

ФОРМИРОВАНИЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ В АВТОМОБИЛЬНОЙ СИСТЕМЕ ПРОМЫШЛЕННОГО МОНИТОРИНГА С СОВМЕЩЕНИЕМ АВТОФОКУСИРОВКИ И КОМПЕНСАЦИИ ДВИЖЕНИЯ

Андросов В.В., главный конструктор АО «ГРПЗ»;

Витязев С.В., к.т.н., доцент кафедры телекоммуникаций и основ радиотехники (ТОР) Рязанского государственного радиотехнического университета (РГРТУ), e-mail: vityazev.s.v@rsreu.ru;

Валуйский Д.В., магистрант кафедры ТОР РГРТУ;

Витязев В.В., д.т.н., профессор, зав. кафедрой ТОР РГРТУ, e-mail: vityazev.v.v@rsreu.ru.

FORMATION OF RADAR IMAGES IN THE AUTOMOTIVE INDUSTRIAL MONITORING SYSTEM WITH THE COMBINATION OF AUTOFOCUS AND MOTION COMPENSATION

Androsov V.V., Vityazev S.V., Valuyskiy D.V., Vityazev V.V.

The article deals with the problem of formation of radar images in order to map and monitor the state of industrial areas with the use of a car as a carrier of a radar station. The features of radio vision conditions in such systems are described. The solution of trajectory instabilities compensation problem and joining of partial frames into a full image frame by methods of PGA autofocus and motion compensation are presented. The results of modeling and field experiments illustrating the effectiveness of the proposed solutions are given. Additionally, the use of sharpness optimization autofocus as an alternative to PGA, as well as the use of a stripmap mode of imaging radar operation are considered.

Key words: radar imaging; PGA; autofocus; automotive radar imaging; motion compensation; resolution enhancement.

Ключевые слова: радиовидение; PGA; автофокусировка, автомобильная система радиовидения; компенсация движения; повышение разрешающей способности.

Введение

Радиолокационные станции (РЛС) картографирования земной поверхности широко применяются во многих современных приложениях гражданского назначения, включая задачи топографии, навигации, мониторинга сельскохозяйственных площадей и окружающей среды, трехмерную визуализацию для поиска потерянных объектов, подповерхностное зондирование и сканирование помещений. Способность радиосигнала проникать внутрь объектов и преодолевать препятствия дождя, тумана и снега на больших расстояниях независимо от освещенности делает радиолокационные системы дистанционного зондирования незаменимыми во многих случаях. Традиционно системы картографирования земной поверхности устанавливаются на самолетах или спутниках. Однако в некоторых случаях автомобильные системы могут иметь ряд преимуществ. Например, в случае проведения геологической разведки, сельскохозяйственного или экологического мониторинга земной и водной поверхностей [1-3] системы радиовидения, установленные на автомобиле, отличаются относительно низкой стоимостью, как самой системы, так и ее повторяющейся эксплуатации. Кроме того, автомобильные РЛС могут быть более гибкими, проще адаптироваться к требуемым условиям, что, в конечном итоге, способно привести к более высоким качественным показателям функционирования. В то же время, автомобильные платформы РЛС

В статье рассматривается проблема формирования радиолокационных изображений в целях картографирования и мониторинга состояния промышленных площадей с использованием автомобиля в качестве носителя радиолокационной станции. Описаны особенности условий радиовидения в таких системах. Представлено решение проблем компенсации траекторных неустойчивостей и стыковки парциальных кадров методами автофокусировки PGA и компенсации перемещения носителя. Приведены результаты моделирования и натурных экспериментов, иллюстрирующие эффективность предлагаемых решений. Дополнительно, рассмотрены вопросы применения автофокусировки оптимизацией резкости в качестве альтернативы PGA, а также использование режима бокового обзора местности.

характеризуются рядом особенностей эксплуатации и параметров зондирования, что отличает их от традиционных бортовых или спутниковых систем и требует применения специальных средств для формирования радиолокационных изображений. Специфическими характеристиками системы являются, например, малые углы места и обилие радиотеней, дальность работы РЛС в диапазоне до единиц километров, низкие скорости и высокая неустойчивость параметров движения платформы.

Последний из указанных факторов в сочетании с малыми дальностями является наиболее важным. Высокая степень неустойчивости автомобиля на дороге приводит к большим ошибкам демодуляции в регистрируемом сигнале, и формируемое радиолокационное изображение оказывается сильно размытым – расфокусированным. Данная проблема, однако, хорошо известна в теории формирования радиолокационных изображений и обычно решается с помощью специальной процедуры обработки сигнала, называемой автофокусировкой. В настоящее время

на практике наиболее распространены два класса методов автофокусировки. Это – автофокусировка по градиенту фазы (Phase Gradient Autofocus – PGA) и автофокусировка методом оптимизации резкости изображения (Sharpness Optimization Autofocus). Метод PGA первоначально был предложен в работе [4] и детально изложен в работах [5-7]. Метод оценивает градиент фазовой ошибки по зарегистрированным данным с усреднением по большому числу каналов дальности, интегрирует полученную оценку и компенсирует фазовую ошибку в исходном сигнале, домножая его на корректирующую функцию. Второй метод автофокусировки – метод оптимизации резкости [8-10] – использует некоторую метрику резкости изображения и ищет оптимум зависимости данной метрики от оценки фазовой ошибки в соответствии с некоторым алгоритмом оптимизации.

Оба метода первоначально использовались для телескопического режима работы радиолокатора. Телескопический режим означает, что диаграмма направленности антенны «следит» за одной и той же сценой в течение длительного времени наблюдения. Антенная система поворачивается по мере перемещения носителя, оставляя одну и ту же сцену в поле зрения в течение долгого времени. Это позволяет достичь наибольшего азимутального разрешения, но только для сцены небольшого размера. Для автомобильной радиолокационной системы промышленного мониторинга больше подходит режим переднебокового обзора или режим сканирования по азимуту. В режиме переднебокового обзора предполагается, что направление антенны остается постоянным в течение всего интервала картографирования. Карта местности формируется в виде полосы поверхности. Автофокусировка для данного режима работы РЛС описана в статьях [11-13]. Режим сканирования по азимуту используется, когда требуется более быстрое наблюдение за сценой, находящейся перед носителем РЛС. Антенна сканирует по азимуту, а носитель движется вперед. Алгоритм PGA, разработанный для телескопического режима обзора, может использоваться для режима сканирования по азимуту без каких-либо дополнительных модификаций. Результаты автофокусировки PGA и формирования изображения в автомобильной системе радиовидения были представлены в работе [14].

Однако автофокусировки в данном случае оказываются недостаточно для получения качественного изображения. Геометрия регистрации сигналов в случае автомобильной РЛС с ее небольшими дальностями картографирования требует учета перемещения платформы за время интервала наблюдения сигнала, соответствующего интервалу синтезирования и формирования одного парциального кадра.

В данной работе предлагается алгоритм компенсации перемещения носителя за время интервала синтезирования, применяемый с целью корректной стыковки парциальных кадров изображения и формирования одного полного кадра, позволяющий в сочетании с процедурой автофокусировки PGA значительно улучшить азимутальное разрешение и разрешение по дальности радиолокационных изображений в автомобильных системах промышленного мониторинга.

Обработка сигналов в системах радиовидения Основы радиовидения

Системы радиовидения обычно связывают с РЛС с синтезированной апертурой антенны (РСА). В 1950-х годах технология РСА дополнила традиционную методику радиолокационного обнаружения и определения дальности и позволила получать двумерные изображения высокого разрешения [15]. Проблема разрешения по дальности уже была решена с применением широкополосного частотно-модулированного сигнала. Технология РСА позволила достичь высокого разрешения по азимуту. Известно, что разрешение по азимуту ограничено физическим размером антенны. Чем шире антенна, тем выше разрешение, которое можно достичь. Но антенны очень большого размера обычно не могут быть установлены на реальных платформах. Технология РСА предложила имитировать антенну очень большого размера, перемещая реальную антенну небольшого размера и «собирая» радиолокационные отражения вдоль линии пути. Последовательная когерентная обработка регистрируемого сигнала позволяет достичь высокого разрешения по азимуту.

Демодулированный сигнал в области нулевой частоты для случая одиночной точечной цели, зарегистрированной вдоль линии пути носителя РЛС с РСА, может быть описан следующим выражением:

$$s_i(t) = U_i \cdot \exp \left\{ j \frac{4\pi}{\lambda} \left(Vt \cos \theta_i - \frac{V^2 t^2}{2R_i} \sin^2 \theta_i \right) + j\varphi_i \right\}. \quad (1)$$

В этом выражении, U_i и φ_i это амплитуда и фаза сигнала, соответственно; λ – длина волны; V – скорость платформы; θ_i – азимут цели и R_i – ее дальность. Фазовые компоненты более высокого порядка обычно игнорируются как незначительные.

В случае сканирующего по азимуту режима обзора время сбора данных обычно достаточно мало, и второй член фазы в (1) также можно игнорировать, что приводит к:

$$s_i(t) = U_i \cdot \exp \left\{ j \frac{4\pi}{\lambda} Vt \cos \theta_i + j\varphi_i \right\}. \quad (2)$$

Разрешение по азимуту может, таким образом, быть получено с помощью дискретного преобразования Фурье, реализованного в виде алгоритма быстрого преобразования Фурье (БПФ). Абсолютные значения БПФ используются для формирования окончательного радиолокационного изображения.

Автофокусировка методом PGA

Модели (1) и (2) предполагают, что все параметры движения антенны, включая ее скорость и угол обзора, постоянны в течении интервала синтезирования и точно известны. В реальной жизни траектория движения фазового центра РЛС всегда включает в себя некоторые случайные компоненты. Такие случайные флуктуации меняют модель (2) на следующее выражение [16]:

$$s_i(t) = U_i \cdot \exp \left\{ j \frac{4\pi}{\lambda} Vt \cos \theta_i + j\varphi_i \right\} \cdot \exp \{ j\varphi_e(t) \}. \quad (3)$$

Здесь $\varphi_e(t)$ – это неизвестная фаза, соответствующая флуктуациям траектории платформы – фазовая ошибка. Фазовая ошибка приводит к расфокусировке радиолокационного изображения.

Алгоритм PGA является одним из наиболее часто используемых методов автофокусировки. Блок-схема одной из реализаций алгоритма автофокусировки класса PGA, описанная в [14], представлена на рис. 1.

Входными данными для алгоритма автофокусировки является сигнал во временной области, зарегистрированный на одном интервале синтезирования после сжатия и разрешения по дальности. Кроме того, входом алгоритма является расфокусированное радиолокационное изображение, построенное по этому сигналу.

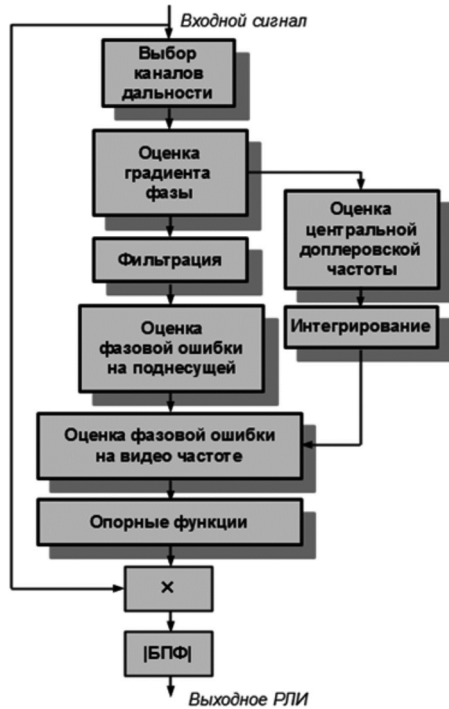


Рис. 1. Алгоритм автофокусировки

Алгоритм включает процедуру, которая на основе анализа мощности сигналов в разных каналах дальности выделяет те каналы, в которых присутствуют цели и по которым, следовательно, можно вести настройку. Затем в каждом канале дальности оценивается градиент фазовой ошибки в соответствии с выражениями:

$$\dot{s}(n) = \sum_{r=0}^{N_r-1} s_r^*(n) \cdot s_r'(n+1). \quad (4)$$

$$\dot{\varphi}(n) = \arg \{ \dot{s}(n) \}. \quad (5)$$

Оценка градиента усредняется по всем выбранным каналам дальности. Производится фильтрация полученной оценки фильтром скользящего среднего. Выполняется интегрирование полученного усредненного градиента фазовой ошибки и рассчитывается сама фазовая ошибка:

$$\bar{\varphi}(n) = \sum_{j=0}^n \dot{\varphi}(j). \quad (6)$$

Эта ошибка является оценкой на промежуточной частоте, поскольку исходный входной сигнал не являлся демодулированным. Чтобы выполнить перенос сигнала ошибки на нулевую частоту, по оценке градиента фазы в полосе выполняется оценка средней доплеровской частоты:

$$\dot{\varphi}_{avr} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \dot{\varphi}(n). \quad (7)$$

Эта оценка интегрируется, формируя среднюю фазу, вычитание которой из фазовой ошибки (6) формирует оценку фазовой ошибки на нулевой частоте:

$$\varphi_{err}(n) = \bar{\varphi}(n) - \varphi_{avr}(n). \quad (8)$$

Далее эта оценка фазовой ошибки может быть использована для формирования корректирующей функции и компенсации фазовой ошибки в исходном сигнале:

$$s_i^c(t) = c_i(t) \cdot \exp \{ -j\hat{\varphi}_e(t) \}. \quad (9)$$

Алгоритм повторяется итеративно, пока не будет достигнут приемлемый уровень ошибки [16].

Геометрия регистрации сигнала и проблема компенсации движения

Пусть носитель РЛС, в качестве которого в данной работе выступает автомобиль, движется прямолинейно с постоянной скоростью. Антенная система механически сканирует в азимутальной плоскости с заданной угловой скоростью. Скорость вращения антенны выбирается так, чтобы за время интервала синтезирования антенна поворачивалась на половину ширины диаграммы направленности. Антенна сканирует в заданном широком секторе обзора. Полный кадр радиолокационного изображения формируется стыковкой набора парциальных кадров, получаемых на каждом интервале синтезирования. Если не принимать во внимание перемещение носителя за время одного интервала синтезирования, то геометрия сбора данных оказывается такой, как показано на рис. 2.

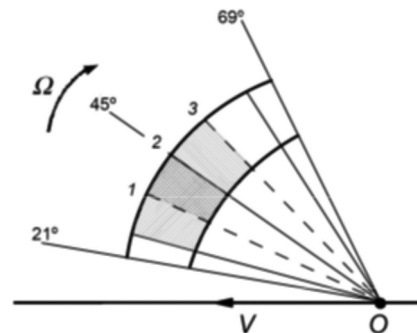


Рис. 2. Геометрия сбора данных (платформа неподвижна)

Показан один канал дальности. В течение первого интервала синтезирования центр диаграммы направленности антенны перемещается из положения 1 в положение 2. При этом в течение всего времени синтезирования в пределах диаграммы направленности находится только заштрихованная область 1-2. Для формирования парциального кадра изображения на одном интервале синтезирования выполняется преобразование БПФ. Следующий парциальный кадр будет сформирован при обработке сигнала, регистрируемого в следующем интервале синтезирования при перемещении центра антенны из положения 2 в положение 3. Формируется область 2-3. Полный кадр радиолокационного изображения получается в этом случае простой стыковкой соседних парциальных кадров. При неподвижном носителе стыковка парциальных кадров оказывается достаточно простой, не требуя какой-либо дополнительной обработки.

В случае учета движения платформы от одного интервала синтезирования к другому геометрия регистрации сигнала выглядит следующим образом (рис. 3).

В этом случае обработка в пределах каждого интер-

вала синтезирования выполняются по-прежнему, однако, стыковка соседних парциальных кадров представляется непростой задачей, поскольку одни и те же точки сцены могут появляться в различных местах в последовательности формируемых парциальных кадров. Оценим ограничения игнорирования движения платформы.

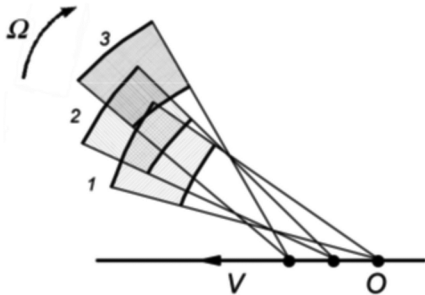


Рис. 3. Геометрия сбора данных (платформа движется)

Предположим, что игнорирование движения платформы может иметь место, если верно следующее:

$$L = Vt \ll B_r, \tag{10}$$

где L – это путь, пройденный платформой за время сбора данных, а B_r – это ширина диаграммы направленности антенны, выраженная в метрах. Установим следующее предельное ограничение :

$$L = B_r / 10. \tag{11}$$

Тогда для типовых в рамках рассматриваемой задачи параметров обзора получим:

$$R_{\min} \approx B_r / \beta = 10Vt / \beta = 2200 \text{ м}. \tag{12}$$

Здесь β – это ширина диаграммы направленности в градусах.

Из (12) можно сделать вывод, что эффект движения платформы можно игнорировать только для дальностей более 2200 м. Но автомобильные РЛС как раз и работают в диапазоне ориентировочно от 300 до 2500 метров в типичном случае. Таким образом, должна быть реализована некоторая методика компенсации движения для получения радиолокационных изображений высокого разрешения.

Способ компенсации перемещения носителя

Рассмотрим задачу компенсации движения как задачу преобразования координат цели. Для этого следует рассмотреть следующие системы координат (рис. 4).

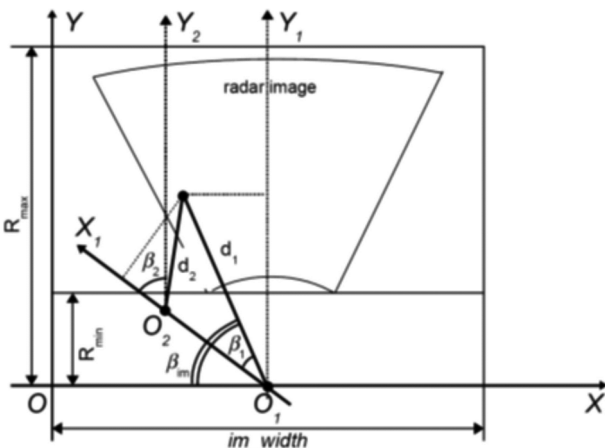


Рис.4. Преобразование координат в задаче компенсации движения

На рис. 4 представлены три системы координат. Первая (XOY) – это прямоугольная система координат, которая соответствует конечному изображению, которое мы хотели бы сформировать. (X1O1Y1) – вторая система координат – полярная. Она имеет свое начало в точке O1, которое соответствует положению автомобиля в начале наблюдения за сектором. Последняя система координат (X1O2Y2) также является полярной. Она движется вдоль оси X1 и имеет свое собственное начало координат O2 для каждого последующего интервала сбора данных. Обычная технология обработки, рассмотренная выше, реализуется для сигнала в каждом периоде сбора данных отдельно. Эта обработка дает координаты цели (β_2, d_2) в системе координат (X1O2Y2). Теперь задача состоит в том, чтобы преобразовать эти координаты в (β_1, d_1) – полярные координаты системы координат (X1O1Y1) и затем далее в (x, y) координаты системы координат (XOY).

Рассмотрим данный вопрос более подробно. Для каждого интервала синтезирования апертуры мы производим расчеты, включая сжатие по дальности и азимуту. Мы также выполняем автофокусировку с помощью алгоритма PGA. Получаем парциальный кадр, который далее необходимо правильно соединить с другими парциальными кадрами и объединить их в итоговое радиолокационное изображение.

Рассмотрим одну точечную цель с координатами (β_2, d_2) в текущем парциальном кадре изображения. Согласно рис. 4 простые тригонометрические вычисления позволяют преобразовать эти координаты в систему координат (X1O1Y1) по следующим формулам:

$$B_1 = \arctg \left\{ \frac{d_2 \sin \beta_2}{d_2 \cos \beta_2 + Vt} \right\}, \tag{13}$$

$$d_1 = \left\{ \frac{d_2 \sin \beta_2}{\cos \beta_1} \right\}. \tag{14}$$

Затем мы преобразуем координаты (β_1, d_1) в систему координат (XOY):

$$x = \frac{im_width}{2} - d_1 \sin(\theta_\alpha - \beta_1), \tag{15}$$

$$y = d_1 \cos(\theta_\alpha - \beta_1) - R_{\min}. \tag{16}$$

Здесь θ_α – это угол между вектором скорости и биссектрисой диаграммы направленности, а R_{\min} – это дальность до начала координат.

Преобразования (13)-(16) повторяются для всех целей во всех каналах дальности и азимута и для всех парциальных кадров в одном секторе наблюдения. Это приводит к корректной стыковке парциальных кадров и позволяет сформировать качественное радиолокационное изображение с компенсацией движения платформы.

Результаты натуральных экспериментов

С целью оценки эффективности разработанной методики был проведен натуральный эксперимент в следующих условиях. Автомобиль движется прямолинейно с постоянной скоростью 11 м/с. Антенная система механически сканирует в азимутальной плоскости с угловой скоростью 0,6 градуса за 400 мс, где 400 мс – время синтезирования, а 0,6 градуса соответствуют половине ширины диаграммы

направленности антенны. Сектор обзора составляет 48 градусов с центром, расположенным под углом 45 градусов. Зона обзора по дальности: от 300 до 2500 м. Геометрия эксперимента показана на рис. 5.

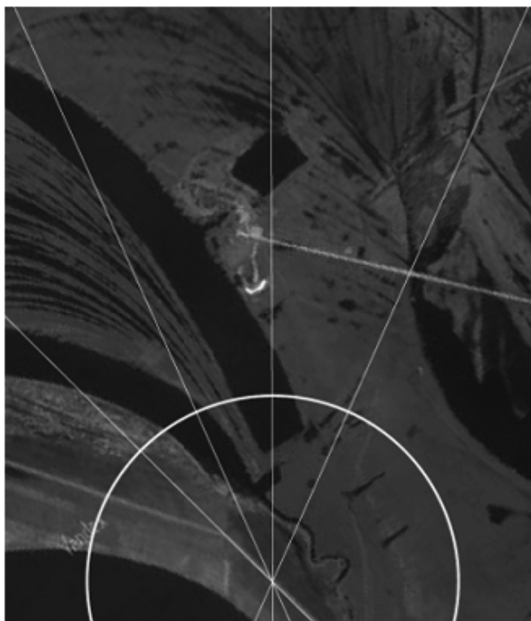


Рис. 5. Геометрия эксперимента

Оптическое изображение местности и изображение, формируемое в режиме реального луча, когда разрешение по азимуту ограничено физическими размерами антенны, представлены на рис. 6 и рис. 7, соответственно.

Как видно на рис. 7, тестовая сцена включает постройки, ряд искусственных объектов, а также поверхность воды, деревья и кусты. Кроме того, в сцену внесён специальный элемент тестирования – уголкового отражателя. Наиболее важные для тестирования объекты выделены на рис. 6 белыми пятнами.

Результаты эксперимента представлены на рис. 8. Радиолокационное изображение, сформированное без какой-либо специальной обработки сигнала, улучшающей азимутальное разрешение, показано на рис. 8 а. Изображение для тех же входных данных, но полученное с применением автофокусировки методом PGA показано на рис. 8 б. Видно, что объекты, расположенные в центре изображения на рис. 8 б, становятся более четкими и сильнее отделены друг от друга.

Тот же входной сигнал, обработанный и с помощью автофокусировки PGA, и посредством предлагаемой методики компенсации движения, приводит к изображению, показанному на рис. 8 в. Четкость изображения намного выше по сравнению с предыдущими изображениями, особенно на расстояниях менее 800 м.

Наиболее показательные области изображений выделены и показаны отдельно на рис. 9 и рис. 10. Таких областей две. Первая соответствует центральной части изображения. Эта область находится на расстоянии порядка 1,3 км. Здесь присутствуют сосредоточенные цели искусственного происхождения с высокой мощностью обратного отражения сигнала. Применение PGA (рис. 9 б) дает ощутимое повышение качества изображения в этом случае по сравнению с исходным изображением (рис. 9 а). Применение и автофокусировки, и компенсации движения (рис. 9 в) также повышает разрешение изображения, однако не слишком заметно.

Вторая область тестового изображения находится на расстояниях 300-800 м. Здесь эффект смазывания изображения при движении носителя проявляется намного сильнее. Результаты обработки представлены на рис. 10.

Применение PGA (рис. 10 б) дает некоторое повышение качества изображения по сравнению с исходным изображением (рис. 10 а), но искажение изображения остается ярко выраженным. Применение и автофокусировки, и компенсации движения (рис. 10 в) существенно повышает качество изображения. В то же время заметна новая проблема: форма изображения становится неправильной, и требуется некоторая методика корректного формирования последовательности полных кадров радиолокационных изображений.

Те же результаты, представленные не в полярных, а в прямоугольных координатах с широким сектором отображения приведены на рис. 11.

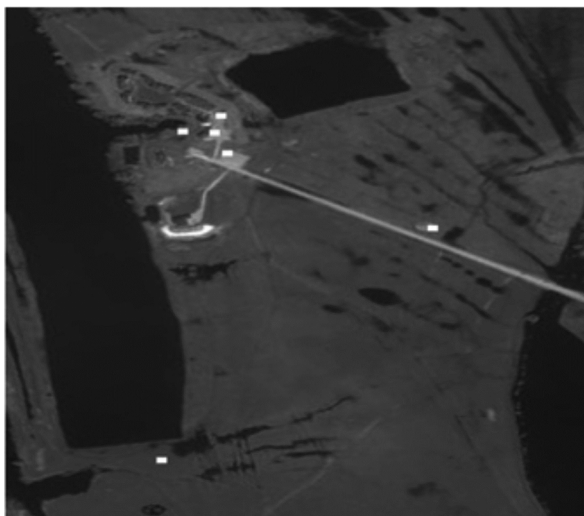


Рис. 6. Оптическое изображение сцены

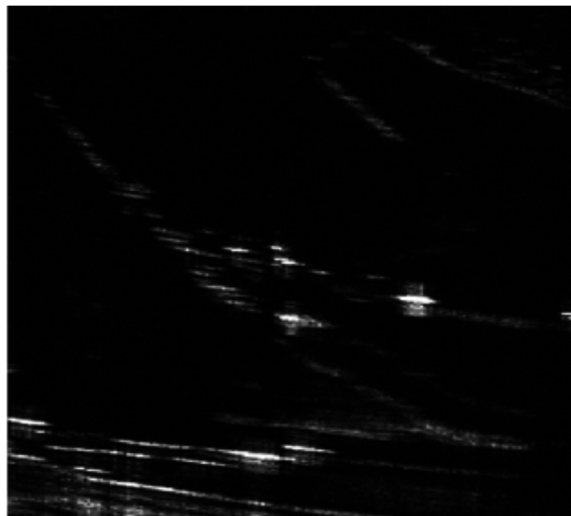
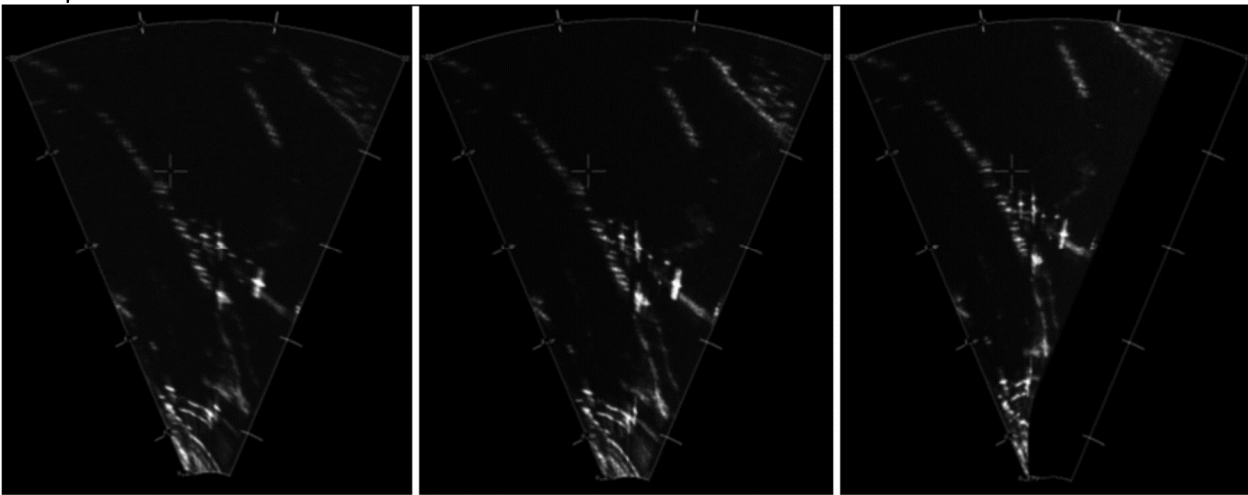


Рис. 7. Радиолокационное изображение в режиме реального луча

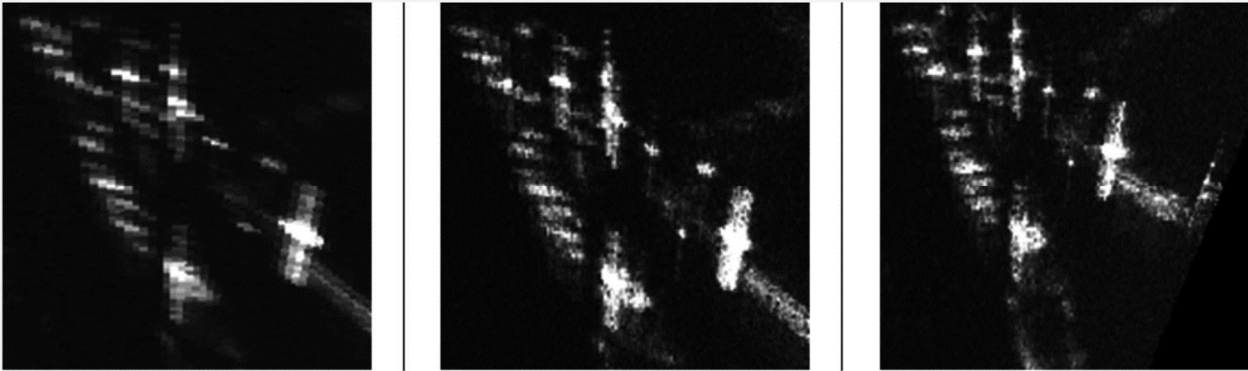


а) Несфокусированное радиолокационное изображение, сформированное в режиме синтезирования апертуры

б) Радиолокационное изображение сфокусированное методом PGA, но без компенсации движения носителя

в) Радиолокационное изображение, полученное с применением PGA и компенсации движения

Рис. 8. Результаты натурных экспериментов

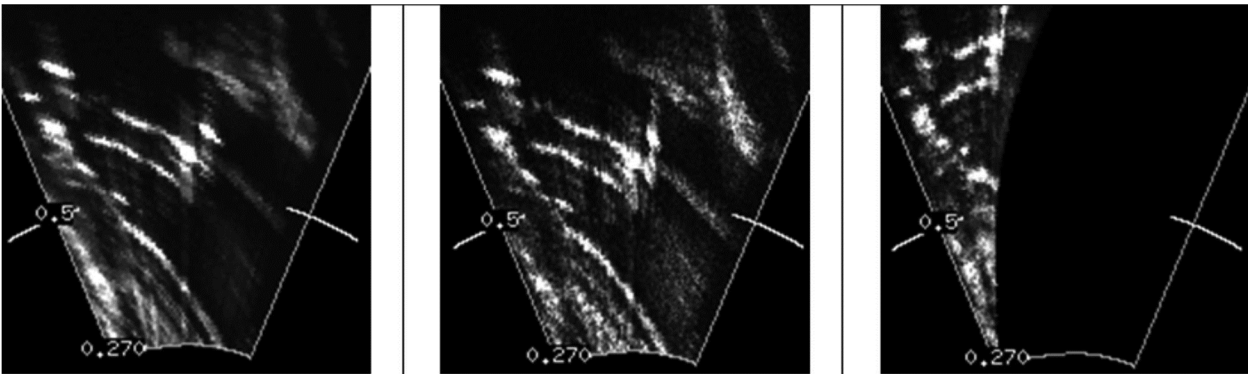


а) Обработка отсутствует

б) Только PGA

в) PGA и компенсация движения

Рис. 9. Область на дальности 1,3 км (увеличенный масштаб)

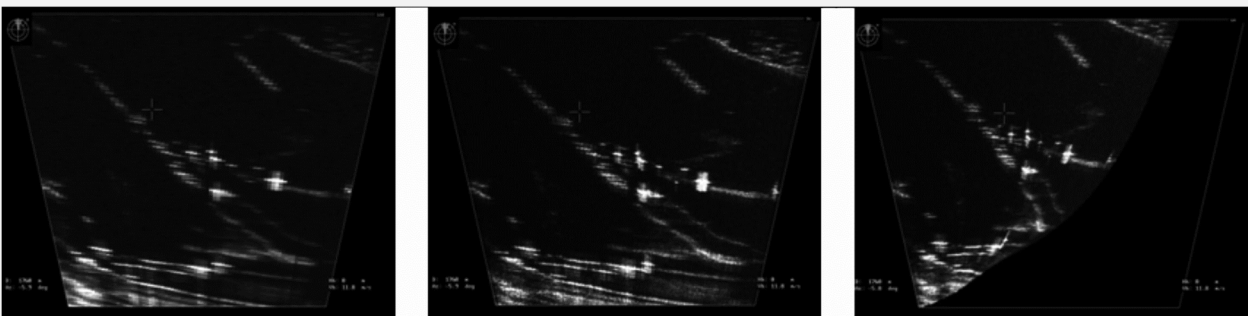


а) Обработка отсутствует

б) Только PGA

в) PGA и компенсация движения

Рис. 10. Область на дальности до 800 м (увеличенный масштаб)



а) Обработка отсутствует

б) Только PGA

в) PGA и компенсация движения

Рис. 11. Радиолокационные изображения в широком секторе отображения

Автофокусировка методом оптимизации резкости

Группа методов автофокусировки, основанных на оптимизации резкости изображений, получила в последние годы широкое распространение при реализации систем радиовидения. В основу методов положена идея выбора оценки резкости изображения и подбора таких параметров корректирующего сигнала, которые приводят к изображению с максимальной резкостью. Считается, что резкость изображения напрямую связана с его сфокусированностью. Соответственно, при реализации данной группы методов решаются две основные проблемы. Первая из них – это выбор метрики резкости изображения, то есть того, как численно можно оценить, насколько сфокусированное изображение мы имеем при различных корректирующих функциях. Вторая проблема и наиболее сложно решаемая – это проблема выбора алгоритма подстройки корректирующей функции, который бы приводил к оптимальному решению, то есть к максимальной (или минимальной) метрике резкости изображения. Причем данный алгоритм должен, с одной стороны, иметь вычислительную сложность, приемлемую для практической реализации, а с другой стороны, приводить к глобальному, а не одному из локальных, экстремуму метрики резкости.

В данной работе проанализирован и реализован практически метод автофокусировки на основе оптимизации резкости, изложенный в [17]. Этот метод в качестве метрики резкости изображения использует сумму квадратов интенсивностей всех пикселей РЛИ:

$$C = \sum_i \sum_r |g[r, i]|^4, \quad (17)$$

то есть сумму четвертых степеней модулей комплексных отсчетов изображения. Использование обратного знака приводит к тому, что метрика должна минимизироваться с целью максимизации резкости изображения.

В качестве алгоритма адаптации предлагается использовать метод градиентного спуска. При этом отмечается имеющий огромное значение факт: подбор корректирующей функции может идти по каждому отсчету независимо. Это существенно упрощает задачу с точки зрения вычислительной сложности, позволяя применять на практике метод простого перебора. В то же время, важно отметить, что такая возможность справедлива только для малых отклонений фазовых ошибок. Результаты моделирования представлены на рис. 12.

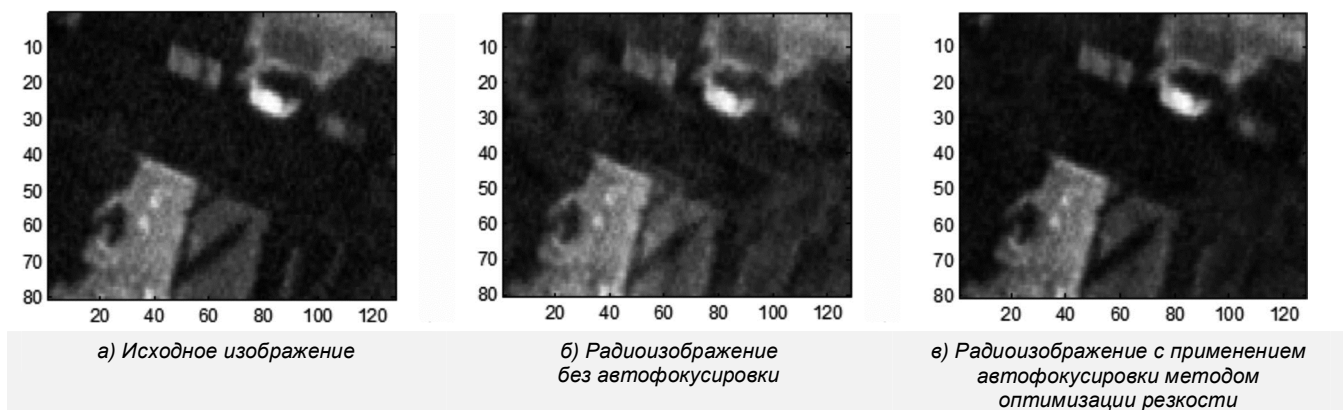


Рис. 12. Результаты моделирования метода автофокусировки на основе оптимизации резкости

На рис. 12 а показано исходное оптическое изображение, которое принимается за идеальное. На основе данного изображения формируется модель отраженного сигнала, которая во временной области умножается на искажающую функцию с фазой, меняющейся по случайному закону в диапазоне $\pm\pi/2$. При восстановлении изображения в режиме синтезирования без автофокусировки наблюдается результат, показанный на рис. 12б. Заметно наличие расфокусировки, которое в данном случае проявляется как спекл-шум, поскольку значения фазы переотражения оказываются случайными. Искажение РЛИ заметно, но незначительно, поскольку значения фазы искажающего сигнала ограничены диапазоном $\pm\pi/2$.

Применение автофокусировки методом оптимизации резкости позволяет получить изображение вида рис. 12 в. Качество изображения заметно повышается.

Важно отметить, что описанный подход к автофокусировке работает при любых законах ухода частоты, а не только при случайном. Важным является факт ограниченности отклонения фазы диапазоном $\pm\pi/2$, что ставит под сомнение его работоспособность в рассматриваемом классе задач с их высокой степенью нестабильности характеристик.

Режим бокового обзора

Другим подходом к дальнейшему повышению разрешающей способности радиолокационных изображений является переход от секторного к переднебоковому или боковому режиму обзора. При формировании изображения в таком режиме проблема стыковки парциальных кадров и компенсация движения носителя снимается сама собой, поскольку изображение формируется в этом случае построчно, а не покадрово.

Первые эксперименты записи и обработки сигналов в режиме, близком к боковому обзору, дали следующие результаты. На рис. 13 показана сцена и условия наблюдений.

Носитель РЛС движется по дороге равномерно прямолинейно. Антенна зафиксирована под углом -79 градусов в азимутальной плоскости. Сигнал регистрируется на интервале перемещения носителя порядка 300 метров (начальный и конечный пункты движения отмечены кружками на рис. 13). На спутниковое изображение наложены данные записанного сигнала – матрица распределения мощности сигнала по каналам дальности и времени.

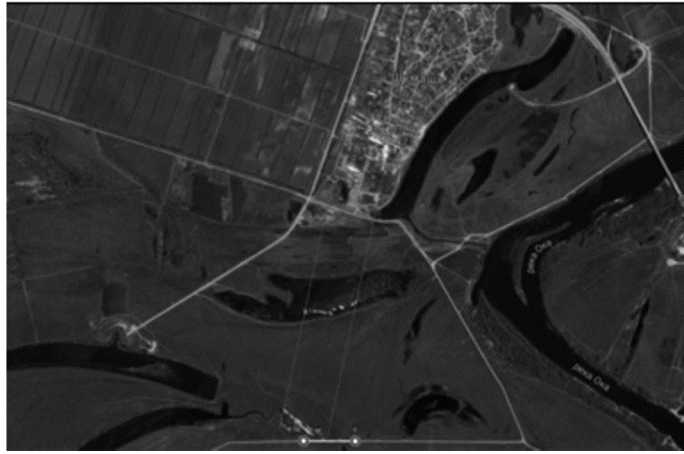
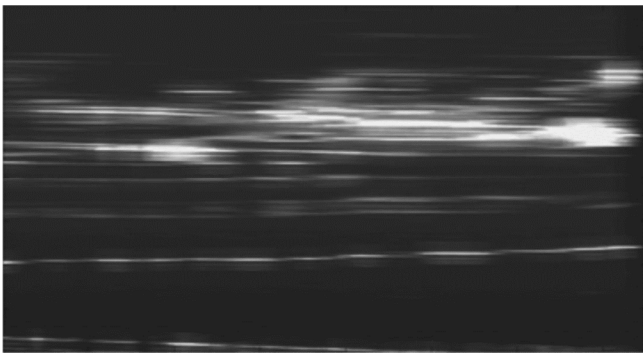
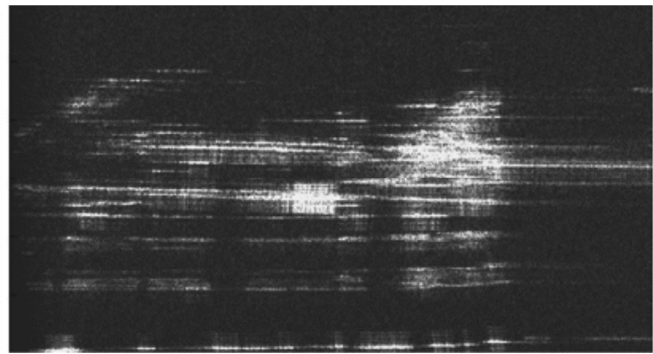


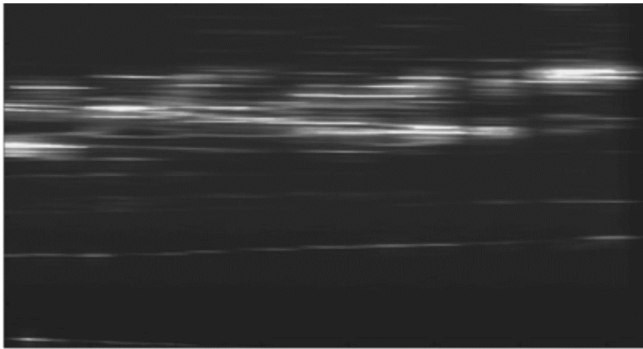
Рис. 13. Регистрация сигнала в режиме бокового обзора



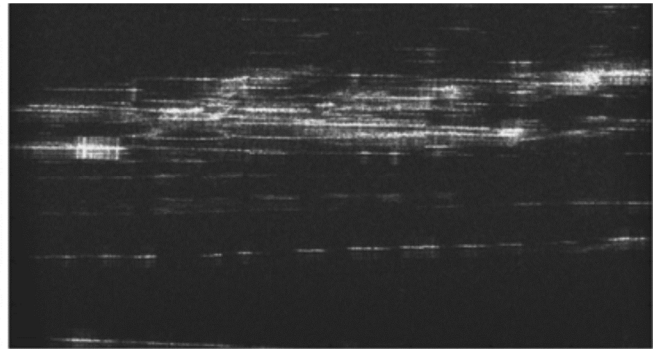
а)



б)



в)



г)

Рис. 14. Результаты формирования радиолокационных изображений в режиме бокового обзора

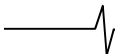
Основная сложность при обработке сигнала в данном случае состоит в отсутствии точной навигационной информации, необходимой для формирования опорных функций. В экспериментах опорная функция оценивалась по сигналу, в котором выделялись фрагменты, соответствующие отражениям от точечных объектов. Такая обработка позволила получить результаты, продемонстрированные на рис. 14.

Результаты представлены для двух экспериментов. Изображения а) и в) соответствуют режиму реального луча для первого и второго экспериментов, соответственно. Изображения б) и г) соответствуют радиолокационным изображениям, полученным для первого и второго экспериментов в режиме повышения разрешения по азимуту в режиме бокового обзора и корреляции с опорными функциями. Заметно ощутимое сжатие отметок от целей по азимуту, однако, высокого качества

изображения достичь не удастся. Требуются дополнительные исследования и эксперименты с внесением в сцену угловых отражателей, используемых для формирования опорных функций, а также решение вопроса о формировании точной навигационной информации.

Заключение

В статье рассмотрены проблемы реализации автомобильных систем радиовидения, разрабатываемые для целей промышленного мониторинга. Такие системы работают в диапазонах дальности от нескольких сотен метров до нескольких километров. Проблема компенсации движения в течение интервала сбора данных становится важной для объединения последовательных кадров изображения в один полный кадр. Интенсивные флуктуации траектории являются еще одним источником искажения изображений. В статье предложен способ



автофокусировки и компенсации движения носителя, которые приводят к повышению разрешения радиолокационных изображений, как по дальности, так и по азимуту. Предложены пути дальнейшей доработки системы с целью повышения качества формируемых изображений.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-07-00419 А.

Литература

1. R. Coscione, I. Hajnsek, O. Frey. «An Experimental Car-Borne SAR System: Measurement Setup and Positioning Error Analysis», IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2018, pp. 6364-6367.
2. O. Frey, C.L. Werner, I. Hajnsek and R. Coscione. «A Car-Borne SAR System for Interferometric Measurements: Development Status and System Enhancements», IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2018, pp. 6508-6511.
3. O. Frey, C.L. Werner, U. Wegmuller, A. Wiesmann, D. Henke and C. Magnard. «A car-borne SAR and InSAR experiment», IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2013, pp. 93-96.
4. P. Eichel, D. Ghiglia, and C. Jakowatz. «Speckle processing method for synthetic-aperture-radar phase correction», Optics Letters, vol. 14, 1989, pp. 1-3.
5. 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», Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on, vol. 30, is. 3, 1994, pp. 827-835.
6. Ch. V. Jakowatz, D.E. Wahl, P.H. Eichel, D.C. Ghiglia, P.A. Thompson. Spotlight-mode synthetic aperture radar: a signal processing approach. Springer. 1996.
7. S. Chen, F. Lu, J. Wang, M. Liu. «An improved phase gradient autofocus method for one-stationary bistatic SAR», IEEE Intern. Conf. on Signal Processing, Communications and Computing pp. 1-5, 2016.
8. M.P. Hayes and S. A. Fortune. «Recursive phase estimation for image sharpening». In Image and Vision Computing New Zealand, Dunedin, New Zealand, 2005.
9. T.J. Kragh. «Monotonic iterative algorithm for minimum-entropy autofocus». In Proc. Adaptive Sensor Array Processing (ASAP) Workshop, Lexington, MA, June 2006.
10. R.L. Morrison Jr., M.N. Do, and D.C. Munson. Jr. «SAR Image Autofocus By Sharpness Optimization: A Theoretical Study», IEEE Journal, pp. 1-13, 2003
11. M.P. Hayes, H.J. Callow and P.T. Gough. «Strip-map Phase Gradient Autofocus», Proceedings of IEEE 6th Digital Signal Processing Workshop, 1994, pp. 53-56.
12. D.G. Thompson; J.S. Bates; D.V. Arnold. «Extending the phase gradient autofocus algorithm for low-altitude stripmap mode SAR». Proceedings of the 1999 IEEE Radar Conference. Radar into the Next Millennium, 1999, pp. 36-40.
13. Y. Gao, W. Yu, Y. Liu, R. Wang, C. Shi. «Sharpness-Based Autofocusing for Stripmap SAR Using an Adaptive-Order Polynomial Model». IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2014, vol. 11, no. 6, pp. 1086-1090.
14. V. Androsov, S. Vityazev, A. Kharin, V. Vityazev. «An Approach to Autofocus in Car-borne Radar Imaging Systems». 2018 IEEE East-West Design & Test Symposium, 2018, pp. 1-4.
15. I.G. Cumming, F.H. Wong. «Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation». Norwood, MA: Artech House, 2005.
16. W.G. Carrara, R.S. Goodman and R.M. Majewski. Spotlight Synthetic Aperture Radar. Signal Processing Algorithms, Artech House, Boston, London, 1995.
17. Robert L. Morrison, Jr., Minh N. Do. and David C. Munson, Jr. «SAR Image Autofocus By Sharpness Optimization: A Theoretical Study». IEEE Journal, 2003.