

УДК 621.396.96

DOI: 10.26467/2079-0619-2019-22-1-83-92

ОБРАБОТКА ЭЛЛИПТИЧЕСКИ ПОЛЯРИЗОВАННОГО СИГНАЛА В РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЯХ С ЦИФРОВЫМ СИНТЕЗИРОВАНИЕМ АПЕРТУРЫ АНТЕННЫ

П.Е. КОРНЕЕВ¹

¹*Егорьевский технологический институт (филиал)
ФГБОУ «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»,
г. Егорьевск, Россия*

Обработка эллиптически поляризованного отраженного сигнала в системах дистанционного зондирования Земли позволяет получать дополнительные преимущества при решении задач распознавания наблюдаемых объектов на земле и под землей. Полный поляризационный прием, реализованный в радиолокационных станциях с цифровым синтезированием апертуры антенны, при дистанционном зондировании Земли повышает информативность таких радиолокаторов (детализируется радиолокационное изображение исследуемой поверхности, подчеркивается контрастность объектов, находящихся в зоне обзора, минимизируются различные негативные эффекты изображения). В статье рассматривается квадратурная обработка отраженного эллиптически поляризованного сигнала в радиолокационных станциях с цифровым синтезированием апертуры антенны в режиме бокового обзора земной (водной) поверхности. Обработка отраженного сигнала с использованием методов радиополяриметрии открывает новые возможности перед такими радиолокаторами при решении задач дистанционного зондирования поверхности и распознавания радиолокационных целей. Кроме того, радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны с обработкой эллиптически поляризованного сигнала имеют более высокую помехоустойчивость по сравнению с радиолокаторами, где обрабатывается линейно-поляризованный сигнал. В статье производится математическое моделирование в части демодуляции синфазной и квадратурной составляющих траекторного сигнала при изменении геометрических параметров эллипса поляризации. Полученные аналитические выражения позволяют оценить влияние геометрических параметров эллипса поляризации на обрабатываемый траекторный сигнал. Аналитически подтверждается, что угол эллиптичности оказывает влияние на энергетические характеристики, а угол ориентации эллипса поляризации вносит дополнительный фазовый сдвиг в характеристики обрабатываемого траекторного сигнала. Неучет этих нюансов при проектировании цифровых блоков и систем таких радиолокаторов может привести к потере всех преимуществ обработки эллиптически поляризованного сигнала. В статье приводится структурная схема поляризационной радиолокационной станции с цифровым синтезированием апертуры антенны.

Ключевые слова: радиолокационная станция с цифровым синтезированием апертуры антенны, радиополяриметрия, цифровая обработка сигналов, полный поляризационный прием.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время широкое практическое применение во всем мире получили радиолокационные станции с синтезированной апертурой антенны (РСА) как космического, так и самолетного базирования, относящиеся к радиолокационным средствам дистанционного зондирования Земли. К преимуществам РСА традиционно относят возможность получения радиолокационного изображения (РЛИ) земной поверхности и находящихся на ней объектов с высокой разрешающей способностью по дальности и азимуту в любое время дня и ночи при разнообразных метеоусловиях. Применение цифровых методов обработки сигналов расширяет преимущества таких радиолокаторов, которые называются радиолокационными станциями с цифровым синтезированием апертуры антенны (ЦРСА). При решении задач дистанционного зондирования поверхности и распознавания радиолокационных целей ЦРСА позволяет получать РЛИ в реальном масштабе времени с отображением актуальной информации на мониторе бортового радиолокатора для принятия незамедлительных решений [1, 11].

На сегодняшний день отмечается стремительно возрастающая роль подповерхностной радиолокации. Все более актуальными становятся задачи распознавания (классификации, различения) наблюдаемых объектов на земле и под землей для отнесения их к соответствующим классам и типам. Решение этих задач относит ЦРСА к мониторинговым радиоэлектронным комплексам. Можно выделить как сугубо военные функции мониторинговых систем (например, сбор необходимых данных для обнаружения замаскированных, укрытых военных целей; сбор данных для обнаружения и предотвращения военных террористических акций; обнаружение тайных оружейных складов, минных полей, массовых захоронений и т. д.), так и гражданские функции (такие как мониторинг лесных, сельскохозяйственных, рыболовных экосистем; проведение гидрологических наблюдений, оценка влажности почв, характеристик снежных покровов, айсбергов, ледников; отчетливое наблюдение на РЛИ водной поверхности, включая взволнованную поверхность моря, пленок загрязнения нефтепродуктами толщиной от нескольких микрон; построение ареалов подземных процессов, зон распределения и аккумуляирования подземных вод и т. д.) [2]. Указанные функции подповерхностного зондирования и распознавания объектов могут быть решены ЦРСА, если извлекать информацию об объекте наблюдения, заключенную в том числе в поляризационной структуре сигнала.

Поэтому использование в ЦРСА методов радиополяриметрии существенно расширяет область применения и функциональные возможности этих радиолокаторов.

В настоящее время в ЦРСА в основном используются линейно-поляризованные сигналы (вертикальная (ВП) и горизонтальная (ГП) поляризации). Эллиптически поляризованная волна в сравнении с линейно-поляризованной волной обладает рядом преимуществ, среди которых можно выделить высокую «проницаемость», изменение вектора вращения на противоположный при отражении от объектов. Использование этих преимуществ особенно важно при решении задач подповерхностной радиолокации. Кроме того, ЦРСА с обработкой эллиптически поляризованного сигнала имеет более высокую помехоустойчивость по сравнению с ЦРСА, где обрабатывается линейно-поляризованный сигнал.

Цель работы – произвести квадратурную обработку отраженного эллиптически поляризованного сигнала в ЦРСА в режиме бокового обзора земной (водной) поверхности. Построить математическую модель блока квадратурной обработки ЦРСА, учитывающей геометрические параметры эллипса поляризации при полном поляризационном приеме. Построить структурную схему поляризационной ЦРСА.

ПОЛЯРИЗАЦИОННАЯ ЦРСА

Назовем ЦРСА, которая производит полный поляризационный прием и последующую цифровую обработку принятого эллиптически поляризованного сигнала для получения РЛИ земной поверхности и находящихся на ней объектов, поляризационной ЦРСА.

Полагаем, что ЦРСА излучает узкополосный эллиптически поляризованный сигнал с несущей частотой ω_0 . Детальное аналитическое описание такого сигнала приводится в работе [7].

Отраженный i -й точечной целью эллиптически поляризованный действительный радиосигнал $x_i(t)$, поступающий по мере движения летательного аппарата (ЛА) на вход приемника ЦРСА, имеет вид

$$x_i(t) = G(t) \cdot [b_+ \cos(\omega_0(t - \tau_i) + \theta_+) + b_- \cos(\omega_0(t - \tau_i) - \theta_-)], \quad (1)$$

где $G(t)$ – нормированная функция, характеризующая модуляцию зондирующего и отраженного от цели сигналов при их передаче и приеме диаграммой направленности реальной антенны, b_+, θ_+ – амплитуда и начальная фаза левосторонне поляризованного колебания, b_-, θ_- – амплиту-

да и начальная фаза правосторонне поляризованного колебания отраженного сигнала, τ_i – задержка радиосигнала.

Получим аналитическое выражение для отраженного сигнала $x_i(t)$, в котором явно были бы представлены геометрические параметры эллипса поляризации.

С учетом следующих выражений [7]

$$\begin{aligned} b_+ &= \frac{\sqrt{2}}{2} A \cdot \cos\left(\frac{\pi}{4} - \varepsilon\right), & \theta_+ &= \beta + \varphi_0; \\ b_- &= \frac{\sqrt{2}}{2} A \cdot \sin\left(\frac{\pi}{4} - \varepsilon\right), & \theta_- &= \beta - \varphi_0, \end{aligned} \quad (2)$$

сигнал $x_i(t)$ примет вид

$$x_i(t) = G(t) \cdot \left[\frac{\sqrt{2}}{2} A \cdot \cos\left(\frac{\pi}{4} - \varepsilon\right) \cdot \cos(\omega_0(t - \tau_i) + \beta + \varphi_0) + \frac{\sqrt{2}}{2} A \cdot \sin\left(\frac{\pi}{4} - \varepsilon\right) \cdot \cos(\omega_0(t - \tau_i) - \beta + \varphi_0) \right], \quad (3)$$

где A – амплитуда отраженного эллиптически поляризованного сигнала, φ_0 – начальная фаза, ε – угол эллиптичности и β – угол ориентации эллипса поляризации. Начальная фаза, угол эллиптичности, угол ориентации эллипса поляризации изменяются в следующих пределах $-\pi < \varphi_0 \leq \pi$, $-\pi/4 \leq \varepsilon \leq \pi/4$, $0 \leq \beta \leq \pi$.

Задержка радиосигнала τ_i связана с изменением расстояния между ЛА и целью соотношением

$$\tau_i = \frac{2 \cdot r_i(t)}{c}, \quad (4)$$

где $r_i(t)$ – текущее расстояние между ЛА и целью, c – скорость распространения радиоволны. Из [1, 11] известно, что $r_i(t)$ имеет квадратичную зависимость от времени t :

$$r_i(t) \approx r_0 + \frac{V_n^2 \cdot t^2}{2r_0}, \quad (5)$$

где r_0 – расстояние между ЛА и целью при $t = 0$, V_n – путевая скорость ЛА.

Тогда итоговое выражение для отраженного i -й точечной целью эллиптически поляризованного сигнала $x_i(t)$ будет иметь вид

$$\begin{aligned} x_i(t) = G(t) \cdot \left[\frac{\sqrt{2}}{2} A \cdot \cos\left(\frac{\pi}{4} - \varepsilon\right) \cdot \cos\left(\omega_0 t - \frac{2\pi V_n^2 t^2}{\lambda r_0} - \frac{4\pi r_0}{\lambda} + \beta + \varphi_0\right) + \right. \\ \left. + \frac{\sqrt{2}}{2} A \cdot \sin\left(\frac{\pi}{4} - \varepsilon\right) \cdot \cos\left(\omega_0 t - \frac{2\pi V_n^2 t^2}{\lambda r_0} - \frac{4\pi r_0}{\lambda} - \beta + \varphi_0\right) \right]. \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь $\lambda = 2\pi c/\omega_0$ – длина волны ЦРСА.

Произведем квадратурную обработку эллиптически поляризованного сигнала (6), для чего выделим синфазную и квадратурную составляющие сигнала и сформируем комплексный аналитический сигнал $\dot{x}(t)$.

Введем следующие обозначения:

$$\begin{aligned}\varphi'(t) &= -\frac{2\pi V_n^2 t^2}{\lambda r_0} - \frac{4\pi r_0}{\lambda} + \beta + \varphi_0, & \varphi''(t) &= -\frac{2\pi V_n^2 t^2}{\lambda r_0} - \frac{4\pi r_0}{\lambda} - \beta + \varphi_0, \\ A'(t) &= G(t) \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} A \cdot \cos\left(\frac{\pi}{4} - \varepsilon\right), & A''(t) &= G(t) \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} A \cdot \sin\left(\frac{\pi}{4} - \varepsilon\right).\end{aligned}\quad (7)$$

Преобразуем (6) с учетом (7) в следующий вид:

$$\begin{aligned}x_i(t) &= [A'(t) \cdot \cos(\varphi'(t)) + A''(t) \cdot \cos(\varphi''(t))] \cdot \cos(\omega_0 t) - \\ &- [A'(t) \cdot \sin(\varphi'(t)) + A''(t) \cdot \sin(\varphi''(t))] \cdot \sin(\omega_0 t).\end{aligned}\quad (8)$$

Тогда синфазная $x_c(t)$ и квадратурная $x_s(t)$ составляющие эллиптически поляризованного сигнала будут определяться следующими выражениями:

$$\begin{aligned}x_c(t) &= A'(t) \cdot \cos(\varphi'(t)) + A''(t) \cdot \cos(\varphi''(t)), \\ x_s(t) &= A'(t) \cdot \sin(\varphi'(t)) + A''(t) \cdot \sin(\varphi''(t)).\end{aligned}\quad (9)$$

Комплексный аналитический сигнал (или другое название комплексная огибающая, траекторный сигнал) будет иметь вид

$$\dot{x}_i(t) = [A'(t) \cdot \cos(\varphi'(t)) + A''(t) \cdot \cos(\varphi''(t))] + j[A'(t) \cdot \sin(\varphi'(t)) + A''(t) \cdot \sin(\varphi''(t))].\quad (10)$$

Будем считать, что принятый эллиптически поляризованный сигнал $\dot{\xi}_i(t)$, который будет подвергнут обработке в блоках поляризационной ЦРСА, представляет собой аддитивную смесь отраженного сигнала $\dot{x}_i(t)$ и шума $\dot{n}(t)$:

$$\dot{\xi}_i(t) = \dot{x}_i(t) + \dot{n}(t).\quad (11)$$

Считаем, что здесь $\dot{n}(t)$ – комплексный гауссовский белый шум [1], действительная и мнимая составляющие которого распределены по нормальному закону, имеют нулевое математическое ожидание и равномерную спектральную плотность на всей частотной оси.

В общем виде процесс синтезирования апертуры антенны при полном поляризационном приеме может быть записан интегралом свертки:

$$J(\eta) = \left| \int_{-T/2}^{T/2} \dot{\xi}(\eta - t) \cdot \dot{h}(t) dt \right|,\quad (12)$$

где $J(\eta)$ – сигнал РЛИ, $\eta = \chi/V_n$ – временной сдвиг, связанный с пространственной координатой χ РЛИ, T – время синтезирования апертуры антенны, $\dot{\xi}(t)$ – принятый сигнал после от-

ражения от участка местности в полосе дальности, $\dot{h}(t)$ – комплексная опорная функция, которая в нашем случае имеет вид

$$\begin{aligned} \dot{h}(t) &= h_c(t) + jh_s(t), \\ h_c(t) &= H(t) \cdot 2 \cos\left(\frac{2\pi \cdot V_n^2 t^2}{\lambda \cdot r_0}\right), \quad h_s(t) = H(t) \cdot 2 \sin\left(\frac{2\pi \cdot V_n^2 t^2}{\lambda \cdot r_0}\right), \end{aligned} \quad (13)$$

где $H(t)$ – действительная весовая (оконая) функция, вид которой зависит от выбранного подхода к синтезу системы обработки, $h_c(t)$, $h_s(t)$ – действительная и мнимая составляющие комплексной опорной функции.

На рис. 1–3 изображены синфазная $x_c(t)$ и квадратурная $x_s(t)$ составляющие траекторного эллиптически поляризованного сигнала при разных значениях геометрических параметров эллипса поляризации (угла эллиптичности ε , угла ориентации эллипса поляризации β и начальной фазы ϕ_0) в сравнении с действительной и мнимой составляющими опорной функции $h_c(t)$ и $h_s(t)$. В ходе математического моделирования были использованы следующие параметры: путевая скорость ЛА $V_n = 300$ м/с, $r_0 = 5000$ м, длина волны ЦРСА $\lambda = 0,03$ м. На рис. 1 представлен траекторный сигнал при изменении угла эллиптичности ε при фиксированных параметрах $\beta = \pi/3$ и $\phi_0 = \pi/3$: $x_{c1}(t), x_{s1}(t)$ при $\varepsilon = -\pi/4$; $x_{c2}(t), x_{s2}(t)$ при $\varepsilon = 0$; $x_{c3}(t), x_{s3}(t)$ при $\varepsilon = \pi/4$.

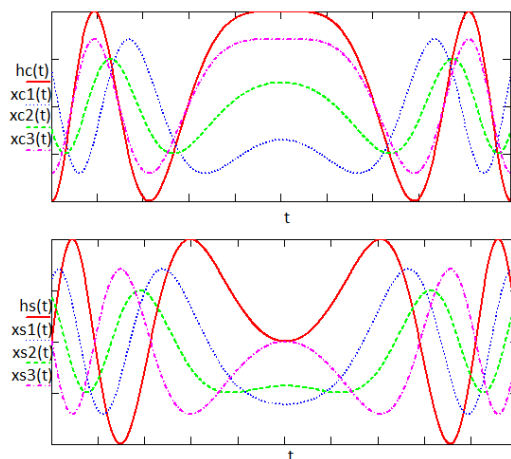


Рис. 1. Опорная функция и траекторный сигнал при изменении угла эллиптичности
Fig. 1. The reference function and the trajectory signal when changing the ellipticity angle

На рис. 2 представлен траекторный сигнал при изменении угла ориентации эллипса поляризации β при фиксированных параметрах $\varepsilon = \pi/6$ и $\phi_0 = \pi/3$: $x_{c1}(t), x_{s1}(t)$ при $\beta = 0$; $x_{c2}(t), x_{s2}(t)$ при $\beta = \pi/2$; $x_{c3}(t), x_{s3}(t)$ при $\beta = \pi$.

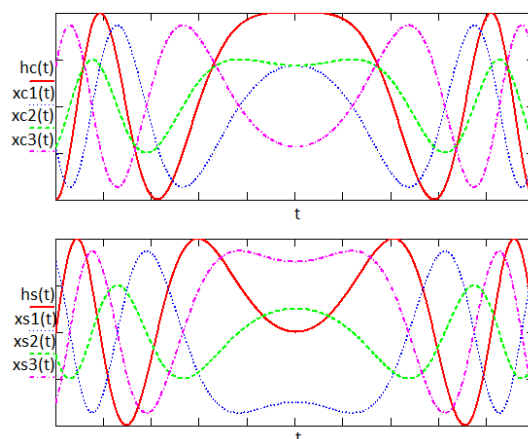


Рис. 2. Опорная функция и траекторный сигнал при изменении угла ориентации эллипса поляризации
Fig. 2. The reference function and the trajectory signal when changing the orientation angle of the polarization ellipse

На рис. 3 представлен траекторный сигнал при изменении начальной фазы φ_0 при фиксированных параметрах $\varepsilon = \pi/6$ и $\beta = \pi/3$: $x_c1(t), x_s1(t)$ при $\varphi_0 = -\pi/2$; $x_c2(t), x_s2(t)$ при $\varphi_0 = 0$; $x_c3(t), x_s3(t)$ при $\varphi_0 = \pi$.

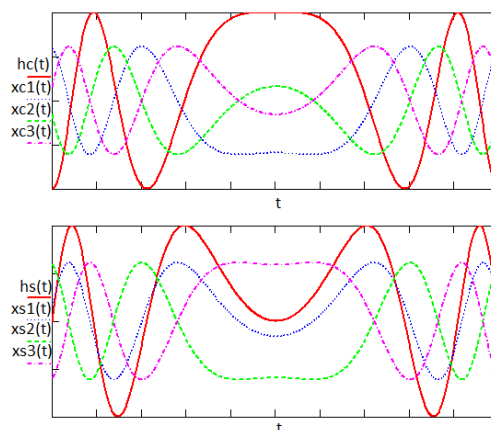


Рис. 3. Опорная функция и траекторный сигнал при изменении начальной фазы
Fig. 3. The reference function and the trajectory signal when changing the initial phase

В области цифровых сигналов выражению (12) соответствует выражение для линейной дискретной свертки цифрового принятого сигнала и опорной функции. То есть для каждого m -го канала по дальности выражение для цифрового РЛИ будет иметь вид

$$J(m, k) = \left| \sum_{q=0}^{N-1} \dot{\xi}(m, k-q) \cdot \dot{h}(m, q) \right|, \quad (14)$$

где N – количество обрабатываемых отсчетов сигнала по азимутальному каналу, $\dot{\xi}(m, q)$ – цифровой принятый сигнал, $\dot{h}(m, q)$ – цифровой сигнал опорной функции.

Процесс цифровой обработки эллиптически поляризованного сигнала заключается в следующем (в литературе [1] этот способ называется способом «быстрой свертки»). Принятый и переведенный в цифровую форму сигнал $\dot{\xi}(m, q)$ и цифровой сигнал опорной функции

$\dot{h}(m, q)$ подвергаются дискретному преобразованию Фурье (ДПФ). Полученные таким способом дискретные спектры перемножаются друг с другом и результат перемножения подвергается обратному дискретному преобразованию Фурье. Это отображается формулой

$$J(m, k_1) = \left| \Phi^{-1} \left\{ \Phi \left\{ \dot{\xi}(m, k) \right\} \cdot \Phi \left\{ \dot{h}(m, k) \right\} \right\} \right|, \quad (15)$$

где $\Phi \{ \cdot \}$ и $\Phi^{-1} \{ \cdot \}$ – символы прямого и обратного ДПФ соответственно.

Нужно отметить, что полученное выражение $J(m, k_1)$ соответствует круговой свертке сигналов $\dot{\xi}(m, k)$ и $\dot{h}(m, k)$ и будет равно выражению линейной дискретной свертки (14) (т. е. истинному РЛИ) только при определенных условиях, которые подробно описаны в [1].

На рис. 4. представлена структурная схема поляризационной ЦРСА.

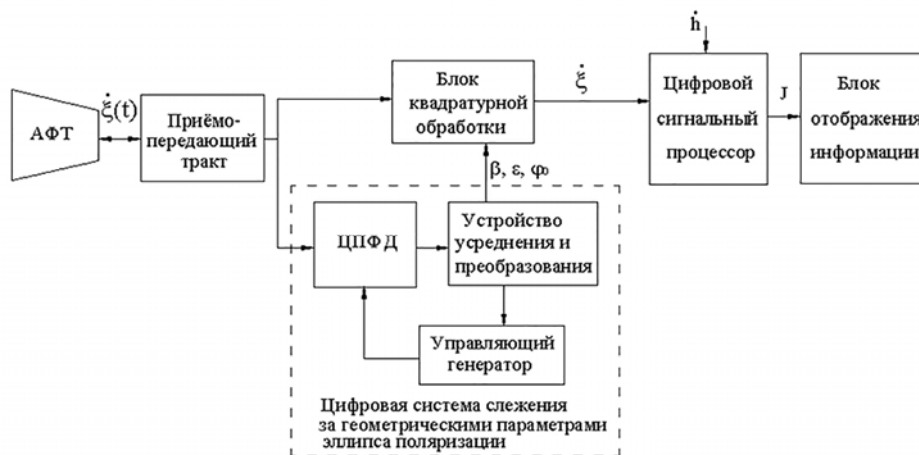


Рис. 4. Структурная схема поляризационной ЦРСА

Fig. 4. The structural scheme of the polarized digital synthesis of the antenna aperture

Принятый антенно-фидерным трактом (АФТ) сигнал $\dot{\xi}(t)$ посредством приемопередающего тракта поступает в блок квадратурной обработки сигнала и цифровой поляризационно-фазовый детектор (ЦПФД). На рис. 4. ЦПФД, устройство усреднения и преобразования, управляющий генератор представляют собой цифровую систему слежения за геометрическими параметрами эллипса поляризации, основное предназначение которой – получение цифровых кодов угла эллиптичности ϵ , угла ориентации эллипса поляризации β и начальной фазы принятого сигнала φ_0 и передача этих значений в блок квадратурной обработки. Функционирование цифровой системы слежения за геометрическими параметрами эллипса поляризации детально описано в работе [6] и выходит за рамки данной статьи. В блоке квадратурной обработки сигнала происходит демодуляция синфазной и квадратурной составляющих сигнала согласно выражению (9) и перевод этих значений в цифровой код. Цифровые значения комплексной огибающей сигнала поступают в цифровой сигнальный процессор, в который также поступают цифровые коды действительной и мнимой составляющих опорной функции. В цифровом сигнальном процессоре согласно выражению (15), с использованием условий преобразования круговой свертки в линейную дискретную свертку, производя вычисления алгоритмами быстрого преобразования Фурье (БПФ), получается цифровой сигнал истинного РЛИ. Воспроизведение информации о РЛИ в реальном масштабе времени производится в блоке отображения информации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

У ЦРСА, учитывающей при обработке поляризационную структуру сигнала, существенно расширяются области применения и возрастают функциональные возможности при решении задач распознавания, классификации, различения объектов на земле и под землей. При осуществлении полного поляризационного приема в ЦРСА детализируется РЛИ исследуемой поверхности, подчеркивается контрастность объектов, находящихся в зоне обзора, устраняются (или минимизируются) различные негативные эффекты изображения, например, спекл-эффекты.

В статье аналитически показано, что при различных значениях геометрических параметров эллипса поляризации и начальной фазы отраженной волны особым образом изменяется траекторный сигнал (угол эллиптичности влияет на энергетические характеристики, а угол ориентации эллипса поляризации вносит дополнительный фазовый сдвиг). При не учете этих особенностей можно потерять все преимущества обработки эллиптически поляризованного сигнала.

Описанная в статье квадратурная обработка отраженного сигнала, проведенное математическое моделирование, представленная структурная схема поляризационной ЦРСА позволят разработчикам радиолокационной техники использовать эти данные при проектировании блоков и систем обработки эллиптически поляризованного сигнала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Антипов В.Н.** Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны / В.Т. Горяинов, А.В. Кулин, В.В. Мансуров, А.Г. Охонский, Н.А. Сазонов, М.П. Титов, Е.Ф. Толстов, А.В. Шаповалов. М.: Радио и Связь, 1988. 304 с.
2. **Козлов А.И., Логвин А.И., Сарычев В.А.** Поляризация радиоволн. Кн. 1. Поляризационная структура радиолокационных сигналов. М.: Радиотехника, 2005. 704 с.
3. **Козлов А.И., Логвин А.И., Сарычев В.А.** Поляризация радиоволн. Кн. 3. Радиополяриметрия сложных по структуре сигналов. М.: Радиотехника, 2008. 688 с.
4. **Коростелев А.А.** Пространственно-временная теория радиосистем: учебное пособие. М.: Радио и связь, 1987. 320 с.
5. **Оппенгейм А., Шафер Р.** Цифровая обработка сигналов. 3-е изд., испр. М.: Техносфера, 2012. 1048 с.
6. **Корнеев П.Е.** Цифровые системы слежения и обработки поляризованного сигнала: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.04. М., 2003. 135 с.
7. **Корнеев П.Е.** Дискретизация поляризованного сигнала // Научный Вестник МГТУ ГА. 2018. Т. 21, № 3. С. 169–177.
8. **Гадзиковский В.И.** Цифровая обработка сигналов. М.: СОЛОН-Пресс, 2013. 769 с.
9. **Вагапов Р.Х.** Дистанционные методы исследования морских льдов / В.П. Гаврило, А.И. Козлов, Г.А. Лебедев, А.И. Логвин. СПб.: Гидрометеиздат, 1993. 341 с.
10. **Сергиенко А.Б.** Цифровая обработка сигналов: учебное пособие. 3-е изд. СПб.: БХВ-Петербург, 2011. 768 с.
11. **Антипов В.Н.** Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны. М.: Книга по Требованию, 2013. 304 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Корнеев Павел Евгеньевич, кандидат технических наук, доцент кафедры технологий автоматизированного производства, ЕТИ ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», paul-korn@yandex.ru.

THE PROCESSING OF THE ELLIPTICALLY POLARIZED SIGNAL IN RADAR STATIONS WITH DIGITAL SYNTHESIS OF THE ANTENNA APERTURE

Pavel E. Korneev¹

¹Branch MSTU "STANKIN", Egorievsk, Russia

ABSTRACT

The processing of the elliptically polarized reflected signal in the Earth remote sensing systems makes it possible to obtain additional advantages when solving problems of recognition of the observable objects on the ground and under the ground. Full polarization reception implemented in radar stations with digital synthesis of the antenna aperture when remote sensing of the Earth increases the information content of such radars (the radar image of the investigated surface is detailed, the contrast of objects in the field of view is improved, and various negative effects of the image are minimized). The paper considers the quadrature processing of the reflected elliptically polarized signal in radar stations with digital synthesis of the antenna aperture in the mode of lateral survey of the terrestrial (water) surface. The processing of the reflected signal using the methods of radio polarimetry opens new possibilities for such radars while solving problems of remote sensing of the surface and recognition of radar targets. In addition, radar stations with digital synthesis of the antenna aperture with processing of an elliptically polarized signal have a higher interference immunity compared to radars, where a linearly polarized signal is processed. In the article, mathematical modeling is performed in the part of demodulation of the in-phase and quadrature components of the trajectory signal when the geometric parameters of the polarization ellipse change. The obtained analytical expressions allow estimating the influence of the geometric parameters of the polarization ellipse on the trajectory signal being processed. It is analytically confirmed that the angle of ellipticity affects the energy characteristics, and the orientation angle of the polarization ellipse introduces an additional phase shift in the characteristics of the trajectory signal being processed. Not taking into account these nuances while designing digital units and systems of such radars can lead to the loss of all the benefits of processing an elliptically polarized signal. The paper presents a structural scheme of the polarization radar station with digital synthesis of the antenna aperture.

Key words: radar station with digital synthesis of the antenna aperture, radio polarimetry, digital signal processing, full polarization reception.

REFERENCES

1. Antipov, V.N., Goryainov, V.T., Kulin, A.V., Mansurov, V.V., Okhonskiy, A.G., Sazonov, N.A., Titov, M.P., Tolstov, E.F. and Shapovalov, A.V. (1988). *Radiolokatsionnyye stantsii s tsifrovym sintezirovaniyem apertury anteny* [Radar stations with digital synthesis of the antenna aperture]. Moscow: Radio i svyaz, 304 p. (in Russian)
2. Kozlov, A.I., Logvin, A.I. and Sarychev, V.A. (2005). *Polyarizatsiya radiovoln. Kn. 1. Polyarizatsionnaya struktura radiolokatsionnykh signalov* [Polarization of the radio waves. Book 1. Polarization structure of the radar signals]. Moscow: Radiotekhnika, 704 p. (in Russian)
3. Kozlov, A.I., Logvin, A.I. and Sarychev, V.A. (2008). *Polyarizatsiya radiovoln. Kn. 3. Radiopolyarimetriya slozhnykh po strukture signalov* [Polarization of the radio waves. Book 3. Radiopolyarimetry of the structurally complex signals]. Moscow: Radiotekhnika, 688 p. (in Russian)
4. Korostelev, A.A. (1987). *Prostranstvenno-vremennaya teoriya radiosistem* [The space-time theory of the radio systems.] *Uchebnoye posobiye* [Tutorial]. Moscow: Radio i svyaz, 320 p. (in Russian)
5. Oppengeym, A. and Shafer, R. (2012). *Tsifrovaya obrabotka signalov* [Digital signal processing]. 3-e izd. [the 3rd revised ed.], Moscow: Tekhnosfera, 1048 p. (in Russian)
6. Korneev, P.E. (2003). *Tsifrovyye sistemy slezheniya i obrabotki polyarizovannogo signala* [Digital systems of tracking and processing the polarized signal]: *diss. na soiskaniye uchenoy*

stepeni kand. tekhn. nauk: 05.12.04. [Thesis by Candidate of Technical Sciences], Moscow, 135 p. (in Russian)

7. **Korneev, P.E.** (2018). *Diskretizaciya polyarizovannogo signala* [The discretization of the polarized signal]. Civil Aviation High Technologies, vol. 21, no. 3, pp. 169–177. (in Russian)

8. **Gadzikovskij, V.I.** (2013). *Tsifrovaya obrabotka signalov* [Digital signal processing]. Moscow: SOLON-Press, 769 p. (in Russian)

9. **Vagapov, R.Kh., Gavrilov, V.P., Kozlov, A.I., Lebedev, G.A. and Logvin, A.I.** (1993). *Distsionnyye metody issledovaniya morskikh ldov* [Remote methods for studying sea ice]. St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 341 p. (in Russian)

10. **Sergienko, A.B.** (2011). *Tsifrovaya obrabotka signalov* [Digital signal processing]. *Uchebnoye posobiye* [Tutorial]. 3-e izd. [The 3rd ed.] St. Petersburg: BHV-Petersburg, 768 p. (in Russian)

11. **Antipov, V.N.** (2013). *Radiolokatsionnyye stantsii s tsifrovym sintezirovaniyem apertury anteny* [Radar stations with digital synthesis of the antenna aperture]. Moscow: Kniga po Trebovaniyu, 304 p. (in Russian)

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Pavel E. Korneev, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Industrial Automation Technologies Chair, MSTU Branch “STANKIN” in Egorievsk, paul-korn@yandex.ru.

Поступила в редакцию 10.09.2018
Принята в печать 17.01.2019

Received 10.09.2018
Accepted for publication 17.01.2019