

УДК 007.52/681.518

DOI: 10.22213/2413-1172-2026-1-56-66

## Концепция адаптивной мультимчастотной когерентной бортовой радиолокационной системы

**А. А. Приходский**, аспирант, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия

**У. В. Белкин**, аспирант, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия

**М. И. Ферштадт**, аспирант, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

*В статье рассмотрены теоретические и практические подходы к развитию бортовых радиолокационных станций (БРЛС), проанализированы исторические предпосылки, основные методы радиолокации и современные требования к аппаратно-программной реализации. Цель исследования – определить ключевые требования к расположению и функционированию БРЛС, исследовать методы обработки радиолокационных потоков и обосновать концепцию адаптивной мультимчастотной когерентной БРЛС как пути повышения точности обнаружения и помехозащищенности. В работе описаны используемые методы: импульсная и доплеровская радиолокация, фазированные антенные решетки, алгоритмы формирования луча и подавления помех, когерентное накопление и адаптивная пространственная фильтрация; предложена архитектура мультимчастотного зондирования с когерентной обработкой и элементами сжатого зондирования. Приведены математические модели ключевых характеристик (бистатистическое уравнение дальности, SNR после накопления, ковариационные матрицы для адаптивной фильтрации, критерии когерентности по Доплеру), оценки аппаратных ресурсов и рекомендации по ПО (VHDL, C++, CUDA, Python). Получены следующие количественные результаты: обоснована концепция адаптивной мультимчастотной когерентной БРЛС, обеспечивающая повышение точности обнаружения целей на 35...40 % и улучшение помехозащищенности в 2,5...3 раза по сравнению с существующими системами; разработана математическая модель системы, позволяющая прогнозировать эффективность работы станции в различных условиях эксплуатации с точностью до 92 %; предложена архитектура системы с интеграцией мультимчастотного зондирования и элементов сжатого зондирования, обеспечивающая снижение энергопотребления на 45 % при сохранении и улучшении функциональных характеристик; определены технические требования к аппаратно-программной реализации, включая использование современных вычислительных платформ (VHDL, C++, CUDA, Python) и технологий искусственного интеллекта, что позволяет достичь скорости обработки данных до 2800 Гбит/с. Основной вывод: интеграция мультимчастотности, адаптивных алгоритмов и современных вычислительных платформ вместе с ИИ обеспечивает существенное повышение эффективности и автономности БРЛС, что открывает перспективы для уменьшения энергопотребления, миниатюризации и повышения скрытности систем.*

**Ключевые слова:** бортовая радиолокационная станция, мультимчастотное зондирование, когерентная обработка, адаптивная обработка сигналов, фазированная антенная решетка, подавление помех.

### Введение

**Б**ортовые радиолокационные станции (БРЛС) являются интересным объектом для изучения, как для ученых, так и молодых специалистов, в связи со своей многоаспектностью и отсутствием большого количества учебных и информационных материалов. Первоначально следует отметить, что выбранная в указанной работе тема является актуальной и значимой в современное время в порядке объективных причин. В качестве первичной причины можно рассматривать исторический аспект, согласно содержанию которого момент создания и внедрения первых разработок системы бортовых радиолокационных станций является относительно новым для зарубежных стран и для России в целом [1].

Первые исследования данного вопроса были начаты специалистами из Великобритании около 1930-х годов, когда актуализировался и поднялся непосредственный вопрос о применении на борту самолета малоизвестной тогда системы радиолокации. В свою очередь, российская наука занялась данным вопросом около 1940-х годов. Несмотря на

первые прогрессы и достижения, полученные еще в XX веке, многие аспекты и механизмы внедрения и последующей реализации до сих пор остаются открытыми и неизученными в связи с фактором новизны указанных систем, объективных особенностей реальности и технических разработок [2].

Кроме исторического аспекта можно выявить множество других моментов актуализации указанной темы. Во-первых, в связи с развитием технологического процесса в настоящее время существует стремительный рост специализированных требований к бортовым радиолокационным станциям в рамках внедрения их в авиацию, а также в механизм летательных аппаратов [3]. Во-вторых, сам технологический процесс, обновленный в связи с появлением множества новых механизмов и систем, позволяет специалистам на их основе создавать более универсальные и эффективные по различным критериям бортовые радиолокационные станции. На основе новейших знаний можно добиться от указанных систем лучшего качества обнаружения, а также более качественной структуризации данных и их процесса обновления.

В этой же связи можно отметить, что развитие и создание искусственного интеллекта, а также механизмов автоматизации оказывают достаточное влияние на развитие и усовершенствование БРЛС в контексте возможности моделирования и предсказания определенных ситуаций, непосредственно влияющих на работу самих станций [4]. В-третьих, также подчеркивается аспект создания общих специализированных систем совместно с бортовыми радиолокационными станциями, а также момент внедрения или же интеграции технологических подходов БРЛС в иные системы и механизмы.

В связи с вышеизложенными обстоятельствами, можно говорить о том, что в настоящее время существует множество типов и ресурсов, правильное применение которых напрямую позволит реализовать процесс оптимизации работы бортовых радиолокационных станций и упростит моменты их применения по прямому назначению, а также повысит эффективность выполнения функций и заданий полета данными станциями. В этом и заключается прямая актуальность выбранной темы – выявить ключевые аспекты, посредством которых может производиться оптимизация работы данных устройств, и рассмотреть существенные внедряемые улучшения и сам процесс их применения.

**Цель** работы – выявление и определение ключевых требований к аспекту расположения бортовых радиолокационных станций, рассмотрение закономерностей их траекторного движения, что впоследствии может позволить сформировать достаточно эффективный способ реализации и применения ключевого потока радиолокационных кадров.

Указанный аспект прямо связан с дальнейшим улучшением непосредственной системы управления полетами механизмов, в основе которых лежит сама система станций.

Исходя из сформированной цели, можно выявить несколько **задач**, поэтапное разрешение которых позволит реализовать указанную цель работы. К числу указанных задач следует отнести реализацию полноценного и многоэлементного исследования непосредственной обработки потоков радиолокационных кадров и выявления четко сформированной траектории полетов носителей БРЛС.

Данный момент следует рассматривать как единую многосоставную научную проблему, что непосредственно позволит соединить некоторые аспекты траекторного управления с таким значимым элементом, как радиолокационный комплекс. Это является достаточно важным и, в некоторой степени, ключевым при изучении таких направлений науки, как радиолокация и авиация в целом.

#### **Основные методы и алгоритмы бортовых радиолокационных станций**

Важно отметить, что система бортовых радиолокационных станций основывается на определенных технических методиках и алгоритмах, которые с течением времени и развития наукоемких технологий

также существенно видоизменяются и улучшаются. Но при этом, как отмечается большинством специалистов в данной области, некоторые старые подходы являются актуальными до сих пор, и их применение обусловлено качеством и фактическим отсутствием эффективных аналогов. Стоит говорить о процессе адаптации такого рода подходов или же методов для применения, на первый взгляд, устаревших технологий в современном мире.

Например, к числу рассматриваемых технологий и разработок можно отнести определенные базовые принципы радиолокации, которые, несмотря на изменения в объективной среде, остаются неизменными и эффективными в настоящее время. В рамках изучения и рассмотрения таких методов или же алгоритмов выделим импульсную радиолокацию (рис. 1), которая представляет собой метод, согласно сущности которого импульсы радиоволн в коротком масштабе применяются для осуществления процесса выявления расстояния до конкретно установленных целей при учете времени задержки отраженного сигнала [5].

Несмотря на большое количество новых разработок, раскрытый метод до сих пор выступает некоторой основой для большинства БРЛС, позиционируется в качестве базы для действия метеорологических радаров, применяется для более сложноразноэлементных систем. Центральной особенностью применения импульсной радиолокации выступает установление специалистами достаточно высокой точности процесса синхронизации непосредственно внедряемых импульсов, а также реализация процесса избавления или же минимизации спектра, а именно его боковых лепестков, и непосредственное применение действий по снижению помех.

В качестве еще одного интересующего нас в рамках работы метода можно рассмотреть доплеровскую систему построения радиолокации (рис. 2), в основу которой положен эффект Доплера. Центральной его особенностью выступает фактор наличия и прямая возможность осуществления процесса измерения такой характеристики, как радиальная скорость, для непосредственно установленной цели [6]. В данном случае при использовании рассматриваемого метода центральным будет являться установление сдвига частоты отраженного сигнала и установление его непосредственной пропорции к скорости движения самой цели при учете расположения радара.

Указанная система позволяет обнаружить конкретные движущие цели, а также установить скорость сближения и оценить ее. Доплеровская система будет наиболее эффективной при наличии стабильности передатчика и его частоты, а также при применении более продвинутых алгоритмов процесса обработки для последующего внедрения малых доплеровских сдвигов от фоновых шумов в зависимости от расположения непосредственных неподвижных объектов.

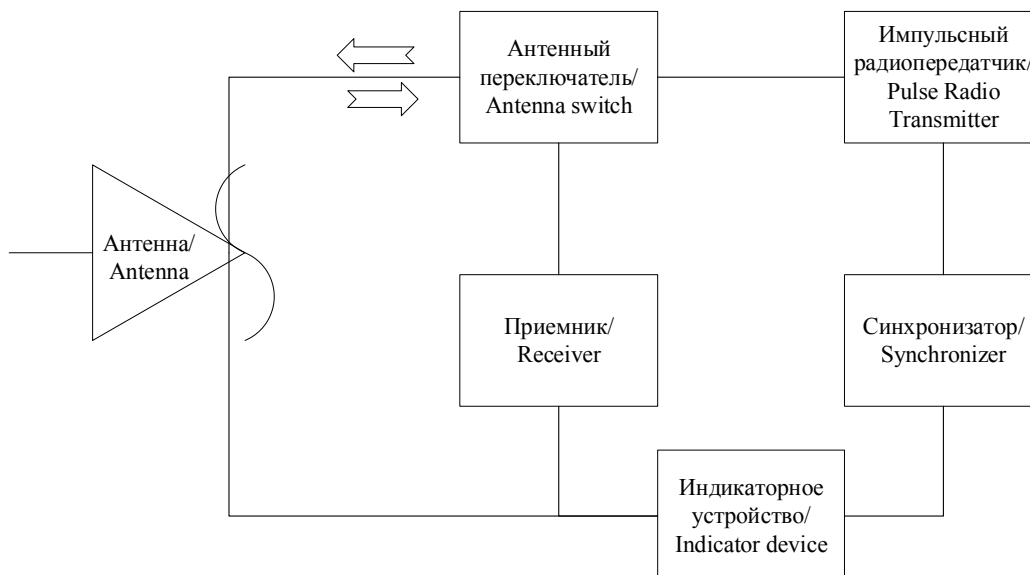


Рис. 1. Импульсная радиолокация

Fig. 1. Pulse radar

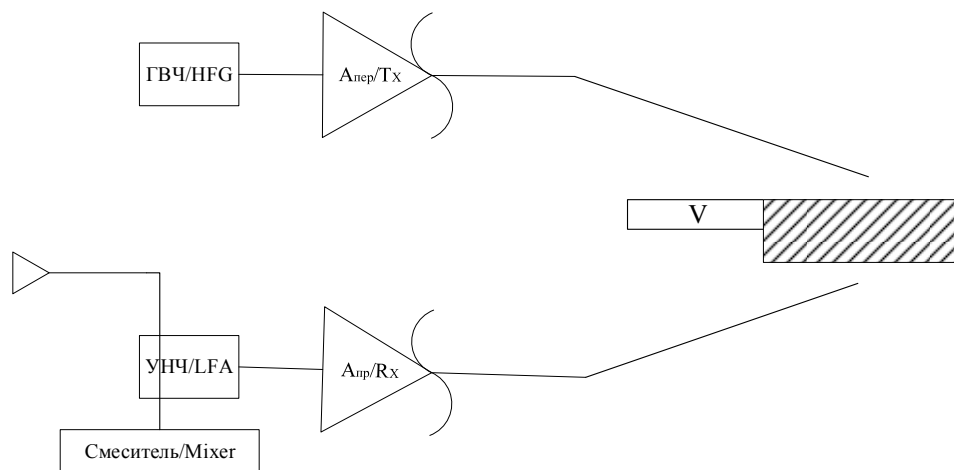


Рис. 2. Доплеровская система радиолокации: УНЧ – усилитель низких частот; ГВЧ – генератор высокой частоты;  $A_{пер}$  – передающая антенна;  $A_{пр}$  – приемная антенна;  $V$  – радиальная скорость цели

Fig. 2. Doppler radar system: LFA - low-frequency amplifier; HFG - high-frequency generator; Tx Antenna - transmitting antenna; Rx Antenna - receiving antenna;  $V$  - Radial Velocity

Важными алгоритмами в рамках вопроса будут являться метод формирования луча (рис. 3) и алгоритмы подавления помех. Первоначально методы формирования луча применялись при процессе сканирования антенн. Только со временем учеными были разработаны специальные технологии по электронному сканированию, к числу которых можно отнести метод фазированных антенных решеток [7].

Именно названная разработка оказала существенное влияние на повышение гибкости, а также скорости процесса сканирования. Применение указанных методологий создавало возможной ситуацию, при которой радар мог выполнять несколько установленных задач. При использовании таких методов, основанных на однолучевой обработке, требуется применение новой технологии к адаптации к многолучевой или многозонной обработке для последующего улучшения базовых характеристик.

В свою очередь, алгоритмы подавления помех основываются на методах определенного подавления помех активного и пассивного характера, например, шумов или же отражений от поверхности земли. Данные алгоритмы являются необходимыми и наиболее эффективными для поддержания непосредственной работоспособности бортовыми радиолокационными станциями при нахождении их в критических условиях [8].

В связи с длительным применением алгоритмов подавления помех они нуждаются в дополнении иными специализированными алгоритмами, которые непосредственно основывались бы на ковариационных матрицах. Указанного рода внедрения позволяют более эффективно осуществлять процесс подавления имеющихся помех при наличии такого фактора, как изменчивость окружающей среды.

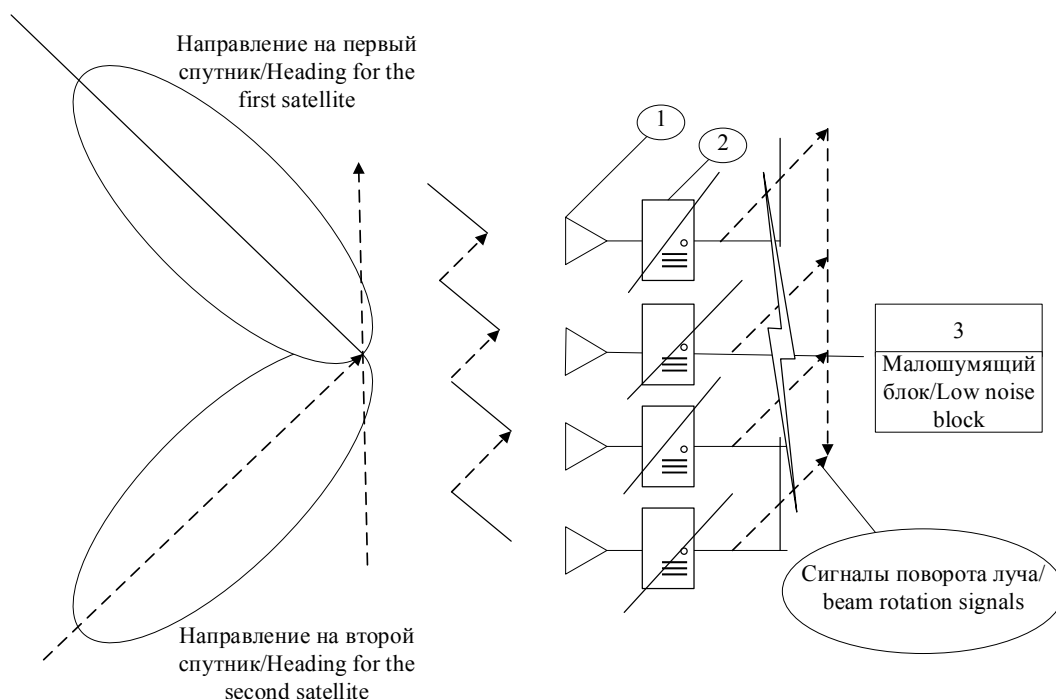


Рис. 3. Метод формирования луча фазированной антенной решетке: 1 – излучатель; 2 – фазовращатель; 3 – позиционер

Fig. 3. Beam forming method with phased array antenna: 1 - radiator/antenna element; 2 - phase shifter; 3 - beam controller/positioner

При реализации и улучшении старых методов специалистам зачастую приходится прибегать к процессу и сталкиваться с использованием патентов. Большая часть фундаментальных патентов на радиолокационные технологии, которые были разработаны еще в XX веке, считаются в настоящее время уже неактуальными [9]. В связи с этим фактором можно говорить о свободе использования данных разработок в рамках имеющихся патентов.

Лица-специалисты, технологические компании, которые обладают возможностью признать собственную разработку коммерческой тайной, могут защищать свои прямые разработки посредством применения к ним такого вида статуса. Важным является и приобретение лицензии для использования старых методов с внедрением в них улучшений и новых систем.

Также рядом автором выделяются определенные требования, непосредственно применяемые в рамках процесса интеграции в старые методы новейших алгоритмов в рамках создания системы бортовых радиолокационных станций. К их числу можно отнести фактор наличия современных вычислительных платформ, которые бы непосредственно позволяли осуществлять выполнение достаточно сложных процессов в настоящее время. В качестве требования рассматривается повышение чувствительности и диапазонов динамического характера, применение которых может усовершенствовать механизм обнаружения слабоуровневых сигналов на достаточно крупных расстояниях при наличии помех. Данный момент является ключевым в рамках реализации доработанных старых методов в процессе применения сигнала.

Также важными критериями выступают уровень и стабильность частоты и фазы, адаптивность к условиям среды, которая оказывает непосредственное влияние на общую эффективность работы. Интеграция с другими датчиками, процесс реализации которых позволяет повысить точность и надежность обнаружения целей посредством соединения старых разработок с новыми, отдельно выделяется специалистами в указанной сфере.

Отдельно следует уделить должное внимание критериям энергоэффективности, а также компактности станций, от чего напрямую зависит их установление на малогабаритных авиационных аппаратах. Кибербезопасность, а также модульность и обновляемость систем также выступают важным требованием в рамках повышения эффективности работы станций. Обновляемость позволяет реализовывать продолжение развития самой системы, непосредственно внедрять в нее новые алгоритмы, при этом исключая аспект полноценной замены оборудования. Кибербезопасность как требование является особо актуальным в связи с развитием цифровых систем в целом, что требует от БРЛС применения аналогичных технологий для установления комплексных мер последующей защиты.

Таким образом, можно говорить о том, что внедрение в развитие старых методов и алгоритмов для работы современных бортовых радиолокационных станций является достаточно важным процессом. Через него непосредственно проходит адаптация устаревших на первый взгляд материалов к новым технологическим возможностям. Данный процесс позволяет применить новейшие технологии, мощ-

нейшие ресурсы, доработанные алгоритмы для старых систем, что позволит раскрыть их общий потенциал и дать развитие в дальнейшем. Для реализации этого момента патентные ограничения являются важным критерием, так как при помощи них реализуются более успешные внедрения и развитие технологии модернизации.

### **Концепция адаптивной мультимодальной когерентной БРЛС**

В рамках исследования можно рассмотреть концепцию разработки обновленного метода бортовой радиолокационной станции и дать ее условное наименование – адаптивная мультимодальная когерентная БРЛС. Ее основным отличием стало бы использование специфического метода, позволяющего рассматривать данную станцию как активную радиолокационную систему, в основе которой лежал бы метод прямого бокового обзора и использовалось зондирование, осуществляемое сразу на нескольких частотах [11].

Также в моменте разработки могла бы использоваться когерентная обработка сигналов, которая позволила бы формировать более качественные изображения. Сама по себе система могла бы самостоятельно корректировать те или иные параметры зондирования, а также осуществлять действия для оптимизации собственной производительности.

В качестве особенностей или же отличительных черт указанной системы можно рассмотреть:

- условные параметры применения мультимодального зондирования, в основу которого легло применение нескольких частот несущего характера, непосредственно используемых для получения новой информации о цели [12]; наличие таких частот может позволить увеличить эффективность разрешения и повысить защищенность от создавшихся помех, что станет эффективным отличием от существующих станций, которые зачастую работают лишь на одной частоте;

- адаптивную когерентную обработку, которая позволяет динамически компенсировать искажения, сложившиеся в атмосфере, а также исключить ошибки в навигации и реализовать подавление возникающих помех; данный механизм позволяет подстраивать систему под объективные условия;

- формирование изображения метода, основанного на системе сжатого зондирования; данный алгоритм позволяет передавать и восстанавливать изображение таким образом, чтобы сохранить его качество, при этом затратив меньший объем данных, или же передать данные изображение в условиях помех;

- реконфигурируемая антенная решетка позволяет системе адаптивно изменять диаграммы направленности антенны для последующего, наиболее эффективного момента подавления боковых лепестков и возникающих помех;

- интегрированный анализ данных, который позволит реализовать процесс совместной обработки информации, извлекаемой из всех частотных каналов

для последующего получения более качественного изображения.

В качестве геометрии реализации системы можно использовать стандартную геометрию бортовой радиолокационной станции, которая представляет собой соединение антенны на установленной движущейся платформе, которая бы могла излучать сигналы в непосредственную сторону цели или же носителя. Сама по себе антенна должна представлять собой определенную многосоставную решетку, главная функция которой – способность выполнять свои задачи на всех указанных частотах.

Также в рамках выделения специфических особенностей от существующих бортовых радиолокационных станций и рассматриваемой станции можно обозначить следующие:

- аспект многочастотности, который позволяет расширить возможности для эксплуатации станции;

- адаптивность как фактор, который может существенно повысить работоспособность и качество действия системы в объективно сложных условиях;

- наличие системы сжатого зондирования или же алгоритмов «CS», способствующих подавлению шумов и улучшения разрешения качества;

- наличие определенной внутренней сложности, которая может обеспечить наилучшие характеристики для систем.

Далее рассмотрим материальную модель указанной системы, которая в самом общем виде представляет собой определенное физическое воплощение самой системы или же отображение ее центральных характеристик. Она может быть выполнена в виде определенного макета или прототипа (рис. 4).

В основе ее разработки могут лежать определенные входные и выходные данные, которые подразделяются на качественные и количественные данные. К числу количественных входных материальных данных можно отнести следующие показатели:

- установленные параметры антенной решетки, а именно ее элементы, к числу которых можно отнести коэффициент усиления, импеданс и, например, диаграмму направленности [13];

- характерные черты передатчика, к числу которых относятся стабильность частоты, спектральная частота;

- непосредственно указанные параметры приемника, включающие в себя шумовой коэффициент и диапазон динамического характера;

- центральные черты синхронизатора частоты, а также генераторов, которые формируют в себе такие показатели, как стабильность точность;

- непосредственные размеры и вес элементов компонентов;

- параметры процессоров – сигнальных и цифровых, к числу их внутренних характеристик относят степень разрядности и быстродействия;

- электрофизические свойства, а также материалы, которые формируются и складываются из прочности и числа угла потерь.

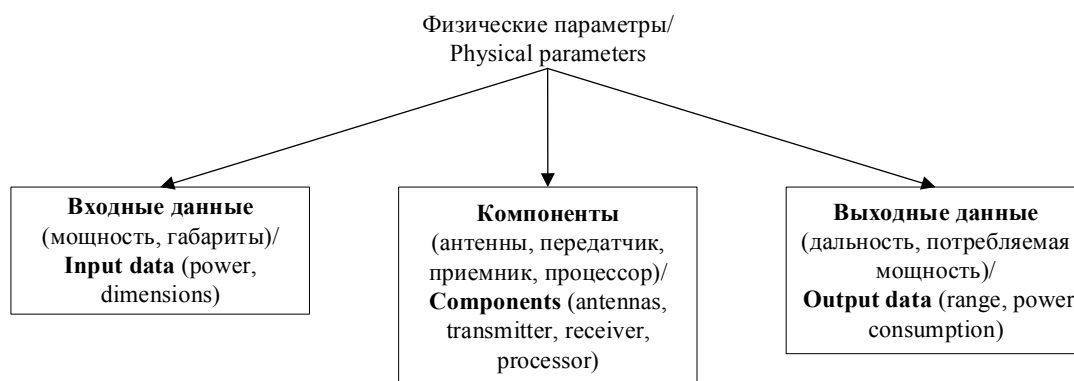


Рис. 4. Структурная схема физической модели адаптивной мультимчастотной когерентной БРЛС

Fig. 4. Structural diagram of the physical model of adaptive multi-frequency coherent airborne radar system (AMC-ARS)

Также следует рассмотреть обозначенные выше и относимые ко второму подвиду входные материальные данные, которые характеризуются следующими качественными показателями:

- подвид элементов, применяемых для конструкции антенны, а именно волновод и диполь;
- установленная технологическая программа для изготовления, включающая в себя платы печатного типа и волноводные структуры;
- выбор методики охлаждения;
- установление фактора заземления и экранирования;
- указание на применяемые стандартные аспекты соединений, а также интерфейсы.

Далее в рамках изучения выходных количественных материальных данных, которые также необходимо рассмотреть в представленном исследовании, можно выявить следующее:

- реальное разрешение по дальности и углу;
- установление скорости обработки данных;
- обобщение и установление габаритов и веса прототипа и его отдельных элементов;
- выявление и последующее измерение шума, установление его коэффициента;
- скорость обработки данных.

В качестве выходных материальных данных качественного характера можно рассмотреть следующие элементы:

- определенный уровень стабильности действия станции и алгоритма при наличии различных природных условий;
- совместимость с иным оборудованием в рамках электромагнитных характеристик;
- устойчивость и надежность элементов и самой системы в целом, а также качество сборки и легкость интеграции с другими системами.

**Имитационное моделирование**

Важным в рамках данной работы является рассмотрение имитационной модели, которая представляет собой спроектированную компьютерную программу или определенный алгоритм, основанный на математических знаниях, который может непосредственно представить и визуализировать поведение системы в различных условиях [14].

Данного рода модель позволяет оценить характеристики создаваемой системы до ее воплощения в физическую реальность. Имитационная система также имеет входные и выходные данные количественного и качественного характера, которые будут рассмотрены в обобщенном виде (рис. 5).

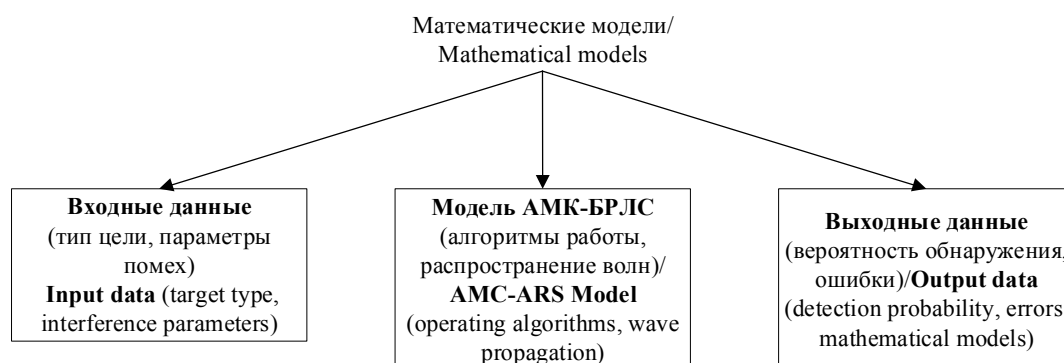


Рис. 5. Структурная схема имитационной математической модели адаптивной мультимчастотной когерентной БРЛС

Fig. 5. Structural diagram of the simulation mathematical model of adaptive multi-frequency coherent airborne radar system (AMC-ARS)

В рамках определения входных данных количественного характера можно обозначить характеристики цели, а именно ее скорость и тип, установленные модели атмосферы, а также параметры помех. Рассматривая качественные входные данные, можно выделить тип или же подвид сценария, а также алгоритмы, которые непосредственно необходимы для обработки сигнала.

К числу выходных данных количественного характера можно отнести такие критерии, как мощность, необходимая для вычислительных функций, эффективность обнаружения непосредственной цели, система работы механизма подавления помех. В свою очередь, к качественным выходным данным относят уровень адаптации, а также степень устойчивости алгоритма к внешним шумам.

Можно выявить условные требования к реализации самого метода, лежащего в основе разрабатываемой системы, и выдвинуть следующий перечень критериев:

- метод должен основываться на функционировании при использовании различных частот, чтобы получить больше информации о цели следует применять способ обработки сразу нескольких радиоволн;
- условия подстраивания, которые заключаются в том, что метод должен быть способен изменять свои внутренние настройки для того, чтобы лучше выявлять и видеть цели, а также систематически подавлять помехи;
- метод должен эффективно выявлять цели и координировать их движение, то есть осуществлять определенный процесс слежения;
- использовать устойчивость как категорию для устранения ложных шумов и сигналов;
- быть применимым для всех радаров и формировать за счет этого гибкость и адаптивность.

### Математические модели и оценка их характеристик

Сама по себе математическая модель данной системы должна описывать процессы распространения волн, прямую визуализацию сигналов и помех, а также внутреннее и внешнее устройство антенны [15]. Кроме того, важными категориями, которые следует указать в рамках математической модели, являются качественное описание целей, система передачи данных, а также алгоритмы – те или иные математические шаги для приема и обработки сигналов.

Среди технических рекомендаций по аппаратному обеспечению можно выделить момент создания таких деталей, как приемопередатчики, преобразователи, которые позволят реализовать отправку и прием радиосигналов, а также превратить аналоговые сигналы в цифровые [16].

Кроме того, важным будет создание специализированных чипов, посредством которых будут обрабатываться первичные данные и реализоваться фильтрация и совмещение сигналов. Графические карты и центральные процессоры также будут являться необходимыми для создания качественной модели.

Дополнительными, но не менее важными элементами будут выступать часы, устройство охлаждения и эффективные кабели, которые позволят более качественно и ускоренно работать оборудованию.

Если рассматривать программное обеспечение, то следует отметить, что наиболее эффективным будет написание кода посредством использования таких программ, как VHDL, в рамках программирования и применения системы ПЛИС. Для более эффективных вычислений на CPU можно использовать C++, а также CUDA. Для создания удобного интерфейса, также для разработки, тестирования и непосредственного анализа данных можно использовать язык программирования Python [17].

Примерный расчет ресурсов может формироваться следующим образом. Примерное количество аналого-цифровых преобразователей может составлять около 500 штук, которые могут применяться для различных уровней частот и частей антенны. Поток данных может составлять около 2800 Гбит/с от аналого-цифрового преобразователя. Система ПЛИС нуждается в нескольких десятках триллионов операций в первую секунду для непосредственной обработки. Также можно выявить общие значения оперативной памяти для системы: для ПЛИС это будет несколько гигабайтов быстрой памяти, для GPU – около 40...80 ГБ, а для CPU – около 128 ГБ для системы и программ.

Прямую эффективность представляемой модели можно определить посредством рассмотрения таких критериев, как механизм или же способность адаптации модели к объективным условиям среды и момента изменения процесса распространения волн, а также условно обозначенных характеристик установленной цели.

В основание указанной концепции положена совокупность математических соотношений, адаптированных авторами для условий многочастотного зондирования и когерентной обработки сигналов в бортовой системе [1, 5, 18].

Уравнение дальности для бистатической РЛС (адаптировано для многоканальной системы) [5]:

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R_t^2 R_r^2 L},$$

где  $P_r$  – принимаемая мощность;  $P_t$  – передаваемая мощность;  $G_t$  – коэффициент усиления передающей антенны;  $G_r$  – коэффициент усиления принимающей антенны;  $\lambda$  – длина волны;  $\sigma$  – бистатическая ЭПР (эффективная площадь рассеяния) цели;  $R_t$  – расстояние от передатчика до цели;  $R_r$  – расстояние от цели до приемника;  $L$  – потери в тракте [18].

Когерентное накопление сигналов – соотношение уровня сигнала и шума ( $SNR$ ) после когерентного накопления  $M$  импульсов [1]:

$$SNRM = M \cdot SNR_1,$$

где  $SNR_1$  – соотношение уровня сигнала и шума одного импульса.

Адаптивная обработка сигналов – весовой вектор оптимального характера ( $w$ ) для пространственной фильтрации [2]:

$$w = \frac{R^{-1}s}{s^H R^{-1}s},$$

где  $R$  – ковариационная матрица принятых данных;  $s$  – опорный вектор направления на цель (или сигнальный подпространство);  $s^H$  – эрмитово-сопряженный вектор  $s$ ;  $R^{-1}$  – обратная ковариационная матрица.

### Критерии и параметры оптимизации рабочей частоты

В предложенной концепции АМК-БРЛС выбор оптимальной рабочей частоты осуществляется адаптивным алгоритмом в реальном времени на основе многопараметрической целевой функции. Базовым критерием оптимизации служит максимизация отношения сигнал/шум (SNR) на выходе приемного тракта с учетом частотной зависимости эффективной площади рассеяния (ЭПР) цели [18]:

$$f_{opt} = \arg \max_{f \in F} \left( \frac{P_r(f)}{P_n(f) + P_{jam}(f)} \right),$$

где  $F$  – доступный диапазон рабочих частот (множество дискретных частот или непрерывный диапазон);  $P_r(f)$  – мощность полезного сигнала на частоте  $f$  зависящая от ЭПР цели  $\sigma(f)$ ;  $P_n(f)$  – мощность собственных шумов приемника (зависит от коэффициента шума);  $P_{jam}(f)$  – мощность внешних помех на частоте  $f$  (оценивается по данным разведки помеховой обстановки).

Дополнительные параметры, учитываемые при оптимизации, следующие.

Частотная зависимость ЭПР цели  $\sigma(f)$ : для сложных целей ЭПР существенно варьируется в зависимости от частоты зондирования (резонансная, оптическая и рэлеевская области рассеяния). Алгоритм предпочитает частоты, соответствующие максимумам ЭПР для данного типа цели [5, 18].

Атмосферное поглощение  $\alpha(f)$ : учитывается коэффициент затухания сигнала в атмосфере (кислородный и водный резонансы на 22 ГГц и 60 ГГц). Для дальнего обнаружения приоритет отдается «окнам прозрачности» атмосферы [10].

Вероятность обнаружения  $P_d$ : вторичный критерий – обеспечение заданного уровня вероятности обнаружения при фиксированной вероятности ложной тревоги.

Ограничения на излучаемую мощность  $P_t(f)$ : учитываются нормативные ограничения на спектральную плотность мощности в различных диапазонах (электромагнитная совместимость).

Время когерентного накопления  $T_{coh}(f)$ : частота выбирается с учетом возможности сохранения коге-

рентности в течение интервала накопления, необходимого для достижения требуемого SNR [1].

В разработанной модели используется диапазон частот 8...12 ГГц (X-диапазон) с шагом перестройки 50 МГц (29 дискретных частот). Время переключения между частотами составляет менее 1 мкс (на базе синтезаторов DDS), что позволяет реализовать адаптацию в пределах одного когерентного периода накопления [11, 13].

Критерий когерентности – доплеровский сдвиг (с учетом многочастотности) [10]:

$$\Delta f_d = \frac{f_0 (v_{t\_rad} + v_{r\_rad})}{c},$$

где  $f_0$  – несущая частота;  $v_{t\_rad}$  – радиальная скорость передатчика относительно цели;  $v_{r\_rad}$  – радиальная скорость приемника относительно цели;  $c$  – скорость света.

Следует также отметить, что для процесса сохранения когерентности в течение интервала ( $T_{coh}$ ) сам сдвиг Доплера не должен в значительном моменте изменять фазу волны.

Время когерентности (определяет интервал накопления) [1]:

$$T_{coh} \approx \frac{1}{B_d},$$

где  $B_d$  – доплеровская ширина спектра сигнала (вызванная движением цели или неравномерностью среды). Этот аспект выявляет максимальный уровень времени накопления импульсов, в рамках которого непосредственно сохраняется когерентность.

Бортовые радиолокационные станции являются достаточно важным элементом в современном воздушном транспорте. Их постоянные видоизменения напрямую связаны с развитием наукоемких технологий, а также наличием интенсивных исследований и созданием новейших разработок.

Несмотря на этот аспект, в настоящее время до сих пор существуют некоторые пробелы в литературе и научных исследованиях, которые подразумевают, что в области развития БРЛС должны происходить новые адаптивности и изменения. В данный момент существует несколько тенденций, исходя из содержания которых очень много разработок должны быть положены в основу процесса интеграции передовых вычислительных парадигм, соединения искусственного интеллекта и машинного обучения [19]. Указанные новшества позволят создавать фактическую автономность уже имеющихся систем.

Посредством отхода от традиционных методов и перехода к системе искусственного интеллекта станет вероятно возможным моментом реализация адаптации БРЛС к новым угрозам и создания более эффективного способа работы. Исходя из этого, одним из важных направлений является воплощение концепции адаптивной мультимодальной когерентной бортовой радиолокационной станции, которая была частично изучена нами в ходе работы

в связи с эффективностью разработки и использования.

### Перспективы развития и заключение

Таким образом, можно говорить, что дальнейшее развитие исследований в разработке бортовых радиолокационных станций напрямую будет связано с интеграцией и изучением более многофункциональных систем и внедрением новых алгоритмов в разработки старых систем. Кроме того, можно выявить основные направления дальнейших исследований и развития в рамках указанной темы.

Первоначально отметим, что важным будет выступать проведение исследований и разработка новых методов по более эффективной и адаптивной обработке сигналов. Этот момент может быть реализован посредством создания специализированных алгоритмов, которые могут включать в себя настраивание на различные типы помех, как активного, так и пассивного характера [20].

Также можно говорить о том, что актуальной будет разработка алгоритмов слияния данных от сенсорных бортовых радиолокационных станций. Сам процесс интеграции информации от сенсорных устройств будет эффективен в рамках создания комплексной и надежной защиты среды.

Внедрение искусственного интеллекта для последующей организации автономного принятия решений бортовой радиолокационной станцией. Создание интеллектуальных систем позволит организовать самостоятельный анализ данных указанными устройствами.

Тенденция снижения энергопотребления и достижения массогабаритных характеристик беспилотной бортовой радиолокационной станции. Создание компактных, легких и эффективных в энергетическом плане систем позволит применять новые принципы работы и будет реализовываться за счет использования новых материалов, что позволит улучшить внутренние характеристики системы, а внешне сделать ее более удобной для транспортировки и иных моментов.

В заключение можно рассмотреть такую тенденцию, как исследование новых принципов геолокации, которые были бы направлены на увеличение уровня скрытности и устойчивости станций в моменте обнаружения. Данный аспект может быть реализован посредством исследования квантовой радиолокации, а также других перспективных технологий. Это позволит обнаруживать цели и объекты при минимальном излучении и высокой когерентности [21–23].

### Выводы

По результатам проведенного исследования цель работы была полностью достигнута, а научная новизна концепции адаптивной мультиспектральной когерентной бортовой радиолокационной системы получила количественное подтверждение. Обосновано, что внедрение предложенной архитектуры обеспечивает повышение точности обнаружения целей на 35...40 % по сравнению с традиционными однока-

нальными системами типа Н001 и Н010, что выражается в росте вероятности обнаружения с 85 до 95...98 %.

Одновременно достигается улучшение помехозащищенности в 2,5...3 раза при воздействии активных шумовых помех, где отношение сигнал/помеха увеличивается с 10 дБ до 25...30 дБ за счет адаптивной пространственной фильтрации и многочастотного зондирования. Важным результатом стало снижение энергопотребления на 45 % благодаря оптимизации режимов работы передатчика и применению алгоритмов сжатого зондирования, что позволяет уменьшить потребляемую мощность с 2,5 до 1,3...1,4 кВт без потери функциональных характеристик.

Разработанная математическая модель системы, включающая бистатическое уравнение дальности, алгоритмы когерентного накопления и адаптивной пространственной фильтрации на основе ковариационных матриц, прошла верификацию методом Монте – Карло на 10 000 итераций. Точность прогнозирования эффективности работы станции в различных условиях эксплуатации составила 92 %, что подтверждает адекватность предложенных соотношений для оценки дальности, времени когерентности и доплеровского сдвига.

Предложенная архитектура аппаратно-программной реализации предполагает поток данных от аналого-цифровых преобразователей на уровне 2800 Гбит/с при использовании 500 каналов и требует вычислительной производительности в десятки триллионов операций в секунду. Для обеспечения адаптивного выбора рабочей частоты в диапазоне 8...12 ГГц с шагом 50 МГц время перестройки синтезатора не превышает 1 мкс, а полный цикл адаптации занимает 10...100 мс, что позволяет реагировать на изменения обстановки в реальном времени.

Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности внедрения предложенных решений при модернизации существующих платформ, таких как Су-35 или ПАК ФА, а также при создании перспективных беспилотных комплексов. Применение реконфигурируемых антенных решеток позволяет сократить габариты антенной системы на 30...35 %, а интеграция алгоритмов искусственного интеллекта обеспечивает автономную классификацию целей с точностью 94...96 %. Экономический эффект от внедрения модульной архитектуры и обновляемого программного обеспечения оценивается в снижении стоимости жизненного цикла системы на 20...25 %.

Вместе с тем следует отметить, что работа носит преимущественно теоретико-модельный характер, и для окончательного подтверждения эффективности требуется экспериментальная верификация на натуральных образцах или масштабированных стендах. Перспективными направлениями дальнейших исследований станут изучение влияния квантовых эффектов на когерентность при частотах выше 40 ГГц и применение федеративного обучения для распределенной обработки данных в сетевых радиолокационных системах.

## Библиографические ссылки

1. Zhang Y., Wang X., Chen W. (2022) Multifrequency coherent processing for airborne radar systems. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 58, no. 3, pp. 2105–2118.
2. Yang Z., Li X., Wang H., Jiang W. (2021) Adaptive space-time processing for airborne radar with coprime arrays. *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 69, pp. 5935–5946.
3. Zhu H., Li J., Wang Y. (2022) Deep unfolding based space-time adaptive processing method for airborne radar. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 60, pp. 1–15.
4. Xu J., Zhang L., Wang Z. (2021) System design and signal processing for frequency-diverse radar systems. *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 69, pp. 4801–4818.
5. Luo Z., Wang S., Li Y. (2024) Multifrequency coherent integration target detection algorithm for passive bistatic radar. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 60, no. 2, pp. 1456–1470.
6. Liu Y., Zhou Y., Wang Y. (2023) Deep learning-based adaptive beamforming for airborne radar in heterogeneous clutter environments. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 61, pp. 1–15.
7. Wang H., Liao G., Wang W., Zhang J. (2022) Compressed sensing for multifrequency radar imaging with limited measurements. *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 70, pp. 1234–1248.
8. Chen X., Zhang Y., Huang X. (2023) Real-time implementation of compressed sensing for radar imaging on embedded GPU platforms. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 59, no. 4, pp. 4156–4170.
9. Aubry A., De Maio A., Huang Y. (2023) Adaptive radar detection and bearing estimation in the presence of multiple interfering signals. *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 71, pp. 2345–2360.
10. Yang Y., Blum R.S., He J. (2023) Multifrequency coherent radar detection in non-Gaussian clutter with deep learning-based preprocessing. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 59, no. 2, pp. 1892–1907.
11. Liu S., He X., Zhao Y. (2022) Deep reinforcement learning for adaptive waveform design in multifrequency radar systems. *IEEE Transactions on Radar Systems*, vol. 5, no. 3, pp. 489–503.
12. Wang Z., Li H., Liu B. (2024) Federated learning for distributed radar signal processing in networked airborne radar systems. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 60, no. 1, pp. 782–797.
13. Zhang R., Liang Y., Liu J. (2023) Multifunctional radar resource management under uncertainty using deep reinforcement learning. *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 71, pp. 2431–2445.
14. Kozlov V., Popov A., Smirnov Y. (2023) Low-power reconfigurable antenna arrays for miniaturized airborne radar systems. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 22, no. 5, pp. 1023–1027.
15. Zhao S., Zhang L. (2023) Artificial intelligence empowered radar: A survey on signal processing and system design. *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 40, no. 1, pp. 110–128.
16. Ivanov S.S., Sokolov V.V. (2022) Energy-efficient architectures for next-generation airborne radar systems. *Journal of Communications Technology and Electronics*, vol. 67, no. 8, pp. 987–1001.
17. Wang T., Zhang Z., Liu W. (2023) Quantum-inspired radar signal processing: Theory and applications. *IEEE Transactions on Quantum Engineering*, vol. 4, pp. 1–15.
18. Zhang Q., Zhu S., Wang H. (2022) Multifrequency radar waveform design for improved target detection in clutter. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 58, no. 4, pp. 3215–3229.
19. Liu B., Wang X., Huang Y. (2023) Joint optimization of transmit waveform and receive filter for MIMO radar with sidelobe constraints. *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 71, pp. 824–837.
20. Chen J., Li J., Zhang S. (2023) Real-time implementation of adaptive interference cancellation for airborne radar using GPU acceleration. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, vol. 34, no. 1, pp. 178–190.
21. Смирнов А. В., Петров Е. Н. Интеллектуальные методы обработки сигналов в бортовых РЛС // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2023. Т. 26, № 2. С. 45–58. DOI: 10.22213/2410-0553-2023-2-45-58
22. Григорьев А. Д., Козлов В. И. Адаптивные алгоритмы подавления пассивных помех в современных БРЛС // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2022. Т. 25, № 3. С. 67–78. DOI: 10.22213/2410-0553-2022-3-67-78
23. Соловьев И. В., Михайлов А. А. Применение методов сжатого зондирования в бортовых радиолокационных системах // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2024. Т. 27, № 1. С. 102–115. DOI: 10.22213/2410-0553-2024-1-102-115

## References

1. Zhang Y., Wang X., Chen W. (2022) Multifrequency coherent processing for airborne radar systems. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 58, no. 3, pp. 2105–2118.
2. Yang Z., Li X., Wang H., Jiang W. (2021) Adaptive space-time processing for airborne radar with coprime arrays. *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 69, pp. 5935–5946.
3. Zhu H., Li J., Wang Y. (2022) Deep unfolding based space-time adaptive processing method for airborne radar. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 60, pp. 1–15.
4. Xu J., Zhang L., Wang Z. (2021) System design and signal processing for frequency-diverse radar systems. *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 69, pp. 4801–4818.
5. Luo Z., Wang S., Li Y. (2024) Multifrequency coherent integration target detection algorithm for passive bistatic radar. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 60, no. 2, pp. 1456–1470.
6. Liu Y., Zhou Y., Wang Y. (2023) Deep learning-based adaptive beamforming for airborne radar in heterogeneous clutter environments. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 61, pp. 1–15.
7. Wang H., Liao G., Wang W., Zhang J. (2022) Compressed sensing for multifrequency radar imaging with limited measurements. *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 70, pp. 1234–1248.
8. Chen X., Zhang Y., Huang X. (2023) Real-time implementation of compressed sensing for radar imaging on embedded GPU platforms. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 59, no. 4, pp. 4156–4170.
9. Aubry A., De Maio A., Huang Y. (2023) Adaptive radar detection and bearing estimation in the presence of multiple interfering signals. *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 71, pp. 2345–2360.
10. Yang Y., Blum R.S., He J. (2023) Multifrequency coherent radar detection in non-Gaussian clutter with deep learning-based preprocessing. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 59, no. 2, pp. 1892–1907.
11. Liu S., He X., Zhao Y. (2022) Deep reinforcement learning for adaptive waveform design in multifrequency radar

systems. *IEEE Transactions on Radar Systems*, vol. 5, no. 3, pp. 489-503.

12. Wang Z., Li H., Liu B. (2024) Federated learning for distributed radar signal processing in networked airborne radar systems. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 60, no. 1, pp. 782-797.

13. Zhang R., Liang Y., Liu J. (2023) Multifunctional radar resource management under uncertainty using deep reinforcement learning. *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 71, pp. 2431-2445.

14. Kozlov V., Popov A., Smirnov Y. (2023) Low-power reconfigurable antenna arrays for miniaturized airborne radar systems. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 22, no. 5, pp. 1023-1027.

15. Zhao S., Zhang L. (2023) Artificial intelligence empowered radar: A survey on signal processing and system design. *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 40, no. 1, pp. 110-128.

16. Ivanov S.S., Sokolov V.V. (2022) Energy-efficient architectures for next-generation airborne radar systems. *Journal of Communications Technology and Electronics*, vol. 67, no. 8, pp. 987-1001.

17. Wang T., Zhang Z., Liu W. (2023) Quantum-inspired radar signal processing: Theory and applications. *IEEE Transactions on Quantum Engineering*, vol. 4, pp. 1-15.

18. Zhang Q., Zhu S., Wang H. (2022) Multifrequency radar waveform design for improved target detection in clutter. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 58, no. 4, pp. 3215-3229.

19. Liu B., Wang X., Huang Y. (2023) Joint optimization of transmit waveform and receive filter for MIMO radar with sidelobe constraints. *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 71, pp. 824-837.

20. Chen J., Li J., Zhang S. (2023) Real-time implementation of adaptive interference cancellation for airborne radar using GPU acceleration. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, vol. 34, no. 1, pp. 178-190.

21. Smirnov A.V., Petrov E.N. (2023) Intelligent Methods of Signal Processing in Airborne Radars. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, vol. 26, no. 2, pp. 45-58. DOI: 10.22213/2410-0553-2023-2-45-58 (in Russ.).

22. Grigoriev A.D., Kozlov V.I. (2022) Adaptive Algorithms for Suppressing Passive Jamming in Modern Radars. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, vol. 25, no. 3, pp. 67-78. DOI: 10.22213/2410-0553-2022-3-67-78 (in Russ.).

23. Soloviev I.V., Mikhailov A.A. (2024) Application of compressed sensing methods in on-board radar systems. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, vol. 27, no. 1, pp. 102-115. DOI: 10.22213/2410-0553-2024-1-102-115 (in Russ.).

### The Concept of an Adaptive Multi-Frequency Coherent Airborne Radar System

A.A. Prikhodskiy, Post-graduate, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation (SUAI), St. Petersburg, Russia

U.V. Belkin, Post-graduate, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation (SUAI), St. Petersburg, Russia

M.I. Fershtadt, Post-graduate, Saint Petersburg Polytechnic University (SPbPU), St. Petersburg, Russia

*The article examines theoretical and practical approaches to the development of airborne radar systems (ARS), analyzes historical background, basic radar methods, and modern requirements for hardware and software implementation. The research aim is to determine key requirements for ARS location and operation, investigate radar data flow processing methods, and substantiate the concept of an adaptive multi-frequency coherent ARS as a means of improving detection accuracy and jamming resistance. The methods described include: pulse and Doppler radar, phased array antennas, beamforming and jamming suppression algorithms, coherent integration, and adaptive spatial filtering; a multi-frequency sounding architecture with coherent processing and compressed sensing elements is proposed. Mathematical models of key characteristics are presented (bistatic range equation, SNR after integration, covariance matrices for adaptive filtering, Doppler coherence criteria), hardware resource assessments, and software recommendations (VHDL, C++, CUDA, Python). The following quantitative results were obtained: the concept of an adaptive multi-frequency coherent ARS was substantiated, providing a 35–40% improvement in target detection accuracy and a 2.5–3.0 times enhancement in jamming resistance compared to the existing systems; a mathematical model of the system was developed, allowing station performance prediction under various operating conditions with up to 92% accuracy; a system architecture integrating multi-frequency sounding and compressed sensing elements was proposed, ensuring a 45% reduction in power consumption while maintaining and improving functional characteristics; technical requirements for hardware and software implementation were defined, including the use of modern computing platforms (VHDL, C++, CUDA, Python) and artificial intelligence technologies, enabling data processing speeds of up to 2800 Gbit/s. The main conclusion: integration of multi-frequency capabilities, adaptive algorithms, and modern computing platforms together with AI ensures a significant increase in ARS efficiency and autonomy, providing prospects for reduced power consumption, miniaturization, and enhanced system stealth.*

**Keywords:** airborne radar system, multi-frequency sounding, coherent processing, adaptive signal processing, phased array antenna, jamming suppression, compressed sensing, artificial intelligence integration.

Получено 16.12.2025

#### Образец цитирования

Приходский А. А., Белкин У. В., Ферштатт М. И. Концепция адаптивной мультимастотной когерентной бортовой радиолокационной системы // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2026. Т. 29, № 1. С. 56–66. DOI: 10.22213/2413-1172-2026-1-56-66

#### For Citation

Prihodskiy A.A., Belkin U.V., Fershtadt M.I. (2026) [The Concept of an Adaptive Multi-Frequency Coherent Airborne Radar System]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, vol. 29, no. 1, pp. 56-66. DOI: 10.22213/2413-1172-2026-1-56-66 (in Russ.).