

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-3-79-92>



УДК 621.396

Особенности представления сигналов в малобазовой поляризационной измерительной системе

И. Е. Мухин¹, А. Н. Попов¹, А. В. Хмелевская² ✉, И. И. Олейник³

¹ АО «Авиаавтоматика» имени В. В. Тарасова
ул. Запольная, д. 47, г. Курск 305040, Российская Федерация

² Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

³ Белгородский государственный национальный исследовательский университет
ул. Победы, д. 85, г. Белгород 308015, Российская Федерация

✉ e-mail: aquarel85@mail.ru

Резюме

Цель исследования – анализ особенностей представления сигналов в малобазовой поляризационной измерительной системе.

Методы. Использовались методы теории вероятностей, математической статистики, статистической радиотехники, вычислительной математики, конструктивные особенности малобазовой поляризационной измерительной системы. Полученные уравнения позволяют вычислить выходные напряжения для приемных антенн обеих позиций. Соотношения справедливы при условии идентичности конструкций обеих позиций, включающих антенну для одновременного приёма и передачи сигналов одной линейной поляризации, а также соответствующее приёмо-передающее оборудование. Для сигналов с горизонтальной и вертикальной поляризацией, ортогональных друг другу по отношению к первой позиции, установлены собственные уникальные свойства, зависящие от ориентации и характера используемых поляризаций. Разработан алгоритм расчета фазовых сдвигов отраженных сигналов для антенн малобазовой поляризационной измерительной системы, который применим для горизонтальной и вертикальной поляризации.

Результаты: обоснована независимость значения амплитуды принимаемой волны отраженных сигналов от особенности конструкции малобазовой поляризационной измерительной системы; установлена зависимость энергетических показателей принимаемых сигналов от эффективной поверхности рассеяния объекта (величины $\sigma_{В.В.}$, $\sigma_{В.Г.}$, $\sigma_{Г.В.}$, $\sigma_{Г.Г.}$) для горизонтальной и вертикальной поляризации; сформулирован алгоритм расчета фазовых сдвигов отраженных сигналов для антенн малобазовой поляризационной измерительной системы; исследованы факторы влияния технических характеристик оборудования малобазовой поляризационной измерительной системы на энергетические показатели принимаемых сигналов.

Заключение. Предложена методика расчета фазового центра малобазовой поляризационной измерительной системы, позволяющая реализовать внутреннюю задачу теории антенных систем, а также выбрать произвольную точку в качестве центра координат малой базы поляризационной измерительной системы. Эта точка может находиться внутри зоны покрытия базы В, включая даже положение центров антенн отдельных позиций. Подобный подход расширяет гибкость системы и улучшает точность вычисления фазовых характеристик, обеспечивая универсальность метода независимо от конкретной физической реализации антенн и взаимного расположения компонентов системы.

Ключевые слова: эффективная поверхность рассеяния; малобазовая поляризационная измерительная система; антенна; горизонтальная поляризация; вертикальная поляризация; фазовый центр; сигнал.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Особенности представления сигналов в малобазовой поляризационной измерительной системе / И. Е. Мухин, А. Н. Попов, А. В. Хмелевская, И. И. Олейник // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2025. Т. 15, № 3. С. 79–92. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-3-79-92>

Поступила в редакцию 11.07.2025

Подписана в печать 10.08.2025

Опубликована 30.09.2025

Features of signal representation in a low-phase polarization measuring system

Ivan E. Mukhin¹, Alexander N. Popov¹,
Alena V. Khmelevskaya² ✉, Ivan I. Oleynik³

¹ JSC "Aviaautomatics" named after V.V. Tarasov"
47 Zapolnaya Str., Kursk 305040, Russian Federation

² Southwest State University
50 Let Oktyabrya Str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

³ Belgorod State National Research University
85 Pobedy Str., Belgorod 308015, Russian Federation

✉ e-mail: quarel85@mail.ru

Abstract

The purpose of the research is analysis of key features of signal representation in a small-base polarization measuring system.

Methods. The methods of probability theory, mathematical statistics, statistical radio engineering and computational mathematics were used in the scientific research. The design features of the small-base polarization measuring system were taken into account. As a result, a number of equations were obtained that allow calculating the output voltages for the receiving antennas of both positions. These relationships are valid in the case when the designs of both positions are similar and include an antenna for receiving and transmitting signals of the same linear polarization and a transceiver. For emitted and received signals of horizontal and vertical polarization, orthogonal to the polarization of the first position, their inherent features are determined. The studies made it possible to formulate an algorithm for calculating the phase shifts of reflected signals for antennas of the small-base polarization measuring system. The proposed algorithm is valid for horizontal and vertical polarization.

Results: the independence of the received wave amplitude value of reflected signals from the design feature of the small-base polarization measuring system was substantiated; the dependence of the energy indicators of received signals on the effective scattering surface of the object (the values $\sigma_{v,v}$, $\sigma_{v,g}$, $\sigma_{g,v}$, $\sigma_{g,g}$) for horizontal and vertical polarization was established; an algorithm for calculating the phase shifts of reflected signals for antennas of the small-base polarization measuring system was formulated; the factors influencing the technical characteristics of the equipment of the small-base polarization measuring system on the energy indicators of received signals were investigated.

Conclusion. The scientific article proposes a method for calculating the phases of the phase center of the small-base polarization measuring system, which allows implementing the internal problem of the theory of antenna systems. The proposed method allows tying the phase center of the small-base polarization measuring system to an arbitrary conditional point within the base, including the centers of the antennas of any of the two positions.

Keywords: effective scattering surface; small-base polarization measuring system; antenna; horizontal polarization; vertical polarization; phase center; signal.

Conflict of interest: The Authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Mukhin I.E., Popov A.N., Khmelevskaya A.V., Oleynik I.I. Features of signal representation in a low-phase polarization measuring system. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2025;15(3):79–92. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-3-79-92>

Received 11.07.2025

Accepted 10.08.2025

Published 30.09.2025

Введение

Конструктивные особенности малобазовой поляризационной измерительной системы заключаются в следующем:

– передающая позиция. Передатчик оснащён активной фазированной антенной решёткой (АФАР), которая способна генерировать два типа сигналов – с вертикальной и горизонтальной поляризацией. Эти сигналы передаются к объекту исследования и взаимодействуют с ним, изменяя своё направление распространения и характеристики амплитудно-фазовых колебаний;

– приёмные позиции. Существуют две приёмные позиции, каждая из которых оборудована индивидуальной антенной системой и приёмником, настроенными на фиксированные типы поляризации. Первая приёмная позиция воспринимает сигнал с вертикальной поляризацией, а вторая – с горизонтальной. При этом важно, что расстояние между этими двумя точками существенно меньше размеров зон отражения сигналов, что обеспечивает плоскость фронта принимаемых сигналов и повышает точность измерений. Это позволяет на

каждую из позиций обеспечить прием сигнала, отраженного от одного и того же объекта [1].

Материалы и методы

В малобазовой поляризационной измерительной системе рассмотрим сигнал с вертикальной поляризацией с ортом поляризации ($\vec{e}_v$). Антенна передающего устройства расположена от объекта на расстоянии r_2 и обладает следующими характеристиками: мощность ($P_{\text{пер.в}}$), максимальный коэффициент усиления на передачу ($G_{\text{пер.в}}(\vec{R})$) и на прием ($G_{\text{пр.в}}(\vec{R})$) в направлении на объект. Принимаем во внимание фазовые смещения в передающем ($\Delta \varphi_{\text{пер.в}}$) и приемном ($\Delta \varphi_{\text{пр.в}}$) тракте.

Описываемый сигнал характеризуется длиной волны λ и соответствующим волновым числом $k = \frac{2\pi}{\lambda}$. Временная форма сигнала задаётся видом комплексной огибающей $\dot{T}_{\text{пер.в}}(t)$.

Представление сигнала в виде вектора напряжённости электромагнитного поля имеет следующий вид [2]:

$$\dot{\vec{E}}_B(t, R) = \sqrt{60P_{A_{\text{пер.в}}} G_{A_{\text{пер.в}}}(\vec{R})} \frac{1}{r_2} e^{-jk r_2} e^{j\Delta\varphi_{\text{пер.в}}} \dot{T}_{\text{пер.в}}(t) \vec{e}_B. \quad (1)$$

Данное представление детально описывает распространение вертикально поляризованных сигналов в пространстве с учётом всех значимых факторов, влияющих на их амплитуду и фазу.

Проанализируем далее поведение отражённого от объекта сигнала с

вертикальной поляризацией. На него оказывают влияние эффективные поверхности рассеяния объекта на вертикальной ($\sigma_{\text{в.в}}$) и горизонтальной ($\sigma_{\text{в.г}}$) поляризации.

На основании соотношения (1) представим данный сигнал в следующем виде [3]:

$$\dot{\vec{E}}_{\text{в0}}(t, R) = \sqrt{60P_{A_{\text{пер.в}}} G_{A_{\text{пер.в}}}(\vec{R})} \frac{1}{r_2} e^{-jk r_2} e^{j\Delta\varphi_{\text{пер.в}}} \dot{T}_{\text{пер.в}}(t). \quad (2)$$

Приемный канал вертикальной поляризации описывается напряжением собственных шумов ($\dot{U}_{\text{ш.в}}(t)$), коэф-

фициентом усиления ($K_{\text{пр.в}}$). Напряжение на выходе канала можно описать соотношением

$$\begin{aligned} \dot{U}_{\text{в.в}}(t, R) \approx K_{\text{пр.в}} \sqrt{G_{A_{\text{пр.в}}}(\vec{R}) G_{A_{\text{пер.в}}}(\vec{R}) P_{A_{\text{пер.в}}}} \frac{1}{r_2 r_2} e^{-jk(r_2+r_2)} e^{j\Delta\varphi_{\text{пер.в}}} e^{j\Delta\varphi_{\text{пр.в}}} \times \\ \times \dot{T}_{\text{пер.в}}(t) \sigma_{\text{в.в}} + \dot{U}_{\text{ш.в}}(t). \end{aligned} \quad (3)$$

Приемный канал горизонтальной поляризации описывается напряжением собственных шумов ($\dot{U}_{\text{ш.г}}(t)$), коэффициентом усиления ($K_{\text{пр.г}}$).

Напряжение на выходе канала представлено аналогично соотношению (3):

$$\begin{aligned} \dot{U}_{\text{в.г}}(t, R) \approx K_{\text{пр.г}} \sqrt{G_{A_{\text{пр.г}}}(\vec{R}) G_{A_{\text{пер.в}}}(\vec{R}) P_{A_{\text{пер.в}}}} \frac{1}{r_1 r_2} e^{-jk(r_1+r_2)} e^{j\Delta\varphi_{\text{пер.в}}} e^{j\Delta\varphi_{\text{пр.г}}} \times \\ \times \dot{T}_{\text{пер.в}}(t) \sigma_{\text{в.г}} + \dot{U}_{\text{ш.г}}(t). \end{aligned} \quad (4)$$

Рассмотрим сигнал с горизонтальной поляризацией, характеризующийся орт-вектором поляризации ($\vec{e}_g$). Данный сигнал излучается антенной передающего устройства с мощностью ($P_{A_{\text{пер.г}}}$), расположенной на расстоянии r_1 от объекта. Максимальный коэффициент усиления антенны в направлении на объект составляет на передачу ($G_{A_{\text{пер.г}}}(\vec{R})$) и на прием ($G_{A_{\text{пр.г}}}(\vec{R})$). Принимаем во

внимание набег фазы в трактах передающего ($\Delta\varphi_{\text{пер.г}}$) и приемного ($\Delta\varphi_{\text{пр.г}}$) устройств.

Данный сигнал описывается длиной волны λ и, соответственно, волновым числом $k = \frac{2\pi}{\lambda}$. Временная форма сигнала задаётся видом комплексной огибающей $\dot{T}_{\text{пер.г}}(t)$.

Излученный сигнал можно представить в следующем виде [4]:

$$\vec{E}_r(t, R) = \sqrt{60P_{A_{\text{пер.г}}} G_{A_{\text{пер.г}}}(\vec{R})} \frac{1}{r_1} e^{-jkr_1} e^{j\Delta\varphi_{\text{пер.г}}} \dot{T}_{\text{пер.г}}(t) \vec{e}_r \cdot \dot{T}_{\text{пер.г}}(t) \sigma_{г.в} + \dot{U}_{ш.в}(t). \quad (5)$$

Рассмотрим подробно поведение сигнала горизонтальной поляризации, отражённого от объекта. Основное влияние на этот сигнал оказывают величины эффективных площадей рассеяния (ЭПР) объекта на соответствующих

поляризациях (вертикальной ($\sigma_{г.в}$) и горизонтальной ($\sigma_{г.г}$)).

На основании соотношения (5) представим данный сигнал в следующем виде [4]

$$\vec{E}_{г0}(t, R) = \sqrt{60P_{A_{\text{пер.г}}} G_{A_{\text{пер.г}}}(\vec{R})} \frac{1}{r_1} e^{-jkr_1} e^{j\Delta\varphi_{\text{пер.г}}} \dot{T}_{\text{пер.г}}(t) \begin{pmatrix} \sigma_{г.в} \\ \sigma_{г.г} \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Приёмный канал вертикальной поляризации характеризуется собственным уровнем шума, выраженным напряжением собственных шумов ($\dot{U}_{ш.в}(t)$), и

коэффициентом усиления приёмного тракта ($K_{\text{пр.в}}$). Напряжение на выходе канала можно описать соотношением

$$\dot{U}_{г.в}(t, R) \approx K_{\text{пр.в}} \sqrt{G_{A_{\text{пр.в}}}(\vec{R}) G_{A_{\text{пер.г}}}(\vec{R}) P_{A_{\text{пер.г}}}} \frac{1}{r_1 r_2} e^{-jk(r_1+r_2)} e^{j\Delta\varphi_{\text{пер.г}}} e^{j\Delta\varphi_{\text{пр.в}}} \times \\ \times \dot{T}_{\text{пер.г}}(t) \sigma_{г.в} + \dot{U}_{ш.в}(t). \quad (7)$$

Приемный канал горизонтальной поляризации описывается напряжением собственных шумов ($\dot{U}_{ш.г}(t)$), коэффициентом усиления ($K_{\text{пр.г}}$). [2].

Напряжение на выходе канала представлено аналогично соотношению (7):

$$\dot{U}_{г.г}(t, R) \approx K_{\text{пр.г}} \sqrt{G_{A_{\text{пр.г}}}(\vec{R}) G_{A_{\text{пер.г}}}(\vec{R}) P_{A_{\text{пер.г}}}} \frac{1}{r_1 r_1} e^{-jk(r_1+r_1)} e^{j\Delta\varphi_{\text{пер.г}}} e^{j\Delta\varphi_{\text{пр.г}}} \times \\ \times \dot{T}_{\text{пер.г}}(t) \sigma_{г.г} + \dot{U}_{ш.г}(t). \quad (8)$$

Конструктивные особенности малобазовых поляризационные измерительных систем позволяют обосновать следующие ограничения и приближения.

Рассмотрим условие равенства дальностей распространения сигналов $R \approx r_1 \approx r_2$ [5]. Расстояние между двумя позициями В существенно меньше самих дистанций ($B \ll R$). Данное

предположение обосновано следующим образом: размеры дистанции в реальных условиях достигают нескольких километров, тогда как межпозиционная база составляет всего лишь десятки метров. Из-за столь значительной разницы указанных величин изменения фазы и амплитуды приходящего сигнала оказываются пренебрежимо малыми.

Влияние разности путей на величину амплитуды отраженного сигнала становится несущественным, что позволяет упростить выражение для расчета амплитудного множителя. Таким образом, справедливо соотношение [6]:

$$\frac{1}{R^2} \approx \frac{1}{r_1^2} \approx \frac{1}{r_2^2} \approx \frac{1}{r_1 r_2}. \quad (9)$$

В случае фазовых множителей имеет место принципиальное отличие.

$$k = \frac{2\pi}{\lambda},$$

где k – волновое число; λ – длина волны.

Начало фазы относительно фазового центра O (общий набег фаз) выражается формулой [7]

$$\Psi = 2 \cdot k \cdot R. \quad (10)$$

Используя формулу Эйлера, экспоненциальные множители $e^{-jk(r_1+r_2)}$ могут быть преобразованы:

$$\exp(-j2kR) = \exp(-j\Psi). \quad (11)$$

Это означает, что фаза сигнала изменяется пропорционально сумме расстояний от фазового центра до каждой точки траектории распространения:

Для расстояний получим следующие соотношения:

$$\begin{aligned} r_1 &= R - \Delta r_1, \quad \Delta r_1 = \rho_1 \sin \alpha, \\ r_2 &= R + \Delta r_2, \quad \Delta r_2 = \rho_2 \sin \alpha. \end{aligned} \quad (12)$$

Следовательно, принимая во внимание, что $\vec{\rho}_1, \vec{\rho}_2$ – радиус-векторы положения антенн относительно условного фазового центра O , соотношения (11) примут следующий вид [8]:

$$-k2r_1 = -k2R + k2\rho_1 \sin \alpha,$$

$$-k(r_1 + r_2) = -k2R - k \sin \alpha (\rho_2 - \rho_1), \quad (13)$$

В результате для антенн обеих позиций начало фазы для отраженных сигналов может быть выражено как:

$$\Psi_{\text{гг}} = -k \cdot 2\rho_1 \sin \alpha, \quad (14)$$

$$\Psi_{\text{гв}} = -k \cdot \sin \alpha \cdot (\rho_2 - \rho_1), \quad (15)$$

$$\Psi_{\text{вг}} = k \cdot \sin \alpha \cdot (\rho_2 - \rho_1), \quad (16)$$

$$\Psi_{\text{вв}} = k \cdot 2\rho_2 \sin \alpha. \quad (17)$$

В выражениях (1–8) присутствуют фазовые множители: $\Delta\varphi_{\text{пер.г}}$, $\Delta\varphi_{\text{пер.в}}$, $\Delta\varphi_{\text{пр.г}}$, $\Delta\varphi_{\text{пр.в}}$, определяющие начальную фазу сигналов в передающих и приёмных каналах системы. Рассмотрение этих величин варьируется в зависимости от используемой схемы синхронизации между элементами системы.

Например, в случае использования единого задающего генератора, гарантирующего высокую степень синхронизации между всеми элементами системы, данные фазовые различия становятся незначительными и могут быть игнорированы. Такой подход широко применяется в современных измерительных и радиолокационных комплексах, где точное управление начальной фазой является критически важным фактором, позволяющим повысить качество и точность регистрации и обработки сигналов [9].

Исходя из вышесказанного можно ввести обозначения:

$$Z_{г.г} = K_{пр.г} \frac{1}{r_1^2} \sqrt{G_{A_{пр.г}}(\vec{R}) \cdot G_{A_{пер.г}}(\vec{R}) \cdot P_{A_{пер.г}}}, \quad (18)$$

$$Z_{г.в} = K_{пр.в} \frac{1}{r_1 r_2} \sqrt{G_{A_{пр.в}}(\vec{R}) \cdot G_{A_{пер.г}}(\vec{R}) \cdot P_{A_{пер.г}}}, \quad (19)$$

$$Z_{в.г} = K_{пр.г} \frac{1}{r_1 r_2} \sqrt{G_{A_{пр.г}}(\vec{R}) \cdot G_{A_{пер.в}}(\vec{R}) \cdot P_{A_{пер.в}}}, \quad (20)$$

$$Z_{в.в} = K_{пр.в} \frac{1}{r_2^2} \sqrt{G_{A_{пр.в}}(\vec{R}) \cdot G_{A_{пер.в}}(\vec{R}) \cdot P_{A_{пер.в}}}. \quad (21)$$

Следует принять во внимание, что приемная и передающая антенны совмещены, т. е. на обеих позициях используются по одной антенне. Таким образом, для коэффициента усиления антенн можно получить соотношения [10]:

$$\begin{aligned} G_{A_г} &= G_{A_{пр.г}} = G_{A_{пер.г}}, \\ G_{A_в} &= G_{A_{пр.в}} = G_{A_{пер.в}}. \end{aligned} \quad (22)$$

Антенны первой и второй позиций имеют комплексные нормированные диаграммы направленности первой $F_1(Q)$ и $F_2(Q)$ соответственно. Данные значения можно подставить в (22), тогда получим следующие соотношения [11]:

$$G_{A_г} = G_{\max A_г} \cdot |F_1(Q)|^2,$$

$$G_{A_в} = G_{\max A_в} \cdot |F_2(Q)|^2. \quad (23)$$

В этом случае соотношения (18–21) примут вид:

$$Z_{г.г} = K_{пр.г} \frac{1}{R^2} \sqrt{G_{A_г}^2(\vec{R}) \cdot P_{A_{пер.г}}},$$

$$Z_{г.в} = K_{пр.в} \frac{1}{R^2} \sqrt{G_{A_в}(\vec{R}) \cdot G_{A_г}(\vec{R}) \cdot P_{A_{пер.г}}}. \quad (24)$$

$$Z_{в.в} = K_{пр.в} \frac{1}{R^2} \sqrt{G_{A_в}^2(\vec{R}) \cdot P_{A_{пер.в}}},$$

$$Z_{в.г} = K_{пр.г} \frac{1}{R^2} \sqrt{G_{A_г}(\vec{R}) \cdot G_{A_г}(\vec{R}) \cdot P_{A_{пер.в}}}. \quad (25)$$

Принимая во внимание соотношения (22–25), напряжения на выходе приемных каналов можно представить в следующем виде:

$$\dot{U}_{г.г}(t, R) = Z_{г.г} \exp(-j\Psi_{г.г}) \dot{T}_{пер.г}(t) \sigma_{г.г} + \dot{U}_{ш.г}(t), \quad (26)$$

$$\dot{U}_{г.в}(t, R) = Z_{г.в} \exp(-j\Psi_{г.в}) \dot{T}_{пер.г}(t) \sigma_{г.в} + \dot{U}_{ш.в}(t), \quad (27)$$

$$\dot{U}_{в.г}(t, R) = Z_{в.г} \exp(-j\Psi_{в.г}) \dot{T}_{пер.в}(t) \sigma_{в.г} + \dot{U}_{ш.г}(t), \quad (28)$$

$$\dot{U}_{в.в}(t, R) = Z_{в.в} \exp(-j\Psi_{в.в}) \dot{T}_{пер.в}(t) \sigma_{в.в} + \dot{U}_{ш.в}(t). \quad (29)$$

Для обеспечения правильного функционирования процесса передачи и приёма сигналов малобазовой поляризационной измерительной системы

комплексные множители, определяющие форму модулированного сигнала [12], должны соответствовать следующим требованиям:

$$\dot{T}_{\text{пер.в}}(t) = \dot{T}_{\text{пер.г}}(t) = \dot{T}(t),$$

$$\dot{T}(t) \cdot \dot{T}^*(t - \tau) = \begin{cases} 1 & \text{при } \tau = 0, \\ \ll 1 & \text{при } \tau \neq 0, \end{cases} \quad (30)$$

т. е. выражения (26–30) корректны [13] при $\tau = 0$.

Результаты и их обсуждение

В работе получены соотношения (26–29), устанавливающие связь между напряжением на выходе приёмных каналов малобазовой поляризационной измерительной системы и физическими процессами, происходящими при передаче и приёме сигналов.

1. Независимость амплитуды от структуры системы. Амплитуда отражённых сигналов практически не зависит от геометрии размещения элементов МПИС [14]. Это обусловлено значительным различием масштабов: расстояния в системе измеряются километрами, в то время как база системы B ограничена метрами ($B \ll R$). Разница между путями прохождения волн Δr_1 и Δr_2 незначительна относительно общего пути R , вследствие чего её влиянием на амплитуду можно пренебречь [14].

2. Определение энергетической составляющей сигнала. Значительная роль отводится эффективным поверхностям рассеивания (величины $\sigma_{\text{в.в.}}$, $\sigma_{\text{в.г.}}$, $\sigma_{\text{г.в.}}$, $\sigma_{\text{г.г.}}$) объекта на различных поляризациях, которые характеризуют взаимодействие зондирующих сигналов с объектом. Данные параметры играют ключевую роль в определении суммарной энергии принятого сигнала [15].

3. Фазовая характеристика сигналов. Фаза принимаемого сигнала определяется геометрической конфигурацией системы и положением целей относительно источников излучения. Фазы также зависят от угла наклона диаграммы направленности антенн (α) и отклонением направления прихода сигнала от нормального положения. Фазовые сдвиги вызваны разницей путей распространения сигнала и влияют на общую картину обработки сигнала. Численные значения фазовых характеристик принимаемых сигналов определяются выражениями (14–17) при условии, что длина волны излучаемого сигнала обратно пропорциональна сдвигу начальных фаз принимаемых сигналов [16].

4. Технические характеристики аппаратуры и энергия сигналов. Технические показатели оборудования обеих позиций малобазовой поляризационной измерительной системы оказывают значительное влияние на энергию принимаемых сигналов [17]. В формировании итогового уровня энергии сигнального отклика непосредственно участвуют коэффициенты усиления антенн и приёмных трактов, уровень собственных шумов приёмных устройств и мощность передаваемых сигналов [18].

5. Обобщённая методика определения фаз. Разработанная методика позволяет выбрать произвольную точку в качестве центра координат малой базы поляризационной измерительной системы [19]. Эта точка может находиться внутри зоны покрытия базы B , включая даже

положение центров антенн отдельных позиций. Подобный подход расширяет гибкость системы и улучшает точность вычисления фазовых характеристик, обеспечивая универсальность метода независимо от конкретной физической реализации антенн и взаимного расположения компонентов системы [20].

Выводы

В научной статье предложена методика расчета фаз фазового центра малобазовой поляризационной измерительной системы, которая позволяет осуществлять внутреннюю задачу теории антенных систем.

Список литературы

1. Конаныхин А. Ю., Конаныхина Т. Н., Панищев В. С. Методы улучшения выделенной области изображения при быстрой обработке символьной информации // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2021. Т. 11, № 4. С. 106–119.
2. Маджд А., Казаков Л. Н., Силантьев А. Б. Использование радиолокационных сигналов с ортогональными поляризациями в задаче обнаружения находящихся за преградой биологических объектов // T-Comm. 2022. № 10. С. 19–27.
3. Методологические основы обнаружения малоразмерных беспилотных летательных аппаратов на основе комплексной субполосной обработки сверхкороткоимпульсных радиолокационных и оптических сигналов: монография / И. И. Олейник, А. А. Черноморец, Д. С. Коптев [и др.]; под общей редакцией В. Г. Андропова; Минобрнауки России, Юго-Западный государственный университет. Курск: ЮЗГУ, 2021. 203 с.
4. Олейник И. И. Представление сигналов при обработке информации в малобазовой поляризационной измерительной системе // Экономика. Информатика. 2020. № 47(3). С. 422–431.
5. Довбня В. Г., Коптев Д. С., Бабанин И. Г. Оценка потенциальной помехоустойчивости приёма цифровых сигналов, используемых в современных и перспективных системах радиорелейной и спутниковой связи // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2020. Т. 10, № 1. С. 21–35.
6. Мухин И. Е., Хмелевская А. В., Бабанин И. Г. Методологические основы синтеза систем обеспечения электромагнитного доступа средствами радиомониторинга современных систем телекоммуникаций: монография / Юго-Западный государственный университет. Курск, 2016. 316 с.
7. Метод и алгоритм автономного планирования траектории полета беспилотного летательного аппарата при мониторинге пожарной обстановки в целях раннего

обнаружения источника возгорания / Р. А. Томакова, С. А. Филист, А. Н. Брежнева [и др.] // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 13, № 1. С. 93–110.

8. Лобач В. Т., Потипак М. В. Измерение дальности медленно движущейся цели радиолокатором с высокой разрешающей способностью по дальности // Известия ЮФУ. Технические науки. 2014. № 11(160). С. 67–75.

9. The conceptual level of analysis and its place in the infological system of information and analytical support in the tasks of operational assessment of threats posed by unmanned aerial vehicles / I. G. Babanin, V. G. Andronov, D. S. Koptev, A. I. Nikolaenko, A.E. Sevriukov // 2021 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems, WECONF 2021 – Conference Proceedings. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021. P. 9470577. <https://doi.org/10.1109/WECONF51603.2021.9470577>

10. Бабанин И. Г., Мухин И. Е., Коптев Д. С. Методологические основы выбора параметров фильтров частотной селекции с учетом эквивалентных энергетических потерь в радиоприёмных устройствах высокоскоростных радиосистем передачи информации: монография / Юго-Западный государственный университет. Курск, 2020. 136 с.

11. Довбня В. Г., Коптев Д. С. Модифицированная математическая модель приемного тракта цифровых линий связи // Телекоммуникации. 2022. № 6. С. 16–23.

12. Оценка помехоустойчивости беспроводных цифровых систем связи при воздействии помех по побочным каналам приема / В. Г. Довбня, А. А. Гуламов, И. Г. Бабанин, Д. С. Коптев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2018. Т. 8, № 3(28). С. 35–40.

13. Оценка дальности передачи видеoinформации различного качества при мониторинге чрезвычайных ситуаций с беспилотного летательного аппарата / М. Ю. Алемпьев, Д. С. Коптев, В. Г. Довбня, Е. В. Скрипкина // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 13, № 2. С. 31–44.

14. Андронов В. Г., Чуев А. А., Юдин И. С. Методика определения отклонений беспилотных летательных аппаратов от заданной траектории по параллаксам изображений подстилающей поверхности // Известия Юго-Западного государственного университета. 2023. Т. 26, № 2. С. 122–141.

15. Оценка влияния воздействия импульсных помех на достоверность принимаемых данных в спутниковых телерадиовещательных системах DVB-S2 / В. Г. Довбня, И. Г. Бабанин, А. И. Николаенко, Н. Ю. Михайлова // Телекоммуникации. 2020. № 7. С. 24–27.

16. Determination of transmission range of high-quality video information when monitoring emergency situations, using unmanned aerial vehicle / D. S. Koptev, V. G. Dovbnya, M. Yu. Alempyev, A. S. Lazarev // Телекоммуникации. 2024. № 6. С. 12–25.

17. Koptev D. S., Floresmilo L. R. H. Principles of organization of information exchange in the complex to ensure search and rescue operations using aviation means // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Т. 17, № 12. С. 51–57.

18. Evaluation of the value of equivalent energy losses due to the quality of frequency synthesis functioning in digital communication systems with quasi-coherent reception of signals with quadrature amplitude keypad / V. G. Dovbnya, D. S. Koptev, L. R. Herman Floresmilo, G. I. Podkhaldin // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Т. 17, № 5. С. 58–63.

19. Evaluation of the influence of the value of the dynamic range of the radio receiver on the noise immunity of receiving signals with quadrature amplitude modulation / V. G. Dovbnya, D. S. Koptev, I. G. Babanin, A. A. Knyazev // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Т. 15, № 6. С. 65–69.

20. Олейник И. И. Представление сигналов при обработке информации в малобазовой поляризационной измерительной системе // Экономика. Информатика. 2020. № 47(3). С. 422–431.

References

1. Konanykhin A.Yu., Konanykhina T.N., Panishchev V.S. Methods of improving the selected image area with high-speed processing of symbolic information. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2021;11(4):106–119. (In Russ.)

2. Majd A., Kazakov L.N., Silantyev A.B. The use of radar signals with orthogonal polarizations in the task of detecting biological objects located behind an obstacle. *T-Comm*. 2022;(10):19–27. (In Russ.)

3. Oleinik I.I., Chernomorets A.A., Koptev D.S., et al. Methodological foundations for the detection of small-sized unmanned aerial vehicles based on complex subband processing of ultra-short-pulse radar and optical signals. Kursk: Yugo-Zapadnyi gosudarstvennyi universitet; 2021. 203 p. (In Russ.)

4. Oleinik I. I. Representation of signals during information processing in a low-frequency polarizing measuring system. *Ekonomika. Informatika = Economics. Computer Science*. 2020;(47):422–431. (In Russ.)

5. Dovbnya V.G., Koptev D.S., Babanin I.G. Assessment of the potential interference stability of receiving digital signals used in modern and promising radio relay and satellite

communication systems. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2020;10(1):21–35. (In Russ.)

6. Mukhin I.E., Khmelevskaya A.V., Babanin I.G. Methodological foundations of the synthesis of electromagnetic access systems by means of radio monitoring of modern telecommunications systems. Kursk: Yugo-Zapadnyi gosudarstvennyi universitet; 2016. 316 p. (In Russ.)

7. Tomakova R.A., Filist S.A., Brezhneva A.N., et. al. Method and algorithm of autonomous flight trajectory planning of an unmanned aerial vehicle when monitoring a fire situation in order to detect the source of ignition early. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2023;13(1):93–110. (In Russ.)

8. Lobach V.T., Potipak M.V. Measuring the range of a slow-moving target with a high-resolution range radar. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki = Izvestiya SFedU. Engineering sciences*. 2014;(11):67–75. (In Russ.)

9. Babanin I.G., Andronov V.G., Koptev D.S., Nikolaenko A.I., Sevriukov A.E. The conceptual level of analysis and its place in the infological system of information and analytical support in the tasks of operational assessment of threats posed by unmanned aerial vehicles. In: *2021 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems, WECONF 2021 – Conference Proceedings*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.; 2021. P. 9470577. <https://doi.org/10.1109/WECONF51603.2021.9470577>

10. Babanin I.G., Mukhin I.E., Koptev D.S. Methodological foundations for selecting the parameters of frequency selection filters, taking into account equivalent energy losses in radio receivers of high-speed radio information transmission systems. Kursk: Yugo-Zapadnyi gosudarstvennyi universitet; 2020. 136 p. (In Russ.)

11. Dovbnya V.G., Koptev D.S. A modified mathematical model of the receiving path of digital communication lines. *Telekommunikatsii = Telecommunications*. 2022;(6):16–23. (In Russ.)

12. Dovbnya V.G., Gulamov A.A., Babanin I.G., Koptev D.S. Evaluation of the noise immunity of wireless digital communication systems under the influence of interference via side reception channels. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2018;8(3):35–40. (In Russ.)

13. Alempyev M.Yu., Koptev D.S., Dovbnya V.G., Skripkina E.V. Evaluation of the transmission range of video information of various quality in emergency monitoring from an unmanned aerial vehicle. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2023;13(2):31–44. (In Russ.)

14. Andronov V.G., Chuev A.A., Yudin I.S. Methodology for determining deviations of unmanned aerial vehicles from a given trajectory by parallaxes of images of the underlying surface. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2023;26(2):122–141. (In Russ.)

15. Dovbnya V.G., Babanin I.G., Nikolaenko A.I., Mikhailova N.Y. Assessment of the impact of pulse interference on the reliability of received data in satellite TV and radio broadcasting systems DVB-S2. *Telekommunikatsii = Telecommunications*. 2020;(7):24–27. (In Russ.)

16. Koptev D.S., Dovbnya V.G., Alempyev M.Yu., Lazarev A.S. Determination of transmission range of high-quality video information when monitoring emergency situations, using unmanned aerial vehicle. *Telekommunikatsii = Telecommunications*. 2024;(6):12–25. (In Russ.)

17. Koptev D.S., Floresmilo L.R.H. Principles of organization of information ex-change in the complex to ensure search and rescue operations using aviation means. *T-Comm: Telekommunikatsii i transport = T-Comm: Telecommunications and transport*. 2023;17(12):51–57.

18. Dovbnya V.G., Koptev D.S., Herman Floresmilo L.R., Podkhaldin G.I. Evaluation of the value of equivalent energy losses due to the quality of frequency synthesis functioning in digital communication systems with quasi-coherent reception of signals with quadrature amplitude keypad. *T-Comm: Telekommunikatsii i transport = T-Comm: Telecommunications and transport*. 2023;17(5):58–63.

19. Dovbnya V.G., Koptev D.S., Babanin I.G., Knyazev A.A. Evaluation of the influence of the value of the dynamic range of the radio receiver on the noise immunity of receiving signals with quadrature amplitude modulation. *T-Comm: Telecommunications and transport*. 2021;15(6):65–69.

20. Oleinik I.I. Representation of signals during information processing in a low-base polarization measuring system. *Ekonomika. Informatika = Economics. Computer Science*. 2020;(47):422–431.

Информация об авторах / Information about the Authors

Мухин Иван Ефимович, доктор технических наук, старший научный сотрудник, заместитель генерального конструктора по инвестпроектам, АО «Авиаавтоматика» имени В. В. Тарасова», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: okb@aviaavtomatika.ru, ORCID: 0009-0005-1583-6550

Ivan E. Mukhin, Doctor of Sciences (Engineering), Senior Researcher, Deputy General Designer for Investment Projects, JSC "Aviaautomatics" named after V. V. Tarasov", Kursk, Russian Federation, e-mail: okb@aviaavtomatika.ru, ORCID: 0009-0005-1583-6550

Попов Александр Николаевич, генеральный директор АО «Авиаавтоматика» имени В. В. Тарасова», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: plant@aviaavtomatika.ru, ORCID: 0009-0004-4020-1082

Alexander N. Popov, General Director, JSC "Aviaautomatics" named after V. V. Tarasov", Kursk, Russian Federation, e-mail: plant@aviaavtomatika.ru, ORCID: 0009-0004-4020-1082

Хмелевская Алена Валентиновна, старший преподаватель кафедры космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: aquarel85@mail.ru, ORCID: 0000-0003-0656-1223

Alena V. Khmelevskaya, Senior Lecture of the Department of Space Instrumentation and Communication Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: aquarel85@mail.ru, ORCID: 0000-0003-0656-1223

Олейник Иван Иванович, заведующий кафедрой информационно-телекоммуникационных систем и технологий, Институт инженерных и цифровых технологий, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Российская Федерация, e-mail: oleinik_i@bsu.edu.ru, ORCID: 0009-0000-7742-0749

Ivan I. Oleynik, Head of the Department of Information and Telecommunication Systems and Technologies, Institute of Engineering and Digital Technologies, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russian Federation, e-mail: oleinik_i@bsu.edu.ru, ORCID: 0009-0000-7742-0749