

АЛГОРИТМ ВРЕМЕННОЙ СЕЛЕКЦИИ ИМПУЛЬСНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ В СМЕШАННОМ ПОТОКЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ

Царик Дмитрий Владимирович

Директор по созданию средств радиопеленгования,
ООО «Специальный технологический центр»,
г. Санкт-Петербург)
dvtsar@gmail.com

ALGORITHM FOR TIME SELECTION OF PULSED SEQUENCES IN A MIXED RADAR SIGNAL STREAM

D. Tsarik

Summary. The problem of separating pulse sequences in a mixed flow of radar signals with restructuring of the pulse repetition period is considered. An algorithm for solving this problem is proposed, which is based on the use of an integral transformation of the pulse repetition intervals as a tool for estimating the periodicity and includes three stages. At the first stage, using the method of histogram analysis, the range of change in the pulse repetition period (PRP) in the input signal is determined. Then, sequences are searched for with a constant PTR and with a change in the PTR from and pulse to pulse according to a regular law. At the final stage, the presence of a sequence with a rearrangement of the PPI, relative to the average value, according to a random law, is considered. It is noted that the proposed algorithm is focused on the selection of pulse sequences with PPI wobble from a mixed stream and can be used in radio control equipment.

Keywords: time selection, pulse sequences, radio engineering control.

Аннотация. Рассмотрена задача разделения импульсных последовательностей в смешанном потоке радиолокационных сигналов с перестройкой периода повторения импульсов. Предложен алгоритм решения данной задачи, основанный на использовании интегрального преобразования интервалов следования импульсов в качестве инструмента оценки периодичности и включающий в себя три этапа. На первом этапе с помощью метода гистограммного анализа определяется диапазон изменения периода повторения импульсов (ППИ) во входном сигнале. Затем осуществляется поиск последовательностей с постоянным ППИ и с изменением ППИ от и импульса к импульсу по регулярному закону. На заключительном этапе рассматривается наличие последовательности с перестройкой ППИ, относительно среднего значения, по случайному закону. Отмечено, что предлагаемый алгоритм ориентирован на выделение из смешанного потока импульсных последовательностей с wobulation ППИ и может быть использован в средствах радиотехнического контроля.

Ключевые слова: временная селекция, импульсные последовательности, радиотехнический контроль.

Введение

Селекция является одной из важных задач в станции радиотехнического контроля (РТК) [6, с.41–46]. Она позволяет разделить смешанный поток радиолокационных сигналов (смесь) на импульсные последовательности, принадлежащие разным источникам радиоизлучения (ИРИ). В смеси могут присутствовать одновременно сигналы с разными видами перестройки ППИ: постоянным законом (англ.— *const*), изменением от импульса к импульсу по регулярному закону (англ.— *stagger*), флуктуацией по случайному закону (англ.— *jitter*) [1, с.27].

Наиболее информативным признаком, по которому выполняется селекция, является время прихода импульса (ВПИ) [7, с.132–155]. Процесс разделения, основанный на данном параметре, называют временной селекцией.

Для решения вышеупомянутой задачи наиболее часто в практике РТК используются два метода: гистограммы разностей ВПИ [9, с.243] с последовательным поиском [2, 3] и интегрального преобразования интервалов следования импульсов (ППИ) [4, 5, 10]. Первый основан на вычислении автокорреляционной функции принятой смеси. Для простых и регулярных импульсных последовательностях при его применении наблюдается явно выраженный пик, который соответствует ППИ, а также их гармоникам (интервалам кратным ППИ). Что касается излучений со случайным изменением ППИ, то независимо от закона флуктуации на гистограмме разностей будет наблюдаться расширение пиков, что приводит к ложным решениям и пропуску jitter-сигнала.

Интегральное преобразование устраняет проблему появления гармонических составляющих при селекции простых сигналов и позволяет обнаруживать jitter-сигналы. Но данный метод имеет и недостатки. Наиболее

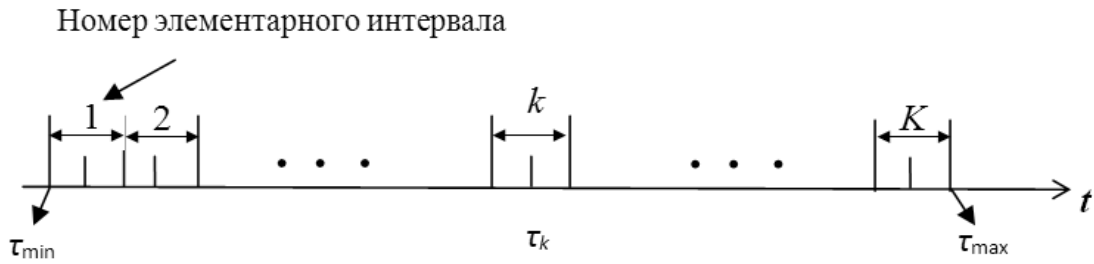


Рис. 1. Разделение диапазона возможных значений ППИ на элементарные интервалы

важные из них — это необходимость задания границ предполагаемых ППИ анализируемых сигналов, отсутствие возможности разделения stagger-последовательностей и недостаточная достоверность выделения jitter-последовательностей с вобуляцией ППИ больше 10%.

Цель статьи — разработка усовершенствованного алгоритма временной селекции сигналов, основанного на интегральном преобразовании интервалов следования импульсов, отличающегося большей достоверностью выделения из смеси последовательностей с вобуляцией ППИ.

Описание и анализ возможностей метода интегрального преобразования интервалов следования импульсов при анализе радиолокационных сигналов

Положим, что на вход анализирующего устройства станции РТК с разных направлений поступает смесь сигналов (потоков импульсов) от неизвестного числа ИРИ. В смеси могут присутствовать одновременно сигналы со всеми ранее упомянутыми видами модуляции ППИ.

Пусть $\Delta\tau = [\tau_{\min}, \tau_{\max}]$ — диапазон возможных значений ППИ. Разделим его на K элементарных интервалов шириной $b = (\tau_{\max} - \tau_{\min}) / K$, рисунок 1.

Середину элементарного интервала обозначим как

$$\tau_k = [(k - 1/2) / K](\tau_{\max} - \tau_{\min}) + \tau_{\min},$$

$$k = 1, 2, \dots, K.$$

Интегральное преобразование входной смеси представим как [4]

$$D_k^1 = \int_{\tau_k - b/2}^{\tau_k + b/2} D(\tau) d\tau =$$

$$\sum_{\tau_k - b/2 < t_n - t_m < \tau_k + b/2} \exp[2\pi i / (t_n - t_m)], \quad (1)$$

где

$$D(\tau) = \sum_{n=2}^N \sum_{m=1}^{n-1} \delta(\tau - t_n + t_m) \exp[2\pi j t_n / (t_n - t_m)],$$

$\tau > 0$, t_n, t_m — время прихода смежных импульсов в смеси, $n = 2, \dots, N$, $m = n - 1$, $\delta(\cdot)$ — единичная функция Дирака.

Модуль $|D_k^1|$ характеризует частотность k -го элементарного интервала. В дальнейшем совокупность значений $|D_k^1|$ на интервале наблюдения T_{\max} будем называть спектром ППИ, а само преобразование (1) как ППИ-преобразование 1. Заметим, что ППИ-преобразование 1 позволяет обнаруживать в смеси, главным образом, простые и регулярные последовательности.

Для анализа jitter-сигналов будем использовать усовершенствованное интегральное преобразование, которое обозначим как ППИ-преобразование 2 [5]:

$$D_k^2 = \sum_{(1-\varepsilon) \cdot \tau_{\min} < t_n - t_m < \tau_{\max}(1+\varepsilon)} \exp[2\pi j(t_n - O_k) / \tau_k], \quad (2)$$

где O_k — начальная точка отсчета, ε — максимальное значение вобуляции ППИ jitter-сигналов.

В отличие от (1) в нем осуществляется перекрытие элементарных участков с переменной величиной

$b_k = 2\varepsilon \tau_k$. Кроме того, в данном преобразовании применено смещение начальной точки отсчета O_k элементарных участков.

Алгоритмы вычисления D_k^1 и D_k^2 приведены ниже.

Алгоритм ППИ-преобразования 1

1. Задать начальные условия: $D_k^1 = 0, 1 \leq k \leq K, n = 1$.

2. Установить $m = n - 1$.

3. Установить $\tau = t_n - t_m$, если $\tau \leq \tau_{\min}$ то перейти к шагу 5, иначе — к шагу 6.

4. Для каждой пары импульсов (m, n) выбрать k , согласно $\tau_k - b/2 < \tau \leq \tau_k + b/2$ и вычислить $D_k^1 = D_k^1 + \exp(2\pi i t_n / \tau)$.

5. Присвоить $m = m - 1$, если $m < 0$, то перейти к шагу 6, иначе — к шагу 3.

6. Присвоить $n = n + 1$, если $n > N - 1$, то завершить процедуры, иначе перейти к шагу 2.

Алгоритм ППИ-преобразования 2:

1. Задать начальные условия: $D_k^2 = 0, 1 \leq k \leq K, n = 2$.

2. Установить $m = n - 1$.

3. Установить $\tau = t_n - t_m$, если $\tau \leq (1 - \varepsilon)\tau_{\min}$, то перейти к шагу 5, если $\tau > (1 + \varepsilon)\tau_{\max}$ — к шагу 6.

4. Рассчитать диапазон элементарных интервалов

$$k_1 = \left\lceil \left(\frac{\tau}{1 + \varepsilon} - \tau_{\min} \right) / \Delta\tau \right\rceil + 1,$$

$$k_2 = \left\lfloor \left(\frac{\tau}{1 - \varepsilon} - \tau_{\min} \right) / \Delta\tau \right\rfloor + 1$$

где $\Delta\tau = (\tau_{\max} - \tau_{\min}) / K$

5. Повторить следующие 5 шагов (от 6-го до 10-го) для $k = k_1, \dots, k_2$

6. Задать начало отсчета. Если k -ый элементарный интервал используется первый раз, то $O_k = t_n$.

7. Рассчитать переменные $\nu = [\eta_0 + 0.5]$ и $\zeta = \eta_0 / \nu - 1$,

где $\eta_0 = (t_n - O_k) / \tau_k$.

8. Сместить начало отсчета $O_k = t_n$, если выполняется одно из ниже приведенных условий:

a) $\nu = 1, t_m = O_k,$

b) $\nu \geq 2, |\zeta| \leq \zeta_0.$

9. Рассчитать переменную $\eta = (t_n - O_k) / \tau_k$.

10. Вычислить $D_k^2 = D_k^2 + \exp(2\pi i t_n / \tau)$.

11. Присвоить $m = m - 1$, если $m < 1$, то перейти к шагу 12, иначе —

к шагу 3.

12. Присвоить $n = n + 1$, если $n > N$, то завершить алгоритм, иначе перейти к шагу 2.

Обнаружение присутствующей в смеси последовательности с ППИ равным τ_k , проводится путем сравнения модуля D_k^1 или D_k^2 с порогом. В качестве последнего предложено использовать величину, вычисляемую по формуле [5]

$$A_k = \max \left\{ \alpha \frac{T_{\max}}{\tau_k}, \beta C_k, \gamma \sqrt{N^2 b_k / T_{\max}} \right\}, \quad (3)$$

где α, β, γ — константы, C_k — число импульсов последовательности с периодом равным $\tau_k, k = 1, 2, \dots, K$.

Анализ влияния влияние параметра $\Delta\tau$ на качество интегрального преобразования ППИ

Предположим, что имеется три перемешанные импульсные последовательности, каждая из которых имеет по 50 импульсов с ППИ, равными 168 мкс, 180 мкс и 902 мкс соответственно. С помощью преобразования ППИ мы можем выделить данные последовательности с максимальной ошибкой $\sigma_{pri} = 1$ мкс, если верхняя граница $\Delta\tau$ равна 1000 мкс, рисунок 2.

Значения ППИ будут равны 167 мкс, 179 мкс и 901 мкс. При увеличении τ_{\max} до 5000 мкс. ошибка σ_{pri} увеличивается до 5 мкс. ($T_1 = 165$ мкс, $T_2 = 175$ мкс и $T_3 = 905$ мкс), рисунок 3.

Из анализа рисунков 2 и 3 следует, что чем больше величина $\Delta\tau$, тем меньше точность определения ППИ.

В случае, когда задан диапазон ППИ, не соответствующий реальному, будут пропуски в обнаружении сигнала. Пусть, например неправильно установлен диапазон $\Delta\tau = [0-900]$ мкс. При данном значении $\Delta\tau$ третья

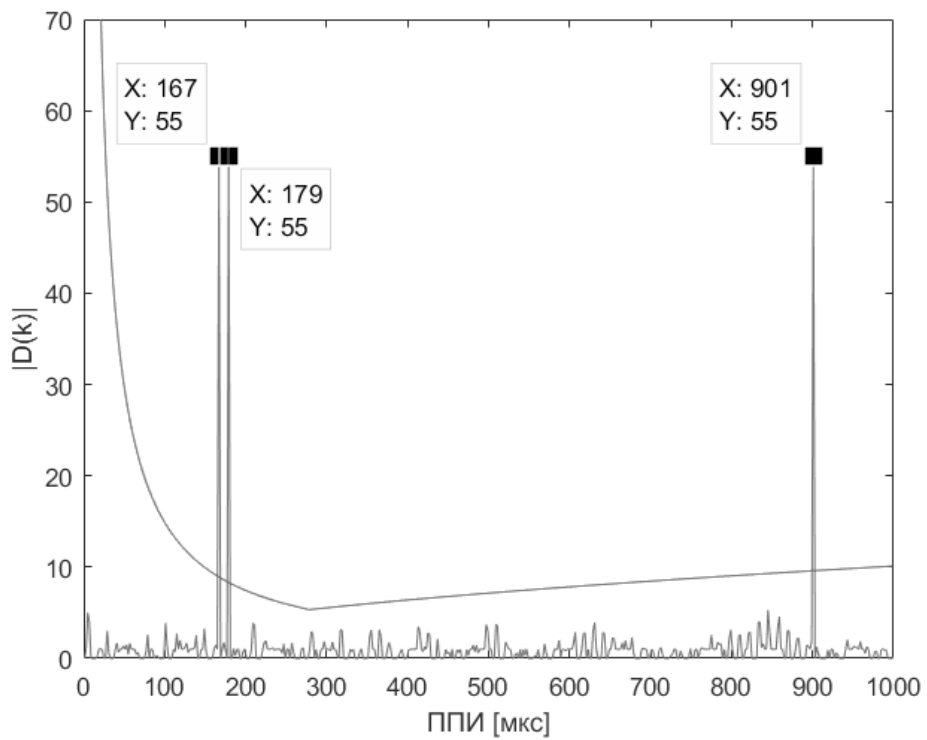


Рис. 2. Спектр ППИ преобразования1 трех перемешанных простых последовательностей на интервале наблюдения 1000 мкс

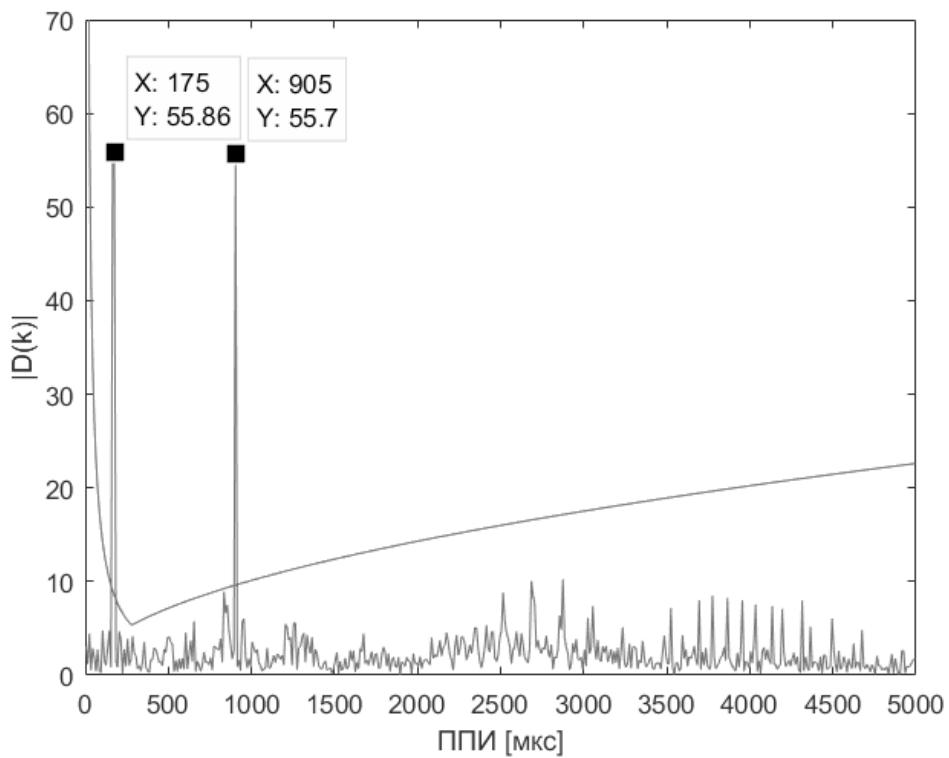


Рис. 3. Спектр ППИ преобразования1 трех перемешанных простых последовательностей на интервале наблюдения 5000 мкс

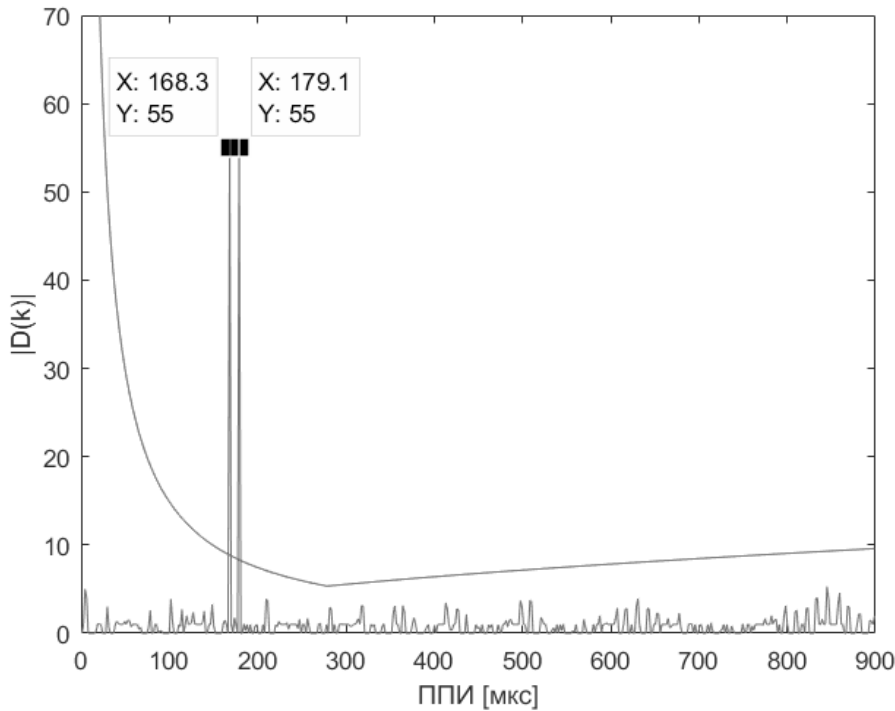


Рис. 4. Спектр ППИ преобразования1 трех перемешанных простых последовательностей на интервале наблюдения 900 мкс

последовательность в анализируемой смеси с $T_3=902$ не будет обнаружена, рисунок 4.

В связи с этим для правильного определения ППИ необходим анализ всех возможных разностей ВПИ смеси перед применением ППИ-преобразования.

Описание алгоритма

Предложенный алгоритм основан на предварительном анализе диапазона возможных значений ППИ в смеси с использованием метода гистограммы разностей ВПИ [2] и последовательном применении двух интегральных преобразований (1) и (2).

Обработка входной смеси выполняется следующим образом, рисунок 5.

На первом этапе обработки формируют массив ВПИ $\{t_k\}$ на выбранном интервале наблюдения T_{max} .

На втором этапе вычисляют диапазон изменения интервалов следования импульсов во входной смеси с использованием разностей ВПИ уровня, $q = 1, 2, \dots, Q_{max}$ где Q_{max} — настраиваемый параметр. Из полученных разностей формируются Q_{max} гистограмм и список ППИ, содержащий значения, для которых уровни гистограммы превосходят порог. Если в списке оказывается един-

ственная разность, она принимается в качестве верхней границы диапазона. Если заданный порог превышают несколько разностей, их минимальное и максимальное значения принимают в качестве границ ППИ.

В качестве пороговой может быть использована функция вида [2]

$$\Phi(\tau) = \beta(N - q) e^{-\tau/gn_{dt}}, \tag{4}$$

где N — число наблюдаемых импульсов; β — константа, ($\beta < 1$); n_{dt} — общее число элементарных ячеек гистограммы; τ — размер элементарной ячейки гистограммы; q — уровень гистограммы; g — константа меньше единицы.

Значения β и g находят опытным путем. Отметим, что здесь величина β задает предполагаемый процент потерянных импульсов.

На третьем этапе проводят обнаружение и выделение импульсных последовательностей, присутствующих в смеси. Данный этап состоит из двух шагов.

На первом шаге с использованием ППИ-преобразования1 входную смесь анализируют на наличие последовательностей с постоянным значением ППИ и изменяемых по регулярному закону.

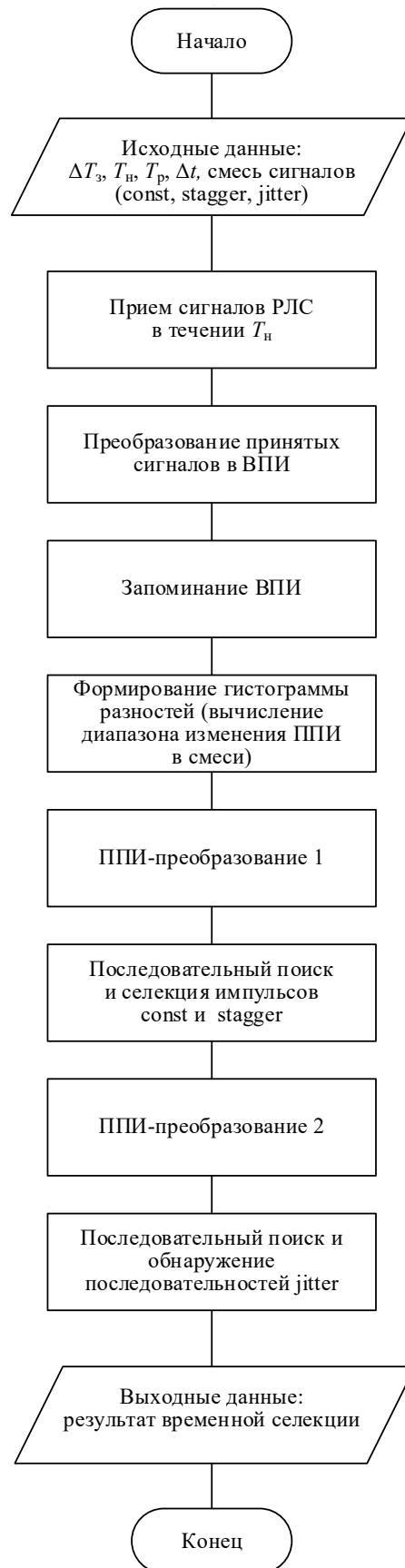


Рис. 5. Алгоритм временной селекции

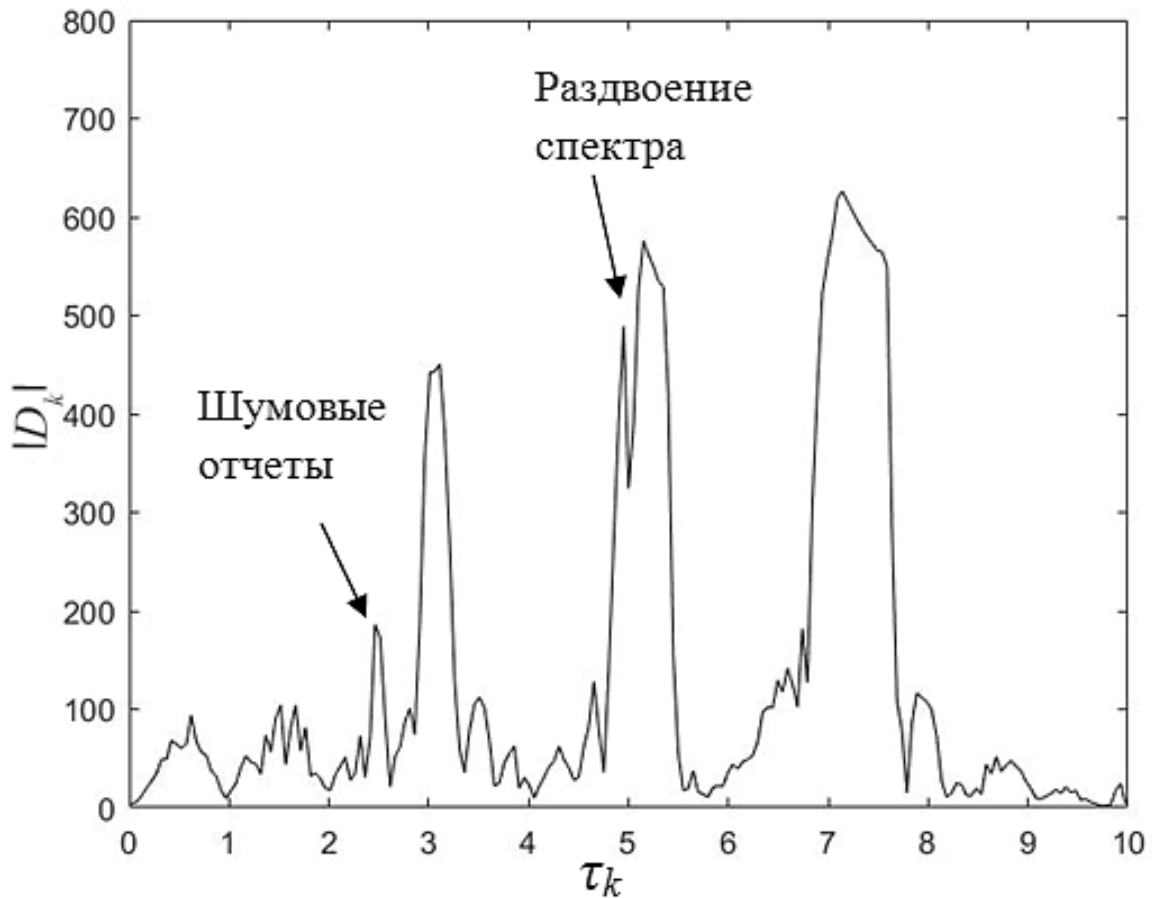


Рис. 6. Результат ППИ-преобразования 2 трех перемешанных последовательностей с амплитудой вобуляции $\epsilon = 0,2$

На втором шаге применяют ППИ-преобразование 2 с целью проверки в смеси последовательности с перестройкой ППИ по случайному закону. Поскольку при большой величине ϵ вобуляции ППИ относительно среднего значения могут наблюдаться ложные пики (шумовые отчеты) на ППИ-спектре, а также его раздвоение (рисунок 6), к вычисленным значениям D_k^2 применяется операция сглаживания

$$|D_k^2| = \frac{1}{5} (|D_{k-2}^2| + |D_{k-1}^2| + |D_k^2| + |D_{k+1}^2| + |D_{k+2}^2|), \quad (5)$$

где $k = 2, 3, \dots, K - 2$.

Применение данной операции позволяет устранить данный недостаток интегрального преобразования, приводящего к обнаружениям ложных последовательностей.

Как на первом, так и на втором шаге для выделения обнаруженных последовательностей из входной смеси используют процедуру последовательного поиска [3]. Критерием остановки поиска является определенный

размер (число оставшихся импульсов $M < 5$) во входной смеси или истечение заданного интервала времени $\Delta T_3, \Delta T_p > \Delta T_3$, где ΔT_p — время анализа.

Продемонстрируем работоспособность предложенного алгоритма временной селекции на следующем примере. Предположим, что входной сигнал представляет собой смесь, состоящую из четырех импульсных последовательностей (по 50 импульсов в каждой) с разными видами изменения ППИ:

1. ППИ-const: $T_1 = 163$ мкс, $T_3 = 4002$ мкс;
2. ППИ-jitter, $\epsilon = 10\%$: $T_1 = 1005$ мкс;
3. ППИ-stagger:
 $= T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5 = 2750 = 300 + 425 + 550 + 675 + 800$.

Согласно предложенному алгоритму, вначале осуществляется оценка диапазона изменения ППИ в исходной смеси импульсных последовательностей с использованием гистограммы разностей. Результат работы данного этапа для 9-ти уровней разностей показан на рисунке 7.

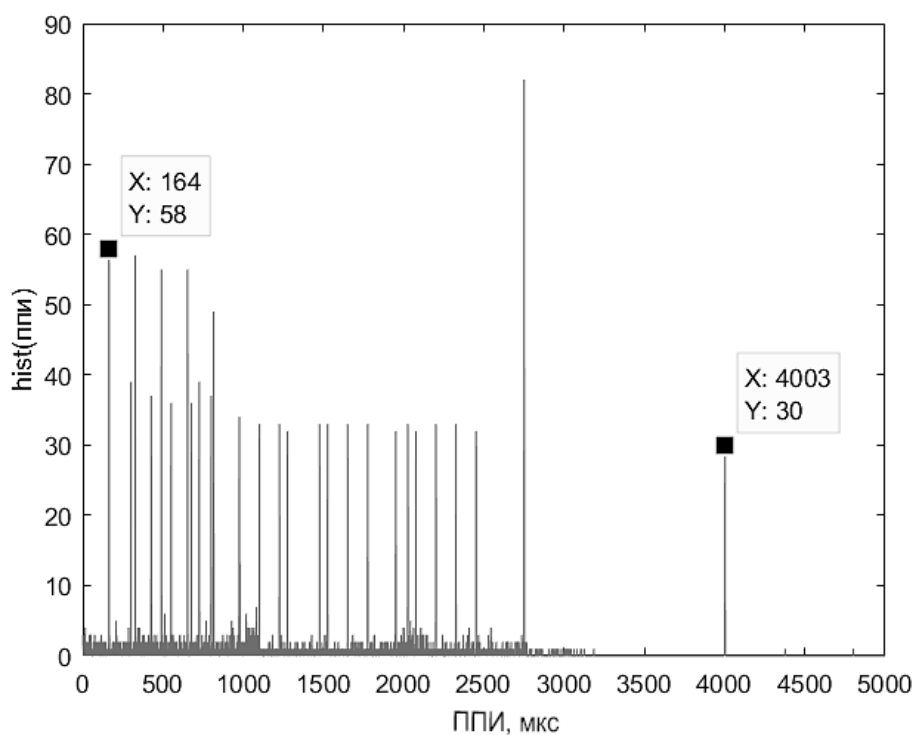


Рис. 7. Результат применения операции гистограммы разностей к анализируемой смеси из четырех перемешанных последовательностей

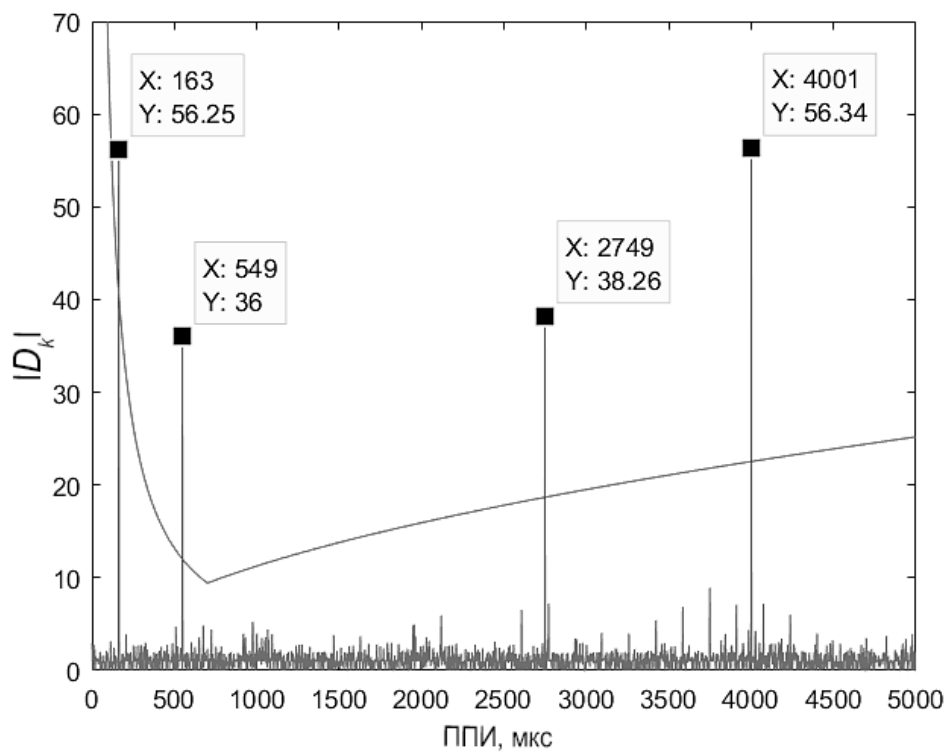


Рис. 8. Результат применения ППИ-преобразования1 к анализируемой смеси из четырех перемешанных последовательностей

Таблица 1. Результаты моделирования

N (Число импульсов в смеси)	Число ИРИ	Число обнаруженных ИРИ		
		Вобуляция 10% ($\alpha=0.05$)	Вобуляция 20% ($\alpha=0.1$)	Вобуляция 30% ($\alpha=0.15$)
1000	1	1/1	1/1	1/1
1000	2	2/2+2 ложных	2/2	2/2
1000	3	3/3 +1 ложный	3/3	3/3
1000	4	4/4	3/4	3/4
1000	5	5/5	3/5	4/5
100	1	1/1	1/1	1/1
100	2	2/2	2/2	2/2 + 1 ложный
100	3	3/3	3/3	2/3 + 1 ложный
100	4	4/4	4/4	4/4 + 2 ложных
100	5	5/5	4/5	5/5
50	1	1/1	1/1	1/1
50	2	2/2	2/2	2/2
50	3	2/3	3/3	2/3
50	4	2/4	2/4	2/4
50	5	2/5	4/5	4/5

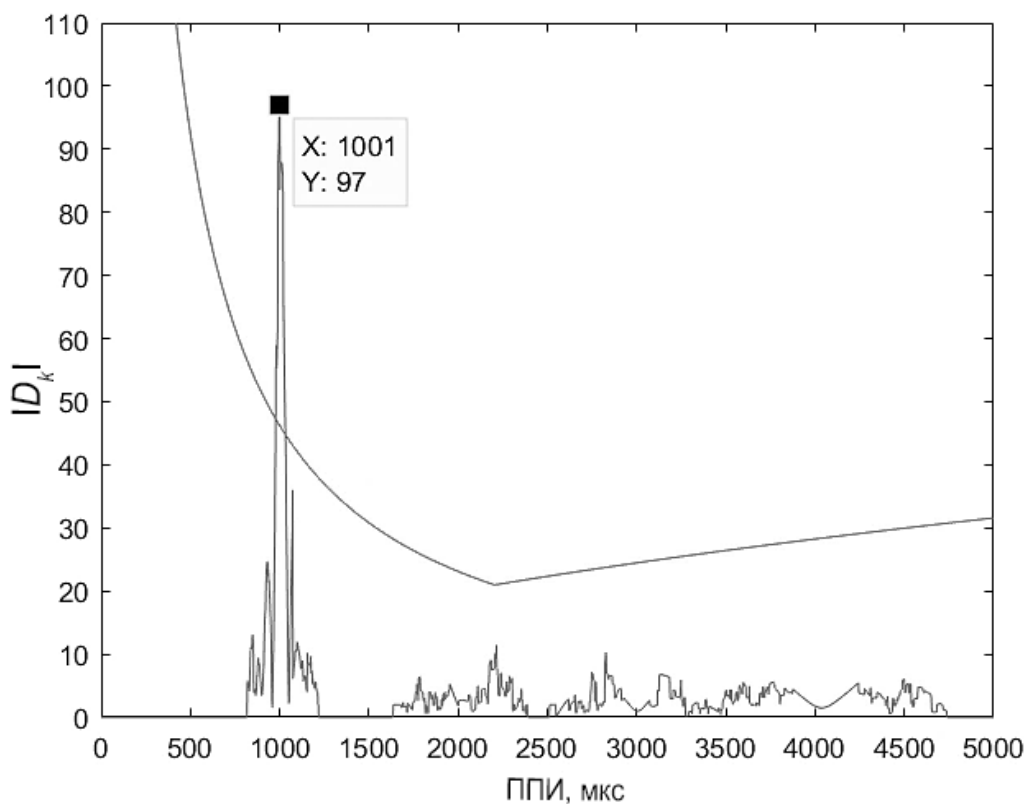


Рис. 9. Результат применения ППИ-преобразования 2 к анализируемой смеси из четырех перемешанных последовательностей

Из его рассмотрения следует, что верхняя граница диапазона изменения ППИ не превышает 4003 мкс. Минимальное значение интервала следования импульсов составляет 164 мкс.

Далее выполняют процедуру селекции, состоящую из двух этапов: обнаружение импульсных последовательностей и их выделение из входной смеси на основе ППИ-преобразования¹ и последовательного поиска. Результат обнаружения ППИ на данном этапе представлен на рисунке 8.

Он показывает, что во входной смеси присутствуют, предположительно, четыре импульсные последовательности с периодами 163 мкс, 549 мкс, 2749 мкс и 4001 мкс. Методом последовательного поиска подтверждено наличие последовательностей с такими ППИ за исключением сигнала с интервалом 549 мкс, являющийся ложным. Последовательный поиск предполагает поочередный просмотр массива ВПИ с заданным интервалом (периодом). Наличие импульсов в контролируемых временных точках является основанием для принятия решения об обнаружении (наличии) импульсной последовательности с определенными (контролируемыми) характеристиками. Сигнал со случайным изменением ППИ от импульса к импульсу, присутствующий в смеси, на данном этапе алгоритма не обнаружен.

После удаления выявленных последовательностей из входной смеси, осуществляют проверку условия остановки селекции: «число оставшихся импульсов не должно превышать требуемого значения». Если это условие не выполняется осуществляют переход ко второму этапу селекции, а именно проверка на наличие вобулирующей последовательности на основе ППИ-преобразования². Применительно к рассматриваемому примеру результат работы данного этапа селекции показан на рисунке 9.

На нем виден пик примененного ППИ-преобразования² в точке со значением $T = 1001$ мкс. Методом последовательного поиска подтверждено наличие последовательности с таким ППИ и вобуляцией его интервалов следования импульсов относительно T .

Путем имитационного моделирования была проведена оценка качества рассмотренного алгоритма

селекции при обработке сигналов с вобуляцией ППИ по случайному закону. Входной поток включал в себя 5 перемешанных сигналов с ППИ равными — 1000 мкс, 1414 мкс, 1732 мкс, 2236 мкс, и 4358 мкс. Величина вобуляции изменялась от 10% до 30% относительно значения ППИ, а число импульсов в смеси от 50 до 1000. Результаты приведены в таблице 1.

При числе импульсов равным 1000 и величине вобуляции 10% были обнаружены (выделены) все 5 последовательностей. Увеличение вобуляции приводит к сокращению числа выявленных ИРИ (до 3–4). В некоторых случаях имеет место ложное обнаружение, обусловленные в том числе неоптимальностью выбранного порога.

Когда число импульсов в смеси уменьшалось до 100, форма спектра ППИ становится менее четкой, но это не влияет на результат обнаружения при вобуляции 10%. Увеличение величины данного параметра до 30% приводит к уменьшению числа правильно выявленных ИРИ до 2–3, но за счет сглаживания отчетов ППИ-спектра достоверность выделения jitter-сигналов выше в 1.3–1.4 раза.

Дальнейшее сокращение числа импульсов в смеси до 50 вызывает рост неопределенности в принятии решения.

Таким образом, можно констатировать, что для приемлемого качества обнаружения последовательностей необходимо, чтобы в смеси присутствовало не менее 100 импульсов.

Заключение

Таким образом, рассмотренный алгоритм селекции за счет предварительного анализа диапазона возможных значений ППИ, присутствующих в исходной выборке и совместного применения гистограммы разностей ВПИ и двух интегральных преобразований интервалов следования импульсов позволяет реализовать разделение смешанного потока, включающего в себя как простые и регулярные последовательности, так и сигналы с вобуляцией ППИ по закону jitter. При этом достоверность выделения jitter последовательностей за счет сглаживания, по сравнению с известным алгоритмом увеличивается в 1,3–1,4 раза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Терентьев А.В., Коротков В.Ф. Радиотехническая разведка: Теория и практика обработки радиолокационных сигналов. СПб.: Медиапир, 2021. — 345 с.
2. Mardia H.K. New Techniques for The Deinterleaving of Repetitive Sequences // IEE Proc. F-Radar and Signal Processing. 1989. Vol. 136, № 4. P. 149–154.
3. Коротков В.Ф., Зырянов Р.С. Разделение импульсных последовательностей в смешанном потоке сигналов // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2017. № 3. С. 5–10.

4. Nelson D, "Special purpose correlation functions for improved signal detection and parameter estimation", International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, pp.73–76, 1993
5. Kenichi N and Masacki K, "Improved Algorithm for Estimating Pulse Repetition Intervals," IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems., VOL. 36, NO.2. April 2000.
6. Смирнов Ю.А. Радиотехническая разведка. — М.: Воениздат, 2001. — 456 с.
7. Мельников Ю.П. Воздушная радиотехническая разведка. Методы оценки эффективности. — М.: Радиотехника, 2005. — 304 с.
8. Wiley, R.G., Electronic Intelligence: The Analysis of Radar Signals Second Edition, Norwood, MA: Artech House, 337 (1993) .
9. Milojevic, D.J., Popovic, B.M.: Improved algorithm for the deinterleaving of radar pulses. IEE proceedings 139 (1), 98–104 (1992) .
10. Balin, M. (1996) IDEA—Interactive deinterleaver for ELINT analysis. In Proceedings of ICSPAT, Oct. 1996, 852–856.

© Царик Дмитрий Владимирович (dvtsar@gmail.com).

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»



г. Санкт-Петербург