

Математическое моделирование пространственно-поляризационных характеристик триортогонального антенного элемента для задач пеленгования КВ-диапазона

Г. С. Грибов✉

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ"
им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

АО «НИИ "Вектор"», Санкт-Петербург, Россия

✉ggribov@yandex.ru

Аннотация

Введение. Одной из наиболее важных и актуальных задач современного радиомониторинга КВ-диапазона является повышение точности и чувствительности пеленгования радиосигналов. С учетом распространения радиоволн КВ-диапазона через слои ионосферы, в которой происходит изменение поляризационных параметров проходящей электромагнитной волны (ЭМВ), в качестве одного из вариантов повышения точности и чувствительности пеленгования КВ-радиосигналов рассматривается использование в составе антенной решетки антенного элемента, который принимает обе составляющие электромагнитного поля.

Цель работы. Сравнительный анализ предложенного триортогонального антенного элемента с существующими решениями для задач пеленгования КВ-диапазона.

Материалы и методы. Математическое моделирование антенных элементов и построение пространственно-поляризационных характеристик в среде программирования MATLAB с помощью дополнения Phased array toolbox.

Результаты. Построены пространственно-поляризационные характеристики исследуемой триортогональной антенны и произведено сравнение с несимметричным вертикальным вибратором и биортогональной антенной. В ходе сравнения установлено, что триортогональная антенна на малых углах места обеспечивает энергетический выигрыш по сравнению с биортогональной антенной и несимметричным вертикальным вибратором до 4.5 дБ. На углах места от 30 до 60° повышение качества сигнала, принятого триортогональным антенным элементом, достигает 3 дБ, а на углах места больше 60° – 2 дБ.

Заключение. По полученным пространственно-поляризационным характеристикам рассматриваемая триортогональная антенна может входить в состав большебазисной антенной решетки КВ-диапазона. Использование данной антенны позволит повысить точность и чувствительность пеленгования за счет согласования антенного элемента с поляризацией ЭМВ.

Ключевые слова: триортогональная антенна, биортогональная антенна, несимметричный вертикальный вибратор, пеленгование, КВ-диапазон, поляризация, пространственно-поляризационная характеристика, диаграмма направленности, MATLAB

Для цитирования: Грибов Г. С. Математическое моделирование пространственно-поляризационных характеристик триортогонального антенного элемента для задач пеленгования КВ-диапазона // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2023. Т. 26, № 4. С. 95–105. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-4-95-105

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 14.04.2023; принята к публикации после рецензирования 08.06.2023; опубликована онлайн 28.09.2023



Simulation of Spatial Polarization Characteristics of a Triorthogonal Antenna Element for the Tasks of HF Band Bearing

Grigory S. Gribov✉

Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

JSC "Research Institute "Vector", St Petersburg, Russia

✉ggribov@yandex.ru

Abstract

Introduction. Achieving improved accuracy and sensitivity of the direction finding of radio signals represents a relevant research direction in the field of modern HF radio monitoring. HF radio waves propagate through ionospheric layers, which distorts the polarization parameters of the passing electromagnetic wave (EMW). One possible approach to improve the accuracy and sensitivity of the direction finding of HF radio signals consists in the use of an antenna element capable of accepting both components of the electromagnetic field in the antenna array.

Aim. A comparative analysis of the proposed triorthogonal antenna element with existing solutions for the tasks of HF band bearing.

Materials and methods. Antenna elements and their spatial polarization characteristics were simulated in the MATLAB environment using the Phased Array toolbox.

Results. The spatial polarization characteristics of the triorthogonal antenna under study were constructed and compared with an asymmetric vertical vibrator and a biorthogonal antenna. The comparison showed that at small elevation angles, the triorthogonal antenna ensures an energy gain of up to 4.5 dB compared to a biorthogonal antenna and an asymmetric vertical vibrator. At elevation angles of 30...60° and over 60°, the increase in the quality of a signal received by the triorthogonal antenna element reaches 3 dB and 2 dB, respectively.

Conclusion. According to the obtained spatial polarization characteristics, the triorthogonal antenna under study can be part of a large-base antenna array of the HF band. The use of this antenna will increase the accuracy and sensitivity of direction finding by means of matching the antenna element with the EMW polarization.

Keywords: triorthogonal antenna, biorthogonal antenna, asymmetric vertical vibrator, direction finding, HF band, polarization, spatial polarization characteristics, radiation pattern, MATLAB

For citation: Gribov G. S. Simulation of Spatial Polarization Characteristics of a Triorthogonal Antenna Element for the Tasks of HF Band Bearing. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2023, vol. 26, no. 4, pp. 95–105. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-4-95-105

Conflict of interest. The author declares no conflicts of interest.

Submitted 14.04.2023; accepted 08.06.2023; published online 28.09.2023

Введение. Распространение радиоволн КВ-диапазона зависит от состояния ионосферы. Под воздействием магнитного поля в ионосфере возникают эффекты Фарадея и Коттона–Мутона, которые приводят к изменению начальной поляризации и параметров поляризации передающей электромагнитной волны (ЭМВ), а также расщеплению волны на обыкновенную и необыкновенную составляющие [1–5]. В итоге в точке приема формируется волна, которая представляет собой суперпозицию обыкновенной и необыкновенной волн. Данный фактор влияет на качество приема сигнала.

Как известно, большинство антенных решеток для задач пеленгования КВ-диапазона построено на базе антенных элементов, принимающих лишь одну из компонент электромагнитного поля [6]. Такие антенные элементы не могут решить в полной мере вопрос снижения влияния интерференционных и поляризационных замираний на качество принимаемого сигнала.

Для повышения качества принимаемого сигнала проведено большое количество исследований по использованию биортогональных и триортогональных антенн в составе антенных решеток [7–9].



Рис. 1. Примеры триортогональных антенных элементов

Fig. 1. Examples of triorthogonal antenna elements

Биортогональные антенны представляют собой ортогональные горизонтальные симметричные вибраторы, способные принимать волну с круговой поляризацией.

В дальнейшем для большей согласованности антенны с принимаемой ЭМВ к биортогональным антеннам присоединили несимметричный вертикальный вибратор. Такие антенны называются триортогональными (рис. 1).

Однако данные антенны имеют существенный недостаток, связанный с различным влиянием Земли на диаграммы направленности в вертикальной плоскости для горизонтальных вибраторов и вертикального несимметричного вибратора [10, 11].

Диаграммы направленности в вертикальной плоскости для горизонтальных симметричных вибраторов и вертикальных несимметричных вибраторов при разном соотношении h/λ приведены на рис. 2, 3.

Таким образом, необходимо использовать антенну, которая минимизирует различие влияния подстилающей поверхности Земли на ортогональные элементы.

Геометрическая модель такой антенны представляет собой 3 несимметричных вибратора (рис. 4). Каждый вибратор образует угол около 35° над подстилающей поверхностью, а в горизонтальной плоскости угол между вибраторами

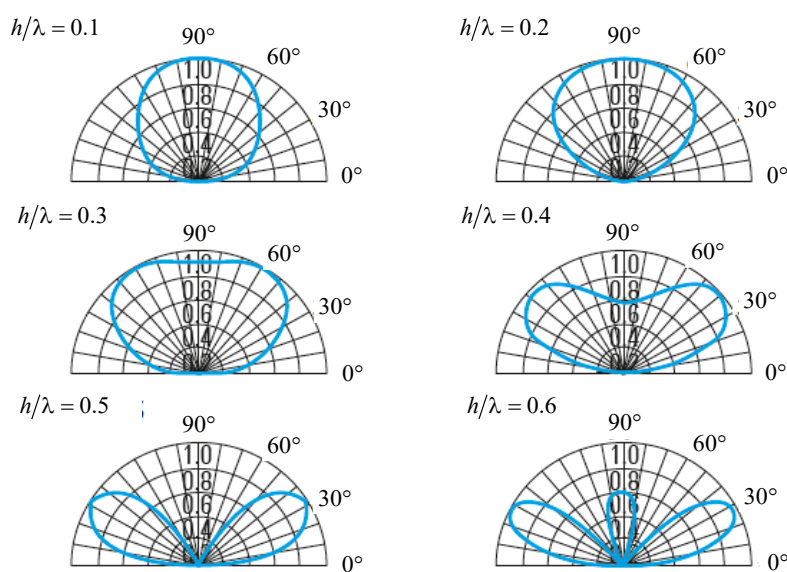


Рис. 2. ДН в вертикальной плоскости для горизонтальных вибраторов

Fig. 2. Directional pattern in the vertical plane for horizontal vibrators

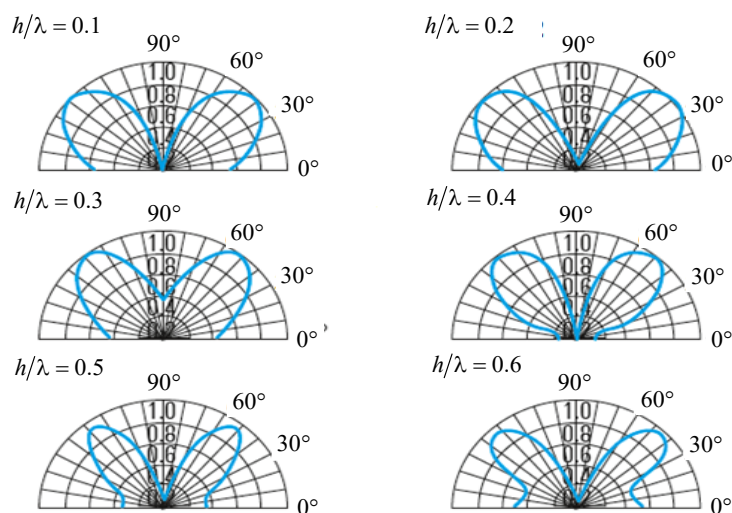


Рис. 3. ДН в вертикальной плоскости для вертикального несимметричного вибратора

Fig. 3. Directional pattern in the vertical plane for vertical asymmetrical vibrators

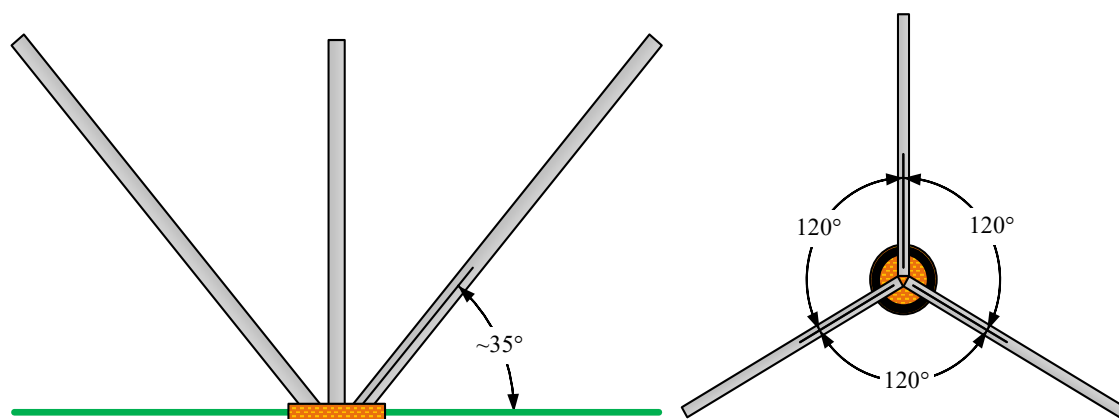


Рис. 4. Геометрическая модель триортогональной антенны

Fig. 4. Geometric model of the triorthogonal antenna

составляет 120° , чтобы обеспечить ортогональность вибраторов [12, 13].

Таким образом, необходимо смоделировать данный триортогональный элемент, построить его пространственно-поляризационные характеристики и оценить его энергетический выигрыш по сравнению с биортогональной антенной и несимметричным вертикальным вибратором, которые входят в состав современных антенных решеток КВ-диапазона.

Модель поляризационной электромагнитной волны. Радиосигнал КВ-диапазона представляет собой две волны, у которых векторы электрического поля взаимно-перпендикулярны. Если предположить, что ЭМВ распространяется вдоль оси x , то эти векторы можно представить в следующем виде:

$$\begin{cases} E_z = E_{0z} \cos(\omega t - kx + \varphi_z), \\ E_y = E_{0y} \cos(\omega t - kx + \varphi_y), \end{cases} \quad (1)$$

где E_{0z} и E_{0y} – амплитуды ЭМВ; ω – частота сигнала; φ_z и φ_y – начальные фазы при $x = 0$, $t = 0$; k – волновое число.

При $\Omega = \omega t - kx$ выражения (1) можно записать в виде

$$\begin{cases} \frac{E_z}{E_{0z}} = \cos(\Omega + \varphi_z) = \cos \Omega \cos \varphi_z - \sin \Omega \sin \varphi_z, \\ \frac{E_y}{E_{0y}} = \cos(\Omega + \varphi_y) = \cos \Omega \cos \varphi_y - \sin \Omega \sin \varphi_y. \end{cases} \quad (2)$$

Решая систему уравнений (2) относительно $\cos \Omega$ и $\sin \Omega$, возведя обе части решений в

квадрат с последующим сложением полученных выражений, можно получить уравнение

$$\left(\frac{E_z}{E_{0z}}\right)^2 + \left(\frac{E_y}{E_{0y}}\right)^2 - 2\left(\frac{E_z}{E_{0z}}\right)\left(\frac{E_y}{E_{0y}}\right)\cos\varphi = \sin^2\varphi,$$

где $\varphi = \varphi_z - \varphi_y$ – разность фаз между двумя составляющими ЭМВ.

Данное выражение описывает эллипс поляризации (рис. 5).

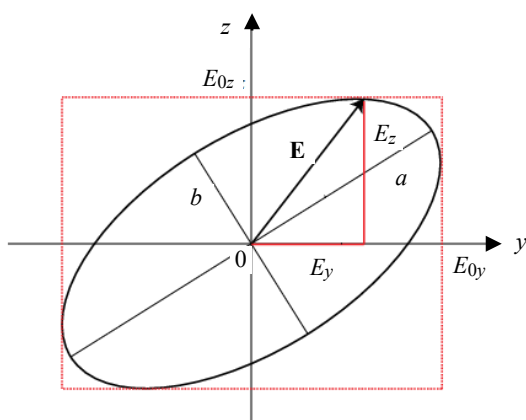


Рис. 5. Эллипс поляризации
Fig. 5. Polarization ellipse

Суммарный вектор \mathbf{E} с течением времени вращается, тем самым описывая эллипс. Направление вращения вектора \mathbf{E} зависит от знака сдвига фаз между E_z и E_y . Если вектор вращается по часовой стрелке относительно направления распространения волны, то такая поляризация называется эллиптической правого вращения, если против часовой – эллиптической левого вращения.

Важными параметрами для описания типа поляризации являются угол наклона эллипса и коэффициент эллиптичности.

Угол наклона эллипса вычисляется по формуле

$$\operatorname{tg}(2\beta) = \frac{2E_{0z}E_{0y}}{E_{0z}^2 - E_{0y}^2} \cos\varphi.$$

Соответственно, коэффициент эллиптичности равен:

$$\gamma = \frac{b}{a} = \frac{2E_{0z}E_{0y}|\sin\varphi|}{E_{0z}^2 + E_{0y}^2 + \sqrt{(E_{0z}^2 - E_{0y}^2)^2 + 4E_{0z}^2E_{0y}^2\cos^2\varphi}}.$$

Частными случаями эллиптической поляризации выступают линейная и круговая поляризации [14]. Линейная поляризация возникает, когда составляющие E_z и E_y находятся в фазе или противофазе, при этом $\gamma = 0$. Круговая поляризация происходит при равенстве амплитуд составляющих E_z и E_y и сдвиге фаз на $\pm\pi/2$, соответственно $\gamma = 1$.

Математическая модель триортогональной антенны. Математическая модель исследуемой триортогональной антенны была построена в среде программирования MATLAB, в частности, в дополнительном пакете Phased array toolbox.

Данная модель создавалась с помощью встроенной функции phased.ShortDipoleAntennaElement за счет указания координат концов вибратора относительно начальной точки (0, 0, 0) в декартовой системе координат x, y, z [15].

Для первого ортогонального вибратора задавались следующие координаты:

$$\begin{aligned}x &= \cos(0^\circ) \sin(55^\circ) = 0.8192; \\y &= \sin(0^\circ) \sin(55^\circ) = 0; \\z &= \cos(55^\circ) = 0.5736.\end{aligned}$$

Для второго:

$$\begin{aligned}x &= \cos(120^\circ) \sin(55^\circ) = -0.4096; \\y &= \sin(120^\circ) \sin(55^\circ) = 0.7094; \\z &= \cos(55^\circ) = 0.5736.\end{aligned}$$

Для третьего:

$$\begin{aligned}x &= \cos(240^\circ) \sin(55^\circ) = -0.4096; \\y &= \sin(240^\circ) \sin(55^\circ) = -0.7094; \\z &= \cos(55^\circ) = 0.5736.\end{aligned}$$

Трехмерные ДН для каждого ортогонального вибратора представлены на рис. 6.

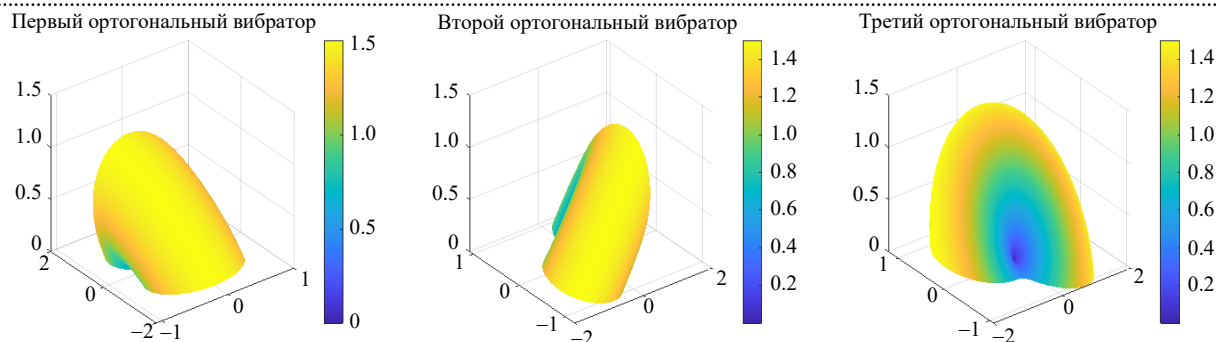


Рис. 6. ДН ортогональных вибраторов, входящих в триортогональный антенный элемент
 Fig. 6. Directional patterns of orthogonal vibrators included in the triorthogonal antenna element

Как видно из рис. 6, диаграммы направленности имеют провалы при некоторых углах прихода, но за счет равномерного расположения вибраторов в азимутальной плоскости суммарная диаграмма направленности моделируемого триортогонального элемента образует всенаправленную ДН без существенных провалов (рис. 7), что обеспечивает идентичный прием сигналов вне зависимости от направления прихода ЭМВ.

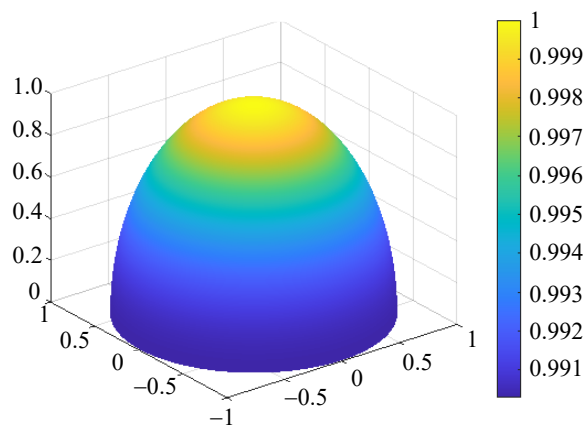


Рис. 7. Суммарная ДН моделируемого триортогонального антенного элемента

Fig. 7. Resultant radiation pattern of the simulated triorthogonal antenna element

Сравнение исследуемого триортогонального антенного элемента с биортогональной антенной и вертикальным несимметричным вибратором. Сравнение антенных элементов выполнялось на основе пространственно-поляризационных характеристик, полученных в ходе математического моделирования в среде MATLAB.

Для создания модели вертикального вибратора использовалась встроенная функция `phased.ShortDipoleAntennaElement`, входящая в состав дополнения `Phased array toolbox`. В параметрах данной функции можно выбрать расположение несимметричного вибратора. Соответственно, для вертикального несимметричного вибратора было выбрано направление вдоль оси z .

В качестве математической модели биортогональной антенны выступали 2 горизонтальных симметричных вибратора, расположенных вдоль осей x и y .

Трехмерные диаграммы направленности несимметричного вертикального вибратора и ортогональных горизонтальных вибраторов изображены на рис. 8.

Само математическое моделирование заключалось в приеме электромагнитной волны с

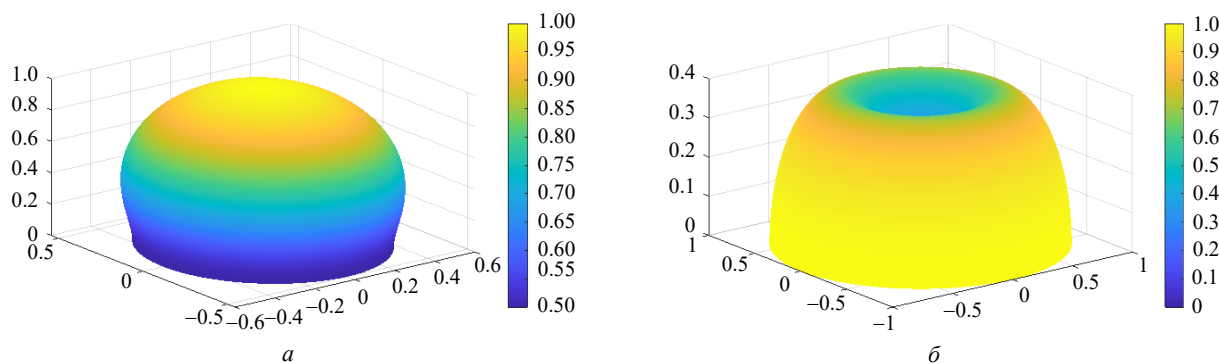


Рис. 8. Трехмерные диаграммы направленности биортогональной антенны (а) и вертикального вибратора (б)

Fig. 8. Three-dimensional radiation patterns of a biorthogonal antenna (a) and a vertical vibrator (b)

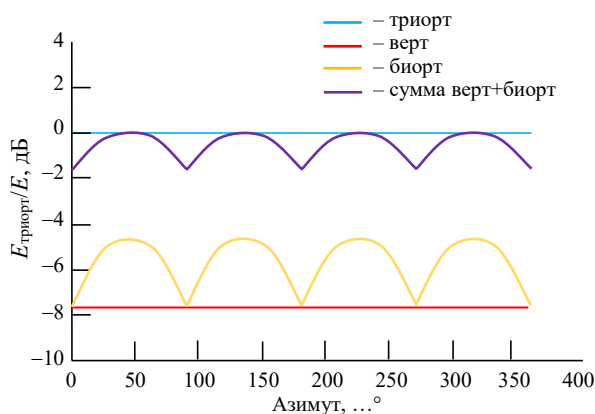


Рис. 9. Зависимость уровня принятого сигнала от азимутального угла при круговой поляризации и угле места 0°

Fig. 9. Dependence of the received signal level on the azimuth angle with circular polarization at an elevation angle of 0°

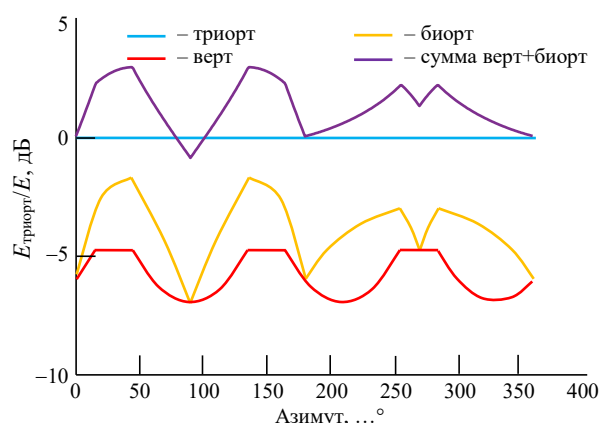


Рис. 10. Зависимость уровня принятого сигнала от азимутального угла при линейной поляризации и угле места 0°

Fig. 10. Dependence of the received signal level on the azimuth angle with linear polarization at an elevation angle of 0°

линейной и круговой поляризациями антенными элементами, представленными ранее. При этом ЭМВ подавалась с разных азимутальных и зенитных углов.

В итоге формировались зависимости уровня принятого сигнала от азимута при разных углах места для рассматриваемых антенных элементов.

Полученные зависимости представлены на рис. 9–20.

Для исследования приема радиосигналов с круговой и линейной поляризациями в угломестной области был усреднен уровень принятого сигнала сравниваемых антенных элемен-

тов по всей азимутальной плоскости при разных значениях угла места.

Получившиеся зависимости среднего уровня сигнала от угла места при круговой и линейной поляризациях приведены на рис. 21, 22.

Как видно из получившихся пространственно-поляризационных характеристик, при круговой поляризации исследуемая триортогональная антенна на углах места от 0 до 30° дает энергетический выигрыш до 6 дБ по сравнению с биортогональной антенной и 9 дБ относительно несимметричного вертикального вибратора. На углах места от 30 до 60° энергетический выигрыш составляет до 4 и 12.5 дБ

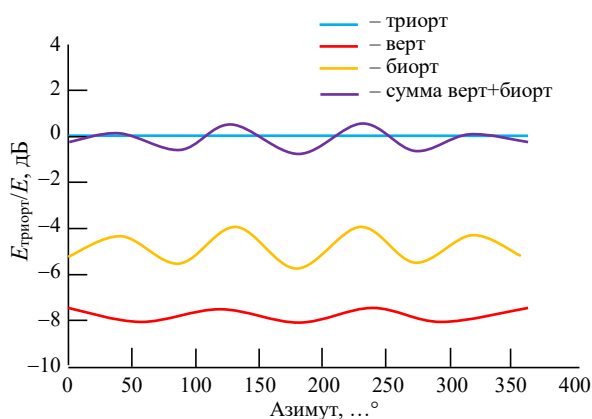


Рис. 11. Зависимость уровня принятого сигнала от азимутального угла при круговой поляризации и угле места 15°

Fig. 11. Dependence of the received signal level on the azimuth angle with circular polarization at an elevation angle of 15°

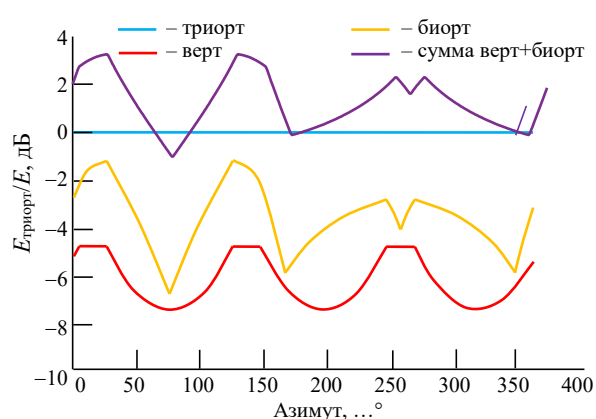


Рис. 12. Зависимость уровня принятого сигнала от азимутального угла при линейной поляризации и угле места 15°

Fig. 12. Dependence of the received signal level on the azimuth angle with linear polarization at an elevation angle of 15°

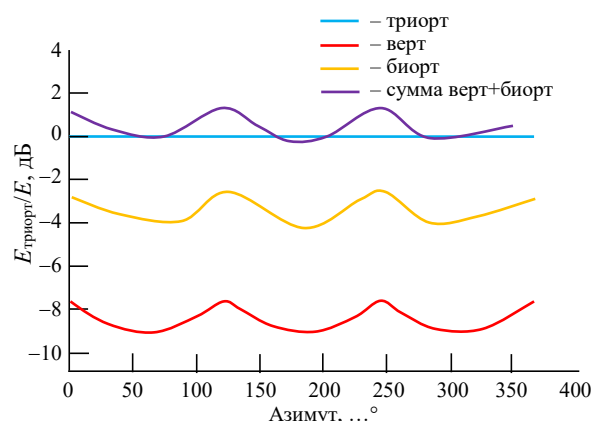


Рис. 13. Зависимость уровня принятого сигнала от азимутального угла при круговой поляризации и угле места 30°

Fig. 13. Dependence of the received signal level on the azimuth angle with circular polarization at an elevation angle of 30°

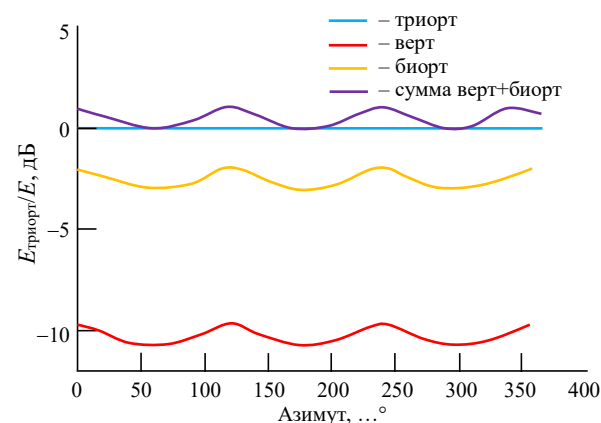


Рис. 15. Зависимость уровня принятого сигнала от азимутального угла при круговой поляризации и угле места 45°

Fig. 15. Dependence of the received signal level on the azimuth angle with circular polarization at an elevation angle of 45°

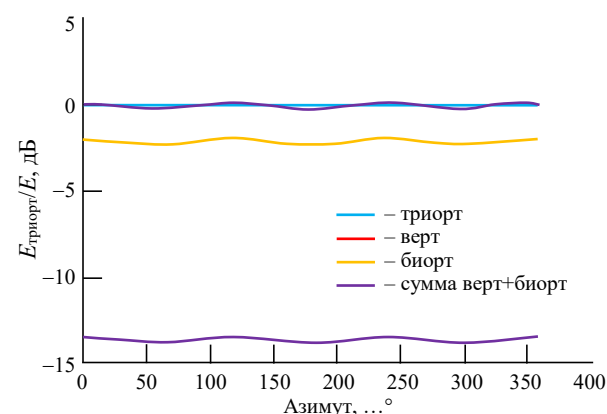


Рис. 17. Зависимость уровня принятого сигнала от азимутального угла при круговой поляризации и угле места 60°

Fig. 17. Dependence of the received signal level on the azimuth angle with circular polarization at an elevation angle of 60°

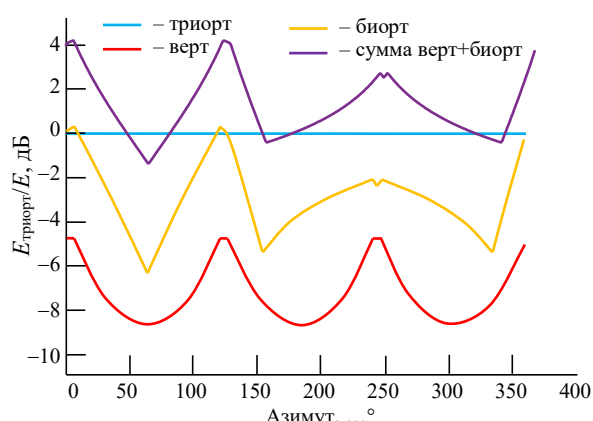


Рис. 14. Зависимость уровня принятого сигнала от азимутального угла при линейной поляризации и угле места 30°

Fig. 14. Dependence of the received signal level on the azimuth angle with linear polarization at an elevation angle of 30°

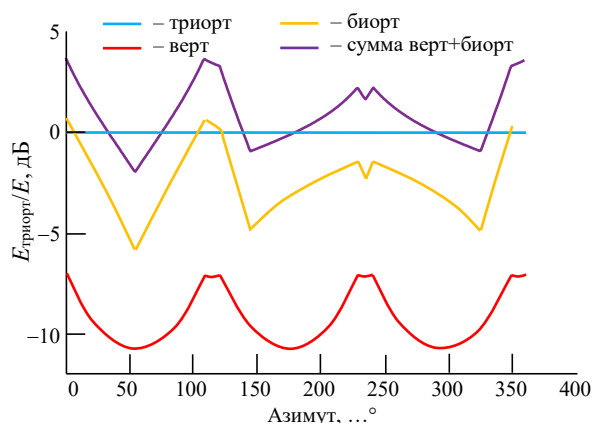


Рис. 16. Зависимость уровня принятого сигнала от азимутального угла при линейной поляризации и угле места 45°

Fig. 16. Dependence of the received signal level on the azimuth angle with linear polarization at an elevation angle of 45°

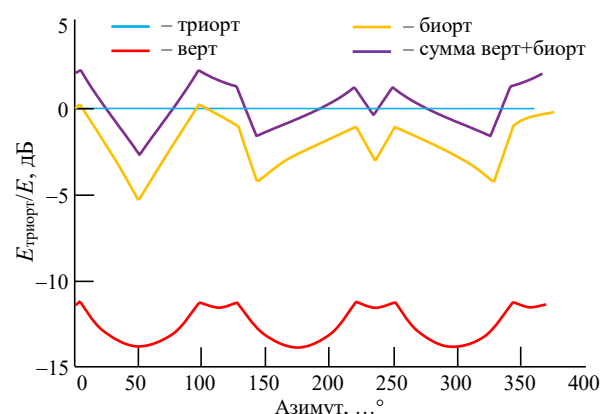


Рис. 18. Зависимость уровня принятого сигнала от азимутального угла при линейной поляризации и угле места 60°

Fig. 18. Dependence of the received signal level on the azimuth angle with linear polarization at an elevation angle of 60°

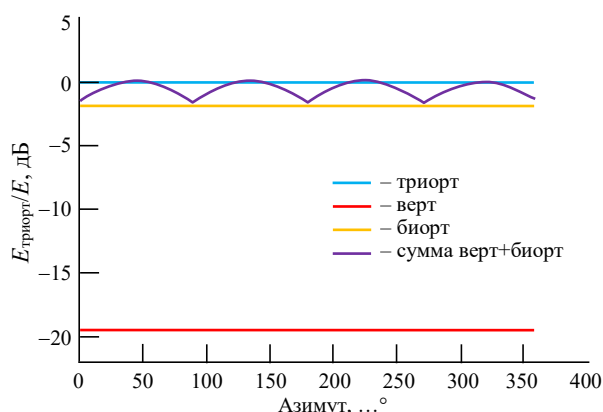


Рис. 19. Зависимость уровня принятого сигнала от азимутального угла при круговой поляризации и угле места 75°

Fig. 19. Dependence of the received signal level on the azimuth angle with circular polarization at an elevation angle of 75°

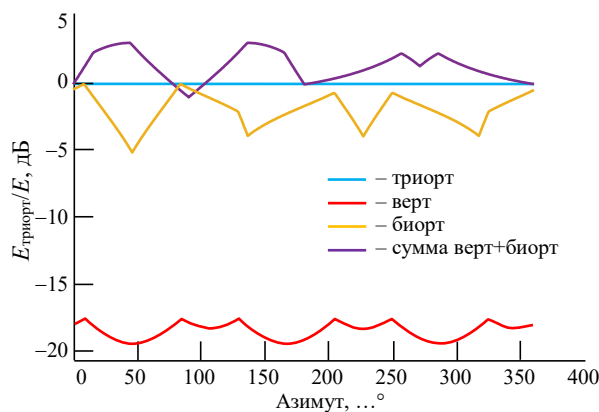


Рис. 20. Зависимость уровня принятого сигнала от азимутального угла при линейной поляризации и угле места 75°

Fig. 20. Dependence of the received signal level on the azimuth angle with linear polarization at an elevation angle of 75°

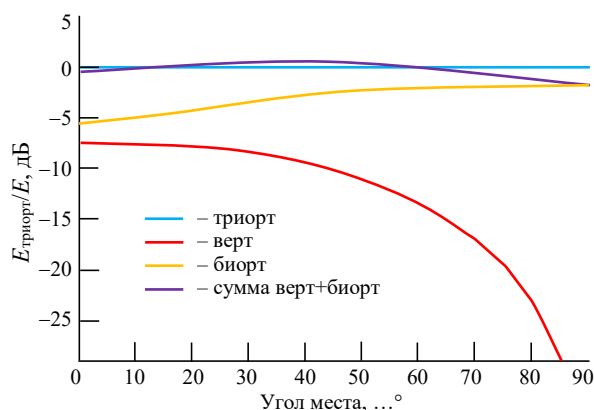


Рис. 21. Зависимость среднего уровня сигнала от угла места при круговой поляризации

Fig. 21. Dependence of the average signal level on the elevation angle with circular polarization

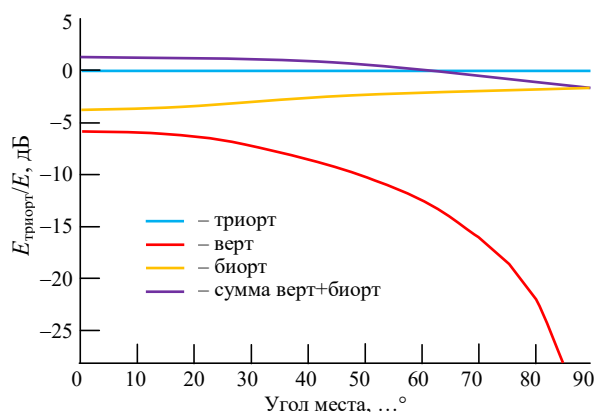


Рис. 22. Зависимость среднего уровня сигнала от угла места при линейной поляризации

Fig. 22. Dependence of the average signal level on the elevation angle with linear polarization

соответственно. Для крутопадающих волн энергетический выигрыш триортогональной антенны над биортогональной антенной сокращается до 2 дБ, в то время как эффективность приема таких волн несимметричным вертикальным вибратором низка. При линейной поляризации, как и в случае круговой поляризации, триортогональная антенна принимает большую энергетику падающей волны. На углах места от 0 до 30° выигрыш составляет до 4.5 дБ относительно биортогональной антенны и до 6.5 дБ по сравнению с несимметричным вертикальным вибратором. На углах места от 30° до 60° принятый сигнал на триортогональную антенну больше на 3 дБ по сравнению с сигналом, принятым биортогональной антенной, и на 12 дБ, чем сигнал на вертикальном вибраторе.

На углах места выше 60° различие между уровнями сигнала на триортогональной и биортогональной антеннах составляет 2 дБ.

Также стоит отметить, что рассматриваемая триортогональная антенна по пространственно-поляризационным характеристикам не уступает триортогональному элементу, состоящему из штыря и двух ортогональных горизонтальных симметричных вибраторов.

Заключение. Рассматриваемая триортогональная антенна позволяет за счет приема обеих составляющих электромагнитного поля повысить качество принятого сигнала на малых углах места – до 4.5 дБ, на углах места от 30° до 60° – до 3 дБ и на углах выше 60° – до 2 дБ по сравнению с биортогональной антенной, а

также благодаря своей конструкции обеспечивает идентичное влияние подстилающей поверхности Земли на диаграммы направленности в вертикальной плоскости ортогональных несимметричных вибраторов, входящих в состав триортогонального антенного элемента.

В итоге исследуемая триортогональная антенна может использоваться в качестве антенного элемента большебазисной антенной ре-

шетки для задач пеленгования и перехвата радиосигналов КВ-диапазона, что в конечном итоге позволит повысить чувствительность и точность пеленгования по сравнению с существующими решетками КВ-диапазона, а также повысить качество перехвата радиосигнала за счет согласованности антенного элемента с поляризацией ЭМВ.

Список литературы

1. Альперт Я. Л. Распространение электромагнитных волн и ионосфера. 2-е изд. М.: Наука, 1972. 564 с.
2. Булатов Н. Д., Савин Ю. К. Статистические характеристики поляризационных замираний КВ сигнала // Электросвязь. 1971. № 2. С. 14–16.
3. Брюнелли Б. Е., Намгаладзе А. А. Физика ионосферы. М.: Наука, 1988. 528 с.
4. Дэвис К. Радиоволны в ионосфере. М.: Мир, 1973. 504 с.
5. Коршунов Д. В., Васильев А. С., Лапшин Э. В. Анализ факторов, влияющих на качество радиосвязи в КВ-диапазоне // Надежность и качество. 2018. Т. 2. С. 1–2.
6. Айзенберг Г. З., Белоусов С. П., Журбенко Э. М. Коротковолновые антенны. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Радио и связь, 1985. 536 с.
7. Компактные приземные антенны для поляризационно-избирательного приема в составе систем радиомониторинга / Д. В. Лучин, А. М. Плотников, А. П. Трофимов, В. В. Юдин // Электросвязь. 2015. № 8. С. 44–48.
8. Лучин Д. В., Сподобаев М. Ю. Системы ДКМВ радиосвязи: разработка, производство и перспективные решения // Вестн. Самарского гос. аэрокосмического ун-та им. академика С. П. Королева. 2014. № 2 (44). С. 74–79.
9. Афраймович Э. Л. Интерференционные методы зондирования ионосферы. М.: Наука, 1982. 197 с.
10. Пространственно-поляризационная обработка радиосигналов в гиперкомплексном пространстве / И. В. Демичев, Н. П. Шмаков, Р. В. Колесников, А. В. Иванов // Наукоемкие технологии. 2018. Т. 19, № 10. С. 25–29.
11. Ротхаммель К., Кришке А. Антенны. Т. 1. 11-е изд. М.: ДМК Пресс, 2005. 416 с.
12. Пат. RU 2649097. Антенна триортогональная / А. В. Иванов, И. В. Демичев, Н. П. Шмаков, Р. В. Колесников. Опубл. 28.11.2016.
13. Демичев И. В., Родин Д. В. Научно обоснованное предложение по технической реализации радиоприемного тракта для регистрации полного вектора электромагнитного поля // Материалы Всерос. науч.-практ. конф. "Проблемы и основные направления развития радиоэлектроники и образовательного процесса подготовки специалистов радиотехнических систем специального назначения", посвященной 60-летию ЧВВИУРЭ. 2017. № 4. С. 10–14.
14. Канарейкин Д. Б., Павлов Н. Ф., Потехин В. А. Поляризация радиолокационных сигналов. М.: Сов. радио, 1966. 440 с.
15. Phased Array System Toolbox. URL: <https://docs.exponenta.ru/phased/index.html> (дата обращения 01.04.2023)

Информация об авторе

Грибов Григорий Сергеевич – ассистент кафедры радиотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), инженер 2-й категории АО «НИИ "Вектор"». Автор 9 научных работ. Сфера научных интересов – радиотехника; радиомониторинг; радиопеленгование; цифровая обработка сигналов.
Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: ggribov@yandex.ru
<https://orcid.org/0009-0005-1338-9187>

References

1. Al'pert Ya. L. *Rasprostranenie ehlektromagnitnyh voln i ionosfera* [Propagation of electromagnetic waves and the ionosphere]. 2nd ed. Moscow, *Nauka*, 1972, 564 p. (In Russ.)
2. Bulatov N. D., Savin Yu. K. Statistical characteristics of polarization fading of the HF signal. *Elektrosvyaz*. 1971, no. 2, pp. 14–16. (In Russ.)
3. Bryunelli B. E., Namgaladze A. A. *Fizika ionosfery* [Physics of Ionosphere]. Moscow, *Nauka*, 1988, 528 p. (In Russ.)

4. Davies K. *Radiovolny v ionosfere* [Ionospheric Radio Waves]. Moscow, Mir, 1973, 504 p. (In Russ.)
5. Korshunov D. V., Vasil'ev A. S., Lapshin E. V. Analysis of Factors Affecting the Quality of Radio Communication in the HF Band. *Nadezhnost' i kachestvo*. 2018, vol. 2, pp. 1–2. (In Russ.)
6. Aizenberg G. Z., Belousov S. P., Zhurbenko E. M. *Korotkovolnovye anteny* [Shortwave Antennas]. 2nd ed. Moscow, *Radio i svyaz'*, 1985, 536 p. (In Russ.)
7. Luchin D. V., Plotnikov A. M., Trofimov A. P., Yudin V. V. Compact Ground-Level Antennas for Polarization-Selective Reception as Part of Radio Monitoring Systems. *Electrosvyaz'*. 2015, no. 8, pp. 44–48. (In Russ.)
8. Luchin D. V., Spodobaev M. Yu. DHMW Radio Communication Systems: Development, Production and Advanced Solutions. *Vest. Samarskogo gos. aerokosmicheskogo un-ta im. akademika S. P. Koroleva*. 2014, no. 2 (44), pp. 74–79. (In Russ.)
9. Afraimovich E. L. *Interferentsionnye metody zondirovaniya ionosfery* [Interference Methods of Ionosphere Sounding]. Moscow, *Nauka*, 1982, 197 p. (In Russ.)
10. Demichev I. V., Shmakov N. P., Kolesnikov R. V., Ivanov A. V. Spatial Polarization Processing Of Radio Signals in Hypercomplex Space. *Naukoemkie tehnologii*. 2018, vol. 19, no. 10, pp. 25–29. (In Russ.)
11. Rothammel' K., Krishke A. *Antenny* [Antennas]. 11th ed. Moscow, *DMK press.*, 2005, 416 p. (In Russ.)
12. Ivanov A. V., Demichev I. V., Shmakov N. P., Kolesnikov R. V. Triorthogonal Antenna. Pat. RU. 2649097. Publ. 28.11.2016. (In Russ.)
13. Demichev I. V. The Scientifically-Based Proposal for the Technical Implementation of a Radio Receiving Path for Recording the Full Vector of the Electromagnetic Field. Proc. of the All- Russ. scientific and practical conf. "Problems and Main Directions of Development of Radio Electronics and the Educational Process of Training Specialists of Radio Engineering Systems for Special Purposes", dedicated to the 60th anniversary of PMVIURE. 2017, no. 4, pp. 10–14. (In Russ.)
14. Kanareykin D. B., Pavlov N. F., Potekhin V. A. *Polarizatsiya radiolokacionnykh signalov* [Polarization of Radar Signals]. Moscow, Sov. Radio, 1966, 440 p. (In Russ.)
15. Phased Array System Toolbox. Available at: <https://docs.exponenta.ru/phased/index.html> (accessed 01.04.2023)

Information about the author

Grigory S. Gribov, Postgraduate Student of the Department of Radio Engineering of Saint Petersburg Electrotechnical University, engineer of the 2nd category of JSC "Research Institute "Vector"". The author of 9 scientific publications. Area of expertise: radio engineering; radio monitoring; radio direction finding; digital signal processing. Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: ggribov@yandex.ru
<https://orcid.org/0009-0005-1338-9187>