

Ю. А. КОВАЛЬ *д-р техн. наук*, А. А. КОСТЫРЯ, *канд. техн. наук*,  
Е. А. ИВАНОВА, *канд. техн. наук*, А. Ф. ХУСЕЙН

## ПОГРЕШНОСТИ И НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ФАЗОВЫХ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ МЕТОДОВ СИНХРОНИЗАЦИИ РАЗНЕСЕННЫХ ЭТАЛОНОВ ВРЕМЕНИ

### Введение и постановка задачи

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 разрабатывается новый метод с применением сигналов, излучаемых ГС [7].

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], комплексный анализ погрешностей и неопределенностей ФМС разнесенных эталонов времени отсутствует. Учитывая это, авторы статьи попытались провести такой анализ как теоретически, так и путем моделирования.

### Теоретический анализ погрешностей и неопределенностей ФМС

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. При этом для синхронизации могут быть использованы традиционные алгоритмы [3], учитывающие специфику ФМС, – две группы активных (фазовый встречный алгоритм – ФВА и фазовые ретрансляционный и опорно-ретрансляционные алгоритмы – ФРА, ФОРА) и пассивный (фазовый алгоритм общего охвата – ФАОО, называемый также англ. *common-view*).

Упрощенные временные диаграммы, иллюстрирующие сущность ФВА, ФРА и ФАОО, построены на рис. 1 – 3, где применены обозначения:

- $\omega_0$  – несущая частота когерентных со шкалами времени сигналов для ФВА, ФРА, ФОРА или известная несущая частота общего сигнала  $s_0(\varphi)$  в случае ФАОО;
- $\varphi = \omega_0 t$  – текущие фазы сигналов;

- $H^A(\varphi)$ ,  $H^B(\varphi)$  – фазовые шкалы времени пунктов А и В соответственно;
- $\Delta T^{AB}$ ,  $\Delta\varphi^{AB}=\omega_0\Delta T^{AB}$  – сдвиги шкал во времени и по фазе;
- $\varphi_1^A=\omega_0 t_1^A$ ,  $\varphi_1^B=\omega_0 t_1^B$ ,  $\varphi_2^A=\omega_0 t_2^A$ ,  $\varphi_2^B=\omega_0 t_2^B$  – фазовые сдвиги принимаемых сигналов

относительно фазовых шкал времени пунктов А и В соответственно (индекс 1 относится к циклу трансляции, а индекс 2 – к циклу ретрансляции для ФРА и ФОРА);

- $n$  – коэффициент опорной ретрансляции в случае ФОРА ( $n>-1$ ,  $n\neq 0$ ) или коэффициент ретрансляции в ФРА ( $n<-1$ ).

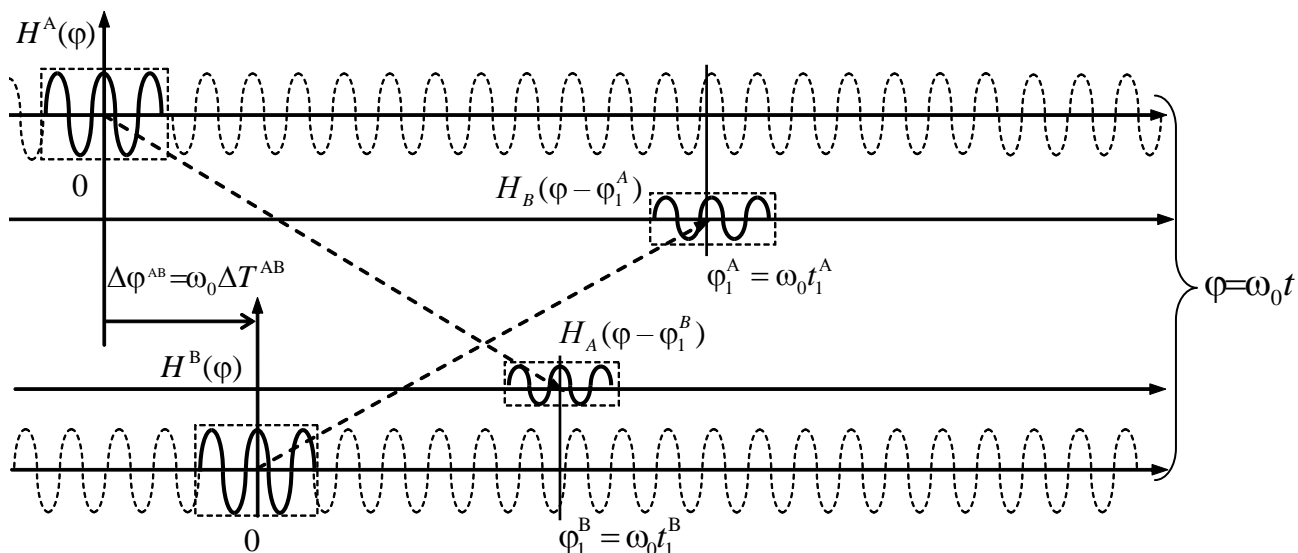


Рис. 1. Фазовый встречный алгоритм

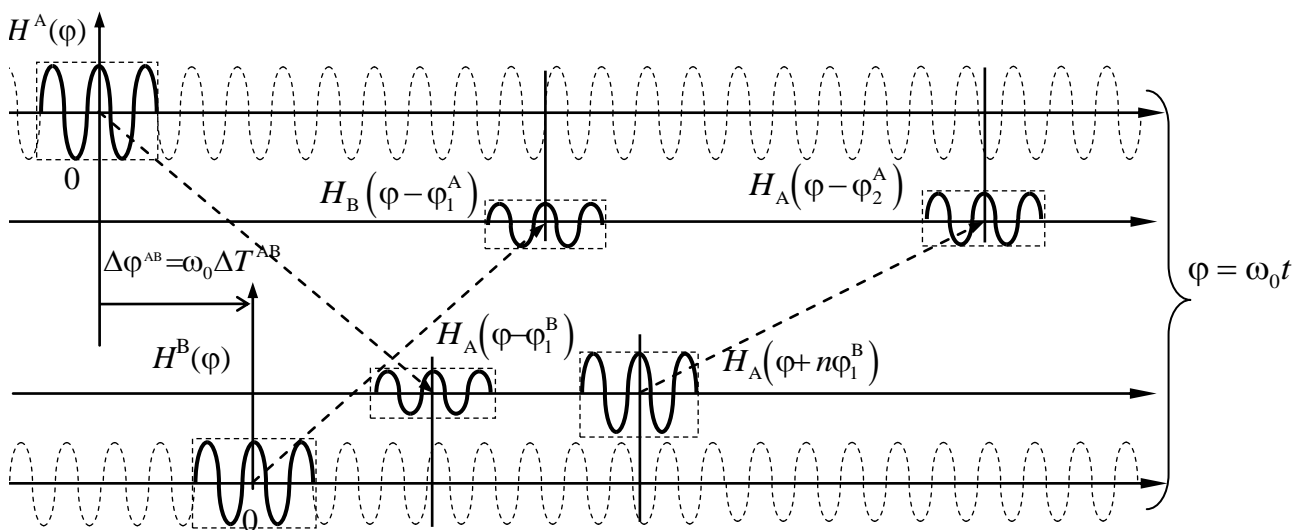


Рис. 2. Фазовые ретрансляционный ( $n<-1$ ) и опорно-ретрансляционный ( $n>-1$ ) алгоритмы

Основными источниками погрешностей ФМС являются: амплитудные и фазовые искажения сигналов, а также нестабильность и невязимость фазовой задержки сигналов в канале распространения радиоволн (РРВ); тракты аппаратуры, имеющие нестабильность и невязимость (для устройств, участвующих как в излучении, так и в приеме сигналов) фазовой задержки сигналов; конечное отношение сигнал/помеха; фазовая нестабильность сигналов эталонов и устройств привязки к этим сигналам; непостоянство измеряемой величины из-за взаимного хода шкал сверяемых эталонов; каналы обмена измерительной информацией между пунктами (в случае, если производится обмен результатами измерений); алгоритмы обработки результатов измерений. Грубые погрешности (промахи) в ФМС возникают из-за ошибок в устранении неоднозначности фазовых измерений, аномальных измерений времен-

ного положения сигналов (случай измерений по ложным выбросам помехи), многолучевости РРВ и ошибок в канале связи (случай, когда измерения сопряжены с передачей данных).

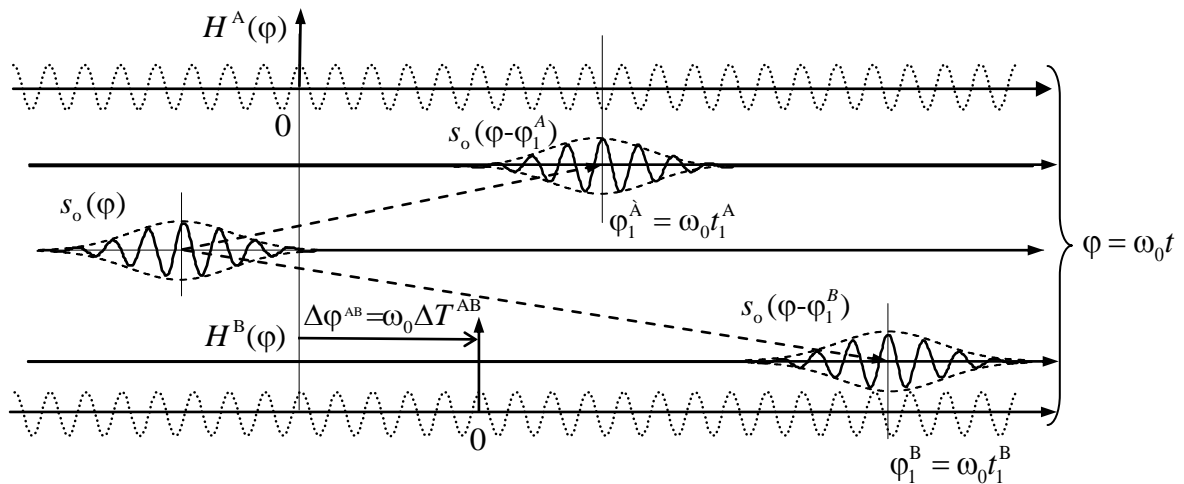


Рис. 3. Фазовый алгоритм общего охвата

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; аппаратные.

Ограничиваясь основными источниками погрешностей, можно получить соотношения для оценок фазовых сдвигов шкал  $\Delta\varphi^{AB}$  (табл. 1) и величин канальной ( $\delta_{\Delta\varphi}^{AB}(\text{ДВВ})$ ), помеховой ( $\delta_{\Delta\varphi}^{AB}(\text{ПВ})$ ) и аппаратной ( $\delta_{\Delta\varphi}^{AB}(\text{АВ})$ ) слагаемых суммарной погрешности (табл. 2). При выводе соотношений для ФОРА принято значение опорного момента времени  $t_{1i}$ , относительно которого осуществляется ретрансляция, равное целому числу периодов несущей ( $t_{1i} = \hat{e}\hat{O}_0$ ). При этом  $\varphi_{1i} = \hat{e}2\pi = 0$ .

В этих таблицах приняты обозначения:

- $\Delta\varphi_{\text{ac}} = \varphi_{\text{ED}\hat{A}}^{\text{BA}} - \varphi_{\text{ED}\hat{A}}^{\text{AB}}$ ,  $\Delta\varphi_{\text{ac}} = \hat{\varphi}_{\text{ED}\hat{A}}^{\text{BA}} - \hat{\varphi}_{\text{ED}\hat{A}}^{\text{AB}}$  – истинное значение и оценка невзаимности фазовой задержки сигналов за счет физических особенностей в канале РРВ;
- $V_{\varphi} = d\varphi_{\text{ED}\hat{A}}/dt$ ,  $V_{\varphi}$  – истинное значение и оценка скорости изменения фазовой задержки сигналов при РРВ;
- $\tau_{12}, \hat{\tau}_{12}$  – временной интервал между циклами трансляции и ретрансляции сигналов (для ФРА и ФОРА) и его оценка;
- $\Delta T^{AB}$  – оценка сдвига шкалы времени пункта А относительно шкалы пункта В;
- $\delta_{\varphi 1}^A, \delta_{\varphi 1}^B, \delta_{\varphi 2}^A, \delta_{\varphi 2}^B$  – случайные абсолютные значения помеховых погрешностей измерений фазовых сдвигов принимаемых сигналов относительно фазовых шкал времени пунктов А и В соответственно для циклов трансляции (индекс 1) и ретрансляции (индекс 2) сигналов (для ФРА и ФОРА);
- $\Delta\varphi_{\hat{\sigma}1}^{\hat{A}}, \Delta\varphi_{\hat{\sigma}1}^{\hat{A}}, \Delta\varphi_{\hat{\sigma}1}^{\hat{A}}, \Delta\varphi_{\hat{\sigma}1}^{\hat{A}}, \Delta\varphi_{\hat{\sigma}2}^{\hat{A}}, \Delta\varphi_{\hat{\sigma}2}^{\hat{A}}, \Delta\varphi_{\hat{\sigma}2}^{\hat{A}}, \Delta\varphi_{\hat{\sigma}2}^{\hat{A}}$  – истинные и оценочные величины фазовых задержек в приемных и передающих трактах пунктов А и В соответственно;
- $\hat{\varphi}_{\text{ED}\hat{A}}^{\hat{A}}, \hat{\varphi}_{\text{ED}\hat{A}}^{\text{O}\hat{A}}, \hat{\varphi}_{\text{ED}\hat{A}}^{\hat{A}}, \hat{\varphi}_{\text{ED}\hat{A}}^{\text{O}\hat{A}}$  – истинные значения и оценки фазовых задержек общего сигнала при РРВ до пунктов А и В (в случае ФАОО).

Таблица 1

Алгоритмы	$\Delta\varphi^{AB}$
<b>ФВА</b>	$\frac{(\varphi_1^A - \varphi_1^B) - (\Delta\varphi_{\hat{a}\zeta} + V_\varphi \Delta T^{AB}) - \left[ \left( \Delta\varphi_{\hat{i}\delta\hat{i}} - \Delta\varphi_{\hat{i}\delta\hat{a}} \right) - \left( \Delta\varphi_{\hat{i}\delta\hat{i}} - \Delta\varphi_{\hat{i}\delta\hat{a}} \right) \right]}{2}$
<b>ФРА</b> ( $n < -1$ )	$\frac{\left[ (n-1)\varphi_1^A + \varphi_2^A \right] - (\Delta\varphi_{\hat{a}\zeta} + V_\varphi \hat{\tau}_{12}/n) - \left( \Delta\varphi_{\hat{i}\delta\hat{i}} - \Delta\varphi_{\hat{i}\delta\hat{a}} \right) - \left( \Delta\varphi_{\hat{i}\delta\hat{i}} - \Delta\varphi_{\hat{i}\delta\hat{a}} \right)}{2n};$
<b>ФОРА</b> ( $n > -1, n \neq 0$ )	$\varphi_2^A - (\Delta\varphi_{\hat{a}\zeta} + V_\varphi \hat{\tau}_{12}) - \left[ \left( \Delta\varphi_{\hat{i}\delta\hat{i}} - \Delta\varphi_{\hat{i}\delta\hat{a}} \right) - \left( \Delta\varphi_{\hat{i}\delta\hat{i}} - \Delta\varphi_{\hat{i}\delta\hat{a}} \right) \right] \rightarrow \text{для } n=1$
<b>ФАОО</b>	$(\varphi_1^A - \varphi_1^B) - (\hat{\varphi}_{\hat{D}\hat{D}\hat{A}}^{OA} - \hat{\varphi}_{\hat{D}\hat{D}\hat{A}}^{OA}) - \left( \Delta\varphi_{\hat{i}\delta\hat{i}} - \Delta\varphi_{\hat{i}\delta\hat{i}} \right)$

Таблица 2

Погрешности	ФВА	ФРА ( $n < -1$ ); ФОРА ( $n > -1; n \neq 0$ )	ФАОО
$\delta_{\Delta\varphi}^{AB}$ ( <b>ЕЕВ</b> )	$0,5(\Delta\varphi_{\hat{a}\zeta} + V_\varphi \Delta T^{AB}) - 0,5(\Delta\varphi_{\hat{a}\zeta} + V_\varphi \Delta T^{AB})$	$0,5(\Delta\varphi_{\hat{a}\zeta} + V_\varphi \tau_{12}/n) - 0,5(\Delta\varphi_{\hat{a}\zeta} + V_\varphi \hat{\tau}_{12}/n)$	$(\hat{\varphi}_{\hat{D}\hat{D}\hat{A}}^{\hat{A}} - \hat{\varphi}_{\hat{D}\hat{D}\hat{A}}^{\hat{A}}) - (\hat{\varphi}_{\hat{D}\hat{D}\hat{A}}^{OA} - \hat{\varphi}_{\hat{D}\hat{D}\hat{A}}^{OA})$
$\delta_{\Delta\varphi}^{AB}$ ( $\hat{n}/\hat{i}$ )	$\frac{\delta_{\varphi 1}^A - \delta_{\varphi 1}^B}{2}$	$\frac{\delta_{\varphi 2}^A - n\delta_{\varphi 1}^B + (n-1)\delta_{\varphi 1}^A}{2n}; \frac{\delta_{\varphi 2}^A - \delta_{\varphi 1}^B}{2} \rightarrow n=1$	$\delta_{\varphi 1}^A - \delta_{\varphi 1}^B$
$\delta_{\Delta\varphi}^{AB}$ ( $\hat{a}\hat{i}$ )	$0,5 \left[ \left( \Delta\varphi_{\hat{i}\delta\hat{i}} - \Delta\varphi_{\hat{i}\delta\hat{a}} \right) - \left( \Delta\varphi_{\hat{i}\delta\hat{i}} - \Delta\varphi_{\hat{i}\delta\hat{a}} \right) \right] - 0,5 \left[ \left( \Delta\varphi_{\hat{i}\delta\hat{i}} - \Delta\varphi_{\hat{i}\delta\hat{a}} \right) - \left( \Delta\varphi_{\hat{i}\delta\hat{i}} - \Delta\varphi_{\hat{i}\delta\hat{a}} \right) \right]$		$\left( \Delta\varphi_{\hat{i}\delta\hat{i}} - \Delta\varphi_{\hat{i}\delta\hat{i}} \right) - \left( \Delta\varphi_{\hat{i}\delta\hat{i}} - \Delta\varphi_{\hat{i}\delta\hat{i}} \right)$

Соотношения для расчета среднеквадратических отклонений (СКО) помеховых погрешностей измерения фазового сдвига шкал в пункте А ( $\sigma_{\Delta\varphi}^{AB}$ ), а также коэффициента корреляции помеховых погрешностей в пунктах ( $R[\delta_{\Delta\varphi}^{AB}(\hat{n}/\hat{i}) \vee \delta_{\Delta\varphi}^{BA}(\hat{n}/\hat{i})]$ ) приведены в табл. 3, где приняты обозначения:

- $\sigma_\varphi^A, \sigma_\varphi^B$  – СКО помеховых погрешностей измерений фазовых сдвигов принимаемых сигналов в пунктах А и В соответственно;
- $m_A = (\sigma_\varphi^B / \sigma_\varphi^A)^2$  – коэффициент, учитывающий различие помеховых обстановок в пунктах А и В;
- $\sigma_{\Delta\varphi}^{AA}$  – СКО измерения фазового сдвига шкалы пункта А относительно шкалы пункта В.

Для удобства сравнения алгоритмов фазовой синхронизации в табл. 3 приведены соотношения для относительных значений СКО

$$\left( \sigma_{\Delta\varphi}^{AB} \right)' = \frac{\sigma_{\Delta\varphi}^{AA}}{\sigma_{\Delta\varphi}^{AA}(\hat{O}\hat{A}\hat{A})},$$

где  $\sigma_{\Delta\varphi}^{AB}(\hat{O}\hat{A}\hat{A})$  – СКО результатов измерений фазового сдвига шкал для ФВА.

Формулы для случайных погрешностей измерения фазового сдвига шкалы пункта В относительно шкалы пункта А ( $\sigma_{\Delta\varphi}^{B\hat{\Lambda}}$ ) отличаются от приведенных в табл. 3 индексами. СКО  $\sigma_{\varphi}^A$  следует заменить на  $\sigma_{\varphi}^{\hat{A}}$ , а коэффициент  $m_A$  – на  $m_B = (\sigma_{\varphi}^A / \sigma_{\varphi}^B)^2$ .

Таблица 3

Алгоритмы	$\sigma_{\Delta\varphi}^{AB}$	$(\sigma_{\Delta\varphi}^{AB})'$	$R[\delta_{\Delta\varphi}^{AB}(\tilde{n}/i) \vee \delta_{\Delta\varphi}^{BA}(\tilde{n}/i)]$
<b>ФВА</b>	$0,5\sigma_{\varphi}^A\sqrt{1+m_A}$	1	-1
<b>ФРА</b> ( $n < -1$ )	$\frac{\sigma_{\varphi}^A\sqrt{n^2(1+m_A)-2n+2}}{2 n }$ ;	$\sqrt{\frac{n^2(1+m_A)-2n+2}{n^2(1+m_A)}}$ ;	$\frac{n(1-n)}{\sqrt{\left(n^2-\frac{2(n-1)}{m_A+1}\right)\left(n^2-\frac{2m_A(n-1)}{m_A+1}\right)}}$ ;
<b>ФОРА</b> ( $n > -1, n \neq 0$ )			
<b>ФАОО</b>	$\sigma_{\varphi}^A\sqrt{1+m_A}$	2	-1

Случайные помеховые погрешности для ФРА и ФОРА зависят от коэффициентов ретрансляции  $n$ . Анализ показывает, что помеховые погрешности минимальны для ФОРА в случае  $n = 2$ . Как показывает анализ, от величины  $n$ , зависит также коэффициент корреляции помеховых погрешностей в пунктах (см. табл. 3). Декорреляция помеховых погрешностей в пунктах (например, для ФОРА  $R(1) = 0$ ) позволяет, после обмена между пунктами результатами измерений сдвига шкал, уменьшить помеховую погрешность.

Преимущество ФВА и ФАОО по сравнению с аналогичными алгоритмами при измерениях по огибающим сигналов (ВА и АОО) состоит в меньшем объеме передаваемой информации о результатах измерений, поскольку диапазон значений  $\varphi_1^A, \varphi_1^B$  для ФВМ составляет  $-\pi \dots \pi$  или  $0 \dots 2\pi$ .

Если для ФОРА принять  $\varphi_{1i} = 0$ , то реализация ФОРА и ФРА сводится к изменению фазы ретранслированных сигналов по сравнению с измеренными начальными фазами принимаемых сигналов в  $-n$  раз. В случае ФОРА и  $n=1$  фазы принятых и ретранслированных сигналов будут отличаться только знаком ( $\varphi_2^A = -\varphi_1^A, \varphi_2^{\hat{A}} = -\varphi_1^{\hat{A}}$ ). Такие изменения фаз можно получить путем преобразования частоты при соответствующем выборе частот гетеродинов.

Основными достоинствами ФАОО, 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  $s_o(\varphi)$  с неполностью известными параметрами. В случае ФАОО необходимо, чтобы несущая частота сигнала  $s_o(\varphi)$  была известна и достаточно стабильна.

Принцип применения ВКО при реализации ФАОО показан на рис.4, где приведены:  $s_o(\varphi-\varphi_1^A), s_o(\varphi-\varphi_1^{\hat{A}})$  – сведенные в одном из пунктов сигналы общего источника, принятые в синхронизируемых пунктах;  $s_{\hat{O}\hat{A}\hat{E}\hat{O}}^{\hat{A}\hat{A}}(\varphi_{\tau}) = \int_{-\infty}^{\infty} s_o(\varphi-\varphi_1^{\hat{A}})s_o(\varphi-\varphi_1^A-\varphi_{\tau})d\varphi$  – фазовая взаимокорреляционная функция (ФВКФ) сигналов  $s_o(\varphi-\varphi_1^{\hat{A}})$  и  $s_o(\varphi-\varphi_1^A)$ .

Можно показать, что ВКФ  $s_{\hat{O}\hat{A}\hat{E}\hat{O}}^{\hat{A}\hat{A}}$  представляет собой согласованно обработанный сигнал общего источника, смещенный на величину  $(\varphi_1^{\hat{A}} - \varphi_1^{\hat{A}})$ . 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).

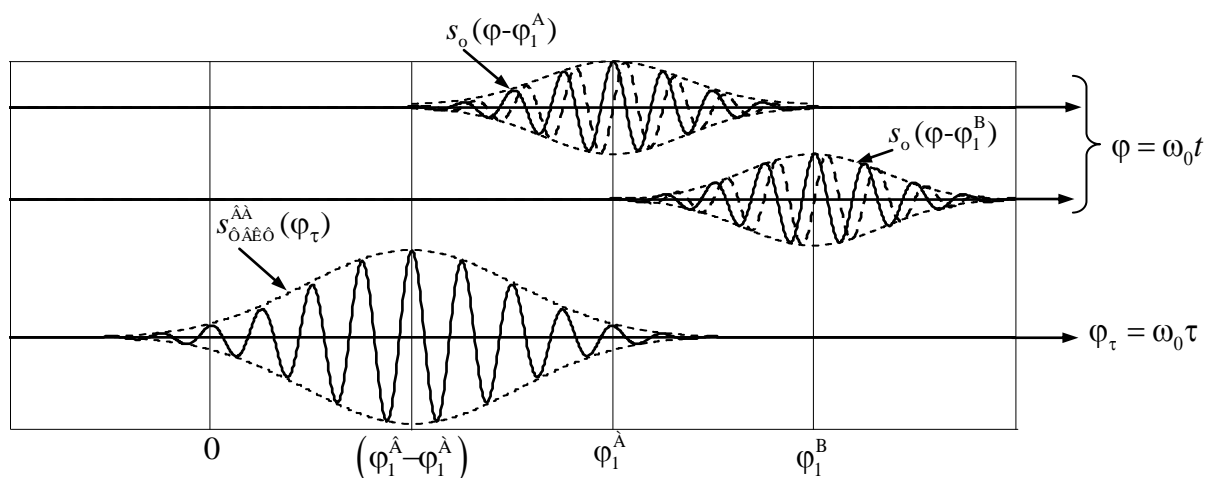


Рис. 4. Применение взаимокорреляционной обработки сигналов в ФАОО

Помимо погрешностей, для оценки качества измерений в настоящее время используются неопределенности измерений [8, 9]. Появились работы, в которых рассматривается неопределенность и при сличениях эталонов времени и частоты [10, 11].

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» [8, 9]  $u_{\langle\hat{A}\rangle/\Delta\varphi} = \sigma_{\Delta\varphi}$ .

Канальную  $\delta_{\Delta\varphi}^{AB}$  (ЕЕВ) и аппаратную  $\delta_{\Delta\varphi}^{AB}$  (äi) погрешности (см. выражения в табл.2) нельзя определить путем статистической обработки результатов измерений. Поэтому, согласно [8, 9], эти погрешности формируют неопределенность типа «В».

Для оценки стандартной фазовой канальной неопределенности  $u_{\langle\hat{A}\rangle/\Delta\varphi}$  (ЕЕА) применимы модели канала РРВ и независимые каналы калибровки, а для фазовой аппаратной неопределенности  $u_{\langle\hat{A}\rangle/\Delta\varphi}$  (äi) – 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. 5.

### Моделирование погрешностей фазовых измерений

С целью исследования погрешностей фазовых измерений для импульсных радиосигналов произвольной формы, принимаемых на фоне аддитивных некоррелированных и коррелированных помех, в пакете Matchcad-14 разработаны две модели.

В модели №1 фаза оценивается временным методом после стробирования в интервале  $\pm T_0/2$  в районе максимума сигналов на выходе согласованного фильтра (СФ).



Рис. 5. Структура погрешностей и неопределенностей измерений для ФМС

Модель включает: формирователи сигнала  $s_1(t)$  и помехи  $n_1(t)$ ; сумматор («+»); СФ; блок стробирования («Строб»  $\pm T_0/2$ ); блоки для измерения временного положения сигнала (ИВП) сигнала без и с помехой; блок обработки результатов. На рис. 6 приведены не только структура модели №1, но и основные временные диаграммы.

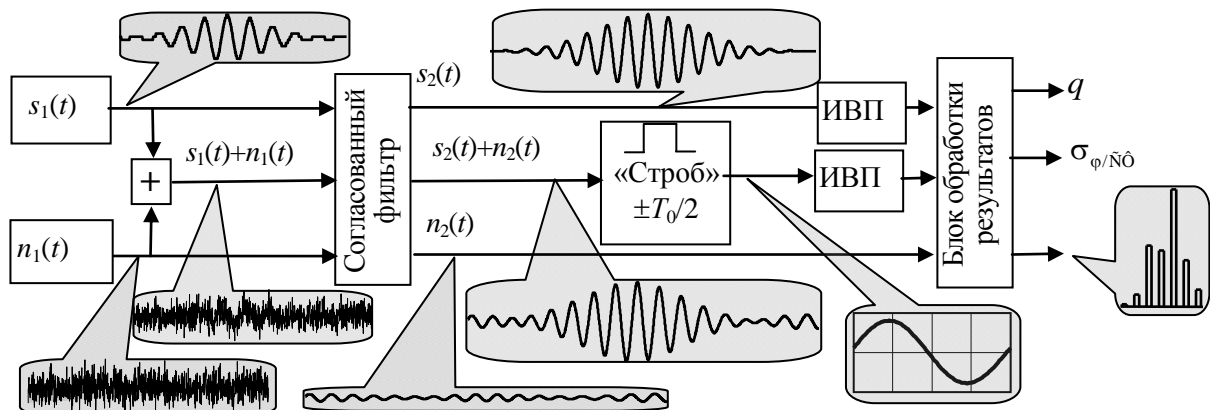


Рис. 6. Структура модели № 1

Модель позволяет определить СКО  $\sigma_{\varphi/\dot{N}\dot{O}}$  для различных отношений сигнал/помеха  $q$  и заданных значений фазы сигнала  $\psi_0$ . Построение гистограмм погрешностей позволяет проверить гипотезы о законах распределения.

Работу модели № 1 иллюстрирует рис. 7, а основные результаты исследований – рис. 8.

В модели №2 (рис. 9) применена широко используемая в радиолокации [12] и радионавигации [13] квадратурная обработка (КО) сигналов. Модель состоит из канала КО сигнала и канала СФ (отмечены на рис.9 пунктиром). Модель формирует огибающую сигнала  $S_{or}(t)$ , аддитивную помеху  $n_1(t)$ , несущее колебание  $s_0(t)$ , радиосигнал  $s_1(t)$ . На рис. 9 обозначены: «+» – сумматоры; «×» – умножители; « $\pi/2$ », « $\psi_0$ » – соответствующие фазовращатели. На рис. 1 приведены основные временные диаграммы для начальной фазы сигнала  $\psi_0=90^\circ$ .

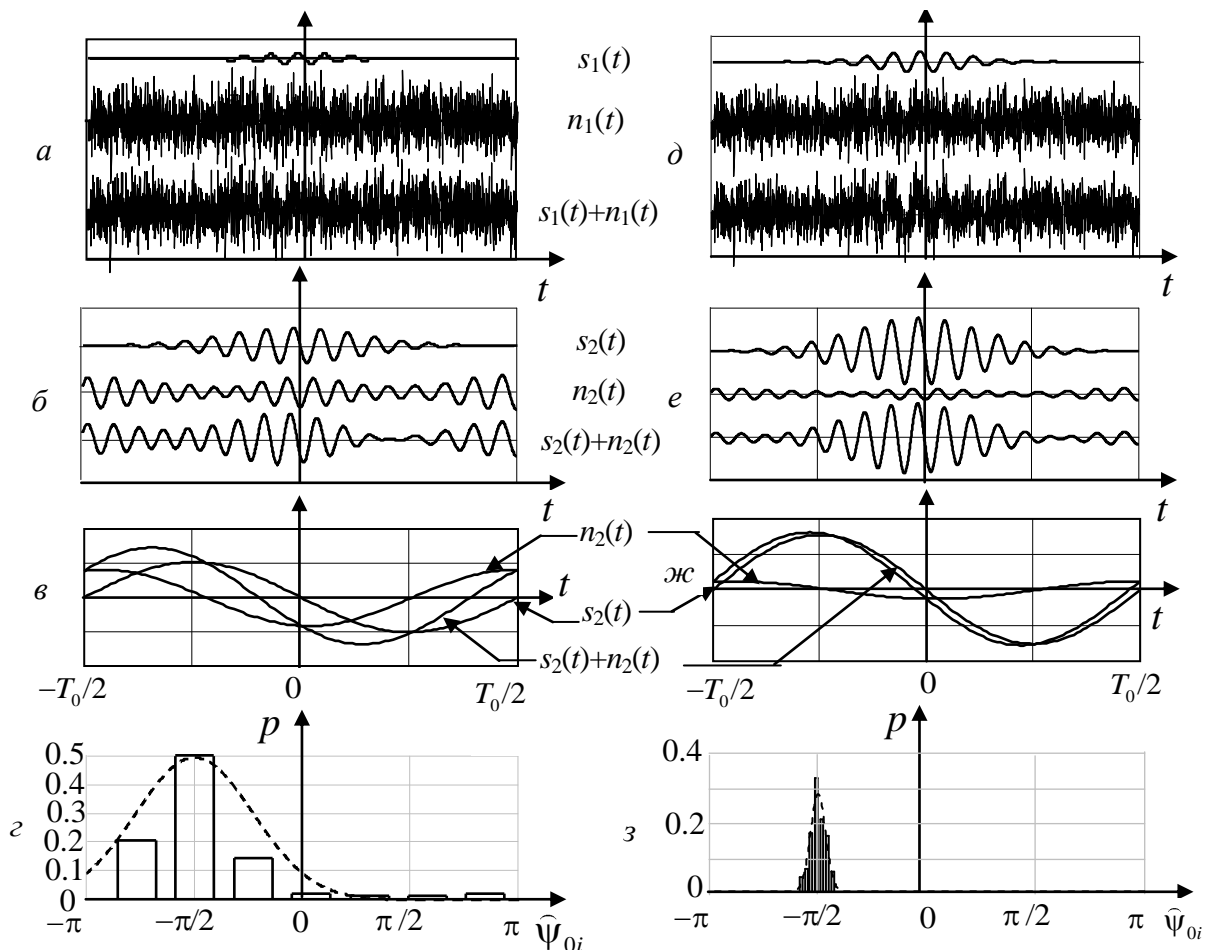


Рис. 7. Временные диаграммы (а-в, д-ж) и гистограммы единичных измерений (з, з) в модели №1 для  $\psi_0 = -90^\circ$  и отношений сигнал/помеха  $q_1 = 2$  (а-з) и  $q_2 = 10$  (д-з)

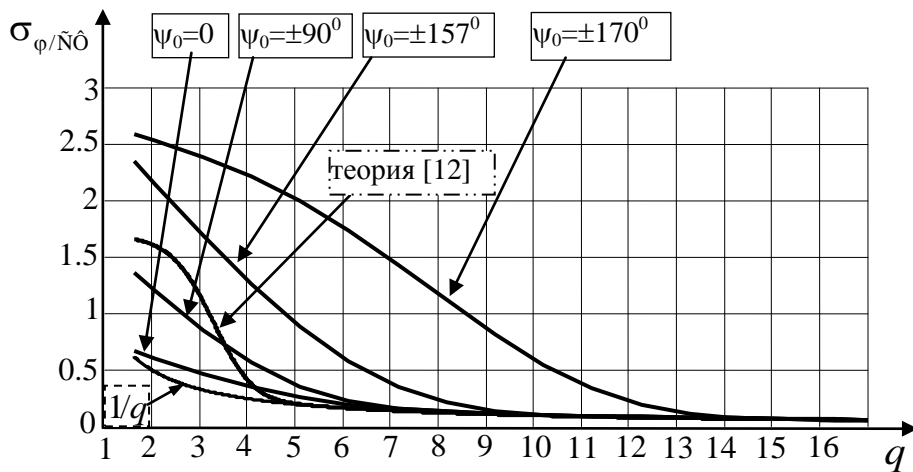


Рис. 8. Результаты исследований с применением модели №1

Модель № 2 позволяет определять отношения сигнал/помеха  $q$  при СФ и СКО для КО ( $\sigma_{\phi/\hat{\phi}_i}$ ) при различных значениях  $\psi_0$ . Результаты исследований приведены на рис. 10.

В результате моделирования подтверждено наличие пороговых эффектов [12]. Сравнение результатов исследования моделей № 1 и № 2 показывает, что пороговые отношения сигнал/помеха при КО ( $q_{\text{пор/КО}}$ ) больше, чем при СФ ( $q_{\text{пор/СФ}}$ ).

Модельные значения пороговых отношений сигнал/помеха ( $q_{\text{пор/СФ}}$ ,  $q_{\text{пор/КО}}$ ) практически совпадают с теоретическими только для  $-\pi/2 < \psi_0 < \pi/2$ . По мере приближения  $\psi_0$  к границам



интервала наблюдения величины  $q_{\text{пор/СФ}}$  и  $q_{\text{пор/КО}}$  существенно возрастают (см. рис. 8 и 10).

Практически устранить влияние значений  $\psi_0$  на пороговые эффекты можно, если проводить параллельно обработку не только для интервала наблюдения  $-\pi < \hat{\psi}_{0i} < \pi$ , но и для интервала  $0 < \hat{\psi}_{0i} < 2\pi$ . Из результатов обработки в этих интервалах выбирается то, для которого СКО минимально (см. рис.11).

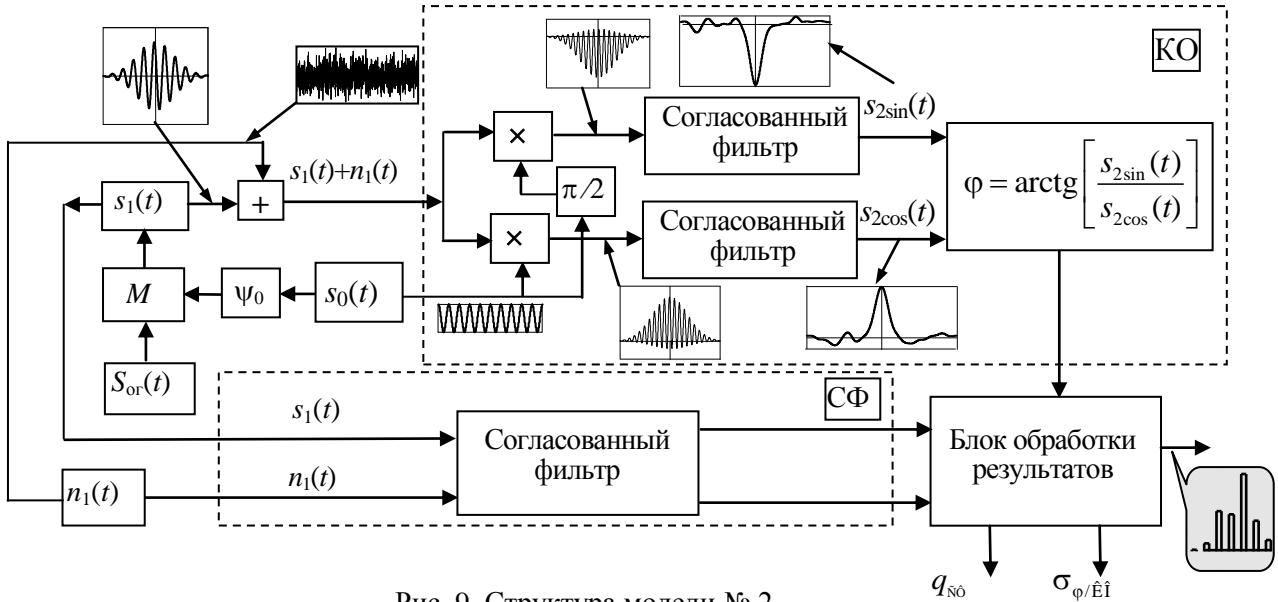


Рис. 9. Структура модели № 2

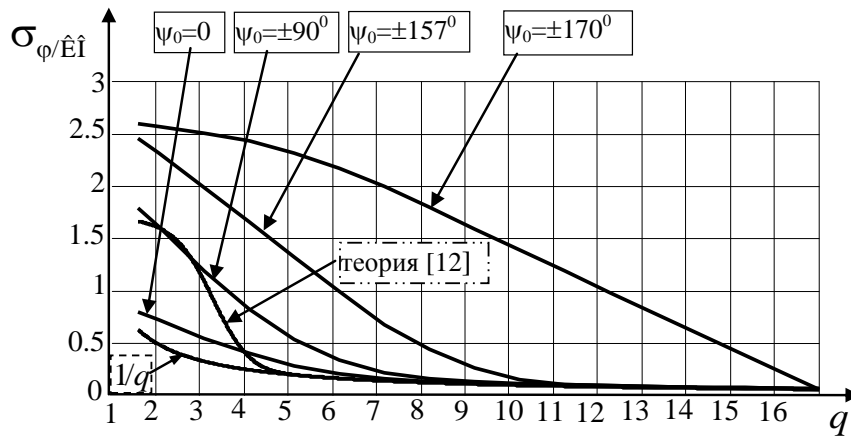


Рис. 10. Результаты исследований с применением модели №2

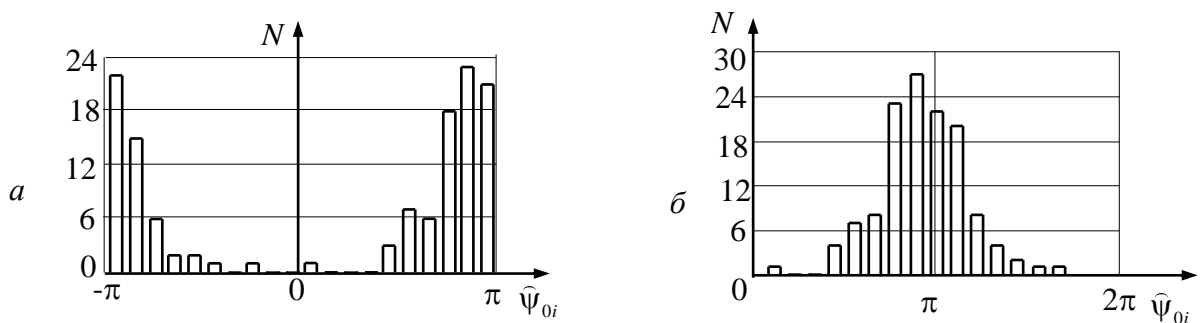


Рис.11. Гистограммы единичных измерений для  $\psi_0 = \pm 170^\circ$  при выборе интервалов наблюдения  $-\pi < \hat{\psi}_{0i} < \pi$  (а) и  $0 < \hat{\psi}_{0i} < 2\pi$  (б)

**Список литературы:** 1. *Финкельштейн, А. М.* Фундаментальное координатно-временное обеспечение // Вестник Российской Академии наук. – 2007. – Т. 77, М 7. – С. 608–617. 2. *Миллс, Дэвид Л.* Сличение времени в компьютерных сетях: Протокол сетевого времени на Земле и в космосе : пер. с англ. под ред. А.В. Савчука. – К. : WIRCOM, 2011. – 464 с. 3. *Антипов, И. Е.* Развитие теории и совершенствование радиометeorных систем связи и синхронизации / *И.Е. Антипов, Ю.А. Коваль, В.В. Обельченко.* – Харьков : Коллегиум, 2006. – 416 с. 4. *Zhang, V. S., Parker, T. E., Weiss, M. A., Vannicola, F. M.* Multi-Channel GPS/GLONASS Common-View between NIST and USNO // IEEE International Frequency Control Symposium, pp. 598-606, June 2000. 5. *Гужва, Ю. Г.* Синхронизация часов по сигналам "ГЛОНАСС" / *Ю.Г. Гужва, А.Г. Геворкян, П. П. Богданов, В. В. Овчинников* // Радионавигация и время. – 1994. – № 1. – С.11. 5. *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., Іванова О.О.*, заявник та власник Харківський нац. університет радіоелектр. – № u2008 09468, подано 21.07.2008; опубл. 25.12.2008, Бюл. № 24. 8. *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement: First edition.* – ISO, Switzerland, 1993. 9. *PMГ 91-2009.* ГСИ. Совместное использование понятий "погрешность измерения" и "неопределенность измерения". Общие принципы. 10. *Lewandowski, W., Matsakis, D., Panfilo and P Tavella, G.* The evaluation of uncertainties in [UTC – UTC(k)], Metrologia 43 (2006). P. 278-286. 11. *Коваль, Ю.А.* Оценивание неопределенности измерений при сличениях эталонов времени и частоты радиотехническими методами / *Коваль Ю.А., Костыря А.А., Приймак В.Ю.* // Системи обробки інформації. – Харків : ХУПС, 2012. – Вип. 21 (99). С. 30–33. 12. *Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория.* Справочник. Изд. 2-е перераб. и доп. / Под ред. Я.Д. Ширмана. – М. : Радиотехника, 2007. – 512 с. 13. *Соловьев Ю.А.* Системы спутниковой навигации. – М. : Эко-Тендз, 2001. – 270 с.

*Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники*

*Поступила в редколлегию 25.05.2012*