

УДК 621.396.91/.96

Ю.А. Светличный, П.А. Дегтярев

Синхронизация и передача данных в радиотехнических системах с территориально распределенными сегментами

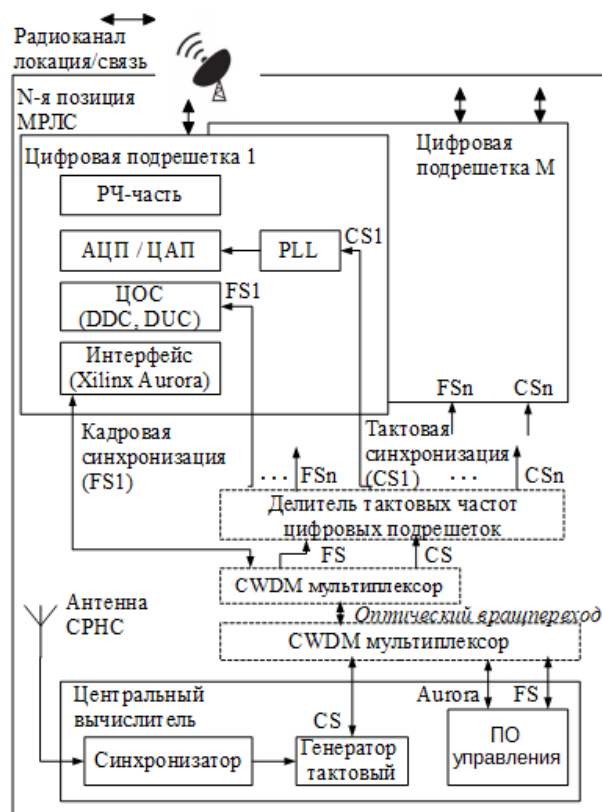
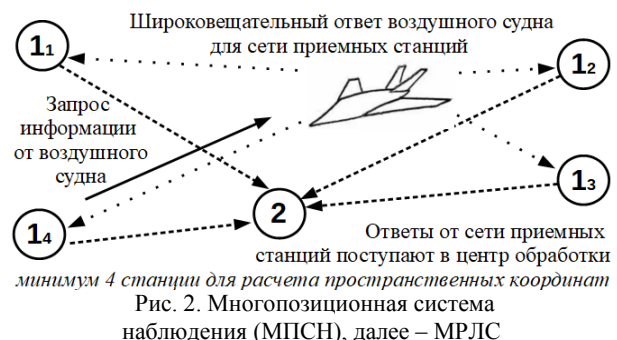
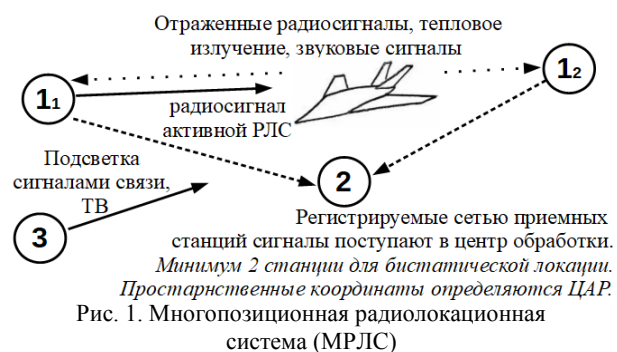
Рассматриваются практические аспекты синхронизации и передачи данных в радиотехнических системах развещающегося сегмента – многопозиционных радиолокационных системах. Активные, полуактивные, пассивные многопозиционные системы имеют схожие принципы обработки сигналов, где определяющим элементом достижения потенциальной точности является синхронизация разнесенных позиций, а для возможности кооперативной обработки информации необходима межпозиционная передача данных. Особенную актуальность имеют технические решения, позволяющие реализовывать мобильные и автономно действующие сегменты многопозиционных систем, размещаемые на беспилотных средствах и в районах с отсутствующей инфраструктурой. Приведены схемы синхронизации и передачи данных, полученные в практических применениях многопозиционных станций нескольких типов. Алгоритмы радиолокации и передачи данных реализованы на единой аппаратной платформе, выполненной по принципу программно-определяемой радиосистемы.

Ключевые слова: синхронизация, связь, передача данных, цифровая антенная решетка, многопозиционная система наблюдения, мултистатическая радиолокационная система, программно-определяемая радиосистема.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-3-7-12

В последние годы к системам наблюдения за объектами предъявляются новые требования по параметрам чувствительности, информативности, достоверности информации при возможности скрытой работы. В связи с этим повышенное внимание уделяется радиотехническим комплексам с территориально распределенными сегментами антенных систем: пассивным пеленгаторам, бистатическим радиолокаторам с использованием «просветного эффекта», пассивным и полуактивным мултистатическим РЛС, РЛС с синтезированной апертурой, мултилатерационным (наземным многопозиционным) системам (рис. 1, 2).

Типовая функциональная схема одной позиции МРЛС с цифровой антенной решеткой (ЦАР) приведена на рис. 3 [1].



Математические выражения для определения погрешности местоположения объектов прямо связаны с относительной точностью взятия временных отсчетов распределенных сегментов МРЛС, а для достижения потенциальных характеристик методов расчета координат наблюдаемых объектов критерии точности синхронизации должны быть однозначно сформулированы и безусловно обеспечены.

В части передачи данных интерес представляют параметры приемопередающей аппаратуры МРЛС, необходимые для обеспечения работы алгоритмов

радиолокации и радиосвязи на единой аппаратной платформе, в частности – допустимый для различных видов модуляции уровень амплитудно-фазовых искажений.

Требуемая точность синхронизации, пропускная способность каналов передачи данных, равно как и методы их обеспечения, могут существенно отличаться для различных видов радиотехнических систем. Сложность практической реализации схем синхронизации высокой точности, отсутствие глубоко изученных и общепризнанных методов синхронизации и передачи данных в многопозиционных системах ограничивают их развитие или накладывают ограничения на использование возможностей систем с разнесенными позициями в полной мере. Практически достигнутые результаты временной синхронизации и передачи данных разнесенных позиций в известной литературе подробно не описаны, известные технические решения реализуются, как правило, только на стационарно развернутых каналах передачи данных и синхронизации. Возможности достижения теоретически рассчитываемой потенциальной точности измерений в многопозиционных системах, основанные в том числе на альтернативных методах расчета пространственных координат и обеспечения синхронизации [2–4], в широкой практике не применяются, но безусловно должны быть проанализированы в перспективе.

В данной работе ставятся задачи уточнения математических зависимостей характеристик МРЛС от погрешностей синхронизации их территориально распределенных сегментов, обобщения основных математических зависимостей, достаточных для оценки бюджета МРЛС, формулирования требований к приемопередающей аппаратуре, способной обеспечивать алгоритмы радиолокации и радиосвязи с заданными параметрами на единой программно-аппаратной платформе, апробации типовых схем и методов синхронизации и передачи данных в системах с распределенными сегментами, расположенными на мобильных носителях и в условиях отсутствия коммуникационной инфраструктуры.

Математические зависимости

Рассмотрим математические зависимости для расчета координат наблюдаемых объектов от времени. В общем случае зависимость основного параметра, определяемого многопозиционными станциями – дальности до наблюдаемого объекта, разностно-дальномерным методом без учета местоположения разнесенных позиций, может быть представлена в виде (1):

$$\sigma_D = \frac{c \cdot \sqrt{\sigma_{i\tau}^2 + \sigma_{iR}^2}}{(d/D_0)^2}, \quad (1)$$

где c – скорость света в вакууме; $\sigma_{i\tau}$ – погрешность внутренних часов; σ_{iR} – погрешность определения времени прихода ответного сигнала; d – расстояние между позициями; D – расстояние до объекта обнаружения.

Погрешность определения дальности прямо пропорциональна составляющим погрешности внутренних часов и погрешности определения времени прихода ответного сигнала [5], что при реализации схемы синхронизации разнесенных позиций накладывает требования к предельной величине обоих видов погрешностей.

Погрешность определения времени прихода ответного сигнала, как правило, обратно пропорциональна ширине спектра радиосигнала, минимизируется известными корреляционными методами обработки и для сигналов с полосой от 10 МГц составляет от 10 до 100 нс (до 30 м по дальности) в зависимости от вида сигнала и схемы обработки.

Погрешность внутренних часов зависит от программно-аппаратных средств синхронизации станций и может существенно отличаться в зависимости от примененных технических решений, при этом предельно допустимая величина находится в пределах 10 нс временного интервала (около 3 м по дальности) [6].

Для оценки качества канала передачи данных важнейшим параметром является вероятность битовых ошибок в канале, которая для радиосвязи с квадратурно-амплитудной модуляцией (М-КАМ) может быть представлена в виде (2) [7]:

$$P_{QAM}(e) = \frac{1}{N_1} \cdot \sum_m \{J \cdot (1, m, 0, \sqrt{\gamma/N_2}, \sigma_{\psi}^2)\}, \quad (2)$$

где N_1 – коэффициент порядка модуляции; m – индексы порядка модуляции; γ – отношение сигнал/шум приемника (ОСШ); σ_{ψ} – ошибка фазы приемник–передатчик.

Скорость передачи данных по радиоканалу для МРЛС с временным разделением между режимами радиолокации и связи может быть определена согласно (3):

$$R = \frac{\Delta F}{2} \cdot \log_2 N \cdot R_S \cdot T_S, \quad (3)$$

где ΔF – полоса сигнала; N – размерность модуляции; R_S – эффективность протокола; T_S – коэффициент использования канала во времени.

Дальность действия радиоканала при выбранном ОСШ с учетом допустимой ошибки определяется бюджетом радиоканала. ОСШ в канале радиосвязи с учетом его параметров может быть рассчитано согласно (4) [8]:

$$M = P_{\text{пер}} + G_{\text{прм}} + G_{\text{прд}} - L_S - L_0 - P_S, \quad (4)$$

где $P_{\text{пер}}$ – мощность передатчика, дБм; $G_{\text{прм}}$ – коэффициент усиления (КУ) приемной антенны, дБ; $G_{\text{прд}}$ – КУ передающей антенны, дБ; L_S – потери на трассе, дБ; L_0 – потери в приемопередающей аппаратуре, дБ; P_S – чувствительность приемника, дБм.

Программно-аппаратная реализация

Для мобильных и размещаемых в районах с отсутствующей коммуникационной инфраструктурой МРЛС для синхронизации позиций и передачи данных между ними должны использоваться свободные от необходимости использования кабельных каналов методы.

Для синхронизации позиций в указанных условиях наилучшим образом может подойти схема на основе известных технических решений с использованием спутниковых радионавигационных систем (СРНС), совмещенная с резервной схемой синхронизации по радиосигналам локальной системы единого времени [9]. При этом достигаемая точность синхронизации таких схем оказывается не лучше 100 нс, что требует дополнительных мероприятий по улучшению полученных показателей – например, путем использования методов усреднения временных отметок за определенный временной интервал (метод накопления) и последующего исключения постоянной составляющей [10]. В предложенной схеме синхронизации усреднение выполняется специализированной интегральной схемой на основе принципа прямого цифрового синтеза (рис. 4).

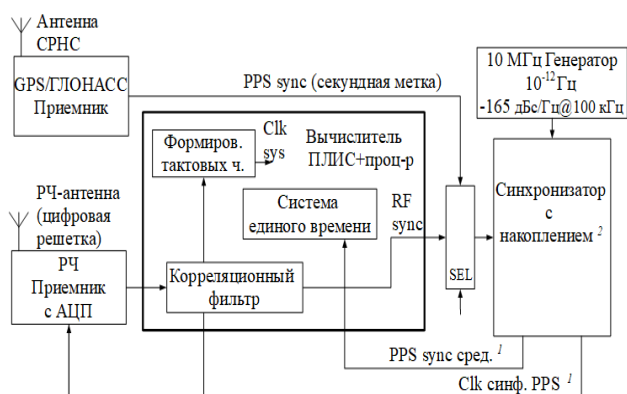


Рис. 4. Схема синхронизации позиции: 1 – уточненный сигнал синхронизации и синфазный ему тактовый сигнал генератора; 2 – уточнение секундной метки СРНС или локального радиосигнала синхронизации

Указанный способ позволяет формировать одновременно высокоточную кадровую метку для внутренних системных часов (PPS sync сред.) и синфазную ей тактовую частоту 50–125 МГц (Clk синф. PPS) для связанных алгоритмов цифровой обработки сигналов (ЦОС) разнесенных позиций.

Для передачи данных наиболее простым и надежным вариантом является использование встроенного радиомодема с М-КАМ-модуляцией, где скорость передачи данных может масштабироваться в зависимости от порядка модуляции, при этом, с целью обеспечения наилучшей помехоустойчивости следует использовать минимально возможный порядок, исходя из допустимых требований производительности канала передачи данных МРЛС [8]. В процессе выполнения работ по реализации МРЛС достаточная скорость передачи данных определена на уровне 2,5 Мбит/с при коэффициенте использования во времени, равном 0,2 [в соответствии с (3)], достаточные виды модуляции – от QPSK до QAM-16.

Совмещение алгоритмов радиолокации и радиосвязи выполнено на единой программно-аппаратной платформе с использованием принципа программно-определяемой радиосистемы. Основными модулями программно-аппаратной платформы яв-

ляются радиотрансиверы, высокоинтегрированные вычислительные средства на базе процессоров и программируемой логики. Антенная система представляет собой масштабируемую по количеству каналов и перестраиваемую в широком частотном диапазоне ЦАР.

Результаты проверки

Проверка синхронизатора проводилась по эфирным сигналам СРНС GPS/ГЛОНАСС на стенде, обеспечивающем условия, приближенные к условиям эксплуатации. Для исключения разницы в условиях приема сигналов разными модулями – мешающие отражения, разные созвездия спутников и др. – для приема сигналов СРНС использовалась общая антенна. СКО расхождения внутренних часов двух устройств синхронизации составило менее 5 нс, что на порядок лучше результата синхронизации по сигналам приемников СРНС непосредственно.

Для многопозиционного доплеровского радиолокатора для правильной оценки скоростей обнаруживаемых целей кроме абсолютной временной привязки важна когерентность тактовых генераторов разнесенных позиций. Предложенная схема синхронизатора позволяет формировать на разнесенных позициях когерентные гетеродины с точностью до погрешности за счет использования схемы формирования синфазных меток внутренних часов и частоты тактового генератора (см. рис. 4). Проверка работы синхронизатора в данном режиме проводилась в условиях опытной эксплуатации бистатического радиолокатора с ЦАР. Эксперимент проводился на автономно функционирующих разнесенных позициях МРЛС, передающая и приемные позиции были разнесены на расстояние около 15 000 м. Передающей станцией излучался периодический импульсный ЛЧМ-сигнал с постоянной фазой, на приёмной стороне анализировался дрейф фазы принимаемого радиосигнала с течением времени, что принималось за меру когерентности тактовых генераторов разнесенных позиций. По результатам эксперимента дрейф фазы за период накопления 0,1...0,2 с не превышает 3°, что находится ниже уровня погрешностей вычисления и не влияет на итоговую ошибку оценки скорости доплеровской МРЛС.

Проверка режима передачи данных проводилась на ранее описанной опытной позиции бистатического радиолокатора. Для передачи данных был реализован пакетный радиомодем с модуляцией QAM-16, обеспечивающий достаточную для МРЛС скорость передачи данных и способный к работе в режиме временного разделения режимов локации и передачи данных. Для исправления ошибок применено избыточное кодирование Рида–Соломона (РС) как наиболее эффективное по критериям: качество, сложность реализации, допустимая вероятность ошибки в канале. Параметры приемопередающей аппаратуры соответствовали условиям: компрессионные искажения – 0 дБ, отклонение фазы на разнесенных позициях – не хуже 3°, ОСШ – 15-20 дБ (соответствующие зависимости вероятности ошибок в канале связи без учета возможности восстановле-

ния, рассчитанные на основе (2), приведены на рис. 5). В наихудшем случае – 15 дБ ОСШ и отклонение фазы 3° , вероятность неправильного приема пакета длиной 255 байт, восстановленного кодом РС с избыточностью 25%, составило 0,05%.

Выводы

1. Погрешность синхронизации позиций МРЛС, применяющих разностно-дальномерные методы оценки координат наблюдаемых объектов, складывается из погрешности шкалы времени внутренних часов и погрешности определения времени прихода ответного сигнала. Соотношения указанных составляющих необходимо учитывать при выборе метода синхронизации позиций – важна минимизация обоих типов погрешностей.

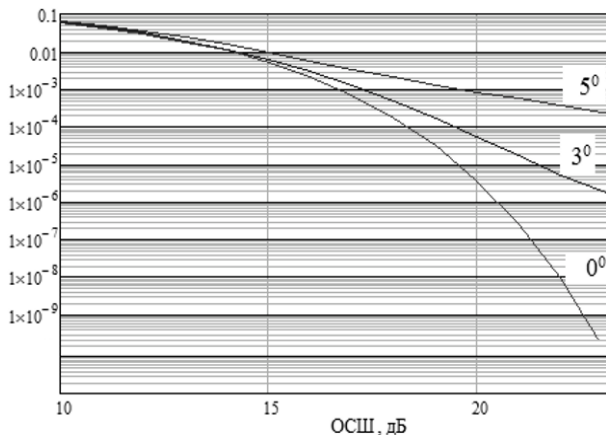


Рис. 5. Характеристики ошибок канала связи

2. Использование методов усреднения синхросигналов (накопления) позволяет повысить точность привязки шкалы времени примерно на порядок относительно их текущих параметров – до нескольких единиц нс в абсолютном выражении и обеспечить возможность синхронизации позиций с приемлемой точностью при временном пропадании сигналов СРНС (до 30 мин) в случае использования в схеме синхронизатора высокостабильного генератора с кратковременной стабильностью (девиацией Аллана) не хуже 10^{-12} Гц. В случае сбоев или пропадания сигналов СРНС на время более 30 мин в качестве альтернативного источника синхросигналов целесообразно использовать локальную синхронизацию путем передачи синхронизирующего радиоимпульса передающим каналом РЛС.

3. Для мобильных и размещаемых в труднодоступных районах с отсутствующей коммуникационной инфраструктурой МРЛС наиболее приемлемыми методами синхронизации и передачи данных является методы на базе радиоканала. Для реализации алгоритмов радиолокации и передачи данных в МРЛС может быть использована предложенная единая программно-аппаратная платформа, реализованная по принципу программно-определяемой радиосистемы.

4. Определенные параметры приемопередающей аппаратуры позволяют реализовывать совмещенные режимы радиолокации и передачи данных

на единой программно-аппаратной платформе, что экономит частотный ресурс, уменьшает общее количество и стоимость радиоаппаратуры, при определенных условиях обеспечивает большую устойчивость к помехам, большую дальность связи. При необходимости уменьшения вероятности ошибок возможно использование более сложных алгоритмов восстановления или предъявление более жестких требований к приемопередающей аппаратуре и взаимной синхронизации позиций.

Литература

1. Светличный Ю.А. Техническая реализация систем ЦОС в радиотехнических комплексах с распределенными модулями на зарубежной и отечественной ЭКБ // 21-я Междунар. конф. «Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA-2019» (27–29 марта 2019). – М., 2019. (Сб. докладов: кн. 2). – С. 442–447.
2. Кирюшкин В.В. Определение координат воздушного судна в полуактивной системе мультilaterации с синхронизацией приемных позиций по запросному сигналу / В.В. Кирюшкин, Н.С. Волков, А.М. Медведев // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2019. – № 2. – С. 24–32.
3. Кирюшкин В.В. Исследование точности определения координат воздушной цели в спутниковой-псевдоспутниковой многопозиционной системе наблюдения / В.В. Кирюшкин, Е.А. Дьяконов // Междунар. информ.-аналит. журн. «Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык». – 2017. – № 2. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-tochnosti-opredeleniya-koordinat-vozdushnoy-tseli-v-sputnikovoy-psevdosputnikovoy-mnogopozitsionnoy-sisteme> (дата обращения: 20.06.2019).
4. High-Precision Synchronized Pulse Generation for Mobile Multistatic Radar System / Zhu Li-Chen, Zhao Chen-Ning, Guo Qing-Zi, Bu Xiang-Yuan // Advances in Computer Science Research. – 2017. – Vol. 44. – P. 458–463.
5. Монаков А.А. Алгоритм оценки координат объектов для систем мультilaterации // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. – 2018. – № 4. – С. 38–46.
6. Multilateration error investigation and classification. Error estimation. // Transport and Telecommunication. – 2007. – Vol. 8, No. 2. – P. 28–37.
7. Артеменко А.А. Влияние неточности оценивания фазы несущей на вероятность битовых ошибок в М-КАМ системах передачи данных / А.А. Артеменко, А.А. Мальцев, А.Е. Рубцов // Вест. Нижегород. ун-та им. Н.И. Лобачевского. – 2007. – № 2. – С. 81–87.
8. Польшинкин А.В. Исследование характеристик радиоканала связи с беспилотными летательными аппаратами / А.В. Польшинкин, Х.Т. Ле // Изв. ТулГУ. Технические науки. – 2015. – Вып. 7, ч. 2. – С. 98–107.
9. Experimental Research of Multistatic Passive Radar with a Single Antenna for Drone Detection / Fang Gao, Wan Xianrong, Yi Jianxin, Liu Yuqi // IEEE Access. – 2018. – Vol. 6. – P. 33542–33551.
10. Rama Chellappa. Academic Press Library in Signal Processing // Array, Radar and Communications Engineering. Academic Press. – 2018. – Vol. 7. – 626 p.
11. Борзов А.Б. Перспективы реализации локальных радионавигационных систем на базе многопозиционных РЛС / А.Б. Борзов, С.В. Микаэльян // Вестник СибГУТИ. – 2015. – №2. – С. 198–208.
12. Потенциальные возможности синхронизации шкал времени удаленных объектов по сигналам ГНСС / А.В. Гребенников, М.Ю. Казанцев, А.П. Кудревич, С.В. Си-

засов // Успехи современной радиоэлектроники. – 2015. – № 10. – С. 113–116.

13. Монаков А.А. Модифицированный алгоритм Банкрофта для систем мультilaterации // Изв. высш. учеб. завед. России. Радиоэлектроника. – 2018. – № 1. – С. 50–55.

14. Крючков И.В. Синхронизация подвижных модулей распределенных радиолокационных комплексов / И.В. Крючков, А.А. Филатов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Приборостроение. – 2012. – С. 45.

15. Колмогоров О.В., Шабанов В.П. Синхронизация шкал времени наземных средств радионавигационных систем и шкал времени пространственно-удаленных эталонов с использованием волоконно-оптических линий связи // Системы связи и радионавигации: сб. тезисов. – Красноярск: Изд-во НПП «Радиосвязь», 2018. – С. 116–119.

16. Куличков К.А., Шабанов В.П. Экспериментальная оценка погрешности системы синхронизации с использованием комбинированного сигнала частотно-временной синхронизации // Системы связи и радионавигации: сб. тезисов. – Красноярск: Изд-во НПП «Радиосвязь», 2018. – С. 141–144.

17. Титов М.П. Временная синхронизация при бистатическом синтезировании апертуры антенны в космических РСА // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2017. – № 4. – С. 44–51.

Светличный Юрий Алексеевич

Директор центра исследований и разработок ПАО «НПО «Алмаз» в г. Томске (ООО «ЛЭМЗ-Т») Развития пр-т, д. 8, г. Томск, Россия, 634055
Тел.: +7 (382-2) 48-85-27
Эл. почта: svetlichny_ya@lemz-t.ru

Дегтярев Павел Алексеевич

Канд. техн. наук, нач. сектора центра исследований и разработок ПАО «НПО «Алмаз» в г. Томске (ООО «ЛЭМЗ-Т») Развития пр-т, д. 8, г. Томск, Россия, 634055
Тел.: +7 (382-2) 48-85-27
Эл. почта: degtyarev_pa@lemz-t.ru

Svetlichny Y.A., Degtyarev P.A.

Synchronization and Data Transmission in Multistatic Radar Systems

The article deals with the practical aspects of synchronization and data transferring in multistatic radar systems. Active, semi-active, passive multistatic systems have similar principles of signal processing, where the determining element of achieving potential accuracy is the synchronization unit, especially in wireless mode. Radiocommunication, radiolocation algorithms are based at common SDR software-hardware platform. The work is focused on typical schemes and methods of distributed multiposition radar synthesis and testing. Synchronization and communication schemes and test results, achieved in practical applications, are presented.

Keywords: synchronization, communication, multilateration, multistatic, radar, surveillance system.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-3-7-12

References

1. Svetlichny Y.A. *Tekhnicheskaya realizaciya sistem cifrovoi obrabotki signalov v radiotekhnicheskikh kompleksah s raspredelennymi modulyami na zarubegnoi i otechestvennoi elektronnoy baze* [Design DSP units for multistatic radar] // XXI International conference DSPA–2019». М., 2019, pp. 442–447 (in Russ).

2. Kirushkin V.V. *Opreделение koordinat vozduzhnogo sudna v poluaktivnoi sisteme multilateracii s sinhronizaciey priemnyh pozitsiy po zaprosnomu kodu* [Determination of aircraft coordinates in a semi-active multilateration system with synchronization of receiving positions by a request signal] / V.V. Kirushkin, N.S. Volkov, A.M. Medvedev // Information and Measurement Systems, 2019, № 2, pp. 24–32 (in Russ).

3. Kirushkin V.V. *Issledovanie tochnosti opredeleniya koordinat vozduzhnoi tseli v sputnikovoi-psevdosputnikovoi mnogoposicionnoi sisteme nabludeniya* [Investigation of the accuracy of air targets coordinates in satellite multilateration surveillance system] // International information-analytical Journal «Crede Experto: transport, society, education, language». 2017. № 2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-tochnosti-opredeleniya-koordinat-vozduzhnoy-tseli-v-sputnikovoy-psevdosputnikovoy-mnogopozitsionnoy-sisteme> (in Russ).

4. Li-Chen Zhu. High-Precision Synchronized Pulse Generation for Mobile Multistatic Radar System // Zhu Li-Chen, Zhao Chen-Ning, Guo Qing-Zi, Bu Xiang-Yuan // Advances in Computer Science Research, vol. 44, 2017, pp. 458–463.

5. Monakov A.A. *Algoritm otsenki koordinat ob'ektov dlya sistem multilateracii* [Estimating object coordinates Algorithm for multilateration systems] // News of Russian universities. Radioengineering, 2018, № 4, pp. 38–46 (in Russ).

6. Yekaterina Trofimova. Multilateration error investigation and classification. Error estimation. Transport and Telecommunication, vol. 8, no. 2, 2007, pp. 28–37.

7. Artemenko A.A. *Vliyanie netochnosti otsenivaniya fazy nesushei na veroyatnost bitovyh oshibok v M-QAM sistemah peredachi dannyh* [Influence of carrier phase estimation inaccuracy on bit error probability in M-QAM data transmission systems] / A.A. Artemenko, A.A. Mal'tsev, A.E. Rubtsov // Vestnik Nizgorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo, 2007, № 2, pp. 81–87 (in Russ).

8. Polynkin A.V. *Issledovanie harakteristik radiokanala svyazi s bezpilotnymi letatelnyimi apparatami* [Research of characteristics of radio channel of communication with unmanned aerial vehicles] / A.V. Polynkin, H.T. Le // Izvestiya TulGU. Technical Science. 2015, № 7, part. 2, pp. 98–107 (in Russ).

9. Gao Fang. Experimental Research of Multistatic Passive Radar with a Single Antenna for Drone Detection / Fang Gao, Wan Xianrong, Yi Jianxin, Liu Yuqi // IEEE Access, 2018, vol. 6, pp. 33542–33551.

10. Rama Chellappa. Academic Press Library in Signal Processing, Volume 7. Array, Radar and Communications Engineering. Academic Press: 2018, , vol. 7, 626 p.

11. Borzov A.V. *Perspektivy realizacii lokalnyh radio-navigatsionnyh sistem na base mnogopositsionnyh RLS* [Prospects for the implementation of local radio navigation systems based on multi-position radar] / A.V. Borzov, S.V. Mikaelyan // Vestnik SibGUTI. 2015., № 2, p. 198–208 (in Russ).

12. Grebennikov A.V. *Potencialnye vozmozhnosti sinhronizacii vremeni udalennyh obektov po signalam GNSS* [Potential possibilities of synchronization of time scales of remote

objects on GPS signals] / A.V. Grebennikov, M.U. Kazantsev, A.P. Kudrevich, S.V. Sizasov // *Uspehi sovremennoy radioelektroniki*. 2015, №10, pp. 113–116 (in Russ).

13. Monakov A.A. *Modificirovanniy algoritm Bankrofta dlya sistem multilateracii* [A modified Bancroft algorithm for multilateration systems] // *News of Russian universities*. Radioengineering. 2018, № 1, pp. 50–55 (in Russ).

14. Kruchkov I.V. *Synhronizaciya podvignyh moduley raspredelennyh radiolokacionnyh kompleksov* [Mobile modules of distributed radar systems Synchronization] / I.V. Kryuchkov, A.A. Filatov // *MGTU im. Baumana. «Instrument Engineering»*. 2012, pp. 45 (in Russ).

15. Kolmogorov O.V. *Synchronizaciya shkal vremeni nazemnyh sredstv radionavigacionnyh sistem i shkal vremeni prostranstvenno udalennyh etalonov s ispolzovaniem volokonno-opticheskikh liniy svyazi* [Time scales Synchronization of ground radio navigation systems and time scales of spatially remote standards using fiber-optic communication lines] // *Communication and Radio navigation System*. Krasnoyarsk, 2018, pp. 116–119 (in Russ).

16. Kulichkov K.A. *Experimentalnaya otsenka pogreshnosti systemy synhronizatsii s ispolzovaniem kombinirovannogo signala chastotno-vremennoi synhronizatsii* [Experimental estimation of the synchronization system error using

the combined time-frequency signaling signal] // *Communication and Radio navigation System*. Krasnoyarsk, 2018, pp. 141–144 (in Russ).

17. Titov M.P. *Vremennaya synhronizaciya pri bistaticheskoy sintezirovanii apertury anteny (SA) v kosmicheskikh RLS s SA* [Time synchronization in bistatic synthetic aperture antenna (SA) in space-based radars] // *Radioengineering and Communication Systems*. 2017, № 4, p. 44–51 (in Russ).

Yury A. Svetlichniy

Director, Research and Development Center
PAO «NPO «Almaz» (LLC «LEMZ-T»),
8, Razvitiya pr., Tomsk, Russia, 634055
Phone: +7 (382-2) 48-85-27
Email: svetlichniy_ya@lemz-t.ru

Pavel A. Degtyarev

Candidate of Engineering Science, Head of Sector,
Center of PAO «NPO «Almaz» (LLC «LEMZ-T»)
8, Razvitiya pr., Tomsk, Russia, 634055
Phone: +7 (382-2) 48-85-27
Email: degtyarev_pa@lemz-t.ru