

УДК 535.41

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИЗМЕРЕНИЙ ИНТЕРФЕРОГРАММ КОГЕРЕНТНОГО ПЕРЕХОДНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2023 г. Д. А. Шкитов^а, *, М. М. Токтаганова^а, **, Г. А. Науменко^а, М. В. Шевелев^а

^аНациональный исследовательский Томский политехнический университет,
Томск, 634050 Россия

*e-mail: shkitovda@tpu.ru

**e-mail: mmt8@tpu.ru

Поступила в редакцию 14.06.2022 г.

После доработки 22.08.2022 г.

Принята к публикации 22.08.2022 г.

Представлены результаты сравнения автокорреляционных функций когерентного переходного излучения, полученных в эксперименте на микротроне Томского политехнического университета и методами компьютерного моделирования. Детально описаны условия эксперимента и математическая модель, лежащая в основе моделирования. Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными показало хорошее согласие. Результаты исследования демонстрируют, что автокорреляционная функция переходного излучения зависит от временной структуры электронного пучка и может быть использована как прецизионный метод измерения времени задержки между электронными сгустками.

Ключевые слова: автокорреляционная функция, интерферометр, последовательность сгустков, диагностика пучков, когерентное излучение, микротрон.

DOI: 10.31857/S1028096023020115, **EDN:** DSUFXM

ВВЕДЕНИЕ

На основе механизма переходного излучения, возникающего в процессе взаимодействия ускоренных заряженных частиц с веществом, в прошлые десятилетия были разработаны методы диагностики поперечных [1] и продольных [2] размеров релятивистских пучков в ускорителях. Поперечные характеристики пучка определяют с помощью регистрации изображения некогерентного оптического переходного излучения. Продольные размеры определяют, измеряя спектр когерентного излучения в различных диапазонах в зависимости от длины сгустков в пучке. Отметим, что существуют и другие предложения по применению переходного излучения для диагностики пучков [3, 4]. Также в настоящее время используют и иные способы диагностики продольных размеров, например, на основе отклоняющего резонатора [5] или электрооптический метод [6]. В [7, 8] авторы исследовали спектральные характеристики когерентного переходного излучения модулированного электронного пучка с помощью интерферометра Мартина–Паплетта [9] и наблюдали периодическую структуру автокорреляционной функции. В настоящем исследовании продолжена разработка метода диагностики расстояния между электронными сгустками на основе интерферометрии переходного излучения, или,

другими словами, измерения автокорреляционной функции переходного излучения с помощью интерферометра. Ранее был апробирован метод измерения продольных размеров сгустков [10, 11] и предложен метод определения расстояний между сгустками [12], близкий к предлагаемому в настоящей работе, на основе измерения интерферограмм двойной щелевой мишени дифракционного излучения, возникающего вследствие динамической поляризации атомов мишени кулоновским полем заряженной частицы, пролетающей на некотором расстоянии от края мишени, но не пересекающей ее. Отметим, что источником когерентного излучения в разрабатываемом методе может служить как дифракционное излучение, так и синхротронное излучение, например, от поворотного магнита, в этом случае метод становится практически неразрушающим для пучка заряженных частиц.

Актуальность данных исследований обусловлена развитием новых способов генерации коротких последовательностей электронных сгустков. Например, с применением кильватерного метода ускорения [13] или с помощью лазеров на свободных электронах [14]. В настоящее время существуют технологии и способы, позволяющие генерировать сгустки с частотой следования в пучке порядка ТГц (от двух сгустков до нескольких де-

сятков) [15, 16]. Сгустки в таком пучке могут иметь разные заряды и находиться на разном расстоянии друг от друга. Подобные пучки, как правило, применяют для генерации излучения, используемого для проведения исследований в материаловедении, биологии и других областях науки.

Ранее [17] была разработана базовая математическая модель и на ее основе создан численный код, позволяющий проводить моделирование автокорреляционной функции переходного излучения и учитывающий различные составляющие, которые влияют на спектральные характеристики излучения от места его генерации до регистрации. Для апробации кода необходимо провести сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными. В Томском политехническом университете (ТПУ) накоплен богатый опыт измерения на микротроне спектральных характеристик поляризованного излучения различных видов [18, 19]. В настоящей работе проведено сравнение результатов расчета интерферограмм переходного излучения на основе разработанного кода с результатами двух измерений спектральных характеристик излучения с помощью интерферометра Мартина–Паплетта (например, [7, 8]) на выведенном электронном пучке микротрона ТПУ с энергией частиц 6.1 МэВ.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве исходных данных для сравнения результатов моделирования были выбраны зависимости, полученные в экспериментах по генерации когерентного переходного излучения, которые проводили на микротроне ТПУ. Примеры подобных измерений характеристик переходного излучения, в том числе схема измерений, достаточно подробно представлены в [7, 8]. В экспериментах электронный пучок выводили на воздух из вакуумного тракта ускорителя через бериллиевое окно. Он проходил через медный прямоугольный экран, расположенный под углом к траектории пучка на расстоянии 320 мм от окна. Обратное переходное излучение, распространяющееся вдоль направления зеркального отражения, направляли на плоское зеркало, которое отражало излучение на вход в интерферометр. Интерферометр состоит из поляризатора на входе, пропускающего горизонтальную компоненту, фиксированного и подвижного зеркала, делителя излучения и параболического зеркала, в фокусе которого расположен детектор. Используемый делитель излучения, представляющий собой периодическую проволочную структуру [7], имеет практически 100%-ные коэффициенты пропускания и отражения почти от нуля до частот $\sim c/2\delta = 600$ ГГц, где δ – зазор между проволочками. Перед детектором был установлен запредельный волновод диаметром 15 мм для подавления длинноволнового спектра излучения от ВЧ-системы ускорителя. В начале эксперимента измеряли ориентацион-

ную зависимость переходного излучения от угла наклона экрана при нулевом положении подвижного зеркала интерферометра, когда расстояния от делителя до зеркал одинаковы (рис. 1). Угол наклона мишени выбирали как угол между направлением пучка и поверхностью мишени. Затем, выставив положение экрана переходного излучения в максимум интенсивности излучения, измеряли интерферограмму (автокорреляционную функцию). Каждая точка в измерениях – это усреднение по 20 макроимпульсам электронного пучка. Полученный результат нормировали на силу тока пучка. Типичный разброс значений силы тока пучка во время измерений интерферограмм варьировался в пределах $\pm 1\%$ при нескольких выбросах до 5% относительно среднего значения. Параметры пучка приведены в табл. 1.

МОДЕЛИРОВАНИЕ

В основе моделирования лежит математическая модель, позволяющая рассчитать интенсивность когерентного переходного излучения I на детекторе от шага подвижного зеркала интерферометра $d = \Delta l/2$, где Δl – оптическая разность хода излучения между зеркалами в интерферометре:

$$I(\Delta l) = \int_{v_1}^{v_2} \frac{d^2 W_0}{dv d\Omega} B(v) S(v) M(v) dv,$$

$$B(v) = N + N(N - 1)F(v),$$

$$F(v) = m^{-2} \exp\left[-4\pi^2 v^2 (\sigma_x^2 s_x^2 + \sigma_y^2 s_y^2 + \sigma_z^2 s_z^2) / c^2\right] \times \left| \sum_{p=1}^m \exp[-i2\pi v L (p - 1) s_z / c] \right|^2,$$

$$\{s_x, s_y, s_z\} = -\{\cos\theta_y \cos\theta_x + \text{ctg}\theta_0 (\sin\theta_y - 1/\beta), \cos\theta_y \sin\theta_x, 1/\beta\},$$

$$M(v) = |1 + \exp(-i2\pi \Delta l v / c)|^2 = 2[1 + \cos(2\pi \Delta l v / c)],$$

$$S(v) = \begin{cases} 1 & v \in \{v_{\text{dmin}}, v_{\text{dmax}}\} \\ 0 & v \notin \{v_{\text{dmin}}, v_{\text{dmax}}\}. \end{cases}$$

Здесь множитель $\frac{d^2 W_0}{dv d\Omega}$ – спектр излучения от одного электрона (рис. 2), который учитывает конечность размеров мишени. В работе этот множитель и ориентационную зависимость переходного излучения (рис. 1) рассчитывали численными методами моделирования [20] на основе обобщенного метода поверхностных токов [21]. Параметр $B(v)$ – множитель, во многом определяющий спектральные свойства излучения и зависящий от структуры электронного пучка, где N – количество электронов во всем пучке, $F(v)$ – форм-фактор пучка [22] (рис. 2), $M(v)$ – интер-

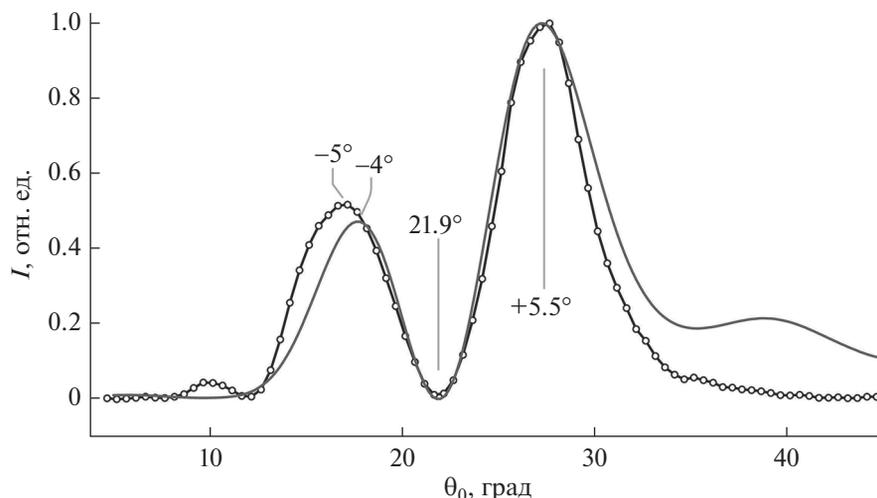


Рис. 1. Нормированные на максимум ориентационные зависимости интенсивности переходного излучения, полученные в эксперименте (символы, объединенные сплошной линией) и в моделировании в одночастичном приближении для частоты 13.2 ГГц (сплошная линия).

ференционный множитель (рис. 3), $S(\nu)$ – функция чувствительности детектора (рис. 2), где $\{\nu_{\text{dmin}}, \nu_{\text{dmax}}\}$ – частотный диапазон чувствительности детектора. Здесь ν – частота излучения, c – скорость света в вакууме, m – количество сгустков в пучке, $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ – поперечные (горизонтальный, вертикальный) и продольный размеры сгустка по осям X, Y и Z , соответственно, L – расстояние между сгустками, $\{s_x, s_y, s_z\}$ – вектор, соответствующий заданной геометрии измерений, θ_x, θ_y – углы наблюдения, отсчитываемые от оси X (θ_x – в направлении оси Y , θ_y – в направлении оси Z), θ_0 – угол наклона мишени, β – относительная скорость электронов в единицах скорости света. Координаты вектора $\{s_x, s_y, s_z\}$ для выбранных

параметров (табл. 1) равны $\{-0.135, 0, -1.004\}$. Это означает, что поперечные размеры сгустков не оказывают значительного влияния на спектр переходного излучения. Дополнительное описание каждого из множителей в модели также приведено в [17]. Наглядный материал по расчету форм-фактора для случая переходного излучения равномерно модулированного пучка доступен по ссылке [23]. Приложение для моделирования автокорреляционной функции реализовано с помощью языка программирования Wolfram Language [24]. Параметры моделирования приведены в табл. 1.

В моделировании расстояние от центра мишени, совпадающей с началом системы координат (правой), до точки наблюдения спектра переход-

Таблица 1. Параметры экспериментов и моделирования

Наименование	Значение
Энергия электронов, МэВ	6.1
Частота макроимпульсов, Гц	8
Число сгустков в макроимпульсе m	$\sim 10^4$
Населенность сгустка	$\sim 10^8$
Частота ВЧ-поля ν_{RF} , ГГц	2.63
Длина электронного сгустка σ_z , мм	2.4
Размер мишени (гориз. \times верт.), мм	300×200
Наклон мишени θ_0 , град	27.4
Угол наблюдения θ_y, θ_x , град	45, 0
Расстояние между сгустками в пучке L , мм	114; 111.5
Гориз./верт. размер сгустка σ_x/σ_y , мм	1.7/0.85
Диапазон чувствительности детектора $\nu_{\text{dmin}}-\nu_{\text{dmax}}$, ГГц	11.76–60
Диапазон моделирования автокорреляционной функции по Δl , мм	–100–500
Диапазон интегрирования $\nu_1-\nu_2$, ГГц	0–65

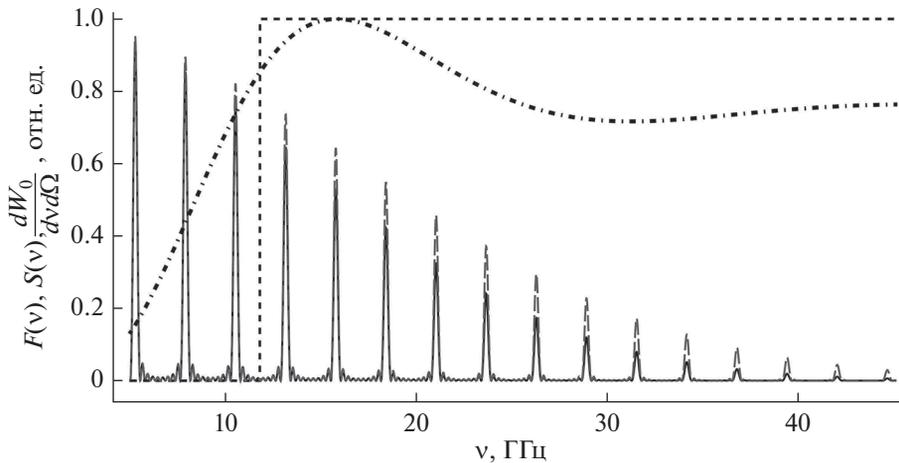


Рис. 2. Диапазон чувствительности детектора $S(v)$ (пунктир); форм-фактор последовательности $F(v)$ из 10 сгустков, расстояния между сгустками 114 мм при $\sigma_z = 2.4$ мм (сплошная линия) и 114 мм при $\sigma_z = 2$ мм (штриховая линия); нормированный спектр переходного излучения одного электрона для мишени конечных размеров (штрихпунктир).

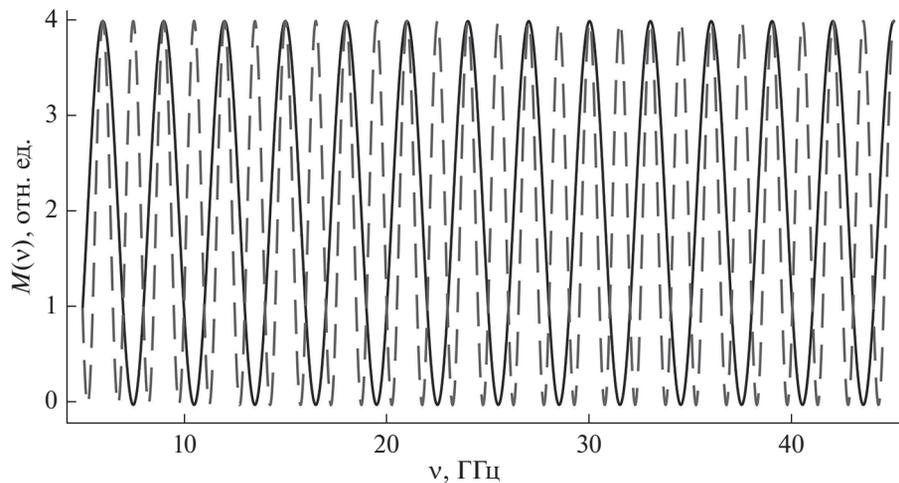


Рис. 3. Примеры интерференционных множителей для разных значений разности хода излучения: 100 мм (сплошная линия); 200 мм (штриховая линия).

ного излучения составляло 10 м, т.е. детектор расположен в дальней волновой зоне, что соответствует измеряемым характеристикам (подробнее об этом в [25]). Апертуру детектора не учитывали, т.е. полагали, что детектор точечный. Его чувствительность принимали равной единице в диапазоне от v_{dmin} до v_{dmax} 11.76–60 ГГц (рис. 2), где минимальное значение определяется диаметром заперделного волновода, а максимальное соответствует паспортному значению. В модели предполагали, что мишень абсолютно проводящая и имеет форму прямоугольного экрана. Так как мишень расположена симметрично относительно горизонтальной плоскости, в которой проводят измерения, переходное излучение содержит только горизонтальную компоненту поляризации. Соответственно, рассчитывали спектр излучения только этой компоненты. С целью ускорения вычислений полагали, что количество сгустков в

пучке $m = 10$. При моделировании заряд был равномерно распределен по последовательности электронных сгустков в пучке, все сгустки были одинаковы по размеру. Считали, что электроны в сгустках подчиняются гауссовому распределению. Расстояние между двумя соседними сгустками в пучке соответствовало частоте поля ВЧ-системы ускорителя. В моделировании точка наблюдения располагалась под углом $\theta_y = 45^\circ$ относительно траектории электронного пучка, где в эксперименте находилось зеркало. Как показано на рис. 1, максимум излучения в такой геометрии наблюдения соответствовал углу наклона мишени $\theta_0 = 27.4^\circ$. Расчет этой зависимости проводили для частоты излучения 13.2 ГГц. Эта частота пучка микротрона является доминирующей при использовании заперделного волновода диаметром 15 мм, который выступает в качестве низкочастотного фильтра, что подтверждают более

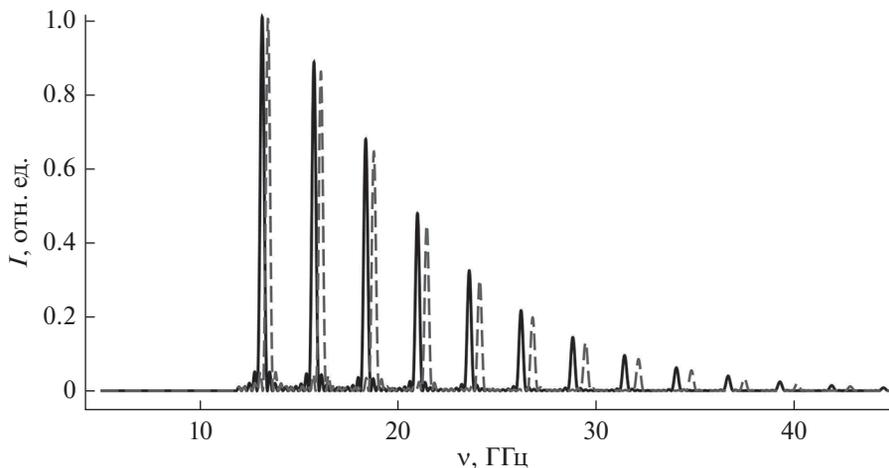


Рис. 4. Итоговый расчетный спектр переходного излучения пучка ($\sigma_z = 2.4$ мм), “видимый” детектором в заданном частотном диапазоне для разных расстояний между сгустками: 114 мм (сплошная линия); 111.5 мм (штриховая линия).

ранние измерения [8]. Добавим, что эта частота соответствует пятому порядку основной частоты $\nu_k = k\nu_{RF}$ ($k = 1, 2, \dots$). Для сравнения зависимостей на рис. 1 экспериментальную кривую сдвинули по оси абсцисс до совпадения минимумов и по оси ординат из нее вычли пьедестал. Шаг зеркала в интерферометре в расчетах был равен 0.05 мм (шаг $\Delta l = 0.1$ мм). Диапазон моделирования автокорреляционной функции выбран в соответствии с диапазоном экспериментальных данных. Для сравнения с моделированием экспериментальные графики автокорреляционной функции сдвинули по оси ординат на среднее значение интенсивности сигнала, и по оси абсцисс – до совпадения основного максимума.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Как показано на рис. 2, изменение длины сгустка приводит к изменению относительной интенсивности пиков в спектре переходного излучения и сдвигу порога когерентности. На рис. 4 приведены итоговые спектры когерентного переходного излучения, полученные в расчетах для разных расстояний между сгустками длиной $\sigma_z = 2.4$ мм. Хорошо видно, что спектр переходного излучения представляет собой набор узких линий, относительные интенсивности которых в данных экспериментальных условиях преимущественно зависят от одночастичного спектра (т.е. размера мишени) и порога когерентности (т.е. длины сгустков). Учет размера мишени в моделировании незначительно влияет на интерферограмму, так как в условиях эксперимента размер мишени больше, чем эффективный радиус кулоновского поля электронов. На рис. 5 приведены для сравнения моделируемые и экспериментальные [7] автокорреляционные функции. Из рисунка видно, что сдвига подвижного зеркала на 150 мм (разность хода 300 мм) недостаточно для корректного

сравнения, а значит более точного определения расстояния между сгустками. Позже были проведены измерения со сдвигом 300 мм. Новая измеренная автокорреляционная функция и моделируемые функции представлены на рис. 6. Сравнение показывает точное совпадение количества как основных (как на рис. 5), так и промежуточных пиков автокорреляционной функции в заданном диапазоне моделирования. Причина несовпадения количества промежуточных пиков на рис. 5 требует исследований. Однако, когда расстояние между электронными сгустками $L = 114$ мм, наблюдается смещение основных пиков вправо относительно экспериментальных данных. В то же время положение основных пиков моделируемой автокорреляционной функции более точно совпадает с данными измерений, когда расстояние между сгустками $L = 111.5$ мм. Отметим, что до этих измерений на микротроне ТПУ считали, что расстояние между сгустками, или частота ВЧ-поля ускорителя, не меняются и равны 114 мм и 2.63 ГГц соответственно. Данное изменение по сравнению с прошлыми измерениями, как выяснилось, связано с тем, что после замены катодного узла и резонатора, которая была сделана после и до проведения измерений, представленных на рис. 5 и 6, соответственно, появляется необходимость заново настраивать новый резонатор ВЧ-системы микротрона. Это и привело к изменению частоты ВЧ-поля. Другое расхождение результатов измерений и моделирования – малая по сравнению с экспериментом амплитуда пиков автокорреляционной функции – также требует дополнительного исследования. Итак, расстояние между сгустками $L = 114$ мм соответствует частоте $\nu_{RF} = 2.63$ ГГц, $L = 111.5$ мм – $\nu_{RF}' = 2.69$ ГГц. Тогда для пятого порядка излучения это смещение частоты ВЧ-поля приводит к сдвигу положения пика на $5(\nu_{RF}' - \nu_{RF}) = 0.3$ ГГц. Так как разре-

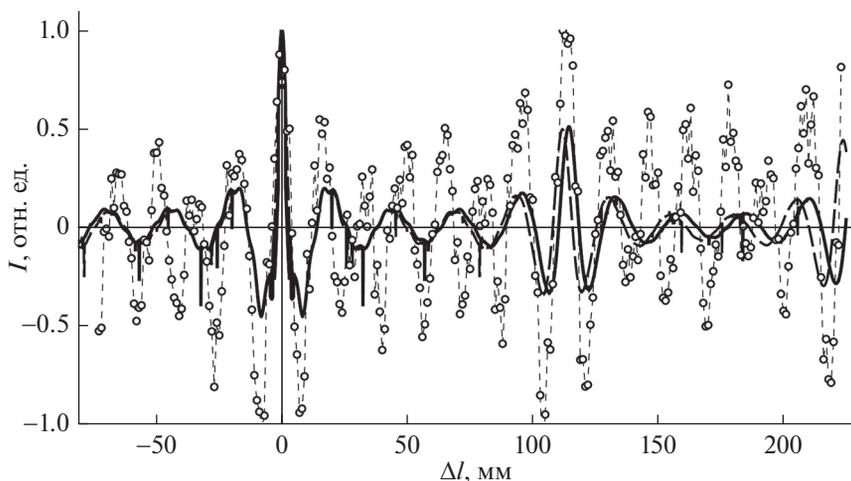


Рис. 5. Автокорреляционные функции переходного излучения, полученные в эксперименте [5] (символы, объединенные пунктирной линией) и при моделировании в интерферометре при $L = 114$ мм (сплошная линия) и 111.5 мм (штриховая линия).

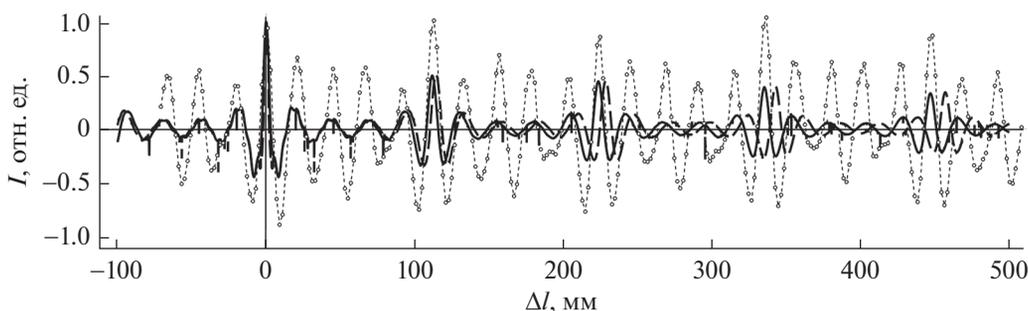


Рис. 6. Автокорреляционные функции переходного излучения, полученные в настоящем эксперименте (символы, объединенные пунктирной линией) и при моделировании в интерферометре при $L = 111.5$ мм (сплошная линия) и 114 мм (штриховая линия).

шение интерферометра оценивается как $\Delta\nu \sim c/2\delta = 0.5$ ГГц, этот сдвиг положения пика практически не может быть экспериментально зафиксирован. Для этого требуется замена линейки шагового двигателя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты моделирования автокорреляционной функции на основе представленной математической модели показывают хорошее согласие с экспериментальными данными. На примере микротрона ТПУ еще раз подтверждена возможность использования разрабатываемого метода для диагностики временной структуры пучков заряженных частиц. Обнаруживаемые небольшие расхождения между моделью и данными эксперимента объясняются недостатком знания о точных характеристиках приборов и оборудования, а также параметров ускорителя в каждом конкретном эксперименте. Остро встает вопрос сле-

дующего этапа разработки – проведения нового эксперимента, основополагающей целью которого будет верификация метода с исключением любых “белых пятен” математической модели.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность сотрудникам ТПУ, обеспечивающим повседневную работу высокопроизводительного кластера. Работа выполнена при поддержке ТПУ в рамках программы развития № Приоритет-2030-НИП/ИЗ-005-0000-2022.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Aryshev A., Ainsworth R., Aumeyr T., Bergamaschi M., Boogert S.T., Karataev P., Kieffer R., Kruchinin K., Lefevre T., Mazzoni S., Nevay L., Terunuma N., Urakawa J.* // *J. Instrum.* 2020. V. 15. № 1. P. P01020. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/01/P01020>

2. *Mihalcea D., Bohn C.L., Happek U., Piot P.* // Phys. Rev. ST Accel. Beams. 2006. V. 9. P. 082801. <https://doi.org/10.1103/PhysRevSTAB.9.082801>
3. *Потылицын А.П., Резаев Р.О.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2006. № 3. С. 77.
4. *Внуков И.Е., Гопонов Ю.А., Лактионова С.А., Ша-тохин Р.А., Sumitani K., Takabayashi Y.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2020. № 6. С. 35. <https://doi.org/10.31857/S1028096020060217>
5. *Behrens C., Decker F.-J., Ding Y., Dolgashev V.A., Frisch J., Huang Z., Krejcik P., Loos H., Lutman A., Maxwell T. J., Turner J., Wang J., Wang M.-H., Welch J., Wu J.* // Nature Commun. 2014. V. 5. P. 3762. <https://doi.org/10.1038/ncomms4762>
6. *Berden G., Jamison S.P., MacLeod A.M., Gillespie W.A., Redlich B., van der Meer A.F.G.* // Phys. Rev. Lett. 2004. V. 98. № 11. P. 114802. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.93.114802>
7. *Науменко Г.А., Потылицын А.П., Каратаев П.В., Шипуля М.А., Блеко В.В.* // Письма в ЖЭТФ. 2017. Т. 106. Вып. 2. С. 115. <https://doi.org/10.7868/S0370274X17140119>
8. *Naumenko G., Potylitsyn A., Shevelev M., Karataev P., Shipulya M., Bleko V.* // J. Instrum. 2018. V. 13. № 4. P. C04008. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/13/04/C04007>
9. *Martin D.H., Puplett E.* // Infrared Phys. 1970. V. 10. № 2. P. 105. [https://doi.org/10.1016/0020-0891\(70\)90006-0](https://doi.org/10.1016/0020-0891(70)90006-0)
10. *Shkitov D.A., Naumenko G.A., Shevelev M.V., Potylitsyn A.P., Deng H., Wang X.* // J. Surf. Invest.: X-ray, Synchrotron Neutron Tech. 2013. V. 7. № 4. P. 784. <https://doi.org/10.1134/S102745101304037X>
11. *Науменко Г.А., Потылицын А.П., Шевелев М.В., Шкитов Д.А., Попов Ю.А.* // Письма в ЭЧАЯ. 2021. Т. 18. № 2(234). С. 223.
12. *Shkitov D.A., Potylitsyn A.P., Aryshev A.S., Urakawa J.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2014. V. 517. № 1. P. 012024. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/517/1/012024>
13. *Antipov S., Jing C., Fedurin M., Gai W., Kanareykin A., Kusche K., Schoessow P., Yakimenko V., Zholents A.* // Phys. Rev. Lett. 2012. V. 108. № 14. P. 144801. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.108.144801>
14. *Marinelli A., Ratner D., Lutman A.A. et al.* // Nature Commun. 2015. V. 6. P. 6369. <https://doi.org/10.1038/ncomms7369>
15. *Piot P., Sun Y.-E., Maxwell T.J., Ruan J., Lumpkin A.H., Rihaoui M.M., Thurman-Keup R.* // Appl. Phys. Lett. 2011. V. 98. № 26. P. 261501. <https://doi.org/10.1063/1.3604017>
16. *Shen Y., Yang Xi, Carr G.L., Hidaka Y., Murphy J.B., Wang X.* // Phys. Rev. Lett. 2011. V. 107. № 20. P. 204801. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.107.204801>
17. *Toktaganova M., Shkitov D., Shevelev M., Stuchebrov S.* // Proceed. RuPAC-2021, Alushta, Russia, 2021. P. 413. <https://doi.org/10.18429/JACoW-RuPAC2021-WEP-SC36>
18. *Naumenko G.A., Potylitsyn A.P., Shevelev M.V., Shkitov D.A., Popov K.E., Vukolov A.V.* // JETP Lett. 2020. V. 111. Iss. 5. P. 255. <https://doi.org/10.1134/S0021364020050094>
19. *Karataev P., Naumenko G., Potylitsyn A., Shevelev M., Artyomov K.* // Results Phys. 2022. V. 33. P. 105079. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2021.105079>
20. *Shkitov D.A.* // Proceed. RuPAC-2018, Protvino, Russia, 2018. P. 510. <https://doi.org/10.18429/JACoW-RUPAC2018-THP-SC56>
21. *Karlovets D.V., Potylitsyn A.P.* // Phys. Lett. A. 2009. V. 373. № 22. P. 1988. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2009.03.060>
22. *Naumenko G.A.* // Adv. Mater. Res. 2015. V. 1084. P. 138. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1084.138>
23. Coherent Transition Radiation from Bunches of Charged Particles. 2020. <http://demonstrations.wolfram.com/CoherentTransitionRadiationFromBunchesOfChargedParticles/>. Cited 30 June 2022.
24. Wolfram Language. 2022. <https://www.wolfram.com/language>. Cited 10 June 2022.
25. *Калинин Б.Н., Науменко Г.А., Потылицын А.П., Саруев Г.А., Сухих Л.Г., Ча В.А.* // Письма в ЖЭТФ. 2006. Т. 84. Вып. 3. С. 136.

Comparison of the Results of Simulation and Measurements of Interferograms of Coherent Transition Radiation

D. A. Shkitov^{1, *}, M. M. Toktaganova^{1, **}, G. A. Naumenko¹, M. V. Shevelev¹

¹National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, 634050 Russia

*e-mail: shkitovda@tpu.ru

**e-mail: mmt8@tpu.ru

The results of a comparison of the autocorrelation functions of coherent transition radiation obtained experimentally on the microtron of the Tomsk Polytechnic University and by simulation methods are presented. The conditions of the experiment and the mathematical basis of the simulation are described in detail. Comparison of experimental and simulated data have shown good agreement. It is demonstrated that the autocorrelation function of the transition radiation depends on the temporal structure of the electron beam and can be used as a precision method for measuring the delay time between electron bunches.

Keywords: autocorrelation function, interferometer, bunch trains, beam diagnostics, coherent radiation, microtron.