

УДК 612.396.674.1

## АНТЕННА СУДОВОЙ ЗЕМНОЙ СТАНЦИИ СИСТЕМЫ INMARSAT-C

В. В. Головин, Ю. Н. Тыщук, Ю. П. Михайлюк, И. Л. Афонин

Севастопольский государственный университет,  
299053, г. Севастополь, ул. Университетская, д.33

Статья поступила в редакцию 8 октября 2019 г.

**Аннотация.** В статье представлены результаты разработки и исследования малогабаритной антенны земной станции системы INMARSAT-C с ненаправленной в верхнем полупространстве и равномерной в азимутальной плоскости диаграммой направленности, с близкой к круговой поляризацией поля излучения в пределах всего верхнего полупространства. Представлены результаты численного моделирования характеристик антенны с учётом элементов конструкции.

**Ключевые слова:** спиральная антенна, ненаправленное излучение, круговая поляризация, INMARSAT-C антенна.

**Abstract.** This paper presents the results of the development and theoretical investigation of compact weakly directional antenna of ship earth station system INMARSAT-C, which differs from the known prototypes by especially qualitative characteristics of the circular polarization field.

The antenna design is based on the four-pass spiral structure with quadrature emitter excitation. Helix emitters are characterized by geometric parameters: the initial and final winding angle of spirals  $\beta_i$  and  $\beta_f$ , the diameter of the cylinder  $d$ , the number of turns of spirals  $n$ . The following values are experimentally obtained:  $\beta_i=13^\circ \dots 15^\circ$ ;  $\beta_f=27^\circ \dots 33^\circ$ ;  $d=(0.18 \dots 0.26)\lambda_0$ ;  $n=1 \dots 2$ . The excitation mode of spiral emitters provides the formation of circular polarization, which is opposite to the winding direction of spiral emitters in the direction of rotation.

A distinctive feature of the developed antenna is that due to the use of irregular winding angle radiating helical structures antenna operation mode is formed, which provides the highest quality polarization characteristics. On the each of the helical

conductors the amplitude-phase current distributions are formed. They characterized by current antinodes in two regions. While the one region determines the radiation field with circular polarization in the direction of the axis Z, the other region determines the radiation field with circular polarization in the directions close to the plane XY. In this case, the antenna is characterized by enough uniform radiation in the upper half-space of the field with polarization as close to circular as possible.

We investigated the radiation characteristics and input characteristics of the antenna in CAD in the frequency range 1.53 — 1.65 GHz, taking into account the influence of the dielectric material of the support cylinder and the radioparent cover. It is shown that in the vertical plane the antenna is characterized by the radiation pattern of the width 180° at the level of -3 dB and a high ellipticity coefficient within the entire upper half-space. In this case, the antenna is characterized by high-quality matching at the inputs of spiral emitters with  $VSWR \leq 1.5$ .

**Key words:** helical antenna, omnidirectional radiation, circular polarization, INMARSAT-C antenna.

## Введение

Высокий уровень интеграции телекоммуникационных технологий в судостроительную отрасль определил одно из приоритетных направления её развития, связанное с возросшим интересом к маломерным судам, на основе которых сегодня ведутся разработки безэкипажных транспортных средств [1]. Ввиду особенностей работы, присущих данному типу судов, формируются требования к характеристикам размещаемого на них оборудования, в том числе к антенным системам, обеспечивающим работу различных бортовых комплексов — небольшие габаритные размеры, качественные поляризионные характеристики поля излучения в требуемых секторах углов в вертикальной и горизонтальной плоскостях, в диапазонах частот и др.

Ввиду широкого использования в оборудовании судовых земных станций (СЗС) системы INMARSAT-C слабонаправленных антенн с круговой поляризацией поля излучения, реализованных на основе многозаходных

спиральных излучающих структур, вопросам разработки таких антенн с улучшенными характеристиками уделяется существенное внимание [2] — [6].

В этих и других аналогичных разработках присутствуют недостатки: большие габаритные размеры, низкий коэффициент эллиптичности в направлениях близких к горизонту, недостаточное согласование в рабочем диапазоне частот и т.д.

Так в [6] предлагается конструкция четырехзаходной цилиндрической спиральной антенны, которая характеризуется дискретным (от витка к витку) увеличением угла намотки спиральных проводников. При этом в широком секторе углом формируется качественная круговая поляризация, однако, данная антенна характеризуется достаточно высокой неравномерностью излучения в пределах ширины главного лепестка диаграммы направленности.

Актуальной задачей является разработка конструкции антенны, обеспечивающей сравнительно с существующими аналогами комплексное улучшение характеристик при сохранении относительно небольших габаритных размеров и простоты ее технологического исполнения.

## **1. Конструктивное исполнение и режим работы антенны**

Для решения поставленной задачи предлагается сформировать антенную систему на основе спиральных проводников, характеризующихся линейным приращением угла намотки спиральных проводников, при этом диапазон увеличения угла намотки от начала излучателей до их внешнего конца составляет  $15^\circ$  —  $20^\circ$ . Подобный подход при определённом режиме возбуждения излучателей позволяет реализовать нестандартный режим работы многозаходной спиральной антенны и ощутимо улучшить поляризационные характеристики антенны, по сравнению с существующими аналогами, при сохранении в рабочем диапазоне частот качественного согласования на входе антенны.

Разработанная четырёхзаходная нерегулярная цилиндрическая спиральная антенна (рис. 1) состоит из четырёх одинаковых цилиндрических спиральных проводников 1a, 1b, 1c, 1d с переменным углом намотки, которые размещаются

на каркасе 4, установленном над экраном 3, при этом с обратной стороны экрана размещается распределительное устройство 5, предназначенное для возбуждения спиральных проводников в точках 2a, 2b, 2c, 2d, расположенных вблизи поверхности экрана 3.

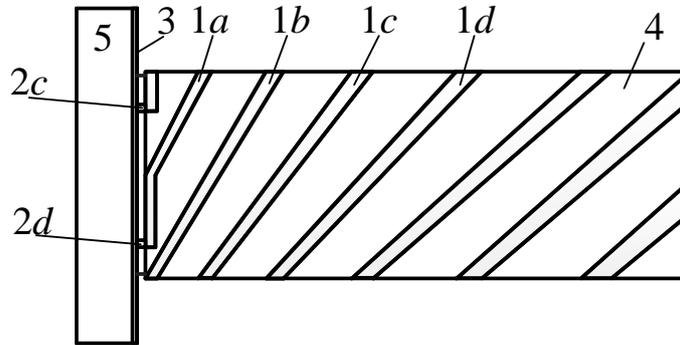


Рис. 1. Модель антенны на диэлектрическом цилиндре.

Трёхмерная модель системы нерегулярных цилиндрических спиральных излучателей над экраном показана на рисунке 2.

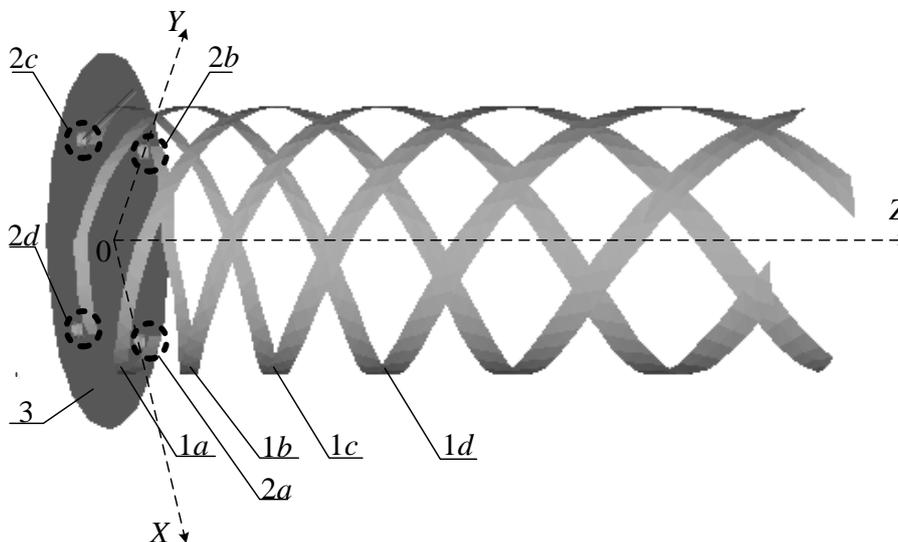


Рис. 2. Трёхмерная модель системы нерегулярных цилиндрических спиральных излучателей, размещённых над экраном.

Геометрия спиральных проводников описывается в параметрической форме соотношениями, приведёнными в табл. 1.

Табл. 1. Параметрическое описание спиральных излучателей

№ Проводника	Правосторонняя намотка спиральных проводников	Левосторонняя намотка спиральных проводников
1a	$x(\alpha) = a \cdot \cos \alpha;$ $y(\alpha) = a \cdot \sin \alpha;$ $z(\alpha) = a \cdot \alpha \cdot \operatorname{tg}[\beta(\alpha)].$	$x(\alpha) = a \cdot \cos \alpha;$ $y(\alpha) = -a \cdot \sin \alpha;$ $z(\alpha) = a \cdot \alpha \cdot \operatorname{tg}[\beta(\alpha)].$
1b	$x(\alpha) = -a \cdot \sin \alpha;$ $y(\alpha) = a \cdot \cos \alpha;$ $z(\alpha) = a \cdot \alpha \cdot \operatorname{tg}[\beta(\alpha)].$	$x(\alpha) = a \cdot \sin \alpha;$ $y(\alpha) = a \cdot \cos \alpha;$ $z(\alpha) = a \cdot \alpha \cdot \operatorname{tg}[\beta(\alpha)].$
1c	$x(\alpha) = -a \cdot \cos \alpha;$ $y(\alpha) = -a \cdot \sin \alpha;$ $z(\alpha) = a \cdot \alpha \cdot \operatorname{tg}[\beta(\alpha)].$	$x(\alpha) = -a \cdot \cos \alpha;$ $y(\alpha) = a \cdot \sin \alpha;$ $z(\alpha) = a \cdot \alpha \cdot \operatorname{tg}[\beta(\alpha)].$
1d	$x(\alpha) = a \cdot \sin \alpha;$ $y(\alpha) = -a \cdot \cos \alpha;$ $z(\alpha) = a \cdot \alpha \cdot \operatorname{tg}[\beta(\alpha)].$	$x(\alpha) = -a \cdot \sin \alpha;$ $y(\alpha) = -a \cdot \cos \alpha;$ $z(\alpha) = a \cdot \alpha \cdot \operatorname{tg}[\beta(\alpha)].$

В таблице 1 используются обозначения:

$\alpha$  — центральный угол, изменяющийся от 0 до  $2\pi n$ ;

$n$  — количество витков спиральных проводников;

$\beta(\alpha)$  — угол намотки витков спиральных проводников, который является функцией от  $\alpha$  и изменяется от начального  $\beta_{\text{НАЧ}}$  до конечного угла  $\beta_{\text{КОН}}$ ;

$a = d/2$  — радиус образующего спирали цилиндра;

$d$  — диаметр образующего спирали цилиндра.

Значения углов намотки  $\beta_{\text{НАЧ}}$  и  $\beta_{\text{КОН}}$ , диаметра  $d$ , количества витков  $n$  выбираются из экспериментально полученных соотношений:

$$\beta_{\text{НАЧ}} = 13^\circ \dots 15^\circ; \beta_{\text{КОН}} = 27^\circ \dots 33^\circ; d = (0,18 \dots 0,26) \lambda_0; n = 1 \dots 2,$$

где  $\lambda_0$  — средняя длина волны в рабочем диапазоне частот.

Положение каждого из спиральных проводников в составе антенны определяется поворотами спиральных проводников вокруг оси антенны (ось OZ на рисунке 2) на углы, кратные  $90^\circ$ .

На входы четырёх спиральных проводников, в точки 2a, 2b, 2c, 2d, подаются токи  $i_{2a}, i_{2b}, i_{2c}, i_{2d}$ :

$$i_{2a} = I_{2a} e^{j\varphi_{2a}} ; i_{2b} = I_{2b} e^{j\varphi_{2b}} ; i_{2c} = I_{2c} e^{j\varphi_{2c}} ; i_{2d} = I_{2d} e^{j\varphi_{2d}} ,$$

где  $I_{2a}, I_{2b}, I_{2c}, I_{2d}$  — амплитуды токов, подводимых к входам соответствующих по номеру спиральных излучателей;

$\varphi_{2a}, \varphi_{2b}, \varphi_{2c}, \varphi_{2d}$  — начальные фазы токов, подводимых к входам соответствующих по номеру спиральных излучателей.

Для возбуждения каждого из четырех спиральных проводников амплитуды токов выбираются с учётом соотношения

$$I_{2a} = I_{2b} = I_{2c} = I_{2d} .$$

Поляризационная структура поля излучения четырёхзаходной цилиндрической спиральной антенны определяется соотношениями начальных фаз токов, подводимых ко входам каждого из четырёх спиральных излучателей. Для возбуждения каждого из четырех спиральных излучателей начальные фазы токов выбираются относительно друг друга в квадратуре и в определённой последовательности, представленной в табл. 2.

Табл. 2. Варианты начальных фаз токов возбуждения спиральных заходов антенны при их различных направлениях намотки.

	Правосторонняя намотка		Левосторонняя намотка	
	$E_{\text{прав}}$	$E_{\text{лев}}$	$E_{\text{лев}}$	$E_{\text{прав}}$
$\varphi_{2a}$ , град	0	0	0	0
$\varphi_{2b}$ , град	90	270	90	270
$\varphi_{2c}$ , град	180	180	180	180
$\varphi_{2d}$ , град	270	90	270	90

В основном при построении на основе спиральных излучателей антенных систем с круговой поляризацией излучения направление намотки проводников выбирается согласованным с требуемым направлением вращения вектора напряженности электрического поля и выбирается соответствующая фазировка токов возбуждения. Однако, в разработанной антенне начальные фазы токов

выбираются для формирования круговой поляризации излучения не согласованной по направлению вращения с направлением намотки спиральных излучателей. То есть при левосторонней намотке спиральных излучателей формируется правосторонняя круговая поляризация излучения и наоборот.

Отличительной особенностью разработанной антенны является то, что за счёт введения нерегулярных по углу намотки излучающих структур формируется режим работы системы из четырех спиральных заходов, при котором обеспечиваются наиболее качественные поляризационные характеристики.

Режим формирования поляризационной структуры поля излучения антенны представлен на рисунке 3, а.

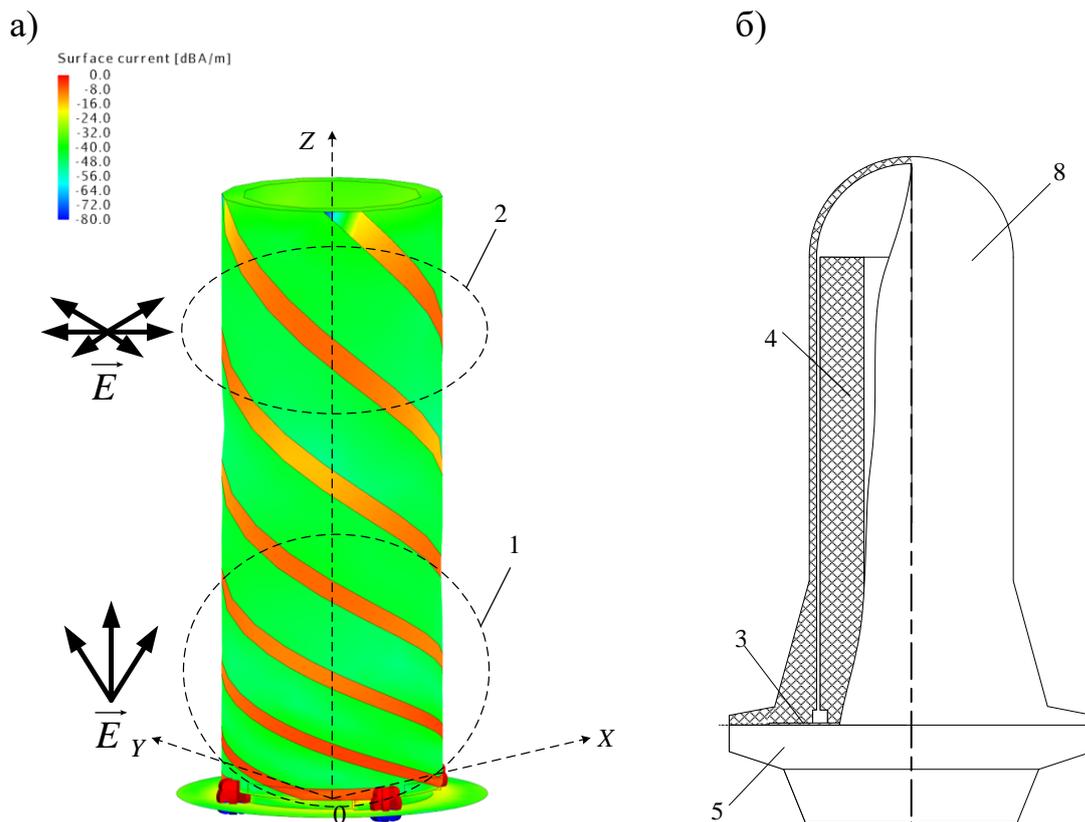


Рис. 3. Зоны формирования поляризационной структуры поля излучения антенны (а) и модель антенны с радиопрозрачным обтекателем (б).

Из-за нерегулярности намотки цилиндрических спиральных проводников с заданными значениями их геометрических параметров, размещения спиральных проводников на одной оси и квадратурного возбуждения

спиральных проводников, на каждом из спиральных проводников формируется амплитудно-фазовое распределение тока, которое характеризуется пучностями тока на участках с углами намотки, близкими к  $\beta_{\text{кон}}$  (рисунок 3,а, область 2) и к  $\beta_{\text{нач}}$  (рисунок 3,а область 1), при этом область 1 определяет излучение поля с круговой поляризацией в направлении оси OZ, область 2 определяет излучение поля с круговой поляризацией в направлениях, близких к плоскости экрана XOY. Поскольку в каждой из областей в отдельности значения амплитуд токов в пучностях на проводниках равны друг другу, а разности фаз этих токов определяются режимом возбуждения спиральных проводников в квадратуре, то антенна характеризуется достаточно равномерным излучением в верхнем полупространстве поля с поляризацией максимально близкой к круговой.

Учитывая особенности эксплуатации антенны в составе оборудования СЗС системы Inmarsat-C, конструкция антенны может содержать радиопрозрачный обтекатель. На рисунке 3,б показана исследуемая модель антенны с радиопрозрачным обтекателем 8.

## **2. Анализ характеристик четырёхзаходной нерегулярной цилиндрической спиральной антенны**

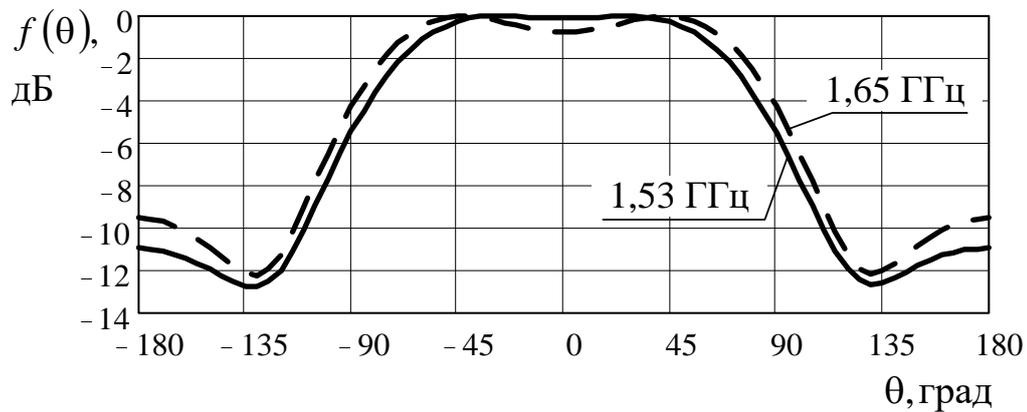
В электродинамическом САПР проведены теоретические исследования характеристик излучения и входных характеристик разработанной четырехзаходной нерегулярной цилиндрической спиральной антенны без обтекателя и при его наличии.

На рисунке 4,а показаны результирующие диаграммы направленности антенны в плоскости XOZ (см. рисунок 3,а). На рисунке 4,б показаны результирующие диаграммы направленности антенны в плоскости XOY (см. рисунок 3,а).

Расчеты проводились в диапазоне частот 1,53 — 1,65 ГГц. Ширина главного лепестка построенной в круговом базисе диаграммы направленности по уровню  $-10$  дБ в плоскости XOZ в рабочем диапазоне частот изменяется в пределах  $220^\circ$  —  $230^\circ$ . По уровню  $-3$  дБ ширина главного лепестка ДН составляет  $170^\circ$  —  $180^\circ$ . Неравномерность диаграммы направленности в

азимутальной плоскости не превышает 0,15 дБ. Диаграммы направленности антенны в плоскостях XOZ и YOZ практически одинаковы, то есть объемная диаграмма направленности антенны характеризуется осевой симметрией. На рисунке 5 показаны угловые зависимости коэффициента эллиптичности в плоскости XOZ. В рабочем диапазоне частот в пределах *всего* верхнего полупространства антенна характеризуется близкой к круговой поляризацией с коэффициентом эллиптичности  $K_{\varepsilon} = 0,8...0,98$ .

а)



б)

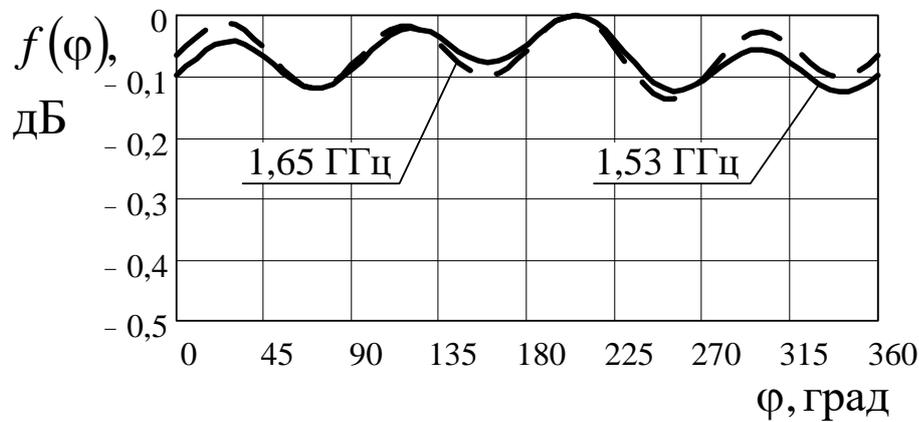


Рис. 4. Диаграммы направленности антенны в плоскости XOZ (а) и в плоскости XOY (б)

На рисунке 6,а показаны результирующие диаграммы направленности антенны в плоскости XOZ, рассчитанные на частоте 1,65 ГГц при наличии в конструкции антенны обтекателя и без использования обтекателя, показанного на рисунке 3,б.

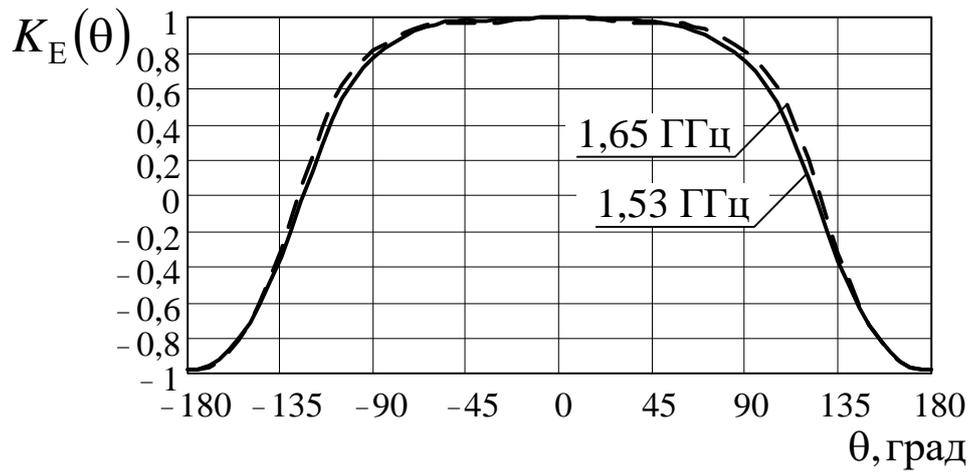
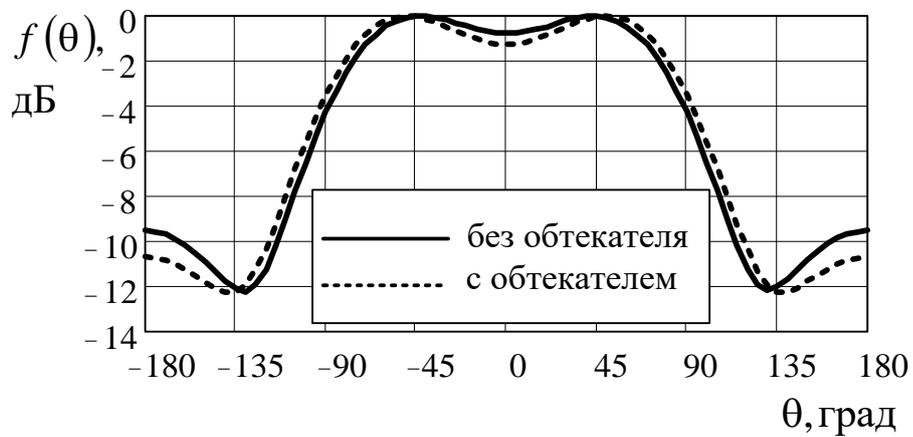


Рис. 5. Угловая зависимость коэффициента эллиптичности в плоскости XOZ

а)



б)

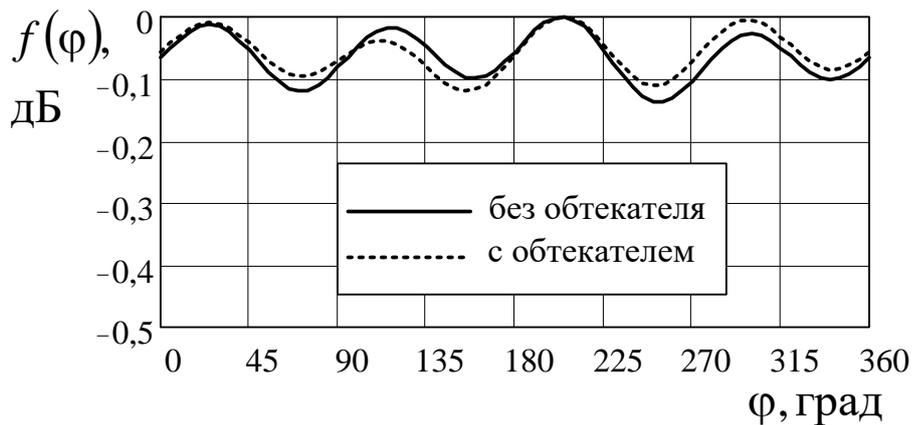


Рис. 6. Диаграммы направленности антенны в плоскости XOZ (а) и в плоскости XOY (б)

В пределах верхнего полупространства антенна характеризуется близкой к круговой поляризацией с коэффициентом эллиптичности  $K_E = 0,8...0,98$ .

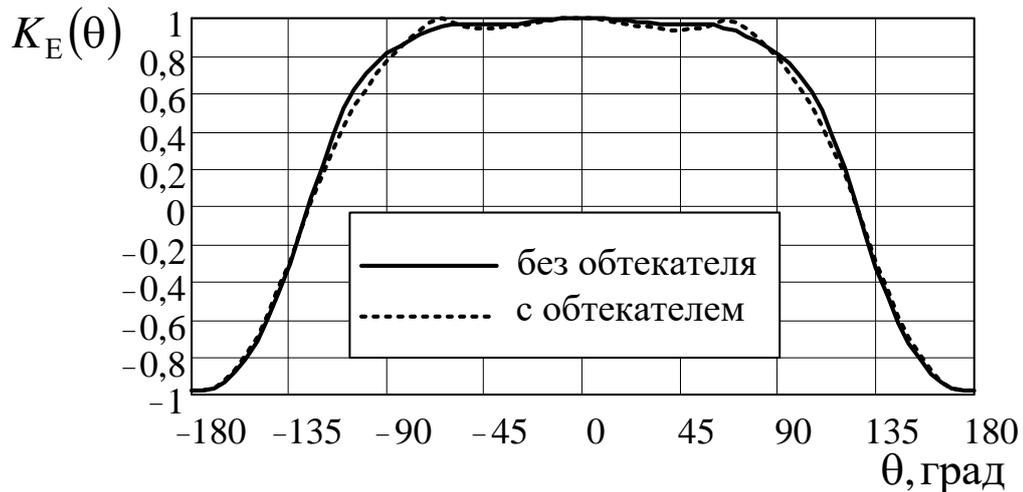


Рис. 7. Угловая зависимость коэффициента эллиптичности в плоскости XOZ с обтекателем и без него.

Установлено, что обтекатель, показанный на рис. 3,б, слабо влияет на характеристики излучения антенны.

На основании полученных результатов исследования можно заключить, что разработанная антенна характеризуется высоким значением коэффициента эллиптичности в пределах всего верхнего полупространства.

Анализ входных характеристик разработанной антенны показал, что в диапазоне частот 1,53 — 1,65 ГГц антенна на каждом из входов излучателей характеризуется близкими значениями входного сопротивления, при которых обеспечивается качественное согласование с  $K_{CTU} \leq 1,5$ .

## Выводы

Разработана модель ненаправленной в верхнем полупространстве малогабаритная антенна с круговой поляризацией поля излучения, предназначенная для использования в оборудовании судовых земных станций системы INMARSAT-C.

В качестве первичных излучателей используется система из четырех нерегулярных цилиндрических спиральных проводников. Для данной антенны рассчитаны собственные характеристики поля излучения и характеристики с учётом наличия радиопрозрачного диэлектрического обтекателя. Показано, что в вертикальной плоскости антенна характеризуется диаграммой

направленности с шириной  $180^\circ$  по уровню  $-3$  дБ и высоким значением коэффициента эллиптичности  $K_\Omega = 0,8...0,98$  в пределах всего верхнего полупространства. При этом антенна характеризуется качественным согласованием на входах спиральных излучателей с  $K_{СТУ} \leq 1,5$ .

Исследование выполнено при финансовой поддержке внутреннего гранта ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет» в рамках научного проекта № 525/06-31.

### Литература

1. Electric & Hybrid Marine Technology International [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.electrichybridmarinetechonology.com/online-magazines> (дата обращения 01.10.2019).
2. Вершков М.В. Судовые антенны / М.В. Вершков, О.Б. Миротворский. — Л.: Судостроение, 1990. — 304 с.
3. Пат. № 6011524 США, H01Q 1/36, H01O 11/08 Integrated antenna system. James W. Jervis. — № 6 011 524; заявлено 24.05.1994; опубл. 04.01.2000.
4. Пат. № 2 395 877 РФ, МПК Н 01 Q 11/00. Квадрифилярная антенна / Банков С. Е. (RU), Давыдов А.Г. (RU).— № 2 395 877; заявл. 22.07.2009; опубл. 27.07.2010, Бюл. № 21.
5. Пат. № 6 288 686 США, МПК Н 01 Q 1/36. Tapered Direct Fed Quadrifilar Helix Antenna / Michael J. Josypbiiko (USA).— № 6 288 686; заявл. 23.01.2000; опубл. 11.09.2001.
6. Пат. № 6 344 834 США, МПК Н 01 Q 1/36. Lowangle, Highangle Quadrifilar Helix Antenna / Michael J. Josypenko (Norwich). — № 6 344 834; заявл. 20.05.2000; опубл. 05.02.2002.

#### Для цитирования:

В. В. Головин, Ю. Н. Тыщук, Ю. П. Михайлюк, И. Л. Афонин. Антенна судовой земной станции системы INMARSAT-C. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. № 10. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/oct19/8/text.pdf>  
DOI 10.30898/1684-1719.2019.10.8