

АЛГОРИТМЫ АВТОФОКУСИРОВКИ РАДИОИЗОБРАЖЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ДИНАМИЧНЫХ ТРАЕКТОРНЫХ НЕСТАБИЛЬНОСТЕЙ

Андросов В.В., начальник конструкторского бюро ОАО «Государственный рязанский приборный завод»

Витязев В.В., д.т.н., зав. кафедрой телекоммуникаций и основ радиотехники Рязанского государственного радиотехнического университета, e-mail: vityazev.v.v@rsreu.ru

Витязев С.В., научный сотрудник кафедры телекоммуникаций и основ радиотехники Рязанского государственного радиотехнического университета

Шершнев Е.Д., заместитель директора НТЦ ОАО «Государственный рязанский приборный завод», главный конструктор по разработке новой техники

Ключевые слова: радиовидение, синтезирование апертуры, автофокусировка, цифровая обработка, траекторный сигнал, азимутальное разрешение.

Введение

Основная цель исследований, связанных с формированием радиолокационных изображений (РЛИ), – достижение максимальной разрешающей способности и, как следствие, повышение качества РЛИ в условиях реальных ограничений, накладываемых динамичным изменением параметров принимаемого траекторного сигнала на интервале синтезирования, обусловленным нестабильностью характеристик летательного аппарата (скорость, ускорение, траектория полета), воздействием широкого спектра шумов и помех на фоне относительно маломощного принимаемого сигнала от удаленных радиоотражателей (объектов), отклонениями в формировании заданной диаграммы направленности антенны (ДНА) и характеристик приемопередающего тракта [1].

Проведенные исследования с использованием принятой модели траекторного сигнала и испытания на подвижном стенде показали потенциальную возможность многократного увеличения азимутального разрешения в диапазоне от $\pm 4^\circ$ до $\pm 90^\circ$ (при введении режима «Доплеровского обужения луча» (режим «ДОЛ»)) в условиях динамичных траекторных нестабильностей при наличии высокоточных датчиков скорости и ускорения по трем координатам движения. Вместе с тем, точность измерения существующих датчиков положения далеко не всегда отвечает заданным требованиям. Поэтому была поставлена задача разработки и исследования алгоритмов автофокусировки радиоизображений в режиме «ДОЛ» вертолетных РЛС, обеспечивающих максимально достижимое повышение разрешающей способности по азимуту в условиях динамичных траекторных нестабильностей, обусловленных неконтролируемыми механическими воздействиями и вибрациями.

Постановка задачи

Обработка траекторного сигнала в режиме «ДОЛ» предполагает, что на интервале синтезирования РЛИ

Рассматриваются алгоритмы автофокусировки радиоизображений, синтезируемых в режиме «Доплеровского обужения луча» вертолетных РЛС, обеспечивающих максимально достижимое повышение разрешающей способности по азимуту в условиях динамичных траекторных нестабильностей. Проводится моделирование алгоритмов синтезирования апертуры с использованием «слепой» автофокусировки (по спектрограмме траекторного сигнала).

доплеровские частоты могут уходить (смещаться) от фиксированных значений, определяемых постоянными значениями скорости полета летательного аппарата, курса и тангажа, не более чем на величину требуемой разрешающей способности, определяемой заданным азимутальным разрешением. В этом случае задача обработки траекторного сигнала и последующего формирования РЛИ сводится к простому ДПФ-преобразованию, которое, как правило, выполняется по алгоритму БПФ.

Вместе с тем в условиях реальных динамичных траекторных нестабильностей доплеровские частоты изменяются на интервале синтезирования РЛИ по произвольному неизвестному закону, поэтому прямое ДПФ-преобразование в этом случае неприемлемо. Необходимо предварительная оценка параметров опорных функций и последующая согласованная фильтрация по всем частотным (азимутальным) каналам, аналогично режиму «Фокусированного синтезирования апертуры» (режим «ФСА»), с той существенной разницей, что закон изменения параметров траекторного сигнала не известен. С целью разработки математической модели траекторного сигнала, адекватной реальным процессам, были проведены экспериментальные исследования на подвижном стенде в режиме передне-бокового обзора (рис. 1).

Предполагалось, что: центр ДНА направлен под углом $\beta_0^0 = 8^\circ - 10^\circ$ к направлению движения носителя стенда; скорость носителя $V = 16,7-20$ м/с (60-72 км/час); дальность до «объекта» наблюдения 400-600 м; частота повторения зондирующих импульсов 10 кГц; ширина ДНА в азимутальном направлении $\Delta\beta^0 = 1,15^\circ$. Для представленных исходных данных был произведен расчет частотно-временных параметров траекторного сигнала и времени синтезирования РЛИ в режиме «ДОЛ».

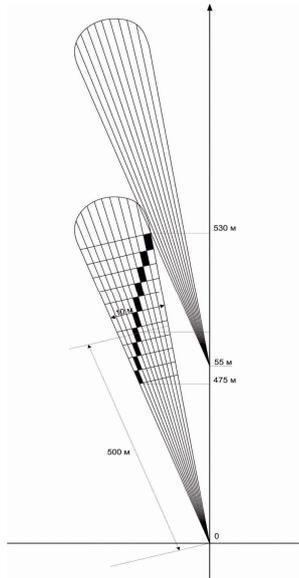


Рис. 1. Передне-боковой обзор в режиме «ДОЛ»

В частности, установлено, что максимальное время наблюдения «объекта» не превышает 3,5 с; ширина полосы доплеровских частот (без учета фактора нестабильности) составляет ориентировочно 15-20 Гц и может расширяться до 60-80 Гц, вследствие траекторных нестабильностей. Допустимое время синтезирования T_C в режиме «ДОЛ» не более 0,4 с, что при отсутствии нестабильностей или использовании эффективных алгоритмов автофокусировки позволяет обеспечить азимутальное разрешение до 0,2 градуса.

Поскольку время «прохождения» одного элемента дальности $\Delta d = 5,35 м$ (при заданной скорости движения подвижного стенда) составляет 0,265 с, было принято решение об уменьшении интервала синтезирования

РЛИ до 0,25 с, что соответствует 2500 отсчетам траекторного сигнала при частоте повторения зондирующих импульсов 10 кГц. При этом ожидаемое азимутальное разрешение пропорционально уменьшается, но остается, по крайней мере, в 3 раза выше по отношению к режиму «Реального луча», если используемые алгоритмы автофокусировки решают поставленную перед ними задачу.

Характер изменения амплитудного спектра траекторного сигнала во времени наглядно иллюстрируют спектрограммы, представленные на рис. 2 для 20, 17, 15 и 12-го каналов дальности, соответственно. Спектрограммы построены с окном анализа 250 мс и смещением по времени 50 мс. На представленных спектрограммах наблюдается «перемещение» видимого объекта по каналам дальности в течение всего времени наблюдения. При этом полоса доплеровских частот расширяется до 40 Гц и совершает колебания (3 периода) с амплитудой 60 Гц.

На рис. 3 представлены в увеличенном масштабе спектрограммы выделенных участков синтезирования РЛИ с окном анализа 250 мс, а на рис. 4 – с окном анализа 50 мс и смещением 10 мс. Уменьшение в 5 раз окна анализа и шага смещения по времени позволяют лучше «отслеживать» динамику изменения доплеровских частот на интервале синтезирования и рассчитать траекторию «движения» средней доплеровской частоты траекторного сигнала (выделена сплошной жирной линией).

Анализ иллюстраций закона изменения средней доплеровской частоты позволяет принять некоторые предположения о модели траекторного сигнала на каждом интервале синтезирования длительностью 250 мс (450 отсчетов).

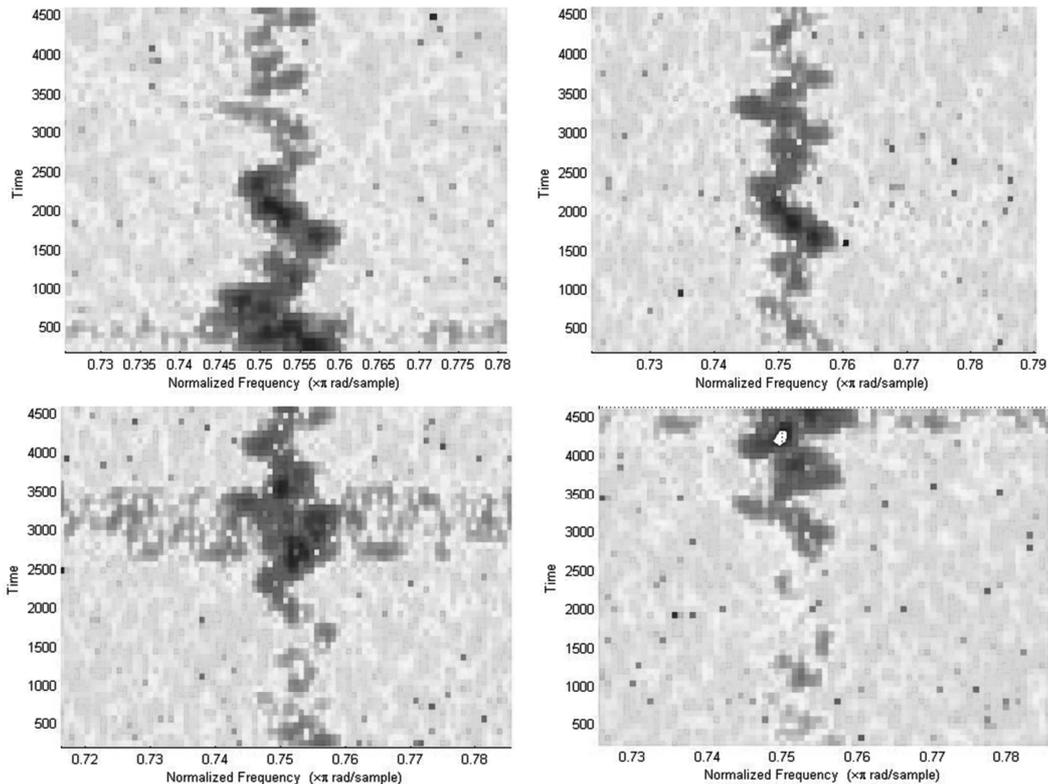


Рис. 2. Спектрограммы реального траекторного сигнала по 20, 17, 15 и 12-му каналам дальности, соответственно

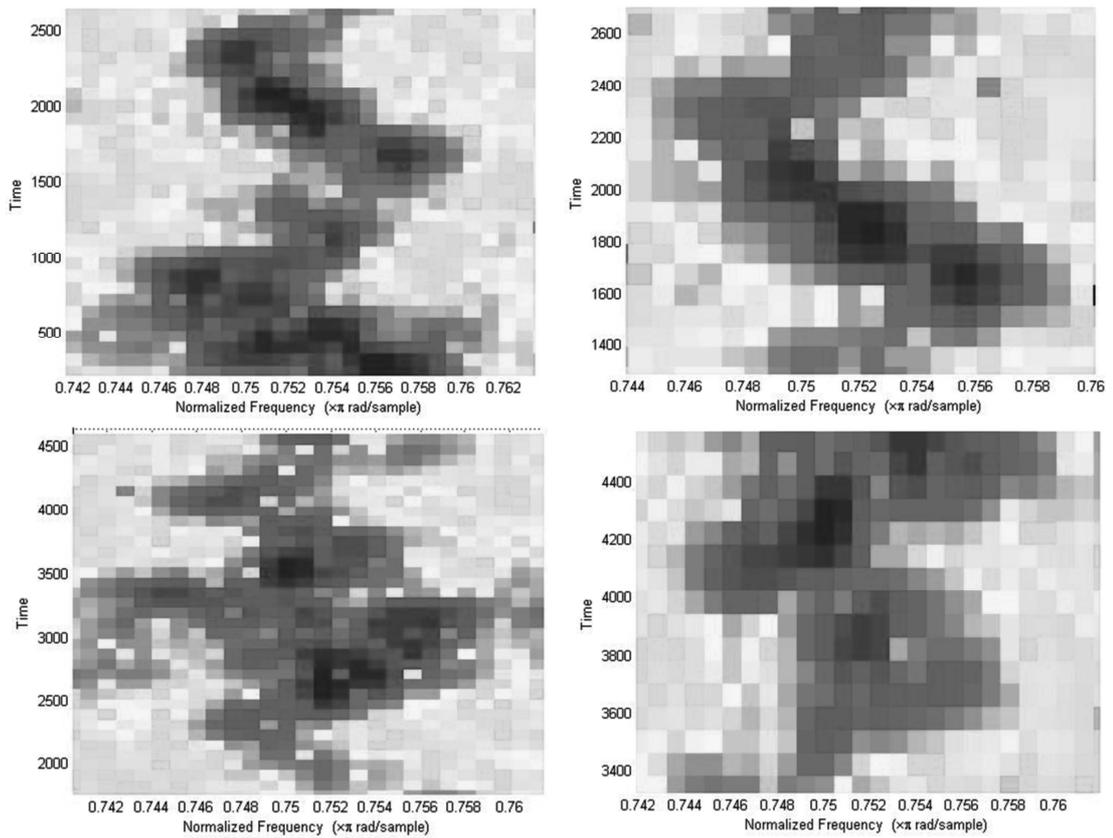


Рис. 3. Спектрограммы выделенных участков синтезирования РЛИ с окном анализа 250 мс

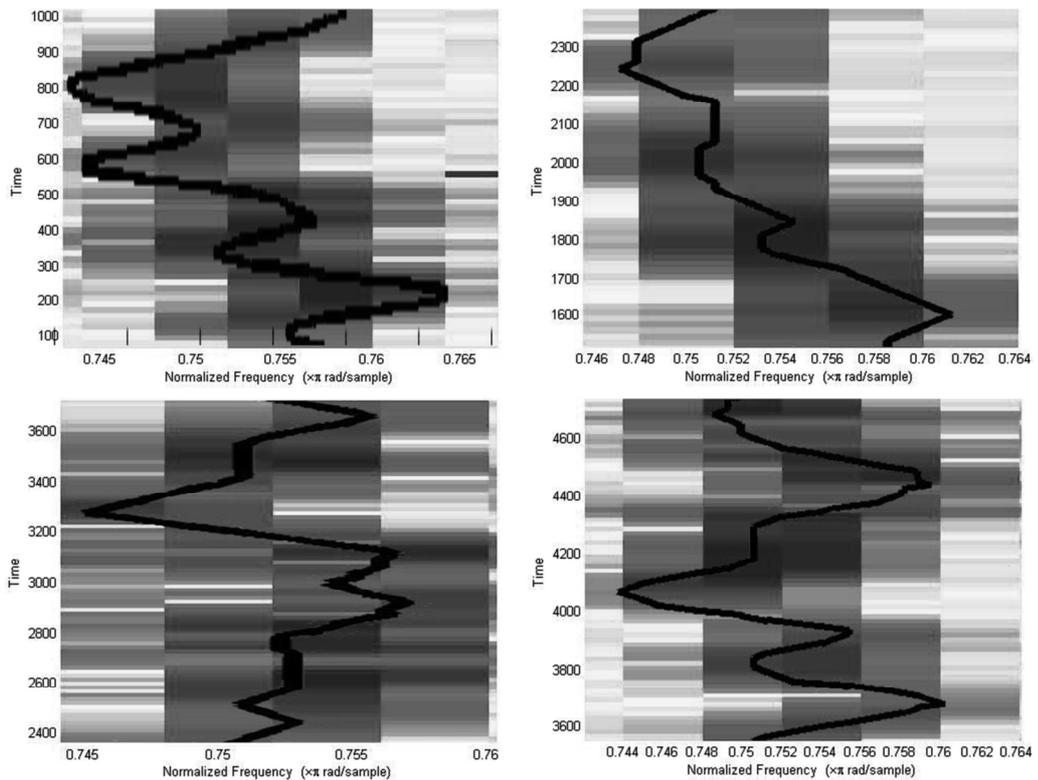
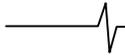


Рис. 4. Иллюстрации закона изменения средних доплеровских частот в выделенных участках синтезирования РЛИ с окном 50 мс

Алгоритм обработки траекторного сигнала для k -го точечного объекта принимает форму [1]:

$$J(\beta_{H_k}, \tau_k) = \left| \int_{-T_c/2}^{T_c/2} x_k(t + \tau_k) h(t, \beta_{H_k}) dt \right|, \quad (1)$$

где $h(t, \beta_{H_k})$ – опорная функция, осуществляющая компенсацию доплеровской частоты сигнала и фокусировку изображения в направлении β_{H_k} ; τ_k – задержка принимаемого траекторного сигнала относительно момента излучения зондирующих импульсов, определяемая



расстоянием до объекта; $x_k(t) = s_k(t) + p(t)$ – принятый траекторный сигнал от k -го точечного объекта, $p(t)$ – комплексный гауссовский шум, действительная и мнимая составляющие которого распределены по нормальному закону, имеют нулевое математическое ожидание и равномерную спектральную плотность мощности по всей частотной оси.

В режиме «ДОЛ» при фиксированных параметрах траекторного сигнала опорная функция представляет собой узкополосный сигнал вида:

$$h(t, \beta_{H_k}) = w(t) \exp \left\{ -j^* \frac{4\pi}{\lambda} V t \cos \beta_{H_k} \cos \alpha \right\}, \quad (2)$$

где $F_D(\beta_{H_k}) = \frac{2V}{\lambda} \cos \beta_{H_k} \cos \alpha$ – доплеровская частота k -го точечного объекта; α – угол падения луча, $w(t)$ – весовая функция, j^* – мнимая единица.

При изменении параметров траекторного сигнала по неизвестному закону опорная функция для k -го точечного объекта принимает следующий вид:

$$h(t, \beta_{H_k}) = w(t) \exp \left\{ -j^* \frac{4\pi}{\lambda} \int V(t) \cos \beta_{H_k}(t) \cos \alpha(t) dt \right\}. \quad (3)$$

Изменение во времени на интервале синтезирования РЛИ таких параметров, как скорость полета, курс и тангаж приводит к уходу (смещению) полосы доплеровских частот k -го точечного объекта по неизвестному закону

$$F_D(\beta_{H_k}, t) = \frac{2V(t)}{\lambda} \cos \beta_{H_k}(t) \cos \alpha(t), \quad (4)$$

который и предстоит определить, прежде чем перейти к формированию РЛИ по алгоритму (1).

Возможны два основных подхода к решению поставленной задачи. Первый ориентирован на прямое использование модели ухода доплеровских частот (4) и текущие показания датчиков скорости, курса и тангажа. Второй, который можно условно назвать «слепым», устанавливает закон ухода доплеровских частот по спектрограмме непосредственно самого траекторного сигнала или методами прямой коррекции фазовых погрешностей [2-7].

Алгоритм автофокусировки РЛИ с учетом показаний датчиков скорости, курса и тангажа

Как показал проведенный выше анализ допустимых траекторных нестабильностей, для обеспечения заданного разрешения по азимуту до $0,2^\circ$ требуется введение механизма адаптации к изменению параметров V , β^0 и α^0 траекторного сигнала не только от кадра к кадру (как для классического режима ДОЛ), но и внутри текущего кадра формирования РЛИ.

Применяется следующий алгоритм адаптации:

– по каждому j -му частотному (азимутальному) каналу i -го элемента дальности вычисляется опорная функция вида

$$h_{j,i}^*(nT_1) = e^{j^* \frac{2\pi}{L} \sum_{l=n-L+1}^n f_{j,i}(lT_1) lT_1}, \quad j = 0, 1, 2, \dots, N-1, \quad (5)$$

где $f_{j,i}(nT_1) = \frac{2V(nT_1)}{\lambda} \cos \beta_{j,i}(nT_1) \cos \alpha(nT_1),$

$n = 0, 1, 2, 3, \dots, L-1, \quad L = T_C / T_1$ – размерность преобразования.

– по каждому j -му частотному (азимутальному) каналу i -го элемента дальности вычисляется на интервале синтезирования РЛИ (условно для $n = 0, 1, 2, 3, \dots, L-1$) длительностью T_C взаимная корреляция входного траекторного сигнала

$$x_i^*(nT_1) = \sum_{m=1}^N A_{m,i} e^{j\varphi_{m,i}} e^{j^* \frac{2\pi}{L} \sum_{l=n-L+1}^n f_{m,i}(lT_1) lT_1}$$

и опорной функции (5):

$$Y^*(j, i) = \frac{1}{L} \sum x_i^*(nT_1) h_{j,i}^{**}(nT_1) =$$

$$\frac{1}{L} \sum_{n=0}^{L-1} \sum_{m=1}^N A_{m,i} e^{j\varphi_{m,i}} e^{j^* \frac{2\pi}{L} \sum_{l=n-L+1}^n f_{m,i}(lT_1) lT_1} e^{-j^* \frac{2\pi}{L} \sum_{l=n-L+1}^n f_{j,i}(lT_1) lT_1}, \quad j = 1, 2, 3, \dots, 10. \quad (6)$$

3. По каждому j -му частотному (азимутальному) каналу i -го элемента дальности вычисляется модуль (амплитуда) взаимной корреляции:

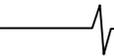
$$|Y^*(j, i)| = \sqrt{Y_{\cos}^2(j, i) + Y_{\sin}^2(j, i)}, \quad j = 1, 2, 3, \dots, 10.$$

4. Результат (спектр амплитуд) i -го элемента дальности при всех $j = 1, 2, 3, \dots, 10$ отображается на экране индикатора РЛИ.

5. Операции п.1-п.4 повторяются для всех элементов дальности $i = 1, 2, 3, \dots, R-1$.

Алгоритм «слепой» автофокусировки

В основе данного подхода лежит идея оценки ухода полосы доплеровских частот по текущей спектрограмме траекторного сигнала и формирования множества опорных функций (5) с учетом установленной модели изменения во времени средней доплеровской частоты для каждого i -го элемента дальности. На рис. 4 отчетливо прослеживается характер ухода полосы доплеровских частот, что позволяет сделать вывод о закономерностях изменения положения спектра траекторного сигнала как внутри каждого интервала синтезирования длительностью $0,25$ с, так и при переходе от интервала к интервалу. В частности, можно утверждать, что закон изменения положения полосы доплеровских частот на отдельно взятом интервале синтезирования аппроксимируется линейной, параболической или синусоидальной моделью с неизвестными параметрами. Поэтому в основе алгоритмов автофокусировки лежит оценка параметров принятых моделей и последующее формирование адекватной опорной функции и корреляционной обработки по алгоритму (6).



Предлагается следующий алгоритм автофокусировки:

1. Для текущего интервала синтезирования РЛИ строится спектрограмма траекторного сигнала с использованием ДПФ, алгоритма MUSIC или других методов спектрального оценивания. Шаг смещения по времени и длительность окна анализа определяются динамикой «траектории движения» доплеровских частот и желаемой разрешающей способностью по частоте (азимутальным разрешением). Для принятой по рабочему сигналу модели траекторного сигнала длительностью 250 мс (2500 отсчетов) длительность окна анализа – 50 мс (500 отсчетов) с шагом 10 мс.

2. По текущей спектрограмме устанавливаются закон и параметры изменения средней доплеровской частоты $f_{0i}(nT_1)$ с использованием интерполяции и полиномиальной аппроксимации реального процесса изменения.

В результате по каждому j -му частотному (азимутальному) каналу i -го элемента дальности формируется опорная функция

$$h_{j,i}^*(nT_1) = e^{j^* \frac{2\pi}{L} \sum_{l=n-L+1}^n f_{j,i}(lT_1)lT_1}, \quad j = 1, 2, 3, \dots, 10. \quad (7)$$

где $f_{j,i}(nT_1) = f_{0i}(nT_1) + l \frac{f_{кв}}{T_C}$; $l = \begin{cases} +j, & j = \overline{N/2, (N-1)}; \\ -j, & j = \overline{0, (N/2-1)}; \end{cases}$

3. По каждому j -му частотному (азимутальному) каналу i -го элемента дальности вычисляется на интервале синтезирования РЛИ (условно для $n = 0, 1, 2, 3, \dots, L-1$) длительностью T_C взаимная корреляция входного траекторного сигнала и соответствующей опорной функции (7) аналогично (6).

4. Результат (спектр амплитуд) i -го элемента дальности при всех $j = 1, 2, 3, \dots, 10$ отображается на экране индикатора РЛИ.

5. Операции п.1-п.4 повторяются для всех элементов дальности $i = 1, 2, 3, \dots, R-1$.

Моделирование алгоритма «слепой» автофокусировки

С целью исследования разработанного алгоритма автофокусировки РЛИ по реальному траекторному сигналу, полученному на подвижном стенде, было проведено моделирование процесса формирования отдельных участков РЛИ. В частности, на рис. 5 представлена спектрограмма траекторного сигнала в 21-ом канале дальности на интервале синтезирования длительностью 250 мс с шагом 10 мс и окном анализа 50 мс. Рис. 6 иллюстрирует оценку положения центра полосы доплеровских частот по 25 измерениям на интервале синтезирования РЛИ, а рис. 7 – сглаженную оценку ухода средней доплеровской частоты относительно исходного (условно нулевого) положения, выраженную в Гц. Аппроксимация функции изменения средней доплеровской частоты полиномом 10-го порядка представлена на рис.8, а закон изменения фазы траекторного сигнала, полученный интегрированием полинома, – на рис. 9.

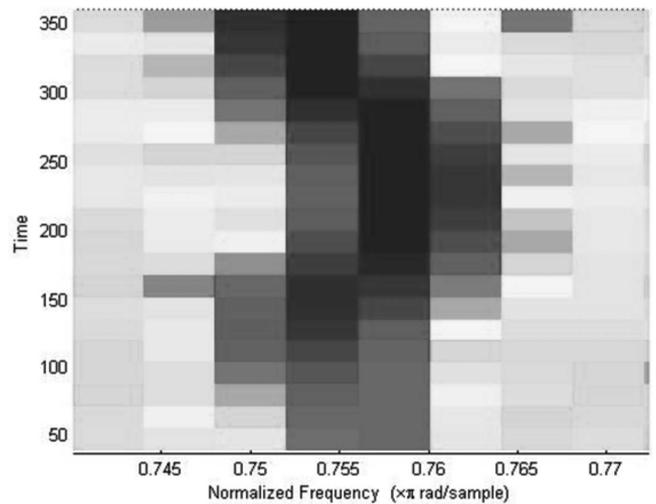


Рис. 5. Спектрограмма траекторного сигнала до применения автофокусировки

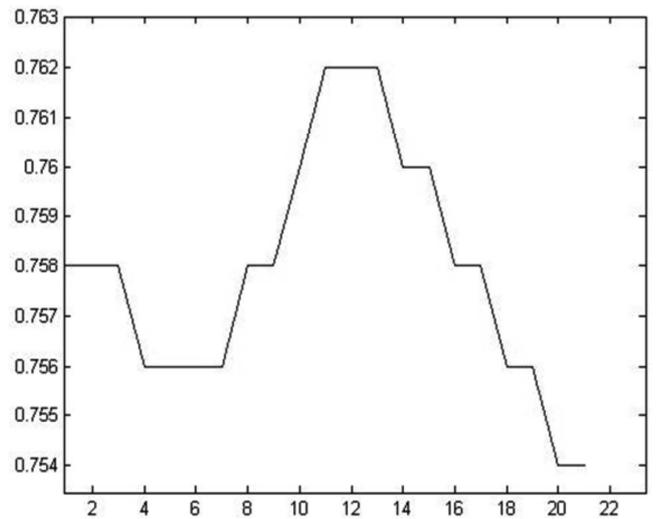


Рис. 6. Оценка ухода средней доплеровской частоты

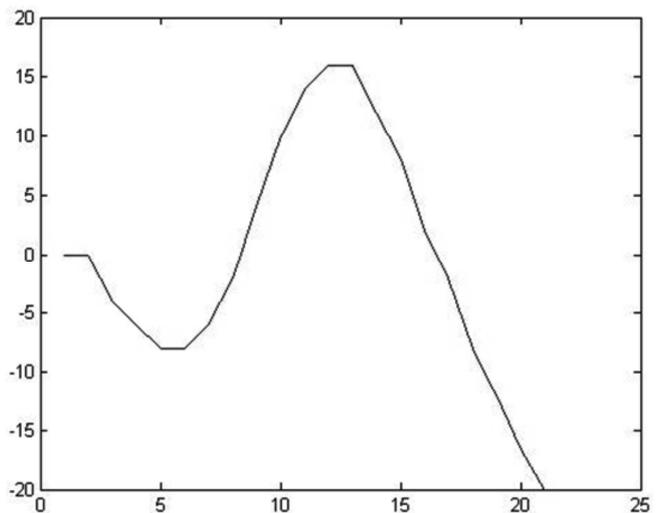


Рис. 7. Сглаженная оценка ухода средней доплеровской частоты

На рис. 10 приведена спектрограмма траекторного сигнала в 21-ом канале дальности после компенсации ухода доплеровских частот, отражающая относительную стабилизацию полосы частот на интервале синтезирования.

Дальнейшие экспериментальные исследования производились на модели ухода средней доплеровской частоты траекторного сигнала (рис. 11), адекватной реальным записям. На всем интервале наблюдения траекторного сигнала можно выделить 5 интервалов синтеза длительностью 2500 отсчетов каждый. В пределах одного интервала синтеза средняя доплеровская частота меняется в пределах от -30 Гц до +30 Гц по закону близкому к линейному или параболическому.

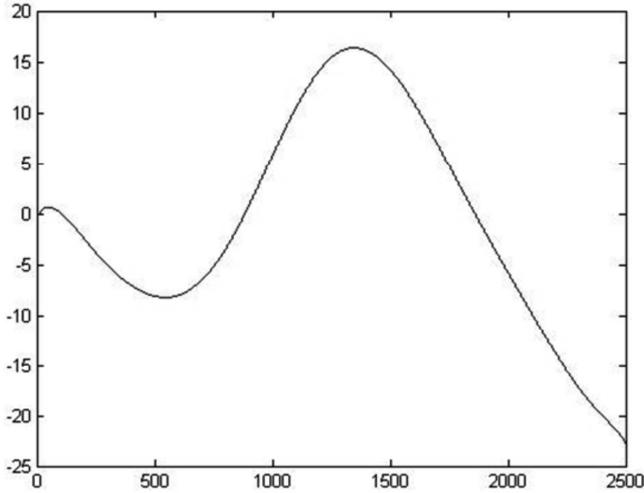


Рис. 8. Аппроксимация ухода средней доплеровской частоты полиномом 10-го порядка

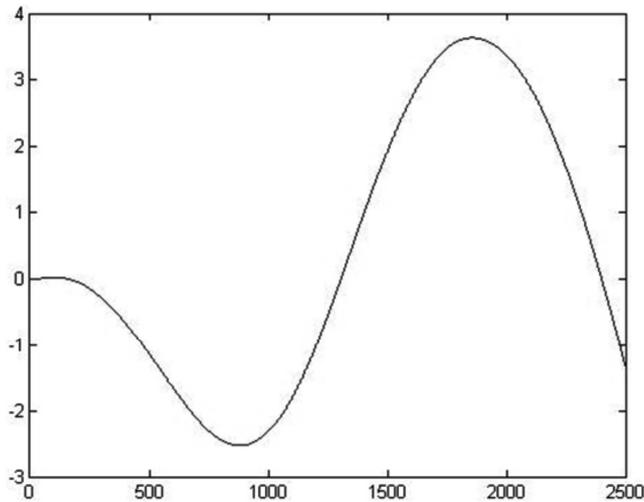


Рис. 9. Аппроксимация изменения фазы траекторного сигнала

Результаты моделирования предложенного алгоритма автофокусировки и обработки траекторного сигнала по исходному оптическому изображению первых четырех интервалов синтеза представлены на рис. 12. В первом столбце приведено исходное синтезируемое изображение, во втором столбце – результаты формирования РЛИ в режиме «Реального луча», в

третьем столбце – синтезируемое РЛИ в режиме «ДОЛ» при введении ухода доплеровских частот в соответствии с принятой моделью (рис. 11), без компенсации, а в четвертом столбце – с компенсацией ухода доплеровских частот методом «слепой» автофокусировки.

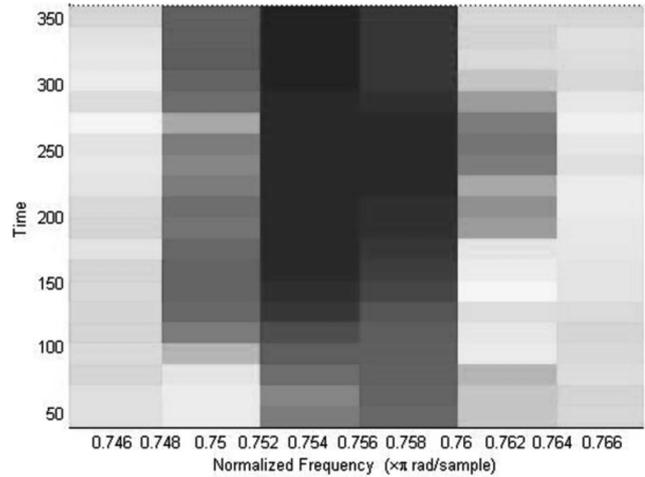


Рис. 10. Спектрограмма траекторного сигнала после применения автофокусировки

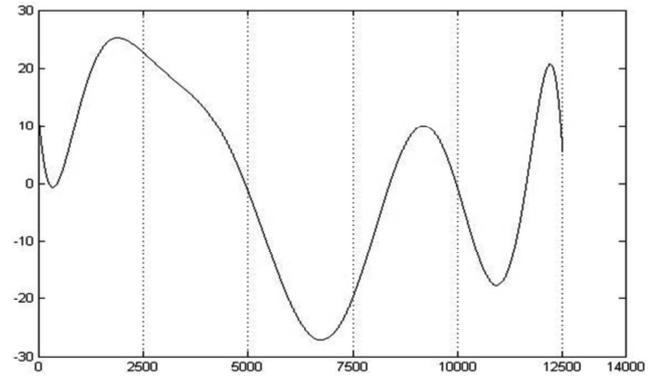


Рис. 11. Модель ухода средней доплеровской частоты траекторного сигнала

Заключение

Результаты экспериментов позволяют сделать вывод о том, что применяемый метод компенсации траекторных нестабильностей на основе алгоритма автофокусировки оказывается работоспособен и дает ощутимое улучшение качества РЛИ по сравнению с некомпенсированной обработкой. Последующие работы следует связать с усложнением модели траекторного сигнала, приближая ее к реальным характеристикам траекторных сигналов, и с поиском путей повышения точности оценки закона ухода доплеровских частот на основе данного, а также альтернативных методов.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ для Ведущих научных школ НШ-242.2012.10.

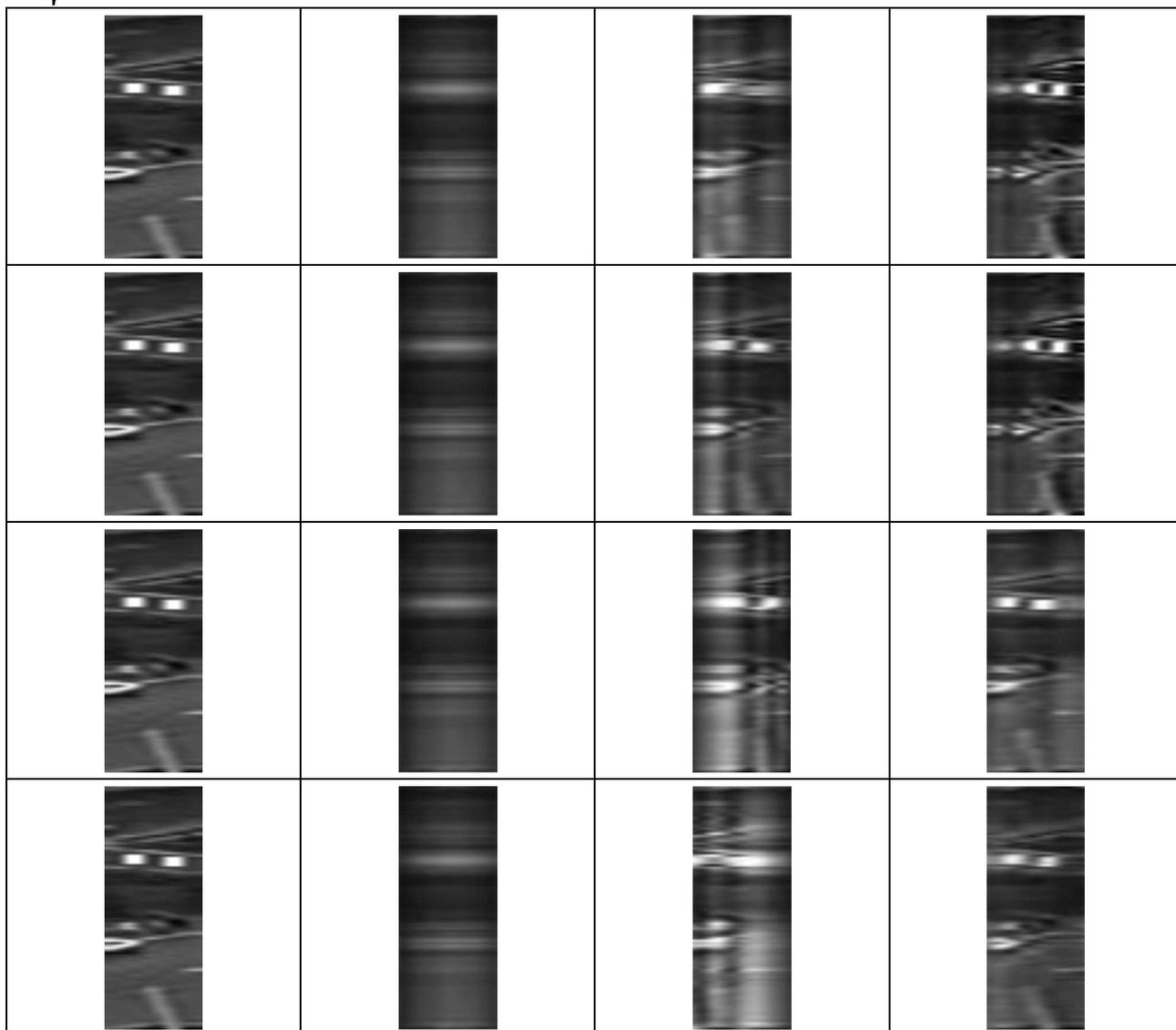


Рис. 12. Результаты формирования РЛИ по исходному оптическому изображению, без компенсации и с компенсацией ухода доплеровских частот

Литература

1. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. Учебное пособие \ Под ред. Г.С. Кондратенкова. – М.: Радиотехника, 2005. – 368 с.
2. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Синтез алгоритма автофокусировки радиолокационного изображения PCA методом динамического фазового портрета. – Радиотехника, 2003, № 1, с. 3-7.
3. D.E. Wahl, P.H. Eichel, D.C. Ghiglia, and C.V. Jakowatz, Jr., «Phase Gradient Autofocus – A robust tool for high resolution SAR phase correction», IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., vol. 30, no. 7, pp. 827-835, 1994.
4. T.J. Kragh, «Monotonic iterative algorithm for minimum-entropy autofocus», Adaptive Sensor Array Processing (ASAP), 2006.
5. R.L. Morrison, Jr., M.N. Do, and D.C. Munson, Jr., «SAR image autofocus by sharpness optimization: A theoretical study», IEEE Trans. Image Processing, vol. 16, pp. 2309-2321, 2007.
6. F. Berizzi and G. Corsini, «Autofocusing of inverse synthetic aperture radar images using contrast optimization», IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., vol. 32, no. 7, pp. 1185-1191, 1996.

7. M.P. Hayes and S.A. Fortune, «Recursive phase estimation for image sharpening», presented at the Image and Vision Computing New Zealand, 2005.

ALGORITHMS OF RADAR IMAGES AUTOFOCUS IN PRESENCE OF DYNAMIC TRAJECTORY INSTABILITIES

*Androsov V.V., Vityazev V.V.,
Vityazev S.V., Shershnev E.D.*

The paper considers the problem of azimuth resolution increasing in the conditions of dynamic trajectory instabilities. It is assumed that an unknown Doppler frequency band fluctuation (shift) may take place during an aperture synthesizing time interval in a Doppler beam narrowing mode of SAR operation. A potentiality of an azimuth resolution increasing with an autofocus algorithm, which takes into account measurements of three-coordinates plane velocity and acceleration sensors, is estimated in the paper.

The algorithm of a «blind» autofocusing is suggested. This algorithm automatically detects a law of a Doppler frequencies fluctuation directly from radio reflection spectrograms. The results of a blind autofocus technique received for a set of practical cases are described and discussed.