

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.10.16>

УДК: 621.37

ВЛИЯНИЕ СЛУЧАЙНЫХ ФАЗОВЫХ ОШИБОК НА РАЗРЕШАЮЩУЮ СПОСОБНОСТЬ РАДИОЛОКАТОРА С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ

Горячкин О.В.

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики,
443010, Самара, ул. Л.Толстого, 23

Статья поступила в редакцию 30 января 2024 г.

Аннотация. В статье рассматривается задача анализа влияния случайных фазовых ошибок на разрешающую способность радиолокатора с синтезированной апертурой. Объектом исследования является усредненная функция рассеяния изображения точечной цели в пространстве радиолокационных координат. Для этой функции удается получить аналитическое решение, учитывающее статистические характеристики фазовых флуктуаций траекторного сигнала РСА, в том числе их многомерный закон распределения. Полученные выражения могут быть использованы для анализа влияния траекторных нестабильностей, вибраций, атмосферных флуктуаций, нестабильностей в приеме-передающем тракте РСА. Расчеты могут быть выполнены для любой заданной траектории полета носителя РСА, с учетом особенностей обзора и эффекта миграции дальности. В работе в качестве иллюстрации предлагаемой методики исследуется влияние траекторных нестабильностей БПЛА, вызванных флуктуациями поля ветровых скоростей на деградацию разрешающей способности РСА VHF диапазона частот, использующего систему спутниковой навигации.

Ключевые слова: радиолокатор с синтезированной апертурой, влияние случайных фазовых ошибок, траекторный сигнал, беспилотный летательный аппарат.

Автор для переписки: Горячкин Олег Валериевич, o.goryachkin@psuti.ru

Введение

В настоящее время наблюдается рост интереса к данным радиолокационного наблюдения поверхности Земли, которые широко используются в военных целях, картографии, глобальном и региональном мониторинге, контроле судоходства, научных приложениях. Основным инструментом получения этих данных являются радиолокаторы с синтезированной апертурой (РСА), которые размещаются на борту спутников, пилотируемых и беспилотных летательных аппаратов, и обеспечивают получение радиолокационных изображений местности с пространственным разрешением, не уступающим оптическим датчикам [1]. Основными преимуществами радиолокационного наблюдения являются всепогодность и круглосуточность, а интерферометрические режимы современных РСА, обеспечивают возможность измерения рельефа местности и его деформаций с высокой точностью. Все это объясняет тот факт, что число запущенных в последние годы космических аппаратов (КА) с РСА на борту исчисляется сотнями, так в настоящее время радиолокационные КА и их группировки эксплуатируют Россия, Китай, США, Сингапур, Финляндия, Япония, Германия, Израиль, Аргентина, Бразилия и др.

Основные тенденции развития современных РСА связаны с повышением пространственного разрешения, расширением используемых частотных диапазонов. Достижение высоких значений пространственного разрешения в РСА связано не только с технологическими ограничениями, но и с действием внешних дестабилизирующих факторов, к числу которых можно отнести случайные фазовые ошибки знания траекторного сигнала, возникающие в процессе синтеза апертуры. Источниками подобных ошибок являются

траекторные измерения, влияние атмосферы, нестабильность параметров зондирующего сигнала. Обычно, компенсировать подобные влияния не удается и перед разработчиками стоит задача оценки степени их влияния, а также предъявления соответствующих требований к обеспечивающим системам.

Анализу влияния случайных фазовых ошибок на разрешающую способность РСА посвящена значительная по объему литература [1-4]. Имеющиеся публикации можно разделить на две категории. К первой категории можно отнести те из них, в которых анализ влияния ошибок знания траекторного сигнала проводится преимущественно аналитическими методами [2-6], ко второй категории можно отнести публикации, в которых анализ осуществляется методом имитационного математического моделирования [7-9].

К недостаткам имеющихся решений можно отнести следующее:

1) аналитические выражения получены как правило в частных случаях, а именно, когда фазовые ошибки предполагаются гауссовскими, оценка производится для одного канала дальности, не учитывается эффект миграции дальности, часто предполагается использование неоптимального алгоритма синтеза апертуры, например, алгоритма спектрального анализа;

2) решения на основе математического моделирования ограничены вычислительными ресурсами и моделируемыми параметрами конкретной системы.

В этой связи поиск эффективных аналитических решений кажется актуальной задачей, решение которой может упростить анализ влияния случайных фазовых ошибок на разрешающую способность радиолокатора с синтезированной апертурой.

1. Функция неопределенности РСА

Зондирующий сигнал РСА можно записать в виде:

$$\dot{s}_0(t) = \dot{i}_0(t)e^{j\omega_0 t}, \quad t \in [t_1, t_2], \quad (1)$$

где $\dot{i}_0(t)$ – комплексная огибающая зондирующего сигнала РСА, ω_0 – несущая частота сигнала. Сигнал, отраженный от точечной цели с координатами на плоской подстилающей поверхности (x_0, y_0) , имеет вид:

$$\dot{s}_1(t) = G(t, x_0, y_0)\dot{i}_0(t - \tau(t, x_0, y_0))e^{j\omega_0(t - \tau(t, x_0, y_0))} + \dot{n}(t), \quad (2)$$

где $\dot{n}(t)$ – комплексный гауссовский шум приемного канала, $G(t, x_0, y_0)$ – вещественная весовая функция, учитывающая влияние диаграммы направленности антенны РСА, $\tau(t, x_0, y_0)$ – временная задержка сигнала.

Сигнал, отраженный от поверхности:

$$\dot{s}_\Sigma(t) = \int_{D_x} \int_{D_y} G(t, x, y)\dot{s}_0(t - \tau(t, x, y))\dot{\xi}(x, y)dx dy + \dot{n}(t), \quad (3)$$

где $\dot{\xi}(x, y)$ – коэффициент отражения элемента поверхности, D_x, D_y – область отражения.

Комплексное радиолокационное изображение может быть получено в виде:

$$\dot{i}(x, y) = \int_{t_1}^{t_2} G(t, x, y)\dot{s}_0(t - \tau(t, x, y))s_\Sigma^*(t)dt. \quad (4)$$

Изображение точечной цели в РСА имеет вид:

$$\dot{i}(x, y, x_0, y_0) = \int_{t_1}^{t_2} G(t, x, y)\dot{s}_0(t - \tau(t, x, y))G(t, x_0, y_0)s_0^*(t - \tau(t, x_0, y_0))dt. \quad (5)$$

Функция неопределенности (ФН) РСА, соответственно, имеет вид:

$$\Phi(x, y, x_0, y_0) = \frac{|\dot{I}(x, y, x_0, y_0)|}{|\dot{I}(x_0, y_0, x_0, y_0)|}. \quad (6)$$

Разрешающая способность РСА по путевой и поверхностной дальности может быть определена различными способами (см.[3]), например, как ширина функции неопределенности по уровню 0.5.

2. Влияние случайных ошибок на разрешающую способность РСА

Как было отмечено выше, изображение точечной цели может быть существенно искажено, если ожидаемый и наблюдаемый сигналы в (5) отличаются. В частности, если траекторные измерения содержат ошибки, или реальная задержка на трассе цель-РСА отличается от предполагаемой на случайное значение, вследствие влияния атмосферы или нестабильности несущей, то изображение цели можно представить в виде

$$\dot{I}(x, y, x_0, y_0) = \int_{t_1}^{t_2} G(t, x, y) \dot{s}_0(t - \tau(t, x, y) - \delta(t)) G(t, x_0, y_0) s_0^*(t - \tau(t, x_0, y_0)) dt, \quad (7)$$

где $\delta(t)$ – случайная задержка.

В этом случае изображение точечной цели $\dot{I}(x, y, x_0, y_0)$ – случайная функция координат (x, y) . Анализ деградации разрешающей способности лучше провести для усредненных характеристик, описывающих степень рассеяния изображения точечной цели в пространстве радиолокационных координат. Для этого, в соответствии с [3] можно использовать среднюю мощность сигнала цели:

$$\Psi(x, y, x_0, y_0) = \sqrt{\frac{\mathbf{M}\left\{|\dot{I}(x, y, x_0, y_0)|^2\right\}}{\mathbf{M}\left\{|\dot{I}(x_0, y_0, x_0, y_0)|^2\right\}}}. \quad (8)$$

Учитывая дискретный характер радиолокационного наблюдения, выражение (7) можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} \dot{i}(x, y, x_0, y_0) = \\ = \sum_k \int_{t_1+kT}^{t_1+(k+1)T} G(t_k, x, y) \dot{s}_0(t - \tau(t_k, x, y) - \delta(t_k)) G(t_k, x_0, y_0) s_0^*(t - \tau(t_k, x_0, y_0)) dt, \end{aligned} \quad (9)$$

где T – период следования импульсов.

Полагая, что скважность зондирующих импульсов РСА $Q \gg 1$, получим:

$$\begin{aligned} \dot{i}(x, y, x_0, y_0) = \sum_k G(t_k, x, y) G(t_k, x_0, y_0) \int_0^T \dot{s}_0(t - \tau(t_k, x, y) - \delta(t_k)) s_0^*(t - \tau(t_k, x_0, y_0)) dt = \\ = \sum_k G(t_k, x, y) G(t_k, x_0, y_0) \Psi_0(\tau(t_k, x_0, y_0) - \tau(t_k, x, y) - \delta(t_k)), \end{aligned} \quad (10)$$

где $\Psi_0(\tau) = \int_{-T}^{+T} \dot{s}_0(t - \tau) s_0^*(t) dt = e^{-j\omega_0\tau} \int_{-T}^{+T} u_0(t - \tau) u_0^*(t) dt = e^{-j\omega_0\tau} U_0(\tau)$.

Тогда,

$$\begin{aligned} \mathbf{M} \left\{ \left| \dot{i}(x, y, x_0, y_0) \right|^2 \right\} = \sum_k \sum_l G(t_k, x, y) G(t_k, x_0, y_0) G(t_l, x, y) G(t_l, x_0, y_0) \times \\ \times \mathbf{M} \left\{ \Psi_0(\tau(t_k, x_0, y_0) - \tau(t_k, x, y) - \delta(t_k)) \Psi_0^*(\tau(t_l, x_0, y_0) - \tau(t_l, x, y) - \delta(t_l)) \right\} \end{aligned} \quad (11)$$

В большинстве имеющих практическое значение случаев, на деградацию пространственного разрешения РСА оказывают влияние именно фазовые случайные ошибки, которые можно учесть, полагая, что $\varphi(t) = \frac{c}{2} \delta(t)$

и $\max_t |\delta(t)| < \frac{1}{\Delta f}$, где Δf – полоса частот зондирующего импульса. С учетом

этих допущений (11) можно представить в виде:

$$\begin{aligned} \mathbf{M} \left\{ \left| \dot{i}(x, y, x_0, y_0) \right|^2 \right\} = \sum_k \sum_l \Theta_{k,l} G(t_k, x, y) G(t_k, x_0, y_0) G(t_l, x, y) G(t_l, x_0, y_0) \times \\ \times U_0(\tau(t_k, x_0, y_0) - \tau(t_k, x, y)) U_0^*(\tau(t_l, x_0, y_0) - \tau(t_l, x, y)), \end{aligned} \quad (12)$$

где $\Theta_{k,l} = \mathbf{M} \left\{ e^{-j\varphi(t_k)} e^{j\varphi(t_l)} \right\}$.

Коэффициенты $\Theta_{k,l}$ легко найти, если заметить, что:

$$\Theta_{k,l} = \mathbf{M} \left\{ e^{-j(\varphi(t_k) - \varphi(t_l))} \right\} = \Xi_{k,l}(v_k, v_l) \Big|_{v_k=-1, v_l=1}, \quad (13)$$

где $\Xi_{k,l}(v_k, v_l)$ – характеристическая функция совместного распределения случайных величин $\varphi(t_k), \varphi(t_l)$.

Воспользуемся последним выражением и найдем коэффициенты $\Theta_{k,l}$ для частных случаев, имеющих практическое значение для РСА. Результаты сведем в таблицу 1.

Таблица 1. Значения коэффициентов $\Theta_{k,l}$.

№	Статистика флуктуаций	Значения коэффициентов $\Theta_{k,l}$	Примечание
1	$\varphi(t_k)$ – независимые случайные величины	$\Theta_{k,l} = \begin{cases} 1, k=l \\ \Xi_k(v_k) \Big _{v_k=-1} \Xi_l(v_l) \Big _{v_l=1}, k \neq l \end{cases}$	
2	$\varphi(t_k)$ – независимые случайные величины, имеющие равномерное распределение на интервале $(-\pi, \pi)$	$\Theta_{k,l} = \begin{cases} 1, k=l \\ 0, k \neq l \end{cases}$	Случай полной потери когерентности сигнала РСА
3	$\varphi(t_k)$ – независимые гауссовские случайные величины с нулевым математическим ожиданием	$\Theta_{k,l} = \begin{cases} 1, k=l \\ e^{-\sigma_\varphi^2}, k \neq l \end{cases}$ σ_φ^2 – дисперсия фазовых флуктуаций	Случай, описывающий влияние вибрации носителя РСА
4	$\varphi(t_k)$ – гауссовские случайные величины с нулевым математическим ожиданием	$\Theta_{k,l} = \begin{cases} 1, k=l \\ e^{-\sigma_\varphi^2(1-r_{k,l})}, k \neq l \end{cases}$ σ_φ^2 – дисперсия фазовых флуктуаций, r_k – коэффициент корреляции фазовых флуктуаций	Случай, описывающий траекторные и атмосферные флуктуации фазы, фазовый шум генератора.
5	$\varphi(t_k)$ – нестационарные гауссовские случайные величины	$\Theta_{k,l} = \begin{cases} 1, k=l \\ e^{j(m_l - m_k) - \frac{1}{2}(\sigma_k^2 r_{k,k} - 2\sigma_k \sigma_l r_{k,l} + \sigma_l^2 r_{l,l})}, k \neq l \end{cases}$ σ_k^2 – дисперсия фазовых флуктуаций, m_k – среднее фазовых флуктуаций $r_{k,l}$ – коэффициент корреляции фазовых флуктуаций	Случай, описывающий траекторные и атмосферные флуктуации фазы, имеющие регулярные составляющие.

3. Анализ влияния траекторных нестабильностей на разрешающую способность РСА VHF диапазона, размещенного на борту БПЛА

Как известно [3,4] размещение РСА на носителе, характеризуемом высокой динамикой, требует анализа влияния траекторных нестабильностей и соответствующего задания требований к навигационному обеспечению БПЛА или алгоритмам автоматической фокусировки радиолокационных изображений.

Рассмотрим в качестве примера анализ влияния траекторных нестабильностей на разрешающую способность РСА МРЛК-2, разработанную в ПГУТИ [10] и работающую в VHF диапазоне частот. РСА МРЛК-2 имеет следующие характеристики.

Таблица 2. Основные технические параметры системы.

Параметры	МРЛК-2
Длина волны	2,069 м
Размеры антенны	1.2x1 м
Масса антенны без разъема и фидера	<1 кг
Полоса захвата (при высоте полета 1000 м)	≤ 20 км
Разрешающая способность по азимуту	3 м
Разрешающая способность по наклонной дальности	3 м
Сигма-ноль (удельная ЭПР фона, мощность отраженного сигнала от которого равна уровню теплового шума)	-20 ДБ
Отношение сигнал-шум для точечной цели с ЭПР 1 м^2 на радиолокационном изображении, на краю полосы захвата не хуже	10 ДБ
Импульсная выходная мощность, не менее	220 Вт
Цифровой поток на выходе РСА (при реализации буферизации в цифровом приемнике)	<25 Мбит/с
Частота дискретизации АЦП (2 канала по 16 бит)	50 МГц
Диапазон частот зондирующего сигнала ЛЧМ (база 150-500)	115-165 МГц
Частота повторения импульсов	50-200 Гц
Объем блока электроники	35 дм ³
Вес электроники	3 кг
Потребляемая мощность	4А/28В

Внешний вид РСА показан на рисунке 1.



Рис.1. РСА МРЛК-2 в полете.

Для регистрации параметров движения РСА МРЛК-2 использован модуль спутниковой навигации LEA-M8S (GPS/ГЛОНАСС) фирмы U-blox, позволяющий получать данные о траектории полета с частотой до 10 Гц.

Траекторная нестабильность в данном случае является следствием ошибок навигационной системы, воздействием воздушной среды, влиянием управляющих воздействий. Будем считать, что система управления БПЛА способна на интервале синтеза апертуры (5-60с), в отсутствии ветра, обеспечить полет по прямолинейной траектории (режим, который в БПЛА роторного типа называется Attitude-Mode). Флуктуации траектории носителя в данном случае определяются исключительно случайным ветровым воздействием. Тогда, случайные фазовые ошибки являются следствием ненулевой случайной разности между данными навигационной системы БПЛА и фактическими данными полета.

Определим случайные траекторные ошибки следующим образом:

$$\begin{aligned} \Delta R(t) = & \frac{(Vt+x)t}{R_0(t,x,y)} v_x(t) - \frac{(Vt+x_0)}{R_0(t,x_0,y_0)} \sum_k (\Delta k v_x(\Delta k) + n x_k) \operatorname{sinc}\left(\frac{t-\Delta k}{\Delta}\right) + \\ & \frac{yt}{R_0(t,x,y)} v_y(t) - \frac{y_0}{R_0(t,x_0,y_0)} \sum_k (\Delta k v_y(\Delta k) + n y_k) \operatorname{sinc}\left(\frac{t-\Delta k}{\Delta}\right) + \\ & \frac{Ht}{R_0(t,x,y)} v_z(t) - \frac{H}{R_0(t,x_0,y_0)} \sum_k (\Delta k v_z(\Delta k) + n z_k) \operatorname{sinc}\left(\frac{t-\Delta k}{\Delta}\right), \end{aligned} \quad (14)$$

$$\varphi(t) = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R(t), \quad R_0(t,x,y) = \sqrt{(Vt+x)^2 + y^2 + H^2}.$$

где $(v_x(t), v_y(t), v_z(t))$ – случайные компоненты скоростей порывов ветра, $R_0(t,x,y)$ – вектор наклонной дальности от РСА до отражающей точки на плоскости с координатами (x,y) , H – высота полета БПЛА, $(n x_k, n y_k, n z_k)$ – случайные ошибки навигационной системы БПЛА, V – скорость полета БПЛА, $\operatorname{sinc}(t)$ – нормированный кардинальный синус, Δ – шаг отсчетов в системе навигации. Для восстановления траектории по данным навигационной системы мы используем усеченный ряд Котельникова.

Траекторные ошибки (14) имеют гауссовское распределение и нестационарны, в этом случае используем выражение для коэффициентов $\Theta_{k,l}$, полученное в 5 пункте таблицы 1.

Найдем ковариационную функцию фазовых флуктуаций в допущении, что в окрестности элемента разрешения $(x,y) \rightarrow (x_0,y_0)$, $R_0(t,x_0,y_0) \approx R_0(t,x,y)$, тогда:

$$\begin{aligned}
 B_{\Delta R}(t_1, t_2) = & \frac{(Vt_1 + x_0)(Vt_2 + x_0)}{R_0(t_1, x_0, y_0)R_0(t_2, x_0, y_0)} \left(t_1 t_2 B_{vx}(t_1, t_2) - \sum_k t_1 \Delta k B_{vx}(t_1, \Delta k) \operatorname{sinc}\left(\frac{t_2 - \Delta k}{\Delta}\right) - \right. \\
 & \left. \sum_k t_2 \Delta k B_{vx}(\Delta k, t_2) \operatorname{sinc}\left(\frac{t_1 - \Delta k}{\Delta}\right) + \right. \\
 & \left. \sum_{k_1} \sum_{k_2} \Delta^2 k_1 k_2 (B_{vx}(\Delta k_1, \Delta k_2) + B_{vx}(k_1, k_2)) \operatorname{sinc}\left(\frac{t_1 - \Delta k_1}{\Delta}\right) \operatorname{sinc}\left(\frac{t_2 - \Delta k_2}{\Delta}\right) \right) + \\
 & \frac{y_0^2}{R_0(t_1, x_0, y_0)R_0(t_2, x_0, y_0)} \left(t_1 t_2 B_{vy}(t_1, t_2) - \sum_k t_1 \Delta k B_{vy}(t_1, \Delta k) \operatorname{sinc}\left(\frac{t_2 - \Delta k}{\Delta}\right) - \right. \\
 & \left. \sum_k t_2 \Delta k B_{vy}(\Delta k, t_2) \operatorname{sinc}\left(\frac{t_1 - \Delta k}{\Delta}\right) + \right. \\
 & \left. \sum_{k_1} \sum_{k_2} \Delta^2 k_1 k_2 (B_{vy}(\Delta k_1, \Delta k_2) + B_{vy}(k_1, k_2)) \operatorname{sinc}\left(\frac{t_1 - \Delta k_1}{\Delta}\right) \operatorname{sinc}\left(\frac{t_2 - \Delta k_2}{\Delta}\right) \right) + \\
 & \frac{H^2}{R_0(t_1, x_0, y_0)R_0(t_2, x_0, y_0)} \left(t_1 t_2 B_{vz}(t_1, t_2) - \sum_k t_1 \Delta k B_{vz}(t_1, \Delta k) \operatorname{sinc}\left(\frac{t_2 - \Delta k}{\Delta}\right) - \right. \\
 & \left. \sum_k t_2 \Delta k B_{vz}(\Delta k, t_2) \operatorname{sinc}\left(\frac{t_1 - \Delta k}{\Delta}\right) + \right. \\
 & \left. \sum_{k_1} \sum_{k_2} \Delta^2 k_1 k_2 (B_{vz}(\Delta k_1, \Delta k_2) + B_{vz}(k_1, k_2)) \operatorname{sinc}\left(\frac{t_1 - \Delta k_1}{\Delta}\right) \operatorname{sinc}\left(\frac{t_2 - \Delta k_2}{\Delta}\right) \right). \tag{15}
 \end{aligned}$$

В этом выражении $B_{vx}(t_1, t_2)$, $B_{vy}(t_1, t_2)$, $B_{vz}(t_1, t_2)$ – ковариационные функции флуктуаций ветрового поля скоростей, $B_{nx}(k_1, k_2)$, $B_{ny}(k_1, k_2)$, $B_{nz}(k_1, k_2)$ – ковариация ошибок навигационных измерений.

При использовании системы спутниковой навигации навигационные отсчеты статистически независимы, поэтому $B_{nx}(k_1, k_2) = \sigma_{n_x}^2 \delta_{k_1, k_2}$, $B_{ny}(k_1, k_2) = \sigma_{n_y}^2 \delta_{k_1, k_2}$, $B_{nz}(k_1, k_2) = \sigma_{n_z}^2 \delta_{k_1, k_2}$, $\delta_{k_1, k_2} = \{1, k_1 = k_2; 0, k_1 \neq k_2\}$.

Для расчета ковариационных функций ветрового поля скоростей используем широко известную модель Драйдена [11], которая задает спектральные плотности мощности для трех компонент линейной скорости порывов в виде:

$$B_{vx}(\omega) = \sigma_x^2 \frac{2L_x}{\pi} \frac{1}{1 + \left(\frac{L_x \omega}{V}\right)^2}, \quad B_{vyz}(\omega) = \sigma_{yz}^2 \frac{2L_{yz}}{\pi} \frac{1 + 12 \left(\frac{L_{yz} \omega}{V}\right)^2}{\left(1 + 4 \left(\frac{L_{yz} \omega}{V}\right)^2\right)^2}. \tag{16}$$

Здесь $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ – интенсивность и L_x, L_y, L_z – масштаб воздушной турбулентности по осям, летательный аппарат движется вдоль оси x со скоростью V . Искомые ковариационные функции можно найти в виде:

$$B_{vx}(t) = \sigma_x^2 \frac{V}{\pi} e^{-\frac{V}{L_x}|t|}, \quad B_{vyz}(t) = \sigma_{yz}^2 \frac{V}{\pi} e^{-\frac{V}{2L_{yz}}|t|} \left(1 - \frac{3V|t|}{2L_{yz}} \right). \quad (17)$$

На рисунке 2 показаны результаты расчетов коэффициента потерь в пространственном разрешении РСА в отсутствии ветровых флуктуаций траектории. Коэффициент потерь мы вычисляем как отношение площади элемента разрешения, полученного по формуле (8), к ожидаемому значению. Приведенные графики рассчитаны для следующих параметров съемки ($H = 30$ м, $V = 10$ м/с, $y_0 = 3$ км, $x_0 = 0$).

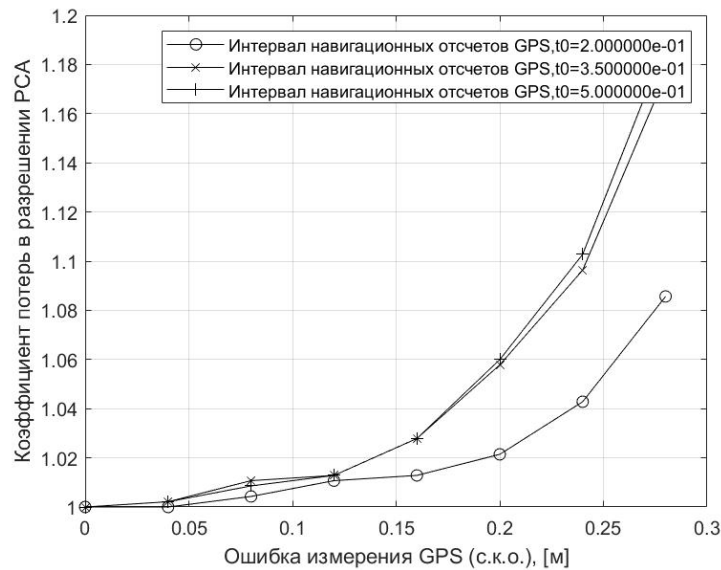


Рис.2. Коэффициент потерь в пространственном разрешении РСА в отсутствии ветровых флуктуаций траектории, в зависимости от $\sigma = \sigma_{nx} = \sigma_{ny} = \sigma_{nz}$, в [м], для различных значений интервала между навигационными отсчетами, приведенного в [с].

На рисунке 3 показаны результаты расчетов коэффициента потерь в пространственном разрешении РСА в условиях воздействия флуктуаций ветрового поля, которые в [12] определены как «слабая турбулентность», для высоты 50 м параметры модели имеют значения $\sigma_x = 0.7$, $\sigma_y = 1.06$, $\sigma_z = 1.06$, $L_x = 50$, $L_y = 200$, $L_z = 200$ м.

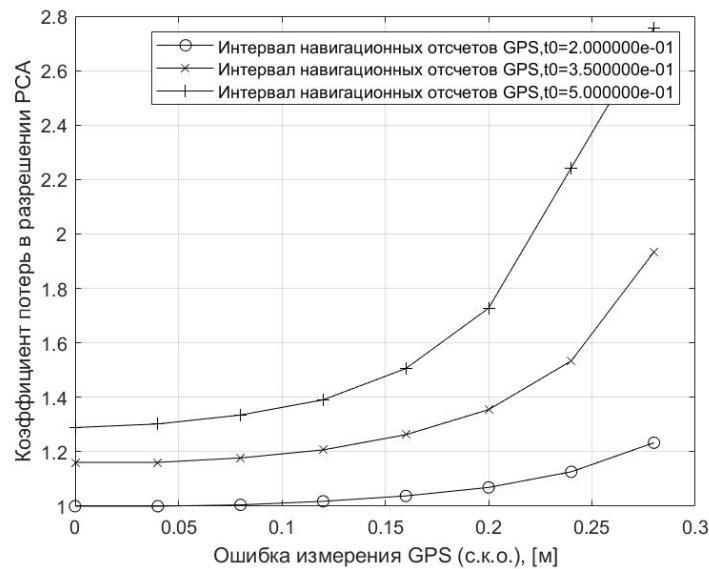


Рис.3. Коэффициент потерь в пространственном разрешении РСА в условиях слабой турбулентности ветрового поля, в зависимости от $\sigma = \sigma_{nx} = \sigma_{ny} = \sigma_{nz}$, в [м], для различных значений интервала между навигационными отсчетами, приведенного в [с].

На рисунке 4 показаны результаты расчетов коэффициента потерь в пространственном разрешении РСА в условиях воздействия флуктуаций ветрового поля, которые в [12] определены как «умеренная турбулентность», для высоты 50 м параметры модели имеют следующие значения $\sigma_x = 1.4$, $\sigma_y = 2.12$, $\sigma_z = 2.12$, $L_x = 50$, $L_y = 200$, $L_z = 200$ м.

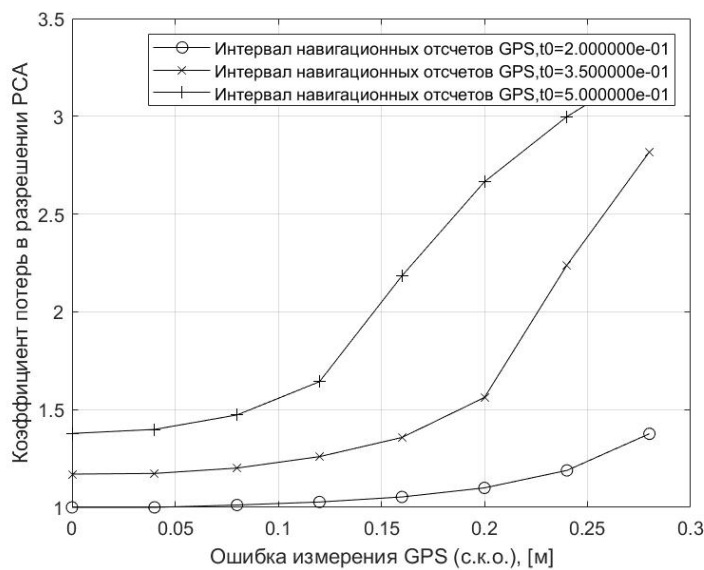


Рис.4. Коэффициент потерь в пространственном разрешении РСА в условиях умеренной турбулентности ветрового поля, в зависимости от $\sigma = \sigma_{nx} = \sigma_{ny} = \sigma_{nz}$, в [м], для различных значений интервала между навигационными отсчетами, приведенного в [с].

При проведении расчетов мы предполагаем, что скорость полета является суммой скорости БПЛА и регулярной составляющей скорости ветра, направленной в попутном направлении.

Следует отметить, что в соответствии с (14) фазовые ошибки зависят от положения элемента разрешения на изображающей плоскости, поэтому необходимо проводить анализ на максимальной дальности, на краю зоны обзора по азимуту. Таким образом, если принять допустимым значение коэффициента потерь 1.5, то допустимое с.к.о. ошибки знания траектории носителя составляет величину порядка 0.3 м, интервал между навигационными отсчетами должен составлять величину не хуже 0.2 с. При проведении расчетов мы не учитывали нестабильность, которая может возникать в результате воздействия автопилота БПЛА. В этой связи можно отметить, что количественный учет влияния автопилота провести довольно трудно, по причине отсутствия достаточно простых моделей, описывающих его воздействие, с другой стороны, влияние автопилота есть смысл рассматривать только в случае, когда он уменьшает ветровую нестабильность траектории, и в этом случае, полученные требования к навигационной системе можно использовать как оценку сверху.

Заключение

Таким образом получено аналитическое решение задачи анализа влияния случайных фазовых ошибок на разрешающую способность РСА, определяемую по площади главного лепестка усредненной функции рассеяния изображения точечной цели в пространстве радиолокационных координат. Решение полностью учитывает статистические характеристики фазовых флуктуаций траекторного сигнала РСА, в том числе их многомерный закон распределения вероятностей. Полученные выражения могут быть использованы для анализа влияния траекторных нестабильностей, вибраций, атмосферных флуктуаций, нестабильностей в приемо-передающем тракте РСА. Расчеты могут быть выполнены для любой заданной траектории полета носителя РСА, с учетом

особенностей обзора и эффекта миграции дальности. В качестве иллюстрации предлагаемой методики проведен анализ влияния на деградацию разрешающей способности РСА траекторных нестабильностей БРЛА, вызванных флуктуациями поля ветровых скоростей. Для этого получены аналитические выражения ковариационной функции фазовых флуктуаций, учитывающие интерполяцию навигационных отсчетов с помощью усеченного ряда Котельникова и модель ветровых флуктуаций Драйдена.

Литература

1. Верба В.С. и др. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования. – 2010.
2. Буренин Н.И. Радиолокационные станции с синтезированной антенной. – 1972.
3. Антипов В.Н. и др. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны. – Радио и связь, 1988.
4. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. – 2005.
5. Гусев С.Н., Журавлев С.В., Попов А.В. Определение пространственной разрешающей способности на радиолокационных изображениях при дистанционном зондировании Земли //Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2021. – Т. 24. – №. 3. – С. 72-80.
6. Кук Ч., Бернфельд М. Радиолокационные сигналы. – 1971.
7. Гуляев Г.А. и др. Исследование влияния траекторных нестабильностей полета носителя малогабаритной РЛС с синтезированной апертурой на качество формируемых радиолокационных изображений //Цифровая обработка сигналов. – 2021. – №. 2. – С. 25-31.
8. Jinping S. et al. Turbulence effects on high resolution airborne SAR performance //2011 International Conference on Electronics, Communications and Control (ICECC). – IEEE, 2011. – С. 1190-1193.

9. Ji Y. et al. Spaceborne P-band SAR imaging degradation by anisotropic ionospheric irregularities: A comprehensive numerical study //IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2020. – Т. 58. – №. 8. – С. 5516-5526.
10. Goriachkin O.V. et al. SAR system for searching and detecting objects in the forest area, based on UAVs //2022 VIII International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT). – IEEE, 2022. – С. 1-4.
11. Биард Р.У., МакЛэйн Т. У. Малые беспилотные летательные аппараты: теория и практика. – 2015.
12. Langelaan J.W., Alley N., Neidhoefer J. Wind field estimation for small unmanned aerial vehicles //Journal of guidance, control, and dynamics. – 2011. – Т. 34. – №. 4. – С. 1016-1030.

Для цитирования:

Горячкин О.В. Влияние случайных фазовых ошибок на разрешающую способность радиолокатора с синтезированной апертурой. // Журнал радиоэлектроники. –2024. – №. 10. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.10.16>