

УДК 621.396.96

Особенности временной синхронизации многопозиционных систем наблюдения летательных аппаратов¹

¹ Сеницын Е. А., ² Фридман Л. Б.

¹ НТЦ АО «Челябинский радиозавод “Полет”»

ул. Курчатова, 9, Санкт-Петербург, 194223, Российская Федерация
esinit@yandex.ru

² ООО «НПК “ТИМ”»

пр. Шаумяна, 4, корп. 1, лит. А, Санкт-Петербург, 195027, Российская Федерация
lenya2002@bk.ru

Получено: 5 мая 2020 г.

Отрецензировано: 10 сентября 2020 г.

Принято к публикации: 15 сентября 2020 г.

Аннотация: Рассмотрены варианты временной синхронизации современных многопозиционных систем наблюдения (МПСН) летательных аппаратов (ЛА) с помощью различных внутренних и внешних источников единого времени. Приводятся результаты сравнительного анализа особенностей построения и схемотехнической реализации временной синхронизации МПСН, основанных на использовании синхронизации разнесенных приемных сенсоров и общего сервера для приема, объединения и совместной обработки принятых сенсорами радиосигналов, излучаемых ЛА, с последующей оценкой параметров положения и движения обнаруженных ЛА. Показаны основные недостатки и достоинства вариантов временной синхронизации МПСН. Предлагается использование дополнительного канала приема и обработки телевизионных сигналов, излучаемых местными телевизионными центрами, что позволяет улучшить качество синхронизации, повысить надежность и достоверность работы, а также точностные характеристики МПСН.

Ключевые слова: временная синхронизация, многопозиционная система, приемный сенсор, сервер, радиосигнал, совместная обработка, телевизионный сигнал, летательный аппарат, точностные характеристики, контрольный сигнал, часы, эталонный сигнал.

¹ Статья является расширенной версией доклада, представленного на 30-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо'2020 (Севастополь, РФ, 6—12 сентября 2020 г.).

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Синицын Е. А., Фридман Л. Б. Особенности временной синхронизации многопозиционных систем наблюдения летательных аппаратов // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2020. Т. 3, № 2. С. 171—180.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011): Синицын, Е. А. Особенности временной синхронизации многопозиционных систем наблюдения летательных аппаратов / Е. А. Синицын, Л. Б. Фридман // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2020. — Т. 3, № 2. — С. 171—180.

Features of time synchronization of multilateral aircraft surveillance systems

E. A. Sinitsin¹ and L. B. Fridman²
¹STC JSC “Chelyabinsk radio plant Polet”

9, Kurchatova str., S-Petersburg, 194223, Russian Federation
esinit@yandex.ru

²LLC “NPK TIM”

4/1, Shaumyana Ave., S-Petersburg, 195027, Russian Federation
lenya2002@bk.ru

Received: May 5, 2020

Peer-reviewed: September 10, 2020

Accepted: September 15, 2020

Abstract: *The variants of time synchronization of modern surveillance multilateration (MLAT) systems with usage of various internal and external sources of a single time are considered. The results of a comparative analysis of the features of construction and circuitry implementation of time synchronization of MLAT are presented. These results are based on the use of synchronization of separated receiving sensors and a shared server for receiving, combining, and joint processing of received sensor signals emitted by the aircraft, with subsequent evaluation of position and parameters of movement of the detected aircrafts. The main disadvantages and advantages of the presented variants of time synchronization of MLAT are shown. The usage of additional channel for receiving and processing of TV signals emitted by local TV centers, which can improve the quality of synchronization, increase the reliability, as well as the accuracy characteristics of MLAT is proposed.*

Keywords: *time synchronization, multilateral system, receiving sensor, server, radio signal, joint processing, television signal, aircraft, accuracy characteristics, control signal, clock, reference signal.*

For citation (IEEE): E. A. Sinitsin et al. “Features of time synchronization of multilateral aircraft surveillance systems,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 3, no. 2, pp. 171—180, 2020. (In Russ.).

1. Введение

Многопозиционные системы наблюдения (МПСН) летательных аппаратов (ЛА) относятся к радиотехническим средствам обзора воздушного пространства с разнесенными приемными сенсорами и общим сервером для приема, объединения и совместной обработки принятых сенсорами радиосигналов, излучаемых ЛА, с последующей оценкой параметров положения и движения обнаруженных ЛА путем использования преимущественно разностно-дальномерного метода [1].

Определение местоположения источника радиоизлучения разностно-дальномерным методом в МПСН основано на формировании системы уравнений, связывающих координаты источника излучения с координатами точек приема (приемных сенсоров) МПСН и временными задержками распространения сигналов (рис. 1) [2]

$$\begin{aligned} \Delta R_{ij} &= \Delta R_{iM} - \Delta R_{jM} = c(\tau_{iM} - \tau_{jM}) = c\Delta\tau_{ij}, \\ R_{iM} &= \sqrt{(x_i - x_M)^2 + (y_i - y_M)^2 + (z_i - z_M)^2}, \\ R_{jM} &= \sqrt{(x_j - x_M)^2 + (y_j - y_M)^2 + (z_j - z_M)^2}, \end{aligned} \quad (1)$$

где ΔR_{ij} — разность расстояний между ЛА, являющимся источником излучения радиосигнала с оцениваемыми координатами (x_M, y_M, z_M) , и двумя i, j точками расположения приемных сенсоров (ПС) с координатами (x_i, y_i, z_i) , (x_j, y_j, z_j) для приема радиосигнала от ЛА, $i, j = 1, 2, \dots, N$, N — количество приемных сенсоров, c — скорость света.

Как следует из выражения (1), величина ΔR_{ij} определяется путем оценки разности взаимных временных задержек распространения сигналов $\Delta\tau_{ij} = \tau_{iM} - \tau_{jM}$.

Основной особенностью построения и оценки параметров пространственного положения ЛА в МПСН является привязка сигналов, принимаемых приемными сенсорами, к временным отсчетам датчика единого времени, общего для всех сенсоров (синхронизация сенсоров) и последующее измерение относительной разности времен прихода сигналов в приемные каналы сенсоров с учетом их известного пространственного положения.

В известных МПСН используются разнообразные варианты временной синхронизации приемных сенсоров с помощью различных источников единого времени.

В МПСН временная синхронизация приемных сенсоров обычно выполняется от одного датчика времени (общих часов), формирующего периодические импульсы (метки) времени (рис. 2) [3]. В таких МПСН на

аналого-цифровые преобразователи (АЦП) всех приемных сенсоров подаются одинаковые метки времени высокостабильного генератора, привязывающие (синхронизирующие) идентичные фрагменты сигналов, принимаемых N приемными сенсорами, к единой временной шкале. Общие часы, вырабатывающие единое текущее время, в зависимости от взаимного пространственного расположения сервера и сенсоров могут располагаться как в составе МПСН на сервере или в одном из приемных сенсоров, так и снаружи МПСН.

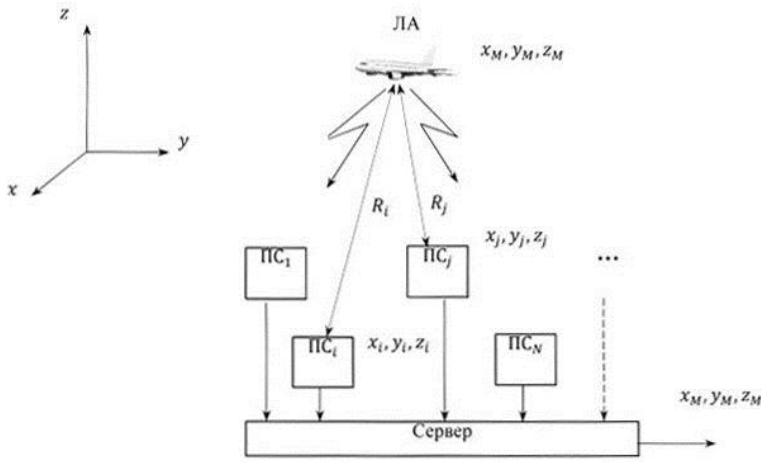


Рис. 1. Определение местоположения источника радиоизлучения разностно-дальномерным методом в МПСН.

Fig. 1. Location finding of a radio source with usage of the difference distance measuring method

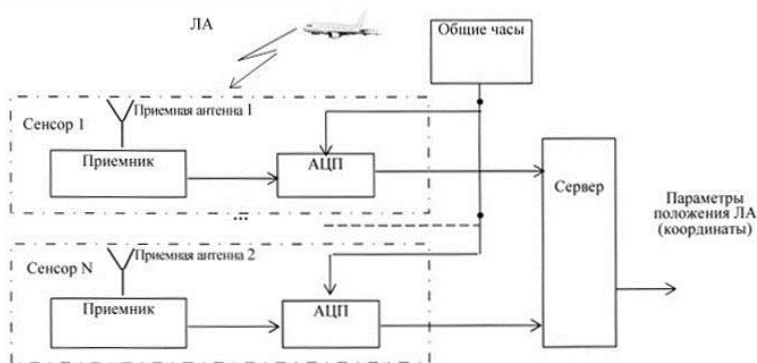


Рис. 2. Временная синхронизация приемных сенсоров МПСН от общих часов.

Fig. 2. Time synchronisation of the MLAT receiving sensors from the common clocks

Синхронизация от общих часов требует передачи сигнала единого времени по аналоговым или цифровым физическим линиям наземной проводной связи или по каналам воздушной радиосвязи (каналам передачи данных), которые должны без искажений, с известными калиброванными временными задержками (в частном случае, одинаковыми) в реальном времени передать разветвленные сигналы единого времени во все приемные сенсоры. Практическая реализация высокостабильных физических линий передачи аналоговых (цифровых) сигналов с одинаковыми или фиксированными калиброванными временными задержками является сложной технической задачей и требует дополнительных организационно-технических и материальных затрат.

2. Теория

Синхронизация приемных сенсоров МПСН может выполняться без использования общих часов и высокостабильных физических линий передачи сигналов с одинаковыми калиброванными временными задержками, а с помощью внешних эталонных сигналов времени, принимаемых в МПСН по радиоканалу от спутников глобальной навигационной спутниковой системы (ГЛОНАСС) или GPS [3].

В МПСН для приема спутниковых сигналов устанавливаются дополнительные приемники ГЛОНАСС/GPS с автономными приемными антеннами. Глобальная спутниковая система используется для предоставления общего эталонного сигнала единого времени для каждого из приемных сенсоров. Спутниковые сигналы отличаются высокой точностью и стабильностью системного времени, что является важным фактором для обеспечения точного измерения параметров положения объектов наблюдения.

Синхронизация МПСН с помощью ГЛОНАСС и GPS проще по сравнению с вариантом использования внешних общих часов (рис. 2), так как не требуется установка дополнительного внешнего оборудования, не нужна прокладка каналов связи и не требуется обеспечение одинаковых или фиксированных калиброванных временных задержек передачи сигналов в сенсорах.

Недостатком МПСН, использующих ГЛОНАСС и GPS, является ухудшение и нарушение работоспособности при замираниях спутниковых сигналов, а также появлением мешающих сигналов сторонних РЭС. Другой недостаток — необходимость использования в сенсорах дополнительного оборудования в виде приемников ГЛОНАСС/GPS.

Для устранения указанных недостатков в МПСН может использоваться техническое решение, предусматривающее синхронизацию от контрольного сигнала внешнего передатчика. МПСН состоит из N сенсоров, каждый из которых содержит приемник с приемной антенной, АЦП и местные часы, общий сервер, N входов которого подключены к выходам сенсоров, а также передатчик контрольного сигнала. АЦП приемных сенсоров тактируются идентичными местными часами. В МПСН синхронизация приемных сенсоров обеспечивается без использования внешних общих часов с каналами передачи данных и выполняется по внешнему контрольному сигналу, создаваемому передатчиком контрольного сигнала и направляемому в МПСН по радиоканалу. Передатчик контрольного сигнала устанавливается в зоне расположения МПСН в точке земной поверхности с известными координатами. В сервере выполняется оценка временного положения сигналов, принимаемых от объекта наблюдения сенсорами, относительно контрольного сигнала.

В МПСН контрольный сигнал излучается передатчиком на несущей частоте, совпадающей с несущей частотой радиосигналов, излучаемых обнаруживаемым ЛА, и принимается теми же антеннами приемных сенсоров, на которые поступают радиосигналы от ЛА. Поступление в приемные каналы сенсоров меток времени, маркеров или других идентичных фрагментов контрольного сигнала обеспечивает привязку (синхронизацию) местных часов всех приемных сенсоров к единой временной шкале. Недостатком данного МПСН является необходимость установки и использования дополнительного оборудования — внешнего передатчика контрольного сигнала в пределах прямой видимости приемных сенсоров. Другим недостатком МПСН является то, что при нестабильной работе или выходе передатчика контрольного сигнала из строя, а также при постоянном (временном) затенении передатчика естественными или преднамеренными статичными (движущимися) препятствиями и при воздействии радиопомех работоспособность МПСН нарушается. Возникающая неопределенность в достоверности определения координат ЛА в условиях меняющегося качества работы передатчика, а также меняющейся затеняющей и помеховой обстановки обусловлена тем, что не учитывается значимость исходных данных, т. н. статистический вес при определении координат ЛА, что не позволяет повышать точность системы. Отсутствие возможности использовать взвешенные данные не позволяет также развивать МПСН — повышать ее надежность и точность, присоединяя к ней иные источники получения синхронизирующей информации, например, такие как сигналы телевизионных центров.

При разработке предлагаемого технического решения решается техническая проблема, заключающаяся в создании МПСН, лишенной указанных выше недостатков. Техническим результатом предлагаемого решения является повышение точности, надежности и достоверности функционирования МПСН.

Указанный технический результат достигается тем, что МПСН УВД, содержащая N сенсоров, подключенных к серверу, а также передатчик контрольного сигнала, содержащий формирователь контрольного сигнала и передающее устройство с антенной, снабжена также частотно-разделительным устройством (ЧРУ), подключенным входом к выходу приемной антенны и состоящим из параллельно включенных фильтра нижних частот (ФНЧ) и фильтра высоких частот (ФВЧ), объединенные входы которых являются входом ЧРУ, выход ФВЧ подключен ко входу приемника и является первым выходом ЧРУ, приемником телевизионного сигнала (ТВС), вход которого подключен к выходу ФНЧ, являющемуся вторым выходом ЧРУ, дополнительным АЦП, сигнальный вход которого подключен к выходу приемника ТВС, а тактирующий вход — к выходу местных часов, формирователем строба, вход которого подключен к выходу местных часов, и коммутатором, первый (сигнальный) вход которого подключен к выходу АЦП, второй (сигнальный) вход — к выходу дополнительного АЦП, третий (управляющий) вход — к выходу формирователя строба управления, а выход является выходом сенсора (рис. 3).

Сигналы от передающей антенны обнаруживаемого ЛА и сигналы от передающей антенны 18 передатчика 15 контрольного сигнала принимаются приемными антеннами 4 каждого из N сенсоров, проходят соответствующие фильтры высоких частот 13, пропускающие сигналы ЛА, а также передатчика 15 контрольного сигнала и блокирующие прохождение телевизионных сигналов, усиливаются в соответствующих приемниках 5, настроенных на согласованный прием импульсных последовательностей сигналов ЛА, а также передатчика 15 контрольного сигнала, и преобразуются в цифровой код в дискретные моменты времени при помощи тактовых импульсов, вырабатываемых местными часами 7, в соответствующих аналого-цифровых преобразователях 6. Полученные цифровые последовательности с выходов АЦП 6 подаются на вход 1 соответствующих коммутаторов 12.

Сигналы от передающей антенны обнаруживаемого ЛА и сигналы от передающей антенны 18 передатчика 15 контрольного сигнала принимаются приемными антеннами 4 каждого из N сенсоров, проходят соответствующие фильтры высоких частот 13, пропускающие сигналы ЛА, а также пе-

передатчика 15 контрольного сигнала и блокирующие прохождение телевизионных сигналов, усиливаются в соответствующих приемниках 5, настроенных на согласованный прием импульсных последовательностей сигналов ЛА, а также передатчика 15 контрольного сигнала, и преобразуются в цифровой код в дискретные моменты времени при помощи тактовых импульсов, вырабатываемых местными часами 7, в соответствующих аналого-цифровых преобразователях 6. Полученные цифровые последовательности с выходов АЦП 6 подаются на вход 1 соответствующих коммутаторов 12.

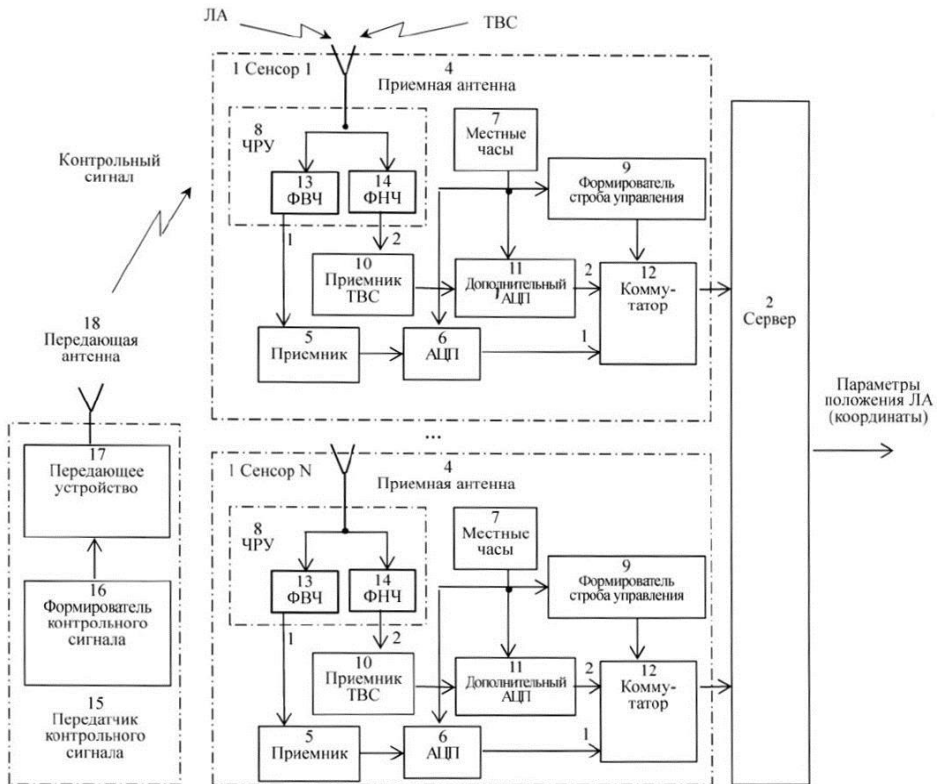


Рис. 3. Синхронизация МПЧН контрольным сигналом внешнего передатчика и ТВ сигналом.

Fig. 3. MLAT synchronisation by the control signal of external transmitter and by TV signal

Одновременно телевизионные сигналы от телевизионного центра принимаются приемными антеннами 4 каждого из N сенсоров, проходят соответствующие фильтры нижних частот 14, пропускающие телевизионные сигналы ЛА и блокирующие прохождение сигналов от ЛА и передатчика 15 контрольного сигнала, усиливаются в соответствующих приемни-

ках 10 ТВС, настроенных на согласованный прием ТВС, и преобразуются в цифровой код в дискретные моменты времени при помощи тактовых импульсов, вырабатываемых местными часами 7, в соответствующих дополнительных АЦП 11. Полученные цифровые последовательности с выходов дополнительных АЦП 11 подаются на вход 2 соответствующих коммутаторов 12.

Коммутация цифровых кодов сигналов ЛА, передатчика 15 контрольного сигнала и телевизионных сигналов для обеспечения их последовательной передачи с выхода каждого из N сенсоров на соответствующий вход сервера выполняется в коммутаторе 12 путем использования выходного сигнала формирователя 9 строка управления, поступающего на управляющий вход коммутатора 12 и представляющего собой, например, 2-битовый двоичный код, значение которого меняется в зависимости от вида пропускаемого сигнала. При этом, например, при значении кода 00 на выход коммутатора 12, являющийся выходом сенсора, могут пропускаться сигналы ЛА, при коде 01 — контрольные сигналы, а при коде 11 — ТВС.

Таким образом, с выхода каждого из N сенсоров по соответствующим каналам связи на сервер последовательно поступают сигналы ЛА, принятые сенсорами, контрольные сигналы передатчика 15 и ТВС.

В сервере МПСН принятые от N сенсоров сигналы ЛА используются для определения пространственных координат ЛА, а сигналы передатчика 15 контрольных сигналов — для обеспечения взаимной временной синхронизации сенсоров. Прием сенсорами и передача на сервер телевизионных сигналов позволяет обеспечить дополнительную относительную временную синхронизацию сенсоров, что повышает надежность и достоверность обнаружения ЛА, а также точностные характеристики измерения координат ЛА в МПСН.

Сигнал, посланный ЛА, принимается N сенсорами, расположенными друг от друга на некотором расстоянии, в разное время, зависящее от расстояния между ЛА и сенсорами. Разницы во времени приема сигнала ЛА сенсорами в соответствии с выражением (1) позволяет определить точное местонахождение ЛА в пространстве.

Так как основным параметром для расчета координат точки расположения ЛА в пространстве является время прихода сигнала, то на первый план выходит синхронизация всех приемников по времени и точность определения времени. Введенные в заявляемое техническое решение временной синхронизации МПСН путем приема и использования внешних телевизионных сигналов для дополнительной относительной временной синхронизации сенсоров повышает надежность и достоверность работы, а также точностные характеристики МПСН.

5. Заключение

Результаты сравнительного анализа особенностей построения и синхронизации МПСН ЛА указывают на возможность временной синхронизации разнесенных приемных сенсоров и общего сервера для приема, объединения и совместной обработки принятых сенсорами радиосигналов, излучаемых ЛА, при помощи внешнего источника единого времени, расположенного в районе установки средств МПСН, внешних эталонных сигналов времени, принимаемых в МПСН по радиоканалу от спутников глобальной навигационной спутниковой системы, а также внешних общих часов по внешнему контрольному сигналу, создаваемому автономным передатчиком контрольного сигнала и направляемому в МПСН по радиоканалу.

Предлагаемое техническое решение по использованию дополнительного канала приема и обработки телевизионных сигналов, излучаемых местными телевизионными центрами, позволяет улучшить качество синхронизации, повысить надежность и достоверность работы, а также точностные характеристики МПСН.

Список литературы

- 1 Черняк В. С. Многопозиционная радиолокация: М : Радио и связь, 1993. 416 с.
- 2 Гринь И. В. Оценка координат источника радиоизлучения на основе решения линеаризованной системы уравнений разностно-дальномерного метода // Технические науки. Электроника, измерительная и радиотехника. 2014. № 4 (32). С. 71—81.
- 3 Бабуров В. И., Васильева Н. В., Иванцевич Н. В., Панов Э. А. Совместное использование навигационных полей спутниковых радионавигационных систем и сетей псевдоспутников. СПб. : Агентство «РДК-Принт», 2005. 264 с.

Информация об авторах

Фридман Леонид Борисович, д. т. н., главный специалист ООО «НПК “ТИМ”», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Синицын Евгений Александрович, д. т. н., проф., заместитель начальника Научно-технического центра АО «Челябинский радиозавод “Поле”», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Information about the authors

Leonid B. Fridman, head specialist of LLC “NPK TIM”, doctor of science, Saint-Petersburg, Russian Federation.

Eugeniy A. Sinitzin, deputy head of the scientific and technical center of JSC “Chelyabinsk radio plant Polet”, doctor of science, professor, Sannt-Petersburg, Russian Federation.