество электроники для обработки сигналов. Нечувствительность оптоволокна к магнитному полю позволяет прокладывать его внутри магнитных элементов, тем самым увеличивая точность измерений. За счет природы черенковского излучения у датчика отсутствуют шумы, связанные с гамма- и синхротронным излучением. При использовании в качестве фотодетектора ФЭУ с коэффициентом усиления  $\sim 10^6$  датчик способен регистрировать потери пучка на уровне 1% (0,1 нКл).

---

<sup>1</sup>E-mail: yuliya.maltseva@gmail.com

Недостатками датчика являются неточность локализации места потери пучка и трудность калибровки абсолютной величины потерь за счет затухания и дисперсии светового импульса.

Для исследования факторов, определяющих пространственное разрешение датчика потерь пучка и способов его улучшения, была создана численная модель при помощи программы FLUKA [2]. Пространственное разрешение датчика определяется дисперсией света в оптоволокне, временными характеристиками фотодетектора и АЦП, а также зависит от того, с какого торца оптоволокна снимаются световые импульсы. Для подтверждения параметров датчика, полученных при помощи численного моделирования, был создан его прототип на электронном участке инжекционного комплекса.

## 1. ДИСПЕРСИЯ СВЕТА В ОПТОВОЛОКНЕ

В оптоволокне существуют два основных вида дисперсии: модовая и хроматическая. При передаче импульса по многомодовому оптоволокну со ступенчатым профилем показателя преломления длиной  $L$  вклад каждой из дисперсий в уширение импульса можно оценить как [3]

$$\frac{t_{\text{мод}}}{L} \approx \frac{NA^2}{2cn}, \quad \frac{t_{\text{хр}}}{L} \approx \frac{\Delta n(\lambda)}{c},$$

где  $NA$  — числовая апертура;  $c$  — скорость света в вакууме;  $n$  — показатель преломления сердцевины оптоволокна;  $\Delta n(\lambda)$  определяет спектральный разброс излучения.

Для пластикового оптоволокна ( $NA = 0,47$ ,  $n = 1,49$ ) вклад модовой и хроматической дисперсий в длительность выходного сигнала в диапазоне длин волн УФ и видимого света (300–700 нм) составляет  $t_{\text{мод}}/L \approx 0,25$  нс/м,  $t_{\text{хр}}/L \approx 0,08$  нс/м соответственно. Таким образом, в пластиковом оптоволокне для видимого диапазона длин волн модовая дисперсия уширяет световой сигнал в три раз больше, чем хроматическая.

Для определения вклада дисперсии в уширение импульса от длины оптоволокна были проведены измерения потерь пучка в конце электронного линейного ускорителя на энергию 300 МэВ. Пучок при помощи магнитного корректора сбрасывался в место расположения оптоволокна.

Было выбрано пластиковое многомодовое оптоволокно со ступенчатым профилем показателя преломления марки «Broadcom» (HFBR-RUS500Z) с параметрами: диаметр сердцевины — 1 мм,  $NA = 0,47$ ,  $n = 1,49$ , коэффициент затухания — 0,22 дБ/м при 660 нм. В качестве фотонного детектора выбран фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) на микроканальных пластинах (МКП) производства АО «Катод» (Новосибирск) со спектральным диапазоном чувствительности фотокатода в максимуме спектра черенковского излучения (300–900 нм), временем нарастания фронта 0,5 нс и длительностью импульса анодного тока (полуширина) — не менее 1,5 нс. АЦП выбран с полосой пропускания 200 МГц и частотой дискретизации  $2 \Gamma_{\text{выб}}/с$ .

На рис. 1, а представлены экспериментальные данные и данные численного моделирования полуширины выходного сигнала при разных длинах отрезка оптоволокна. При этом измеренный временной вклад ФЭУ в результирующее уширение импульса,

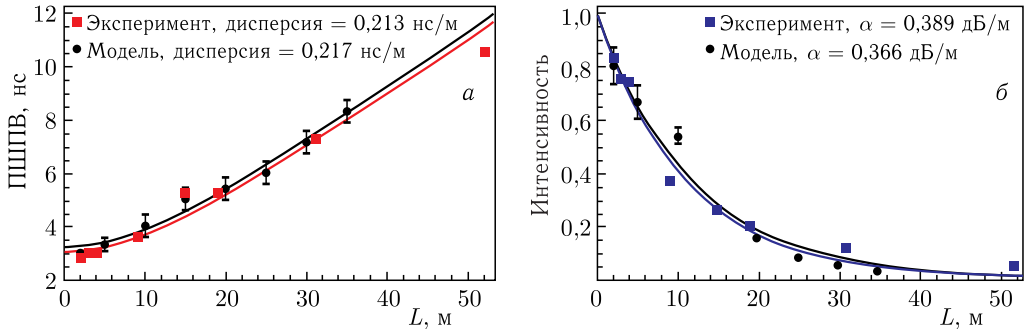


Рис. 1. а) Измеренные (квадраты) и модельные (кружки) полуширины сигналов с ФЭУ при разных длинах пластикового многомодового оптоволоконного кабеля; б) измеренные (квадраты) и модельные (кружки) уровни сигналов с ФЭУ при разных длинах пластикового многомодового оптоволоконного кабеля

равный примерно 3,3 нс, был добавлен к результатам численного моделирования дисперсии света в оптоволоконном кабеле. Дисперсия света в оптоволоконном кабеле в результате аппроксимации равна 0,213 нс/м с учетом экспериментальных ошибок и свидетельствует о преобладании модовой дисперсии в пластиковом оптоволоконном кабеле со ступенчатым профилем показателя преломления. Экспериментальные данные находятся в хорошем согласии с результатами численного моделирования и аналитическими расчетами. Для длины оптоволоконного кабеля более 20 м временные разрешения ФЭУ и электроники незначительны по сравнению с вкладом дисперсии.

## 2. ЗАТУХАНИЕ СВЕТА В ОПТОВОЛОКНЕ

Помимо дисперсии свет, распространяясь по оптоволоконному кабелю, подвергается затуханию. Вычислить, какая часть мощности теряется при переносе светового сигнала по оптоволоконному кабелю, можно по следующей формуле:

$$P_{\text{вых}} = P_{\text{вх}} \cdot 10^{-\alpha L/10},$$

где  $P_{\text{вых}}$ ,  $P_{\text{вх}}$  — выходная и входная мощности;  $\alpha$  — коэффициент затухания в дБ/м;  $L$  — длина отрезка оптоволоконного кабеля.

На рис. 1, б представлены экспериментальные данные и данные численного моделирования интенсивности выходного светового сигнала с оптоволоконного кабеля, нормированной на входной сигнал, при разных длинах отрезка оптоволоконного кабеля. Экспериментальные данные находятся в хорошем согласии с результатами численного моделирования. При прохождении света по оптоволоконному кабелю длиной 15 м световой сигнал уменьшается на 70 %, в основном за счет кабельных потерь. Путем аппроксимации экспериментальных данных получен коэффициент затухания, равный 0,389 дБ/м. Это значение немного больше указанного в спецификации, так как спектр черенковского излучения смещен в УФ-область, где затухание излучения происходит сильнее.

## 3. ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАЗРЕШЕНИЕ ДАТЧИКА

Для определения места потери пучка вдоль структуры ускорителя необходимо пересчитать время прихода сигнала с датчика в продольную координату. Вследствие

широкого углового распределения заряженных частиц, проходящих сквозь оптоволокну, черенковское излучение распространяется по оптоволокну как в направлении движения первичного пучка (направление 1), так и в противоположном направлении (направление 2). Поэтому световой сигнал можно регистрировать с обоих торцов оптоволокну. Поскольку скорость движения пучка больше скорости распространения света в оптоволокну, то шаг дискретизации по координате при снятии сигнала с торца в направлении 1 и 2 можно выразить как

$$s_1 \approx \frac{c}{f(n-1)}, \quad (1)$$

$$s_2 \approx \frac{c}{f(n+1)}, \quad (2)$$

где  $s_1, s_2$  — шага дискретизации по координате при регистрации импульсов с торцов, расположенных по и против направления движения пучка соответственно;  $f$  — частота дискретизации АЦП.

Таким образом, для пластикового оптоволокну ( $n = 1,49$ ) пространственное разрешение датчика при регистрации сигнала, распространяющегося в направлении, противоположном движению пучка, в пять раз лучше, чем разрешение датчика при регистрации сигнала по направлению пучка. При этом, согласно численной модели, интенсивность первого сигнала будет на порядок меньше второго.

На рис. 2 представлены распределения потерь электронного пучка в 500-МэВ канале выпуска накопителя, полученные с двух торцов оптоволокну. В обоих случаях датчик регистрирует две основные потери пучка: в месте выпуска пучка из накопителя (после септум-магнита SM) и при помощи магнитной коррекции диполя ЗМЗ. В таблице содержится описание полуширин и отношений интенсивности этих сигналов.

По значениям в таблице можно сделать вывод о том, что регистрация сигнала, распространяющегося в направлении, противоположном направлению движения пучка, позволяет в 4–5 раз улучшить пространственное разрешение оптоволоконного датчика потерь пучка по сравнению с регистрацией сигнала, распространяющегося по направлению движения пучка. С учетом разницы коэффициентов усиления ФЭУ

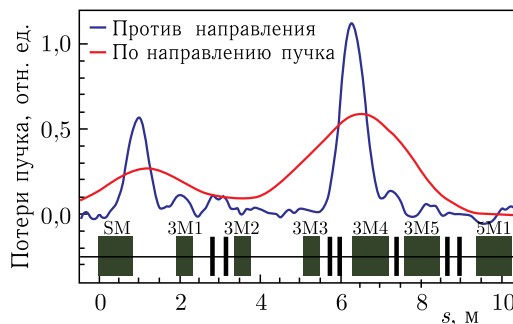


Рис. 2. Потери пучка электронов в канале выпуска из накопительного кольца, полученные с двух торцов оптоволокну. Первая потеря возникла после септум-магнита, вторая — в результате сброса пучка при помощи коррекции магнита ЗМЗ

**Результаты обработки сигналов, представленных на рис. 3**

Место потери	Направление сигнала	Расстояние до ФЭУ, м	Пространственное разрешение, м	Отношение интенсивности сигналов 1 и 2
SM	1	19	3,1	9,3
	2	16	0,6	
3МЗ	1	14,5	3,0	10,9
	2	20,5	0,7	

интенсивность сигнала при этом будет на порядок меньше. Оба этих вывода хорошо согласуются с результатами аналитических расчетов и численного моделирования.

Согласно рис. 1, демонстрирующему искажение сигнала на выходе датчика в зависимости от длины оптоволоконна, и формулам (1), (2) для вычисления шага дискретизации пространственного разрешения, можно сделать вывод, что для достижения пространственного разрешения датчика не хуже 1 м, которое предъявляется к оптоволоконному датчику потерь пучка на инжекционном комплексе ИЯФ СО РАН, оптимальная длина отрезка оптоволоконна составляет 20 м. При этом затухание в оптоволоконне приведет к потере до 80% излучения.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В данной работе исследована зависимость пространственного разрешения датчика потерь пучка и интенсивность выходного сигнала от длины оптоволоконна для случая использования многомодового пластикового волокна со ступенчатым профилем показателя преломления. Полученные оценки хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Для достижения наилучшего пространственного разрешения датчика световой сигнал необходимо регистрировать с торца, противоположного направлению движения пучка. В качестве приемника светового сигнала рекомендуется использовать ФЭУ на МКП, который обладает высоким временным разрешением. АЦП следует подбирать с полосой пропускания не менее 200 МГц. Для достижения пространственного разрешения не хуже 1 м, которое требуется от оптоволоконного датчика потерь пучка на инжекционном комплексе ИЯФ СО РАН, необходимо наряду с быстрой электроникой использовать отрезки оптоволоконна длиной 20 м

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. *Maltseva Yu. et al.* // Proc. of XXVI Russ. Particle Accelerator Conf. "RuPAC2018", Protvino, Russia, Oct. 1–5, 2018. P. 39.
2. *Battistoni G. et al.* // Ann. Nucl. Energy. 2015. P. 10–18.
3. *Senior J. M.* Optical Fiber Communications Principles and Practice. 3rd ed. Pearson Education Limited, 2009.