

УДК 621.396.96

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТРАЕКТОРНЫХ НЕСТАБИЛЬНОСТЕЙ ПОЛЕТА НОСИТЕЛЯ МАЛОГАБАРИТНОЙ РЛС С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ НА КАЧЕСТВО ФОРМИРУЕМЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Гуляев Г.А., младший научный сотрудник Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), e-mail: gregory.gulyaev@yandex.ru;
Иванникова М.В., специалист научно-производственного комплекса специального программного обеспечения АО «НПП «Радар ммс» (г. Санкт-Петербург), e-mail: ivannikova_mv93@mail.ru;
Рязанцев Л.Б., к.т.н., доцент Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), e-mail: kernel386@mail.ru;
Унковский А.В., адъюнкт Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), e-mail: alex-unuk@yandex.ru.

RESEARCH ON THE EFFECT OF TRAJECTORY INSTABILITY OF FLIGHT CARRIER SMALL-SIZE SAR ON QUALITY OF GENERATED RADAR IMAGES

Gulyaev G.A., Ivannikova M.V., Ryazantsev L.B., Unkovsky A.V.

The article is devoted to the study of the influence of trajectory instabilities of the flight of a carrier of a small-sized radar station with a synthesized aperture on the quality of generated radar images. The procedure for mathematical modeling of the process of radar image formation under conditions of trajectory instabilities is presented on the basis of statistical data obtained in a series of flight experiments on various types of carriers. Shown the new method of preliminary fast focusing of the radio location image, registered by the radio locator with the synthesized aperture, the essence of the method is to find the optimal aperture synthesis time based statistical characteristics of the trajectory instabilities.

Key words: synthetic aperture radar, resolution, trajectory instability, phase errors, optimal aperture synthesis time, autofocus.

Ключевые слова: РЛС с синтезированной апертурой антенны, траекторные неустойчивости, фазовые ошибки, разрешающая способность, оптимальное время синтеза, автофокусировка радиолокационного изображения.

Введение

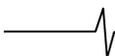
Достигнутые за последние несколько лет высокие информационные возможности малогабаритных РЛС с синтезированной апертурой антенны (РСА) [1-3], связанные с возможностью получения детальных радиолокационных изображений (РЛИ) участков местности, обусловили значительный рост интереса к их разработке и дальнейшему использованию для решения задач картографирования, видовой разведки, обнаружения замаскированных в оптическом диапазоне объектов независимо от условий освещенности и состояния атмосферы на значительных удалениях от трассы полета носителя. Это стало возможным благодаря развитию микроэлектронных технологий, обеспечивающих формирование и обработку широкополосных сигналов с полосой 300...500 МГц и более для достижения разрешающей способности в единицы дециметров.

В то же время для достижения высокой разрешающей способности по путевой дальности время когерентного накопления сигналов в большинстве случаев должно быть не менее 10...15 с, что требует размещения на борту носителя наряду со штатными навигационными датчи-

Статья посвящена изучению влияния траекторных неустойчивостей полета носителя малогабаритной радиолокационной станции с синтезированной апертурой на качество формируемых радиолокационных изображений. Представлен порядок проведения математического моделирования процесса формирования радиолокационных изображений в условиях траекторных неустойчивостей на основе статистических данных, полученных в серии летных экспериментов на различных типах носителей. Предложен способ предварительной быстрой автофокусировки формируемых радиолокационных изображений, заключающийся в определении оптимального времени синтеза на основе анализа статистических характеристик траекторных неустойчивостей.

ками высокоточных дорогостоящих инерциальных навигационных систем (ИНС) для компенсации траекторных неустойчивостей (ТН) полета носителя, обусловленных его отклонением от равномерной и прямолинейной траектории из-за турбулентности атмосферы, аэроупругих колебаний планера и т.д., и приводящих к возникновению фазовых флуктуаций в траекторном сигнале, которые являются причиной ухудшения разрешающей способности в результате расфокусировки РЛИ.

Результаты практических исследований радиолокационной съемки с борта пилотируемых и беспилотных летательных аппаратов (ЛА) показали [1], что без использования информации ИНС для компенсации ТН даже при реализации алгоритмов автоматической фокусировки [4, 5] увеличение времени когерентного накопления более 2...3 с не только не приводит к заметному улучшению



качества формируемых РЛИ, но и напротив приводит к их заметной деградации и разрушению, причем, чем сильнее амплитуда ТН, тем меньшие значения времени синтеза приходится задавать оператору при формировании РЛИ. Аналогичные явления характерны для задач инверсного синтеза апертуры антенны, которые детально рассматриваются в работах [6, 7, 8]. В них приведены исследования влияния флуктуаций параметров движения аэродинамических объектов различных классов на степень когерентности принимаемых сигналов, а также результаты использования информации о ТН полета ЛА, заключенной в принятом радиолокационном сигнале, в интересах повышения вероятности их идентификации.

Несмотря на значительное количество работ в области исследования ТН в задачах формирования РЛИ и стремительно развивающиеся методы автоматической обработки РЛИ, оптимальное время синтеза, обеспечивающее наилучшее качество, по-прежнему подбирается оператором-дешифровщиком вручную, на основе собственного опыта с учетом типа и массогабаритных характеристик носителя, а также характера его полета и погодных условий. Поэтому реализация автоматического получения качественных РЛИ на борту носителя РСА в режиме реального времени становится трудновыполнимой задачей.

Так на рис. 1 приведен фрагмент РЛИ одного и того же участка местности при различных значениях времени синтеза (0,5, 1,0 и 2,0 с). Наилучшее разрешение получено при $T_c = 1,0$ с. Изображения получены с использованием малогабаритной РЛС С-диапазона, разработанной ВУНЦ ВВС «ВВА» (г. Воронеж) совместно с АО «НПП «Радар ммс» (г. Санкт-Петербург) [1], при следующих параметрах сигналов и условиях съемки: ширина спектра сигнала $\Delta f_c = 100$ МГц, высота полета носителя $h_n = 693$ м, скорость полета носителя $V_n = 356$ км/ч (самолет Ил-114лл), дальность до центра кадра 3,8 км.

При невозможности размещения на борту носителя высокоточных ИНС, в основу алгоритма выбора оптимального времени синтеза могут быть положены известные итерационные подходы автофокусировки, применяемые для оценки скорости носителя, основанные

на восстановлении параметров функции фазовых ошибок [9] и минимизации целевой функции, характеризующей качество локального участка РЛИ по значению энтропии [4] или степени контрастности [5]. Однако такие алгоритмы требуют значительных вычислительных затрат для решения оптимизационной задачи, что ограничивает их применение на борту носителей (особенно малоразмерных) при реализации формирования РЛИ в масштабе времени близком к реальному.

Повышение качества РЛИ без увеличения требований к вычислительным ресурсам можно обеспечить за счет реализации этапа предварительной фокусировки, в ходе которого выбор оптимального значения времени синтеза, используемого при формировании РЛИ, может быть осуществлен на основе анализа статистических характеристик ТН по показаниям штатных бортовых навигационных датчиков, например, приемников спутниковой радионавигационной системы (СРНС) по заранее рассчитанным зависимостям с учетом параметров сигналов и режимов работы РЛС. Окончательная дофокусировка изображений может быть осуществлена при необходимости по запросу оператора-дешифровщика на борту носителя уже известными алгоритмами.

Таким образом, целью статьи является определение оптимального времени синтеза, используемого в алгоритмах формирования РЛИ на этапе предварительной фокусировки, обеспечивающего наилучшее разрешение РЛИ по путевой дальности при наличии траекторных нестабильностей на основе статистического анализа информации от бортовых ИНС.

Разработка математической модели траекторных нестабильностей

Для оценки степени влияния ТН на качество формируемых РЛИ и определения оптимального значения времени синтеза необходимо выполнение следующих этапов: расчет статистических характеристик ТН, регистрируемых бортовыми датчиками во время полета для различных типов носителей; моделирование полета ЛА при наличии ТН с учетом рассчитанных статистических характеристик; интеграция математических моделей полета ЛА в алгоритмы формирования РЛИ с последующим расчетом методом имитационного моделирования

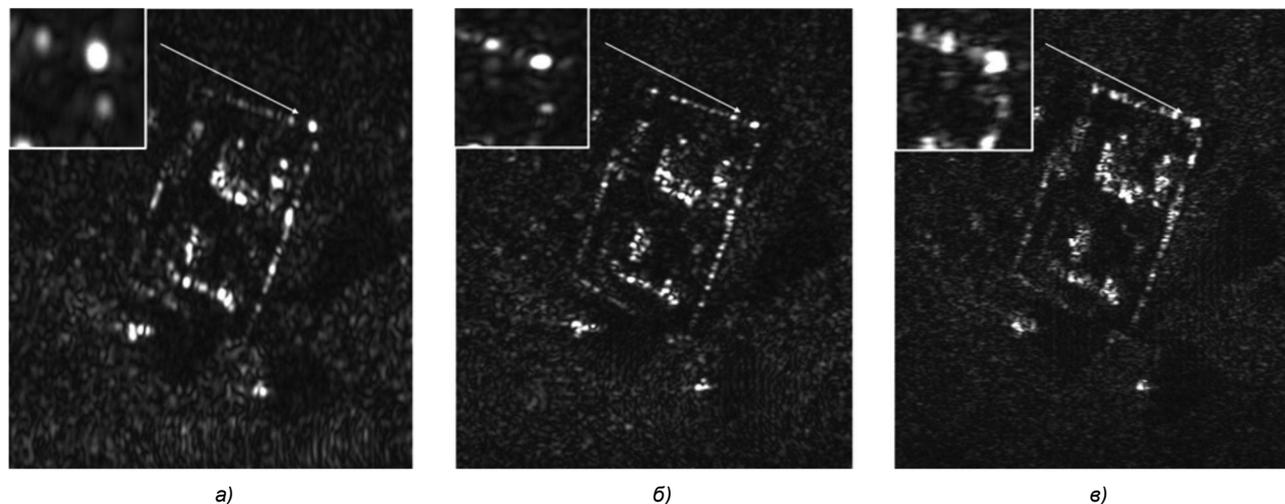


Рис. 1. РЛИ участка местности ($45^{\circ}6'12,31''\text{C}$; $33^{\circ}35'43,58''\text{B}$) при значениях T_c , равных 0,5 (а), 1,0 (б) и 2,0 (е) секунды

оптимального времени синтезирования апертуры, при котором обеспечивается наилучшее качество РЛИ.

Для расчета статистических характеристик ТН проведен ряд летных экспериментов с использованием различных типов ЛА: беспилотный летательный аппараты (БпЛА) самолетного типа Skywalker 1880 и «Феникс» (ООО «НПП «Новые технологии телекоммуникаций», г. Санкт-Петербург), пилотируемый вертолет Robinson R44, а также пилотируемый самолет Ил-114лл (АО «НПП «Радар ммс», г. Санкт-Петербург). Регистрация параметров полета осуществлялась на прямолинейных участках траектории приемником СРНС Ublox NEO-M8, данные с выхода которого сохранялись с частотой 10 Гц в виде отсчетов координат, скорости и высоты полета носителя для последующей статистической обработки. Характеристики ЛА и условия проведения летных экспериментов представлены в табл. 1. Полет БпЛА Skywalker 1880 и «Феникс» осуществлялся в режиме автопилота по контрольным точкам. Регистрация полетных данных пилотируемых носителей осуществлялась на прямолинейных и равномерных участках их полета.

Результаты анализа зарегистрированных в ходе экспериментов параметров полета, представленных в табл. 1, показали, что ТН представляют собой узкополосные коррелированные колебания с нормальным законом распределения, которые соответствуют случайному процессу на выходе низкочастотного фильтра с полосой пропускания Δf , автокорреляционная функция (АКФ) которого имеет вид

$$R(\tau) = \sigma^2 \frac{\sin(2\pi\Delta f \tau)}{2\pi\Delta f \tau}, \quad (1)$$

где σ – среднеквадратическое отклонение (СКО) траекторных нестабильностей по соответствующей координате.

Полученные в ходе экспериментов значения статистических характеристик ТН по скорости V , высоте h и плановым координатам x и y для различных типов ЛА представлены в табл. 2.

На основе полученных статистических характеристик произведено моделирование ТН, которое осуществля-

лось путем пропускания белого гауссовского шума через формирующий фильтр, импульсная характеристика $h(t)$ которого вычисляется на основе АКФ с заданной шириной спектра Δf .

Порядок формирования модели ТН заключается в расчете АКФ, определяемой выражением (1), с последующим нахождением в соответствии с теоремой Винера-Хинчина спектральной плотности мощности [10]. Поскольку АКФ является симметричной функцией, то

$$S(f) = \text{Re}\{\mathcal{F}\{R(\tau)\}\}, \quad (2)$$

где $\text{Re}\{f(x)\}$ и $\mathcal{F}\{f(x)\} = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)e^{-j2\pi xf} dx$ – операторы выделения действительной части и преобразования Фурье функции $f(x)$ соответственно.

На основе полученной спектральной плотности мощности осуществляется нахождение частотной характеристики формирующего фильтра [11]

$$H(f) = A(f) \exp(j\varphi(f)), \quad (3)$$

где $A(f) = \sqrt{S(f)}$; $\varphi(f) = -\pi f / \Delta f$ – линейная фазо-частотная характеристика, обеспечивающая постоянство групповой задержки фильтра [12].

Расчет импульсной характеристики фильтра осуществляется как

$$h(t) = \mathcal{F}^{-1}\{H(f)\}, \quad (4)$$

где $\mathcal{F}^{-1}\{f(x)\} = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)e^{j2\pi xf} dx$ – оператор обратного преобразования Фурье.

Для моделирования реализаций ТН по соответствующим координатам и скорости полета носителя осуществляется фильтрация некоррелированного белого гауссовского шума $x(t)$ с единичной дисперсией формирующим фильтром с импульсной характеристикой $h(t)$, которая определяется выражением (4). Таким образом реализация ТН определяется как

$$M(t) = \text{Re}\{h(t) * x(t)\}, \quad (5)$$

где $*$ – операция свертки.

Таблица 1 – Характеристики ЛА и условий проведения летных экспериментов

Наименование ЛА	Масса, кг	Диапазон скоростей, км/ч	Диапазон высот полета, м	Скорость ветра, м/с
Skywalker 1880	3,5	40...60	100...1000	0,5...2,0
«Феникс»	25	100...140	150...3000	5,0...9,0
Robinson R44	1100	100...210	до 2000	4,5...8,5
Ил-114лл	23500	350-390	100...4000	3,6...7,7

Таблица 2 – Статистические характеристики ТН

Наименование ЛА	СКО м/с, м		Δf , Гц	
	σ_v	$\sigma_h, \sigma_x, \sigma_y$	Δf_v	$\Delta f_h, \Delta f_x, \Delta f_y$
Skywalker 1880	1,2...5,7	0,08...3,05	0,08...0,2	0,01...0,5
«Феникс»	1,1...4,9	0,06...1,8	0,1...0,6	0,01...0,9
Robinson R44	0,5...2,45	0,05...1,2	0,14...0,8	0,03...1,4
Ил-114лл	0,1...1,6	0,01...0,5	0,5...1,2	0,1...2,1

Процедура расчета оптимального времени синтеза

При дискретной обработке сигнала, которая наиболее распространена на сегодняшний день, в качестве формирующего фильтра может применяться фильтр с конечной импульсной характеристикой, а белый гауссовский шум представляется в виде дискретных отсчетов. ТН по каждой координате моделируются отдельным формирующим фильтром. Полученные модели ТН интегрируются в алгоритм формирования РЛИ. Для формирования РЛИ могут применяться различные алгоритмы на основе гармонического анализа, с коррекцией миграции или на основе прямой свертки [1]. Несмотря на несколько большие вычислительные затраты наилучшим качеством и простотой реализации обладает алгоритм, основанный на процедуре прямой свертки [13], который в общем случае представляет собой операцию согласованной фильтрации для каждого m, n -го элемента разрешения в пределах зоны обзора РЛС

$$A_{m,n} = \left| \int_{-T_c/2}^{T_c/2} S_{\Sigma}(t) S_{on}(t, R_{m,n}) dt \right|, \quad (6)$$

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 (рис. 2); $R_{m,n}(t) = \sqrt{(h_n + M_h(t))^2 + (x_{om} + M_x(t))^2 + ((y_{on} + M_y(t)) - t(V_n + M_v(t)))^2}$ – закон изменения дальности до точечного отражателя, расположенного в m, n -м элементе разрешения, при наличии траекторных нестабильностей; $x_{om} = x_o + m\Delta x$, $y_{on} = n\Delta y - 0,5L_y$ – расстояния до точечного отражателя по горизонтальной и путевой дальности относительно траверза РСА на момент начала синтеза апертуры антенны; x_o – ближняя граница кадра; Δx и Δy – расстояние между центрами элементов разрешения по горизонтальной и путевой дальности соответственно; $m = 0, 1, \dots, N_x - 1$; $n = 0, 1, \dots, N_y - 1$; $N_x = \text{int}[L_x / \Delta x]$; $N_y = \text{int}[L_y / \Delta y]$; $\text{int}[x]$ – целая часть x ; L_x и L_y – линейные размеры формируемого РЛИ по горизонтальной и путевой дальности соответственно; $M_h(t)$, $M_x(t)$, $M_y(t)$ и $M_v(t)$ – реализации ТН по соответствующим координатам.

При наличии ТН на интервале синтеза разрешения способная по путевой дальности имеет свойство улучшаться до определенного момента, после которого дальнейшее накопление сигнала приводит к ухудшению качества РЛИ. Момент времени на интервале синтеза, при котором наблюдается наилучшая разрешающая способность РЛИ, соответствует оптимальному времени синтеза апертуры T_{opt} .

Расчет значения T_{opt} , обеспечивающего наилучшее качество РЛИ, основан на формировании РЛИ, тестовой

сцены, состоящей из одиночного точечного отражателя (ТО) с известными координатами, характерными для условий наблюдения малогабаритной РЛС высокого разрешения, с использованием процедуры (6) и с последующим вычислением ширины отклика ТО по путевой дальности и представляет собой последовательность следующих действий:

- расчет импульсных характеристик формирующих фильтров на основе исходных данных в соответствии с табл. 2 и выражений (1)-(4);
- моделирование реализаций ТН с заданными статистическими характеристиками по соответствующим координатам и скорости полета носителя, путем свертки отсчетов белого гауссовского шума с соответствующими импульсными характеристиками на основе выражения (5);
- моделирование реализации сигнала тестовой сцены $S_{\Sigma}(t)$ на выходе приемного устройства РЛС, содержащей ТН по соответствующим координатам;
- формирование РЛИ тестовой сцены на основе алгоритма «прямой свертки» с одиночным точечным отражателем согласно выражению (6);
- вычисление ширины отклика от точечного отражателя по путевой дальности и расчет разрешающей способности сформированного РЛИ;
- расчет оптимального времени синтеза апертуры на основе рассчитанных зависимости разрешающей способности по путевой дальности от времени синтеза.

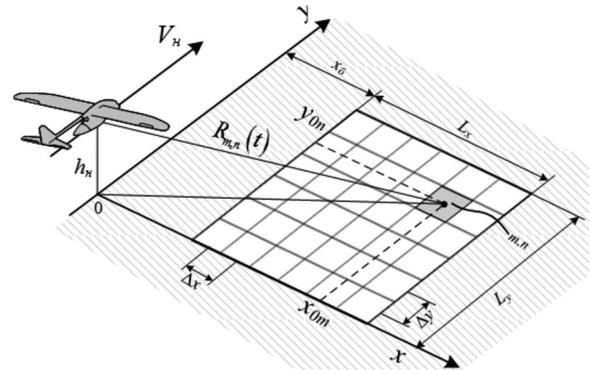


Рис. 2. Геометрия обзора земной поверхности РСА

В качестве примера приведены результаты моделирования расчета времени T_{opt} для РЛС С-диапазона [1]. Параметры полета носителя, а также условия наблюдения сцены характерны для малогабаритного БПЛА типа «Феникс»: $V_n = 120$ км/ч; $h_n = 550$ м; дальность до точечного отражателя – 1 км. Ширина спектра зондирующих сигналов РЛС составляет $\Delta f_c = 300$ МГц. Вид сформированного с использованием процедуры (6) РЛИ точечного отражателя, а также сечения его отклика по путевой и горизонтальной дальности при $T_c = 1,0$ с и отсутствии траекторных нестабильностей представлены на рис. 3, а. Разрешение по горизонтальной и путевой дальности с учетом весовой обработки окном Хэмминга составляет 0,7 и 1,2 м соответственно, что согласуется с теоретическими значениями для данных условий съемки. На рис. 3 б и 3 в представлены отклики точечного отражателя в условиях воздействия траекторных нестабильностей по скорости при $\sigma_v = 1,0$ м/с и $\sigma_v = 1,5$ м/с соответственно.

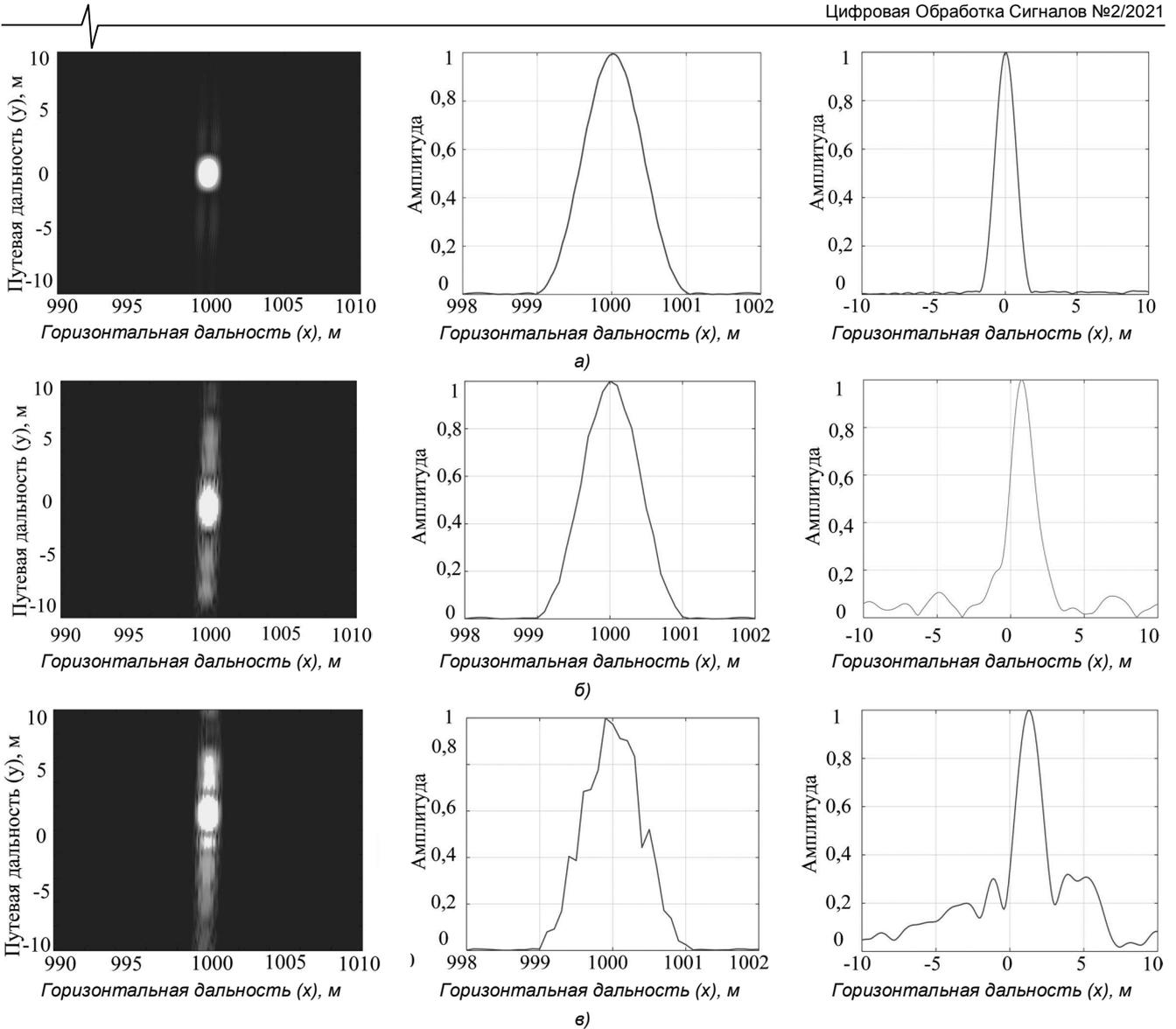


Рис. 3. РЛИ точечного отражателя и его сечения по горизонтальной и путевой дальности при $\sigma_v = 0$ м/с (а), $\sigma_v = 1,0$ м/с (б), $\sigma_v = 1,5$ м/с (в)

Анализ рис. 3 показывает, что степень расфокусировки РЛИ обусловлена в основном не расширением главного лепестка отклика точечного отражателя, а повышением уровня его боковых лепестков. При этом ухудшение разрешающей способности по наклонной дальности практически не наблюдается. Наличие ТН также приводит к некоторому случайному смещению максимума отметки точечного отражателя по путевой дальности.

На рис. 4 представлены полученные в ходе имитационного моделирования зависимости разрешающей способности по путевой дальности δl от времени синтеза сигнала, при различных σ_v , σ_h и Δf .

Ширина спектра ТН Δf при вычислении зависимостей, представленных на рис. 4 а и 4 б принята равной 0,5 Гц. Для наибольшего учета влияния боковых лепестков на качество РЛИ разрешающая способность измерялась по уровню 30 % от максимума отклика точечного отражателя. Зависимости получены статистическим моделированием с усреднением результатов по 50 реализациям и последующей аппроксимацией функ-

цией вида $f(x) = a \exp(bx) + c \exp(dx)$, где a , b , c и d – коэффициенты, полученные с использованием метода наименьших квадратов. Характер зависимостей показывает, что ТН по скорости оказывают негативное воздействие в меньшей степени по сравнению с ТН по плановым координатам или высоте полета, которые в конечном счете определяют флуктуации по наклонной дальности. Ширина спектра ТН Δf существенного влияния на ухудшение разрешающей способности и значение T_{omm} не оказывает (рис. 4, в). Результаты моделирования показывают наличие некоторого минимального значения δl при увеличении T_c . Так при $\sigma_v = 0,12$ м/с значение T_{omm} составляет 1,8...2,2 с, а при $\sigma_v = 0,24$ м/с – 1,2...1,4 с. Зависимость степени уменьшения δl при увеличении T_c и наличии ТН по плановым координатам и высоте носит асимптотический вид. Такие ТН, сопоставимые с длиной волны зондирующего сигнала, приводят к существенному снижению разрешающей спо-

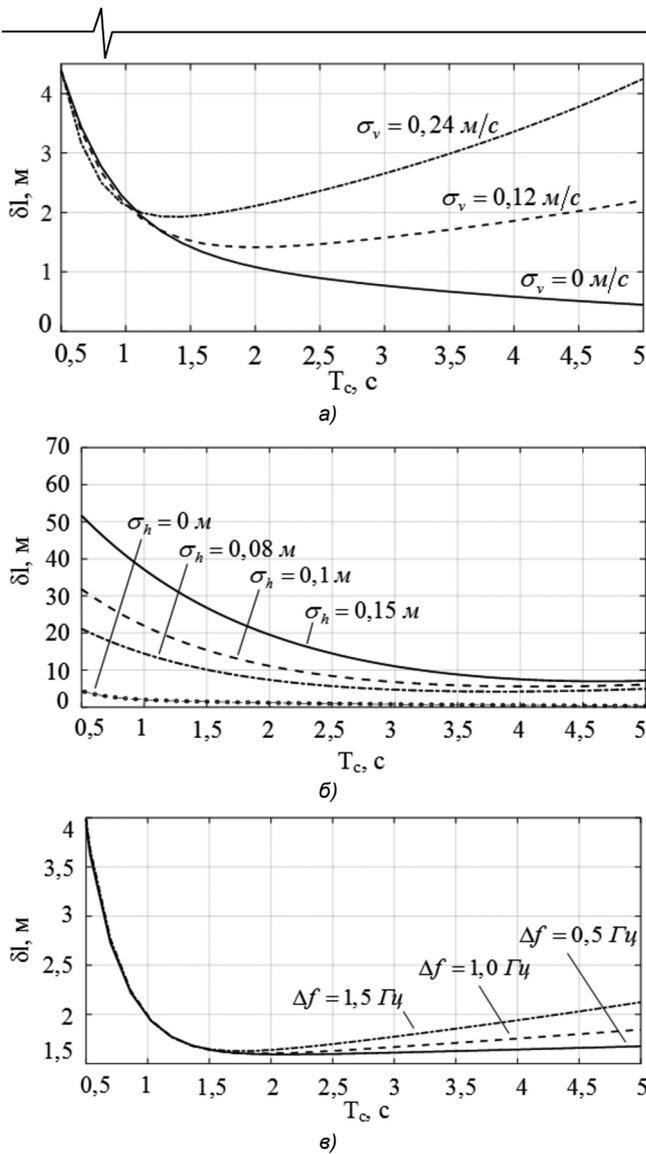


Рис. 4. Зависимости разрешающей способности по путевой дальности от времени синтезирования при различных СКО ТН (а, б) и Δf (в)

способности. Так, например, при работе РЛС в С-диапазоне длин волн (длина волны 5,5 см) уже при σ_h равном 8 см ($h_n = 500$ м; дальность до точечного отражателя – 1 км, что соответствует значению угла визирования 26 градусов) наилучшее значение δl не превысит 4...5 м. Следует отметить, что снижение разрешающей способности при ТН по высоте и плановым координатам

обусловлено случайным изменением наклонной дальности. При этом при меньших углах визирования флуктуации по высоте будут оказывать меньшее значение по сравнению с ТН по плановым координатам.

Для повышения качества РЛИ при их формировании на борту носителя в режиме реального времени без участия оператора-дешифровщика алгоритмы формирования РЛИ с учетом полученных результатов могут быть дополнены подпрограммами анализа статистических характеристик ТН и оценки и прогнозирования T_{opt} (рис. 5).

Статистические характеристики ТН рассчитываются на основе показаний датчиков навигационной системы в режиме реального времени в процессе полета носителя РЛС. Оптимальное время синтезирования выбирается из табличных значений, полученных заранее на основе рассчитанных зависимостей δl от T_c для различных σ и Δf .

В силу того, что ТН являются узкополосным коррелированным колебательным процессом статистические характеристики, а вследствие и T_{opt} будут флуктуировать около одного среднего значения, которое так же будет изменяться с течением времени по мере движения носителя РСА. Поэтому алгоритмы формирования РЛИ могут быть дополнены процедурой прогнозирования T_{opt} на основе Калмановской фильтрации. Оценки текущей скорости полета носителя $V(t)$ используются в подпрограмме фокусировки на этапе предварительной фокусировки РЛИ. На этапе дофокусировки подпрограмма фокусировки, например, на основе методов градиентного поиска обеспечивает получение оптимального значения скорости носителя V_n при котором достигается наилучшее качество РЛИ. Кроме того, данные ИНС также позволяют отслеживать фазовый центр приемной антенны и осуществлять предварительную компенсацию ТН, что позволит увеличить T_{opt} .

Заключение

Таким образом, на основе проведенной оценки статистических характеристик траекторных нестабильностей различных типов беспилотных и пилотируемых летательных аппаратов, а также степени влияния ТН на качество формируемых РЛИ, предложен новый подход оценивания оптимального времени синтезирования при

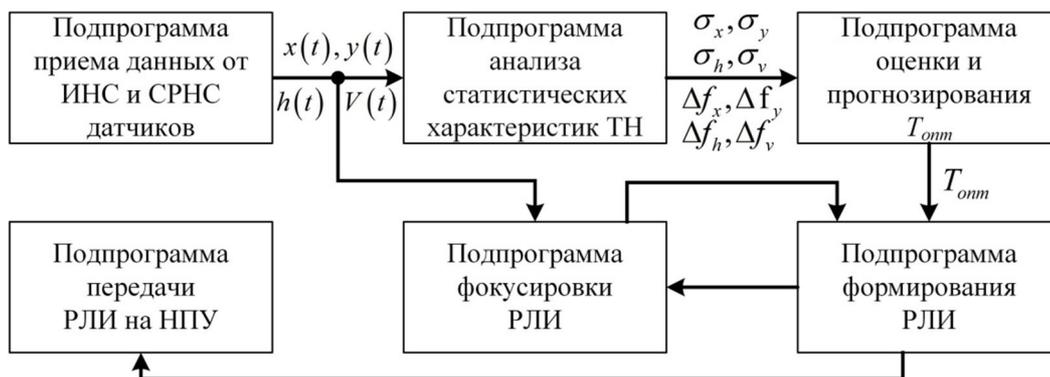


Рис. 5. Структура программного обеспечения формирования РЛИ при наличии ТН

наличии траекторных нестабильностей на основе анализа их статистических характеристик. Включение процедур оценки оптимального времени синтезирования в алгоритмы формирования РЛИ обеспечит достижение предельно допустимого качества РЛИ при их автоматическом формировании на борту носителя при сокращении вычислительных затрат.

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. Ильин Е., Полубехин А., Савостьянов В., Самарин О. МБРЛС Ku-диапазона длин радиоволн. Важный шаг к внедрению в состав бортового радиоэлектронного оборудования БЛА // Радиоэлектронные технологии, № 3. 2020. С. 20-25.
3. Кулакова В.И., Ноздрин С.А., Сохарев А.Ю., Царик Д.В. Система микронавигации для поддержки радиолокатора с синтезированной апертурой на борту малогабаритного БПЛА // Гироскопия и навигация. Том 27. № 4 (107). 2019. С. 130-146.
4. Школьный Л.А. Радиолокационные системы воздушной разведки, дешифрирование радиолокационных изображений. М.: ВВИА им. Проф. Н.Е. Жуковского, 2008. 531 с.
5. Гурьянов М.А., Прокофьев А.А. Автоподбор параметров синтеза радиолокационного изображения, полученного с радиолокатора с синтезированной апертурой // Известия вузов. Электроника. Т. 20, № 2. 2015. С. 161-167.
6. Лихачев В.П., Пасмуров А.Я. Формирование радиолокационных изображений летательных аппаратов методом обращенного синтезирования апертуры в условиях частичной когерентности сигнала // Радиотехника и электроника, № 3. 1999. С. 294.
7. Лихачев В.П. Влияние системы обработки сигналов РЛС с синтезированной апертурой на характеристики изображений имитируемых целей // Труды 5 Международной НТК «Радиолокация, навигация, связь». Т. 2. Воронеж: ВГУ. 1999. С. 887-895.
8. Митрофанов Д.Г., Ткаченко В.П. Исследования параметров траекторных нестабильностей летательных аппаратов методом натурального эксперимента // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук, № 2. 2009. С. 70-82.
9. Wahl D.E., Eichel P.H., Ghiglia D.C., Jakowatz C.V. Phase Gradient Autofocus – A Robust Tool for High Resolution SAR Phase Correction // IEEE Trans. Aerospace Electron. Syst. № 3, 1994. Pp. 827-834.
10. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. М.: Радио и связь, 1982. 624 с.
11. Солонина А.И., Клионский Д.М., Меркучева Т.В., Перов С.Н. Цифровая обработка сигналов и MATLAB. СПб.: БХВ-Петербург, 2013. 512 с.
12. Лайонс Р., Цифровая обработка сигналов: Второе издание. Пер. с англ. М.: «Бином-Пресс», 2006. 656 с.
13. 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, № 2. 2018. С. 53-58.