

Труды МАИ. 2022. № 125
Trudy MAI, 2022, no. 125

Научная статья
УДК 621.396.96
DOI: [10.34759/trd-2022-125-14](https://doi.org/10.34759/trd-2022-125-14)

ВЛИЯНИЕ ТРАЕКТОРНЫХ НЕСТАБИЛЬНОСТЕЙ И ХАРАКТЕРИСТИК БОРТОВОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ НА КАЧЕСТВО РАДИОЛОКАЦИОННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ ПРИ СИНТЕЗИРОВАНИИ АПЕРТУРЫ

Кирилл Владимирович Каменский

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

kvkmai@mail.ru

Аннотация. Цель: определить требования к характеристикам данных от бортовой навигационной системы (БНС) для радиолокатора, размещаемого на малом беспилотном летательном аппарате и работающего в режиме синтезирования апертуры антенны при боковом обзоре с использованием непрерывного линейно-частотно модулированного зондирующего сигнала. Предполагается, для формирования радиолокационного изображения (РЛИ) используется метод обратного проецирования.

Методика: эксперименты на основе численного моделирования в среде Matlab.

Результат: предложена методика исследования влияния траекторных неустойчивостей на качество изображения в радиолокаторе непрерывного излучения

с синтезированием апертуры, позволяющая получить оценки влияния характеристик данных от БНС на качество РЛИ и получены оценки, использованные при выборе БНС носителя конкретного радара.

Практическая значимость: предложенная методика позволила обосновать выбор БНС носителя конкретного радиолокатора.

Ключевые слова: радиолокатор с синтезированием апертуры, обратное проецирование, траекторный сигнал, непрерывное излучение, линейно-частотно модулированный сигнал

Для цитирования: Каменский К.В. Влияние траекторных нестабильностей и характеристик бортовой навигационной системы на качество радиолокационного изображения при синтезировании апертуры // Труды МАИ. 2022. № 125. DOI: [10.34759/trd-2022-125-14](https://doi.org/10.34759/trd-2022-125-14)

Original article

TRAJECTORY INSTABILITIES AND ONBOARD NAVIGATION SYSTEM CHARACTERISTICS INFLUENCE ON SYNTHETIC APERTURE RADAR IMAGE QUALITY

Kirill V. Kamenskiy

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

kvkmai@mail.ru

Abstract. The goal of this work is to determine requirements imposed on onboard navigation system for the radar that is to be placed on a small unmanned aerial vehicle and

to work in stripmap side-looking synthetic aperture mode with linear frequency modulated continuous wave. To achieve this goal the methodology is proposed to investigate trajectory instabilities effects on radar image in continuous wave synthetic aperture radar. The same methodology can be used to obtain the estimates of onboard navigation system characteristics impact on radar image quality. These characteristics are: measurement accuracy of radar antenna system phase center coordinates and data sampling frequency. The proposed methodology is based upon the use of backprojection method to process a track signal obtained through direct simulation in the condition that there is only one point reflector on the illuminated scene. Quality of the amplitude radar image obtained this way can be estimated by objective criteria: main lobe width and side lobes relative level in the point reflector's response. The results of the proposed methodology implementation are estimates used to choose the onboard navigation system for a specific radar. In this paper the cases were investigated where trajectory instabilities are absent, represent a constant value, a linear function, or a non-linear function (sinusoid). It is concluded that onboard navigation system data sampling frequency should be not less than track signal sampling frequency in slow time, and acceptable accuracy of coordinate measurement depends on expected intensity of trajectory instabilities. The practical value of the conducted work is in that the proposed methodology allowed to provide rationale for requirements imposed on the onboard navigation system characteristics.

Keywords: synthetic aperture radar, backprojection, track signal, continuous wave, linear frequency modulation

For citation: Kamenskiy K.V. Trajectory instabilities and onboard navigation system characteristics influence on synthetic aperture radar image quality. *Trudy MAI*, 2022, no. 125. DOI: [10.34759/trd-2022-125-14](https://doi.org/10.34759/trd-2022-125-14)

Введение

В настоящее время в задачах картографирования и радиомониторинга широкое применение находят радиолокаторы с синтезированием апертуры (РСА), размещаемые на малых и сверхмалых беспилотных летательных аппаратах (БПЛА) и использующие непрерывное излучение (НИ) с линейно-частотно модулированным (ЛЧМ) сигналом (в зарубежной литературе для таких сигналов используется аббревиатура LFM CW – Linear Frequency Modulated Continuous Wave). У таких радиолокаторов (далее – НИЛЧМ-РСА) сравнительно небольшая дальность действия (порядка десяти-пятнадцати километров), небольшие габариты и невысокие требования к электропитанию. Продолжающаяся миниатюризация и удешевление электронных устройств, составляющих НИЛЧМ-РСА, позволяют по-новому рассматривать известные технические решения, ранее не представлявшиеся целесообразными.

Один из примеров таких решений – метод обратного проецирования (“ВР” или “Backprojection” в зарубежной литературе), предназначенный для формирования радиолокационного изображения (РЛИ). Этот метод использует двумерный согласованный фильтр с пространственно-зависимой импульсной характеристикой,

что позволяет получать РЛИ наилучшего качества, но накладывает высокие требования к вычислительной мощности [1–7].

Данная статья – часть комплекса работ, посвящённых расширениям дальностно-доплеровского алгоритма (ДДА). ДДА – метод формирования РЛИ, использующий допущения, позволяющие разменять качество РЛИ, получаемое с помощью ВР, на облегчение нагрузки на бортовой вычислитель [8–10]. Эти же допущения делают качество РЛИ уязвимым перед такими мешающими факторами, как траекторные неустойчивости (ТН) – отклонение движения носителя РЛС от заданного в модели, лежащей в основе метода обработки ТС. Здесь была поставлена задача разработать методику исследования влияния ТН на качество РЛИ, получаемого методом обратного проецирования, чтобы в будущем использовать эту методику как инструмент для определения границ применимости тех или иных решений, связанных с ДДА.

Для работы метода обратного проецирования необходимо точное знание положения фазового центра антенной системы радиолокатора в системе координат, в которой строится РЛИ, поэтому важно, чтобы бортовая навигационная система (БНС) своевременно поставляла точные данные. Очевидно, что разрабатываемая методика должна позволять исследовать и влияние характеристик от БНС на качество РЛИ, получаемого тем же методом. Под характеристиками БНС понимаются точность измерения координат носителя, а также частота выдачи данных.

Практическая ценность этой методики состоит в возможности предъявлять требования к характеристикам БНС для радиолокатора с синтезированием апертуры.

В разделе 1 даётся краткое описание модели траекторного сигнала и пояснение принципа работы метода обратного проецирования. В разделе 2 указываются параметры данных БНС и то, как они отражаются на работе метода обратного проецирования. В разделе 3 предложена методика исследования влияния траекторных нестабильностей на качество РЛИ, получаемого методом обратного проецирования. В разделе 4 предложенная методика использована для исследования влияния характеристик БНС на качество РЛИ, получаемого методом обратного проецирования. В заключении обобщаются выводы по проделанной работе.

1. Формирование РЛИ методом обратного проецирования

1.1. Модель траекторного сигнала

Рассмотрим модель траекторного сигнала (ТС), используя рис. 1, где приведена геометрическая модель съёмки с помощью РСА полосового бокового обзора.

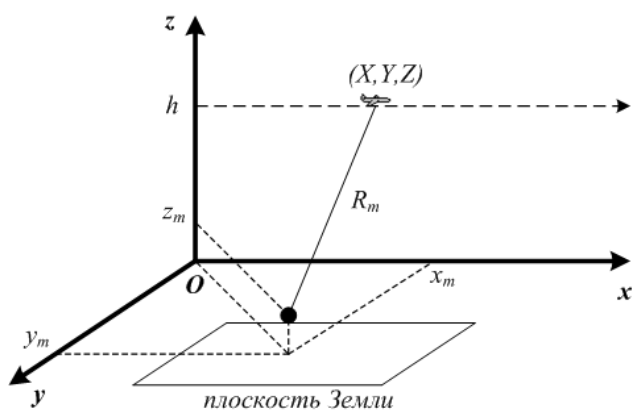


Рис. 1 – Геометрическая модель съёмки РСА бокового обзора

На рис. 1 задана трёхмерная декартова система координат с центром в точке O такой, что точка начала съёмки имеет координаты $(0, 0, h)$. Штриховой линией со стрелкой обозначена линия курса, по которой на воздушном носителе движется НИЛЧМ-РСА. Основы теории таких радиолокационных систем подробно рассматриваются в работе [11]. Излучённый сигнал, пройдя расстояние R_m , достигает цели, представленной в виде точечного отражателя с координатами (x_m, y_m, z_m) . Отражённый сигнал проходит от цели до радара расстояние, которое обычно можно считать равным R_m . Отражённый сигнал смешивается в приёмнике с копией излучённого и пропускается через фильтр нижних частот, что в идеале оставляет одно гармоническое колебание, частота и фаза которого хранят информацию об удалении цели от радара, а амплитуда – об отражающей способности.

ТС представляет собой аддитивную смесь гармонических колебаний, каждое из которых соответствует своему отражателю на облучаемой сцене. Для удобства последующей обработки ТС записывается в двумерном виде с использованием понятий быстрого и медленного времени (см. Рис. 2):

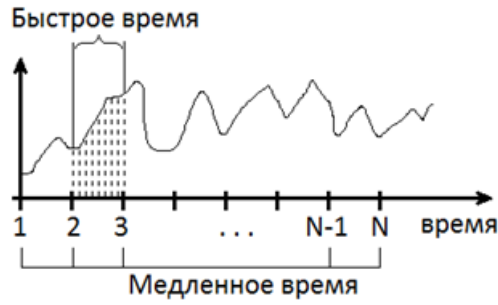


Рис. 2 – Быстрое и медленное время

$$s_{TC}(\eta, t) = \sum_{\eta=1}^N \sum_{m=1}^M s_m(\eta, t) W_m(\eta, t) \quad (1)$$

Здесь η – индекс медленного времени такой, что момент медленного времени вычисляется как произведение $\eta \Delta T_s$, где ΔT_s – интервал между отсчётами медленного времени; t – быстрое время, причём $t \in [0, \tau_n)$, где τ_n – время наблюдения, $\tau_n \leq \Delta T_s$; m – порядковый номер отражателя; $s_m(\eta, t)$ – парциальный ТС, соответствующий m -му отражателю на облучённой сцене; $W_m(\eta, t)$ – функция прямоугольного окна, отражающая результат прохождения сигналом $s_m(\eta, t)$ фильтра нижних частот после смесителя. Полагая, что величина τ_n не превышает интервал модуляции, запишем парциальный ТС следующим образом:

$$s_m(\eta, t) = \exp \left(j2\pi \left[f_0 \tau_m(\eta, t) + \beta \tau_m(\eta, t) t - \frac{1}{2} \beta \tau_m^2(\eta, t) \right] - \varphi_m \right) \quad , \quad (2)$$

где f_0 – начальная частота линейной частотной модуляции; β – крутизна нарастания частоты в линейно-частотной модуляции, равная отношению полосы частот ЛЧМ к длительности интервала модуляции; φ_m – фазовый сдвиг, вызванный

индивидуальными особенностями m -го отражателя; $\tau_m(\eta, t)$ – время задержки сигнала, описываемое как:

$$\tau_m(\eta, t) \approx \frac{2R_m(\eta, t)}{c} = \frac{2}{c} \sqrt{(X(\eta, t) - x_m(\eta, t))^2 + (Y(\eta, t) - y_m(\eta, t))^2 + (Z(\eta, t) - z_m(\eta, t))^2}, \quad (3)$$

где $R_m(\eta, t)$ – наклонная дальность до m -го отражателя; c – скорость распространения электромагнитной волны в среде; X, Y, Z – координаты фазового центра антенной системы радиолокатора (далее – просто радиолокатора), а x_m, y_m, z_m – координаты m -го отражателя. При допущении, что за всё время съёмки объекты на сцене остаются неподвижными, выражение (3) упрощается:

$$\tau_m(\eta, t) \approx \frac{2}{c} \sqrt{(X(\eta, t) - x_m)^2 + (Y(\eta, t) - y_m)^2 + (Z(\eta, t) - z_m)^2}. \quad (4)$$

1.2. Метод обратного проецирования

Метод обратного проецирования можно рассматривать как двумерный пространственно-зависимый согласованный фильтр [12]. Этот метод представляет собой цикл, смысл каждой итерации которого в том, чтобы выбрать на РЛИ точку и определять её яркость по результату согласованной фильтрации, где импульсная характеристика согласованного фильтра получается из численно смоделированного выражения (2) для отражателя, соответствующего выбранной точке. Это значит, что если формируемое РЛИ состоит из K точек, то для каждой k -й точки ($k = 1, \dots, K$) будет выполняться один и тот же алгоритм, блок-схема которого представлена на рис. 3.

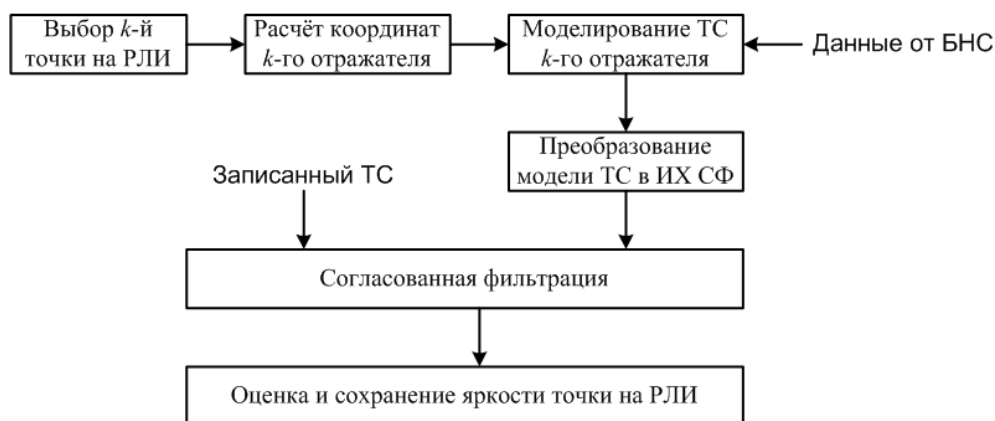


Рис. 3 – Блок-схема k -й итерации алгоритма обратного проецирования

Если РЛИ строится на плоскости Земли (Oxy на рис. 1), то расчёт координат k -го точечного отражателя выполняется на основе соотношения размеров и разрешения РЛИ с границами облучаемой сцены, а также на основе имеющейся в наличии карты высот:

$$\begin{aligned}
 x_k &= \left(k - \left\lfloor \frac{k}{I_x} \right\rfloor \right) \Delta x \\
 y_k &= \left(k - \left\lfloor \frac{k}{I_y} \right\rfloor \right) \Delta y \\
 z_k &= DEM \left(k - \left\lfloor \frac{k}{I_x} \right\rfloor, k - \left\lfloor \frac{k}{I_y} \right\rfloor \right)
 \end{aligned}
 ,$$

где $\lfloor \dots \rfloor$ – знак округления вниз; I_x, I_y – размер РЛИ в точках по оси Ox и Oy соответственно; Δx и Δy – разрешение РЛИ в метрах по оси Ox и Oy соответственно; $DEM(k_x, k_y)$ – функция, возвращающая из карты высот значение высоты для точки, положение которой задано индексами k_x, k_y .

Координаты (x_k, y_k, z_k) , а также координаты, полученные от БНС, используются для расчёта по выражению (4) времени задержки $\tau_k(\eta, t)$. Это время

задержки подставляется вместо $\tau_m(\eta, t)$ в выражение (2), чтобы рассчитать по нему ТС для точечного отражателя, соответствующего k -й точке на РЛИ:

$$s_{TC,k}(\eta, t) = \sum_{\eta=1}^N s_k(\eta, t) W_k(\eta, t) \quad (5)$$

Преобразование сигнала (5) в импульсную характеристику (ИХ) согласованного фильтра (СФ) может быть выполнено во временной области путём последовательного зеркального отображения исходного сигнала по t и η со сдвигом на τ_H и $N\Delta T_s$ соответственно. Поскольку последующую за этой операцией согласованную фильтрацию удобно проводить в частотной области, то имеет смысл преобразовывать сигнал (5) в передаточную функцию СФ:

$$H(p, f_{\bar{o}}) = S_{TC,k}^*(p, f_{\bar{o}}) = \left(\Phi_{\eta} \left\{ \Phi_t \left\{ s_{TC,k}(\eta, t) \right\} \right\} \right)^* \quad (6)$$

где знак $*$ означает комплексное сопряжение; p – индекс дискретных частот Доплера, $f_{\bar{o}}$ – частоты биений; $\Phi_{\eta}\{\dots\}$ – прямое преобразование Фурье по медленному времени; $\Phi_t\{\dots\}$ – прямое преобразование Фурье по быстрому времени.

Тогда согласованная фильтрация в частотной области сводится к поэлементному умножению двумерного спектра сигнала (1) и двумерной передаточной функции (6):

$$S_{CF}(p, f_{\bar{o}}) = S_{TC,k}(p, f_{\bar{o}}) \cdot H(p, f_{\bar{o}}) \quad (7)$$

Искомой яркости k -й точки РЛИ соответствует оценка энергии сигнала на выходе СФ. Её можно вычислить как модуль суммы значений частотного спектра (7) по всем p и $f_{\bar{o}}$.

2. Параметры, влияющие на качество работы метода обратного проецирования

По внешнему виду выражений (1), (2) и (3) можно сказать, что параметры, влияющие на качество РЛИ, полученного ВР, – это:

- параметры излучаемого сигнала;
- координаты радиолокатора, полученные от БНС;
- координаты объектов на сцене.

Предмет интереса в этой работе – влияние траекторных нестабильностей на качество формируемого РЛИ, а информация о них заложена в координатах точек на реальной траектории движения носителя РЛС – X, Y, Z в (3, 4). Эти координаты оцениваются с помощью БНС, то есть исследование влияния траекторных нестабильностей на качество РЛИ неразрывно связано с характеристиками используемой БНС. В связи с этим другие параметры, влияющие на качество РЛИ, можно посчитать в этом контексте менее важными и для них принять следующее допущение: параметры излучаемого сигнала и координаты объектов на сцене известны точно и не меняются за время съёмки.

Для формирования РЛИ с помощью ВР необходимо, чтобы координаты радиолокатора были известны в каждый момент быстрого времени t и медленного времени $\eta\Delta T_s$, поэтому конкретизируем интерес к характеристикам данных, получаемых от БНС:

- а) точность измерения координат;
- б) частота выдачи данных.

Погрешность в измерениях координат радара влечёт за собой несовпадение модели ТС $s_k(\eta, t)$ и парциального ТС $s_m(\eta, t)$, из-за чего реакция СФ теряет сходство с автокорреляционной функцией сигнала (2) и теряет в энергии. В результате, отклик m -го отражателя на РЛИ может стать неразличим на общем фоне или искажён.

Частота выдачи данных по той же причине имеет важное значение для работы ВР. Частота дискретизации быстрого времени обычно на несколько порядков превосходит частоту, с которой поставляются данные от БНС (единицы и десятки Герц), поэтому при обработке ТС не получается сопоставить координаты радиолокатора каждому отсчёту. Чтобы преодолеть это препятствие, данные от БНС интерполируются между отсчётами медленного времени так, чтобы каждый отсчёт быстрого времени сопровождался нужным набором координат.

Сочетание частоты выдачи данных и выбранного метода интерполяции так же может представлять интерес в условиях наличия траекторных нестабильностей, поскольку чем более сложной оказывается траектория движения радара в отличие от запланированной и чем ниже частота выдачи данных от БНС, тем существеннее разница между реальными координатами и полученными в результате интерполяции. Однако, влияние методов интерполяции данных от БНС на качество РЛИ не рассматривается в данной работе, поэтому выбор метода интерполяции далее основан исключительно на простоте его реализации.

3. Методика исследования влияния траекторных нестабильностей на качество

РЛИ

Для использования объективных критериев оценки качества РЛИ количество возможной получаемой визуальной информации нужно ограничить. Этого можно достичь, влияя на характеристики и количество отражателей, размещённых на облучаемой сцене, изменяя характеристики передающей и приёмной аппаратуры, точно управляя движением носителя радиолокатора и пр., что при натуральных экспериментах очень трудоёмко и затратно, а главное, не гарантирует сохранения тех же условий съёмки от опыта к опыту.

Исходя из вышесказанного, для данного исследования реальному ТС будет практичнее предпочесть ТС, получаемый путём численного моделирования. Тогда исследование можно представить в виде блок-схемы, изображённой на рис. 4.

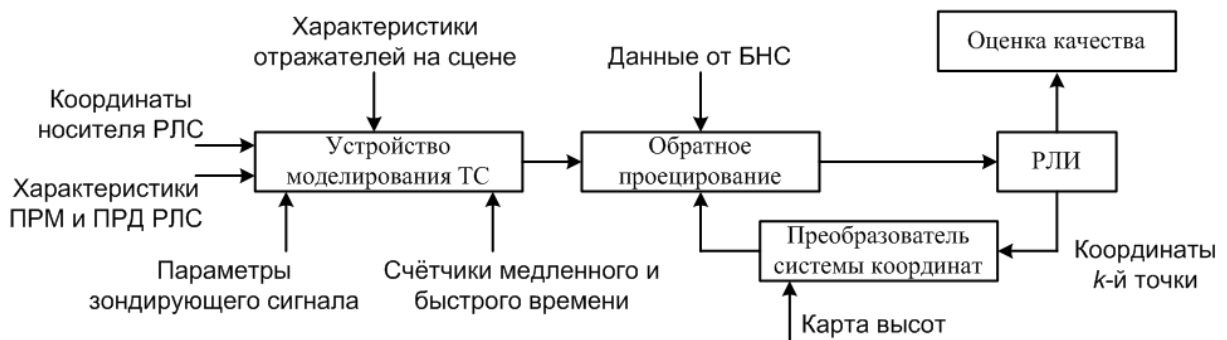


Рис. 4 – Блок-схема методики исследования влияния ТН на качество РЛИ

На приведённой блок-схеме Устройство моделирования ТС использует прямое моделирование [10, 11], поскольку такой подход позволяет учесть в модели ТС влияние движения носителя радиолокатора в течение каждого интервала

медленного времени. Такая модель способна воспроизводить явление искажения закона модуляции отражённого сигнала, вызванное самим движением носителя радиолокатора.

Метод ВР в каждой итерации требует знание координат отражателя, которому соответствует точка, выбранная на РЛИ. Если ВР работает с одной системой координат (например, радарграмметрической), а РЛИ определено в другой системе координат (например, «курсовые дальности – наклонные дальности» или прямоугольная система координат на уровне земли), то требуется преобразователь координат из одной системы в другую. Преобразователю системы координат, в свою очередь, нужна заранее подготовленная карта высот облучаемой местности.

РЛИ – это функция отклика на входное воздействие, которым является траекторный сигнал. Если траекторный сигнал получен при облучении сцены, на которой расположен только один точечный отражатель, то РЛИ примет вид, показанный на рис. 5а (чёрный цвет соответствует максимальной яркости, а белый – минимальной). Если построить сечения, параллельные осям Ox (см. рис 5б) и Oy (см. рис. 5в), проходящие через точку на РЛИ, где предполагается центр отклика точечного отражателя (при отсутствии ТН), то качество РЛИ можно оценить с помощью следующих объективных критериев:

- а) ширина главного луча;
- б) относительные уровни боковых лепестков.

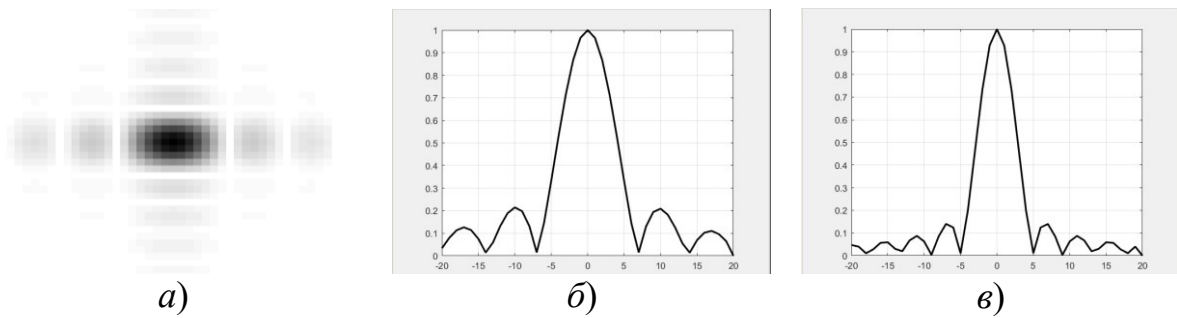


Рис. 5 – Субъективные и объективные критерии качества РЛИ:

а) амплитудное РЛИ; б) сечение РЛИ по оси Ox ; в) сечение РЛИ по оси Oy

Ширина главного луча по соответствующей оси координат ($dx_{\text{ГЛ}}$ и $dy_{\text{ГЛ}}$), в которых определено РЛИ, эквивалентна разрешающей способности радиолокатора с синтезированием апертуры по этой координате. Чем уже ширина главного луча, тем более детализированным получится РЛИ, и, соответственно, тем лучше качество РЛИ.

Уровни боковых лепестков ($dx_{\text{УБЛ}}$ и $dy_{\text{УБЛ}}$) относительно максимума главного луча показывают угрозу искажения РЛИ из-за наложения друг на друга откликов от соседних отражателей. Чем ниже значения этих величин, тем более контрастным получится РЛИ и, соответственно, тем лучше его качество.

Оценивание качества РЛИ по объективным критериям имеет смысл при наличии оценок качества эталонного РЛИ, за которое можно взять РЛИ, полученное ВР при обработке ТС, смоделированного в условиях идеальной (прямолинейной) траектории движения носителя РЛС. То есть методика исследования влияния ТН на качество РЛИ, полученного с помощью ВР, состоит из двух этапов:

1. Получение (и оценка качества) РЛИ на основе ТС, смоделированного при условии отсутствия ТН.
2. Получение (и оценка качества) РЛИ на основе ТС, смоделированных с учётом наличия траекторных нестабильностей с заданными свойствами.
3. Сравнение и анализ с целью определения количественных показателей ухудшения качества РЛИ.

Описанная выше методика позволяет исследовать влияние ТН на качество РЛИ не только при использовании ВР, но и других методов, однако, в этом случае она несколько усложнится. Так, при использовании метода ДДА блок-схема из рис.4 примет вид, показанный на рис.6:

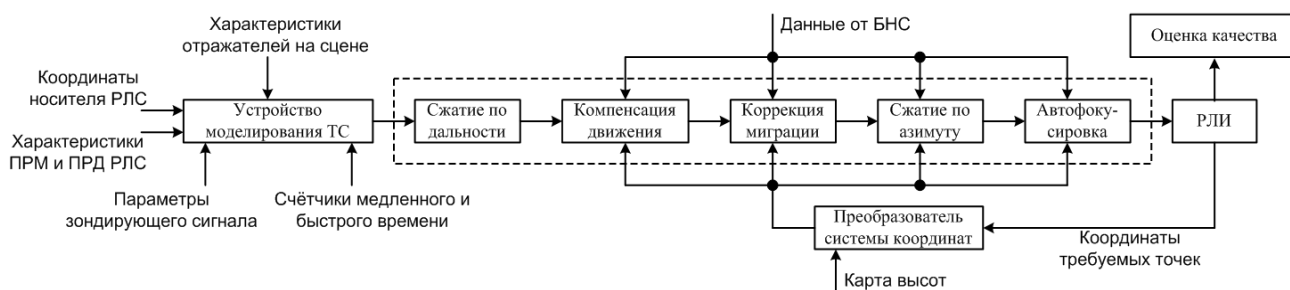


Рис. 6 – Блок-схема методики исследования влияния ТН на качество РЛИ

РЛИ НИЛЧМ-РСА, получаемое на выходе метода ДДА, определено в координатах «частоты биений – медленное время». Поскольку некоторые операции в ДДА требуют опоры на точки, заданные в координатах X, Y, Z из (3, 4), то Преобразователь системы координат становится неотъемлемой частью уже самого метода формирования РЛИ.

ДДА – метод, который можно вывести из ВР с помощью принятия допущений, позволяющих разменять выигрыш в скорости вычислений на заведомое ухудшение качества РЛИ. Это ухудшение проявляется в геометрическом сжатии РЛИ по оси, перпендикулярной курсовым дальностям, поскольку ДДА заменяет ось Oy на ось наклонных дальностей, которая по своей сути имеет нелинейную шкалу отсчётов, связанную с частотами биений линейным соотношением.

Из вышесказанного следует, что методика исследования влияния ТН на качество РЛИ, получаемого методом ДДА, будет выглядеть следующим образом:

1. Получение (и оценка качества) эталонного РЛИ в координатах «наклонные дальности – медленное время» с помощью метода ВР (см. рис. 4). Блок «Преобразователь системы координат» здесь принимает из системы координат формируемого РЛИ k -ю точку с координатами (f_{bk}, η_k) и передаёт её в метод ВР для формирования сигнала $s_{TC,k}(\eta, t)$, где $f_{bk} = \beta\tau_k = 2\frac{\beta}{c}\sqrt{(y_k^2 + z_k^2)}$, $\eta_k = x_k/v$, v – постоянная скорость движения носителя РЛС.

2. Получение (и оценка качества) РЛИ методом ДДА (см. рис. 6) на основе того же ТС, который использовался для получения эталонного РЛИ из п.1.

3. Получение (и оценка качества) РЛИ методом ДДА (см. рис. 6) на основе ТС, смоделированных с учётом наличия траекторных нестабильностей с заданными свойствами.

4. Сравнение и анализ с целью определения количественных показателей ухудшения качества РЛИ.

РЛИ, полученное в п.1, – это РЛИ наивысшего качества в системе координат, используемой ДДА. Такого качества можно достичь при условии, что ТН либо изначально не было, либо их влияние полностью скомпенсировано.

РЛИ, полученное в п.2, позволяет путём сравнения его с РЛИ из п.1 сделать вывод о том, способна ли конкретная реализация ДДА приблизиться по качеству получаемого РЛИ к методу ВР, и если нет, то в чём выражается проигрыш.

РЛИ, получаемое в п.3, позволяет после оценивания делать выводы о влиянии на его качество тех или иных характеристик ТН, что и является целью предложенной методики.

Как было сказано ранее, предлагаемая методика должна позволять исследовать не только влияние ТН на качество РЛИ, но и влияние на него характеристик БНС. Действительно, если в приведённых выше блок-схемах изменять между опытами не ТН, а значения величин, характеризующих БНС (точность измерения координат и частоту выдачи данных), то шаги, изложенные в пп.1–3 выше, относятся к БНС с абсолютной точностью и бесконечно высокой частотой выдачи данных. К этим шагам добавляется четвёртый:

4. Получение (и оценка качества) РЛИ методом ДДА (см. рис. 6) на основе ТС из п.3 при условии использования неидеальной БНС с заданными характеристиками.

4. Исследование зависимости качества РЛИ от характеристик БНС

Цель данной работы состоит в том, чтобы с помощью методики, разработанной в разделе 3, определить требования к характеристикам БНС НИЛЧМ-

РСА в режиме полосового бокового обзора. Предполагается размещение на малом БПЛА и получение РЛИ с помощью ВР.

В связи с этим, исследование основано на экспериментах с численным моделированием при помощи программного комплекса, реализованного в среде Matlab, и состоит из нескольких этапов:

- 1) прямое моделирование ТС во временной области и запись координат радара с идеальной точностью [13];
- 2) обработка данных от БНС (ухудшение точности и изменение частоты выдачи данных);
- 3) интерполяция данных от БНС в быстром времени;
- 4) получение амплитудного РЛИ с помощью ВР;
- 5) анализ амплитудного РЛИ.

Прямое моделирование ТС во временной области рассматривается во многих работах и считается позволяющим добиться наилучшего сходства с реальным сигналом [14–16]. Кроме того, вид используемых при таком подходе уравнений позволяет без больших трудностей усложнять модель, добавляя в неё новые факторы при необходимости. Для удобства дальнейшего анализа РЛИ на облучаемой сцене располагается только один или несколько отражателей.

Данные от БНС сохраняются в формате, удобном для работы ВР, то есть в виде набора из трёх координат (X , Y , Z), при этом частота выдачи данных соответствует требуемой экспериментом и может не совпадать с частотой дискретизации медленного времени.

Чтобы каждому отсчёту в быстром и медленном времени был сопоставлен свой набор координат, данные от БНС сначала передискретизируются на частоту, обратную интервалу дискретизации медленного времени, а затем данные между соседними отсчётами медленного времени подвергаются линейной интерполяции (с учётом того, что $\tau_n < \Delta T_s$).

Обработка ТС осуществляется так, как описано в п.1.2 данной статьи. В результате, получается амплитудное РЛИ.

Амплитудное РЛИ анализируется по нескольким критериям:

- положение отклика отражателя на РЛИ;
- форма отклика отражателя на РЛИ;
- ширина главного лепестка отклика отражателя на РЛИ;
- уровни боковых лепестков отклика отражателя на РЛИ;

Рассмотренные этапы исследования проводятся для разных сочетаний точности измерений БНС и частоты выдачи данных сначала на траекторных сигналах, соответствующих движению без траекторных нестабильностей (ТН). Затем эти же этапы проводятся на траекторных сигналах, полученных с учётом отклонения от идеальной траектории в плоскости Oxy . Рассматриваются три случая (см. Рис. 7, где штриховой линией обозначена идеальная траектория движения, а сплошной линией – неидеальная): ТН описывается константой (*а*), линейной функцией (*б*) и нелинейной функцией, в качестве которой взята синусоида (*в*).

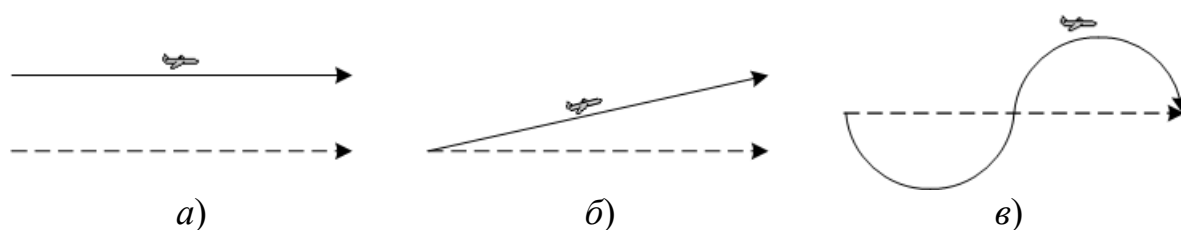


Рис. 7 – Рассматриваемые виды траекторных нестабильностей

4.1. ТН отсутствуют

4.1.1. Описание модели

Исследуемая модель имеет следующие характеристики:

Параметры сигнала. Начальная частота ЛЧМ $f_0 = 10$ ГГц; полоса частот ЛЧМ $B = 300$ МГц; период модуляции – $T = 0,001$ с; время наблюдения $\tau_n = 0,001$ с; излучаемая мощность $P_{изл} = 2$ Вт.

Параметры движения и сцены. Начальная точка движения имеет координаты $(0, 0, 1000)$; движение непрерывное и прямолинейное вдоль оси Ox с постоянной курсовой скоростью $v = 25$ м/с; облучаемая сцена имеет форму прямоугольника на плоскости Oxy с координатами противоположных углов $(0, 1000, 0)$ и $(100, 1200, 0)$; шумы приёмного тракта и помехи в среде распространения отсутствуют; среда распространения однородна.

Параметры съёмки. Режим полосового бокового обзора; полное время съёмки $T_n = 4$ с, за которое радар должен пройти путь $L = 100$ м; интервал медленного времени $\Delta T_s = 0,01$ с; частота дискретизации в быстром времени $f_d = 13$ МГц; ширина главного лепестка диаграммы направленности антенны по азимуту составляет 6° , по углу места – 90° .

Объекты на сцене. На сцене расположен один точечный отражатель с координатами (50, 1100, 0), его эффективная поверхность рассеяния (ЭПР) равна 1 м²; а фазовый сдвиг $\varphi_1 = 0$ рад.

В силу принятых ранее допущений ожидается, что в идеале отклик точечного отражателя с координатами (x_m, y_m, z_m) окажется в точке с координатами (x_m, y_m) на РЛИ. В связи с этим, с помощью метода ВР разумно обрабатывать не всё полотно РЛИ, а лишь небольшой его участок вокруг точки, где ожидается появление отклика единственного на сцене отражателя. Размер РЛИ составляет 2000x2000 точек, покрывающих область 200x100 метров на плоскости Oxy , т.е. размер каждой точки соответствует 0,05м по вертикали и 0,10м по горизонтали. Размер окна, формируемого методом обратного проецирования, – 40x40 точек или 4м по горизонтали и 2м по вертикали. Такой размер выбран на основе расчёта разрешающей способности радара Δx и Δy по осям Ox и Oy соответственно в окрестности точки с координатами (50,1100,0), где расположен точечный отражатель:

$$\Delta R_r = \frac{cT}{2B\tau_n} = \frac{3 \cdot 10^8 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 300 \cdot 10^6 \cdot 10^{-3}} = 0,5 \text{ м};$$

$$\Delta x = \frac{R\lambda_0}{2L} = \frac{\sqrt{1000^2 + 1100^2} \lambda_0}{2L} \approx \frac{1486,71 \cdot 0,03}{2 \cdot 100} \approx 0,22 \text{ м};$$

$$\Delta y = \sqrt{R^2 - h^2} - \sqrt{(R - \Delta R_r)^2 - h^2} \approx 0,68 \text{ м},$$

где ΔR_r – разрешение по наклонной дальности, R – кратчайшее расстояние от радара до точечного отражателя.

4.1.2. Результаты моделирования

На рис. 8 показаны увеличенные участки РЛИ с откликом точечного отражателя, при этом варьировалось значение точности данных от БНС: а) 5м, б) 2,5м, в) 1м, г) 0,5м, д) 0,25м, е) 0,1м, ж) 0,05м, з) 0,01м. Для всех случаев частота выдачи данных составляла 100 Гц. РЛИ окрашены в оттенки серого так, что чем ближе к чёрному, тем выше нормированная амплитуда к единице, а чем ближе к белому – тем ближе к нулю. Под каждым участком РЛИ расположена пара графиков, соответствующих горизонтальному и вертикальному сечениям. Центр оси абсцисс соответствует координате 1100 м по оси Ox , амплитуды отсчётов нормированы по максимуму на всём участке РЛИ.

На рис. 8а–в видно, что точности данных от БНС не хватает: по оси Ox выстраивается множество пиков вместо одного. На рис. 8г у отклика отражателя формируется единственный главный лепесток, ширина которого по обеим осям координат составляет семь отсчётов или 0,35м по вертикали и 0,7м по горизонтали. Положение максимума отклика не совпадает с ожидаемым на 0,15м по вертикали и 0,5м по горизонтали. На рис. 8д–з главный лепесток отклика сужается по вертикали и составляет 0,25м, уровень боковых лепестков составляет примерно -7 дБ, а положение максимума отклоняется от ожидаемого примерно на 0,05м по вертикали и 0,5 по горизонтали.

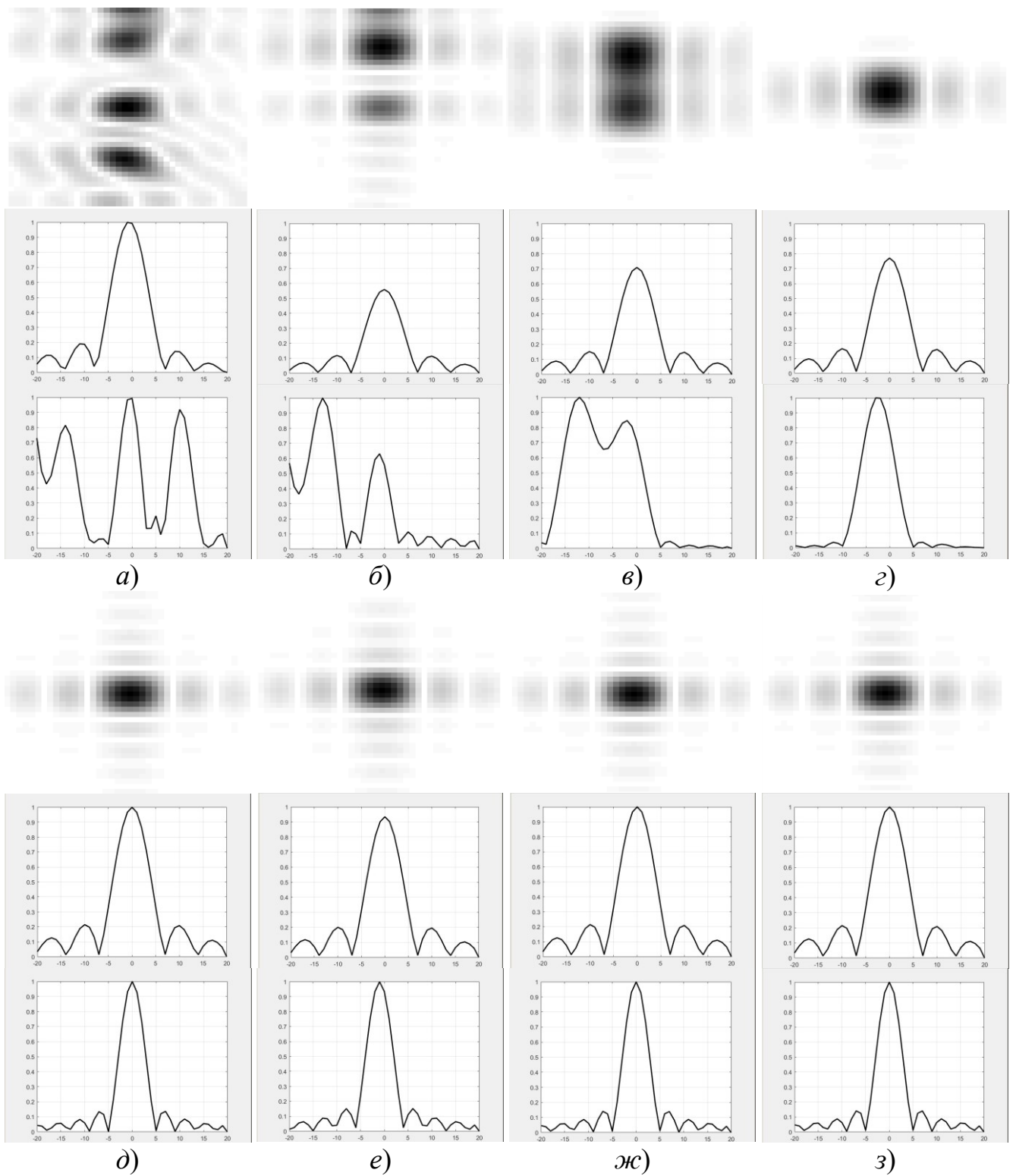


Рис. 8 – Увеличенные участки РЛИ. Варьируется точность данных от БНС

На рис. 9 показаны увеличенные участки РЛИ с откликом точечного отражателя, при этом варьировалось значение частоты выдачи данных от БНС: а) 1

Гц, б) 10 Гц, в) 25 Гц, г) 50 Гц, д) 100 Гц, е) 200 Гц, ж) 400 Гц. Для всех случаев точность измерения координат составляла 0,1м.

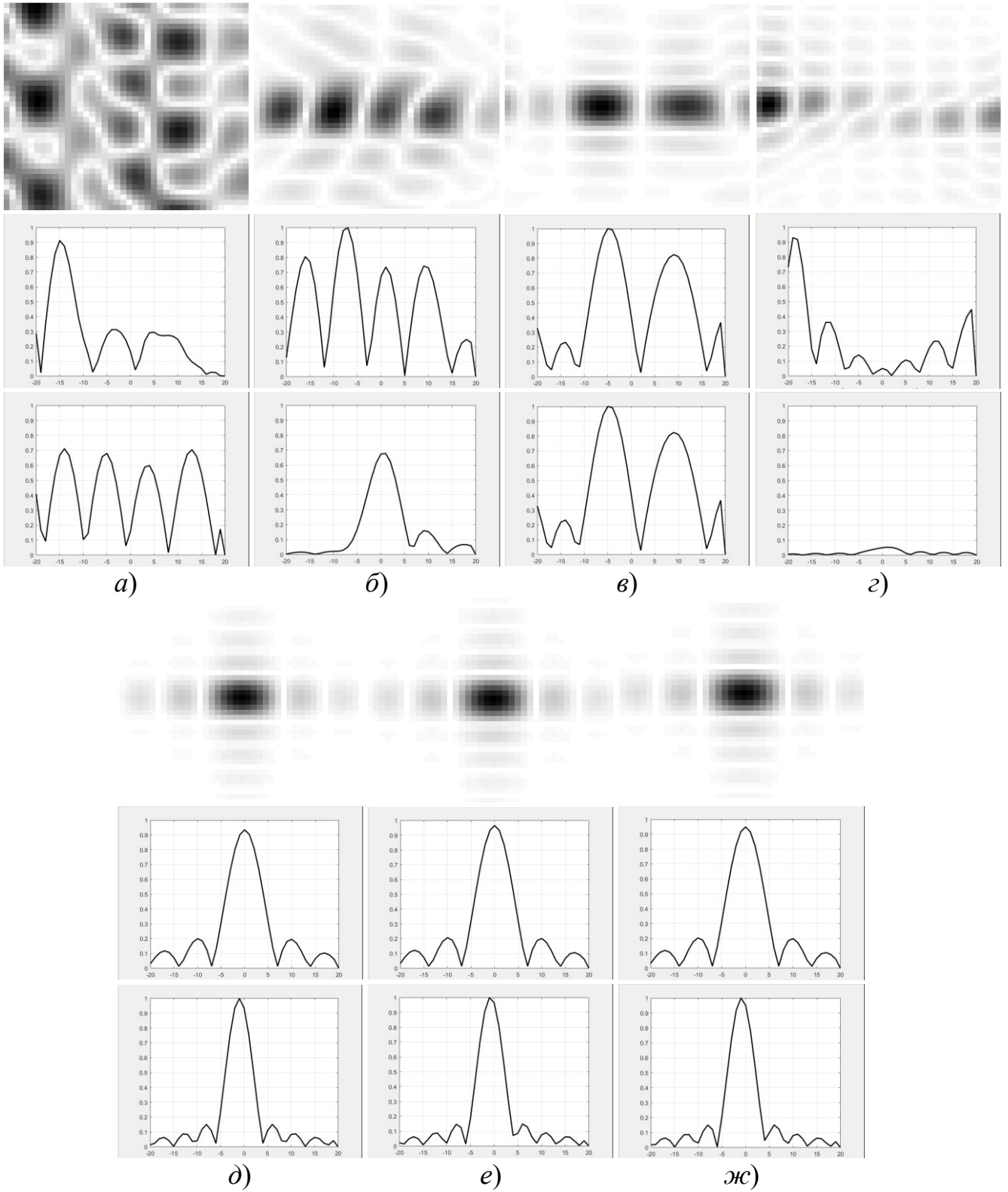


Рис. 9 – Увеличенные участки РЛИ. Варьируется частота выдачи данных от БНС

На рис. 9 видно, что отклик отражателя становится чётким, когда частота выдачи данных от БНС совпадает с частотой дискретизации ТС по медленному времени и превышает её.

4.2. ТН присутствуют

4.2.1. Описание модели

Исследуемая модель во многом совпадает с той, которая описана в п.4.1.1. Единственное различие в том, что исследуемый траекторный сигнал рассчитывается с учётом траекторной неустойчивости (см. Рис. 7), то есть отличия настоящей траектории от запланированной. Это может выражаться в том, что начальная и конечная точки имеют иные координаты, нежели указанные ранее, и движение может быть не прямолинейным. В каждом рассматриваемом случае параметры движения конкретизируются.

4.2.2. ТН – постоянное смещение

Здесь ТН описывается постоянной величиной (см. Рис. 7а) такой, что начальная точка имеет координаты (0, 10, 1000), и конечная – (100, 10, 1000). На рис. 10 показаны увеличенные участки РЛИ с откликом точечного отражателя, при этом варьировалось значение точности данных от БНС: а) 5м, б) 2,5м, в) 1м, г) 0,5м, д) 0,25м, е) 0,1м, ж) 0,05м, з) 0,01м. Для всех случаев частота выдачи данных

составляла 100 Гц. РЛИ окрашено в оттенки серого по тому же принципу, что и в п.4.2.1.

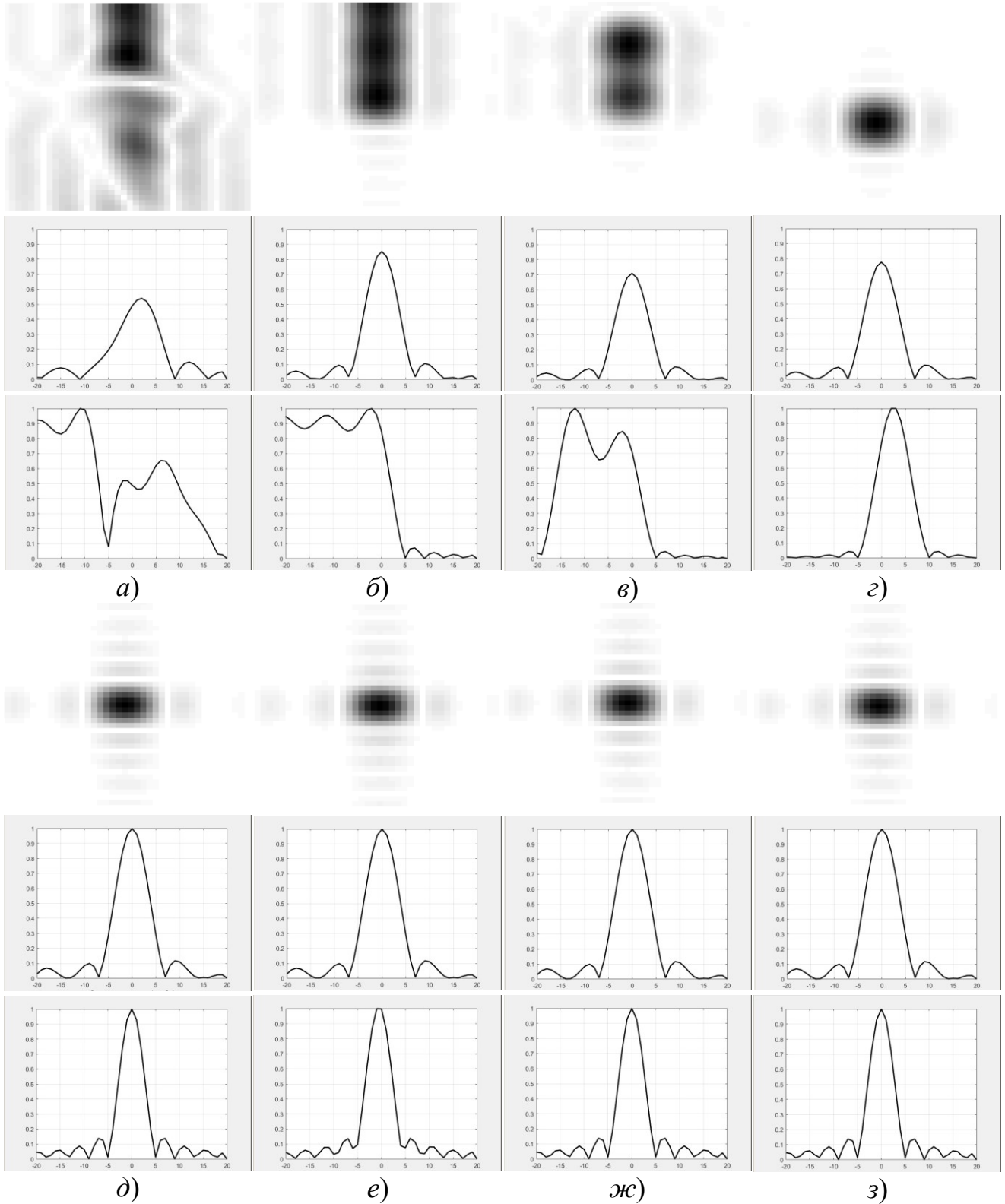


Рис. 10 – Увеличенные участки РЛИ. Варьируется точность данных от БНС
28

На рис. 10 видно, что, как и в п.4.1.2, отклик становится чётким, когда точность данных от БНС приближается к разрешающей способности по оси Oy . Ширина главного лепестка при этом составляет 0,3 м по вертикали и 0,5 м по горизонтали, а уровень боковых лепестков не превышает примерно $-9,5$ дБ. Рис. 10д–з показывают, что улучшение точности приводит к сужению главного лепестка отклика по вертикали до 0,25 м, но уровни боковых лепестков по вертикали могут при этом достигать $-8,3$ дБ.

На рис. 11 показаны увеличенные участки РЛИ с откликом точечного отражателя, при этом варьировалось значение частоты выдачи данных от БНС: а) 1 Гц, б) 10 Гц, в) 25 Гц, г) 50 Гц, д) 100 Гц, е) 200 Гц, ж) 400 Гц. Для всех случаев точность измерения координат составляла 0,1 м.

Как следует из рис. 11, отклик отражателя на РЛИ не формируется, если частота выдачи данных от БНС меньше частоты дискретизации ТС по медленному времени. Увеличение частоты выдачи данных от БНС не влияет на положение максимума отклика, но может положительно сказываться на разрешении по вертикали: на рис. 11д ширина главного лепестка составляет 0,25 м, а на рис. 11е,ж – 0,2 м.

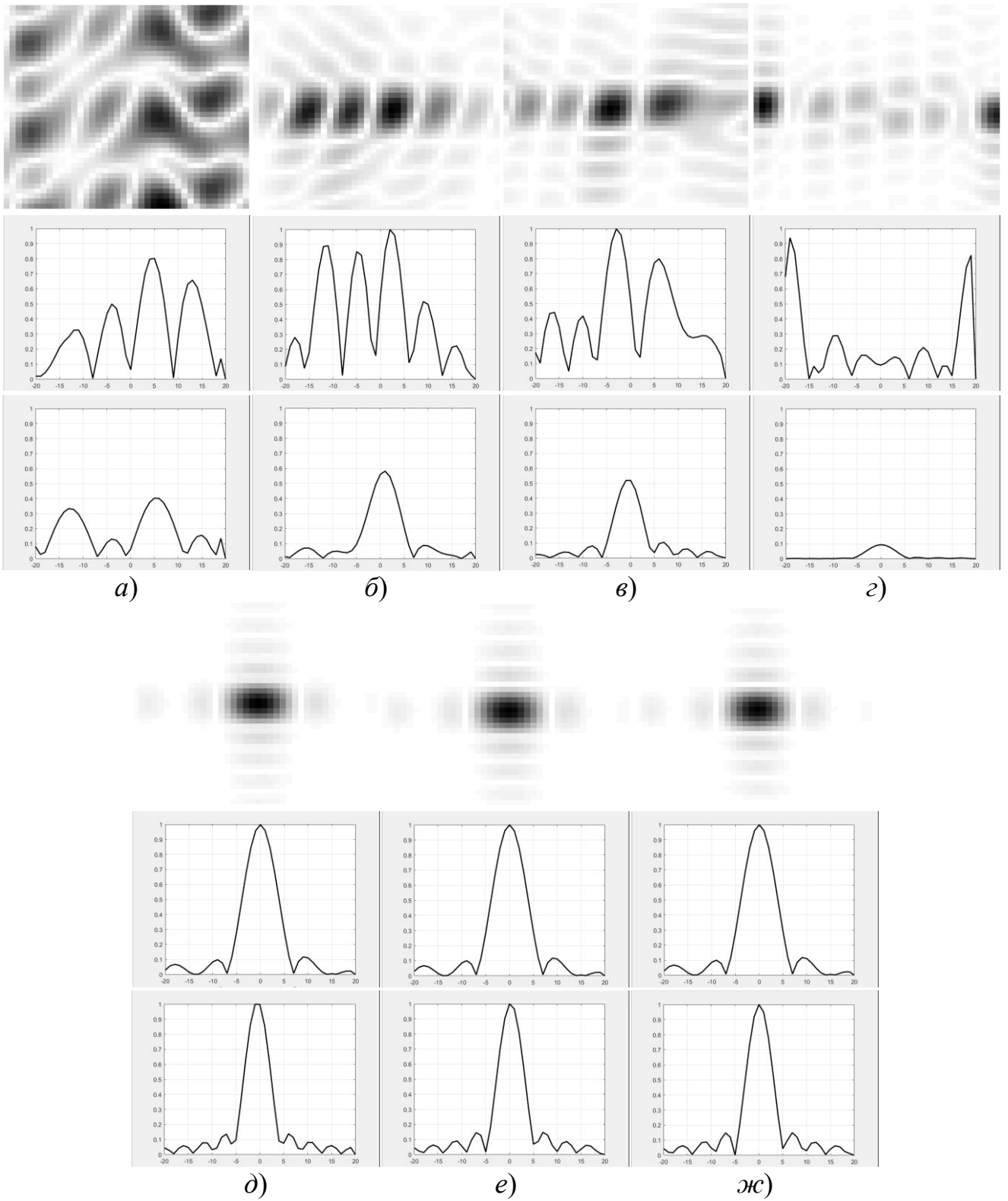


Рис. 11 – Увеличенные участки РЛИ. Варьируется частота выдачи данных от БНС

4.2.3. ТН – линейное смещение

Здесь ТН описывается линейной функцией (см. Рис. 7б) такой, что начальная точка имеет координаты $(0, 0, 1000)$, и конечная – $(100, 10, 1000)$. На рис. 12 показаны увеличенные участки РЛИ с откликом точечного отражателя, при этом варьировалось значение точности данных от БНС: а) 5м, б) 2,5м, в) 1м, г) 0,5м, д) 0,25м, е) 0,1м, ж) 0,05м, з) 0,01м. Для всех случаев частота выдачи данных составляла 100 Гц.

На рис. 12 видно, что усложнение функции ТН до линейной ужесточает требования к точности данных от БНС. В отличие от рис. 8 и 10, здесь отклик отражателя формируется при значении точности 0,1 м. При этом заметен поворот отклика на небольшой угол против часовой стрелки. Ширина главного лепестка на рис. 9е по горизонтали равна примерно 0,7 м, а по вертикали – 0,2 м. Уровень боковых лепестков не превышает $-7,2$ дБ, но возрастает на рис. 9ж,з до -6 дБ.

На рис. 13 показаны увеличенные участки РЛИ с откликом точечного отражателя, при этом варьировалось значение частоты выдачи данных от БНС: а) 1 Гц, б) 10 Гц, в) 25 Гц, г) 50 Гц, д) 100 Гц, е) 200 Гц, ж) 400 Гц. Для всех случаев точность измерения координат составляла 0,1м.

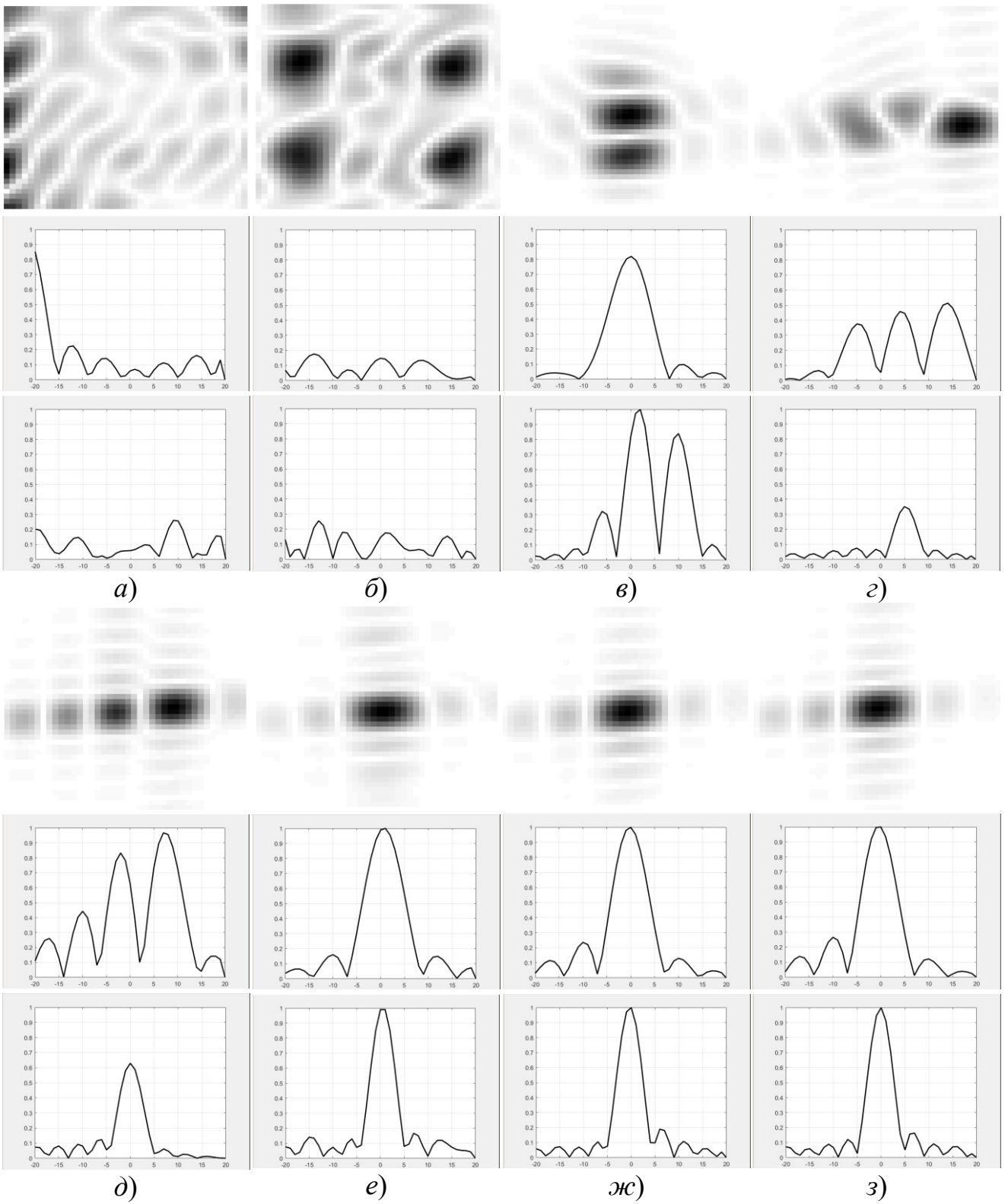


Рис. 12 – Увеличенные участки РЛИ. Варьируется точность данных от БНС

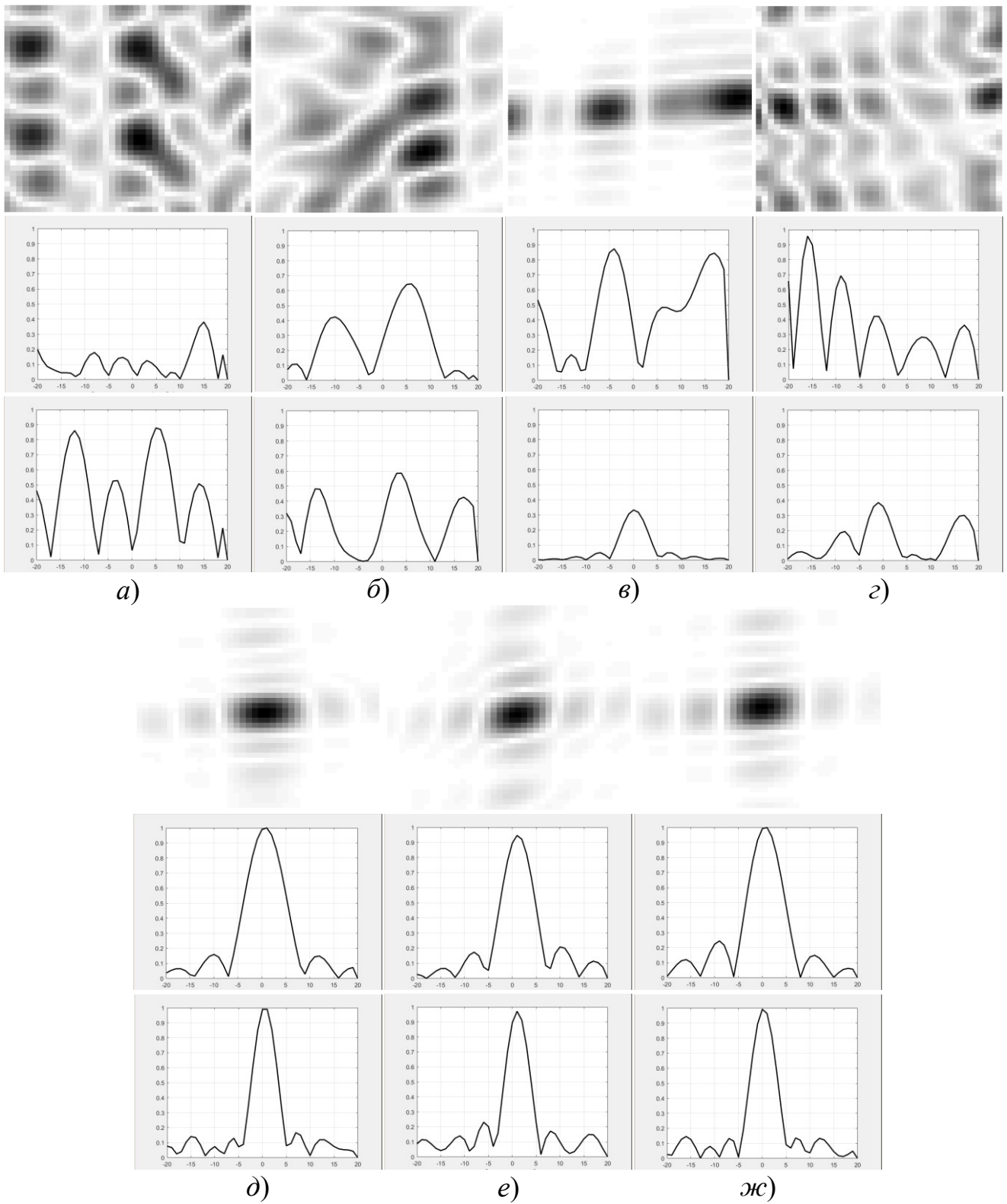


Рис. 13 – Увеличенные участки РЛИ. Варьируется частота выдачи данных от БНС

На рис. 13 видно, что отклик отражателя на РЛИ сформирован, когда частота выдачи данных от БНС равна или больше частоты дискретизации ТС по медленному

времени. Увеличение частоты выдачи данных здесь почти не влияет на сформировавшуюся форму отклика, при этом уровень боковых лепестков на рис. 10ж растёт до примерно -5.8 дБ.

4.2.4. ТН – нелинейное смещение: синусоида вдоль оси Оу в плоскости Оху

Здесь ТН описывается нелинейной функцией, в качестве которой взята синусоида (см. Рис. 7в) с периодом 2 секунды и амплитудой 7 метров, так что начальная точка полёта имеет координаты $(0, 0, 1000)$, и конечная – $(100, 0, 1000)$. На рис. 14 показаны увеличенные участки РЛИ с откликом точечного отражателя, при этом варьировалось значение точности данных от БНС: а) 5м, б) 2,5м, в) 1м, г) 0,5м, д) 0,25м, е) 0,1м, ж) 0,05м, з) 0,01м. Для всех случаев частота выдачи данных составляла 100 Гц.

Как видно из рис.14, отклик точечного отражателя формируется при заданных параметрах ТН, когда точность данных от БНС равна 0,05 и 0,01м. Ширина главного лепестка при этом составляет 0,25 м по вертикали и 0,6 м по горизонтали, а уровень боковых лепестков достигает $-6,0$ дБ. Поворотов отклика, как в п.4.2.3, не наблюдается.

На рис. 15 показаны увеличенные участки РЛИ с откликом точечного отражателя, при этом варьировалось значение частоты выдачи данных от БНС: а) 1 Гц, б) 10 Гц, в) 25 Гц, г) 50 Гц, д) 100 Гц, е) 200 Гц, ж) 400 Гц. Для всех случаев точность измерения координат составляла 0,01м – такой выбор основан на том, что

отклик отражателя наименее искажён на рис. 14з, который соответствует именно такой точности данных от БНС.

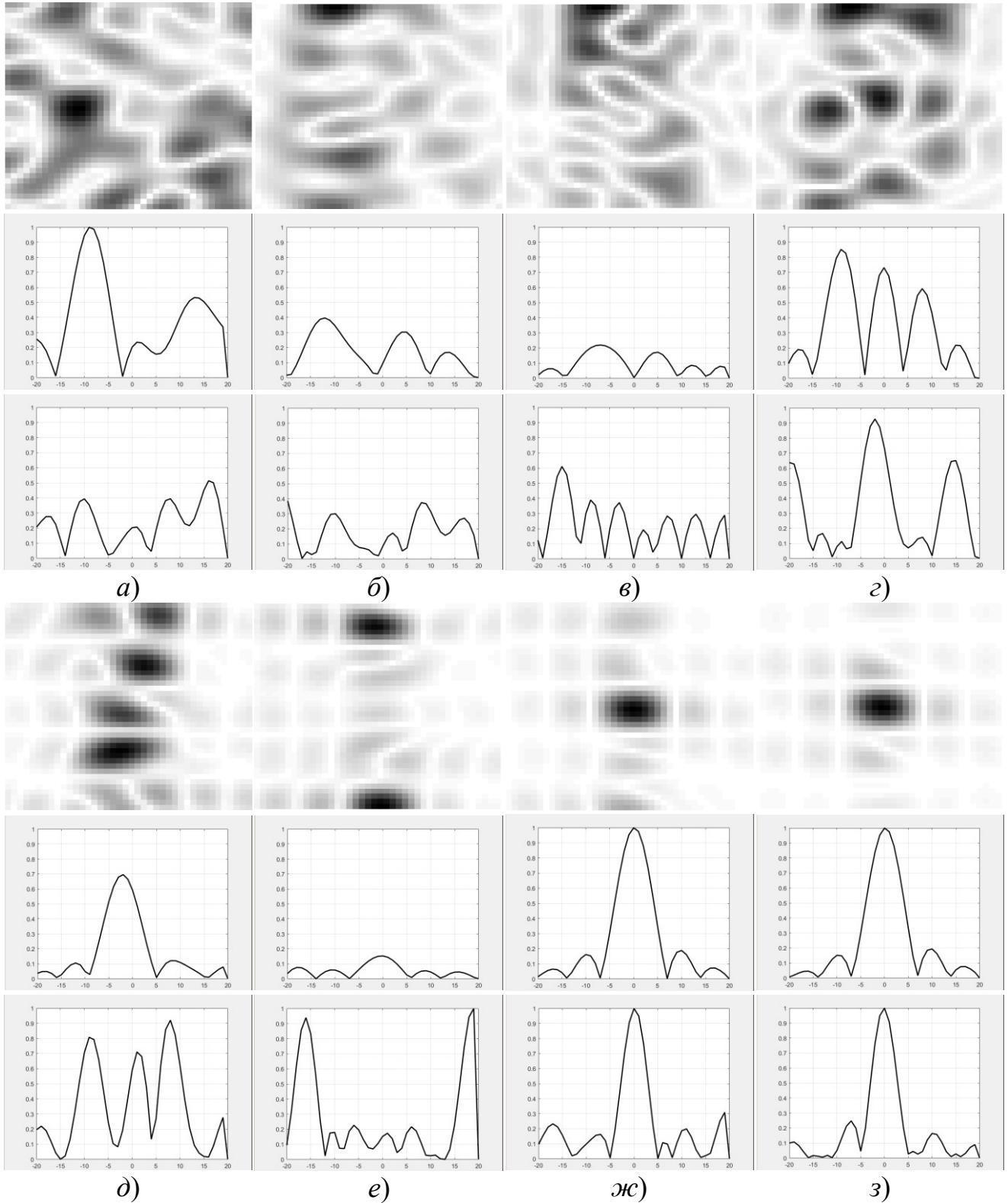


Рис. 14 – Увеличенные участки РЛИ. Варьируется точность данных от БНС

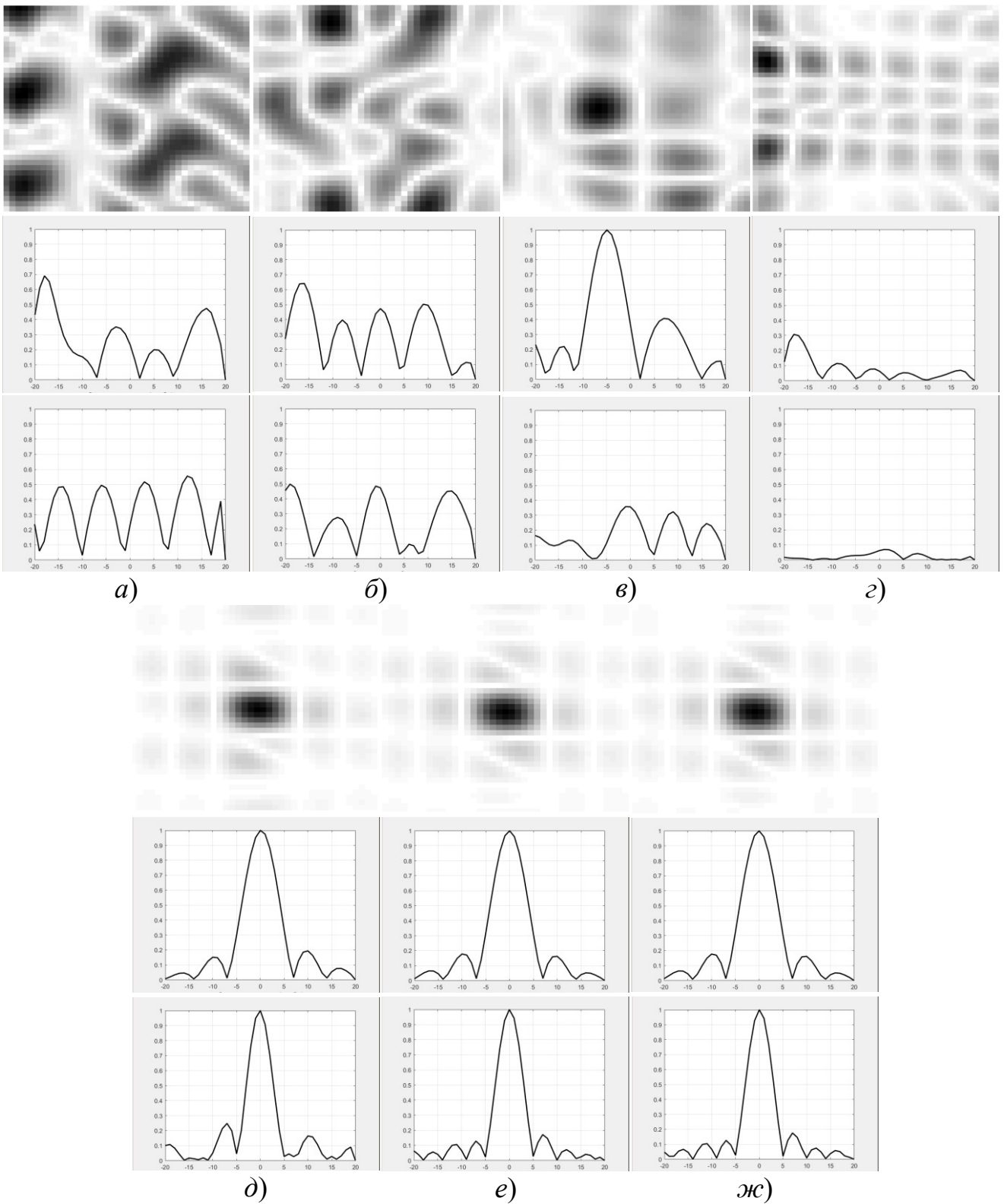


Рис. 15 – Увеличенные участки РЛИ. Варьируется частота выдачи данных от БНС

Рис.15 показывает, что для формирования отклика отражателя важно, чтобы частота выдачи данных от БНС была не меньше частоты дискретизации по медленному времени. Заметно, что с ростом частоты выдачи данных уменьшается уровень боковых лепестков с примерно -6 дБ на рис. 15д до $-6,8$ на рис. 15ж.

4.2.5. ТН – нелинейное смещение. ТС на основе оптической фотографии

В эксперименте, результаты которого изображены на рис. 16, ТС моделировался для сцены, построенной на основе оптического изображения района, прилегающего к кинотеатру "Байконур". Изображение взято с сервиса Google Maps, преобразовано в оттенки серого. Расстояние между точечными отражателями составляло $0,5$ м по оси Ox и по оси Oy . Общее число отражателей составило $20\ 000$, их ЭПР варьировались от 1 до 0 м² в зависимости от яркости соответствующей точки на оптическом изображении. Во избежание порчи РЛИ муаровым узором, вызванным пространственной интерференционной картиной [17, 18], отражатели сосредоточены на прямоугольном участке с координатами противоположных углов $(0, 1075, 0)$ и $(100, 1125, 0)$. Значения в карте высот равны нулю, чтобы исключить необходимость учёта радиотеней и переотражений. В остальном модель повторяет использовавшуюся в п.4.2.4.

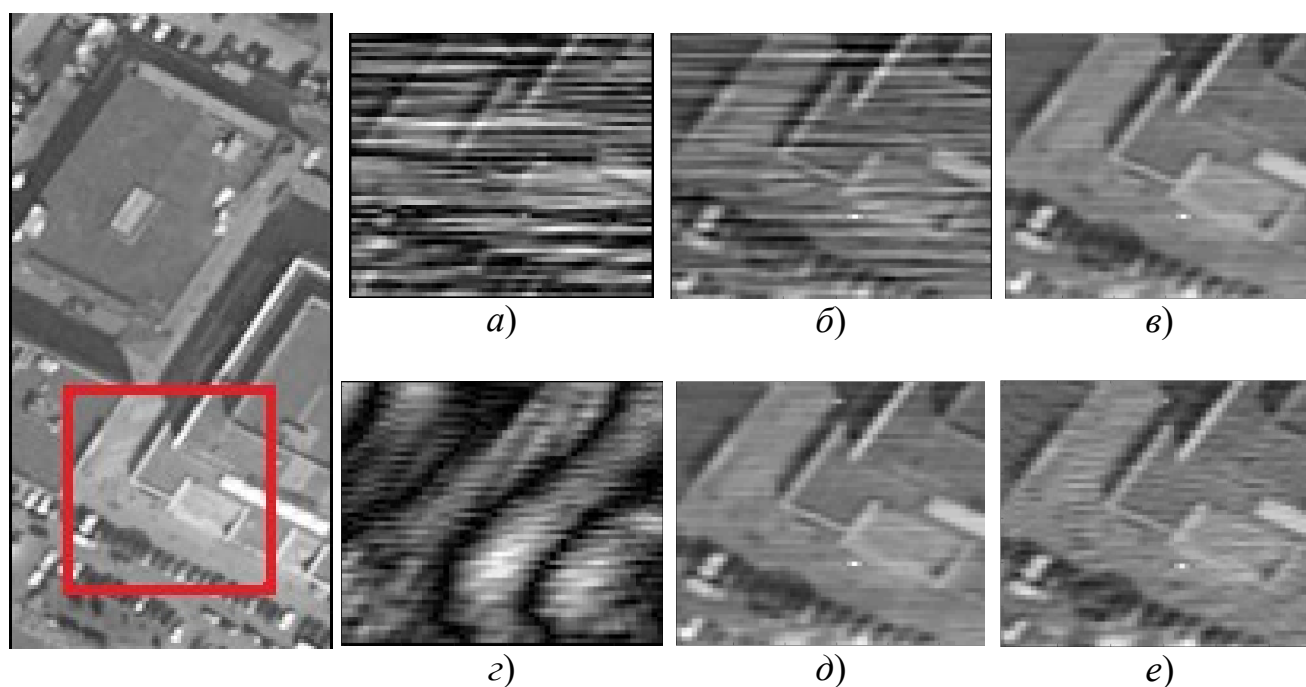


Рис. 16 – Увеличенные участки РЛИ в районе кинотеатра "Байконур"

На рис. 16 слева показано исходное оптическое изображение в оттенках серого, а красной рамкой обведён участок, для которого по рассчитанному ТС формировалось РЛИ. Справа показаны увеличенные участки РЛИ, при этом на изображениях сверху варьировалась точность данных от БНС: а) 0,01м; б) 0,005м; в) 0,001м – для каждого случая частота выдачи данных от БНС составляла 100 Гц. На изображениях снизу варьировалась частота выдачи данных от БНС: з) 50 Гц; д) 100 Гц; е) 200 Гц – для каждого случая точность данных от БНС составляла 0,001м. Периодические горизонтальные полосы разной яркости, мешающие различать объекты на РЛИ, вызваны ошибкой округления данных от БНС. С улучшением точности измерения координат радара заметно, что полосы становятся более редкими и менее интенсивными, позволяя визуально различить не только крупные

объекты (лестницу на второй этаж кинотеатра, углы и стены строений), но и менее габаритные (автомобили на стоянках, дерево).

Рассмотренный пример нелинейной ТН в п.4.2.4 и п.4.2.5, очевидно, является экстремальным и показывает, что необходимо учитывать вероятные помехи движению носителя, чтобы выводы по исследованию модели не заставляли чрезмерно завышать требования к характеристикам данных от БНС.

5. Заключение

На основе краткого рассмотрения модели ТС и метода обратного проецирования разработана и предложена методика оценки влияния траекторных нестабильностей на качество РЛИ. Методика заключается в использовании прямого численного моделирования ТС с заданными параметрами НИЛЧМ-РСА, зондирующего сигнала, сцены и объектов на ней, а также движения носителя с учётом траекторных нестабильностей, чтобы по результатам обработки с помощью метода обратного проецирования измерить параметры откликов отражателей и соотнести их с требованиями, предъявляемыми к разрешающей способности радара.

Показано, что разработанная методика может быть применена для оценки характеристик БНС (точности измерения координат и частоты выдачи данных) на качество РЛИ LFMCW-РСА полосового бокового обзора на малом БПЛА.

На конкретном примере получены результаты применения этой методики для различных типов движения носителя РСА: прямолинейного, с постоянным смещением относительно запланированной траектории, с линейной ТН и с

нелинейной ТН. Сделан вывод, что частота выдачи данных от БНС должна быть не ниже частоты дискретизации ТС по медленному времени, а приемлемая точность измерения координат зависит от ожидаемой интенсивности ТН.

В работе рассмотрены лишь два параметра, непосредственно связанных с БНС и влияющих на качество РЛИ при его формировании методом обратного проецирования. Влияние других параметров, косвенно связанных с БНС [19, 20], не освещалось, но так же представляет интерес и потому может служить направлением для дальнейшей работы, а именно:

- подход к интерполяции данных БНС в быстром времени;
- модификация метода обратного проецирования как альтернатива интерполяции данных БНС в быстром времени [3];
- движение носителя с непостоянным ускорением во всех трёх плоскостях.

Список источников

1. Moon K.M. Windowed Factorized Backprojection for Pulsed and LFM-CW SAR, Master's Thesis, Brigham Young University, Provo, 2012.
2. Duersch M. Backprojection for Synthetic Aperture Radar. All Theses and Dissertations, 2013. URL: <https://scholarsarchive.byu.edu/etd/4060>. DOI: [10.30898/1684-1719.2019.4.12](https://doi.org/10.30898/1684-1719.2019.4.12)
3. Stringham C., Long D.G. Processing for UWB LFM-CW SAR // International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2014, pp. 1105-1108. DOI: [10.1109/IGARSS.2014.6946622](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2014.6946622)

4. Doerry A. Basics of Backprojection Algorithm for Processing Synthetic Aperture Radar Images. Sandia National Laboratories, 2016.
5. Zhang H., Tang J., Wang R., Deng Y., Wang W., Li N. An Accelerated Backprojection Algorithm for Monostatic and Bistatic SAR Processing // Remote Sensing, 2018, vol. 10, pp. 140. DOI: [10.3390/rs10010140](https://doi.org/10.3390/rs10010140)
6. Рязанцев Л.Б., Купряшкин И.Ф., Лихачев В.П., Гнездилов М.В. Алгоритм формирования радиолокационных изображений с субметровым разрешением в малогабаритных РЛС с синтезированной апертурой // Цифровая обработка сигналов. 2018. № 2. С. 53-58.
7. 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. 2019. № 4. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/apr19/12/text.pdf>
8. Richards M.A. Fundamentals of Radar Signal Processing. McGraw-Hill, New York, 2005, 894 p.
9. Cumming G., Wong F. Digital Signal Processing of Synthetic Aperture Radar data: Algorithms and Implementation, Artech House, 2005, 660 p.
10. Zaugg E., Long D. Generalized SAR Processing and Motion Compensation, 2008. URL: <https://www.semanticscholar.org>
11. Комаров И.В., Смольский С.М. Основы теории радиолокационных систем с непрерывным излучением частотно-модулированных колебаний. – М.: Горячая линия–Телеком, 2010. – 366 с.

12. Michael I Duersch & David G Long. Analysis of time-domain backprojection for stripmap SAR // International Journal of Remote Sensing, 2015, vol. 36 (8), pp. 2010-2036. DOI: [10.1080/01431161.2015.1030044](https://doi.org/10.1080/01431161.2015.1030044)
13. Гаврилов К.Ю., Каменский К.В. Методы численного моделирования траекторного сигнала в радиолокаторе с синтезированием апертуры // 17-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2018» (Москва, 19–23 ноября 2018): Тезисы докладов. – М.: Люксор, 2018. С. 254-255.
14. Гаврилов К.Ю., Каменский К.В., Малютина О.А. Моделирование траекторного сигнала в радаре с синтезированием апертуры на основе оптических изображений земной поверхности // Труды МАИ. 2021. № 118. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=158252>. DOI: [10.34759/trd-2021-118-12](https://doi.org/10.34759/trd-2021-118-12)
15. Allan J., Collins M.J. Sarsim: A Digital Sar Signal Simulation System. // In Proceedings of the Remote Sensing & Photogrammetry Society. RSPSoc, Newcastle upon Tyne, UK, 11–14 September 2007.
16. Schlutz M. Synthetic Aperture Radar Imaging Simulated in MATLAB // California Polytechnic State University, San Luis Obispo, California, 2009.
17. Гаврилов К.Ю., Каменский К.В. Восстановление профиля протяжённой цели при радиолокационном зондировании непрерывным ЛЧМ-сигналом // Радиотехника. 2019. Т. 83. № 11 (17). С. 26-42.
18. Kamenskiy K.V., Gavrilov K.Y. Analysis of Distortions in the De-ramped LFM-CW Signal of an Extended Target // 2020 Systems of Signals Generating and Processing in the

Field of on Board Communications, Moscow, Russia, 2020, pp. 1-6. DOI: [10.1109/IEEECONF48371.2020.9078585](https://doi.org/10.1109/IEEECONF48371.2020.9078585)

19. Корнилов А.В., Корчагин К.С., Лосев В.В. Разработка алгоритмов комплексной измерительной навигационной системы авиационного применения на отечественной элементной базе // Труды МАИ. 2021. № 117. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=156235>. DOI: [10.34759/TRD-2021-117-09](https://doi.org/10.34759/TRD-2021-117-09)

20. Ермаков П.Г., Гоголев А.А. Сравнительный анализ схем комплексирования информации бесплатформенных инерциальных навигационных систем беспилотных летательных аппаратов // Труды МАИ. 2021. № 117. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=156253>. DOI: [10.34759/trd-2021-117-11](https://doi.org/10.34759/trd-2021-117-11)

References

1. Moon K.M. *Windowed Factorized Backprojection for Pulsed and LFM-CW SAR*, Master's Thesis, Brigham Young University, Provo, 2012.

2. Duersch M. *Backprojection for Synthetic Aperture Radar*. All Theses and Dissertations, 2013. URL: <https://scholarsarchive.byu.edu/etd/4060>. DOI: [10.30898/1684-1719.2019.4.12](https://doi.org/10.30898/1684-1719.2019.4.12)

3. Stringham C., Long D.G. Processing for UWB LFM-CW SAR, *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 2014, pp. 1105-1108. DOI: [10.1109/IGARSS.2014.6946622](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2014.6946622)

4. Doerry A. *Basics of Backprojection Algorithm for Processing Synthetic Aperture Radar Images*, Sandia National Laboratories, 2016.

5. Zhang H., Tang J., Wang R., Deng Y., Wang W., Li N. An Accelerated Backprojection Algorithm for Monostatic and Bistatic SAR Processing, *Remote Sensing*, 2018, vol. 10, pp. 140. DOI: [10.3390/rs10010140](https://doi.org/10.3390/rs10010140)
6. Ryazantsev L.B., Kupryashkin I.F., Likhachev V.P., Gnezdilov M.V. *Tsifrovaya obrabotka signalov*, 2018, no. 2, pp. 53-58.
7. Kupryashkin I.F., Likhachev V.P., Ryazantsev L.B. *Zhurnal radioelektroniki*, 2019, no. 4, URL: <http://jre.cplire.ru/jre/apr19/12/text.pdf>
8. Richards M.A. *Fundamentals of Radar Signal Processing*. McGraw-Hill, New York, 2005, 894 p.
9. Cumming G., Wong F. *Digital Signal Processing of Synthetic Aperture Radar data: Algorithms and Implementation*, Artech House, 2005, 660 p.
10. Zaugg E., Long D. *Generalized SAR Processing and Motion Compensation*, 2008. URL: <https://www.semanticscholar.org>
11. Komarov I.V., Smol'skii S.M. *Osnovy teorii radiolokatsionnykh sistem s nepreryvnym izlucheniem chastotno-modulirovannykh kolebaniy* (Fundamentals of the theory of radar systems with continuous radiation of frequency-modulated oscillations), Moscow, Goryachaya liniya–Telekom, 2010, 366 p.
12. Michael I Duersch & David G Long. Analysis of time-domain backprojection for stripmap SAR, *International Journal of Remote Sensing*, 2015, vol. 36 (8), pp. 2010-2036. DOI: [10.1080/01431161.2015.1030044](https://doi.org/10.1080/01431161.2015.1030044)
13. Gavrilov K.Yu., Kamenskii K.V. *17-ya Mezhdunarodnaya konferentsiya «Aviatsiya i kosmonavtika – 2018»*, Moscow, Lyuksor, 2018, pp. 254-255.

14. Gavrilov K.Yu., Kamenskii K.V., Malyutina O.A. *Trudy MAI*, 2021, no. 118. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=158252>. DOI: [10.34759/trd-2021-118-12](https://doi.org/10.34759/trd-2021-118-12)
15. Allan J., Collins M.J. Sarsim: A Digital Sar Signal Simulation System, *In Proceedings of the Remote Sensing & Photogrammetry Society. RSPSoc*, Newcastle upon Tyne, UK, 11–14 September 2007.
16. Schlutz M. *Synthetic Aperture Radar Imaging Simulated in MATLAB*, California Polytechnic State University, San Luis Obispo, California, 2009.
17. Gavrilov K.Yu., Kamenskii K.V. *Radiotekhnika*, 2019, vol. 83, no. 11 (17), pp. 26-42.
18. Kamenskiy K.V., Gavrilov K.Y. Analysis of Distortions in the De-ramped LFM-CW Signal of an Extended Target, *2020 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*, Moscow, Russia, 2020, pp. 1-6. DOI: [10.1109/IEEECONF48371.2020.9078585](https://doi.org/10.1109/IEEECONF48371.2020.9078585)
19. Kornilov A.V., Korchagin K.S., Losev V.V. *Trudy MAI*, 2021, no. 117. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=156235>. DOI: [10.34759/TRD-2021-117-09](https://doi.org/10.34759/TRD-2021-117-09)
20. Ermakov P.G., Gogolev A.A. *Trudy MAI*, 2021, no. 117. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=156253>. DOI: [10.34759/trd-2021-117-11](https://doi.org/10.34759/trd-2021-117-11)

Статья поступила в редакцию 09.06.2022

Статья после доработки 10.06.2022

Одобрена после рецензирования 04.08.2022

Принята к публикации 25.08.2022

The article was submitted on 09.06.2022; approved after reviewing on 04.08.2022; accepted for publication on 25.08.2022

