

Разработка и экспериментальное исследование АФАР КВ-диапазона с управляемой диаграммой направленности

В.М. Голубев¹, В.Д. Пашкевич¹✉, М.С. Проценко²

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

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

*Адрес для переписки: pashkevich_vd@ntiradio.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 20.11.2019

Принята к публикации 06.03.2020

Ссылка для цитирования: 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

Аннотация: Перспективным направлением при проектировании антенного поля стационарного передающего радицентра КВ-диапазона является применение активных фазированных антенных решеток (АФАР) с пространственным сложением мощности и управляемой диаграммой направленности. В статье рассматривается алгоритм расчета V-образной антенны, как базового элемента АФАР, а также расчет четырехэлементной антенной решетки на базе V-образной антенны. Приведены результаты трассовых испытаний по оценке приращению мощности в зависимости от работающих элементов в АФАР, а также результаты по управляемости диаграммы направленности в горизонтальной плоскости.

Ключевые слова: активная фазированная антенная решетка, трассовые испытания, эффективная изотропно излучаемая мощность, диаграмма направленности.

Введение

Анализ состояния антенно-фидерных систем, существующих стационарных передающих центров позволяет сделать следующие выводы:

– использование частотных ресурсов антенно-фидерных устройств (АФУ) ограничено их недостаточной широкополосностью, в связи с чем технический диапазон радицентра перекрывается набором антенн различных типоразмеров;

– реализация пространственно-поляризационных ресурсов антенных систем осуществляется путем применения на антенных полях АФУ различных типов, ориентированных по разным направлениям;

– отсутствие динамического управления диаграммой направленности (ДН) АФУ приводит к быстрому возрастанию количества антенн и, соответственно, увеличению площадей антенных полей, на которых они развернуты [1].

Одним из перспективных направлений развития радиотехнических систем связи ДКМВ-диапазона, в частности передающих радиочастотных

[2], является разработка широкополосных активных фазированных антенных решеток (АФАР) с управляемой ДН.

Применение АФАР на радиочастоте позволит получить выигрыш в характеристиках радиосистемы в целом:

– увеличить эффективную изотропно излучаемую мощность (ЭИИМ) (повысить энергопотенциал радиолинии);

– сократить площадь антенного поля и количество АФУ вследствие обеспечения активной фазированной антенной решеткой (АФАР) охвата большего сектора гарантированного обслуживания за счет сканирования главного лепестка диаграммы направленности;

– варьировать количество одновременно работающих радиоканалов за счет гибкого использования антенн как в составе АФАР, так и в режиме автономной работы;

– адаптироваться к конкретным условиям работы в окружающей обстановке с преднамеренными и непреднамеренными помехами.

Необходимо отметить, что широкополосность АФАР определяется параметрами одиночного излучателя из ее состава. Как правило, это совокупность следующих основных параметров: абсолютный коэффициент усиления (по отношению к изотропному излучателю); коэффициент стоячей волны по напряжению; ширина ДН в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Конкретные значения этих параметров зависят от требований к надежности и протяженности радиолиний.

Целью работы является определение способов моделирования ДКМВ АФАР, позволяющих решать задачи оптимизации стационарных антенных полей на их основе. Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- определение способов электродинамического моделирования ДКМВ проволочных передающих антенн;
- оценка электрических характеристик V -образной наклонной антенны и АФАР на ее основе;
- оценка адекватности моделирования ДКМВ-радиолинии с АФАР на основе численного и натурального эксперимента.

Разработка электродинамической модели V -образного излучателя как базового элемента АФАР

В данной статье представлены результаты расчета четырехэлементной антенной решетки, построенной на базе четырех V -образных наклонных согласованных антенн с резистивными нагрузками [3, 4], а также методика проведения и результаты трассовых испытаний по оценке прироста уровня ЭИИМ за счет наращивания числа элементов в АФАР, управляемости ДН в горизонтальной плоскости в пределах, определенных геометрией АФАР и излучателем из ее состава.

В рамках проводимых авторами научно-исследовательских работ в области разработки радиотехнических систем с реализацией пространственного сложения мощности и управляемости ДН, одним из вариантов антенны как элемента АФАР была выбрана V -образная антенна типа VH l/h .

Геометрия антенны – длина плеча $l = 100$ м, высота точки возбуждения $h = 22$ м, угол φ между плечами вибраторов 50° были подобраны расчетным путем. Критерием выбора параметров геометрии антенны было формирование максимального излучения в диапазоне углов места (рисунок 1), соответствующих трассам протяженностью 800–1800 км при минимальных массе и габаритах антенны.

Представленные на рисунке 1 данные [5] по диапазонам углов места Δ в зависимости от протяженности радиотрасс имеют обобщенный характер. В статье приведены результаты трассовых испытаний, которые планировались заранее под конкретный период с известными значениями солнечной активности и с учетом географических особенностей трасс.

При этом долгосрочное прогнозирование (определение наименьших применимых частот, оптимальных рабочих частот (ОРЧ), максимальных применимых частот, структура слоев ионосферы, высоты отражений лучей h_m , энергетический расчет) определялись с помощью программного комплекса прогнозирования траекторных и энергетических характеристик радиоканалов диапазона 2–30 МГц [6, 7].

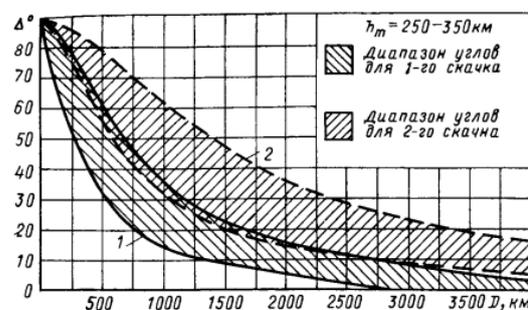


Рис. 1. Диапазон углов для работы на трассах при вариациях высот отражающих слоев $\sim 250-350$ км

Fig. 1. Range of Elevation Angles for Working on Transmission Paths with Variations in the Height of Reflecting Ionosphere Layers $\sim 250-350$ km

Расчеты радиотехнических характеристик V -образных антенн и АФАР на их основе выполнялись с помощью свободно распространяемого пакета программ 4NEC2 v.5.8.16, основанного на численном решении интегрального уравнения теории линейных антенн методом моментов [8].

Кроме того, в данном пакете программ предусмотрена возможность использования метода Зоммерфельда – Нортон, позволяющего учитывать влияние реальной земли на характеристики антенн. Результаты расчетов представлены только для одного варианта земной поверхности, соответствующей параметрам влажной почвы – $\sigma = 0,01$ См/м и $\epsilon = 10$, поскольку вариации параметров σ и ϵ в небольших пределах (например, $\sigma = 0,005$ См/м, $\epsilon = 13$ – средняя почва) практически не влияют на энергетические характеристики выбранной антенны с горизонтальной поляризацией излучаемых волн.

На рисунке 2 представлена геометрия расчетных моделей одиночной V -образной антенны с провисами вибраторов и без. Практика развертывания и монтажа проволочных антенн ДКМВ-диапазона показывает неизбежность появления провиса проводов, образующих излучатели антенн. Обычно величина провиса составляет 8–10 % от длины провода, закрепленного между двумя точками. Проведенные расчеты данных вариантов позволили сделать вывод о том, что наличие 8–10 % провиса приводит к уменьшению абсолютного коэффициента усиления (КУ) на 0,5–1 дБи, что составляет в зависимости от рабочей частоты от 10 до 30 % от максимального абсолютного КУ антенны.

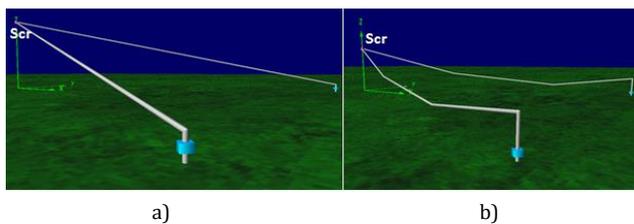


Рис. 2. Электродинамическая модель антенны VH 100/22 для случаев: а) без провисов вибраторов; б) с имитацией 8–10 % провиса вибраторов

Fig. 2. Electrodynamics Model of the VH 100/22 Antenna for: a) without Slack Vibrators; b) with Simulation 8–10 % slack of Vibrators

Точка возбуждения антенн (*Scr*) расположена на высоте 22 м. Концы лучей антенны соединены с землей через резисторы $R = 400$ Ом для реализации режима бегущей волны в плечах антенны. В конструкции антенны предусмотрено применение экспоненциального трансформатора 300/600 Ом для согласования входа антенны с выходным со-

противлением устройства симметрирования и согласования УСС 75/300, которое используется для подключения к радиопередающим устройствам (РПДУ) с помощью радиочастотного кабеля.

На рисунках 3 и 4 приведены результаты расчета коэффициентов стоячей волны по напряжению (КСВН), а также ДН в вертикальной плоскости. Анализ результатов расчета позволяет сделать вывод, что V-образная антенна имеет хорошее согласование (КСВН не более 1,74) с фидерной линией с волновым сопротивлением 600 Ом, а максимум ДН антенны с ростом частоты прижимается к земле, что является следствием режима бегущей волны в плечах антенны. Основные расчетные характеристики V-образной антенны приведены в таблице 1.

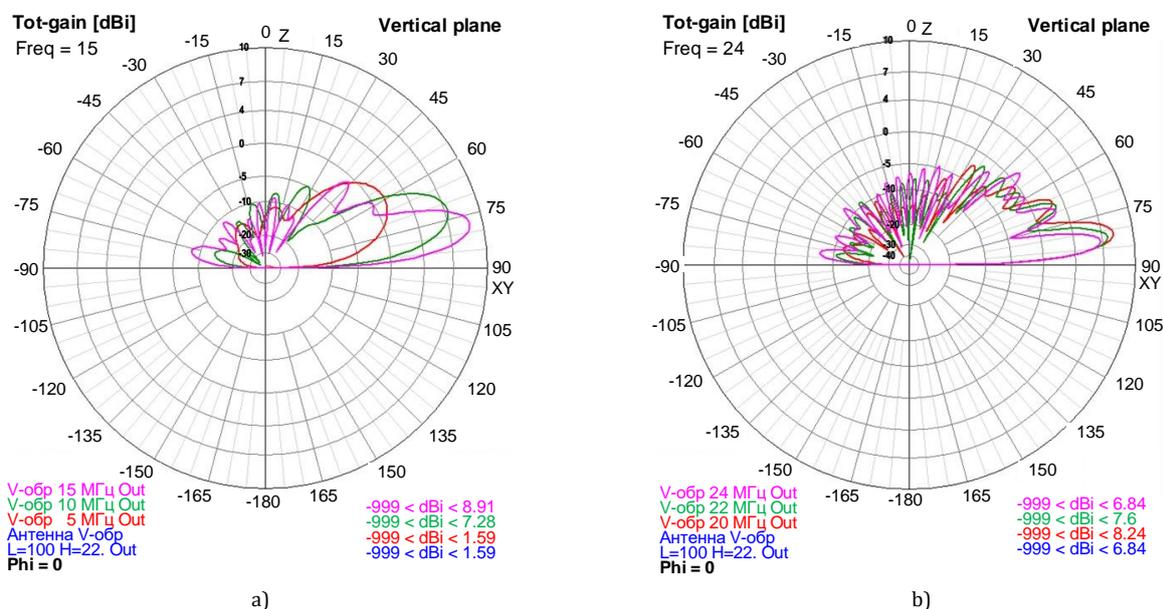


Рис. 3. ДН антенны VH 100/22 в вертикальной плоскости: а) 5, 10, 15 МГц; б) 20, 22, 24 МГц

Fig. 3. Directional Pattern of the VH 100/22 Antenna in the Vertical Plane: a) 5, 10, 15 MHz; b) 20, 22, 24 MHz

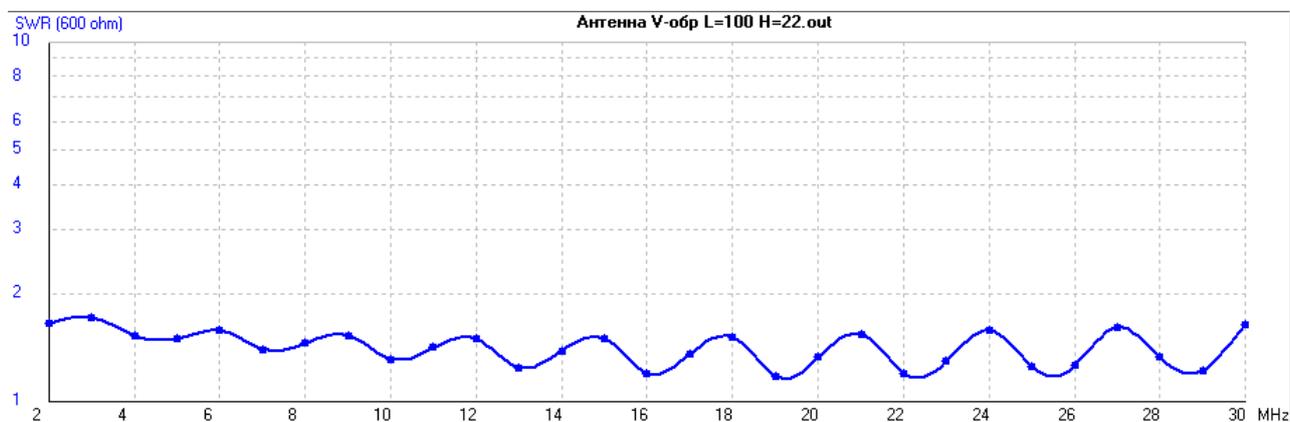


Рис. 4. КСВН антенны VH 100/22 относительно входного сопротивления 600 Ом

Fig. 4. VSWR Antenna VH 100/22 Relative to the input Resistance of 600 Ohms

ТАБЛИЦА 1. Результаты расчета антенны VH 100/22

TABLE 1. Calculation Results Main Characteristics of the VH 100/22 Antenna

f , МГц	5	6	8	12	18	20	24	26	30
KU_{\max} , дБи	1,6	3,3	5,8	8,3	8,7	8,2	9,6	9,8	9,6
$KU_{\Delta=30^\circ}$, дБи	1,57	3,2	4,3	-1,2	0	-2,9	-2	-6,2	2,1
$KU_{\Delta=20^\circ}$, дБи	0,14	2,5	5,7	7,3	1	0,7	6	7,7	7,9
$KU_{\Delta=10^\circ}$, дБи	-4,7	-1,9	2,3	7	8,7	8,1	9,4	9,1	8,1
Δ_{\max} , град	31	27	20	15	10	9	9	8	7
$2\Delta\theta$, град	31	28	22	16	11	10	10	8	8
$2\Delta\varphi^{\circ}_{\Delta=\max}$, град	56	44	32	22	36	36	18	17	16
η , %	28	41	44	48	54	52	55	55	57
КСВ	1,62	1,54	1,44	1,5	1,5	1,3	1,5	1,2	1,5

В таблице 1 приняты следующие обозначения: KU_{\max} – максимальное значение КУ; $KU_{\Delta=10^\circ}$ – значение КУ под углом места $\Delta = 10^\circ$; Δ_{\max} (град) – значение угла места в вертикальной плоскости, при котором наблюдается максимальное значение КУ главного лепестка ДН; $2\Delta\theta$ (град) – ширина главного лепестка ДН в вертикальной плоскости по уровню половинной мощности; $2\Delta\varphi^{\circ}_{\Delta=\max}$ (град) – ширина главного лепестка ДН в горизонтальной плоскости по уровню половинной мощности под углом Δ_{\max} (град); η – коэффициент полезного действия антенны; КСВ – коэффициенты стоячей волны на входе антенны.

Анализ данных (см. таблицу 1) показывает, что рабочий диапазон V-образной антенны составляет 5–30 МГц. В этом диапазоне она обеспечивает эффективное функционирование на радиолиниях заданной протяженности. Ниже 5 МГц ее излучение характеризуется низкими значениями КУ, а также отсутствием выраженных направленных свойств.

Разработка 4-элементной АФАР на базе излучателя типа VH 100/22

Количество элементов АФАР определялось требованиями технического задания и количеством

возбудительных и РПДУ из состава передающей части радиотехнической системы.

Разработка четырехэлементной линейной АФАР 4VH 100/22 с равноамплитудным возбуждением и линейным изменением фазы [9] сводится к решению следующих задач:

– определение расстояния между фазовыми центрами (точками питания) элементов АФАР d (шаг линейной решетки) [9] для эффективного сложения полей излучателей при заданной ширине главного максимума ДН и его смещения в горизонтальной плоскости;

– разработка унифицированного алгоритма расчета фазовых задержек напряжений Ψ , поступающих на входы элементов АФАР, для изменения направления главного лепестка в горизонтальной плоскости φ .

Для исключения появления дифракционных боковых лепестков, сравнимых по уровню с главным максимумом ДН АФАР, необходимо выполнение условия $d \leq \frac{\lambda}{2}$. С учетом определенного частотного диапазона элемента АФАР – $10 \leq \lambda_{\text{раб}} \leq 60$ м, а также обеспечения наиболее эффективного излучения в диапазоне частот, соответствующим ОРЧ для трасс 800–1800 км, задача по определению шага решетки d сводится к построению электродинамических моделей АФАР со значениями d в пределах 5–30 м.

Таким образом, необходимо исследование ряда вариантов АФАР с различными значениями d , с целью поиска оптимального по ширине главного лепестка в плоскости φ , значению абсолютного КУ, минимизации уровня боковых лепестков (УБЛ) в рабочем диапазоне частот. На рисунке 5 приведен общий вид электродинамической модели АФАР 4VH 100/22 и в проекции на ось XY.

В таблице 2 приведены результаты расчета основных характеристик излучения АФАР при d , равном 25, 30, 35, 40 м при синфазном возбуждении элементов в направлении излучения $\varphi = 0^\circ$ – режим нормального излучения [9].

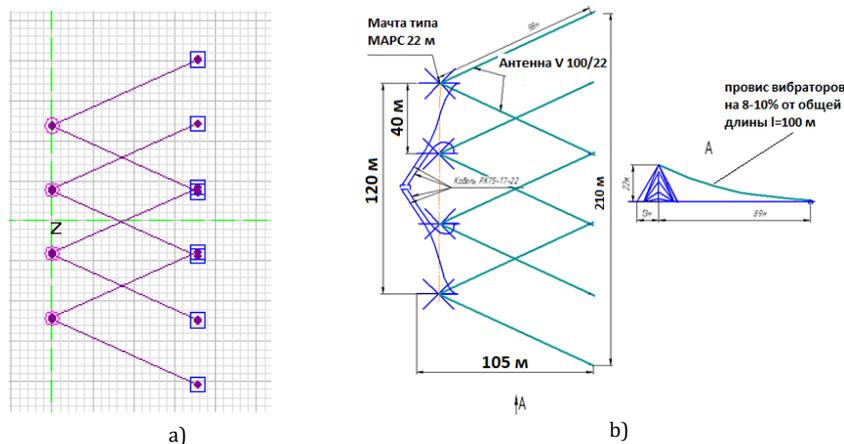


Рис. 5. АФАР 4VH 100/22: а) проекция XY; б) общий вид

Fig. 5. APPA 4VH 100/22: a) XY Projection; b) General View

ТАБЛИЦА 2. Результаты расчета АФАР при $d = 25/30/35/40$

TABLE 2. Results of APPA Calculation for $d = 25/30/35/40$

f , МГц	КУ _{max} , дБи	$2\Delta\varphi^{\circ}_{\Delta = \max}$, град	УБЛ1 _φ , дБи	УБЛ2 _φ , дБи
5	7,2/7,4/7,4/7,4	31/28/24/22	-9,4/-12/-10,3/-8,4	-/-/-
6	8,9/9/9,2/9,2	24/22/19/17	-11/-8,6/-7,8/-5,8	-/-/-9,2
8	11,2/11,3/11,3/11,2	17/15/14/12	-6,5/-4,6/-6,9/-3,7	-13/-7,8/-7,1
12	13,3/13,3/13,3/13,3	11/10/8/8	-3/-2/-2,8/-1,2	-6/0,3/5,1/-4,9
18	13,2/13,7/13,6	8/6/6/6	1,1/0,6/1,43	6,6/7,9/9/9
20	13,1/13,2/13,6/12,9	8/6/6/4	2,6/2,9/3/2,2	8,3/8,2/9,8/9,9
24	11,9/11,9/11,8/11,8	11,9/11,9/11,8/11,8	3,2/4/4/11,9	9,9/10/11,8/7,5
26	11,1/11,1/11,4/11,4	8/6/4/4	8/6/4/4	9,8/10,7/7,1/9
30	11,6/12/11,4/11,4	6/5/4/4	3,4/12,7/14,2/13	11,9/7,3/9,5/9,1

Дальнейшие расчеты с увеличением шага решетки d нецелесообразны из-за появления дополнительных дифракционных лепестков, сравнимых по амплитуде с главным максимумом, расщепления главного лепестка в горизонтальной плоскости, начиная с частоты 18 МГц, увеличения апертурного размера решетки в проекции на горизонтальную плоскость. Варианты с $d \leq 30$ также нецелесообразны вследствие значительного уменьшения абсолютного КУ, а также появлению пересечений вибраторов, что с учетом возникающих провисов, накладывает определенные сложности на конструктивные решения, усложняя методику развертывания АФАР на местности.

Критерием выбора оптимального d среди рассчитанных комбинаций было положено достижение максимального значения КУ в диапазоне частот, соответствующим трассам заданной протяженности и периоду проведения трассовых испытаний. Исходя из этих соображений, для реализации АФАР был выбран шаг решетки $d = 40$ м. Выбранное расстояние $d = 40$ м также является оптимальным, исходя из конструктивных соображений, обеспечивая лишь одно пересечение вибраторов

соседних антенн, что не требует дополнительных конструктивных решений.

Далее были определены варианты фазового распределения на входах элементов АФАР, обеспечивающие поворот главного лепестка ДН на разные углы в заданном секторе обслуживания. Электрическая схема соединений и подключений передающей части радиотехнической системы приведена на рисунке 6, где приняты следующие обозначения:

- АРМ – автоматизированное рабочее место;
- ВУ – 4-канальное возбудительное устройство;
- УМ 5 кВт – 5-киловаттный усилитель мощности;
- НО – направленный ответвитель из состава УМ;
- УСС 75/300 – устройство симметрирующее согласующее 75/300 Ом.

В тракте ВУ – УМ 5 кВт указаны значения разности фаз возбуждающих напряжений ($\Delta\psi$) между смежными ВЧ-трактами, т. е. фаза второго тракта относительно первого составляет $\Delta\psi$, третьего относительно первого $2\Delta\psi$, четвертого относительно первого $3\Delta\psi$. Положительное значение $\Delta\psi$ при данной нумерации излучателей в соответствии с рисунком 6 означает опережение по фазе.

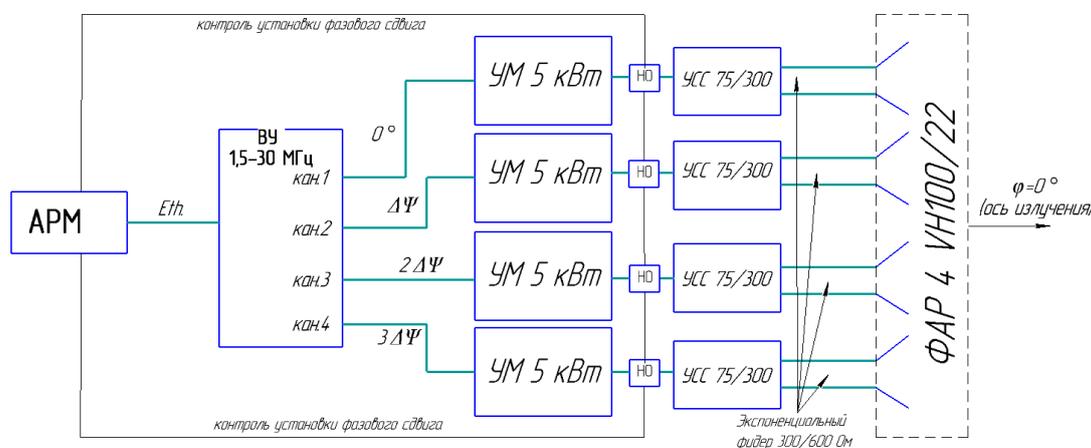


Рис. 6. Схема соединений и подключений передающей части радиотехнической системы

Fig. 6. Connection Scheme of the Transmitting Part of the Radio Engineering System

Для определения значения разности фаз возбуждающих напряжений ($\Delta\Psi$) с целью реализации поворота главного лепестка от нормали к оси решетки (режим наклонного излучения) воспользуемся формулой:

$$\Delta\Psi = \frac{2\pi}{\lambda} \times d \times \cos \varphi, \quad (1)$$

На рисунках 7 и 8 представлены результаты расчета реализации сканирования главного лепестка в горизонтальной плоскости на частотах 6 и 12 МГц. Расчетным способом были определены основные характеристики АФАР на базе V-образных антенн для всех полезных режимов фазирования. Результаты приведены в таблице 3. Расчеты проводились на частотах 6–18 МГц и под углом места $\Delta = 15^\circ$, на которых запланировано проведение испытаний по проверке приращения мощности и сканирования главного лепестка на радиолинии протяженностью 1800 км.

В таблице 3 приняты следующие обозначения: $\pm/\varphi_{\max} \Delta = 15^\circ$ – значение угла в горизонтальной плоскости при $\Delta = 15^\circ$, при котором наблюдается максимум ДН; $\pm/\Delta\Psi$ – значение разности фаз возбуждающих напряжений на входах смежных излучателей АФАР; $2\Delta\varphi \Delta = 15^\circ$ – ширина ДН в горизонтальной плоскости при $\Delta = 15^\circ$.

ТАБЛИЦА 3. Результаты расчета проверки управляемости диаграммы направленности АФАР

TABLE 3. Results of Calculating the Controlling Radiation Pattern of the APPA

f , МГц	\pm/φ_{\max} , град	$\pm/\Delta\Psi$, град	КУ, дБи	$2\Delta\varphi$, град
6	0	0	6,8	17
	8	40	7	16
	21	110	6	16
8	0	0	10,3	12
	6	40	10,2	12
	13	90	9,5	12
10	0	0	12,5	9
	5	40	12,2	9
	10	90	11	9
12	0	0	13,6	8
	4	40	13,1	7
	6	70	12,4	7
14	0	0	14	6
	3	40	13,6	7
	8	85	12,6	6
16	0	0	13,3	6
	3	40	13,1	6
	5	75	12,5	5
18	0	0	11,6	5
	3	45	11,5	5

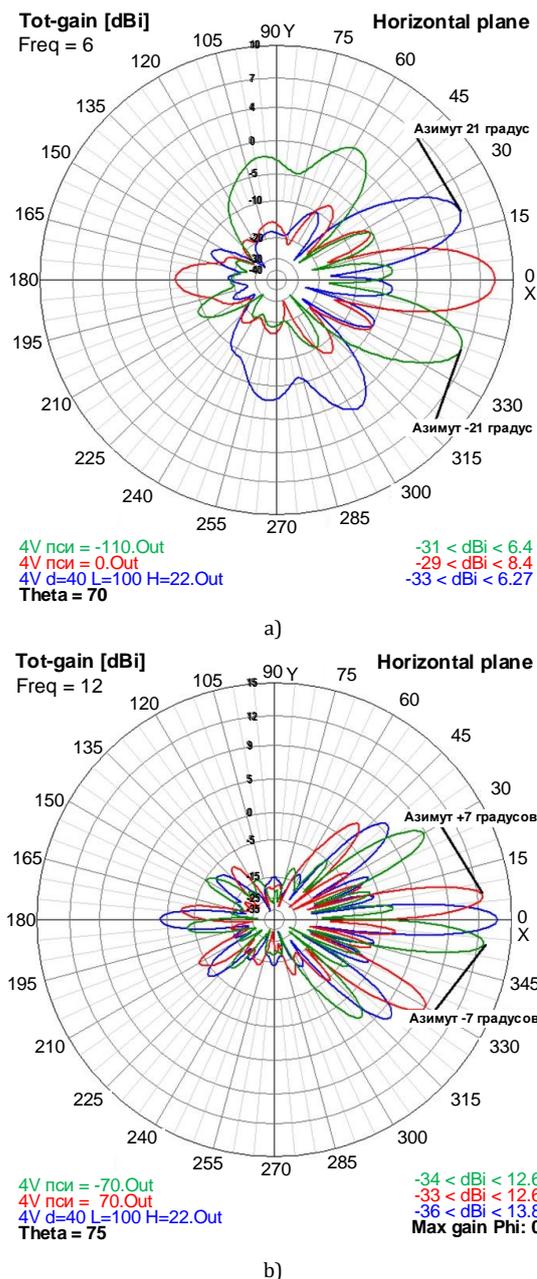


Рис. 7. Сканирование главного лепестка ДН АФАР 4 VH 100/22 на частотах: а) 6 МГц, $\Delta\Psi = 110^\circ$; б) 12 МГц, $\Delta\Psi = 70^\circ$
Fig. 7. Results of Scanning Main Beam of the APPA at the Frequencies: а) 6 MHz, $\Delta\Psi = 110^\circ$; б) 12 MHz, $\Delta\Psi = 70^\circ$

Трассовые испытания

Для оценки приращения мощности в зависимости от количества работающих элементов (антенн) в АФАР было организовано проведение трассовых испытаний [10] на трассе Москва – Тюмень протяженностью 1730 км. Передающая часть радиотехнической системы (рисунок 9) была развернута в Московской области, приемная часть (ИП1), в составе которой был спектроанализатор с возможностью записи сеансов и измерительная рамочная антенна, в Тюменской области. Для проверки реализации управляемости ДН, в г. Самара был развернут дополнительный измерительный пункт (ИП2) по составу оборудования аналогичный ИП1.

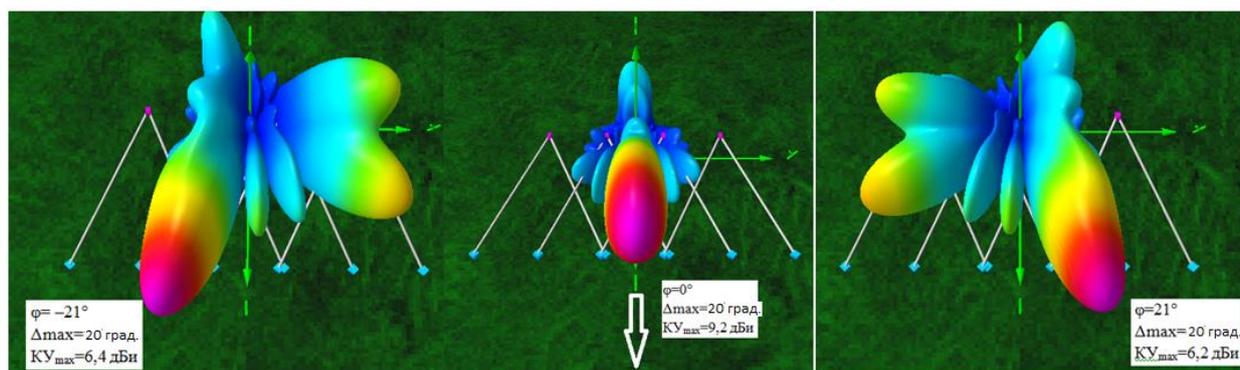


Рис. 8. Расчетные 3D ДН АФАР 4 VH 100/22 на частоте 6 МГц при ΔΨ = 0°, 110°, -110°

Fig. 8. Results of Calculating 3D Radiation Pattern APFA at Frequency 6 MHz at ΔΨ = 0°, 110°, 110°

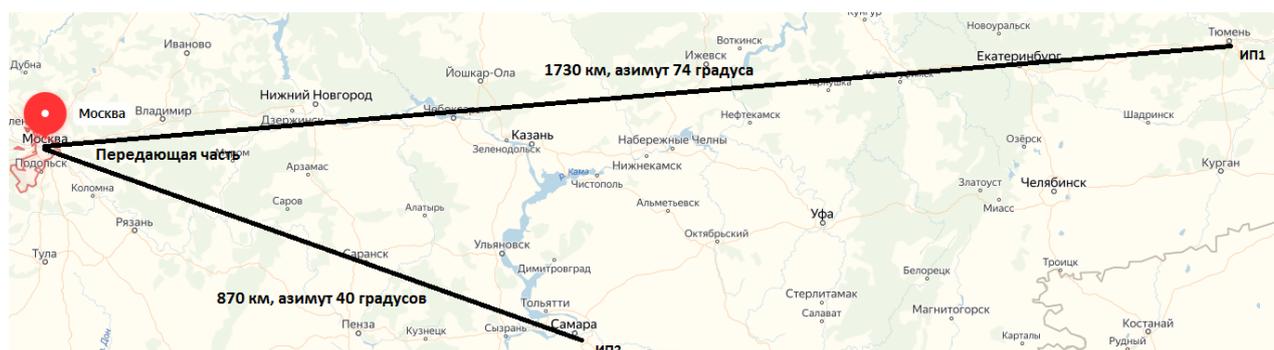


Рис. 9. Расположение передающей и приемных частей радиотехнической системы

Fig. 9. Location of Transmitting and Receiving parts of the Radio Engineering System

Испытания по оценке приращения мощности в зависимости от количества излучающих элементов АФАР проводились на частотах 9202, 11477, 14634, 16124 кГц. На каждой частоте проводился сеанс излучения и записи уровня принимаемого сигнала в течение 60 с. Пример результата записи уровней принимаемого сигнала на одной из частот представлен на рисунке 10.

Измерения уровней сигналов, формируемых ВЧ-трактами, на каждой частоте проводились за период времени, не превышающий 10 минут с целью минимизации влияния изменений отражающих слоев ионосферы на распространение радиоволн. От каждого сеанса записи вычислялось медианное значение (рисунок 11).

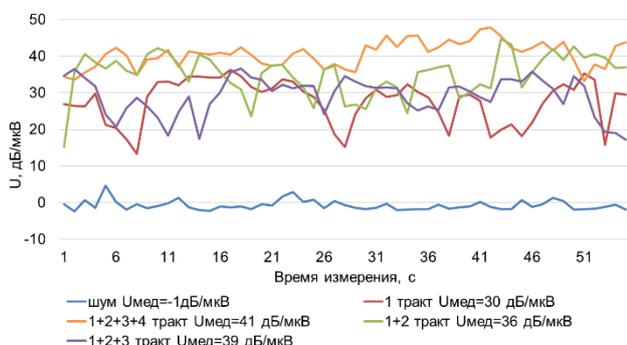


Рис. 10. Пример результатов измерений уровней сигналов на f = 9202 кГц

Fig. 10. Example of Measurement Results for Signal Levels at f = 9202 kHz

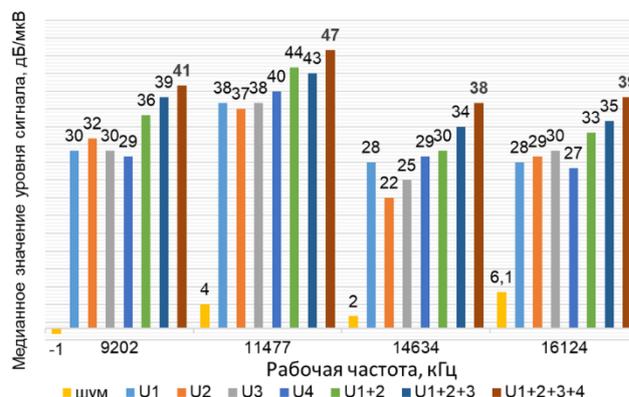


Рис. 11. Результаты измерений и обработки сеансов записи

Fig. 11. Results of Measurement and Processing of Recording Sessions

В таблице 4, представлены уровни сигналов, измеренные на ИП1.

$$U_{с, (мкВ)} = 10^{\frac{U_n, \text{дБ/мкВ}}{20}} \quad (2)$$

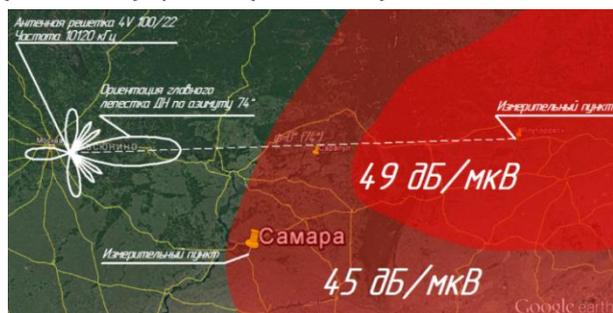
ТАБЛИЦА 4. Результаты измерений уровней сигналов на ИП1, мкВ

TABLE 4. Results of Measurement of Signal Levels on Measuring Point № 1, μV

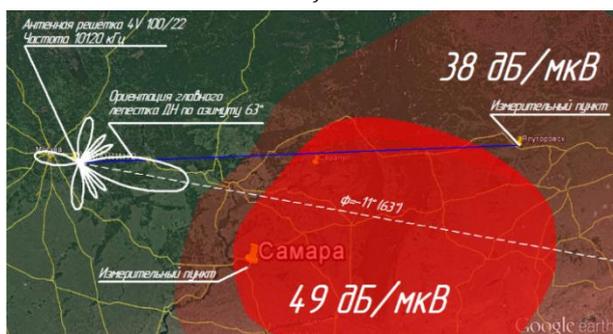
№	f, кГц	U ₁	U ₂	U ₃	U ₄	U ₁₊₂	U ₁₊₂₊₃	U ₁₊₂₊₃₊₄
1	9202	31,6	39,8	31,6	28,1	63,1	89,1	112,2
2	11477	79,4	70,8	79,4	100	158,5	141,2	223,9
3	14634	25,1	12,6	17,8	28,1	31,6	50,1	79
4	16124	25,1	28,1	31,6	22,4	44,6	56,2	89,1

Физическая интерпретация проводимого эксперимента по проверке управляемости главного лепестка ДН в горизонтальной плоскости АФАР 4VH 100/22 представлена на рисунке 12. Расположенные в Тюмени и Самаре измерительные пункты осуществляли одновременную запись уровней сигналов при работе АФАР 4VH 100/22 при сеансах связи на частотах 7447, 10120, 13881 кГц в двух режимах работы АФАР:

- максимум главного лепестка сориентирован по азимуту $\varphi = 0^\circ$ (направление на ИП1);
- главный лепесток поворачивался на предельно возможные углы для каждой из выбранных частот связи – это $\varphi = -17^\circ$ (7447 кГц), $\varphi = -11^\circ$ (10120 кГц), $\varphi = -8^\circ$ (13881 кГц).



a)



b)

Рис. 12. Ориентация максимума ДН по азимуту на ИП1 (а) и ИП2 (б)

Fig. 12. Orientation of the Main Beam in Azimuth on Measuring Point № 1 (a) and Point № 2 (b)

Как и в случае с оценкой приращения мощности, у каждого записанного сеанса вычислялось медианное значение уровня сигнала. Результаты измерений уровня сигнала на ИП1 и ИП2 приведены в таблице 5.

ТАБЛИЦА 5. Результаты расчета проверки управляемости диаграммы направленности АФАР

TABLE 5. Results of Experiments of Scanning Main Beam of the APPA

Превышение уровня сигнала (медианные значения минутных сеансов записи) над шумами, дБ/мкВ. Сеансы 14.06.16						
Частота, кГц	7447	10120	13881			
Изм. пункт/угол поворота ДН, φ	0°	-17°	0°	11°	0°	-8°
ИП1 (Тюмень)	46	38	49	38	51	43
ИП2 (Самара)	47	48	45	49	40	40

Полученные экспериментальные данные в ходе численного и натурального экспериментов подтверждают возможность исследований АФАР по эффективному управлению положением максимума ДН в горизонтальной плоскости, а также корректность электродинамической модели АФАР и модели расчета ДКМВ радиолиний.

Заключение

В данной статье показаны результаты, представляющие, на наш взгляд, определенный научный и практический интерес.

1) С помощью математического моделирования определен состав радиопередающего комплекса, тип антенного устройства для АФАР, геометрия антенного устройства и АФАР, оптимизированные с точки зрения наиболее эффективного обслуживания радиотрасс средней протяженности (800–1800 км) с наименьшими затратами.

2) Построена электродинамическая модель V-образной антенны в двух вариантах исполнения – с учетом провиса вибраторов антенны и без. Показано, что наличие величины провиса вибратора в 8–10 % от длины проводника приводит к уменьшению абсолютного коэффициента усиления в среднем на 0,5–1 дБи. Данную особенность необходимо учитывать при расчетах проволочных антенн КВ-диапазона.

3) Определен набор количественных показателей антенной системы, анализ которых в совокупности позволяет делать вывод о наиболее эффективном применении антенны в проектируемой радиотехнической системе. Однако многообразие параметров радиолинии, например, многолучевость, протяженность, географическое расположение корреспондентов, прогнозируемая точка отражения радиоволн от ионосферы и т. д. не позволяет с достаточной точностью задать ограничительные критерии к показателям.

4) Представлен алгоритм расчета четырехэлементной АФАР на базе V-образных антенн, подобрано оптимальное расстояние между соседними излучателями для наиболее эффективной работы на радиолинии протяженностью 1800 км. Данный алгоритм также может быть использован при проектировании и расчете АФАР с базовыми излучателями сложных конструкций, например, сверхширокополосных логопериодических антенн [11, 12].

5) Полученные в ходе математического моделирования характеристики АФАР нашли свое экспериментальное подтверждение, что говорит о высокой эффективности и надежности разработанной электродинамической модели, в частности:

– проведены трассовые испытания по оценке приращения уровня сигнала в точке приема (ИП1) в зависимости от количества излучающих элементов АФАР; полученные результаты измерений по проверке режимов приращения мощности позволяют

сделать вывод о наращивании эффективной изотропной излучаемой мощности с увеличением числа элементов в антенной решетке 4 VH 100/22: на исследованных частотах 9202, 11477, 14634 и 16124 кГц на приемном пункте наблюдается стабильное увеличение напряженности поля от 20 до 40 мкВ/м с добавлением очередного элемента из состава АФАР. Данное свойство позволяет получить выигрыш в качестве приема, а также повышает помехозащищенность радиолинии;

– принцип фазирования излучателей АФАР по падающим волнам напряжения показал свою работоспособность – изменение фазового соотношения падающих на входы элементов АФАР волн позволяет вращать главный лепесток ДН в горизонтальной плоскости в некоторых частотно-зависимых преде-

лах, определяемых шириной ДН в горизонтальной плоскости базового элемента АФАР; управление ДН в горизонтальной плоскости позволяет осуществлять маневрирование зоной обслуживания, сокращает количество АФУ, необходимых для обслуживания заданных секторов.

б) Представленный принцип фазирования элементов АФАР позволил создать автоматизированную систему управления радиопередающим комплексом, когда оператору необходимо ввести в систему только значение азимута на корреспондента и выбор частоты наиболее близкой к значению ОРЧ для данного времени. При этом установка необходимого фазового распределения в излучателях АФАР осуществляется автоматически в режиме реального времени.

Список используемых источников

1. Мешалкин В.А., Савицкий О.К. Перспективы развития средств и комплексов радиосвязи вооруженных сил Российской Федерации // Техника радиосвязи. 2010. №15. С. 65–76.
2. Зачатейский Д.Е., Шадрин Б.Г. Пути модернизации многоканальных узлов коротковолновой радиосвязи // Международная научно-техническая конференция (РЭИС-2011, Омск, 05–08 июня 2011). Радиотехника, электроника и связь: сборник докладов. Омск: Омский научно-исследовательский институт приборостроения, 2011. С. 66–75.
3. Гвоздев И.Н., Муравьев Ю.К., Серков В.П., Чернолес В.П. Характеристики антенн радиосистем связи. Ленинград.: Военная ордена Ленина краснознаменная академия связи имени С.М. Буденного, 1978. 231 с.
4. Муравьев Ю.К. Справочник по расчету проволочных антенн. Ленинград.: Военная ордена Ленина краснознаменная академия связи имени С.М. Буденного, 1978. 392 с.
5. Айзенберг Г.З., Белоусов С.П., Журбенко Э.М. Коротковолновые антенны. М.: Радио и связь, 1985. 535 с.
6. Барабашов Б.Г., Анишин М.М. Программный комплекс прогнозирования траекторных и энергетических характеристик радиоканалов диапазона 2–30 МГц «Трасса» (часть 1) // Техника радиосвязи. 2013. № 1(19). С. 25–34.
7. Барабашов Б.Г., Анишин М.М. Программный комплекс прогнозирования траекторных и энергетических характеристик радиоканалов диапазона 2–30 МГц «Трасса» (часть 2) // Техника радиосвязи. 2013. № 2(20). С. 13–21.
8. Бузова М.А., Юдин В.В. Проектирование проволочных антенн на основе интегральных уравнений: учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по специальностям 201100 – Радиосвязь, радиовещание и телевидение, 201200 – Средства связи с подвижными объектами. М.; Радио и связь, 2005. 172 с.
9. Кочержевский Г.Н., Ерохин Г.А., Козырев Н.Д. Антенно-фидерные устройства. М.: Радио и связь, 1989. 352 с.
10. Попов О.В., Сосунов Б.В., Фитенко Н.Г. Методы измерения характеристик антенно-фидерных устройств. Ленинград.: Военная ордена Ленина краснознаменная академия связи имени С.М. Буденного, 1990. 182 с.
11. Голубев В.М., Пашкевич В.Д. Антенная решетка турникетного типа КВ диапазона. Патент на полезную модель RU 188638 от 15.10.2018. Оpubл. 18.04.2019. Бюл. 11.
12. Голубев В.М., Пашкевич В.Д. Применение унифицированных широкополосных логопериодических излучателей для построения антенных полей передающих радиоцентров КВ диапазона // VII Международная научно-техническая и научно-методическая конференция. Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2018, Санкт-Петербург, Россия, 28 февраля–01 марта 2018 г.): сборник статей. Санкт-Петербург: СПбГУТ, 2018. Т. 3. С. 112–117. URL: <http://www.sut.ru/doci/nauka/7apino/APINO%202018-T.%203.pdf> (дата обращения 20.10.2019).

* * *

Development and Experimental Study of APAA HF-Band with Controlled Radiation Pattern

V. Golubev¹, V. Pashkevich¹ , M. Protsenko²

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

Article info

DOI:10.31854/1813-324X-2020-6-1-50-59

Received 20th November 2019

Accepted 6th March 2020

For citation: Golubev V., Pashkevich V., Protsenko M. Development and Experimental Study of APAA HF-Band with Controlled Radiation Pattern. *Proc. of Telecom. Universities*. 2020;6(1):50–59. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2020-6-1-50-59

Abstract: *There is a promising direction in the antenna field design of a stationary transmitting radio center short-wavelength range is the use of active phased array antennas with spatial power addition and a controlled directional pattern. The article considers the algorithm for calculating the V shaped antenna as a basic element of antenna array, apart from that it considers calculation of the four-element antenna array based on the V shaped antenna. This paper presents the track tests results to estimate the power increment depending on the operating elements in the antenna array, as well as horizontal controllability results.*

Keywords: *active phased array antenna, trace signals tests, effective isotropically radiated power, radiation pattern.*

References

1. Meshalkin V.A., Savitskiy O.K. Perspectives for Developing Radiocommunication Equipment and Centers for Armed Forces of the Russian Federation. *Radio Communication Technology*. 2010;15: 65–76. (in Russ.)
2. Zachateisky D.E., Shadrin B.G. Ways of Modernization of Multi-Channel Nodes of Short-Wave Radio Communication // International Scientific and Technical Conference, Omsk, 05–08 June 2011. Radio Engineering, Electronics and Communications: a Collection of Reports. Omsk: Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering Publ, 2011. (in Russ.)
3. 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.)
4. Muravev Yu.K. Handbook for Calculating Wire Antennas. Leningrad: Military Order of Lenin Red Banner Communications Academy named after S.M. Budyonny Publ.; 1978. 392 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. Barabashov B.G., Anishin M.M. Software Package «Trassa» for Predicting Trajectory and Power Characteristics of Radio Channels in 2-30 Mhz Band (part 1). *Radio Communication Technology*. 2013; 1(19): 25–34. (in Russ.)
7. Barabashov B.G., Anishin M.M. Software Package «Trassa» for Predicting Trajectory and Power Characteristics of Radio Channels in 2-30 Mhz Band (part 2). *Radio Communication Technology*. 2013; 2(20): 13–21. (in Russ.)
8. Buzova M.A., Yudin V.V. Design of wire antennas based on integral equations Moscow: Radio i sviaz Publ.; 2005. 172 p. (in Russ.)
9. Kocherzhevsky G.N., Erokhin G.A., Kozyrev N.D. *Antenna Feeder Devices*. Moscow: Radio i sviaz Publ.; 1989. 352 p. (in Russ.)
10. Popov O.V., Sosunov B.V., Fitenko N.G. *Methods for measuring the characteristics of antenna-feeder devices*. Leningrad: Military Order of Lenin Red Banner Communications Academy named after S.M. Budyonny Publ.; 1990. 182 p. (in Russ.)
11. Golubev V.M., Pashkevich V.D. *HF Turnstile Antenna Array*. Patent RF, no. 188638, 18.04.2019. (in Russ.)
12. Golubev V.M., Pashkevich V.D. Use of the Unified Broadband Log-Periodic Antennas for Creation the Antenna Fields of the Transmitting Short-Wave Radio Centers. *Proceedings of the VIIth International Conference on Infotelecommunications in Science and Education, 28 February–1 March 2018, St. Petersburg, Russian Federation*. St. Petersburg: Saint-Petersburg State University of Telecommunications Publ.; 2018. vol.3. p.112–117. (in Russ.) URL: <http://www.sut.ru/doci/nauka/7apino/APINO%202018-T.%203.pdf> [Access 20th October 2019]

Сведения об авторах:

ГОЛУБЕВ
Валерий Михайлович

кандидат технических наук, главный научный сотрудник отдела перспективных исследований и разработок АО «НТИ «Радиосвязь»,
aleks-gol1311@yandex.ru

ПАШКЕВИЧ
Василий Дмитриевич

заместитель начальника отдела перспективных исследований и разработок АО «НТИ «Радиосвязь», pashkevich_vd@ntiradio.ru
 <https://orcid.org/0000-0001-9306-1934>

ПРОЦЕНКО
Михаил Сергеевич

кандидат технических наук, профессор цикла многоканальных телекоммуникационных систем, средств и комплексов СПбГУТ им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, protsenkoms@gmail.com