

Моделирование и расчет характеристик АФАР КВ-диапазона на базе несимметричных вертикальных вибраторов

В.Д. Пашкевич^{1*}, В.М. Голубев¹, 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 19.10.2020

Принята к публикации 02.02.2021

Ссылка для цитирования: 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

Аннотация: При проектировании антенного поля стационарного передающего радиоцентра КВ-диапазона необходимо предусматривать резервирование наземных симметричных антенн, функционирующих на круглосуточных радионаправлениях, резервными, быстро разворачиваемыми антенными системами. В качестве таких антенн предложено использование несимметричных вертикальных вибраторов, активных фазированных антенных решеток (АФАР) на их основе с управляемой диаграммой направленности. Рассмотрены методы расчета таких систем, разработана методика определения фазовых соотношений токов на входах элементов АФАР с учетом ее размещения и функционирования на реальном объекте. Приведены результаты трассовых испытаний одиночных антенн и АФАР на радиолинии протяженностью 650 км.

Ключевые слова: электродинамическое моделирование, передающий радиоцентр, штыревая антенна, трассовые испытания, оптимальная рабочая частота, диаграмма направленности, сканирование главного лепестка диаграммы направленности в горизонтальной плоскости, коэффициент усиления, ионосферное распространение радиоволн.

Введение

Анализ состава антенно-фидерных устройств типового передающего радиоцентра КВ-диапазона с обеспечением функционирования на радиолиниях протяженностями 500–2000 км позволяет сделать вывод, что в качестве основных наземных антенн используются широкоизвестные [1, 2] симметричные антенны типа:

– ВГДШ, ВГДШП, УГД, УГДШ, ВГДШ-2У, ВГДШП-2У, РГ, РГД, строительство которых осуществлялось в 60–70-х годах прошлого столетия;

– антенны нового конструктивного исполнения типа ЛПА, Э1377-1.1, Э1377-2.1, Э1377-2.2.

Для разворачивания данных антенн на объекте требуются хорошо подготовленные площадки, очищенные от леса, площадями десятки (ВГДШ и др.) и сотни (ЛПА, РГД) метров. Относительно большие га-

бариты антенн, обусловленные техническим диапазоном обслуживаемыми ими радиолиний, определяют их низкую защищенность от ряда факторов, таких как стихийные бедствия, низкая разведзащищенность и, как следствие, высокая вероятность поражения высокоточным оружием.

С учетом перечисленных факторов очевидно, что антенны, функционирующие на круглосуточных радионаправлениях постоянной готовности, должны резервироваться комплектом резервных быстро разворачиваемых антенн. Для решения данной задачи могут быть применены несимметричные вертикальные вибраторы [1, 3, 4], а также активные фазированные антенные решетки (АФАР) на их основе с управляемой диаграммой направленности в азимутальной (горизонтальной) плоскости [5].

Как правило, задачи проектирования диапазонных АФАР решаются в два этапа [6].

Этап 1. Выбор антенны (элементарного излучателя) с требуемой характеристикой направленности и согласованием (достижения минимального коэффициента стоячей волны) с передатчиком (приемником) радиостанции во всем диапазоне частот работы радиолинии.

Этап 2. Конфигурация АФАР (топологическое распределение излучателей, формирование системы питания с требуемым амплитудно-фазовым возбуждением), обеспечивающая заданную характеристику направленности при сканировании в диапазоне частот.

Методология построения антенн применительно к ДКМВ-радиосвязи ионосферной (пространственной) волной базируется на решении задач:

- электродинамического анализа (внутренняя и внешняя задачи электродинамики) проволочных структур вблизи границы раздела земля–воздух [7];
- синтеза электродинамических систем с заданными характеристиками направленности [8, 9].

Задачи анализа ДКМВ-антенн могут быть решены аналитическими [4, 6, 7], численными (вычислительными) [8, 9, 10] и комбинированными методами электродинамики [10] в условиях тонкопроволочного приближения излучающих структур с учетом конечной проводимости подстилающей поверхности.

Решение задачи синтеза антенн и АФАР, образованных на их основе, заключается [6] в получении заданной формы характеристики направленности, максимизации коэффициента направленного действия и оптимизации диаграммы направленности (формировании минимума диаграммы направленности в заданном направлении, уменьшении уровня побочных лепестков и т. д.).

Синтез антенных решеток, в особенности АФАР, направлен на выбор способа расположения элементов (эквидистантные, неэквидистантные, линейные, плоские и т. д.), вычисление распределения возбуждения элементов АФАР, а также оптимальное размещение излучателей с учетом требований по формированию заданной характеристики направленности и ее сохранению при (сканировании) изменении направления главного лепестка.

Обозначенная проблематика разрешается методами глобальной оптимизации целевой функции многих переменных. Практика конструирования антенн и АФАР показывает, что при решении задач синтеза антенных систем применяются два основных класса методов глобальной оптимизации: детерминированные (градиентные) и стохастические (эволюционные). Выбор конструктором конкретного метода базируется на возможности формализации задачи (целевой функции). Как правило, в

тех случаях, когда целевую функцию удастся задать в аналитическом виде (дифференцируемая функция), используют градиентные методы, характеризующиеся высокой производительностью (малое время решения задачи при низких требованиях к вычислительной мощности ЭВМ). В противном случае, например, при решении задач анализа численными методами электродинамики – стохастическими.

Использование современных методов вычислительной электродинамики в совокупности с эволюционными методами глобальной оптимизации позволяет синтезировать конструктивно сложные антенные системы, оптимальные введенным ограничениям электродинамических моделей, учитывающие электрические характеристики материальной среды размещения антенн произвольных конструкций.

Целью настоящей работы является:

- оценка аналитических и вычислительных способов моделирования АФАР;
- оценка степени корреляции данных моделирования с характеристиками реальных АФАР;
- разработка методики настройки АФАР на реальном объекте с учетом наличия пассивных элементов окружающей обстановки, искажающих характеристику направленности АФАР;
- количественная оценка эффективности работы штыревых антенн и АФАР на их основе на радиолинии протяженностью 650 км ионосферной волной.

Геометрия модели исследования

В рамках работ по модернизации передающих коротковолновых радиоцентров АО «НТИ «Радиосвязь» были разработаны и изготовлены антенны типа АШ (аббр. от Антенна Штыревая стационарная) с перестраиваемыми согласующими устройствами диапазона 1,5–30 МГц, а также сформированы двухэлементные АФАР на их основе и проведены теоретические и экспериментальные исследования характеристик этих АФАР.

Общий вид двухэлементной АФАР на базе антенн АШ представлен на рисунке 1. Варианты размещения антенн на объекте (стационарный и защищенный) приведены на рисунке 2.

Изделие АШ в своем составе имеет несимметричный вертикальный вибратор высотой 11 м, согласующее устройство (СУ), а также его блок управления, размещаемый в техническом здании. Частотный диапазон антенны – 1,5–30 МГц. Согласующее устройство выполняет коммутацию элементов согласования по сигналам от радиопередающего устройства (РПДУ) через блок управления, обеспечивая уровень согласования коэффициента стоячей волны по напряжению антенно-фидерного тракта со входом антенны во всем частотном диапазоне не хуже 2.

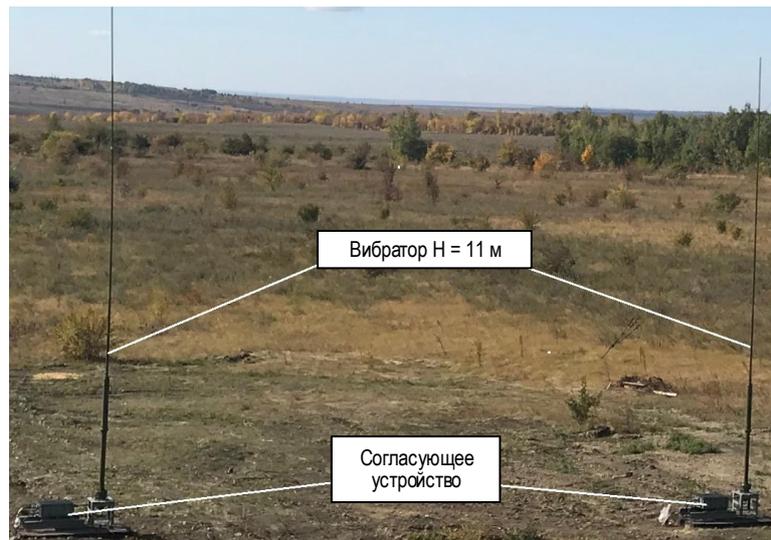


Рис. 1. Общий вид антенн АШ (стационарный вариант размещения)

Fig. 1. General View of WSA, abbr. from Whip Stationary Antenna, (Fixed Placement Option)

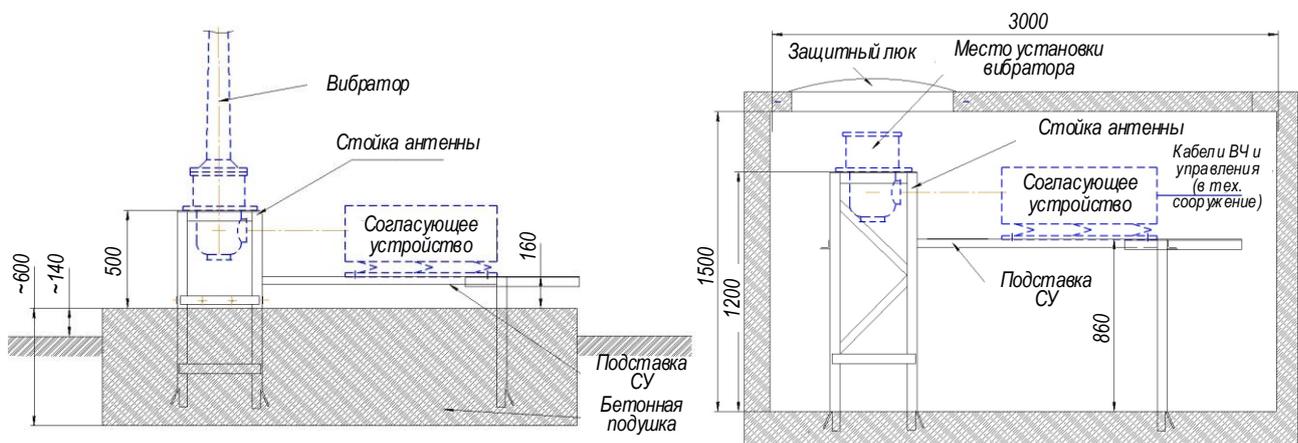


Рис. 2. Варианты размещения на объекте: а) стационарный; б) защищенный (аварийный)

Fig. 2. Options for Placement: a) Stationary; b) Protected (Emergency)

Расчет характеристик излучения антенны АШ и ФАР 2 АШ по пространственной волне

В данном подразделе представлены результаты расчетов характеристик излучения, выполненные в программном пакете 4NEC2X, позволяющие количественно оценить возможности двухэлементной АФАР по формированию направленного излучения в любом азимутальном направлении в рабочем диапазоне частот.

Расчетная модель фазированной антенной решетки 2 АШ (ФАР 2 АШ) представлена на рисунке 3 и состоит из активных антенн АШ. Данная модель не имеет привязки к местности на объекте развертывания, вследствие постановки задачи по количественному определению абсолютного коэффициента усиления ФАР и одиночной антенны АШ в режиме автономной работы.

Расстояние между антеннами АШ составляло 15 м, и этот выбор был обусловлен проектными требованиями к размещению данных антенн на

объекте монтажа с учетом их совместимости с другими сооружениями. Расчеты диаграмм направленности проводились с учетом потерь в подстилающей земной поверхности с соответствующими параметрами: $\sigma = 0,01 \text{ См/м}$; $\epsilon = 10$.

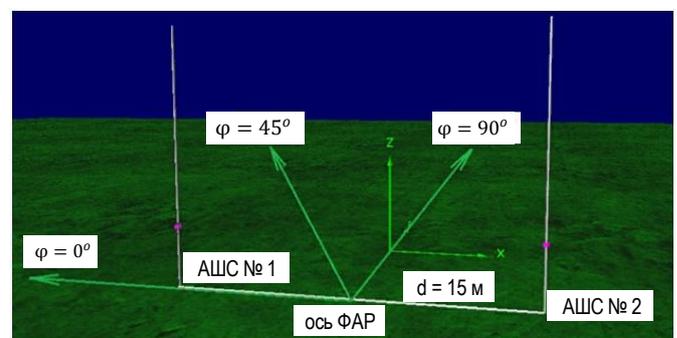


Рис. 3. Расчетная модель ФАР 2 АШ

Fig. 3. Design Model of the PAA 2 AWS (abbr. from Phased Antenna Array of 2 WSA)

Исследовались диаграммы направленности в вертикальной и горизонтальной плоскостях на частотах 2–30 МГц при оптимальном сложении полей антенн АШ № 1 и АШ № 2 для трех значений азимутального угла φ [12]:

- $\varphi = 0^\circ$ (осевое излучение);
- $\varphi = \pm 45^\circ$ (наклонное излучение);
- $\varphi = \pm 90^\circ$ (поперечное/нормальное излучение).

Для азимутальных углов $\varphi = 180^\circ$ и $\varphi = \pm 135^\circ$ диаграммы направленности будут иметь вид зеркального изображения. Значения фазы возбуждающего напряжения, поступающего на вход АШ № 1, принимается равным 0, фазовый сдвиг Ψ в точке питания АШ № 2 для оптимального сложения полей в заданном азимуте φ должен вычисляться по формуле:

$$\Psi^0 = 1,2 \times f \times d \times \cos\varphi, \quad (1)$$

где f – частота в МГц; $d = 15$ – расстояние между антеннами ФАР в метрах.

Для определения длин кабелей задержки $l_{\text{геом}}$, обеспечивающих $0^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ$, воспользуемся формулой:

$$\Psi^0 = \frac{\sqrt{\varepsilon} \times l_{\text{геом}}}{\lambda} \times 360. \quad (2)$$

После преобразований, с учетом $\lambda = \frac{c}{f}$:

$$\Psi^0 = \frac{\sqrt{\varepsilon} \times l_{\text{геом}} \times f \times 360}{300} = 1,2 \times f \times \sqrt{\varepsilon} \times l_{\text{геом}}, \quad (3)$$

Подставляя (3) в (1) получаем:

$$l_{\text{геом}} = \frac{d \times \cos\varphi}{\sqrt{\varepsilon}}, \quad (4)$$

где $\varepsilon = 2,3$ – диэлектрическая проницаемость полиэтиленовой изоляции бронированного радиочастотного коаксиального кабеля РК-75-44-15Б, применяемого для питания антенн типа АШ.

Таким образом, с учетом (4) для обеспечения поворота главного лепестка диаграммы направленности ФАР в пределах $0^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ$ потребуются длины радиочастотного кабеля, питающего АШ № 2 от 0 до 10 м.

На рисунках 4 приведены расчетные диаграммы направленности АШ №1 (красный цвет) и ФАР 2 АШ (синий цвет) на частоте 8 МГц в горизонтальной (φ) и вертикальной (θ) плоскостях.

Анализ результатов расчета диаграмм направленности во всей коротковолновой области позволил сделать вывод о величине среднего приращении по абсолютному коэффициенту усиления двухэлементной ФАР по сравнению с одиночной антенной из ее состава в режиме:

- поперечного излучения (см. рисунки 4а и 4б) – 3,1 дБи;
- осевого излучения (см. рисунки 4с и 4д) – 2,4 дБи;
- наклонного излучения (см. рисунки 4е и 4ф) – 2,5 дБи.

Характеристика направленности ФАР 2 АШ на расстоянии 10 км от антенной системы при подводимой мощности к каждой антенне 1 кВт (2 кВт суммарно) для трех направлений фазирования излучения электромагнитного поля представлена на рисунке 5. Здесь синим цветом изображены характеристики направленности, рассчитанные в программном пакете 4NEC2X, а красным – аналитическим способом по методике [4].

В целях повышения наглядности диаграммы направленности АФАР, вычисленные аналитически (красный цвет), нормированы и в горизонтальной плоскости отображены зеркально экваториальной плоскости сферических координат, а в горизонтальной – отображены в другом масштабе (зеленая линия – радиальная компонента равна «единице»).

В результате анализа полученных результатов (рисунок 5) возможно сделать следующие выводы:

- направления излучения и характер главного и бокового (боковых) лепестков диаграммы направленности исследуемых моделей с высокой степенью точности совпадают;
- отклонения в результатах наблюдаются в нулях диаграммы направленности, что возможно объяснить ограничениями аналитической модели и машинной степенью точности полученных вычислений.

Полученные оценки позволяют вести речь о возможности разработки быстрых алгоритмов синтеза характеристик направленности многоэлементных, а также разнородных по составу одиночных излучателей ФАР на основе комбинирования методов анализа и синтеза ФАР аналитическими и вычислительными методами электродинамики.

Методика настройки ФАР 2 АШ на объекте

Представленные выше расчеты не учитывают реальную обстановку на объекте размещения. Различные сооружения, мачты, воздушные фидерные линии, разные геометрические длины радиочастотных кабелей, питающие элементы АФАР, а также трассы их прокладки, изгибы, невозможность реализации одинаковой электрической длины двух РПДУ и антенно-фидерного тракта в целом могут кардинально и разнонаправленно изменить вид расчетных диаграмм направленности АФАР и одиночных штыревых антенн в режиме автономной работы. Поэтому эффективность работы АФАР может быть не такой высокой, как это следует из представленных выше результатов.

В условиях размещения реального объекта, с учетом вышеописанных особенностей, в условиях работы на реальных корреспондентов была разработана и реализована методика определения значений фаз Ψ в антеннах из состава ФАР 2 АШ.

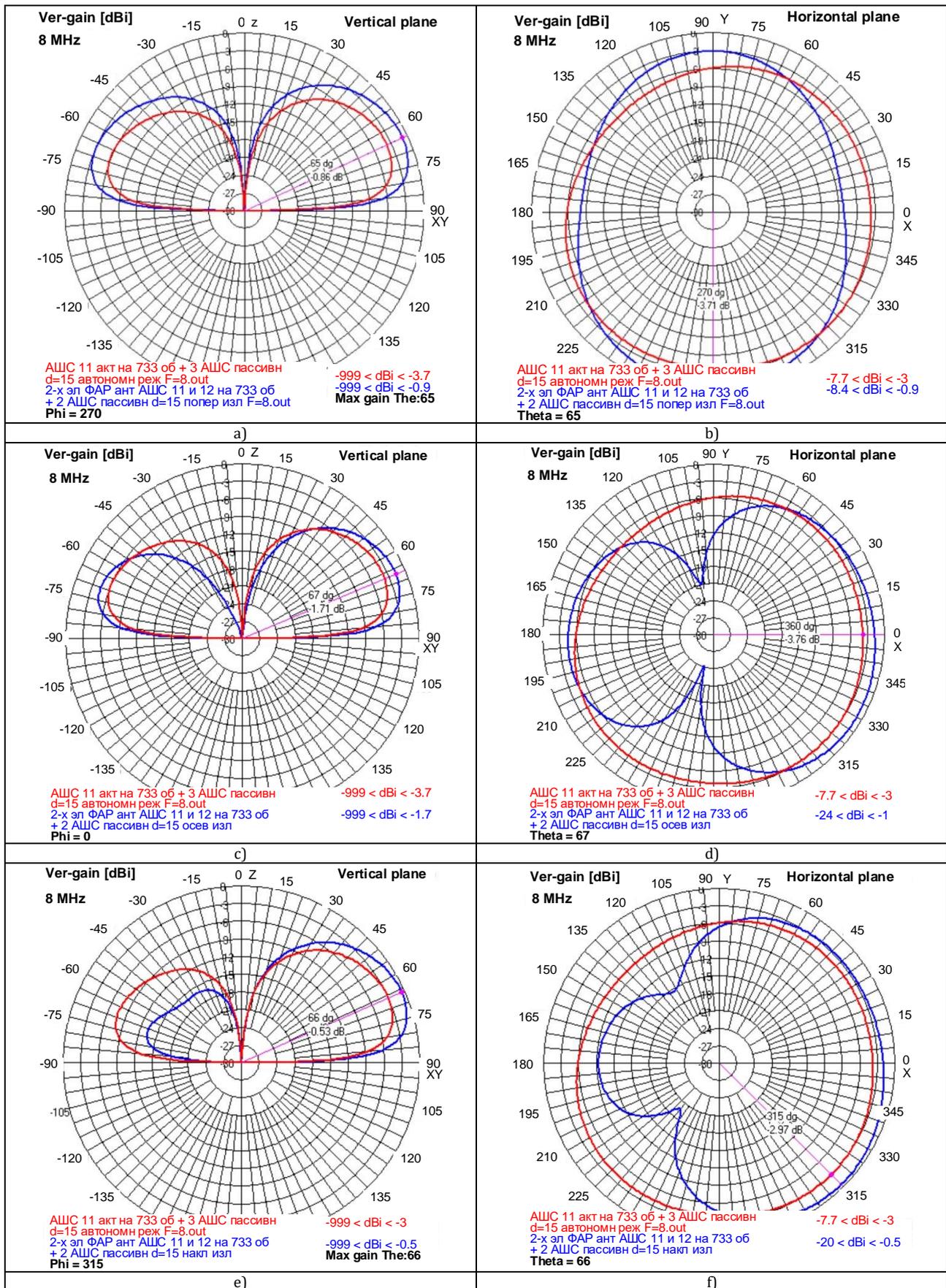


Рис. 4. Диаграммы направленности ФАР 2 АШ (синий цвет) в режиме осевого, поперечного, наклонного излучения (синий цвет) и антенны АШ № 1 (красный цвет) в режиме автономной работы на частоте 8 МГц
 Fig. 4. Radiation pattern PAA 2 WSA and WSA №1 at 8 MHz

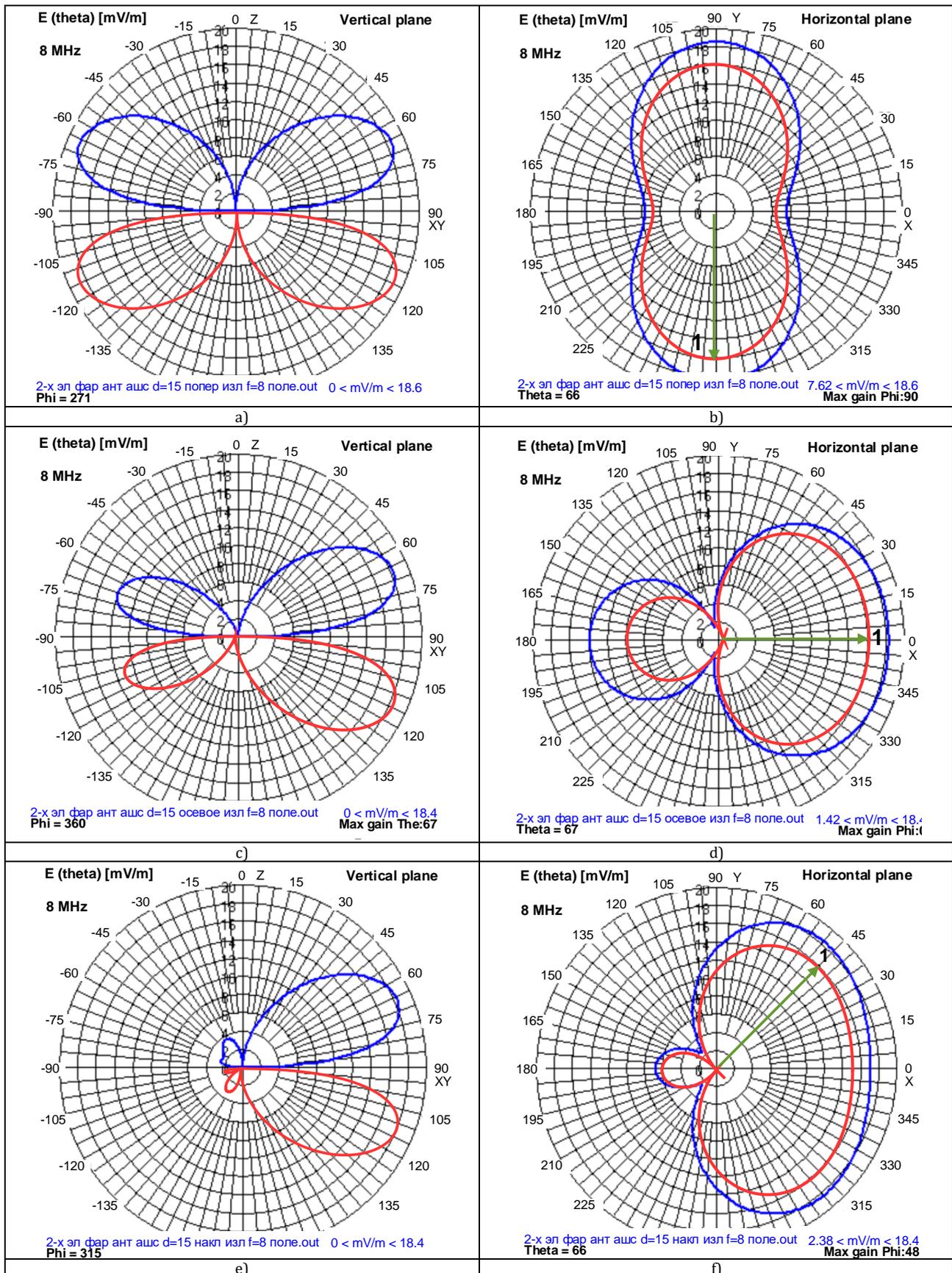


Рис. 5. Диаграммы направленности ФАР 2 АШ: синий цвет – расчет в программном пакете 4NEC2X; красный цвет – по методике [4]

Fig. 5. Radiation pattern PAA 2 WSA: Blue Color – Calculation at the 4NEC2X Software Package; Red Color – According to the Method [4]

Данные по протяженности радиолиний и азимуты на корреспондентов, обслуживание которых должно производиться ионосферной волной с помощью АШ и ФАР 2 АШ, приведены в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1. Дальности и азимуты на взаимодействующих корреспондентов

TABLE 1. Distances and Azimuths for Interacting Correspondents

№ корреспондента	Направление								
	№ 1						№ 2	№ 3	
Дальность, км	715	646	623	1000	663	718	581	1050	1050
Азимут, ф°	300	308	328	315	335	295	14	50	50

Анализ данных таблицы 1 позволяет выделить всего три азимутальных направления, для которых необходимо подобрать фазовые соотношения. Это азимуты – $\varphi_1 = 315^\circ$, $\varphi_2 = 14^\circ$ и $\varphi_3 = 50^\circ$.

Структурная схема высокочастотного тракта с антеннами АШ приведена на рисунке 6, где приняты следующие обозначения:

- ВУ – одноканальное возбуждающее устройство диапазона 1,5–30 МГц;
- КСАУ ПДРЦ – комплекс средств автоматизированного управления передающего радицентра; осуществляет управление средствами связи объекта по различным интерфейсам;
- ПКВ – прибор коммутации возбуждателей, обеспечивающий коммутацию ВЧ-сигналов в диапазоне 2–30 МГц с четырех входов на четыре выхода; дополнительно в режимах вх. 1(2) – вых. 1, вых. 2 (см. рисунок 6), а также вх. 3(4) – вых. 3, вых. 4 ПКВ обеспечивает управление фазовыми сдвигами и коэффициентом передачи в скоммутированных трактах по командам от КСАУ ПДРЦ по интерфейсу Ethernet. Управление фазовыми сдвигами в выбранных ВЧ-трактах обеспечивается путем выбора по командам управления геометрических длин линий задержек в пределах от 0 до 37,8 м с шагом 0,6 м.

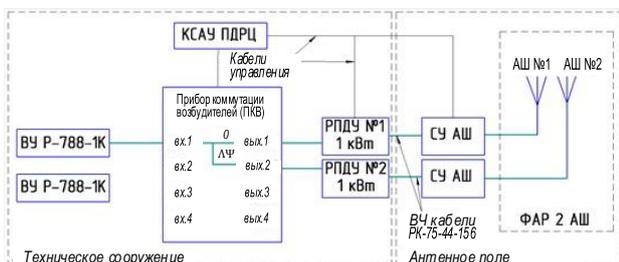


Рис. 6. Структурная схема ВЧ-тракта

Fig. 6. Block diagram of the HF path

Методика определения значений фаз в элементах (антеннах) ФАР 2 АШ, обеспечивающих излучение в заданных направлениях, предполагает проведение измерений напряженности поля земной волны в ближней зоне, на удалении 50 м [12] с помощью измерительной антенны, последовательно устанавливаемой в этих направлениях (рисунок 7).

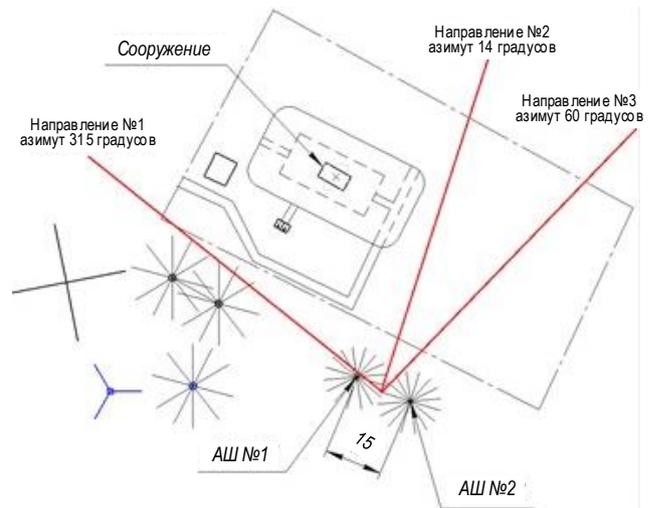


Рис. 7. Точки измерения напряженности полей, создаваемых земной волной в направлениях № 1, 2, 3

Fig. 7. Points for Measuring the Strength of the Fields Created by the Earth Wave in the Directions 1, 2, 3

Последовательность действий при этом была следующей:

- измерительная антенна с анализатором спектра устанавливалась в точке измерения № 1;
- включался на излучение РПДУ № 1 с АШ № 1, производилось измерение напряженности поля земной волны U_1 в точке размещения измерительной антенны;
- аналогично производилось измерение U_2 , создаваемого РПДУ № 2 и АШ №2;
- включались на излучение обе антенны АШ № 1 и АШ № 2 от двух РПДУ, возбуждаемых когерентно одним возбуждателем;
- на каждой частоте, плавно изменяя фазу $\Delta\psi$ путем перебора различных длин линий задержек в тракте с РПДУ № 2 и АШ № 2 с помощью прибора ПКВ, фиксировалось максимальное значение напряженности поля $U_{\text{ФАР}}$ в месте расположения измерительной антенны, а также состояние прибора ПКВ на данной частоте;
- измерения повторялись в точках № 2 и № 3 (направления № 2 и № 3, соответственно).

Результатом измерений стал набор данных, сведенных в таблицу 2. Анализ измерений дает возможность сделать вывод, что подбор фазового распределения в высокочастотных трактах № 1 и 2, реализуемый в приборе ПКВ путем изменения геометрических длин линий задержек, позволил получить выигрыш по напряженности поля, создаваемого ФАР 2 АШ относительно автономной работы каждой из антенн АШ. В частности, на каждой исследованной частоте диапазона 2–30 МГц при работе ФАР 2 АШ наблюдалось увеличение напряженности поля от 3 до 12 дБ/мкВ по сравнению с полями, создаваемыми одиночными антеннами, что соответствует теоретически ожидаемому увеличению сигнала на 6 дБ (в 4 раза по мощности).

ТАБЛИЦА 2. Результат измерений уровня полей в ближней зоне (направление №1)

TABLE 2. Result of Field Level Measurements in the Near Zone (Direction 1)

f, МГц	Направление № 1			ΔΨ, м
	дБ/мкВ			
	U ₁	U ₂	U _{ФАР-АШ 1,2}	
2,66	91	87	94	4,8
3,5695	93	90	98	0
4,4395	86	91	97	33,6
5,757	83	87	92	24
...				
28,999	57	56	67	7,2
29,217	59	56	68	8,4

Трассовые испытания

Совокупность полученных расчетных и экспериментальных результатов оценки приращения эффективной изотропно излучаемой мощности (ЭИИМ) в зависимости от режима работы антенной системы (автономная работа или АФАР) позволили сделать вывод о целесообразности проведения трассовых испытаний с использованием ионосферного канала распространения радиоволн [12]. Для проведения этих испытаний была выбрана трасса г. Саратов (передающий пункт) – г. Владимир (приемный пункт) протяженностью 650 км. Технический диапазон радиолинии в период проведения испытаний (март 2020 г.), представленный на рисунке 8, был определен по [1], а также с помощью пакета программ для долгосрочного прогнозирования траекторных и энергетических характеристик радиоканалов диапазона 2–30 МГц «Трасса» [13, 14].

На приемном пункте был развернут анализатор спектра с возможностью записи уровня сигнала, подключенный к приемной штыревой пассивной антенне высотой 2 м, размещенной на железной крыше кирпичного здания высотой 7 м. По команде из приемного пункта передающий начинал последовательное излучение «точек» (класс излучения F1B-200) ВЧ-трактами с антеннами АШ № 1, АШ № 2, ФАР 2 АШ. Продолжительность каждого сеанса излучения и записи составляла 60 с, таким образом, на каждой частоте время измерения трех сеансов составляло не более 6–7 мин. Пример записи сеансов на частоте 7187 кГц приведены на рисунке 9.

Дополнительно с помощью измерителя искажений телеграфных сигналов ЭТИ-69 оценивалась величина искажений телеграфных посылок.

Технический диапазон радиолинии в период проведения испытаний: 6,2–7,8 МГц. Вне границ указанного участка прохождения радиоволн отсутствовало. По результатам каждого сеанса на каждой частоте вычислялось медианное значение. Ре-

зультаты обработки 9 сеансов представлен на рисунке 10, измеренных искажений телеграфных посылок в таблице 3, где РВ – редкие выбросы.

ТАБЛИЦА 3. Результат измерений искажений телеграфных посылок

TABLE 3. Result Measurements of Distortion Telegraph Parcels

Частота, кГц	6257	6423,5	6853	7187	7545
Антенна					
АШ № 1	0–3 (РВ до 25)	0–2	0–5	0–8	0–2 (РВ до 8)
АШ № 2	0–7 (РВ до 20)	0–3	0–4 (РВ до 25)	0–5	0–3 (РВ до 7)
ФАР 2 АШ	0–1 (РВ до 6)	0–1	0–2	0–1	0–1

Результаты трассовых испытаний АШ и ФАР 2 АШ

Во-первых, разработанная в АО НТИ «Радиосвязь» передающая штыревая антенна с согласующим устройством типа АШ, а также двухэлементные АФАР из антенн АШ могут эффективно применяться на трассах малой и средней протяженности в качестве как основной антенной системы на радиолинии, так и аварийной, резервирующей наземные симметричные антенны. Конструктивное исполнение обеспечивает быстроту развертывания антенны, а также два варианта строительства (развертывания) на объекте – стационарный наземный и защищенный (аварийный), определяемые проектными решениями.

Во-вторых, построена электродинамическая модель двухэлементной АФАР на базе штыревых антенн типа АШ. Результат анализа характеристик излучения АФАР позволяет сделать вывод о возможности сложения полей в произвольном направлении в горизонтальной плоскости, при этом обеспечивается средний выигрыш по абсолютному коэффициенту усиления 2,67 дБи во всем диапазоне частот по сравнению с одиночной антенной.

В-третьих, для подтверждения реализации сложения ЭИИМ в пространстве в заданных направлениях были проведены трассовые испытания на радиолинии протяженностью 650 км. Полученные результаты измерений по проверке приращения мощности позволяют сделать вывод о наращивании ЭИИМ с увеличением числа элементов в антенной решетке: на исследованных частотах 6257, 6423,5, 6853, 7187, 7545, 7725,5 кГц на приемном пункте наблюдалось стабильное увеличение напряженности поля от 1 до 9 дБ/мкВ при работе двух элементов АФАР, что при передаче телеграфных сообщений позволяет получить средний выигрыш по краевым искажениям от 1 до 7 % при допустимой норме краевых искажений телеграфного канала 15 % [15].

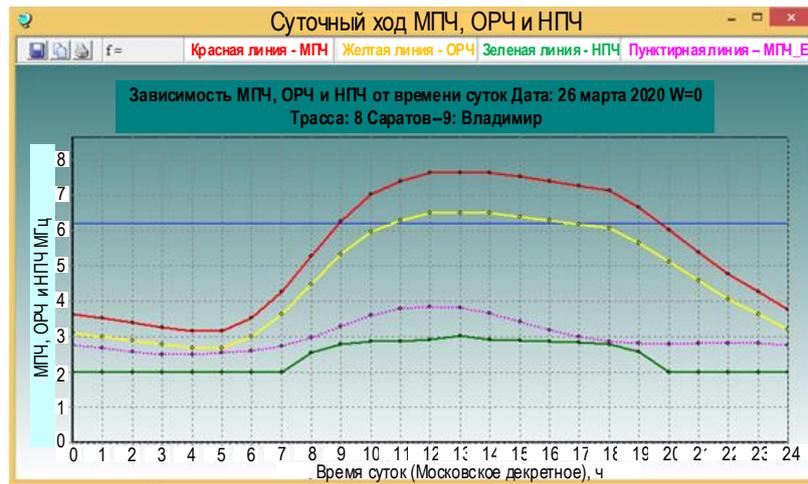


Рис. 8. Суточный ход наименьшей применимой частоты (НПЧ – зеленая линия), оптимальной рабочей частоты (ОРЧ – желтая линия), максимальной применимой частоты (МПЧ – красная линия) в период проведения испытаний на трассе Саратов – Владимир

Fig. 8. Frequency Range during Testing on the Saratov – Vladimir Radio Path

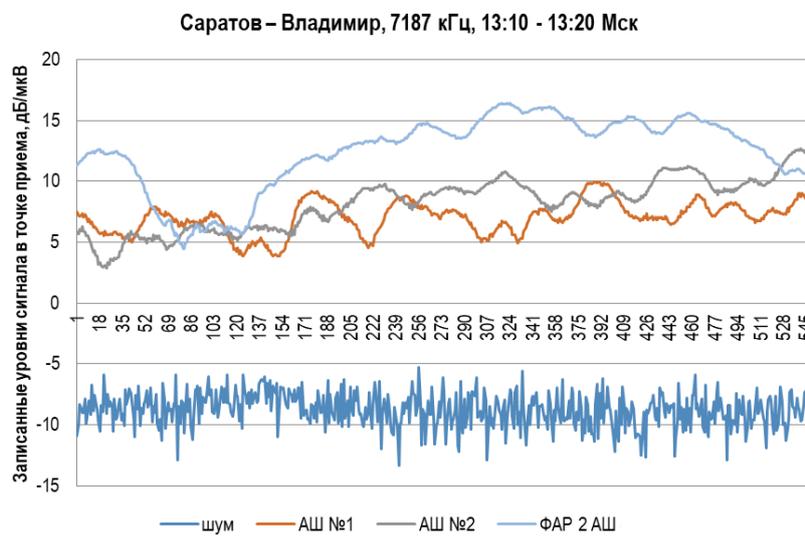


Рис. 9. Результат записи уровней сигналов на $f = 7187$ кГц

Fig. 9. Result of Recording Signal Levels at the Receiving Point (Vladimir) at a Frequency 7187 KHz



Рис. 10. Медианные значения уровней сигналов

Fig. 10. Median Values of Signal Levels

В-четвертых, при проведении трассовых испытаний теоретически и экспериментально определено, что на коротких трассах (500–700 км) диапазон ОРЧ составляет от 2,5 до 9 МГц. При этом в моменты организации сеансов связи частоты должны выбираться исходя из условия $f_{ОРЧ} \pm (0-1,5 \text{ МГц})$. Такое ограничение усложняет организацию связи по сравнению с организацией связи на трассах средней (1000–3000 км) протяженности [16], в которых технический диапазон радиолинии составляет существенно больший участок.

В-пятых, для организации КВ-радиосвязи на коротких трассах, с учетом наличия РПДУ малой (до 1 кВт) мощности и всенаправленных штыревых антенн, решающим фактором в обеспечении надежной связи является оптимальный выбор рабочей частоты. Оперативный (краткосрочный) мониторинг состояния ионосферы и определение таких значений ОРЧ для ионосферных трасс, а также анализ помеховой обстановки должны выполняться ионосферно-волновой и частотно-диспетчерской службой вышестоящего узла связи [17–19] с применением аппаратуры (наклонного, возвратно-наклонного, вертикального) зондирования ионосферы.

Заключение

В настоящей работе решены следующие задачи:

- 1) проведено численное исследование двухэлементной ФАР из вертикальных несимметричных вибраторов над реальной землей аналитическим и численными методами электродинамики;
- 2) произведен анализ результатов расчетов с точки зрения оценки степени корреляции данных моделирования различными способами (численным, аналитическим), в том числе с натурным экспериментом;
- 3) разработана методика определения фазовых сдвигов в передающих трактах ФАР 2 АШ для формирования максимума излучения в заданных направлениях в горизонтальной плоскости с учетом ее размещения на реальном объекте.

Список используемых источников

1. Айзенберг Г.З., Белоусов С.П., Журбенко Э.М. Коротковолновые антенны. М.: Радио и связь, 1985. 535 с.
2. 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» (Санкт-Петербург, Россия, 28 февраля–1 марта 2018). СПб: СПбГУТ, 2018. Т. 3. С. 112–117.
3. 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.
4. Муравьев Ю.К. Справочник по расчету проволочных антенн. Л.: Военная ордена Ленина краснознаменная академия связи имени С.М. Буденного, 1978. 392 с.
5. 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
6. Марков Г.Т., Сазонов Д.М. Антенны. М.: Энергия, 1975. 528 с.
7. Пименов Ю.В. Линейная макроскопическая электродинамика: вводный курс для радиофизиков и инженеров: учебное пособие. Долгопрудный: Интеллект, 2008. 536 с.

Данная методика позволила:

- компенсировать негативное влияние пассивных элементов окружающей обстановки объекта, искажающих характеристику направленности;
- исключить необходимость выравнивания электрических длин передающих трактов;
- обеспечить в заданном направлении увеличение напряженности поля поверхностной волны от 3 до 12 дБ/мкВ по сравнению с полями, создаваемыми одиночными антеннами, что соответствует теоретически ожидаемому увеличению сигнала на 6 дБ (в 4 раза по мощности).

Решение задач синтеза в реальном масштабе времени, особенно при быстро изменяющейся помеховой обстановке либо при организации связи с множеством территориально распределенных корреспондентов, требует разработки алгоритмов формирования заданных характеристик направленности ФАР, адекватных условиям и требованиям организации связи. Полученные в настоящей работе результаты позволят при дальнейших исследованиях обозначенной проблематики использовать комбинированный метод синтеза ФАР, который предполагает двухэтапное решение:

- на основе аналитических методов исследования характеристик направленности ФАР (АФАР) находить оптимальные решения упрощенной модели электродинамической системы.
- использовать полученные результаты в качестве начальных данных с последующим приближением модели численного решения задач электродинамики к условиям реальной обстановки и применении эволюционных методов глобальной оптимизации.

На реальных объектах связи целесообразно применять системы контроля диаграммы направленности ФАР (АФАР), функционирующие, например, как предложено в методике настройки ФАР 2 АШ на объекте, настоящей работы. Полученные данные целесообразно учесть в алгоритме формирования заданной ФАР (схеме диаграммообразующего устройства) как систему обратной связи.

8. Стрижков В.А. Математическое моделирование электродинамических процессов в проволочных антенных системах // Математическое моделирование. 1989. Т. 1. № 8. С. 127–138.
9. Газизов Т.Т. Синтез оптимальных проводных антенн. Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2013. 120 с.
10. Бузова М.А., Юдин В.В. Проектирование проволочных антенн на основе интегральных уравнений. М.; Радио и связь, 2005. 172 с.
11. Кочержевский Г.Н., Ерохин Г.А., Козырев Н.Д. Антенно-фидерные устройства. М.: Радио и связь, 1989. 352 с.
12. Попов О.В., Сосунов Б.В., Фитенко Н.Г. Методы измерения характеристик антенно-фидерных устройств. Л.: Военная ордена Ленина краснознаменная академия связи имени С.М. Буденного, 1990. 182 с.
13. 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.
14. 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.
15. ГОСТ 14662–83. Аппаратура приема-передающая каналов телеграфной радиосвязи. Основные параметры, общие технические требования и методы измерения приема-передающего тракта. М.: Издательство стандартов, 1986.
16. Головин О.В., Простов С.П. Системы и устройства коротковолновой радиосвязи. М.: Горячая линия-Телеком, 2006. 598 с.
17. Богданов А.В., Пукса Д.О., Романов Ю.В., Фомин В.В. Аппаратура перспективных комплексов профессиональной КВ радиосвязи. Радиопередающие устройства, радиомодемы. // Международная научно-техническая конференция «Радиотехника, электроника и связь» (РЭИС-2011, Омск, Россия, 5–8 июля 2011). Омск: Омский научно-исследовательский институт приборостроения, 2011. С. 76–81.
18. Будяк В.С., Кисмерешкин В.П., Шадрин Б.Г. Развитие принципов построения автоматизированных модульных узлов радиосвязи // Международная научно-техническая конференция «Радиотехника, электроника и связь» (РЭИС-2013, Омск, Россия, 1–4 октября 2013). Омск: Омский научно-исследовательский институт приборостроения, 2013. С. 92–97.
19. Чупров А.А. Руководство по ионосферно-волновой и частотно-диспетчерской службы на узлах связи. Москва: Военное издательство, 1990. 96 с.

* * *

Modeling and Calculation Characteristics of APAA HF-Band Based on Whip Antennas

V. Pashkevich¹ , V. Golubev¹, M. Protsenko²

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

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

Article info

DOI:10.31854/1813-324X-2021-7-1-81-92

Received 19th October 2020

Accepted 02nd February 2021

For citation: 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

Abstract: *When designing the antenna field of a stationary HF transmitting radiocenter, it is necessary to provide for reserving ground-based symmetrical antennas operating on round-the-clock radio directions with backup, fast-deployable antenna systems. As such antennas, it is proposed to use asymmetric vertical dipoles, active phased antenna arrays (APAA) based on them with a controlled directional pattern. This article considers methods for calculating such systems, a method is developed for determining the phase relationships of currents at the inputs of APAA elements, taking into account its placement and functioning on a real object. The results of route tests of single antennas and APAA on a radio link with a length of 650 km are presented.*

Keywords: *electrodynamic modeling, transmitting radio center, whip antenna, trace signals tests, optimal operating frequency, radiation pattern, scanning main beam of APAA, the method of calculation.*

References

1. Aizenberg G.Z., Belousov S.P., Zhurbenko E.M. *Shortwave Antennas*. Moscow: Radio i sviaz Publ.; 1985. 535 p. (in Russ.)
2. 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.)
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. 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
6. Markov G.T., Sazonov D.M. *Antennas*. Leningrad: Energiya Publ.; 1975. 528 p. (in Russ.)
7. Pimenov U.V. *The Linear Macroscopic Electrodynamics: an Introductory Course for Radiophysicists and Engineers*. Dolgoprudnyj: Intellect Publ.; 2008. 536 p. (in Russ.)
8. Strijkov V.A. Mathematical Modeling of Electrodynamics Processes in Wire Antenna Systems. *Mathematical modeling*. 1989;1:127–138. (in Russ.)
9. Gasisov T.T. *Synthesis of Optimal Wired Antennas*. Tomsk: Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics Publ.; 2013. 120 p. (in Russ.)
10. Buzova M.A., Yudin V.V. *Design of Wire Antennas Based on Integral Equations*. Moscow: Radio i sviaz Publ.; 2005. 172 p. (in Russ.)
11. Kocherzhevsky G.N., Erokhin G.A., Kozyrev N.D. *Antenna Feeder Devices*. Moscow: Radio i sviaz Publ.; 1989. 352 p. (in Russ.)
12. 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.)
13. 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.)
14. 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.)
15. GOST 14662–83. *Telegraph radio communication channel transmit-receive equipment. Main parameters, general technical requirements and methods of measurement of transmit-receive channel*. Moscow: Publishing House of Standards; 1986. (in Russ.)
16. Golovin O.V., Prostov S.P. *Short-Wave Radio Communication Systems and Devices*. Moscow: Goryachaya liniya-Telecom; 2006. 598 p. (in Russ.)
17. Bogdanov A.V., Puxsa D.O., Romanov U.V., Fomin V.V. Equipment for Advanced Professional HF Radio Communication Systems. Radio Transmitting Devices, Radio Modems. *Proceedings of the International Scientific and Technical Conference on Radio Engineering, Electronics and Communications, Omsk, Russian Federation, 5–8 July 2011*. Omsk: Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering Publ.; 2011. p.76–81 (in Russ.)
18. Budyak V.S., Kismereshkin V.P., Shadrin B.G. Development of Principles for Building Automated Modular Radio Communication Nodes. *Proceedings of the International Scientific and Technical Conference on Radio Engineering, Electronics and Communications, Omsk, Russian Federation, 1–3 October 2013*. Omsk: Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering Publ.; 2013. p.92–97 (in Russ.)
19. Chuprov A.A. *Manual of the Ionospheric-Wave and Frequency-Dispatch Service on Communication Nodes*. Moscow: Voennoe izdatelstvo Publ.; 1990. 96 p. (in Russ.)

Сведения об авторах:

ПАШКЕВИЧ
Василий Дмитриевич

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

ГОЛУБЕВ
Валерий Михайлович

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

ПРОЦЕНКО
Михаил Сергеевич

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