

На правах рукописи



Мархакшинов Аюр Лувсаншаравович

**ОЦЕНКА ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ  
В СЕЙСМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ ОХРАНЫ**

Специальность 05.13.17 – Теоретические основы информатики

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Новосибирск – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет»

Научный руководитель: **Спектор Александр Аншелевич**  
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Нежевенко Евгений Семенович**  
доктор технических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт автоматизации и электротехники Сибирского отделения Российской академии наук», ведущий научный сотрудник лаборатории информационной оптики

**Носов Владимир Иванович**  
доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики», заведующий кафедрой систем радиосвязи

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск

Защита состоится «14» февраля 2013 г. в 14-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.06 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630092, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета.

Автореферат разослан «\_\_» января 2013 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Чубич Владимир Михайлович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность исследования.** В настоящее время для обеспечения безопасности протяженных рубежей широко используются периметровые средства обнаружения (СО), построенные на различных физических принципах: инфракрасные, виброакустические, магнитометрические, емкостные, сейсмические и другие типы систем. Фактически периметровыми СО осуществляется мониторинг области пространства вдоль рубежа по некоторому физическому параметру (полю), и в случае выхода параметра за допустимые пределы выдается сигнал тревоги, поступающий на систему сбора и обработки информации.

По принципу действия СО принято разделять на две группы: активные и пассивные. Активные формируют вдоль охраняемого рубежа поле определенной природы, которое ими же и контролируется. Пассивные контролируют существующее физическое поле (колебания среды, грунта, магнитное поле Земли), параметры которого в общем случае случайны, не излучая при этом энергию в окружающее пространство. Рассматриваемые в диссертации сейсмические периметровые системы относятся к пассивным СО. В системах такого типа с помощью сейсмочувствительных элементов колебания грунта преобразуются в электрические сигналы, которые затем подвергаются дальнейшей обработке. В результате могут решаться задачи обнаружения сейсмоактивных объектов, их классификации и трассировки (определение параметров движения объекта).

Если повышение тактико-технических характеристик (ТТХ) активных СО достигается чаще всего за счет повышения мощности излучения, применения более совершенных корреляционных приемников, фильтров и т.д. – то есть технологическим путем, то в пассивных СО наиболее перспективным считается путь усложнения используемых методов обработки сигналов. Разумеется, нельзя пренебрегать такими направлениями как разработка чувствительных элементов с увеличенной информативностью, поиск инженерных методов повышения надежности СО (например, рытье «шунтирующих» канав вдоль зоны обнаружения, выбор оптимальной конфигурации размещения датчиков при монтаже и др.). Тем не менее, создание эффективных алгоритмов обработки данных все же является приоритетной задачей при второстепенности других способов развития как пассивных СО в целом, так и сейсмических периметровых систем в частности.

Среди решаемых в сейсмических системах охраны (ССО) задач можно выделить задачу определения местоположения нарушителя и анализа его траектории. При схожести рассматриваемой задачи с задачами радиолокации и

радионавигации особенности среды распространения сейсмических сигналов (неоднородность грунта, широкий разброс скоростей распространения волн, нестационарность принимаемых сигналов) приводят к низкой эффективности радиолокационных методов определения координат и необходимости создания специализированных алгоритмов для решения имеющейся проблемы. Кроме того, данная задача, во-первых, может быть решена не во всех разновидностях ССО, во-вторых, этому вопросу разработчиками уделяется гораздо меньше внимания по сравнению с вопросами обнаружения и классификации сейсмоактивных объектов.

Вместе с тем, задача оценки траектории представляется весьма значимой, так как при контроле обстановки на периметрах значительной протяженности (например, на пограничных рубежах) информация, позволяющая локализовать место вторжения и определить направление и скорость движения нарушителя, несомненно окажется полезной для оперативной организации реагирования сил охраны и своевременного пресечения возможных несанкционированных действий.

Кроме кафедры теоретических основ радиотехники НГТУ научные разработки в области ССО проводятся как зарубежными (J. Wen, I.A. Thanasopoulos, L. Peck, J.P. Diaz, M.A. Borkar), так и российскими исследователями (С.С. Звездинский, А.А. Вольсков, В.А. Дудкин, Г.К. Чистова, В.А. Иванов, Н.В. Прокина, Е.С. Нежевенко). В доступных публикациях по данной тематике авторы, как правило, ограничиваются обсуждением задач пеленгации или определения локального местоположения объекта, не затрагивая вопросы траекторного анализа. Во многих работах зачастую отсутствует статистический подход к оценке эффективности предлагаемых решений, не всегда во внимание принимаются практические требования к быстродействию алгоритмов обработки информации и к затрачиваемым ими вычислительным ресурсам, а также разнообразие условий, в которых регистрируются реальные сейсмические сигналы (например, широкий диапазон возможных значений отношения сигнал/шум).

**Целью диссертационной работы** является разработка алгоритма оценивания параметров движения человека, учитывающего ограниченные вычислительные возможности ССО. В соответствии с поставленной целью решались **задачи** разработки модели движения нарушителя, анализа характеристик распределения получаемых сейсмолокационных наблюдений, исследования точности разработанного алгоритма.

Сложность процесса сигналообразования в сейсмической среде и обилие помех различного происхождения обуславливают случайность регистрируемых в ССО сигналов и вероятностный характер решаемых задач. В связи с этим

**методы исследования** опирались на теорию вероятностей, математическую статистику, статистическую радиолокацию. Использовались теория оптимальной фильтрации параметров сигналов, метод получения оценок максимального правдоподобия (МП). При исследовании алгоритма в среде Matlab применялись методы статистического моделирования.

**Научная новизна работы.** Впервые решена статистическая задача траекторного анализа для ССО с помощью разработанного алгоритма оценки параметров движения человека. Исследована точность созданного алгоритма. Впервые изучены свойства реальных сейсмолокационных наблюдений, что позволило выявить негауссовский характер их распределения и зависимость параметров распределения от местоположения объекта.

**Достоверность результатов** подтверждается адекватностью применявшегося математического аппарата, согласованностью результатов моделирования и экспериментальных исследований.

**Личный вклад автора.** С помощью статистического моделирования выполнено исследование точности алгоритма трассировки, основанного на модели равномерного прямолинейного движения в локальной области и использующего допущение о нормальном распределении сейсмолокационных наблюдений с постоянными характеристиками. Автор принимал участие в натуральных экспериментах, им получены результаты практических испытаний по исследованию точности указанного алгоритма.

По результатам моделирования и натуральных экспериментов выполнен анализ распределения сейсмолокационных наблюдений. Автором установлено, что распределение наблюдений может быть описано точнее с применением бета-закона с характеристиками, зависящими от параметров траектории.

Также автором разработан и исследован с помощью статистического моделирования алгоритм трассировки, позволяющий учесть негауссовский характер распределения наблюдений и зависимость его параметров от местоположения объекта.

**Практическая ценность и внедрение результатов.** Научные и практические результаты выполненного исследования были применены в хозяйственных научно-исследовательских работах, проводившихся в 2010-2012 годах на кафедре теоретических основ радиотехники НГТУ. Соответствующим актом внедрения подтверждается, что результаты работы использованы при модернизации ССО «Азимут-1» – изделия, серийно выпускаемого ФГУП ПО «Север» (г. Новосибирск). Разработанный алгоритм оценки параметров движения позволил повысить точность трассировки и значительно ускорить темп обновления информации об отслеживаемой траектории.

**Основные положения, выносимые на защиту.** На защиту выносятся:

- алгоритм МП-оценивания параметров траектории человека, использующий модель равномерного прямолинейного движения при допущении о нормальном распределении сейсмолокационных наблюдений с постоянными характеристиками;
- алгоритм МП-оценивания параметров траектории человека, использующий модель равномерного прямолинейного движения при негауссовском распределении сейсмолокационных наблюдений с характеристиками, зависящими от местоположения объекта;
- результаты анализа точности разработанных алгоритмов.

**Апробация работы.** Результаты работы обсуждались на 2 всероссийских конференциях (Всероссийская научная конференция молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации», г. Новосибирск, НГТУ, 2009, 2010 гг.) и на Международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» (г. Новосибирск, НГТУ, 2010).

**Публикации.** По теме исследования имеется 7 публикаций, из них 3 – статьи в изданиях, внесенных в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук; 1 – статья в сборнике научных трудов; 3 – в материалах трудов всероссийских и международных конференций.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Объем работы составляет 160 страниц основного текста, включая 104 рисунка, 1 таблицу и список литературы из 60 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследования, показаны научная новизна и практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту положения.

В **первой главе** приведены основные сведения о ССО, рассматриваются особенности периметровых систем данного типа, обсуждаются задачи и методы определения местоположения и параметров движения объектов в ССО. Отмечено, что возможности ССО различаются в зависимости от типа используемого чувствительного элемента (точечные датчики либо распределенные кабельные преобразователи). В частности, исследуемая задача траекторного анализа может быть решена только в ССО, располагающих набором точечных датчиков.

Для определения координат текущего местоположения объекта в ССО могут использоваться известные в пассивной радиолокации методы (например, разностно-дальномерный), но при этом результатам измерений в силу специфики сейсмической среды свойственна крайне низкая точность. Из радиолокации также известно, что изменение координат подвижных объектов в общем случае описывается случайными функциями времени, что связано с воздействием на них различных возмущений и возможными маневрами. Поэтому определение текущего местоположения подвижных объектов осуществляется методами теории фильтрации. Согласно этим методам, для успешного синтеза алгоритмов фильтрации необходимо располагать сведениями о возможном поведении цели, в данном случае моделью движения объекта.

В зависимости от выбранной модели движения определяется набор параметров, используемых для описания траектории объекта. Таким образом, рассматриваемая задача заключается в том, чтобы на основании заданной модели движения и известного уравнения измерений, устанавливающего связь между наблюдаемыми координатами и параметрами траектории, построить оптимальную оценку вектора искомых параметров.

С учетом относительно несложного характера движения отслеживаемых в ССО объектов и, как правило, небольших интервалов наблюдения, будем считать оцениваемые параметры неизвестными константами. В таких условиях для получения оценок используется критерий максимального правдоподобия.

**Вторая глава** посвящена синтезу и предварительному анализу алгоритма трассировки с помощью статистического моделирования.

В ССО «Азимут-1» датчики-геофоны размещаются на антенных кабелях, которые затем прокладываются попарно вдоль контролируемого периметра. Укладка антенн в грунт выполняется так, чтобы в результате датчики располагались в шахматном порядке, образуя ряд треугольников. Информации, регистрируемой тремя датчиками, достаточно для определения местоположения объекта, поэтому далее такие тройки сейсмоприемников будем называть навигационными треугольниками. Расстояние между датчиками в треугольниках зависит от особенностей охраняемой территории и обычно составляет 5...10 м.

Как показывает практика, специфика задачи контроля обстановки на протяженных рубежах такова, что наиболее часто встречающийся тип тревожной ситуации, связанной с человеком – пересечение нарушителем или группой нарушителей линии антенн в поперечном направлении. В таких случаях оценка траектории объекта обычно выполняется на базе одного-двух навигационных треугольников. При этом чувствительность датчиков позволяет

отслеживать обнаруженный объект в зоне диаметром около 30...40 м, в зависимости от условий функционирования системы.

Исходя из вышесказанного, при разработке алгоритма трассировки была принята модель равномерного прямолинейного движения на локальном участке, размеры которого соизмеримы с зоной действия одного навигационного треугольника. Способ отслеживания объекта на больших дистанциях с использованием данной модели представлен в четвертой главе, далее же обсуждается трассировка в локальной области.

На рис. 1 изображен проход через треугольник, состоящий из датчиков 1-2-3. Точки на траектории движения представляют собой местоположения объекта в моменты выполнения

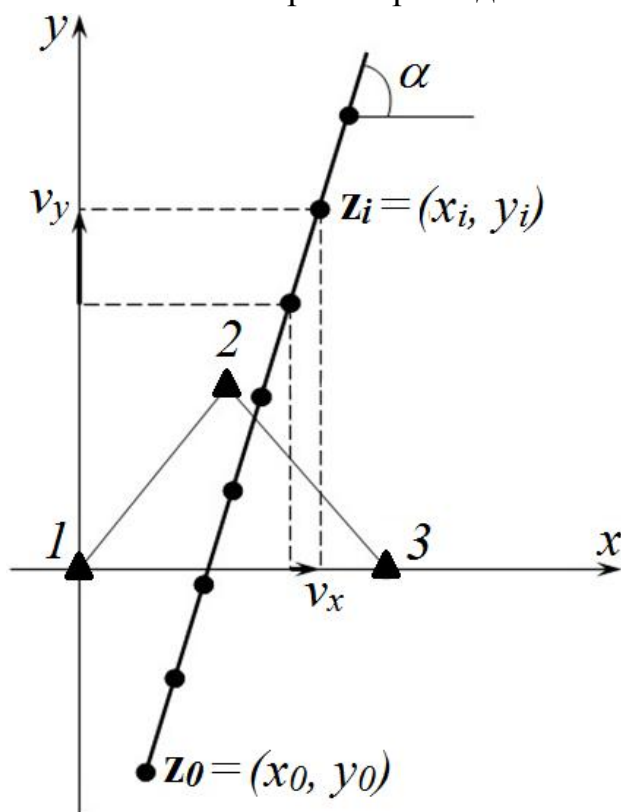


Рис. 1. Модель движения

первичных измерений при условии, что измерения производятся через равные промежутки времени  $\delta t$ . Согласно выбранной модели, для построения трассы необходимо знать координаты начальной точки  $\mathbf{z}_0 = \|x_0, y_0\|^T$ , соответствующей моменту обнаружения объекта датчиками треугольника ( $T$  – символ транспонирования), и вектор  $\mathbf{V} = \|v_x, v_y\|^T$ , компоненты которого характеризуют перемещение объекта вдоль декартовых осей за отрезок времени между измерениями.

Очевидно, что координаты местоположения объекта в момент

$i$ -го измерения записываются в следующем виде:

$$\mathbf{z}_i = \mathbf{z}_0 + i\mathbf{V} = \begin{cases} x_i = x_0 + i \cdot v_x, \\ y_i = y_0 + i \cdot v_y. \end{cases} \quad (1)$$

Для определения координат объекта  $\mathbf{z}_i = \|x_i, y_i\|^T$  можно воспользоваться разностно-дальномерным методом (РДМ), при котором измеряются разности между моментами поступления сигнала источника  $t_i$  на разнесенные точки приема. Следовательно, навигационными параметрами в данном случае будут являться разности задержек распространения сейсмических импульсов:



$$\Delta t_i^{(k,r)} = t_i^{(k)} - t_i^{(r)} = \frac{1}{c} (\sqrt{(x^{(k)} - x_i)^2 + (y^{(k)} - y_i)^2} - \sqrt{(x^{(r)} - x_i)^2 + (y^{(r)} - y_i)^2}), \quad (2)$$

$$k, r = 1, 2, 3; \quad k \neq r,$$

где  $c$  – скорость распространения сейсмической волны, подлежащая измерению при монтаже ССО;  $\|x^{(k)}, y^{(k)}\|^T$  – декартовы координаты  $k$ -го датчика.

Измерение разностей  $\Delta t_i^{(k,r)}$  осуществляется корреляционным методом, при котором в окне определенной длительности вычисляется взаимная корреляционная функция (ВКФ) сигналов с соседних датчиков. Положение максимума ВКФ принимается в качестве оценки  $\Delta t_i^{*(k,r)}$ . Размер окна для вычисления ВКФ принят равным длительности одного кадра, используемого при передаче данных в ССО «Азимут-1», и составляет 1000 отсчетов или 1,675 с (частота дискретизации – 597 Гц). Таким образом, временной промежуток между первичными измерениями  $\delta t = 1,675$  с.

Стоит отметить, что в сейсмической локации в силу значительного затухания и искажения формы полезных сигналов при прохождении через грунт и присутствия коррелированной фоновой составляющей применение корреляционного метода без предварительной обработки сигналов может привести к результатам крайне низкой точности. Поэтому при первичных измерениях предложено проводить адаптивное выбеливание (декорреляцию) регистрируемых сигналов с их последующим преобразованием по правилу:

$$u_p(i) = \frac{1}{\Delta} \sqrt{\sum_{l=i}^{i+\Delta} u_w^2(l)}. \quad (3)$$

Согласно (3) сигнал  $u_p$  образуется на основании оценки текущей мощности выбеленного сигнала  $u_w$  в скользящем окне длиной  $\Delta$  отсчетов. Использование сигналов  $u_p$  позволяет осуществлять корреляционное измерение разностей  $\Delta t_i^{*(k,r)}$  даже при наличии интенсивного сейсмического фона. Для наглядности фрагменты пары сигналов с соседних датчиков треугольника показаны на рис. 2.

Решение систем уравнений вида (2) для получения оценок координат объекта  $\mathbf{z}_i^* = \|x_i^*, y_i^*\|^T$  на основании значений  $\Delta t_i^{*(k,r)}$  при каждом измерении не представляется целесообразным из-за нелинейности уравнений и возможности отсутствия аналитических результатов, обусловленной ошибками измерений. Для упрощения процедуры нахождения оценок  $\mathbf{z}_i^*$  в ССО «Азимут-1» используется табличный метод решения данной задачи.

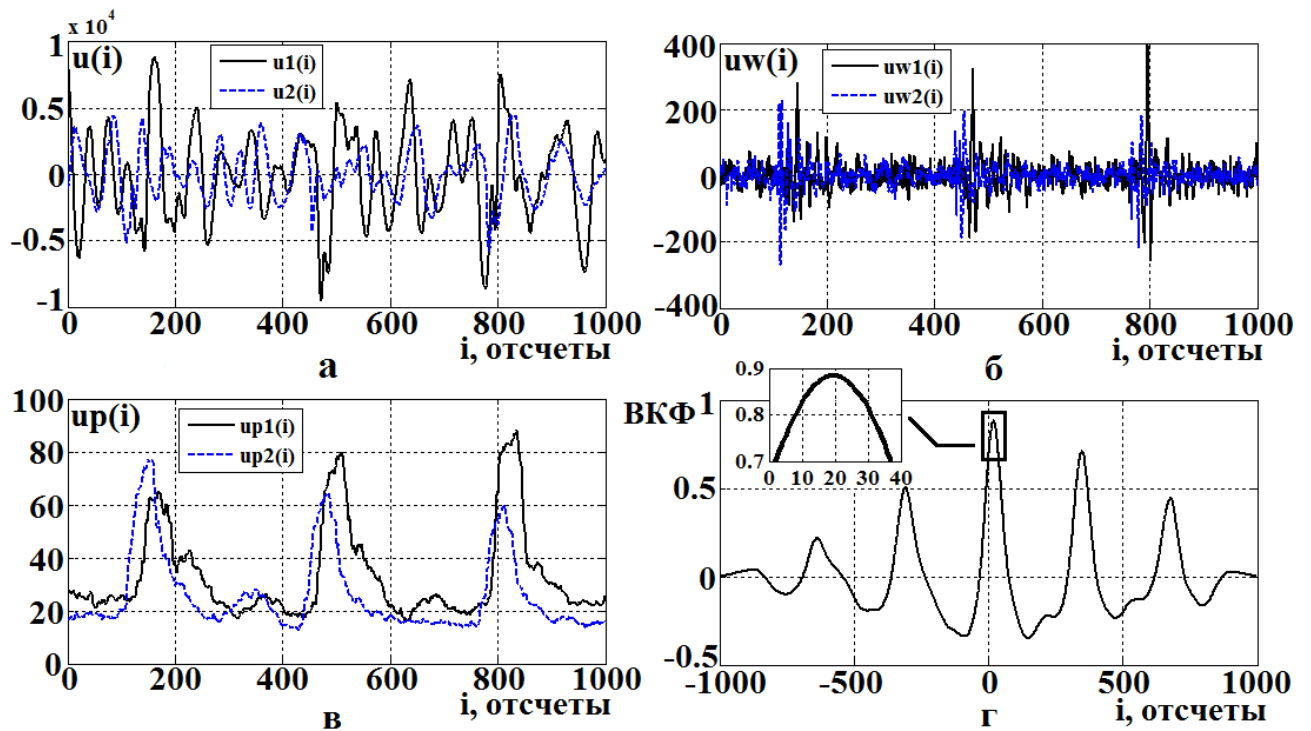


Рис. 2. Осциллограммы: *a* – сейсмические сигналы; *б* – выделенные сигналы; *в* – преобразованные сигналы; *г* – ВКФ преобразованных сигналов

Данный метод предполагает построение в привязанной к навигационному треугольнику локальной системе координат равномерной сетки,

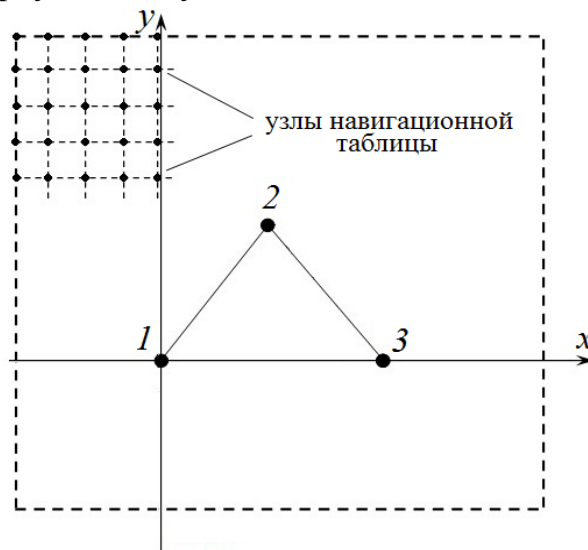


Рис. 3. Табличный метод

покрывающей зону действия датчиков (рис. 3). Шаг сетки может варьироваться и на практике лежит в пределах 0,5...1 м. Для каждого из узлов с известными координатами по формуле (2) рассчитываются значения разностей задержек  $\Delta t^{(1,2)}$ ,  $\Delta t^{(1,3)}$ ,  $\Delta t^{(2,3)}$ . В итоге образуется матрица, заполненная векторными элементами из трех чисел  $\Delta t_{m,n}^{(1,2)}$ ,  $\Delta t_{m,n}^{(1,3)}$ ,  $\Delta t_{m,n}^{(2,3)}$ , где  $m$  и  $n$  – индексы соответствующего узла. В процессе трассировки происходит обращение к навигационной таблице с последующим выбором элемента, который в минимальной степени отличается от вектора имеющихся измерений  $\Delta t_i^{*(k,r)}$ . Координаты выбранного узла принимаются в качестве оценок координат объекта  $\mathbf{z}_i^*$ .

Итак, входными наблюдениями являются оценки текущих координат  $\mathbf{z}_i^*$ , образуемые на каждом шаге в результате табличного решения системы РДМ-

уравнений. Случайным величинам ошибок измерений разностей задержек  $\Delta t_i^{*(k,r)}$  обычно присущ нормальный характер распределения вероятностей. С учетом возможной линеаризации (2) для наблюдений  $\mathbf{z}_i^*$  также примем нормальное распределение.

Для описания входных данных, имеющих на  $i$ -м шаге, введем вектор  $\mathbf{Z}_i^*$ , состоящий из элементов:

$$\mathbf{z}_j^* = \left\| x_j^*, y_j^* \right\|^T, \quad j = \overline{0, i},$$

полученных путем описанных измерений. Модель наблюдаемых координат:

$$\mathbf{z}_j^* = \begin{cases} x_j^* = x_0 + j \cdot v_x + \xi_j^x \\ y_j^* = y_0 + j \cdot v_y + \xi_j^y \end{cases},$$

где  $\xi_j^x, \xi_j^y$  – ошибки определения координат, распределенные по нормальному закону. Промежуток времени  $\delta t$  между локальными измерениями существенно превышает интервал корреляции сигналов и помех, регистрируемых датчиками, следовательно, наблюдения можно считать независимыми. Тогда многомерное распределение оценок координат может быть записано в виде произведения:

$$w(\mathbf{Z}_i^* | \mathbf{z}_0, \mathbf{V}) = \prod_{j=0}^i w(\mathbf{z}_j^* | \mathbf{z}_0, \mathbf{V}), \quad \mathbf{Z}_i^* = (\mathbf{z}_0^*, \mathbf{z}_1^*, \dots, \mathbf{z}_i^*)^T, \quad (4)$$

где

$$w(\mathbf{z}_j^* | \mathbf{z}_0, \mathbf{V}) = \frac{1}{2\pi |\mathbf{K}_j|} \exp \left\{ -\frac{1}{2} (\mathbf{z}_j^* - \mathbf{z}_0 - j\mathbf{V})^T \mathbf{K}_j^{-1} (\mathbf{z}_j^* - \mathbf{z}_0 - j\mathbf{V}) \right\} \quad (5)$$

– распределение локальных измеренных значений координат на  $j$ -м шаге. Здесь  $\mathbf{K}_j$  – корреляционная матрица одношаговых ошибок оценки  $\mathbf{z}_j^*$ , имеющая вид:

$$\mathbf{K}_j = \left\| \begin{array}{cc} \sigma_x^{2(j)} & \sigma_x^{(j)} \sigma_y^{(j)} \rho_{xy}^{(j)} \\ \sigma_x^{(j)} \sigma_y^{(j)} \rho_{xy}^{(j)} & \sigma_y^{2(j)} \end{array} \right\|,$$

где  $\sigma_x^{2(j)}, \sigma_y^{2(j)}$  – дисперсии ошибок измерения соответствующих координат объекта;  $\rho_{xy}^{(j)}$  – коэффициент корреляции оценок абсциссы и ординаты.

Для нахождения оценок параметров  $\mathbf{z}_0$  и  $\mathbf{V}$  по совокупности имеющихся наблюдений  $\mathbf{Z}_i^*$  запишем логарифм функции правдоподобия, подлежащий максимизации:

$$L_i(\mathbf{z}_0, \mathbf{V}) = \ln(w(\mathbf{Z}_i^* | \mathbf{z}_0, \mathbf{V})) = \sum_{j=0}^i (\mathbf{z}_j^* - \mathbf{z}_0 - j\mathbf{V})^T \mathbf{K}_j^{-1} (\mathbf{z}_j^* - \mathbf{z}_0 - j\mathbf{V}). \quad (6)$$

МП-оценки выводятся из решения системы уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial L_i(\mathbf{z}_0, \mathbf{V})}{\partial \mathbf{z}_0} = 0, \\ \frac{\partial L_i(\mathbf{z}_0, \mathbf{V})}{\partial \mathbf{V}} = 0. \end{cases} \quad (7)$$

Итоговые выражения оценок искомых параметров имеют вид:

$$\hat{\mathbf{z}}_{0i} = \frac{2(2i+1)f_1(\mathbf{Z}_i^*) - 6f_2(\mathbf{Z}_i^*)}{(i+1)(i+2)}, \quad (8)$$

$$\hat{\mathbf{V}}_i = \frac{12f_2(\mathbf{Z}_i^*) - 6if_1(\mathbf{Z}_i^*)}{i(i+1)(i+2)}. \quad (9)$$

В приведенных соотношениях  $f_1(\mathbf{Z}_i^*)$  и  $f_2(\mathbf{Z}_i^*)$  представляют собой достаточные статистики, вычисляемые рекуррентным образом:

$$\begin{cases} f_1(\mathbf{Z}_i^*) = \sum_{j=0}^i (\mathbf{z}_j^*)^T = f_1(\mathbf{Z}_{i-1}^*) + \mathbf{z}_i^*, \\ f_2(\mathbf{Z}_i^*) = \sum_{j=1}^i j(\mathbf{z}_j^*)^T = f_2(\mathbf{Z}_{i-1}^*) + i\mathbf{z}_i^*. \end{cases} \quad (10)$$

При выводе (8) и (9) для упрощения результата было принято допущение о постоянстве корреляционной матрицы для любого  $j$ , т.е.  $\mathbf{K}_j \equiv \mathbf{K}$ . С точки зрения рассматриваемой задачи это означает, что принимается допущение о постоянстве свойств распределения ошибок локальных измерений координат объекта в зоне действия навигационного треугольника. В действительности же элементы корреляционной матрицы зависят от номера шага  $j$ , а точнее от истинного местоположения объекта на  $j$ -м шаге  $\mathbf{z}_j$ . Ввод указанного допущения обосновывается независимостью полученных выражений для вычисления оценок от конкретного вида  $\mathbf{K}$  и простотой алгоритма трассировки, что оказывается важным достоинством при его реализации. Нахождение корреляционной матрицы на практике является весьма трудоемкой задачей, причем на результат заметное влияние оказывают сезонные условия, свойства грунта и ряд других факторов. Это приводит к отсутствию реальных сведений о корреляционной матрице и необходимости подобных упрощений. Последствия допущения о постоянном характере параметров распределения наблюдений рассмотрены в третьей главе.

Отметим, что соотношения (8) и (9) являются точным решением уравнения МП в условиях допущений, принятых относительно вида корреляционной матрицы и распределения помех, и обладают свойствами несмещенности и эффективности.

Предварительный анализ точности алгоритма выполнялся методом статистического моделирования в среде Matlab. В ходе моделирования имитировалось пересечение человеком зоны действия навигационного треугольника. При этом считалось, что первичные измерения осуществляются для каждого шага объекта. Период шагов объекта в процессе экспериментов и, следовательно, интервал времени  $\delta t$  между поступлением имитированных локальных измерений были выбраны равными 0,6 с. Количество наблюдаемых шагов  $I = 24$ . Объем статистического эксперимента, т.е. количество симуляций прохода человека по заданной траектории, составил  $N = 10000$ .

Датчики треугольника разносились на расстояние  $d = 7$  м. Скорость сейсмической волны  $c$ , которая в действительности зависит от свойств грунта и сезонных условий (по имеющимся экспериментальным данным скорость волны колеблется в пределах около 90...250 м/с), была принята равной 160 м/с. Модель измеряемых разностей задержек:

$$\Delta t_i^{*(k,r)} = \Delta t_i^{(k,r)} + \zeta_i^{(k,r)}, \quad (11)$$

где  $\Delta t_i^{(k,r)}$  – истинные значения разностей временных задержек, рассчитываемые при известных координатах датчиков и местоположения объекта по формуле (2);  $\zeta_i^{(k,r)}$  – аддитивные гауссовские ошибки измерения с нулевым средним и среднеквадратическим отклонением задававшимся как:

$$\sigma = q \cdot \Delta t_{\max}, \quad \Delta t_{\max} = \frac{d}{c} = \frac{7}{160} = 0,04375 \text{ с.}$$

Здесь  $q$  – параметр, позволяющий имитировать различные уровни помех при первичных измерениях;  $\Delta t_{\max}$  – максимально возможная разность задержек. В экспериментах параметр  $q$  принимал четыре значения: 0,03; 0,05; 0,07; 0,1.

По смоделированным разностям  $\Delta t_i^{*(k,r)}$  с помощью табличного метода оценивались координаты местоположения объекта  $\mathbf{z}_i^* = \left\| \begin{matrix} x_i^* \\ y_i^* \end{matrix} \right\|^T$ , затем, согласно (8) и (9), формировались оценки параметров траектории  $\hat{\mathbf{z}}_{0i}$  и  $\hat{\mathbf{V}}_i$ . Применялась навигационная сетка размером 40×40 м, расстояние между узлами составляло 0,5 м.

Далее для количественного анализа точности используются среднеквадратические ошибки оценивания координат начальной точки траектории, скорости  $v$  и угла движения  $\alpha \left( v = \frac{1}{\delta t} \sqrt{v_x^2 + v_y^2}, \quad \alpha = \arctg \left[ \frac{v_y}{v_x} \right] \right)$  на  $i$ -м шаге. Эти среднеквадратические ошибки обозначены как  $\sigma_{x_0}$ ,  $\sigma_{y_0}$ ,  $\sigma_v$  и  $\sigma_\alpha$  соответственно.

На рис. 4 представлены результаты моделирования для поперечного прохода со следующими исходными параметрами: скорость движения  $v = 1,8$  м/с; угол движения  $\alpha = 90^\circ$ .

Приведенные зависимости подтверждают факт увеличения точности оценок параметров траектории по мере поступления новых наблюдений  $z_i^*$ . Видно, что качество наблюдений влияет на точность работы алгоритма лишь на начальных этапах. Причем образуемым в это время оценкам свойственно невысокое качество. Однако, при накоплении некоторого количества входных данных – судя по графикам, около 7...12 локальных оценок – точность трассировки повышается до уровня, удовлетворяющего практическим требованиям.

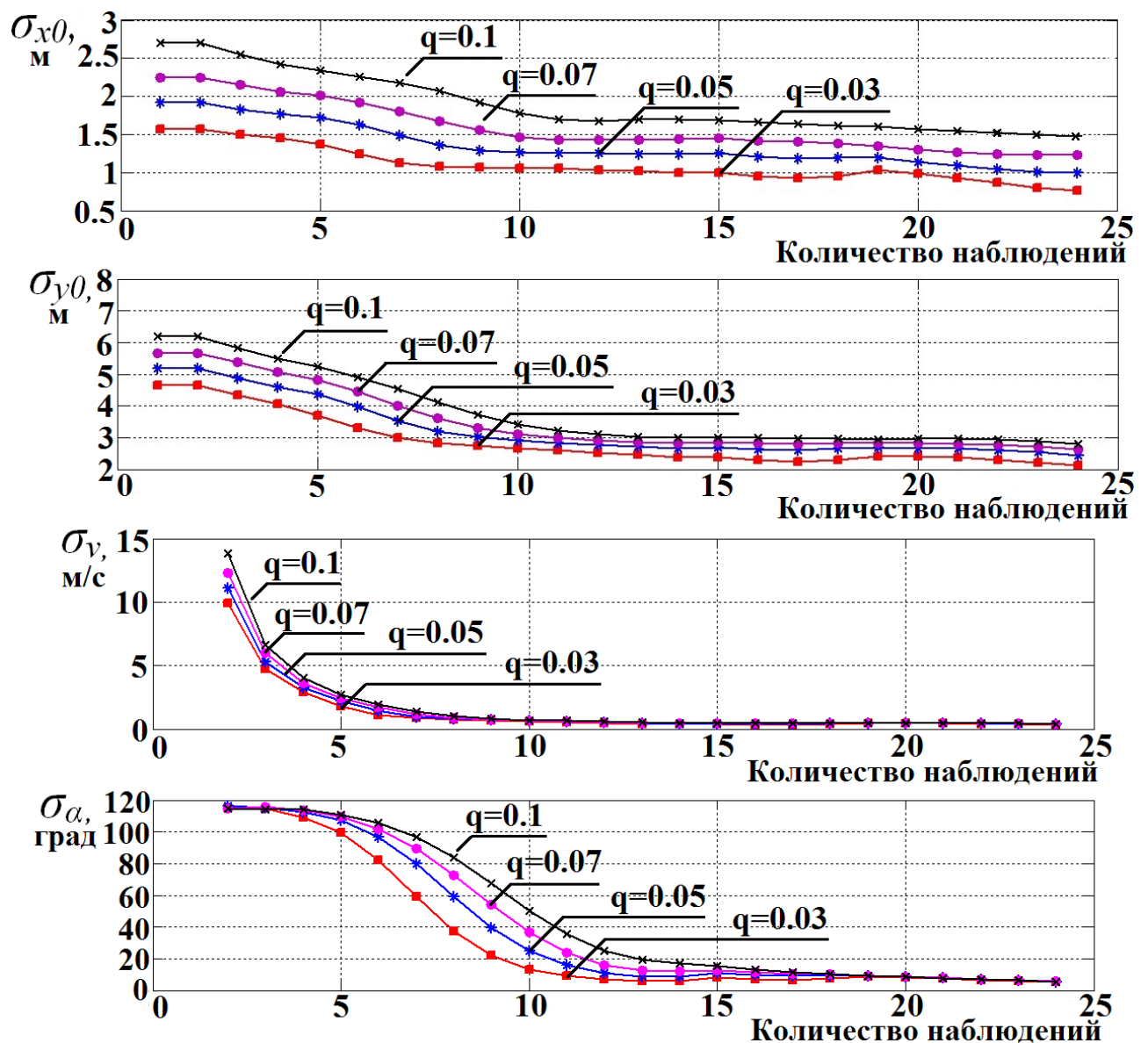


Рис. 4. Зависимость показателей точности от количества наблюдений (моделирование)

С помощью моделирования также исследовалось влияние дискретного характера наблюдений  $\mathbf{z}_i^*$ , получаемых с помощью табличного метода, на точность трассировки. Эксперименты воспроизводились для постоянных значений  $q$  при трех различных значениях шага навигационной сетки  $h$  ( $h = 1$  м,  $h = 0,5$  м,  $h = 0,1$  м). Выигрыш, наблюдаемый при использовании максимально подробно составленной навигационной таблицы, незначителен с практической точки зрения ( $\sim 5...7$  градусов), поэтому для экономии вычислительных ресурсов ССО величина шага сетки  $h$  может выбираться равной  $0,5...1$  м.

В третьей главе по результатам моделирования и натурных экспериментов выполнен анализ распределения входных наблюдений.

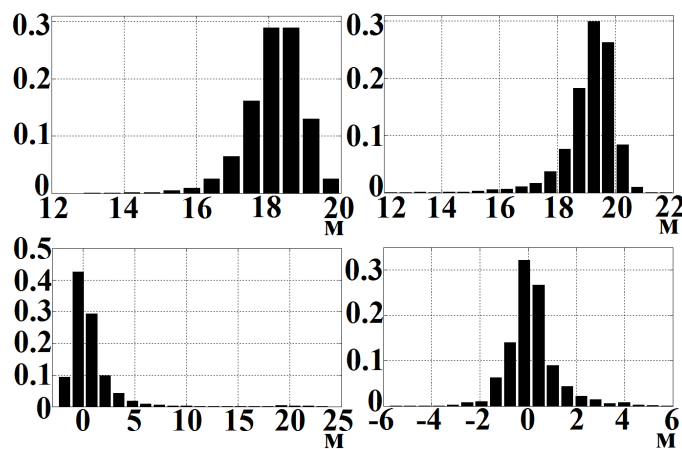


Рис. 5. Пример гистограмм наблюдений (моделирование)

Показано, что имеет место зависимость параметров распределения  $\mathbf{z}_i^*$  от текущего местоположения объекта. Также было установлено, что бета-закон позволяет точнее аппроксимировать гистограммы наблюдений (см. рис. 5). В связи с этим при описании распределения наблюдений предложено использовать нормальный либо бета-законы с зависящими от  $\mathbf{z}_0$  и  $\mathbf{V}$  параметрами.

Таким образом, в диссертации для представления сейсмолокационных наблюдений  $\mathbf{z}_i^*$  рассмотрены три подхода, характеризующиеся возрастающей сложностью конечной процедуры получения оценок  $\hat{\mathbf{z}}_{0i}$  и  $\hat{\mathbf{V}}_i$ :

- модель нормальных случайных величин с постоянным распределением;
- модель случайных величин, распределенных по нормальному закону с характеристиками, зависящими от параметров траектории;
- модель случайных величин, распределенных по бета-закону с характеристиками, зависящими от параметров траектории.

В последних двух случаях производится преобразование системы координат (рис. 6), позволяющее считать оценки  $x_i^*$  и  $y_i^*$  независимыми. Для величин  $x_i^*$  и  $y_i^*$  после пересчета в преобразованную систему координат с осями  $x_\Sigma$  и  $y_\Sigma$  вводятся обозначения  $\xi_i$  и  $\eta_i$ . Тогда для второй из перечисленных моделей плотность вероятности наблюдений на  $i$ -м шаге выглядит следующим образом:

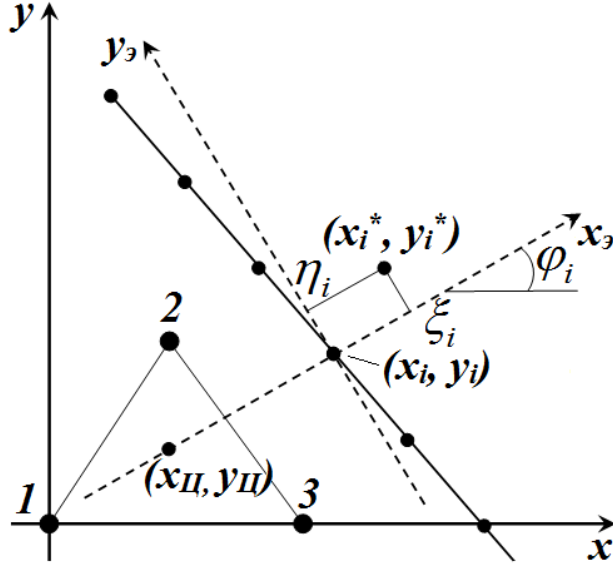


Рис. 6. Преобразование системы координат

$$w(\xi_i, \eta_i | \mathbf{z}_0, \mathbf{V}) = w(\xi_i | \mathbf{z}_0, \mathbf{V})w(\eta_i | \mathbf{z}_0, \mathbf{V}) = \frac{1}{2\pi\sigma_\xi(\mathbf{z}_0, \mathbf{V})\sigma_\eta(\mathbf{z}_0, \mathbf{V})} \cdot \exp\left[-\left(\frac{(\xi_i - m_\xi(\mathbf{z}_0, \mathbf{V}))^2}{2\sigma_\xi^2(\mathbf{z}_0, \mathbf{V})} + \frac{(\eta_i - m_\eta(\mathbf{z}_0, \mathbf{V}))^2}{2\sigma_\eta^2(\mathbf{z}_0, \mathbf{V})}\right)\right]. \quad (12)$$

Плотность вероятности для модели, использующей бета-закон:

$$w(\xi_i, \eta_i | \mathbf{z}_0, \mathbf{V}) = w(\xi_i | \mathbf{z}_0, \mathbf{V})w(\eta_i | \mathbf{z}_0, \mathbf{V}), \quad (13)$$

$$w(\xi_i | \mathbf{z}_0, \mathbf{V}) = \frac{1}{B(a_\xi(\mathbf{z}_0, \mathbf{V}), b_\xi(\mathbf{z}_0, \mathbf{V}))} \left(\frac{\xi_i - \xi^{(1)}(\mathbf{z}_0, \mathbf{V})}{\xi^{(2)}(\mathbf{z}_0, \mathbf{V}) - \xi^{(1)}(\mathbf{z}_0, \mathbf{V})}\right)^{a_\xi(\mathbf{z}_0, \mathbf{V})-1} \cdot \left(1 - \frac{\xi_i - \xi^{(1)}(\mathbf{z}_0, \mathbf{V})}{\xi^{(2)}(\mathbf{z}_0, \mathbf{V}) - \xi^{(1)}(\mathbf{z}_0, \mathbf{V})}\right)^{b_\xi(\mathbf{z}_0, \mathbf{V})-1}, \quad (14)$$

$$w(\eta_i | \mathbf{z}_0, \mathbf{V}) = \frac{1}{B(a_\eta(\mathbf{z}_0, \mathbf{V}), b_\eta(\mathbf{z}_0, \mathbf{V}))} \left(\frac{\eta_i - \eta^{(1)}(\mathbf{z}_0, \mathbf{V})}{\eta^{(2)}(\mathbf{z}_0, \mathbf{V}) - \eta^{(1)}(\mathbf{z}_0, \mathbf{V})}\right)^{a_\eta(\mathbf{z}_0, \mathbf{V})-1} \cdot \left(1 - \frac{\eta_i - \eta^{(1)}(\mathbf{z}_0, \mathbf{V})}{\eta^{(2)}(\mathbf{z}_0, \mathbf{V}) - \eta^{(1)}(\mathbf{z}_0, \mathbf{V})}\right)^{b_\eta(\mathbf{z}_0, \mathbf{V})-1}, \quad (15)$$

где  $B(x, y)$  – бета-функция.

Величины  $\xi_i$  и  $\eta_i$  выражаются через значения  $\mathbf{z}_i = \|x_i, y_i\|^T$  и  $\varphi_i$ , зависящие от параметров траектории. Далее, исходя из результатов моделирования, определяются функции, аппроксимирующие зависимости параметров распределений (12), (14) и (15) от  $\mathbf{z}_0$  и  $\mathbf{V}$ . В процессе трассировки



для наблюдаемых  $\xi_i$  и  $\eta_i$  должны быть подобраны значения  $\hat{z}_{0i}$  и  $\hat{V}_i$ , максимизирующие соответствующие функции правдоподобия вида (4).

По причине громоздкости получаемых уравнений правдоподобия алгоритм вычисления оценок параметров траектории для рассматриваемых моделей наблюдений использует табличный подход, описанный ранее и применявшийся для приближенного решения систем нелинейных уравнений РДМ вида (2). При этом формируемая на каждом этапе оценивания таблица представляет собой четырехмерный массив, в котором индексам узлов соответствует определенный набор значений параметров  $(x_0, y_0, v_x, v_y)$ . Узлы таблицы заполняются значениями функции правдоподобия (4) при плотностях вида (12) либо (14) и (15), рассчитанными для поступающего вектора наблюдений и текущей совокупности  $(x_0, y_0, v_x, v_y)$ . Шаг, с которым изменяются параметры при переходе от одного узла к другому, а также диапазон изменения могут варьироваться и влияют на размерность создаваемого в конечном итоге массива. После расчета функции (4) для всего заданного множества  $(x_0, y_0, v_x, v_y)$  в таблице отыскивается ее максимальное значение и, исходя из номеров индексов данного узла, определяются величины  $(\hat{x}_0, \hat{y}_0, \hat{v}_x, \hat{v}_y)$ , принимаемые в качестве МП-оценок.

На рис. 7 изображены среднеквадратические ошибки оценивания скорости и угла движения, полученные в процессе моделирования для различных алгоритмов. Представленные зависимости позволяют говорить о наличии некоторого выигрыша (до 20...30 градусов) в точности оценивания угла движения на ранних этапах трассировки при переходе к более сложным моделям наблюдений (рис. 7б и 7г). Однако, при достаточном количестве входных данных (7...12 наблюдений) величины ошибок оценивания параметров траектории при различных подходах одинаковы.

Объем операций, требуемых для достижения наблюдаемого на ранних этапах выигрыша, многократно превышает требования исходного алгоритма и ставит под сомнение возможность реализации рассмотренных подходов в ССО из-за жестких ограничений по вычислительным затратам и энергопотреблению. Тем не менее, следует иметь в виду, что продемонстрированный потенциал повышения точности может быть использован, если указанные факторы перестанут вносить существенные ограничения при выборе математических средств.

В четвертой главе обсуждаются вопросы, связанные с практическим применением алгоритма трассировки в ССО – подробнее рассмотрен упомянутый ранее способ предварительной обработки сейсмических сигналов, позволяющий повысить качество первичных измерений; учтена возможность

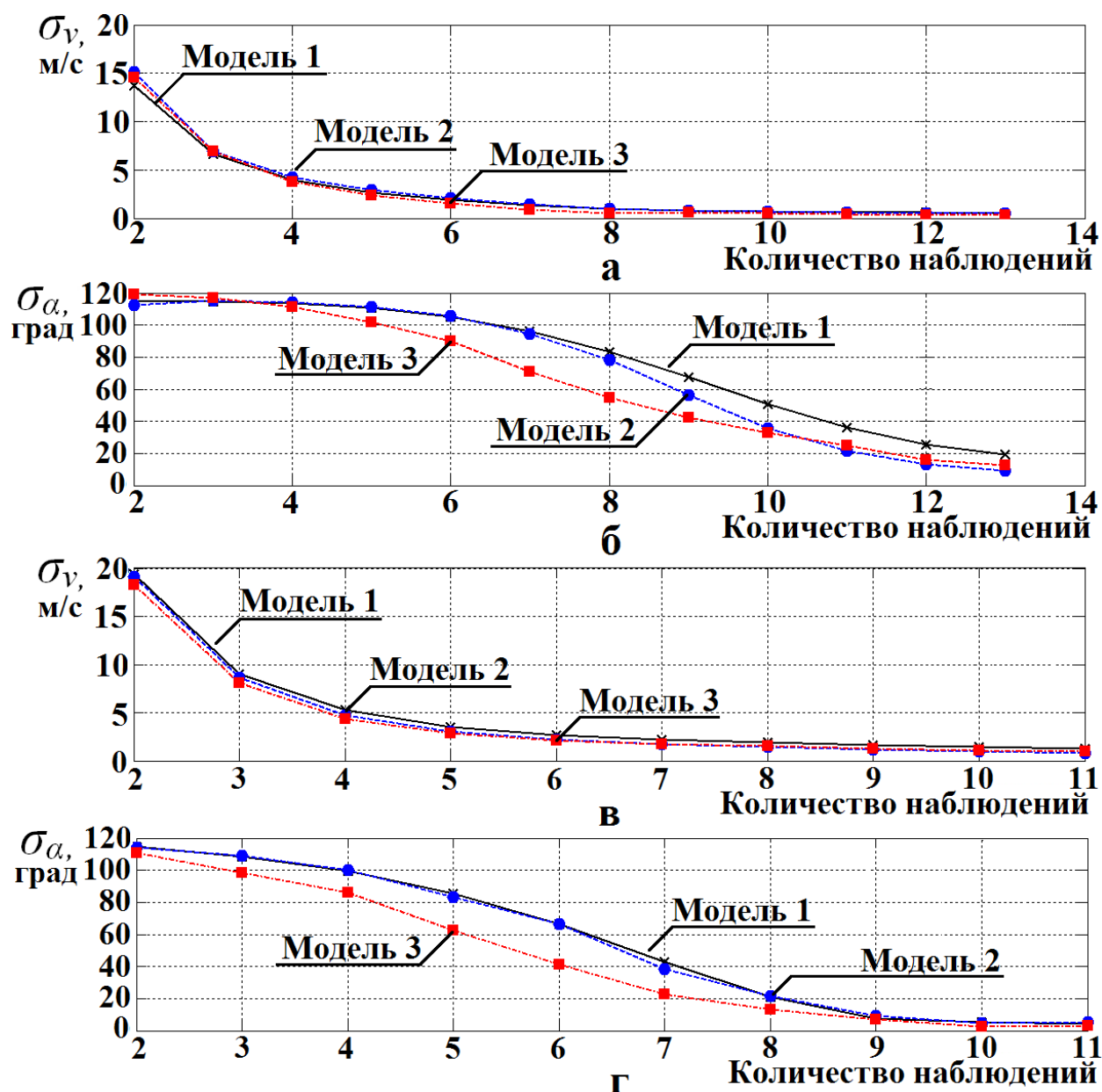


Рис. 7. Результаты анализа точности трассировки для различных алгоритмов:  
а, б –  $v = 1,8$  м/с,  $\alpha = 90^\circ$ ; в, г –  $v = 1,8$  м/с,  $\alpha = 45^\circ$

пропуска некорректных наблюдений (результаты измерений игнорируются, если  $\Delta t_i^{*(k,r)} > \Delta t_{\max}$ ) на произвольных шагах процедуры трассировки.

Также представлены результаты экспериментального анализа точности алгоритма и выполнено сравнение с траверсной трассировкой – алгоритмом, использовавшимся ранее в ССО «Азимут-1». Результаты проведенных испытаний сведены в табл. 1.

При выполнении экспериментов разработанный алгоритм был внедрен непосредственно в комплекс программного обеспечения действующего изделия «Азимут-1». Таким образом, в отличие от компьютерного моделирования и анализа сейсмических записей, обрабатывавшиеся данные были полностью сформированы реальной ССО.

Показатели точности трассировки для различных алгоритмов

Количественная характеристика точности	Алгоритм	
	Разработанный алгоритм	Траверзный алгоритм
СКО оценки угла, град	10,3	20,7
СКО оценки скорости, м/с	0,76	0,98
Среднее смещение трассы относительно истинной, м	1,24	1,86

Рассматриваемый алгоритм синтезирован на основе простой модели равномерного и прямолинейного движения объекта. Было оговорено, что данный характер движения допускается для участков, соизмеримых с зоной действия одной навигационной тройки датчиков ССО.

Очевидно, что в случаях, когда обнаруженный объект наблюдается на более длительных интервалах (например, при перемещении вдоль линии антенн), выбранная модель может оказаться неподходящей для правильного отражения реальной траектории, что обуславливает необходимость учета возможного изменения направления и скорости движения объекта при трассировке. Для решения данной задачи вводится ограничение на количество наблюдений, используемых алгоритмом при вычислении оценок параметров траектории. Обновление оценок достигается за счет буферной обработки входной информации.

В программном комплексе ССО «Азимут-1» в ходе решения задач обнаружения и классификации используется буфер, формируемый в памяти компьютера и позволяющий хранить последние 10 блоков (10000 отсчетов) регистрируемых каждым датчиком системы сейсмических сигналов. При поступлении очередного блока данных первый сохраненный в буфере блок вытесняется из него, т.е. выполняется сдвиг величиной 1000 отсчетов.

В начале процесса трассировки осуществляется постепенное заполнение буфера и на каждом шаге корреляционным методом находятся локальные наблюдения  $\mathbf{z}_i^*$ , по которым согласно (8) и (9) образуются уточняющиеся оценки параметров движения (рис. 8а). Такая процедура происходит до накопления первых 10 измерений, что занимает 16,75 с от начала трассировки (рис. 8б). Если маршрут объекта оказывается достаточно длинным, и блоки с полезным сигналом продолжают поступать по истечении указанного времени, то данные в буфере сдвигаются с каждым кадром, а для оценки траектории на текущем шаге используется все содержимое буфера (рис. 8в).

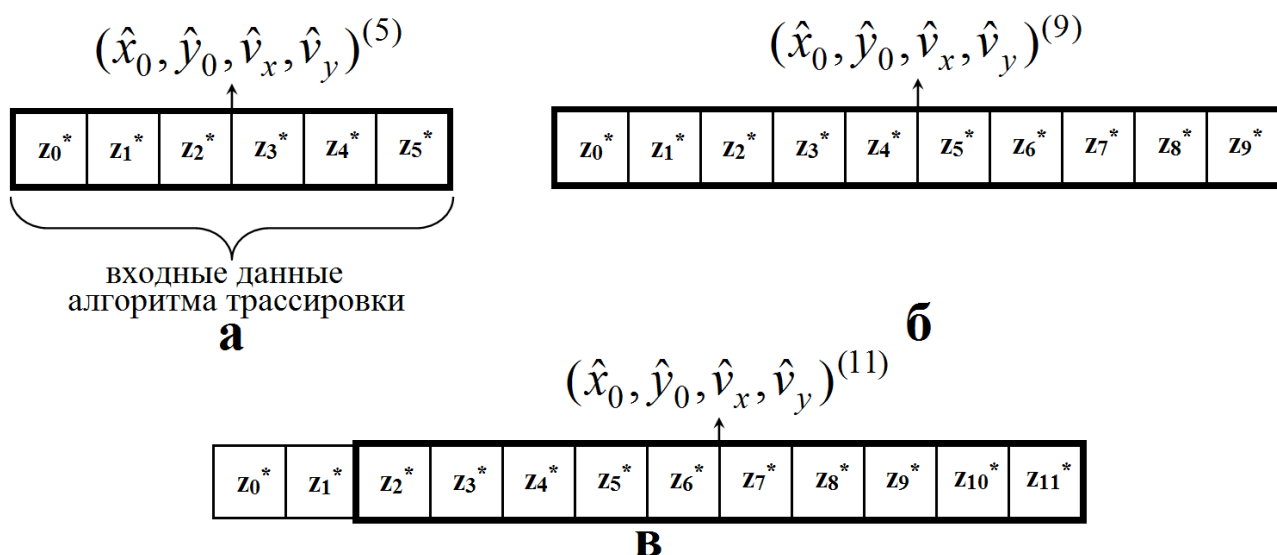


Рис. 8. Буферная обработка данных

Для демонстрации возможностей предложенного для протяженных дистанций способа трассировки на рис. 9 приведен результат эксперимента на полигоне ФГУП ПО «Север». В эксперименте ССО отслеживалось перемещение человека вдоль линии антенн, траектория движения отличалась от прямолинейной. Кроме того, имело место изменение направления движения на угол, составлявший приблизительно 90 градусов.

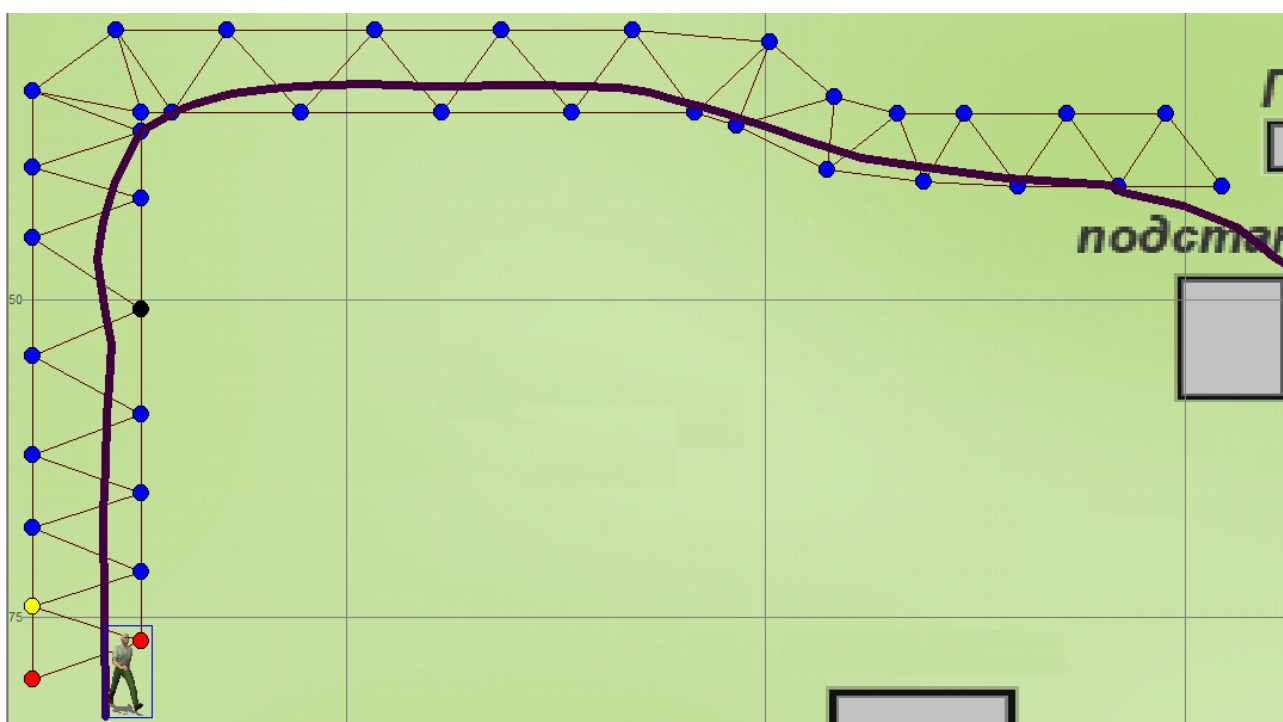


Рис. 9. Программа мониторинга ССО «Азимут-1». Отслеживание объекта на дистанции ~110 м

Натурными экспериментами подтверждается эффективность буферного способа обработки входных наблюдений, предназначенного для оценки протяженных траекторий и учитывающего возможность маневра объекта.

## **ОСНОВНЫЕ ЗАКЛЮЧЕНИЯ И ВЫВОДЫ**

В диссертации решена задача статистической оценки параметров траектории движения объектов в ССО. В ходе исследования получены следующие результаты.

Разработан алгоритм вычисления МП-оценок параметров траектории, основанный на модели равномерного прямолинейного движения в локальной области и использующий допущение о нормальном распределении сейсмолокационных наблюдений с постоянными характеристиками.

Методом статистического моделирования и с помощью натуральных экспериментов исследована точность разработанного алгоритма. Полученные показатели точности подтверждают соответствие алгоритма практическим требованиям.

По результатам моделирования и натуральных экспериментов выполнен анализ распределения входных наблюдений. Показано, что распределение обрабатываемых наблюдений может быть описано точнее с применением бета-закона с характеристиками, зависящими от параметров траектории.

Разработан и исследован с помощью статистического моделирования алгоритм трассировки, позволяющий учесть негауссовский характер распределения наблюдений и зависимость его параметров от местоположения объекта. Обеспечиваемый при малом количестве наблюдений выигрыш в точности может достигать 20...30 градусов. При этом увеличение сложности данного алгоритма по сравнению с алгоритмом, использующим упрощенное представление наблюдений, затрудняет его реализацию в современных ССО.

Предложен способ предварительной обработки сейсмических сигналов для повышения точности первичных измерений.

Для оценки параметров движения на протяженных участках и отслеживания маневра объекта введена буферная обработка входных данных.

## **ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Мархакшинов А.Л., Спектор А.А. Оценивание локальных характеристик движения объекта в сейсмической системе охраны // Автометрия. – 2009. – №5 (45). – С. 48-53.
2. Мархакшинов А.Л. Оценивание характеристик движения человека в сейсмической системе охраны // Материалы всероссийской научной студенческой конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации». Новосибирск. – 2009. – Часть 2. – С. 111-112.

3. Мархакшинов А.Л., Райфельд М.А., Спектор А.А. Корреляционное измерение навигационных параметров в сейсмической системе охраны // Научный вестник НГТУ. – 2010. – №3 (40). – С. 161-166.
4. Мархакшинов А.Л., Спектор А.А. Оценивание траектории движения человека на локальном участке в сейсмической системе охраны // Сборник научных трудов НГТУ. – 2010. – №1 (59). – С. 59-64.
5. Гребенщиков К.Д., Коробов В.В, Мархакшинов А.Л., Райфельд М.А., Соколова Д.О., Спектор А.А., Тонконогов Е.А., Филатова С.Г. Задачи и методы обработки сигналов в сейсмических системах наблюдения // Материалы X Международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения». Новосибирск. – 2010. – Том 4. – С. 46-49.
6. Мархакшинов А.Л. Двухэтапное оценивание траектории движения человека в сейсмической системе охраны // Материалы всероссийской научной студенческой конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации». Новосибирск. – 2010. – Часть 1. – С. 347-349.
7. Мархакшинов А.Л., Спектор А.А. Оценивание параметров движения человека в сейсмической системе охраны при неоднородном характере первичных данных // Научный вестник НГТУ. – 2011. – №4 (45). – С. 171-175.