

УДК 621.396.67

ВСКРЫТИЕ ВРЕМЕННОЙ СТРУКТУРЫ ПАКЕТНЫХ ФАЗОМАНИПУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ

А. П. Дятлов, П. А. Дятлов, А. Н. Шостак

Институт радиотехнических систем и управления инженерно-технологической
академии Южного Федерального Университета

Статья получена 25 февраля 2015 г.

Аннотация. Исследованы алгоритм и структура автокорреляционного анализатора составных ФМС, обладающего высокими достоверностью и быстродействием при вскрытии временной структуры пакетных ФМС. Представлен стенд для моделирования процесса анализа составных ФМС и оптимизации основных характеристик автокорреляционного анализатора.

Ключевые слова: радиомониторинг, фазоманипулированные сигналы, помехоустойчивость, достоверность, быстродействие, отношение сигнал/шум, корреляционная обработка, некогерентная обработка.

Abstract. The algorithm and the structure of the autocorrelation analyzer component PSK signal having a high reliability and performance at the opening of the temporal structure of the packet PSK signals are researched. The stand for modeling the analysis of composite PSK signals and optimization of the basic characteristics of the autocorrelation analyzer is presented.

Keywords: radiomonitoring, phase-shift keyed signals, noise immunity, reliability, performance, signal/noise ratio, correlation processing, incoherent processing.

Широкое распространение в системах спутниковой связи получил многостанционный доступ с временным разделением каналов (МДВР). Обычно цифровые системы связи с МДВР используют для передачи группы каналов на основе использования группового цифрового сигнала, разбиваемого на пакеты и кадры. Каждый пакет или кадр содержит преамбулу, необходимую для синхронизации, и информационную часть. При формировании преамбулы, как

правило, используются процессы с дискретным спектром, а при формировании информационной части, используются фазоманипулированные сигналы (ФМС) с псевдослучайной манипулирующей функцией, имеющие сплошной спектр.

При радиомониторинге ФМС с неизвестной формой для вскрытия спектрально-временной структуры используются спектральные и корреляционные методы. При приёме высокоскоростных ФМС автокорреляционные методы обеспечивают по сравнению со спектральными методами более высокую точность оценки временной структуры при меньшей аппаратной сложности и заслуживают особого внимания [1].

В данной работе исследуются принципы построения автокорреляционного анализатора (АА) составных ФМС, используемых в комплексах радиомониторинга, обеспечивающего повышение помехоустойчивости и быстродействия при вскрытии спектрально-временного состава радиоизлучений с МДВР.

В современных системах с МДВР применяют два способа организации цифрового потока:

- 1) при фиксированной длительности кадров используют пакеты переменной длительности;
- 2) при фиксированной длительности пакетов изменяют период повторения пакетов в кадре.

На рис. 1 приведена структурная схема автокорреляционного анализатора (АА), где $\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \Pi_4$ – перемножители; $\Phi_{в1}, \Phi_{в2}$ – фазовращатели; $ЛЗ_1, ЛЗ_2$ – линии задержки; $И_1, И_2, И_3, И_4$ – коммутируемые интеграторы; $Кв_1, Кв_2, Кв_3, Кв_4$ – квадраторы; $С_1, С_2$ – сумматоры; $ПУ_1, ПУ_2$ – пороговые устройства; $Сч_1, Сч_2$ – счётчики; Упр – управитель; ГТИ – генератор тактовых импульсов; РУ – решающее устройство; $УИК_1, УИК_2$ – устройства извлечения квадратного корня; $АКО_1, АКО_2$ – автокорреляторы с квадратурной обработкой.

Для обеспечения высокой помехоустойчивости радиомониторинг (РМ) фазоманипулированных сигналов (ФМС) в системах связи с МДВР осуществляется в несколько этапов.

На первом этапе осуществляется обнаружение и предварительное оценивание средней частоты ФМС \hat{f}_s и ширины спектра ФМС $\Delta\hat{f}_s$. Поскольку для ФМС имеем $\Delta f_s = 2/T_3$, где T_3 – длительность элемента манипулирующей последовательности, то на первом этапе также оценивается \hat{T}_3 .

Второй этап предназначен для вскрытия спектрально-временной структуры пакетов ФМС, что позволяет затем перейти к третьему этапу РМ, посвящённому перехвату выбранных каналов передачи информации систем связи с МДВР.

В данном подразделе в рамках второго этапа РМ рассмотрим принципы построения АА.

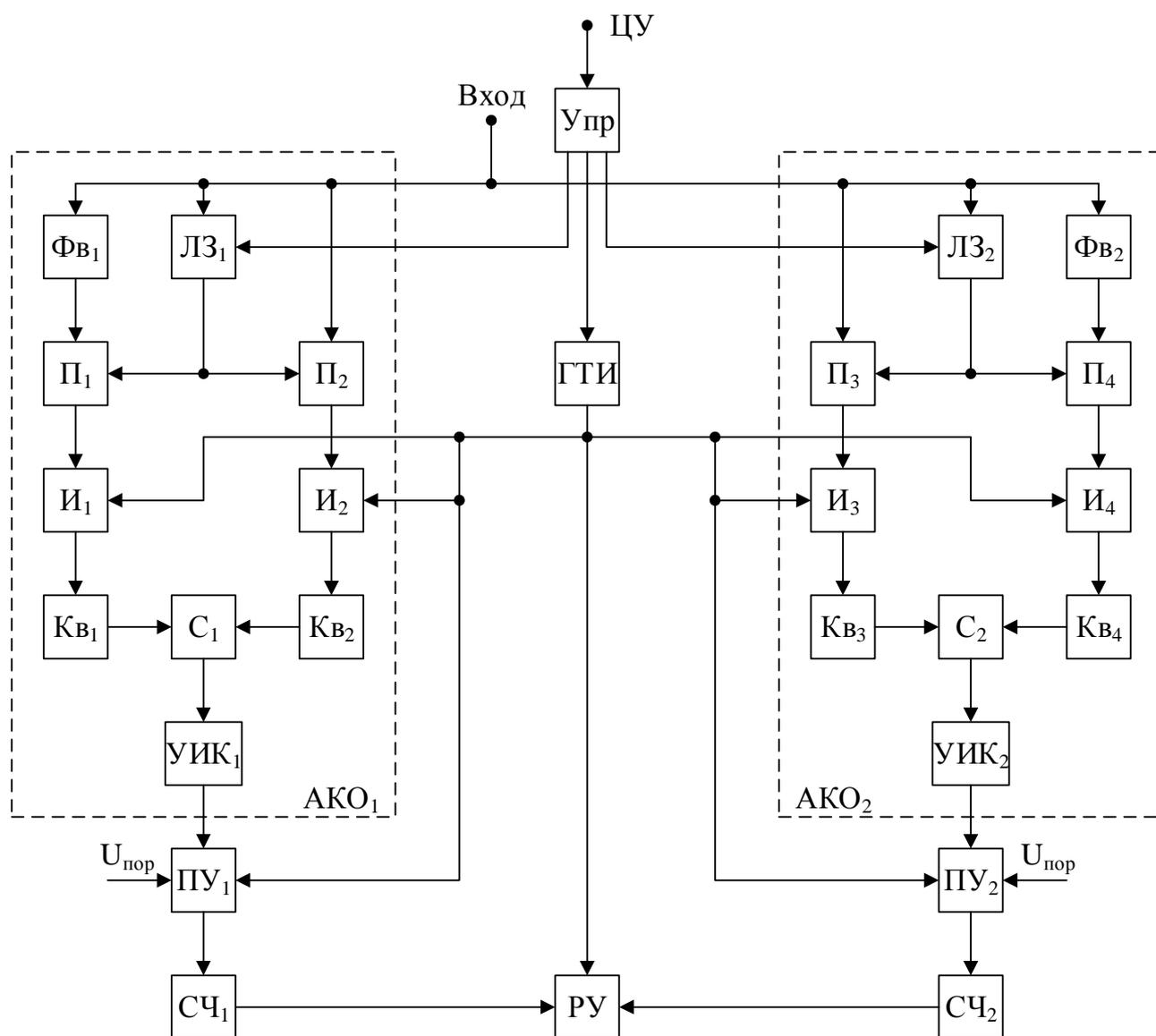


Рис. 1. Структура автокорреляционного анализатора

На вход АА поступает аддитивная смесь

$$y(t) = S(t) + n(t) \text{ при } t_0 \leq t \leq t_0 + T_C;$$

$$S(t) = U_{ms} \Pi(t) \cos[2\pi f_s t + \varphi_s],$$

где $S(t)$ – ФМС; U_{ms}, f_s, φ_s – амплитуда, частота и фаза ФМС; $\Pi(t)$ – манипулирующая функция; $n(t)$ – гауссова стационарная помеха; t_0, T_C – начало и длительность сеанса РМ.

ФМС в системах с МДВР состоят из пакетов и кадров, в которых используются как детерминированные, так и стохастические манипулирующие функции.

Для случая, когда в $\Pi(t)$ используется детерминированная последовательность элементов с коэффициентами α_k одного и того же знака, энергетический спектр $G(f)$ соответствует фрагменту в виде гармонического колебания (Γ):

$$G_1(f) = \frac{U_{ms}^2}{2} \delta(f - f_s) \text{ при } t_1 \leq t \leq t_1 + T_\Gamma,$$

где t_1, T_Γ – момент начала и длительность фрагмента гармонического колебания.

Автокорреляционная функция фрагмента ФМС $R_1(\tau)$, соответствующая гармоническому колебанию имеет вид:

$$R_1(\tau) = \frac{U_{ms}^2}{2} r_1(\tau) \cos \omega_s \tau, \text{ при } \tau \in [0, T_\Gamma];$$

$$r_1(\tau) = 1 - \frac{|\tau|}{T_\Gamma}; \omega_s = 2\pi f_s,$$

где $r_1(\tau)$ – нормированная огибающая автокорреляционной функции $R_1(\tau)$.

Для случая, когда в $\Pi(t)$ используется детерминированная последовательность элементов по закону меандра, энергетический спектр двухпозиционного ФМС с манипуляцией $[0, \pi]$ имеет вид:

$$G_2(f) = \frac{2U_{ms}^2}{\pi} \left\{ \sum_{k_m}^{\infty} \frac{1}{2k_m - 1} \delta[f - f_s + 2(k_m - 1)\Omega] - \sum_{k_m}^{\infty} \frac{1}{2k_m - 1} \delta[f - f_s - 2(k_m - 1)\Omega] \right\}$$

при $t_2 \leq t \leq t_2 + T_M$,

где $\Omega = \frac{2\pi}{T_3}$ – круговая частота манипуляции; t_2 , T_M – момент начала и длительность фрагмента ФМС с манипуляцией по закону меандра (М); T_3 – длительность элемента.

Автокорреляционная функция фрагмента ФМС с манипулирующей функцией по закону меандра $R_2(\tau)$ имеет вид:

$$R_2(\tau) = \frac{U_{ms}^2}{2} r_2(\tau) \cos \omega_s \tau \text{ при } (i - 1)T_3 \leq \tau \leq iT_3; i \in \left[1, \frac{T_M}{T_3}\right];$$

$$r_2(\tau) = \left| 1 - \frac{2(\tau - (i - 1)T_3)}{T_3} \right|.$$

Для случаев, когда манипулирующая последовательность $\Pi(t)$ представляет собой псевдослучайную последовательность элементов (ПСП), энергетический спектр и автокорреляционная функция ФМС при равновероятных скачках фазы $\Delta\varphi \in [0, \pi]$ имеет вид:

$$G_3(f) = \frac{U_{ms}^2}{2} T_3 \text{sinc}^2[\pi(f - f_s)T_3];$$

$$R_3(\tau) = \frac{U_{ms}^2}{2} r_3(\tau) \cos \omega_s \tau \text{ при } t_3 \leq t \leq t_3 + T_I; r_3(\tau) = 1 - \frac{|\tau|}{T_3},$$

где t_3 , T_I – момент начала и длительность информационного фрагмента ФМС с манипуляцией ПСП (И).

В общем случае в системах с МДВР ФМС имеют в своём составе все вышеперечисленные фрагменты.

Поскольку при проведении РМ, как правило, осуществляется обработка ФМС с неизвестной формой, то наличие в составе ФМС фрагментов различных типов приводит к нестационарному характеру энергетического спектра,

параметры которого зависят от априорно неизвестных состава, длительности и закона формирования манипулирующей функции.

Для вскрытия спектрально-временной структуры таких ФМС, также как и локально-стационарных случайных процессов, в условиях большой априорной неопределённости о временных параметрах наиболее простая аппаратная реализация обеспечивается при использовании адаптивного многоканального корреляционного анализа [1].

Анализ законов изменения нормативных огибающих автокорреляционных функция вышерассмотренных фрагментов ФМС показывает, что для из аппроксимации достаточно иметь информацию о двух ординатах огибающей коэффициента автокорреляции $r_s(\tau)$. Для классификации таких фрагментов ФМС, как Г, М и И достаточно использовать набор ординат:

$$\left\{ r_s\left(\frac{T_{\text{Э}}}{2}\right), r_s(T_{\text{Э}}) \right\},$$

поскольку при этом для Г имеем $r_s\left(\frac{T_{\text{Э}}}{2}\right) \rightarrow 1, r_s(T_{\text{Э}}) \rightarrow 1$, для М имеем $r_s\left(\frac{T_{\text{Э}}}{2}\right) \rightarrow 0, r_s(T_{\text{Э}}) \rightarrow 1$, для И имеем $r_s\left(\frac{T_{\text{Э}}}{2}\right) = 0.5, r_s(T_{\text{Э}}) \rightarrow 0$. Кроме того, имеется возможность классификации защитного промежутка (З), так как при отсутствии ФМС имеем $r_s\left(\frac{T_{\text{Э}}}{2}\right) \rightarrow 0, r_s(T_{\text{Э}}) \rightarrow 0$.

Типовая структура пакета ФМС приведена на рис. 2, где Пр – преамбула; Г – гармонический фрагмент; М – меандровый фрагмент; И – информационная часть; З – защитный промежуток; П – пакет; К – кадр; t_1, t_2, t_3, t_4 – моменты начала Г и Пр, М, И, З; t_5, t_6 – моменты окончания пакета (П) и кадра (К); ΔT – интервал временной неопределённости.

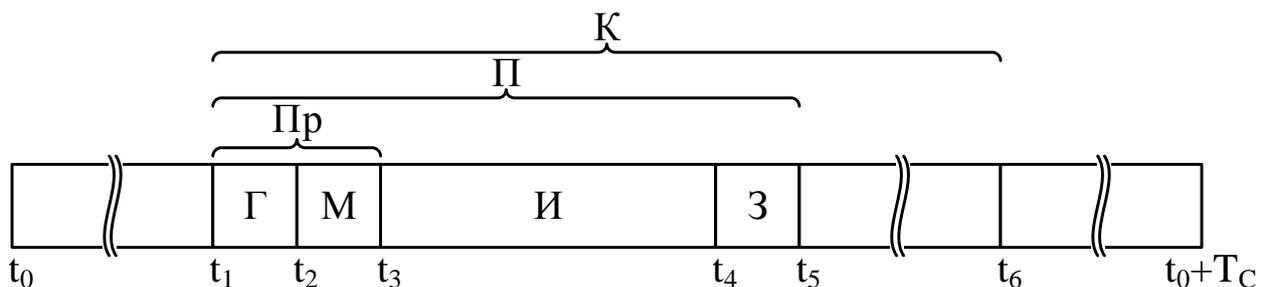


Рис. 2. Структура пакета ФМС

Из структуры пакета следует, что

$$\begin{aligned} \Delta T &= t_1 - t_0 < T_{\Pi}; T_{\Gamma} = t_2 - t_1 = n_{\Gamma}T_{\text{Э}}; T_{\text{М}} = t_3 - t_2 = n_{\text{М}}T_{\text{Э}}; \\ T_{\text{И}} &= t_4 - t_3 = n_{\text{И}}T_{\text{Э}}; T_{\text{ПР}} = T_{\Gamma} + T_{\text{М}}; T_{\text{З}} = t_5 - t_4 = n_{\text{З}}T_{\text{Э}}; \\ T_{\Pi} &= t_5 - t_1 = T_{\Gamma} + T_{\text{М}} + T_{\text{И}} + T_{\text{З}}; T_{\text{К}} = t_6 - t_1 = n_{\text{К}}T_{\Pi}; \\ n_{\Pi} &= n_{\Gamma} + n_{\text{М}} + n_{\text{И}} + n_{\text{З}}, \end{aligned}$$

где $T_{\Gamma}, T_{\text{М}}$ – длительность гармонического и меандрового фрагментов; $T_{\text{ПР}}$ – длительность преамбулы; $T_{\text{И}}$ – длительность информационной части пакета; $T_{\text{З}}$ – длительность защитного промежутка; $T_{\Pi}, T_{\text{К}}$ – длительность пакета и кадра; $n_{\Gamma}, n_{\text{М}}, n_{\text{И}}, n_{\text{З}}, n_{\Pi}, n_{\text{К}}$ – количество элементов в $\Gamma, \text{М}, \text{И}, \text{З}, \Pi, \text{К}$.

Для вскрытия спектрально-временной структуры ФМС необходимо осуществить классификацию компонентов $\Gamma, \text{М}, \text{И}, \text{З}, \Pi$, а также оценивать временные параметры $t_1, T_{\Gamma}, T_{\text{М}}, T_{\text{И}}, T_{\text{З}}, T_{\Pi}, T_{\text{К}}$.

С учётом вышеизложенного при построении АА можно ограничиться двумя каналами автокорреляторов с квадратурной обработкой (АКО), в одном из которых временной сдвиг, вносимый ЛЗ₁, равен $\tau_1 = T_{\text{Э}}/2$, а в другом временной сдвиг, вносимый ЛЗ₂, равен $\tau_2 = T_{\text{Э}}$.

Для уменьшения погрешности оценивания временных параметров фрагментов ФМС в АА предлагается перейти от усреднения по времени к усреднению по множеству за счёт использования вместо аналогового усреднения дискретного усреднения за счёт использования коммутируемых интеграторов (КИ) с импульсной реакцией

$$h(t) = \frac{1}{T} \sum_{j=1}^{N_c} t_j \text{ при } t_0 + (j-1)T \leq t_j \leq t_0 + jT; j \in [1, N_c]; T \geq 3T_{\text{Э}},$$

где T – постоянная времени КИ; N_c – количество циклов интегрирования, соответствующих длительности сеанса РМ.

При воздействии на вход АКО₁ и АКО₂ аддитивной смеси $y_2(t)$ на выходе коммутируемых интеграторов (И₁, И₂) и (И₃, И₄) имеем квадратурные составляющие

$$U_{y1}(t, \tau) = \int_{-\infty}^t h(t-x)y_2(x)y_2(x-\tau)dx = U_{s1}(t) + U_{sn1}(t) + U_{n1}(t);$$

$$U_{y2}(t, \tau) = \int_{-\infty}^t h(t-x)y_{2\perp}(x)y_2(x-\tau)dx = U_{s2}(t) + U_{sn2}(t) + U_{n2}(t),$$

где $U_{s1}(t), U_{s2}(t)$ – косинусная и синусная составляющие компонентов, обусловленных взаимодействием типа «сигнал-сигнал»; $U_{sn1}(t), U_{sn2}(t)$ – косинусная и синусная составляющие компонентов, обусловленных взаимодействием типа «сигнал-помеха»; $U_{n1}(t), U_{n2}(t)$ – косинусная и синусная составляющие компонентов, обусловленных взаимодействием типа «помеха-помеха».

При использовании КИ компоненты «сигнал-сигнал» имеют следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} U_{s1}(t) &= \sum_{j=1}^N \frac{K_{\Pi} U_{ms}^2}{2T} r_s(\tau) \cos(2\pi f_s \tau) t \\ U_{s2}(t) &= \sum_{j=1}^N \frac{K_{\Pi} U_{ms}^2}{2T} r_s(\tau) \sin(2\pi f_s \tau) t \end{aligned} \right\} \text{при } t_0 + (j-1)T \leq t \leq t_0 + jT,$$

где K_{Π} – коэффициент передачи с размерностью 1/В.

Для обеспечения инвариантности амплитуды выходного эффекта от частоты ФМС f_s в АКО используется квадратурная обработка, и при этом на выходе устройства извлечения квадратного корня (УИК) получаем:

$$U_s(t) = \sum_{j=1}^N \frac{K_{\Pi} U_{ms}^2}{2T} r_s(\tau) t \text{ при } t_0 + (j-1)T \leq t \leq t_0 + jT.$$

Наибольшая помехоустойчивость АА при отсчёте $U_s(t)$ в момент времени $t_0 + jT$, что обеспечивается при подаче на вход порогового устройства (ПУ), наряду с напряжением $U_s(t)$, стробирующего напряжения

$$U_{СТР}(t) = U_0 \sum_{j=2}^N \text{rect}[t - t_j],$$

$$rect[t - t_j] = \begin{cases} 1 & \text{при } t_0 + (j - 1)T \leq t_j \leq t_0 + (j - 1)T + \tau_c; \\ 0 & \text{при других } t, \end{cases}$$

где U_0 – амплитуда; $rect[x]$ – временное окно; τ_c – длительность строба.

На этом интервале времени, когда выполняется условие $U_s(t) > U_{\text{ПОР}}$, где $U_{\text{ПОР}}$ – пороговое напряжение, на выходе ПУ получаем последовательность δ -импульсов с нормированной амплитудой

$$U_{\text{ПУ}}(t) = U_0 \sum_{i=2}^{N_\Phi} rect[t - t_i] \text{ при } t_H + (j - 1)T \leq t \leq t_H + (j - 1)T + \tau_c;$$

$$i \in [1, N_\Phi]; N_\Phi = \frac{T_\Phi}{T},$$

где t_H , T_Φ – начало и длительность обнаруженного фрагмента ФМС; N_Φ – количество импульсов на выходе ПУ.

После подсчёта количества импульсов в счётчике (Сч) в решающем устройстве (РУ) обеспечивается оценивание временных параметров фрагмента ФМС: \hat{t}_H , \hat{T}_Φ .

Для обеспечения синхронизации при функционировании КИ, ПУ и РУ используется генератор тактовых импульсов (ГТИ), момент начала работы которого t_0 и период повторения импульсов T устанавливаются по командам поступающих от Упр. Кроме того, Упр обеспечивает подстройку ЛЗ₁ до $\tau_1 = T_\Delta/2$ и ЛЗ₂ до $\tau_2 = T_\Delta$.

На выходе каждого канала АА для различных фрагментов ФМС имеем:

– при приёме фрагментов с ГК

$$\left. \begin{aligned} U_{s1K}(t) &= \sum_{j=1}^{n_\Gamma} \frac{K_\Pi U_{ms}^2}{2T} rect[t - t_j] \\ U_{s2K}(t) &= \sum_{j=1}^{n_\Gamma} \frac{K_\Pi U_{ms}^2}{2T} rect[t - t_j] \end{aligned} \right\} \text{при } t_1 + (j - 1)T \leq t \leq t_1 + (j - 1)T + \tau_c;$$

$$j \in [1, n_\Gamma]; T_\Gamma = \hat{n}_\Gamma T;$$

– при приёме фрагмента с ФМ-М

$$\left. \begin{aligned} U_{s1K}(t) &\rightarrow 0 \\ U_{s2K}(t) &= \sum_{j=1}^{n_M} \frac{K_{\Pi} U_{ms}^2}{2T} \text{rect}[t - t_j] \end{aligned} \right\} \text{при } t_2 + (j - 1)T \leq t \leq t_2 + (j - 1)T + \tau_C;$$

$$j \in [1, n_M]; T_M = \hat{n}_M T;$$

– при приёме фрагмента с ФМ-ПСП

$$\left. \begin{aligned} U_{s1K}(t) &= \sum_{j=1}^{n_{И}} \frac{K_{\Pi} U_{ms}^2}{2T} \text{rect}[t - t_j] \\ U_{s2K}(t) &\rightarrow 0 \end{aligned} \right\} \text{при } t_3 + (j - 1)T \leq t \leq t_3 + (j - 1)T + \tau_C;$$

$$j \in [1, n_{И}]; T_{И} = \hat{n}_{И} T;$$

где $U_{s1K}(t)$, $U_{s2K}(t)$ – напряжение на выходе АКО₁ и АКО₂, обусловленные взаимодействием типа «сигнал-сигнал».

В защитном промежутке в связи с отсутствием сигнала имеем

$$\left. \begin{aligned} U_{s1K}(t) &\rightarrow 0 \\ U_{s2K}(t) &\rightarrow 0 \end{aligned} \right\} \text{при } t_4 + (j - 1)T \leq t \leq t_4 + (j - 1)T + \tau_C;$$

$$j \in [1, n_3]; T_3 = \hat{n}_3 T.$$

С учётом действия помехи $n(t)$ для вскрытия спектрально-временной структуры пакета используются алгоритмы обнаружения « n » из « n », характеризующиеся следующими соотношениями:

$$H_{\Gamma}: \{U_{y1K}(T) > U_{\text{ПОР}}; U_{y2K}(T) > U_{\text{ПОР}}\} \text{при } \hat{t}_1 \leq t \leq \hat{t}_1 + \hat{T}_{\Gamma}, n = \hat{n}_{\Gamma};$$

$$H_M: \{U_{y1K}(T) < U_{\text{ПОР}}; U_{y2K}(T) > U_{\text{ПОР}}\} \text{при } \hat{t}_2 \leq t \leq \hat{t}_2 + \hat{T}_M, n = \hat{n}_M;$$

$$H_{И}: \{U_{y1K}(T) > U_{\text{ПОР}}; U_{y2K}(T) < U_{\text{ПОР}}\} \text{при } \hat{t}_3 \leq t \leq \hat{t}_3 + \hat{T}_{И}, n = \hat{n}_{И};$$

$$H_3: \{U_{y1K}(T) < U_{\text{ПОР}}; U_{y2K}(T) < U_{\text{ПОР}}\} \text{при } \hat{t}_4 \leq t \leq \hat{t}_4 + \hat{T}_3, n = \hat{n}_3,$$

где H_{Γ} , H_M , $H_{И}$, H_3 – гипотезы о наличии фрагментов Γ , M , $И$, 3 ; $U_{y1K}(T)$, $U_{y2K}(T)$ – выходной эффект в АКО₁ и АКО₂ с учётом помехи $n(t)$; \hat{t}_1 , \hat{t}_2 , \hat{t}_3 , \hat{t}_4 – оценки моментов начала фрагментов Γ , M , $И$, 3 ; \hat{n}_{Γ} , \hat{n}_M , $\hat{n}_{И}$, \hat{n}_3 – оценки количества импульсов при обнаружении фрагментов Γ , M , $И$, 3 .

На основе информации об оценках моментов времени \hat{t}_1 , \hat{t}_2 , \hat{t}_3 , \hat{t}_4 определяется структура пакета: момент начала \hat{t}_H , конца \hat{t}_K и длительность пакета \hat{T}_{Π} при обработке в реальном масштабе времени.

Для проверки работоспособности АА по вскрытию временной структуры пакетных ФМС используем моделирующий стенд, реализованный на основе САПР SystemView.

Функциональная схема моделирующего стенда АА приведена на рис. 3, где ФУ8 – метасистема формирователя пакетного ФМС; ФУ9, 13, 15, 22, 24 – перемножители; ФУ10 – генератор гармонического колебания; ФУ11 – полосовой фильтр Баттерворта; ФУ12, 21 – делители мощности на 2 направления с 90° сдвигом фазы на втором выходе (преобразователь Гильберта); ФУ14, 23 – линии задержки; ФУ16, 17, 25, 26 – интеграторы со сбросом; ФУ18, 20, 27, 29 – выпрямители; ФУ19, 28 – сумматоры; ФУ30, 31, 32, 33 – анализаторы данных.

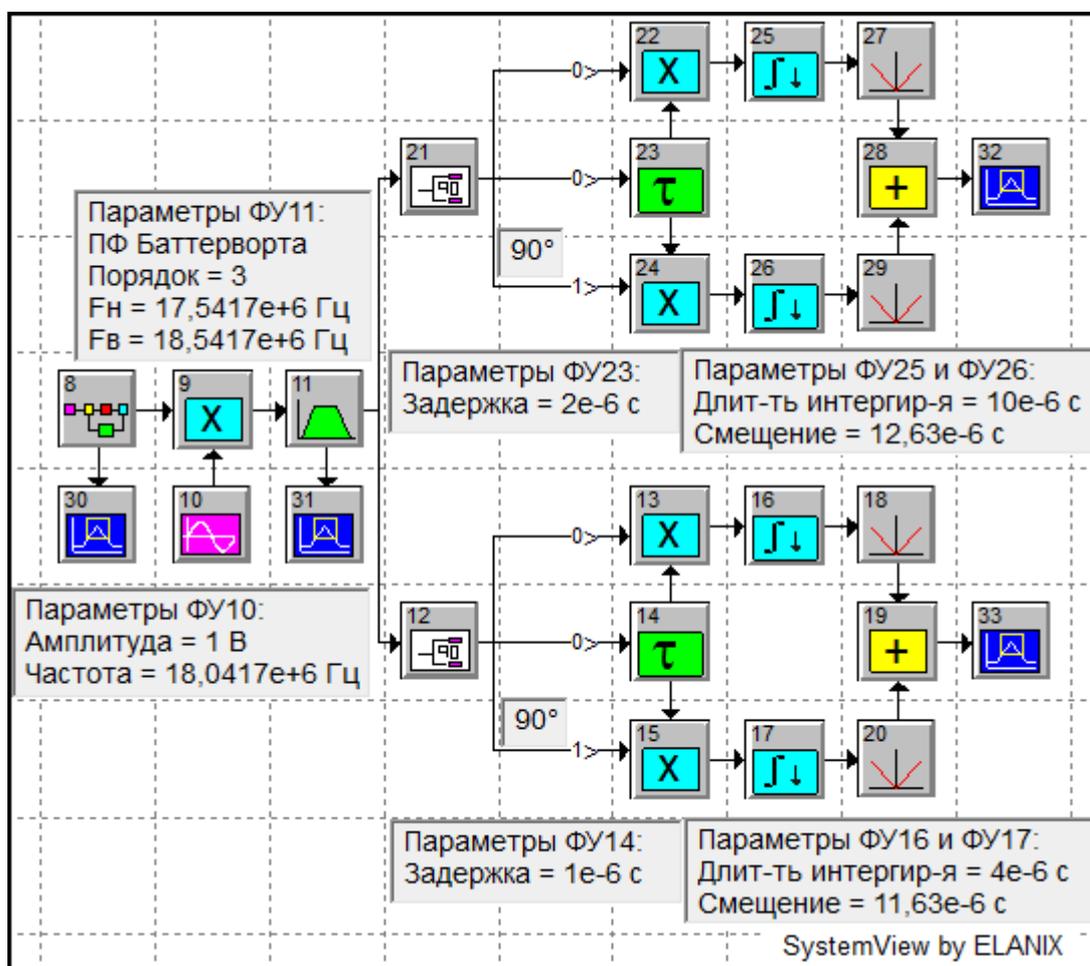


Рис. 3.

Функциональная схема метасистемы формирователя пакетного ФМС приведена на рис. 4, где ФУ0, 1, 2 – диспетчеры управления; ФУ3 – генератор

постоянного напряжения; ФУ4 – генератор меандра; ФУ5 – генератор ПСП; ФУ6 – сумматор.

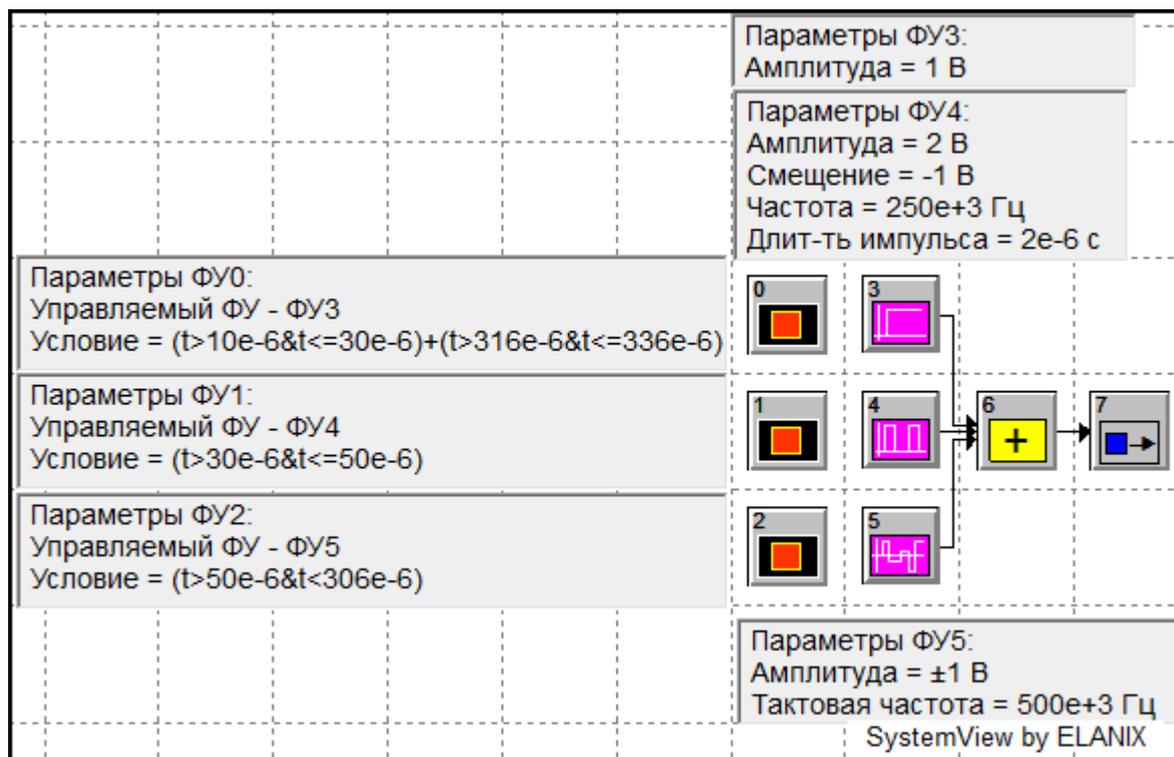


Рис. 4.

Параметры моделирования приведены в таблице 1, где $F_{\text{дискр}}$ – частота дискретизации; $T_{\text{мод}}$ – время моделирования.

Таблица 1.

Параметр	Значение
$F_{\text{дискр}}$	200 МГц
$T_{\text{мод}}$	336 мкс

Для обеспечения временной синхронизации при коммутации фрагментов пакетного ФМС используются диспетчеры управления из библиотеки диспетчеров логического управления САПР SystemView, параметры которых приведены в таблице 2, где & – логическое «И»; + – логическое «ИЛИ»; t – текущее время.

Таблица 2.

№ ФУ	Название ФУ	Параметры ФУ
0	Диспетчер управления	Управляемый ФУ – ФУ3 Условие = $(t > 10e-6 \& t \leq 30e-6) + (t > 316e-6 \& t \leq 336e-6)$
1	Диспетчер управления	Управляемый ФУ – ФУ4 Условие = $(t > 30e-6 \& t \leq 50e-6)$
2	Диспетчер управления	Управляемый ФУ – ФУ5 Условие = $(t > 50e-6 \& t < 306e-6)$

Начало интегрирования в интеграторах, синхронизируется с моментом появления ФМ пакета в АКО₁ и АКО₂, в соответствии со следующими условиями:

$$\text{для АКО}_1: \tau_{см1} = t_1 + \tau_{гр} + \tau_1;$$

$$\text{для АКО}_2: \tau_{см2} = t_1 + \tau_{гр} + \tau_2,$$

где $\tau_{см1}, \tau_{см2}$ – длительность смещения перед началом интегрирования; t_1 – момент появления ФМ пакета; $\tau_{гр}$ – групповая задержка ПФ (ФУ11); τ_1, τ_2 – величина задержки.

В процессе моделирования используются временные и спектральные характеристики пакетного ФМС при прохождении через функциональные узлы АКО₁ и АКО₂.

Для оценки эффективности вскрытия временной структуры пакетного ФМС наибольший интерес представляют эпюры на входе АА и выходе АКО₁ и АКО₂.

На рис. 5а-в приведены:

- а) манипулирующая функция пакетного ФМС;
- б) временное представление пакетного ФМС;
- в) спектральное представление пакетного ФМС,

где ΔT – интервал временной неопределённости; Δt_{Γ} – длительность гармонического фрагмента; Δt_{M} – длительность меандрового фрагмента; $\Delta t_{\text{ПСП}}$ – длительность фрагмента ПСП; Δt_3 – длительность ЗИ; ΔT_{Π} – длительность пакета; t_1 – момент появления ФМ пакета; t_2 – начало меандрового фрагмента; t_3 – начало фрагмента ПСП; t_4 – начало ЗИ; t_5 – момент появления 2-го ФМ пакета.

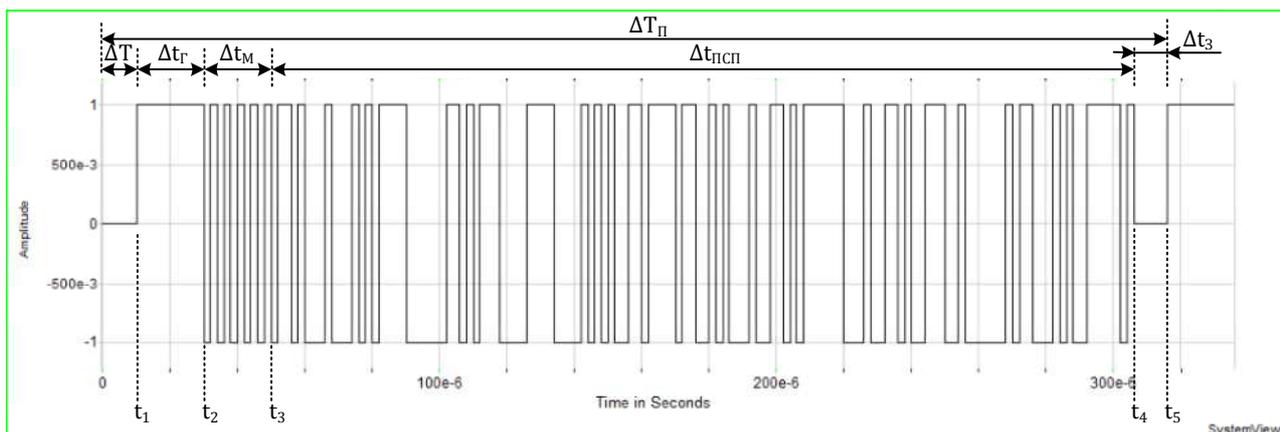


Рис. 5а.

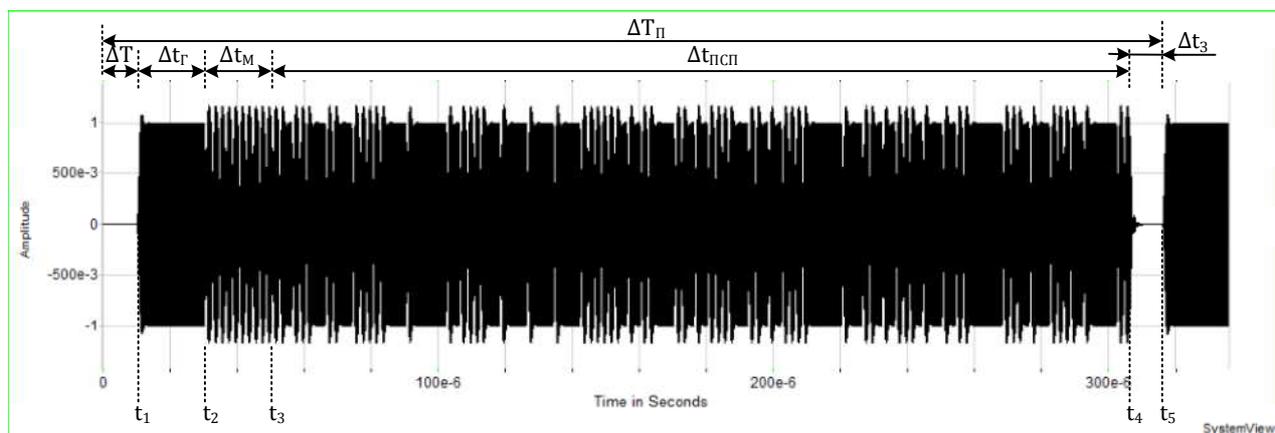


Рис. 5б.

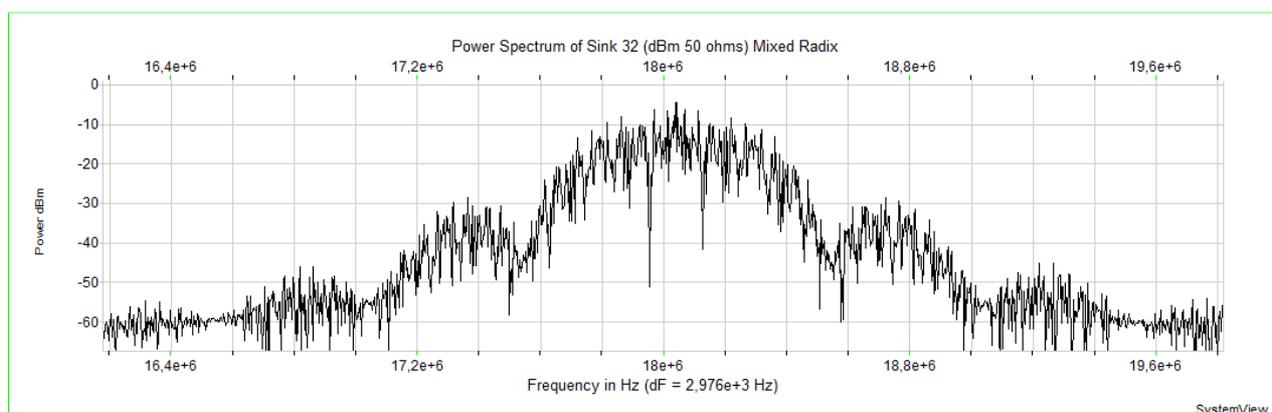


Рис. 5в.

Как следует из рис. 5б,в, использование временного и спектрального представления пакетного ФМС для выявления временных параметров его фрагментов не обеспечивает требуемой достоверности из-за отсутствия устойчивых информативных признаков, что объясняет целесообразность использования для этих целей алгоритмов корреляционной обработки.

К числу основных параметров АКО₁ и АКО₂ относятся величина ЛЗ₁ (τ_1) и ЛЗ₂ (τ_2), а также постоянные усреднения T_1 и T_2 в интеграторах И₁ и И₂.

Результаты моделирования на выходах АКО₁ и АКО₂ представляют собой последовательности, состоящие из δ -импульсов, амплитуда которых соответствует коэффициенту автокорреляции $r(\tau)$ для каждого фрагмента пакета, а период их повторения равен постоянной усреднения (T_1 для АКО₁ и T_2 для АКО₂).

При $\tau_{ЛЗ1} = 0,5T_3$ в АКО₁ при приёме гармонического фрагмента $r_r(\tau_{ЛЗ1}) \rightarrow 1$, при приёме меандрового фрагмента $r_m(\tau_{ЛЗ1}) \rightarrow 0$, при приёме информационного фрагмента $r_i(\tau_{ЛЗ1}) \rightarrow 0,5$.

При $\tau_{ЛЗ2} = T_3$ в АКО₂ имеем $r_r(\tau_{ЛЗ2}) \rightarrow 1$, $r_m(\tau_{ЛЗ2}) \rightarrow 1$ и $r_i(\tau_{ЛЗ2}) \rightarrow 0$.

Выбор величины T_1 и T_2 следует производить на основе компромисса между характеристиками помехоустойчивости АА и величиной погрешности вскрытия временных параметров начала и конца фрагментов.

На рис. 6 приведены результаты моделирования на выходе АКО₁ при $T_1 = 2T_3$, а на рис. 7 результаты на выходе АКО₂ при $T_2 = 5T_3$.

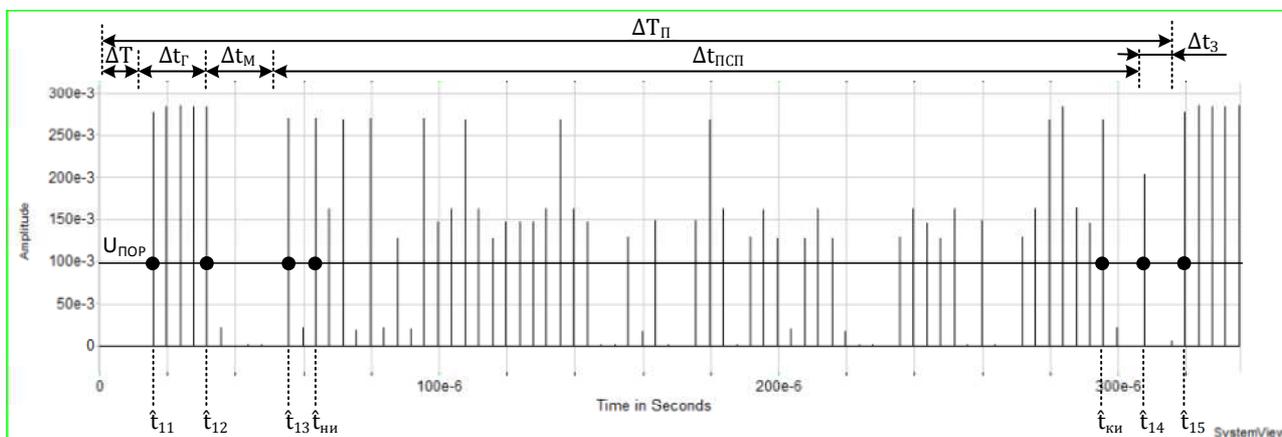


Рис. 6

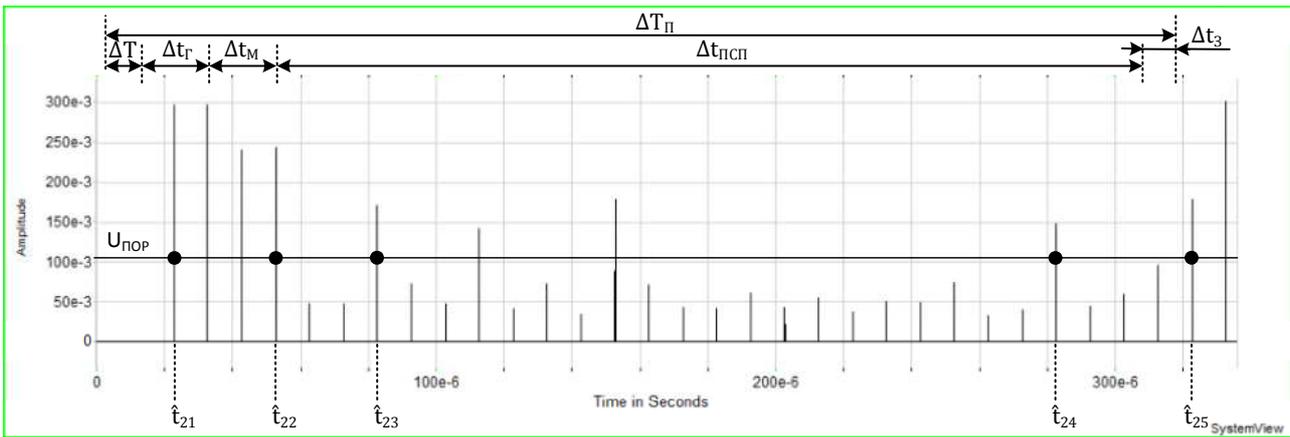


Рис. 7

При выработке решающих правил для оценивания моментов начала и конца фрагментов пакета следует использовать следующий набор информативных признаков.

При приёме гармонического фрагмента следует учитывать, что $r_{\Gamma}(\tau_{лз1}) = r_{\Gamma}(\tau_{лз2}) \rightarrow 1$ и на выходе АКО₁ следует учитывать последовательность δ -импульсов с периодом повторения T_1 и длительностью фрагмента $T_{\Gamma} = t_{12} - t_{11}$, которые превосходят пороговое напряжение. С учётом вышеизложенного алгоритмы оценивания \hat{t}_{11} , \hat{t}_{12} и \hat{T}_{Γ} имеют вид $\hat{t}_{11} = t_1 + T_1$; $\hat{t}_{12} = t_2 \pm T_1$; $\hat{T}_{\Gamma} = \hat{t}_{12} - \hat{t}_{11}$.

При приёме меандрового фрагмента следует учитывать, что $r_{\text{М}}(\tau_{лз1}) \rightarrow 0$ и $r_{\text{М}}(\tau_{лз2}) \rightarrow 1$, т.е. на выходе АКО₁ нет δ -импульсов, на интервале времени от \hat{t}_{12} до \hat{t}_{13} , а на выходе АКО₂ имеется последовательность δ -импульсов с периодом повторения T_2 на интервале времени от \hat{t}_{21} до \hat{t}_{22} , соответствующему сумме длительностей гармонического и меандрового фрагментов $\hat{T}_{\Gamma} + \hat{T}_{\text{М}}$. Алгоритмы оценивания моментов начала $\hat{t}_{\text{НМ}}$, конца $\hat{t}_{\text{КМ}}$ и $\hat{T}_{\text{М}}$ имеют вид $\hat{t}_{\text{НМ}} = \hat{t}_{12}$; $\hat{t}_{\text{КМ}} = \hat{t}_{12}$; $\hat{t}_{22} = t_3 \pm T_2$; $\hat{T}_{\text{М}} = \hat{t}_{\text{КМ}} - \hat{T}_{\Gamma}$.

При приёме информационного фрагмента следует учитывать, что $r_{\text{И}}(\tau_{лз1}) \rightarrow 0,5$ и $r_{\text{И}}(\tau_{лз2}) \rightarrow 0$, а поскольку постоянные усреднения T_1 и T_2 намного меньше кодового интервала ФМС, то при этом возникают аномальные погрешности: а) на выходе АКО₁ в последовательности δ -импульсов с периодом повторения T_1 наблюдаются провалы ниже $U_{\text{пор}}$; б) на выходе АКО₂

появляются отдельные выбросы, превышающие $U_{\text{пор}}$, в виде δ -импульсов с временным разнесом больше T_2 . Данное обстоятельство приводит к увеличению погрешности оценивания моментов начала $\hat{t}_{\text{ни}}$, конца $\hat{t}_{\text{ки}}$ и длительности $\hat{T}_{\text{и}}$ информационного фрагмента, которые определяются из соотношений: $\hat{t}_{\text{ни}} = \hat{t}_{13} - 2T_1$; $\hat{t}_{13} = t_3 - T_1$; $\hat{t}_{\text{ки}} = \hat{t}_{14} + 2T_1$; $\hat{T}_{\text{и}} = \hat{t}_{\text{ки}} - \hat{t}_{\text{ни}}$.

Длительность интервала защитного фрагмента и пакета в целом равна $\hat{T}_3 = \hat{t}_{15} - \hat{t}_{14}$; $\hat{T}_{\text{п}} = \hat{t}_{15} - \hat{t}_{11} = t_5 - t_1 + 2T_1$.

С учётом вышеизложенного можно констатировать, что моделирующий стенд обеспечивает вскрытие временных параметров структуры пакета с высокой достоверностью, поскольку их погрешность не превышает $4T_3$ при $T_1 = 2T_3$.

Результаты проведённых исследований подтверждают работоспособность АА, обладающего высокими достоверностью и быстродействием при вскрытии временной структуры пакетных ФМС.

Литература

1. Дятлов А.П., Кульбикаян Б.Х. Корреляционная обработка широкополосных сигналов в автоматизированных комплексах радиомониторинга. – М.: Горячая линия – Телеком, 2013. – 332 с.