

На правах рукописи

Филатова Светлана Геннадьевна

**ОЦЕНИВАНИЕ ВРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛОВ
В СЕЙСМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ОХРАНЫ**

Специальность: 05.13.17 – Теоретические основы информатики

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Новосибирск – 2011

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

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Спектор Александр Аншелевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Загоруйко Николай Григорьевич

доктор технических наук, профессор
Носов Владимир Иванович

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

Защита состоится «24» ноября 2011 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 «___» октября 2011 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета

Чубич В.М.

Актуальность темы. В настоящее время для охраны объектов и территорий используются различные технические средства охраны. Среди них особое место занимают сейсмические системы охраны (ССО), имеющие ряд преимуществ, которые обеспечивают их устойчивую конкурентоспособность. Пассивность принципа функционирования ССО и расположение сейсмоприёмников (СП) в грунте гарантирует высокую степень маскировки. У ССО практически не существует ограничений на тип грунта, за исключением некоторых, гасящих полезные сигналы (зыбучие пески, болотистые грунты). В настоящее время работы в области создания ССО проводятся американской компанией Safeguards Technology, компанией Geopir (Великобритания), ФГУП НИКИРЭТ (Россия, г. Пенза) и ФГУП ПО «Север» (Россия, г. Новосибирск). В России научные разработки в этой области ведутся А.А. Вольским, В.А. Дудкиным, С.С. Звездинским, В.А. Ивановым, И.Н. Крюковым, Ю.А. Олениным, А.А. Спектором, М.А. Райфельдом, Г.К. Чистовой.

Создание современных ССО базируется на развитии математических методов и алгоритмов для решения ряда задач, стоящих перед такими системами, совершенствовании программного обеспечения, а также использовании современных средств вычислительной техники. Сейсмические сигналы обладают высокой информативностью, их анализ позволяет решать задачи обнаружения, распознавания и определения координат объектов. При этом разработчики ССО сталкиваются с существенной нестационарностью и неоднородностью характеристик сигналов, которые связаны с наличием разнообразных мешающих факторов, как природного, так и техногенного характера, а также с высокой временной и пространственной изменчивостью свойств среды распространения сейсмических волн. Принятая в ряде разработок декорреляция (выбеливание) сигналов в качестве их предварительной обработки из-за этого выполняется в адаптивном режиме, которому сопутствует получение текущих оценок параметров математической модели сигнала. По этим же причинам все процедуры обработки, решающие задачи обнаружения, классификации, определения координат и параметров движения, должны адаптироваться к конкретным условиям, в которых происходит функционирование ССО. Один из подходов к решению параметрической адаптивной настройки ССО может состоять в использовании библиотеки эталонных записей сигналов, полученных при работе системы в различных условиях. Множество условий при этом разбивается на группы, для каждой из которых осуществляется определение оптимальных параметров обработки в ССО. С участием квалифицированных специалистов осуществляется эталонная настройка сейсмоприёмника (СП). При настройке ССО на новом объекте выполняется оценивание параметров среды, при помощи которого условия функционирования для каждого СП относятся к одной из типичных групп, представленных в библиотеке эталонов, а параметры обработки сигналов для этого СП устанавливаются в соответствии с эталонной настройкой для данной группы.

Решение задач адаптивной настройки требует, очевидно, развития методов оценки параметров, которые могут быть использованы в качестве признаков эталонных групп, из которых составлена библиотека эталонных сигналов.

В качестве таких параметров в диссертации выбраны временные параметры сейсмического сигнала, поскольку, как показывает качественный анализ, они в значительной мере зависят от свойств сейсмических сред. Такими параметрами являются длительность импульса и длительность совокупности (пачки) импульсов, описывающих движение человека мимо сейсмического приёмника. Следует отметить, что, наряду с задачами адаптивной настройки, оценки временных параметров, таких как временные положения импульсов и пачки импульсов, могут быть использованы при решении задач, связанных с определением текущих координат сейсмоактивного объекта и параметров его движения.

Цель и задачи работы. Цель диссертационной работы заключается в развитии методов оценки временных параметров сейсмических сигналов применительно к задачам обработки информации в ССО и их адаптивной настройки в нестационарных и неоднородных условиях функционирования. В диссертации решены следующие задачи: разработана математическая модель сейсмического сигнала; разработаны алгоритмы определения временных параметров сигналов; исследована точность полученных алгоритмов.

Методы исследований, используемые в работе, основываются на теории вероятностей, математической статистике, теории случайных процессов и теории цифровой обработки сигналов. Разработка всех моделей, методов и алгоритмов производилась с учётом результатов предварительных натуральных исследований. При исследовании алгоритмов применялись методы статистического моделирования.

Научная новизна работы состоит в том, что в ней впервые решены задачи получения оценок временных параметров сейсмических сигналов, а именно:

- времени прихода на СП сейсмического сигнала, соответствующего одному шагу человека;
- времени прихода сигнала, соответствующего нахождению объекта в точке наименьшего удаления (траверза) от СП;
- длительности импульса, вызванного шагом движущегося человека,
- длительности пачки импульсов, соответствующей длительности прохода человека через область обнаружения СП.

Также исследована точность алгоритмов оценки временных параметров, разработана модель сигналов, наблюдаемых в ССО, и определена точность траверзного метода оценки параметров движения сейсмоактивного объекта.

Достоверность полученных результатов, адекватность разработанной математической модели и алгоритмов оценки параметров подтверждаются согласованностью результатов математического моделирования и экспериментальной проверки алгоритмов на записях сигналов. Качество работы алгоритма определения временного положения пачки импульсов в работе сравнивается с потенциально достижимым, полученным на основе анализа нижней границы ошибок Крамера-Рао.

Практическая ценность и реализация результатов диссертации. Научные и практические результаты исследований нашли применение в хозяйственных и госбюджетных научно-исследовательских работах, выполненных в течение 2007-2010 гг. на кафедре ТОР НГТУ. Результаты диссертации исполь-

зованы при разработке одного из методов настройки изделия ССО «Азимут-1» (ФГУП ПО «Север», г. Новосибирск) в заранее не известных условиях. Полученные в диссертации алгоритмы могут быть использованы при создании новых образцов ССО. Алгоритм определения временного положения пачки импульсов предназначен для реализации траверзного метода оценки параметров движения человека. Алгоритм оценки временных положений импульсов может быть использован в разностно-дальномерном методе определения координат объекта. Алгоритмы оценки длительностей импульсов и пачки позволяют реализовать автоматическую настройку ССО при изменяющихся условиях.

На защиту выносятся разработанные на основе метода максимального правдоподобия (МП) алгоритмы оценки временного положения пачки импульсов, длительностей импульсов и их совокупности, алгоритм оценки временных положений импульсов, разработанный на основе теории марковской фильтрации, а также результаты анализа точности этих алгоритмов.

Апробация работы. Результаты работы обсуждались на 6 всероссийских и 5 международных конференциях, в том числе: Всероссийской научно-технической конференции «Современные проблемы радиоэлектроники» (г. Красноярск, СФУ, 2006-2009 гг.), Международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления. Опыт инновационного развития» (г. Томск, ТУСУР, 2007 г.), Всероссийской научной конференции с международным участием «Проблемы развития и интеграции науки, профессионального образования и права в глобальном мире» (г. Красноярск, СФУ, 2007, 2009 гг.), Международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» (г. Новосибирск, НГТУ, 2008 г.), Международной конференции по микро/нанотехнологиям и электронным приборам EDM (Алтай, НГТУ, 2007-2009 гг.)

Публикации. Результаты, полученные в диссертации, опубликованы в 16 печатных работах, из них две – в изданиях, внесённых в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёной степени доктора и кандидата наук, четыре – в сборниках научных трудов и десять – в материалах трудов международных и всероссийских научно-технических конференций.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, трёх разделов основной части, заключения, списка использованных источников и приложений. Объём работы составляет 152 страницы основного текста, включая 98 рисунков, 6 таблиц, а также список использованных источников из 109 наименований.

Содержание работы. Во **введении** обоснована актуальность задачи оценивания временных параметров сигналов в ССО, сформулированы цель и задачи, обозначены методы исследования, показана научная новизна работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту. Приведены структура и объём работы, а также количество публикаций по теме диссертации.

Первый раздел диссертации посвящен изложению общих сведений о ССО, являющихся одними из перспективных средств охраны протяжённых

периметров. В подразделах 1.1 – 1.2 обсуждаются достоинства ССО по сравнению с системами, построенными на других физических принципах, анализируется восприимчивость различных технических средств охраны (ТСО) к некоторым внешним факторам, а также их потенциал обнаружения. Описание ССО типа «Азимут-1» (разработанного ФГУП ПО «Север» совместно с кафедрой ТОР НГТУ) и наблюдаемых в них сигналах приводится в п. 1.3. Улучшение технических характеристик ССО связано с развитием помехоустойчивых алгоритмов оценки и фильтрации параметров. Обзор методов получения статистически оптимальных оценок приводятся в п. 1.4.

Второй раздел посвящен траверзному методу оценивания параметров движения человека в ССО. В п. 2.1 анализируется модель поведения потенциального нарушителя, на основе которой затем предлагается модель его движения. Нарушитель стремится пересечь охраняемый периметр максимально быстро, поэтому оправданным является предположение о прямолинейности и равномерности его движения в зоне обнаружения. В этом случае движение объекта полностью описывается углом наклона траектории в локальной системе координат α и модулем вектора скорости перемещения объекта V .

П. 2.2 посвящён разработке математической модели сигнала человека, наблюдаемого в ССО. Поскольку в ССО типа «Азимут-1» сейсмические сигналы подвергаются предварительной дискретизации с частотой $F_d \approx 600$ Гц, в диссертации при разработке и анализе алгоритмов используется дискретная шкала времени (в отсчетах). Кроме того, учитывается наличие предварительной процедуры выбеливания в алгоритмическом обеспечении ССО типа «Азимут-1». В некоторых работах, посвящённых ССО, предлагаются математические модели сейсмосигнала, разработанные на основе анализа физических процессов в грунте. Основным недостатком таких моделей заключается в том, что они учитывают очень большое число факторов, включающих как параметры грунта, так и параметры движения человека, что требует большого количества «подстроек» при изменении внешних условий. Это приводит к невозможности, на наш взгляд, создавать быстрые алгоритмы обработки, реализуемые вычислительными устройствами реальных ССО. Более естественным является подход, когда сигналы рассматриваются как случайные процессы, определённые параметры которых зависят от внешних условий.

При воздействии шагов человека на грунт сигналы на выходе СП имеют характер импульсов примерно одинаковой длительности и случайной интенсивности (рис. 1). Частота их появления зависит от скорости движения. Амплитуда изменяется в зависимости от расстояния между источником сейсмосигнала и СП, а также определяется силой удара. Полученные после выбеливания данные представляются в виде суммы двух гауссовых случайных процессов: фона, являющегося белым шумом с нулевым средним и постоянной дисперсией D_Φ ; и полезного сигнала (обусловленного воздействием объекта) с нулевым средним и дисперсией, меняющейся по правилу $D[i, i_{\text{пи}}] = F_\Pi [i, i_{\text{пи}}] \sum_{k=1}^K F_k [i]$, $i = 1..I$. Здесь функции $F_k [i] = \exp\left(-\frac{(i - i_k)^2}{2 \tau_k^2}\right)$, $i = 1..I$, описывают интенсивности K

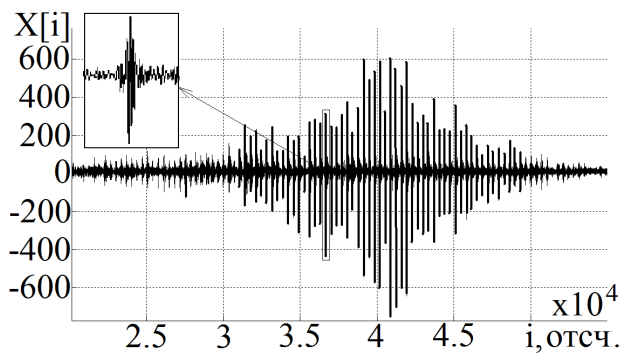


Рис. 1. Пример выбеленного сигнала

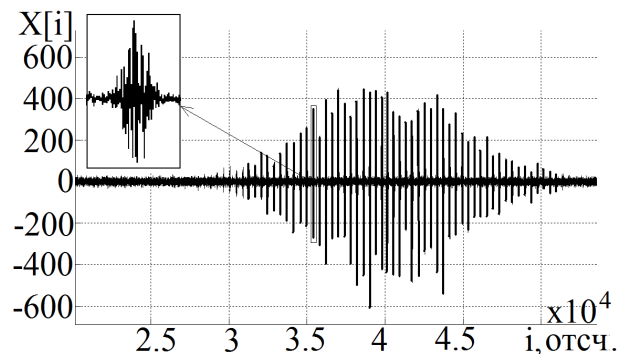


Рис. 2. Пример моделируемого сигнала

импульсов, соответствующих шагам человека (i_k – временное положение k -го импульса, τ_k – его длительность), а $F_{\Pi}[i, i_{\Pi}] = D_{\Pi} \exp\left(-\frac{(i - i_{\Pi})^2}{2 \tau_{\Pi}^2}\right)$, $i = 1..I$, описывает огибающую пачки импульсов, соответствующую проходу человека мимо СП (D_{Π} – максимальная интенсивность пачки, i_{Π} – её временное положение, τ_{Π} – параметр, определяющий длительность). Неравномерный характер перемещения объекта вводится соотношением $i_k - i_{k-1} = T + \Delta T_k$, $k = 1..K$, в котором T – средний период следования импульсов, ΔT_k – случайная составляющая, определяющая отклонение от среднего периода для k -го импульса и имеющая нулевое математическое ожидание. На рис. 2 приведён характерный пример сигнала, иллюстрирующий предложенную математическую модель.

В п. 2.3 рассматривается сущность траверзного метода определения параметров движения. Предполагается, что в пределах распределённой группы трёх СП объект движется прямолинейно и равномерно, а также, что скорость распространения сейсмической волны является постоянной на наблюдаемом

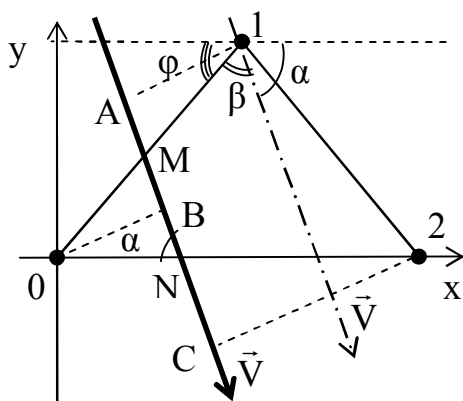


Рис. 3. К сущности траверзного метода

локальном участке. Отметим, что движение объекта может последовательно проходить через несколько таких групп, являясь глобально непрямолинейным и неравномерным. Однако в пределах одной группы указанные предположения о характере движения в большинстве случаев представляются вполне оправданными. На рис. 3 изображен пример расположения СП в вершинах 0, 1 и 2. Определению подлежат угол наклона траектории α к оси x локальной системы координат и модуль вектора скорости V :

$$\operatorname{tg} \alpha = \operatorname{ctg} \varphi + \delta t_{10} \cdot d_{20} / (\delta t_{02} \cdot d_{10} \cdot \sin \varphi), \quad V = (d_{20} \cos \alpha) / \delta t_{02}.$$

Здесь d_{10} , d_{20} – расстояния между СП; $\delta t_{10} = (t_0 - t_1)$ – время, за которое объект перемещается из траверзной точки A , в которой он находится в момент времени t_1 , в траверзную точку B , где он оказывается в момент времени t_0 ; аналогично обозначается промежуток $\delta t_{02} = (t_2 - t_0)$. Траверзный метод базируется на указанных соотношениях. Его реализация требует измерения временных задержек δt_{10} и δt_{02} , основой которых может служить анализ текущих

интенсивностей сигналов на каждом СП при перемещении объекта и определение моментов времени t_0, t_1, t_2 , когда эти интенсивности максимальны.

Точность траверзного метода анализируется в п. 2.4. В определённых условиях, обычно имеющих место, распределение погрешностей измерения моментов времени t_0, t_1 и t_2 подчиняется нормальному закону с нулевым средним и дисперсией σ^2 . Погрешности определения временных задержек δt_{10} и δt_{02} описываются совместным гауссовым распределением с нулевым средним, дисперсией $2\sigma^2$ и коэффициентом корреляции $\rho = -0.5$. Для оценки точности рассматриваются функции:

$$f(\Delta t_{10}, \Delta t_{02}) = \alpha + \Delta\alpha = \arctg[\text{ctg} \varphi + (\delta t_{10} + \Delta t_{10}) \cdot d_{20} / ((\delta t_{02} + \Delta t_{02}) \cdot d_{10} \cdot \sin \varphi)],$$

$$g(\Delta t_{10}, \Delta t_{02}) = V + \Delta V = (d_{20} \cdot \cos(\alpha + \Delta\alpha)) / (\delta t_{02} + \Delta t_{02}),$$

где $\Delta\alpha$ – ошибка определения угла α , ΔV – ошибка определения скорости. Смещение и флюктуацию оценок α и V можно найти как математическое

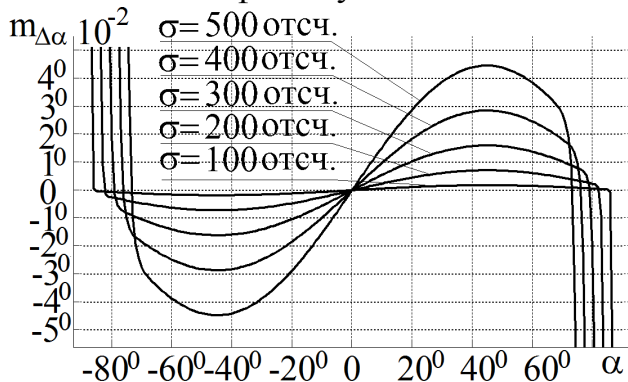


Рис. 4. Зависимость $m_{\Delta\alpha}$ от α , $V=1$ м/с

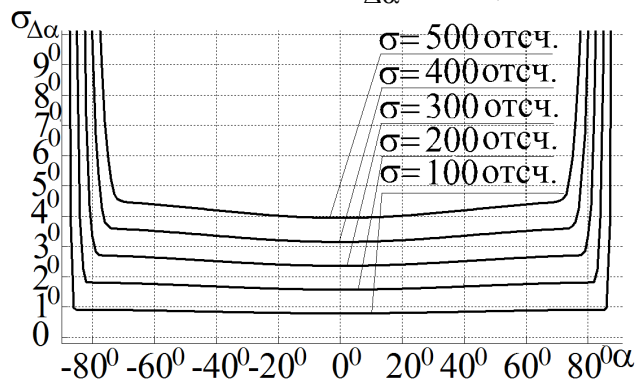


Рис. 5. Зависимость $\sigma_{\Delta\alpha}$ от α , $V = 1$ м/с

не на пары датчиков 0-1 и 0-2, а, например, на 1-0 и 1-2.

На рис. 6-9 приведены зависимости смещения и СКО оценки модуля вектора скорости от его истинного значения V при различных σ и $\alpha = 45^\circ$ (рис. 6, 8), а также от угла α при различных σ и скорости 1 м/с (рис. 7, 9). При $|\alpha| > 70^\circ$ оценка становится смещённой, а её флюктуация резко увеличивается. Избежать этого можно, используя для расчетов пары датчиков 1-0 и 1-2. При малых углах α можно считать, что оценки модуля вектора скорости являются несмещёнными: $m_{\Delta V} < 0.01$ м/с даже при больших σ . При возрастании V увеличивается СКО оценки модуля вектора скорости. Но для $V = 1$ м/с оценки, получаемые

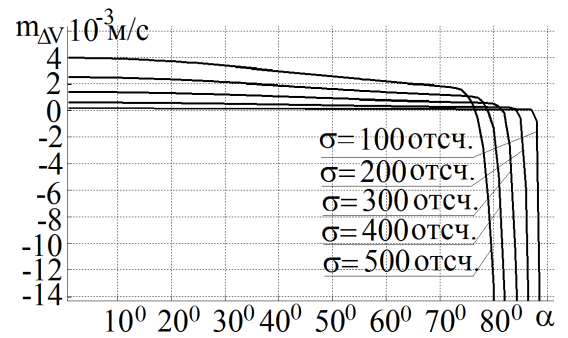
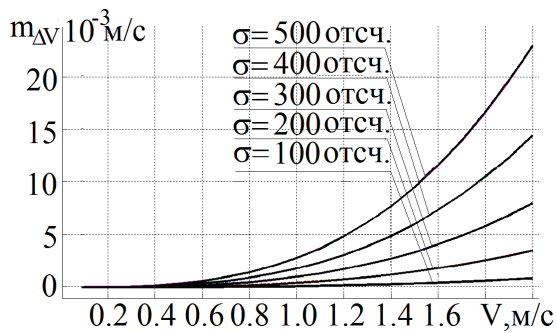


Рис. 6. Зависимость $m_{\Delta V}$ от V , $\alpha = 45^\circ$ Рис. 7. Зависимость $m_{\Delta V}$ от α , $V = 1 \text{ м/с}$

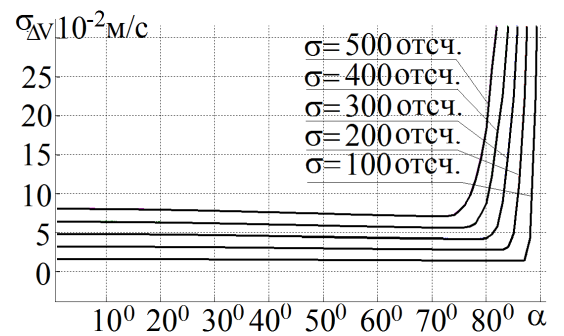
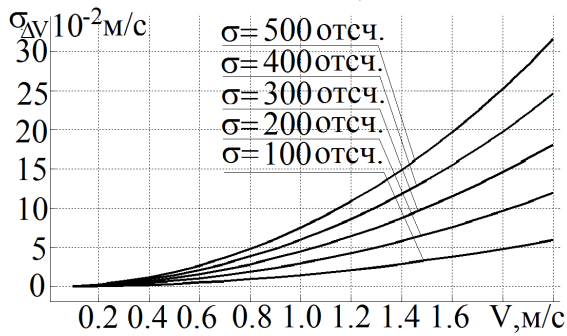


Рис. 8. Зависимость $\sigma_{\Delta V}$ от V , $\alpha = 45^\circ$ Рис. 9. Зависимость $\sigma_{\Delta V}$ от α , $V = 1 \text{ м/с}$

при помощи траверзного метода, являются достаточно точными: $\sigma_{\Delta V} < 0.1 \text{ м/с}$ при $\alpha \leq 70^\circ$. Заметим, что при измерении угла направления движения объекта и модуля вектора скорости имеются совпадающие рабочие области, в пределах которых оценки являются несмещёнными и слабо флюктуирующими. При выходе за границы этой области необходимо воспользоваться для вывода выражений, по которым определяются угол и скорость, другими парами датчиков, например, 1-0 и 1-2.

Реализация траверзного метода базируется на оценке временного положения максимумов сигналов ($i_{\text{пн}}$). Решению этой задачи с помощью метода МП посвящён п. 2.5. Получение оценок $i_{\text{пн}}$ должно производиться в «реальном» масштабе времени, однако большой объём наблюдаемых данных препятствует этому. Предложенная в п. 2.2 модель сигнала предполагает знание ряда параметров, которые должны быть оценены предварительно. А сложная зависимость функции правдоподобия для исходного процесса $X[i]$ от параметра, описывающего временное положение пачки $i_{\text{пн}}$, является причиной большого объема вычислений при реализации, что препятствует созданию быстрого алгоритма. Указанные обстоятельства приводят к необходимости образовывать вспомогательную последовательность так, чтобы сократился объем анализируемых данных, и уменьшилось количество параметров модели, которые нужно знать для реализации алгоритма обработки. Однако при формировании такой последовательности информация о положении пачки должна сохраниться. В диссертации предлагается перейти к сигналу, отсчёты которого являются независимыми локальными оценками мощности:

$$Y[j] = \frac{1}{\Delta} \sum_{i=t-\Delta/2}^{t+\Delta/2} X^2[i], j = 1 \dots J, i = 1 \dots I, \quad (1)$$

где $t = ((j-1)\Delta + \Delta/2)$ – текущее положение окна. Результатом такого преобразования является выборка $Y[j]$, объём которой в Δ раз меньше объёма исходного сигнала $X[i]$. Длительность окна Δ должна выбираться достаточно большой, чтобы в результате вычисления (1) происходило «сглаживание» импульсов. Это позволит не вводить параметры, описывающие одиночный импульс, в число исходных данных для алгоритма обработки. В то же время слишком большая длительность Δ приводит к значительной потере информации.

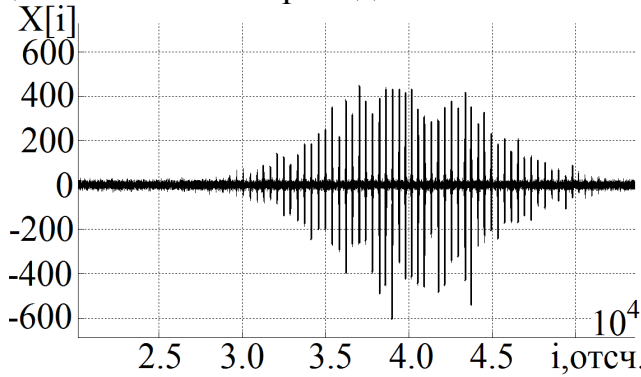


Рис. 10. Модель сейсмического сигнала

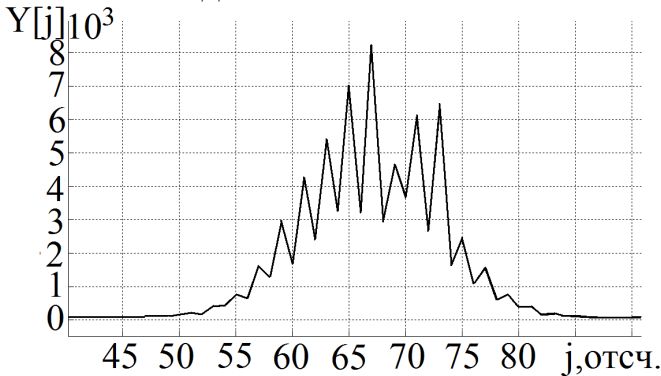


Рис. 11. Преобразованный при помощи (1), сигнал $Y[j]$, $\Delta = 600$

На рис. 10 приведена модель сейсмического сигнала, а на рис. 11 изображается преобразованный при помощи (1) сигнал $Y[j]$. Длительность окна Δ равна двум средним периодам следования импульсов. В диссертации процесс, изображённый на рис. 11, представляется в виде аддитивной смеси ($Y[j] = D_{\Phi} + f[j] + \xi[j]$, $j = 1 \dots J$) постоянной составляющей, соответствующей интенсивности фона D_{Φ} , функции

$$f[j] = f_0 \exp\left[-\left(j - i'_{\text{пн}}\right)^2 / 2\tau'_{\text{пн}}{}^2\right], \quad (2)$$

соответствующей изменению интенсивности сигнала пачки, и случайного процесса $\xi[j]$ с дисперсией D_{ξ} , описывающего отклонения сигнала $Y[j]$ от функции $f[j]$. Эти отклонения

вызваны случайной природой исходных сигналов. Так, в окне Δ при усреднении может наблюдаться случайное количество импульсов и промежутков между импульсами, содержащих только отсчёты фона. За счёт того, что интенсивности фона и импульсов значительно различаются, происходит скачкообразное отклонение сигнала $Y[j]$ от функции $f[j]$. Дисперсия случайного процесса, описывающего это отклонение, изменяется в пределах пачки, возрастая к её центру. В диссертации принимается, что отклонение от функции $f[j]$ распределено по гауссову закону с нулевым средним и постоянной дисперсией, равной её значению в центре пачки. Для вектора данных \vec{Y} при некоррелированных отсчётах шума $\xi[j]$ записывается функция правдоподобия:

$$w(\vec{Y} | i'_{\text{пн}}) = (2\pi \cdot D_{\xi})^{-J/2} \exp\left(-\frac{1}{2D_{\xi}} \sum_{j=1}^J (Y[j] - D_{\Phi} - f[j])^2\right).$$

В диссертации получено уравнение МП для оценки временного положения пачки импульсов:

$$\sum_{j=1}^J \frac{j-i'_{\text{пн}}}{\tau'_{\text{пн}}{}^2} (Y[j]-D_{\Phi}) \exp\left(-\frac{(j-i'_{\text{пн}})^2}{2\tau'_{\text{пн}}{}^2}\right) - \frac{f_0}{2} \exp\left(-\frac{(i'_{\text{пн}}-1)^2}{\tau'_{\text{пн}}{}^2}\right) + \frac{f_0}{2} \exp\left(-\frac{(i'_{\text{пн}}-J)^2}{\tau'_{\text{пн}}{}^2}\right) = 0. \quad (3)$$

Величина f_0 , входящая в уравнение (3) и модель (2), характеризует интенсивность сигнала в момент, когда объект находится в траверзной точке траектории. Она зависит как от свойств среды распространения сейсмической волны, которые изменяются в зависимости от природно-климатических условий, так и от удалённости траверзной точки траектории от датчика. Величина f_0 вводится в число неизвестных параметров и оценивается в процессе работы системы.

Алгоритм оценки $i'_{\text{пн}}$ исследован методом статистического моделирования. Результаты приведены в п. 2.6. Эксперимент проводился путем генерирования и обработки ансамбля из 100 сигналов. Получен ряд зависимостей, описывающих работу алгоритма в различных условиях. Характерными являются зависимости смещения и СКО оценки временного положения пачки от длительности окна Δ . С её ростом наблюдается увеличение СКО ошибок. Кроме того, как при больших, так и при малых Δ наблюдается смещение получаемых оценок. Смещение, которым можно пренебречь, получается при длительности окна от 500 до 700 отсч.

При реализации алгоритма в качестве входных данных используется ряд параметров сигнала. В силу случайной природы сигналов, наличия мешающего сейсмического фона возникают ошибки в их определении. В диссертации изучено влияние параметрических расстройек на точность алгоритма. Под параметрической расстройкой понимается разность между истинным значением параметра и ожидаемым значением, которое используется в рабочем алгоритме $v_p = p_{\text{и}} - p_0$. Здесь $p_{\text{и}}$, p_0 – обобщённые обозначения соответственно истинных и ожидаемых параметров сигнала. Получены зависимости смещения и СКО оценки $i'_{\text{пн}}$ от расстройки по отношению сигнал/шум (ОСШ). Ошибка минимальна при нулевой расстройке. При $q_0^2 > q_{\text{и}}^2$ ошибка больше, чем при $q_0^2 < q_{\text{и}}^2$, что говорит о необходимости задаваться заведомо меньшим q_0^2 для уменьшения ошибок.

Также получены зависимости смещения и СКО оценки $i'_{\text{пн}}$ от расстройки по длительности пачки. Минимальные ошибки наблюдаются при нулевой расстройке. Её наличие обуславливает появление значительного смещения оценок и увеличение их флюктуации, что препятствует получению точных оценок угла и скорости. При этом увеличение смещения и СКО наиболее существенно, когда ожидаемое значение длительности пачки больше истинного.

Поскольку основная цель разработки алгоритма состояла в уменьшении задержек выдачи результата с сохранением приемлемой точности, в диссертации проанализированы зависимости смещения и СКО оценки $i'_{\text{пн}}$ от длительности наблюдения $I_{\text{набл}}$. Рис. 12-13 иллюстрируют тот факт, что приемлемая точность оценки угла (до 5^0) достигается при наблюдении не менее чем половины пачки импульсов. При аппроксимации огибающей по наблюдению менее, чем

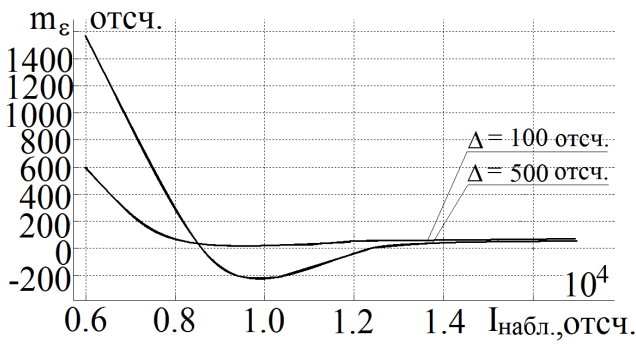


Рис. 12. Зависимость m_ε оценки $\tau_{\text{ПИ}}$ от $I_{\text{набл.}}$, $q^2 = 100$

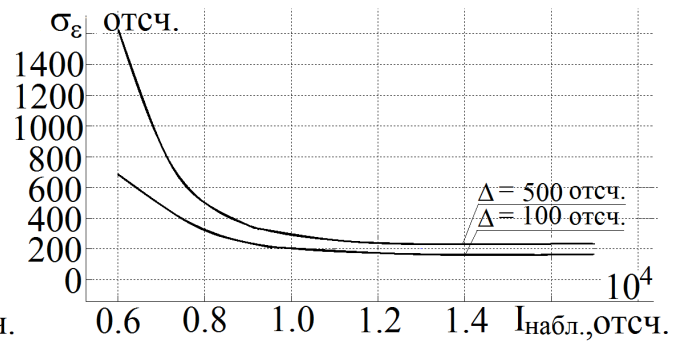


Рис. 13. Зависимость σ_ε оценки $\tau_{\text{ПИ}}$ от $I_{\text{набл.}}$, $q^2 = 100$

половины пачки, оценка $i_{\text{ПИ}}$ является смещённой и сильно флюктуирующей. В этом случае качество оценок снижается значительно в условиях априорной неопределённости относительно параметров сигнала. Учитывая результаты исследования точности траверзного метода, а также то, что для построения траектории используются три датчика, очевидно, что приемлемая точность определения угла и скорости гарантируется при нахождении объекта в траверзной точке относительно третьего (последнего для прохода) датчика. Сокращение времени ожидания выдачи результата оценки угла и скорости при использовании разработанного алгоритма очевидно. Однако при использовании траверзного метода и с учётом требуемой точности определения параметров выигрыш по времени незначителен.

П. 2.7 посвящён расчёту потенциальной точности алгоритма оценки временного положения пачки. Потенциальная точность позволяет объективно судить о качестве получаемых оценок. В диссертации получено выражение, определяющее потенциальную СКО оценки временного положения пачки $\sigma_{\min}^2 \{ \hat{i}_{\text{ПИ}} | i_{\text{ПИ}} \}$ (граница Крамера-Рао). Приводятся результаты, характеризующие потенциальную СКО для процесса с различными значениями параметров. Так, при увеличении ОСШ, интервала наблюдения сигнала и длительности импульса происходит уменьшение нижней границы $\sigma_{\min}^2 \{ \hat{i}_{\text{ПИ}} | i_{\text{ПИ}} \}$. Увеличение длительности импульса приводит к росту энергии сигнала, что в свою очередь снижает потенциальную СКО. Увеличение числа импульсов в пачке при фиксированных длительности импульса и среднем периоде следования приводит к повышению нижней границы СКО. Это является итогом взаимодействия двух противоположных механизмов: при увеличении числа импульсов энергия пачки возрастает, что должно вести к получению более точных оценок, однако увеличение количества импульсов приводит к уменьшению эффективной полосы спектра сигнала, что, в свою очередь, ухудшает оценки. Этот же эффект объясняет и увеличение $\sigma_{\min}^2 \{ \hat{i}_{\text{ПИ}} | i_{\text{ПИ}} \}$ с ростом среднего периода следования импульсов.

При сравнении потенциальной точности оценки временного положения пачки и точности алгоритма, разработанного в подразделе 2.5, наблюдается значительное различие. Оно вызвано преобразованием (1), представляющим собой «квантование времени» с интервалом, который значительно превышает исходный временной шаг дискретизации сигналов. Шумы, обусловленные этим

преобразованием, являются аддитивными с дисперсией $\sigma_{пр}^2 = \Delta^2/12$. Однако, в отличие от алгоритма, который мог бы обеспечить точность, сравнимую с потенциальной точностью, реализация алгоритма, разработанного в п. 2.5, не требует знания параметров, описывающих «внутреннюю» структуру пачки – длительность импульсов и период их следования. Кроме того, использование преобразования (1) позволяет сократить объём вычислений, а значит и время ожидания результата. Несмотря на то, что при $\Delta = 500$ отсч. и $\Delta = 1000$ отсч. происходит значительное (по сравнению с потенциальной точностью) ухудшение точности алгоритма, точность оценки α и V оказывается приемлемой в условиях реализации быстрого алгоритма оценки длительности пачки.

Таблица 1

Исследование алгоритма определения $i_{пи}$

$\varphi_э^2$	Положение пачки								
	Оценка оператора, $i_{пи}^э$	Оценка, формируемая алгоритмом, отсч.							
		$\Delta = 1000$ отсч.		$\Delta = 500$ отсч.		$\Delta = 250$ отсч.		$\Delta = 100$ отсч.	
		$i_{пи}^a$	ε	$i_{пи}^a$	ε	$i_{пи}^a$	ε	$i_{пи}^a$	ε
14	8500	8799	-299	8732	-232	8650	-150	8605	-105
25	14500	18510	4010	18489	3989	18345	3845	18026	3526
79	11000	10291	709	10052	948	9958	1042	9917	1083
643	7000	7517	-517	7273	-273	7076	-76	6938	62
4667	18500	15896	2604	15524	2976	15466	3034	15015	3485
31447	17500	14405	3095	16498	1002	17639	-139	17264	236
52817	5800	6255	-455	6124	-324	5874	-74	5730	70

В п. 2.8 приводятся результаты исследования алгоритма на записях реальных сейсмических сигналов. В первом столбце табл. 1 приведены оценки ОСШ, определённые квалифицированным оператором. Записи сигналов производились в различных условиях, обусловленных, во-первых, их разнесением по времени, во-вторых, разнесением датчиков системы в пространстве, а также отличием характеристик движения человека. Этот факт не позволяет производить статистический анализ работы алгоритма, поэтому в табл. 1 приведены результаты однократных измерений.

Приведены результаты работы алгоритма определения временного положения пачки импульсов и их отклонения от оценок, определяемых квалифицированным оператором $\varepsilon = i_{пи}^э - i_{пи}^a$. При этом оценка определялась по наблюдению всего участка осциллограммы, содержащего полезный сигнал. Для алгоритма использовались окна различной длительности. Серым цветом выделены ячейки, в которых отклонение от оценки оператора превышает 1500 отсч., обеспечивающих точность оценки угла лучше 5^0 , и скорости лучше 0.1 м/с в рабочей области. Видно, что большие ошибки в определении положения пачки возникли для одинаковых записей при разных размерах окна, что объясняется значительным отклонением формы огибающей исследуемых сигналов от используемой модели. Анализ данных табл. 1 показывает, что в большинстве

случаев приемлемая точность (меньшее количество значительных ошибок в соответствующем столбце) достигается при размере окна 500 и 250 отсч.

Результаты исследования алгоритма показывают его применимость для обработки сейсмических сигналов. При этом он обладает приемлемой с точки зрения решаемых локационных задач точностью. Так, бóльшая часть отклонений от оценок оператора ε_τ , приведённых в табл. 1, меньше 1500 отсч., что согласно п. 2.4 обеспечивает точность оценки угла лучше 5^0 , и скорости лучше 0.1 м/с при $|\alpha| \leq 70^0$.

Третий раздел посвящен оценке временных параметров сейсмического сигнала человека, связанных с изменением условий функционирования ССО, для решения задач автоматической настройки алгоритмов ССО. К таким параметрам относятся длительность импульса τ_k , $k = 1..K$, и длительность пачки $\tau_{\text{пи}}$. При реализации алгоритмов определения временных параметров сейсмического сигнала требуется знание временных положений импульсов i_k , $k = 1..K$. Алгоритм их оценки описывается в п. 3.1. Интервалы между шагами $(i_k - i_{k-1})$ изменяются случайным образом, имеют известное среднее значение T и случайную компоненту ΔT_k , наличие которой компенсирует некоторую неточность предварительного определения величины T , а также её непостоянство. Поскольку последовательности $\{i_k, k = 1..K\}$ и $\{\Delta T_k, k = 1..K\}$ связаны однозначной зависимостью $i_k - i_{k-1} = T + \Delta T_k$, в диссертации разработан алгоритм получения оценок второй из этих последовательностей, при этом принималось, что отклонения ΔT_k временных положений импульсов от среднего периода повторения образуют марковскую последовательность.

Задача состоит в текущем оценивании случайной величины ΔT_k по наблюдаемым данным, отвечающем байесовскому критерию оптимальности. В качестве наблюдаемых на k -м шаге данных при оценке отклонения ΔT_k используется вектор, составленный из элементов исходного наблюдения, попадающих в окрестности δ_k точек i_k истинного нахождения сигналов: $\bar{X}_k = \{X[i] | i \in \delta_k\}$. При неизвестных значениях i_k окрестности δ_k формируются динамически, используются оценки i_k^* , полученные на предыдущих шагах работы. Случайный характер оцениваемого параметра, наличие случайных шумов определяют статистическую природу задачи, а изменение информационного параметра сигнала во времени относит его измерение к числу задач фильтрации. Вероятностная модель процесса позволяет воспользоваться байесовским принципом, согласно которому в качестве оптимальной оценки вычисляется апостериорное математическое ожидание. Поскольку оцениваемый параметр является марковским процессом, реализуется рекуррентный алгоритм фильтрации. На k -м шаге работы алгоритма используются значения параметров, полученные на предыдущем шаге. В качестве начальных условий задаётся ожидаемое временное положение первого импульса i_1 и предполагаемая точность его оценки, определяемая дисперсией D_1 и отклонением ΔT_1 . Вычисление оценки

i_k^* времени появления k -го импульса в сигнале рассматриваемого СП осуществляется согласно выражению $i_k^* = i_{k-1}^* + T + \Delta T_k^*$.

Работа алгоритма исследовалась экспериментально на математической модели. Статистический эксперимент проводился путем генерирования и обработки 100 реализаций, содержащих по 50 импульсов. В диссертации получены зависимости СКО оценки временных положений импульсов от ОСШ при различных дисперсиях отклонений временных положений импульсов от среднего периода $D_{\Delta T}$. С ростом ОСШ увеличивается точность оценки параметра. Увеличение дисперсии $D_{\Delta T}$ приводит к росту СКО. Также имеется зависимость СКО оценки временных положений импульсов от коэффициента одношаговой корреляции γ при различных ОСШ. При большом ОСШ ($q^2 = 100$) можно говорить о слабой зависимости СКО от γ . Однако, при $q^2 = 1$ эффективность алгоритма фильтрации с ростом γ увеличивается.

При применении байесовских методов обработки сейсмических сигналов возникает проблема отсутствия данных о параметрах сигналов и помех. Одним из способов её решения является использование вместо истинных значений параметров их оценок. Изучение влияния параметрических расстройок на точность работы алгоритма проводилось методом статистического моделирования. Получены зависимости СКО оценки временных положений импульсов от расстройки по ОСШ при различных значениях истинных ОСШ. Ошибка оценивания минимальна для $q_0^2 = q_{и}^2$. При отклонении q_0^2 от $q_{и}^2$ ошибка возрастает. При $q_0^2 > q_{и}^2$ могут возникать аномальные ошибки, то есть ситуации, когда СКО превышает некоторую установленную величину (например, $\sigma_\varepsilon > \tau$, где τ – средняя длительность импульса). При проведении экспериментов при $q_0^2 < q_{и}^2$ аномальных ошибок не наблюдалось. Необходимо отметить, что при увеличении $q_{и}^2$ и неизменном q_0^2 , ошибка оценивания уменьшается. Так как сейсмосигнал характеризуется различными значениями ОСШ для каждого импульса, при его обработке необходимо задаваться некоторым минимальным q_0^2 (например, $q_0^2 = 5$). Заметим, что возникновение аномальной ошибки для измерительной процедуры, которую можно интерпретировать как работу следящей системы, не означает срыва слежения. Как показывают эксперименты, в большинстве случаев система возвращается к режиму нормальных ошибок. Это объясняется тем, что при достаточно больших размерах окрестности δ_k в рабочей зоне даже при значительных локальных ошибках оказываются участки импульса. Это приводит к корректирующим воздействиям в работе алгоритма на следующих шагах, возвращающим измерения в состояние нормальных ошибок.

В диссертации получены и исследованы зависимости СКО оценки временных положений импульсов от расстроек по коэффициенту одношаговой корреляции ν_γ , по дисперсии отклонений временных положений импульсов от

среднего периода ν_D и по длительности импульса ν_τ . Рассмотрена зависимость СКО оценки временных положений импульсов от расстройки по среднему периоду следования ν_T . Ошибка оценивания минимальна при нулевой расстройке. При малых расстройках ($\nu_T < 0.1 \cdot T$) СКО возрастает незначительно, затем (при $\nu_T > 0.1 \cdot T$) наблюдается резкий рост. Это обусловлено появлением значительного количества аномальных ошибок, что в свою очередь зачастую приводит к полному срыву работы алгоритма и невозможности возвращения его в режим получения точных оценок. Очевидно, что к точности определения среднего периода T необходимо предъявлять высокие требования.

В целом, результаты моделирования подтверждают применимость разработанного алгоритма для обработки сигнала в условиях неизвестных параметров. При этом некоторые параметры, например, длительность импульса и дисперсия его временного положения, могут быть предварительно (до начала работы алгоритма) оценены с невысокой точностью (расстройка может составлять 50% от величины истинного значения параметра). Другие (ОСШ, коэффициент одношаговой корреляции) могут быть заменены на постоянные. Средний период следования импульсов должен оцениваться с высокой точностью (относительная расстройка не должна превышать 10%).

В п. 3.2 описывается алгоритм оценки длительности пачки импульсов, основанный на методе МП. Согласно предложенной математической модели, информация о длительности пачки заключена в функции $D[i, i_{\text{пи}}]$, описывающей изменение дисперсии в пределах пачки импульсов, значит, основой измерений служит анализ текущей интенсивности сейсмического сигнала. Для построения алгоритма определения длительности пачки формируется вспомогательная последовательность $\bar{U} = \{\bar{U}_k, k = 1 \dots K\}$, (K – количество импульсов в пачке), элементами которой будут векторы $\bar{U}_k = \{X[i], i \in [i_k - \Delta i_k; i_k + \Delta i_k]\}$, состоящие из отсчетов исходного наблюдения, попадающих в окрестность $2\Delta i_k$ точки i_k , которая является временным положением k -го импульса. В работе получено уравнение максимального правдоподобия:

$$\sum_{k=1}^K \frac{d_k(\tau_{\text{пи}})(i_k - i_{\text{пи}})^2}{(d_k(\tau_{\text{пи}}) + D_\Phi)} \left(\frac{\sum_{i_k - \Delta i_k}^{i_k + \Delta i_k} U_k^2[i]}{2(d_k(\tau_{\text{пи}}) + D_\Phi)} - 2\Delta i_k \right) = 0. \quad (4)$$

На численном решении уравнения (4) основана реализация алгоритма определения длительности пачки $\tau_{\text{пи}}$. Исследование алгоритма производилось методом статистического моделирования. При проведении экспериментов предполагалось, что временные положения импульсов известны точно.

Характерными являются зависимости смещения и СКО оценки длительности пачки от размера окрестности Δi_k . Уже при окрестности, равной длительности импульса $\tau_{\text{и}}$, имеется смещение получаемых оценок длительности пачки $\tau_{\text{пи}}^*$. Это может быть вызвано тем, что при достаточно большом размере

окрестности Δi_k наблюдается отклонение от модели, описывающей вспомогательную последовательность \bar{U} . В то же время, анализ величины смещения относительно длительности пачки показывает, что даже при размере окна $\Delta i_k = 3\tau_{\text{и}}$, она не превышает 15% от $\tau_{\text{пи}}$, что является пренебрежимо малой величиной. Увеличение Δi_k приводит к уменьшению СКО оценки длительности пачки, что вызвано увеличением объема обрабатываемых данных. При обработке реального сигнала временные положения импульсов определяются с некоторой погрешностью, значит, выбор наименьшего размера окрестности Δi_k не гарантирует достижение наименьшей ошибки в оценке длительности пачки $\tau_{\text{пи}}^*$. В этом случае центр окна длительностью $2\Delta i_k$ не совпадает с реальным положением импульса. А если ошибка определения временных положений импульсов достаточно велика, наблюдается отклонение от модели вспомогательной последовательности \bar{U} , что в свою очередь приводит к возрастанию погрешности оценки длительности пачки. Исходя из всего выше сказанного, целесообразным представляется выбор размера окрестности Δi_k , равным или превышающим ожидаемую длительность импульса не более чем на 50%.

В п. 3.3 разрабатывается алгоритм оценки длительностей импульсов, основанный на методе МП. Длительность импульса определяется свойствами грунта, которые в свою очередь зависят от природно-климатических факторов. Например, для сейсмического сигнала, записанного зимой, $\tau_{\text{и}} = 50$ отсч., а для сигнала, записанного летом, $\tau_{\text{и}} = 20$ отсч. Оценка длительности импульса осуществляется при помощи двухэтапной процедуры. Сначала определяются длительности отдельных импульсов в пачке, затем производится усреднение по всем импульсам. Оценка длительности k -го импульса τ_k^* в пачке находится на основе метода МП. В качестве наблюдаемых на k -м шаге данных используется вектор, составленный из элементов исходного наблюдения, попадающих в окрестности Δi точек i_k положения импульсов: $\bar{X}_k = \{X[i], i \in \Delta i\}$. Длительность импульса определяется из уравнения максимального правдоподобия

$$\sum_{i=i_{\text{min}}^k}^{i_{\text{max}}^k} \frac{D[i, \tau_k](i - i_k)^2}{(D[i, \tau_k] + D_{\Phi})} \left(\frac{X^2[i]}{(D[i, \tau_k] + D_{\Phi})} - 1 \right) = 0. \quad (5)$$

При помощи (5) оценивается длительность k -го импульса в пачке. При численном решении (5) для всех $k = 1 \dots K$, входящих в состав наблюдаемого сигнала, находится множество независимых оценок $\tau_1^*, \tau_2^* \dots \tau_K^*$.

Анализ точности алгоритма определения длительности импульса производился методом статистического моделирования. Эксперимент проводился путем генерирования и обработки ансамбля из 100 сигналов, содержащих по 50 импульсов. Предполагалось, что интенсивность D_k всех импульсов одинаковая. На точность получения оценок влияют ОСШ и истинная длительность импульса, также наблюдается зависимость от размера интервала Δi . Характерными являются зависимости смещения и СКО оценки длительности импульса от

размера интервала Δi . Разработанный алгоритм обеспечивает несмещённость оценки, а СКО оценки значительно уменьшается с увеличением интервала наблюдения. При этом бесконечному увеличению интервала Δi препятствует квазипериодичность сейсмического сигнала шагов человека.

При работе предложенного алгоритма требуется знание ОСШ, что невозможно в условиях априорной неопределённости, которая возникает из-за изменяющихся фоновой обстановки и свойств грунта, и из-за отсутствия информации об удалённости траектории движения объекта от СП. Решение этой проблемы заключается в использовании оценки ОСШ, обычно несовпадающей с истинным значением. В диссертации изучено влияние расстройки по ОСШ на точность оценок длительностей импульсов. Модуль математического ожидания и СКО минимальны при нулевой расстройке по ОСШ. При $q_{и}^2 > q_0^2$ наблюдается менее резкое увеличение погрешности оценки, чем при $q_{и}^2 < q_0^2$. Это говорит о том, что при установке q_0^2 необходимо задаваться заведомо меньшим значением параметра, что позволит обрабатывать сигнал с различным ОСШ достаточно точно, не прибегая при этом к адаптивной подстройке.

П. 3.4 посвящён исследованию разработанных алгоритмов на записях сейсмических сигналов. Квалифицированным оператором определялось отношение дисперсии пачки к дисперсии фона q_0^2 . В табл. 2 приведены результаты работы алгоритма определения положений импульсов i_k^a и их отклонения от оценок квалифицированного оператора $\varepsilon_k = i_k^э - i_k^a$. Оператором определялись положения сейсмических импульсов, соответствующие временному положению их энергетических центров. Поскольку в исследуемых сигналах наблюдалось несколько десятков импульсов, была возможной оценка математического ожидания m_ε и СКО σ_ε отклонений от оценок $i_k^э$. Также приведены результаты работы алгоритма определения длительностей импульсов $\tau_{и}^a$, их отклонения от оценок оператора $\varepsilon_{и} = \tau_{и}^э - \tau_{и}^a$, результаты работы алгоритма определения длительностей пачки $\tau_{пч}^a$ и их отклонения от оценок оператора $\varepsilon_{пч} = \tau_{пч}^э - \tau_{пч}^a$.

Анализ данных, приведенных в табл. 2, показывает, что в большинстве случаев наблюдается уменьшение ошибок с ростом ОСШ. Серым цветом выделены ячейки, соответствующие существенным ошибкам в оценке параметров. Аномальные ошибки выделены курсивом. Аномальная ошибка – это ошибка, превышающая некоторое значение, например, $\varepsilon_{и} > \tau_{и}^э$; $\varepsilon_{пч} > \tau_{пч}^э$; $\sigma_\varepsilon > \tau_{и}^э$. Ошибка в оценке длительности пачки приводит к неточностям в определении её временного положения. Если рассматривать наибольшую ошибку $\varepsilon_{пч} = 1511$ отсч., приведённую в табл. 2, то, в конечном счёте, математическое ожидание $m_{\Delta\alpha}$ ошибки определения угла α не превысит 0.5^0 для $\sigma = 1500$ отсч. в рабочей области. СКО оценки угла $\sigma_{\Delta\alpha}$ не превысит 14^0 для $\sigma = 1500$ отсч. в рабочей области. Заметим, что для $\sigma = 1500$ отсч. область малых

смещений уменьшается и составляет $\alpha = \{-50^0 \dots 50^0\}$. При оценке модуля вектора скорости рабочая область также уменьшается, если $\sigma = 1500$ отсч. При этом смещение оценок $m_{\Delta V}$ в рабочей области ($\alpha = \{-50^0 \dots 50^0\}$) не превышает 0.5 м/с при истинном значении модуля вектора скорости 2 м/с. Заметим, что при $\sigma = 1500$ отсч. происходит значительное ухудшение СКО оценок модуля вектора скорости. Появляются выбросы $\sigma_{\Delta V}$, которые сравнимы с истинным значением или во много раз превосходят его. Это говорит о невозможности применения траверзного метода для оценки модуля вектора скорости в условиях значительных ошибок в определении длительности пачки импульсов. Однако стоит отметить, что рассматриваемая ошибка $\varepsilon_{\text{пи}}$ получена при весьма малом ОСШ $q_3^2 = 48$, кроме того, форма исследуемого сигнала значительно отличалась от формы сигнала, принятой в математической модели.

Таблица 2

Точность алгоритмов оценки временных параметров сейсмосигналов

q_3^2	Длительность импульса, отсч.			Длительность пачки, отсч.			Положение импульсов, отсч.	
	$\tau_{\text{и}}^{\text{э}}$	$\tau_{\text{и}}^{\text{а}}$	$\varepsilon_{\text{и}}$	$\tau_{\text{пи}}^{\text{э}}$	$\tau_{\text{пи}}^{\text{а}}$	$\varepsilon_{\text{пи}}$	m_{ε}	σ_{ε}
14	30	31	-1.0	3833	5032	-1199	4.9	37.3
25	30	29.6	0.4	4833	5517	-684	-2.5	41.2
48	20	19.7	0.3	7000	8511	-1511	12.1	41
79	35	45.4	-10.4	4083	5052	-969	5.2	18.3
4667	30	30.9	-0.9	5000	5126	-126	2.3	11.3
31447	30	31.5	-1.5	5800	4492	1308	2.5	27.3
34169	30	32.3	-2.3	4000	3047	953	6.4	35.7
52817	30	36.8	-6.8	2000	1705	295	3.3	27.4

Ошибка в оценке $\tau_{\text{и}}$ приводит к ошибкам в определении временных положений импульсов. Наибольшая ошибка $\varepsilon_{\text{и}} = -10.4$ отсч., указанная в табл. 2, приводит к СКО оценки положения импульсов, не превышающему 5 отсч. (25% длительности импульса) для $q^2 = 10$, что является приемлемой точностью, так как позволяет избежать срывов слежения. Значительные СКО положений импульсов могут быть вызваны нерегулярностью движения объектов, которым соответствуют исследованные сигналы. Высокий уровень сейсмического фона обуславливает аномально высокое СКО для q_3^2 , равного 14, 25 и 48, которое, однако, не свидетельствует о срыве слежения. Как показывают эксперименты, система возвращается к режиму нормальных ошибок.

В заключении формулируются основные результаты диссертационного исследования. **Приложение 1** содержит акт об использовании результатов диссертационной работы в проектно-конструкторской деятельности ФГУП ПО «Север» при разработке новейших образцов сейсмических систем охраны. В **приложении 2** определяются моменты распределения погрешностей определения временных задержек δt_{10} , δt_{02} , используемые при расчёте точности

траверзного метода. В **приложении 3** показан пример изменения нумерации датчиков в локальной группе с целью возвращения оценки координат объекта по траверзному методу в область несмещённости и высокой точности. **Приложение 4** посвящено выводу выражения для расчёта потенциальной точности алгоритма определения временного положения пачки импульсов. В **приложении 5** приведён вывод уравнения МП для определения длительности импульса.

Основные результаты работы. В диссертации решена проблема получения оценок временных параметров сигналов сейсмической системы охраны, являющаяся важным звеном в общей задаче построения математического и программного обеспечения автоматической ССО. Основные результаты исследований заключаются в следующем:

- Разработана феноменологическая модель сейсмического сигнала человека, которая описывает все характерные признаки сейсмических сигналов. Показано, что модель позволяет синтезировать достаточно простые и быстрые алгоритмы статистической обработки сигналов, обладающие приемлемой точностью, что подтверждается их исследованием методом цифрового статистического моделирования и при испытаниях на реальных сигналах.

- Исследована точность траверзного метода, определена рабочая область, в пределах которой оценки угла направления движения объекта и модуля вектора его скорости являются несмещёнными и слабо флюктуирующими. Даны рекомендации по корректировке вычислений при выходе за границы этой области.

- Разработан и исследован методом статистического моделирования и экспериментально на реальных сигналах алгоритм оценки временного положения пачки импульсов, который применяется для определения параметров движения объекта в ССО при помощи траверзного метода. Проведено сравнение качества разработанного алгоритма с потенциально достижимым. Использование разработанного алгоритма позволяет получить результат с приемлемой точностью уже при наблюдении половины пачки импульсов.

- Разработан и исследован методом статистического моделирования и на записях сигналов марковский алгоритм оценки временных положений импульсов, который предназначен для разностно-дальномерного метода определения координат движущегося человека, а также для реализации автоматической настройки алгоритмов ССО при изменяющихся внешних условиях. Результаты моделирования подтверждают применимость разработанного алгоритма для обработки сигнала в условиях неизвестных параметров. Кроме того, как показывают результаты исследования алгоритма на записях сигналов, при возникновении аномальных ошибок измерения система способна возвращаться в режим нормальных измерений, что позволяет избежать срыва слежения.

- Разработан и исследован методом статистического моделирования и на записях сигналов алгоритм оценки длительности пачки импульсов, который может применяться для реализации автоматической настройки алгоритмов ССО при изменяющихся внешних условиях. Показано, что при верно выбранном размере окрестности (равном или превышающем ожидаемую длительность

импульса не более чем на 50%) при формировании вспомогательной последовательности алгоритм обладает достаточно высокой точностью.

▪ Разработан алгоритм оценки длительности импульса, который используется при реализации автоматической настройки алгоритмов ССО в изменяющихся внешних условиях. Результаты исследования методом статистического моделирования и на записях реальных сигналов показывают достаточно высокую точность этого алгоритма, а также его применимость для обработки сигнала в условиях неизвестных параметров.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Спектор А.А., Филатова С.Г. Оценка временного положения импульсов в сейсмических системах наблюдения на основе марковской фильтрации // Автометрия. 2008. № 4. С. 68 – 74.
2. Спектор А.А., Филатова С.Г. Определение временных положений сигналов для оценки движения человека в сейсмической системе охранного наблюдения // Научный вестник НГТУ. 2009. №3. С. 57 – 66.
3. Спектор А.А., Филатова С.Г.. Марковское оценивание временного положения импульсов в сейсмической системе наблюдения // Сб. науч. тр. конф. «Современные проблемы радиоэлектроники». М. : Радио и связь, 2006. С. 41 – 44.
4. Филатова С.Г. Влияние параметрических расстройек на точность марковского оценивания временных положений импульсов // Сб. науч. тр. конф. «Современные проблемы радиоэлектроники». Красноярск : Изд-во СФУ, 2007. С. 48 – 51.
5. Filatova S.G. Markovian Estimation of Pulses Time Positions in Seismic Observing System // International Workshop and Tutorials on Electron Devices and Materials Proceedings. 8th Annual. Erlagol, Altai, July 1-5, 2007. Novosibirsk : NSTU, 2007. P. 184 – 186. [Марковская оценка временного положения импульсов в сейсмической системе наблюдения]
6. Опыт повышения эффективности системы охранной сигнализации при использовании специальных методов цифровой обработки сигналов / Гребенщиков К.Д. [и др.] // Труды 4-й межд. науч. - практ. конф. «Электронные средства и системы управления. Опыт инновационного развития». Томск : Изд-во ТУСУР, 2007. Ч. 1. С. 277 – 279.
7. Филатова С.Г. Статистическое моделирование при оценке временных положений импульсов в сейсмической системе наблюдения // Материалы II Всеросс. науч. конф. с межд. участием «Проблемы развития и интеграции науки, профессионального образования и права в глобальном мире». Красноярск : Изд-во СФУ, 2007. Ч. 1. С. 354 – 359.
8. Филатова С.Г. Принцип построения траектории движения объекта в сейсмической системе наблюдения // Сб. науч. тр. конф. «Современные проблемы радиоэлектроники». Красноярск : Изд-во СФУ, 2008. С. 43 – 46.

9. Filatova S.G., Spector A.A. The determination of the pulse packet time position in a seismic guard system // International Workshop and Tutorials on Electron Devices and Materials Proceedings. 9th Annual. Erlagol, Altai, July 1-5, 2008. Novosibirsk: NSTU, 2008. P. 163 – 165. [Определение временного положения пачки импульсов в сейсмической системе охраны]
10. Спектор А.А., Филатова С.Г. Оценка информационного параметра для построения траектории движения объекта в сейсмической системе охраны // Материалы IX международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения». Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2008. Т. 4. С. 31 – 33.
11. Райфельд М.А, Спектор А.А., Филатова С.Г. Траверзный метод построения траектории движения объекта в сейсмической системе наблюдения // Сб. науч. тр. конф. «Современные проблемы радиоэлектроники». Красноярск : Изд-во СФУ, 2009. С. 42 – 45.
12. Спектор А.А., Филатова С.Г. Определение длительностей импульсов в сейсмической системе охраны // Сб. науч. тр. конф. по микро/нанотехнологиям и электронным приборам EDM'2009. Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2009. С. 184 – 186.
13. Спектор А.А., Филатова С.Г. Оценка временного положения импульса в сейсмической системе мониторинга движений объекта // Сб. науч. тр. НГТУ. Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2007. Вып. 1. С. 51 – 56.
14. Спектор А.А., Филатова С.Г. Исследование влияния параметрических расстройек на точность определения временных положений импульсов // Сб. науч. тр. НГТУ. Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2007. Вып. 3. С. 63 – 68.
15. Райфельд М.А, Спектор А.А., Филатова С.Г. Определение направления и скорости движения объекта в сейсмической системе охранного наблюдения // Сб. науч. тр. НГТУ. Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2008. Вып. 4. С. 45 – 52.
16. Спектор А.А., Филатова С.Г. Совместная обработка сигналов группы датчиков при построении траектории движения объекта в сейсмической системе наблюдения // Сб. науч. тр. НГТУ. Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2008. Вып. 4. С. 53 – 58.