

Ю.А. КОВАЛЬ, *д-р техн. наук*, А.А. КОСТЫРЯ, *д-р техн. наук*, В.Н. НАУМЕНКО,
С.А. ПЛЕХНО, С.И. УШАКОВ

КВАДРАТУРНАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ В МОДЕЛЯХ ПАССИВНЫХ СИСТЕМ ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ

Введение и постановка задачи

К пассивным системам синхронизации территориально разнесенных мер (в частном случае эталонов) времени и частоты следует относить такие, сличение в которых осуществляется при помощи принимаемых в пунктах сигналов общих сторонних источников. Предлагаемый пассивный метод общего охвата (ПМОО) принципиально отличается от известного в зарубежной литературе «*common-view*» [1, 2]. Отличительной особенностью ПМОО является возможность использовать произвольные искусственные и естественные общие источники сигналов, включая шумоподобные, что обеспечивается за счет взаимокорреляционной обработки (ВКО) принятых в синхронизируемых пунктах идентичных фрагментов сигнала, в то время как в «*common-view*» общий источник является специализированным и излучает частотно-временной синхросигнал.

К достоинствам пассивных систем относятся: отсутствие излучения в синхронизируемых пунктах; исключение влияния задержек в трактах общего источника. Недостатками метода общего охвата являются необходимость оценки разности задержек в канале распространения радиоволн и необходимость обмена измерительной информацией.

Отсутствие излучения обеспечивает скрытность, помехозащищенность и экономичность пассивных систем. Поэтому теоретический и практический интерес представляют проводимые на кафедре «Основы радиотехники» ХНУРЭ исследования по разработке ПМОО и применению новых общих источников (ТВ и FM станций в пределах прямой видимости, а также ИСЗ для синхронизации на больших расстояниях) [3 – 5].

При реализации пассивных систем с новыми источниками основополагающим является выбор методов обработки общих сигналов. Наличие априорной информации о разности времени распространения сигнала от общего источника до пунктов в сочетании с ВКО позволяет свести решаемую задачу к оценке временного положения сигнала со случайной начальной фазой относительно шкалы времени пункта приема [6]. Для решения аналогичных задач принято использовать квадратурную обработку сигналов в сочетании с ее цифровой реализацией. Принцип квадратурной обработки находит широкое применение в радиолокационных измерениях [7 – 9], однако, как вопросы статистической теории устройств квадратурной обработки с учетом их нелинейности, так и моделирование этих устройств для случая обработки сигналов в пассивных системах синхронизации исследованы недостаточно.

Для оценки возможности применения квадратурной обработки в пассивных системах синхронизации разработана модель, состоящая из ряда блоков, которые позволяют имитировать как обработку для случая измерения временного положения сигналов по огибающим, так и применение двух вариантов обработки в данных системах – согласованную фильтрацию (СФ) сигналов в каждом из пунктов и ВКО принимаемых в пунктах сигналов. В работе приводятся принципы построения модели и результаты моделирования.

Принципы построения и структура модели

В основу функционирования модели положен принцип ПМОО, полная временная диаграмма которого для случая измерения временного положения сигналов по огибающим (рис.1) отражает качественный состав погрешностей синхронизации шкал времени пространственно разнесенных эталонов [3, 6]. Рис. 2 показывает, что при отсутствии сдвига шкал положение максимума взаимокорреляционной функции (ВКФ) принятых сигналов в

системной шкале соответствует разности времени прихода сигнала общего источника в пункты.

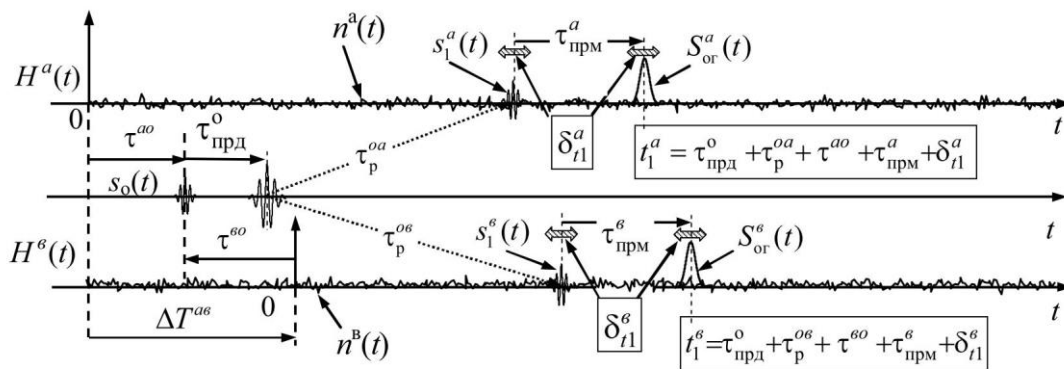


Рис.1. Временная диаграмма метода общего охвата

На рис.1, 2 использованы обозначения: $s_0(t)$ – сигнал общего источника; $H^a(t)$, $H^b(t)$ – шкалы времени пунктов **a** и **b**; τ_p^{oa} , τ_p^{ob} – задержка сигнала в канале распространения радиоволн от общего источника до пунктов; $\Delta T^{ab} = \tau^{ao} - \tau^{bo}$ – сдвиг шкал пунктов **a** и **b**; $s_1^a(t)$, $s_1^b(t)$, $S_{oz}^a(t)$, $S_{oz}^b(t)$ – принятые в пунктах радиосигналы и их огибающие после согласованной фильтрации; τ_{prm}^a , τ_{prm}^b , τ_{prd}^o – задержки сигнала в приемных трактах пунктов и передающем тракте общего источника; t_1^a , t_1^b – временные положения огибающих сигналов в пунктах; δ_{t1}^a , δ_{t1}^b – абсолютные значения погрешностей измерения временного положения сигнала в пунктах, вызванные помехами $n^a(t)$ и $n^b(t)$; $B^{ab}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S_{oz}^a(t) \cdot S_{oz}^b(t - \tau) dt$ – ВКФ огибающих принятых в пунктах сигналов; \hat{t}_1^a , \hat{t}_1^b , $\hat{t}^a - \hat{t}^b$ – оценки временных положений огибающих сигналов в пунктах и разности этих временных положений соответственно.

Из рис.1 следует выражение для определения сдвига шкал времени пунктов

$$\Delta T^{ab} = \tau^{ao} - \tau^{bo} = (t_1^a - t_1^b) - (\tau_p^{oa} - \tau_p^{ob}) - (\tau_{prm}^a - \tau_{prm}^b) - (\delta_{t1}^a - \delta_{t1}^b). \quad (1)$$

Анализ (1) показывает, что в методе общего охвата оценивание сдвига шкал сводится к измерению и вычитанию значений временных положений огибающих общего сигнала, принятого в пунктах, а также исключению разностей задержек в канале распространения радиоволн и аппаратуре пунктов. Последнее слагаемое в правой части (1) $(\delta_{t1}^a - \delta_{t1}^b)$ определяет потенциальную (помеховую) погрешность измерений, определяемую значением отношения сигнал/помеха (с/п).

Разработанная в пакете Matchcad-14 модель состоит из блоков, соответствующих основным этапам обработки сигналов в пассивных системах синхронизации:

1) блок формирования общего сигнала (рис. 3) позволяет формировать видео и радиосигналы с различными огибающими;

2) блоки моделирования устройств квадратурной обработки и согласованной фильтрации (СФ) (рис. 4) обеспечивают выполнение соответствующих математических операций и входят составными частями в исследуемые модели рис.5 и 6;

3) блок квадратурной обработки сигналов (КОС) и статистической оценки результатов измерений для СФ в каждом из пунктов – блок «КОС+СФ» (рис. 5) позволяет получить первое из сравниваемых значений оцениваемого параметра;

4) блок КОС и статистической оценки результатов измерений для ВКО принимаемых в пунктах сигналов – блок «КОС+ВКО» (рис. 6) дает второе значение оцениваемого параметра и отражает результат работы предлагаемого пассивного метода общего охвата.

Блок формирования сигналов (рис. 3) включает генератор общего сигнала $s_0(t)$, формируемого путем модуляции (блок «М») несущей $s_0(t)$ видеосигналом $S_{ор0}(t)$.

Кроме структуры блоков на рис. 3 – 6 качественно показаны основные временные диаграммы.

Блок моделирования устройства квадратурной обработки (обведен пунктиром на рис.4) позволяет имитировать обработку общего сигнала $s_0(t)$ без помех (в положении 1 переключателя П1), аддитивной смеси (см. сумматор «+») общего сигнала и помехи– $s_1(t)$ (в положении 2 переключателя П1), только помехи $n(t)$ (в положении 3 переключателя П1). Для изменения отношения с/п предусмотрен аттенюатор «Ат.».

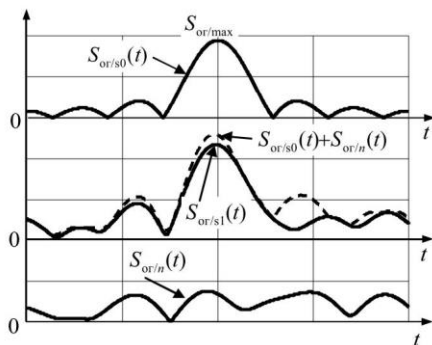


Рис. 2. Принцип ВКО сигналов

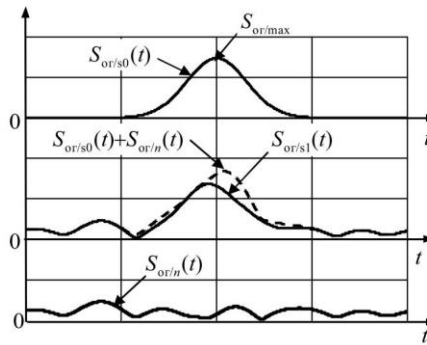


Рис. 3. Структура блока формирования сигналов

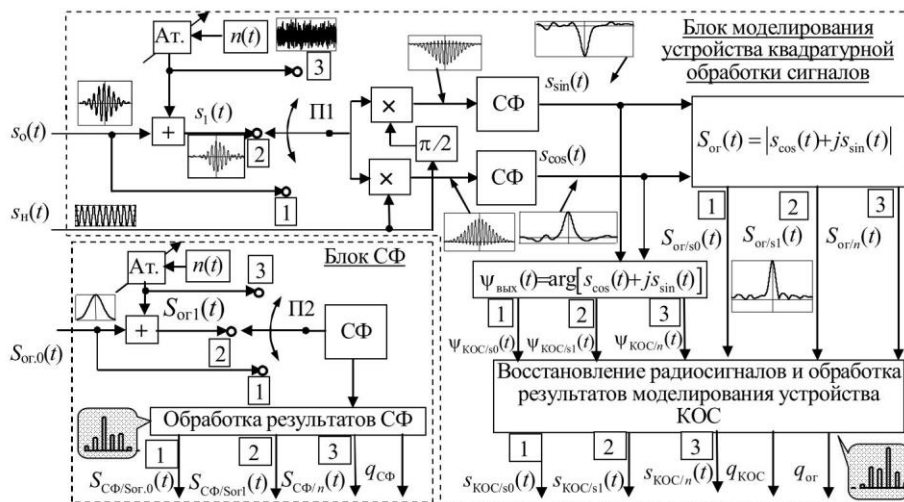


Рис. 4. Структуры блоков моделирования устройства квадратурной обработки и СФ

Устройство квадратурной обработки состоит из двух каналов, каждый из которых включает перемножитель « \times » и СФ для огибающей общего сигнала $S_{ор}(t)$. В качестве гетеродина используется несущая $s_n(t)$, сдвинутая по фазе на $\pi/2$ в одном из каналов. Выходные сигналы каналов $s_{\sin}(t)$, $s_{\cos}(t)$ используются для определения огибающих $S_{ор}(t) = |s_{\cos}(t) + js_{\sin}(t)|$ и фаз $\Psi_{КОС}(t) = \arg[s_{\cos}(t) + js_{\cos}(t)]$ принятых сигналов. Для огибающих и фаз соответствующих выходных сигналов приняты обозначения: $S_{ор/с0}(t)$; $\Psi_{КОС/с0}(t)$; $S_{ор/с1}(t)$; $\Psi_{КОС/с1}(t)$; $S_{ор/сn}(t)$; $\Psi_{КОС/сn}(t)$.

Сигнал на выходе блока квадратурной обработки имеет вид

$$s_{KOC}(t) = S_{oz}(t) \cos[\omega_0 t + \Psi_{KOC}(t)],$$

где ω_0 – угловая частота несущей общего сигнала.

Выходные радиосигналы типа «сигнал», «сигнал+помеха» и «помеха» обозначены соответственно: $s_{KOS/s0}(t)$; $s_{KOS/s1}(t)$; $s_{KOS/n}(t)$.

Обработка результатов моделирования устройства квадратурной обработки заключается в количественных оценках отношений с/п для огибающих и для восстановленных радиосигналов (соответственно q_{or} и q_{KOC}), построении гистограмм и оценок законов распределения помех для огибающих и восстановленных радиосигналов, проверке принципа наложения и др.

Блок моделирования СФ огибающей общего сигнала (обведен пунктиром на рис.4) в зависимости от положения переключателя П2 имитирует согласованный фильтр огибающей общего сигнала $S_{or0}(t)$ без помех, суммы огибающей и помехи $S_{or1}(t)$ и только помехи $n(t)$. Назначение аттенюатора и принятые обозначения для огибающих на выходе аналогичны блоку моделирования устройства квадратурной обработки. Основное назначение блока состоит в выдаче отношений с/п для согласованной фильтрации q_{CF} и последующем их сравнении с отношениями с/п для квадратурной обработки (q_{or} и q_{KOC}).

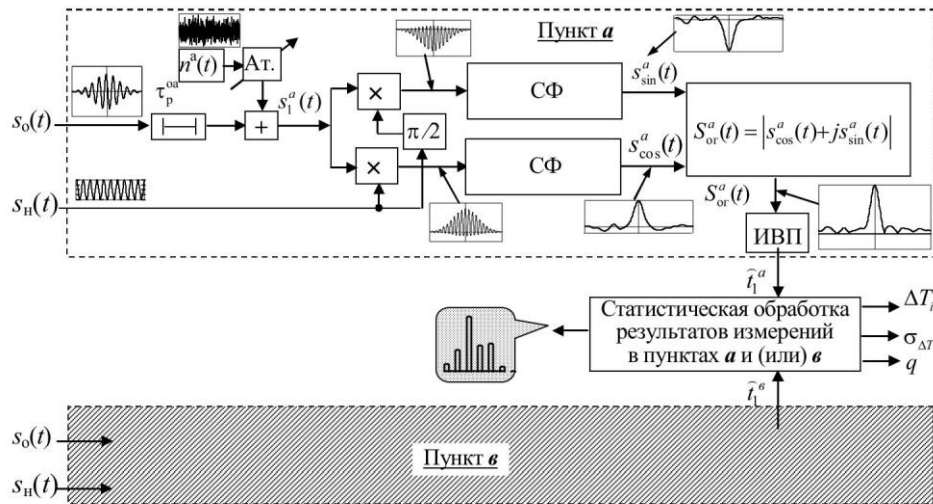


Рис. 5. Структура блока моделирования «КОС+СФ»

С целью упрощения для блоков «КОС+СФ» (рис.5) и «КОС+ВКО» (рис. 6) полные структурные схемы приведены только для одного из пунктов (пункт a). Структурные схемы для второго пункта, которые отличаются только индексом b в обозначениях, условно показаны заштрихованными прямоугольниками.

Идентичными для блоков «КОС+СФ» и «КОС+ВКО» являются: линии задержки, имитирующие запаздывание сигнала в канале распространения τ_p^{oa}, τ_p^{ob} ; генераторы помех $n^a(t), n^b(t)$; аттенюаторы «Ат.» и сумматоры «+», формирующие аддитивные смеси задержанного общего сигнала и помех $s_1^a(t), s_1^b(t)$, элементы устройств квадратурной обработки – перемножители « \times » и фазовращатели на $\pi/2$; формирователи огибающих $S_{oz}(t) = |s_{\cos}(t) + js_{\sin}(t)|$; измерители временного положения сигналов «ИВП»; алгоритмы статистической обработки результатов измерений.

Блоки «КОС+СФ» и «КОС+ВКО» отличаются устройствами обработки в квадратурных каналах. В блоке «КОС+СФ» используется согласованный фильтр (см. рис. 5), а в блоке «КОС+ВКО» – фильтры нижних частот (см. рис. 6) для подавления преобразованных сигналов с частотой $2\omega_0$. Блок «КОС+ВКО» отличается также наличием устройства для ВКО огибающих сигналов в пунктах $S_{oz}^a(t), S_{oz}^b(t)$.

Результатами моделирования пассивной системы синхронизации для случаев применения квадратурной обработки с последующей СФ либо ВКО являются средние значение сдвигов шкал $\overline{\Delta T}$ и СКО измерений $\sigma_{\Delta T}$, а также гистограммы, позволяющие проверить гипотезы о законах распределения. Поскольку нелинейность квадратурной обработки приводит к большему отношению с/п на выходе, чем в случае СФ, для анализа используются значения $q_{СФ}$ по результатам моделирования СФ огибающей.

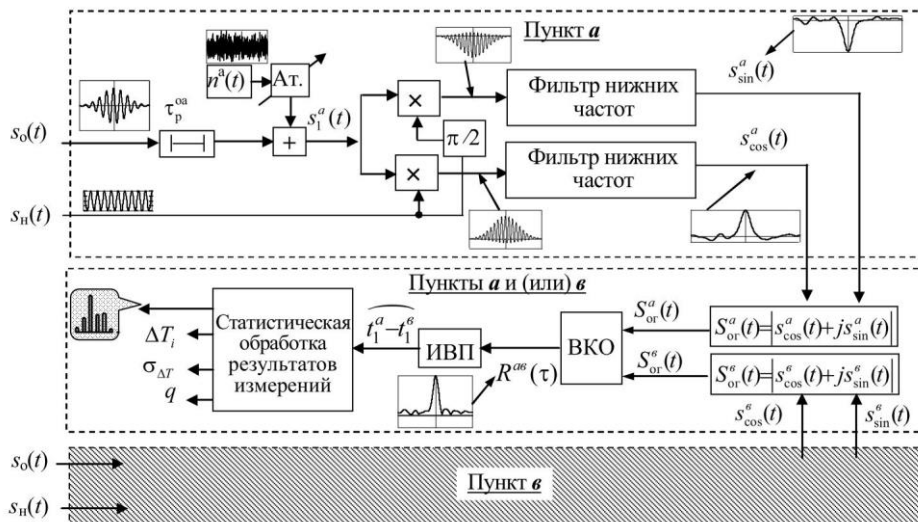


Рис. 6. Структура блока моделирования «КОС+ВКО»

Результаты моделирования устройства квадратурной обработки и согласованной фильтрации

В результате моделирования получены реализации мгновенных значений огибающих ($S_{ор/s0}(t)$, $S_{ор/s1}(t)$, $S_{ор/п}(t)$) и восстановленных радиосигналов ($s_{KOC/s0}(t)$; $s_{KOC/s1}(t)$; $s_{KOC/n}(t)$) после квадратурной обработки для различных видов общего сигнала. Показанные в качестве примеров на рис. 7 виды огибающих, а на рис. 8 – восстановленных радиосигналов для *Sinc* (а) и колокольного (б) импульсов демонстрируют появление погрешности оценки временного положения сигналов вследствие помехового воздействия. Анализ показал, что для огибающих не выполняется, а для восстановленных радиосигналов выполняется принцип наложения:

$$S_{ор/s1}(t) \neq S_{ор/s0}(t) + S_{ор/п}(t);$$

$$s_{KOC/s1}(t) = s_{KOC/s0}(t) + s_{KOC/n}(t).$$

Отношения с/п для восстановленного в устройстве квадратурной обработки радиосигнала $s_{KOC/s1}(t)$ и для СФ одинаковы:

$$q_{СФ} = q_{КОС},$$

где $q_{КОС} = S_{КОС/маx} / \sigma_{КОС/n}$; $S_{КОС/маx}$ – максимальное значение восстановленного сигнала без помех (см. рис.8); $\sigma_{КОС/n}$ – среднеквадратическое отклонение восстановленного узкополосного шума; $q_{СФ} = S_{СФ/маx} / \sigma_{СФ/n}$; $S_{СФ/маx}$, $\sigma_{СФ/n}$ – максимальное значение сигнала без помех и среднеквадратическое отклонение шума на выходе СФ.

Отношение с/п для огибающих при квадратурной обработке составляет

$$q_{ор} \approx 1,5q_{КОС} = 1,5q_{СФ},$$

где $q_{ор} = S_{ор/маx} / \sigma_{ор/n}$; $S_{ор/маx}$ – максимальное значение огибающей сигнала без помех при квадратурной обработке (см. рис.7); $\sigma_{ор/n}$ – СКО огибающей шума при квадратурной обработке.

Как следует из рис. 9, гистограмма распределения значений огибающей шума приближенно соответствует закону распределения Релея (рис. 9, а), а для мгновенных значений восстановленного узкополосного шума закон распределения Гауссов (рис. 9, б).

Математическое ожидание значений огибающей шума на рис. 9, а обозначено $m_{ор/n}$.

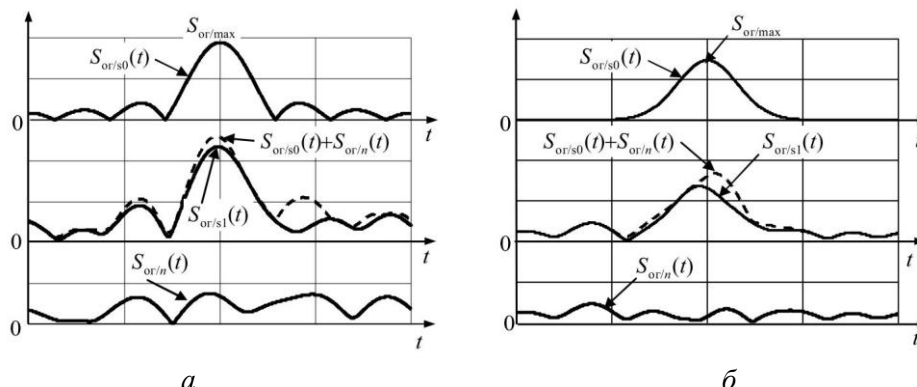


Рис. 7. Реализации огибающих на выходе устройства квадратурной обработки для $q_{C\Phi} = q_{KOC} = 7$

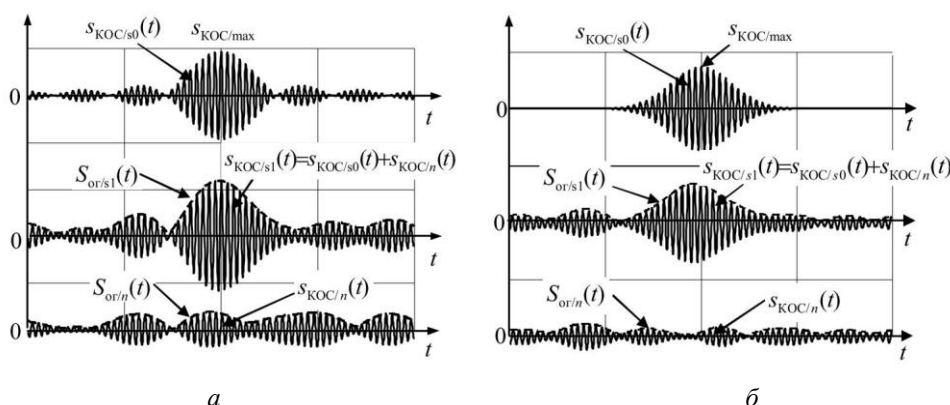


Рис. 8. Реализации восстановленных радиосигналов на выходе устройства квадратурной обработки для $q_{C\Phi} = q_{KOC} = 7$

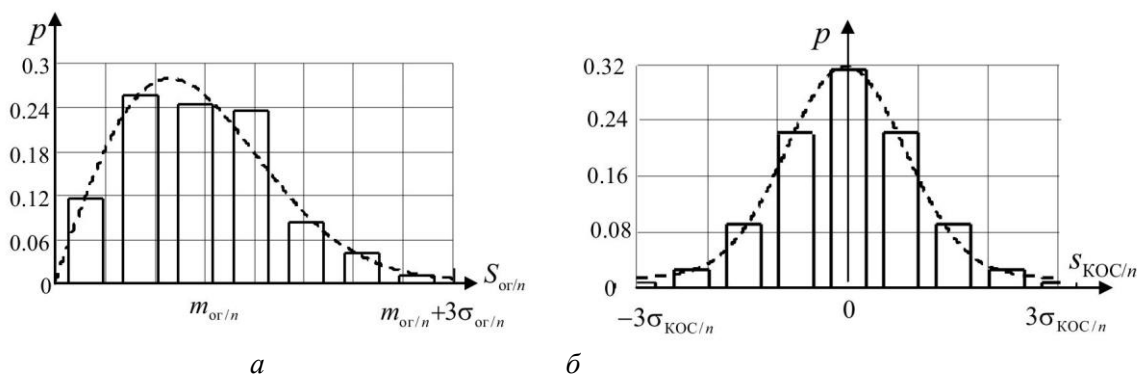


Рис. 9. Распределения значений огибающей шума (а) и восстановленного узкополосного шума (б)

Результаты моделирования пассивной системы синхронизации для случаев применения квадратурной обработки и последующей СФ либо ВКО

Приведенные на рис.10 результаты исследований для случая $M = T_n \Delta\omega_{эф} = 25$ (T_n – интервал наблюдения; $\Delta\omega_{эф}$ – эффективная ширина спектра огибающей [9]) подтверждают

наличие пороговых эффектов, что проявляется в резком увеличении среднеквадратического отклонения измерения сдвига шкал $\sigma_{\Delta T}$ при уменьшении отношения с/п ниже некоторого порогового значения $q_{пор}$. Хотя пороговые эффекты теоретически обоснованы для измерения временного положения сигналов после согласованной фильтрации, однако модельные значения $q_{пор}$ для пассивных систем синхронизации в случае квадратурной обработки ($q_{пор/(КОС+СФ)}$) и $q_{пор/(КОС+ВКО)}$ на рис. 10) примерно на 3 дБ превышают теоретические значения [9].

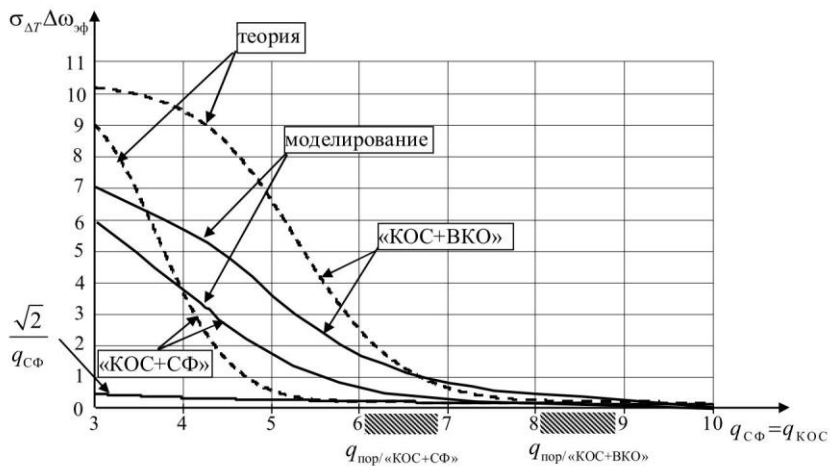


Рис. 10. Зависимости среднеквадратического отклонения измерения сдвига шкал в пассивных системах синхронизации от отношения с/п

При $q < q_{пор}$ зависимости $\sigma_i \Delta \omega_{эф}(q)$ для квадратурной обработки существенно отличаются от теоретических. В случае $q > q_{пор}$ точности измерения сдвига шкал в методе общего охвата для случаев квадратурной обработки и согласованной фильтрации практически совпадают.

Гистограммы распределений значений сдвига шкал ΔT_i , построенные на рис. 11, показывают, что при $q > q_{пор}$ закон распределения приближается к нормальному с математическим ожиданием $\overline{\Delta T}$, а при $q < q_{пор}$ – стремится к равномерному.

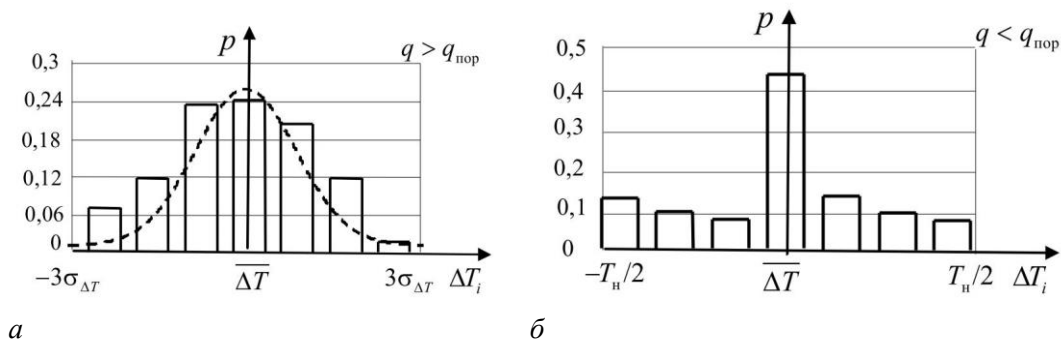


Рис. 11. Распределения модельных значений сдвига шкал

Выводы

Таким образом, при условии превышения отношений с/п соответствующих пороговых значений $q > q_{пор} = 6...9$ квадратурная обработка может быть использована в пассивных системах синхронизации для измерений сдвига шкал по огибающим общим сигналам совместно с согласованной фильтрацией либо взаимокорреляционной обработкой.

Недостатком квадратурного приема является усложнение аппаратуры, однако квадратурная составляющая может быть получена алгоритмически с использованием преобразования Гильберта, что не представляет сложности после оцифровки принятого сигнала.

Применение квадратурной обработки и получение огибающей сигнала общего источника позволяет существенно уменьшить объем информации, которой обмениваются пункты для последующей взаимокорреляционной обработки, что является преимуществом по сравнению с передачей сигнала радио или промежуточной частоты.

Представляет интерес развитие модели для случаев фазовых измерений, коррелированных и мультипликативных помех, вызванных изменением коэффициента затухания и многолучевостью в канале распространения радиоволн.

Список литературы: 1. *Reid, W.G., Oaks, O.J.* Fourier transform for non- uniformly sampled data in the study of systematic errors in common-view time transfer // *IEEE Proc. of 52th Annual International Frequency Control Symposium.* – 1998. – pp. 254. 2. *Reid, W.G., MacCaskill, T.B., Oaks, O.J., Buisson, J.A., Warren, H.E.* Common View Time Transfer Using Worldwide GPS and DMA Monitor Stations // *Proc. 27th Annual Precise Time and Time Interval Applications and Planning Meeting.* – 1995. – pp. 145–158. 3. *Коваль, Ю. А.* Анализ возможностей метода общего охвата для высокоточной синхронизации стандартов времени и частоты в пределах прямой видимости / Ю. А. Коваль, А. А. Костыря, В. В. Обельченко, Е. Ю. Бондарь, Е. А. Иванова, Е. П. Ермолаев, М. В. Милых // *Радиоэлектроника. Информатика. Управление.* – Запорожье : ЗНТУ, 2009. – № 1(20). – С. 21-30. 4. *Коваль, Ю.А.* Моделирование систем частотно-временной синхронизации, использующих сигналы общих источников / Ю.А. Коваль, Е.А. Иванова, А.А. Костыря, Б.А. Ал-Твежри // *Известия вузов. Радиоэлектроника.* – 2011. – Вып. № 2 (т. 54). – С. 12-21. *Koval, Yu.* Modeling frequency-time synchronization systems that use signals of common sources / *Yu. Koval, E. Ivanova, A. Kostyrja and B. Al-Tvejri // Radioelectronics and Communications Systems, 2011, Volume 54, Number 2, Pages 68-76.* 5. *Weiss, M. A., Powers, E., Kropp, A., Fonville, B., Fenton, P. and Pelletier, R.* “Time and Frequency Transfer Using a WAAS Satellite with L1 and L5 Code and Carrier,” in *Proceedings of the 2008 IEEE International Frequency Control Symposium (FCS), 19-21 May 2008, Honolulu, Hawaii, USA (IEEE Publication CFP08FRE-CDR), pp. 733-737.* 6. *Должиков, В.В.* Исследования макета пассивной системы синхронизации по фазе несущей частоты аналогового телевизионного сигнала / В.В. Должиков, А. А. Костыря, В.Н. Науменко, С.А. Плехно, С.И. Ушаков // *Радиотехника.* – 2014. – Вып. 178. – С. 111 – 118. 7. *Richards, M. A.* *Fundamentals of Radar Signal Processing.* New York: McGraw-Hill, 2005. 8. *Elachi, C.,* *Introduction to the Physics and Techniques of Remote Sensing,* John Wiley & Sons, New York, 1987. 9. *Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория.* Справочник. Изд. 2-е, перераб. и доп. ; под ред. Я.Д. Ширмана. – М. : Радиотехника, 2007. – 512 с.

*Харьковский национальный
университет радиоэлектроники*

Поступила в редколлегию 25.06.2015