

емая информация, определяемая функционалом  $\delta$ , соответствует потери информации из-за статистической флуктуации результатов  $\beta$ . Например, при числе сосчитанных импульсов  $1,3 \cdot 10^4$  (около 100 импульсов в канале) достижима степень сжатия, равная 4 для функций I и II типа, при передаче 25% компонентов их общего числа и степень сжатия 16 для функции III типа при передаче 6,3% компонентов их общего числа.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Понсен Т. Использование преобразования Адамара для кодирования и сжатия сигналов изображения. - "Зарубежная радиоэлектроника", 1972, № 3, с. 30-56.

2. Мухин В.И., Федоров Г.А. Исследование возможности сжатия регистрируемой информации в ядерной спектроскопии на основе преобразования Уолша. - Прикладная ядерная спектроскопия. Вып. 5. М., Атомиздат, 1975, с. 30-37.

3. Мухин В.И., Федоров Г.А. Методы и эффективность сжатия на основе преобразования Уолша передаваемой спектральной информации. Программа и тезисы докладов XXV Совещания по ядерной спектроскопии и структура атомного ядра. М., "Наука", 1975, с. 446-447.

4. Shore J.E. On the Application of Haar Functions. - IEEE Trans., 1973, v. COM-21, N 3, p.209-216.

#### ДВУМЕРНЫЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СКАНИРУЮЩИЕ СИСТЕМЫ РЕГИСТРАЦИИ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

*Г. А. Федоров, В. И. Мухин,  
Г. Г. Северюхин, З. М. Иванова*

В работе [1] показано преимущество интегральных методов сканирования радиоактивных объектов перед традиционными. Применение интегральных систем регистрации, построенных с использованием матриц Адамара, состоящих из 1 и -1, дает наибольший выигрыш в уменьшении дисперсии результатов, обусловленной фоновым излучением преобразователя и аппаратуры. Необходимость применения  $2N$  различных коллиматоров, где  $N$  - число участков сканирования, и биполярных (разностных) схем регистрации ограничивает

использование таких устройств. Коллимирующие системы, построенные с использованием псевдослучайных последовательностей [2], состоящих из 1 и 0, дают примерно вчетверо большую дисперсию результатов, обусловленную помехами (фон, шумы), по сравнению с системами, построенными на основе матриц Адамара. Однако эти системы позволяют использовать униполярную схему регистрации и простые по конструкции коллиматоры. Согласно работам [2, 3] псевдослучайные последовательности могут быть построены для чисел  $N$ , если выполняется одно из приведенных ниже условий:

- а)  $N=q$ , где  $q$  — простое число и  $(N+1)$  кратно 4;
- б)  $N=q(q+2)$ , где  $q$  и  $(q+2)$  — простые числа;
- в)  $N=2^K-1$ , где  $K$  — целое число. Примерами таких  $N$  являются 3, 7, 11, 15, 19 и т.д. Циклическая матрица  $\hat{K}$ , первая строка которой является псевдослучайной последовательностью из 1 и 0 длиной  $N$ , имеет следующие свойства:

$$|\Delta| = 2 \left( \frac{N+1}{4} \right)^{\frac{N+1}{2}}; \quad \hat{K} = \hat{K}^T, \quad \hat{K}\hat{K}^T = \frac{N+1}{4} (\hat{I} + \hat{E});$$

$$\hat{K}^{-1} = \frac{2}{N+1} \hat{K}^*; \quad \text{Tr}[\hat{K}^{-1}(\hat{K}^{-1})^T] = 4 - \frac{8N}{(N+1)^2} - \frac{4}{(N+1)^2},$$

где  $\Delta$  — определитель;  $\text{Tr}$  — след;  $\tau$  — знак транспонирования;  $\hat{I}$ ,  $\hat{E}$  и  $\hat{K}^*$  — соответственно матрица — единичная диагональная, матрица, состоящая из 1, и матрица  $\hat{K}$  в которой 0 заменены на -1.

При  $N \gg 1$   $\text{Tr}[\hat{K}^{-1}(\hat{K}^{-1})^T] \approx 4$ . Для матрицы Адамара и единичной диагональной матрицы, соответствующей традиционной системе регистрации, соответственно

$$\text{Tr}[\hat{H}^{-1}(\hat{H}^{-1})^T] = 1 \quad \text{и} \quad \text{Tr}[\hat{I}^{-1}(\hat{I}^{-1})^T] = N.$$

Схематический вид коллиматоров, предназначенных для двухкоординатного сканирования и построенных на основе псевдослучайных последовательностей, приведен на рис. 1. В качестве примера даны коллиматоры, предназначенные для сканирования поверхности в 15 участках. Пунктиром обведены рабочие участки коллиматоров при первом измерении. Расположение элементов псевдослучайной последовательности по поверхности таким образом, как это показано на рис. 1, позволяет свести двумерную задачу при декодировании результатов измерений к одномерной и обеспечивает простую схему измерений и оптимальные размеры коллиматоров. При

①	2	3	4	⑤	6	7	⑧	⑨	10	⑪	12	⑬	⑭	⑮	①	2	3	4
6	7	⑧	⑨	10	⑪	12	⑬	⑭	⑮	①	2	3	4	⑤	6	7	⑧	⑨
⑪	12	⑬	⑭	⑮	①	2	3	4	⑤	6	7	⑧	⑨	10	⑪	12	⑬	⑭

①	2	3	4	⑤	6	7	⑧	⑨
6	7	⑧	⑨	10	⑪	12	⑬	⑭
⑪	12	⑬	⑭	⑮	①	2	3	4
①	2	3	4	⑤	6	7	⑧	⑨
6	7	⑧	⑨	10	⑪	12	⑬	⑭

Рис. 1. Схемы коллиматоров для сканирования плоской поверхности в 15 участках при их одномерном (а) и двумерном перемещении (б) (цифры показывают расположение  $N$  элементов псевдослучайной последовательности по сканируемой поверхности при каждом из  $N$  -измерений; положение канала соответствует положению 1 в псевдослучайной последовательности)

этом регистрируемые значения ( $F_j$ ) и искомые значения ( $f_i$ ) связаны соотношениями

$$F_j = \sum_{i=1}^N K_{ij} f_i + \rho_j; \quad (1)$$

$$f_i = \sum_{j=1}^N K_{ji}^{-1} F_j = \frac{2}{N+1} \sum_{j=1}^N K_{ji}^{-1} F_j, \quad (2)$$

где  $\rho_j$  - помехи в  $j$ -м измерении;  $K_{ij}$  и  $K_{ij}^{-1}$  - элементы матриц  $\hat{K}$  и  $\hat{K}^{-1}$  соответственно.

Общий вид скеннеров, в которых использованы коллиматоры, показанные на рис. 1, приведен на рис. 2 и 3 соответственно. Система механического перемещения скеннера, изображенного на рис. 2, обеспечивает перемещение коллиматора в одном направлении. При таком законе перемещения расположение каналов в коллиматоре определяется матрицей, первая строка которой содержит  $(m\ell + m - 1)$  первых элементов псевдослучайной последовательности длиной  $N = m\ell$  из единиц (наличие канала) и нулей (отсутствие канала), и

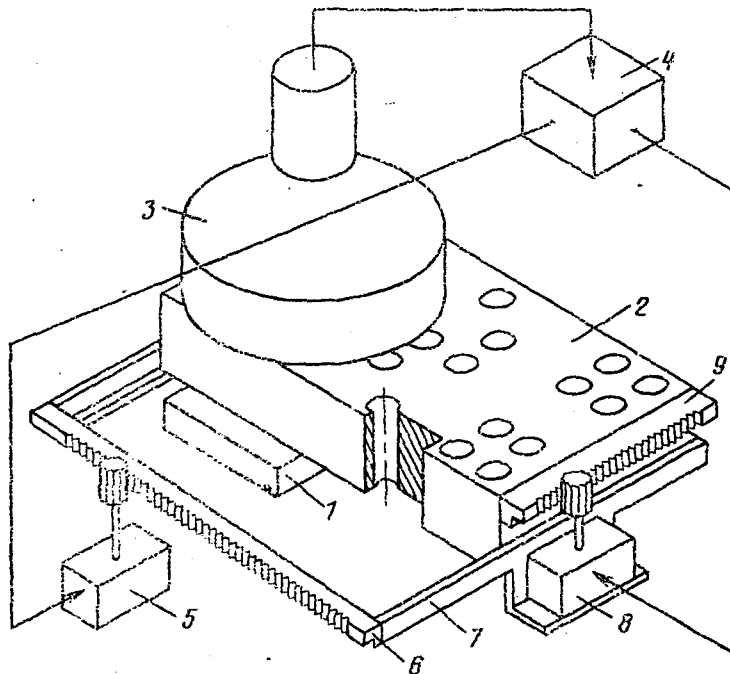


Рис. 2. Сканнер с одномерным движением коллиматора:

- 1 - сканируемая область; 2 - коллиматор;  
 3 - измерительный преобразователь; 4 - счетчик (анализатор) импульсов; 5 - система перемещения коллиматора

каждая последующая из  $n$  строк образована из предыдущей строки ее циклическим сдвигом на  $m$  элементов. Условный размер такого коллиматора  $S_1 = a(mn + m - 1)n \approx aN^{3/2}$ , где  $a$  - постоянный коэффициент и  $m \approx n$ . Система механического перемещения сканнера, изображенного на рис.3, обеспечивает перемещение коллиматора в двух взаимоперпендикулярных направлениях. При этом расположение каналов коллиматора определяется матрицей, первая строка которой состоит из  $(2m - 1)$  первых элементов псевдослучайной последовательности длиной  $N = mn$  из единиц (наличие канала) и нулей (отсутствие канала), а каждая последующая из  $(2n - 1)$  строк образована из предыдущей строки ее циклическим сдвигом на  $m$  - элементов. Условный размер такого коллиматора  $S_2 = a(2m - 1)(2n - 1) \approx 4aN$ . При  $N \gg 1$  отношения размеров равны  $S_1 : S_2 = \sqrt{N} : 4$ . При сканировании объектов с

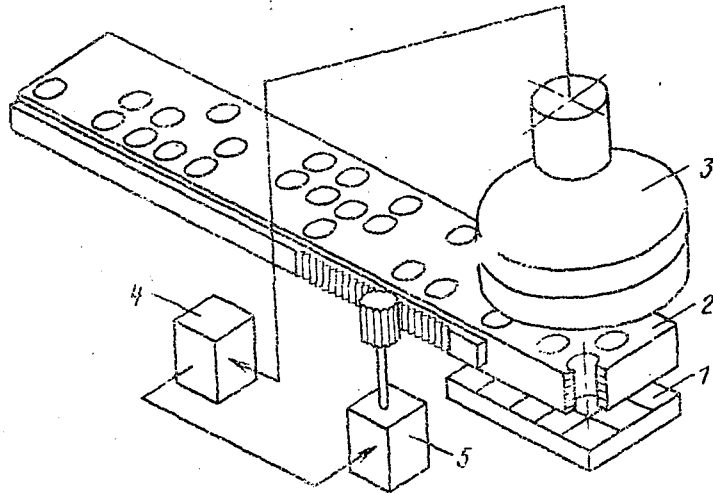


Рис. 3. Сканнер с двумерным движением коллиматора:

1, 2, 3 и 4 - то же, что и на рис. 2; 5 - 9 - система перемещения коллиматора

помощью описанных сканнеров в  $N$  участках длина последовательности  $N$  может быть разложена на множители  $m$  и  $n$ .

Описываемые сканнеры работают следующим образом. Перед началом измерений коллиматор устанавливают таким образом, чтобы первые  $\frac{mn+1}{2}$  каналов (на рис.1 обведены пунктиром) находились над сканируемой областью и под измерительным преобразователем. После первого измерения коллиматор смещается на один ряд каналов, и процедура повторяется  $(N-1)$  раз. Число фиксированных позиций коллиматора и измерений равно  $N$ .

При использовании идентичных измерительных преобразователей интегральные сканнеры, приведенные выше, имеют следующие преимущества перед традиционными, осуществляющими поэлементное сканирование: неподвижный измерительный преобразователь, что обеспечивает лучшую стабильность получаемых результатов; результат измерений имеет дисперсию примерно в  $N/4$  раз меньшую, если уровень помех (фон, шумы) значительно превосходит регистрируемый полезный эффект; вклад в регистрируемый эффект фона и шумов аппаратуры подавляется примерно в  $N/2$  раз, если их среднее ожидаемое значение не равно нулю; уменьшается влияние дрейфа измерительной аппаратуры.

Был проведен математический эксперимент на ЭВМ, моделировавший сканирование радиоактивной площади в 63 участках при условии  $\rho_j \gg F_j$ . Результаты были усреднены по двум генерированным при помощи ЭВМ случайным распределениям  $f_i$  для заданного расположения активности и двум распределениям  $F_j$  при моделировании интегральной схемы сканирования. При моделировании биполярной схемы регистрации использовали псевдослучайную последовательность длиной  $N = 63$  из 1 и -1. Отношения дисперсий результатов, полученных при моделировании интегральной и традиционной систем регистрации, оказались равными 10,5 и 20 при использовании соответственно униполярной и биполярной схемы регистрации. Эти цифры близки к расчетным, равным 10,7 и 21,4 при выбранном соотношении полезного сигнала и помехи. Математический эксперимент также подтвердил, что при использовании униполярной интегральной системы регистрации вклад фонового излучения и шумов аппаратуры в результат измерений, если среднее значение этого вклада не равно нулю, уменьшается примерно в  $N/2$  раз по сравнению с вкладом при традиционной схеме измерений.

Эксперимент, аналогичный модельному, по сканированию площадки размером  $7 \times 9 \text{ см}^2$  с 5 источниками кобальт-57 и церий-139 был проведен с использованием в качестве измерительного преобразователя кристалла  $\text{NaJ(Fe)}$  размером  $140 \times 100 \text{ мм}^2$ , сочлененного с ФЭУ-49. Коллиматор размером  $17 \times 13 \text{ см}^2$  был выполнен из свинца толщиной 6 мм, диаметр цилиндрических каналов составлял 7 мм. Рабочий участок коллиматора при каждом измерении имел 32 канала. Импульсы от измерительного преобразователя поступали на 800-канальный анализатор амплитуд импульсов NOKIA LP 4840, где суммировались в заданном энергетическом интервале. Система механического перемещения коллиматора соответствовала приведенной на рис. 3.

Были проанализированы результаты трех экспериментов: 1) интегральное сканирование при условии, что число импульсов фона примерно в 63 раза превосходит среднее число импульсов на один канал коллимирующего устройства от исследуемого распределения нуклидов; 2) поэлементное сканирование при тех же условиях регистрации; 3) поэлементное сканирование при условии, что  $f_i \gg \rho_i$ , при большем времени измерения чем в экспериментах 1 и 2.

Значения  $f_i$ , полученные в эксперименте 3, принимали за "истинные". Расчет показал, что отношение полных дисперсий результатов, полученных в эксперименте 2 и 1 соответственно, составило 5,3 при теоретически ожидаемом 10,7. Некоторое несоответствие полученного и ожидаемого результатов может быть объяснено неточностью знания "истинного" распределения, полученного также в эксперименте, и погрешностью, связанной с различием в эффективности регистрации сцинтиллятора при падении излучения на него в разных точках поверхности, которая составляла около 6%.

Был проведен эксперимент по сканированию бета-излучающих источников типа 1ОУГ-14 с углеродом-14, представляющих собой диски из алюминия, на которые нанесено радиоактивное пятно в форме круга площадью  $10 \text{ см}^2$ . Исследуемая площадка разбивалась на  $N = 15 = 5 \times 3$  участков и сканировалась с использованием коллиматора, приведенного на рис. 1,а, выполненного из алюминиевой пластины толщиной 0,5 мм с диаметром каналов 7 мм. Результаты эксперимента показали, что распределение активности в пределах радиоактивного пятна близко к равномерному (отклонение от среднего значения составило для одного источника около 12% и для другого около 6%), а за пределами пятна значения активности были получены близкими к нулю.

Приведенные системы регистрации можно рассматривать как гамма- или бета-камеры с временной модуляцией сигнала. При использовании многоканального коллиматора с параллельными каналами камера может работать со стандартными (толстыми) кристаллами и не требует сложной системы для определения координаты попадания излучения в кристалл по координате световспышки. При использовании многоканального узкодиафрагмированного (многопинхольного) коллиматора с координатным измерительным преобразователем улучшается примерно в  $\sqrt{2}$  раз отношение полезного сигнала к помехе и появляется возможность анализа распределения активности по глубине объекта.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванова З.М., Мужин В.И., Федоров Г.А. Интегральное радиоизотопное сканирование. — В кн.: Прикладная ядерная спектроскопия. Вып. 5. М., Атомиздат, 1975, с. 42–47.
2. Цифровые методы в космической связи. Под ред. С.Голomba. М., "Связь", 1969.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ОСКОЛОЧНЫХ РАДИОНУКЛИДОВ В ПОЧВАХ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ГАММА-ДОЗИМЕТРОВ**

*И. Ф. Моисеев, Г. А. Федоров*

Полевая гамма-дозиметрия — простой и доступный способ радиологического контроля почвы и земли, в процессе которого получают первичные данные о радиоактивном загрязнении местности. Измеренное значение мощности дозы есть сумма трех компонент

$$P_{\text{изм}} = \sum_j f_{1j} \beta_j^{\text{оск}} + \sum_j f_{2j} \beta_j^{\text{ест}} + P_{\text{косм}}, \quad (1)$$

где первые два компонента обусловлены наличием в почве осколочных и естественных радионуклидов с концентрацией  $\beta^{\text{оск}}$  и  $\beta^{\text{ест}}$  соответственно, последний дает вклад в дозу космического излучения. Причем

$$\beta_j = \int_0^{\infty} q_j(z) dz, \quad (2)$$

где  $q_j(z)$  — профиль концентрации  $j$ -го нуклида по глубине ( $z$ ) почвы; коэффициент пропорциональности между показателем детектора и концентрацией  $j$ -го нуклида в почве — коэффициент пропорциональности между показателем детектора и концентрацией  $j$ -го нуклида в почве.

Для оценки мощности дозы от естественных радионуклидов ( $P_{\text{ест}}$ ) используется модель равномерного распределения концентрации естественных радионуклидов по глубине почвы  $q(z) = q_0 [1]$ . Справедливо следующее соотношение:

$$P_{\text{ест}} = 2\pi \sum_{j=1}^{\infty} q_{0j} \sum_{n=1}^{\infty} E_{jn} \delta_{jn} \eta_{jn} C_{jn}^{\text{ест}}, \quad (3)$$

где  $q_{0j}$  — концентрации калия-40, урана-235 и тория-232;  $E_{jn}$ ,  $\delta_{jn}$  и  $\eta_{jn}$  — значения энергии, коэффициента истинного поглощения энергии и выхода отдельной гамма-линии;  $C_{jn}^{\text{ест}}$  — функция, выражающая зависимость мощности дозы от  $E_{jn}$  и геометрических условий измерений