

А. И. Митюшов<sup>1</sup>, Л. С. Егоренков<sup>1</sup>, С. А. Карпов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова

## ОСОБЕННОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ СИГНАЛОВ НА ВЫХОДЕ УСТРОЙСТВА ОБРАБОТКИ С ТРЕХУРОВНЕВЫМ КВАНТОВАНИЕМ

*В статье рассматривается способ математического описания результатов обработки в согласованном фильтре аддитивной смеси сигнала с шумом при использовании трехуровневого квантования. Способ основан на представлении обрабатываемых сигналов в виде случайных трехмерных дискретных векторов. Предлагается методика расчета статистических характеристик сигналов на выходе устройства. Методика дает возможность наглядно представить закон распределения вероятностей трехуровневых сигналов на разных этапах обработки и определить его числовые параметры: математическое ожидание, дисперсию. Это позволяет рассчитать отношение сигнал/шум на выходе устройства с учетом величины уровней квантования. Кроме того, на основе предложенной методики можно получить показатели качества обнаружения, построить рабочие характеристики обнаружителя. Трехуровневое квантование позволяет существенно упростить техническую реализацию устройств обработки сигналов при допустимых энергетических потерях.*

**Ключевые слова:** случайный дискретный вектор, уровни квантования, закон распределения вероятностей, матрица вероятностей, согласованный фильтр

### Введение

Создание цифровых обнаружителей, реализующих оптимальные алгоритмы обработки сигналов на радиочастоте, наталкивается на ограниченное быстродействие элементной базы. Поэтому количество уровней квантования приходится уменьшать. Знаковые (бинарные или двухуровневые – 0, 1) устройства отличаются простотой технической реализации, однако имеют большие энергетические потери по сравнению с многоуровневыми устройствами обработки. Устройства с тремя уровнями квантования (–1, 0, +1) по сравнению со знаковыми устройствами сохраняют простоту технической реализации и позволяют существенно снизить энергетические потери в процессе обработки.

В [1] рассмотрены особенности аналитического описания сигналов и шумов после трехуровневого квантования с использованием случайных трехмерных дискретных векторов (СТДВ), предложена методика расчета распределения вероятностей СТДВ и параметров распределения. В данной статье анализируются особенности математического описания процессов обработки сигналов при трехуровневом квантовании и предлагается методика расчета статистических характеристик сигналов на выходе устройства. Известно [2], что для оценки показателей качества обнаружения знание статистических

характеристик обрабатываемых сигналов имеет решающее значение.

### Объект исследования

Три уровня квантования обеспечивает идеальный ограничитель (рис. 1) с зоной нечувствительности. Верхний уровень выходного сигнала ограничителя условно обозначим +1, а нижний – –1:

$$\eta_i = \begin{cases} +1, & \text{если } Y(t_i) > U_0, \\ 0, & \text{если } -U_0 < Y(t_i) < U_0, \\ -1, & \text{если } Y(t_i) < -U_0. \end{cases} \quad (1)$$

Как правило, при симметричной плотности распределения шумов выбирают пороги квантования  $\pm U_0$ , равные по абсолютной величине. Преобразование (1) осуществляет переход от непрерывной случайной величины  $y(t)$  к дискретной  $\eta_i$ . Особенности математического описания  $\eta$  заключаются в следующем. В каждом отсчете можно получить одно из трех попарно несовместимых значений (+1, 0, –1). Вероятности их появления для шума и смеси сигнала и шума можно найти, зная плотность распределения входной непрерывной величины и пороги квантования.

За время длительности полезного сигнала с выхода ограничителя снимается  $N$  значений  $\eta$ , которые

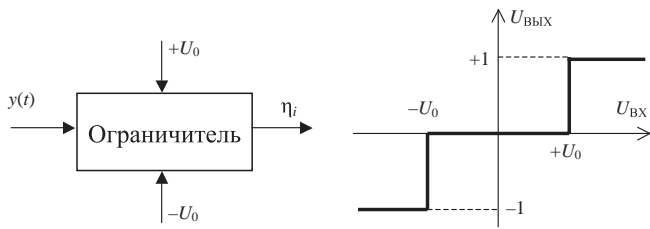


Рисунок 1. Идеальный ограничитель и его выходная характеристика

могут быть представлены как СТДВ  $Q = (Q^+, Q^0, Q^-)^T$ , где  $Q^+$  – случайная величина числа появлений +1 в серии,  $Q^0$  и  $Q^-$  – случайные величины количества 0 и –1 соответственно. Опорный сигнал  $x(t)$  также может быть представлен в виде СТДВ.

Когда на входе только стационарный шум и неслучайный неизменный сигнал, вероятности  $P^+$  появления +1 во всех отсчетах одинаковы точно так же, как  $P^0$  и  $P^-$ . В этом случае СТДВ подчиняется полиномиальному закону распределения. Вероятность реализации вектора, т.е. вероятность того, что в серии из  $N$  отсчетов будет  $i$  единиц,  $j$  нулей и  $k$  минус единиц, рассчитывается по формуле:

$$P_{i,j,k} = P(Q^+ = i, Q^0 = j, Q^- = k) = \frac{N!}{i! j! k!} (P^+)^i (P^0)^j (P^-)^k \quad (2)$$

Отметим, что  $i + j + k = N$ . Следовательно, если известно  $N$ , то набор индексов определяется только двумя составляющими.

Если на входе – смесь неслучайного изменяющегося сигнала и шума, то для нахождения вероятностей реализаций предлагается использовать формулу

$$P_{i,j,k} = P_{i-1,j,k} P_n^{+1} + P_{i,j-1,k} P_n^0 + P_{i,j,k-1} P_n^{-1}, \quad (3)$$

где  $P_{i,j,k}$  – вероятность реализации вектора  $Q_n$  в серии из  $n$  отсчетов;  $P_n^*$  – вероятность появления

минус единицы, ноля или плюс единицы соответственно в очередном  $n$ -м отсчете ( $n$  изменяется от 1 до  $N$ ).

Распределение вероятностей реализаций вектора  $Q$  удобно представить в виде таблицы (матрицы). В таблицу по строкам заносятся вероятности реализаций вектора  $Q$  с одинаковым количеством +1 (первый индекс), в столбцы заносятся вероятности реализаций вектора  $Q$  с одинаковым количеством –1 (третий индекс). Второй индекс – на пересечении столбца и строки, то есть число нулей в серии  $j = N - (i + k)$ . Пример такой матрицы для пяти отсчетов приведен в табл. 1.

Так как элементами матрицы являются вероятности всех возможных реализаций СТДВ, то сумма всех элементов должна быть равна единице. Значения элементов матрицы образуют поверхность, по виду которой легко судить о статистических свойствах СТДВ.

Структура свертывающего устройства приведена на рис. 2. На вход устройства поступает обрабатываемый сигнал  $Y$  после аналого-цифрового преобразования. В общем случае  $Y$  может иметь произвольное количество разрядов. Код  $Y$  запоминается в сдвигающих регистрах и продвигается по ним под воздействием тактовых импульсов (ТИ). Количество сдвигающих регистров равно количеству разрядов цифрового кода. Количество триггеров  $N$  в сдвигающих регистрах равно количеству отсчетов за длительность полезного сигнала. В процессе работы полезный сигнал, принимаемый вместе с шумом, заполнит сдвигающие регистры.

В запоминающее устройство (ЗУ) опорного сигнала до начала обработки заносятся цифровые коды  $X$  ожидаемого сигнала, которые используются как коэффициенты импульсной характеристики для свертки.

С одинаковых по номеру выходов сдвигающих регистров и ЗУ опорного сигнала параллельные цифровые коды поступают на входы умножителей. С выходов умножителей коды результатов перемножения поступают на входы сумматора, где

Таблица 1. Матрица распределения вероятностей вектора  $Q$  для пяти отсчетов

		Количество –1 (третий индекс)					
		0	1	2	3	4	5
Кол-во +1 (первый индекс)	5	$P_{500}$	–	–	–	–	–
	4	$P_{410}$	$P_{401}$	–	–	–	–
	3	$P_{320}$	$P_{311}$	$P_{302}$	–	–	–
	2	$P_{230}$	$P_{221}$	$P_{212}$	$P_{203}$	–	–
	1	$P_{140}$	$P_{131}$	$P_{122}$	$P_{113}$	$P_{104}$	–
	0	$P_{050}$	$P_{041}$	$P_{032}$	$P_{023}$	$P_{014}$	$P_{005}$

происходит их сложение. Код суммы  $Z$  на выходе сумматора является результатом свертки на каждом интервале дискретизации.

При использовании трехуровневых сигналов структура устройства свертки не изменяется. Отличия в технической реализации трехуровневого устройства обусловлены тем, что трехуровневые сигналы кодируются двухразрядным кодом. Поэтому в нем только два сдвигающих регистра и объем запоминающего устройства опорного сигнала значительно меньше. Существенно проще умножители и сумматор. Также имеется ряд особенностей функционирования трехуровневого устройства.

Известно, что при умножении двоичных кодов с одинаковым числом разрядов количество разрядов произведения удваивается. В отличие от этого произведение трехуровневых сигналов может иметь только три значения:

- +1, если сомножители не равны нулю и имеют одинаковый знак;
- 0, если хотя бы один сомножитель равен 0;
- -1, если сомножители не равны нулю и имеют разный знак.

Таким образом, в результате умножения трехуровневых сигналов  $Y$  и  $X$  будет получен также трехуровневый сигнал  $S$ , а количество разрядов произведения не изменится.

### Методология исследования

Статистические характеристики сигнала на выходе свертывающего устройства с трехуровневым квантованием можно найти, рассчитав матрицу распределения вероятностей на выходах умножителей.

Цифровые коды  $X$  ожидаемого (опорного) сигнала формируются из аналогового сигнала, содержащего шумовую составляющую. Поэтому в общем случае для получения трехуровневого опорного сигнала могут использоваться уровни квантования, не равные нулю. Следовательно, значения (+1, 0, -1) опорного сигнала в каждом отсчете появляются с некоторой вероятностью, которую, как и для принимаемого сигнала, можно определить, зная закон распределения шумов и закон изменения опорного сигнала.

Вероятности появления +1, 0 и -1 на выходе умножителя, т.е. для одного отсчета, вычисляются по формулам:

$$\begin{aligned} P_S^+ &= P_Y^+ P_X^+ + P_Y^- P_X^-, \\ P_S^0 &= P_Y^+ P_X^0 + P_Y^0 P_X^0 + P_Y^- P_X^0 + P_Y^0 P_X^+ + P_Y^- P_X^-, \\ P_S^- &= P_Y^+ P_X^- + P_Y^- P_X^+, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $P_Y^*$  – вероятности появления +1, 0 или -1 соответственно в данном отсчете на выходе сдвигающих

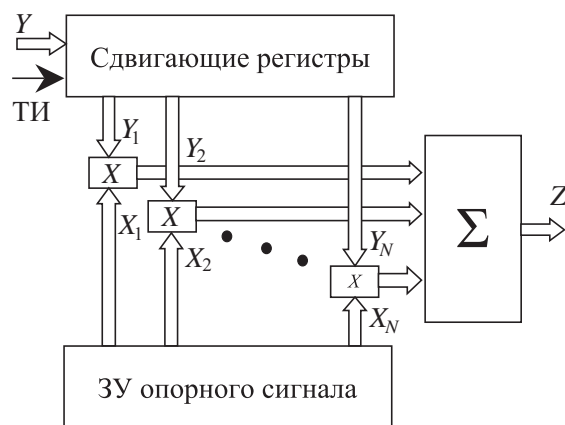


Рисунок 2. Структура свертывающего устройства

регистров обрабатываемого сигнала;  $P_X^*$  – вероятности появления +1, 0 или -1 на соответствующем выходе ЗУ опорного сигнала.

Набор трехуровневых сигналов, которые появляются одновременно на выходах всех умножителей (т.е. результаты перемножения всех отсчетов), также можно представить как СТДВ.

По формулам (4) можно рассчитать векторы вероятностей появления минус единиц, нулей и плюс единиц на выходах всех умножителей:

$$\begin{aligned} \overline{P_S^+} &= (P_{S1}^+, P_{S2}^+, \dots, P_{SN}^+)^T, \\ \overline{P_S^0} &= (P_{S1}^0, P_{S2}^0, \dots, P_{SN}^0)^T, \\ \overline{P_S^-} &= (P_{S1}^-, P_{S2}^-, \dots, P_{SN}^-)^T. \end{aligned} \quad (5)$$

Затем, начиная с первого отсчета, используя выражение (3), можно рассчитать методом итераций матрицу распределения вероятностей СТДВ  $S$  на выходах умножителей.

Матрица вероятностей позволяет найти математические ожидания  $m^+$  и  $m^-$  количества +1 и -1, которые одновременно присутствуют на выходах умножителей, и дисперсии  $D^+$  и  $D^-$  количества +1 и -1.

Случайная величина количества +1 далее обозначается  $S^+$ , а случайная величина количества -1 обозначается  $S^-$ . Эти величины имеют большое значение. Именно от них зависит сигнал на выходе сумматора и свертывающего устройства, так как нули на результат суммирования не влияют. По сути, результат свертки  $Z$  равен разности этих случайных величин

$$Z = S^+ - S^-.$$

Величина  $Z$  может принимать значения от  $-N$  до  $+N$ . Распределение вероятностей и числовые характеристики  $Z$  можно найти из матрицы распределения вероятностей случайного дискретного трехмерного вектора  $S$ .

Рассмотрим методику расчета распределения вероятностей  $Z$ .

Вероятность того, что  $Z$  примет конкретное значение, очевидно, равна сумме вероятностей  $P_{ijk}$  реализаций вектора  $S$ , в которых разность между первым и третьим индексом равна этому значению, т.е.  $Z = i - k$ . Количество нулей (второй индекс) значения не имеет.

Для наглядности допустим, что обрабатываемый сигнал имеет пять отсчетов. Матрица распределения вектора  $S$  приведена в табл. 2. В данном случае случайная величина  $Z$ , равная разности количества +1 (первый индекс) и -1 (третий индекс), может принимать значения от -5 до 5.

Вероятность появления на выходе сумматора  $Z = 1$  равна сумме вероятностей того, что на выходах умножителей появятся реализации СТДВ, в которых  $i - k = 1$  (в табл. 2 эти элементы матрицы выделены):

$$P(Z = 1) = P_{140} + P_{221} + P_{302}. \quad (6)$$

Аналогично из табл. 3 находятся вероятности всех значений выходного сигнала  $Z$  от -5 до +5.

Затем строится график (гистограмма) распределения вероятностей выходного сигнала  $Z$ .

Данную методику можно использовать для любого количества отсчетов.

В качестве примера на рис. 3 представлены результаты расчета распределения вероятностей выходной величины  $Z$  для следующих условий:

- количество отсчетов  $N = 20$ ;
- входной шум распределен по нормальному закону  $D_{ш} = 1$ ;
- полезный и опорный сигналы представляют собой немодулированные радиоимпульсы с частотой 5 периодов за длительность импульса;
- уровень квантования  $U_0 = \pm 2\sigma_{ш}$ ;
- параметр обнаружения  $q$  имеет значения 0 (только шум), 4, 6, 8, 10.

В радиолокации по величине сигнала на выходе свертывающего устройства принимается решение о наличии или отсутствии цели. Другими словами, величина  $Z$  является весовой функцией (достаточной статистикой). Распределение вероятностей дает полную информацию о статистических свойствах величины  $Z$ , в частности позволяет найти ее математическое ожидание и дисперсию. Это, в свою очередь, дает возможность рассчитать

Таблица 2. Матрица распределения вероятностей вектора  $S$  для пяти отсчетов

		Количество -1 (третий индекс)					
		0	1	2	3	4	5
Кол-во +1 (первый индекс)	5	$P_{500}$	-	-	-	-	-
	4	$P_{410}$	$P_{401}$	-	-	-	-
	3	$P_{320}$	$P_{311}$	$P_{302}$	-	-	-
	2	$P_{230}$	$P_{221}$	$P_{212}$	$P_{203}$	-	-
	1	$P_{140}$	$P_{131}$	$P_{122}$	$P_{113}$	$P_{104}$	-
	0	$P_{050}$	$P_{041}$	$P_{032}$	$P_{023}$	$P_{014}$	$P_{005}$

Таблица 3. Вероятности всех значений выходного сигнала  $Z$  для пяти отсчетов

Значение $Z$	Вероятность появления на выходе
5	$P_{500}$
4	$P_{410}$
3	$P_{320} + P_{401}$
2	$P_{230} + P_{311}$
1	$P_{140} + P_{221} + P_{302}$
0	$P_{050} + P_{131} + P_{212}$
-1	$P_{041} + P_{122} + P_{203}$
-2	$P_{032} + P_{113}$
-3	$P_{023} + P_{104}$
-4	$P_{014}$
-5	$P_{005}$

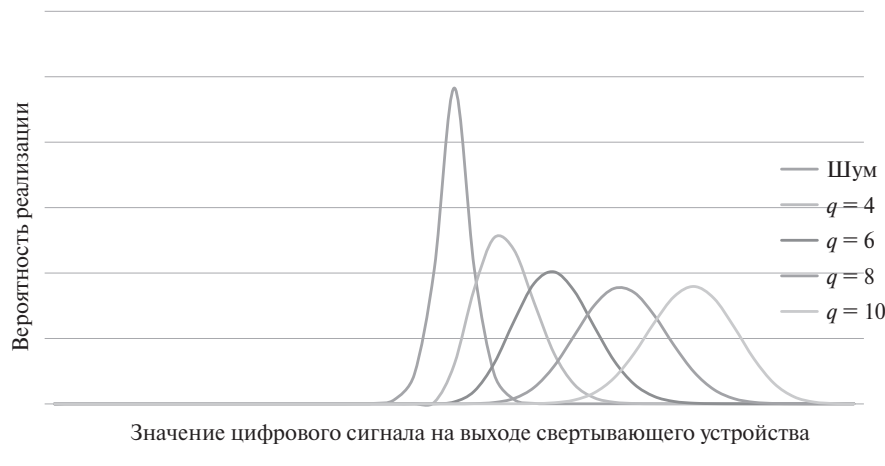


Рисунок 3. Распределение вероятностей выходного сигнала устройства свертки

отношение сигнал/шум (С/Ш) на выходе устройства.

Под С/Ш по напряжению понимается отношение математического ожидания (МО) величины  $Z$  при наличии полезного сигнала  $m_Z$  к среднему квадратическому значению выходного шума  $\sigma_{ш}$  при отсутствии полезного сигнала на входе.

Математическое ожидание величины  $Z$  можно найти как сумму произведений значений этой величины на вероятность их появления

$$m_Z = \sum_{i=-N}^N Z_i P_{Zi} \quad (7)$$

или как разность МО количества +1 и -1 на выходах умножителей

$$pm_Z = m^+ - m^-.$$

МО случайной дискретной величины находится как сумма произведений значений этой величины на вероятность их появления [2]. При трехуровневом квантовании случайная величина количества +1 может принимать только целочисленные значения от 0 до  $N$ . Вероятность  $P_i^+$  появления  $i$  плюс единиц равна сумме вероятностей реализации СТДВ, в которых количество +1 равно  $i$ . Другими словами, необходимо просуммировать все элементы строки матрицы вероятностей с номером  $i$ . При этом необходимо учесть, что количество минус единиц  $k$  может изменяться от 0 до  $(N - i)$ . Тогда выражение для расчета математического ожидания количества +1 примет вид

$$m^+ = \sum_{i=0}^N iP_i^+ = \sum_{i=0}^N i \sum_{k=0}^{N-i} P_{ijk}, \quad (8)$$

где  $i$  – значение случайной величины количества +1 в серии;  $k$  – значение случайной величины количества -1 в серии;  $P_{ijk}$  – элементы матрицы вероятностей на пересечении соответствующих строк и столбцов (табл. 1).

Аналогично для подсчета вероятности появления  $k$  минус единиц нужно суммировать элементы матрицы по столбцам. Математическое ожидание для -1

$$m^- = \sum_{k=0}^N kP_k^- = \sum_{k=0}^N k \sum_{i=0}^{N-k} P_{ijk}. \quad (9)$$

Расчеты показывают, что оба способа дают одинаковый результат. При отсутствии сигнала и симметричном законе распределения шума  $m_{Zш} = 0$ .

Среднее квадратическое значение (среднее квадратическое отклонение, СКО) выходной величины  $\sigma_Z$  равно корню квадратному из дисперсии  $D_Z$ , которую можно найти по распределению вероятностей  $Z$

$$D_Z = \sum_{i=-N}^N (Z_i - m_Z)^2 P_{Zi} \quad (10)$$

или по матрице распределения СДТВ  $W$  на выходах умножителей.

Второй способ рассмотрим подробнее.

Сначала по распределению СДТВ  $W$  в соответствии с выражениями (8–10) находятся МО и дисперсии количества плюс единиц  $W^+$  и минус единиц  $W^-$ .

С учетом того, что  $W^+$  и  $W^-$  – это зависимые величины (чем больше +1 в серии, тем меньше количество -1), формула для расчета  $D_{Zш}$  приобретает вид

$$D_Z = D^+ + D^- + 2K(S^+, S^-), \quad (11)$$

где  $D^+$  и  $D^-$  – дисперсии случайных величин  $S^+$  и  $S^-$ ;  $K(S^+, S^-)$  – ковариация случайных величин  $S^+$  и  $S^-$ .

Дисперсии этих случайных величин находятся при помощи следующих выражений:

$$\begin{aligned} D^+ &= \sum_{i=0}^N (i - m^+)^2 P_i^+ = \sum_{i=0}^N (i - m^+)^2 \sum_{k=0}^{N-i} P_{ijk}, \\ D^- &= \sum_{k=0}^N (k - m^-)^2 P_k^- = \sum_{k=0}^N (k - m^-)^2 \sum_{i=0}^{N-k} P_{ijk}. \end{aligned} \quad (12)$$

Ковариация, т.е. МО произведения флуктуаций случайных величин, при известных МО самих величин может быть определена как разность МО произведения случайных величин и произведения их математических ожиданий

$$K(S^+, S^-) = M[S^+S^-] - m^+m^-, \quad (13)$$

где МО произведения может быть рассчитано по формуле

$$M[S^+S^-] = \sum_{i=0}^N \sum_{k=0}^{N-i} ijP_{ijk}. \quad (14)$$

Расчеты подтверждают, что оба способа дают одинаковый результат. Первый способ кажется проще, однако для получения  $P_Z = P(Z = i - k)$  необходимо просуммировать отдельные элементы матрицы распределения вероятностей СДТВ (13). Практика показывает, что с точки зрения вычислительных затрат при известных дисперсиях и МО величин  $S^+$  и  $S^-$  оба способа примерно равны.

Среднее квадратическое значение выходного шума  $\sigma_{ш}$  равно корню квадратному из дисперсии шума  $D_{Zш}$  при отсутствии полезного сигнала на входе. С учетом того, что МО шумов на выходе равно 0, расчетная формула для дисперсии принимает вид

$$D_{Zш} = \sum_{i=-N}^N Z_i^2 P_{Zi}. \quad (15)$$

Проанализируем результаты расчетов математического ожидания  $m_Z$  и среднего квадратического отклонения  $\sigma_Z$  величины  $Z$  на выходе

свертывающего устройства с трехуровневым квантованием для разных порогов квантования (ограничения) и разной энергии сигнала (параметра обнаружения  $q$ ).

На рис. 4а приведены графики зависимости МО выходных сигналов от уровня ограничения для  $q = 5$ . На рис. 4б показано влияние порога ограничения (порог  $U_0$  нормирован к  $\sigma$  входных шумов) на СКО результата обработки при приеме шума и смеси сигнала с шумом для двух значений параметра обнаружения. Как видно, МО выходных сигналов уменьшается с ростом порога ограничения. Это связано с тем, что значения входных сигналов и помех в диапазоне  $(-U_0; +U_0)$  преобразуются в нули, т.е. подавляются.

СКО выходного шума также уменьшается при увеличении  $U_0$ . Сложнее зависимость СКО выходного сигнала  $\sigma_Z$  когда на входе зашумленный сигнал. При малых порогах ограничения ( $U_0 \rightarrow 0$ ) появление сигнала на входе приводит к уменьшению СКО (или дисперсии) на выходе. Увеличение порога  $U_0$  при постоянном сигнале вызывает сначала возрастание  $\sigma_Z$  до величины  $\sigma_{ш}$ , а затем – уменьшение.

Особенностью обработки сигналов с тремя уровнями квантования в отличие от линейных многоуровневых устройств является нелинейная зависимость дисперсии выходного сигнала от энергии входного сигнала при фиксированных порогах ограничения (квантования).

Необходимо отметить, что знание распределения вероятностей выходной величины  $Z$  позволяет найти показатели качества обнаружения

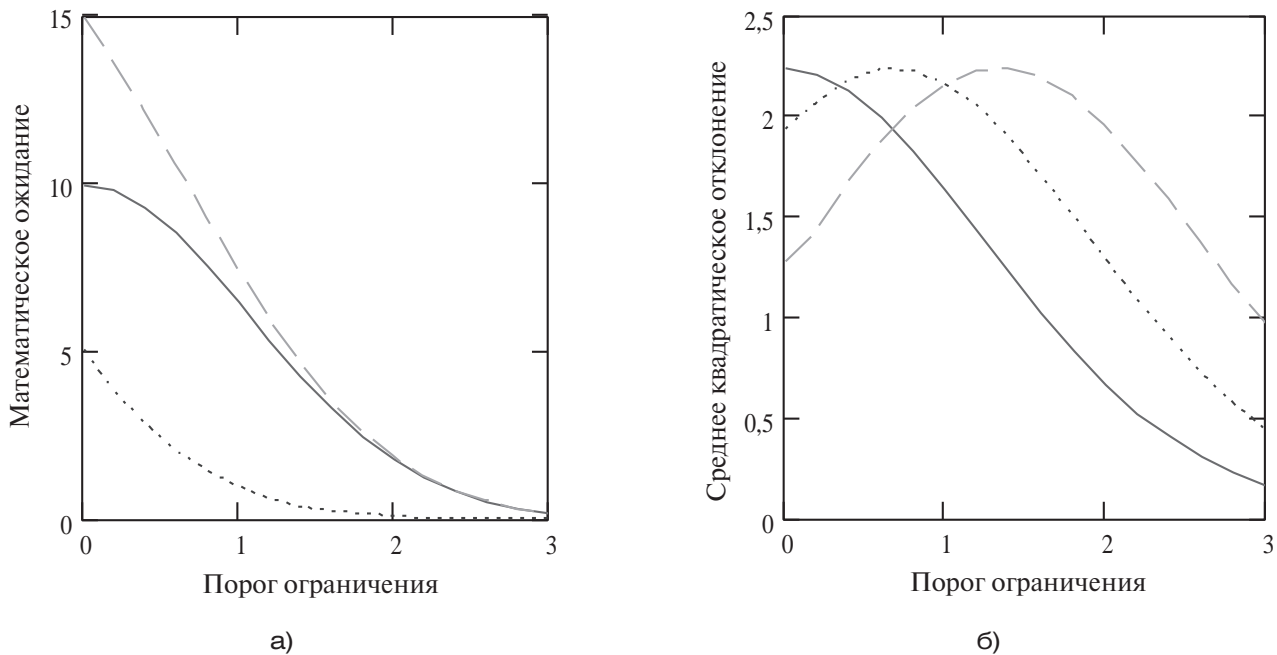


Рисунок 4. Статистические характеристики выходной величины: а – зависимость математического ожидания от порога ограничения; б – зависимость среднего квадратического значения от порога квантования

устройства, т.е. вероятность правильного обнаружения  $D$  и вероятность ложной тревоги  $F$ .

Для этого необходимо задать порог обнаружения  $Z_0$ , т.е. значение выходной величины, при превышении которой принимается решение о наличии сигнала цели во входной реализации. Вероятность правильного обнаружения находится как сумма вероятностей того, что выходная величина  $Z$  примет значение не меньше порога обнаружения при условии, что на входе сигнал с шумом

$$D = \sum_{n=Z_0}^N P_{Zn}(C + \text{Ш}).$$

Вероятность ложной тревоги находится как сумма вероятностей того, что выходная величина  $Z$  не меньше порога обнаружения при условии, что на входе только шум

$$F = \sum_{n=Z_0}^N P_{Zn}(\text{Ш}).$$

Расчет  $D$  и  $F$  для разноразмерной энергии сигнала  $q$  и разных порогов обнаружения  $Z_0$  позволяет построить рабочие характеристики обнаружителя (зависимость  $D(F)$  при фиксированном сигнале  $q = \text{const}$ ) и кривые обнаружения (зависимость  $D(q)$  при фиксированной вероятности ложной тревоги  $F = \text{const}$ ).

Кроме того, производя такие расчеты для разных порогов квантования  $U_0$ , можно оценить их влияние на показатели качества обнаружения.

Знание статистических характеристик сигналов на выходе свертывающего устройства

обеспечивает расчет отношения С/Ш и показателей качества обнаружения при заданных порогах квантования.

С другой стороны, рассчитывая с помощью данной методики статистические характеристики для разных значений  $U_0$ , можно определить оптимальные пороги квантования, при которых отношение С/Ш и вероятность правильного обнаружения достигают максимума.

### Выводы

Разработана методика расчета закона распределения вероятностей на выходе устройства обработки с трехуровневым квантованием сигналов. Достоинства предлагаемой методики заключаются в том, что она позволяет рассчитать статистические характеристики сигналов с трехуровневым квантованием для шумов с любым известным законом распределения, для сигналов произвольной формы (в том числе с внутриимпульсной модуляцией параметров), для сигналов одинаковой формы с разной амплитудой (энергией), при рассогласовании параметров принимаемого и опорного сигналов, а также для различных уровней квантования.

Моделирование трехуровневого квантования сигналов с использованием датчика случайных чисел, распределенных по нормальному закону, показало, что рассчитанные и полученные в результате эксперимента результаты совпадают, что доказывает правильность предлагаемой методики.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Митюшов А.И., Косарев О.В. Анализ статистических характеристик сигналов на выходе устройств обработки с тремя уровнями квантования. Актуальные вопросы развития радиоэлектронной техники радиотехнических войск ВВС: тематический научный сборник № 13. СПб.: СПВВУРЭ (ВИ), 2005. С. 25–33.
2. Кузьмин С.З. Основы проектирования систем цифровой обработки радиолокационной информации. М.: Радио и связь, 1986. С. 35–52.
3. Горбунов Ю.Н. Цифровая обработка радиолокационных сигналов в условиях использования грубого (малоразрядного) квантования. М.: Федеральное космическое агентство, ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт (ЦНИРТИ) им. академика А.И. Берга», 2007. 87 с.
4. Литюк В.Н., Литюк Л.В. Методы цифровой многопроцессорной обработки ансамблей радиосигналов. М.: Солон-Пресс, 2007. 592 с.
5. Черенок Н.Г. Сверхширокополосные переносчики, формируемые классическими ортогональными полиномами. СПб.: МВАА, 2018. С. 17–31.
6. Шахмейстер Л.Е. Цифро-частотные и время-импульсные преобразователи информации. М.: КДУ, 2008. С. 109–124.
7. Хармут Х.Ф. Несинусоидальные волны в радиолокации и радиосвязи. М.: Мир, 1983. 376 с.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Митюшов Александр Иванович**, к.т.н., доцент, профессор, кафедра автономных информационных и управляющих систем, Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, Российская Федерация, 190005, Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, д. 1, тел.: 8 (812) 495-77-58, e-mail: bgty\_e6@mail.ru.

**Егоренков Леонид Семенович**, к.т.н., с.н.с., чл.-кор. РАН, заведующий кафедрой автономных информационных и управляющих систем, Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, Российская Федерация, 190005, Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, д. 1, тел.: 8 (921) 444-17-12, e-mail: bgty\_e6@mail.ru.

**Карпов Сергей Анатольевич**, к.т.н., доцент, профессор, кафедра автономных информационных и управляющих систем, Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, Российская Федерация, 190005, Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, д. 1, тел.: 8 (812) 495-77-58, e-mail: bgty\_e6@mail.ru.

A.I. Mityushov, L.S. Egorenkov, S.A. Karpov

## FEATURES OF MATHEMATICAL DESCRIPTION OF RANDOM SIGNALS WITH THREE-LEVEL OF QUANTIZATION

The paper describes the method of mathematical description of an additive mixture signal with noise when using the three-level quantization. Method is based on the presentation of the implementation of the signal after quantization in the form of a random discrete 3D vector. It is proposed that statistical calculation technique characteristics of three-level signals. The technique allows visualizing the probability distribution law of radar signals of different shapes on the background noise and calculating its numeric parameters. Knowledge of the law of probability distributions, assuming that the only inlet noise and distribution law of probability signal with noise allows to calculate the detection quality indicators to build a detector performance. Three-level quantization allows to considerably simplify the technical implementation of electronic signal processing device with acceptable energy loss.

**Keywords:** discrete random variables, discrete random vector, polynomial distribution law, quantization thresholds, matrix of probabilities

## REFERENCES

1. Mityushov A.I., Kosarev O.V. Analysis of the statistical characteristics of signals at the output of the processing devices with three tiers of quantization. In: *Aktualnye voprosy razvitiya radioelektronnoi tekhniki radiotekhnicheskikh voisk VVS: tematicheskii nauchnyi sbornik № 13* [Topical issues of development of radio-electronic equipment of radio engineering troops of the air force: thematic scientific collection of publications no. 13]. St. Petersburg, SPVVURE Publ., 2005, pp. 25–33. (In Russian).
2. Kuzmin S.Z. *Osnovy proektirovaniya sistem tsifrovoi obrabotki radiolokatsionnoi informatsii* [Fundamentals of designing systems of digital processing of radar information]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1986, pp. 35–52. (In Russian).
3. Gorbunov Y.N. *Tsifrovaya obrabotka radiolokatsionnykh signalov v usloviyakh ispolzovaniya grubogo (malorazryadnogo) kvantovaniya* [Digital processing of radar signals in the conditions of use of gross (malorazryadnogo) quantization]. Moscow, Federal Space Agency, TsNIRTI Publ., 2007, 87 p. (In Russian).
4. Lityuk V.N., Lityuk L.V. *Metody tsifrovoi mnogoprotsessornoi obrabotki ansamblei radiosignalov* [Methods digital radio ensembles multiprocessing]. Moscow, Solon Press Publ., 2007, 592 p. (In Russian).
5. Cherenok N.G. *Sverkhshirokopolosnye perenoschiki, formiruemye klassicheskimi ortogonalnymi polinomami* [Ultrawideband vectors generated by classical orthogonal polynomials]. St. Petersburg, MVAА Publ., 2018, pp. 17–31. (In Russian).
6. Shakhmeister L.E. *Tsifro-chastotnye i vremya-impul'snye preobrazovateli informatsii* [Digital-frequency and time-pulse data converters]. Moscow, KDU Publ., 2008, pp. 109–124. (In Russian).
7. Harmuth H.F. *Nonsinusoidal waves for radar and radio communication*. Academic Press, 1981, 396 p.

## AUTHORS

**Mityushov Aleksandr**, Ph. D., associate professor, Ustinov Baltic State Technical University «VOENMEH», 1, 1<sup>st</sup> Krasnoarmejskaja St., Saint-Petersburg, 190005, Russian Federation, tel.: +7 (812) 316-24-77, e-mail: bgty\_e6@mail.ru.

**Egorenkov Leonid**, Ph. D., professor, Ustinov Baltic State Technical University «VOENMEH», 1, 1<sup>st</sup> Krasnoarmejskaja St., Saint-Petersburg, 190005, Russian Federation, tel.: +7 (921) 444-17-12, e-mail: bgty\_e6@mail.ru.

**Karpov Sergey**, Ph. D., associate professor, Ustinov Baltic State Technical University «VOENMEH», 1, 1<sup>st</sup> Krasnoarmejskaja St., Saint-Petersburg, 190005, Russian Federation, tel.: +7 (812) 316-24-77, e-mail: bgty\_e6@mail.ru.