

Научная статья

УДК 621.396.71

DOI:10.31854/1813-324X-2022-8-3-57-71



Проектирование антенных полей передающих радиочентров декаметрового диапазона на основе сверхширокополосных антенных систем

- ✉ Василий Дмитриевич Пашкевич¹, pashkevich_vd@ntiradio.ru
- ✉ Валерий Михайлович Голубев¹, aleks-gol1311@yandex.ru
- ✉ Михаил Сергеевич Проценко², protsenkoms@gmail.com
- ✉ Михаил Владимирович Юрков¹, yurkov_mv@ntiradio.ru
- ✉ Павел Владимирович Прошин¹, proshin_pv@ntiradio.ru
- ✉ Виктория Игоревна Патяк¹, patyak_vi@ntiradio.ru
- ✉ Андрей Сергеевич Анохин³, vmfandrey@mail.ru

¹АО «Научно-технический институт «Радиосвязь»,
Санкт-Петербург, 198097, Российская Федерация

²Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. М.А. Бонч-Бруевича,
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

³Военно-морская академия,
Санкт-Петербург, 197045, Российская Федерация

Аннотация: Рассмотрено современное техническое состояние антенных полей коротковолновых стационарных передающих радиочентров. Сформулированы основные требования к антенным системам, которые должны применяться в составе передающих радиочентров для эффективного функционирования на трассах протяженностями 100–5000 км. С помощью методов электродинамического моделирования построены модели наиболее распространенных типов антенных систем КВ-диапазона – логопериодическая, ромбическая горизонтальная двойная, симметричный горизонтальный вибратор, исследованы их энергетические и неэнергетические характеристики. Предложены конструкции модифицированного варианта сверхширокополосной логопериодической структуры, функционирующей в частотном диапазоне 2–30 МГц, активной фазированной решетки, построенной на ее основе. Выполнено сравнение по энергетическим и неэнергетическим параметрам существующих и модифицированных, предлагаемых к замене вариантов антенных систем. Представлены результаты трассовых испытаний с использованием существующих и перспективных антенных систем, функционирующих на реальном объекте, с оценкой эффективности функционирования каждой системы на трассе средней протяженности (2100 км). По совокупности полученных расчетных и экспериментальных результатов предложен вариант построения высокочастотного тракта передающего радиочентра с использованием сверхширокополосных пирамидальных изогнутых логопериодических и штыревых антенн, активных фазированных антенных решеток на их основе с управляемыми диаграммами направленности, а также вариант компоновки антенного поля таких систем в составе объекта.

Ключевые слова: передающий радиочентр, активная фазированная антенная решетка, частотный диапазон, ионосферное распространение радиоволн, логопериодическая антенна, полуволновой горизонтальный вибратор, ромбическая антенна, трассовые испытания

Ссылка для цитирования: Пашкевич В.Д., Голубев В.М., Проценко М.С., Юрков М.В., Прошин П.В., Патяк В.И., Анохин А.С. Проектирование антенных полей передающих радиочентров декаметрового диапазона на основе сверхширокополосных антенных систем // Труды учебных заведений связи. 2022. Т. 8. № 3. С. 57–71. DOI:10.31854/1813-324X-2022-8-3-57-71

Design of Antenna Fields for HF Band Transmitting Radio Centers Based on Ultra-Wide-Band Antenna Systems

✉ Vasilij Pashkevich¹, pashkevich_vd@ntiradio.ru

Valeriy Golubev¹, aleks-gol1311@yandex.ru

Mikhail Protsenko², protsenkoms@gmail.com

Mikhail Yurkov¹, yurkov_mv@ntiradio.ru

Pavel Proshin¹, proshin_pv@ntiradio.ru

Victoria Patyak¹, patyak_vi@ntiradio.ru

Andrey Anohin³, vmfandrey@mail.ru

¹JSC Scientific and Technical Institute Radio Communication,
St. Petersburg, 198097, Russian Federation

²The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

³Kuznetsov Naval Academy,
St. Petersburg, 197022, Russian Federation

Abstract: *The current technical condition of antenna fields used in short-wave stationary transmitting radio centers is considered. The basic requirements for antenna systems used in radio centers to allow effective operation on routes having a length of 100–5000 km are formulated. Models for the most common types of HF-band antenna systems constructed using electrodynamic modeling methods, which include logoperiodic, rhombic horizontal double, symmetrical horizontal vibrator, are described together with their energy and non-energy characteristics. Designs for a modified version of an ultra-wide-band logoperiodic structure and active phased array operating in the frequency range of 2–30 MHz are presented. Energy and non-energy parameters of existing and modified antenna systems proposed for replacement are compared. Presented results of track tests using existing and prospective antenna systems operating on a real object include an assessment of the effectiveness of each system on an average-length radio track (2100 km). The developed approach to constructing a high-frequency path of a transmitting radio center using ultra-wide-band pyramidal curved logoperiodic and pin antennas is based on calculated and experimentally obtained results. Active phased antenna arrays with controlled directional patterns developed on their basis are presented along with an appropriate antenna field layout variant.*

Keywords: *transmitting radio center, active phased array antenna, frequency range, ionospheric propagation of radio waves, log-periodic antenna, half-wave horizontal vibrator, rhombic antenna, track tests*

For citation: Pashkevich V., Golubev V., Protsenko M., Yurkov M., Proshin P., Patyak V., Anohin A. Design of Antenna Fields for HF Band Transmitting Radio Centers Based on Ultra-Wide-Band Antenna Systems. *Proc. of Telecom. Universities*. 2022;8(3):57–71. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2022-8-3-57-71

Введение

В рамках концепции [1–3] построения (модернизации) передающих радиочастотных станционных узлов связи одной из основных задач является проектирование и компоновка антенного поля с выбором наиболее оптимальных антенно-фидерных устройств (АФУ) по энергетическим и неэнергетическим характеристикам с целью обеспечения максимально эффективного функционирования в составе обслуживаемых радиосетей и радионаправлений.

В настоящее время застройка и планировка антенных полей функционирующих радиочастотных станций определяется в том числе возможностями местности, отводимой для этих целей, и зависит от типов и электрических параметров применяемых антенн. Необходимость иметь антенны, перекрывающие все многочисленные рабочие азимуты радиочастотного расположения антенн и громоздким фидерным коммуникациям.

На передающих радиочастотных станциях для связи на малые (до 500 км) и средние (до 1000–2000 км)

дальности применяются слабонаправленные диапазонные антенны типа ВГ, ВГД, ВГДШ (вибратор горизонтальный диапазонный шунтовой), УГД и УГДШ (уголковая горизонтальная диапазонная и шунтовая антенны). Такие антенны, являясь симметричными горизонтальными излучателями с объемными вибраторами, имеют в горизонтальной плоскости круговую (УГД, УГДШ) диаграмму направленности в не более чем двух-трехкратном диапазоне частот и многолепестковую вне частотного диапазона. Для магистральных радиолиний протяженностями более 2000 км, как правило, применяются горизонтальные ромбические антенны различных типоразмеров [3–5]: например, РГД (ромб горизонтальный двойной).

Анализ технических решений, реализованных разработчиками антенных полей в 60–70-х гг. прошлого столетия, позволяет сделать вывод, что для каждого радионаправления с учетом протяженностей радиотрасс и азимутов проектировались АФУ с индивидуальными типоразмерами, в результате чего на объектах появились конструкции [5–7]:

- антенны РГД (типоразмеры: $\frac{65}{4} \times 1$; $\frac{65}{2,8} \times 0,6$; $\frac{70}{6} \times 1,25$ и др. с различными длинами сторон ромба);
- антенны ВГДШ (типоразмеры: $\frac{12}{14} \times 2$; $\frac{25}{16} \times 2$; $\frac{14}{16} \times 1,5$; $\frac{8}{12} \times 1,2$; $\frac{24}{25} \times 3$ и др.).

Приведенные типы передающих антенн в составе радиоцентров, как правило, не перекрывают частотный диапазон радиолинии, что приводит к необходимости строительства на заданном азимутальном направлении двух и более антенн типа ВГДШ, РГД для обеспечения маневрированием частотой радиоволн в зависимости от условий проведения сеансов радиосвязи.

Следствием такого подхода, а также поэтапным, по мере необходимости, возведением новых антенн явилось то, что антенное поле типового передающего радиоцентра, в противоречие требованиям, изложенным в [7], представляет собой многотипность антенн и неупорядоченность их взаиморасположения. Примеры таких антенных полей приведены на рисунке 1.

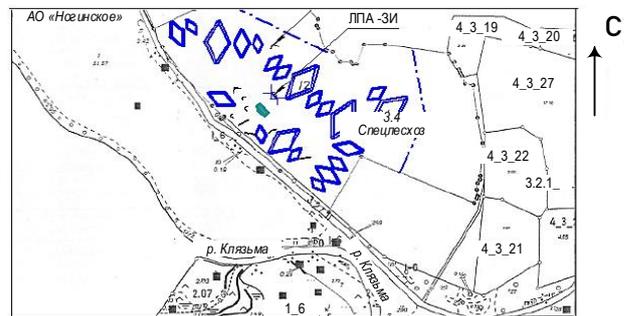
Таким образом, к насущным проблемам антенных полей настоящего времени следует отнести:

- многообразие типов и неупорядоченность расположения АФУ с разветвленным такелажом воздушных фидерных линий, пересекающихся между собой, отсутствие унификации типов; снижение компетенций обслуживающего персонала создает предпосылки к работе радиопередающих устройств на несущих частотах вне частотного диапазона АФУ [8], что приводит к преждевремен-

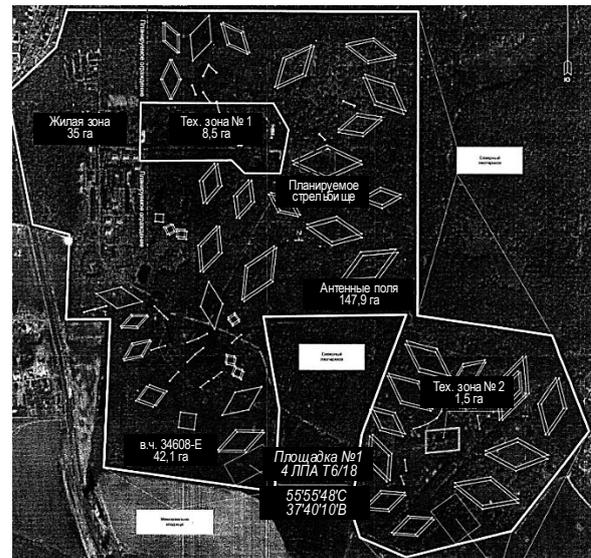
ному выходу их из строя при работе на рассогласованную нагрузку;

- применение нескольких типоразмеров АФУ с целью обеспечения работы во всем КВ-диапазоне для обслуживания одной радиолинии, что увеличивает площадь антенного поля;
- отсутствие в большинстве случаев на объектах резервных (аварийных) АФУ, резервирующих основные радионаправления.

Кроме того, остаются актуальными вопросы сокращения площадей антенного поля и устранение мачт с разветвленным такелажом из конструкции декаметровых (ДКМВ) антенн магистральных радиосвязей.



a)



b)

Рис. 1. Примеры антенных полей типовых радиоцентров КВ-диапазона: а) до трех антенн РГД для одной радиолинии; б) хаотичное расположение различных АФУ

Fig. 1. Examples of Antenna Fields HF Radio Centers: a) Three Antennas on One Radio Line; b) Chaotic Arrangement of Antennas

В случае разработки широкополосной декаметровой антенно-фидерной системы (АФС) реализуется возможность использовать ее в качестве типового элемента радиоцентра и осуществить фазирование излучения нескольких АФС с целью повышения коэффициента усиления передающих антенн и реализации принципа многократного использования АФС. Данное обстоятельство поз-

волит проектировать антенные поля в заметной степени более однородными и компактными.

С учетом указанной проблематики, рациональным путем модернизации антенного поля стационарного передающего радицентра, а также целью настоящей работы является:

- 1) обоснование и выбор унифицированного антенного излучателя, перекрывающего весь ДКМВ-диапазон, т. н. однолитерной антенны;
- 2) оценка электрических характеристик унифицированного антенного излучателя путем численного моделирования и экспериментальных работ;
- 3) сравнительный анализ энергетических и неэнергетических характеристик наиболее распространенных антенн ВГДШ, РГД с предложенным решением;
- 4) анализ результатов трассовых испытаний по оценке приращения эффективной изотропной излучаемой мощности (ЭИИМ), формируемой одиночным излучателем и активной фазированной антенной решеткой (АФАР) на его основе, сравнение с ЭИИМ, формируемой антеннами УГД, ВГДШ, РГД на трассе средней протяженности (2100 км);
- 5) выработка предложения по схмотехническому построению сегмента унифицированного высокочастотного тракта на базе предложенного излучателя и АФАР.

Дополнительно в [9] была рассмотрена и обоснована целесообразность применения штыревых антенн и АФАР на их основе в качестве как основных, так и резервных (аварийных) антенн, приведены результаты трассовых испытаний на трассе малой (650 км) протяженности. В рамках настоящей статьи в качестве дополнения к [9], приводят-

ся результаты трассовых испытаний таких антенн на трассе средней протяженности 2100 км.

Выбор унифицированного антенного излучателя

Анализ требований к организации КВ-радиосвязи типового передающего радицентра показал, что наиболее востребованными являются радиотрассы протяженностью от 100 до 4–5 тысяч километров. Исходя из этого требования, возможно рассчитать технические диапазоны радиолиний.

На рисунке 2 представлены данные, полученные по долгосрочным прогнозам с помощью программных пакетов «Трасса» [10], ITS HF Propagation [11], МСЭ [12] по используемым оптимальным рабочим частотам (ОРЧ) на среднеширотных трассах протяженностями до 7000 км. Из рисунка видно, что для обслуживания радиолиний до 5000 км должен быть использован диапазон ОРЧ от 2,6 до 27 МГц. С учетом колебаний значений от наименьшей до максимальной применяемой частоты, связанных с изменением ионосферы по искусственным или естественным причинам, внезапными ионосферными возмущениями, технический диапазон радиолиний протяженностями до 5000 км будет диапазон от 2 до 28–30 МГц, т. е. весь ДКМ-диапазон.

Учитывая сформированное требование к рабочему диапазону частот (от 2 до 30 МГц), выбор типов антенн, обладающих удовлетворительными электрическими характеристиками при 10–15-кратном отношении крайних частот диапазона, ограничен.

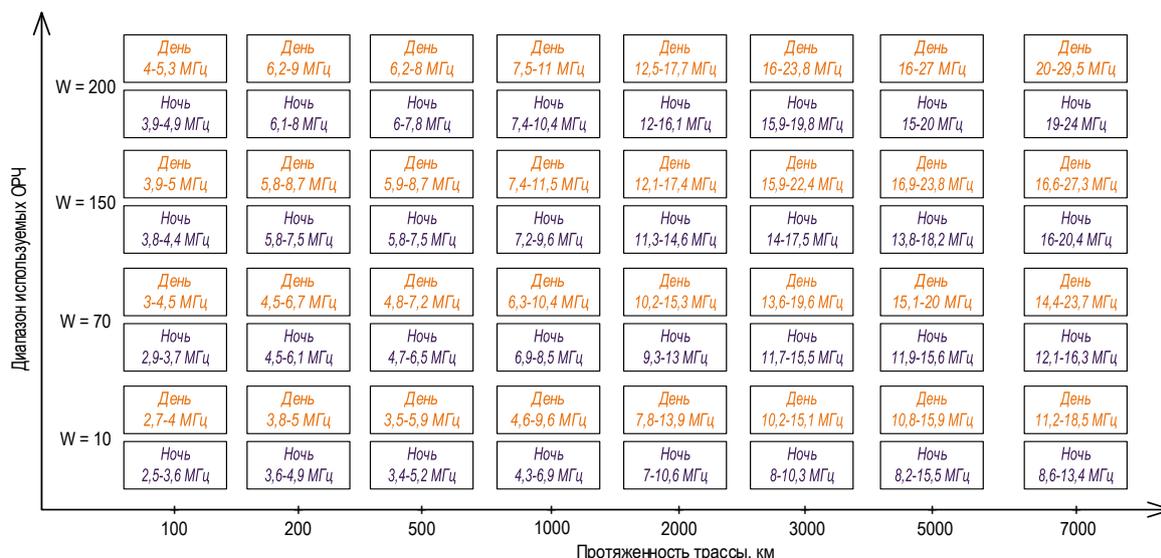


Рис. 2. Расчетные значения ОРЧ для ионосферных радиолиний различной протяженности с учетом изменения солнечной активности для среднеширотных радиолиний на территории РФ

Fig. 2. Calculated Frequency Values for Ionospheric Radio Links of Various Lengths, Taking into Account Changes in Solar Activity for Mid-Latitude Radio Links on the Territory of the Russian Federation

Рабочий диапазон антенны, согласно [13], это диапазон частот (длин волн), в котором параметры антенны находятся в заданных пределах. В рамках данной работы примем за частотный диапазон антенной системы совокупность параметров – коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН) и ширина главного лепестка диаграммы направленности в горизонтальной ($2\Delta\varphi^\circ$) и вертикальной ($2\Delta\theta^\circ$) плоскостях, которые должны быть:

– для антенн, работающих в режиме бегущей волны (РГД, РГ), и логопериодических антенн (ЛПА) – $КСВН \leq 3,3$, $2\Delta\varphi^\circ \geq 8^\circ$, $2\Delta\theta^\circ \geq 8^\circ$ [5, 14, 15];

– для полуволновых симметричных горизонтальных вибраторов (ВГДШ, УГД) – $КСВН \leq 5$ [6], $2\Delta\varphi^\circ \geq 8^\circ$, $2\Delta\theta^\circ \geq 8^\circ$.

ЛПА являются практически единственными широкополосными частотно-независимыми антеннами, пригодными для работы без перестройки в указанном диапазоне частот с высокой степенью согласования с радиопередающими устройствами (значения коэффициентов бегущей волны по напряжению – до 0,8–0,9). Классические плоские наклонные ЛПА подробно описаны в ряде работ [4, 5, 15–18].

Обоснование и выбор метода электродинамического моделирования АФУ

Антенны КВ-диапазона конструируются, как правило, из цилиндрических хорошо проводящих металлических прямых отрезков, определенным образом ориентированных в пространстве. Диаметры отрезков проводников при этом весьма малы по сравнению с длиной волны. На этапе электродинамического анализа ставится задача расчета электрических характеристик спроектированной антенны – диаграммы направленности, входного сопротивления в рабочей полосе частот, коэффициента усиления и т. д. Интересующие характеристики можно получить, зная распределение тока на проводах, образующих антенну. Операция определения распределения тока в конечном итоге выполняется численными методами путем вычисления интегралов и решения системы линейных алгебраических уравнений на ЭВМ. Исходными выражениями к интегральным уравнениям распределений токов по вибраторам являются уравнения Максвелла.

При решении задач конструирования антенн различной конфигурации, необходимо составить интегральные уравнения для каждой из них, а затем получить их решения. Решения могут быть получены сведением интегральных уравнений к системам линейных алгебраических уравнений с последующим вычислением на ЭВМ.

При исследовании проволочных антенн можно исходить из уравнения Поклингтона и из уравне-

ния Халлена, строгое решение которых в аналитическом виде в настоящее время не получено, а решение ищется приближенными методами, одним из потенциально наиболее точных является метод моментов [19]. Различные реализации метода моментов как численное решение интегрального уравнения получили развитие за последние десятилетия благодаря совершенствованию средства вычисления – ЭВМ. Соответственно, появились и программные реализации с вычислительными ядрами на основе той или иной разновидности метода моментов; в основном, определяющим фактором в степени соответствия вычисленного токового распределения на заданной антенной структуре истинному, априори неизвестному, является выбор базисных и весовых функций.

На сегодняшний день для расчета основных характеристик проектируемой антенны можно воспользоваться специализированными профессиональными пакетами, значительно повышающими точность расчетов. В наибольшей степени на расчет КВ-антенн ориентированы программы NEC (аббр. от англ. Numerical Electromagnetic Code). Вместе с тем, очевидно, что проверка расчетов должна выполняться с целью проверки, как самого программного продукта, так и выбранных граничных условий и конструктивного исполнения. Последнее может быть выполнено на масштабных моделях антенных систем.

Разработка электродинамической модели антенны типа ЛПА и АФАР на ее основе, исследование их характеристик

В работе исследовалась классическая плоская логопериодическая структура с параметрами $\tau = 0,9$; $\sigma = 0,093$; $N = 26$ (количество вибраторов); $\alpha = 30^\circ$ (угол при вершине ЛПА); $L_1 = 52$ м (длина наибольшего вибратора); $\beta = 15^\circ$ (угол наклона полотна ЛПА), электродинамическая модель которой приведена на рисунке 3. Данная антенна является серийно изготавливаемой и используется на объектах.

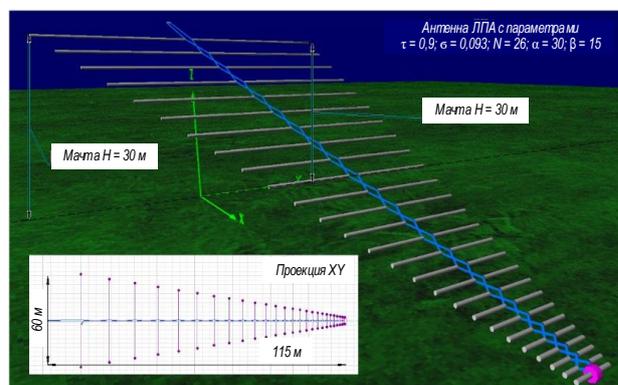


Рис. 3. Антенна ЛПА

Fig. 3. Flat Inclined Log-Periodic Antenna

Учитывая необходимость:

- организации двух независимых радиоканалов (основной режим) практически с каждым (в зависимости от объекта) корреспондентом – объектом взаимодействия;
- реализации одного радиоканала в режиме пространственного сложения мощностей двух радиопередающих устройств в режиме синфазной работы с повышенным значением ЭИИМ радиоканала для борьбы с преднамеренными и непреднамеренными помехами, – была разработана модель двухэлементной АФАР на базе антенн типа ЛПА – ФАР 2 ЛПА (рисунок 4).

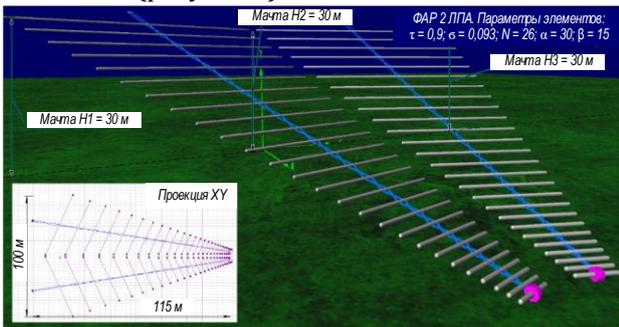


Рис. 4. Электродинамическая модель ФАР 2 ЛПА
 Fig. 4. Electrodynamic Model of the Phased Antenna Array of Two-Element Log-Periodic Antennas (PAA 2 LPA)

Расчетные энергетические характеристики ЛПА и ФАР 2 ЛПА приведены ниже в таблице 1.

На рисунке 5 приведены расчетные, полученные в 4NEC2X, и экспериментально полученные значения КСВН в диапазоне частот 2–30 МГц для

антенны типа ЛПА и элементов ФАР 2 ЛПА, которые являются эффективными антенными системами и могут успешно применяться на передающих радиостанциях.

Однако представленные варианты обладают следующими недостатками:

- невозможность работы в диапазоне от 2 до 3 МГц;
- наличие двух опорных мачт для ЛПА и трех для ФАР 2 ЛПА, что является элементом избыточности в части конструктивного исполнения.

Варьирование значениями габаритов, числа вибраторов и коэффициента усиления ЛПА практически всегда осуществляется путем выбора соответствующих значений знаменателя геометрической прогрессии τ и относительного расстояния между вибраторами в ЛПА (параметр σ), связанных между собой соотношением:

$$\sigma = \frac{1}{4} \times (1 - \tau) \times \cot \alpha, \quad (1)$$

где α – угол между осью антенны и линией, проходящей через концы вибраторов.

При этом, чем ближе τ к единичному значению, тем больше количество вибраторов в ЛПА и тем больше значение абсолютного коэффициента усиления. С целью расширения рабочего диапазона частот логопериодической структуры необходимо подобрать значения τ и σ таким образом, чтобы энергетические характеристики были не менее характеристик приведенного на рисунке 3 аналога (см. таблицу 1).

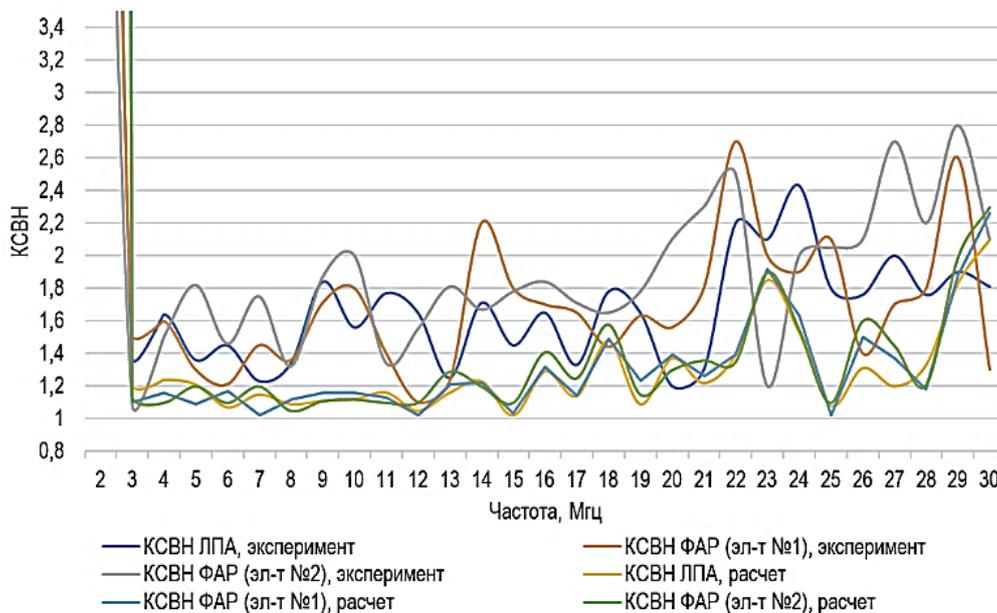


Рис. 5. Значения КСВН антенн типа ЛПА, элементов из состава ФАР 2 ЛПА, полученные расчетным и экспериментальным способами

Fig. 5. VSWR of LPA and Elements from PAA 2 LPA, Obtained by Calculated and Experimental Methods

ТАБЛИЦА 1. Характеристики антенных систем ЛПА, ФАР 2 ЛПА, ЛПГИ, ФАР 2 ЛПГИ, ВГДШ, РГД, полученные расчетным способом

TABLE 1. Characteristics of LPA, PAA 2 LPA, PC LPA, Phased Antenna Array of Two-Element Log-Periodic Pyramidal Curved Antennas (PAA 2 PC LPA), Rhombic Horizontal Dual (RHD), Symmetrical Band Horizontal (SBH) Obtained by Calculation

f, МГц	Тип АФС	КСВН	Δ_{\max}^0	G_{\max} , дБи	G_{Δ} , дБи						$2\Delta\theta^\circ$	$2\Delta\varphi^\circ$	Количество опорных мачт / высота, м	Занимаемая площадь, га
					10°	15°	20°	40°	60°	80°				
2	ЛПА	150	70	7,1	-4,2	-0,88	1,33	5,68	6,96	7,07	110	360	2/30	0,8
	ФАР 2 ЛПА	78	70	8,1	-3,2	0,1	2,36	6,73	8	8	110	360	3/30	1,32
	ЛПГИ	2,5	70	6,55	-5,6	-2,2	0	4,8	6,39	6,4	85	180	1/35	1,2
	ФАР 2 ЛПГИ	1,9	65	10,2	-1,22	2,1	4,35	8,86	10,13	9,8	85	110	2/35	2,56
	РГД	1,15	65	10,7	-7,7	-3,3	0,2	9	10,2	0,7	35	80	6/35	3,52
	ВГДШ	100	90	5,92	-7,8	-4,9	-2	2,9	5	5,8	100	360	2/14	0,45
3	ЛПА	1,22	45	9,63	1,16	4,33	6,36	9,54	8,88	6,36	60	90		
	ФАР 2 ЛПА	1,1	40	11,1	2,94	6,1	8,1	11,1	10	6,4	50	50		
	ЛПГИ	1,7	45	8,79	0,2	3,38	5,43	8,67	8,15	5,77	60	110		
	ФАР 2 ЛПГИ	1,5	40	12,5	4,73	7,85	9,82	12,5	11,1	7,7	50	50		
	РГД	1,42	40	14,3	1,22	5,45	8,65	14,3	5,8	-20	25	40		
	ВГДШ	41	90	6,7	-6,2	-3	-0,6	4,13	6	6,6	108	360		
4	ЛПА	1,24	40	10,2	2,2	5,33	7,32	10,16	8,86	5,39	50	80		
	ФАР 2 ЛПА	1,16	40	11,4	3,7	6,8	8,8	11,4	9,6	5,2	45	60		
	ЛПГИ	1,31	40	8,9	1,8	4,8	6,6	8,86	8,43	5,2	55	110		
	ФАР 2 ЛПГИ	1,3	40	14	5,36	8,6	10,7	14	10,9	3,54	40	40		
	РГД	1,32	30	16,6	7,24	11,2	14	14,7	-19	-4,3	20	30		
	ВГДШ	12	88	6,82	-5	-1,2	0,5	4,92	6,39	6,78	116	360		
7	ЛПА	1,15	45	10,4	3,13	6,22	8,14	10,38	8,19	3,55	45	80		
	ФАР 2 ЛПА	1,02	45	11,9	5	8	9,9	11,7	9	2,82	45	50		
	ЛПГИ	1,16	45	8,9	1,76	4,77	7	8,86	8,88	5,15	55	110		
	ФАР 2 ЛПГИ	1,5	45	13,6	5,66	8,84	10,9	13,54	9,7	4,64	35	40		
	РГД	1,55	25	21	18,9	21	21	-1,2	7	4,4	15	10		
	ВГДШ	3	56	6,69	-1,48	2,1	3,61	6,6	6,2	5,2	140	104		
10	ЛПА	1,13	45	10,6	4,24	7,18	8,92	10,37	7,2	1,5	45	70		
	ФАР 2 ЛПА	1,2	45	11,9	5,8	8,7	10,4	11,7	7,9	1	40	50		
	ЛПГИ	1,31	40	10,3	4,35	7,3	8,97	9,84	5,25	-2	40	80		
	ФАР 2 ЛПГИ	1,5	40	13,4	8,31	11,1	12,6	12,7	7,6	-0,5	35	40		
	РГД	1,38	12	23,1	23	21	14,8	13,7	-7,2	1,88	10	8		
	ВГДШ	1,57	30	8,64	3	6,27	7,5	8	3	-3,7	38	64		
14	ЛПА	1,23	30	11	4,89	7,95	9,74	10,11	6,15	-4	35	70		
	ФАР 2 ЛПА	1,22	30	12,8	7,3	10,18	11,85	11,5	7,2	-5,1	35	40		
	ЛПГИ	1,32	45	10,3	4,44	7,5	9,2	9,8	1,84	-6	35	80		
	ФАР 2 ЛПГИ	1,5	30	13,9	8,1	10,8	12,46	12,1	4,5	-8	30	30		
	РГД	1,6	8	22,5	21,2	12	6,8	4,8	4,83	-2,7	8	4		
	ВГДШ	7,2	32	10,2	6,82	9,46	10,1	3,68	1,94	7,18	24	32		
18	ЛПА	1,48	30	10,8	5,65	8,28	9,88	9,95	2,66	-9,3	35	70		
	ФАР 2 ЛПА	1,5	30	12,5	7	9,7	11,4	11,7	3,2	-11	30	50		
	ЛПГИ	1,6	30	10,8	6	8,43	9,8	8,44	-3,1	-17	30	70		
	ФАР 2 ЛПГИ	1,7	25	14	8,94	11,9	13,56	11,2	0,5	-6,9	25	30		
	РГД	1,38	6	17,8	8,45	6,65	12,2	12,9	3,56	-5,2	6	4		
	ВГДШ	5,1	26	8,49	7,24	8,5	7,88	-1	-1	-8,8	18	(*)		

Продолжение таблицы 1

f, МГц	Тип АФС	КСВН	Δ _{max} ⁰	G _{max} , дБи	G _Δ , дБи						2Δθ°	2Δφ°	Количество опорных мачт / высота, м	Занимаемая площадь, га
					10°	15°	20°	40°	60°	80°				
22	ЛПА	1,4	25	11,1	6,55	9	10,35	9,58	-1,8	-15	30	70		
	ФАР 2 ЛПА	1,4	25	12,9	7,9	10,5	12,1	11,4	-1,3	-10,2	30	50		
	ЛПГИ	1,45	25	11,2	7	9,28	10,6	7,52	-6	-3,2	30	70		
	ФАР 2 ЛПГИ	1,4	25	13,7	9,8	12,3	13,5	10,7	-5,8	-1,9	30	30		
	РГД	1,4	(*)											
	ВГДШ	9,4	24	6,73	6,22	6,41	4,64	5,5	2,73	-1,65	16	(*)		
26	ЛПА	1,46	25	11,2	6,76	9,63	11	7	-7	-4,2	30	70		
	ФАР 2 ЛПА	1,5	25	13,9	9,9	12,5	13,65	9,2	-5,6	-0,8	25	40		
	ЛПГИ	1,29	25	10,9	7,54	10,15	10,9	6,2	-11	1,6	30	70		
	ФАР 2 ЛПГИ	1,3	20	14	10,8	13,22	14	9,2	-6,3	3,75	25	20		
	РГД	1,4	(*)											
	ВГДШ	7,5	12	8	7,58	7,3	4,24	7,8	-10,9	-3,2	14	(*)		
30	ЛПА	2,13	25	11,3	8,24	10,4	11,1	7	-8,8	0,2	25	70		
	ФАР 2 ЛПА	2,26	25	13,2	10	12	13	9,5	-5,2	2,65	30	40		
	ЛПГИ	1,58	25	11	8	10,11	11	4,2	-2,7	-3,4	25	70		
	ФАР 2 ЛПГИ	1,4	20	13,9	11	13,12	13,85	6,93	1	6,21	25	20		
	РГД	1,4	(*)											
	ВГДШ	5,3	10	0,9	0,9	-1,63	-5,44	-5,18	-20	0,3	12	(*)		

Для каждого значения τ существует оптимальное с точки зрения коэффициента усиления значение σ, которое рекомендуется выбирать в соответствии с графиками, приведенными в [16–18], но при разработке сверхширокополосных ЛПА КВ-диапазона с перекрытием по частоте $\frac{f_{max}}{f_{min}} \approx 15$ и более приходится отступать от рекомендаций графиков и искать компромисс между величиной КУ и приемлемыми габаритами антенного полотна.

Так, при разработке антенны, представленной на рисунке 3, использовались τ = 0,9, σ = 0,093. При этом поперечные размеры составили 95×40 м, количество вибраторов – 26, в то время, как применение оптимального в соответствии с [16–18] значения σ = 0,17 привело бы почти к двукратному увеличению длины антенного полотна, как следствие, существенному усложнению конструктивного исполнения, увеличению числа опорных мачт, что неприемлемо.

Путем оптимизации и подбора параметров τ и σ, анализа и расчетных оценок ряда вариантов была выбрана структура с параметрами τ = 0,87, σ = 0,12, содержащая 26 вибраторов с поперечными размерами 135×80 м. Для построения антенны таких

размеров по классической схеме с плоским наклонным полотном (см. рисунок 3) потребуется не менее шести мачт – по две спереди и сзади полотна и две в середине. Конструкция получается дорогой и сложной в обслуживании.

Поэтому, с целью упрощения и удешевления была разработана конструкция ЛПА изогнутой пирамидальной формы – ЛПГИ, в которой вибраторы относительно собирательной линии наклонены по отношению к земле на угол Ψ, лежащий в пределах $100^\circ \leq \Psi \leq 155^\circ$. Сама логопериодическая структура с целью сокращения количества опорных мачт и упрощения конструкции имеет излом, вершиной которого является место соединения вибратора № 22 с распределительной линией таким образом, чтобы обеспечить углы наклона обеих частей распределительной линии [20] для ориентации главного лепестка диаграммы направленности под требуемыми углами возвышения (места).

Такая конструкция позволяет обойтись одной мачтой в середине структуры и одной стойкой у точки питания (рисунок 6). При построении двухэлементной решетки из антенн ЛПГИ – ФАР 2 ЛПГИ, для того, чтобы в режиме пространственно-

го сложения мощностей обеспечить одинаковую ширину главного лепестка диаграммы направленности ФАР в средней и верхней частях рабочего диапазона частот и предупредить появление дифракционных максимумов, антенны ЛПГИ необходимо размещать под углом друг к другу.

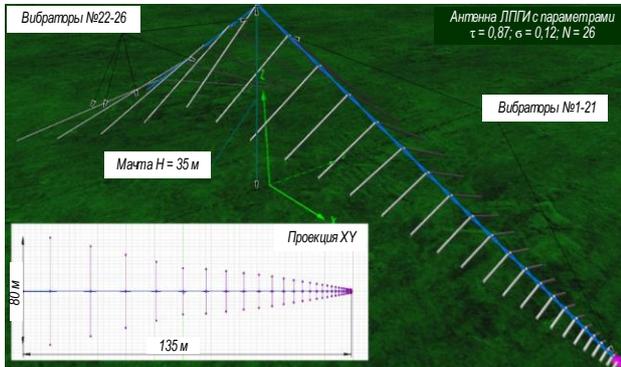


Рис. 6. Антенна ЛПГИ

Fig. 6. Pyramidal Curved LPA

При этом положение максимумов диаграмм направленности в горизонтальной плоскости антенны ЛПГИ в автономном режиме работы сдвигалось от оси ФАР именно на этот угол в ту и другую стороны, т. е. не соответствовало направлению на корреспондента. Оказалось, что можно практически устранить этот нежелательный эффект путем некоторой модификации конструкции антенны ЛПГИ для применения в составе ФАР. Суть этой модификации состоит в том, что, хотя собирательные линии антенны ЛПГИ расположены под углом друг к другу, вибраторы обеих антенн соосны и располо-

жены на линиях перпендикулярных оси ФАР, в отличие от структуры, приведенной на рисунке 4. Расчеты подтвердили правомерность такой модификации. Схематическое изображение 2-элементной ФАР на базе модифицированных антенн ЛПГИ показано на рисунке 7. На рисунке 8 приведены расчетные и экспериментальные значения КСВН в диапазоне частот 2–30 МГц.

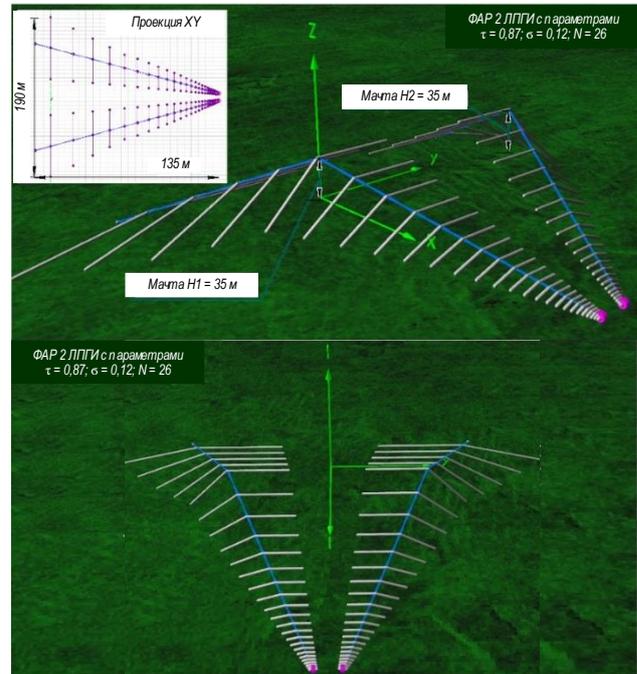


Рис. 7. Электродинамическая модель ФАР 2 ЛПГИ

Fig. 7. Electrodynamic Model of the PAA 2 PC LPA

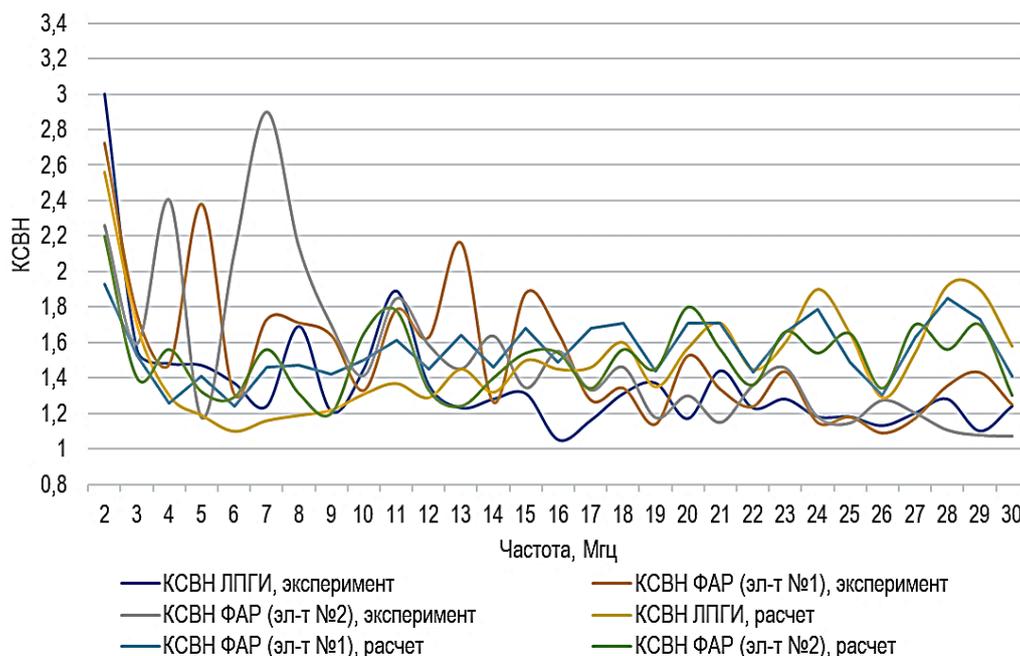


Рис. 8. Значения КСВН антенн ЛПГИ, элементов из состава ФАР 2 ЛПГИ, полученные расчетным и экспериментальным способами

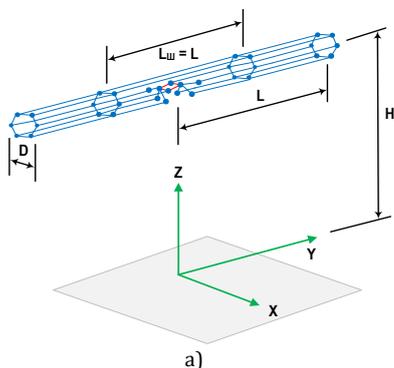
Fig. 8. VSWR of PC LPA and Elements from PAA 2 PC LPA, Obtained by Calculated and Experimental Methods

По результатам рассмотренных вариантов можно сделать вывод, что предложенная конструкция расширила нижнюю границу рабочего диапазона антенны с 3 до 2 МГц. Кроме того, конструктивное исполнение позволяет сократить число опорных мачт с двух до одной при одиночной антенне и с трех до двух при двухэлементной решетке. Недостатком предложенного решения является увеличение поперечных размеров, однако это является неизбежностью при расширении частотного диапазона. Расчетные энергетические характеристики ЛПГИ и ФАР 2 ЛПГИ приведены в таблице 1.

Сравнительный анализ энергетических и неэнергетических характеристик антенн ВГДШ, РГД с предложенным решением

Исследовав в предыдущем разделе классическую ЛПА, двухэлементную АФАР на ее основе, а также модифицированные варианты изогнутых логопериодических структур с расширенным частотным диапазоном, приведем количественные оценки энергетических и неэнергетических характеристик основных типов использующихся на радиоцентрах антенн РГД $\frac{65}{4} \times 1$, ВГДШ $\frac{12,5}{14} \times 2$ (рисунок 9).

Антенна ВГДШ 12,5/14*2 с параметрами:
L = 12,5; H = 14; D = 2



Антенна РГД 65/4*1 с параметрами:
 $\lambda_0 = 32,43$ м; D = 235 м; d = 110 м; h = 32 м; L = 130 м; b = 38 м

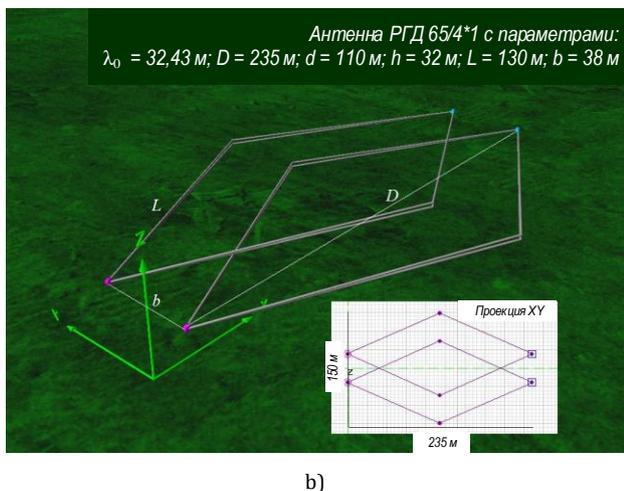


Рис. 9. Электродинамические модели антенн ВГДШ (а) и РГД (б)

Fig. 9. Electrodynamics Models of the RHD (a) and SBH (b) Antennas

В сравнительном анализе рассмотрен только один типоразмер РГД ($\lambda_0 = 32,43$ м, $D = 235$ м, $d = 110$ м, $h = 32$ м, $L = 130$ м, $b = 38$ м), так как другие типоразмеры имеют аналогичные характеристики, отличие будет только в перемещении их по частотному диапазону.

По результатам анализа таблицы 1, с учетом заданных выше критериев по определению частотного диапазона АФУ, частотные диапазоны рассмотренных антенн составили:

- ЛПА, ФАР 2 ЛПА: 3–30 МГц;
- ЛПГИ, ФАР 2 ЛПГИ: 2–30 МГц;
- РГД $\frac{65}{4} \times 1$: 2–11 МГц;
- ВГДШ $\frac{12,5}{14} \times 2$: 4,2–13,9 МГц.

Как видно из результатов, требуемая широкополосность обеспечивается антеннами ЛПГИ, ФАР 2 ЛПГИ. По неэнергетическим характеристикам наибольшую занимаемую площадь, а также наибольшее количество мачтовых опор, что пропорционально стоимости изделия, занимает антенна РГД, наименьшие показатели – антенна ВГДШ. Логопериодические структуры занимают промежуточное положение.

Результаты трассовых испытаний АФУ на трассе средней протяженности

В данном подразделе представляются результаты трассовых испытаний АФУ ЛПА, ФАР 2 ЛПА, ВГДШ, штыревой антенны (АШ), ФАР 2 АШ на трассе протяженностью 2100 км (г. Омск – г. Москва). Методология испытаний аналогична приведенной в [9, 21] и заключается в том, чтобы за период времени, не превышающий 10–15 минут (период стационарности ионосферы), провести 90-секундные сеансы излучения узкополосных телеграфных сигналов и запись создаваемыми ими уровней на приемной стороне. На все испытываемые антенны работало два радиопередающих устройства с выходной мощностью 5 кВт, подключенные к АФУ через автоматизированный антенный коммутатор.

Из-за многолучевости в сочетании с флуктуациями параметров ионосферы, приводящими к тому, что характеристики результирующего поля сигнала в месте приема непрерывно менялись и прием коротких волн сопровождался быстрыми и медленными изменениями уровня сигнала на входе приемника, замираниями [22], по каждому сеансу вычислялось медианное значение уровня поля, создаваемого антенной системой в точке приема. Фазирование систем ФАР 2 ЛПА и ФАР 2 АШ было выполнено по приведенному в [9] алгоритму. Результаты измерения уровня поля в точке приема на трассе Омск-Москва, декабрь 2021 г. (время измерения 10:00–14:00 Мск) представлены на рисунке 10.

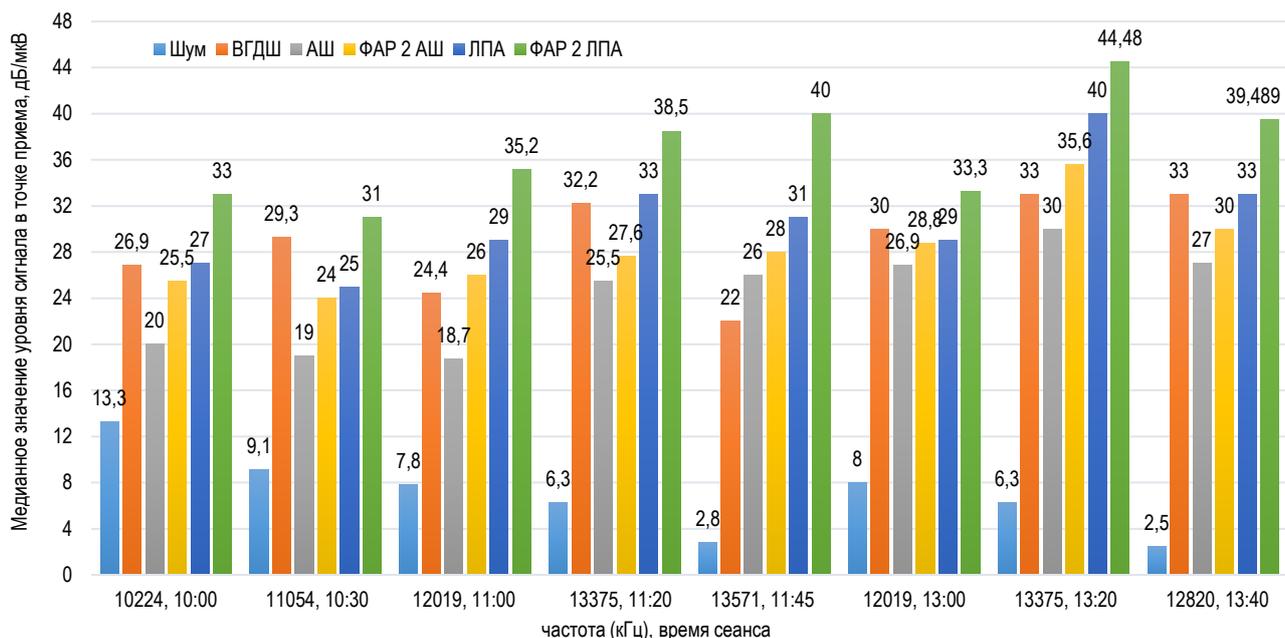


Рис. 10. Результаты трассовых испытаний антенных систем

Fig. 10. Result of Recording Signal Levels at the Receiving Point

Наибольший энергопотенциал на радиолинии, как и ожидалось, создает ФАР 2 ЛПА, приращение уровня сигнала в точке приема относительно работы одного радиопередающего устройства на антенну ЛПА составило от 4 до 9 дБ/мкВ.

Приращение уровня сигнала, формируемого от ФАР 2 АШ, относительно одной антенны АШ составило от 2,1 до 8 дБ/мкВ, что подтверждает эффективность предложенного в [9] способа фазирования 2-элементных решеток с управляемой диаграммой направленности и позволяет сделать вывод об эффективности применения штыревых антенн с перестраиваемыми согласующими устройствами и АФАР на их основе на трассах средней протяженности.

Антенны типа симметричный горизонтальный излучатель (и их производные – ВГДШ, УГД, ВГДШП (плоскостная), ВГДШ-2У со всеми многочисленными типоразмерами и т. д.) могут эффективно заменяться антеннами типа АШ и ЛПА.

Антенны типа ЛПГИ и ФАР 2 ЛПГИ в трассовых испытаниях не участвовали (на объекте модернизации данные АФУ отсутствовали, экспериментальные данные, приведенные на рисунке 8, получены в более ранних работах авторов), но, основываясь на расчетных данных таблицы 1, можно сделать вывод, что уровни принимаемых сигналов будут не меньше, а в существенном ряде случаев и больше уровней, формируемых ЛПА и ФАР 2 ЛПА, во всем коротковолновом диапазоне.

Также, ввиду отсутствия антенны на модернизируемом объекте, сориентированной по азимуту на приемный пункт, не удалось провести трассовые испытания антенны РГД. Однако, анализируя

количественные характеристики антенны РГД с антеннами ЛПА (ЛПГИ), ФАР 2 ЛПА (ФАР 2 ЛПГИ), можно утверждать, что на частотах трассовых испытаний (10–14 МГц) коэффициент усиления при $\Delta = 5 - 15^\circ$ (для трассы 2100 км – [23]) у антенны РГД значительно (на 5–10 дБи) больше, чем у ЛПА, соответственно, и в точке приема наблюдался бы пропорциональный энергетический выигрыш. Однако, на трассах малой (~200–1500 км) протяженности или на частотах выше 13–14 МГц (когда у антенны РГД главный лепесток становится шириной всего в единицы градусов), антенны типа ЛПА будут предпочтительней, ввиду наличия свойства стационарности энергетических характеристик во всем рабочем диапазоне частот.

Выработка предложения по схмотехническому построению сегмента унифицированного высокочастотного тракта на базе рассмотренных антенн

Вариант высокочастотного тракта, построенный на базе одиночных излучателей АШ (резервная антенна), ЛПГИ (основная антенна), а также формируемыми из них 2- и 4-элементных АФАР с управляемой диаграммой направленности в горизонтальной плоскости приведен на рисунке 11.

Представленный комплекс позволит обеспечить формирование четырех независимых радиоканалов, двух независимых радиоканалов с увеличенной ЭИИМ, образуемых ФАР 2 ЛПГИ или ФАР 2 АШ в различных сочетаниях, одного канала с увеличенной ЭИИМ с подводимой к антенной системе ФАР 4 ЛПГИ или ФАР 4 АШ 5 кВт, а также резервирование основных наземных АФУ (ЛПГИ) быстроразвертываемыми аварийными типа АШ [9].

ные характеристики, сформулированы недостатки подобных систем.

В-четвертых, с учетом недостатков плоских наклонных ЛПА предложен вариант пирамидальной изогнутой конструкции – ЛПГИ, который позволил достичь коэффициента перекрытия по частоте $K_f = 15$, сократил количество опорных мачт с двух до одной в одиночной антенне и с трех до двух в 2-элементных решетках на базе этих антенн при неизменности энергетических характеристик.

В-пятых, исследованы электродинамические модели и рассчитаны характеристики существующих и широко используемых антенн типа ВГДШ, РГД, антенн нового конструктивного исполнения ЛПА, ФАР 2 ЛПА, а также предлагаемого варианта ЛПГИ, ФАР 2 ЛПГИ.

В-шестых, проведены трассовые испытания антенн ВГДШ, АШ, ФАР 2 АШ, ЛПА, ФАР 2 ЛПА на трассе средней протяженности (2100 км): энергетический выигрыш 2-элементных ФАР относительно одиночного излучателя составил – от 2,1 до 8 дБ/мкВ для несимметричных вертикальных вибраторов (АШ) и от 4 до 9 дБ/мкВ для логопериодических антенн на частотах 10–14 МГц в период проведения испытаний.

В-седьмых, по результатам анализа расчетных и экспериментальных данных можно сделать вывод о возможности эффективной замены существующих антенн ВГДШ, РГД на рассмотренные ЛПГИ, АШ и АФАР на базе этих антенн.

И в-восьмых, на основе рассмотренных предложений выработаны предложения по построению сегмента ВЧ-тракта в составе объекта. Предложенное решение является базовым, состав оборудования может быть увеличен до требуемого количества одновременно функционирующих радиолиний в соответствии с задачами, возложенными на объект.

В качестве предложений по применению рассмотренных сверхширокополосных логопериодических антенн в качестве передающих антенн действующих и перспективных стационарных и мобильных комплексов ДКМВ-радиосвязи, с учетом настоящего исследования, также возможно сформулировать следующие тезисы.

Список источников

1. Жилинков В.И., Цыванюк В.А., Лисицын Ю.Д. Применение высокотехнологичных средств при модернизации КВ передающих радиостанций // Международная научно-техническая конференция «Радиотехника, электроника и связь» (РЭИС-2011, Омск, Россия, 5–8 июля 2011). Омск: Омский научно-исследовательский институт приборостроения, 2011. С. 249–255.
2. Мешалкин В.А., Савицкий О.К. Перспективы развития средств и комплексов радиосвязи Вооруженных Сил Российской Федерации // Техника радиосвязи. 2010. №15. С. 65–76.
3. Мешалкин В.А., Чепелев К.В. Совершенствование стационарных передающих центров радиосвязи путем использования модульного принципа построения передатчиков с активными фазированными антенными решетками // VIII Международная научно-техническая и научно-методическая конференция «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании» (Санкт-Петербург, Россия, 27–28 февраля 2019). СПб: СПбГУТ, 2019. Т. 3. С. 273–277.

1) Диапазон рабочих частот ЛПГИ, ФАР 2 ЛПГИ, высокая степень согласования выхода передатчика и антенно-фидерного тракта, отсутствие необходимости применения перестраиваемого согласующего устройства в перспективе позволяют рассмотреть возможность применения разработанных систем в автоматических ДКМВ-радиолиниях с целью повышения помехоустойчивости, помехозащищенности и скрытности радиосвязи за счет применения современных технологий частотно-адаптивных радиолиний, программной перестройки частоты, использования шумоподобных сигналов во всем коротковолновом диапазоне.

2) Характеристика направленности разработанных антенн обеспечивает формирование широких зон обслуживания с возможностью их оперативного перемещения, данное обстоятельство позволяет использовать разработанные ФАР в качестве передающих антенн ретрансляционных объектов в сетях с радиально-ветвящейся структурой.

3) С целью снижения стоимости ДКМВ-радиолиний, с учетом свойства формирования широких зон обслуживания, формируемых антеннами ЛПГИ, целесообразна их эксплуатация с несколькими передатчиками (многочастотными передатчиками) для снижения массо-габаритных показателей оборудования, занимаемой антенными полями площади и сокращения обслуживаемого персонала.

4) При модернизации действующих радиостанций применение разработанных ЛПГИ позволит обеспечить перекрытие азимутального направления связи в пределах 60° с дальностями радиосвязи от 100 до 5000 км, а ФАР 2 ЛПГИ – обеспечить формирование зон радиовидимости с возможностью их оперативного перемещения по азимуту в пределах $\pm 30^\circ$ относительно центрального направления (оси излучения ФАР) и дальностями от 100 до 5000 км.

6) Целесообразно при разработке перспективных объектов предложенные АФС использовать в качестве типового элемента, что позволит осуществить фазирование излучения нескольких АФС с целью повышения коэффициента усиления передающих антенн и реализации принципа многократного их использования.

4. Гвоздев И.Н., Муравьев Ю.К., Серков В.П., Чернолес В.П. Характеристики антенн радиосистем связи. Л.: Военная ордена Ленина Краснознаменная академия связи имени С.М. Буденного, 1978. 231 с.
5. Айзенберг Г.З., Белоусов С.П., Журбенко Э.М. Коротковолновые антенны. М.: Радио и связь, 1985. 535 с.
6. С2-1123-48. Антенны коротковолновые диапазонные. Типы, размеры, электрические характеристики, технические условия. СССР, Министерство Судостроительной промышленности, утвержден УС ВМС 12/12 МСП 14Х, 1948 г.
7. ВНТП 212-93. Передающие и приемные радиостанции, радиотелевизионные передающие станции и радиотелевизионные ретрансляторы. Утверждены Министерством связи России. Приказ от 15.07.93 № 168. Дата введения 01.01.1994.
8. Шахгильдян В.В. Проектирование радиопередатчиков: учебное пособие. М.: Издательство «Радио и связь», 2000. 656 с.
9. Пашкевич В.Д., Голубев В.М., Проценко М.С. Моделирование и расчет характеристик АФАР КВ-диапазона на базе несимметричных вертикальных вибраторов // Труды учебных заведений связи. 2021. Т. 7. № 1. С. 81–92. DOI:10.31854/1813-324X-2021-7-1-81-92
10. Барабашов Б.Г., Анишин М.М., Жбанков Г.А., Косогор А.А. Пакет программ прогнозирования характеристик ВЧ-радиоканалов // III Международная научно-техническая конференция «Радиотехника, электроника и связь» (РЭИС-2015, Омск, Россия, 6–8 октября 2015). М.: Издательский дом «Наука», 2015. С. 106–108.
11. HF Propagation Prediction and Ionospheric Communications Analysis // VOACAP Online services. URL: <https://www.voacap.com> (дата обращения 14.05.2022)
12. Рекомендация МСЭ-R P.533-13 (07/2015). Метод для прогнозирования рабочих характеристик ВЧ-линий.
13. ГОСТ 24375–80. Радиосвязь. Термины и определения. М.: Издательство стандартов, 1982.
14. Калинин А.И., Черенкова Е.Л. Распространение радиоволн и работа радиолиний. М.: Связь, 1971. 440 с.
15. Ротхамель К., Кришке А. Антенны. Т. 1. Пер. с нем. М.: Лайт Лтд, 2000. 416 с.
16. Яковлев А.Ф., Пятненко А.Е. Широкодиапазонные направленные антенные решетки из вибраторных элементов. СПб.: НИЦ связи ВМФ, 2007. 141 с.
17. DuHamel R., Isbell D. Broadband logarithmically periodic antenna structures // Proceedings of the IRE National Convention Record (New York, USA, 21–25 March 1966). IEEE, 1957. Part 1. PP. 119–128. DOI:10.1109/IRECON.1957.1150566
18. Кэррел Р. Расчет логопериодических вибраторных антенн // Бененсон Л.С. Сверхширокополосные антенны. М.: Мир, 1964.
19. Банков С.Е., Грибанов А.Н., Курушин А.А. Электродинамическое моделирование антенных и СВЧ структур с использованием FEKO. М.: One-Book, 2013. 423 с.
20. Голубев В.М., Пашкевич В.Д. Сверхширокополосная логопериодическая антенна с коллинеарными вибраторами. Патент на полезную модель RU 179700 от 09.11.2017. Оpubл. 22.05.2018.
21. Голубев В.М., Пашкевич В.Д., Проценко М.С. Разработка и экспериментальное исследование АФАР КВ-диапазона с управляемой диаграммой направленности // Труды учебных заведений связи. 2020. Т. 6. № 1. С. 50–59. DOI:10.31854/1813-324X-2020-6-1-50-59
22. Благовещенский Д.В. Радиосвязь и электромагнитные помехи: учебное пособие. СПб.: СПбГУАП, 2002. 70 с.
23. Романов Ю.В. О некоторых типичных ошибках построения систем высокоскоростной КВ радиосвязи // Техника радиосвязи. 2012. №18. С. 5–20.

References

1. Zhilinkov V.I., Cyvanyuk V.A., Lisicyn Yu.D. The Use of High-Tech Tools in the Modernization of HF Transmitting Radio Centers. *Proceedings of the International Scientific and Technical Conference on Radio Engineering, Electronics and Communications, 5–8 July 2011, Omsk, Russia*. Omsk: Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering Publ.; 2011. p.249–255. (in Russ.)
2. Meshalkin V.A., Savickiy O.K. Perspectives for Developing Radiocommunication Equipment and Centers for Armed Forces of the Russian Federation. *Tekhnika Radiosvyazi*. 2010;15:65–76. (in Russ.)
3. Meshalkin V.A., Chepelev K.V. Improving Stationary Transmitting Radio Communication Centers by Using the Modular Principle of Constructing Transmitters with Active Phased Antenna Arrays. *Proceedings of the VIII th International Conference on Infotelecommunications in Science and Education, 28 February–1 March 2019, St. Petersburg, Russia*. St. Petersburg: Saint-Petersburg State University of Telecommunications Publ.; 2019. vol.3. p.273–277. (in Russ.)
4. Gvozdev I.N., Muravev Yu.K., Serkov V.P., Chernoles V.P. *Characteristics of Antennas of Radio Communication Systems*. Leningrad: Military Order of Lenin Red Banner Communications Academy named after S.M. Budyonny Publ.; 1978. 231 p. (in Russ.)
5. Aizenberg G.Z., Belousov S.P., Zhurbenko E.M. *Shortwave Antennas*. Moscow: Radio i sviaz Publ.; 1985. 535 p. (in Russ)
6. С2-1123-48. Short-Wave Band Antennas. Types, Sizes, Electrical Characteristics, Technical Conditions. USSR, Ministry of Shipbuilding Industry, approved 1948. (in Russ.)
7. ВНТП 212-93. *Transmitting and Receiving Radio Stations, Radio-television Transmitting Stations and Radio-Television Repeaters*. Approved by the Ministry of Communications of Russia. Order of 15.07.93 № 168. Introduced 01.01.1994.
8. Shakhgildyan V.V. *Design of Radio Transmitters*. Moscow: Radio i sviaz Publ.; 2000. 656 p. (in Russ)
9. Pashkevich V., Golubev V., Protsenko M. Modeling and Calculation Characteristics of APAA HF-Band Based on Whip Antennas. *Proc. of Telecom. Universities*. 2021;7(1):81–92. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2021-7-1-81-92
10. Barabashov B.G., Anishin M.M., Gbankov G.A., Kosogor A.A. Software Package for Predicting Characteristics of HF Radio Channels. *Proceedings of the International Scientific and Technical Conference on Radio Engineering, Electronics and Communications, 6–8 October 2015, Omsk, Russia*. Omsk: Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering Publ.; 2015. p.106–108. (in Russ.)

11. VOACAP Online services. HF Propagation Prediction and Ionospheric Communications Analysis. URL: <https://www.voacap.com> [Accessed 14th May 2022]
12. Rec. ITU-R P.533-13 (07/2015). *Method for the Prediction of the Performance of HF Circuits*.
13. GOST 24375-80. *Radio communication. Terms and definitions*. Moscow: Izdatelstvo standartov Publ.; 1982. (in Russ.)
14. Kalinin A.I., Cherenkova E.L. *Propagation of Radio Waves and Operation of Radio Lines*. Moscow: Sviaz Publ.; 1971. 440 p. (in Russ.)
15. Rothammel K., Kriske A. *Antennas*. Vol. 1. Translated from Germ. Moscow: Lite Ltd; 2000. 416 p.
16. Yakovlev A.F., Pyatnenkov A.E. *Wide-Band Directional Antenna Arrays Made of Vibratory Elements*. St. Petersburg: Naval Communications Research Center Publ.; 2007. 141 p. (in Russ.)
17. DuHamel R., Isbell D. Broadband logarithmically periodic antenna structures. *Proceedings of the IRE National Convent Record, USA New York*. IEEE; 1957. Part 1. p.119–128. DOI:10.1109/IRECON.1957.1150566
18. Carrel R. Calculation of Log-Periodic Vibratory Antennas. In: *Benenson L.S. Ultra-Broadband Antennas*. Moscow: Mir Publ.; 1964. (in Russ.)
19. Bankov S., Griбанov A., Kurushin A. *Electromagnetic Design Antennas and Microwave Structures with FEKO*. Moscow: ONE-BOOK Publ.; 2013. 423 p. (in Russ.)
20. Golubev V.M., Pashkevich V.D. Ultra-Wide-Band Logoperiodic Antenna with Collinear Vibrators. Patent RF, no. 179700, 09.11.2017. (in Russ.)
21. Golubev V., Pashkevich V., Protsenko M. Development and Experimental Study of APAA HF-Bandwidth Controlled Radiation Pattern. *Proc. of Telecom. Universities*. 2020;6(1):50–59. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2020-6-1-50-59
22. Blagoveschenskiy D.V. *Radio Communication and Electromagnetic Interference*. Saint Petersburg: Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation Publ.; 2002. 70 p. (in Russ.)
23. Romanov U.V. About some typical errors in the construction of high-speed HF radio communication systems. *Tekhnika radiosvyazi*. 2012;18:5–20. (in Russ.)

Статья поступила в редакцию 28.07.2022; одобрена после рецензирования 16.08.2022; принята к публикации 19.08.2022.

The article was submitted 28.07.2022; approved after reviewing 16.08.2022; accepted for publication 19.08.2022.

Информация об авторах:

ПАШКЕВИЧ Василий Дмитриевич	начальник отдела перспективных исследований и разработок АО «НТИ «Радиосвязь»  https://orcid.org/0000-0001-9306-1934
ГОЛУБЕВ Валерий Михайлович	кандидат технических наук, главный научный сотрудник отдела перспективных исследований и разработок АО «НТИ «Радиосвязь»  https://orcid.org/0000-0002-6740-6414
ПРОЦЕНКО Михаил Сергеевич	кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры радиорелейной, тропосферной и спутниковой связи СПбГУТ им. проф. М.А. Бонч-Бруевича  https://orcid.org/0000-0003-2927-6644
ЮРКОВ Михаил Владимирович	главный специалист отдела перспективных исследований и разработок АО «НТИ «Радиосвязь»  https://orcid.org/0000-0002-1929-7508
ПРОШИН Павел Владимирович	ведущий инженер отдела радиопередающих устройств АО «НТИ «Радиосвязь»  https://orcid.org/0000-0001-8093-9496
ПАТЯК Виктория Игоревна	инженер 1 категории отдела перспективных исследований и разработок АО «НТИ «Радиосвязь»  https://orcid.org/0000-0003-2378-9983
АНОХИН Андрей Сергеевич	младший научный сотрудник НИИ оперативно-стратегических исследований строительства ВМФ ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия»  https://orcid.org/0000-0002-3160-5737