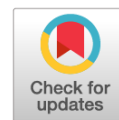


УДК 621.396.962:629.7

DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_81

Оригинальное исследование



Влияние аддитивных помех и фазовых флуктуаций на характеристики синтезированной апертурной антенны при произвольной траектории движения летательного аппарата

Е.К. Самаров, И.В. Евграфова

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Как правило, в специализированных работах исследуется влияние фазовых флуктуаций принимаемых сигналов в радиолокационных станциях с синтезированной апертурой антенной на разрешение по азимуту и точность определения азимута неподвижных движущихся наземных объектов при произвольных траекториях полета летательного аппарата без учета аддитивных помех.

Цель — определить степень влияния аддитивных помех и фазовых флуктуаций на разрешающую способность и точность определения азимута радиолокационной станции с синтезированной апертурной антенной при произвольной траектории движения летательного аппарата и наземных объектов.

Материалы и методы. Рассмотрено и проанализировано влияние фазовых флуктуаций и аддитивных помех на основные характеристики синтезированной апертурой антенны при произвольной траектории летательных аппаратов и наземных объектов.

Результаты. Получены соотношения для оценки разрешающей способности и точности определения азимута в радиолокационной станции с синтезированной апертурной антенной в условиях воздействия фазовых флуктуаций отраженного сигнала и аддитивных помех при произвольной траектории движения летательного аппарата и наземных объектов.

Выводы. Показано, что в условиях воздействия аддитивных помех математическое ожидание и дисперсия углового положения объекта, а также длительность выходного сигнала по угловому параметру зависят от соотношения энергетических характеристик этого шума и отраженного сигнала.

Ключевые слова: радиолокационная станция; фазовые флуктуации; синтезированная апертура антенны; летательный аппарат; радиолокационное изображение; дисперсия углового положения объекта.

Как цитировать

Самаров Е.К., Евграфова И.В. Влияние аддитивных помех и фазовых флуктуаций на характеристики синтезированной апертурной антенны при произвольной траектории движения летательного аппарата // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2025. Т. 4, № 1. С. 81–87. DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_81

DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_81

Original study article

How additive interference and phase fluctuations influence the performance of a synthetic aperture antenna on an arbitrary aircraft path

Evgeny K. Samarov, Irina V. Evgrafova

Saint Petersburg State Marine Technical University, Saint Petersburg, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: Dedicated papers often study the influence of phase fluctuations of signals received by radar stations with a synthetic aperture antenna on the azimuth resolution and accuracy of stationary moving ground objects for arbitrary aircraft trajectories without additive interference.

AIM: To determine how additive interference and phase fluctuations influence azimuth resolution and accuracy of a radar station with a synthetic aperture antenna during arbitrary movement of an aircraft and ground objects.

MATERIALS AND METHODS: The article reviews and analyzes the influence of phase fluctuations and additive interference on the key parameters of a synthetic aperture antenna during arbitrary movement of an aircraft and ground objects.

RESULTS: The article presents relationships to assess the resolution and accuracy of azimuth determination by a radar station with a synthetic aperture antenna under the influence of phase fluctuations of the reflected signal and additive interference during arbitrary movement of an aircraft and ground objects.

CONCLUSIONS: It is shown that under the influence of additive interference, the expected value and dispersion of the object's angular position and the output signal duration in the angular position depend on the ratio of the output performance of this noise and the reflected signal.

Keywords: radar station; phase fluctuations; synthetic aperture antenna; aircraft; radar image; angular position dispersion of an object.

To cite this article

Samarov EK, Evgrafova IV. How additive interference and phase fluctuations influence the performance of a synthetic aperture antenna on an arbitrary aircraft path. *Transactions of the Saint Petersburg State Marine Technical University*. 2025;4(1):81–87. DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_81

Received: 10.01.2025

Accepted: 15.02.2025

Published online: 20.03.2025

ВВЕДЕНИЕ

В работах [1–5] исследовано влияние фазовых флуктуаций (ФФ) принимаемых сигналов в радиолокационных станциях (РЛС) с синтезированной апертурной антенной (САА) на разрешение по азимуту и точность определения азимута неподвижных движущихся [1, 2] наземных объектов (целей) при произвольных траекториях полета летательного аппарата (ЛА) и угле β_n [3] без учета аддитивных помех.

Рассмотрим и проанализируем влияние фазовых флуктуаций и аддитивных помех на указанные основные характеристики САА при произвольной траектории ЛА и наземных объектов.

Оценка влияния фазовых флуктуаций и аддитивных помех на основные характеристики синтезированной апертурной антенны при произвольной траектории полета летательного аппарата и наземных объектов

Оценку будем осуществлять с помощью метода моментов по модулю функции выходного сигнала, радиолокационного изображения (РЛИ), системы обработки.

Сигнал на выходе системы обработки САА, отраженный от i -го движущегося объекта Π_i [3]:

$$S_n(\beta_i, \tau) = A(\beta_i, \tau) \exp\{-i[kD(\beta_i, \tau) - \beta_c(\tau)]\} + \dot{n}(\tau), \quad (1)$$

где $A(\beta_i, \tau)$ — амплитуда сигнала; β_i — угол наблюдения i -го движущегося объекта относительно оси O_1Y_1 системы координат синтезирования $O_1X_1Y_1Z_1$; τ — текущее время на пространственном интервале синтезирования (ИС) L_c , которому соответствует временной ИС T_c ($|\tau| \leq T_c/2$); $k = 4\pi/\lambda$ — удвоенное волновое число; λ — длина волны САА; $D(\beta_i, \tau)$ — расстояние между фазовым центром антенны (ФЦА) и i -м объектом на ИС; $\beta_c(\tau)$ — флуктуации фазы, обусловленные различными физическими процессами [6]; $\dot{n}(\tau)$ — аддитивная комплексная помеха с нулевым математическим ожиданием и практически постоянным значением спектральной плотности в полосе пропускания приемника САА, с временем корреляции, значительно меньшим T_c .

На рис. 1 изображены две правые ортогональные системы координат: нормальная земная система координат (НЗСК) $O_0X_gY_gZ_g$ и подвижная система координат синтезирования (СКС) $O_1X_1Y_1Z_1$, ось O_1Z_1 которой проходит по местной вертикали через ФЦА в момент времени t полета, совпадающий с центром каждого временного ИС ($\tau = 0$).

Ось O_1Y_1 проходит в тот же момент времени через опорную точку Π_0 , расположенную под углом β_n относительно вектора v_n путевой скорости ЛА. Углы ψ_k и γ_k — соответственно углы карты и падения; v_k — вектор земной (полной) скорости ФЦА (ЛА); β — текущее значение азимутального угла относительно оси O_1Y_1 в

пределах углового размера β_k кадра РЛИ (для упрощения записи аргумент t в последующих соотношениях опущен); 1 и 2 — траектория и линии пути ФЦА (ЛА), 3 и 4 — кадр РЛИ и полосы равных дальностей.

При обработке в РСА сигнала (1) методом гармонического анализа сигнал на выходе линейной части системы обработки [2]:

$$\dot{F}(\alpha_0, \omega_0, \omega) = \int_{-T_c/2}^{T_c/2} A(\beta_i, \tau) \dot{H}(\alpha_0, \omega_0, \omega) \exp\{-i\omega\tau\} d\tau + \int_{-T_c/2}^{T_c/2} \dot{n}(\tau) \dot{H}(\tau) \exp\{ikD(\tau)\} \exp\{-i\omega\tau\} d\tau, \quad (2)$$

где ω — круговая частота; $H(\tau)$ — весовая функция, обычно являющаяся четной функцией [1]; $D(\tau) = D(0, \tau)$ — текущее расстояние «ФЦА- Π_0 » на ИС;

$$\omega_0 = k[v_{Ri} + \beta_i(v_{iX_1} - v_{X_1})\sin\gamma + \beta_i^2(v_{iY_1} - v_{Y_1})\sin\gamma/2]; \quad (3)$$

$$\alpha_0 = k\{a_{Ri} + a_{RK} + \beta_i[(a_{iX_1} - a_{X_1})\sin\gamma - a_{RK1}] + \beta_i^2[(a_{iY_1} - a_{Y_1})\sin\gamma - a_{RK2}]/2\}; \quad (4)$$

$$\dot{H}(\alpha_0, \omega_0, \omega) = H(\tau) \exp\{i[\alpha_0\tau^2 + \omega_0\tau + \beta_c(\tau)]\}, \quad (5)$$

где v_{Ri} и a_{Ri} — радиальные скорость и ускорение движущегося объекта, цели, Π_i относительно ФЦА при $\tau = 0$; v_{X_1} , v_{iX_1} и v_{Y_1} , v_{iY_1} — составляющие скоростей ФЦА и Π_i по осям O_1X_1 и O_1Y_1 СКС в тот же момент времени; a_{X_1} , a_{iX_1} и a_{Y_1} , a_{iY_1} — составляющие ускорения ФЦА и Π_i по осям O_1X_1 и O_1Y_1 СКС при $\tau = 0$.

Приведенные скорости и ускорения, а также значения a_{RK} , a_{RK1} , a_{RK2} определены в [2], где показано, что при линейной связи между текущими значениями

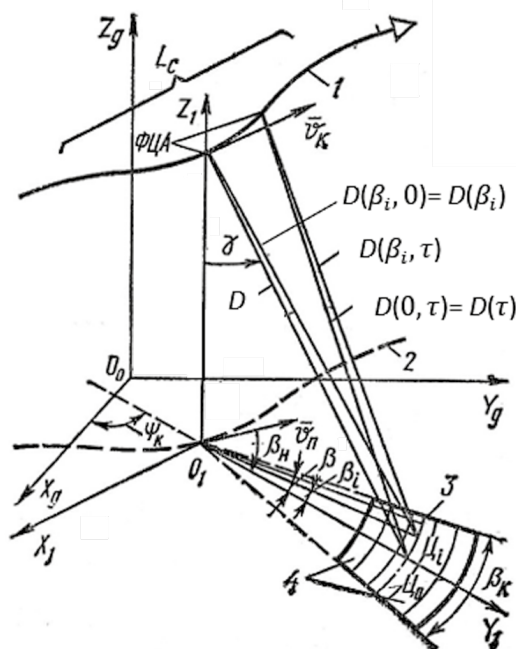


Рис. 1. Геометрическое пояснение двух правых ортогональных систем координат.
Fig. 1. Geometric interpretation of two right-handed orthogonal coordinate systems.

$$\text{угла } \beta \text{ и круговой частотой } \omega \left\{ \beta \approx \frac{\omega}{\left[k(v_{LX_1} - v_{X_1}) \sin \gamma \right]} \right\},$$

математическое ожидание, дисперсия положения центра тяжести модуля выходного сигнала, характеризующие точность определения азимута объекта на РЛИ, и разрешение по азимутальному углу задаются равенствами:

$$m_\beta = \frac{m_\omega}{\left[k(v_{LX_1} - v_{X_1}) \sin \gamma \right]};$$

$$D_{m_\beta} = \frac{D_m}{\left[k(v_{LX_1} - v_{X_1}) \sin \gamma \right]^2}; \quad (6)$$

$$\delta\beta_A = 2|R_\beta| = 2 \left| \frac{R_\omega}{\left[k(v_{LX_1} - v_{X_1}) \sin \gamma \right]} \right|,$$

где R_β — радиус протяженности модуля выходного сигнала;

$$m_\omega = M\{m\} = M \left\{ \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \omega |\dot{F}(\alpha_0, \omega_0, \omega)|^2 d\omega}{\int_{-\infty}^{\infty} |\dot{F}(\alpha_0, \omega_0, \omega)|^2 d\omega} \right\},$$

$$D_m = M\{m^2\} - m_\omega^2, \quad (7)$$

$$R_\omega = \sqrt{M \left\{ \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \omega^2 |\dot{F}(\alpha_0, \omega_0, \omega)|^2 d\omega}{\int_{-\infty}^{\infty} |\dot{F}(\alpha_0, \omega_0, \omega)|^2 d\omega} \right\} - M\{m^2\}}. \quad (8)$$

Здесь $M\{\cdot\}$ — операция статистического усреднения.

С помощью (2)–(8), используя теорию комплексных случайных процессов [7] и методику из [1], после преобразований можно получить соотношения для m_β , D_{m_β}

$$D_{m_\beta} = \left(\frac{U}{q_S} \right)^2 \left\{ \frac{1}{T_c^2} \iint_{-T_c/2}^{T_c/2} K_{\beta_c}(\tau_1, \tau_2) H^2(\tau_1) H^2(\tau_2) d\tau_1 d\tau_2 - \left[\frac{1}{T_c} \int_{-T_c/2}^{T_c/2} M\{\beta_c(\tau)\} H^2(\tau) d\tau \right]^2 + \right. \\ \left. + \frac{2}{q_{A_n} T_c} \left[3 \int_{-T_c/2}^{T_c/2} [H'(\tau)]^2 H^2(\tau) d\tau + (\omega_0 - \omega_*)^2 + \omega_0 \omega_* \right] \times \right. \\ \left. \times \int_{-T_c/2}^{T_c/2} H^4(\tau) d\tau + (2\omega_0 - \omega_*) \int_{-T_c/2}^{T_c/2} M\{\beta_c(\tau)\} H^4(\tau) d\tau + (4\alpha_0 - ka_R) \times \int_{-T_c/2}^{T_c/2} M\{\beta_c(\tau)\} \tau H^4(\tau) d\tau + \right. \\ \left. + \int_{-T_c/2}^{T_c/2} M\{\beta_c(\tau)\} H^4(\tau) d\tau \right\} + \frac{1}{q_{A_n}^2} \left[4H''(\tau)|_{\tau=0} + \omega_0^2 \right]; \quad (10)$$

$$R_\beta^2 = \frac{U^2(1+1/q)}{2\pi T_c q_S} \left\{ \left(1 + \frac{1}{q_{A_n}} \right) \int_{-T_c/2}^{T_c/2} [H'(\tau)]^2 d\tau + \left(4\alpha_0^2 + \frac{k^2 a_R^2}{q_{A_n}} \right) \times \int_{-T_c/2}^{T_c/2} \tau^2 H^2(\tau) d\tau + \frac{D_{n'}}{D_n q_{A_n}} \int_{-T_c/2}^{T_c/2} H^2(\tau) d\tau + \right. \\ \left. + T_c q_S \left[\left(\omega_0^2 + \frac{\omega_*^2}{q} \right) - \frac{2\pi}{1+1/q} \left(\omega_0 + \frac{\omega_*}{q} \right)^2 \right] + 4\alpha_0 \int_{-T_c/2}^{T_c/2} M\{\beta_c(\tau)\} \tau H^2(\tau) d\tau + 2 \left[\omega_0 - \frac{2\pi}{1+1/q} \left(\omega_0 + \frac{\omega_*}{q} \right) \right] \times \right. \\ \left. \times \int_{-T_c/2}^{T_c/2} M\{\beta_c(\tau)\} H^2(\tau) d\tau + \int_{-T_c/2}^{T_c/2} M\left\{ \left[\beta_c(\tau) \right]^2 \right\} H^2(\tau) d\tau - \frac{2\pi}{T_c q_S (1+1/q)} \times \int_{-T_c/2}^{T_c/2} M\{\beta_c(\tau)\} H^2(\tau) d\tau \right\} - D_{m_\beta}. \quad (11)$$

и $R_{\beta'}$, в подынтегральные выражения которых входят дисперсия

$$D_n = M\left\{ \left| \dot{n}(\tau) \right|^2 \right\},$$

и корреляционная функция

$$R_n(\tau_1 - \tau_2) = M\left\{ \dot{n}(\tau_1) n^*(\tau_2) \right\},$$

аддитивной комплексной помехи, а также дисперсия

$$D_{n'} = M\left\{ \left| \dot{n}'(\tau) \right|^2 \right\},$$

корреляционная функция

$$R_{n'}(\tau_1 - \tau_2) = M\left\{ \dot{n}'(\tau_1) n'^*(\tau_2) \right\} = \frac{\partial^2}{\partial \tau_1 \partial \tau_2} R_n(\tau_1 - \tau_2),$$

производной этой помехи.

Так как по условию время корреляции аддитивной помехи значительно меньше T_c , а спектральная плотность $S_m(\omega)$ этой помехи практически не изменяется в полосе пропускания приемника САА ($S_m(\omega) \approx N_n$), с опреде-

ленной степенью приближения можно получить [7]:

$$R_n(\tau_2 - \tau_1) \approx N_n \delta(\tau_2 - \tau_1);$$

$$R_{n'}(\tau_1 - \tau_2) \approx N_n \frac{\partial^2}{\partial \tau_1 \partial \tau_2} \delta(\tau_2 - \tau_1),$$

где $\delta(\tau_2 - \tau_1)$ — дельта-функция Дирака.

Воспользовавшись теорией обобщенных функций [8–10], в частности фильтрующими свойствами дельта-функции и ее производных, соотношения для m_β , D_{m_β} и R_β можно упростить:

$$m_\beta = U \left[\omega_0 + \frac{\omega_*}{q} + \frac{1}{T_c q_S} \int_{-T_c/2}^{T_c/2} M\{\beta_c(\tau)\} H^2(\tau) d\tau \right]; \quad (9)$$

В выражениях (9)–(11) переменные имеют следующие значения:

$K_{\beta_c}(\tau_1, \tau_2) = M\{\beta_c'(\tau_1)\beta_c'(\tau_2)\}$ — ковариационная функция производной случайного процесса $\beta_c(\tau)$;

$$\omega_* = kU_R;$$

$$U = \frac{2\pi}{\left(1 + \frac{1}{q}\right) \left[k(v_{LX_1} - v_{X_1}) \sin\gamma \right]};$$

v_R и a_R — радиальная скорость и ускорение ФЦА относительно опорной точки L_0 [3];

$$q = E_{SH} / E_{nH};$$

$$q_S = E_{SH} / [A^2(\beta_i)T_c];$$

$$q_{A_n} = \frac{A^2(\beta_i)T_c}{D_n T_c} = \frac{A^2(\beta_i)T_c}{N_n};$$

$$E_{SH} = \int_{-T_c/2}^{T_c/2} A^2(\beta_i, \tau) H^2(\tau) d\tau \approx A^2(\beta_i) \int_{-T_c/2}^{T_c/2} H^2(\tau) d\tau$$

энергия «взвешенного» сигнала;

$$E_{nH} = \int_{-T_c/2}^{T_c/2} D_n H^2(\tau) d\tau = D_n \int_{-T_c/2}^{T_c/2} H^2(\tau) d\tau$$

— энергия «взвешенной» помехи (шума) $n^*(\tau)$.

Если $n^*(\tau)$ — эргодический процесс с временем корреляции значительно меньше T_c , а $H(\tau)$ при $|\tau| = \frac{T_c}{2}$ равна или близка к нулю, то

$$\int_{-T_c/2}^{T_c/2} n^2(\tau) H^2(\tau) d\tau \approx T_c \lim_{T_c \rightarrow \infty} \frac{1}{T_c} \int_{-T_c/2}^{T_c/2} n^2(\tau) H^2(\tau) d\tau = E_{nH}.$$

В случае стационарности процесса $\beta_c(\tau)$

$$M\{\beta_c'(\tau)\} = 0, \quad M\{[\beta_c'(\tau)]^2\} = D_{\beta_c},$$

$$K_{\beta_c}(\tau_1, \tau_2) = R_{\beta_c}(\tau_2 - \tau_1),$$

(D_{β_c} — дисперсия производной стационарного фазового шума; $R_{\beta_c}(\tau_2 - \tau_1)$ — его корреляционная функция), и (9)–(11) значительно упрощаются.

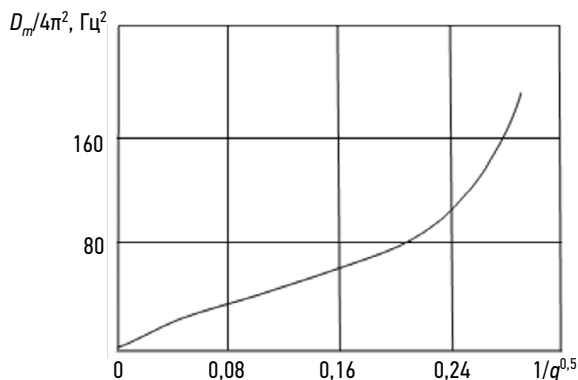


Рис. 3. Зависимость $D_m/4\pi^2$ от величины $f(1/q^{0.5})$.
Fig. 3. Dependence of $D_m/4\pi^2$ on $f(1/q^{0.5})$.

С помощью (9)–(11) можно оценивать раздельное и одновременное влияние ФФ и аддитивной помехи (шума) на основные характеристики САА при обработке сигналов как способом гармонического анализа, так и способом «прямой» свертки, если в них $\beta_i = 0$.

В [8–11] проведен качественный анализ влияния нестационарного и стационарного фазового шума на разрешающую способность САА и точность определения азимута наземных объектов, характеризуемую значениями m_β и D_{m_β} при различных способах обработки сигналов.

На рис. 2 представлены графики зависимости $\frac{m_\omega}{2\pi} = f\left(\frac{1}{\sqrt{q}}\right)$, на рис. 3 — $\frac{D_m}{4\pi^2} = f\left(\frac{1}{\sqrt{q}}\right)$, на рис. 4 — $R_\omega = f\left(\frac{1}{\sqrt{q}}\right)$, рассчитанные при фазовых флюктуациях, которые связаны с m_β , D_{m_β} и $\delta\beta_A$ линейными соотношениями (6).

Некоторый сдвиг значений $\frac{m_\omega}{2\pi}$ вверх при $\frac{1}{\sqrt{q}} = 0$ обусловлен смещением цели L_i относительно центра кадра РЛИ.

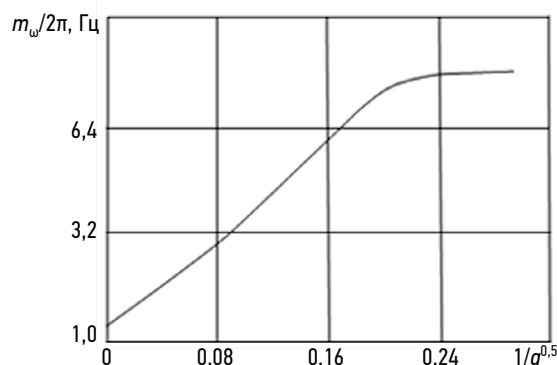


Рис. 2. Зависимость $m_\omega/2\pi$ от величины $f(1/q^{0.5})$.
Fig. 2. Dependence of $m_\omega/2\pi$ on $f(1/q^{0.5})$.

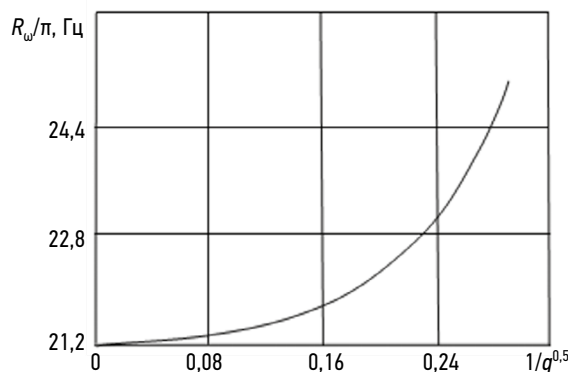


Рис. 4. Зависимость R_ω от величины $f(1/q^{0.5})$.
Fig. 4. Dependence of R_ω on $f(1/q^{0.5})$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, рассмотрено и проанализировано влияние фазовых флуктуаций и аддитивной помехи (шума) на характеристики синтезированной апертурной антенны. Получены соотношения для оценки разрешающей способности и точности определения азимута в радиолокационной станции с синтезированной апертурной антенной в условиях воздействия фазовых флуктуаций отраженного сигнала и аддитивных помех при произвольной траектории движения летательного аппарата и наземных объектов. Показано, что в условиях воздействия аддитивных помех (шума) математическое ожидание и дисперсия углового положения объекта, а также длительность выходного сигнала по угловому параметру зависят от соотношения энергетических характеристик этого шума и отраженного сигнала.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. Все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

Личный вклад каждого автора: Е.К. Самаров — разработка концепции, проведение исследования, подготовка статьи и одобрение финальной версии перед публикацией; И.В. Евграфова — участие в проведении исследования и подготовке статьи.

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

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

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. All authors made a substantial contribution to the conception of the study, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the article, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the study. Personal contribution of each author: E.K. Samarov, conceptualising, researching and drafting the article and approving the final version before publication; I.V. Evgrafova, participation in the research and preparation of the article.

Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богачев А.С., Толстов Е.Ф. Применение радиолокационных систем с синтезированной апертурой антенной. Москва: ВИНТИ, 1986. 145 с.
2. Ванштейн Л.А., Вакман Д.Е. Разделение частот в теории колебаний и волн. Москва: Наука, 1983. 287 с.
3. Евсиков Ю.А., Чапурский В.В. Преобразование случайных процессов в радиотехнических устройствах. Москва: Высшая школа, 1977. 264 с.
4. Функциональный анализ / под ред. С.Г. Крейна. Москва: Наука, 1972.
5. Антипов В.Н., Горяинов В.Т., Кулин А.Н., и др. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием Р 15 апертуры антенны / под ред. В.Т. Горяинова. Москва: Радио и связь, 1988. 304 с.
6. Сазонов Н.А., Очеловский А.В., Романенко Г.В., и др. Влияние фазовых флуктуаций и аддитивного шума на характеристики РСА // Радиотехника. 1988. № 10. С. 43–47.
7. Artyushenko V.M., Volovach V.I. Comparative analysis of discriminators efficiency of tracking meters under influence of non-Gaussian broadband and band-limited noise. В кн.: 11th international IEEE scientific and technical conference «Dynamics of systems, mechanisms and machines». 2017. P. 1–4. doi: 10.1109/Dynamics.2017.8239430
8. Artyushenko V.M., Volovach V.I. Synthesis and analysis of discriminators under influence of non-Gaussian noise // J Phys: Conf Ser. 2018. Vol. 944. ID 012004. doi: 10.1088/1742-6596/944/1/012004
9. Artyushenko V.M., Volovach V.I., Shakursky M.V. The demodulation signal under the influence of additive and multiplicative non-Gaussian noise. В кн.: Proceedings of 2016 IEEE East-west design and test symposium, EWDTs 2016. Yerevan, 2017. ID 7807704. doi: 10.1109/EWDTs.2016.7807704
10. Blacknell D., Freeman A., Quegan S., et al Geometric accuracy in airborne SAR images // IEEE Trans Aerosp Electron Syst. 1989. Vol. 25, N 2. P. 241–258. doi: 10.1109/7.18685
11. Buckreuss S. Motion errors in an airborne synthetic aperture radar system // Eur Trans Telecommun. 1991. Vol. 2, N 6. P. 655–664. doi: 10.1002/ett.4460020609

REFERENCES

1. Bogachev AS, Tolstov EF. *Application of radar systems with synthesized aperture antenna*. Moscow: VINITI; 1986. 145 p. (In Russ.)
2. Vanstein LA, Wackman DE. *Frequency separation in the theory of vibrations and waves*. Moscow: Nauka; 1983. 287 p. (In Russ.)
3. Evsikov YuA, Chapursky VV. *Transformation of random processes in radio engineering devices*. Moscow: High School; 1977. 264 p. (In Russ.)
4. Crane SG, editor. *Functional analysis*. Moscow: Nauka; 1972. (In Russ.)
5. Antipov VN, Goryainov VT, Kulin AN, et al. *Radar stations with digital synthesis of P 15 antenna aperture*. Goryainov VT, editor. Moscow: Radio and Communication; 1988. 304 p. (In Russ.)
6. Sazonov NA, Ochevovskiy AV, Romanenko GV, et al. *Influence of phase fluctuations and additive noise on PCA characteristics*. *Radioengineering*. 1988;(10):43–47. (In Russ.)
7. Artyushenko VM, Volovach VI. Comparative analysis of discriminators efficiency of tracking meters under influence of non-Gaussian broadband and band-limited noise. In: *11th international IEEE scientific and technical conference «Dynamics of systems, mechanisms and machines»*. 2017. P. 1–4. doi: 10.1109/Dynamics.2017.8239430
8. Artyushenko VM, Volovach VI. Synthesis and analysis of discriminators under influence of non-Gaussian noise. *J Phys: Conf Ser*. 2018;944:012004. doi: 10.1088/1742-6596/944/1/012004
9. Artyushenko VM, Volovach VI, Shakursky MV. The demodulation signal under the influence of additive and multiplicative non-Gaussian noise. In: *Proceedings of 2016 IEEE East-west design and test symposium, EWDTs 2016*. Yerevan, 2017. ID 7807704. doi: 10.1109/EWDTs.2016.7807704
10. Blacknell D, Freeman A, Quegan S, et al. Geometric accuracy in airborne SAR images. *IEEE Trans Aerosp Electron Syst*. 1989;25(2):241–258. doi: 10.1109/7.18685
11. Buckreuss S. Motion errors in an airborne synthetic aperture radar system. *Eur Trans Telecommun*. 1991;2(6):655–664. doi: 10.1002/ett.4460020609

ОБ АВТОРАХ

***Евгений Кимович Самаров**, д-р техн. наук, заведующий кафедрой математики ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет»; адрес: Россия, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3; eLibrary SPIN: 1077-2126; e-mail: omega511@mail.ru

Ирина Владимировна Евграфова, канд. пед. наук; декан факультета естественнонаучного и гуманитарного образования ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет»; e-mail: spbmtu@yandex.ru

AUTHORS' INFO

***Evgeny K. Samarov**, Dr. Sci. (Engineering), Head of the Department of Mathematics, Saint Petersburg State Marine Technical University; address: 3 Lotsmanskaya st, Saint Petersburg, 190121, Russia; eLibrary SPIN: 1077-2126; e-mail: omega511@mail.ru

Irina V. Evgrafova, Cand. Sci. (Pedagogy); Dean of the Faculty of Natural Sciences and Humanities, St. Petersburg State Marine Technical University; e-mail: spbmtu@yandex.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author