

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.1.10>

УДК: 621.396.674

ПЛАНАРНАЯ ТРЕХДИАПАЗОННАЯ АНТЕННА МОРСКОГО АВАРИЙНОГО РАДИОБУЯ

Л.И. Калюжный¹, А.А. Савочкин², В.В. Головин², Ю.Н. Тыщук²¹ ООО «Уранис», 299053, Россия, г. Севастополь, ул. Вакуленчука, 33-Г² Севастопольский государственный университет
299053, Россия, г. Севастополь, ул. Университетская, 33

Статья поступила в редакцию 29 октября 2024 г.

Аннотация. В статье представлены результаты разработки двух модификаций планарных антенн для морских аварийных радиобуев. Рабочие частоты антенн: 121,5 МГц, 162 МГц и 406 МГц. Антенны имеют габариты, соответствующие возможности размещения в корпусе серийно выпускаемого радиобуя. На трех частотах реализовано качественное согласование с применением LC-фильтров. Реализованное согласование обеспечивает возможность использования радиобуя в различных средах – в воде и свободном пространстве. На нижних частотах получены локальные резонансы сопротивлений, позволившие расширить полосы согласования и увеличить коэффициент усиления антенн на соответствующих рабочих частотах. По характеристикам излучения разработанные антенны полностью отвечают требованиям, предъявляемым к антеннам аварийных радиобуев. К достоинствам предлагаемых вариантов антенн относится: планарная структура, повышенный коэффициент усиления на нижних рабочих частотах – по сравнению с существующими аналогами.

Ключевые слова: антенна радиобуя, радиомаяк с указанием аварийного положения, трехдиапазонная планарная антенна, согласующий фильтр.

Автор для переписки: Головин Владислав Викторович, v_golovin@mail.ru

Введение

Важным компонентом Глобальной морской системы связи при бедствии (ГМССБ), а также ключевым элементом поисково-спасательной системы «Коспас-Сарсат» являются предназначенные для использования на морских судах радиомаяки с указанием аварийного положения (EPIRB, Emergency Position-Indicating Radio Beacon). Основные рабочие частоты таких аварийных радиомаяков находятся в диапазоне 406,0 – 406,1 МГц. Кроме того, аварийные радиомаяки должны быть оснащены радиопередатчиком для работы на частоте 121,5 МГц. Маломощный сигнал самонаведения на частоте 121,5 МГц используется для руководства спасательными службами, когда они находятся на удалении в пределах 10 миль от радиомаяка.

Согласно Приложению 24 MSC.471(101) [1], каждый свободно-плавающий EPIRB, установленный 1 июля 2022 года или позже, должен обеспечивать работу на внутренних частотах автоматической идентификационной системы (АИС) вместе с каналом на частоте 406 МГц и приемником ГНСС (GPS, ГЛОНАСС или др.), а также иметь передатчик для работы на частоте 121,5 МГц. Автоматическая идентификационная система представляет собой эффективный инструмент поддержания безопасности судоходства и предназначена для передачи в УКВ-диапазоне данных о параметрах судна и его движении. Функциональность любого судового оборудования постоянно расширяется [2, 3]. Поэтому функции АИС со временем перестали ограничиваться передачей только лишь идентификационной информации о судне. А сама система из идентификационной превратилась в информационную, что никак не отразилось на аббревиатуре названия. В морском УКВ диапазоне на частотах AIS1 – 161,975 МГц, AIS2 – 162,025 МГц работают различные двухканальные приемники АИС.

В подавляющем большинстве морские аварийные радиобуи (АРБ) оснащаются проволочной штыревой антенной с разными особенностями конструктивной реализации:

- модели RescueME EPIRB1 – EPIRB3 производства SVB [4];
- АРБМ-406Н производства Ярославского радиозавода [5];
- SAILOR 4065 [6];
- ACR GlobalFix V5 [7];
- SmartFind G8/E8 [8];
- NEB-2000 [9].

Главным недостатком такого варианта антенн является то, что на нижних рабочих частотах коэффициент усиления антенн крайне низкий, так как их активное входное сопротивление мало и обычно не превышает 1 – 1,5 Ом.

По сравнению с рассмотренными разработками АРБ в модели Jotron Tron 40S Mk II [10] используется штыревая антенна, представляющая собой фольгированную диэлектрическую пластину, зафиксированную в пазах пластиковой крышки АРБ.

Данное конструкторское решение позволило вывести в верхнюю часть АРБ проблесковый маячок, питание которого по постоянному току обеспечивается проводящим слоем фольгированного материала.

С практической точки зрения представляет интерес, опираясь на данную модификацию антенны, улучшить ее характеристики по коэффициенту полезного действия (КПД) и коэффициенту усиления (КУ) на нижних рабочих частотах за счет увеличения активной части входного сопротивления.

В данной статье представлены результаты решения данной задачи. Разработаны модели трех модификаций планарных штыревых антенн. Разработаны и изготовлены опытные образцы антенн и проведены измерения их характеристик.

1. Разработка моделей планарных штыревых антенн в САПР Гамма

Вид диэлектрического корпуса буга, к которому производится крепление антенны показан на рис. 1, а, на рис. 1, б показана конфигурация излучающего элемента антенны.

Для разработки использован диэлектрик FR-4, для которого приняты типовые значения диэлектрической проницаемости $\varepsilon = 4,4$ и тангенс угла диэлектрических потерь $tg(\delta) = 0,02$, толщина подложки выбрана равной 1,5 мм.

При моделировании антенн рассматривался диапазон частот 100 – 420 МГц с рабочими частотами 121,5, 162, 406 МГц.

Исходя из особенностей практической реализации АРБ диаметр экрана антенны был принят равным 0,2 м.

В качестве ключевых критериев оценки характеристик моделей вариантов прототипов антенн приняты:

- на частоте 406 МГц: активное сопротивление больше 10 Ом, индуктивный характер реактивной составляющей сопротивления, коэффициент усиления больше 0 дБи;

- на частотах 121,5 МГц и 162 МГц: реактивное сопротивление в диапазоне $-300 - 0$ Ом, коэффициент усиления не хуже -10 дБи.

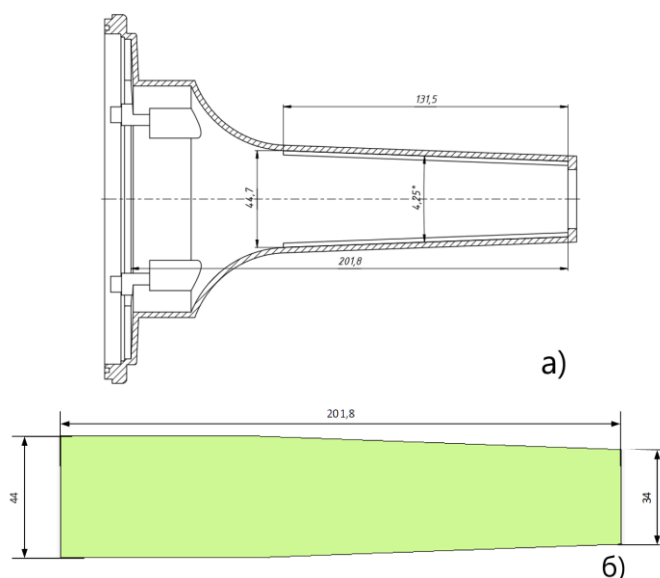


Рис. 1. Чертеж детали кожуха АРБ (а), конфигурация излучающего элемента антенны (б).

На рис. 2 показана модель первого варианта разработанной модели Z-01 на диэлектрической подложке, соответствующей форм-фактору буя и результаты расчета диаграммы направленности антенны в САПР (см. рис. 1). Излучающая структура модели Z-01 выполнена в форме меандра (Z-образной формы). Вдоль «развернутого» проводника формируется синфазное распределение поверхностной плотности тока. В свернутой структуре в формировании излучения участвуют вертикальные отрезки Z-образного проводника. На соседних горизонтальных участках Z-образного проводника токи противофазные, и создаваемое ими поле излучения в основном взаимно компенсируется. Для увеличения электрической длины этих горизонтальных участков и снижения интенсивности их побочного излучения с обратной стороны подложки добавлена металлизация, перекрывающая площадь горизонтальных отрезков излучающей структуры. При этом, в составе излучающего проводника горизонтальные участки представляют собой отрезки несимметричной микрополосковой линии, которые для самой излучающей структуры являются некоторой неоднородностью.

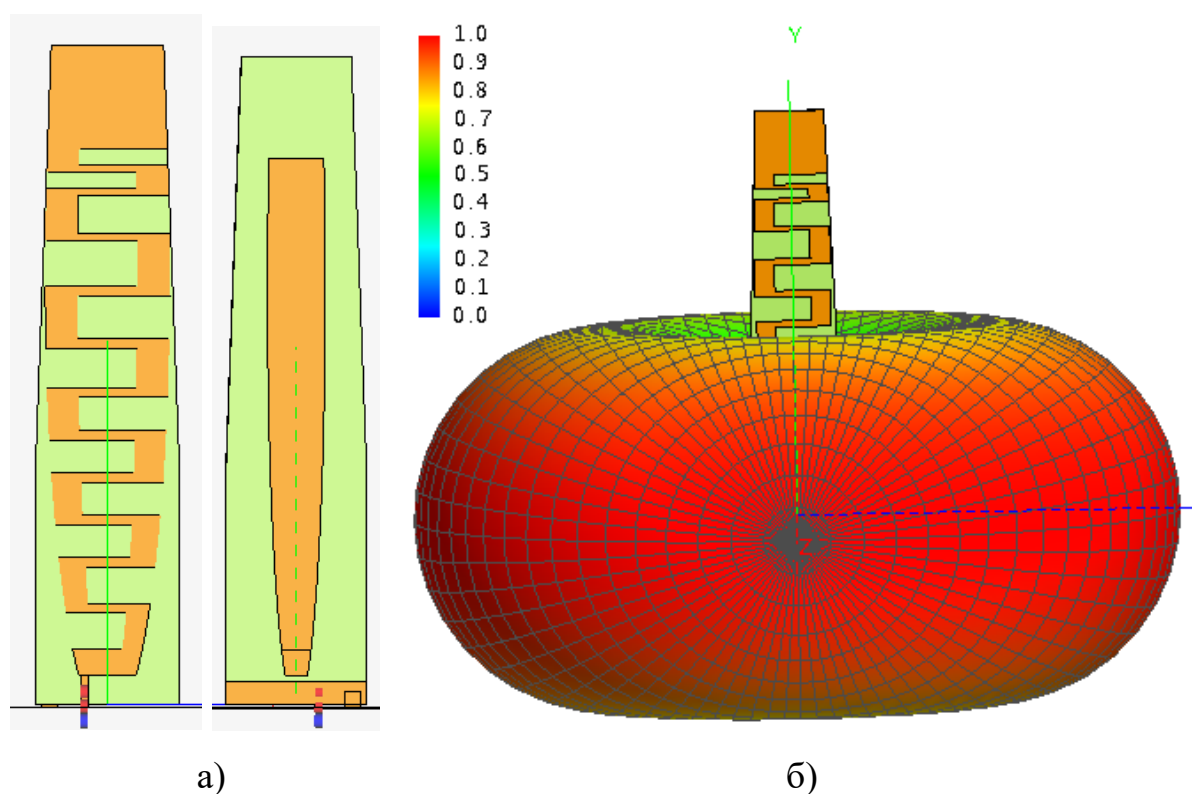


Рис. 2. Модель антенны Z-01 в САПР (а) и ее нормированная 3D-диаграмма направленности на частоте 162 МГц (б).

Наличие в составе излучающей структуры вставок в виде несимметричных полосковых волноводов, обуславливает появление дополнительных резонансов входного сопротивления, как показано на рис. 3. Активная составляющая входного сопротивления антенны Z-01 на рабочих частотах принимает значения: 2; 8,18; 65,2 Ом, реактивная составляющая: $-186,4$; -67 ; $36,3$ Ом.

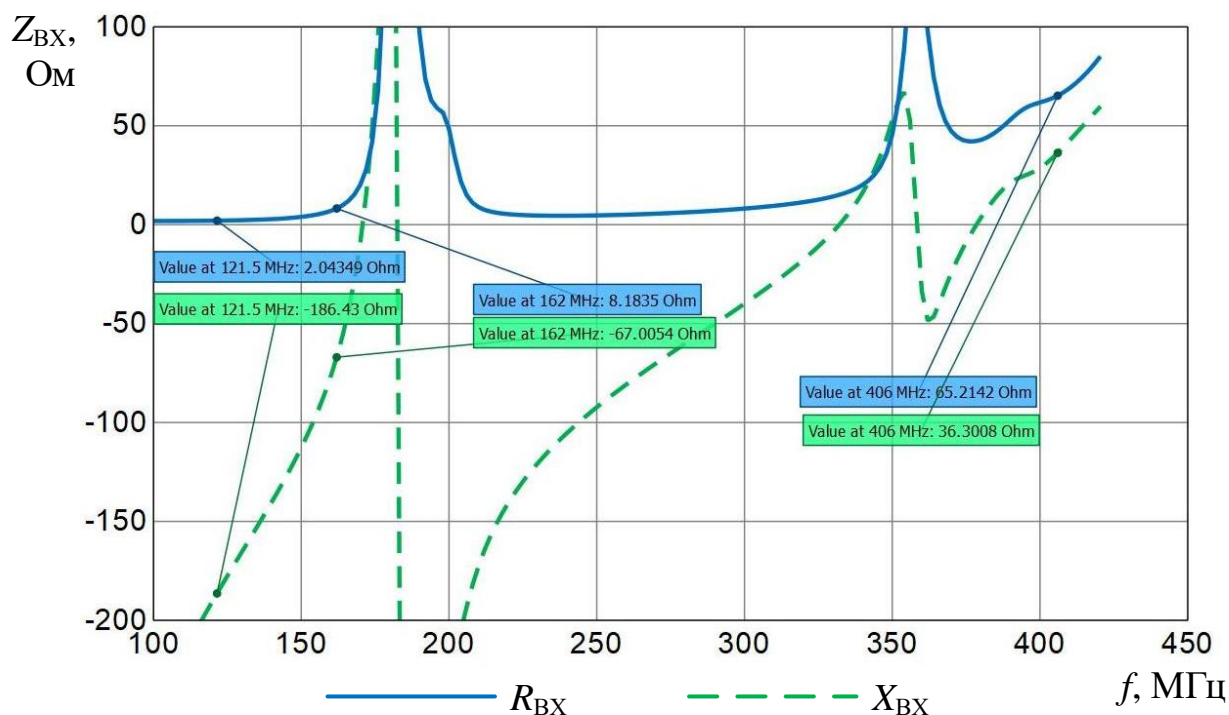


Рис. 3. Частотные зависимости активной (R_{BX}) и реактивной (X_{BX}) составляющих входного сопротивления модели антенны Z-01.

Значения коэффициента усиления для модели антенны Z-01 приведены в табл. 1. Значение КУ оценивалось для размещения антенны в свободном пространстве, т.е. без учета влияния отражающей морской подстилающей поверхности.

Таблица 1. Коэффициент усиления антенны Z-01.

Частота, МГц	121,5	162	406
КУ, дБи	-1,9	-2,7	1,0

Конфигурация второй разработанной модификации штыревой антенны Z-02, реализованной на основе фольгированного диэлектрика, и результаты расчета диаграммы направленности антенны в САПР показаны на рис. 4.

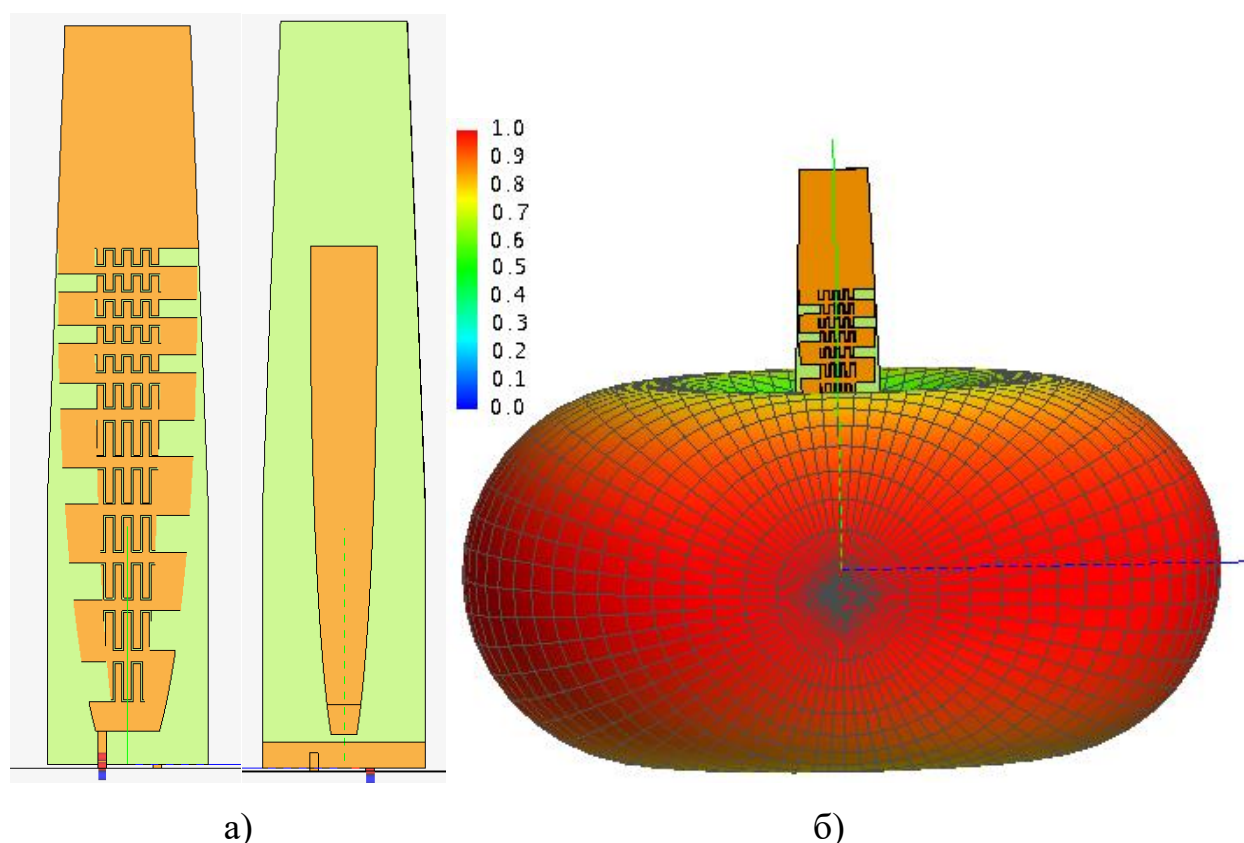


Рис. 4. Модель антенны Z-02 в САПР (а) и ее нормированная 3D-диаграмма направленности на частоте 162 МГц (б).

В отличие от антенны Z-01 в данной модели на горизонтальных участках излучающей Z-образной структуры, представляющих собой отрезки несимметричных полосковых волноводов, для увеличения их электрической длины введены емкостные нагрузки этих отрезков линий – в виде распределенной встречно-гребенчатой структуры. Таким образом, в антенне Z-02 в формировании диаграммы направленности участвуют вертикальные отрезки излучающей структуры. На горизонтальных участках обеспечивается дополнительное увеличение электрических размеров антенны за счет их емкостной нагрузки.

Частотная зависимость входного сопротивления модели антенны Z-02 показана на рис. 5. Активная составляющая входного сопротивления антенны Z-02 на рабочих частотах принимает значения: 1,95; 5,7; 66,5 Ом, реактивная составляющая: –196,7; –90,2; 65,9 Ом.

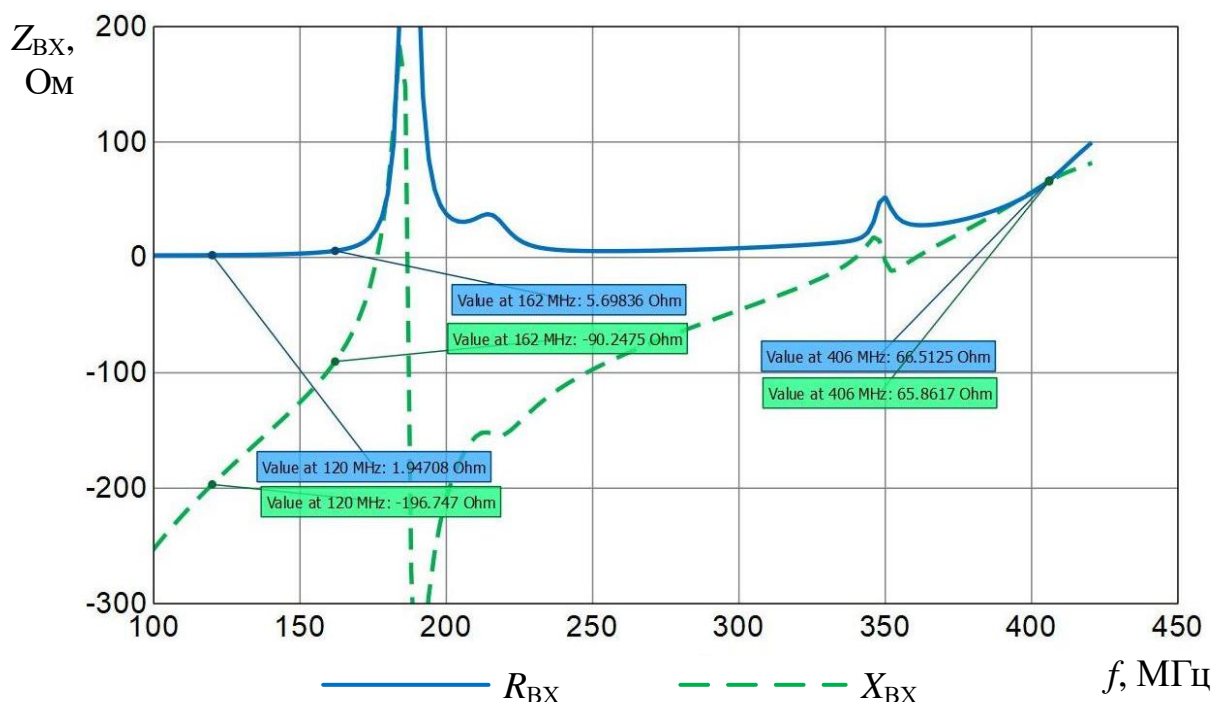


Рис. 5. Частотные зависимости активной (R_{BX}) и реактивной (X_{BX}) составляющих входного сопротивления модели антенны Z-02.

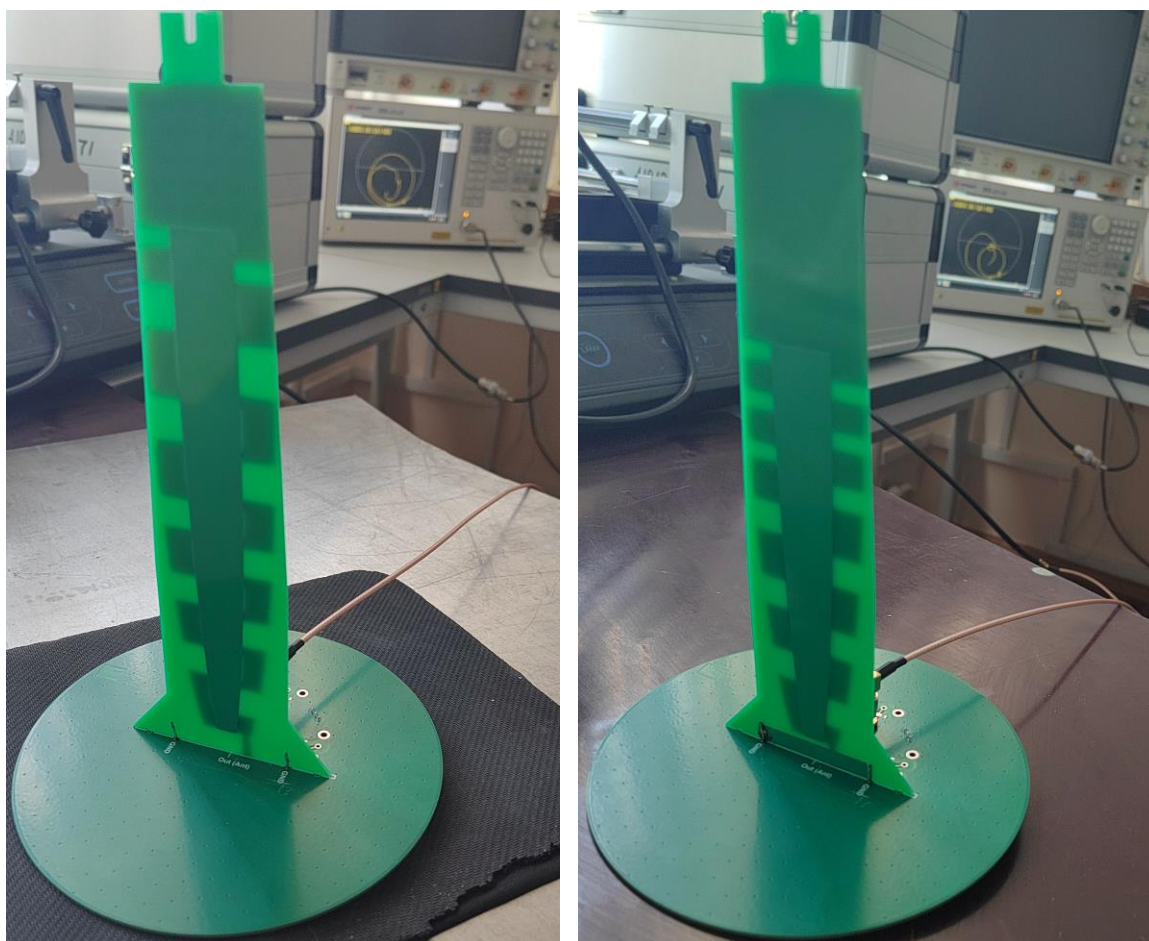
Значения коэффициента усиления для модели антенны Z-02 приведены в табл. 2. Значение КУ оценивалось без учета отражающей морской подстилающей поверхности.

Таблица 2. Коэффициент усиления антенны Z-02.

Частота, МГц	121,5	162	406
КУ, дБи	-1,7	-1,8	1,3

2. Результаты испытаний прототипов антенн

Внешний вид изготовленных опытных образцов антенн показан на рис. 6. Измерения входного сопротивления антенн производились с применением векторного анализатора цепей Keysight E5063A с комплектом калиброванных нагрузок. Измеренные частотные зависимости активной составляющей входного сопротивления антенного модуля Z-01 и Z-02 показаны на рис. 7, 8. Полученные значения входного сопротивления Z-01 и Z-02 для рабочих частот приведены в табл. 3.



а)

б)

Рис. 6. Внешний вид опытных образцов разработанных антенн:
Z-01 (а), Z-02 (б)

Таблица 3. Экспериментальные значения входного сопротивления антенн.

Тип антенны	Рабочая частота, МГц		
	121,5	162	406
	Входное сопротивление, Ом		
Z-01, «свободное пространство»	7,358-j95,38	5,498-j66,7	101,8+j0,49
Z-01 над экраном	3,05-j92,92	5,135-j53,26	55,17-j54,28
Z-02, «свободное пространство»	6,421-j87,8	4,927-j60,78	54,6-j6,544
Z-02 над экраном	2,875-j85,33	4,644-j49,11	34,39-j40,28

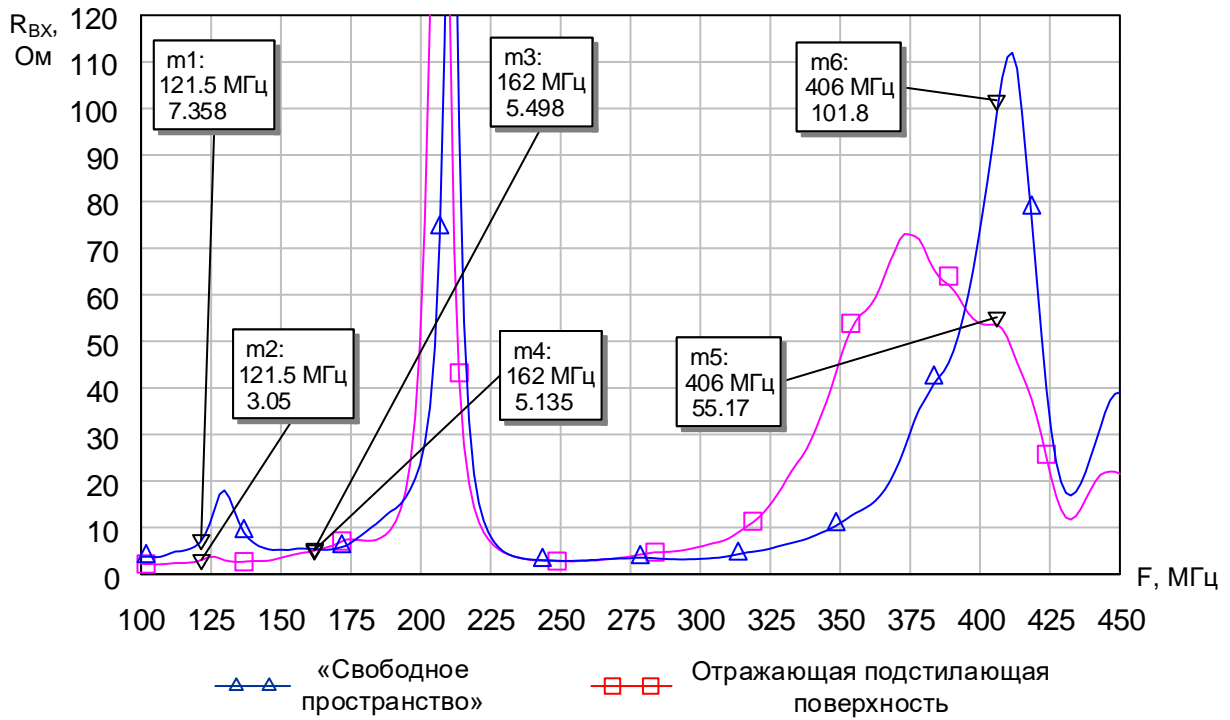


Рис. 7. Частотные зависимости активной составляющей входного сопротивления антенны Z-01.

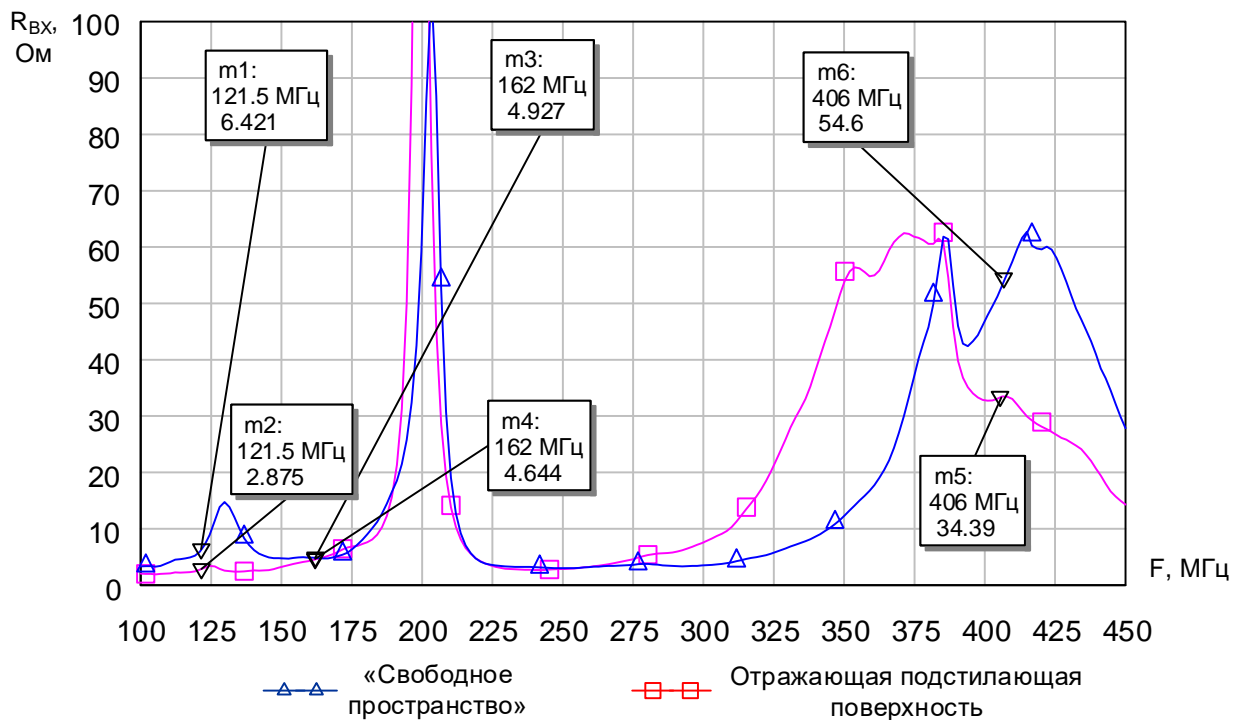


Рис. 8. Частотные зависимости активной составляющей входного сопротивления антенны Z-02.

Для исследованных антенн Z-01, Z-02 на частотах 121,5 МГц и 162 МГц активное сопротивление изменяется при переходе от «свободного пространства» к отражающей подстилающей поверхности на 50%, при этом реактивная

составляющая входного сопротивления изменяется на 1,5-12%. Незначительное изменение реактивного сопротивления позволит с приемлемыми потерями обеспечить согласование на этих частотах для разных условий работы АРБ.

Для антенны Z-01 на частоте 406 МГц при переходе от «свободного пространства» к отражающей подстилающей поверхности реактивность меняет значение и знак, при том, что активное сопротивление изменяется на 50%. Для антенны Z-02 реактивное сопротивление сохраняет знак реактивности в различных условиях измерений, активное сопротивление изменится на 37%.

3. Согласование антенн на рабочих частотах

Согласующее устройство выполнено по схеме, показанной на рис. 9.

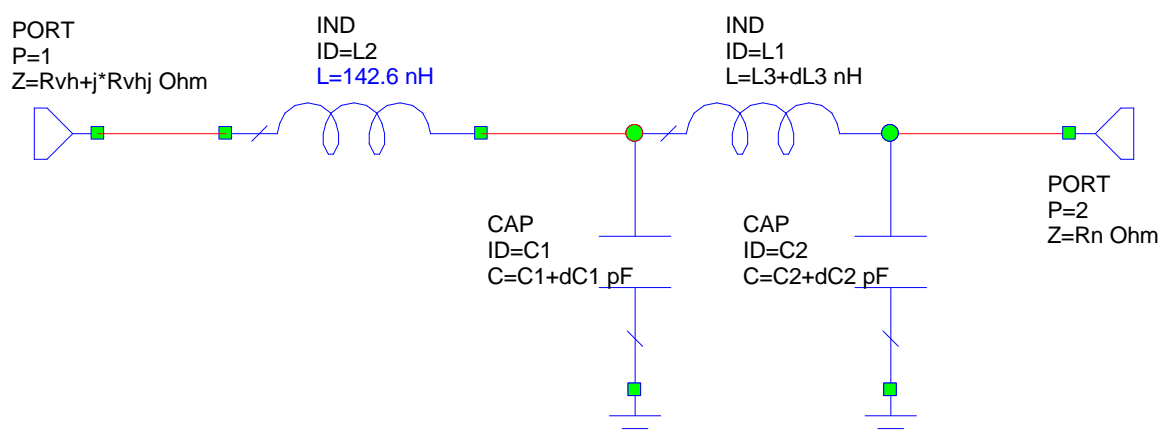


Рис. 9. Обобщённая принципиальная схема согласующего устройства.

На схеме рис. 9 назначение элементов следующее:

- Port P1 – порт, имитирующий антенну с заданным входным сопротивлением;
- Port P2 – входная линия с волновым сопротивлением 50 Ом;
- L2 – индуктивность, компенсирующая ёмкостную реактивность входного сопротивления антенны;
- C1, C2, L1 – реактивные элементы, образующие трансформатор сопротивлений.

Разработка согласующего устройства для каждой из рабочих частот проводилась в несколько этапов.

1 этап. По результатам измерений (см. табл. 3) для каждой из антенн рассчитывалось среднее значение активной и реактивной частей входного сопротивления. Учитывались соответствующие значения для случаев «Свободное пространство» и «Отражающая подстилающая поверхность».

2 этап. По методике, описанной в книге [11] рассчитывалось согласующее устройство, построенное по схеме на рис. 9, нагруженное на среднее входное сопротивление.

3 этап. В рассчитанном согласующем устройстве номиналы элементов «корректировались» под требуемые комбинацией реальных элементов, выбранных по ряду E24.

4 этап. В согласующее устройство, полученное на 3 этапе, вместо Port P1 включался блок измеренных S-параметров соответствующей антенны. Проверялось качество работы согласующего устройства с антеннами, находящимися в различных условиях эксплуатации.

На рис. 10 показаны полученные с применением фильтров нижних частот характеристики согласования со стороны питающей линии на частотах 121,5 МГц и 162 МГц для антенны Z-02.

На рис. 11 показана частотная зависимость коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН) на входе согласующего устройства со стороны питающей линии для случая подключения к согласующему устройству блока с S-параметрами антенны, измеренными при размещении антенны в «свободном пространстве» и «над подстилающей поверхностью».

На частоте 406 МГц для антенны Z-02 согласующий фильтр обеспечивает со стороны питающей линии для усредненного входного сопротивления антенны КСВН в пределах значений 1,1-1,2 в полосе частот 400-412 МГц – для подобранных номиналов элементов. Для случая входных сопротивлений, соответствующих размещению антенны в «свободном пространстве» и «над

подстилающей поверхностью» КСВН на частоте 406 МГц увеличивается до 1,45-2,1 в указанном диапазоне частот.

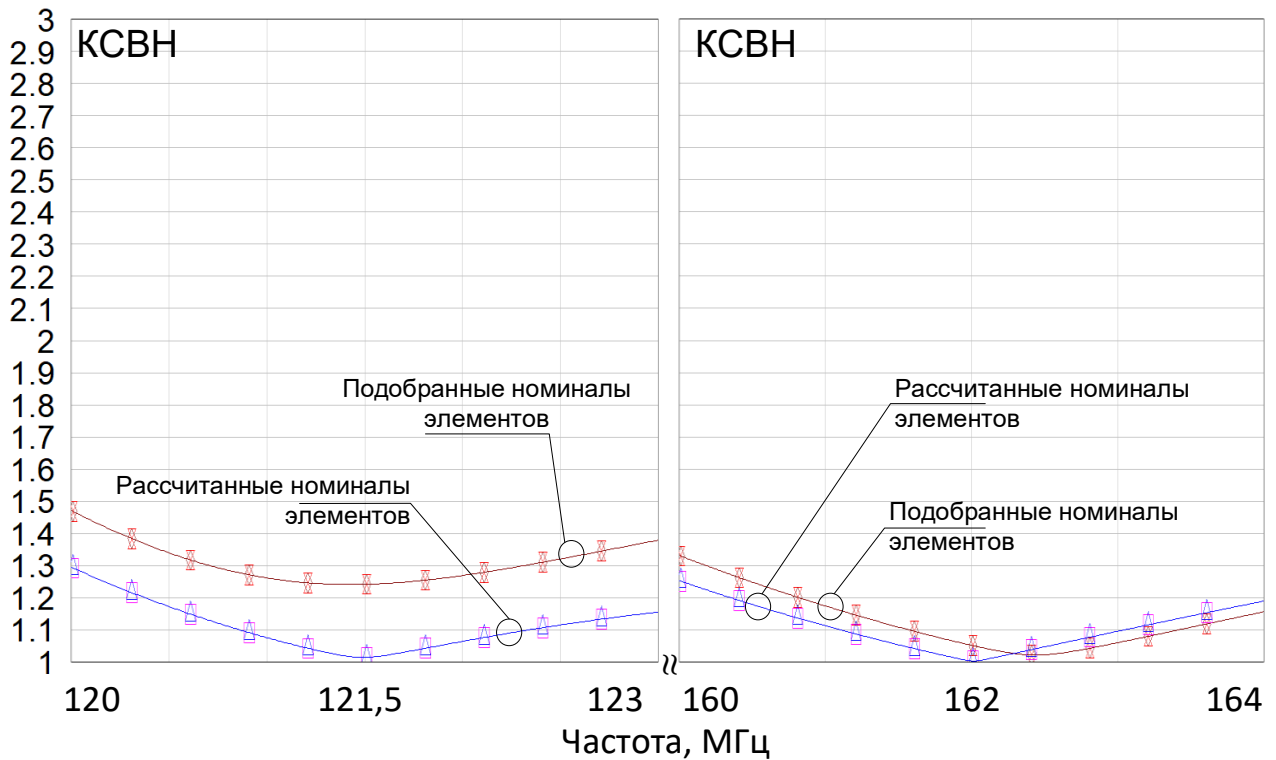


Рис. 10. Частотные характеристики КСВН со стороны питающей линии для антенны Z-02 для рассчитанных и подобранных номиналов элементов фильтров.

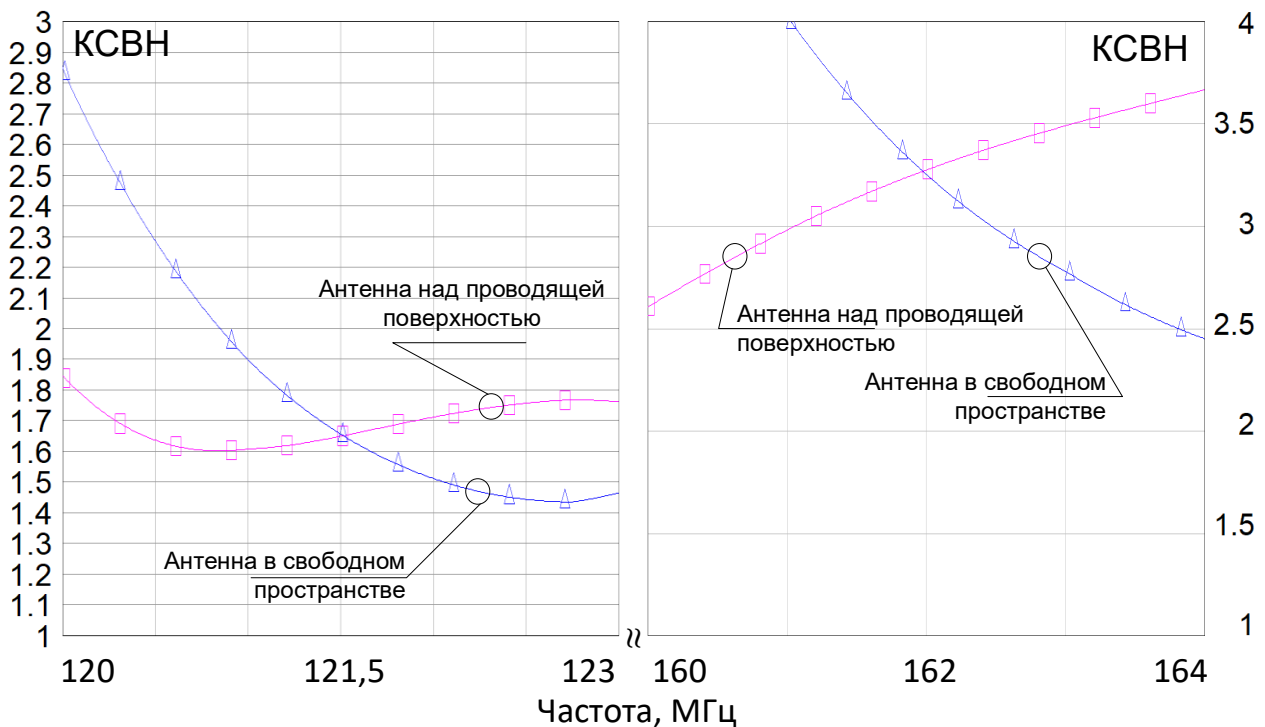


Рис. 11. Частотные характеристики КСВН со стороны питающей линии для антенны Z-02 для разных сред размещения антенны.

Аналогичные характеристики согласования получены для антенны Z-01. Характер их изменения в диапазоне частот при размещении антенны в разных средах мало отличается от рассмотренных на рис. 10, 11 характеристик.

Величина КСВН на уровне 3 для нижних частот является допустимым значением, при котором потери мощности по сравнению с существующими аналогами антенн будут существенно снижены.

Решение задачи согласования обеспечивает получение максимально возможного реального коэффициента усиления разработанных антенн, т.е. позволяет максимально повысить надежность и дальность канала радиосвязи аварийного радиобуя при использовании его «на воздухе» и в погруженном в воду состоянии.

Заключение

Разработаны две модификации планарных трех-диапазонных антенн для аварийного радиобуя с форм-фактором, аналогичным модели буя Jotron Tron 40S Mk II. Разработанные антенны полностью отвечают требованиям стандарта к данному оборудованию аварийных радиобуев. Изготовлены опытные образцы антенн, проведены измерения их характеристик, подтвердившие теоретические результаты. На частоте 406 МГц обеспечивается достаточно высокий коэффициент усиления и широкополосное согласование. На частотах 121,5 и 162 МГц обеспечивается приемлемое качество согласования в относительной полосе частот около 3%. Согласующие устройства реализованы в виде LC-фильтров, рассчитанных с учетом использования радиобуя в «свободном пространстве» и над подстилающей поверхностью. На нижних частотах антенны обеспечивают коэффициент усиления около -2 дБи, что превышает аналогичные значения для существующих аналогов антенн.

Литература

1. MSC I.M.O. Performance Standards For Float-Free Emergency Position Indicating Radio Beacons (EPIRBs) Operating On 406 MHz // MSC471 (101), Annex. – 2019. – Т. 24. – С. 3-7.
2. Базаров Ю.И., Комраков Е.В. Универсальная автоматическая идентификационная система // VII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. – 2000. – С. 133-146.
3. Dudnikov S.Y. et al. Remote control system for the unmanned floating platform // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2021. – Т. 1047. – №. 1. – С. 012130. <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/1047/1/012130>
4. RescueME EPIRB3. – Текст: электронный // SVB: [<https://www.svb24.com/>]. – URL: <https://www.svb24.com/en/ocean-signal-rescueme-epirb3-with-ais-and-rls-function.html>
5. Аварийный радиобуй АРБМ-406Н. – Текст: электронный // Связь и Радионавигация: [<https://cirspb.ru/>]. – URL: <https://cirspb.ru/equipment-and-service/epirb/arbм-406н/>
6. Аварийный радиобуй SAILOR 4065 EPIRB. – Текст: электронный // Связь и Радионавигация: [<https://cirspb.ru/>]. – URL: https://cirspb.ru/equipment-and-service/epirb/sailor_4065/
7. GlobalFix™ V5 AIS EPIRB with Return Link Service and Mobile App. – Текст: электронный // ACR: [<https://www.acrartex.com/>]. – URL: <https://www.acrartex.com/products/globalfix-v5-ais-epirb/>
8. SmartFind G8/E8 EPIRB. – Текст: электронный // Marko Ltd: [<https://markogroup.com/>]. – URL: <https://markogroup.com/en/ship-supply/smartfind-g8-epirb/>
9. AIS EPIRB (COSPAS-SARSAT) NEB-2000. User manual. – Текст: электронный // MED Co. Ltd: [marineqdis.com]. – URL: <https://marineqdis.com/wp-content/uploads/2023/08/NEB-2000-AIS-Manual-ENG.pdf>

10. Аварийный радиобуй Jotron Tron 40S Mk II. – Текст: электронный // Связь и Радионавигация: [<https://cirspb.ru/>]. – URL: https://cirspb.ru/equipment-and-service/epirb/jotron_tron_40s_mk_ii/
11. Фуско В. СВЧ цепи: Анализ и автоматизированное проектирование: Пер. с англ. – Радио и связь, 1990.

Для цитирования:

Калюжный Л.И., Савочкин А.А., Головин В.В., Тыщук Ю.Н. Планарная трехдиапазонная антенна морского аварийного радиобуя // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – №1. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.1.10>