

<https://doi.org/10.26160/2572-4347-2022-17-66-76>

ОЦЕНКА ИМПУЛЬСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИГНАЛА В УСЛОВИЯХ ШУМОПОДОБНОЙ ПОМЕХИ

Моисеев А.А.

Научно-производственное предприятие «Технос–РМ», Мытищи, Россия

Ключевые слова: импульсная характеристика, шумоподобная помеха, частотная полоса, период следования, скважность, селекция, медианно-рекурсивная фильтрация, статистические методы.

Аннотация. Рассмотрен алгоритм оценивания импульсных характеристик сигнала в условиях шумоподобной помехи с частичным перекрытием частотных полос. Разработаны методы построения частотных характеристик средствами Excel на базе формуляра со стандартной структурой, а также использование этих средств для оценивания импульсных параметров на той же базе. К числу оцениваемых параметров относятся: интегральная полоса пачки импульсов; интегральная длительность пачки импульсов; период следования и скважность наблюдаемых пачек. Формирование интегральных характеристик осуществлялось на выходе процедур селекции, к числу которых относились частотная, по расчетной частотной полосе и расчетному размаху амплитуды. Указанные процедуры включали медианно – рекурсивную обработку, включая реализацию полосовой фильтрации средствами Excel, а также автоматическую оценку параметров наблюдаемых импульсов с использованием статистических методов. Для выделения сигнальной составляющей с частичным частотным перекрытием была использована амплитудная селекция и медианно – рекурсивная обработка без полосовой фильтрации. Переключение режимов обработки осуществлялось с помощью признака амплитудной селекции.

ESTIMATION OF PULSE CHARACTERISTICS OF A SIGNAL UNDER NOISE-LIKE INTERFERENCE CONDITIONS

Moiseev A.A.

Scientific and industrial entertainment “Technos–RM”, Mytisch, Russia

Keywords: pulse characteristics, noise-like interference, frequency band, boxcar period, of – duty – factor, selection, median and recursive filtration, statistical methods.

Abstract. Estimation algorithm for pulse characteristics developed at noise-like interference with frequency bands overlap. Were developed also some Excel methods of frequency characteristics formation and pulse parameters estimation based on standard registration form. The following parameters were considered: integral boxcar band; integral boxcar durability; boxcar period and of – duty – factor. Integral characteristics forming performed on the output of selection procedures including frequency one, selection on frequency band and selection on amplitude swing. These procedures include median and recursive processing with band filtration implemented in Excel as well as automatic estimation of pulse parameters using statistical methods. For overlapping component excretion was amplitude selection used without band filtration. Processing modes switching performed using amplitude selection flag.

Оценивание импульсных характеристик сигнала приходится, как правило, проводить при наличии помехи, в том числе также импульсной. В рассматриваемом сравнительно простом случае считается, что последняя включает низкочастотную шумоподобную составляющую. Сигнал включает

импульсные составляющие, разнесенные по частоте и одну дополнительную составляющую в том же частотном диапазоне. Общая частотная характеристика, отображающая сигнальные и помеховые составляющие, приведена на рисунке 1. Для ее построения использовались временные зависимости частоты $f(t)$ ($= \text{полоса max}$) и амплитуды $A(t)$ ($= A \text{ max}$), входящие в формуляр наблюдения. Оценка времени t осуществлялась в соответствии с рекурсивным выражением $t_{i+1} = t_i + p_i d$, $p_i = f e_i - r e_i$, где p_i – длительность i – го кадра формуляра, выраженная числом импульсов в кадре, а $r e_i$, $f e_i$ – передний и задний фронты кадра, выраженные в импульсах, $d = 1,6 \cdot 10^{-6}$ с – стандартная длительность импульса.

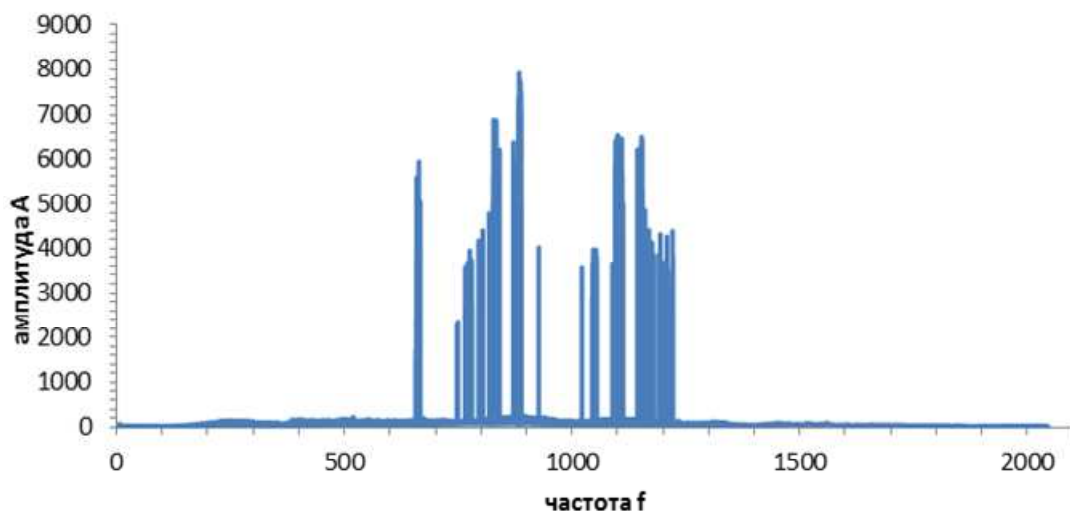


Рис. 1. Общая частотная характеристика

Построение частотной характеристики осуществлялась средствами Excel путем совместной сортировки частоты и амплитуды по возрастанию частоты [1, 2]. Во избежание совпадений дискретных значений частотного и временного аргументов к ним с помощью функции СЛЧИС предварительно добавлялись случайные величины, равномерно распределенные в диапазоне соответствующих дискретных приращений. Полученная таким образом общая характеристика разбивалась на фрагменты по частоте, включающие связанные ряды значений частоты f , времени t и амплитуды A , упорядоченные по возрастанию частоты.

На этой основе были выбраны диапазоны изменения частоты для частотных составляющих:

- $f \in (f_l, f_h) = (700, 1300)$ для сигнальной составляющей;
- $f \in (n l_1, n h_1) \cup (n l_2, n h_2) = (200, 600) \cup (1400, 2000)$ для помеховой составляющей.

Для нахождения диапазонов по амплитуде использовался следующий подход. На основе общей частотной характеристики строились последовательности амплитуд с использованием тернарных выражений [3]:

$$A1_i = f_i \in (nl1, nh1) \cup (nl2, nh2) ? A_i : 0$$

$$A2_i = f_i \in (fl, fh) ? A_i : 0$$

Левая граница амплитудного диапазона определялась при этом соотношением $hl = \max_i A1_i$, а правая – соотношением $hh = \max_i A2_i$. В результате получаем амплитудный диапазон $A \in (226, 7709)$ для сигнальной составляющей.

В качестве дополнительных решающих статистик [4] были определены:

- локальная частотная полоса $lb_i = (полоса + /2)_i - (полоса - /2)_i$;
- размах амплитуды $dA_i = abs((A+)_i - (A-)_i)$.

Их частотные характеристики отображены на рисунке 2.

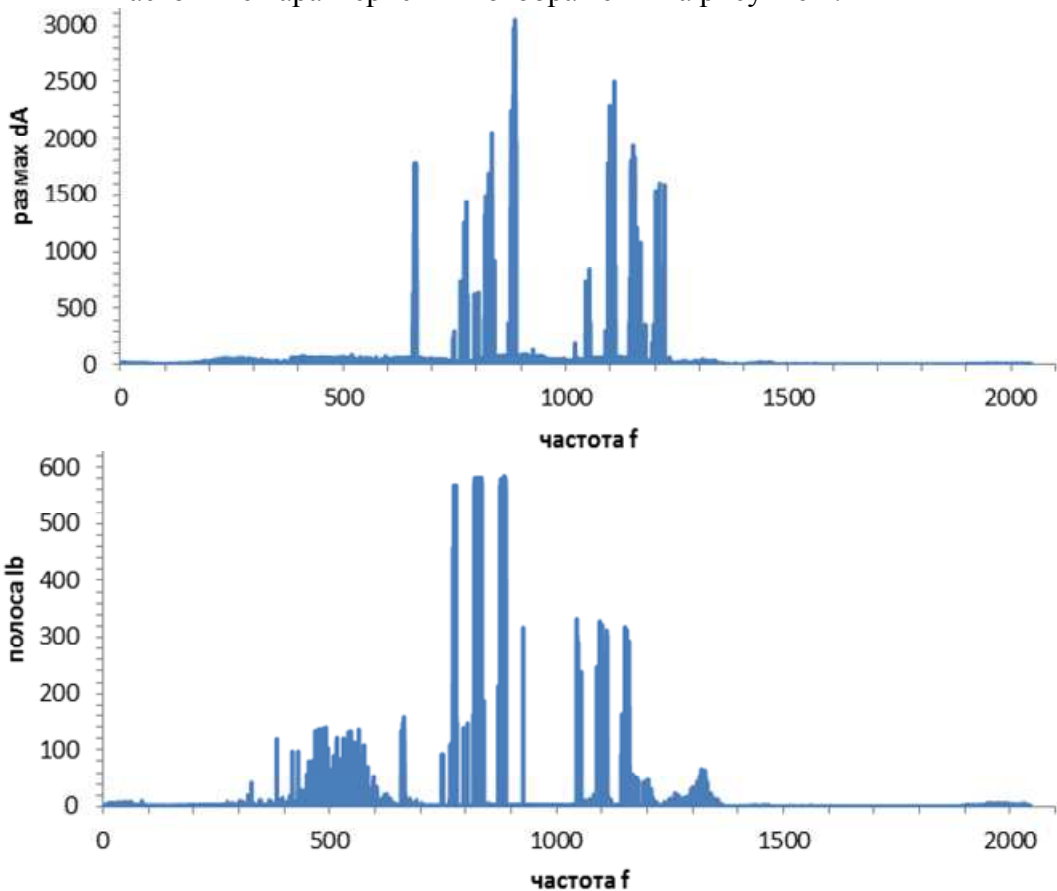


Рис. 2. Частотная полоса и размах по амплитуде

Пороги селекции по полосе hb и размаху hs формировались следующим образом. Предварительно строились последовательности $LB_i = f_i \in (fl, fh) ? lb_i : 0$, $DA_i = f_i \in (fl, fh) ? dA_i : 0$. Затем по ним рассчитывались соответствующие пороги селекции $hb = \max_i LB_i$, $hs = \max_i DA_i$. Для расчетов длительности локальных импульсов

использовалось выражение $ld_i = dr_i$, где d – стандартная длительность, а r_i – количество отсчетов в кадре, определенное в формуляре.

На следующем этапе ряды переменных (t , f , A , lb , ld) упорядочивались по времени и в таком виде использовались для оценивания импульсных характеристик, схема которого приведена на рисунке 3.

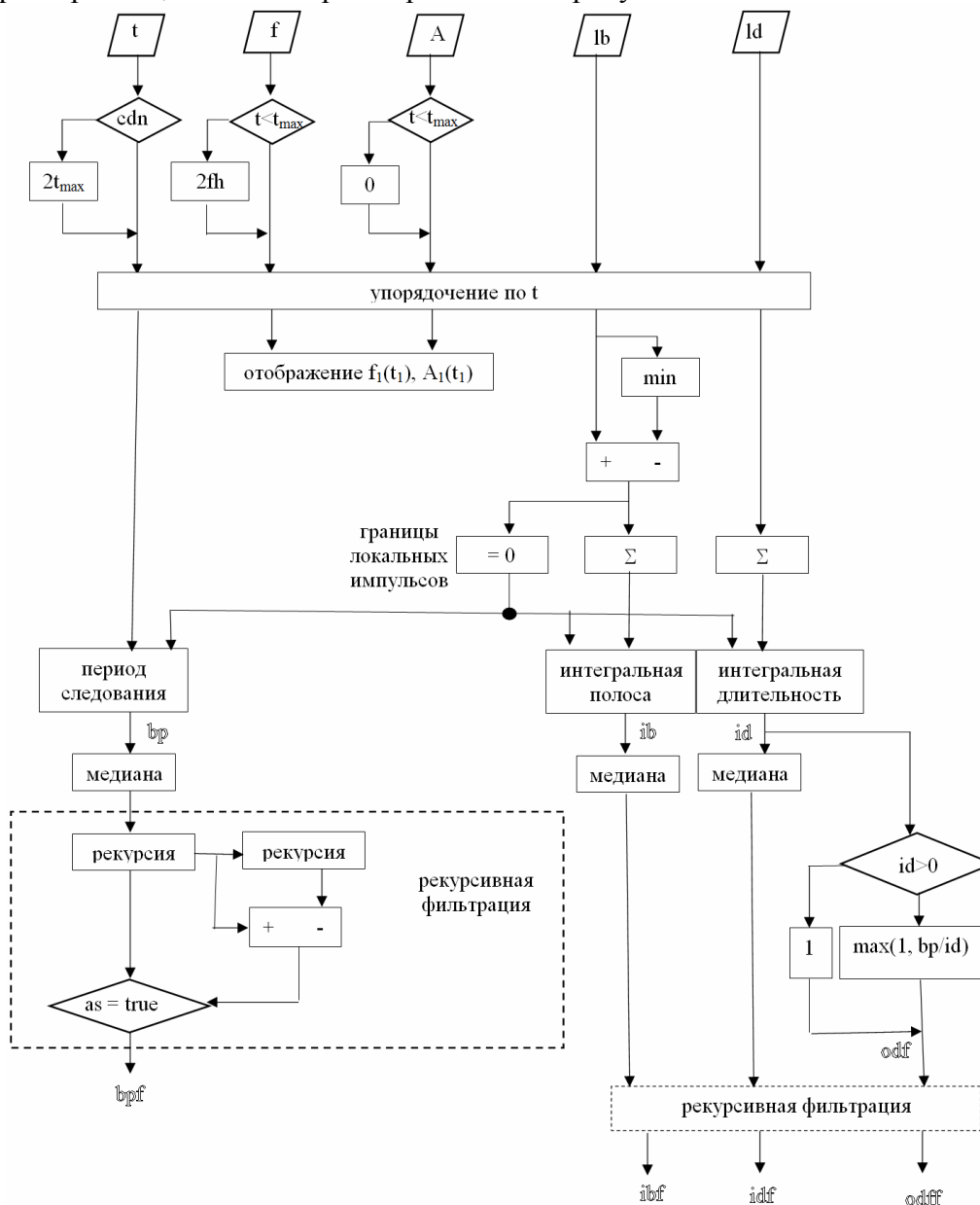


Рис. 3. Оценка импульсных характеристик

В случае частотной селекции, а также селекции по полосе и размаху амплитуды признак амплитудной селекции устанавливался как `as = false`. Основным условием частотной селекции являлось

$cdn_f = A \in (hl, hh) \wedge f \in (fl, fh)$, селекции по полосе – $cdn_b = lb > hb$, а селекции по размаху – $cdn_s = dA > hs$. Эти условия использовались для трансформации временной переменной, задаваемой выражением $cdn_?t:2t_{\max}$, где cdn – соответствующее условие, $t_{\max}$ – максимальное значение исходной переменной t . Частотная переменная при этом трансформировалась в соответствии с выражением $f_1 = t < t_{\max} ? f : 2fh$, а амплитудная – в соответствии с выражением $A_1 = t < t_{\max} ? A : 0$. Исходный набор переменных ($t_1=t$, $f_1=f$, $A_1=A$, $lb_1 = lb$, $ld_1=ld$) упорядочивался по возрастанию переменной t_1 . При этом для реализации упорядочения в Excel исходные переменные набора предварительно сохранялись в виде значений [1]. Для подавления частотного перекрытия локальных импульсов упорядоченная переменная lb_1 преобразовывалась к виду $lb_1' = lb_1 - \min$, где $\min_i = \min(lb_1 : lb_{1+m-1})$ – скользящий минимум в окне из $m = 10$ элементов.

Величина lb' интерпретировалась как набор полос локальных импульсов в составе пачки, разделенных нулями, соответствующими межимпульсным интервалам. Для перехода к расчету интегральных полос импульсов локальные полосы lb_1' предварительно аккумулировались в сумму. Точки, удовлетворяющие условиям $lb_1' = 0 \wedge lb_{1-1}' > 0$, соответствуют задним фронтам импульсов и им приписывалось значение аккумулируемой суммы для интегрального импульса. Поэтому значения тернарного выражения $be_i = (lb_1 = 0 \wedge lb_{1-1} > 0) ? bs_i : be_{i-1}$ представляют собой частотные границы интегральных импульсов, а тернарное выражения инкремента $ib_i = (be_i - be_{i-1} > 0) ? be_i - be_{i-1} : ib_{i-1}$ – их интегральные полосы.

Аналогично осуществлялось аккумулирование локальных длительностей в сумму $ds_i = ds_{i-1} + ld_i$ и ее разделение в точках фронтов $de_i = (lb_i = 0 \wedge lb_{i-1} > 0) ? ds_i : de_{i-1}$.

Временные точки фронтов при этом определялись выражением $te_i = (lb_i = 0 \wedge lb_{i-1} > 0) ? t_i : te_{i-1}$, а интегральные длительности – тернарным выражением инкремента $id_i = (de_i - de_{i-1} > 0) ? de_i - de_{i-1} : id_{i-1}$. Отсюда находим период следования импульсов $bp_i = (te_i - te_{i-1} > 0) ? te_i - te_{i-1} : bp_{i-1}$ и скважность $odf_i = id_i > 0 ? \max(1, \frac{bp_i}{id_i}) : 1$.

Для получения окончательных оценок импульсных характеристик предварительные оценки интегральной полосы ib , интегральной длительности id , периода следования bp и скважности odf подвергались каскадному медианно-рекурсивному сглаживанию (фильтрации) [5]. Оконная фильтрация на первом этапе осуществлялась при этом по алгоритму скользящей медианы

для интегральной полосы ib и интегральной длительности id , периода следования bp и скважности odf :

– сглаженная полоса $ibs_i = med(ib_i : ib_{i+n-1})$, где размер скользящего окна $n = 30$;

– сглаженная длительность $ids_i = med(id_i : id_{i+n-1})$;

– сглаженный период $bps_i = med(bp_i : bp_{i+n-1})$;

– сглаженная скважность $odfs_i = med(odf_i : odf_{i+n-1})$.

Второй этап каскадного сглаживания представлял собой рекурсивную (инерционную) фильтрацию [6]:

$ibr_i = (1 - rc) * ibr_{i-1} + rc * ibs_i$, где rc – коэффициент рекурсии и $ibr_0 = ibs_0$;

$idr_i = (1 - rc) * idr_{i-1} + rc * ids_i$, где $idr_0 = ids_0$;

$bpr_i = (1 - rc) * bpr_{i-1} + rc * bps_i$, где $bpr_0 = bps_0$;

$odfr_i = (1 - rc) * odfr_{i-1} + rc * odfs_i$, где $odfr_0 = odfs_0$.

Селекция по частоте, полосе или размаху осуществляется при установке признака $as = false$ и позволяет выделить все сигнальные компоненты, число которых приблизительно соответствует числу выбросов во временной зависимости соответствующей характеристики. При этом возникает ненулевой переход за счет дополнительного временного перекрытия. Для его подавления предлагается оценивать импульсные характеристики на выходе форсирующих звеньев вида

$\frac{Tp}{1 + Tp} = 1 - \frac{1}{1 + Tp}$, где $T = \frac{\tau}{rc}$, τ – квант дискретного времени [6]. Учитывая, что на вход форсирующего звена

подается результат рекурсии, эквивалентной инерционному звену $\frac{1}{1 + Tp}$, получаем для результата форсировки ibd (т.е. на выходе полосового фильтра):

$$ibd \rightarrow \frac{1}{1 + Tp} \frac{Tp}{1 + Tp} = \frac{1}{1 + Tp} \left(1 - \frac{1}{1 + Tp} \right) = \frac{1}{1 + Tp} - \frac{1}{1 + Tp} \frac{1}{1 + Tp} \rightarrow ibr - ibrr.$$

Таким образом, результат на выходе полосового фильтра ibd соответствует разнице между рекурсией ibr и повторной рекурсией $ibrr$ (от рекурсии ibr). Отсюда получаем:

$$ibd_i = ibr_i - ibrr_i$$

$$idd_i = idr_i - idrr_i$$

$$bpd_i = bpr_i - bprr_i$$

$$odfd_i = odfr_i - odfr_i$$

где повторные рекурсии определяются соотношениями:

$$ibrr_i = (1 - rc) * ibrr_{i-1} + rc * ibr_i, \text{ где } ibrr_0 = ibr_0;$$

$$idrr_i = (1 - rc) * idrr_{i-1} + rc * idr_i, \text{ где } idrr_0 = idr_0;$$

$$bpr_{ri} = (1 - rc) * bpr_{r_{i-1}} + rc * bpr_i, \text{ где } bpr_{r0} = bpr_0;$$

$$odfrr_i = (1 - rc) * odfrr_{r_{i-1}} + rc * odfrr_i, \text{ где } odfrr_0 = odfrr_0.$$

В случае амплитудной фильтрации необходимость в подавлении перехода между сигнальными составляющими отсутствует и последняя этом включается установкой признака $as = true$. На выходе каскадной фильтрации получаем в конечном итоге:

$$ibf_i = fs ? ibr_i : ibd_i$$

$$idf_i = fs ? idr_i : idd_i$$

$$bpf_i = fs ? bpr_i : bpd_i$$

$$odff_i = fs ? odfrr_i : odfd_i$$

Для оценки диапазона импульсных характеристик использовался следующий подход. В последовательности e_i , соответствующей фильтрованной оценке (например, $e_i = ibf(t)$), выделяется последовательность экстремумов с использованием выражений

$$emx_i = (e_i > 0) \wedge (e_i > e_{i-1}) \wedge (e_i > e_{i+1}) ? e_i : 0,$$

$$emn_i = (e_i > 0) \wedge (e_i > e_{i-1}) \wedge (e_i > e_{i+1}) ? e_i : 10^4.$$

Границы исходного диапазона определяются при этом из соотношений $el = \min emn_i$ и $eh = \max emx_i$. Предполагая распределение значений экстремумов равномерно распределенным в этом диапазоне, находим величины взаимно дополняющих квантилей, определяющих границы искомого диапазона оценки [7]:

$$el' = el + a(eh - el)$$

$$eh' = el + (1 - a)(eh - el)$$

где $a = 0,4$ – аргумент квантиля.

Импульсные характеристики частотной фильтрации для сигнальной компоненты наблюдались на выходе полосового фильтра и отображены на рисунке 4. К ним также относились временные зависимости частоты f и амплитуды A в соответствующих временных диапазонах. Обратим внимание на амплитудную зависимость $A(t)$. «Борода» на ее начальном участке соответствует упомянутой выше дополнительной составляющей, наблюдаемой в том же частотном диапазоне. Возможным методом ее селекции является амплитудная, которая рассматривается ниже. Что касается частотной селекции сигнальной составляющей, то частотная полоса при выбранном значении аргумента составляет 574-789 МГц, а длительность импульса – 67-100 мкс с периодом следования 73-105 мс.

Регистрация импульсных характеристик полосовой фильтрации также осуществляется на выходе полосового фильтра. Ее результаты отображены на рисунке 5. Частотная полоса при этом составляет 355-516 МГц при длительности импульса 190-290 мкс и периоде следования 65-96 мс. Аналогичная ситуация имеет место при селекции по размаху амплитуды. Ее

результаты на выходе полосового фильтра отображены на рисунке 6. Частотная полоса при этом составляет 821-1217 МГц при длительности импульса 69-102 мкс и периоде следования 92-137 мс.

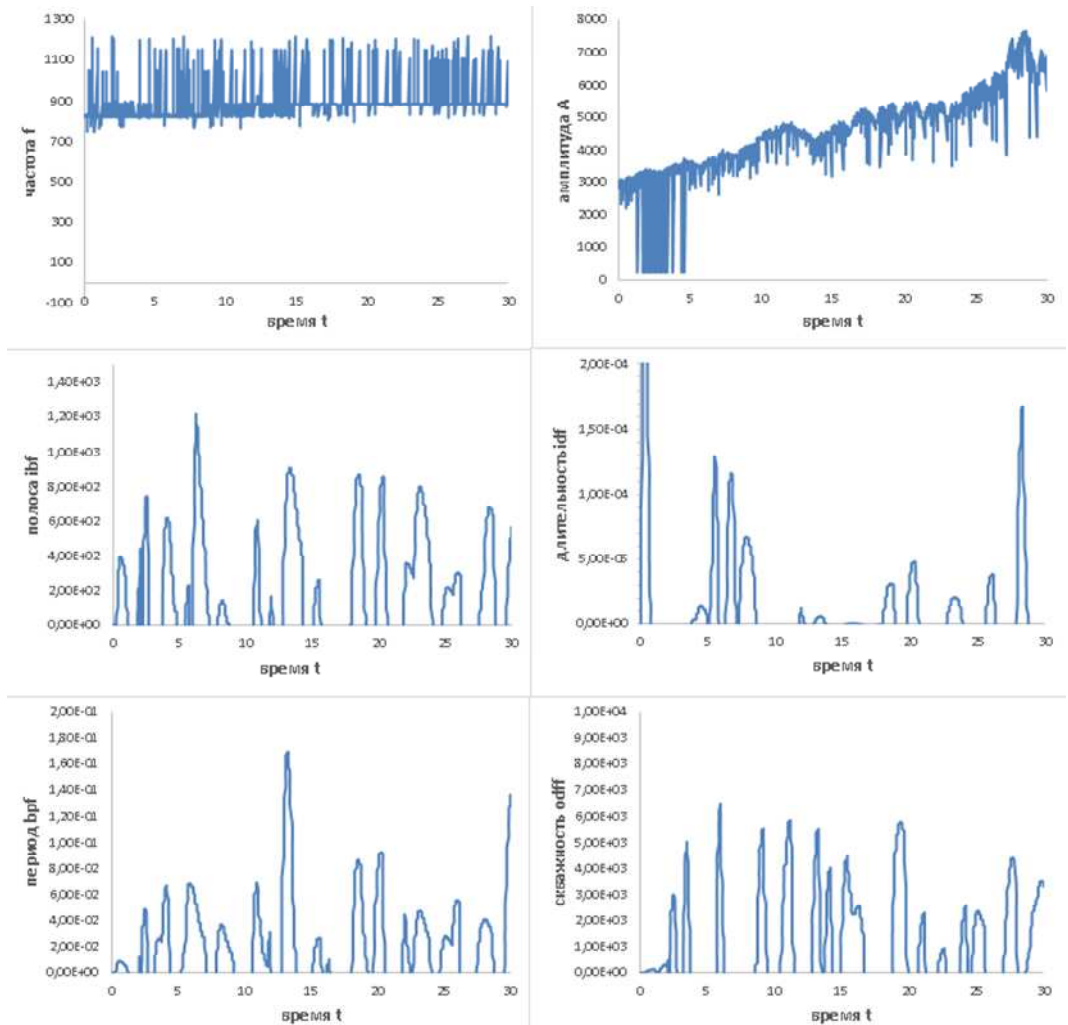


Рис. 4. Частотная селекция

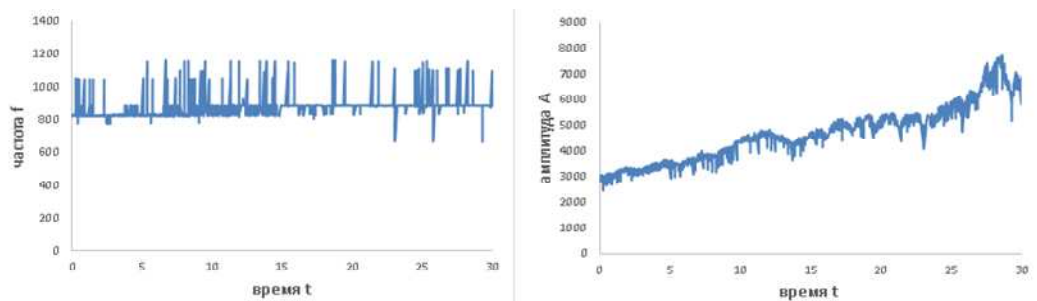


Рис. 5. Селекция по частотной полосе

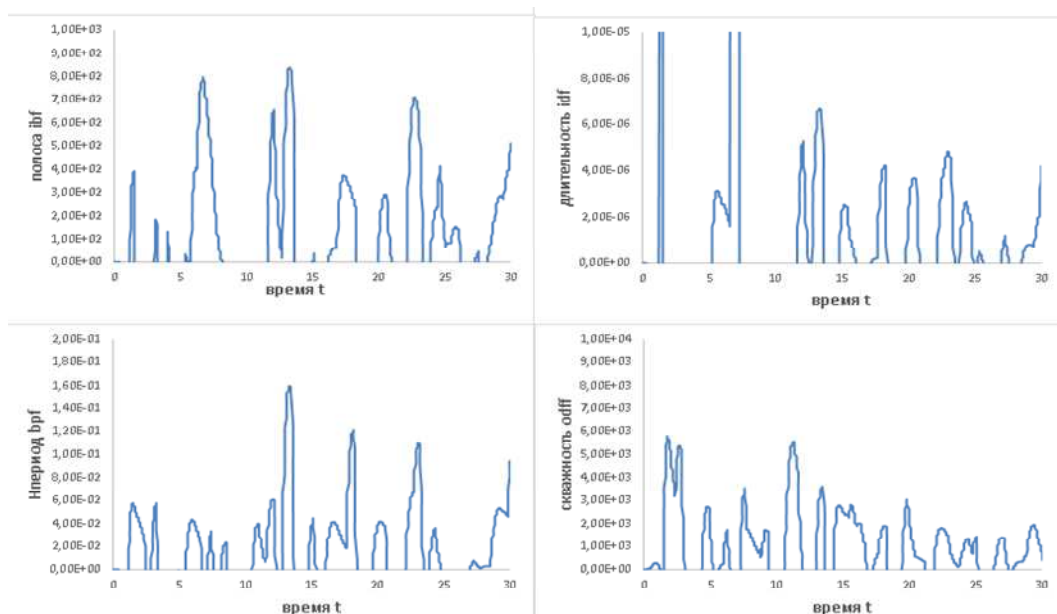


Рис. 5. Продолжение

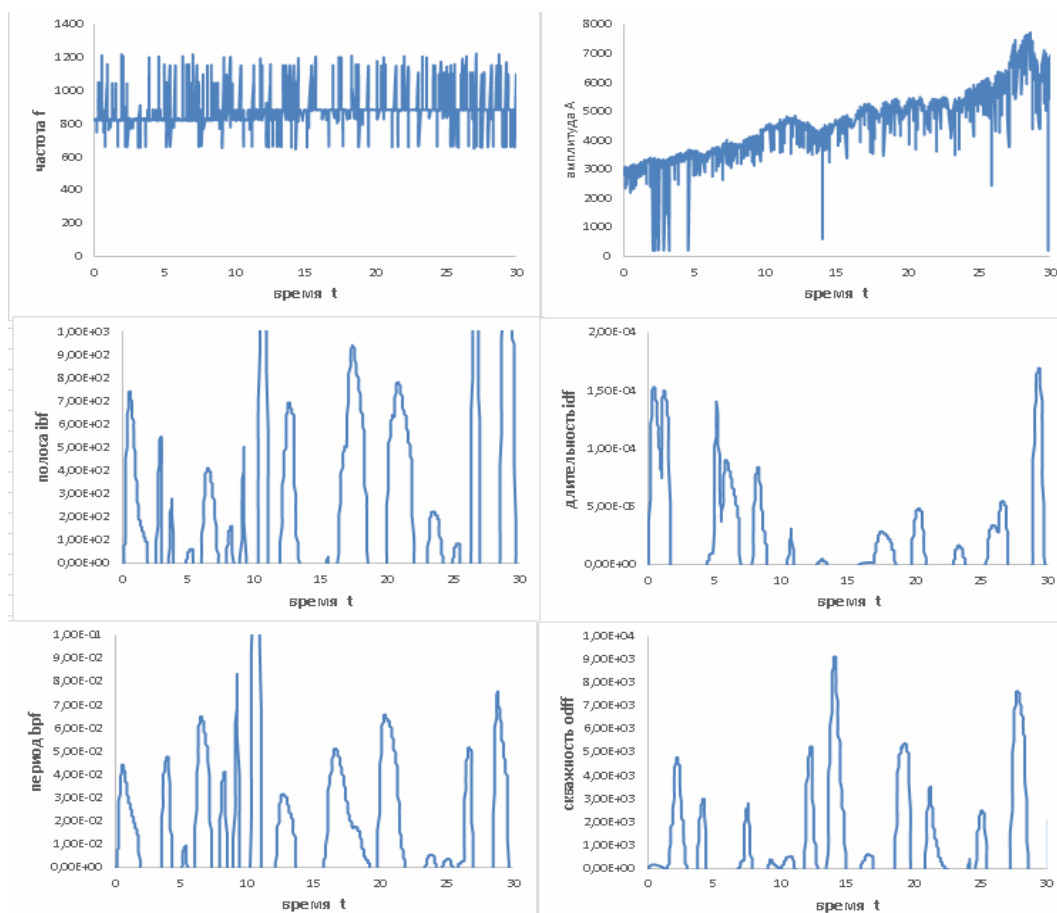


Рис. 6. Селекция по размаху амплитуды

Выделение дополнительной составляющей осуществляется путем амплитудной селекции, задаваемой условием $A \in (hl, 10hl)$. Результаты этой селекции наблюдаются на выходе рекурсивной фильтрации и отображены на рисунке 7. Частота дополнительной составляющей составляет 900 МГц при полосе 1 МГц, т.е. сигнал практически монохроматический. Длительность импульса составляет 5-12 мкс, а период следования 100-400 мс.

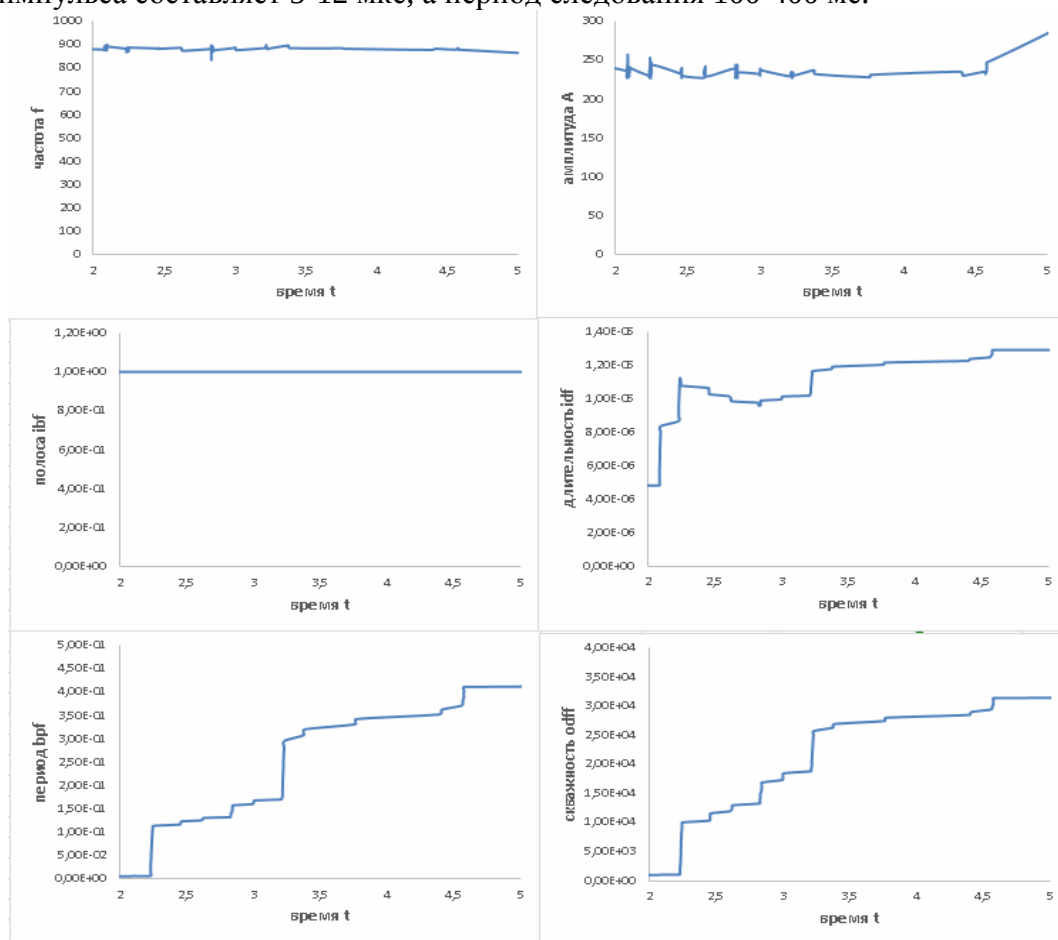


Рис. 7. Селекция по амплитуде

Список литературы

1. Вадзинский Р.Н. Статистические вычисления в среде Excel. – СПб.: Питер, 2008. – 608 с.
2. Моисеев А.А. Модельно-ориентированное оценивание радиотехнических параметров // Радиопромышленность. 2018. № 3. С. 31-45.
3. Strastrup B. Programming: principles and practice. – NY: Addison-Wesley, 2014. – 1312 p.
4. Володин И.Н. Оптимальные статистические решения. – Казань: КФУ, 2011. – 182с.
5. Моисеев А.А. Медианно-рекурсивная фильтрация // Радиопромышленность. 2018. № 1. С. 103-109.

6. Моисеев А.А. Реализация базовых динамических элементов средствами автоматизированного проектирования // Новые промышленные технологии. 2006. № 1. С. 32-38.
7. Шмойлова Р.А., Минашкин В.Г., Садовникова Н.А. Практикум по теории статистики. – М.: Финансы и статистика, 2011. – 416 с.

References

1. Vadzinsky R.N. Statistical calculations in Excel. – SPb.: Piter, 2008. – 608 p.
2. Moiseev A.A. Model oriented estimation of radioparameters // Radioindustry. 2018. No. 3. P. 31-45.
3. Strastrup B. Programming: principles and practice. – NY: Addison-Wesley, 2014. – 1312 p.
4. Volodin I.N. Optimal statistical decisions. – Kazan: KFU, 2011. – 182 p.
5. Moiseev A.A. Median and recursive filtration // Radio industry. 2018. No. 1. P. 103-109.
6. Moiseev A.A. Dynamical elements realization using CAD // New industrial technologies. 2006. No. 1. P. 32-38.
7. Shmoilova R.A., Minaskin V.G., Sadovniova N.A. Workshop on statistical theory. – М.: Finances and statistics, 2011. – 416 p.

Моисеев Александр Александрович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник slow.coach@yandex.ru	Moiseev Aleksandr Aleksandrovich – candidate of technical sciences, senior researcher
---	---

Received 30.08.2022