

Стратегия надфоновых измерений

Со времени открытия явления радиоактивности прошло чуть более ста лет. И все это время человеческое общество было вынуждено интенсивно его изучать. Установив основные виды излучений, сопровождающих радиоактивный распад, и механизмы их взаимодействия с веществом, исследователи приступили к решению проблемы использования его огромной (на единицу массы) энергии. Природа распорядилась таким образом, что за высвобождаемую энергию приходится платить большую цену, как за утилизацию продуктов распада, так и эксплуатацию изделий и объектов, содержащих рукотворные радионуклиды. К тому же, экстенсивная добыча ископаемых видов топлива и общее повышение жизненного уровня в условиях комфорта, привела к возникновению технологически измененного естественного радиационного фона. В этой сверхкраткой ретроспективе, подробности которой большинству читателей в той или иной мере хорошо известны, нам хотелось бы выделить всего одно слово – *фон*.

При первых же попытках измерения радиоактивности выяснилось, что при её заведомом отсутствии вблизи детектирующего устройства, последнее на что-то реагирует. Эта увлекательнейшая история о том, что есть фон, не закончена и сегодня, и будет без сомнения продолжаться. Как и принято у строгих физиков, которые находились наряду с любознательными химиками в авангарде исследований радиоактивности, наблюдения проводили с препаратами, регистрацию которых было легче осуществить с убедительной воспроизводимостью.

Так, шаг за шагом, был установлен стохастический характер радиоактивных превращений, и реализованы селективные методы регистрации одного вида излучения (исторически – альфа) в присутствии других (бета- и гамма). Сегодня мы определили бы селективность регистрации отношением $S = \text{сигнал}/(\text{сигнал}+\text{фон})$. Очевидно, что селективность может варьироваться в диапазоне значений от 0 до 1, и её максимально возможные величины предпочтительны при выборе детектирующих устройств. Кроме этого, метод регистрации и аппаратура, его реализующая, характеризуются величиной эффективности регистрации $e = \text{сигнал}/\text{поток излучения на внешней поверхности детектора}$. В общем случае эти величины определяют качество и продолжительность измерения. Не следует никогда забывать, что спектральная плотность фона и метод обработки сигнала от первичного преобразователя – детектора прямым образом влияют на значения обсуждаемых величин, и поиски оптимума составляют основу тех разработок, в которых существует, как будет показано ниже, острая практическая необходимость.

Переходим к процедуре измерений. В случаях, когда нам необходимо зарегистрировать малые уровни радиоактивности (перечень таких проблем превысил бы объём любой статьи, авторы которой надеются, что она будет прочитана до конца), мы выбираем детектор с высокими значениями селективности и эффективности. Но, в подавляющем большинстве практических случаев, измеряемая радиоактивность сопровождается фоновым излучением, интенсивность которого достаточно высока. Тогда, даже для детекторов с высокой селективностью (например – полупроводниковых), приходится принимать меры по уменьшению фона: измерения в подземных лабораториях, сооружение мощной пассивной защиты детектора и её дополнение активной защитой. Такие измерения принято называть *низкофоновыми*, и они крайне важны для выявления тенденций «расползания» радионуклидов во внешнюю среду из многочисленных загрязненных территорий и объектов, образовавшихся за последнее пятидесятилетие практически на всей обитаемой поверхности нашей планеты.

Проблема, которую мы предлагаем обсудить, формулируется так: каким образом эффективно осуществлять *надфоновые* измерения. Для точного определения этого термина привлечем величину отношения $\Gamma = \text{сигнал}/\text{фон}$. На наш взгляд, надфоновые измерения характеризуются диапазоном значений Γ от 0,05 до 1 (5 – 100%). Достижение верхней гра-

ницы диапазона, согласно авторитетному мнению одного из ведущих специалистов в области метрологии измерений /1/, на сегодняшний день не вызывает затруднений при массовых анализах. Нижняя граница диапазона определена нами в соответствии со средней величиной наблюдаемых вариаций фона, вызываемых космическими, сезонными, суточными и метеорологическими факторами /2/. Разумеется, обе границы весьма условны и относятся, в основном, к практике использования носимых и портативных приборов, хотя дальнейшие рассуждения справедливы для большинства детектирующих систем.

Неудовлетворенность практиков работой приборов, призванных измерять и контролировать радиоактивность /3/, привела к шокирующему выводу: «Во многих отношениях контрольно-измерительная аппаратура для радиационного контроля ... все еще находится на начальной стадии развития, и необходимы дальнейшие усилия по разработке в целях совершенствования легкости ее использования и надежности...». В целом, мы согласны с мнением международных экспертов и составителей цитируемого документа и попытаемся выявить одну из причин, следствием которой, на наш взгляд, и сложилась такая ситуация.

В ядерном приборостроении, как правило, при составлении алгоритмов и методик выполнения измерений разработчики до сих пор опираются на классические схемы статистического контроля /4/, возникшие на заре становления математической статистики. Конечно, отрадно сознавать, что для распределения Пуассона /5/, которым обычно аппроксимируется регистрируемый поток, существует, среди прочих, равномерно наиболее мощный критерий σ и это можно математически строго доказать, не выходя за пределы курсов вузовской подготовки.

А что же происходит на практике? Вот типичный пример. Одна из уважаемых нами приборостроительных фирм выпускает прибор, в инструкции к которому сказано, что «регулирование порога осуществляется путем установки оператором надлежащего числа в пределах от 1-ой до 9-ти «сигм». Специалистам понятно, что речь идет о защите от частых ложных срабатываний или на сленге разработчиков – «ложников». Но, если диапазон 1 - 3 «сигмы» статистически оправдан, а 4 - 5 даже претендует на рекламный девиз «не чаще 1-го раза за год», то величина 9 свидетельствует лишь о наличии у разработчиков пухлых таблиц функций статистических распределений и ... о существенных недостатках аппаратуры и методики измерений.

Отставив на время аппаратную реализацию («хард»), обратимся к программному и математическому «софт» обеспечению приборов. Историческим является тот факт, что ядерная физика является «полигоном», а подчас и «локомотивом» современной математики в целом и методов численного анализа в частности. Представители иных сфер деятельности эффективно используют методы решения задач, разработанные физиками. Может быть, в этом и кроется часть причин, по которой физики с долей некоего скепсиса относятся к достижениям своих коллег из других областей человеческой деятельности в области математических методов решения практических задач?

На наш взгляд, наибольшего успеха в области практического использования статистических методов добились датский инженер Агнер Эрланг /6/ и американец венгерского происхождения, математик Абрахам Вальд /7/. Первый из них заложил теоретические основы описания процессов, впоследствии названных в его честь эрлангиановскими, а второй - разработал и обосновал принципы последовательного анализа. А. Эрланг выполнял заказ телефонных компаний, остро нуждавшихся в оптимизации числа коммутаторов при обслуживании телефонных вызовов. Действительно, если зафиксировать время контроля, то число событий становится случайной величиной, и, наоборот, фиксация числа событий с неизбежностью влечет за собой случайный характер распределения времени. Справедливости ради следует отметить, что оба эти подхода давно используются в области ядерного приборостроения. Наибольшей популярностью пользуется метод подсчета числа зарегистрированных событий за фиксированное время измерений. Но и метод анализа времени, за которое произошло определенное число событий, в частности «ТИМ» (Time Interval Method), применяется, хотя и существенно реже, в аппаратуре радиационного контроля. В

свою очередь, работы А.Вальда лежат в основе практически всех методов контроля качества продукции. Номограммы, контрольные карты, метод «кумулятивных сумм» и многие другие с успехом применяются в различных областях техники.

Прошло уже более полувека, как Вальд доказал /8/, что метод последовательного анализа позволяет существенно сократить время принятия решений и, что весьма существенно, четко формулировать количественные характеристики, лежащие в их основе. Иногда специалисты в области ядерного приборостроения приводят следующие аргументы, когда речь заходит об использовании последовательного анализа, которые, по их мнению, говорят о низкой эффективности его использования:

- волюнтаризм при выборе «альтернативной гипотезы»;
- отсутствие «существенного выигрыша» по сравнению с другими «классическими» методами контроля;
- подчас «непредсказуемо» затянутое время принятия решения;
- проблемы в организации непрерывности контроля;
- методические пробелы в использовании много детекторных систем контроля.

Изложим наши доводы «за» по порядку.

- Метод последовательного анализа основан на сравнении двух гипотез, численные характеристики которых должны быть априорно известны. Одна из гипотез (отсутствие радиоактивности в контролируемом объекте), как правило, определяется фоновым потоком. Для выработки другой – альтернативной гипотезы, в работах по последовательному анализу, действительно, приводятся не вполне четкие рекомендации о выборе ее значения (например, «существенно значимое различие», «отклонение с практическими последствиями» и т.д). Возможно, в некоторых случаях подобных рекомендаций будет достаточно для выработки численного значения альтернативной гипотезы. Но здесь возможен и универсальный подход. Выражение, описывающее отношение средних частот двух пуассоновских потоков, известно достаточно давно /9/. Рассматривая его в совокупности с классическим подходом для оценки минимально детектируемой активности (МДА) /10/ и, зафиксировав предельно допустимое время принятия решений (см. ниже), вполне приемлемо принять в качестве альтернативной гипотезы значение потока, связанного с обнаружением МДА. Использование МДА при формулировке альтернативной гипотезы оправдано еще и тем, что в том или ином виде МДА или связанная с ней характеристика радиоактивности объекта контроля является одной из базовых характеристик прибора.

Таким образом, исключается «волюнтаризм» при формулировке гипотез последовательного анализа.

- Теперь – “о главном” – существенном выигрыше во времени контроля при использовании последовательного анализа. Его основное преимущество – выигрыш во времени. Действительно, зачем продолжать измерения, если статистически значимое изменение фона выявлено на первых секундах выполнения измерений? Большая часть приборов радиационного контроля строится на основе классического критерия, в котором вероятность ошибки I-го рода устанавливает оператор («число сигм», см. выше), а вероятность ошибки II-го рода принимают равной 50%. Вообще говоря, для оценки численных значений обеих ошибок существуют отдельные дисциплины и, в частности, теория планирования эксперимента (матрицы плана с учетом стоимости принятия решений). Возможно, в некоторых случаях, столь большая вероятность «пропуска» радиоактивного объекта является допустимой. Тогда действительно, как показано на рисунке, выигрыша во времени обнаружения источника при использовании последовательного анализа практически нет. Однако этот выигрыш становится очевидным по мере уменьшения ошибки II-го рода. При расчетах нами использовался современный метод

го рода. При расчетах нами использовался современный метод статистического контроля /10/, в основе которого лежит классический анализ с использованием ошибок I-го и II-го рода и метод последовательного анализа для распределения Пуассона.

- О «непредсказуемо» затянутом времени контроля. Конечно, привлекательность классического критерия состоит в фиксации времени контроля. Время истекло, сравнили зафиксированное число событий с пороговыми и приняли ту или иную гипотезу с известными ошибками I-го и II-го рода. При использовании последовательного анализа время принятия решения является случайной величиной. Можно рассчитать его характеристики - математическое ожидание и дисперсию. Как правило, предельное время принятия решения является, наряду с прочими характеристиками контроля, величиной заданной. Поэтому, процедура усечения контроля, которая подробно описана в работе Вальда /8/, может быть успешно применена при согласованной с пользователем формулировке альтернативной гипотезы (см. выше).

- Проблемы в организации непрерывности контроля на самом деле никакой нет. Техника непрерывного контроля используется достаточно давно, например, в методе «скользящего среднего», который, в определенной степени, можно считать частным случаем последовательного анализа. Однако, в отличие от метода скользящего среднего, в нашем случае число событий, по которому принимается решение, адаптируется к текущему потоку, а не является фиксированным. Замечательное свойство эрлангиановского потока заключается в том, что любая цепочка событий обладает его характеристиками. Быстродействие и память современных вычислителей, используемых в системах контроля, позволяет производить полный анализ набранной статистики, начиная с любого зарегистрированного события. Поэтому нет необходимости дожидаться срабатывания критерия с некоторого «начального» события, если найдена цепочка, по которой возможно принятие решения. Здесь уместно также добавить, что априорное формулирование временных характеристик «сигнала» является существенным при контроле движущихся объектов. В частности, мы наблюдали равноускоренный характер свободного падения источника Sr-90, «отснятый» с помощью прибора, фиксирующего время регистрации каждого события /11/. Кстати, возможность многократного по событийного анализа зарегистрированного потока является одной из важных характеристик нового поколения приборов.

- И, наконец, несколько слов об использовании методов последовательного анализа в много детекторных системах контроля. Вузовского курса математического анализа и теории вероятностей вполне достаточно, чтобы составить выражение для статистики, описывающей одновременное наблюдение нескольких пуассоновских потоков. И, что, несомненно важно, все вычисления могут быть выполнены большинством современных микропроцессоров, включая те из них, в системе команд которых отсутствуют операции с плавающей запятой.

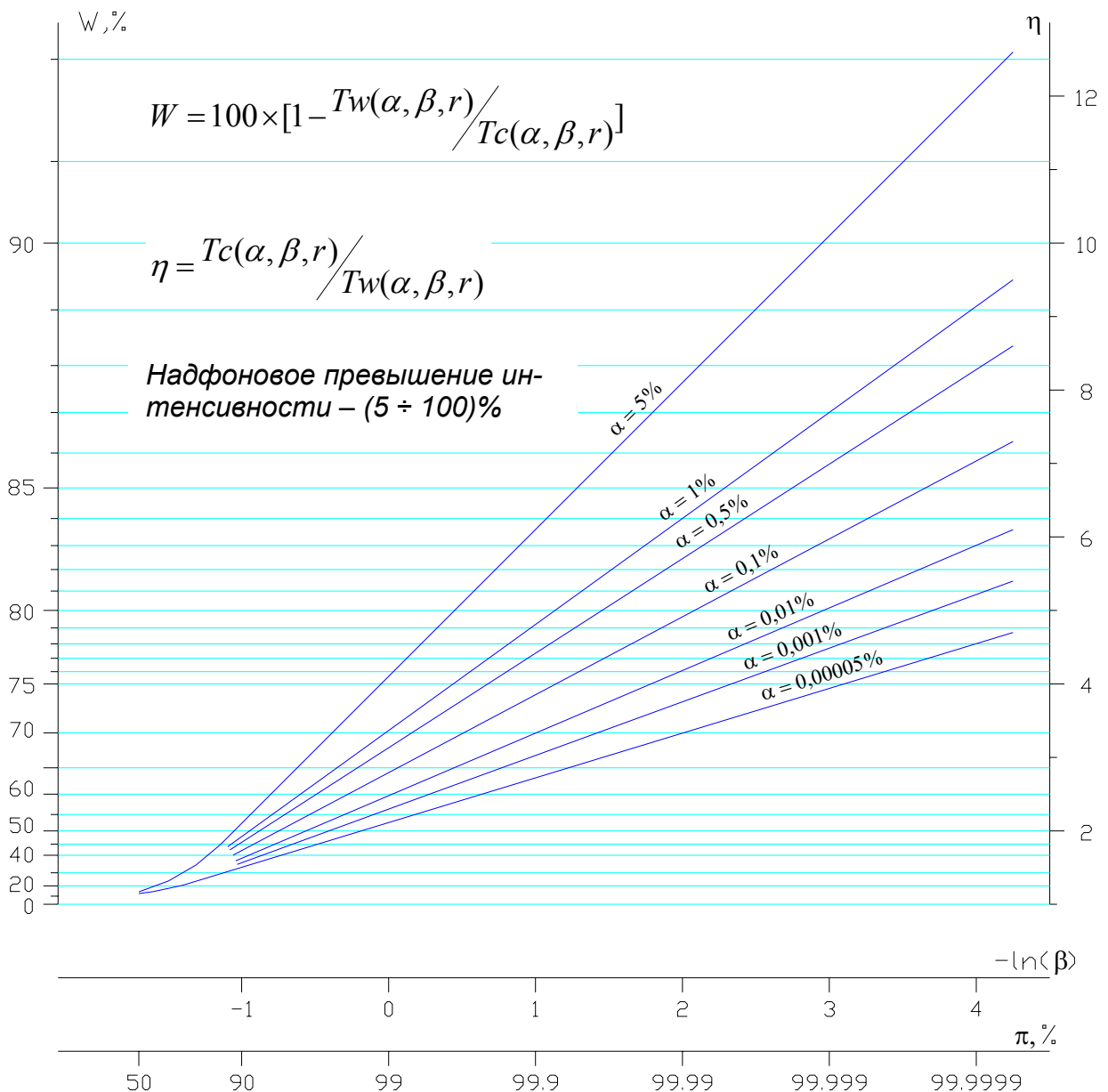
Ниже мы приводим рисунок, на котором изображено семейство кривых, показывающих средний выигрыш во времени обнаружения надфоновое излучения при последовательном критерии /8/ по сравнению с «классическим» /4, 9, 10/. Здесь, по оси абсцисс отложена мощность критерия ρ

$\rho = 100 \times [1 - \beta]$, где β – вероятность ошибки II-го рода,

а по оси ординат – значение величины W

$W = 100 \times [1 - \frac{T_w(\alpha, \beta, r)}{T_c(\alpha, \beta, r)}]$, характеризующей выигрыш во времени обнаружения.

T_w и T_c – среднее время обнаружения при использовании последовательного и «классического» критериев соответственно, а их отношение $\eta = T_c/T_w$. Отметим, что аргументами этих функций являются α - ошибка I-го рода, β - ошибка II-го рода и r – упоминавшееся выше отношение «сигнал/фон». Понятие «средний выигрыш» включает в себя не только математическое ожидание отношения двух случайных величин, описываемых распределением Пуассона, но и усреднение по отношению «сигнал/фон» в диапазоне от 5 до 100%. Каждой кривой семейства соответствует определенная вероятность ошибки I-го рода. Значения этих ошибок (α) указаны на графике.



Результаты практического подтверждения приведенного анализа опубликованы в работах /11, 12/. Мы надеемся, что приведенные нами аргументы побудят специалистов в области ядерного приборостроения обратить более пристальное внимание на используемые алгоритмы обработки регистрируемых потоков и, в частности, на метод последовательного анализа.

1. И.А.Харитонов *Метрология и приборостроение в условиях рыночной интеграции*. №54 СП, декабрь, 2002, с.16
2. А.А.Моисеев, В.И.Иванов *Справочник по дозиметрии и радиационной гигиене*. М.: Энергоатомиздат, 1990
3. IAEA-TECDOC-1312/R *Обнаружение радиоактивных материалов на границе*. 2003
4. Худсон Д. *Статистика для физиков*. М.: Мир, 1967
5. S.D.Poisson *Récherches sur la probabilité des jugements*. Paris, 1837
6. А.К.Erlang *The Theory of Probabilities and Telephone Conversations*. Nyt Tidsskrift for Matematik B, vol. 20, 1909
7. L Weiss, Abraham Wald, in N L Johnson and S Kotz (eds.), *Leading personalities in statistical sciences* New York, 1997, p.164-167.
8. А. Вальд *Последовательный анализ*, М.: Физматгиз, 1960
9. Ред. А.А.Тяпкин *Статистические методы в экспериментальной физике*. М.: Атомиздат, 1976
10. L. A. Currie *Limits for Qualitative Detection and Quantitative Determination*. №40 Anal. Chem, p. 586-593, 1968
11. С.Л.Пасков, Д.А.Алексеев, Н.К.Черезов *Алгоритмы идентификации и выявления нестационарности радиационных полей в приборах на основе газоразрядных счетчиков*. Доклады 2-й международной конференции «Радиационная безопасность: радиоактивные отходы и экология», СПб, 9-12 ноября, 1999
12. Н.К.Черезов, Д.А.Алексеев, С.Л.Пасков, А.В.Перфилов, В.П.Тишков, В.В.Канюков, С.В.Сэпман, И.Б.Барсуков, Г.В.Млинарчук, В.В.Стародубов *Реализация спектральной чувствительности в радиометре РКС-02 «Стриж»*. Доклады 5-й международной конференции «Радиационная безопасность: обращение с РАО и ОЯТ», стр.268, 2002