

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОЛОКАТОРА БОКОВОГО ОБЗОРА С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ

А.В. Костоусов, В.Б. Костоусов

Институт математики
и механики УрО РАН, Екатеринбург

В работе рассматриваются алгоритмы обработки траекторного сигнала и построение синтезированного эхолокационного изображения (ЭЛИ), которое формируется гидролокатором бокового обзора. Модель траекторного сигнала строится с помощью специализированного алгоритма обратной трассировки лучей. Разработаны формат и алгоритмические средства представления трехмерной модели местности. Разработан метод описания отражающих характеристик поверхностей и объектов с помощью локационных текстур. Приводятся результаты численного моделирования эхолокационных изображений. Исследуются особенности алгоритма синтеза ЭЛИ и пути компенсации искажений изображения из-за траекторных нестабильностей, в частности изучается метод автофокусировки изображения по сигналам точечных отражателей.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема повышения углового разрешения гидролокатора бокового обзора (ГБО), или, иначе говоря, повышение разрешающей способности ГБО в направлении движения носителя, является одной из приоритетных задач системы технического зрения автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА) [1]. В работе [2] проведен анализ существующих обзорно-поисковых гидролокаторов с синтезированной апертурой (ГБО СА) и дана высокая оценка эффективности применения таких систем на АНПА. Особое внимание при этом уделяется гидролокаторной системе DARPA SAS [3], алгоритмические идеи которой подробно обсуждаются и в данной работе. На исследование алгоритмов синтеза значительное влияние оказали методы, разработанные для радиолокационных систем [4].

Здесь подробно рассмотрен алгоритм формирования синтезированной апертуры антенны

ГБО. К основным специфическим проблемам его применения в гидролокации относятся:

- неоднородность и изменчивость морской среды распространения звуковых волн;
- проблема неоднозначности измерения дальности;
- проблема траекторных нестабильностей, решение которой приводит к необходимости:

1) предварительной фазовой коррекции смещения фазового центра антенны (ФЦА) во время формирования одного дальностного портрета, в случае применения n каналов необходима компенсация сдвига фазовых центров;

2) применения одного из методов автофокусировки.

Здесь приведен краткий обзор существующих путей решения указанных проблем. Работа продолжает исследование, начатое в [5]. Алгоритм синтеза реализован и исследуется в рамках моделирующего программного комплекса «SRL-Навигация», который разработан на базе созданного ранее комплекса [6] для моделирова-

ния и исследования радиолокационных систем навигации летательных аппаратов. Для моделирования отраженных сигналов здесь используются результаты работы [7], посвященной моделям ГБО с реальной апертурой.

■ Алгоритм синтеза апертуры: основы

Для полноты изложения и для ввода обозначений рассмотрим основной алгоритм синтеза апертуры антенны, который базируется на использовании закона изменения фазы отраженного сигнала при известном относительном движении наблюдаемой цели и фазового центра антенны (ФЦА). Геометрия формирования синтезированного ГБО-изображения приведена на рис. 1, а. На рис. 1, б показана схема формирования одной строки отсчетов синтезированного изображения многоканальным ГБО, соответствующей одному значению координаты y .

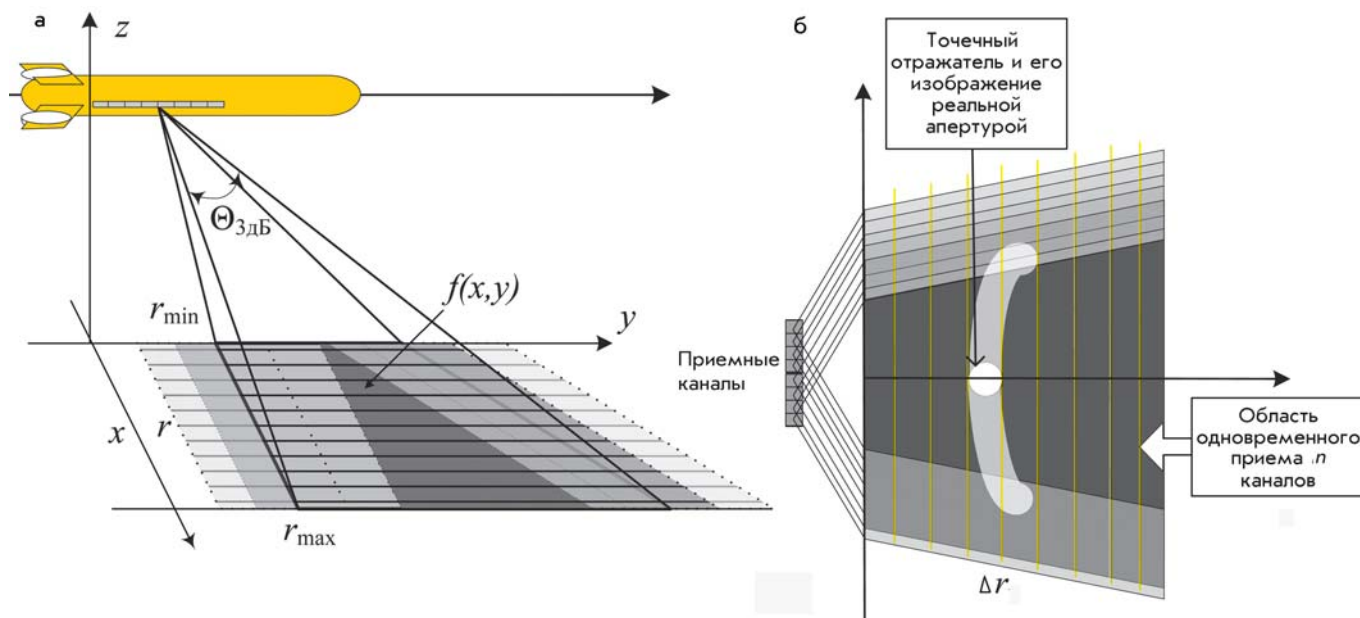


Рис. 1. а – геометрия формирования синтезированного ГБО-изображения; б – схема формирования одной строки отсчетов синтезированного изображения многоканальным ГБО, соответствующей одному значению координаты y . Здесь же условно показано полученное реальной апертурой изображение точечного отражателя, которое одновременно является функцией размытия точки

Модель траекторного сигнала на интервале синтеза $[-T/2, T/2]$, принятого от i -го элемента разрешения, для случая произвольного движения АНПА выглядит следующим образом [4]:

$$s_i(\tau) = U_i G(\tau) \exp\{-j[4\pi r_i(\tau)/\lambda - \varphi_i]\} + n(\tau), \quad (1)$$

где τ – текущее время ($\tau \in [-T/2, T/2]$); U_i – амплитуда элементарного отраженного сигнала (определяется дальностью до точки отражения и локационной текстурой в этой точке); $G(\tau)$ – функция диаграммы направленности антенны; $r_i(\tau)$ – закон изменения расстояния от ФЦА до элемента отражения; λ – длина волны; φ_i – неизвестная начальная фаза отраженного сигнала; $n(\tau)$ – комплексный гауссовский белый шум, моделирующий шумы приемника; j – мнимая единица.

Алгоритм обработки траекторного сигнала с точностью до постоянного множителя описывается формулой

$$I(r_i, x) = I_i(\eta) = \left| \int_{-T/2}^{T/2} s(\tau + \eta) h(\tau) d\tau \right|, \quad (2)$$

где $h(\tau)$ – комплексная опорная функция, формируемая по траекторным измерениям навигационной системы АНПА; η – временной сдвиг между траекторным сигналом и опорной функцией, который соответствует продольной координате y системы координат ЭЛИ (рис. 1). Опорная функция $h(\tau)$ имеет вид:

$$h(\tau) = H(\tau) \exp\{j[4\pi r_i(\tau)/\lambda]\}, \quad (3)$$

где $r_i(\tau)$ – прогнозируемый (по показаниям ИНС) закон изменения дальности до элемента отражения; $H(\tau)$ – весовая функция.

Приведем классическую оценку потенциальной разрешающей способности фокусированной на дальность R_0 синтезирующей системы [3, 4] в предположении идеального знания закона изменения дальности до объекта. Как известно, угловое разрешение реальной апертуры по уровню 3 дБ составляет [4] $\theta_{3дБ} = \lambda/D$ (D – диаметр апертуры антенны). Тогда линейное разрешение реальной апертуры δy_{RA} по координате y на дальности R_0 составит

$\delta y_{RA} \approx R_0 \theta_{3дБ} = \lambda R_0 / D$. За счет движения реальной апертуры за время синтеза система обработки траекторного сигнала расширяет диаметр синтезированной апертуры. Максимальный размер D_{SA} синтезированной апертуры на дальности R_0 ограничен шириной диаграммы направленности физической антенны:

$$D_{SA} = R_0 \theta_{3дБ} = \lambda R_0 / D. \quad (3)$$

Поскольку при синтезировании реальная апертура *излучает и принимает в каждом положении* во время обработки, относительный фазовый сдвиг отраженного сигнала удваивается по сравнению с реальной антенной того же диаметра. Поэтому формирование изображения от синтезированной апертуры дает такой же эффект, как от реальной апертуры удвоенного размера. Отсюда

$$\delta y_{SA} = \lambda R_0 / (2D_{SA}) = D/2. \quad (4)$$

Таким образом, теоретическая потенциальная разрешающая способность синтезированного ЭЛИ в направлении движения АНПА не зависит от

дальности цели и от значения длины волны (рабочей частоты).

■ Фазовые искажения траекторного сигнала и их влияние на гидролокационное изображение

В реальных условиях работы ГБО всегда присутствуют искажения траекторного сигнала, обусловленные различными факторами. К ним относятся неустойчивости движения АНПА, среды распространения звуковых волн и неустойчивости работы аппаратуры ГБО. Искажения траекторного сигнала, которые могут быть как амплитудными, так и фазовыми, вызывают искажения получаемого изображения. Поскольку обычно амплитудные флуктуации траекторного сигнала за время синтезирования не велики, основное внимание направим на изучение фазовых искажений траекторного сигнала (1):

$$\psi(t) = 4\pi/\lambda \cdot \delta r(t), \quad (5)$$

где $\delta r(t) = \rho(t) - r(t)$ – разность между измеренным на борту расстоянием $\rho(t)$ от ФЦА до объекта и фактическим расстоянием $r(t)$; λ – длина волны.

Рассмотрим влияние траекторных неустойчивостей на примере одиночного точечного отражателя. Траекторный сигнал ГБО от точечного объекта, расположенного в точке (x_0, y_0) (см. рис. 1, б), при движении с постоянной скоростью V по прямолинейной траектории с точностью до квадратичной аппроксимации функции $r(t)$ изменения дальности от ФЦА до объекта записывается в виде [4]:

$$s(t) = u(t)G(t)\exp\{-j2\pi(f_0 \cdot t + \mu_0 \cdot t^2) + j\psi(t)\}. \quad (6)$$

Здесь $u(t)$, $\psi(t)$ – флуктуации амплитуды и фазы траекторного сигнала; $G(t)$ – значение коэффициента усиления антенны в

направлении объекта (функция диаграммы направленности – ДНА); $f_0 = 2V\theta_0/\lambda$ – смещение доплеровской частоты сигнала, определяемое азимутом θ_0 объекта ($\theta_0 = y_0/R_0$, y_0 – координата объекта вдоль движения АНПА, R_0 – наклонная дальность до объекта) (на рис. 1, б: $y_0 = 0$);

$$\mu_0 = \frac{V^2 \sin^2(\pi/2 + \theta)}{\lambda R_i} - \text{скорость}$$

изменения частоты сигнала; j – мнимая единица.

Амплитудные флуктуации обусловлены в основном изменением эффективной полосы рассеивания (ЭПР) цели за время синтезирования и колебаниями диаграммы направленности антенны, они носят медленный характер, и их влиянием обычно пренебрегают. По этой причине и для упрощения выкладок будем считать константами в (6) $u(t) = U_0$ и $G(t) = G_0$, т.е. – амплитудные флуктуации отсутствуют, а ДНА – равномерная в пределах интервала синтезирования. В этих условиях при равномерной весовой функции ($H(t) = 1$) опорную функцию (3) можно представить в виде:

$$h(\tau) = \exp\{j[2\pi(f \cdot \tau + \mu \cdot \tau^2)/\lambda]\},$$

где f и μ – параметры настройки согласованной системы обработки траекторного сигнала:

$$f = 2V\theta/\lambda \text{ и } \mu_i = \frac{V^2 \sin^2(\pi/2 + \theta)}{\lambda R_i}$$

($\theta = y/R_i$ – параметр-азимут, R_i – дальность i -й полоски). Тогда комплексный выходной сигнал (2) (где $\eta = 0$) согласованной системы обработки как функция параметров f и μ_i имеет вид (полагая, что начальная фаза равна нулю):

$$I(f, \mu_i) = U_0 G_0 \int_{-T/2}^{T/2} \exp\{j2\pi((f - f_0)t + (\mu_i - \mu_0)t^2 + j\psi(t))\} dt.$$

Отсюда, при отсутствии искажений траекторного сигнала,

когда $\psi(t) = 0$, система обработки идеально сфокусирована, т.е. $\mu_i = \mu_0$, получим

$$I(f) = U_0 G_0 \frac{T \sin(\pi(f - f_0)T)}{\pi(f - f_0)T}.$$

Как видим, выходной сигнал синтезирующего алгоритма в рассматриваемом идеальном случае имеет вид функции $\frac{\sin x}{x}$.

Максимум сигнала наблюдается при $f = f_0 = 2V\theta_0/\lambda = 2Vy_0/(\lambda R_i)$, т.е. положение максимума определяется координатой y_0 объекта.

Основными параметрами неискаженного выходного сигнала в заданной полоске дальности являются: 1) максимальная амплитуда $U_0 G_0 T$; 2) положение максимума $f = f_0$, которое определяется координатой объекта; 3) ширина главного лепестка $\delta f = 1/T$, которая определяет разрешение по направлению движения; 4) уровень первого бокового лепестка по отношению к главному лепестку, который для функции $\frac{\sin x}{x}$ составляет 13,5 дБ.

Следствием фазовых искажений $\psi(t)$ траекторного сигнала в системе обработки являются:

1) смещение максимума, что приводит к геометрическим искажениям ЭЛИ визируемого района;

2) уменьшение максимума выходного сигнала, что равносильно снижению энергетического потенциала ГБО;

3) расширение главного лепестка, что ухудшает разрешающую способность;

4) увеличение уровня боковых лепестков, что снижает контраст ЭЛИ.

Большие фазовые искажения могут привести к полному разрушению синтезированного ЭЛИ.

Искажающая функция $\psi(t)$ может быть регулярной или случайной, медленно или быстро изменяющейся, в некоторых

случаях возможны периодические изменения $\psi(t)$. При медленных флуктуациях фазы, когда время синтезирования значительно меньше периода корреляции $\psi(t)$, искажения можно аппроксимировать степенным полиномом со случайными коэффициентами:

$$\psi(t) = c_1 t + c_2 t^2 + c_3 t^3 + \dots \quad (7)$$

При этом (см. [4]):

- чисто линейное искажение фазы (когда $\psi(t) = c_1 t$) приводит к смещению изображения объекта по координате y , которое пропорционально коэффициенту c_1 линейного искажения фазы и длительности синтезирования T (отметим, что при некогерентном накоплении различные смещения отдельных изображений объектов приводят к размытию получаемого ЭЛИ);

- квадратичное искажение фазы (когда $\psi(t) = c_2 t^2$) вызывает уменьшение максимума сигнала изображения точечного объекта, расширение главного лепестка и увеличение боковых лепестков. Степень этих искажений зависит от величины фазового набега на концах синтезированной апертуры относительно ее середины $\Delta\psi = c_2 T^2/4$. Допустимым уровнем фазовых искажений обычно считается $\Delta\psi = \pi/4$, при котором допустимый коэффициент квадратичных фазовых искажений c_2 не должен превышать π/T^2 .

Влияние на результат синтезирования других типов фазовых искажений траекторного сигнала описывается в работе [4].

Основным источником информации об изменении дальности $r(t)$ (в виде измеренной функции $\rho(t)$, используемой в (3)) является бортовая инерциальная навигационная система (ИНС), главное назначение которой – выработка управляющих сигналов для обеспечения

движения АНПА по заданной (опорной) траектории. Неточности работы системы управления и различного рода случайные возмущения при движении АНПА в сложной возмущенной среде вызывают отклонения реальной траектории движения от заданной. Эти случайные отклонения от опорной траектории принято называть *траекторными нестабильностями*.

Траекторные нестабильности явились, по-видимому, основным сдерживающим фактором широкого развития гидролокационных систем с синтезированием апертуры [2]. Действительно, для нормальной работы синтезирующего алгоритма необходимо знание траектории АНПА для вычисления функции $r(t)$ и расчета опорной функции (3) с точностью до малых долей (например, одной восьмой) длины волны ГБО в пределах интервала синтезирования – это несколько миллиметров. Точность инерциальных систем, применяемых в современных АНПА [1], совершенно недостаточна для решения такой задачи. Тем не менее показания ИНС необходимо использовать для получения функции $\rho(t)$ – первого, грубого приближения функции $r(t)$. Применение простейшей квадратичной модели ошибок ИНС позволяет записать модель фазовых искажений (5) в виде:

$$\psi(t) = 4\pi/\lambda (\Delta V_r t + \Delta a_r t^2/2),$$

где ΔV_r , Δa_r – флуктуации радиальной скорости и ускорения ФЦА относительно наблюдаемого объекта. Отсюда видно, что ошибка измерения радиальной скорости приводит к сдвигу изображения по направлению движения АНПА, а ошибка измерения радиального ускорения – к квадратичному набегу фазы, а значит, к расфокусировке ЭЛИ.

■ Особенности обработки сигнала ГБО и алгоритмы компенсации траекторных нестабильностей

Несмотря на различия физических принципов формирования, распространения и приема сигналов в гидролокации и радиолокации, принципы математической обработки сигналов гидролокатора и РЛС оказались, по существу, идентичны. Тем не менее с точки зрения методов и условий синтезирования апертуры следующие три основных отличительных фактора приносят существенные особенности в обработку траекторного сигнала гидролокатора по сравнению с РЛС.

- **Неоднородность и изменчивость морской среды** распространения звуковых волн значительно выше аналогичных факторов в случае распространения электромагнитных волн в атмосфере, и, как следствие, имеется более существенная нестабильность скорости звука в морской среде. Это может приводить к нарушению базового принципа формирования синтезированной апертуры – фазовой устойчивости отраженного сигнала. Изменчивость скорости может приводить к тому, что звуковой сигнал распространяется не точно по прямой. Кроме того, часто сигнал может раздваиваться из-за переотражений от поверхности воды или от дна. Как указано в работе [3], проведенные в 1970-х и 80-х годах исследования и более поздние эксперименты (в частности, с использованием системы DARPA SAS) тем не менее показали, что, по крайней мере, в диапазоне частот 10–100 кГц имеется достаточно хорошая стабильность фазы сигнала (со среднеквадратическим отклонением порядка нескольких градусов на протяжении одной минуты) на дальности до 50 м для несущей частоты 100 кГц и на

дальности до 2,5 км при 10 кГц. Эти исследования и дальнейшее развитие алгоритмического обеспечения показали принципиальную возможность эффективного синтезирования ГБО и достижения разрешения, близкого к теоретическому пределу (4).

• **Скорость распространения сигнала** в среде отличается на пять порядков (скорость звука в морской среде около 1500 м/с, а скорость света – $3 \cdot 10^8$ м/с). Отсюда, в условиях гидролокации время возвращения отраженного сигнала является существенным ограничивающим фактором для дальности действия ГБО и для получения достаточного числа отсчетов траекторного сигнала с фиксированной дальности. Например, для дальности $R_{\max} = 150$ м интервал времени отсчетов сигнала должен быть не менее $dt > 0,2$ с, что является слишком большим для правильного воспроизведения фазы сигнала. Эта проблема детально обсуждается ниже.

Отметим также, что работа при синтезировании ЭЛИ на относительно малых дальностях и большой угловой ширине реального луча требует специально обрабатывать эффект «кривизны» носителя функции размытия точечного отражателя. Это означает, что здесь нельзя считать отклик точечного объекта сосредоточенным в одной полоске дальности (т.е. сводить задачу фокусировки к одномерному случаю), а нужно работать, по существу, с функцией размытия как с двумерным ядром интегрального преобразования. В работе [3] для этой цели рассматриваются два метода. Первый основан на идее преобразования частотной плоскости для двумерного преобразования Фурье, это так называемый *seismic migration algorithm* (или ω - k алгоритм). Второй метод использует коррекцию линейно-частотной модуляции сигнала

для «выпрямления» в частотной области функции размытия точки, этот метод называется *Chirp scaling*, и его развитие – *ACS-алгоритм (accelerated chirp scaling)*. В нашей работе моделирование, которое будет представлено ниже, демонстрирует эффект кривизны функции размытия, но поскольку частотно-импульсная модуляция пока не моделируется, то при обработке траекторного сигнала вместо применения указанных методов в упрощенной схеме обработки напрямую имитируется «выпрямление» функции размытия.

• **Скорость движения носителя** (скорость АНПА в десятки и сотни раз меньше скорости летательных аппаратов). Прежде всего, малая скорость движения АНПА – это большая длительность интервала синтезирования, на котором требуется выдерживать чрезвычайно стабильное движение по заданной траектории. С одной стороны, малая скорость АНПА способствует ослаблению только что упомянутой проблемы низкой частоты получения отсчетов траекторного сигнала. Но для полного решения этой проблемы скорость движения должна быть слишком мала (например, как показано ниже, для дальности $R_{\max} = 150$ м скорость движения не должна превышать 0,125 м/с), и при такой малой скорости системе управления очень сложно выдерживать устойчивое заданное движение. С другой стороны, малая скорость движения носителя ГБО ограничивает применение методов компенсации фазовых возмущений траекторного сигнала, основанных на измерении сдвигов доплеровских частот в каналах синтезирования, поскольку в этом случае изменения доплеровских частот очень малы и для их оценки требуются слишком большие времена синтезирования. Следует

отметить связанную с оценкой фазовых искажений траекторного сигнала с помощью малых доплеровских частот проблему увеличения временной задержки формирования синтезированного ЭЛИ, которая может препятствовать возможности формирования управления АНПА в перспективе на основе результатов обработки ЭЛИ.

Рассмотрим более подробно проблему недостаточной частоты получения отсчетов эхолокационного сигнала в направлении движения носителя (ось y на рис. 1). Интервал dt между получаемыми отсчетами вдоль оси y ($dy = Vdt$), с одной стороны, ограничен снизу заданной максимальной дальностью обзора $dt > 2R_{\max}/c$, где c – скорость звука. Например, для $R_{\max} = 150$ м $dt > 0,2$ с. С другой стороны, этот интервал должен поддерживать необходимую частоту съема эхолокационного сигнала вдоль координаты y , т.е. должно быть $dt < 1/f_{\max}$. Здесь f_{\max} – максимальная скорость изменения фазы траекторного сигнала, принятого от точечного отражателя, которая в случае прямолинейного равномерного движения АНПА приблизительно оценивается выражением:

$$f_{\max} = 2 \cdot \theta_0 \cdot V / \lambda = 2 \cdot V / D,$$

где θ_0 – угловая ширина диаграммы направленности (ДНА) реальной приемной антенны, V – скорость движения АНПА, λ – длина волны акустического сигнала, D – ширина реальной апертуры. При $\theta_0 = 20^\circ$, $\lambda = 0,02$ м ($D = 0,06$ м), $V = 1,0$ м/с $f_{\max} = 34$ Гц, и, следовательно, dt не должно превышать 0,03 с! При невыполнении последнего условия наблюдается (см. рис. 2, 3) так называемый эффект наложения спектров, возникающий из-за недостаточной частоты дискретизации сигнала. Этот эффект известен также под названием неоднозначности

измерения дальности (*range ambiguity*) [3].

Это фундаментальное противоречие может быть разрешено путем применения линейки из нескольких приемных антенн, расположенных вдоль направления движения на расстоянии, обеспечивающем необходимую частоту съема. Следующие способы решения проблемы неоднозначности измерения дальности в ГБО описаны в [3], где можно найти дальнейшие ссылки:

1) использование расширения полосы импульсного ЛЧМ-сигнала – сложный и дорогой путь решения проблемы;

2) использование многолучевого лоатора, в котором каждый луч работает как не-

зависимый лоатор, лучи располагаются веером в вертикальной плоскости, каждый луч работает на отдельной частоте и обеспечивает свою полосу дальностей. Тоже, хотя и применяемый, но не самый лучший способ;

3) наиболее распространенный для ГБО АНПА способ заключается в использовании одного передающего и n приемных каналов. При этом работает так называемый принцип *смещенных фазовых центров (Displaced Phase Center)*. Это, по-видимому, наилучший на сегодняшний день вариант. Однако у этого метода имеются свои специфические трудности, связанные с совместной обра-

боткой пересекающихся линеек откликов каналов для компенсации различных флуктуаций носителя (боковых, продольных, вертикальных и поворотных в разных плоскостях).

Как было отмечено, для обеспечения высокой разрешающей способности синтезированного ЭЛИ необходимо с точностью до долей длины волны знать изменение траектории движения фазового центра антенны ГБО на интервале синтеза. Использование ИНС и других навигационных приборов не может обеспечить такой точности. Для решения этой проблемы в радиолокации достаточно давно [4], а в гидро-

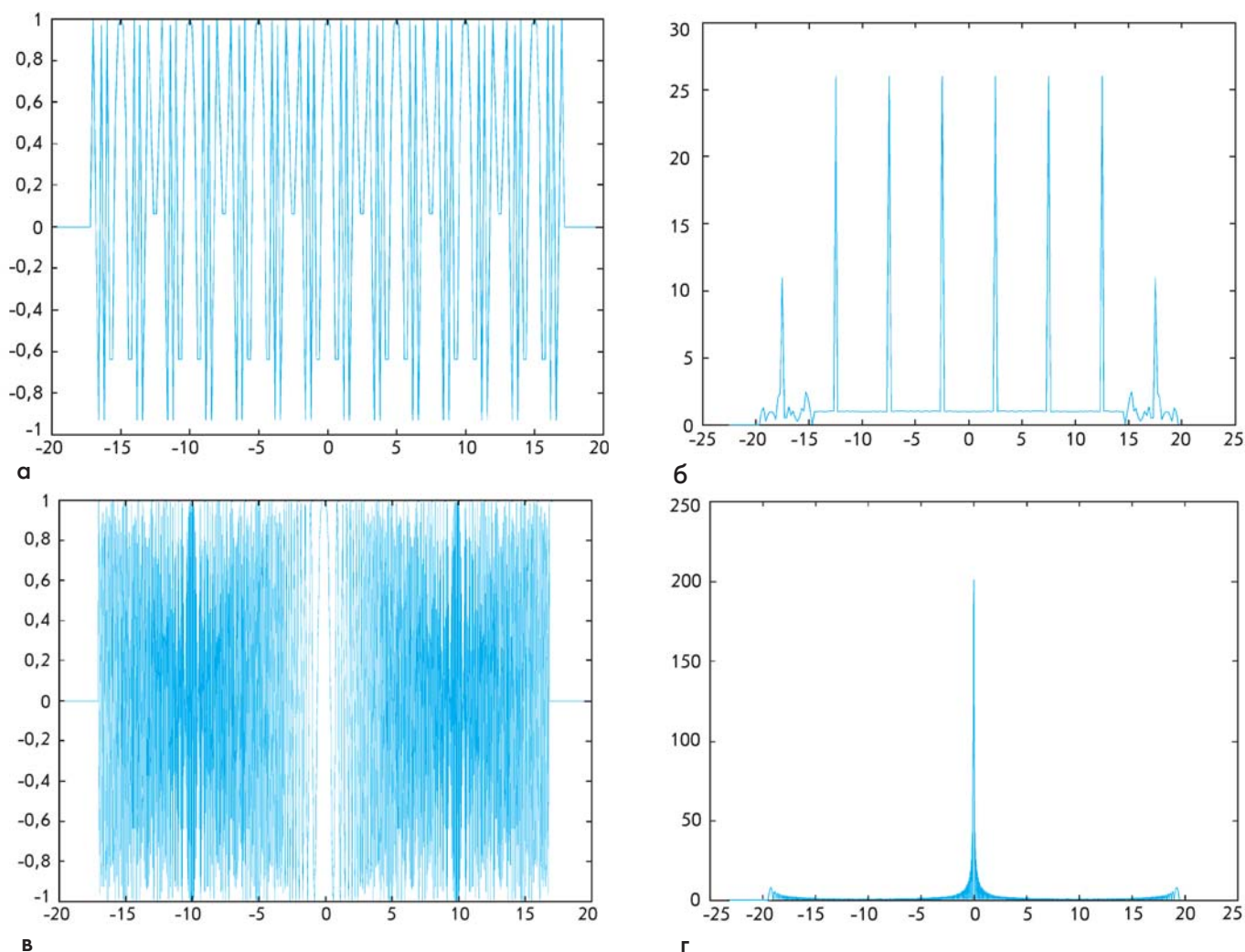


Рис. 2. Проблема неоднозначности изображения цели при синтезировании траекторного сигнала ГБО. Слева (а, в) – модельный траекторный сигнал ($T = 5$ с, $\lambda = 0,02$ м, $R = 100$ м, $V = 1$ м/с, $\theta_{зпб} = 20^\circ$); справа (б, г) – результат синтезирования. Вверху (а, б) – сигнал одного канала, $dt = 0,2$ с; внизу (в, г) – 8 каналов, что соответствует $dt = 0,025$ с

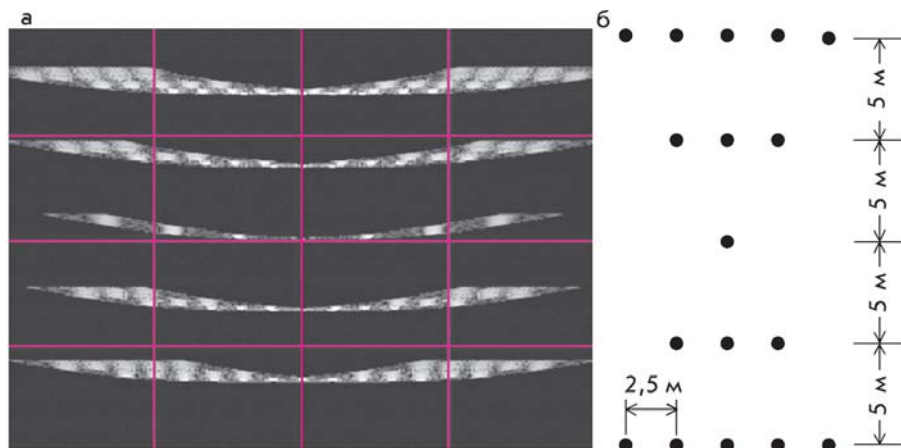


Рис. 3. Результат использования одного канала при синтезировании апертуры демонстрирует проблему неоднозначности изображения цели при синтезировании траекторного сигнала ГБО. На рисунке справа расположено ЭЛИ сцены, состоящей из точечных отражателей и показанной слева

локации относительно недавно [3] используется подход, основанный на том, что сам траекторный сигнал или ЭЛИ являются носителями информации о фазовых нестабильностях, которые могут быть измерены с помощью специальной обработки сигнала. Более того, при таком подходе появляется возможность компенсации фазовых флуктуаций, обусловленных не только траекторными нестабильностями, но и нестабильностями аппаратуры ГБО и среды распространения эхосигнала. Поскольку обычно процесс извлечения информации о фазовых искажениях из траекторного сигнала или самого ЭЛИ и компенсации этих искажений используется для повышения детальности (резкости) ЭЛИ, то он часто называется [4] *автофокусировкой*.

Целью автофокусировки является обеспечение заданной разрешающей способности ЭЛИ в условиях реального движения при ограниченной точности навигационной системы. При синтезировании апертуры в радиолокации характеристики навигационных систем, условия движения и длительности синтезирования позволяют по показаниям штатной ИНС или специализированной инерци-

альной системы микронавигации фазового центра антенны (ФЦА) достаточно близко подойти к требуемым точностям оценки фазовых искажений.

В гидролокации для обеспечения работоспособности алгоритмов автофокусировки необходим дополнительный этап «грубой» коррекции фазовых искажений, который с неизбежностью связан с извлечением информации о положении фазовых центров опять же из самого траекторного сигнала. Методы «грубой» коррекции фазовых искажений, возникающих за счет движения ФЦА, основаны на «выправлении» траекторного сигнала в процессе его поступления. В работе [3] приведен весьма перспективный метод «избыточного фазового центра» (RPC – *Redundant Phase Center method*) и его модификации, который является методом корреляционного типа. Он оценивает флуктуации антенны многоканального ГБО путем вычисления положения пика взаимной корреляционной функции между двумя группами отсчетов, соответствующих двум соседним по времени положениям антенны.

Методы автофокусировки ЭЛИ работают на заключительной стадии обработки и используются для компенсации малых

остаточных фазовых ошибок, приближая разрешение ЭЛИ к теоретическому пределу $\delta y = D/2$.

Алгоритмы автофокусировки можно разбить на две группы. В первой группе методов используются мощные сигналы одиночных точечных отражателей. При большом соотношении сигнал/шум и сигнал/фон траекторный сигнал отражателя имеет те же фазовые искажения, что и траекторный сигнал объекта, расположенного в окрестности отражателя. Эти искажения оцениваются тем или иным способом и затем компенсируются в траекторном сигнале, пришедшем от окрестности. Достоинством этих методов является возможность компенсации всех видов искажений, в том числе быстроменяющихся (с полосой частот в единицы–десятки герц), недостаток метода – необходимость наличия ярких точечных отражателей в ЭЛИ.

Вторая группа методов для оценки фазовых искажений использует траекторный сигнал от всех объектов и фона в диаграмме направленности антенны. Важным достоинством этих методов является то, что отсутствие точечных отражателей не срывает работу алгоритма, а их наличие только повышает эффективность процесса автофокусировки.

Приведем краткий обзор практически реализуемых алгоритмов автофокусировки, подробно описанных в [4] для РЛС и в [3] для ГБО.

- **Алгоритм на основе оценки средней доплеровской частоты (СДЧ)** [4] относится ко второй из вышеуказанных групп и оценивает относительно медленные фазовые искажения вида (7) по сдвигу максимума спектра траекторного сигнала. Для измерения сдвига СДЧ вся синтезированная апертура разбивается на несколько подапертур,

на которых допустима линейная аппроксимация движения ФЦА. Использование двух подапертур позволяет оценить квадратичный коэффициент, трех подапертур – кубический и т.д. Например, коэффициент c_2 (см. (7)) оценивается по положению пика взаимной корреляционной функции двух изображений, полученных двумя подапертурами.

● **Фазоразностный алгоритм** [4] так же, как и предыдущий алгоритм оценки СДЧ, основан на корреляционном сравнении сигналов подапертур в частотной области и оценивает коэффициенты модели (7), но требует существенно меньших вычислительных ресурсов для своей реализации и более устойчив при малых отношениях сигнал/шум.

● **Автофокусировка по сигналам точечных отражателей** [4] проводится после обработки вычисленной по навигационным данным опорной функцией (3) и состоит из двух этапов: 1 – обнаружение и фильтрация сигнала точечного источника (задача фильтрации состоит в отделении сигнала от фона); 2 – формирование фокусирующей опорной функции на основе фазы выделенного сигнала и коррекции изображения. Алгоритмы этого типа наиболее популярны в радиолокации, поскольку компенсируют фазовые искажения всех типов и имеют впечатляющие результаты. А проблем с наличием ярких точек в изображениях, полученных мощными радиолокаторами, как правило, не возникает. Однако они предъявляют достаточно жесткие требования к «точечности» целей. Это приводит к необходимости применения дополнительных алгоритмов отбора объектов для фокусировки, что, в свою очередь, приводит к увеличению вычислительной сложности алгоритма. Применение ал-

горитмов автофокусировки по сигналам точечных отражателей в гидролокации является не столь очевидным, тем не менее представляет интерес исследование их возможностей в условиях синтезированного ГБО.

● **Фазо-градиентный алгоритм автофокусировки** [3] (PGA – Phase Gradient Autofocus) и его модификации [3] требуют наличия ярких точечных отражателей, но не столь придирчивы к их качеству («точечности» и силе), как предыдущий метод. PGA – алгоритм основан на оценке функции $\psi(t)$ фазовых искажений ЭЛИ путем выделения различий в изменении фазы отраженного сигнала от соседних участков сцены.

● **Метод формирования динамического фазового портрета** [4] оценивает коэффициент c_2 квадратичных фазовых искажений с помощью двух подапертур неодинаковой длительности. Динамический фазовый портрет – это изображение объекта, сигнал каждой точки которого пропорционален разности фаз сигналов в двух разнесенных во времени (в пространстве) каналах синтеза соответствующего разрешаемого участка. Метод позволяет формировать одновременно изображение всей зоны обзора и работает по сигналам всех точечных целей без предварительной оценки их «точечности» и приведения сигналов к одной частоте.

■ Реализация модели траекторного сигнала

Отличительными особенностями предлагаемого подхода к моделированию траекторного сигнала являются: использование развитой специально организованной трехмерной модели местности; введение «локационной текстуры», использующей как экспериментальные отражающие характеристики

поверхностей и объектов из базы данных, так и модели гидролокационного отражения (использованные в [7]); последовательное применение лучевого метода моделирования.

Исходными данными для формирования траекторного сигнала гидролокатора являются электронная карта морского дна и база данных отражательных свойств поверхностей (БД ОСП). На основе электронной карты строится трехмерная иерархическая модель сцены. На верхнем уровне иерархии находится понятие *сцены*. Сцена содержит в себе *объекты*. Понятие *объекта* является ключевым – это контейнер, который выполняет две функции: с одной стороны, он содержит геометрическую информацию о части моделируемой сцены в виде примитивов, а с другой – служит средством структурирования модели сцены. Допускается наличие объектов без геометрических примитивов, которые содержат только дочерние объекты. Вся информация о геометрии сцены сосредоточена в примитивах. Примитивы могут быть как простыми фигурами, такими, как треугольник, плоскость, сфера, параллелепипед, конус и т.п., так и более сложными образованиями: например, рельеф, заданный матрицей высот, моделируется специальным примитивом. Кроме того, была реализована поддержка точечных отражателей, позволяющих исследовать алгоритмы обработки траекторного сигнала гидролокатора «в чистом виде». Помимо описания геометрии, примитивы используются для задания отражательных свойств поверхностей моделируемых ими участков сцены.

Моделирование траекторного сигнала осуществляется с использованием внутреннего представления геометрической модели сцены, которое имеет

описанную иерархическую структуру. Однако для повышения скорости моделирования с каждым объектом сцены во внутреннем представлении ассоциируется габаритное тело простой геометрической формы (в текущей реализации используются сферы), которое обладает следующим свойством: если луч не пересекается с габаритным телом данного объекта, то этот луч не пересекается ни с одним из геометрических примитивов, принадлежащих данному объекту или какому-либо из его дочерних объектов. За счет простоты проверки условия пересечения луча с габаритным телом удается существенно ускорить процедуру поиска пересечения луча с объектами сцены при его трассировке.

Опишем алгоритм моделирования траекторного сигнала гидролокатора. Пусть в некоторой «глобальной» декартовой системе координат задан гидролокатор: его положение задано радиус-вектором l , угловая ориентация – единичными векторами d_f (направление обзора) и d_u (направление верха). Пусть визируемая сцена представляет собой некоторую поверхность. Свяжем с датчиком локальную сферическую систему координат такую, что положение локатора определяет начало координат этой системы, а каждая точка пространства характеризуется расстоянием

до фазового центра антенны локатора $r \in [0, \infty)$ и двумя углами: азимутом $\theta \in [-\pi, \pi]$ – это угол между вектором d_f и проекцией радиус-вектора, соответствующего данной точке, на плоскость, перпендикулярную вектору d_u ; углом места $\theta \in [0, \pi]$ – это угол между вектором d_u и радиус-вектором, соответствующим данной точке.

Отражательные свойства сцены зададим в виде функции $T(r, \varphi, \theta)$, называемой «локационной текстурой» сцены, следующим образом. Если луч, выходящий из начала координат новой сферической системы в направлении, заданном углами (φ, θ) , пересекает поверхность сцены и ближайшая к началу координат точка пересечения находится от него на расстоянии r , тогда значение $T(r, \varphi, \theta)$ полагаем равным коэффициенту отражения в этой точке поверхности сцены; для всех остальных точек указанного луча полагаем $T(r, \varphi, \theta) = 0$. Если данный луч не пересекает поверхность сцены, то для всех точек этого луча также полагаем $T(r, \varphi, \theta) = 0$. Коэффициент отражения в точке поверхности сцены показывает, какая доля сигнала, пришедшего от локатора, переизлучается в обратном направлении в данной точке.

Результатом моделирования траекторного сигнала гидролокатора является дис-

кретная (получаемая в виде матрицы комплексных чисел) функция $s(r, y)$, описывающая зависимость амплитуды и фазы отраженного сценой акустического сигнала от дальности r и продольной координаты y , с которых он принимается. Каждое значение этой функции соответствует элементу разрешения (r, y) по дальности и продольной координате. Сечение $s(r, y)$ при фиксированном значении y называется дальностным портретом.

Для формирования каждого дальностного портрета, составляющего траекторный сигнал, используется известный в компьютерной графике метод *обратной трассировки лучей*. Термин «обратная трассировка» означает, что лучи трассируются в направлении, обратном направлению распространения акустического сигнала. Для моделирования отражательных свойств поверхностей объектов сцены используются значения коэффициентов отражения основных типов поверхностей из БД ОСП, а также диффузно-зеркальная модель отраженного излучения (см. [7]).

Выбор метода обратной трассировки обусловлен тем, что в отличие от других методов анализа сцены, например таких, как метод, использующий буфер глубины, он позволяет учесть эффект многократного переотражения акустических волн, когда гидролокатор принимает не только непосредственный отклик посланного сигнала, но и сигнал, один или несколько раз переотраженный объектами сцены (рис. 4). За счет увеличения преодолеваемого переотраженным сигналом расстояния на ЭЛИ могут появиться ложные объекты – яркие точки или линии, изображенные на дальностях, на которых в сцене никаких объектов на самом деле нет.

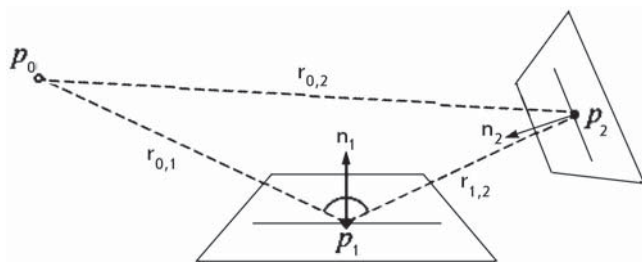


Рис. 4. Схема трассировки лучей и эффект переотражения эхосигнала. Основной отклик гидролокатора p_0 получает из точки p_1 с расстояния $r_{0,1}$ (что соответствует пути сигнала $p_0 p_1 p_0$); однако, если сигнал, идущий по пути $p_0 p_2 p_1 p_0$, оказывается достаточно мощным, то гидролокатор будет наблюдать ложный объект на расстоянии $(r_{0,2} + r_{1,2} + r_{0,1})/2$

■ Моделирующий программный комплекс «SRL-Навигация»

Для исследования вопросов, связанных с моделированием работы гидролокатора бокового обзора, формированием траекторного сигнала и его обработки, был создан программный комплекс «SRL-Навигация». При его разработке использовались современные технологии и средства создания программного обеспечения. В частности, широко применялись принципы объектно-ориентированного программирования, использовались паттерны проектирования и технологии распределенных вычислений.

Программный комплекс «SRL-Навигация» представляет собой набор нескольких Windows-приложений; на рис. 5 представлена его структура. Овалами на схеме обозначены блоки данных, а прямоугольниками – программные модули. В виде пятиугольника изображен формат xml-файла с описанием трехмерной сцены. Стрелки показывают направления потоков данных: входящие в программный модуль стрелки показывают, какие данные являются для него входными, а исходящие – выходными.

Исходными данными для моделирования ЭЛИ является электронная карта местности. Специальный конвертер позволяет преобразовать электронную карту в файл описания соответствующей трехмерной сцены (или просто файл сцены). Полученный файл сцены можно загрузить в OpenGL-просмотрщик, который обеспечивает визуализацию трехмерных сцен. В частности, в нем реализовано перемещение наблюдателя и управление источниками освещения. Также файл сцены можно загрузить в приложение «SRL-console», которое позволяет моделировать ЭЛИ построенной сцены и производить на ней статистические

эксперименты по обработке и распознаванию изображений.

В результате моделирования ЭЛИ программным модулем «SRL-console» формируется srli-файл, содержащий это изображение. Этот файл может быть сохранен на диске для дальнейшего использования. В состав «SRL-console» входит просмотрщик гидролокационных изображений, позволяющий визуализировать как только что полученные ЭЛИ, так и сохраненные ранее.

Модуль «SRL-console» является основным в составе программного комплекса «SRL-Навигация»; его логическая структура представлена на рис. 6 (восьмиугольники на схеме обозначают элементы пользовательского интерфейса).

Для заданного гидролокатора формирование траекторного сигнала и его обработка, необходимая для получения ЭЛИ загруженной в «SRL-console» трехмерной сцены, производится при помощи соответствующего моделирующего блока. Для инициализации локационных текстур объектов сцены этот блок обращается к БД ОСП.

В ходе проведения статистического эксперимента модуль, реализующий собственно логику этого эксперимента, обращается к моделирующему блоку; в зависимости от типа эксперимента он обращается либо к блокам выделения точечных особенностей, распознавания точечных изображений, либо к блокам выделения границ. Результаты проведенного

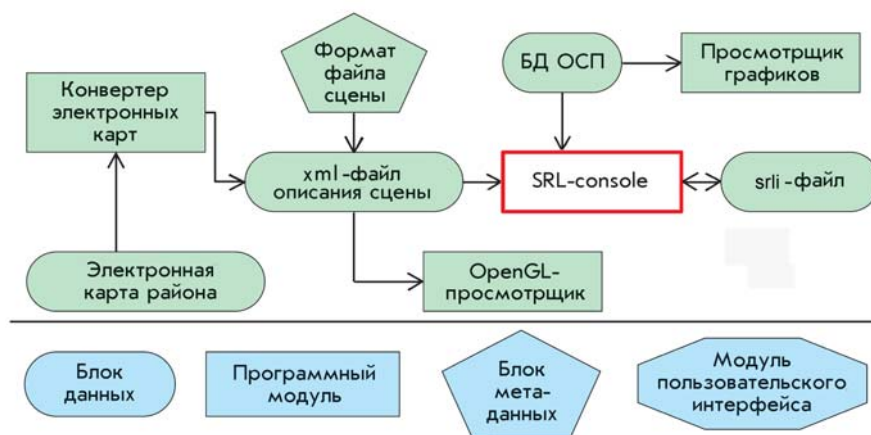


Рис. 5. Структура моделирующего программного комплекса

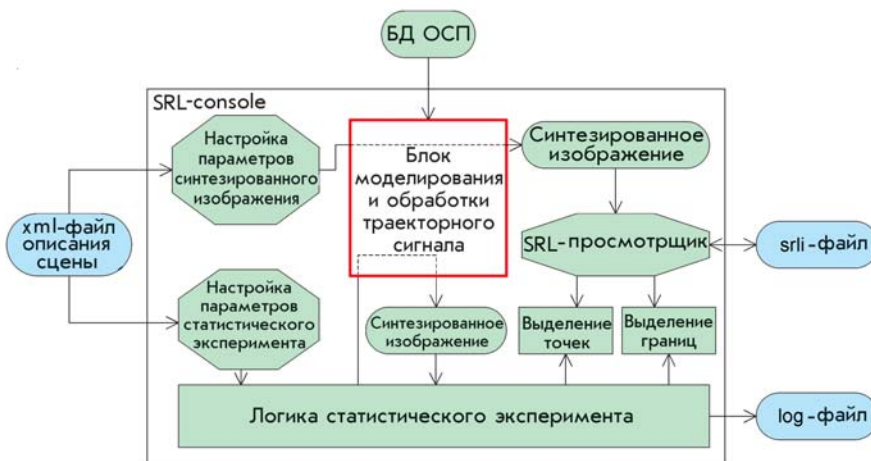


Рис. 6. Архитектура модуля «SRL-console»

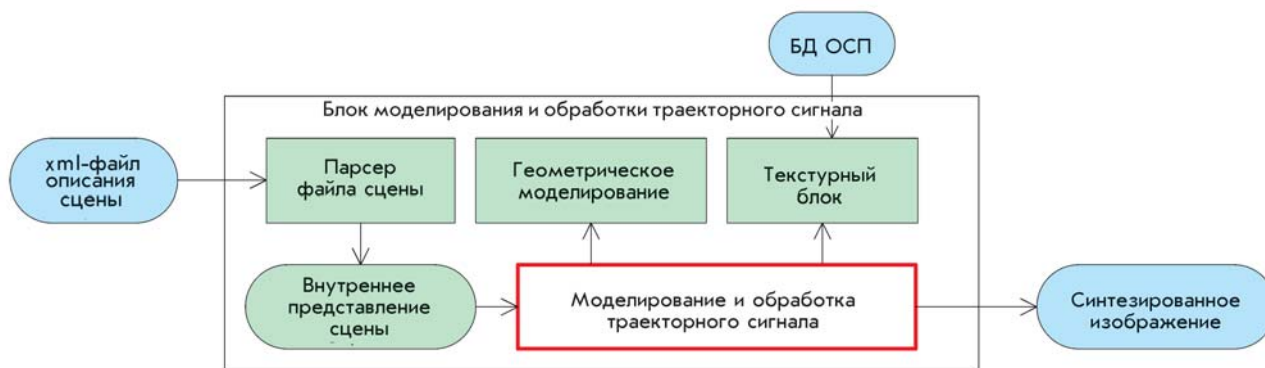


Рис. 7. Архитектура моделирующего блока

статистического эксперимента записываются в файл протокола эксперимента.

Рассмотрим функциональную цепочку (рис. 7), которую реализует блок моделирования и обработки траекторного сигнала, для получения синтезированного ЭЛИ.

На вход моделирующему ЭЛИ блоку подается файл сцены, который содержит всю необходимую информацию для решения этой задачи, и только ее (назовем такой файл сцены заданием). В частности, в этом файле описывается один и только один гидролокатор, для которого требуется получить ЭЛИ, и все параметры этого гидролокатора также указаны в этом файле. Такой подход закладывает основу для использования распределенных вычислений, поскольку позволяет выносить моделирование ЭЛИ за пределы одного процесса. Так, мы можем сформировать задание на одной машине и передать только его на другую для выполнения; при этом никаких дополнительных параметров передавать не требуется – вся необходимая исходная информация уже содержится в задании.

Парсер файла сцены осуществляет разбор xml-файла описания сцены. В частности, он формирует внутреннее иерархическое представление сцены. Далее блок моделирования траекторного сигнала выполняет свою работу, осуществляя

обратную трассировку лучей, моделирование диаграммы направленности антенны гидролокатора и т.д. с учетом заданной модели траекторных нестабильностей носителя. При этом блок, генерирующий траекторный сигнал, позволяет за счет использования одного излучателя и нескольких разнесенных приемников делать это в многоканальном режиме, используя принцип смещенного фазового центра [3].

Выделенный блок геометрического моделирования, необходимый для реализации алгоритма обратной трассировки лучей, отвечает за эффективную реализацию геометрических операций со сценой. В частности, он реализует алгоритм нахождения пересечения лучей с объектами сцены. Логика геометрических операций тесно связана с данными, описывающими внутреннее представление сцены, поэтому в программе представлено одним и теми же объектами (в соответствии с терминологией объектно-ориентированного программирования объект соединяет в себе данные и поведение).

Также на рис. 7 выделяется текстурный блок, который осуществляет моделирование отражательных свойств поверхностей объектов сцены. При моделировании гидролокаторных отражательных

свойств поверхностей (локационных текстур), используемых в процессе формирования траекторного сигнала, этот блок либо обращается к справочнику БД ОСП, либо использует диффузно-зеркальную модель отражения.

На рис. 8 представлена схема обработки траекторного сигнала, в результате выполнения которой строится гидролокаторное изображение подводной сцены.

После того как траекторный сигнал построен, в него вносится помеха, моделирующая шумы приемника, которая представляет собой аддитивный гауссов шум – случайную величину, имеющую нулевое среднее и некоторую заданную дисперсию. Затем происходит синтезирование апертуры гидролокатора в соответствии с описанной выше схемой. При этом ширина носителя опорной функции для синтеза апертуры выбирается с учетом величины дальности для обрабатываемой полосы. А также имитируется «выпрямление» носителя функции размытия точечной цели путем вычисления текущей дальности до фокусируемой точки и использования отсчетов траекторного сигнала, соответствующих вычисленной дальности.

На следующем этапе обработки траекторного сигнала производится автофокусировка. Для этого сначала производится



Рис. 8. Основная часть моделирующего блока

поиск точечного отражателя на изображении с синтезированной апертурой, фаза сигнала которого определяет опорную функцию для автофокусировки. Затем производится свертка сигналов в каждом канале дальности с построенной опорной функцией. Полученный в результате описанной процедуры обработки комплексный сигнал преобразуется в гидролокационное изображение путем взятия модуля значений его отсчетов.

■ Результаты моделирования

В настоящем разделе приводятся полученные при помощи программного комплекса «SRL-Навигация» результаты моделирования и обработки траекторного сигнала гидролокатора бокового обзора. Демонстрируется потенциальная возможность радикального повышения углового разрешения ГБО за счет синтеза апертуры антенны, показывается разрушающее влияние даже незначительных траекторных нестабильностей носителя на синтезированное изображение и демонстрируются возможности метода автофокусировки по борьбе с ними.

Модельная сцена, использованная в вычислительном эксперименте, изображена на рис. 3, б. Она состоит из 5-ти рядов точечных ориентиров, расположенных на плоскости. Расстояние между рядами составляет 5 м; расстояние между ориентирами в одной полоске дальности – 2,5 м. Гидролокатор движется прямолинейно вдоль оси Oy с постоянной скоростью $v = 1$ м/с на высоте 30 м над плоскостью дна. Расстояние от него до центра сцены в горизонтальной плоскости составляет 100 м.

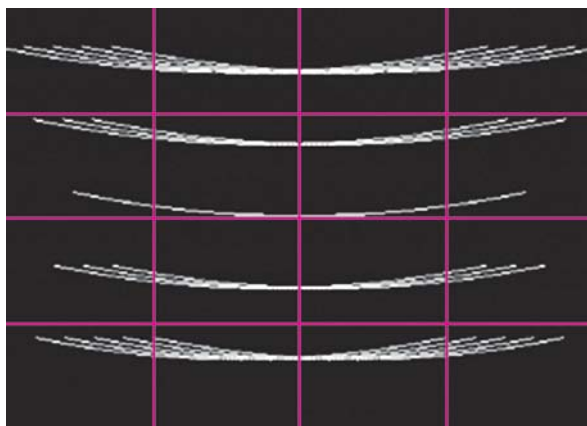
Перечислим основные параметры моделирования траекторного сигнала ГБО: длина волны эхосигнала – 2 см; диапазон дальностей, с которых гидролокатор принимает отклик сцены, – [95,...,125] м; разрешение датчика по дальности – 10 см; период посылки эхосигнала составляет 0,2 с; число каналов приемника – 8. Общее время формирования траекторного сигнала – 50 с (что соответствует 50 м развертке изображения вдоль траектории). Диаграмма направленности антенны гидролокатора моделировалась в виде ступенчатой функции: ее ширина – 20° ; коэффициент усиления

в раскрытии антенны равен 1, а за его пределами – 0.

На рис. 9, а представлен исходный траекторный сигнал без всякой обработки. Видно, что на дальности 100 м изображение точечного ориентира при указанной ширине диаграммы направленности реальной антенны растягивается на 34 м.

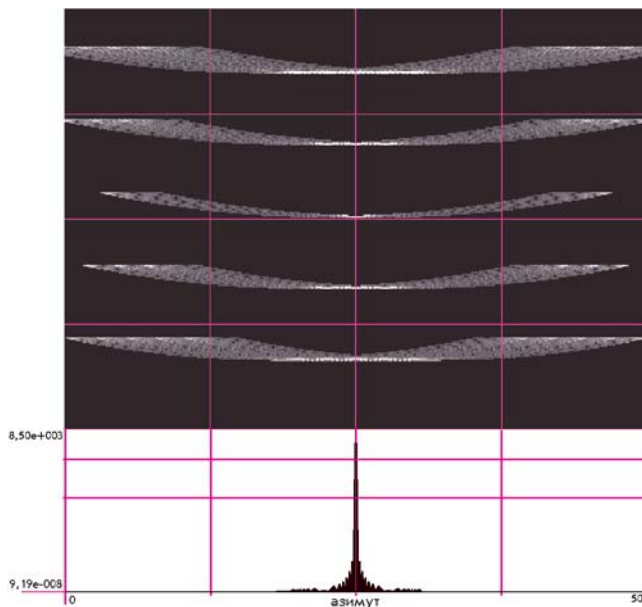
На рис. 9, б представлено изображение, полученное в результате синтеза апертуры антенны гидролокатора в условиях абсолютно точного знания траектории носителя. Время синтеза в среднем канале дальности составляет 5 с (что соответствует интервалу синтеза длиной 5 м). В этих условиях удается добиться практически идеального разрешения гидролокатора по азимуту – ширина пика, соответствующего центральному ориентиру сцены, составляет всего 10–20 см.

Следующий рис. 10 демонстрирует влияние траекторных нестабильностей на синтезированное изображение. Исследуется модель траекторных возмущений в виде бокового сноса, поскольку алгоритм синтеза апертуры наиболее чувствителен к ошибкам именно такого рода [3]. Для этого в реальную координату x гидро-



а

Рис. 9. а – изображение сцены рис. 3,б без синтеза с помощью реальной апертуры; б – синтезирование апертуры в условиях отсутствия траекторных возмущений



б

локатора при формировании траекторного сигнала вносится аддитивная ошибка по закону $x = 0,01 \sin(2\pi t/5)$. То есть вместо прямой гидролокатор движется по синусоиде с амплитудой 1 см и периодом 5 с. В скорость и ускорение возмущения не вносятся. Видно, что даже при таких незначительных отклонениях реального курса гидролокатора от программной траектории, на основе которой производится синтезирование апертуры, на-

блюдается существенное ухудшение азимутального разрешения получаемого ЭЛИ.

На рис. 11 представлен результат работы алгоритма автофокусировки по «испорченному» изображению с рис. 10. Ориентир, по которому строится опорная функция автофокусировки, выделяется в центре изображения при помощи простого порогового алгоритма (в этом направлении еще предстоит работать). Носитель опор-

ной функции автофокусировки в четыре раза уже носителя опорной функции синтезирования апертуры (это отношение подобрано эмпирически). На рисунке видно, что хотя автофокусированное изображение центрального ориентира сцены и далеко от идеального случая синтезирования апертуры, все же соответствующий ориентир пик на изображении выделить можно – разрешение по азимуту повышается.

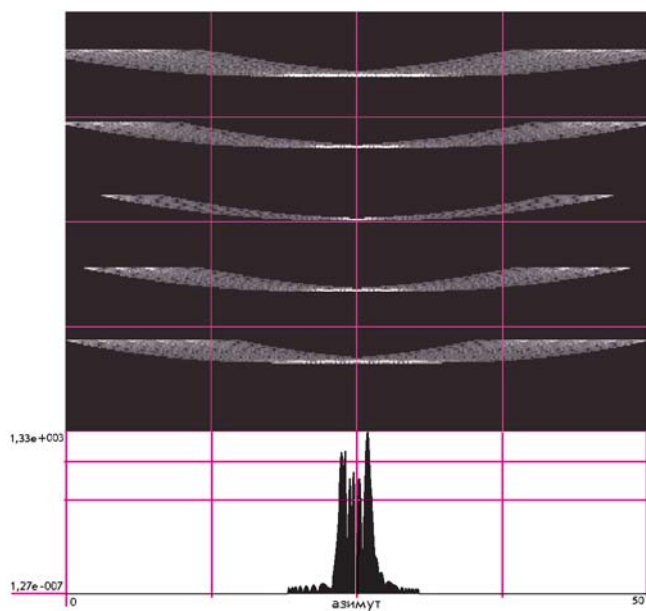


Рис. 10. Влияние траекторных нестабильностей на процесс синтезирования апертуры

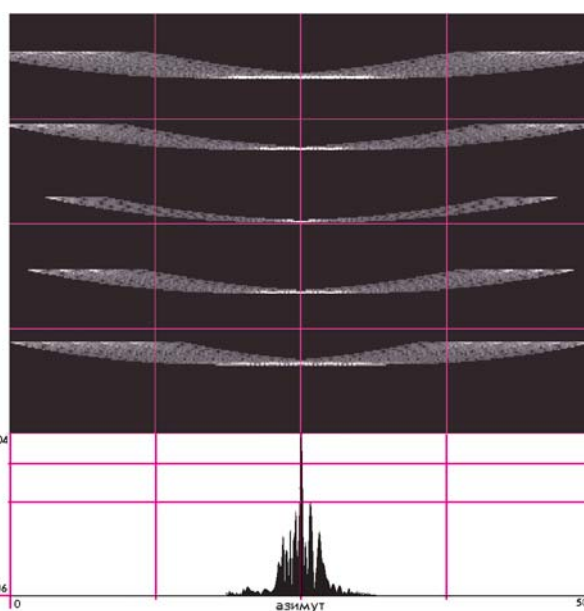


Рис. 11. Результаты компенсации траекторных нестабильностей при помощи автофокусировки

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный в работе метод моделирования траекторного сигнала ГБО является достаточно гибким для исследования различных алгоритмов обработки сигнала и для имитации разнообразных условий формирования обзорных эхолокационных изображений как модельных сцен, так и реальных, взятых с карт подводной обстановки. Разработаны формат и алгоритмические средства представления трехмерной модели местности. Разработан метод описания отражающих характеристик поверхностей и объектов с помощью локационных текстур. Создан моделирующий программный комплекс, в котором предусмотрены возможности параллельного моделирования изображения и положено начало созданию и исследованию алгоритмов обработки траекторного сигнала, а также алгоритмов обнаружения и локализации объектов на синтезированном ГБО-изображении.

В ходе исследования было установлено, что основное влияние на формирование син-

тезированного ЭЛИ оказывают следующие параметры модели: геометрические и отражательные характеристики поверхностей объектов сцены, перераспределения звукового сигнала и фазовые искажения траекторного сигнала. В работе исследованы особенности алгоритма синтеза ЭЛИ и пути компенсации фазовых искажений сигнала из-за траекторных нестабильностей и других факторов. В частности, методом численного эксперимента изучен алгоритм автофокусировки изображения по сигналам точечных отражателей.

В результате проведенного исследования выявилась актуальность следующих направлений работы:

1) развитие модели формирования траекторного сигнала в части построения и программной реализации моделей траекторных нестабильностей, ошибок ИНС, имитации импульсного ЛЧМ-сигнала. При этом должны быть задействованы модель динамики АНПА и адекватные модели подводной обстановки;

2) реализация рассмотренных наиболее перспективных для ГБО алгоритмов обработки траекторного импульсного ЛЧМ-сигнала с целью более детального исследования алгоритмов формирования и компенсации фазовых искажений;

3) исследование методов и разработка алгоритмов распознавания синтезированных ГБО-изображений. Требуется создание устойчивых и эффективных специализированных алгоритмов обнаружения и локализации (точечных, линейных и площадных) объектов на синтезированных изображениях.

Благодарности. Авторы выражают глубокую благодарность коллегам из Института проблем морских технологий ДВО РАН за плодотворные обсуждения, предоставленные исходные данные и гидролокационные изображения. Работа выполнена при финансовой поддержке интеграционного проекта «Исследование фундаментальных проблем создания интеллектуальных подводных роботов для изучения и освоения минеральных, биологических и энергетических ресурсов океана» между учреждениями УрО РАН и ДВО РАН, а также РФФИ (грант № 06-01-00229).

ЛИТЕРАТУРА

1. Автономные подводные роботы: системы и технологии / М.Д. Агеев, Л.В. Киселев, Ю.В. Матвиенко и др.; под общ. ред. М.Д. Агеева. М.: Наука, 2005. 398 с.
2. Золотарев В.В. Гидролокаторы с синтезированной апертурой для автономного подводного робота // Подводные исследования и робототехника. 2007. № 1(3). С. 12–20.
3. Bonifant W.W.Jr. Interferometric Synthetic Aperture Sonar Processing: a thesis presented to the Academic Faculty In Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Master of Science in Electrical Engineering. Georgia Inst. of Tech. 1999.
4. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли: учеб. пособие для вузов / под ред. Г.С. Кондратенкова. М.: Радиотехника, 2005. 368 с.
5. Костоусов А.В., Костоусов В.Б. Моделирование гидролокатора бокового обзора с синтезированной апертурой // Материалы IV Междунар. симпоз. «Обобщенные решения в задачах управления». Улан-Уде: Изд-во Бурят. госун-та, 2008. С. 74–76.
6. Костоусов А.В., Костоусов В.Б. Распределенные вычисления и моделирование процесса навигации по радиолокационным изображениям // Автоматика и телемеханика. 2007. № 5. С. 97–111.
7. Золотарев В.В., Щербатюк А.Ф. Моделирование работы гидролокатора секторного обзора автономного подводного робота // Морские технологии. Владивосток: Дальнаука, 2000. Вып. 3. С. 92–101.