

РАДИОТЕХНИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И СВЯЗЬ

Научная статья

УДК 621.396.96

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=186308>

EDN: <https://www.elibrary.ru/PIHNQY>

**ФОРМИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЛИКА КОМПЛЕКСИРОВАННОГО
КОРАБЕЛЬНОГО АНТЕННОГО УСТРОЙСТВА**

Николай Викторович Самбуров✉

Научно-производственное предприятие «Калужский приборостроительный завод
«Тайфун», Калуга, Российская Федерация

✉ samburov.n.v@yandex.ru

Аннотация. В статье проводится формирование и обоснование технического облика корабельного комплексированного антенного устройства. Рассматривается сложившаяся практика и особенности расположения антенных устройств (АУ) на современных кораблях. Процессу формирования предшествует решение ряда аналитических задач по исследованию требований к корабельным АУ. Данные требования условно разделены на: нефункциональные (связанные в первую очередь с морскими и корабельными особенностями эксплуатации) и функциональные (связанные непосредственно с выполнением функции антенны в составе радиотехнических станций). Далее на основе данных исследований сформирован

частный облик корабельного АУ. Приводится пример комплексированного корабельного антенного устройства дециметрового диапазона на базе АФАР.

Ключевые слова: комплексированная антенна, многофункциональная антенна, корабельная антенна, радиотехнический комплекс, многофункциональный комплекс.

Для цитирования: Самбуров В.Н. Формирование технического облика комплексированного корабельного антенного устройства // Труды МАИ. 2025. № 144. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=186308>

RADIO ENGINEERING, COMPUTER ENGINEERING, INSTRUMENTATION AND COMMUNICATIONS

Original article

FORMATION OF THE TECHNICAL APPEARANCE OF A COMPLEX SHIP ANTENNA DEVICE

Nikolay V. Samburov✉

Research and Production Enterprise «Kaluga-based Instrument-Making Plant
«TYPHOON» Joint-Stock Company, Kaluga, Russian Federation

✉ samburov.n.v@yandex.ru

Abstract. The article describes the development and justification of the technical design of a shipborne integrated antenna device. It examines current practices and features of antenna device (AD) placement on modern ships. The development process is preceded by a series

of analytical tasks to study the requirements for ship AD. These requirements are conditionally divided into: non-functional (primarily related to maritime and ship operating characteristics) and functional (directly related to the performance of the antenna's function as part of radio engineering stations). Next, based on the results of these studies, a specific design for a shipboard AD is developed. An example of an integrated shipboard antenna system in the decimeter range based on AESA is provided.

Keywords: Integrated antenna system, multifunctional antenna system, shipborne antenna, radio engineering complex, multifunctional complex.

For citation: Samburov N.V. Formation of the technical appearance of a complex ship antenna device // Trudy MAI. 2025. No. 144. (In Russ.) URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=186308>

Введение

Основным направлением развития радиотехнических станций и комплексов (РТС и РТК, соответственно) является повышение функциональной эффективности, в частности — расширение номенклатуры функциональных задач, решаемых данными системами (т.е. расширение функциональности). Это достигается как введением дополнительных режимов работы (т.е. модернизацией составляющих), так и многоцелевым использованием блоков и узлов данных систем.

Одним из важнейших элементов РТС являются антенные устройства (АУ), функциональным назначением которых является прием и излучение электромагнитных волн в определенных направлениях. Данные устройства могут

являться объектами для многоцелевого использования несколькими РТС из состава РТК. При этом ключевым фактором, обеспечивающим возможность реализации совместного использования устройства, является наличие системы высшего порядка, осуществляющей централизованное управление распределением частотно-временного ресурса АУ между РТС [1].

Целью работы является формирование облика корабельного антенного устройства с возможностью использования различными радиотехническими станциями. Подобные устройства (часто называемые многофункциональными [2...7]) не являются многофункциональными в прямом смысле (т.е. выполнения функции передачи и приема сигнала в определенных пространственных направлениях) и представляют собой комплексированные антенные устройства для использования рядом РТС различного функционального назначения и (или) рабочих диапазонов [8,9].

Далее на основе практических примеров будет обоснована актуальность работы, а также поставлены задачи исследования для целей формирования облика компенсированного корабельного АУ.

Практическая актуальность и постановка задач

Для обоснования и постановки задач исследования следует рассмотреть сложившуюся практику, а именно – номенклатуру корабельных АУ, а также особенности их компоновки на корабле.

Наличие на корабле большого количества излучающих антенн РТС располагаемых в ограниченном надпалубном пространстве приводит к проблеме электромагнитной совместимости (ЭМС) и требует реализации оптимальной

компоновки (размещения), минимизирующей их взаимное влияние. Так различают горизонтальную и вертикальную схемы размещения так называемых антенных постов (условное наименование обособленных корабельных антенных приборов) [10]. Компоновку по горизонтальной схеме, когда антенные посты (АП) размещаются на открытых слабозатененных (верхних) частях надстроек (обычно носовой или кормовой), можно считать простейшей, не требующей возведение дополнительных специализированных надстроек и мачт. Однако такое размещение антенных постов приводит к «затенению» одного поста другим и ухудшению ЭМС излучающих радиотехнических средств за счет паразитного приема сигналов не только боковыми и фоновыми, но и главными лепестками диаграмм направленности. Данного недостатка лишена вертикальная (или ярусная) схема размещения.

Для реализации вертикальной (ярусной) схемы обычно используется мачта, представляющая собой единую платформу для размещения антенных и высокочастотных постов радиотехнических средств, работающих в различных диапазонах. Корпус мачты для снижения эффективной площади рассеяния реализуется в виде конструкции со скошенными углами. Некоторые примеры реализации компоновки мачты и номенклатура антенных постов представлены на рисунке 1. В примере, показанном на рисунке 1а, на верхнем ярусе мачты установлена антенна радиолокационной станции (РЛС) общего обнаружения. Далее на верхних ярусах последовательно вниз размещены АП: РЛС управления, РТС связи, азимутально-дальномерного радиомаяка (АДРМ), системы взаимного обмена информацией (ВЗОИ) и навигационной РЛС (НРЛС). На средних ярусах размещаются антенны комплекса радиосвязи. На нижних ярусах мачты размещаются

антенные посты комплекса радиоэлектронного подавления (РЭП). Показанный пример компоновки наглядно демонстрируют, что при значительной номенклатуре РТС проблема ЭМС и затенения антенных устройств остается актуальной. Так в рассмотренном примере присутствует только одно «незатенённое» надстройкой место на топе мачты, а большинство АП для снижения эффекта «затенения» дублируются и (или) «относят» от надстройки при одновременно ухудшении взаимной развязки.

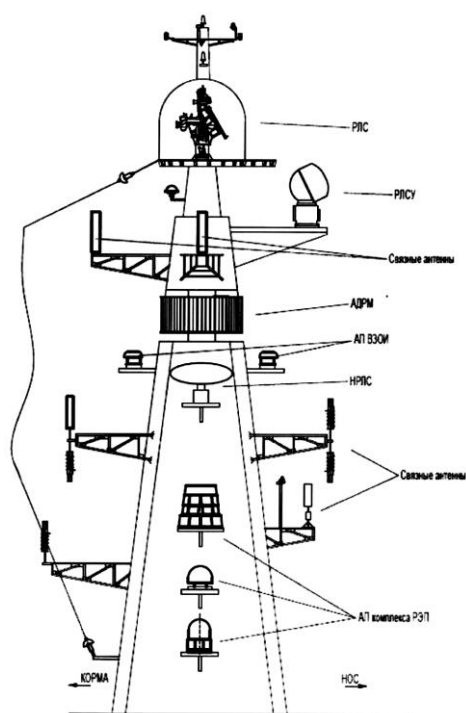


Рисунок 1 — примеры реализации вертикальной схемы размещения антенных постов: а – размещение АП на отдельной несущей мачте [10], б – интегрированная мачта Thales I-Mast 400 [11].

В настоящее время перспективным является вариант вертикальной компоновки, при которой АП интегрируются в мачтовую конструкцию. При этом происходит замена одного или двух АП кругового обзора рядом антенных устройств

(обычно четырем) с электрически управляемым лучом, располагаемых на гранях мачтовой конструкции. Данный вариант улучшает ЭМС РТС, что позволяет использовать компактные мачтовые конструкции в связи с возросшей плотностью расположения антенн. Одновременно снижается комплексная величина эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) мачты по сравнению с неинтегрированной. Это согласуется с практикой широкого внедрения технологии, так называемой, *архитектурной защиты* кораблей (от обнаружения системами разведки и целеуказания), т.к. преобладающий (до 80%) вклад в ЭПР кораблей вносят надстройки и надпалубные элементы [12]. На рис 1б показана подобная мачтовая система включает в себя антенны следующих радиотехнических систем: Sea Master 400 (РЛС воздушного обзора дециметрового диапазона), Sea Watcher 100 (обзорная РЛС морской поверхности трехсантиметрового диапазона), Gatekeeper (оптико-электронная система наблюдения), NR-IFF (вторичная РЛС опознавания «свой-чужой» дециметрового диапазона волн), SHF Satcom (станция спутниковой связи СВЧ и УВЧ диапазонов), а также ICAS – антенно-коммутационный комплекс антенн (передающих и приемных) для аппаратуры связи и управления СВЧ и УВЧ диапазонов. В данном примере стоит отметить, что антенны РЛС обнаружения воздушных объектов расположены значительно ниже антенн РЛС обнаружения надводных (в отличие, например, от реализации компоновки, показанной на рисунке 1а). Данное решение при котором АУ располагаются в порядке учитывающим соответствие их габаритов форме пирамидальной мачты наиболее полно соответствует принципу архитектурной защиты, но не является оптимальным для противодействия воздушных (низколетящих скоростных) корабельных угроз в

верхней полусфере. Таким образом проблема размещения значительного количества антенн широкой номенклатуры остаётся актуальной и для интегрированных мачтовых конструкций на базе АП с электрически управляемым лучом.

Одним из способов решения проблемы является сокращение номенклатуры антенн больших габаритных размеров. Среди корабельных антенных устройств значительными габаритами обладают направленные антенны РТС дециметрового диапазона, а именно: РЛС воздушного обзора и вторичные радиолокационные станции (ВРЛС) кооперативной классификации (государственного опознавания). Станции классификации целей, работают на принципе взаимного обмена информацией между станцией-запросчиком и ответчиком, установленном на объекте классификации [13,14]. Поскольку принятие решения об классификации объекта не требуют постоянного взаимного обмена информацией (повторная классификация требуется в исключительных случаях), а сам обмен происходит за достаточно малый промежуток (не превышает десятков миллисекунд) [15], то имеется профицит временного ресурса использования АУ станции-запросчика по функциональному назначению. Таким образом РЛС воздушного обзора и станция классификации, могут стать объектом для комплексирования на базе единого антенного устройства в составе интегрированной корабельной мачты с временным разделением циклов работы. Это позволит не только уменьшить суммарную стоимость комплексов, но и оптимизировать схему размещения АУ, улучшить ЭМС и снизить радиолокационную заметность объекта размещения, что также является актуальным для современных и перспективных типов кораблей.

В общем виде целью формирования облика антенного устройства является определение основных конструктивных особенностей построения устройства, недопущение системных ошибок, которые впоследствии (например, на этапе выполнения опытных конструкторских работ) могут привести к необходимости переконструирования как самого устройства, так и РТС и РТК. Поэтому процессу формирования должно предшествовать решение ряда аналитических задач по исследованию требований к корабельным АУ. Данные требования будут условно разделены на: нефункциональные (связанные в первую очередь с морскими и корабельными особенностями эксплуатации) и функциональные (связанные непосредственно с выполнением функции антенны в составе РТС). Далее на основе данных исследований будет сформирован частный облик корабельного АУ.

Обобщенные нефункциональные требования к АУ корабельных станций

Морские условия и непосредственное размещение радиотехнической аппаратуры на корабле существенным образом оказывают влияние на работу станции, что необходимо учитывать в процессе проектирования. Особые требования к АУ, определяемые условиями эксплуатации, можно разделить на несколько групп:

- 1) *Работа в условиях воздействия морской климатической среды.* Работа РТС в условиях повышенной влажности и солености воздуха, а также наличие резких перепадов температуры требует применение специфических конструкторских и технологических решений. В частности, необходимо предполагать методы влагозащиты элементов устройства и несущих конструкций. При этом следует иметь в виду, что морская влажность содержит соли, к которым неустойчивы многие антикоррозионные покрытия.

Антенные устройства РТС, располагаемые на верхней палубе и мачтовых конструкциях, подвергаются водо- и брызговоздействию (интенсивность брызг не менее 5 мм/мин), следовательно, антенно-фидерные устройства и радиоэлектронная аппаратура АП должны быть герметизированы. В дополнении к этому штатное крепление антенны должно выдерживать значительные ветровые нагрузки при скорости ветра не менее 100 узлов (51,5 м/с). Защита от воздействия морской климатической среды наиболее просто реализуется при неподвижном полотне АУ (без механического сканирования лучом), размещаемом в интегрированной мачте.

2) *Работа в условиях механических воздействий от корпуса корабля.* В процесс работы корабельного двигателя и соударения о волны возникают вибрации частотой 10...30 Гц с ускорением 1,5g и более. Наличие вибраций и ударов, сопутствующих эксплуатации РТС, обуславливает применение прочных (не хрупких) материалов и технических решений, способствующих упрочнению конструкции АУ. К данным воздействиям сильно критичны механические (подвижные) узлы и устройства, в частности антенны с механическим типом сканирования.

3) *Работа в условиях воздействия морской корабельной качки.* Качка корабля на морском волнении приводит к смещению луча ДН корабельных РЛС относительно плоскости горизонта, вследствие чего дестабилизируется зона обзора, снижается вероятность обнаружения (вплоть до пропуска цели на обзоре) и ухудшается точность определения координат. В зависимости от назначения станций требования к работе в условиях качки обычно лежат в пределах от $\pm 10^\circ$ (для судовых НРЛС) до $\pm 15/20^\circ$ (килевая/бортовая соответственно) [16], что порой превышает

ширину ДН в вертикальной плоскости. Таким образом возникает необходимость в механической либо электрической стабилизации положения луча.

4) *Влияние архитектурно-конструктивных особенностей корабля.*

Частично данный вопрос рассматривался выше (при обосновании актуальности). Перечислим подробно наиболее значимые эффекты, оказывающие влияние на работу корабельного АУ и степень их влияния:

- переотражение от корабельных надстроек и других элементов приводит к появлению секторов затенения станции, увеличению боковых лепестков и расщепления главного лепестка ДН антенных устройств. Наиболее сильно это проявляется для антенн с механическим вращением луча. При этом даже в случае вертикальной компоновки, с целью снижения эффекта, используются дублирование АП (по направлениям «борт-борт» или «нос-корма») в составе РТС либо дублирование самих станций;

- ограниченные возможности по оптимальному размещению (габариты, масса, высота подъёма фазового центра) антенных устройств на корабле приводят к снижению качества работы станции, наличие проблем ЭМС с другими радиотехническими средствами (РТС в составе носителя могут иметь близкие рабочие частоты или побочные излучения). На корабле имеется крайне ограниченное число незатененных (слабозатененных) мест для размещения антенн кругового обзора. Использование нескольких неподвижных антенных полотен с электрическим способом управления лучом имеют в этом смысле кардинальное преимущество. Оппозитное размещение ряда антенных полотен на корабельных надстройках и

мачтах снижает также проблему затенения и переотражений, а также проблемы общекорабельной ЭМС;

- размещение и конструкция АУ должна быть согласована с общей радиолокационной заметностью корабля. Радиолокационная заметность в первую очередь определяется формой и размерами надстроек, значит – АУ должно быть конформной формы с возможностью располагаться на свободных частях конструкции надстроек и мачт. Этому наиболее полно соответствует случай расположения неподвижных антенных полотен под углом соответствующим углам завалов граней интегрированной мачты.

5) *Влияние организационно-технических особенностей эксплуатации (службы) корабля.* Перечислим наиболее значимые особенности, оказывающие влияние на работу корабельного АУ и степень их влияния, а именно:

- антенные устройства, как составная часть РТС, размещаемых на кораблях, должны сохранять работоспособность в течение по меньшей мере периода автономного плавания. Здесь также стоит отметить, что надежность двумерной антенной решетки с электрически управляемым лучом, содержащей значительное число каналов и излучающих элементов, выше чем у антенны с механическим управлением лучом. Это определяется не только отсутствием подвижных механизмов, но и кардинальным (ключевым) отличием в структурном построении. АФАР можно отнести к сложной квазиизбыточной системе, надежность которой зависит от количества управляемых элементов, структуры построения и непосредственно самой формулировки условного критерия «отказ». Данный критерий определяется функциональным назначением РТС и обычно выражается

через величину деградации параметров АУ (например, допустимое превышение уровня УБЛ или степень расширения луча). Однако в большинстве случаев провести прямые измерения параметров АУ на корабле проблематично, поэтому критерий «отказ» формулируется косвенно — специализированной системой контроля через соответствующее число отказавших управляемых элементов или каналов АФАР;

- ограниченность численности обслуживающего персонала РТС, что определяет требование максимальной автоматизации устройств, входящих в РТК. В том числе — автоматизацию процессов контроля и диагностики антенных устройств;

- техническая ограниченность (пространственная, конструктивно-несущая, по водоизмещению и пр.) корабля как обособленного объекта размещения ряда РТС и РТК. Это также определяет необходимость снижения массогабаритных характеристик и комплексирования узлов ряда РТС для совместного использования в составе РТК;

- большая длительность жизненного цикла корабля-носителя РТС без возможности глобальной модернизации станции. Это предопределяет использование (в процессе формирования образа) ряда технических решений, позволяющих проводить модернизацию в течении всего жизненного цикла изделия.

Перечисленному ряду требований наиболее соответствует обширный класс антенных устройств с электрическим (немеханическим) управлением лучом.

Обобщенные функциональные требования

Ключевыми параметрами (техническими характеристиками) АУ являются: рабочий диапазон частот и поляризация, номенклатура и параметры формируемых ДН. По причине широкой номенклатуры РТС различного функционального назначения, формирование функциональных требований к АУ размещаемых на корабле (в отличие от нефункциональных требований, допускающих некоторое обобщение) возможно лишь после некоторой конкретизации комплексируемых типов РТС по назначению, то есть рассмотрения более частного случая.

Выше было предложено использование общего АУ для станции классификации и активной РЛС (АРЛС) — этот конкретный случай и будет рассматриваться далее. В виду разнообразия существующих корабельных систем ВРЛС и АРЛС, достаточно трудно, а в некоторых случаях даже невозможно, обоснованно сформировать полную номенклатуру технических требований к АУ. Для случая формирования облика устройства в этом нет необходимости, однако возможно и необходимо сформулировать характеристики АУ в общем виде (достаточном для формирования облика):

1) *Диапазон частот и поляризация излучаемого сигнала.* Станции классификации (в том числе опознавания свой-чужой, IFF) работают в дециметровом диапазоне длин волн (конкретно, L-диапазон) на вертикальной поляризации [14]. Данные характеристики являются основополагающими для всей работы системы классификации, и не могут быть изменены. Следовательно, возможно комплексирование АУ станций классификации и активной РЛС с

вышеприведенными параметрами излучаемого сигнала или близкими по несущей частоте.

Стоит отметить, что дециметровый диапазон из-за своих свойств широко используется для радиолокационного обнаружения воздушных объектов. В частности, для гражданского использования (управления воздушным движением) выделены диапазоны работы наземных РЛС сверхдальнего радиолокационного обнаружения (890...942 МГц), а также РЛС дальнего радиолокационного обнаружения и контроля воздушного пространства (1215...1400 МГц). В корабельной радиолокации, в связи с ограничениями на размеры апертур антенн, в РЛС обзора обычно используется более высокочастотная часть дециметрового диапазона. При этом в морской радиолокации принята горизонтальная поляризация сигнала, так как в этом случае уровень отражений от морской поверхности при малых углах скольжения и среднем волнении ниже (при соизмеримых уровнях в иных случаях). Однако в связи с малой удельной величиной ЭПР морской поверхности в дециметровом диапазоне данное различие несущественно. Наряду с малой величиной отражений от подстилающей поверхности достоинствами использования данного диапазона для активной радиолокации являются слабая погодозависимость и улучшение работы системы СДЦ (более пологая характеристика режекторных фильтров и меньшее количество «слепых скоростей»). Таким образом использование L диапазона для АРЛС обзора актуально и имеет распространенную практику, а значит задача комплексирования станций в приведенном диапазоне частот и поляризации сигнала обоснованно и имеет практическую значимость.

2) *Номенклатура формируемых ДН.* Номенклатура формируемых ДН для работы системы классификации включает в себя до 3-х типов ДН: направленная (Σ), разностная (Δ) и ненаправленная (Ω) (первые две должны формироваться одновременно). Для АРЛС основным типом ДН является направленная. Однако иные типы ДН также могут быть использованы при необходимости: для компенсации боковых лепестков (ненаправленная ДН) или уточнения координат (моноимпульсная ДН). Таким образом для рассматриваемого случая типы ДН совпадают либо близки.

Немаловажным требованием к номенклатуре диаграммам является обеспечение возможности сопряжения не только с существующей на сегодняшний день, но и с перспективной аппаратурой ВРЛС (в частности систем госопознавания). Процесс замены и модернизации аппаратуры вторичной системы радиолокации и обмена информации в масштабах государства или военного альянса достаточно дорог и может продолжается в течении десятилетия. Для корабельных АУ данное требование имеет особое значение так как является следствием учета организационно-технических особенностей эксплуатации (обеспечения большой длительность жизненного цикла РТС).

3) *Параметры ДН.* Конкретные параметры ДН (ширина диаграммы направленности, уровень боковых лепестков, коэффициент направленного действия и прочее) и их взаимные энергетические соотношения определяются требуемыми техническими характеристиками радиотехнических станций, и обеспечиваются размерами и построением излучающей апертуры, поэтому здесь не рассматриваются [13,14].

Вышеприведенным требованиям может соответствовать широкий ряд типов антенных устройств, от зеркальных до активных фазированных антенных решеток (АФАР). При этом широкий ряд необходимых ДН может быть сформирован как с

помощью обособленных специализированных антенн, так и с помощью апертурного синтеза на одном полотне антенной решетки. Стоит отметить, что обычно технические требования к энергетическому потенциалу и угловому разрешению АРЛС более высокие, чем у ВРЛС. Поэтому габаритные размеры и тип АУ будут определяться техническими требованиями АРЛС, а структура диаграммобразующих антенно-фидерных устройств дополнительных каналов (Δ и Ω) – требованиями ВРЛС.

Корабельная комплексированная АФАР

Формирование облика должно основываться на выше рассмотренных функциональных и нефункциональных требованиях к АУ. Резюмируя вышеизложенные требования и их анализ стоит отметить, что АУ должно иметь минимально возможные габаритные размеры (с возможностью масштабирования), быть конструктивно простой и удобной для установки и обслуживания на объекте-носителе. Предварительный комплексный анализ требований показывает, что они в достаточной степени противоречивы, поэтому для их полного удовлетворения необходимо идти на технический компромисс.

Антенны большинства станций ВРЛС, прежде всего по технико-экономическим соображениям, имеет механический тип сканирования лучом (обычно круговой обзор плоским лучом) [17]. Таким образом реализуется круговая зона обзора одним направленным лучом (Σ) в определенном угломестном секторе. В зависимости от конкретной конструкции АУ для Σ -канала, формируются компенсационные каналы различных типов (встроенные в Σ -канал или обособленные), которые также располагаются на азимутально-поворотном устройстве. В условиях сложной электромагнитной и фоно-целевой обстановки это не позволяет проводить

качественную классификацию целей [14]. В дополнении к этому подобные антенны слабо удовлетворяют части вышеприведенным нефункциональным требованиям.

Целесообразность построения того или иного варианта АУ с электрическим сканированием во многом определяется заданным энергетическим потенциалом станции. Обычно АУ должно обладать возможностью обеспечить заданную излучаемую мощность в главном лепестке при максимуме коэффициента направленного действия антенны, чему в наибольшей степени соответствует АУ типа АФАР [18]. В дополнении к этому при таком построении АУ реализуется возможность для синтеза широкой номенклатуры ДН. Сформулируем требования к корабельному комплексированному (КК) АУ:

1. Тип АУ: АФАР с электрическим управлением лучом в двух плоскостях. Тип управляющих элементов АФАР — фазовращатель и аттенюатор. Необходимость в дальнейшей конкретизации параметров для целей формирования облика отсутствует, так как их значения в первую очередь будут зависеть от размерности решетки. Размерность (размеры апертуры) решетки, в свою очередь, определяется требуемым качеством обеспечения выполнения функциональных задач сопрягаемыми станциями либо ограничениями на техническую возможность размещения полотен АФАР на конкретном проекте корабля.

2. Параметры излучаемого и принимаемого сигнала: диапазон частот — L , поляризация — вертикальная (в соответствии с функциональными требованиями).

3. Номенклатура формируемых ДН: Σ , Δ , Ω (в соответствии с функциональными требованиями).

4. Максимальный угол отклонения луча при сканировании: горизонтальная плоскость — 45° , вертикальная плоскость — φ_{max} . Причем:

$$\varphi_{max} = \max \begin{cases} \varphi_0 + \alpha_{KK} \\ \Psi - \varphi_0 + \alpha_{KK} \end{cases},$$

где φ_0 — угол отклонения нормали антенного полотна от горизонта (величина обосновывается нефункциональными требованиями), α_{KK} — максимальный угол бортовой и килевой корабельной качки (величина обосновывается нефункциональными требованиями), Ψ — размер рабочего сектора обзора РТС по углу места. Таким образом четырьмя полотнами АФАР реализуется круговая азимутальная зона обзора в угломестном секторе $0 \dots \Psi$.

5. Конструктивное исполнение — герметичное от воздействия внешней среды (при интегрировании в мачтовую конструкцию) с радиопрозрачным укрытием-обтекателем (в соответствии с нефункциональными требованиями).

6. Наличие встроенной подсистемы контроля функционирования АФАР (в соответствии с нефункциональными требованиями).

На рисунке 2 показана функциональная схема КК АФАР. Принцип работы АФАР в функциональном режиме понятен из рисунка и подрисуночных надписей, и в целом соответствует классическому построению АФАР с пассивным диаграммобразующим устройством (делителем) [19]. Данное построение, включающее укрупненно: излучающее полотно (АР), набор из N приемо-передающих модулей (ППМ) с системой управления (СУ), делитель с сумарным и разностным выходом (Σ_o и Δ_o соответственно), дополнено подсистемой встроенного контроля (ПВК) и многофункциональным коммутирующим устройством (МФКУ).

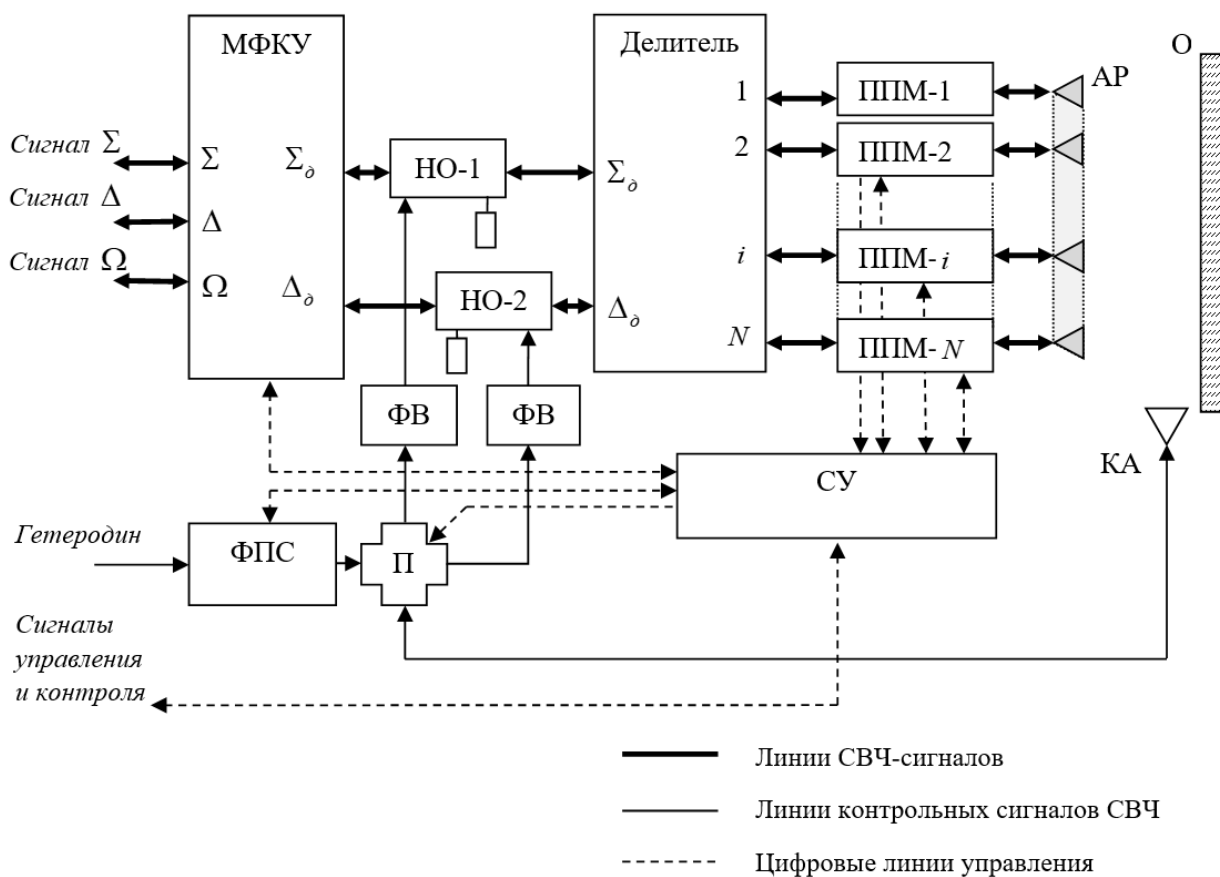


Рисунок 2 — Структурная схема КК АФАР L диапазона: МФКУ — многофункциональное коммутирующее устройство, НО-1 и НО-2 – направленные ответвители, ППМ- i - приемо-передающие модули ($i=1 \dots N$), АР — антенная решетка, ФВ — ферритовый вентиль, КА — контрольная антенна, СУ — система управления и контроля АФАР, ФПС — формирователь пилот-сигнала, П — СВЧ переключатель, О — обтекатель.

Использование АУ рядом РТС различного назначения и рабочих диапазонов требует обеспечение оперативного переключения между станциями, что обеспечивается централизованной корабельной системой коммутации. МФКУ обеспечивает попеременную коммутацию сигналов АРЛС и станции ВРЛС с выходов данной системы на входы делителя. Делитель распределяет сигналы на ППМ. В приемо-передающем модуле происходит усиление и преобразование амплитуды и

фазы сигнала в соответствии сигналами системы управления лучом. Антенные выходы набора ППМ соединены с соответствующими излучателями АР, укрытой обтекателем.

Назначение подсистемы ПВК, как следует из названия – обеспечение функционального контроля работоспособности АФАР. ПВК содержит контрольную антенну (КА), направленные ответвители (НО-1 и НО-2), систему кабелей и устройства коммутации (СВЧ переключатель П перекрёстного типа) для переключения режимов контроля. Таким образом обеспечивается контроль КК АФАР в режимах: «на передачу» и «на прием». Блок ФПС является непосредственно источником контрольного СВЧ сигнала. Более подробно подобные системы приведены и описаны в [20,21]. Анализатором контрольного сигнала, источником синхронизирующего (гетеродинного) сигнала, а также субъектом управления подсистемы ПВК является система высшего порядка. В рассматриваемом случае наиболее органично этой роли соответствует аппаратура из состава АРЛС, содержащая необходимые аппаратные технические возможности. Таким образом в режиме контроля параметров АФАР задействована часть аппаратных ресурсов АРЛС (а именно — цифровое приемное устройство и вычислитель).

Для обоснования реализуемости блоков и устройств приведем примеры технической реализации близких функциональных аналогов. Так аналог МФКУ рассмотрен в [22], делителя – в [18,23], ППМ и СУ – в [24-26], ПВК и её составляющие – в [20,26], обтекателя – в [27,28]. Некоторым аналогом широкополосной АР можно считать решетки, описанные в [2-8,29,30], однако они слабо соответствуют приведенным нефункциональным требованиям к КК АУ. Таким образом существует

необходимость разработки широкополосного антенного полотна (АР) с возможностью управления лучом в двух плоскостях.

Заключение

Выше обоснован частный облик корабельного комплексированного антенного устройства на базе АФАР для нужд ВРЛС и АРЛС. Закладываемые в техническом облике возможности по масштабируемости размера антенны, электрическое управление лучом и разнообразие типов ДН позволяют в перспективе расширить номенклатуру комплекслируемых РТС.

В частности, среди станций имеющих близкий диапазон частот стоит выделить средства обмена тактической информации (существующая практика комплексирования таких средств приведена выше). В дополнении к этому наличие на корабле высокоэнергетической АФАР L-диапазона с возможностью концентрации энергии в необходимых пространственных направлениях позволяет значительно расширить возможности корабельной аппаратуры РЭБ, в частности — для целей подавления информационно управляющих каналов беспилотных (безэкипажных) летательных аппаратов и катеров: каналов навигации, управления, телеметрии и связи.

Список источников:

1. Одзиляев Д.С., Самбуров Н.В. Постановка задачи разработки эффективного алгоритма распределения временного ресурса РЛС// Вопросы радиоэлектроники. 2016. № 10. С. 85–93.
2. Исследование характеристик многофункциональной антенной решетки / М. Р. Бибарсов, В. А. Волошина, С. В. Землянский [и др.] // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2012. № 2. С. 3–9.

3. Стрекалов, А. В. Многофункциональная адаптивная антенная решетка / А. В. Стрекалов, Ю. А. Стрекалов // Инфокоммуникационные технологии. 2007. Т. 5, № 1. С. 89–90.
4. Суховецкий, Б. И. Многофункциональная антенная система / Б. И. Суховецкий // Вопросы радиоэлектроники. 2008. № 1. С. 3–12.
5. Многофункциональные полотна антенных решеток / Д. И. Воскресенский, Ю. В. Котов, Ю. Я. Харланов, Е. В. Овчинникова // Антенны. 2006. № 9(112). С. 5–23.
6. Кондратьева, С. Г. Многофункциональная бортовая антенная решетка интегрированного радиоэлектронного комплекса / С. Г. Кондратьева // Труды МАИ. 2012. № 52. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=29560>.
7. Многофункциональная бортовая активная фазированная антенная решетка L-диапазона / П. А. Агеев, А. И. Синани, Г. Ф. Мосейчук, Т. А. Ломовская // Антенны. 2021. № 4(272). С. 63–72. DOI: [10.18127/j03209601-202104-08](https://doi.org/10.18127/j03209601-202104-08).
8. Поляков А.О., Смирнов И.В., Тендера М.Б., Филатов А.М., Кравцов А.А. Принципы и основы построения многофункциональных интегрированных радиоэлектронных систем // Радиотехника. 2023. Т.87, №5. С. 86–92.
9. Драч В.Е., Самбуров Н.В., Чухраев И.В. Термин "многофункциональная РЛС" // Электромагнитные волны и электронные системы. 2016. Т. 21, № 7. С. 23-25.
10. Коробов, А. А. Тенденции по размещению антенных и высокочастотных постов на надводных кораблях / А. А. Коробов, Д. С. Мотрич // Неделя науки Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2021. № 1–1.
11. G. H. C. van Werkhoven and R. H. van Aken Evolutions in naval phased array radar at Thales Nederland B.V. // Proceedings of the Fourth European Conference on Antennas and Propagation, Barcelona, Spain, 2010. P. 1–4.

12. Шляхтенко А.В., Захаров И.Г., Лысенко Э.Л. Развитие антенных устройств и тенденции формирования проектно-архитектурных решений перспективных надводных кораблей // Морская радиоэлектроника. 2016. №1(55). С. 4–8.
13. Алиев М.Ю., Самбуров Н.В., Ларин А.А. Антенные системы запросчиков вторичных радиолокационных комплексов и систем. Принципы организации и использования пространственных каналов информации // Радиопромышленность. 2014. Вып. 4 (4). С. 116–137.
14. Радиоэлектронные системы. Основы построения и теория: справочник / Под ред. Я.Д. Ширмана. – М.: Радиотехника, 2007. – 512 с.
15. Stevens, M.C. Secondary Surveillance Radar. Boston and London: Artech House, 1988.
16. Основы теории построения корабельных комплексов крылатых ракет / Васильев С. В., Дюдяев К. Н., Петрушин А. В., Селезнёв А. Г. Санкт-Петербург: БГТУ "Военмех" им. Д.Ф. Устинова, 2019. – 80 с.
17. Самбуров Н.В., Мазин А.В. Антенные системы запросчиков вторичных радиолокационных комплексов и систем. Системы на основе рефлекторных антенн и антенных решеток // Радиопромышленность. 2014. Вып. 4 (4). С. 97–115.
18. Азаров А.В., Латышев А.Е., Рожков С.С., Семернин М.А., Славянский А.О., Караваев М.Н. Сравнительный анализ вариантов построения антенной решетки бортовой аппаратуры высокоскоростной радиолинии // Труды МАИ. 2023. № 128. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=171392>. DOI: [10.34759/trd-2023-128-10](https://doi.org/10.34759/trd-2023-128-10).
19. Устройства СВЧ и антенны: учебник для вузов / Воскресенский Д. И., Гостюхин В. Л., Максимов В. М., Пономарев Л. И. ; ред. Воскресенский Д. И. - 3-е изд. – М.: Радиотехника, 2008. – 384 с.
20. Россельс Н.А., Шишлов А.В., Шитиков А.М. Активные фазированные антенные решетки – некоторые вопросы настройки и обслуживания // Радиотехника. 2009. №4. С. 64–70.

21. Стакозов А.О., Темченко В.С. Калибровка активной фазированной антенной решетки в безэховой камере на основе измерений излучателей в ближней зоне // Труды МАИ. 2024. № 138. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=182671>
22. Ганичев А.А., Самбуров Н.В. Многофункциональное комплексированное устройство коммутации сигналов L-диапазона // Электромагнитные волны и электронные системы. 2014. №10 (т.19). С. 33–37.
23. Самбуров, Н. В. Диаграмообразующее устройство широкополосной АФАР / Н.В. Самбуров, М.В. Требин // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2024. № 2(54). С. 33–40. DOI: [10.24412/2221-2574-2024-2-33-40](https://doi.org/10.24412/2221-2574-2024-2-33-40).
24. Шмачилин, П. А. Матричная диаграмообразующая схема цифровой антенной решётки / П. А. Шмачилин, Т. Ю. Шумилов // Труды МАИ. 2019. № 109. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=111382>. DOI: [10.34759/trd-2019-109-12](https://doi.org/10.34759/trd-2019-109-12).
25. Радиолокационные системы специального и гражданского назначения. 2020–2012 / Под ред. Ю.И. Белого. – М.: Радиотехника, 2011. – 920 с.
26. Линкевичиус, А. П. Метод оптимизации комплекса контроля и управления техническим состоянием адаптивных фазированных антенных решёток РЛС / А. П. Линкевичиус // Труды МАИ. 2017. № 94. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=81098>
27. Гуртовник И.Г., Соколов В.И., Трофимов Н.Н., Шалгунов С.Г. Радиопрозрачные изделия из стеклопластиков. М.: Мир, 2002. – 368 с.
28. Bodryshev, V. V. Flaw detection method for radomes in weakly anechoic conditions / V. V. Bodryshev, L. N. Rabinsky, A. A. Larin // TEM Journal. Vol. 9, No. 1, 2020. P. 169–176. DOI: [10.18421/TEM91-24](https://doi.org/10.18421/TEM91-24).
29. Q.-Q. He, B.-Z. Wang, and J. He, Wideband and dual-band design of a printed dipole antenna // IEEE Antennas Wireless Propag. Lett. Vol. 7. 2008. P. 1–4. DOI: [10.1109/LAWP.2007.913325](https://doi.org/10.1109/LAWP.2007.913325).
30. Цветков В. А., Кондратьева С. Г. Оптимизация широкополосной фазированной антенной решётки с вибраторными излучателями // Труды МАИ. 2019. №108. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=109430>. DOI: [10.34759/trd-2019-108-6](https://doi.org/10.34759/trd-2019-108-6).

References

1. Odzilyaev D.S., Samburov N.V. Formulation of the effective time distribution algorithm problem. *Voprosy radioelektroniki*. 2016. No. 10. P. 85–93. (In Russ.).
2. Bibarsov M.R., Voloshina V.A., Zemlynsky S.V., Manuilov B.D., Shatsky V.V., Shatsky N.V. Research of characteristics of multi-functional array. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij Rossii. Radioelektronika*. 2012. No. 2. P. 3–9. (In Russ.).
3. Strekalov A.V., Strekalov Ju.A. Multifunctional adaptive antenna array. *Infokommunikacionnye tehnologii*. 2007. No. 1. P. 89–90. (In Russ.).
4. Suhoveckij B. I. Multifunctional antenna system. *Voprosy radioelektroniki*. 2008. No. 1. P. 3–12. (In Russ.).
5. Voskresensky D.I. Kotov Yu.V., Kharlanov Yu.Ya., Ovchinnikova E.V. Multifunctional Antenna Arrays. *Antenny*. 2006. No. 9. P. 2–23. (In Russ.).
6. Kondrat'eva S. G. Multifunctional board array of integrated radio electronic complex. *Trudy MAI*. 2012. No. 52. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=29560>.
7. Ageev P.A., Sinani A.I., Moseychuk G.F., Lomovskaya T.A Multifunctional airborne L-band active electronically scanned array. *Antenny*. 2021. No. 4. P. 63–72. (In Russ.). DOI: [10.18127/j03209601-202104-08](https://doi.org/10.18127/j03209601-202104-08).
8. Polyakov A.O., Smirnov I.V., Tendera M.B., Filatov A.M., Kravtsov A.A. Principles and basics of building multifunctional integrated radio electronic systems. *Radiotekhnika*. 2023. No. 5. P. 86–92. (In Russ.).
9. Drach V.E., Samburov N.V., Chukhraev I.V. The "multi-function radar" term. *Jelektromagnitnye volny i jelektronnye sistemy*. 2016. No. 7. P. 23–25. (In Russ.).
10. Korobov A.A., Motrich D.S. The uptrends of antenna and high-frequency control post layout on surface ships. *Nedelja nauki Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo morskogo tehničeskogo universiteta*. 2021. No. 1–1. P. 23–25. (In Russ.).

11. G. H. C. van Werkhoven and R. H. van Aken. Evolutions in naval phased array radar at Thales Nederland B.V. *Proceedings of the Fourth European Conference on Antennas and Propagation*, Barcelona, Spain, 2010. P. 1–4.
12. Shlykhtenko A.V., Zakharov I.G., Lysenko E.L. Evolution of the antenna means and trends in creating of design and architectural decisions for the future surface ships. *Morskaja radioelektronika*. 2016. No. 1. P. 4–8. (In Russ.).
13. Aliev M.Yu., Samburov N.V., Larin A.A. Antenna systems of interrogators of secondary radar complexes and systems. Principles of organization and use of spatial information channels. *Radiopromyshlennost'*. 2014. No. 4. P. 116–137. (In Russ.).
14. *Radioelektronnyye sistemy. Osnovy postroeniya i teoriya: spravochnik* (Radio-electronic systems: Fundamentals of construction and theory. Directory). Ed. 2nd, revised and additional. Ed. by Ya.D. Shirman. Moscow: Radiotekhnika, 2007. 512 p.
15. Stevens, M.C. *Secondary Surveillance Radar*. Boston and London: Artech House, 1988. ISBN-13: 978-0890062920.
16. Vasil'ev S. V., Djudjaev K. N., Petrushin A. V., Seleznev A. G. *Osnovy teorii postroeniya korabel'nykh kompleksov krylatykh raket* (Fundamentals of the theory of building cruise missile ship complexes). Vol. 1. Sankt-Peterburg: BGTU "Voenmeh" im. D.F. Ustinova, 2019. 80 p.
17. Samburov N.V., Mazin A.V. Antenna systems of interrogators of secondary radar complexes and systems. Systems based on reflector antennas and antenna arrays. *Radiopromyshlennost'*. 2014. No. 4. P. 97–115. (In Russ.).
18. Azarov A. v., Latyshev A. E., Rozhkov S. S., Semernin M. A., Slavyansky A. O., Karavaev M. N. Experimental methods for recording the process of diffusion instability in gas systems. *Trudy MAI*. 2023. No. 128. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=171392>. DOI: [10.34759/trd-2023-128-10](https://doi.org/10.34759/trd-2023-128-10).
19. Voskresensky D.I. *Ustroystva SVCH i anteny* (Microwave devices and antennas). Moscow: Radiotekhnika, 2008. 384 p.

20. Rossel's N.A., Shishlov A.V., Shitikov A.M. Active Phased Array antennas – some configuration and maintenance issues. *Radiotekhnika*. 2009. No. 4. P. 64–70. (In Russ.).
21. Stakozov A.O., Temchenko V.S. Calibration of active electronically scanned array antenna in anechoic chamber based on measurements of the characteristics of radiators in the near field zone. *Trudy MAI*. 2024. No. 138. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=182671>.
22. Ganichev A.A., Samburov N.V. Multifunctional integrated device for switching L-band signals. *Jelektro-magnitnye volny i jelektronnye sistemy*. 2014. No. 10. P. 33–37. (In Russ.).
23. Samburov N.V., Trebin M.V. Beam-forming device for broadband APAA. *Radiotekhnicheskie i telekommunikacionnye sistemy*. 2024. No.2. C.33–40. (In Russ.). DOI: [10.24412/2221-2574-2024-2-33-40](https://doi.org/10.24412/2221-2574-2024-2-33-40).
24. Shmachilin P. A., Shumilov T. Y. Matrix beam-forming scheme of a digital antenna array. *Trudy MAI*. 2019. No. 109. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=111382>. DOI: [10.34759/trd-2019-109-12](https://doi.org/10.34759/trd-2019-109-12).
25. *Radiolokacionnye sistemy special'nogo i grazhdanskogo naznachenija. 2020–2012* (Radar systems for special and civil purposes. 2020–2012). Ed. Yu.I. Belyj. Moscow: Radiotekhnika, 2011. 920 p.
26. Linkevichius A. P. Optimization method of adaptive phased antenna array technical state monitoring and control complex. *Trudy MAI*. 2017. No. 94. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=81098>.
27. Gurtovnik I.G. Sokolov V.I., Trofimov N.N. et al. *Radioprozrachnye izdeliya iz stekloplastikov* (Radio-transparent products from glass-reinforced plastics). Moscow: Mir Publ., 2002. 368 p.
28. Bodryshev V. V., Rabinsky L. N., Larin A. A. Flaw detection method for radomes in weakly anechoic conditions. *TEM Journal*. Vol. 9, No. 1, 2020. P. 169–176. DOI: [10.18421/TEM91-24](https://doi.org/10.18421/TEM91-24).
29. Q.-Q. He, B.-Z. Wang, and J. He Wideband and dual-band design of a printed dipole antenna. *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.* Vol. 7, 2008. P. 1–4. DOI: [10.1109/LAWP.2007.913325](https://doi.org/10.1109/LAWP.2007.913325).

30. Tsvetkov V. A., Kondrat'eva S. G. Optimization of a broadband phased array with vibrator emitters. *Trudy MAI*. 2019. No. 108. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=109430>. DOI: [10.34759/trd-2019-108-6](https://doi.org/10.34759/trd-2019-108-6).