

# Разработка и исследование слабонаправленных электрически малых антенн радиомаяков VHF и UHF диапазонов

О. Ю. Журавлева, И. А. Илларионов, М. И. Дудкин,  
С. С. Чуркин, М. Р. Кириллова, М. Е. Суворова

ООО «Радио Gigabit»

olga.zhuravleva@radiogigabit.net, ivan.illarionov@radiogigabit.net, mikhail.dudkin@radiogigabit.net,  
sergey.churkin@radiogigabit.net, margarita.kirillova@radiogigabit.net, maria.suvorova@radiogigabit.net

**Аннотация.** В настоящей работе приведены результаты разработки антенны передатчика аварийных сигналов, работающей в диапазоне системы КОСПАС-САРСАТ 406,0–406,1 МГц и на частотах поисково-спасательных служб 121,5/243,0 МГц, с конструктивными массогабаритными ограничениями, главным из которых является малая высота антенны. В работе описаны основные проблемы, связанные с созданием электрически малых антенн, следующие из теоретически установленных фундаментальных пределов. Приводятся результаты моделирования и экспериментальных исследований разработанной оригинальной конструкции слабонаправленной антенны, прототипом которой являлась перевернутая F-антенна. Результаты измерений показали хорошую сходимость с расчетными характеристиками, а также применимость предложенной конструкции антенны в многодиапазонных радиотехнических устройствах при сильных габаритных ограничениях.

**Ключевые слова:** электрически малая антенна, добротность антенны, шлейфовая антенна, спасательный радиомаяк

## I. ВВЕДЕНИЕ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Современные поисково-спасательные системы нуждаются в компактных решениях конструкций аварийных радиомаяков. В настоящей работе в качестве рабочих диапазонов использовались доступные практически во всем мире ОВЧ и УВЧ диапазоны, а именно частоты системы КОСПАС (Космическая Система Поиска Аварийных Судов)-САРСАТ (SARSAT – Search And Rescue Satellite-Aided Tracking) 406,0–406,1 МГц [1] и частоты поисково-спасательных служб 121,5 / 243,0 МГц [1]. Одной из основных частей передатчиков аварийных сигналов является многодиапазонная излучающая антенна, располагающаяся в радиопрозрачном герметичном кожухе.

Разрабатываемая антенна должна соответствовать требованиям к размерам, приведенным на рис. 1, а также использовать один вход для всех рабочих диапазонов. Требуемые относительные размеры антенны, приведенные к длине волны, для частоты 121,5 МГц составляют  $0,11\lambda \times 0,02\lambda$ , для частоты 406 МГц –  $0,38\lambda \times 0,07\lambda$ . В таких заданных габаритных ограничениях необходимо добиться следующих характеристик излучения антенны: диаграмма направленности (ДН) слабонаправленная с коэффициентом усиления (КУ) не менее -8 дБн в диапазоне ОВЧ и -2 дБн в диапазоне УВЧ. КСВн в рабочей полосе частот не более 1.5.

Физический размер слабонаправленных антенн (диполи, рамки) определяется длиной волны, что в случае ОВЧ и УВЧ диапазонов приводит к невозможности использования подобных резонансных антенн в составе компактных радиомаяков, так как излучающий элемент должен иметь низкий профиль и малые поперечные размеры.

Под электрически малой антенной (ЭМА) подразумевается антенна, размеры которой намного меньше длины волны на ее рабочей частоте. Антенна на рис. 1 заключена внутри воображаемой сферы радиусом  $a$ , обладающей минимальными размерами и описывающей антенну, расположенную на проводящей поверхности. Это так называемая сфера Чу [2].

Одним из критериев ЭМА является условие Виллера [3]:

$$ka \leq 1 \quad (1)$$

где  $k=2\pi/\lambda$  – волновое число в свободном пространстве.

Более строгим является условие [4]:

$$ka \leq 0.5 \quad (2)$$

Для разрабатываемой антенны параметр  $ka_{121,5} = 0.36$ , что относит её к классу ЭМА, обладающих существенными ограничениями по полосе частот согласования и достижимому КУ.

Однако основная сложность разработки состоит в том, что существует сильное ограничение на высоту антенны ( $0,02\lambda_{121,5}$ , рис. 1), что делает невозможным использование всей сферы Чу для достижения оптимальных характеристик по рабочей полосе согласования и КУ. В данной работе описано несколько

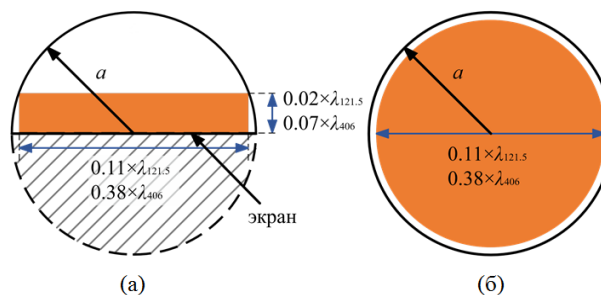


Рис. 1. Габаритные ограничения разрабатываемой антенны: вид сбоку (а), вид сверху (б)

методов и подходов для создания ЭМА для достижения приемлемых характеристик излучения.

## II. ПАРАМЕТРЫ ЭМА И ИХ ОЦЕНКИ

Для анализа возможных вариантов антенны аварийного радиопередатчика необходимо оценить наиболее важные при проектировании характеристики ЭМА: добротность  $Q$ , коэффициент полезного действия (КПД)  $\eta$ , максимально достижимую полосу рабочих частот антенны  $BW_{max}$  в зависимости от размера антенны по отношению к рабочей длине волны ( $ka$ ).

Наименьшая возможная добротность  $Q_{min}$ , часто называемая пределом Чу, определяется как [4]:

$$Q_{min} = \eta \left( \frac{1}{(ka)^3} + \frac{1}{(ka)} \right) \quad (3)$$

Для случая неизвестной антенны мы полагаем значение КПД  $\eta = 1$ . Таким образом, при настоящих ограничениях (рис. 1) получаем значение  $Q_{min} = 23,5$ . Важно отметить, что добротность ЭМА часто ошибочно принимается равной этой нижней границе. Добротность всех ЭМА будет больше этого значения.

Максимально достижимая относительная полоса пропускания антенны по заданному уровню КСВн может быть определена в зависимости от размера антенны по формуле [4]:

$$FBW_{max} = \frac{1}{\eta} \frac{2\sqrt{\beta}(ka)^3}{1 + (ka)^2} \cdot \sqrt{\beta} = \frac{s-1}{2\sqrt{s}} \quad (4)$$

где  $s$  – значение требуемого КСВн.

Для  $\eta = 1$ ,  $s = 1,5$ , для частоты 121,5 МГц получаем максимально достижимую полосу пропускания антенны  $BW_{max} = 2$  МГц.

КПД антенны можно охарактеризовать через сопротивление излучения  $R_r$  и потерь  $R_l$  [4]:

$$\eta(\omega) = \frac{R_r(\omega)}{R_r(\omega) + R_l(\omega)} \quad (5)$$

Для коротких монополюсных антенн сопротивление излучения будет уменьшаться с уменьшением высоты антенны  $h$  как квадрат отношения к длине волны [4]:

$$R_r \approx 40\pi^2 \left( \frac{h}{\lambda} \right)^2 \quad (6)$$

Следовательно, при конечных омических потерях КПД, а вместе с ним и КУ, будут снижаться при понижении профиля антенны вследствие уменьшения сопротивления излучения.

Таким образом, при заданных габаритных ограничениях максимально достижимая полоса антенны составляет 2 МГц, что делает невозможным разработку широкополосного антенного устройства, охватывающего все рабочие диапазоны с относительной полосой согласования не менее 108 % (121,5–406,1 МГц). Для определения возможных габаритов требуемых широкополосных вариантов в работе были рассмотрены некоторые конструкции малогабаритных широкополосных антенн.

## III. ШИРОКОПОЛОСНЫЕ ВАРИАНТЫ АНТЕННЫ РАДИОМАЯКА

При разработке антенн УВЧ диапазона большое распространение получили моноконусные антенны. В работе [5] рассматривается один из таких вариантов электрически малой моноконусной антенны диапазона 0,47–6 ГГц, и высотой 60 мм. Широкая полоса согласования антенны и низкопрофильность достигается за счет применения емкостного кольца на вершине конуса и трёх наклонных закорачивающих стержней. Согласование в рассматриваемой полосе частот для данного варианта антенны (рис. 2) достигается при минимальных габаритах 340×1060 мм (или  $0,14\lambda \times 0,43\lambda$ , где  $\lambda$  – длина волны самой низкой рабочей частоты), что не удовлетворяет требованию к размерам антенны.

Исследованные модификации конусной антенны, такие как гофрирование и сложение конуса в меандр, не позволили существенно сократить размеры антенны до необходимых, так как рабочая полоса антенны определяется внешним диаметром конуса и экрана, и в меньшей степени площадью поверхности конуса.

В работе [6] исследовалась сверхширокополосная кольцевая антенна, состоящая из вогнутого цилиндра, четырех закорачивающих стержней, верхнего диска и резонансной полости. Такая конструкция обеспечивает генерацию нескольких смежных частотных резонансов, что увеличивает полосу пропускания антенны до 54 %. Однако, размеры антенны все еще превышают требуемые и составляют  $0,10\lambda \times 0,52\lambda$ .

Ещё один метод расширения рабочей полосы антенны при относительно малых габаритах рассмотрен в [7]. Конструкция предложенной антенны состоит из монополя, дополнительной пластины между монополем и его плоскостью заземления и нескольких закорачивающих стержней. Антенна резонирует на двух частотах, определяемых стержнями и пластиной, а правильное разделение резонансов приводит к работе в широком диапазоне частот. Антенна обеспечивает полосу пропускания 17 % при размерах  $0,03\lambda \times 0,23\lambda$ .

Анализ существующих вариантов малогабаритных широкополосных антенн показывает, что при разработке возможно достичь либо желаемой полосы антенны при существенно больших габаритах и весе, либо обеспечить компактные размеры при недостаточной полосе согласования антенны. Таким образом, требуемых характеристик антенны в заданных ограничениях возможно удастся достичь в случае многорезонансного (многодиапазонного) узкополосного варианта.

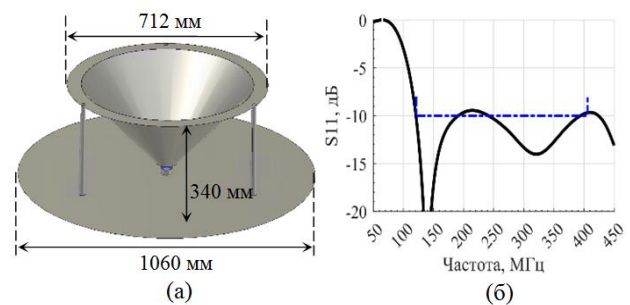


Рис. 2. Модель моноконусной антенны (а) и результаты моделирования коэффициента отражения (б)

#### IV. УЗКОПОЛОСНЫЕ ВАРИАНТЫ АНТЕННЫ

Монопольная антенна – антенна самой простой формы. Резонанс монополя достигается при высоте антенны, примерно равной четверти рабочей длины волны [8]. Однако, высота в четверть длины волны ограничивает применение штыревых монопольных антенн там, где необходима низкопрофильная конструкция. Широко используются модификации монополей, при которых их высоту уменьшают посредством сгибания антенны (рис. 3). Примером таких антенн служат Inverted L-Antenna (ILA) и Inverted F-Antenna (IFA).

По мере уменьшения высоты монополя его согласование ухудшается, такие антенны с низкими профилями имеют более высокие значения добротности, что затрудняет согласование и приводит к узкой полосе. В IFA для поддержания хорошего согласования к точке питания вводится L-образный шлейф, вертикальная часть которого заземлена (антенна так же носит название шлейфовой). К преимуществам данной антенны относятся низкопрофильность, компактность, а также простота согласования с активным импедансом без дополнительных цепей. Однако рабочая полоса частот IFA является узкой из-за высокого значения добротности антенны.

Как и простой монополю, IFA имеет резонанс при длине антенны примерно равной  $\lambda/4$ . Для получения нескольких резонансов в IFA вводят паразитные элементы [8], а также используют ветвления главного излучателя [9], длины которых и определяют дополнительные частотные резонансы.

Таким образом, многодиапазонный вариант F-антенны был выбран в качестве варианта для дальнейшего исследования.

#### V. РАЗРАБОТКА МНОГОДИАПАЗОННОЙ ЭМА

Для размещения антенны в требуемые габариты предлагается использовать сгиб F-антенны не только в вертикальной плоскости, но и в горизонтальной (например, по периметру кожуха устройства), а также ветвления для получения многорезонансной частотной характеристики. Это возможно осуществить с помощью изогнутой проволоки или металлического листа специальной формы, а также с использованием технологии гибких печатных плат (рис. 4). Однако, с целью повышения технологичности производства антенны предпочтительно использование плоской IFA (PIFA – Planar Inverted F-Antenna), так как она может быть изготовлена с использованием промышленных фольгированных диэлектриков, что облегчает процесс изготовления и повышает повторяемость характеристик изготовленных образцов. Другой не менее важной причиной отказа от конструкций, приведенных на рис. 4 (а, б), является их меньшая высота над экраном, что приведет к дополнительному снижению полосы антенны.

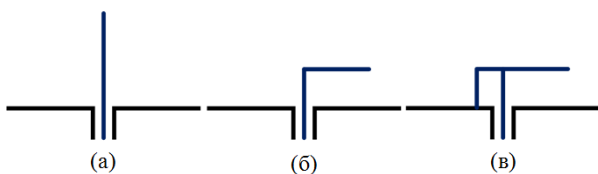


Рис. 3. Примеры модификации прямого монополя: монополю (а), ILA (б), IFA (в)

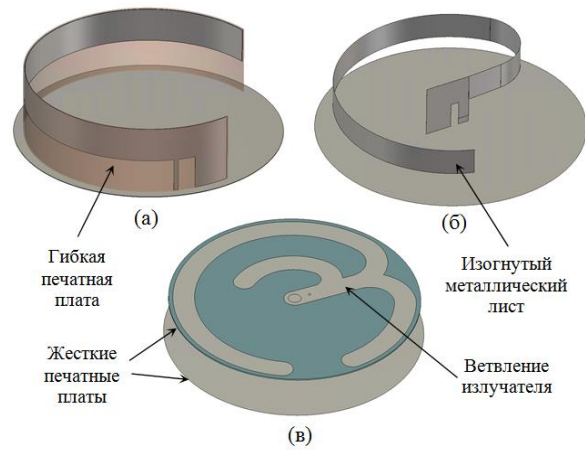


Рис. 4. Примеры размещения F-антенны в условиях габаритных ограничений

В разработанном варианте антенна представляет собой комбинацию двух однослойных печатных плат, верхней (излучающей) и нижней (экран), диаметрами 250 мм и 260 мм соответственно, и находящимися друг от друга на расстоянии 47 мм (рис. 5). На верхней плате расположен излучающий полосок с тремя ветвями, на каждой ветви предусмотрены регулировочные полоски для более точной подстройки на этапе тестирования. Также на излучателе расположен набор отверстий для запайки жилы коаксиального кабеля, посредством которого и осуществляется питание антенны. Точка возбуждения выбирается при настройке. Верхняя и нижняя платы соединяются с помощью латунной стойки.

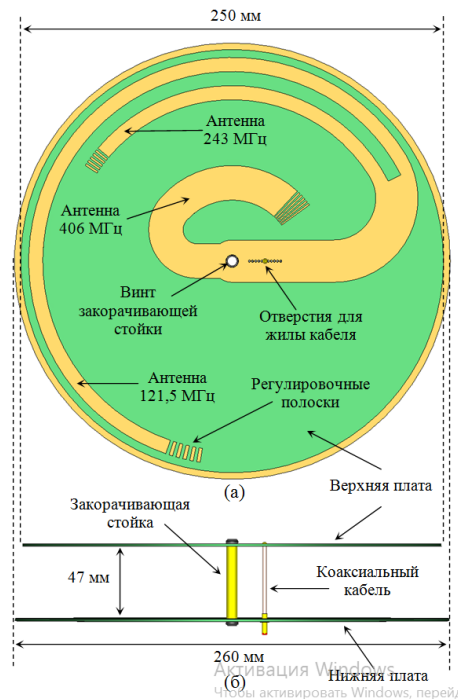


Рис. 5. Геометрия разрабатываемой антенны: вид сверху (а), вид сбоку (б)

Результаты моделирования коэффициента отражения и диаграммы направленности показаны на рис. 6. Следует отметить, что ветви антенны оказывают сильное влияние на рабочие полосы друг друга, что связано с единой точкой запитки для всех трёх частот. Однако, данной проблемы можно избежать, разделяя антенны и соответствующие им входы на нижней плате с помощью делителя или дуплексера.

По результатам моделирования был изготовлен прототип антенны, печатные платы которого выполнены на материале FR-4 толщиной 1.5 мм и толщиной фольги 18 мкм. Внешний вид антенны показан на рис. 7 (а).

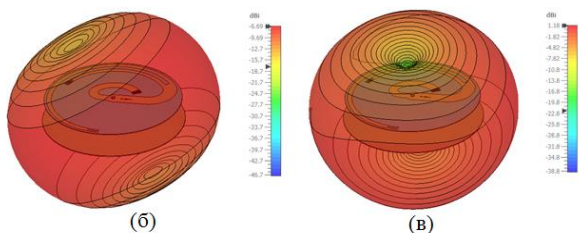
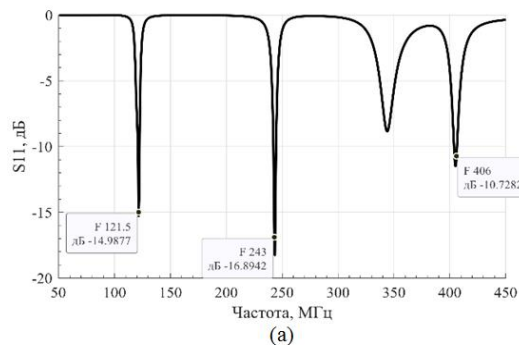


Рис. 6. Результаты моделирования коэффициента отражения (а) и диаграммы направленности для частот 121,5 МГц (б) и 406 МГц (в) разрабатываемой антенны

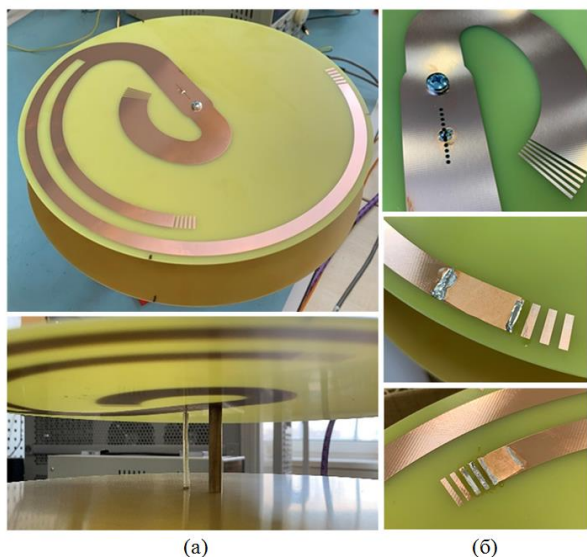


Рис. 7. Фотографии прототипа антенны: собранный образец антенны (а), процесс настройки (б)

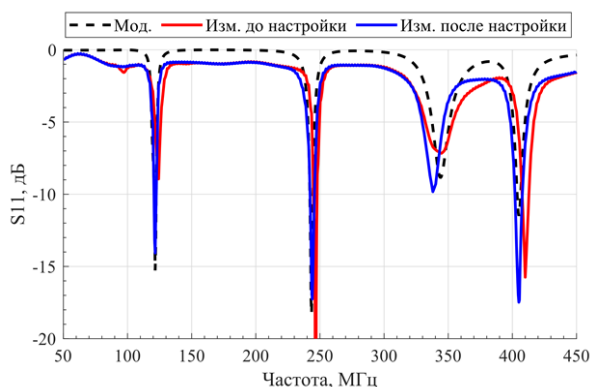


Рис. 8. Сравнение результатов моделирования и измерений F-антенны

Результаты измерения коэффициента отражения в сравнении с моделированием показаны на рис. 8. При первоначальном тестировании антенны резонансы смещены вверх по частоте, это говорит о том, что требуется только увеличение длин излучающих плеч антенны. Данный эффект объясняется предварительным укорочением излучающих полосков относительно оптимальной длины для обеспечения широкого диапазона перестройки по частоте. С помощью подстроечных элементов путем напайки медной фольги была произведена настройка антенны на резонансные частоты (рис. 7 б). Измерение КПД антенны проводилось методом шляпы Виллера [3], минимальное значение КПД для частоты 121,5 МГц составило -4,6 дБ, что удовлетворительно согласуется с требуемым значением КУ разрабатываемой антенны.

## VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном исследовании представлены этапы разработки ЭМА, излучающей на частотах поисково-спасательных служб. Рассмотрены подходы, обеспечивающие работу антенны в трёх частотных диапазонах при существенных ограничениях на высоту антенны. По результатам анализа этих подходов предложена и исследована модификация многодиапазонной перевернутой F-антенны, обладающей необходимыми характеристиками излучения в условиях массогабаритных ограничений. Измерения прототипа подтвердили, что разработанная ЭМА обеспечивает работу радиомаяка на всех заданных частотах.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] International Cospas-Sarsat Programme. Available at: <https://www.cospas-sarsat.int/>
- [2] Volakis J., Chen C., Fujimoto K. Small antennas: Miniaturization techniques and applications. Mc Graw Hill, 2010.
- [3] Wheeler H. A. Fundamental limitation of small antennas. Proceedings of the IRE, Dec. 1947, pp. 1479-1488.
- [4] Volakis J. Antenna Engineering Handbook. McGraw-Hill Companies, 2007.
- [5] S. Zhou, J. Ma, J. Deng, and Q. Liu. A low-profile and broadband conical antenna. Progress In Electromagnetics Research Letters, Vol. 7, 97-103, 2009. p. 97-103.
- [6] Yong Zhong Zhu. Design of an ultrawideband uhf embedded annular slot antenna. Microwave and optical technology letters. Vol. 55, No. 3, March 2013 p. 680-682.
- [7] Akhoondzadeh-Asl, L., Hill, J., Laurin, J.-J., & Riel, M. Novel low profile wideband monopole antenna for avionics applications. 2013. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 61(11), 5766-5770.
- [8] Zhi Ning Chen and Michael Y. W. Chia. Broadband Planar Antennas. Design and Applications. John Wiley & Sons Ltd, 2006.
- [9] Kyohei Fujimoto, Koichi Ito. Antennas for Small Mobile Terminals. Artech house, 2018.