

Описано принцип роботи фазових пасивних радіотехнічних систем частотно-часової синхронізації рознесених еталонів. Отримано співвідношення для оцінок похибок і невизначеностей таких систем. Приведено результати моделювання похибок фазових пасивних систем синхронізації для випадку узгодженої фільтрації і кореляційної обробки сигналів у квадратурних каналах. Оцінено порогові відношення сигнал/перешкода таких варіантів вимірювань

Ключові слова: корельовані завади, багатопроменевість, похибки, узгоджений фільтр, квадратурна обробка

Описан принцип работы фазовых пассивных радиотехнических систем частотно-временной синхронизации разнесенных эталонов. Получены соотношения для оценок погрешностей и неопределенностей таких систем. Приведены результаты моделирования погрешностей фазовых пассивных систем синхронизации для случая согласованной фильтрации и корреляционной обработки сигналов в квадратурных каналах. Оценены пороговые отношения сигнал/помеха таких вариантов измерений

Ключевые слова: коррелированные помехи, многолучевость, погрешности, согласованный фильтр, квадратурная обработка

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФАЗОВЫХ ПАССИВНЫХ СИСТЕМ СИНХРОНИЗАЦИИ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ КВАДРАТУРНУЮ ОБРАБОТКУ СИГНАЛОВ

В. Ю. Приймак

Аспирант*

E-mail: pryimak_viacheslav@i.ua

А. Ф. Хуссейн

Аспирант*

*Кафедра основ радиотехники

Харьковский национальный университет

радиоэлектроники

пр. Ленина, 14, г. Харьков, Украина, 61166

1. Введение

Непрерывный рост требований к точности частотно-временной синхронизации территориально разнесенных эталонов времени и частоты обусловлен высоким темпом совершенствования эталонов, относительная нестабильность которых в настоящее время достигла $10^{-15} \dots 10^{-16}$, и расширением круга задач, решаемых с применением высокоточных частотно-временных методов [1].

Кроме традиционных областей применения этих методов (метрология, системы координатно-временного обеспечения, радиоастрономия, радиолокация), появляются и новые, например, – компьютерные и цифровые сети связи. В последнем случае для синхронизации разработаны стандартные протоколы (Network Time Protocol – NTP и Precision Time Protocol – PTP) [2].

Помимо прямого метода (перевозимые квантовые часы – ПКЧ), наибольшую точность обеспечивают радиотехнические методы синхронизации с использованием различных частотных диапазонов. С 70-х годов прошлого века и до 2000 г. наибольшую точность обеспечивал радиометеорный метод сличения (РМС) [3], а в настоящее время – метод, основанный на использовании спутниковых радионавигационных систем (СРНС) GPS и ГЛОНАСС [4, 5].

Используется также ретрансляция сигналов через геостационарные спутники (ГС) [6].

В ХНУРЭ проводятся работы по совершенствованию пассивных систем синхронизации, основанных на, так называемом, алгоритме общего охвата (АОО, англ. термин – «*common-view*») с применением сигналов новых общих источников (геостационарные ИСЗ, ТВ и FM станций) [7 – 9].

Одним из перспективных направлений совершенствования существующих и разработки новых радиотехнических систем синхронизации является использование фазовых принципов их построения. К достоинствам фазовых методов синхронизации (ФМС) относятся: высокая потенциальная точность и простота устройств для измерений временного положения сигналов; возможности высокоточного формирования сигналов и гетеродинов от сигналов эталонов; симметрия измерительного сигнала, имеющего гармоническую форму.

Основным недостатком ФМС является их неоднозначность в пределах периода (T_0) частоты несущей.

Хотя разработка фазовой радиометеорной аппаратуры проводилась [3], а в СРНС используются когерентные сигналы и выполняются фазовые измерения [4, 5], анализ погрешностей и неопределенностей фазовых пассивных систем синхронизации времени отсутствует.

Учитывая это, в статье сделана попытка провести такой анализ как теоретически, так и путем моделирования для случая широко используемой квадратурной обработки сигналов.

2. Теоретический анализ погрешностей и неопределенностей фазовых пассивных систем синхронизации

Принципиальное отличие ФМС от методов с применением огибающих сигналов заключается в том, что для измерений используются не синхронные со шкалами времени огибающие радиоимпульсов, а их фазы.

Упрощенная временная диаграмма, иллюстрирующая сущность фазового АОО, построена на рис. 1, где применены обозначения:

- ω_0 – известная несущая частота сигнала общего источника;
- $\varphi = \omega_0 t$ – текущие фазы сигналов;
- $H^a(\varphi)$, $H^b(\varphi)$ – фазовые шкалы времени пунктов **a** и **b** соответственно;
- ΔT^{ab} , $\Delta\varphi^{ab} = \omega_0 \Delta T^{ab}$ – сдвиги шкал во времени и по фазе;
- $\varphi_1^a = \omega_0 t_1^a$, $\varphi_1^b = \omega_0 t_1^b$ – фазовые сдвиги принимаемых сигналов относительно фазовых шкал времени пунктов **a** и **b** соответственно.

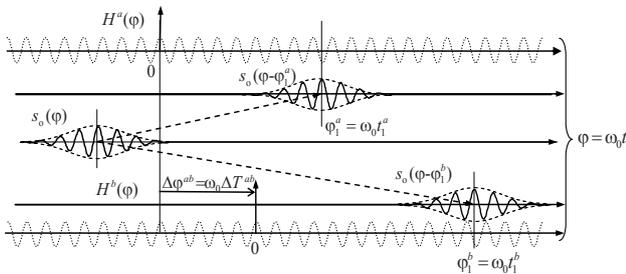


Рис. 1. Фазовый алгоритм общего охвата

Основными источниками погрешностей ФМС являются: амплитудные и фазовые искажения сигналов; тракты аппаратуры, имеющие нестабильность фазовой задержки сигналов; конечное отношение сигнал/помеха; фазовая нестабильности сигналов эталонов и устройств привязки к этим сигналам; непостоянство измеряемой величины из-за взаимного хода шкал сверяемых эталонов; каналы обмена измерительной информацией между пунктами; алгоритмы обработки результатов измерений. Грубые погрешности (промахи) в ФМС возникают из-за ошибок в устранении неоднозначности фазовых измерений, аномальных измерений временного положения сигналов (случае измерений по ложным выбросам помехи), многолучевости РРВ и ошибок в канале связи (случай, когда измерения сопряжены с передачей данных).

Исходя из принятой в теории информационно-измерительных систем терминологии, к основным видам погрешностей относятся: помеховые, которые еще называют потенциальными (из-за их неизбежности); каналные, зависящие от характеристик РРВ; аппаратурные.

Ограничиваясь основными источниками погрешностей, можно получить соотношения для оценок фазовых сдвигов шкал $\Delta\varphi^{ab}$ и величин канальной $(\delta_{\Delta\varphi}^{ab}(\text{РРВ}))$, помеховой $(\delta_{\Delta\varphi}^{AB}(\text{с/п}))$ и аппаратурной $(\delta_{\Delta\varphi}^{AB}(\text{ап}))$ слагаемых суммарной погрешности:

$$\widehat{\Delta\varphi}^{AB} = (\varphi_1^A - \varphi_1^B) - (\widehat{\varphi}_{\text{РРВ}}^{\text{ОА}} - \widehat{\varphi}_{\text{РРВ}}^{\text{ОБ}}) - (\widehat{\Delta\varphi}_{\text{прм}}^A - \widehat{\Delta\varphi}_{\text{прм}}^B);$$

$$\delta_{\Delta\varphi}^{AB}(\text{РРВ}) = (\varphi_{\text{РРВ}}^{\text{ОА}} - \varphi_{\text{РРВ}}^{\text{ОБ}}) - (\widehat{\varphi}_{\text{РРВ}}^{\text{ОА}} - \widehat{\varphi}_{\text{РРВ}}^{\text{ОБ}}); (\delta_{\Delta\varphi}^{AB}(\text{с/п})) = \delta_{\varphi_1}^A - \delta_{\varphi_1}^B,$$

$$(\delta_{\Delta\varphi}^{ab}(\text{0п})) = \delta_{\Delta\varphi}^{ab}(\text{0п}) = (\Delta\varphi_{\text{прм}}^a - \Delta\varphi_{\text{прм}}^b) - (\widehat{\Delta\varphi}_{\text{прм}}^a - \widehat{\Delta\varphi}_{\text{прм}}^b),$$

где $\delta_{\varphi_1}^a$, $\delta_{\varphi_1}^b$, $\delta_{\varphi_2}^a$, $\delta_{\varphi_2}^b$ – случайные абсолютные значения помеховых погрешностей измерений фазовых сдвигов принимаемых сигналов относительно фазовых шкал времени пунктов **a** и **b**;

$\varphi_{\text{РРВ}}^{\text{ОА}}$, $\varphi_{\text{РРВ}}^{\text{ОБ}}$, $\varphi_{\text{РРВ}}^{\text{об}}$, $\varphi_{\text{РРВ}}^{\text{об}}$ – истинные значения и оценки фазовых задержек общего сигнала при РРВ до пунктов **a** и **b**;

$\Delta\varphi_{\text{прм}}^a$, $\widehat{\Delta\varphi}_{\text{прм}}^a$, $\Delta\varphi_{\text{прм}}^b$, $\widehat{\Delta\varphi}_{\text{прм}}^b$, $\Delta\varphi_{\text{прд}}^a$, $\widehat{\Delta\varphi}_{\text{прд}}^a$, $\Delta\varphi_{\text{прд}}^b$, $\widehat{\Delta\varphi}_{\text{прд}}^b$ – истинные и оценочные величины фазовых задержек в приемных и передающих трактах пунктов **a** и **b** соответственно;

Соотношения для расчета среднеквадратических отклонений (СКО) помеховых погрешностей измерения фазового сдвига шкал в пункте **a** ($\sigma_{\Delta\varphi}^{ab}$), а также коэффициента корреляции помеховых погрешностей в пунктах $(R[\delta_{\Delta\varphi}^{ab}(\text{с/п}) \vee \delta_{\Delta\varphi}^{ba}(\text{с/п})])$ приведены в табл. 1, где приняты обозначения:

- $m_a = (\sigma_{\varphi}^b / \sigma_{\varphi}^a)^2$ – коэффициент, учитывающий различие помеховых обстановок в пунктах **a** и **b**;
- σ_{φ}^a , σ_{φ}^b – СКО помеховых погрешностей измерения фазовых сдвигов принимаемых сигналов в пунктах **a** и **b** соответственно.

Формулы для случайных погрешностей измерения фазового сдвига шкалы пункта **b** относительно шкалы пункта **a** ($\sigma_{\Delta\varphi}^{ba}$) отличаются от приведенных в табл. 3 индексами. СКО σ_{φ}^a следует заменить на σ_{φ}^b , а коэффициент m_a – на $m_b = (\sigma_{\varphi}^a / \sigma_{\varphi}^b)^2$.

Таблица 1

Коэффициент корреляции помеховых погрешностей

| | |
|-----------------------------------|---|
| $\sigma_{\Delta\varphi}^{ab}$ | $R[\delta_{\Delta\varphi}^{ab}(\text{с/п}) \vee \delta_{\Delta\varphi}^{ba}(\text{с/п})]$ |
| $\sigma_{\varphi}^a \sqrt{1+m_a}$ | -1 |

Преимущество фазового АОО по сравнению с аналогичным алгоритмом при измерениях по огибающим сигналам состоит в меньшем объеме передаваемой информации о результатах измерений, поскольку диапазон значений φ_1^A , φ_1^B составляет $-\pi \dots \pi$ или $0 \dots 2\pi$.

Основными достоинствами фазового АОО, как и АОО с использованием огибающих сигналов, являются отсутствие излучения в синхронизируемых пунктах (это обеспечивает скрытность, электромагнитную совместимость, экологическую и информационную безопасность) и возможность использования для измерения сдвига шкал взаимокорреляционную обработку (ВКО) сигналов.

Применение ВКО дает возможность использования общих сигналов $s_0(\varphi)$ с не полностью известными параметрами. В случае фазового АОО необходимо, чтобы несущая частота сигнала $s_0(\varphi)$ была известна и достаточно стабильна.

Принцип применения ВКО показан на рис. 2, где показаны:

$s_o(\varphi-\varphi_1^a)$, $s_o(\varphi-\varphi_1^b)$ – сведенные в одном из пунктов сигналы общего источника, принятые в синхронизируемых пунктах;

$$s_{\text{ФВКФ}}^{\text{ба}}(\varphi_\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} s_o(\varphi-\varphi_1^b) s_o(\varphi-\varphi_1^a - \varphi_\tau) d\varphi$$

– фазовая взаимокорреляционная функция (ФВКФ) сигналов $s_o(\varphi-\varphi_1^a)$ и $s_o(\varphi-\varphi_1^b)$.

Можно показать, что ВКФ $s_{\text{ФВКФ}}^{\text{ба}}$ представляет собой согласованно обработанный сигнал общего источника, смещенный на величину $(\varphi_1^b - \varphi_1^a)$. При этом огибающая и колебание несущей сигнала общего источника не обязательно должны быть когерентными (см. построенные на рис. 4 пунктиром заполнения несущей у принятых сигналов).

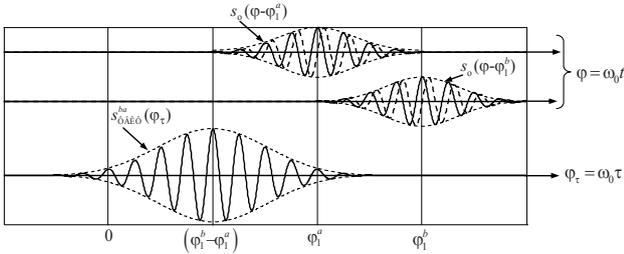


Рис. 2. Применение взаимокорреляционной обработки сигналов для фазового АОО

В случае согласованной фильтрации (СФ) соотношения для СКО измерения сдвига шкал фазового АОО с учетом аномальных измерений, рассмотренных в работе [10], имеют вид:

$$\sigma_{\Delta\varphi}^{\text{СФ}} = \frac{1}{q_{\text{аб}}} \sqrt{1 - P_{\text{ош}}^{\text{СФ}} \left[1 - \frac{(M q_{\text{аб}})^2}{12} \right]}, \quad (1)$$

где q_a , q_b – отношения сигнал/помеха в пунктах а и б соответственно;

$q_{\text{аб}} = \frac{q_a q_b}{\sqrt{(q_a)^2 + (q_b)^2}}$ – эквивалентное отношение сигнал/помеха для АОО;

$$P_{\text{ош}}^{\text{СФ}} = \left[\frac{P_{\text{ош}}^a}{(q_a)^2} + \frac{P_{\text{ош}}^b}{(q_b)^2} \right] (q_{\text{аб}})^2$$

– вероятность ошибочных измерений сдвига шкал в при СФ сигналов в пунктах;

$P_{\text{ош}}^a = \frac{(q_a)^2}{(q_a)^2 + M^{-1} e^{0.5(q_a)^2}}$, $P_{\text{ош}}^b = \frac{(q_b)^2}{(q_b)^2 + M^{-1} e^{0.5(q_b)^2}}$ – вероятности ошибочных измерений временного положения сигналов в пунктах а и б соответственно; $\omega_0 = 2\pi f_0$ – угловая частота несущей; $M = T_0 \omega_0 = T 2\pi f_0 = 2\pi$ – число элементов разрешения на интервале наблюдения;

T_0 – интервал наблюдения, равный периоду несущей частоты.

Соотношения для случая ВКО:

$$\sigma_{\Delta\varphi}^{\text{ВКО}} = \frac{1}{q_{\text{аб}}} \sqrt{1 - P_{\text{ош}}^{\text{ВКО}} \left[1 - \frac{(2M q_{\text{аб}})^2}{12} \right]}, \quad (2)$$

где $P_{\text{ош}}^{\text{ВКО}} = \frac{(q_{\text{аб}})^2}{(q_{\text{аб}})^2 + 0,5M^{-1} e^{0,5(q_{\text{аб}})^2}}$ – вероятность ошибочных измерений сдвига шкал при ВКО сигналов.

Без учета аномальных измерений (случай, так называемых, нормальных измерений) СКО измерений сдвига шкал для фазового АОО описывается выражением

$$\sigma_{\Delta\varphi}^{\text{СФ}} = \sigma_{\Delta\varphi}^{\text{ВКО}} = \frac{1}{q_{\text{аб}}}, \quad (3)$$

а в случае $q_a = q_b = q$

$$\sigma_{\Delta\varphi}^{\text{СФ}} = \sigma_{\Delta\varphi}^{\text{ВКО}} = \frac{\sqrt{2}}{q}.$$

Построенные в соответствии с выражениями (1) – (3) графики для случая $q_a = q_b = q$ приведены на рис. 3.

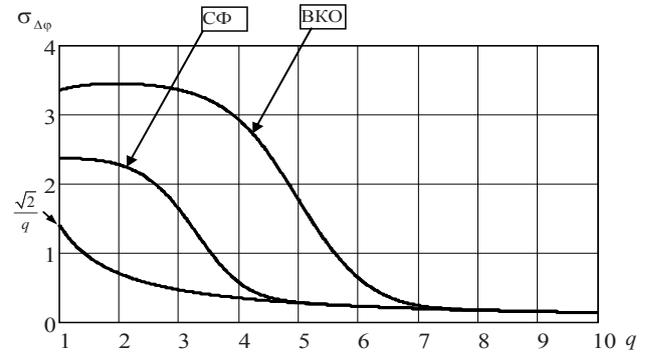


Рис. 3. Зависимости СКО помеховых погрешностей фазового алгоритма общего охвата для СФ и ВКО сигналов

Помимо погрешностей, для оценки качества измерений в настоящее время используются неопределенности измерений [11, 12]. Появились работы, в которых рассматривается неопределенность и при сличениях эталонов времени и частоты [13, 14].

Поскольку СКО помеховых погрешности в ФМС ($\sigma_{\Delta\varphi}$) определяются при статистической обработке результатов измерений сдвига шкал, эта оценка погрешности соответствует стандартной неопределенности типа «А» [11, 13] $u_{\langle A \rangle / \Delta\varphi} = \sigma_{\Delta\varphi}$.

Канальную $\delta_{\Delta\varphi}^{\text{аб}}$ (РРВ) и аппаратную $\delta_{\Delta\varphi}^{\text{ап}}$ погрешности нельзя определить путем статистической обработки результатов измерений. Поэтому, согласно [11, 12], эти погрешности формируют неопределенность типа «В».

Для оценки стандартной фазовой канальной неопределенности $u_{\langle B \rangle / \Delta\varphi}$ (РРВ) применимы модели канала РРВ и независимые каналы калибровки, а для фазовой аппаратной неопределенности $u_{\langle B \rangle / \Delta\varphi}$ (ап) – измерения («пилотирование») фазовых аппаратных задержек или проведение измерений в режиме «нулевой базы» (аппаратурные комплексы пунктов совмещаются).

Структура и классификация источников погрешностей ФМС, а также принцип формирования соотношений для неопределенностей измерений приведены на рис. 4.



Рис. 4. Структура погрешностей и неопределенностей измерений для ФМС

3. Принцип и структура модели

Модель разработана в пакете Matchcad-14 и состоит из блока формирования сигналов и помех (рис. 5), а также блоков обработки сигналов и статистической оценки результатов измерений – с применением СФ (рис. 6) и ВКО (рис. 7).

Блок формирования сигналов и помех (рис. 5) включает: генератор общего сигнала $s_o(\varphi)$ (модулятор – М, формирователи несущей $s_n(t)$ и огибающей $S_{or}(t)$); генераторы помех $n_a(\varphi)$, $n_b(\varphi)$; фазовые линии задержки φ_p^{oa} , φ_p^{ob} ; аттенюаторы – АТ.; сумматоры «+».

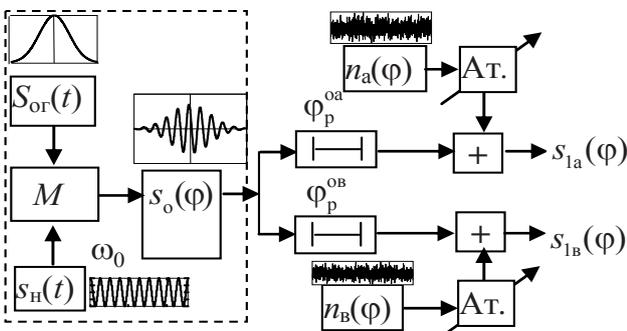


Рис. 5. Структурная схема блока формирования сигналов и помех

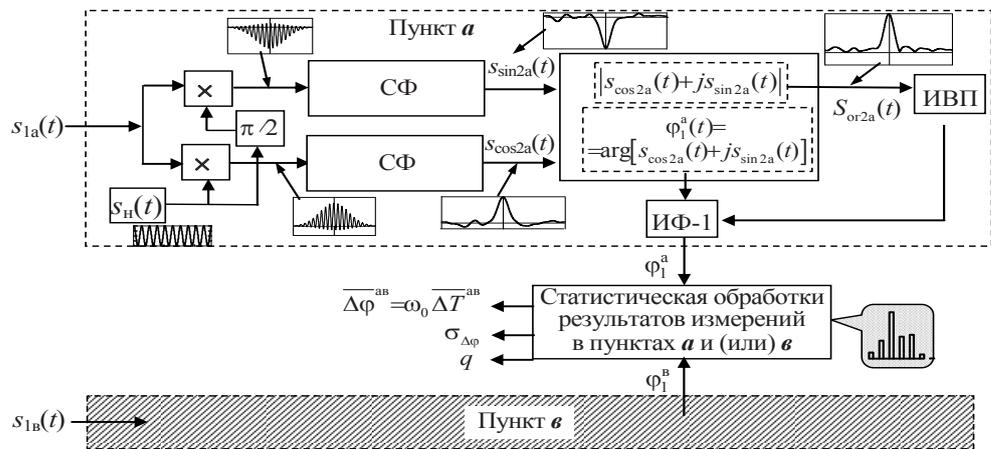


Рис. 6. Структурная схема блока обработки сигналов (случай СФ)

Кроме структуры модели, на рис. 5–7 приведены основные временные диаграммы.

Блоки обработки (рис. 6, 7) состоят из квадратурных каналов (гетеродин $s_n(t)$, умножители «×», фазовращатель на $\pi/2$, СФ – рис. 6, фильтр нижних частот – рис. 5), сигналы с выхода которых ($s_{\sin 2a}(t)$, $s_{\cos 2a}(t)$, $s_{\sin 2b}(t)$, $s_{\cos 2b}(t)$) используются для измерения φ_1^0 , φ_1^2 в пунктах (рис. 6), либо – $\Delta\varphi^{02} = \varphi_1^0 - \varphi_1^2$ по ВКФ $R^{02}(\varphi_\tau)$ (рис. 7).

В блоке обработки с применением СФ (рис. 6) оценки фазовых задержек (φ_1^0 , φ_1^2) производятся по мгновенным значениям фаз $\varphi_1^0(t)$, $\varphi_1^2(t)$ для моментов, соответствующих максимумам соответствующих огибающих, в измерителе фаз (ИФ-1).

Для этого определяются огибающие $S_{or2a}(t)$ и $S_{or2b}(t)$ и измеряются их временные положения (ИВП).

В блоке обработки, приведенном на рис. 7, ВКО применяется дважды – для огибающих ($S_{or2a}(t)$, $S_{or2b}(t)$) и

для восстановленных радиосигналов (ВРС). В первом случае находится ВКФ

$$R_{\text{ор}i\text{б}}^{\text{ав}}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S_{\text{ор}2a}(t)S_{\text{ор}2b}(t-\tau)dt,$$

а во втором – $R_{\text{ри}}^{\text{ав}}(\varphi_\tau)$.

С помощью ВКФ $R_{\text{ри}}^{\text{ав}}(\varphi_\tau)$ и $R_{\text{ор}i\text{б}}^{\text{ав}}(\tau)$ в квадратурном измерителе фаз ИФ-2 оценивается фазовый сдвиг шкал $\Delta\varphi^{\text{ав}} = \varphi_1^a - \varphi_1^b$ (рис. 7).

Модель позволяет определять среднее значение фазового сдвига шкал $\Delta\varphi = \omega_0 \Delta T^{\text{ав}}$ и СКО измерений $\sigma_{\Delta\varphi}$, а также строить гистограммы и проверить гипотезы о законах распределения.

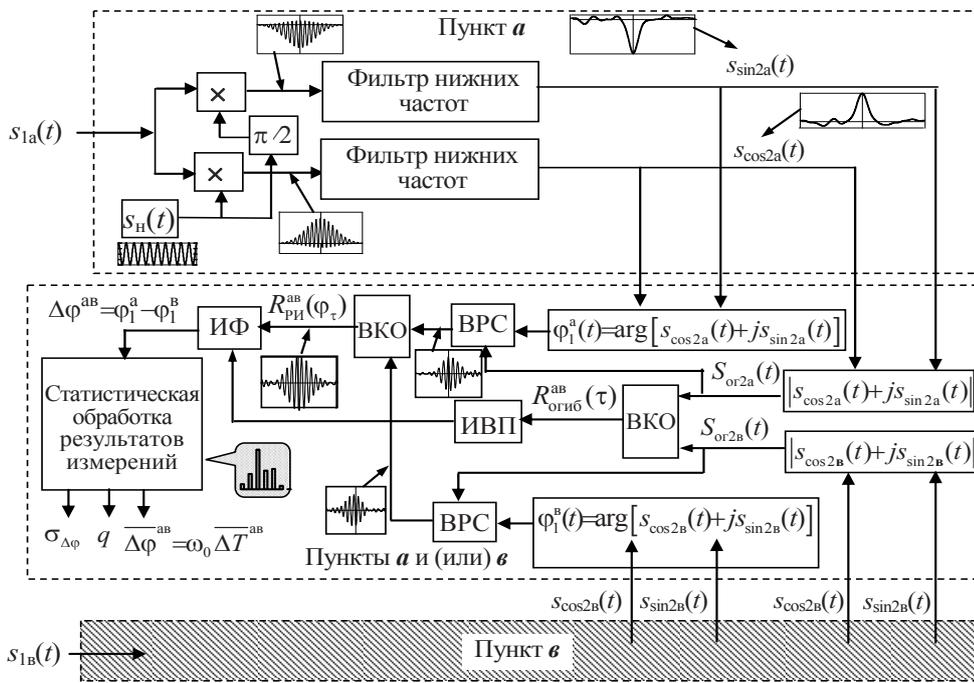


Рис. 7. Структурная схема блока обработки сигналов (случай ВКО)

4. Результаты моделирования и выводы

Результаты исследования приведены на рис. 8, 9.

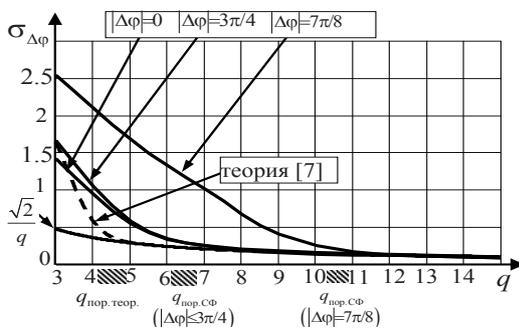


Рис. 8. Результаты моделирования для случая СФ

Теоретические зависимости приведены на основании (1) – (3) – для числа элементов разрешения $M = T_0 \omega_0 = 2\pi$.

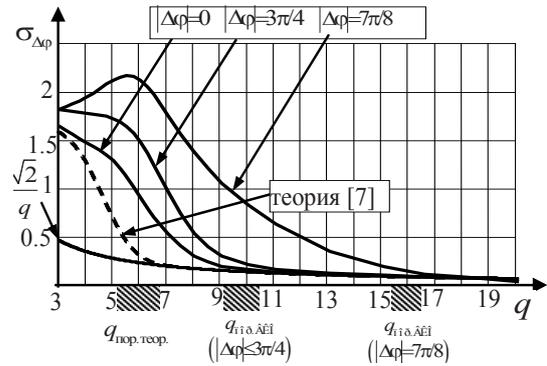


Рис. 9. Результаты моделирования для случая ВКОФ

Значения пороговых отношений сигнал/помеха, полученные в результате моделирования для КОС ($q_{\text{пор.СФ}}$ – рис. 6 и $q_{\text{пор.ВКО}}$ – рис. 7), примерно на 3 дБ превышают теоретические значения.

При одинаковых значениях $\Delta\varphi$, $q_{\text{пор.СФ}}$ больше $q_{\text{пор.ВКО}}$ также на 3 дБ.

Модельные значения пороговых отношений сигнал/помеха ($q_{\text{пор.СФ}}$, $q_{\text{пор.КО}}$) практически совпадают с теоретическими. По мере приближения ψ_0 к границам интервала наблюдения ($-\pi < \Delta\varphi < \pi$) величины $q_{\text{пор.СФ}}$ и $q_{\text{пор.КО}}$ существенно возрастают (рис. 8 и рис. 9).

Практически устранить влияние значений $\Delta\varphi$ на пороговые эффекты можно, если проводить параллельно обработку не только для интервала наблюдения $-\pi < \Delta\varphi < \pi$, но и для интервала $0 < \Delta\varphi < 2\pi$.

Из результатов обработки для этих интервалах выбирается то, для которого СКО минимально (рис. 10).

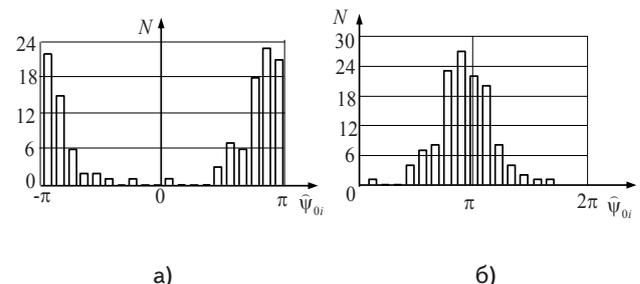


Рис. 10. Гистограммы единичных измерений для $\psi_0 = \pm 1700$ при выборе интервалов наблюдения $-\pi < \psi_{oi} < \pi$ (а) и $0 < \psi_{oi} < 2\pi$ (б)

Литература

1. Финкельштейн, А. М. Фундаментальное координатно-временное обеспечение [Текст] / А. М. Финкельштейн, // Вестник Российской Академии наук. – 2007. – Т. 77, № 7. – С. 608–617.
2. Миллс Дэвид, Л. Сличение времени в компьютерных сетях: Протокол сетевого времени на Земле и в космосе [Текст] : Пер. с англ. / Миллс Дэвид, Л. ; Под ред. А. В. Савчука. – К: WIRCOM, 2011 – 464 с.
3. Антипов, И. Е. Развитие теории и совершенствование радиометеорных систем связи и синхронизации» [Текст] / И. Е. Антипов, Ю. А. Коваль, В. В. Обельченко // Харьков: Коллегиум, 2006. – 416 с.
4. Zhang, V. S. Multi-Channel GPS/GLONASS Common-View between NIST and USNO . [Текст] / Zhang, V. S. Parker, T. E. Weiss, M. A. Vannicola. F. M. // IEEE International Frequency Control Symposium, pp. 598-606, June 2000.
5. Гужва, Ю. Г. Синхронизация часов по сигналам "ГЛОНАСС" [Текст] / Ю. Г. Гужва, А. Г. Геворкян, П. П. Богданов, В. В. Овчинников // Радионавигация и время. 1994. № 1. С.11.
6. Recommendation ITU-R TF.1153-3, «The operational use of two-way satellite time and frequency transfer employing PN time codes». ITU, Radiocommunication Study Group, Geneva, Last update 2005.
7. Пат. 38167 Україна, МПК51 (2006), G04G 7/00. Спосіб частотно-часової синхронізації просторово рознесених еталонів та стандартів часу і частоти /Нестеренко Г.В., Коваль Ю.О., Иванова О.О., заявник та власник Харківський нац. університет радіоелектр. – № u2008 09468, подано 21.07.2008; опубл. 25.12.2008, Бюл. № 24.
8. Коваль, Ю. А. Анализ возможностей метода общего охвата для высокоточной синхронизации стандартов времени и частоты в пределах прямой видимости [Текст] / Ю. А. Коваль, А. А. Костыря, В. В. Обельченко, Е. Ю. Бондарь, Е. А. Иванова, Е. П. Ермолаев, М. В. Милях // Радиоэлектроника. Информатика. Управление. Научный журнал. 2009. Вып. 1(20) С.21-30.
9. Коваль, Ю. А. Экспериментальные исследования возможностей частотно-временной синхронизации при использовании сигналов геостационарных ИСЗ системы SBAS [Текст] / Ю.А. Коваль, Е. А. Иванова, А. А. Костыря, Е. А. Иванова, Б. А. Ал-Твежри, А. Ф. Хусейн, Х. Х. Асаад // Радиотехника: Всеукр. межвед. научн. -техн. сб. – 2011. – №. 165. – С. 46-55.
10. Ширман, Я. Д. Теоретические основы радиолокации [Текст] / Я. Д. Ширман, В. Н. Голиков, И. Н. Бусыгин и др; под ред. Я. Д. Ширмана // Учебное пособие для вузов. – М.: Советское радио, 1970. – 374 с.
11. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement: First edition. – ISO, Switzerland, 1993.
12. РМГ 91-2009. ГСИ. Совместное использование понятий "погрешность измерения" и "неопределенность измерения". Общие принципы. [Текст].
13. W. Lewandowski, D. Matsakis, G. Panfilo and P Tavella, The evaluation of uncertainties in [UTC - UTC(k)], Metrologia 43 (2006). pp 278-286.
14. Коваль, Ю. А. Оценивание неопределенности измерений при сличениях эталонов времени и частоты радиотехническими методами [Текст] / Ю. А. Коваль, А. А. Костыря, В. Ю. Приймак // Системи обробки інформації. – Харків.: ХУПС, 2012. – Вып. 21 (99). С. 30–33.