

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2019-22-2-44-52>

УДК 621.396.96

И. В. Крючков, М. И. Нониашвили, А. И. Скачкова[✉], А. А. Филатов
Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана
ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1, Москва, 105005, Россия

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ СИНХРОНИЗАЦИИ РАЗНЕСЕННОЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С ПОДВИЖНЫМИ НОСИТЕЛЯМИ ПРОГРАММНО-АЛГОРИТМИЧЕСКИМ СПОСОБОМ

Аннотация

Введение. Одним из классов современных радиотехнических систем являются системы с пространственным разнесением приемных, передающих или приемо-передающих элементов. В таких системах достигается повышение информативности за счет совместной обработки сигналов при обеспечении синхронизации по времени и фазе несущего колебания. В настоящее время в литературе не уделяется должное внимание требованиям к точности синхронизации разнесенных систем различного назначения, а также простым и доступным способам их синхронизации.

Цель работы. Поиск технических решений для тактовой и фазовой синхронизации без использования атомных стандартов частоты и внешних источников координатно-временной информации.

Методы и материалы. В работе рассмотрена разнесенная радиотехническая система с нежесткой структурой. Каждый элемент системы тактируется собственным кварцевым генератором. Генераторы не синхронизированы между собой. Фазы их колебаний периодически сличаются методом двусторонней передачи синхронизирующих сигналов (от одного элемента к другому и обратно). Методика синхронизации (программно-алгоритмический подход) сводится к коррекции совместно обрабатываемых сигналов с учетом оценок ухода частоты (фазы). Отработка предложенных технических решений представлена на макете аппаратуры, состоящей из десяти приемо-передающих модулей.

Результаты. Экспериментально показано, что среднеквадратическое отклонение ошибки синхронизации не превышает 12° по фазе (на несущей частоте в метровом диапазоне) или 0.2 нс по времени. Указанные результаты получены при пространственном разносе до нескольких сотен метров, на скоростях взаимного перемещения модулей до нескольких метров в секунду и могут быть распространены на более высокочастотные диапазоны (в частности, на дециметровый).

Заключение. В работе предложен метод многостороннего распространения для синхронизации разнесенных радиотехнических систем. Данный метод совместно с использованием программно-алгоритмического подхода позволяет получать в реальном масштабе времени точность синхронизации, достаточную для когерентного разнесенного приема.

Ключевые слова: программно-алгоритмический способ синхронизации, разнесенная радиотехническая система, пространственная когерентность, кварцевый генератор

Для цитирования: Экспериментальные результаты синхронизации разнесенной радиотехнической системы с подвижными носителями программно-алгоритмическим способом / И. В. Крючков, М. И. Нониашвили, А. И. Скачкова, А. А. Филатов // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2019. Т. 22, № 2. С. 44–52. doi: 10.32603/1993-8985-2019-22-2-44-52

Источник финансирования. Работа выполнялась при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания № 3.2190.2014/К.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 06.12.2018; статья принята к публикации 18.03.2019; опубликована онлайн 24.04.2019

© Крючков И. В., Нониашвили М. И., Скачкова А. И., Филатов А. А., 2019

Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License



Igor V. Kryuchkov, Mikhail I. Noniashvili, Anna I. Skachkova✉, Andrey A. Filatov

Bauman Moscow State Technical University
5/1, 2nd Baumanskaya Str., 105005, Moscow, Russia

EXPERIMENTAL RESULTS OF SOFTWARE ALGORITHMIC SYNCHRONIZATION OF DISTRIBUTED RADIO SYSTEM WITH MOBILE CARRIERS

Abstract

Introduction. One of the classes of modern radio engineering systems are systems with spatial diversity of transmitting, receiving or transceiving elements. In such systems, an increase of the information content is achieved by signal coprocessing ensuring synchronization in time and phase of the carrier oscillation. Currently, the researchers do not pay enough attention to the requirements for the accuracy of synchronization of distributed systems of different applications, as well as simple and affordable ways to synchronize them.

Objective. The paper main objective is the search for technical solutions for clock and phase synchronization without atomic frequency standards and external sources of coordinate-time information.

Methods and materials. The paper considers a distributed radio engineering system with non-rigid structure. Each element of the system has reference signal from its own crystal oscillator. The oscillators are not physically aligned. The phases of their oscillations are periodically compared by the method of two-way transmission of synchronizing signals (from one element to another and vice versa). The synchronization technique (software algorithmic approach) is reduced to the coprocessing signal correction according to estimated frequency (phase) drifts. The testing of the proposed technical solution is presented on a hardware model consisting of ten receiving and transmitting modules.

Results. The experiment showed that RMS of synchronization errors does not exceeded 12 degrees by phase (for VHF), or 0.2 ns by time. These results are acquired for spatial diversity up to several hundred meters, mutual speed of the modules up to several meters per second and may be extended for higher frequencies (in particular, UHF).

Conclusion. The paper proposes a method of multilateral propagation to synchronize distributed radioengineering systems. Combined with software algorithmic technique this method enables to obtain synchronization accuracy in real-time sufficient for coherent diversity technique.

Key words: software algorithmic synchronization mode, distributed radio system, spatial coherence, crystal oscillator

For citation: Kryuchkov I. V., Noniashvili M. I., Skachkova A. I., Filatov A. A. Experimental Results of Software Algorithmic Synchronization of Distributed Radio System with Mobile Carriers. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2019, vol. 22, no. 2, pp. 44–52. doi: 10.32603/1993-8985-2019-22-2-44-52 (In Russ.)

Source of financing. The work was implemented with the support of Ministry of Higher Education and Science of the Russian Federation within the frames of State Assignment No 3.2190.2014/K.

Conflict of interest. Authors declare no conflict of interest.

Received 06.12.2018; accepted 18.03.2019; published online 24.04.2019

Введение. Принцип совместной обработки сигналов, принимаемых в разнесенных точках пространства, используют в интерферометрической радиоастрономии, спутниковой радионавигации, радиолокации и других направлениях. Методам и алгоритмам совместной пространственно-временной обработки сигналов уделяется заметное внимание, особенно в последнее время [1]–[6]. Большинство работ носит теоретический характер, и в них, как правило, не рассматриваются требования к точности синхронизации. Под точностью синхронизации обычно понимают среднеквадратические значения ошибок контроля временных сдвигов между огибающими и разностью ВЧ-фаз радиосигналов, соответствующих разнесенным элементам системы [7].

Точность синхронизации, реализуемая в разнесенных системах, зависит от ряда причин: пространственной конфигурации, рабочего диапазона частот, характера движения, методов синхронизации – и, как правило, накладывает ограничения на способ объединения сигналов (когерентный или некогерентный). Настоящая статья посвящена особенностям совместной когерентной обработки сигналов в разнесенных радиотехнических системах, в том числе анализу требований к точности синхронизации и способам ее достижения, а также экспериментальной проверке предлагаемых технических и алгоритмических решений.

Для синхронизации нескольких устройств, разнесенных в пространстве, существует два спо-

соба: перемещение предварительно синхронизированных опорных генераторов и обмен синхронизирующими сигналами [8]. Первый способ требует исключительно высокостабильных генераторов (например, атомных) даже при сравнительно небольших расстояниях между синхронизируемыми позициями, так как фазы предварительно синхронизированных генераторов с течением времени в любом случае расходятся.

Передача синхронизирующих сигналов обеспечивает регулярное сличение фаз разнесенных генераторов и внесение поправок, что позволяет существенно снизить требования к стабильности генераторов. В промежутках между сличениями синхронизация по-прежнему поддерживается за счет стабильности генераторов. В последнее время все большее распространение получают алгоритмические методы синхронизации, основанные на оценке расхождения опорных генераторов и дальнейшем учете при совместной обработке соответствующих поправок без обеспечения физического синхронизма колебаний генераторов [1], [7]. Как правило, основной фактор, ограничивающий точность синхронизации в указанном методе, – это неопределенность характеристик канала передачи синхронизирующего сигнала.

Различают системы с односторонней (вещанием) и двунаправленной (обменом) передачами синхронизирующих сигналов. Пример системы с односторонней передачей – синхронизация по сигналам различных радионавигационных систем (типа LORAN, Transit, Глонасс и т. п.).

При двунаправленной передаче синхронизирующих сигналов влияние характеристик канала распространения можно существенно снизить, обеспечив почти одновременную передачу сигналов в обоих направлениях между двумя антеннами. Это позволяет отказаться от дополнительных средств и процедур оценки задержки в канале и допускает применение относительно простой аппаратуры. Кроме того, в ряде случаев требуется сохранение работоспособности радиотехнической системы вне зависимости от наличия внешних источников координатно-временной информации – таких, как радионавигационные системы.

В настоящей статье рассмотрен метод двустороннего распространения, расширенный на случай одновременной синхронизации нескольких разнесенных в пространстве позиций, реализованный с применением программно-алгоритмического подхода. Такой метод можно назвать методом многостороннего распространения синхронизирующих

сигналов. Возникающие при этом избыточные измерения позволяют контролировать и несколько улучшать достигаемую точность синхронизации.

Обоснование требований к точности системы фазовой синхронизации. Погрешность определения фаз комплексных огибающих сигналов, объединяемых когерентно, складывается из показателей стабильности следующих основных параметров: частоты (фазы) опорных генераторов, комплексной амплитудно-фазовой частотной характеристики (АФЧХ) канала распространения сигналов (в том числе отношения сигнал/шум в канале, многолучевости и др. [9], [10]) и ВЧ-трактов (главным образом, комплексные АФЧХ приемных каналов). Дополнительное влияние на фазу может оказывать движение передатчиков и приемников, а в радиолокации – вторичных отражателей (радиолокационных целей), что накладывает ограничение на интервал времени когерентности принимаемых сигналов [11].

В [7] рассмотрены разреженные антенные решетки метрового и дециметрового диапазонов. По аналогии с фазированными антенными решетками (ФАР) введены требования к точности оценки координат излучателей. Считается, что среднеквадратическое отклонение (СКО) ошибок фазового распределения в раскрыте антенной решетки не должно превышать $25...40^\circ$ [12], что, как правило, соответствует среднеквадратической погрешности установки координат элементов решетки около $\lambda/8$, где λ – длина волны несущего колебания. В обоих случаях приведены среднеквадратические значения ошибок.

Дополнительным ограничением служат потери от некогерентного сложения сигналов

$$\Pi = \left| \sum_{n=0}^{N-1} s_n \right| / \sum_{n=0}^{N-1} |s_n|, \quad (1)$$

где N – число приемных элементов системы (или когерентно объединяемых сигналов); $s_n = |s_n| \exp(j\varphi_n) \exp(j\delta\varphi_n)$ – комплексная огибающая принимаемого сигнала, причем φ_n – информационная составляющая ВЧ-фазы; $\delta\varphi_n$ – составляющая ошибки фазовой синхронизации. Выражение (1) записано для нормированных по усилению и по шумам сигналов в приемных элементах.

Даже такая упрощенная модель показывает, что энергетические потери Π , вызванные ошибкой фазовой синхронизации, незначительны. Так, при равномерном распределении случайной ве-

личины $\delta\varphi_n$ потери не превышают 1...2 дБ при среднеквадратической ошибке фазы 40° и не более 10 объединяемых сигналов. На практике указанные потери считаются удовлетворительными, поскольку удастся снизить требования к стабильности опорных колебаний, по которым осуществляется фазовая привязка.

Следует подчеркнуть, что взаимосвязь требований к точности фазовой синхронизации с задачей определения направления на источник принимаемого разнесенной системой сигнала (пеленгации) требует отдельного рассмотрения. Точность пеленгации зависит не только от точности фазирования приемных каналов, но и от пространственной конфигурации системы, погрешности местоопределения, характера движения носителей (например, преимущественно радиального или тангенциального относительно направления на источник сигнала), параметров фоноцелевой обстановки и др.

Существенным ограничением на допустимую погрешность фазовой синхронизации может быть интервал времени, на котором требуется обеспечить заданную стабильность фазы опорного колебания. В обзорных радиолокационных системах такой промежуток времени может составлять от долей до единиц секунд и более в зависимости от времени когерентности эхосигнала [13].

Обоснование выбора опорных генераторов приемных элементов для фазовой синхронизации разнесенной системы метрового диапазона. Для стабильных опорных генераторов флуктуации фазы или частоты обычно оцениваются во временной области с помощью вариации Аллана, связанной со спектральной плотностью фазового шума генератора [14]. Поскольку в настоящей статье рассмотрены кварцевые генераторы, не отличающиеся высокими показателями фазовых шумов, оценку ухода фазы опорного колебания $\delta\Phi(T)$ предлагается определять по формуле

$$\delta\Phi(T) = M\left\{\left[\Delta\Phi(T) - M[\Delta\Phi(T)]\right]^2\right\}, \quad (2)$$

где $M[\cdot]$ – символ математического ожидания; $\Delta\Phi(T)$ – разность фаз на интервале времени сличений фазы (периоде следования пилот-сигналов) T [14];

$$M[\Delta\Phi(T)] = \frac{1}{L} \sum_{l=0}^{L-1} [\Phi(t_l + T) - \Phi(t_l)], \quad (3)$$

причем $\Phi(t)$ – фаза опорного колебания; t_l – текущий момент времени; L – число усредняемых заме-

ров разности фаз, соответствующее, например, времени накопления сигнала в системе $\tau = t_{L-1} - t_0$.

Согласно методике (2), (3), количественной мерой фазовых флуктуаций опорного генератора является СКО разности фаз $\delta\Phi(T)$ опорного колебания. Оценки (2), (3) определяют интервал времени T , на котором наблюдается допустимый уход фазы, а значит, должно осуществляться хотя бы одно "сличение". Под "сличением" будем понимать сравнение фазы местного генератора с фазой удаленного опорного генератора. Другими словами, T представляет собой период следования пилот-сигналов (фрагментов опорного колебания), по которым можно оценить разность фаз двух разных (синхронизируемых) генераторов.

Для рассмотренных в настоящей статье расчетов приемник, тактируемый рассматриваемым кварцевым генератором, записывал отсчеты квадратур гармонического колебания вида

$$\dot{s}(t) = A \exp[j\Phi(t)], \quad (4)$$

где A – амплитуда; $\Phi(t) = 2\pi f_0 t + \varphi_{ф.ш}(t)$ – фаза опорного колебания, причем f_0 – частота опорного колебания, $\varphi_{ф.ш}(t)$ – флуктуации фазы опорного генератора, вызванные фазовым шумом генератора. Фаза $\Phi(t)$ определялась как аргумент комплексного сигнала (4).

Пример зависимости $\delta\Phi(T)$ для опорного генератора КХО-82 (Германия) с долговременной относительной нестабильностью частоты 10^{-6} за год и спектральной мощностью фазового шума -130 дБн/Гц при отстройке 1 кГц на частоте $f_0 = 160$ МГц, для разных интервалов времени когерентного накопления τ представлен на рис. 1 [1]. Из него видно, что на интервалах времени T до 0.5...1 мс флуктуации фазы практически

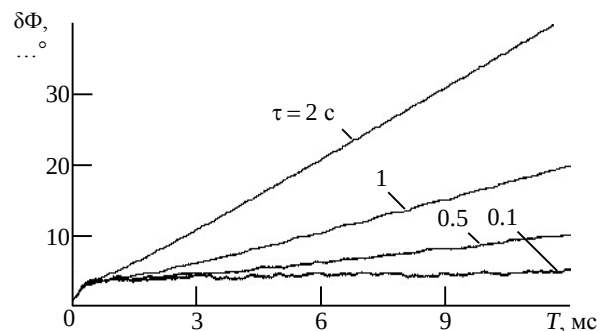


Рис. 1. Уход фазы кварцевого генератора по выборкам различной длительности

Fig. 1. Leaving the phase of a quartz oscillator in samples of various durations

не зависят от времени накопления. На больших интервалах времени (при сличениях фазы с интервалом до 12 мс) среднеквадратический уход фазы кварцевого генератора не превышает 20° при длительности выборки, по которой осуществлялась оценка, 1 с. Абсолютный уход частоты на данном интервале времени не превышает 5 Гц, что соответствует кратковременной относительной нестабильности частоты 10^{-8} за секунду. Отметим, что показатели кратковременной нестабильности обычно не приводятся в технических описаниях кварцевых генераторов.

Способ программно-алгоритмической синхронизации разнесенных систем. Опорные генераторы в различных элементах разнесенной системы не синхронизированы между собой и работают в режиме свободных колебаний. При этом регистрация сигналов каждым элементом осуществляется в шкале времени, задаваемой собственным (местным) опорным генератором. На практике это приводит к тому, что один и тот же отсчет сигнала (после переноса спектра на нулевую частоту и оцифровки) в разных приемных элементах соответствует разным моментам времени. В связи с этим возникает задача обеспечения соответствия фрагментов сигналов, обрабатываемых в разных приемных элементах, одному и тому же моменту времени, решаемая тактовой синхронизацией.

Для осуществления фазовой привязки должны быть сведены не только шкалы времени, но и ВЧ-фазы местных генераторов. Устранение разброса фаз гетеродинов обеспечивается фазовой синхронизацией.

В рамках рассматриваемого подхода тактовая и фазовая синхронизации осуществляются следующим образом. Все элементы системы "обмениваются" друг с другом пилот-сигналами (фрагментами опорных колебаний) с требуемой периодичностью T (1...10 мс при использовании квар-

цевых генераторов рассмотренного типа). "Обмен" пилот-сигналами (передача пилот-сигналов от одного элемента другому и в обратном направлении) соответствует синхронизации двусторонним методом [15]. По результатам обработки пилот-сигналов оцениваются взаимные уходы временной шкалы $\Delta t(t)$ и фазы $\Delta \varphi(t)$. Получаемые поправки учитываются при совместной обработке.

Сформулированную последовательность операций для синхронизации будем называть программно-алгоритмическим способом синхронизации.

В [1] получена экспериментальная зависимость $T_{p.p.c}(T)$ – момента времени регистрации пилот-сигнала, передаваемого одним элементом, в шкале времени другого. Если выборка содержит K отсчетов, то через точки $T_{p.p.c}(T_0)$ и $T_{p.p.c}(T_{K-1})$ может быть проведена прямая линия $T_{1 p.p.c}(T)$, отображающая линейную зависимость, описываемую полиномом первой степени.

На рис. 2 показан пример зависимости момента регистрации пилот-сигнала одного генератора в шкале времени другого генератора после компенсации линейной составляющей, рассчитанной по граничным отсчетам выборки [1]

$$\Delta T(T) = T_{p.p.c}(T) - T_{1 p.p.c}(T).$$

Представленная экспериментальная выборка данных соответствует периоду следования пилот-сигналов 5 мс, тактовой частоте опорных генераторов 50 МГц, частоте дискретизации 1 МГц.

Как следует из рисунка, в режиме свободных колебаний наблюдается существенное расхождение шкал времени (рис. 2, а), в которых регистрируются сигналы. Поэтому перед фазированием шкалы времени сводятся алгоритмически, что существенно снижает их разброс (рис. 2, б), после чего может происходить совместная обработка.

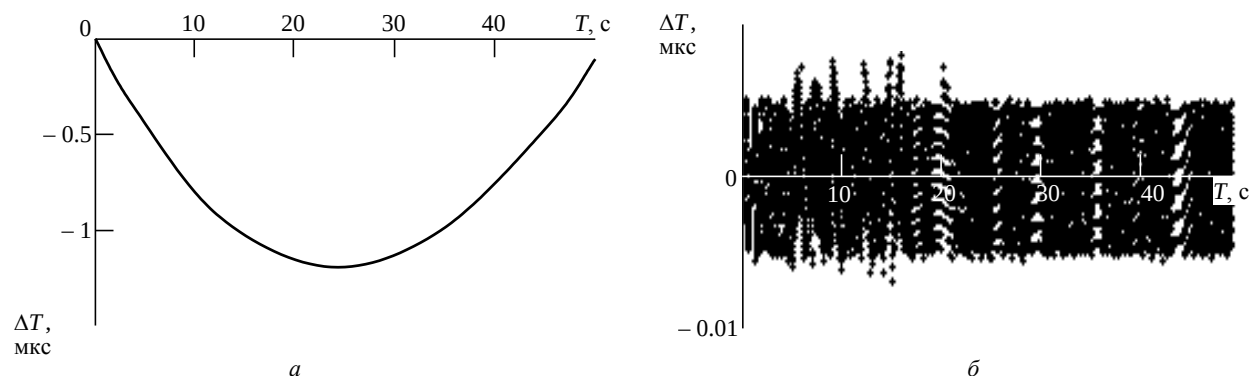


Рис. 2. Расхождение шкал времени двух генераторов в зависимости от времени: а – без коррекции, б – с коррекцией
Fig. 2. Discrepancy of time scales of two generators depending on time: а – without correction, б – with correction

Основное преимущество программно-алгоритмического способа состоит в невысоких технических требованиях к аппаратуре системы синхронизации, а недостаток – в необходимости периодического анализа расхождения фаз опорных генераторов (чем хуже стабильность частоты, тем чаще нужен анализ). Для этого необходимо выделение специальных временных окон в циклограмме работы системы.

Экспериментальная проверка точности фазовой синхронизации опорных генераторов на подвижных носителях. Предложенный принцип синхронизации реализован на макете экспериментальной распределенной радиотехнической системы метрового диапазона волн. Макет создан для отработки технологии когерентного объединения сигналов в крупноапертурных разреженных фазированных антенных решетках переменной конфигурации.

Экспериментальный макет состоял из десяти приемопередающих модулей, размещенных на подвижных носителях (привязных аэростатах) на высоте от 40 до 150 м над землей (рис. 3). Положения фазовых центров антенн модулей изменялись в соответствии с порывами и направлением ветра со скоростью 1...7 м/с. Положение точек привязки запуска модулей (рис. 4) фиксировалось комплектом навигационной и геодезической аппаратуры. В начале собственных координат макета на земле неподвижно находился синхронизирующий модуль 1, относительно фазы сигнала которого оценивались фазовые искажения, возникающие вследствие разброса параметров антенно-фидерных трактов разных модулей. Пространственный разнос между наиболее удаленными модулями (база системы) составлял около 400 м.

Приемопередающие модули обменивались пилот-сигналами по эфиру на несущих частотах в диапазоне 150...170 МГц. Во время эксперимента одновременно работали 9 приемопередающих модулей.

Пример пилот-сигналов, зарегистрированных модулями, показан на рис. 5. Длительность такта



Рис. 3. Размещение приемопередающих модулей на привязных аэростатах
Fig. 3. Placement of receiving and transmitting modules on tethered balloons

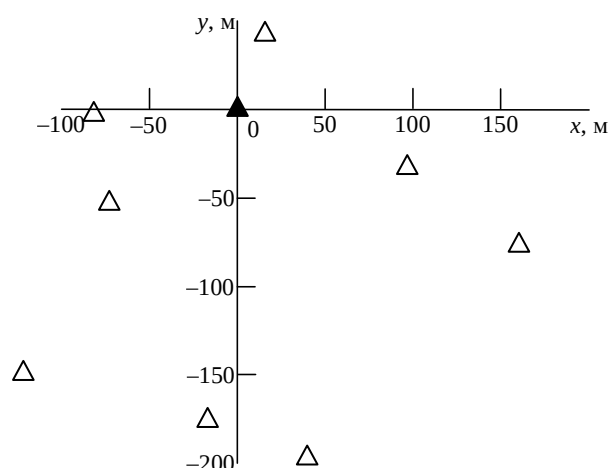


Рис. 4. Точки привязки запуска модулей
Fig. 4. Module launch anchor points

работы системы составляла 1 мс, пилот-сигнал каждого одного модуля занимал 90 мкс.

Представлен один такт работы системы, за который все модули (1–9) последовательно излучали простые радиоимпульсы длительностью около 50 мкс. В начале такта в эфир выходил модуль 2, далее – модуль 3 и в конце – модуль 1 (синхронизирующий).

Результатом обработки принятых пилот-сигналов стали оценки разности фаз двусторонним методом:

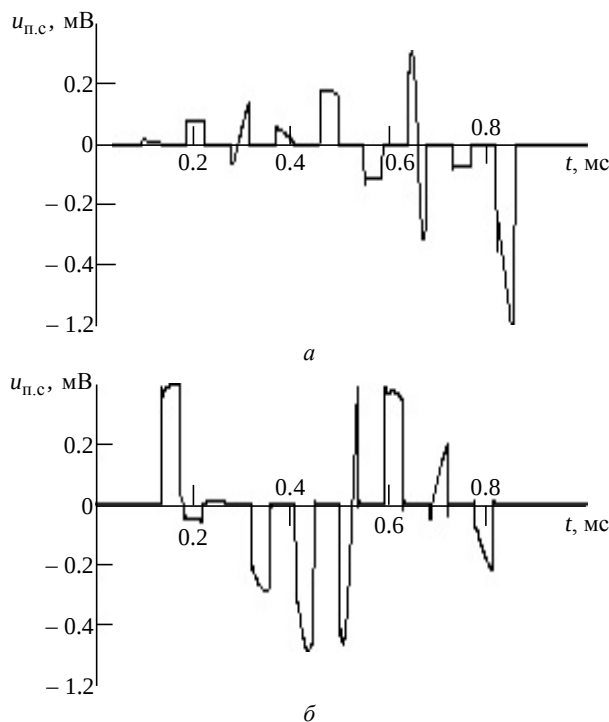


Рис. 5. Пилот-сигналы, принятые модулями:
а – 1 (синхронизирующий), б – 2
Fig. 5. Pilot signals received by modules:
а – 1 (synchronization), б – 2

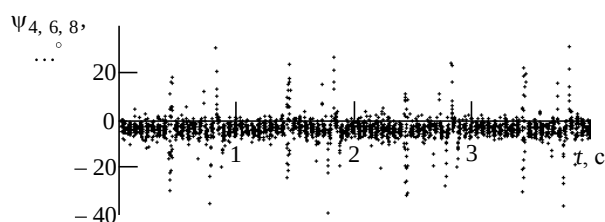


Рис. 6. Оценка погрешности фазовой синхронизации по условию "замыкания" фаз

Fig. 6. Estimation of the phase synchronization error by the "closing of the phases" condition

$$\Delta\varphi_{\text{п.с.}m,n} = \frac{\hat{\varphi}_{\text{п.с.}m,n} - \hat{\varphi}_{\text{п.с.}n,m}}{2}, \quad (5)$$

где $\hat{\varphi}_{\text{п.с.}m,n}$ – оценка фазы пилот-сигнала, приведенная к одному для всех модулей моменту времени; m и n – номера передатчика (первый индекс) и приемника (второй индекс). Разность (5) определялась для каждого такта работы системы.

Проверка точности фазовой синхронизации проводилась по так называемому условию "замыкания" фаз, которое должно выполняться в произвольный момент времени для любых трех модулей m, n, k :

$$\Psi_{m,n,k} = \Delta\varphi_{\text{п.с.}m,n} + \Delta\varphi_{\text{п.с.}m,k} + \Delta\varphi_{\text{п.с.}n,k} = 0. \quad (6)$$

Пример экспериментальной зависимости (6) для модулей 4, 6, 8 показан на рис. 6.

Результирующая ошибка фазовой синхронизации оценивалась как

$$\Delta\Psi = M(\Psi_{m,n,k}) + 3\sigma\Psi,$$

где $\sigma\Psi = \sqrt{M\left\{\left[\Psi_{m,n,k} - M(\Psi_{m,n,k})\right]^2\right\}}$ – СКО $\Delta\Psi$.

Анализ доступных экспериментальных данных показал, что СКО ошибки фазовой синхронизации не превышает 12° , смещение оценки незначительно и составляет в среднем единицы градусов. Так, по данным рис. 6 математическое ожидание (смещение) результирующей фазовой ошибки составило -3° , а ее СКО – 5° .

Заключение. В настоящей статье рассмотрен метод синхронизации разнесенных подвижных позиций в распределенных радиотехнических системах на основе принципа многостороннего распространения синхронизирующих сигналов.

Практическая реализация метода основана на вычислении в реальном времени совместного решения относительно текущих фаз и частот опорных генераторов разнесенных позиций, работающих в режиме свободных колебаний, по результатам наблюдений синхронизирующих сигналов, передаваемых поочередно с каждой позиции и принимаемых на всех остальных позициях.

В экспериментах, проведенных на макете распределенной радиотехнической системы с несколькими подвижными воздушными носителями, получена точность синхронизации, характеризующаяся СКО фазы опорных генераторов порядка 12° на несущей частоте в диапазоне волн 2 м (т. е. около 0.2 нс) при расстояниях между ними несколько сотен метров и скоростях взаимного перемещения до нескольких метров в секунду. Для передачи сигналов синхронизации использованы основные приемопередающие каналы радиотехнической системы (внутриполосная синхронизация), т. е. метод синхронизации не требует применения дополнительной аппаратуры.

Реализованная точность фазовой синхронизации достаточна для когерентной или кратковременно-когерентной обработки сигналов в радиотехнических системах, по крайней мере в диапазоне метровых волн, с потерями когерентности не более 1...2 дБ.

Полученные данные позволяют также сделать вывод, что примененный метод можно распространить на более высокочастотные диапазоны радиоволн, включая дециметровый, и на большее разнесение синхронизируемых позиций в пространстве. Предложенный метод является автономным (не зависящим от доступности внешних источников координатно-временной информации, например СРНС Глонасс и т. п.) и не требует применения специфической аппаратуры – такой, как атомные синтезаторы частоты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крючков И. В., Нефедов С. И., Филатов А. А. Аппроксимация шкал времени в пространственно-когерентных РЛС с кооперативным приемом // Радиолокация и радиосвязь: докл. 6-й Всеросс. конф. 19–22 ноября 2012, Москва / ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН. М., 2012. С. 298–302.
2. Вовшин Б. М., Куликов К. В. Пространственно-многоканальный прием в MIMO РЛС параллельного

обзора пространства с ортогональными многочастотными сигналами // Успехи современной радиоэлектроники. 2016. № 8. С. 67–79.

3. Лоскутов В. Ю., Слукин Г. П., Чапурский В. В. Спектральный метод обработки сигналов в многочастотных пространственно-многоканальных РЛС // Радиотехника. 2013. № 11. С. 39–49.

4. Чапурский В. В., Крючков И. В. Структура систем корреляционной пространственно-временной обработки сигналов в многочастотных пространственно многоканальных РЛС // Успехи современной радиоэлектроники. 2014. № 7. С. 3–12.

5. Зарецкий В. И., Королев А. Н., Котов А. Ф. Алгоритмы определения координат в МРЛС с несколькими источниками подсвета цели // Радиотехника. 2011. № 7. С. 17–25.

6. Крючков И. В., Слукин Г. П., Чапурский В. В. Точность измерения координат в многопозиционных радиолокационных системах при комплексном учете погрешностей первичных измерений вследствие шумов, атмосферных флуктуаций и неточности топопривязки позиций // Радиотехника и электроника. 2016. Т. 61, № 11. С. 1057–1064. doi: 10.7868/S003384941610017X

7. Возможности и особенности построения нового поколения информационных систем на основе принципов когерентной малобазовой радиолокации / И. Б. Федоров, И. В. Крючков, С. И. Нефедов, Г. П. Слукин // Вестн. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2009. Спец. выпуск. С. 28–40.

8. Direct frequency comparison of intercontinentally separated Sr lattice clocks using carrier-phase two-way satellite frequency transfer / T. Ido, M. Fujieda, H. Hachisu, Sh. Nagano, T. Gotoh, S. Falke, N. Huntemann, C. Grebing, B. Lipphardt, Ch. Lisdat, D. Piester // IEEE Intern. Frequency Control Symposium (FCS), 19–22 May 2014, Taipei, Taiwan. Piscataway: IEEE, 2014. P. 1–3. doi: 10.1109/FCS.2014.6859906

9. Чапурский В. В. Функция распределения отражений от Земли и обобщение формулы Уэстерфилда для расчета мощности отражений в пространственно-многоканальных радиолокационных системах типа MIMO // Радиотехника и электроника. 2017. Т. 62, № 3. С. 217–223. doi: 10.7868/S003384941703007X

10. Analytical approximation-based method for calculation of generalized ambiguity function and 3D down-looking SAR image reconstruction / G. P. Slukin, V. V. Chapursky, M. P. Golubtsiv, I. V. Kryuchkov, N. A. Soloviev // 2017 Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS), 22–25 May 2017, St. Petersburg, Russia. 2017. P. 2572–2578. doi: 10.1109/PIERS.2017.8262185.

11. Слукин Г. П. Время когерентности радиолокационного сигнала и влияние на него различных факторов // Радиооптические технологии в приборостроении: тез. докл. 3-й Всерос. НТК, Сочи, 12–16 сент. 2005 / МГТУ им. Н. Э. Баумана. М., 2005. С. 21–26.

12. Сазонов Д. М. Антенны и устройства СВЧ. М.: Высш. шк., 1988. 432 с.

13. Вопросы перспективной радиолокации / под ред. А. В. Соколова. М.: Радиотехника, 2003. 508 с.

14. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / под ред. А. И. Перова, В. Н. Харисова. М.: Радиотехника, 2010. 800 с.

15. Одуан К., Гино Б. Измерение времени. Основы GPS. М.: Техносфера, 2002. 399 с.

Крючков Игорь Викторович – начальник отдела НИИ радиоэлектронной техники (НИИ РЭТ) Московского государственного технического университета имени Н. Э. Баумана (национального исследовательского университета) (МГТУ им. Н. Э. Баумана). Окончил указанный университет по специальности "Радиоэлектронные системы" (1998). Автор более 50 научных работ. Сфера научных интересов: радиолокация; статистическая радиотехника; цифровая обработка сигналов.

E-mail: kryuchkov@bmstu.ru

Нониашвили Михаил Ильич – кандидат технических наук по специальности "Радиолокация и радионавигация" (2016), доцент кафедры "Радиоэлектронные системы и устройства" МГТУ им. Н. Э. Баумана, заместитель директора НИИ РЭТ МГТУ им. Н. Э. Баумана. Автор 36 научных работ. Сфера научных интересов: радиолокация; статистическая радиотехника; цифровая обработка сигналов.

E-mail: min-st-1986@mail.ru

Скачкова Анна Игоревна – студентка 6-го курса МГТУ им. Н. Э. Баумана, инженер НИИ радиоэлектронной техники (НИИ РЭТ) МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сфера научных интересов: радиолокация; статистическая радиотехника; цифровая обработка сигналов.

E-mail: blackbird.11@yandex.ru

Филатов Андрей Александрович – кандидат технических наук по специальности "Радиолокация и радионавигация" (2013), доцент кафедры "Радиоэлектронные системы и устройства" МГТУ им. Н. Э. Баумана, старший научный сотрудник НИИ РЭТ МГТУ им. Н. Э. Баумана. Автор 23 научных работ. Сфера научных интересов: радиолокация; статистическая радиотехника; цифровая обработка сигналов.

E-mail: filatov@bmstu.ru

REFERENCES

1. Kryuchkov I. V., Nefedov S. I., Filatov A. A. *Approximation in Spatial Coherent Multistation Distributed Radar with Cooperative Reception*. [Time Scale Approximation in Spatial Coherent Multistation Distributed Radar with Cooperative Reception]. Proc. of the 6th All-Russian Scientific and Tech. Conf. on Radiolocation and

Radiocommunication, vol. 2. Moscow, 2012, pp. 298–302. (In Russ.)

2. Vovshin B. M., Kulikov K. V. Spatial Single-Channel Reception in MIMO RADAR with Parallel Survey with Orthogonal Multi-Frequency Signals. *Uspekhi sovremennoy radioelektroniki* [Achievements of Modern Radioelectronics]. 2016, no. 8, pp. 67–79. (In Russ.)

3. Loskutov V. Yu., Slukin G. P., Chapursky V. V. Spectral Signal Processing Method in Multifrequency Spatially Multichannel Radar System. *Radiotekhnika* [Radioengineering]. 2013, no. 11, pp. 39–49. (In Russ.)

4. Chapurskii V. V., Kryuchkov I. V. Structure Of Space-Time Signal Processing Systems In Multifrequency Spatially Multichannel Radar. *Uspekhi sovremennoi radioelektroniki* [Achievements of Modern Radioelectronics]. 2014, no. 7, pp. 3–12. (In Russ.)

5. Zaretskii V. I., Korolev A. N., Kotov A. F. Algorithms of Coordinate Definition in Multiposition Doppler Radar with Several Irradiation Sources. *Radiotekhnika* [Radioengineering]. 2011, no. 7, pp. 17–25. (In Russ.)

6. Kryuchkov I. V., Slukin G. P., Chapurskii V. V. The Accuracy of Coordinate Measurements in Multistatic Radar Systems with Complex Consideration for Primary Measurement Errors due to Noise, Atmospheric Fluctuations, and Uncertainty in Position Topo Binding. *Radiotekhnika i elektronika* [Journal of Communications Technology and Electronics]. 2016, vol. 61. no. 11, pp. 1057–1064. doi: 10.7868/S003384941610017X (In Russ.)

7. Fedorov I. V., Slukin G. P., Kryuchkov I. V., Nefedov S. I. Possibilities and Features of Construction of Data System New Generation Based on Principles of Coherent Small-Base Radiolocation. *Vestnik MGTU. Priborostroeniye* [Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Ser. Instrument Engineering]. 2009, special iss., pp. 28–40. (In Russ.)

8. Ido T., Fujieda M., Hachisu H., Nagano Sh., Gotoh T., Falke S., Huntemann N., Grebing C., Lipphardt B., Lisdat Ch., Piester D. Direct Frequency Comparison of Intercontinentally Separated Sr Lattice Clocks Using Carrier-Phase Two-Way Satellite Frequency Transfer. *IEEE International*

Frequency Control Symposium (IFCS), 19–22 May 2014, Taipei, Taiwan. 2014, pp. 1–3. doi: 10.1109/FCS.2014.6859906.

9. Chapurskii V. V. Distribution Function of the Ground Clutter and Generalization of the Westerfield Formula for Calculation of the Clutter Power in Spatially Multichannel MIMO Radar Systems. *Radiotekhnika i elektronika* [Journal of Communications Technology and Electronics]. 2017, vol. 62, no. 3, pp. 217–223. doi: 10.7868/S003384941703007X (In Russ.)

10. Slukin G. P., Chapursky V. V., Golubtsiv M. P., Kryuchkov I. V., Soloviev N. A. Analytical Approximation-Based Method for Calculation of Generalized Ambiguity Function and 3D Down-Looking SAR Image Reconstruction. 2017 Progress In Electromagnetics Research Symposium – Spring (PIERS), 22–25 May 2017, St. Petersburg, Russia. 2017, pp. 2572–2578. doi: 10.1109/PIERS.2017.8262185

11. Slukin G. P. *Vremya kogerentnosti radiolokatsionnogo signala i vliyanie na nego razlichnykh faktorov* [Radar Signal Coherence Time and the Influence of Diverse Factors on It]. 3rd All-Russian Scientific and Technical Conference on Radiooptic Technologies in Instrument Engineering, Abstracts of Papers. Moscow, 2005, pp. 21–26.

12. Sazonov D. M. *Antenny i ustroystva SVCH* [Antennas and Microwave Devices]. Moscow, *Vyssшая shkola* Publ., 1988, 432 p. (In Russ.)

13. *Voprosy perspektivnoy radiolokatsii* [Matters of modern radiolocation]. Ed. by A. V. Sokolov. Moscow, *Radiotekhnika* Publ., 2003, 508 p. (In Russ.)

14. Perov A. I., Kharisov V. N. *GLONASS. Printsipy postroeniya i funktsionirovaniya* [GLONASS. Design and Operation Concept]. Moscow, *Radiotekhnika* Publ., 2010, 800 p. (In Russ.)

15. Audoin C., Guinot B. *Les Fondements De La Mesure Du Temps*. Paris, Masson, 1998, 300 p.

Igor V. Kryuchkov – Director of the Department of Scientific Researcher Institute of Radio-Electronic Engineering of Bauman Moscow State Technical University. Graduated from Radioelectronic Department of Bauman Moscow State Technical University (1998). The author of 50 scientific publications. Area of expertise: radar; statistical radio engineering; digital signal processing.
E-mail: kryuchkov@bmstu.ru

Mikhail I. Noniashvili – Cand. of Sci. (Engineering) (2016), Associate Professor of the Department of Radio-electronic systems and devices of Bauman Moscow State Technical University. Deputy Director of Scientific Researcher Institute of Radio-Electronic Engineering, Bauman Moscow State Technical University. The author of 36 scientific publications. Area of expertise: radar; statistical radio engineering; digital signal processing.
E-mail: min-st-1986@mail.ru

Anna I. Skachkova – 6th year student, Engineer of Scientific Researcher Institute of Radio-Electronic Engineering of Bauman Moscow State Technical University. Area of expertise: radar; statistical radio engineering; digital signal processing.
E-mail: blackbird.11@yandex.ru

Andrey A. Filatov – Cand. of Sci. (Engineering) (2013), Associate Professor of the Department of Radio-electronic systems and devices of Bauman Moscow State Technical University, Senior Researcher of Scientific Researcher Institute of Radio-Electronic Engineering of Bauman Moscow State Technical University. The author of 23 scientific publications. Area of expertise: radar; statistical radio engineering; digital signal processing.
E-mail: filatov@bmstu.ru
