

Научная статья
УДК 621.396.969
DOI: <https://doi.org/10.18127/j20700784-202403-07>

Формирование потока радиолокационных кадров в пространственно-распределенной системе малогабаритных бортовых РЛС

В.А. Ненашев¹, А.Р. Бестугин², И.А. Киршина³, Е.А. Антохин⁴

¹⁻⁴ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (Санкт-Петербург, Россия)

¹ nenashev.va@yandex.ru, ² fresguap@mail.ru, ³ ikirshina@mail.ru, ⁴ fresguap@mail.ru

Аннотация

Постановка проблемы. При обзоре земной поверхности все чаще применяются пространственно-распределенные радиолокационные системы, обеспечивающие оперативный поиск и автоматическое распознавание физических наземных объектов в режиме реального времени. При этом каждая малогабаритная радиолокационная станция пространственно-распределенной системы должна обеспечить высокое разрешение формируемого радиолокационного кадра для передних зон обзора малогабаритных бортовых РЛС, сопоставимое с разрешением оптических кадров, регистрируемых в оптических локационных видеосистемах технического зрения. Одновременно такие системы технического зрения должны быть способны функционировать в сложных погодных и сезонных условиях ограниченной видимости.

Цель. Разработать методику формирования потока радиолокационных кадров с высокой частотой их следования для оперативного отображения радиолокационной обстановки в передних зонах обзора бортовых РЛС, объединенных в группу и функционирующих в режимах реального времени.

Результаты. Получена методика, позволяющая отображать на экране оператора поток радиолокационных кадров высокого разрешения и с высокой частотой их следования, к которому могут применяться новые и модифицированные алгоритмы классификации территорий и распознавания физических наземных объектов.

Практическая значимость. Новая методика позволяет обеспечивать оперативный и высокоточный мониторинг земной поверхности, и предназначена для экстренного поиска физических наземных объектов, в частности, людей, попавших в зону чрезвычайных ситуаций в результате природных и техногенных катастроф.

Ключевые слова

Малогабаритная бортовая радиолокационная станция, поток радиолокационных кадров, высокое разрешение, частота следования кадров, радиолокационное синтезирование апертуры антенны, субапертура

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-79-00303).

Для цитирования

Ненашев В.А., Бестугин А.Р., Киршина И.А., Антохин Е.А. Формирование потока радиолокационных кадров в пространственно-распределенной системе малогабаритных бортовых РЛС // Успехи современной радиоэлектроники. 2024. Т. 78. № 3. С. 59–69. DOI: <https://doi.org/10.18127/j20700784-202403-07>

A brief version in English is given at the end of the article

Введение

Для задач оперативного мониторинга земной поверхности преимущественно используются малые летательные аппараты с малогабаритными бортовыми радиолокационными станциями (БРЛС). Они позволяют за короткий промежуток времени охватить обширные площади наблюдаемых территорий, своевременно информировать оператора о наличии наблюдаемых физических наземных объектов (ФНО) в зоне чрезвычайных ситуаций (ЧС) в режиме реального времени.

Такие средства авиационного мониторинга имеют обширную гражданскую сферу применения в задачах контроля и разведки природных сред, оперативного реагирования на ЧС (землетрясения, сели, лесные пожары, наводнения), картографирования труднодоступных территорий, мониторинга железнодорожных путей и трубопроводов, картографирования сельскохозяйственных зон и т.д. [1–7]. Кроме того, они имеют высокую эффективность работы в неблагоприятных условиях и возможность формировать радиолокационные изображения (РЛИ) в различных сложных условиях наблюдения для контроля природных ресурсов, исследования ландшафта, прогноза и оценки стихийных бедствий и пр.

На данный момент актуальны исследования и разработки технологии технического зрения по формированию потока радиолокационных кадров (РЛК) с частотой, сравнимой с видеочастотой на основе

модификации метода радиолокационного синтезирования апертуры антенны. Такой режим функционирования БРЛС в последние годы вызывает особый интерес у исследователей и специалистов – разработчиков радиоэлектронной бортовой аппаратуры [8–22]. В этом режиме РЛК потока формируются с гораздо большей скоростью, чем при классическом методе синтезирования апертуры антенны, поэтому этот поток можно отображать непрерывно, подобно оптическому видео.

Поскольку такие радиолокационные системы способны формировать поток РЛК высокого разрешения с высокой частотой их следования независимо от погодных и сезонных условий, то они могут использоваться как замена оптико-локационным видеосистемам, которые способны функционировать преимущественно в благоприятных метеоусловиях (в ясную погоду в условиях достаточной освещенности) [23].

Оптическим системам присущ ряд ограничений: они имеют малую дальность действия, на их работу существенно влияют различные сложные условия, вызванные техногенной катастрофой (при наличии дыма), плохой метеорологической обстановкой, а также некоторыми сезонными явлениями. В связи с этим предлагается в качестве альтернативы разработать методику формирования потока РЛК, в том числе в пространственно-распределенном варианте функционирования, которая позволит заменить оптические системы аэромониторинга и уйти от их ограничений при решении оперативных задач.

Ц е л ь р а б о т ы – разработать методику формирования потока радиолокационных кадров с высокой частотой их следования для оперативного отображения радиолокационной обстановки в передних зонах обзора БРЛС, объединенных в группу и функционирующих в режимах реального времени. Для этого следует рассмотреть особенности и ограничения режимов формирования видеопотока радиолокационных кадров, реализуемых на базе группы БРЛС, с целью их устранения.

Особенности формирования видеопотока радиолокационных кадров в малогабаритных БРЛС

Разработка методики, реализующей формирование потоков РЛК, генерируемых под разными ракурсами наблюдения в малогабаритных БРЛС пространственно-распределенной системы (ПРС) оперативного мониторинга, имеет ряд особенностей и отличий от существующих систем. В отличие от практически мгновенной регистрации кадров в оптических малогабаритных бортовых системах, в малогабаритных БРЛС требуется определенное время на формирование РЛК высокого разрешения, т.е. время на синтезирование полной апертуры антенны. В связи с этим поток РЛК формируется с меньшей частотой следования кадров в малогабаритных БРЛС, чем аналогичный поток в малогабаритных оптико-локационных системах мониторинга земной поверхности [3,23].

Для реализации процесса формирования потока РЛК в однопозиционном варианте реализации на практике могут применяться несколько вариантов обзора земной поверхности с соответствующим движением носителя БРЛС. В частности, осуществляется движение по прямолинейной или круговой траекториям [12] с реализацией бокового и переднебокового обзора земной поверхности. При этом существует *два подхода к обработке эхо-сигналов для формирования потока РЛК*: 1) на основе синтезирования полной апертуры; 2) на основе обработке данных от субапертур с частичным их перекрытием [10,12,18].

Сложность первого подхода заключается в том, что если поток РЛК формируется при получении радиолокационной информации на основе синтезирования полной апертуры, то частота следования кадров в потоке мала по сравнению с аналогичным параметром для оптико-локационных видеосистем оперативного мониторинга земной поверхности. Кроме того, в случае формирования потока РЛК на основе радиолокационных данных от полной синтезированной апертуры требуются значительные вычислительные мощности, что не всегда возможно обеспечить на борту малогабаритных БРЛС.

Таким образом, для увеличения частоты следования кадров и снижения вычислительной нагрузки на малогабаритные БРЛС предлагается детально рассмотреть второй подход, применяемый для формирования потока РЛК, основанный на разложении полной синтезированной апертуры на субапертуры с обновлением текущего РЛК каждый раз, когда формируются новые данные от субапертуры с их частичным перекрытием. Для реализации процесса формирования потока РЛК предлагается использовать метод обработки информации с перекрытием данных от субапертур на интервале синтезирования, или также называемый метод скользящего окна. Формирование нового РЛК осуществляется в режиме скользящего окна с соответствующим перекрытием, т.е. каждый раз при формировании текущего кадра осу-

существляется добавление новых данных от субапертуры к данным предыдущего кадра, благодаря чему и обеспечивается более высокая частота следования кадров в потоке, чем при первом подходе, при котором требуется ожидать накопления данных эхо-сигнала на интервале синтезирования до достижения полной апертуры [10,18].

Так как во втором подходе используются данные от эхо-сигналов от отдельных субапертур, то этот подход меньше зависит от жестких требований, накладываемых к траектории полета носителя БРЛС, чем первый подход, для которого существенны изменения траектории движения фазового центра антенны БРЛС на всем интервале синтезирования апертуры.

На рис. 1 показан подход формирования потока РЛК в режиме перекрытия данных субапертур, при этом выбран переднебоковой обзор наблюдения за земной поверхностью в целях его дальнейшего использования в ПРС. Здесь субапертуры предыдущего РЛК будут повторно использоваться при синтезировании изображения следующего РЛК при формировании потока, что реализуется с меньшей длиной синтезированной апертуры, из чего следует, что вычислительная нагрузка будет меньше, чем при других подходах, описанных выше, следовательно ее можно будет осуществлять на борту малого летательного аппарата в режиме реального времени. По этим причинам данный подход является перспективным для его реализации в оперативных ПРС. Рассмотрим его подробнее.

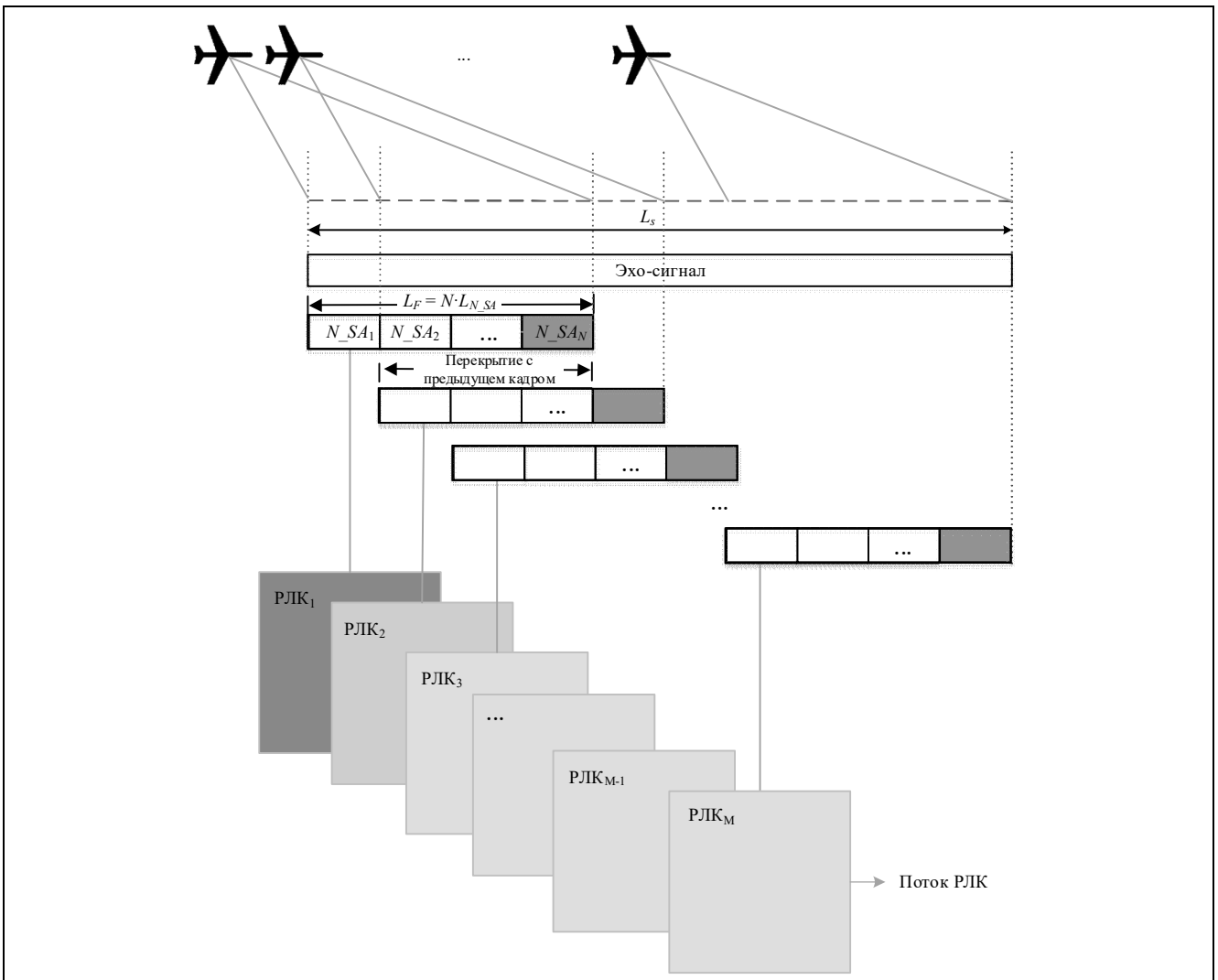


Рис. 1. Формирование потока РЛК в режиме перекрытия данных от субапертур при переднебоковом обзоре наблюдения за земной поверхностью

Fig. 1. Formation of a radar flow in the mode of overlapping data from subapertures during an anterolateral view of observing the earth's surface

Соответствующая отдельному РЛК синтезированная субапертура длиной L_F делится на N равных частей. Длина субапертуры РЛК $L_F = NL_{SA}$, а длина полной апертуры L_S . Так как данные от каждой субапертуры длины L_F обрабатываются параллельно, то для формирования текущего (не первого) кадра используется часть левых крайних данных от предыдущего кадра (длины $(N-1)L_{SA}$) с добавлением новых данных эхо-сигнала (длины L_{SA}), и так далее по методу скользящего окна для каждого РЛК потока, что и показано на рис. 1. При этом в течении формирования нового кадра большая часть вычислений сориентирована на обработке данных эхо-сигнала, соответствующих новому элементу субапертуры длины L_{SA} , что способствует снижению вычислительной нагрузки на данную систему.

На рис. 2 показана разница во времени между приходом данных эхо-сигнала, полученных от субапертуры 1 и субапертуры 2, по данным от которых и формируются РЛК за время T_{SA} . При этом частота следования кадров равна F_R и определяется обратной величиной длительности T_R элемента N_{SA} .

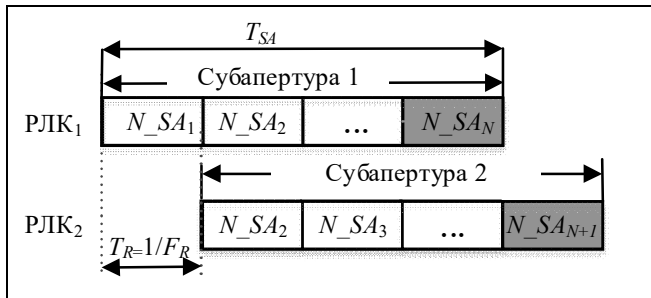


Рис. 2. Частота следования кадров с перекрытием субапертур
 Fig. 2. Frame rate with sub-aperture overlap

Описанные выше особенности формирования потока РЛК следует учитывать при реализации данного подхода в ПРС малогабаритных БРЛС для отображения динамики изменения объектов исследуемых территорий в реальном масштабе времени по курсу движения носителей малогабаритных БРЛС в пространственно-распределенной системе оперативного мониторинга.

Особенности реализации пространственно-распределенной системы малогабаритных бортовых РЛС

При решении задач оперативного поиска в зонах чрезвычайных ситуаций и мониторинге труднодоступных зон интереса все чаще в гражданских сферах применяются ПРС радиолокационные системы, БРЛС которых расположены на малых летательных аппаратах [1,2]. Их главным критерием является оперативность исполнения поставленной задачи, что накладывает требование к сокращению времени поиска при осуществлении наблюдения и контроля за земной поверхностью и влечет за собой необходимость использовать высокоскоростные вычислительные ресурсы и разработку быстрых алгоритмов обработки получаемой информации от элементов многопозиционной ПРС [3,6,7].

Многопозиционные системы, состоящие из двух и более распределенных в пространстве БРЛС, обладают существенными преимуществами по сравнению с однопозиционными вариантами их реализации. В частности, двухпозиционные ПРС малогабаритных БРЛС обладают способностью формировать детальные РЛК по курсу своего движения, и далее с высокой точностью определять на них координаты ФНО как по дальности, так и по азимутальной координате, а также параметры их движения. При этом точность определения координат ФНО и детальность РЛК в распределенных БРЛС значительно выше по сравнению с однопозиционным вариантом их реализации для передних зон обзора [3,6,7,23–26].

Выбор пространственно-распределенного варианта обзора обусловлен фактором повышения оперативности систем наблюдения за счет возможности осуществлять мониторинг земной поверхности в передних зонах обзора малогабаритных БРЛС, объединенных во взаимодействующую группу комплексного принятия оперативных решений. Такой вариант реализации позволяет существенно сократить время на поиск, что является ключевым фактором при решении задач оперативного мониторинга земной поверхности. Возможность осуществлять обзор в передней зоне по курсу движения носителей БРЛС, объединенных в группу, обеспечивает минимизацию времени на поиск физических объектов при проведении поисково-спасательных операций оперативного характера.

Важным аспектом является тот факт, что при выполнении этих операций реализуется мониторинг именно в передней зоне обзора по курсу движения носителя БРЛС: траекторию движения легко скорректировать при подлете прежде, чем наблюдаемая зона будет идентифицирована как зона бедствия экологической или техногенной катастрофы. Этот аспект также позволяет экономить время подлета к соответствующей зоне по сравнению с методом картографирования в режиме бокового обзора, при котором необходимо осуществлять разворот или движение по круговой траектории, что сопровождается дополнительными временными затратами. Кроме того, при освещении передней зоны с приближением

носителей БРЛС по направлению к наблюдаемой зоне ЧС дальность до нее постепенно уменьшается, и, как следствие, увеличивается отношение сигнал/шум, что позволяет обеспечить повышение вероятности правильного обнаружения при фиксированном значении вероятности ложной тревоги.

Возможность обеспечения высокого разрешения по азимуту и дальности в передней зоне обзора БРЛС также является основной характеристикой при выполнении задач оперативного мониторинга, которую необходимо повышать при формировании РЛИ [25]. Этими доводами и обосновывается целесообразность выбора малогабаритных многопозиционных БРЛС применительно к реализации систем оперативного мониторинга.

Таким образом, целесообразно разработать методику, осуществляющую формирование потока РЛК в ПРС и способную обеспечить повышение оперативности при проведении соответствующих поисково-спасательных операций.

Методика формирования потока радиолокационных кадров в разнесенной в пространстве группы малогабаритный БРЛС

Методика, по которой осуществляется формирование РЛК в ПРС, взаимодействующей группой малогабаритных БРЛС для их передних зон обзора, представлен на рис. 3. Данная методика формирования потока РЛК отличается от известных тем, что реализуется на базе развития методов многопозиционной бортовой радиолокации, передачи и обработки разноразмерных данных и слияния спектров, вычисленных по данным от субапертур с их наложением друг на друга по методу скользящего окна. При этом учитываются требования по обеспечению оперативности и повышению скорости и разрешения РЛК, а также частоты их следования. Это достигается за счет того, что каждая из БРЛС будет осуществлять формирование потока РЛК высокого разрешения для передней зоны ее обзора, что позволит их носителям осуществлять полет по направлению к зоне предполагаемой катастрофы практически параллельными курсами с одновременным повышением разрешения формируемого потока РЛК в передней зоне.

Суть предлагаемой методики. В двухпозиционной ПРС осуществляется обработка разноразмерной информации, в которой каждая из БРЛС осуществляет регистрацию данных от субапертур в переднебоковом обзоре для передней зоны обзора боковой БРЛС. Эти данные, собранные от переднебокового обзора от каждой субапертуры, передаются на боковую БРЛС с целью освещения ее передней зоны обзора, где эта информация пересчитывается и корректируется в систему координат боковой БРЛС, что позволит носителям БРЛС осуществлять полет по направлению к предполагаемой зоне бедствия практически параллельными курсами и способствует повышению оперативности обзора больших площадей поверхностей.

Геометрия взаимного параллельного движения носителей каждой из малогабаритных БРЛС двухпозиционной ПРС и облучаемых зон обзора показана на рис. 3.

Отметим, что в подобных ПРС должна быть реализована система синхронизации шкал времени для группы взаимодействующих БРЛС. Такая синхронизация успешно решается на основе методов запросной радиолокации с точностью до 5 нс [24].

Предлагаемая методика состоит из четырех этапов (рис. 4).

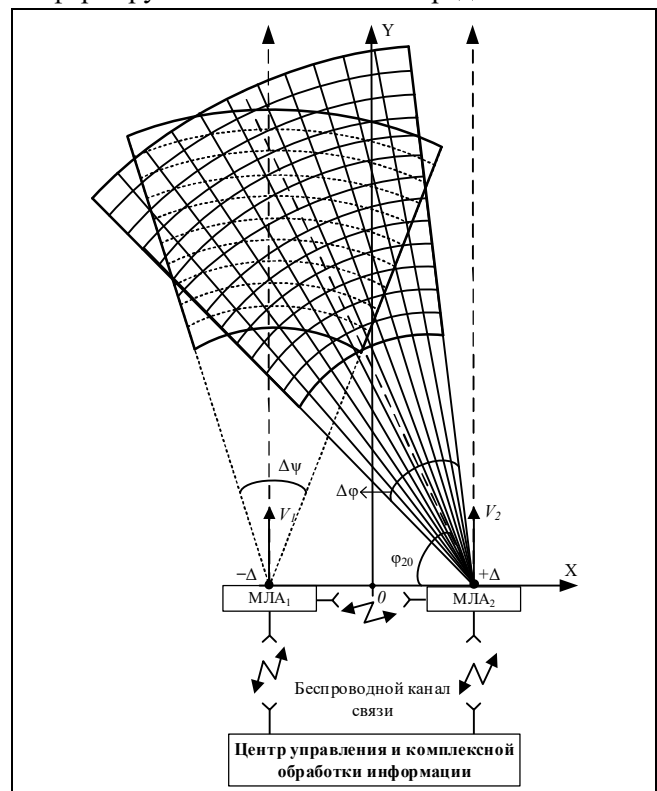


Рис. 3. Геометрия взаимного расположения БРЛС двухпозиционной пространственно-распределенной системы и наблюдаемой подстилающей поверхности

Fig. 3. Geometry of the relative position of the radar of a two-position spatially distributed system and the observed underlying surface

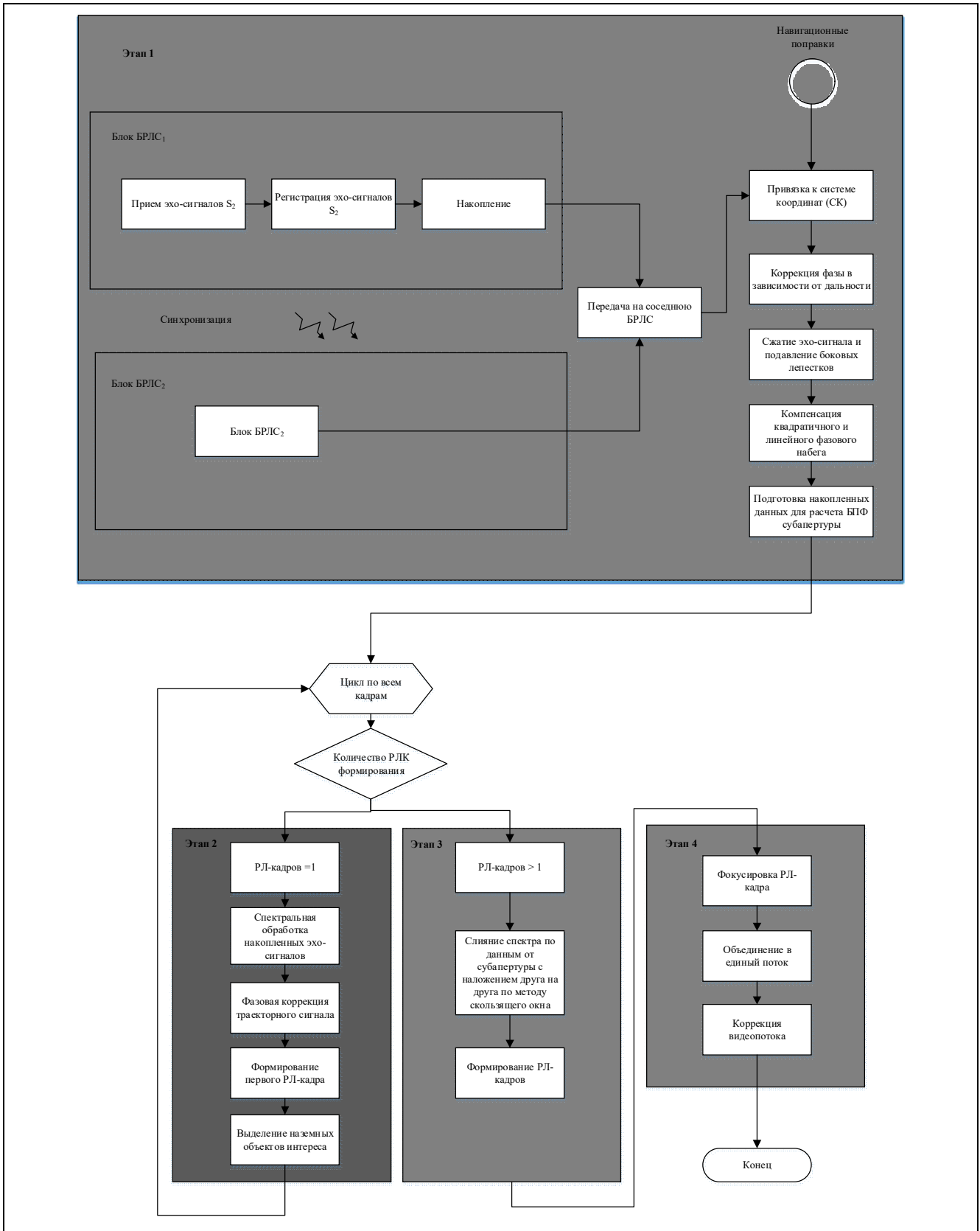


Рис. 4. Схема методики формирования потока РЛК, основанной на принципе субапертурного слияния спектров

Fig. 4. Scheme of the method for generating a radar flux based on the principle of sub-aperture fusion of spectra

Этап 1. Осуществляется прием, регистрация, передача на соседнюю БРЛС, а также накопление радиолокационных эхо-сигналов S_2 на борту БРЛС₁ с привязкой этих данных к локальной системе координат (СК) относительно текущего положения бортового носителя. Таким образом, после передачи навигационных параметров, данных для синхронизации и эхо-сигналов между БРЛС₂ и БРЛС₁, для каждого канала дальности осуществляются следующие действия: коррекция фазы в зависимости от дальности; сжатие эхо-сигнала и подавление боковых лепестков; компенсация квадратичного и линейного фазовых набегов; подготовка накопленных данных для расчета БПФ субапертуры.

Этап 2. Реализуется формирование первого радиолокационного кадра для передней зоны обзора малогабаритной бортовой РЛС на основе спектральной обработки накопленных выборок сжатых эхо-сигналов в течении времени синтеза субапертуры антенны l с их фазовой коррекцией траекторного сигнала, зависящей от отклонения от линейной траектории носителей. При этом параллельно возможно осуществить выделение наземных объектов интереса, определение их координат и параметров движения [25,27].

Этап 3. Когда число кадров больше одного, осуществляется формирование второго и далее последующих кадров высокого разрешения на основе слияния спектров, вычисленных по данным от субапертур с их наложением друг на друга по методу скользящего окна, как это было показано на рис. 1 и 2.

Этап 4. Реализуется алгоритм фокусировки РЛК и их объединение в единый поток на основе собранных данных, для чего используются алгоритмы построения видеопотока по набору отдельных кадров с соответствующей коррекцией данного потока для ее отображения в передней зоне обзора.

В результате данная методика формирует поток РЛК с высоким разрешением и частотой следования кадров в передних зонах обзора малогабаритных бортовых РЛС с учетом требований к оперативности решаемых прикладных задач

Обсуждение полученных результатов

На основании вышеизложенного следует, что представленная методика формирования потока радиолокационных кадров в ПРС малогабаритных БРЛС реализуется на основе объединения варианта формирования потока РЛК и многопозиционной оперативной системы бортовых РЛС, осуществляющих картографирование в передних зонах обзора по курсу движения их носителей.

Формирование РЛК методом скользящего окна позволяет обеспечить высокое разрешение кадров, а также высокую частоту их следования в отличие от других рассмотренных подходов. При этом существенным фактором при реализации формирования потока РЛК методом скользящего окна являются низкие требования к строгой прямолинейности траекторий движения полетов отдельных носителей малогабаритных БРЛС, что существенно при реализации многопозиционных систем картографирования. В свою очередь, реализация методики формирования потока радиолокационных кадров в ПРС малогабаритных БРЛС реализует повышение оперативности за счет обеспечения мониторинга земной поверхности в передних зонах обзора БРЛС по курсу движения их носителей, объединенных в группу принятия комплексных решений.

Реализация пространственно-распределенного режима наблюдения и методики формирования РЛК с высоким разрешением в передних зонах обзора каждой БРЛС позволит осуществить обнаружение, селекцию и определение координат ФНО, а также параметров их движения параллельно процессу формирования РЛК. Такой подход также способствует повышению оперативности всей системы в целом в случаях, когда требуется решать не одну, а две задачи: формирования РЛК и определения на нем ФНО. Повышение скорости обработки данных достигается за счет возможности в ПРС выполнять эти задачи не последовательно друг за другом, а параллельно в процессе формирования каждого РЛК.

Кроме того, формирование непрерывного потока РЛК высокого разрешения с частотой, близкой к видеочастоте, позволит объединять данный поток с аналогичным потоком радиолокационных снимков, сформированном на соседней БРЛС, в единый поток для более эффективного решения задач классификации и распознавания территорий и наземных объектов на них [23,26], а также модифицировать известные и разработать новые интеллектуальные методики и алгоритмы, основанные на методах технического зрения, межкадровой обработки видеоданных, семантической сегментации кадров с учетом специфики работы БРЛС в ПРС, что позволит значительно повысить информативность, полноту и достоверность отображаемой радиолокационной обстановки.

В совокупности все вышесказанное обеспечит повышение оперативности и высокоточное отображение динамически меняющейся во времени радиолокационной обстановки – результата комплексной обработки разноракурсных потоков РЛК в ПРС с учетом особенностей ее формирования. Это особенно актуально в условиях временных ограничений, когда требуется оперативно обнаружить экологические и техногенные катастрофы, представляющие особую опасность для жизнедеятельности людей и окружающей природы.

Заключение

Предложена методика формирования потока РЛК высокого разрешения в передних зонах обзора БРЛС, объединенных в группу для оперативного наблюдения картографируемых поверхностей. Обоснована целесообразность (в качестве альтернативы оптическим системам аэромониторинга, которые имеют ряд ограничений) перехода к исследованиям радиолокационных малогабаритных БРЛС, способных качественно их заменить при решении задач оперативного характера.

Проанализированы особенности и ограничения режимов формирования видеопотока радиолокационных кадров, применяемых в однопозиционных малогабаритных БРЛС. Выбран режим, способный обеспечить высокие показатели по частоте следования кадров в потоке и по разрешению самих кадров с невысокими требованиями к траектории полета носителя БРЛС.

Рассмотрены особенности реализации ПРС, целесообразность применения которых обосновывается фактором повышения оперативности этих систем за счет возможности осуществлять мониторинг земной поверхности в передних зонах обзора группой БРЛС по курсу движения их носителей.

На основе объединения выбранного и проанализированного режима, способного обеспечить высокие показатели формируемого потока РЛК в многопозиционном варианте исполнения, разработана новая методика формирования потока РЛК в ПРС, способная обеспечить требования по повышению оперативности и характеристик качества самого потока при проведении соответствующих поисково-спасательных операций.

Обсуждены векторы дальнейшего развития и направления исследования по развитию данной методики, способной качественно заменить оптические видеосистемы оперативного мониторинга, обеспечить высокую точность и полноту формируемых радиолокационных данных для решения широкого круга гражданских задач оперативного характера.

Список источников

1. Kim H.G., Park J.-S., Lee D.-H. Potential of Unmanned Aerial Sampling for Monitoring Insect Populations in Rice Fields // Florida Entomol. 2018. V. 101. P. 330–334.
2. Toro G.F., Tsourdos A. UAV sensors for environmental monitoring // Belgrade: MDPI. 2018.
3. Ненашев В.А., Сенцов А.А. Пространственно-распределенные системы радиолокационного и оптического мониторинга: монография. СПб: редакционно-издательский центр ГУАП. 2022.
4. Ненашев В.А., Сенцов А.А., Куломчев Г.В. Моделирование процесса формирования радиолокационного изображения высокого разрешения в бортовых РЛС // Вопросы радиоэлектроники. 2013. Т. 2. № 3. С. 48–56.
5. Nenashev V.A., Shepeta A.P., Kryachko A.F. Fusion radar and optical information in multiposition on-board location systems // 2020 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems, WECONF 2020. Saint-Petersburg. P. 9131451.
6. Nenashev V.A., Khanykov I.G. Formation of fused images of the land surface from radar and optical images in spatially distributed on-board operational monitoring systems // Journal of Imaging. 2021. V. 7. № 12. DOI 10.3390/jimaging7120251.
7. Ненашев В.А., Ханыков И.Г. Формирование комплексного изображения земной поверхности на основе кластеризации пикселей локационных снимков в многопозиционной бортовой системе // Информатика и автоматизация. 2021. Т. 20. № 2. С. 302–340.
8. Yang T., Zhang X., Xu Q., Zhang S., Wang T. An Embedded-GPU-Based Scheme for Real-Time Imaging Processing of Unmanned Aerial Vehicle Borne Video Synthetic Aperture Radar // Remote Sens. 2024, 16, 191. <https://doi.org/10.3390/rs16010191>.
9. Chen J., An D., Wang W., Chen L., Feng D., Zhou Z. A Novel Generation Method of High Quality Video Image for High Resolution Airborne ViSAR // Remote Sens. 2021, 13, 3706. <https://doi.org/10.3390/rs13183706>.
10. Ненашев В.А., Афанасьева В.И., Ненашев С.А. Особенности формирования потока радиолокационных кадров с частотой близкой к видеочастоте. Современные технологии в задачах управления, автоматики и обработки информации // Тезисы докладов XXXII Междунар. науч.-технич. конф. 2023. 14-20 сентября 2023 г. С. 131–132.
11. He Z., Li Z., Chen X., Yu A., Yi T., Dong Z. Detecting Moving Target on Ground Based on Its Shadow by Using VideoSAR // Remote Sens. 2021, 13, 3291. <https://doi.org/10.3390/rs13163291>.

12. Kim S., Yu J., Jeon S.-Y., Dewantari A., Ka M.-H. Signal Processing for a Multiple-Input, Multiple-Output (MIMO) Video Synthetic Aperture Radar (SAR) with Beat Frequency Division Frequency-Modulated Continuous Wave (FMCW) // *Remote Sens.* 2017, 9, 491. <https://doi.org/10.3390/rs9050491>.
13. Zhang Y., Zhu D., Mao X., Yu X., Zhang J., Li Y. Multitrotors Video Synthetic Aperture Radar: System Development and Signal Processing // *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine.* V. 35. № 12. P. 32–43. 1 Dec. 2020. Doi: 10.1109/MAES.2020.3000318.
14. He Z., Chen X., Yi T., He F., Dong Z., Zhang Y. Moving Target Shadow Analysis and Detection for ViSAR Imagery // *Remote Sens.* 2021, 13, 3012. <https://doi.org/10.3390/rs13153012>.
15. Ding J., Wen L., Zhong C., Loffeld O. Video SAR Moving Target Indication Using Deep Neural Network // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2020, 58, 7194–7204.
16. Wen L., Ding J., Loffeld O. Video SAR Moving Target Detection Using Dual Faster R-CNN // *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.* 2021, 14, 2984–2994.
17. Yang X., Shi J., Zhou Y., Wang C., Hu Y., Zhang X., Wei S. Ground Moving Target Tracking and Refocusing Using Shadow in Video-SAR // *Remote Sens.* 2020, 12, 3083.
18. Guo P., Wu F., Tang S., Jiang C., Liu C. Implementation Method of Automotive Video SAR (ViSAR) Based on Sub-Aperture Spectrum Fusion // *Remote Sens.* 2023, 15, 476.
19. Kim C.K., Azim M.T., Singh A.K., Park S.O. Doppler Shifting Technique for Generating Multi-Frames of Video SAR via Sub-Aperture Signal Processing // *IEEE Trans. Signal Process.* 2020, 68, 3990–4001.
20. Yang C., Chen Z., Deng Y., Wang W., Wang P., Zhao F. Generation of Multiple Frames for High Resolution Video SAR Based on Time Frequency Sub-Aperture Technique // *Remote Sens.* 2023, 15, 264.
21. Cheng Y., Ding J., Sun Z. Processing of airborne video SAR data using the modified back projection algorithm // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2022, 60, 5238013.
22. Jiang J., Li Y., Yuan Y., Zhu Y. Generalized Persistent Polar Format Algorithm for Fast Imaging of Airborne Video SAR // *Remote Sens.* 2023, 15, 2807. <https://doi.org/10.3390/rs15112807>.
23. Ненашев В.А., Ненашев С.А. Классификация и распознавание наземных объектов в потоке радиолокационных кадров на основе нейросетевого подхода в передней зоне обзора бортовых РЛС многопозиционной системы // *Труды Междунар. конф. по компьютерной графике и зрению "Графикон".* 2023. № 33. С. 572–580. DOI 10.20948/graphicon-2023-572–580.
24. Васильев К.К., Гуторов А.С., Маслов А.А. и др. Корабельные многопозиционные РЛС. Методы обработки информации. Монография / Под ред. Э.Д. Павлыгина. М.: Радиотехника. 2019.
25. Патент № 2703996 С2 РФ, МПК G01S 13/90. Способ локации целей в передних зонах обзора бортовых радиолокационных станций двухпозиционной радиолокационной системы / Коржавин Г.А., Ненашев В.А., Шенета А.П., Подоплекин Ю.Ф., Давидчук А.Г. Заявл. 26.03.2019. Опубл. 23.10.2019.
26. Ненашев В.А., Ненашев С.А. Классификация и распознавание наземных объектов в потоке радиолокационных кадров на основе нейросетевого подхода // *Автоматизация в промышленности.* 2024. № 1. С. 29–33. DOI 10.25728/avtprom.2024.01.07.
27. Патент № 2760873 С1 РФ, МПК G01S 13/52, G01S 13/42. Устройство для определения параметров движения наземных объектов в двухпозиционной системе бортовых малогабаритных РЛС / Ненашев В.А., Григорьев Е.К., Шенета А.П., Подоплекин Ю.Ф. Заявл. 09.03.2021. Опубл. 01.12.2021.

Информация об авторах

Вадим Александрович Ненашев – к.т.н., доцент, зав. лабораторией
SPIN-код: 6728-6108. AuthorID: 745612.

Александр Роальдович Бестугин – д.т.н., профессор, директор
SPIN-код: 1584-4019. AuthorID: 33418.

Ирина Анатольевна Киришина – к.э.н., доцент
SPIN-код: 1904-9672. AuthorID: 682156.

Евгений Александрович Антохин – к.т.н., доцент
SPIN-код: 4685-8452. AuthorID: 1191508.

Поступила в редакцию 08.02.2024

Одобрена после рецензирования 20.02.2024

Принята к публикации 28.02.2024

Original article

Formation of radar frame flow in a spatially distributed system of small-size airborne radar systems

V.A. Nenashev¹, A.R. Bestugin², I.A. Kirshina³, E.A. Antokhin⁴¹⁻⁴ Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation (St. Petersburg, Russia)¹ nenashev.va@yandex.ru, ² fresguap@mail.ru, ³ ikirshina@mail.ru, ⁴ fresguap@mail.ru

Abstract

Spatially distributed radar systems are increasingly used in the survey of the Earth's surface to provide real-time operational search and automatic recognition of physical ground objects. Each small-size radar station of the spatially distributed system should provide high resolution of the formed radar frame for the front viewing areas of small-size airborne radars. This resolution should be comparable to the resolution of optical frames registered in optical localisation video vision systems. At the same time, such vision systems should be able to operate in difficult weather and seasonal conditions of limited visibility.

The purpose is to develop a methodology for the formation of a stream of radar frames with a high frequency of their succession for the operational display of the radar situation in the forward viewing areas of airborne radars, combined in a group and operating in real-time modes.

Development and research of this methodology will allow to display on the operator's screen a stream of radar frames of high resolution and with high frequency of their succession, to which new and modified algorithms of territory classification and recognition of physical ground objects can be applied. This result will increase the informativeness, completeness and reliability of the displayed radar situation, as well as - reduce the time to search for physical ground objects, increase the reliability of their recognition in automatic mode of observation by a group of small-sized airborne radars.

The new technique, which provides prompt and highly accurate monitoring of the Earth's surface, is designed for emergency search of physical ground objects, in particular, people who have got into the zone of emergency situations as a result of natural and man-made disasters. The implementation of this technique will make it possible to carry out a timely search in a number of emergency situations that pose a special danger to human life, to find them promptly and thereby save many lives and health of people.

Keywords

Small-size on-board radar station, radar frame stream, high resolution, frame rate, radar synthesis of antenna aperture, subaperture

For citation

Nenashev V.A., Bestugin A.R., Kirshina I.A., Antokhin E.A. Formation of radar frame flow in a spatially distributed system of small-size airborne radar systems. *Achievements of modern radioelectronics*. 2024. V. 78. № 3. P. 59–69. DOI: <https://doi.org/10.18127/j20700784-202403-07> [in Russian]

REFERENCES

- Kim H.G., Park J.-S., Lee D.-H. Potential of Unmanned Aerial Sampling for Monitoring Insect Populations in Rice Fields. *Florida Entomol.* 2018. V. 101. P. 330–334.
- Toro G.F., Tsourdos A. UAV sensors for environmental monitoring. Belgrade: MDPI. 2018.
- Nenashev V.A., Sentsov A.A. Prostranstvenno-raspredelennye sistemy radiolokatsionnogo i opticheskogo monitoringa: monografiya. SPb: redaktsionno-izdatel'skiy tsentr GUAP. 2022. [in Russian]
- Nenashev V.A., Sentsov A.A., Kuyumchev G.V. Modelirovanie protsessa formirovaniya radiolokatsionnogo izobrazheniya vysokogo razresheniya v bortovykh RLS. *Voprosy radioelektroniki*. 2013. T. 2. № 3. S. 48–56. [in Russian]
- Nenashev V.A., Shepeta A.P., Kryachko A.F. Fusion radar and optical information in multiposition on-board location systems. 2020 *Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems, WECONF 2020*. SPb. P. 9131451.
- Nenashev V.A., Khanykov I.G. Formation of fused images of the land surface from radar and optical images in spatially distributed on-board operational monitoring systems. *Journal of Imaging*. 2021. V. 7. № 12. DOI 10.3390/jimaging7120251.
- Nenashev V.A., Khanykov I.G. Formirovanie kompleksnogo izobrazheniya zemnoy poverkhnosti na osnove klasterizatsii pikselnykh lokatsionnykh snimkov v mnogopozitsionnoy bortovoy sisteme. *Informatika i avtomatizatsiya*. 2021. T. 20. № 2. S. 302–340. [in Russian]
- Yang T., Zhang X., Xu Q., Zhang S., Wang T. An Embedded-GPU-Based Scheme for Real-Time Imaging Processing of Unmanned Aerial Vehicle Borne Video Synthetic Aperture Radar. *Remote Sens.* 2024, 16, 191. <https://doi.org/10.3390/rs16010191>.
- Chen J., An D., Wang W., Chen L., Feng D., Zhou Z. A Novel Generation Method of High Quality Video Image for High Resolution Airborne ViSAR. *Remote Sens.* 2021, 13, 3706. <https://doi.org/10.3390/rs13183706>.
- Nenashev V.A., Afanas'eva V.I., Nenashev S.A. Osobennosti formirovaniya potoka radiolokatsionnykh kadrov s chastotoy blizkoy k videochastote. *Sovremennye tekhnologii v zadachakh upravleniya, avtomatiki i obrabotki informatsii. Tezisy dokladov XXXII Mezhdunar. nauch.-tekhnich. konf.* 2023. 14-20 sentyabrya 2023 g. S. 131–132. [in Russian]
- He Z., Li Z., Chen X., Yu A., Yi T., Dong Z. Detecting Moving Target on Ground Based on Its Shadow by Using VideoSAR. *Remote Sens.* 2021, 13, 3291. <https://doi.org/10.3390/rs13163291>.
- Kim S., Yu J., Jeon S.-Y., Dewantari A., Ka M.-H. Signal Processing for a Multiple-Input, Multiple-Output (MIMO) Video Synthetic Aperture Radar (SAR) with Beat Frequency Division Frequency-Modulated Continuous Wave (FMCW). *Remote Sens.* 2017, 9, 491. <https://doi.org/10.3390/rs9050491>.
- Zhang Y., Zhu D., Mao X., Yu X., Zhang J., Li Y. Multitrotors Video Synthetic Aperture Radar: System Development and Signal Processing. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*. V. 35. № 12. P. 32–43. 1 Dec. 2020. Doi: 10.1109/MAES.2020.3000318.
- He Z., Chen X., Yi T., He F., Dong Z., Zhang Y. Moving Target Shadow Analysis and Detection for ViSAR Imagery. *Remote Sens.* 2021, 13, 3012. <https://doi.org/10.3390/rs13153012>.

15. Ding J., Wen L., Zhong C., Loffeld O. Video SAR Moving Target Indication Using Deep Neural Network. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2020, 58, 7194–7204.
16. Wen L., Ding J., Loffeld O. Video SAR Moving Target Detection Using Dual Faster R-CNN. IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens. 2021, 14, 2984–2994.
17. Yang X., Shi J., Zhou Y., Wang C., Hu Y., Zhang X., Wei S. Ground Moving Target Tracking and Refocusing Using Shadow in Video-SAR. Remote Sens. 2020, 12, 3083.
18. Guo P., Wu F., Tang S., Jiang C., Liu C. Implementation Method of Automotive Video SAR (VISAR) Based on Sub-Aperture Spectrum Fusion. Remote Sens. 2023, 15, 476.
19. Kim C.K., Azim M.T., Singh A.K., Park S.O. Doppler Shifting Technique for Generating Multi-Frames of Video SAR via Sub-Aperture Signal Processing. IEEE Trans. Signal Process. 2020, 68, 3990–4001.
20. Yang C., Chen Z., Deng Y., Wang W., Wang P., Zhao F. Generation of Multiple Frames for High Resolution Video SAR Based on Time Frequency Sub-Aperture Technique. Remote Sens. 2023, 15, 264.
21. Cheng Y., Ding J., Sun Z. Processing of airborne video SAR data using the modified back projection algorithm. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2022, 60, 5238013.
22. Jiang J., Li Y., Yuan Y., Zhu Y. Generalized Persistent Polar Format Algorithm for Fast Imaging of Airborne Video SAR. Remote Sens. 2023, 15, 2807. <https://doi.org/10.3390/rs15112807>.
23. Nenashev V.A., Nenashev S.A. Klassifikatsiya i raspoznavanie nazemnykh ob'ektov v potoke radiolokatsionnykh kadrov na osnove ney-rossetevogo podkhoda v peredney zone obzora bortovykh RLS mnogopozitsionnoy sistemy. Trudy Mezhdunar. konf. po komp'yuternoy grafike i zreniyu "Grafikon". 2023. № 33. S. 572–580. DOI 10.20948/graphicon-2023-572–580. [in Russian]
24. Vasil'ev K.K., Gutorov A.S., Maslov A.A. i dr. Korabel'nye mnogopozitsionnye RLS. Metody obrabotki informatsii. Monografiya. Pod red. E.D. Pavlygina. M.: Radiotekhnika. 2019. [in Russian]
25. Patent № 2703996 C2 RF, MPK G01S 13/90. Sposob lokatsii tseley v perednikh zonakh obzora bortovykh radiolokatsionnykh stantsiy dvukhpzitsionnoy radiolokatsionnoy sistemy. Korzhavin G.A., Nenashev V.A., Shepeta A.P., Podoplekin Yu.F., Davidchuk A.G. Zayavl. 26.03.2019. Opubl. 23.10.2019. [in Russian]
26. Nenashev V.A., Nenashev S.A. Klassifikatsiya i raspoznavanie nazemnykh ob'ektov v potoke radiolokatsionnykh kadrov na osnove ney-rossetevogo podkhoda. Avtomatizatsiya v promyshlennosti. 2024. № 1. S. 29–33. DOI 10.25728/avtprom.2024.01.07. [in Russian]
27. Patent № 2760873 C1 RF, MPK G01S 13/52, G01S 13/42. Ustroystvo dlya opredeleniya parametrov dvizheniya nazemnykh ob'ektov v dvukhpzitsionnoy sisteme bortovykh malogabaritnykh RLS. Nenashev V.A., Grigor'ev E.K., Shepeta A.P., Podoplekin Yu.F. Zayavl. 09.03.2021. Opubl. 01.12.2021. [in Russian]

Information about the authors

Vadim A. Nenashev – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Head of Laboratory

Aleksandr R. Bestugin – Dr.Sc. (Eng.), Professor, Director

Irina A. Kirshina – Ph.D. (Econ.), Associate Professor

Evgeniy A. Antokhin – Ph.D. (Eng.), Associate Professor

The article was submitted 08.02.2024

Approved after reviewing 20.02.2024

Accepted for publication 28.02.2024

ЖУРНАЛ «АНТЕННЫ»

Главный редактор: член-корреспондент РАН **Владимир Степанович Верба**

Международный научно-технический и теоретический журнал, публикует оригинальные и обзорные статьи по основным направлениям теории и техники антенн, фидерных устройств и электродинамики СВЧ. Основан А.А. Пистолькорсом.

Включен в Перечень ВАК

Издается с 1966 г.

ISSN 0320-9601

Периодичность – 6 номеров в год

«Пресса России» – индекс 83826

Научные специальности ВАК

1.3.4. Радиофизика

2.2.13. Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

2.2.14. Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций

2.2.16. Радиолокация и радионавигация

2.3.1 Системный анализ, управление и обработка информации

