

УДК 621.396.96

## АЛГОРИТМ ФОРМИРОВАНИЯ ДЕТАЛЬНЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ С КОМПЕНСАЦИЕЙ ТРАЕКТОРНЫХ НЕСТАБИЛЬНОСТЕЙ ПОЛЕТА НОСИТЕЛЯ РЛС ПО УГЛУ СНОСА

*Муравьев Н.П., инженер конструкторского отдела АО «РИФ» (г. Воронеж), [nikitamuraviev10@gmail.com](mailto:nikitamuraviev10@gmail.com);  
Рязанцев Л.Б., к.т.н., доцент Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), [kernel386@mail.ru](mailto:kernel386@mail.ru)*

## ALGORITHM FOR GENERATING DETAILED RADAR IMAGES WITH COMPENSATION OF FLIGHT'S TRAJECTORY INSTABILITIES OF THE SAR'S CARRIER BY THE LEEWAY

*Muraviev N.P., Ryzantsev L.B.*

*The article is devoted to the development of an algorithm that provides up to two... three times declined the computational costs of the on-board computer when generating radar images by excluding image elements from the calculation that are not included in the main beam of the antenna pattern. The calculation of the elements is carried out taking into account the presence of trajectory instabilities in the angle of demolition caused by a crosswind during the flight of a small-sized unmanned aerial vehicle. The leeway is determined based on an estimate of the average Doppler frequency in the signal at the output of the radar receiver.*

**Key words:** synthetic aperture radar, trajectory instability, leeway, radar images.

**Ключевые слова:** РЛС с синтезированной апертурой антенны, траекторные неустойчивости, угол сноса, радиолокационное изображение.

### Введение

В последнее время наблюдается активное использование средств радиолокации на малогабаритных беспилотных летательных аппаратах (БЛА) для решения задач воздушного мониторинга, картографирования, контроля за коммуникациями и других задач в военной и гражданской сфере [1-4]. Существующие технологии цифровой обработки сигналов за счет применения методов синтеза апертуры антенны позволяют реализовать формирование радиолокационных изображений (РЛИ) с высоким пространственным разрешением в единицы дециметров и лучше в масштабе времени близком к реальному [5], а технологии миниатюризации – снизить массогабаритные характеристики аппаратуры до нескольких килограмм, что позволяет осуществить их установку на малоразмерные БЛА, в том числе и мультикоптеры [2]. Несмотря на высокие потенциальные возможности таких РЛС, получение детальных РЛИ связано со значительными вычислительными затратами, которые существенно увеличиваются при наличии траекторных неустойчивостей полета носителя РЛС [6]. Так, при жестко закрепленной антенне и отсутствии управления положением луча диаграммы направленности в азимутальной плоскости, что характерно при установке РЛС на малоразмерные БЛА, наличие бокового ветра приводит к изменению угла сноса и отклонению луча диаграммы направленности антенны от направления, перпендикулярного вектору скорости носителя (рис. 1). Это приводит к тому, что при реализации алгоритмов формирования РЛИ, которые являются весьма требовательными к производительности бортовых вычислителей, приходится существенно увеличивать размер кадра изображения по путе-

*Статья посвящена разработке алгоритма, обеспечивающего до двух...трех раз снижение вычислительных затрат бортового вычислителя при формировании радиолокационных изображений за счет исключения из расчета элементов изображения, не входящих в основной луч диаграммы направленности антенны. Расчет элементов осуществляется с учетом наличия траекторных неустойчивостей по углу сноса, вызванных боковым ветром в процессе полета малоразмерного беспилотного летательного аппарата. Определение угла сноса производится на основе оценки средней доплеровской частоты в сигнале на выходе приемного устройства РЛС.*

вой дальности (рис. 2). Так как, расчет яркостей элементов разрешения РЛИ производится в пределах всего кадра, в том числе, и не попадающих в луч диаграммы направленности РЛС, это приводит к пропорциональному увеличению вычислительных затрат и времени формирования кадра РЛИ. Кроме того, постоянное изменение положения луча диаграммы направленности в процессе полета носителя существенно затрудняет реализацию полосового режима съемки, а ненулевые значения яркостей элементов разрешения, обусловленные боковыми лепестками и зонами неоднозначности, находящимися вне основного луча диаграммы направленности РЛС, оказывают негативное воздействие на качество работы алгоритмов автоматической фокусировки РЛИ.

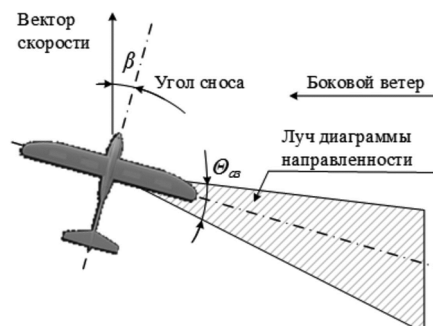
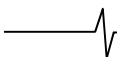


Рис. 1. Геометрия съемки при наличии бокового ветра



Таким образом, целью статьи является разработка алгоритма компенсации угла сноса на радиолокационном изображении при ведении радиолокационной съемки

малогобаритным БЛА для снижения вычислительных затрат, времени формирования кадра и геометрической коррекции радиолокационных изображений.

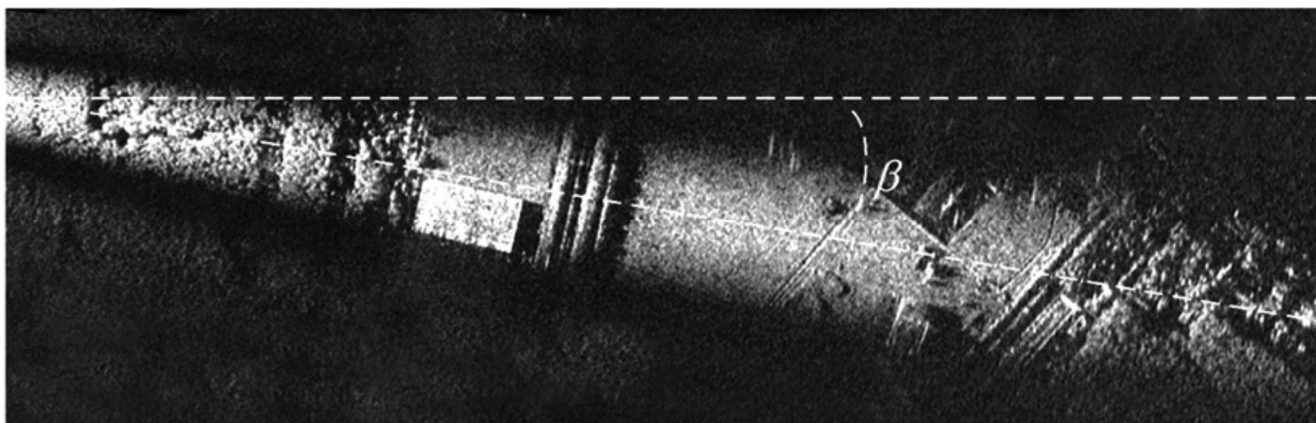


Рис. 2. Радиолокационное изображение, сформированное при наличии бокового ветра

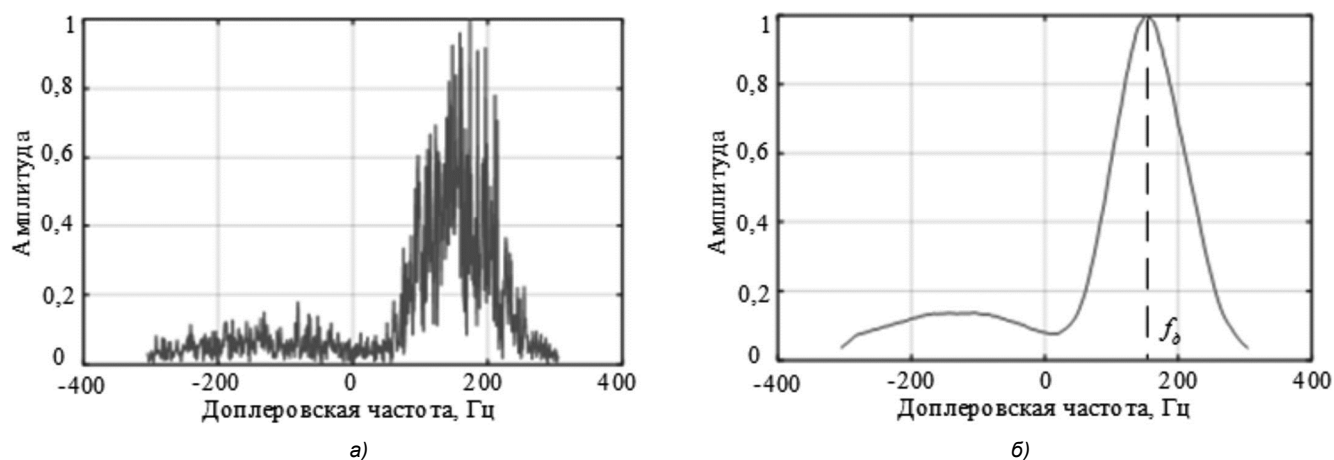


Рис. 3. Вид усредненного спектра доплеровских частот до (а) и после (б) применения фильтра Гаусса

Разработка алгоритма формирования РЛИ с компенсацией угла сноса связана с разработкой дополнительных процедур оценки угла сноса на основе обработки принятого сигнала РЛС, выбора элементов разрешения в пределах луча диаграммы направленности и геометрической трансформации РЛИ с компенсацией углового смещения.

### Процедура оценки угла сноса на основе обработки принятого сигнала РЛС

В большинстве случаев для получения значений угла сноса летательных аппаратов используются доплеровские измерители скорости и угла сноса [8], однако их установка на малоразмерные БЛА затруднительна ввиду массогабаритных ограничений. Получение оценки угла сноса в этом случае может быть осуществлено на основе анализа параметров усредненного спектра доплеровских частот путем обработки принятого сигнала РЛС в процессе формирования РЛИ. Для этого принятый сигнал в каждом периоде зондирования сжимается по дальности и накапливается в течении времени синтезирования с последующим вычислением преобразования Фурье по соответствующим элементам дальности для получения спектров доплеровских частот. Полученные спектры усредняются (рис. 3, а) по дальности и фильтруются (рис. 3, б), например, с использованием медианного или

гауссовского фильтра для сглаживания шума и устранения выбросов, обусловленных отражениями от ярких объектов, расположенных в зоне обзора.

Определение угла сноса осуществляется по положению максимума спектра доплеровских частот (рис. 3, б) в соответствии с выражением

$$\beta = \arcsin\left(\frac{f_{\delta}\lambda}{2V_n}\right), \quad (1)$$

где  $f_{\delta}$  – положение максимума спектра доплеровских частот;  $\lambda = c/f_0$ ,  $f_0$  – длина волны и частота зондирующего сигнала соответственно;  $c$  – скорость света;  $V_n$  – скорость полета носителя РЛС.

В ряде случаев при съемке неоднородной местности форма спектра доплеровских частот может иметь несколько близкорасположенных максимумов и выполнение операций усреднения спектров и фильтрации не обеспечивает достаточной точности получения оценки  $\beta$ . Для повышения качества работы процедуры оценки угла сноса целесообразным является дополнительное использование процедур калмановской фильтрации, обеспечивающих уточнение оценок между отдельными кадрами РЛИ. Получение оценки угла сноса  $\hat{\beta}_k$ , являющейся компонентом оценки вектора состояния  $\hat{x}_k$  в моменты формирования  $k$ -го

кадра РЛИ может быть осуществлено на основе следующих рекуррентных уравнений [9]:

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \tilde{\mathbf{x}}_k + \mathbf{K}_k \mathbf{v}_k, \quad \hat{\mathbf{P}}_k = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k) \tilde{\mathbf{P}}_k, \quad (2)$$

$$\mathbf{v}_k = \beta_k - \mathbf{H}_k \tilde{\mathbf{x}}_k, \quad (3)$$

$$\mathbf{K}_k = \tilde{\mathbf{P}}_k \mathbf{H}_k^T \mathbf{V}_k^{-1}, \quad \mathbf{V}_k = \mathbf{H}_k \tilde{\mathbf{P}}_k \mathbf{H}_k^T + \sigma_\beta^2, \quad (4)$$

$$\tilde{\mathbf{x}}_k = \mathbf{F}_k \hat{\mathbf{x}}_{k-1}, \quad \tilde{\mathbf{P}}_k = \mathbf{F}_k \hat{\mathbf{P}}_{k-1} \mathbf{F}_k^T + \mathbf{Q}_{k-1}, \quad (5)$$

где  $\mathbf{x} = [\beta \quad \dot{\beta}]^T$  – вектор состояния;  $\hat{\mathbf{x}}_k, \hat{\mathbf{P}}_k$  – оценки вектора состояния и его ковариационная матрица соответственно;  $\tilde{\mathbf{x}}_k, \tilde{\mathbf{P}}_k$  – экстраполированные значения вектора состояния и ковариационной матрицы на текущем  $k$ -м кадре соответственно;  $\mathbf{K}_k$  – коэффициент усиления невязки  $\mathbf{v}_k$  фильтра;  $\sigma_\beta^2, \mathbf{Q}_{k-1}$  – дисперсия шума измерений угла сноса и ковариационная матрица формирующего шума соответственно;  $\mathbf{F}_k, \mathbf{H}_k = [1 \quad 0]$  – матрицы перехода и измерений соответственно;  $\mathbf{x}^T, \mathbf{x}^{-1}$  – операции транспонирования и взятия обратной матрицы соответственно  $\mathbf{x}$ ;  $\dot{x}$  – производная от  $x$ .

В предположении о равномерном изменении угла сноса матрица перехода  $\mathbf{F}_k$  и ковариационная матрица формирующего шума  $\mathbf{Q}_{k-1}$  будут иметь вид:

$$\mathbf{F}_k = \begin{bmatrix} 1 & T_k \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{Q}_{k-1} = \begin{bmatrix} T_{k-1}^3/3 & T_{k-1}^2/2 \\ T_{k-1}^2/2 & T_{k-1} \end{bmatrix} \sigma_\xi^2, \quad (6)$$

где  $T_k$  – промежуток времени между измерениями угла сноса в процессе формирования кадров РЛИ;  $\sigma_\xi^2$  – дисперсия формирующего шума, величина которой определяет качество фильтрации (на практике выбирается в пределах  $(0, 1 \dots 1, 0) \sigma_\beta^2$ ).

**Процедура выбора элементов разрешения в пределах луча диаграммы направленности и геометрической трансформации РЛИ с компенсацией углового смещения**

В общем случае процесс формирования РЛИ заключается в оценке амплитуды сигнала для каждого  $m, n$ -го элемента разрешения в пределах зоны обзора РЛС, которая реализуется операцией согласованной фильтрации [5]

$$\hat{A}_{m,n} = \left| \int_{-T_c/2}^{T_c/2} S_\Sigma(t) S_{on}(t, R_{m,n}) dt \right|, \quad (7)$$

где  $S_\Sigma(t)$  – сигнал на выходе приемного устройства;  $S_{on}(t, R_{m,n})$  – опорный сигнал, представляющий собой сигнал с единичной амплитудой, фаза которого соответствует фазе демодулированного эхосигнала точечного отражателя, расположенного в  $m, n$ -й элементе разрешения зоны обзора;  $T_c$  – время синтезирования апертуры;  $R_{m,n}(t) = \sqrt{h_n^2 + x_m^2 + (y_n - V_n t)^2}$  – закон изменения дальности до точечного отражателя, расположенного в  $m, n$ -м элементе разрешения;  $h_n, V_n$  – высота и скорость полета носителя РЛС;  $x_m, y_n$  – координаты  $m, n$ -го элемента разрешения.

Процедура выбора элементов разрешения в пределах луча диаграммы направленности и последующей геометрической трансформации РЛИ заключается в расчете массива точек  $p(x_m, y_n)$ , координаты которых находятся в пределах луча диаграммы направленности, с последующим вычислением для каждой точки оценки ее яркости в соответствии с выражением (7). Расчет массива точек осуществляется в два этапа. На первом этапе производится расчет координат точек  $p(x'_m, y'_n)$  при отсутствии угла сноса (рис. 4, а), на втором (рис. 4, б) – расчет координат точек  $p(x_m, y_n)$ , осуществляемых путем применения операции поворота на плоскости на величину угла сноса к координатам точек  $p(x'_m, y'_n)$ . Это обеспечивает сопоставление индексов элементов разрешения  $m$  и  $n$  на геометрически скорректированном РЛИ с координатами точек, находящимися в луче диаграммы направленности, отклоненном на величину угла сноса. Результатом является компенсация углового смещения на РЛИ, обусловленного наличием угла сноса.

Вычисление координат точек  $p(x'_m, y'_n)$  осуществляется на основе заданных параметров формируемого кадра РЛИ: удаления до ближней границы кадра  $x_0$ , протяженности кадра по горизонтальной дальности  $L_x$ , а также размеров элементов разрешения по горизонтальной  $\Delta x$  и путевой  $\Delta y$  дальности, рассчитываются значения координат элементов разрешения на земной поверхности, находящихся в пределах формируемого кадра РЛИ

$$x'_m = x_0 + m \Delta x, \quad y'_n = n \Delta y - L_y / 2, \quad (8)$$

где  $m = 0, 1, \dots, N_x - 1$ ;  $n = 0, 1, \dots, N_y - 1$ ;  $N_x = L_x / \Delta x$ ;  $N_y = L_y / \Delta y$ ;  $L_y = 2(x_0 + L_x) \text{tg}(\Theta_{az} / 2)$ ;  $\Theta_{az}$  – ширина диаграммы направленности антенны в азимутальной плоскости.

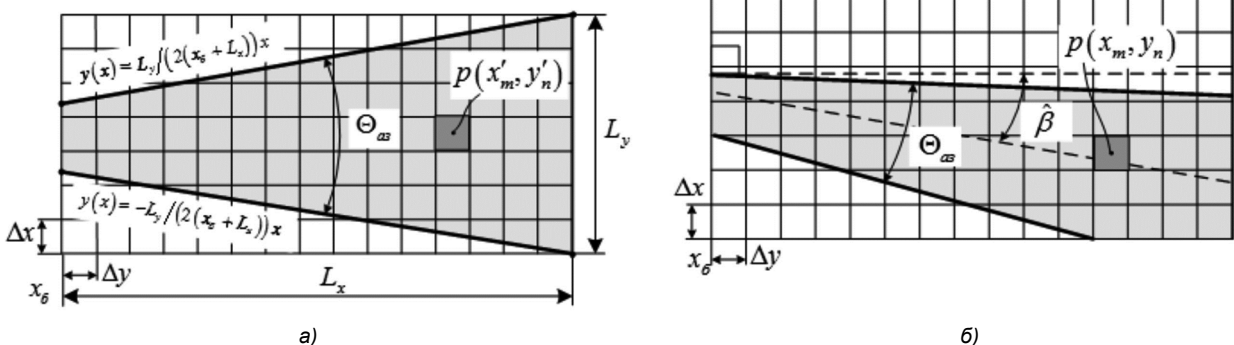


Рис. 4. К определению геометрического места элементов разрешения в пределах луча диаграммы направленности

Затем из рассчитанных значений  $x_m$  и  $y_n$  формируется массив точек  $p(x_m, y_n)$ , находящихся в области, ограниченного сверху и снизу прямыми (рис. 4), представляющими границы луча диаграммы направленности РЛС

$$-kx'_m \leq y'_n \leq kx'_m, \quad (9)$$

где  $k = L_y / (2(x'_0 + L_x))$ .

Массив точек  $p(x'_m, y'_n)$  представляет собой координаты элементов разрешения в пределах луча диаграммы направленности при нулевом значении угла сноса летательного аппарата. В процессе полета, когда луч диаграммы направленности отклоняется на величину угла сноса. Тогда координаты элементов разрешения в пределах луча диаграммы направленности могут быть вычислены на основе известных геометрических трансформаций, основанных на применении математических операций поворота

$$x_m = x'_m \cos(\hat{\beta}) - y'_n \sin(\hat{\beta}), \quad (10)$$

$$y_n = x'_m \sin(\hat{\beta}) + y'_n \cos(\hat{\beta}), \quad (11)$$

где  $\hat{\beta}$  – оценки угла сноса после выполнения процедур калмановской фильтрации (2-6).

Последовательность действий при реализации алгоритма формирования детальных РЛИ с компенсацией траекторных нестабильностей полета носителя РЛС по углу сноса с учетом рассмотренных процедур представлено на рис. 5.

## Результаты работы алгоритма

Качество работы алгоритма оценивалось при проведении натурального эксперимента с использованием малогабаритной программно-определяемой РЛС С-диапазона [1], в процессе которого проводилась оценка производительности предложенного алгоритма. Ширина спектра зондирующего сигнала – 500 МГц, что обеспечивало потенциальное разрешение 0,3 м, носитель РЛС – вертолет Robinson R44, скорость полета носителя – 130 км/ч. Алгоритм реализован на языке высокого уровня С++. Оценка производительности осуществлялась на вычислителе Intel Core i3-4130 3,4 ГГц. Параметры РЛИ при его формировании представлены в таблице. Сформированное изображение с компенсацией угла сноса представлено на рис. 6.

Результаты исследования алгоритма показывают, что среднее время формирования РЛИ без выполнения процедур геометрической трансформации (рис. 2) и с выполнением рассмотренных процедур при параметрах формирования РЛИ, указанных в таблице, составляет около 50...60 с в зависимости от угла сноса, а при выполнении процедур – около 20...30 с. Причем, чем большее значение угла сноса – тем больший наблюдается выигрыш по времени формирования РЛИ. Это объясняется увеличением размеров кадра при больших значениях угла сноса.

Таким образом предложенный способ, обеспечивает от двух до трех раз уменьшение времени, затрачиваемого

Параметры формирования РЛИ

Параметр	Значение
Время синтезирования $T_c$ , с	1
Ближняя граница по горизонтальной дальности $x'_0$ , м	1500
Протяженность кадра по горизонтальной дальности $L_x$ , м	4500
Размер элемента разрешения по горизонтальной дальности $\Delta x$ , м	1
Размер элемента разрешения по путевой дальности $\Delta y$ , м	1
Ширина диаграммы направленности $\Theta_{az}$ , град	10



Рис. 5. Последовательность действий при реализации алгоритма формирования РЛИ с компенсацией по углу сноса

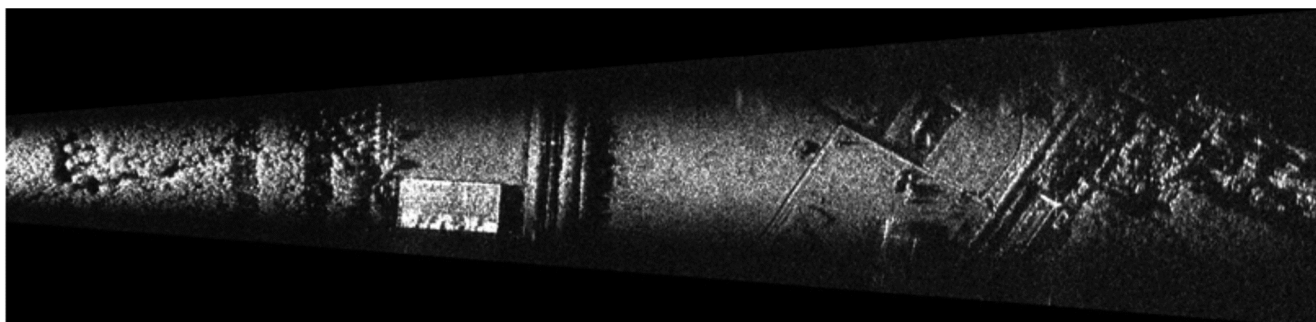


Рис. 6. РЛИ, сформированное с компенсацией угла сноса

на формирование РЛИ при наличии траекторных нестабильностей полета по углу сноса. Наряду с уменьшением времени формирования применение процедур геометрической коррекции позволяет повысить качество работы алгоритмов автоматической фокусировки, упростить процедуру дальнейшей геопривязки изображений к цифровым картам местности, а также улучшить восприятие изображений оператором дешифровщиком.

#### Литература

1. Купряшкин И.Ф., Лихачев В.П., Рязанцев Л.Б. Малогабаритные многофункциональные РЛС с непрерывным частотно-модулированным излучением. Монография. М.: Радиотехника, 2020. 280 с.
2. Купряшкин И.Ф., Лихачев В.П., Рязанцев Л.Б. Краткий опыт создания и первые результаты практической съемки поверхности малогабаритной РЛС с синтезированием апертуры антенны с борта мультикоптера. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал], 2019. № 4. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/apr19/12/text.pdf>.
3. Дмитриев А.В., Жарков Д.С., Ярцев И.М., Половинкина А.С. Макет малогабаритной программно-определяемой РЛС с синтезированием апертуры антенны на мультикоптере // Сборник трудов XXV Международной научно-технической конференции, посвященной 160-летию со дня рождения А.С. Попова. Воронеж: ВГУ, 2019. С. 164-180.
4. Брайткрайц С.Г., Ильин Е.М., Полубехин А.И., Прищеп Д.В., Юрин А.Д., Хомяков К.А. Проблемы и пути создания радиолокационных систем для беспилотных летательных аппаратов тактического и оперативно-тактического назначения // Известия Тульского государственного университета. Тула: ТГУ, 2018. С. 303-313.
5. Гнездилов М.В., Купряшкин И.Ф., Лихачев В.П., Рязанцев Л.Б. Алгоритм формирования радиолокационных изображений с субметровым разрешением в малогабаритных РЛС с синтезированной апертурой // Цифровая обработка сигналов, 2018. № 2. С. 53-58.
6. Гуляев Г.А., Иванникова М.В., Рязанцев Л.Б., Унковский А.В. Исследование влияния траекторных нестабильностей полета носителя малогабаритной РЛС с синтезированной апертурой на качество формируемых радиолокационных изображений // Цифровая обработка сигналов, 2021. № 2. С. 25-31.
7. Авиационные системы радиовидения. Монография. Под ред. Г.С. Кондратенкова. М.: Радиотехника, 2015. 648 с.
8. Колчинский В.Е., Мандуровский И.А., Константиновский М.И. Автономные доплеровские устройства и системы навигации летательных аппаратов / Под ред. В.Е. Колчинского. М.: Сов. радио, 1975. 432 с.
9. Рязанцев Л.Б. Многомодельное байесовское оценивание вектора состояния маневренной воздушной цели в дискретном времени // Вестник ТГТУ, 2009. № 4. С. 729-739.