

Оценка поляризационных и пространственных параметров сигнала источника радиоизлучения с помощью триортогональной антенны

Г. С. Грибов^{1,2✉}

¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

²АО «НИИ "Вектор"», Санкт-Петербург, Россия

✉ ggribov@yandex.ru

Аннотация

Введение. Определение угловых координат принятой электромагнитной волны источника радиоизлучения (ИРИ) и оценка его параметров – основные задачи радиомониторинга. В настоящее время используются классические амплитудные, фазовые и корреляционные методы пеленгования ИРИ. Амплитудные методы заключаются в использовании направленных свойств антенны. Фазовый и корреляционный методы основываются на различии задержек сигналов, принимаемых разнесенными антенными элементами. В этой статье предлагается рассмотреть метод оценки пространственных параметров сигнала, основанный на ортогональности плоскости поляризации относительно направления распространения радиоволны.

Цель работы. Моделирование алгоритма оценки поляризационных и пространственных параметров сигнала ИРИ на основе фиксации трех проекций электромагнитного поля с помощью триортогональной антенны.

Материалы и методы. Математическое моделирование алгоритма пространственно-поляризационной обработки сигналов, принимаемых триортогональным антенным элементом в среде программирования MATLAB.

Результаты. По разработанной математической модели пространственно-поляризационного алгоритма обработки сигналов, полученных триортогональной антенной, построены зависимости оценки поляризационных и пространственных параметров принятой электромагнитной волны от отношения сигнал/шум в полосе 50 кГц. По полученным характеристикам определены максимальные СКО оценки азимута, угла места, коэффициента эллиптичности принятой волны и наклона эллипса поляризации. Также представлены сравнения среднего уровня потерь энергии принятого сигнала при обработке пространственно-поляризационным алгоритмом и при приеме только вертикальной составляющей поля в зависимости от коэффициента эллиптичности и угла места. На основе сравнения удалось выявить, что пространственно-поляризационная обработка позволяет использовать большую энергию поступающего сигнала, а максимальный эффект наблюдается на углах места больше 40°.

Заключение. Алгоритм пространственно-поляризационной обработки трех проекций электромагнитного поля дает возможность оценить пространственные и поляризационные параметры распространяющейся электромагнитной волны. Оценка возможна только при присутствии в сигнале обеих компонент поля: горизонтальной и вертикальной. При определении пространственных и поляризационных параметров волны можно выполнить пространственно-поляризационную фильтрацию сигнала, тем самым повысив его энергетические параметры.

Ключевые слова: триортогональная антенна, пеленгование, КВ-диапазон, поляризация, пространственно-поляризационная обработка, MATLAB, алгебра кватернионов

Для цитирования: Грибов Г. С. Оценка поляризационных и пространственных параметров сигнала источника радиоизлучения с помощью триортогональной антенны // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2025. Т. 28, № 1. С. 51–64. doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-1-51-64

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 19.04.2024; принята к публикации после рецензирования 01.09.2024; опубликована онлайн 28.02.2025



Estimation of Polarization and Spatial Parameters of a Radio Source Signal Using Triorthogonal Antenna

Gribov S. Gribov^{1,2✉}

¹Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

²JSC "Research Institute "Vector", St Petersburg, Russia

✉ ggribov@yandex.ru

Abstract

Introduction. Determination of the angular coordinates of the electromagnetic wave received from a radio source and estimating its parameters constitute the main tasks of radio monitoring. For direction finding of radio sources, classical amplitude, phase, and correlation methods are currently used. Amplitude methods involve the directional properties of the antenna. Phase and correlation methods are based on the difference in delays of signals received by spaced antenna elements. The information parameter in these methods consists in the phase front of the incident wave, which is orthogonal to the direction of its propagation. In this article, we consider a method for estimating the spatial parameters of a signal based on the orthogonality of the polarization plane relative to the propagation of a radio wave.

Aim. Simulation of an algorithm for estimating the polarization and spatial parameters of a radio source signal based on the fixation of three projections of the electromagnetic field using a triorthogonal antenna system.

Materials and methods. Mathematical simulation of an algorithm for spatial polarization processing of signals received by a triorthogonal antenna element in the MATLAB software environment.

Results. The developed mathematical model of an algorithm for processing a spatially polarized signal received by a triorthogonal antenna system was used to obtain dependencies for assessing the polarization and spatial parameters of the received electromagnetic wave on the signal-to-noise ratio in the 50 kHz band. The obtained characteristics were used to determine the maximum standard deviations of the azimuth, elevation angle, ellipticity coefficient, and ellipse inclination. A comparison of the average level of energy loss of the received signal calculated by the spatial polarization algorithm and when receiving only the vertical component of the field, depending on the ellipticity coefficient and elevation angle, was carried out. As a result, spatial polarization processing allows a greater energy of the incoming signal to be employed, with the greatest gain being observed at elevation angles greater than 40°.

Conclusion. The spatial polarization processing algorithm of three electromagnetic field projections makes it possible to estimate the spatial and polarization parameters of a propagating electromagnetic wave. Evaluation is possible provided that both field components – horizontal and vertical – are present in the signal. When determining the spatial and polarization parameters of the wave, the signal can be depolarized, thereby increasing its energy.

Keywords: triorthogonal antenna system, direction finding, HF band, polarization, spatial polarization processing, MATLAB, quaternion algebra

For citation: Gribov G. S. Estimation of Polarization and Spatial Parameters of a Radio Source Signal Using Triorthogonal Antenna. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2025, vol. 28, no. 1, pp. 51–64. doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-1-51-64

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

Submitted 19.04.2024; accepted 01.09.2024; published online 28.02.2025

Введение. Распространение сигналов от источника радиоизлучения (ИРИ) в коротковолновом (КВ) диапазоне на дальние расстояния происходит посредством отражения сигнала от слоев ионосферы и от поверхности Земли. В зависимости от длины трассы от передатчика до пункта радиомониторинга количество отражений от слоев ионосферы возрастает.

Сама ионосфера представляет собой анизотропную преломляющую среду, в которой под воздействием магнитного поля возникают эффекты Фарадея и Коттона–Мутона. Данные эффекты влияют на начальную поляризацию и параметры поляризации передаваемой радиоволны и приводят к ее расщеплению на обыкновенную и необыкновенную волны [1–5]. Таким образом, в пункте приема наблюдается многомодовый радиосигнал с двумя составляющими электромагнитного поля.

В общем случае волна будет иметь эллиптическую поляризацию, параметры которой определяются соотношением амплитуд и фаз между волнами.

Антенны, принимающие только одну из составляющих распространяющейся электромагнитной волны, подвержены следующим эффектам:

- временным замираниям, связанным с изменением состояния ионосферы;
- снижению уровня принятого сигнала за счет приема антенным элементом только одной составляющей распространяющейся волны.

Антенно-приемный тракт. Для снижения влияния эффекта временных замираний сигнала, а также повышения энергии принятого сигнала предлагается применить двухполяризационный антенный элемент [6–9].

В качестве него предполагается использовать триортогональную антенну, способную фиксировать 3 проекции распространяющейся электромагнитной волны.

В данной статье описывается триортогональный антенный элемент, который представляет собой 3 взаимно ортогональных симметричных вибратора. Данная конструкция прикрепляется к

мачте высотой 6 м (рис. 1) [8]. Угол между ортогональными вибраторами составляет 120° в горизонтальной плоскости. Сама ортогональность вибраторов достигается за счет образования в пространстве угла 90° между вибраторами. При этом фазовый центр трех взаимно ортогональных вибраторов находится в одной точке.

Такая конструкция антенны обусловлена требованием идентичного влияния подстилающей поверхности Земли на ортогональные вибраторы.

Сигналы, принимаемые ортогональными симметричными вибраторами, поступают на входы трехканального радиоприемного устройства (РПУ) с квадратурным преобразованием (рис. 2) [9]. В состав одного канала РПУ входят следующие блоки:

- аналого-цифровой преобразователь АЦП;
- генератор с прямым цифровым синтезом (Direct Digital Synthesis) DDS;
- дециматор с каскадным интегрально-гребенчатым фильтром (Cascaded Integral-Comb filter) CIC;
- фильтр-дециматор с конечной импульсной характеристикой (Finite Impulse Response filter) FIR.

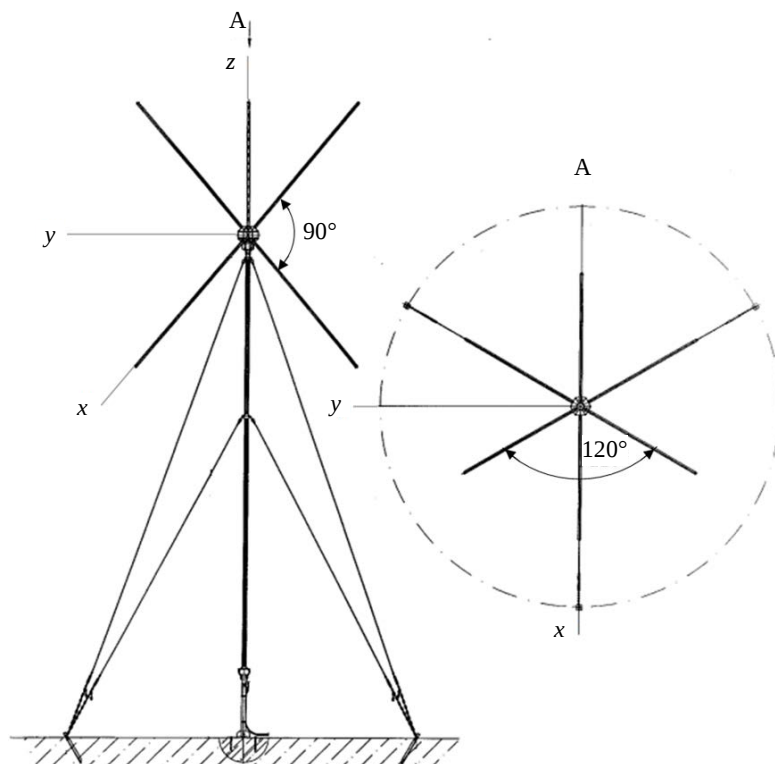


Рис. 1. Геометрическая модель триортогональной антенны

Fig. 1. Geometric model of the triorthogonal antenna element

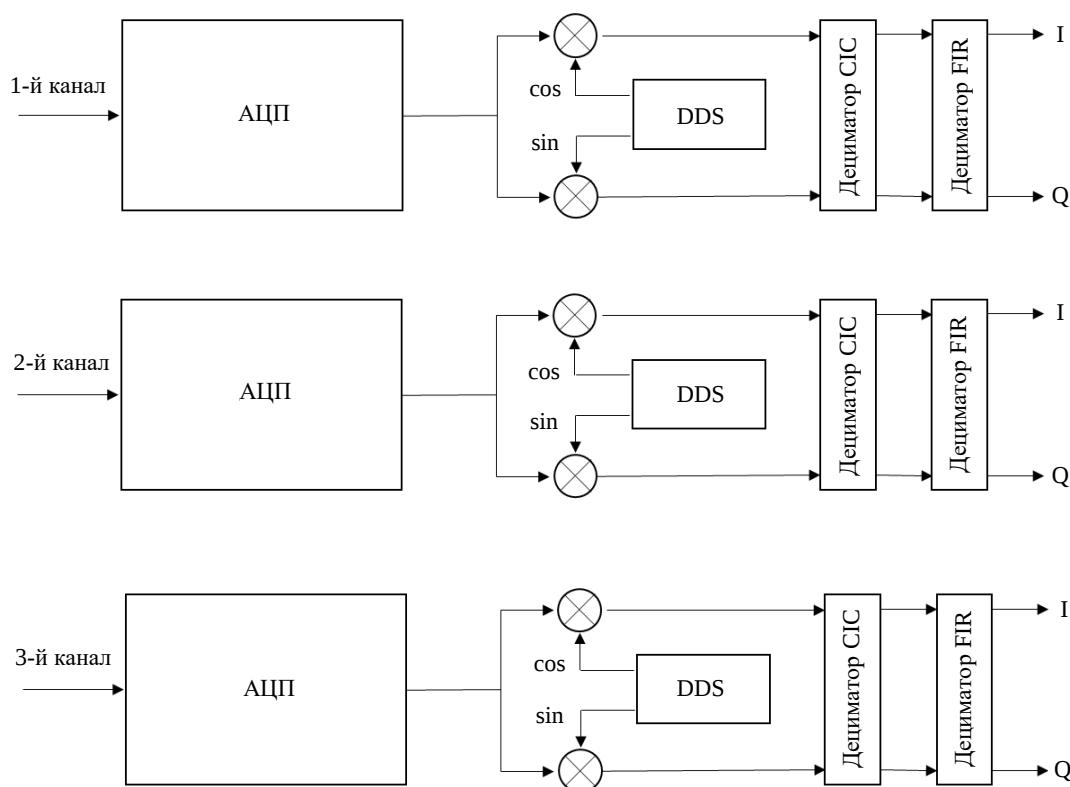


Рис. 2. Схема радиоприемного устройства с квадратурным преобразованием

Fig. 2. Scheme of a radio receiver with quadrature conversion

На выходе РПУ формируются 3 сигнала:

$$\begin{aligned} \dot{S}_x(t) &= A_{mx}s(t)\cos(\varphi_x + \varphi(t)) + \\ &+ iA_{mx}s(t)\sin(\varphi_x + \varphi(t)); \\ \dot{S}_y(t) &= A_{my}s(t)\cos(\varphi_y + \varphi(t)) + \\ &+ iA_{my}s(t)\sin(\varphi_y + \varphi(t)); \\ \dot{S}_z(t) &= A_{mz}s(t)\cos(\varphi_z + \varphi(t)) + \\ &+ iA_{mz}s(t)\sin(\varphi_z + \varphi(t)). \end{aligned} \quad (1)$$

где A_{mx}, A_{my}, A_{mz} – выходные амплитуды после квадратурного преобразования проекции электромагнитного поля; $s(t), \varphi(t)$ – изменение амплитуды и фазы во времени; $\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$ – начальные фазы трех проекций поля.

Алгоритм пространственно-поляризационной обработки сигналов. Возможность определения пространственных и поляризационных параметров сигнала основана на теореме Пойнтинга, которая гласит, что векторы электрической и магнитной составляющих поля ортогональны относительно направления распростра-

нения электромагнитной волны [10–19]. Данные составляющие образуют плоскость поляризации, по которой можно определить коэффициент эллиптичности, а также коэффициент наклона эллипса поляризации. Соответственно, восстановление плоскости поляризации позволяет не только определить направление принятой радиоволны, но и выполнить пространственно-поляризационную фильтрацию сигнала.

Из (1) видно, что вещественная и мнимая части сдвинуты по фазе на 90° . Благодаря этому можно сформировать в трехмерном пространстве вектор из действительных частей и вектор из мнимых частей:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} R_x \\ R_y \\ R_z \end{bmatrix}; \mathbf{I} = \begin{bmatrix} I_x \\ I_y \\ I_z \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где

$$R_x = A_{mx}s(t)\cos(\varphi_x + \varphi(t));$$

$$R_y = A_{my}s(t)\cos(\varphi_y + \varphi(t));$$

$$R_z = A_{mz}s(t)\cos(\varphi_z + \varphi(t));$$

$$\begin{aligned} I_x &= A_{mx} s(t) \sin(\varphi_x + \varphi(t)); \\ I_y &= A_{my} s(t) \sin(\varphi_y + \varphi(t)); \\ I_z &= A_{mz} s(t) \cos(\varphi_z + \varphi(t)). \end{aligned}$$

Векторы действительной и мнимой частей в течение времени образуют плоскость поляризации поступающей электромагнитной волны.

Так как изменение векторов происходит как во времени, так и в пространстве, оценку пространственных и поляризационных параметров волны рациональнее производить на основе алгебры кватернионов.

Таким образом, выражения (2) можно представить в виде кватернионов:

$$\begin{aligned} Q_{\text{Re}} &= i \operatorname{Re}(\dot{S}_x(t)) + j \operatorname{Re}(\dot{S}_y(t)) + k \operatorname{Re}(\dot{S}_z(t)); \\ Q_{\text{Im}} &= i \operatorname{Im}(\dot{S}_x(t)) + j \operatorname{Im}(\dot{S}_y(t)) + k \operatorname{Im}(\dot{S}_z(t)). \end{aligned}$$

Перемножение кватернионов действительной и мнимой частей образует кватернион, который описывает пространственно-временное изменение вектора напряженности поступающей электромагнитной волны:

$$Q = Q_{\text{Re}} * Q_{\text{Im}} = |Q| \left(\cos \frac{\alpha}{2} + \mathbf{v} \sin \frac{\alpha}{2} \right),$$

где $|Q| = \sqrt{q_0^2 + q_x^2 + q_y^2 + q_z^2}$ – модуль кватерниона ($q_0 = Q(1)$; $q_x = Q(2)$; $q_y = Q(3)$; $q_z = Q(4)$ – вещественные числа); $\alpha = 2 \arccos \frac{q_0}{|Q|}$ – аргу-

мент кватерниона; $\mathbf{v}^T = [x, y, z]$ – вектор вращения.

Вектор вращения $\mathbf{v}$ параллелен направлению распространения электромагнитной волны и может быть определен по следующей формуле:

$$\mathbf{v} = \frac{1}{|Q| \sin \frac{\alpha}{2}} \begin{bmatrix} q_x \\ q_y \\ q_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}.$$

Вычислив вектор вращения, можно оценить пространственные параметры поступившей радиоволны.

В результате азимут можно найти по следующей формуле:

$$\varphi = \arctg \left(\frac{y}{z} \right),$$

а угол места

$$\theta = \arctg \left(\frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}} \right),$$

где φ – азимут; θ – угол места.

Для оценки поляризационных параметров принимаемой триортогональной антенной электромагнитной волны требуется перенести плоскость поляризации в плоскость xOy с помощью последовательных поворотов в пространстве относительно осей z - x - z .

Для выполнения данной операции можно воспользоваться углами Эйлера, найденными по рассчитанному ранее азимуту и углу места ИРИ:

$$\alpha = 0,$$

$$\gamma = \frac{\pi}{2} + \varphi,$$

$$\beta = \frac{\pi}{2} - \theta.$$

Вычислив углы Эйлера, получаем следующую матрицу последовательных поворотов относительно оси zxz :

$$\begin{aligned} R_{zxz} &= \begin{bmatrix} \cos \gamma & \cos \beta \sin \gamma & \sin \gamma \sin \beta \\ -\sin \gamma & \cos \beta \cos \gamma & \cos \gamma \sin \beta \\ 0 & -\sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (3)$$

Кватернион поворота в соответствии с выражением (3) принимает следующий вид:

$$q = w - ix - jy - kz,$$

где

$$\begin{aligned} w &= \frac{\sqrt{1 + R_{11} + R_{22} + R_{33}}}{2}; \\ x &= \frac{\sqrt{1 + R_{11} - R_{22} - R_{33}}}{2}; \\ y &= \frac{\sqrt{1 - R_{11} + R_{22} - R_{33}}}{2}; \\ z &= \frac{\sqrt{1 - R_{11} - R_{22} + R_{33}}}{2}. \end{aligned}$$

Поворот плоскости поляризации выполняется с помощью кватерниона поворота:

$$\dot{R} = qQ_{\text{Re}}q^{-1} = R_x + iR_y;$$

$$\dot{I} = qQ_{\text{Im}}q^{-1} = I_x + iI_y.$$

После поворота плоскости поляризации определяется угол наклона большой оси эллипса поляризации:

$$\varphi_z = \arg(\sqrt{\dot{R}^2 + \dot{I}^2}).$$

Для компенсации амплитудно-фазового смещения, связанного с углом наклона эллипса поляризации, необходимо домножить $\dot{R}$ и $\dot{I}$ на $\exp(-i\varphi_z)$:

$$\dot{R}' = \dot{R} \exp(-i\varphi_z) = R'_x + iR'_y;$$

$$\dot{I}' = \dot{I} \exp(-i\varphi_z) = I'_x + iI'_y. \quad (4)$$

Чтобы оценить коэффициент эллиптичности и направление вращения эллипса поляризации, необходимо привести выражения (4) к следующему виду:

$$\dot{R}_0 = R'_x + iI'_x = |\dot{R}_0| \exp(i\varphi_R);$$

$$\dot{I}_0 = R'_y + iI'_y = |\dot{I}_0| \exp(i\varphi_I).$$

Тогда коэффициент эллиптичности можно найти как модуль отношения комплексных амплитуд $\dot{R}_0$ и $\dot{I}_0$:

$$K = \left| \frac{\dot{R}_0}{\dot{I}_0} \right|.$$

Направление вращения находится как аргумент отношения комплексных амплитуд $\dot{R}_0$ и $\dot{I}_0$:

$$\Delta\varphi = \arg\left(\frac{\dot{R}_0}{\dot{I}_0}\right).$$

По знаку разности фаз определяется знак коэффициента эллиптичности. Знак "–" обозначает левое вращение эллипса, а знак "+" – правое.

После определения коэффициента эллиптичности и направления вращения эллипса можно выполнить деполяризацию сигнала выделив информационный сигнал следующим образом:

$$\dot{S} = \frac{\dot{R}_0}{\dot{R}_3} = \frac{\dot{I}_0}{\dot{I}_3},$$

где $\dot{R}_3 = \text{Re}(\dot{K}) \exp(i0)$; $\dot{I}_3 = \text{Im}(\dot{K}) \exp(-i\Delta\varphi)$,

$$\dot{K} = \exp\left[i \arctg\left(\frac{1}{K}\right)\right].$$

В итоге, данный алгоритм пространственно-поляризационной обработки трех проекций поля позволяет:

- определить угловые координаты принятой электромагнитной волны;
- восстановить эллипс поляризации на основе оценки коэффициента эллиптичности и наклона эллипса;
- выделить информационный сигнал, выполнив его деполяризацию.

Математическое моделирование алгоритма пространственно-поляризационной обработки сигнала. Проверка работоспособности алгоритма посредством создания имитационной модели проводилась в среде программирования MATLAB.

Распространяющаяся электромагнитная волна задавалась с помощью следующих векторов электромагнитного поля:

$$\begin{cases} E_z = E_{0z} \sin(\omega t + \varphi_z); \\ E_y = E_{0y} \sin(\omega t + \varphi_y), \end{cases}$$

где E_{0z} и E_{0y} – амплитуды электромагнитной волны; φ_z и φ_y – начальные фазы при $t = 0$.

Коэффициент эллиптичности K изменялся за счет варьирования отношения амплитуд E_{0z} и E_{0y} либо разности фаз $\varphi = \varphi_z - \varphi_y$.

Антенный элемент представлял собой 3 ортогональных симметричных вибратора, расположенных в соответствии с рис. 1.

Данный антенный элемент принимал распространяющуюся волну с заданными пространственными и поляризационными параметрами.

С помощью трехканального РПУ фиксировались три комплексные амплитуды проекций поля, по которым в дальнейшем производилась пространственно-поляризационная обработка.

На выходе имитационной модели формировались СКО оценки азимута, угла места, коэффициента эллиптичности и наклона эллипса в зависимости от отношения сигнал/шум (ОСШ) в полосе 50 кГц при разных коэффициентах

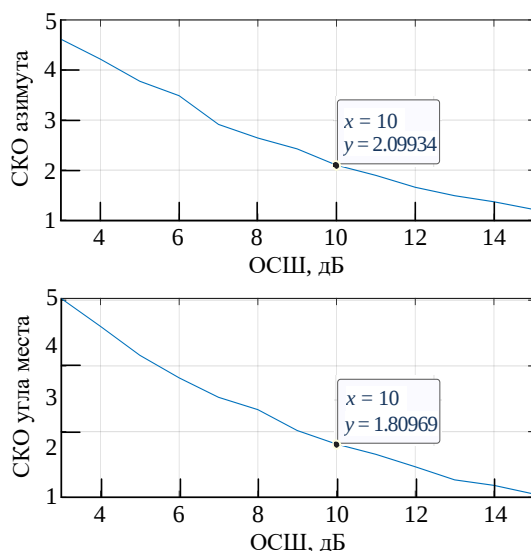


Рис. 3. Зависимости СКО оценки азимута и угла места от ОСШ при $K = 1$; $E_{0y}/E_{0z} = 1$; $\Delta\varphi = 90^\circ$

Fig. 3. Dependence of the STD of the azimuth and elevation angle estimates on the SNR at $K = 1$; $E_{0y}/E_{0z} = 1$; $\Delta\varphi = 90^\circ$

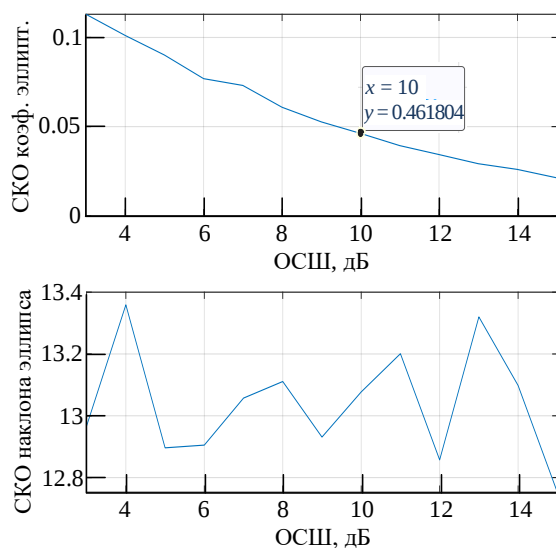


Рис. 4. Зависимости СКО оценки коэффициента эллиптичности и наклона эллипса от ОСШ при $K = 1$; $E_{0y}/E_{0z} = 1$; $\Delta\varphi = 90^\circ$

Fig. 4. Dependence of the STD of the estimation of the ellipticity coefficient and the slope of the ellipse on the SNR at $K = 1$; $E_{0y}/E_{0z} = 1$; $\Delta\varphi = 90^\circ$

эллиптичности принятой волны. Результаты моделирования представлены на рис. 3–16.

По полученным результатам видно, что оценки азимута, угла места и наклона эллипса зависят от коэффициента эллиптичности падающей волны. Для круговой поляризации волны нельзя однозначно определить значение наклона эллипса принятой волны. Это связано с тем, что при круговой поляризации наличие каких-либо

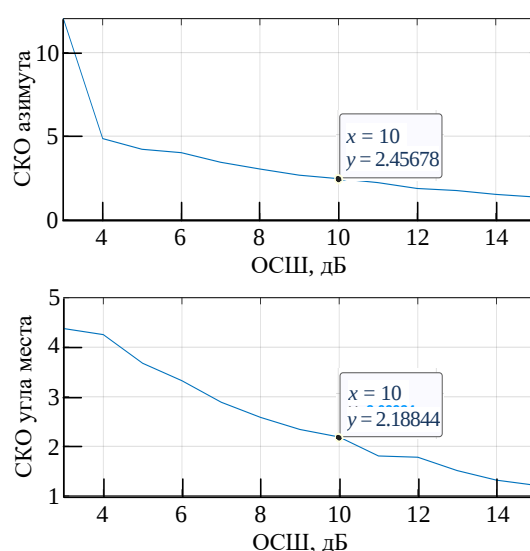


Рис. 5. Зависимости оценки азимута и угла места от ОСШ при $K = 0.6$; $E_{0y}/E_{0z} = 1$; $\Delta\varphi = 60^\circ$

Fig. 5. Dependence of the azimuth and elevation angle estimates on the SNR at $K = 0.6$; $E_{0y}/E_{0z} = 1$; $\Delta\varphi = 60^\circ$

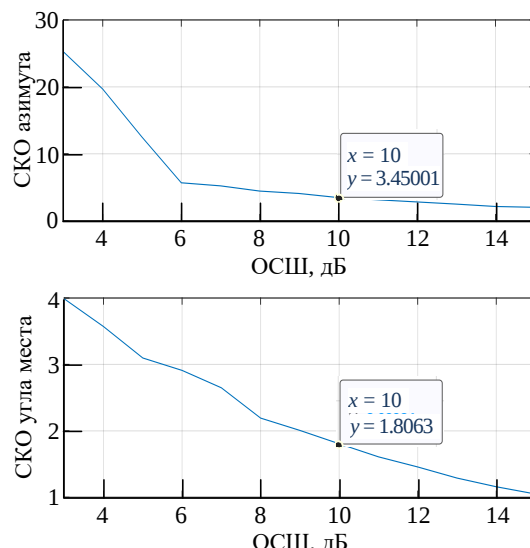


Рис. 6. Зависимости оценки азимута и угла места от ОСШ при $K = 0.6$; $E_{0y}/E_{0z} = 0.6$; $\Delta\varphi = 90^\circ$

Fig. 6. Dependence of the azimuth and elevation angle estimates on the SNR at $K = 0.6$; $E_{0y}/E_{0z} = 0.6$; $\Delta\varphi = 90^\circ$

шумовых составляющих меняет наклон эллипса. Также при отсутствии одной из составляющих электромагнитного поля в поступающей волне оценить азимут, угол места и наклон эллипса не представляется возможным.

Стоит отметить, что в КВ-диапазоне за счет переотражений от ионосферы в распространяющейся волне всегда существуют обе составляющие поля, поэтому на практике возможна предварительная оценка пространственных и

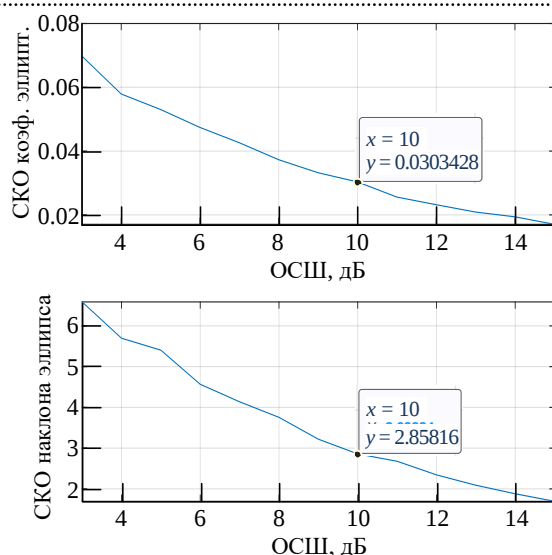


Рис. 7. Зависимости СК0 оценки коэффициента эллиптичности и наклона эллипса от ОСШ при $K = 0.6$; $E_{0y}/E_{0z} = 1$; $\Delta\varphi = 60^\circ$

Fig. 7. Dependence of the STD of the estimation of the ellipticity coefficient and the slope of the ellipse on the SNR at $K = 0.6$; $E_{0y}/E_{0z} = 1$; $\Delta\varphi = 60^\circ$

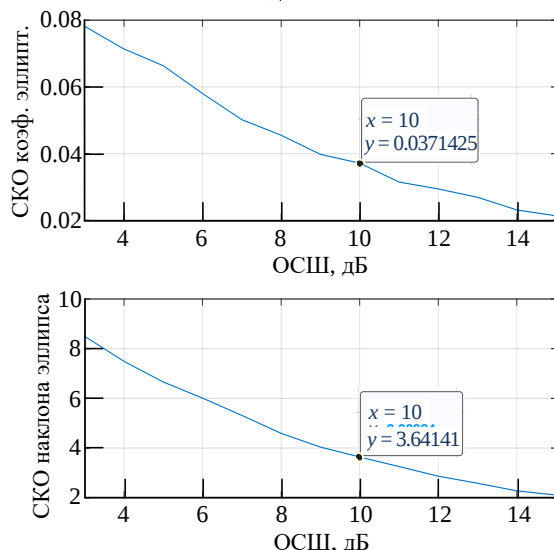


Рис. 8. Зависимости СК0 оценки коэффициента эллиптичности и наклона эллипса от ОСШ при $K = 0.6$; $E_{0y}/E_{0z} = 0.6$; $\Delta\varphi = 90^\circ$

Fig. 8. Dependence of the STD of the estimation of the ellipticity coefficient and the slope of the ellipse on the SNR at $K = 0.6$; $E_{0y}/E_{0z} = 0.6$; $\Delta\varphi = 90^\circ$

поляризационных параметров принимаемой волны. На основе полученных оценок азимута и угла места можно выбрать сектор пеленгования для получения более точных значений угловых координат, а за счет полученных поляризационных параметров – отобразить эллипс поляризации волны.

В табл. 1 приведены СК0 оценки азимута, уг-

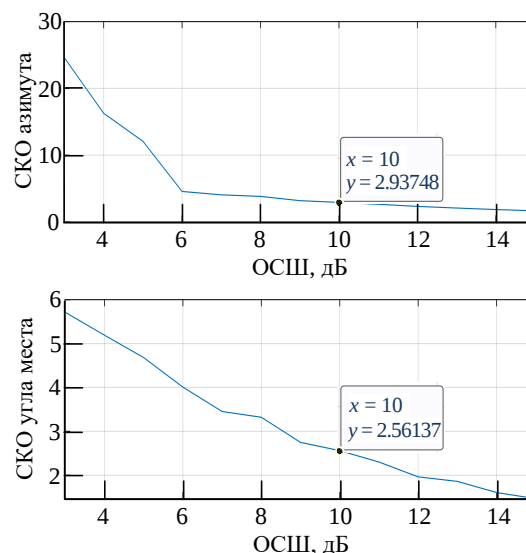


Рис. 9. Зависимости СК0 оценки азимута и угла места от ОСШ при $K = 0.4$; $E_{0y}/E_{0z} = 1$; $\Delta\varphi = 45^\circ$

Fig. 9. Dependence of the STD of the azimuth and elevation angle estimates on the SNR at $K = 0.4$; $E_{0y}/E_{0z} = 1$; $\Delta\varphi = 45^\circ$

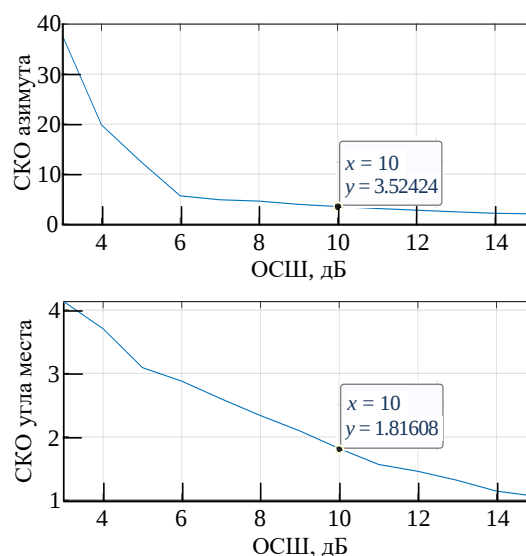


Рис. 10. Зависимости СК0 оценки азимута и угла места от ОСШ при $K = 0.4$; $E_{0y}/E_{0z} = 0.4$; $\Delta\varphi = 90^\circ$

Fig. 10. Dependence of the STD of the azimuth and elevation angle estimates on the SNR at $K = 0.4$; $E_{0y}/E_{0z} = 0.4$; $\Delta\varphi = 90^\circ$

ла места, коэффициента эллиптичности и наклона эллипса при ОСШ 10 дБ в полосе 50 кГц.

При ОСШ 10 дБ в полосе 50 кГц максимальные СК0 оценки пространственных и поляризационных параметров достигают:

- СК0 оценки азимута – 10.4° при $K = 0.2$;
- СК0 оценки угла места – 5.1° при $K = 0.2$;
- СК0 коэффициента эллиптичности – 0.05 при $K = 0$;
- СК0 наклона эллипса – 7.96° при $K = 0.8$.

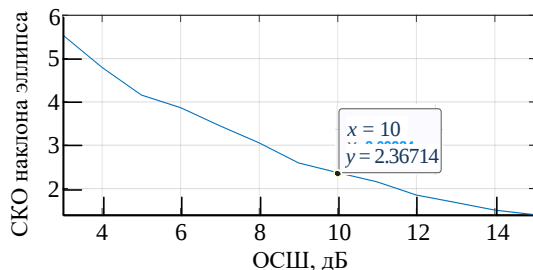
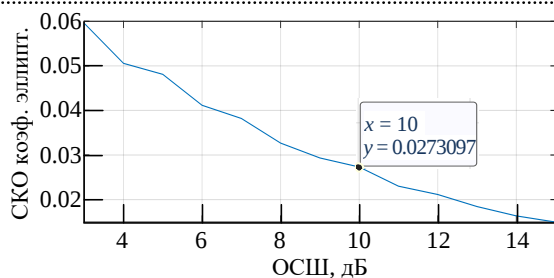


Рис. 11. Зависимости оценки СКО коэффициента эллиптичности и наклона эллипса от ОСШ при $K = 0.4$; $E_{0y}/E_{0z} = 1$; $\Delta\varphi = 45^\circ$

Fig. 11. Dependence of the STD of the estimation of the ellipticity coefficient and the slope of the ellipse on the SNR at $K = 0.4$; $E_{0y}/E_{0z} = 1$; $\Delta\varphi = 45^\circ$

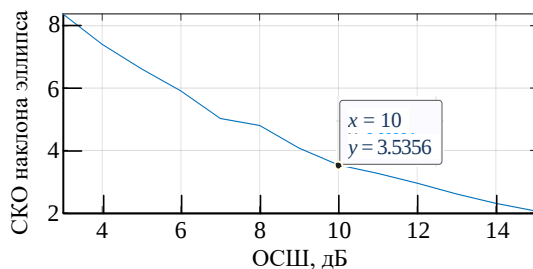
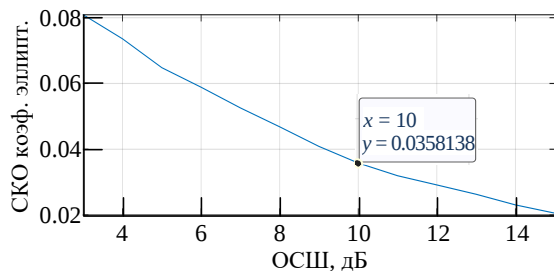


Рис. 12. Зависимости СКО оценки коэффициента эллиптичности и наклона эллипса от ОСШ при $K = 0.4$; $E_{0y}/E_{0z} = 0.4$; $\Delta\varphi = 90^\circ$

Fig. 12. Dependence of the STD of the estimation of the ellipticity coefficient and the slope of the ellipse on the SNR at $K = 0.4$; $E_{0y}/E_{0z} = 0.4$; $\Delta\varphi = 90^\circ$

Также оценивалась потеря энергии передаваемой радиоволны с разными коэффициентами поляризации при приеме триортогональным антенным элементом и антенной с вертикальной поляризацией. Для этого на модель триортогональной антенны и на модель несимметричного вертикального вибратора подава-

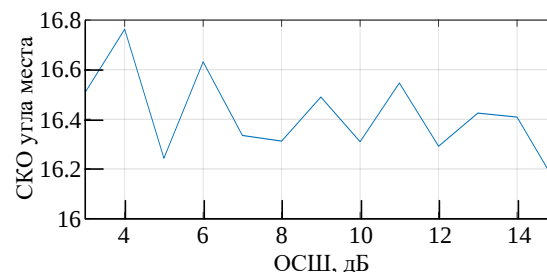
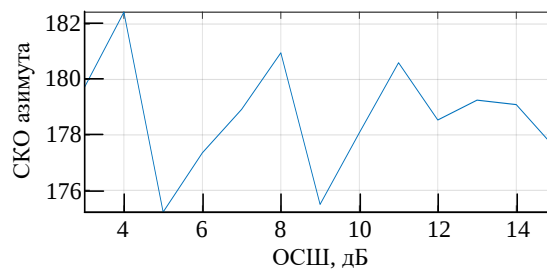


Рис. 13. Зависимости СКО оценки азимута и угла места от ОСШ при $K = 0$; $E_{0y}/E_{0z} = 1$; $\Delta\varphi = 0^\circ$

Fig. 13. Dependence of the STD of the azimuth and elevation angle estimates on the SNR at $K = 0$; $E_{0y}/E_{0z} = 1$; $\Delta\varphi = 0^\circ$

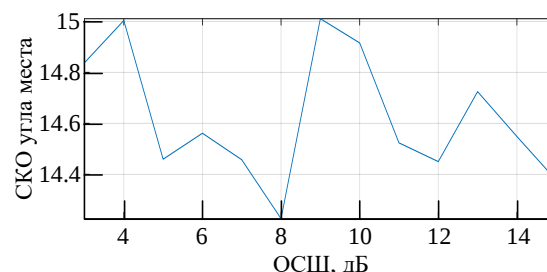
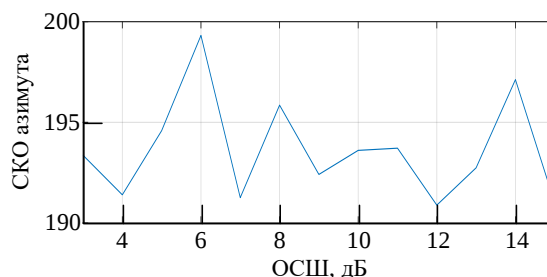


Рис. 14. Зависимости СКО оценки азимута и угла места от ОСШ при $K = 0$; $E_{0y}/E_{0z} = 0$; $\Delta\varphi = 90^\circ$

Fig. 14. Dependence of the STD of the azimuth and elevation angle estimates on the SNR at $K = 0$; $E_{0y}/E_{0z} = 0$; $\Delta\varphi = 90^\circ$

лась электромагнитная волна различной поляризации при разных азимутах и углах места. При этом коэффициент эллиптичности менялся за счет варьирования разности фаз между горизонтальной и вертикальной составляющими поля, а также их соотношения. Затем по всему азимуту при определенных угле места и коэффициенте эллиптичности брался средний уровень принятого сигнала и вычитался из энергии передаваемой радиоволны.

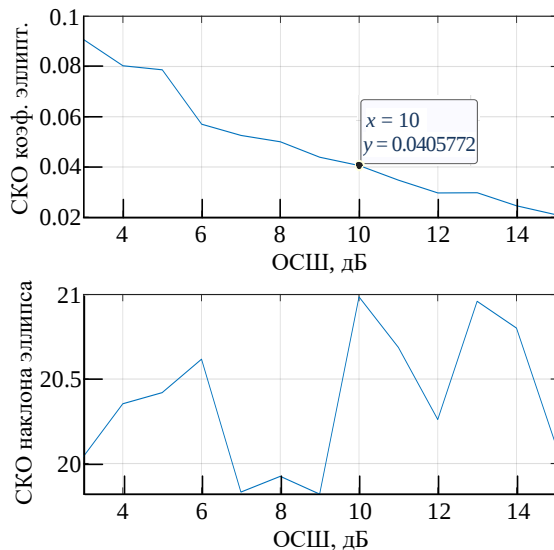


Рис. 15. Зависимости СКО оценки коэффициента эллиптичности и наклона эллипса от ОСШ при $K = 0$; $E_{0y}/E_{0z} = 1$; $\Delta\varphi = 0^\circ$

Fig. 15. Dependence of the STD of the estimation of the ellipticity coefficient and the slope of the ellipse on the SNR at $K = 0$; $E_{0y}/E_{0z} = 1$; $\Delta\varphi = 0^\circ$

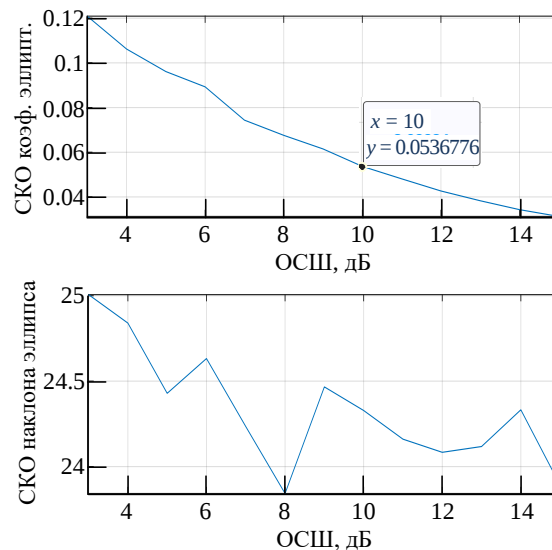


Рис. 16. Зависимости СКО оценки коэффициента эллиптичности и наклона эллипса от ОСШ при $K = 0$; $E_{0y}/E_{0z} = 0$; $\Delta\varphi = 90^\circ$

Fig. 16. Dependence of the STD of the estimation of the ellipticity coefficient and the slope of the ellipse on the SNR at $K = 0$; $E_{0y}/E_{0z} = 0$; $\Delta\varphi = 90^\circ$

СКО оценок азимута, угла места, коэффициента эллиптичности и наклона эллипса принятой электромагнитной волны при ОСШ 10 дБ в полосе 50 КГц

The standard deviation of the azimuth, elevation angle, ellipticity coefficient and ellipse slope estimates of the received electromagnetic wave at a signal-to-noise ratio of 10 dB in the 50 kHz band

Коэффициент эллиптичности	СКО азимута	СКО угла места	СКО коэффициента эллиптичности	СКО наклона эллипса
$K = 1$; $E_{0y}/E_{0z} = 1$; $\Delta\varphi = 90^\circ$	2.1	1.8	0.046	—
$K = 0.8$; $E_{0y}/E_{0z} = 0.8$; $\Delta\varphi = 90^\circ$	2.25	1.86	0.037	7.96
$K = 0.8$; $E_{0y}/E_{0z} = 1$; $\Delta\varphi = 80^\circ$	2.7	1.79	0.04	6.48
$K = 0.6$; $E_{0y}/E_{0z} = 0.6$; $\Delta\varphi = 90^\circ$	2.46	2.19	0.03	2.86
$K = 0.6$; $E_{0y}/E_{0z} = 1$; $\Delta\varphi = 60^\circ$	3.45	1.8	0.037	3.64
$K = 0.4$; $E_{0y}/E_{0z} = 0.4$; $\Delta\varphi = 90^\circ$	2.94	2.56	0.027	2.37
$K = 0.4$; $E_{0y}/E_{0z} = 1$; $\Delta\varphi = 45^\circ$	3.52	1.82	0.036	3.54
$K = 0.2$; $E_{0y}/E_{0z} = 0.2$; $\Delta\varphi = 20^\circ$	6.06	5.1	0.024	3.48
$K = 0.2$; $E_{0y}/E_{0z} = 1$; $\Delta\varphi = 90^\circ$	10.4	1.86	0.032	5.58
$K = 0$; $E_{0y}/E_{0z} = 1$; $\Delta\varphi = 0^\circ$	—	—	0.04	—
$K = 0$; $E_{0y}/E_{0z} = 0$; $\Delta\varphi = 90^\circ$	—	—	0.05	—

Полученные зависимости среднего уровня потерь по азимуту от угла места при разных коэффициентах эллиптичности поступающей волны приведены на рис. 17–23.

Из рисунков следует, что потери энергии в принятом сигнале после пространственно-поляризационной обработки меньше, чем при

приеме только вертикальной составляющей. Наибольший выигрыш при пространственно-поляризационной обработке наблюдается на углах места больше 40° . Максимальные потери возникают, когда обе составляющие электромагнитного поля приходят синфазно ($\Delta\varphi = 0^\circ$).

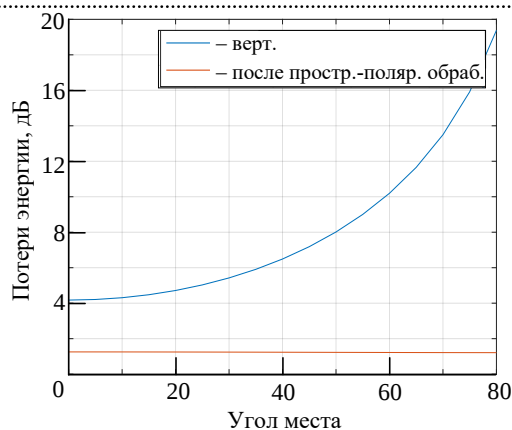


Рис. 17. Зависимость среднего уровня потерь по азимуту принятого сигнала от угла места при $K = 1$; $E_{0y}/E_{0z} = 1$; $\Delta\varphi = 90^\circ$

Fig. 17. Dependence of the average loss level in azimuth of the received signal on the elevation angle at $K = 1$; $E_{0y}/E_{0z} = 1$; $\Delta\varphi = 90^\circ$

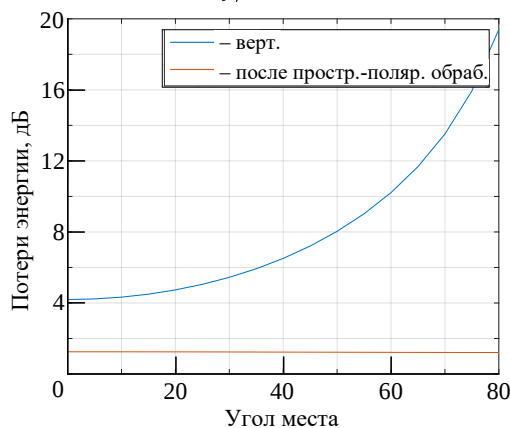


Рис. 18. Зависимость среднего уровня потерь по азимуту принятого сигнала от угла места при $K = 0.6$; $E_{0y}/E_{0z} = 1$; $\Delta\varphi = 60^\circ$

Fig. 18. Dependence of the average loss level in azimuth of the received signal on the elevation angle at $K = 0.6$; $E_{0y}/E_{0z} = 1$; $\Delta\varphi = 60^\circ$

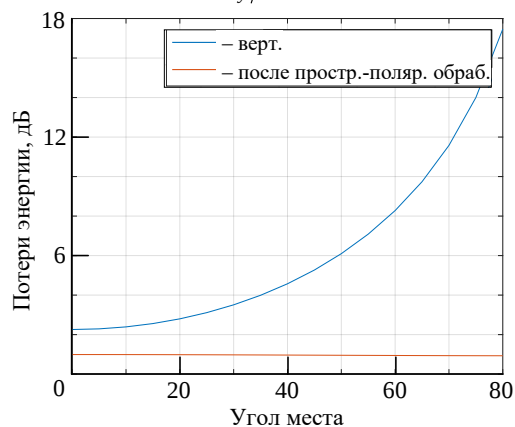


Рис. 19. Зависимость среднего уровня потерь по азимуту принятого сигнала от угла места при $K = 0.6$; $E_{0y}/E_{0z} = 0.6$; $\Delta\varphi = 90^\circ$

Fig. 19. Dependence of the average loss level in azimuth of the received signal on the elevation angle at $K = 0.6$; $E_{0y}/E_{0z} = 0.6$; $\Delta\varphi = 90^\circ$

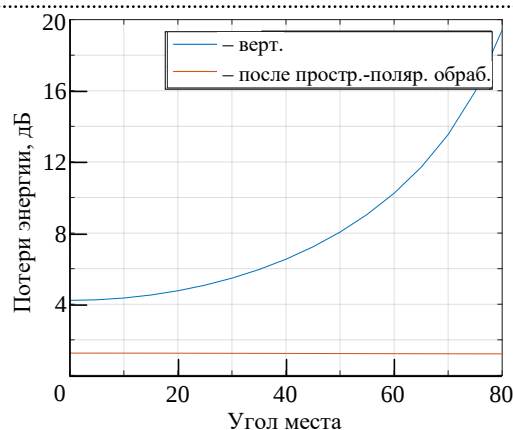


Рис. 20. Зависимость среднего уровня потерь по азимуту принятого сигнала от угла места при $K = 0.4$; $E_{0y}/E_{0z} = 1$; $\Delta\varphi = 45^\circ$

Fig. 20. Dependence of the average loss level in azimuth of the received signal on the elevation angle at $K = 0.4$; $E_{0y}/E_{0z} = 1$; $\Delta\varphi = 45^\circ$

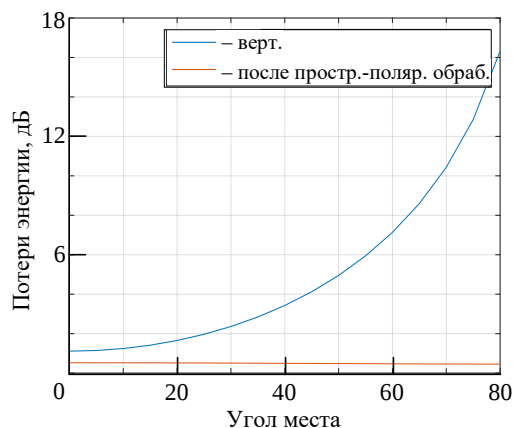


Рис. 21. Зависимость среднего уровня потерь по азимуту принятого сигнала от угла места при $K = 0.4$; $E_{0y}/E_{0z} = 0.4$; $\Delta\varphi = 90^\circ$

Fig. 21. Dependence of the average loss level in azimuth of the received signal on the elevation angle at $K = 0.4$; $E_{0y}/E_{0z} = 0.4$; $\Delta\varphi = 90^\circ$

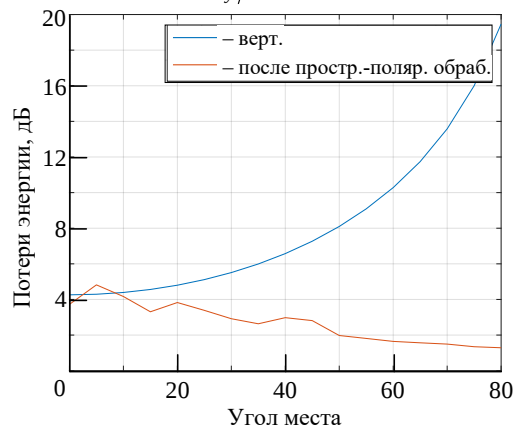


Рис. 22. Зависимость среднего уровня потерь по азимуту принятого сигнала от угла места при $K = 0$; $E_{0y}/E_{0z} = 1$; $\Delta\varphi = 0^\circ$

Fig. 22. Dependence of the average loss level in azimuth of the received signal on the elevation angle at $K = 0$; $E_{0y}/E_{0z} = 1$; $\Delta\varphi = 0^\circ$

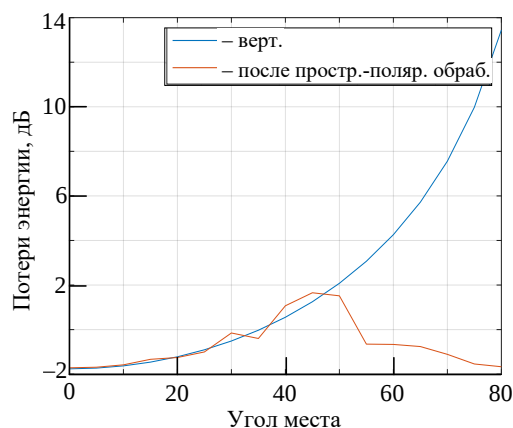


Рис. 23. Зависимость среднего уровня потерь по азимуту принятого сигнала от угла места при $K = 0$; $E_{0y}/E_{0z} = 0$; $\Delta\varphi = 90^\circ$

Fig. 23. Dependence of the average loss level in azimuth of the received signal on the elevation angle at $K = 0$; $E_{0y}/E_{0z} = 0$; $\Delta\varphi = 90^\circ$

Заключение. Алгоритм пространственно-поляризационной обработки трех проекций элек-

ромагнитного поля позволяет оценить угловые координаты передаваемой радиоволны ИРИ, а также оценить поляризационные параметры сигнала (коэффициент эллиптичности и наклон эллипса). При этом, как отмечалось ранее, для корректной оценки пространственных и поляризационных параметров необходимо, чтобы в распространяющейся волне присутствовали обе составляющие электромагнитного поля.

На основе сравнения потерь энергии передаваемого сигнала при приеме триортогональной антенной, при дальнейшей пространственно-поляризационной обработке сигнала, а также при приеме вертикально поляризованной антенной можно заключить, что данный алгоритм позволяет обеспечить пространственно-поляризованную согласованность приема, тем самым повышая энергию принятого сигнала. Наибольший выигрыш наблюдается на углах места больше 40° .

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. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-faktorov-vliyayuschih-na-kachestvo-radiosvyazi-v-kv-diapazone/viewer> (дата обращения: 12.02.2023).
6. Компактные призматические 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.
7. Лучин Д. В., Сподобаев М. Ю. Системы ДКМВ радиосвязи: разработка, производство и перспективные решения // Вестн. Самарского аэрокосмического ун-та. 2014. Т. 44, № 2. С. 74–79.
8. Грибов Г. С. Перспективы использования двухполяризационных антенных элементов в составе антенных решеток для задач радиомониторинга // Научные, инженерные и производственные проблемы создания технических средств мониторинга электромагнитного поля с использованием инновационных технологий: V науч.-техн. конф., Санкт-Петербург, 4–6 окт. 2023. СПб., 2024. С. 18–23.
9. 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

10. Грибов Г. С. Экспериментальные исследования поляризационного метода пеленгования с помощью регистрации трех проекций электромагнитного поля // Инфокоммуникационные технологии в цифровом мире: сб. докл. 13-й науч.-техн. шк.-семинара, Санкт-Петербург, 12–16 дек. 2023. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2023. С. 62–66.

11. 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.

12. Демичев И. В., Шмаков Н. П., Иванов А. В. Пространственно-поляризационная обработка радиосигналов в гиперкомплексном пространстве // Наукоемкие технологии. 2018. Т. 19, № 10. С. 25–29. doi: 10.18127/j19998465-201810-05

13. Дворников С. В., Конюховский В. С., Симонов А. Н. Способ частотно-пространственной селекции радиоизлучений с помощью триортогональной антенной системы // Информационно-управляющие системы. 2020. № 1. С. 63–72. doi: 10.31799/1684-8853-2020-1-63-72

14. Богдановский С. В., Симонов А. Н., Теслевич С. Ф. Поляризационный метод пеленгования источников радиоизлучения в пространстве //

Наукоемкие технологии. 2016. Т. 17, № 12. С. 40–43.

15. Wong K. Direction finding/polarization estimation-dipole and/or loop triad(s) // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2001. Vol. 37, № 2. P. 679–684. doi:10.1109/7.937478

16. Lower bound of the estimation error of an emitter's direction-of-arrival/polarization, for a collocated triad of orthogonal dipoles/loops that fail randomly / D. Kitavi, K. Wong, M. Zou, K. Agrawal // IET Microwaves, Antennas & Propagation. 2017. Vol. 11, iss. 7. P. 961–970. doi:10.1049/iet-map.2016.0918

17. Chintagunta S., Ponnusamy P. Integrated polarization and diversity smoothing algorithm for DOD and

DOA estimation of coherent targets // IET Signal Processing. 2018. Vol. 12, iss. 4. P. 447–453. doi: 10.1049/iet-spr.2017.0276

18. Khan S., Wong K. Electrically Long Dipoles in a Crossed Pair for Closed-Form Estimation of an Incident Source's Polarization // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2019. Vol. 67, № 8. P. 5569–5581. doi:10.1109/TAP.2019.2916581

19. Zheng G. Two-dimensional DOA estimation for polarization sensitive array consisted of spatially spread crossed-dipole // IEEE Sensors J. 2018. Vol. 18, iss. 12. P. 5014–5023. doi:10.1109/JSEN.2018.2820168

Информация об авторе

Грибов Григорий Сергеевич – магистр по направлению "Радиотехника" (2021, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)), аспирант кафедры радиотехнических систем названного университета, инженер 1-й категории АО «НИИ "Вектор"». Автор 12 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* [Electromagnetic Wave Propagation 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. *Ionospheric Radio Waves*. Waltham, Blaisdell Pub. Co, 1969, 504 p.

5. Korshunov D. V., Vasiliev A. S., Lapshin E. V. Analysis of Factors Affecting the Quality of Radio Communication in the HF band. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-faktorov-vliyayuschih-na-kachestvo-radiosvyazi-v-kv-diapazone/viewer> (accessed 12.02.2023) (In Russ.)

6. 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. *Telecommunications*. 2015, no. 8, pp. 44–48. (In Russ.)

7. Luchin D. V., Spodobae M. Yu. DCMV Radio Communication Systems: Development, Production and Promising Solutions. *Bull. of Samara Aerospace University*. 2014, vol. 44, no. 2, pp. 74–79. (In Russ.)

8. Gribov G. S. *Perspektivy ispolzovaniya dvuhpolarizacionnykh antennoy elementov v sostave antennoy reshetok dlya zadach radiomonitoringa* [Prospects for the Use of Dual-Polarization Antenna Elements as Part of Antenna Arrays for Radio Monitoring Tasks]. *Scientific, Engineering*

and Production Problems of Creating Technical Means for Monitoring the Electromagnetic Field Using Innovative Technologies. V Scientific and Technical Conf., St Petersburg, 4–6 Oct. 2023. SPb., 2024, pp. 18–23. (In Russ.)

9. Gribov G. S. Simulation of Spatial Polarization Characteristics of a Triorthogonal Antenna Element for the Tasks of HF Band Bearing. *J. of the Russian Universities. Radioelectronics*. 2023, vol. 26, no. 4, pp. 95–105. (In Russ.) doi:10.32603/1993-8985-2023-26-4-95-105

10. Gribov G. S. *Eksperimentalnyye issledovaniya polarizatsionnogo metoda pelengovaniya s pomoshchyu registratsii trekh proyektsey elektromagnitnogo polya* [Experimental Studies of the Polarization Direction Finding Method Using Registration of Three Electromagnetic Field Projections]. *Infocommunication Technologies in the Digital World: Collection. Report 13th Scientific and Technical. School-Seminar, St Petersburg, 12–16 Dec. 2023. St Petersburg, Izd-vo SPbGETU "LETI", 2023, pp. 62–66. (In Russ.)*

11. Demichev I. V., Rodin D. V. *Nauchno-obosnovannoe predlozhenie po tehnikeskoj realizacii radiopriemnogo trakta dlya registratsii polnogo vektora elektromagnitnogo polya* [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"*. 2017, no. 4, pp. 10–14. (In Russ.)

12. Demichev I. V., Shmakov N. P., Ivanov A. V. Spatial Polarization Processing of Radio Signals in Hyper-

complex Space. Science Intensive Technologies. 2018, vol. 19, no. 10, pp. 25–29. (In Russ.)
doi: 10.18127/j19998465-201810-05

13. Dvornikov S. V., Konyukhovskiy V. S., Simonov A. N. Method of Frequency-Spatial Selection of Radio Emissions Using a Triorthogonal Antenna System. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems]. 2020, no. 1, pp. 63–72. (In Russ.)
doi:10.31799/1684-8853-2020-1-63-72

14. Bogdanovsky S. V., Simonov A. N., Teslevich S. F. A Polarization Method of Spatial Radio Source Direction Finding. *Science Intensive Technologies*. 2016, vol. 17, no. 12, pp. 40–43. (In Russ.)

15. Wong K. Direction finding/polarization estimation-dipole and/or loop triad(s). *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 2001, vol. 37, no. 2, pp. 679–684. doi:10.1109/7.937478

16. Kitavi D., Wong K., Zou M., Agrawal K. Lower Bound of the Estimation Error of an Emitter's Direction-of-

Arrival/Polarization, for a Collocated Triad of Orthogonal Dipoles/Loops that Fail Randomly. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*. 2017, vol. 11, iss. 7, pp. 961–970.
doi: 10.1049/iet-map.2016.0918

17. Chintagunta S., Ponnusamy P. Integrated Polarization and Diversity Smoothing Algorithm for DOD and DOA Estimation Of Coherent Targets. *IET Signal Processing*. 2018, vol. 12, iss. 4, pp. 447–453.
doi: 10.1049/iet-spr.2017.0276

18. Khan S., Wong K. Electrically Long Dipoles in a Crossed Pair for Closed-Form Estimation of an Incident Source's Polarization. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2019, vol. 67, no. 8, pp. 5569–5581.
doi:10.1109/TAP.2019.2916581

19. Zheng G. Two-Dimensional DOA Estimation for Polarization Sensitive Array Consisted of Spatially Spread Crossed-Dipole. *IEEE Sensors J*. 2018, vol. 18, iss. 12, pp. 5014–5023.
doi:10.1109/JSEN.2018.2820168

Information about the author

Grigory S. Gribov, Master's Degree in "Radio Engineering" (2021, Saint Petersburg Electro-technical University), Postgraduate Student of the Department of Radio Engineering of Saint Petersburg Electro-technical University, engineer of the 1st category of JSC "Research Institute "Vector"". The author of 12 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>
