

P1-2004-70

А. А. Мальцев, М. А. Мальцев, М. В. Маслова

**ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ШИРОКОПОЛОСНЫЙ
ИНФРАКРАСНЫЙ МОНИТОР
ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ
РЕЛЯТИВИСТСКИХ ПУЧКОВ И ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ.
Расчет инфракрасного синхротронного излучения**

Направлено в оргкомитет XIX Всероссийской конференции
по ускорителям заряженных частиц (RUPAC),
4–9 октября 2004 г., Дубна;
в оргкомитет 10-го рабочего совещания по электронике для ЛНС,
13–17 августа 2004 г., Бостон, США,
и в журнал «Измерительная техника»

Мальцев А. А., Мальцев М. А., Маслова М. В.

P1-2004-70

Высокочувствительный широкополосный инфракрасный монитор пространственной структуры релятивистских пучков и тепловых полей.
Расчет инфракрасного синхротронного излучения

Разработаны подпрограммы расчета спектральных и угловых характеристик инфракрасного синхротронного излучения ряда протонных и электронных ускорителей. По результатам расчетов разработаны методы и высокочувствительные детекторы инфракрасного излучения для дистанционной неразрушающей бесконтактной диагностики и исследования пучков, быстропротекающих процессов в кольцевых (CERN/SPS-LHC) и линейных (пучковая мишень GSI) ускорителях, а также тепловых полей в электроядерных установках.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий им. В. И. Векслера и А. М. Балдина ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2004

Перевод авторов

Mal'tsev A. A., Mal'tsev M. A., Maslova M. V.

P1-2004-70

High-Sensitivity Broadband Infrared Monitor of Spatial Structure of Relativistic Bunches and Thermal Fields.
Calculation of Infrared Synchrotron Radiation

Subroutines for calculation of the spectral and angular characteristics of infrared synchrotron radiation are designed. For a number of proton and electron accelerators the conforming calculations are made, the outcomes of which allow one to elaborate methods and highly sensitive detectors of an infrared radiation for remote contactless non-destructive diagnostics and research of bunches and high-speed processes in ring-type (CERN/SPS-LHC) and linear (GSI) accelerators, and also thermal fields in electronuclear-power equipment.

The investigation has been performed at the Veksler and Baldin Laboratory of High Energies, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2004

ВВЕДЕНИЕ

Качество современного ускорительного эксперимента непосредственно зависит от точного и строгого выполнения требований, предъявляемых к ускоряемому пучку. Проблема контроля и регулирования пучка в процессе ускорения является весьма актуальной для всех ускорителей, а для создаваемых особенно. Она требует как развития существующих методов диагностики пучков, так и разработки новых. Причем предпочтение отдается бесконтактным неразрушающим методам, что, в свою очередь, требует разработки и создания соответствующих детектирующих информационно-измерительных систем для реализации этих методов.

Один из таких перспективных методов неразрушающей бесконтактной диагностики пучков релятивистских элементарных частиц основан на использовании их собственного электромагнитного излучения (эффекта синхротронного излучения). Синхротронное, или магнитотормозное, излучение возникает при отклонении магнитным полем релятивистской заряженной частицы от прямолинейного пути, когда частица пролетает в поле поворотных магнитов накопителя или в специально созданном пространственно-периодическом магнитном поле. Эффект синхротронного излучения хорошо изучен и подробно описан во многих работах. Оно используется как инструмент и как источник информации в различных научных и прикладных исследованиях и экспериментах. Генерируемое элементарными частицами магнитотормозное излучение (синхротронное, краевое, *bremsstrahlung*) служит в качестве источника информации о различных параметрах релятивистских пучков (например, токовых, энергетических, пространственных). Благодаря своим уникальным свойствам синхротронное излучение нашло широкое применение в промышленности (особенно в микроэлектронике).

Неразрушающая синхротронная диагностика релятивистских пучков, движущихся по криволинейной орбите, в основном осуществляется с помощью синхротронного излучения видимого или ближнего инфракрасного диапазонов. Но для решения весьма актуальных в настоящее время проблем исследования излучения пучков CERN/LHC-SPS [1, 2] и обнаружения когерентного магнитотормозного излучения (*bremsstrahlung*) на встречных пучках [3, 4] традиционные методы оптической диагностики и детекторы (ФЭУ, CCD) не могут быть использованы. Сложность вопроса заключается в том, что спектр генерируемого релятивистскими элементарными заряженными частицами син-

хротронного излучения находится преимущественно в инфракрасном диапазоне длин волн. Для этой области требуется развитие существующих и разработка новых методов инфракрасной синхротронной диагностики [5]. Именно такая особенность ряда современных ускорительных комплексов стимулировала получение результатов, положенных в основу данной работы.

Все возрастающий интерес проявляется к спектральным и угловым синхротронным экспериментам [6, 7], являющимся основой для совершенствования и корректировки используемых в задачах расчетов магнитотормозного синхротронного излучения релятивистских заряженных частиц расчетных программ и библиотек [8, 9]. Особый интерес представляют полномасштабные эксперименты, выполненные на реальных ускорительных установках [10], а также планируемые на проектируемых коллайдерах [11].

Цель этой работы — проектирование и разработка программного обеспечения для расчета основных характеристик инфракрасного синхротронного излучения протонных и электронных ускорителей; анализ возможности применения методов инфракрасной диагностики для контроля пучков релятивистских элементарных заряженных частиц на криволинейных участках их орбиты; разработка способов и устройств, позволяющих выполнять измерения методами инфракрасной диагностики в условиях повышенного уровня электромагнитных и радиационных помех.

СОБСТВЕННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ РЕЛЯТИВИСТСКОЙ ЧАСТИЦЫ И ЕГО СРАВНЕНИЕ С ТЕПЛОМЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Для того чтобы определить, какая детектирующая аппаратура нужна для измерения основных параметров сгустка (токовых, энергетических, геометрических) и какая требуется инструментальная эффективность, необходимо знать характеристики синхротронного излучения — его спектральное и угловое распределения. Диагностику основных параметров сгустков релятивистских заряженных частиц с помощью их синхротронного излучения иллюстрирует рис. 1, на котором показана геометрия испускания излучения и размещение детектирующих блоков относительно излучателя.

Спектральное распределение испускаемой моноэнергетической релятивистской заряженной частицей (например, электроном) мгновенной мощности синхротронного излучения на длине волны λ , в единичном интервале длин волн, описывается формулой

$$w(\lambda) = \frac{3^{5/2}}{16\pi^2} \frac{e^2 c}{R^3} \gamma^7 y^3 \int_y^\infty K_{5/3}(\eta) d\eta, \quad (1)$$

где $y = \lambda_c/\lambda$.

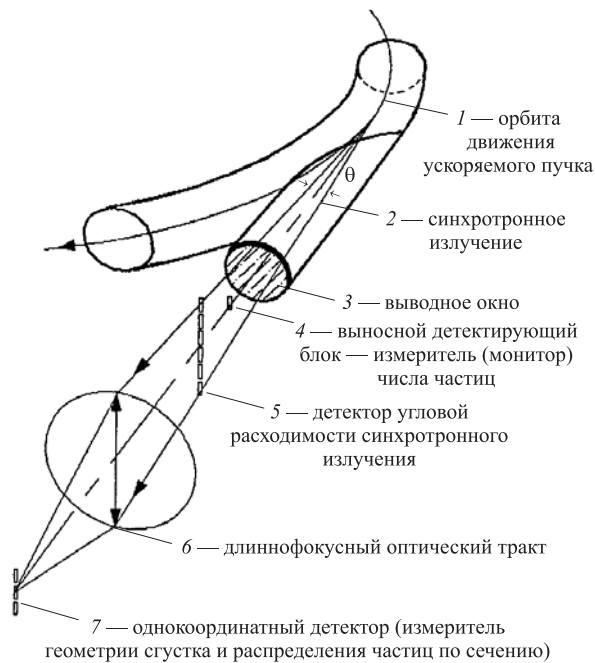


Рис. 1. Схема, поясняющая геометрию испускания синхротронного излучения и его регистрации

Для моноэнергетических электронов критическая длина волны λ_c связана с длиной волны λ_m , соответствующей максимуму спектрального распределения синхротронного излучения, следующим соотношением:

$$\lambda_m = 0,42\lambda_c.$$

В формулу (1) входит функция

$$G(y) = y^3 \int_y^\infty K_{5/3}(\eta) d\eta. \quad (2)$$

Это выражение характеризует универсальную кривую спектрального распределения интенсивности синхротронного излучения моноэнергетических электронов, которую можно использовать для получения распределения при любой энергии, поскольку форма кривой не зависит от энергии электронов.

Из (1) сделана оценка мощности, излучаемой вблизи максимума кривой спектрального распределения (для $\lambda \sim \lambda_c/2$) [12]:

$$w_1 \left[\text{Вт} \cdot \text{мкм}^{-1} \cdot \text{электрон}^{-1} \right] \simeq 9 \cdot 10^{-21} \gamma^7 R^{-3} \quad (3)$$

и мощности, излучаемой на длинах волн, превышающих критическую $\lambda \geq \lambda_c$:

$$w_2 \left[\text{Вт} \cdot \text{мкм}^{-1} \cdot \text{электрон}^{-1} \right] \simeq 9 \cdot 10^{-10} R^{-2/3} \lambda^{-7/3}. \quad (4)$$

Из (3) и (4) видно, что ошибка вычисления мощности синхротронного излучения, связанная с неточностью знания энергии электронов и радиуса их орбит вращения, во втором случае значительно меньше, чем при измерении вблизи пика спектрального распределения:

$$w_1/w_2 = [(7\Delta\gamma/\gamma)^2 + (3\Delta R/R)^2]^{1/2},$$

тогда как

$$w_2/w_1 \sim \Delta R/R.$$

Это обстоятельство и определяет целесообразность использования для измерения полного числа заряженных частиц, например тока электронов в ускоряемом ступке (кольце), лежащих области длин волн $\lambda \geq \lambda_c$.

Синхротронное излучение по азимутальному углу распределено изотропно. Относительно плоскости орбиты оно распространяется в узком конусе, угол раствора θ которого подчиняется выражению

$$\theta \simeq (1 - \beta^2)^{1/2} = m_0 c^2 / E = 1/\gamma, \quad (5)$$

где E — энергия электрона.

Угловое распределение интенсивности излучения по θ имеет вид

$$w(\theta) = \frac{e^2 c}{R^2} \gamma^5 [1 + (\gamma\theta)^2]^{-5/2} \left\{ \frac{7}{16} + \frac{5}{16} \frac{(\gamma\theta)^2}{1 + (\gamma\theta)^2} \right\}. \quad (6)$$

По углу θ (угол отклонения от плоскости орбиты) распределение резко анизотропно, вытянуто вперед и зависит от направления поляризации. Основная часть излучения сконцентрирована в интервале углов $\pm 1/\gamma$. Приближенно угловой разброс излучения (полную ширину на полувысоте) можно представить формулами

$$\Delta\theta \simeq \begin{cases} \frac{2}{\gamma} \left(\frac{\lambda}{\lambda_c} \right)^{1/3} & \text{для } \lambda \gg \lambda_c, \\ \frac{2}{\gamma} \left(\frac{\lambda}{\lambda_c} \right)^{1/2} & \text{для } \lambda \ll \lambda_c. \end{cases} \quad (7)$$

В формулу для вычисления абсолютного числа электронов N_e в сгустке [13]

$$N_e = \frac{U}{S} f(E, R, G, \lambda), \quad (8)$$

измеряемого с помощью синхротронного излучения, входит калибровочная константа (интегральная чувствительность) детекторов S . В выражении (8) U — величина сигнала на выходе измерительной системы, а f — функция, зависящая от энергии электронов E , радиуса R , геометрии регистрации G , спектрального диапазона λ .

При определении абсолютного числа электронов необходимо знать калибровочную константу S . Для чего измерительный канал с приемником синхротронного излучения должен быть прокалиброван на эталонном источнике с известной интенсивностью и спектральными характеристиками, желательно близкими спектральному распределению синхротронного излучения. Таким эталонным источником может быть либо кольцевой электронный ускоритель, например синхротрон, с известной спектральной плотностью [14] синхротронного излучения, либо тепловой источник (планковский излучатель), у которого, как известно, характер спектрального распределения близок характеру [15] распределения синхротронного излучения.

Для синхротронного излучения максимум спектрального распределения приходится на длину волны $\lambda_m^{\text{си}}$, определяемую из выражения

$$\lambda_m^{\text{си}} = 1,7R/\gamma^3, \quad (9)$$

где γ — релятивистский фактор.

Для теплового излучателя из вольфрама максимум спектрального распределения находится по закону Вина из выражения

$$\lambda_m^{\text{ти}} = 2660T^{-1}, \quad (10)$$

где T — абсолютная температура излучателя (К). Из условия $\lambda_m^{\text{си}} \simeq \lambda_m^{\text{ти}}$ (соответствие максимумов спектральных распределений теплового и синхротронного излучений) можно определить температуру эталонного источника, которая соответствовала бы определенному радиусу орбиты и энергии электрона:

$$T_{[\text{К}]} = 1565\gamma^3 R_{[\text{МКМ}]}^{-1}. \quad (11)$$

Таким образом, при выборе эталонного источника для калибровки инфракрасных детекторов синхротронного излучения, учитывая такую особенность, как подобие спектров синхротронного и теплового излучений, можно делать прецизионную калибровку детекторов синхротронного излучения на тепловом источнике либо наоборот.

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Программное обеспечение разрабатывалось для расчета спектральных и угловых характеристик синхротронного излучения ряда наиболее известных протонных и электронных ускорительных комплексов, на которых может быть использована инфракрасная диагностика.

Одним из требований, накладываемых на разрабатываемый программный продукт, является представление выходных данных в удобном для пользователя виде, т.е. в виде гистограмм, семейств кривых, таблиц. Для этого необходимо, чтобы рассчитываемые данные были записаны по определенным правилам (формату), принятым в графических пакетах анализа статистических, научных, экспериментальных и др. данных, таких как PAW — Physics Analysis Workstation [8]. В целом подсистема расчета подразумевает также обработку полученных данных в графических пакетах и выдачу готовой информации (кривых, гистограмм, таблиц и т.д.) на экран или в файл для последующего ее использования, например для подготовки документов и отчетов.

Таким образом, задача разработки подсистемы расчета спектров и углового распределения мощности синхротронного излучения не заканчивается на получении «голых» цифр после вычислений, а заключается в получении, обработке и представлении результатов.

РАСЧЕТ СПЕКТРОВ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Задача расчета спектров решалась в несколько этапов: написание программы расчета спектров распределения интенсивности синхротронного излучения на основе формулы (1), вычисление и обработка полученных данных. Написание программы и расчет производились на ЭВМ типа VAX в операционной системе VAX/VMS [9, 16], а обработка данных и их графическое представление делались на персональном компьютере типа IBM PC/AT.

Столь широкое применение разных ЭВМ, принадлежащих к различным классам, обусловлено их способностью выполнять те или иные задачи. Так, например, сложные инженерные, математические расчеты (вычисление интегралов функции от мнимого аргумента с пределами интегрирования $[y \pm \infty]$) лучше всего производить на таких ЭВМ, как VAX, а обработку и получение информации в графическом виде лучше всего осуществлять на персональном компьютере (ПК), так как большинство графических пакетов разработано именно для таких машин. Связь и обмен информацией между машинами осуществлялась по сети JINET.

Подпрограммы вычисления интеграла и функции Бесселя брались из библиотеки NAGLIB (библиотека, содержащая подпрограммы численных методов математического анализа).

D01ANF — подпрограмма вычисления интеграла

$$I = \int_{(a)}^{(b)} f(x)dx,$$

где границы интегрирования a , b могут принимать значения *scalar* — число и $\pm\infty$ либо $\pm\infty$ (в нашем случае [*scalar*, $+\infty$]). При вызове данной подпрограммы в качестве входных параметров задаются функция $f(x)$ (может быть как встроенной, так и внешней, описанной как External Function), границы интегрирования, абсолютная ошибка интегрирования и относительная ошибка. На выходе подпрограмма либо возвращает значение интеграла и абсолютную ошибку, или сообщает номер ошибки, обнаруженной в ходе выполнения подпрограммы, или выдает предупреждение.

S18DCF — подпрограмма вычисления функции Бесселя

$$y = K_{\nu-N+1}(z).$$

При вызове данной подпрограммы в качестве входных параметров задаются ν — дробный коэффициент функции, $N \geq 1$, где N — целое число, комплексный аргумент функции z . При выходе из процедуры подпрограмма возвращает массив значений $y(N)$.

Библиотека CERN GRAPHLIB содержит различные процедуры работы с графикой. Из нее брались следующие подпрограммы.

HLIMIT(n) — подпрограмма резервирования места для гистограммы; n — *integer* размер резервируемого пространства.

HBOOK1 — подпрограмма определения параметров гистограммы; при вызове — HBOOK1(id , *string'*, ch , a , b , c), где id — номер гистограммы, *string* — надпись по оси ординат, ch — число используемых каналов, a — нижняя граница первого канала, b — верхняя граница последнего канала, c — верхний предел.

HFILL — подпрограмма занесения значений в гистограмму. При вызове — HFILL(di , X , Y , *WEIGHT*), где di — номер гистограммы, X — переменная по оси X , Y — переменная по оси Y , *WEIGHT* — способ занесения (прибавление или отнимание).

HRPUT(id , *filename'*, *chopt*) — запись гистограммы в файл, где id — номер гистограммы, *filename'* — имя файла, *chopt* — символьный параметр (' n ' — новый файл).

HPRINT(id) — вывод гистограмм на экран (id — номер гистограммы).

Рассмотрим алгоритм расчета спектров распределения интенсивности синхротронного излучения.

Укрупненный алгоритм расчета спектров синхротронного излучения:

Входные параметры:
Радиус орбиты, м
Энергия частицы, МэВ

Диапазон длин волн, А

Вычисление критической длины
волны $\lambda_c = 4\pi R/3\gamma^3$

$G(y)$ — вычисление универсальной
кривой спектрального распре-
деления излучения моноэнер-
гетического электрона

Вычисление интенсивности син-
хротронного излучения электрона
с энергией E , вращающегося по
круговой орбите радиусом R

Построение гистограмм

Печать таблицы результатов

Построение гистограммы спек-
трального распределения интен-
сивности синхротронного излу-
чения на экране дисплея

Конец

Блок-схема программного вычисления спектрального распределения ин-
тенсивности синхротронного излучения электронов имеет следующий вид:

Начало

Описание данных:
pi, radius, energy, mc2
gamma, lc, meter, cm, cl
elec, a, a1, a2
y(100), inten(100), la(100)

Присвоение значений

данным:

meter — количество ангстрем в метре
cm — количество ангстрем в сантиметре
pi — π
elec — заряд электрона
cl — скорость света
radius — радиус орбиты
energy — энергия ускоренной частицы
mc2 — энергия покоя электрона

$id = 6$

Обращение к подпрограмме

HLIMIT

(резервирование массива
для построения гистограмм)

Обращение к подпрограмме

HBOOK

(определение параметров
гистограмм)

Вычисление констант:

$gamma = energy/mc^2$
 $lc = 4(pi/3) \cdot radius \cdot gamma^{-3} \cdot meter$
 $a1 = 3^{5/2}/(16 \cdot pi^2)$
 $a2 = elec^2 \cdot C1 \cdot 10^{-4}$
 $a = a1 \cdot a2$

$j = 1, n1$

$i = 1, n1$

$n = n + 1$

Вычисление элементов

массива $la(n)$

Вычисление элементов
массива $y(n)$

Вычисление элементов
массива $INTEN(n)$

Обращение к подпрограмме
HFILL
(занесение информации
в гистограмму)

Обращение к подпрограмме
DATE
(запись текущего дня
сеанса работы)

Обращение к подпрограмме
TIME
(запись текущего
времени работы)

Запись результатов на диск
 $day, time, energy, radius$

$j = 1, npoint$

Запись массивов
 $la(i), inten(i)$

Обращение к подпрограмме
HPUT
(запись гистограмм на диск)

Обращение к подпрограмме
HPRINT
(вывод гистограмм на экран)

Конец

Ниже представлен текст программы вычисления спектров на языке FORTRAN.

```

program synch
external G
common /pawc/ H(40000)

real pi,radius,energy,mc2,gamma,lc
real meter,cm,c1,elec
real a,a1,a2
real y(100),inten(100),la(100)
character*9 day
character*8 tim

c-----
open(unit=1,file='ndata.sin',status='old')
  read(1,'(e10.0)') energy
  read(1,'(e10.0)') radius
  read(1,'(e10.0)') mc2
  read(1,'(e10.0)') elec
close(unit=1)
write(*,*)energy,radius,mc2,elec
meter=1.e10
cm=meter/100
pi=3.14159
c1=3.e10

c-----
id=6
call hlimit(40000)
call HBOOK1(id,'I(1)',50,1.E-2,1.e3,10000)

c-----
gamma=energy/mc2
lc=4*pi/3.*radius*gamma**(-3)*meter

a1=3.**(5./2)/(16*pi**2)
a2=elec**2*c1*1.E-14
a=a1*a2

c---
a11=1.E-02
a12=1.E+03
n=0
n1=log10(a12/a11)
n2=9
npoint=n1*n2
do j=1,n1
  do i=1,n2
    n=n+1
    la(n)=1.E-02*10**(j-1)*i
    y(n)=lc/la(n)
    inten(n)=a*radius**(-3)*gamma**7*G(y(n))
    call HFILL(id,la(n),0,inten(n))
  enddo
enddo

cc-----
call DATE(day)
call TIME(tim)
open (unit=1,file='rez.sin',status='unknown')
write(1,200)day,tim
write(1,210)energy,radius
write(1,230)

```

```

do i=1,npoint
  write (1,220) la(i),inten(i)
end
close(unit=1)
call HRPUT(0,'sinch.rz','n')
call HPRINT(0)
c-----
200 format (/' Program SINCH.FOR'5x,2a10//
*      ' Spectral synchrotron distribution'/
*      ' for monoenergetic electron')
210 format(/' Energy = ',e15.5/' Radius = ',e15.5)
220 format (1x,2e15.5)
230 format (/9x' 1      '7x' inten'/)
end

real function G(y)
external FKN
integer LW,LIW
parameter (LW=800,LIW=LW/4)
integer NOUT
parameter (NOUT=6)
c-----
integer KOUNT
c-----
DOUBLE precision A,ABSERR,EPSABS,EPSREL,RESULT
DOUBLE PRECISION x(100)
integer IFAIL,INF
c-----
DOUBLE PRECISION W(LW)
integer IW(LIW)
c-----
DOUBLE PRECISION FKN
c-----
external D01AMF
c-----
common /telnum/KOUNT
c-----

EPSABS=0.0D+00
EPSREL=1.0D-04

INF=1
KOUNT=0
IFAIL=-1
call D01AMF(FKN,y,INF,EPSABS,EPSREL,RESULT,ABSERR,W,LW,
*      IW,LIW,IFAIL)
if (IFAIL.ne.0) then
  write(NOUT,FMT=99996) IFAIL
  if (IFAIL.le.5) write (NOUT,FMT=99997) RESULT,
*      ABSERR,KOUNT,IW(1)
else
  G=y**3*RESULT
end if

99997 format (' RESULT - APPROXIMATION TO THE INTEGRAL = ',f9.5,/
*      ' ABSERR - ESTIMATE OF THE ABSOLUTE ERROR = ',d9.2,/
*      ' OUNT - NUMBER OF FUNCTION EVALUATIONS = ',I4,/
*      ' IW(I) - NUMBER OF SUBINTERVALS USED = ',I4)
99996 format (' IFAIL = ',I2)

return
end

```

```

c---      double precision function FKN(X)
c-----
integer N,NZ,IFAIL
parameter (N=2)

real FNU
double precision X

integer KOUNT

complex Z,CY(N)

character*1 SCALE

common /telnum/ KOUNT

intrinsic CMPLX

external S18DCF
c-----
KOUNT=KOUNT+1
FNU=5./3.
Z=CMPLX(X)
SCALE='U'
IFAIL=0

call S18DCF (FNU,Z,N,SCALE,CY,NZ,IFAIL)

FKN=REAL(CY(1))
return
end

```

РАСЧЕТ УГЛОВОЙ РАСХОДИМОСТИ

Расчеты углового распределения интенсивности расходящегося потока синхротронного излучения, генерируемого ультрарелятивистской заряженной частицей с энергией E и радиусом траектории R , проводились по формуле (6). Расчеты выполнены непосредственно на языке макрокоманд пакета PAW. Результаты были получены в виде двух- и трехмерных гистограмм.

Пакет PAW (а значит, и его встроенный язык макрокоманд) включает в себя непосредственное обращение к функциям и подпрограммам FORTRAN, которое заключается в вызове интерпретатора языка, автоматическую трансляцию программы (функции) и ее исполнение из родительской программы. Причем все данные, получаемые из подпрограммы (функции), будут заноситься непосредственно в общую базу данных. При этом гистограммы на экране будут выглядеть, как на листе бумаги. Кроме того, возможно включение комментариев и другой информации в рисунки как из самой программы, так и «вручную» (в так называемом интерактивном режиме).

В качестве иллюстрации процедуры расчета угловой расходимости синхротронного излучения, генерируемого на электронном ускорителе DESY, приведена программа на языке макрокоманд пакета PAW, а также исходные тексты функций на FORTRAN.

Далее представлен текст макроса для построения «плоских» гистограмм в PAW для радиуса орбиты $R = 31,7$ м и энергии электрона $E = 1, 3, 6, 9$ ГэВ.

```

MACRO PAWEX3f
*****
* макрос для занесения результатов расчета углового распределения
* синхротронного излучения в гистограмму и вывод ее на диск
* и в файл с именем pic1.plt
*****
Exec alldef
opt grid
opt utit
OPT LOGY
zone 2 2
*
* вызываемые функции фортрана для расчета углового
* распред. излучения при R=31.7 м, для диапазона
* углов от 0 до 0.8 мрад и энергий:
*
fun1 130 angle9.ext 50 0. 0.0008 * E=9 ГэВ
fun1 120 angle6.ext 50 0. 0.0008 * E=6 ГэВ
fun1 110 angle3.ext 50 0. 0.0008 * E=3 ГэВ
fun1 100 angle1.ext 50 0. 0.0008 * E=1 ГэВ
*
histogram/file 1 paw3f.rzd 1024 N * запись гистограмм на диск
hrou 0
close 1
hi/de 0
*
pict/create pict1 * открытие рисунка в памяти
histogram/file 1 paw3f.rzd * открытие исходного файла с
* гистограммами
hrin *
close 1
opt *
exec alldef * определение параметров
opt untit * гистограмм
opt grin *
opt logy *
*
hi/pl 130 * рисование гистограммы в
metafile 10 * текущей директории и
hi/pl 120 * ее запись на диск
metafile 10 * отдельно для каждого
hi/pl 110 * значения энергии E
metafile 10 *
hi/pl 100 *
metafile 10 *
close 10
RETURN

Function angle9(fi_tek)
*****
* External Function angle9.ext для E=9 ГэВ *
* другие внешние функции (angle6.ext, angle3.ext, *
* angle1.ext), вызываемые из основной программы, *

```



```

*   аналогичны данной, но имеют другое значение           *
*   энергии Epow                                           *
*****
REAL fi_tek,mc23,Epow5,gf2,gf5
REAL Radius,c,elec,mc2,Epow,g_f,R2
REAL e2c,g_5,g_f_2,I_max,angle9
data Epow/0.9E+4/,Radius/0.317E+2/,c/3.0E+09/
data elec/4.8E-10/
e2c=c*elec*elec*1.E-7
R2=Radius*Radius
mc2=0.511
gamma=Epow/mc2
g_5=gamma*gamma*gamma*gamma*gamma
Epow5=Epow*Epow*Epow*Epow*Epow
mc23=mc2*mc2*mc2
I_max=7/(16*R2)*(e2c/(mc2*mc2))*Epow5/mc23
if(fi_tek.eq.0) then
angle9=7/(16*R2)*(e2c/(mc2*mc2))*Epow5/mc23
else
g_f=gamma*fi_tek
g_f_2=g_f*g_f
gf2=sqrt(1/(1+g_f_2))
gf5=gf2*gf2*gf2*gf2*gf2
angle9=I_max*gf5*(1+5/7*g_f_2/(1+g_f_2))
endif
END

```

Приведем текст макроса для построения трехмерной гистограммы в PAW.

```

MACRO PAWEK3d
*****
* MACRO расчета углового распределения синхротронного излучения
* при радиусе R=31.7 м и различных энергиях электрона E=var
*****

exec alldef
OPT GRID
OPT utit
opt logy
fun2 100 angle3d.ext 40. -0.0005 0.0005 20. 1.e+3 1.e+4
histogram/file 1 paw3d.rzd 1024 N
hrou 0
close 1
fortran/file 10 paw.ps
metafile 10
suf
close 10
hi/de 0
RETURN

```

Текст внешней функции для вычисления углового распределения синхротронного излучения при $R = 31,7$ м и нескольких значениях энергии электронов $E, \psi = var$ выглядит следующим образом.

```

angle3d.ext

Function angle3d(fi_tek,Epow)
REAL fi_tek,mc23,Epow5,gf2,gf5,Int

```

```

REAL Radius,c,elec,mc2,Epow,g_f,R2
REAL e2c,g_5,g_f_2,I_max,angle3d
data Radius/0.317E+2/,c/3.0E+10/,elec/4.8E-10/,mc2/0.511/

*****
* Radius - радиус орбиты электрона
* c - скорость света
* e - заряд частицы (4.8e-10 - электрон)
* mc2 - энергия покоя частицы МэВ (0.511 - электрон,
*      938.279 - протон)
*****

e2c=c*elec*elec*1.E-8
R2=Radius*Radius
gamma=Epow/mc2
g_5=gamma*gamma*gamma*gamma*gamma
Epow5=Epow*Epow*Epow*Epow*Epow
mc23=mc2*mc2*mc2
I_max=7/(16*R2)*(e2c/(mc2*mc2))*Epow5/mc23
if(fi_tek.eq.0) then
angle3d=I_max
else
g_f=gamma*fi_tek
g_f_2=g_f*g_f
gf2=sqrt(1/(1+g_f_2))
gf5=gf2*gf2*gf2*gf2*gf2
angle3d=I_max*gf5*(1+5/7*g_f_2/(1+g_f_2))
endif
END

```

РЕЗУЛЬТАТЫ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОГРАММ

Процедура и результаты расчета спектрального и углового распределений интенсивности синхротронного излучения заряженных частиц (электронов и протонов) для ряда известных ускорителей, существующих реально и в виде проектов, приведены в виде таблиц и графиков. Были рассмотрены электронные (DESY (ФРГ), *Cτ* и УТИ ОИЯИ) и протонные (SSC, УНК ИФВЭ, SPS-LHC CERN, нуклотрон ОИЯИ) ускорители. Их основные параметры (E , R) закладывались в программы расчетов. В программах использовались классические формулы спектрального распределения интенсивности (1) синхротронного излучения и его углового распределения (6).

В табл. 1 представлена универсальная зависимость (2) спектрального распределения интенсивности синхротронного излучения моноэнергетических электронов. С помощью табл. 1 построены и показаны на рис. 2 и 3 спектральные распределения мощности синхротронного излучения $w(\lambda)$ протонов (рис. 2) и электронов (рис. 3), отличающихся энергиями и радиусами орбит.

Программа расчета распределения интенсивности синхротронного излучения позволяет более детально представить каждую зависимость этого спектрального распределения как в виде таблицы, так и в виде кривой. Для примера кривую спектрального распределения излучения электронов ускорителя

Таблица 1. Универсальная зависимость спектрального распределения синхротронного излучения $G(y)$

$y(n)$	$G(y)$	$y(n)$	$G(y)$	$y(n)$	$G(y)$
82,0000	0,0000E+0	1,1714	0,7920E+0	0,0205	0,2316E-03
41,0000	0,2146E-13	1,0250	0,6727E+0	0,0164	0,1389E-03
27,3333	0,6769E-08	0,9111	0,5741E+0	0,0137	0,9136E-04
20,5000	0,3086E-05	0,8200	0,4930E+0	0,0117	0,6408E-04
16,4000	0,1074E-03	0,4100	0,1512E+0	0,0103	0,4710E-04
13,6667	0,1056E-02	0,2733	0,6857E-01	0,0091	0,3590E-04
11,7143	0,5098E-02	0,2050	0,3804E-01	0,0082	0,2815E-04
10,2500	0,1590E-01	0,1640	0,2380E-01	0,0041	0,5658E-05
9,1111	0,3726E-01	0,1367	0,1612E-01	0,0027	0,2208E-05
8,2000	0,7169E-01	0,1171	0,1155E-01	0,0021	0,1132E-05
4,1000	0,8114E+0	0,1025	0,8636E-02	0,0016	0,6738E-06
2,7333	0,1211E+1	0,0911	0,6670E-02	0,0014	0,4409E-06
2,0500	0,1216E+1	0,0820	0,5287E-02	0,0012	0,3080E-06
1,6400	0,1086E+1	0,0410	0,1121E-02	0,0010	0,2257E-06
1,3667	0,9325E+0	0,0273	0,4468E-03	0,0009	0,1716E-06

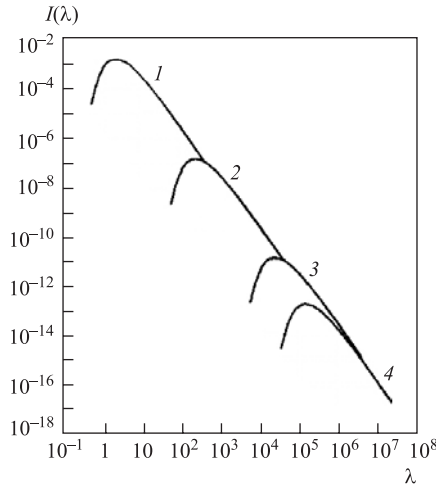


Рис. 2. Спектральное распределение интенсивности синхротронного излучения протонов с энергией E , движущихся по круговым траекториям радиуса R в однородном магнитном поле. $I(\lambda)$ [эрг \cdot с $^{-1}$ \cdot \AA^{-1}], λ [\AA]: 1 — $E = 20$ ТэВ, $R = 10000$ м; 2 — $E = 2$ ТэВ, $R = 1000$ м; 3 — $E = 200$ ГэВ, $R = 100$ м; 4 — $E = 120$ ГэВ, $R = 128$ м

DESY с энергией $E = 6$ ГэВ и радиусом орбиты $R = 31,7$ м, показанную на рис. 4, дополняет табл. 2.

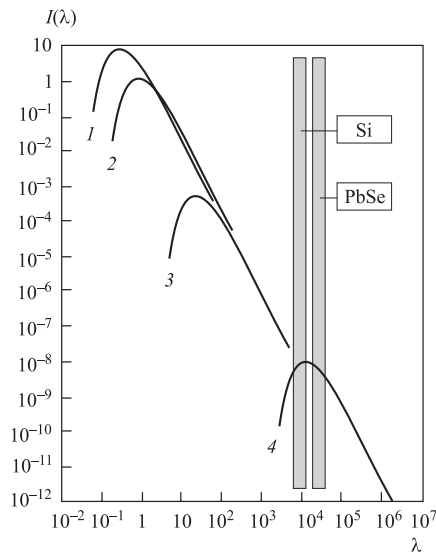


Рис. 3. Спектральное распределение интенсивности синхротронного излучения электронов. $I(\lambda)$ [эрг · с⁻¹ · Å⁻¹], λ [Å]: 1 — $E = 6$ ГэВ, $R = 31,7$ м; 2 — $E = 3$ ГэВ, $R = 11,92$ м; 3 — $E = 1$ ГэВ, $R = 11,92$ м; 4 — $E = 18,2$ МэВ, $R = 4$ см

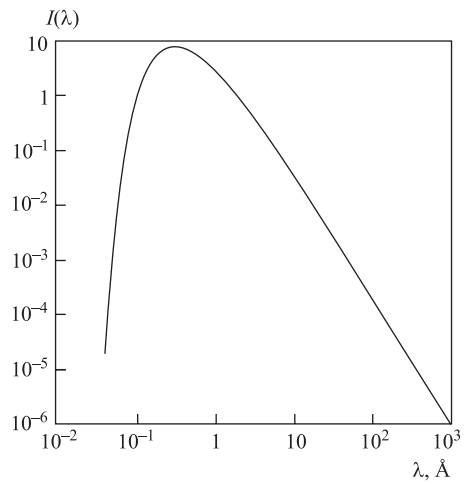


Рис. 4. Кривая спектрального распределения интенсивности синхротронного излучения электронов ускорителя DESY с $E = 6$ ГэВ и $R = 31,7$ м

Таблица 2. Спектральное распределение интенсивности излучения электронов для $E = 6 \text{ ГэВ}$ и $R = 31,7 \text{ м}$

λ	<i>inten</i>	λ	<i>inten</i>	λ	<i>inten</i>
0,01000	0,0000E+0	0,70020	0,5220E+1	40,01310	0,1527E-02
0,02000	0,1415E-12	0,80030	0,4434E+1	50,01640	0,9154E-03
0,03000	0,4461E-07	0,90030	0,3783E+1	60,01970	0,6021E-03
0,04000	0,2034E-04	1,00030	0,3249E+1	70,02300	0,4223E-03
0,05000	0,7081E-03	2,00070	0,9964E+0	80,02630	0,3104E-03
0,06000	0,6959E-02	3,00100	0,4519E+0	90,02960	0,2366E-03
0,07000	0,3360E-01	4,00130	0,2507E+0	100,03280	0,1855E-03
0,08000	0,1048E+0	5,00160	0,1569E+0	200,06570	0,3729E-04
0,09000	0,2456E+0	6,00200	0,1062E+0	300,09850	0,1455E-04
0,10000	0,4725E+0	7,00230	0,7614E-01	400,13130	0,7460E-05
0,20010	0,5347E+1	8,00260	0,5692E-01	500,16420	0,4441E-05
0,30010	0,7983E+1	9,00300	0,4396E-01	600,19710	0,2906E-05
0,40010	0,8016E+1	10,00330	0,3484E-01	700,22990	0,2030E-05
0,50020	0,7156E+1	20,00660	0,7390E-02	800,26270	0,1488E-05
0,60020	0,6146E+1	30,00990	0,2945E-02	900,29550	0,1131E-05

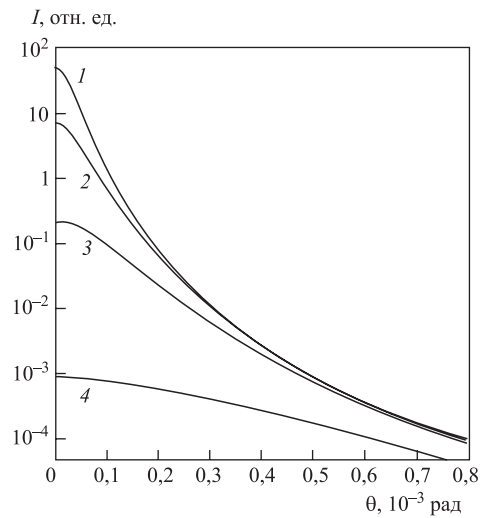


Рис. 5. Рассчитанное угловое распределение синхротронного излучения электрона $R = 31,7 \text{ м}$ с энергией: 1 — 9 ГэВ, 2 — 6 ГэВ, 3 — 3 ГэВ, 4 — 1 ГэВ

Результаты расчетов углового распределения интенсивности синхротронного излучения для нескольких значений энергий электронов и радиусов их орбит представлены в виде «плоских» гистограмм на рис. 5.

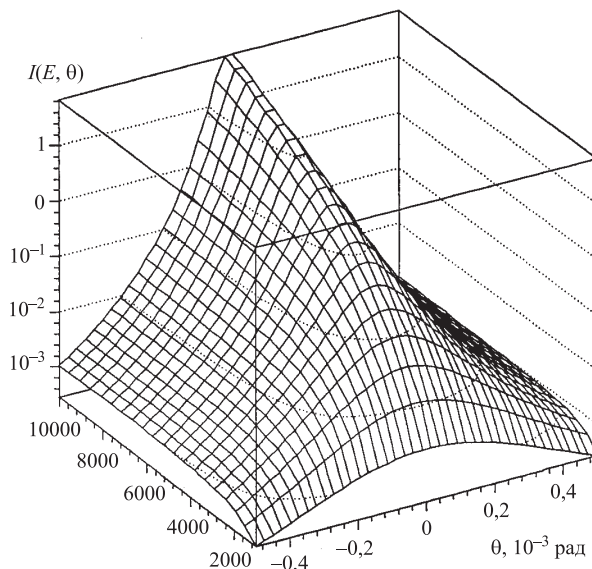


Рис. 6. Зависимость мощности синхротронного излучения $I(E, \Theta)$

Трехмерная гистограмма углового распределения интенсивности для нескольких значений энергии при радиусе $R = 31,7$ м показана на рис. 6.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе приведены результаты разработки подсистемы расчета спектральных и угловых характеристик синхротронного излучения для ряда наиболее известных протонных и электронных ускорительных комплексов. Данные расчеты необходимы при проектировании высокочувствительного инфракрасного детектора [17, 18] для дистанционной бесконтактной неразрушающей диагностики и мониторинга пучков релятивистских заряженных частиц и температурных полей. Кроме того, эти расчеты могут найти применение при решении проблемы размещения оборудования и детектирующих систем на пучке ускорителя.

С дальнейшим развитием и усовершенствованием ПК наряду с экспериментами самостоятельную роль играют расчеты, связанные с моделированием процессов в ускорителе. Такие расчеты, проведенные с верифицированными аттестованными программами и константами в хороших приближениях, которые обеспечивают библиотеки CERN PAW [8] и VAX/VMS [9, 16],

оцененные на экспериментах, представляют специалисту более систематические дифференциальные данные, чем дорогостоящий эксперимент. Описание основной (реперной) информации должно исключать неоднозначную интерпретацию данных, обеспечивать возможность воспроизведения результатов.

Полученные результаты могут быть использованы при создании новых программ моделирования, при планировании экспериментов на ускорителях высоких и сверхвысоких энергий, а также при разработке новых методов и систем диагностики пучков. В частности, на основе проведенных расчетов сделан выбор сенсоров для проекта высокочувствительного широкополосного инфракрасного детектора-монитора пространственной структуры релятивистских пучков и тепловых полей, который можно применять для диагностики пучка на протонном комплексе SPS-LHC CERN, встречных пучков на DESY (bremsstrahlung) [4], на линейном ускорителе GSI (пучковая мишень) и на электроядерной установке (тепловые поля) [18]. В связи с тем, что спектр излучения протонов SPS в основном находится в инфракрасной области (длины волн от 1 мкм и более), наиболее оптимальными по своим параметрам, эксплуатационным свойствам и стоимости являются фотоприемники из кремния (для $\Delta\lambda \sim 0,3 \div 1,1$ мкм) и селенида свинца (для $\Delta\lambda \sim 0,6 \div 4,8$ мкм).

ЛИТЕРАТУРА

1. Design Study of the LHC. CERN/AC/95-05(LHC). 1995.
2. *Bosser J. et al.* CERN/LHC Project Report 370. 2000.
3. *Гинзбург И. Ф. и др.* // ЯФ. 1992. Т. 55, вып. 12. С. 3310.
4. *Кураев Э. А., Мальцев А. А.* Препринт ОИЯИ Р9-97-242. Дубна, 1997.
5. *Мальцев А. А.* // ЭЧАЯ. 1996. Т. 27, вып. 3. С. 797.
6. *Edwards H. T.* // Proc. of the 2nd Eur. Part. Accel. Conf. (EPAC-90). 1990. V. 1. P. 356.
7. *Bosser J., Bovet C., Jung R.* LHC/Note 192. 1992.
8. CERNLIB-CERN Program Library Short writeupс. CERN. Geneva, 1994.
9. *Carminati F., Bunn J.* CERN/DD/US/21. 1987.
10. *Мальцев А. А.* // Физика плазмы. 1997. Т. 23, № 5. С. 419.
11. LHC Physics and Detectors // Proc. of the 2nd Intern. Symp. Dubna, 2000. V. 1-3.
12. *Годвин Р.* // УФН. 1970. Т. 101. С. 493.

13. *Мальцев А. А.* Сообщение ОИЯИ 9-86-289. Дубна, 1986.
14. *Волков Ю. М. и др.* // ЯФ. 1978. Т. 27, № 4. С. 868.
15. *Мальцев А. А., Мальцев М. А.* // Измерительная техника. 1995. № 10. С. 67.
16. *Grote H.* VAX/VMS for beginners. CERN/DD/US/45. 1987.
17. *Мальцев А. А., Мальцев М. А.* // АЭ. 1996. Т. 80, вып. 3. С. 190.
18. *Маслова М.* // АЭ. 2002. Т. 93, вып. 4. С. 295.

Получено 17 мая 2004 г.

Редактор *О. Г. Андреева*

Подписано в печать 08.07.2004.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,50. Уч.-изд. л. 1,83. Тираж 365 экз. Заказ № 54514.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@pds.jinr.ru

www.jinr.ru/publish/