

УДК 621.396.9

Помехоустойчивость алгоритма автофокусировки изображений по минимуму энтропии при сложной фоновой обстановке

Лихачев В.П.*, Сидоренко С.В.**

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»,

ул. Старых Большевиков, 54А, Воронеж, 394064, Россия

**e-mail: lvp_home@mail.ru*

***e-mail: sidor-vire@rambler.ru*

Аннотация

В статье исследованы вопросы функционирования радиолокационной станции с цифровым синтезированием апертуры антенны (РСА) с автофокусировки радиолокационных изображений (РЛИ) по минимуму функции энтропии в условиях шумовых маскирующих помех и сложной фоновой обстановки. Определены границы практического применения алгоритма автофокусировки по минимуму функции энтропии для малогабаритной РСА и типовых постановщиков помех.

Ключевые слова: радиолокационная станция с цифровым синтезированием апертуры антенны, энтропия, радиолокационные изображения, автофокусировка, беспилотный летательный аппарат.

Введение

Современные РСА обеспечивают большую, по сравнению с оптическими системами, дальность действия, более быстрое (в течение нескольких секунд) получение РЛИ поверхности земли большой площади с субметровым разрешением, а также независимость качества снимков от метеоусловий и состояния естественной освещенности места съемки [1-11].

Сравнительно небольшие массогабаритные показатели современных РСА позволили устанавливать их на беспилотные летательные аппараты (БЛА) малого класса [11-13], применение которых существенно снижает затраты на эксплуатацию и содержание средства носителя. Однако использование таких БЛА в качестве носителя РСА связано со значительными нестабильностями траектории и скорости полета, обусловленной турбулентностью атмосферы.

Для формирования качественных РЛИ с заданным разрешением в масштабе времени, близком к реальному, необходимо наличие точной информации о параметрах движения носителя и, в первую очередь, о его скорости полета.

Размещение на БЛА малого класса высокоточной инерциальной навигационной системы невозможно, а применение навигационных приемников GPS, ГЛОНАСС в условиях помех [14-16] не обеспечивает требуемой точности оценки скорости носителя РСА при формировании РЛИ. Для компенсации погрешности оценки скорости используют различные алгоритмы автофокусировки РЛИ [17-18], например, автофокусировку РЛИ по минимуму функции энтропии [19]. Для его работы не требуется наличие в зоне обзора мощных точечных отражателей, но для оценки эффективности, например, при решении задач

коррекции навигационных ошибок по РЛИ в условиях большого отношения шум/сигнал q требуются дополнительные исследования.

Актуальность статьи определяется необходимостью формирования РЛИ с заданным разрешением в масштабе времени, близком к реальному, малогабаритной РСА, установленной на БЛА, в которых отсутствует возможность компенсировать траекторные неустойчивости по информации от инерциальной навигационной системы (ИНС) и т.п. При наличии шумовой маскирующей помехи и при фоновых отражениях необходимо определить границы устойчивого функционирования алгоритма автофокусировки РЛИ по минимуму энтропии.

Научная новизна статьи заключается в том, что авторами выполнено имитационное моделирование, на основе которого выявлены зависимости математического ожидания и среднеквадратического отклонения скорости носителя РСА от отношения шум/сигнал при различном времени синтезирования апертуры антенны и количестве доминирующих точечных фоновых отражателей. Введен новый термин Q_{cp} - пороговое отношение шум/сигнал, при котором погрешность оценки скорости носителя РСА превышает 1 % от истинного значения.

Цель работы – определение границ устойчивого функционирования алгоритма автофокусировки РЛИ по минимуму энтропии при наличии шумовой маскирующей помехи и различных фоновых отражениях.

Использование алгоритма автофокусировки изображений по минимуму энтропии при формировании РЛИ

Рассмотрим использование данного алгоритма в процессе формирования РЛИ методом прямой свертки. Траекторный сигнал (ТС) точечного отражателя в n -м

элементе разрешения по путевой дальности при равномерном прямолинейном движении и боковом обзоре можно записать в виде:

$$\dot{s}_n(t_m) = A_i \theta_\beta(t_m) \exp \left\{ -j \frac{2\pi V_n^2}{\lambda R_{0n}} t_{0m}^2 \right\} + \dot{n}(t_m) \quad (1)$$

где $A_i = K_{PCA} \sqrt{\sigma_{\phi i}}$ – амплитуда ТС, определяемая энергетическими характеристиками РСА, условиями распространения зондирующего сигнала и отражающей способностью i -й точечной цели (ТЦ); K_{PCA} – коэффициент усиления РСА; $\sigma_{\phi i}$ – эффективная площадь рассеяния (ЭПР) i -го доминирующего точечного фонового отражателя; $\theta_\beta(t_m) \approx \exp \left[-1,39 \left(\frac{V_n t_{0m}}{R_{0n} \Theta_\beta} \right)^2 \right]$ – амплитудная модуляция ТС, обусловленная формой азимутальной диаграммы направленности (ДН) реальной антенны РСА; Θ_β – азимутальная ширина ДН реальной антенны РСА по уровню половинной мощности, выраженная в радианах; λ – длина волны зондирующего сигнала; V_n – скорость полета носителя РСА; R_{0n} – расстояние между фазовым центром реальной антенны РСА и ТЦ в середине интервала синтезирования; $\dot{n}(t_m)$ – комплексная амплитуда шума, обусловленного как тепловым шумом приемника, так и преднамеренной шумовой маскирующей помехой; $n = 1, N_x$ – номер отсчета вдоль линии пути; $m = 1, N_r$ – номер отсчета по наклонной дальности; N_r, N_x – количество элементов кадра РЛИ по наклонной дальности и вдоль линии пути соответственно; $i = 1, I_c$ – номер доминирующего точечного фонового отражателя; I_c – количество доминирующих точечных фоновых отражателей, $t_{0m} = t_0 \pm m\Delta t$.

При формировании РЛИ формируется опорная функция, которая для n -го элемента разрешения по дальности при равномерном прямолинейном движении носителя РСА и боковом обзоре описывается выражением:

$$\dot{h}_n(t_m) = \begin{cases} \exp\left\{j \frac{2\pi V_u^2}{\lambda R_{0n}} t_{0m}^2\right\}, t_m \in \left[-T_c/2; T_c/2\right], \\ 0, t_m \notin \left[-T_c/2; T_c/2\right] \end{cases}, \quad (2)$$

где $V_u = V_0 + u\Delta V$, $u = 1, U - 1$ – номер отсчета скорости; U – количество отсчетов скорости, V_0 – начальное значение скорости, ΔV – шаг дискретизации скорости; T_c – время синтезирования апертуры антенны.

Синтез комплексного отсчета РЛИ в точке n , m включает построчное вычисление быстрого преобразования Фурье сфокусированной радиоголограммы:

$$\dot{I}_{nm}^u = F_u \left\{ \dot{s}_n(t_m) \dot{h}_n(t_m) \right\} \quad (3)$$

Суммарная мощность отсчетов РЛИ определяется как:

$$P_u = - \sum_n^{N_r} \sum_m^{N_x} \left| \hat{I}_{nm}^u \right|^2, \quad (4)$$

Нахождение минимума функции энтропии РЛИ предполагает осуществление оценки элементов вектора \mathbf{H} в соответствии с определением Шеннона [19]:

$$H(V_u) = - \sum_n^{N_r} \sum_m^{N_x} p_{nm} \log(p_{nm}), \quad (5)$$

где $p_{nm} = \frac{\left| \hat{I}_{nm}^u \right|^2}{P_u}$.

Показатель $H(V_u)$ принимает минимальное значение именно в том случае, когда РЛИ является точно сфокусированным, то есть распределение энергии между отсчетами РЛИ наиболее неравномерно.

Структурная схема алгоритма представлена на рисунке 1.

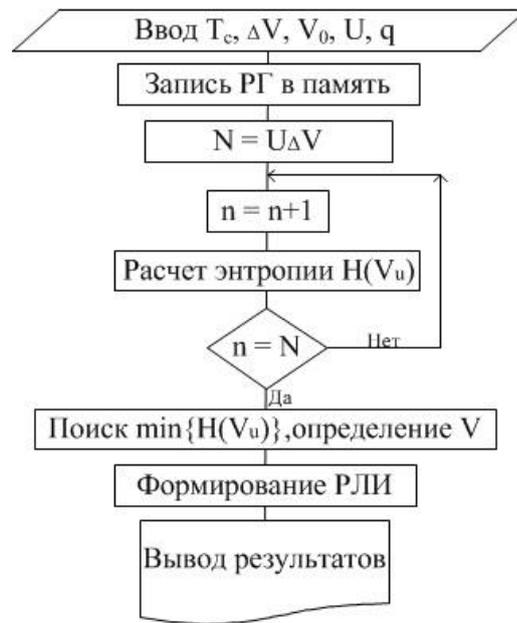


Рисунок 1 – Структурная схема алгоритма автофокусировки РЛИ по минимуму энтропии

Моделирование алгоритма автофокусировки РЛИ по минимуму энтропии

Модель фоновой обстановки опишем следующим образом.

Положим, что имеется два типа элементов фона: I_c доминирующих точечных фоновых отражателя с ЭПР $\sigma_{\phi i}$ и элементы фона, коэффициенты отражения которых описываются нормальным законом с дисперсией $\sigma_{\phi s}^2$ причем $\frac{\sigma_{\phi i}}{\sigma_{\phi s}} < 20$ дБ. В интересах определения помехоустойчивости алгоритма автофокусировки РЛИ по минимуму энтропии помеховую составляющую в (1) зададим некоррелированным гауссовским шумом с нулевым средним и дисперсией σ_{u}^2 . Тогда опишем мощность сигнала на входе приемного устройства РСА суммарной мощностью сигналов, отраженных от элементов фона, и мощностью шума:

$$P_{ex.np} = \sum_{i=1}^{I_c} P_i + \sum_{s=1}^S P_s + P_u, \quad (6)$$

где P_i – мощность сигнала, отраженная i -м ТО; $S = N_r N_x - I_c$ – количество элементов кадра с нормальным законом распределения ЭПР; P_s – мощность сигнала, отраженная s -м элементом кадра с нормальным законом распределения ЭПР.

Допустим, что мощность помехи намного больше мощности сигналов, отраженных от S элементов фона. Тогда отражениями от этих элементов фона можно пренебречь:

$$P_{\text{эк.лр}} = \sum_{i=1}^{I_c} P_i + P_{\text{ш}}, \quad (7)$$

$$P_i = \frac{PG^2 \lambda^2 \sigma_{\phi i} N_{\kappa}}{64\pi^3 R_{0n}^4}, \quad (8)$$

где $N_{\kappa} = F_n T_c$; F_n , P и G – частота повторения зондирующих сигналов, мощность передатчика и коэффициент усиления антенны РСА.

Мощность шумовой маскирующей помехи на входе приемника РСА:

$$P_{\text{ш}} = \frac{P_n G_{\text{ш}} G_n \lambda^2}{4\pi R_n^2}, \quad (9)$$

где P_n – мощность помехи, $G_{\text{ш}}$ – коэффициент усиления антенны постановщика помех, G_n – коэффициент усиления антенны РСА в направлении постановщика помех, R_n – дальность от постановщика помех до РСА.

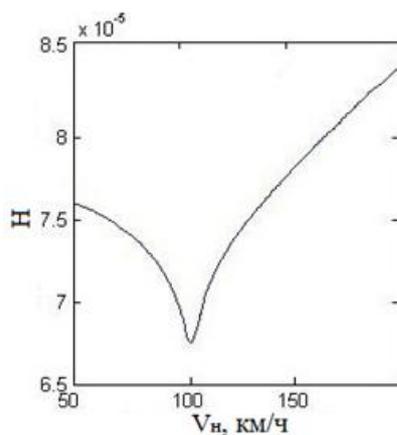
Соотношение шум/сигнал:

$$q = \frac{P_{\text{ш}}}{\sum_{i=1}^{I_c} P_i}, \quad (10)$$

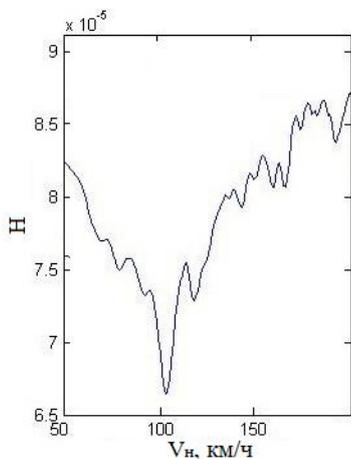
Параметры, при которых исследуется помехоустойчивость РСА с алгоритмом автофокусировки РЛИ по минимуму функции энтропии: $\lambda = 0,23$ м; $q = 1-80$ дБ; $\sigma_{\phi i} = 1$ м²; $I_c = 1, 2, 3, 5$; $V_n = 80, 100, 120$ км/ч; $T_c = 1 \dots 3$ с; начальное (конечное)

значение диапазона скоростей для расчета минимума функции энтропии 70 (130) км/ч; шаг дискретизации по времени синтезирования 0,1 с.

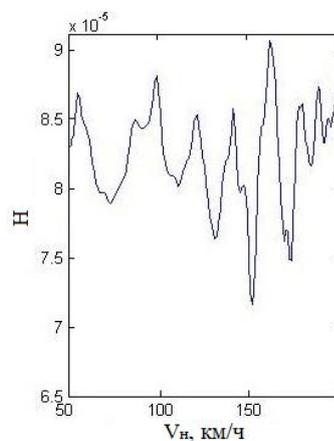
Зависимости энтропии РЛИ от V_n при отсутствии (рисунок 2а) и наличии (рисунок 2, б и в) фазовых искажений ТС, обусловленных преднамеренными шумовыми помехами, представлены на рисунке 2.



а) $q = -30$ дБ



б) $q = 25$ дБ



в) $q = 50$ дБ

Рисунок 2 – Влияние шумовой маскирующей помехи на работу алгоритма автофокусировки РЛИ по минимуму функции энтропии, $V_n = 100$ км/ч, $T_c = 3$ с

Наибольший интерес в процессе моделирования представляет выявление соотношения шум/сигнал, при котором обеспечивается устойчивость

функционирования алгоритма автофокусировки РЛИ по минимуму энтропии для различного диапазона скоростей движения носителя РСА, времени синтезирования апертуры антенны и количества доминирующих точечных фоновых отражателя.

Введем пороговое отношение шум/сигнал Q_{cp} , при котором погрешность оценки скорости носителя РСА превышает 1 % от истинного значения, то есть происходит срыв автофокусировки, и исследуем ее зависимость от различных параметров.

Для выявления зависимости Q_{cp} от T_c было произведено моделирование работы алгоритма (рисунок 1). Количество итераций для определения зависимости математического ожидания (M_v) и среднеквадратического отклонения (σ_v) оценки скорости носителя РСА по каждому соотношению шум/сигнал составляло 100. Граничные результаты моделирования по T_c для $V_n = 120$ км/ч, и $I_c = 3$ представлены на рисунке 3 а) и б).

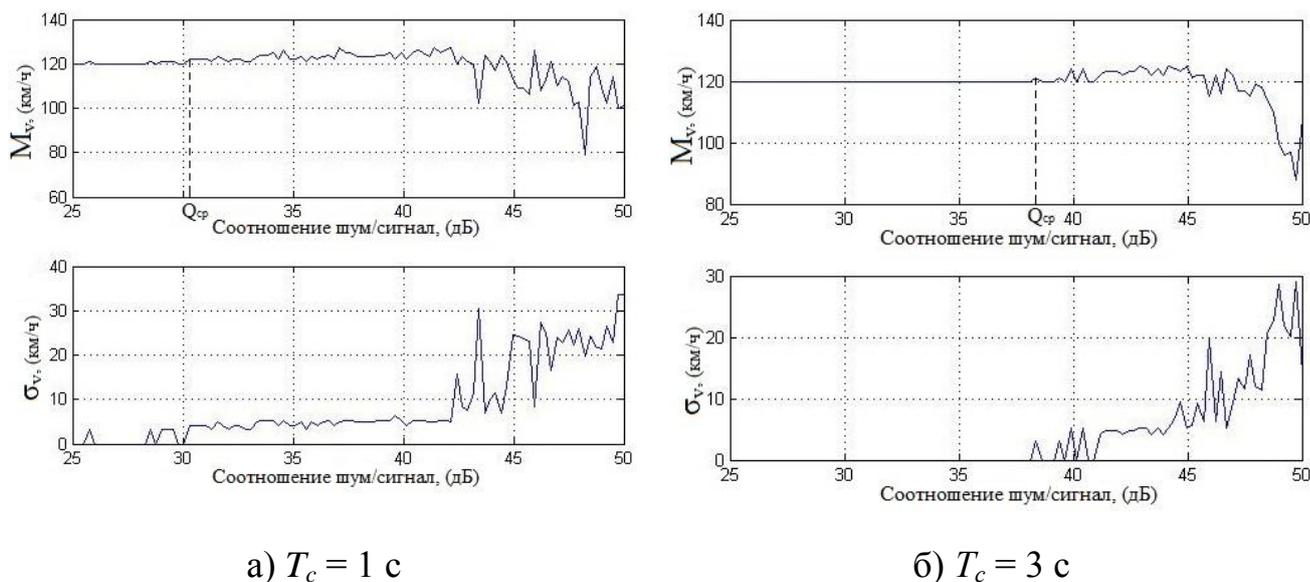


Рисунок 3 – Зависимости M_v и σ_v от q при различном T_c

На рисунке 4 представлены зависимости Q_{cp} от T_c для различных скоростей полета носителя РСА при $I_c = 3$.

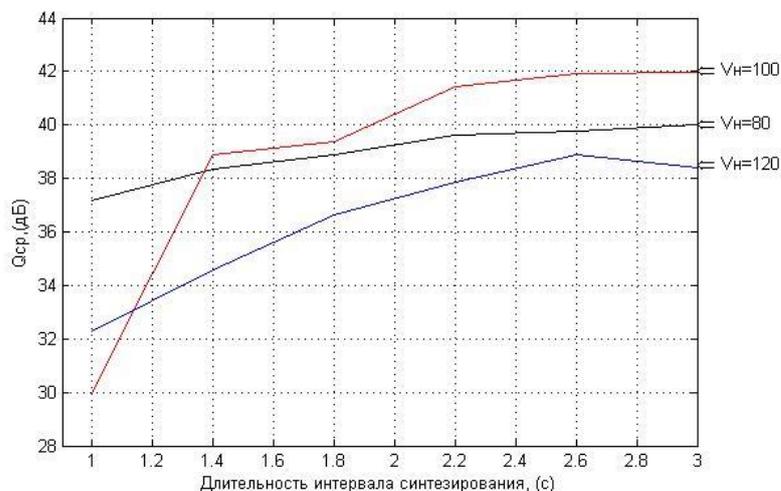
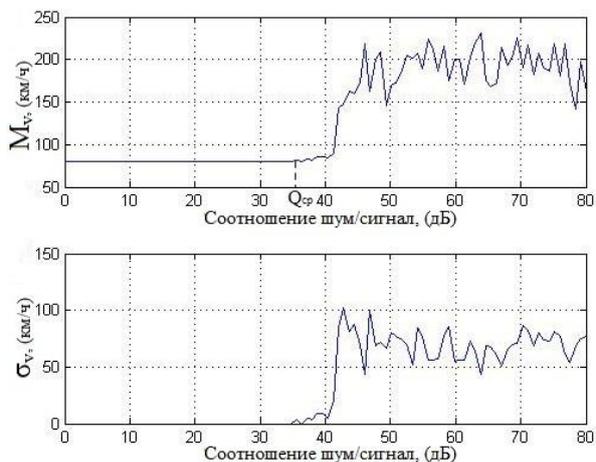


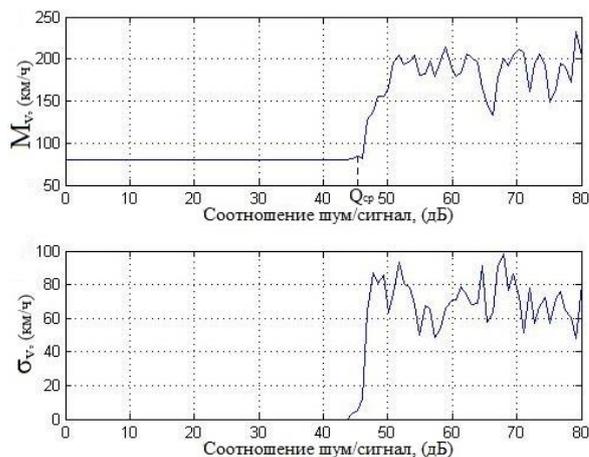
Рисунок 4 – Зависимость Q_{cp} от T_c при различных V_n

Из графиков на рисунках 3-4 следует, что увеличение T_c при различных V_n , снижает влияние фазовых искажений, вызванных шумовой маскирующей помехой, при этом алгоритм автофокусировки РЛИ по минимуму функции энтропии работает устойчивее. Так, при увеличении T_c с 1 до 3 секунд величина Q_{cp} увеличивается от 2,5 дБ (при $V_n = 80$ км/ч) до 6...12 дБ (при $V_n = 100...120$ км/ч).

На рисунке 5 представлены зависимости M_v и σ_v от q при различных значениях I_c .



а) $I_c = 1$



б) $I_c = 5$

Рисунок 5 – Зависимости M_v и σ_v от I_c

Графики получены при следующих исходных данных: $V_n = 80$ км/ч, $T_c = 3$ с.

На рисунке 6 представлены зависимости Q_{cp} от I_c в зоне обзора для различных скоростей полета носителя РСА, $T_c = 3$ с.

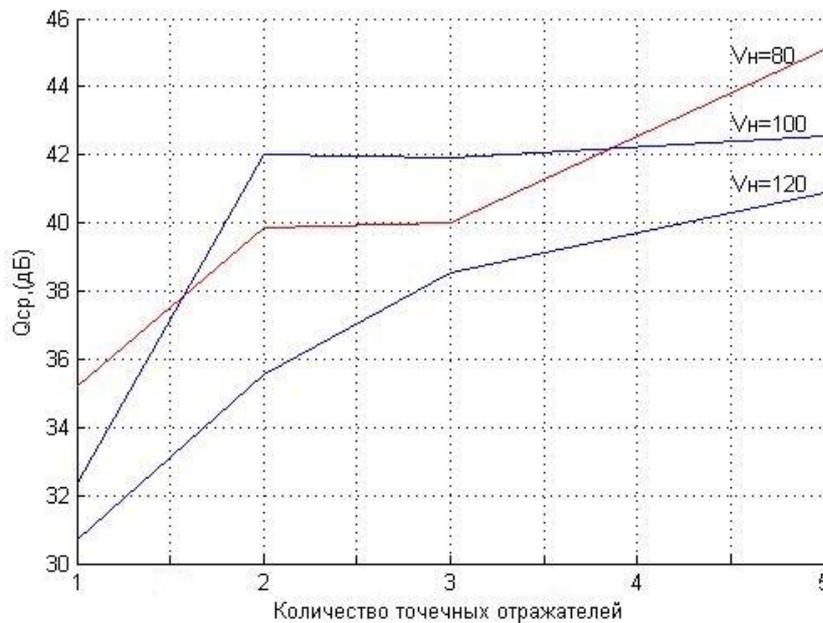


Рисунок 6 – Зависимость Q_{cp} от I_c при различных V_n

С увеличением I_c в зоне обзора требуемое q , при котором обеспечивается устойчивость функционирования предложенного алгоритма, уменьшается, то есть требования к ЭПР радиоконтрастных отдельных отражателей в кадре РЛИ снижаются. При $V_n = 100$ км/ч и изменении I_c от 1 до 5 - Q_{cp} увеличилось на 10 дБ.

Рассчитаем требуемые дальности размещения постановщиков помех (ПП) с различным энергопотенциалом, для определения реализуемости отношений q , заданных в качестве исходных данных при моделировании (рисунки 3-6).

Требуемое расстояние от ПП до РСА согласно (8 - 9) можно записать в виде:

$$R_n = \sqrt{\frac{16P_n G_{ul} \pi^2 R_{0n}^4}{PGqN_\kappa \sum_{i=1}^{I_c} \sigma_{\phi i}}}, \quad (11)$$

$$N_\kappa = \frac{\lambda R_{0n} F_n}{2\delta V_n \sin \Theta_n}, \quad (12)$$

где δ – требуемое азимутальное разрешение на дальности R_{0n} , Θ_n – угол наклона луча ДН в вертикальной плоскости.

Подставив (12) в (10) получим:

$$R_n = \sqrt{\frac{32P_n G_{ul} \pi^2 R_{0n}^3 \delta V_n \sin \Theta_n}{PGq\lambda F_n \sum_{i=1}^{I_c} \sigma_{\phi i}}}, \quad (13)$$

Исходные данные по ПП, необходимые для расчетов R_n , представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Исходные данные по техническим характеристикам ПП

	РСА	ПП №1	ПП №2	ПП №3
$P(P_n), (\text{Вт})$	10	3	100	100
$G(G_{ul})$	50	1	10	50

В таблице 2 представлены значения R_n для вариантов реализации СП с различным энергопотенциалом, при условии $G_n = G$; $R_{0n} = 1$ км; $\sigma_{\phi i} = 1$ м²; $I_c = 1, 3, 5$; $V_n = 100$ км/ч; $\delta = 1$ м; $\Theta_n = 57^\circ$; $F_n = 77$ Гц.

Энергетические характеристики ПП №1 соответствуют характеристикам забрасываемых передатчиков помех, №2 – варианту размещения ПП на автомобильном шасси, №3 – варианту размещения ПП на летательном аппарате, поэтому при расчете

R_{n1} , R_{n2} выбирался коэффициент усиления антенны РСА G (помеха по главному лепестку), а при расчете $R_{n3} - G = 0,1G$ (помеха по боковому лепестку).

Таблица 2 – Дальности от РСА до типовых ПП, при которых обеспечивается заданное q

q , дБ	10	20	30	40	50	60	70	80
Для $I_c=1$								
R_{n1} , км	16	5,1	1,6	0,5	0,16	0,05	0,01	0,005
R_{n2} , км	299	94	29	9,4	2,9	0,9	0,3	0,094
R_{n3} , км	668	211	66	21	6,6	2,1	0,6	0,2
Для $I_c=3$								
R_{n1} , км	9,4	2,9	0,99	0,29	0,09	0,03	0,009	0,003
R_{n2} , км	172	54	17	5,4	1,7	0,54	0,17	0,054
R_{n3} , км	386	122	38	12	3,8	1,2	0,3	0,1
Для $I_c=5$								
R_{n1} , км	7,3	2,3	0,7	0,2	0,07	0,02	0,007	0,002
R_{n2} , км	130	42	13	4,2	1,3	0,4	0,13	0,04
R_{n3} , км	299	94	29	9,4	2,9	0,9	0,3	0,09

Задавая высоту полета БЛА 0,5 км для ПП №1, №2 и дальность прямой видимости 50 км для ПП №3, следует сделать вывод о реализуемости R_{n1} при условии, что в зоне обзора РСА $I_c = 1, 3, 5$ (таблица 2):

- ПП №1 может обеспечить отношение помеха/сигнал $q = 30$ дБ; 30 дБ; 20 дБ только при дальности $R_{n1} = 1,6$ км; 0,99 км; 2,3 км соответственно. Обеспечить Q_{cp} больше, чем 30 дБ (рисунки 4 и 6) с помощью ПП№1 невозможно.

- ПП №2 может обеспечить отношение помеха/сигнал, требуемое для достижения $Q_{cp} = 30...40$ дБ, находясь на расстоянии R_{n2} 9,4...29 км; 5,4...17 км; 4,2...13 км соответственно.

- ПП №3 может обеспечить отношение помеха/сигнал, требуемое для достижения $Q_{cp} = 30...40$ дБ, находясь на расстоянии R_{n2} 21...66 км; 12...38 км; 9,4...29 км соответственно..

Размещение ПП дальше указанных значений R_n не приводит к срыву работы алгоритма автофокусировки РЛИ по минимуму функции энтропии.

Следует отметить, что для устойчивой работы исследуемого алгоритма при наличии помехи от ПП №1 необходимо, чтобы время синтезирования апертуры антенны составляло не менее 1 с и в зоне обзора находилось не менее 3 доминирующих точечных фоновых отражателей, а при наличии помехи от ПП№2 или ПП№3 время синтезирования апертуры антенны должно составлять не менее 3 с и в зоне обзора должно находиться не менее 5 доминирующих точечных фоновых отражателей.

Полученные результаты показывают границы практического применения алгоритма автофокусировки РЛИ по минимуму функции энтропии в условиях шумовых маскирующих помех и сложной фоновой обстановки.

Библиографический список

1. Купряшкин И.Ф., Лихачев В.П. Космическая радиолокационная съемка земной поверхности в условиях помех. - Воронеж: Научная книга, 2014. - 460 с.
2. Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук В.Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования. - М.: Радиотехника, 2010. - 675 с.
3. Michael Israel Duersch, BYU micro-SAR: A very small, low-power LFM-CW Synthetic Aperture Radar Brigham Young University // All Theses and Dissertations, 12 March 2004, pp. 728.
4. Margaret Cheney and Brett Borden. Fundamentals of Radar Imaging // Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM), 2009, pp. 63-66.
5. Palubinskas G., Meyer F., Runge H., Reinartz P., Scheiber R., Bamler R. Estimation of along-track velocity of road vehicles in SAR data, Proc. of SPIE, Bruges, October 2005, vol. 5982, pp. 1 – 9.
6. Zhong Lu, Oh-Ig Kwoun, Russel Rykhus. Interferometric Synthetic Aperture Radar: Its Past, Present and Future // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2007, vol. 73, issue 3, pp. 217 – 221.
7. Evan C. Zaugg. Generalized Image Formation for Pulsed and LFM-CW Synthetic Aperture Radar, Ph.D. Dissertation, Brigham Young University, Provo, Utah, 2010, 176 p.
8. Антипов В.Н., Горяинов В.Т., Кулин А.Н. и др. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны – М.: Радио и связь, 1988. - 304 с.
9. Ярлыков М.С. Спутниковые радионавигационные системы. - М: Радиотехника, 2013. Т. 1. - 190 с. Т. 2. – 182 с.
10. Аппаратура дистанционного сбора разведывательных данных // Научно-техническая информация ВИНТИ, 2002, № 3, pp. 66 - 70.

11. Богомоллов А.В., Купряшкин И.Ф., Лихачев В.П., Рязанцев Л.Б. Малогабаритная двух диапазонная РСА для беспилотного авиационного комплекса // Труды XXIX Всероссийского симпозиума «Радиолокационное исследование природных сред» Санкт-Петербург, ВКА имени А.Ф. Можайского, 2015, 711 с.
12. Болкунов А.А., Рязанцев Л.Б., Сидоренко С.В. Оценка радиолокационной заметности вооружения, военной и специальной техники с применением беспилотных летательных аппаратов // Военная мысль. 2017. № 9. С. 70 - 74.
13. Лихачев В.П., Рязанцев Л.Б., Чередников И.Ю. Применение беспилотных летательных аппаратов для ведения тактической радиолокационной разведки // Военная мысль. 2016. № 3. С. 24 - 28.
14. Журавлев А.В. Новые способы обеспечения электромагнитной совместимости техники радиоподавления и аппаратуры потребителей ГНСС. - Воронеж: Научная книга, 2017. - 152 с.
15. Романов А.С., Турлыков П. Ю. Исследование влияния имитирующих помех на аппаратуру потребителей навигационной информации // Труды МАИ. 2013. № 56. URL: <http://trudi.mai.ru/published.php?ID=66445>
16. Лихачев В.П., Семенов В.В., Веселков А.А. Показатель помехоустойчивости РЛС с синтезированной апертурой антенны к параметрическим формируемым помехам, имитирующим точечные объекты // Антенны. 2017. № 12 (244). С. 31 - 37.
17. Кондратенков Г.С. Авиационные системы радиовидения. – М.: Радиотехника, 2015. - 648 с.
18. Купряшкин И.Ф., Лихачев В.П., Мубарак Н Х. Эффективность фазоразностной автофокусировки при синтезировании апертуры антенны в условиях ретрансляционных помех // Антенны. 2007. № 4. С. 39 - 43.

19. Школьный Л.А., Толстов Е.Ф., Детков А.Н. и др. Радиолокационные системы воздушной разведки, дешифрирование радиолокационных изображений. - М.: ВВИА им. Проф. Н.Е. Жуковского, 2008. - 531 с.