

На правах рукописи

Курбатов Александр Витальевич

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Курбатов', written in a cursive style.

**ДИСТАНЦИОННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ  
ДВИЖЕНИЯ В УСЛОВИЯХ АПРИОРНОЙ  
ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ПРИ  
ЗОНДИРОВАНИИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬЮ  
ОПТИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ**

Специальность 01.04.03 — Радиофизика

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Воронеж — 2015

Работа выполнена в Воронежском государственном университете

**Научный руководитель:** доктор технических наук  
профессор  
ТРИФОНОВ Андрей Павлович

**Официальные оппоненты:** ЛУКИН Александр Николаевич  
доктор физико-математических наук,  
профессор, Воронежский  
институт МВД России,  
профессор кафедры физики,  
  
КОНДРАТОВИЧ Павел Александрович  
кандидат физико-математических наук,  
ЗАО “ПКК МИЛАНДР”,  
инженер 1-ой категории.

**Ведущая организация:** ФГОБУ ВПО “Поволжский государствен-  
ный университет телекоммуникаций и информатики”, г. Самара.

Защита состоится 28 мая 2015 г. в 15<sup>20</sup> на заседании диссертационного  
совета Д.212.038.10 при Воронежском государственном университете по  
адресу: 394006, г. Воронеж, Университетская пл., 1, ВГУ, физический  
факультет, ауд. 428.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке  
Воронежского государственного университета по адресу 394006, г. Воро-  
неж, Университетская площадь, 1, и на сайте ВУЗа <http://www.vsu.ru>, с  
авторефератом — также на сайте Высшей аттестационной комиссии при  
Министерстве образования и науки РФ <http://vak.ed.gov.ru>.

Автореферат разослан “     ” апреля 2015 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



МАРШАКОВ  
Владимир Кириллович

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** Появившаяся в последнее время возможность формирования сверхкоротких лазерных импульсов позволяет производить измерение радиальных параметров движения с высокой разрешающей способностью. Одновременно имеется возможность создания детекторов, реагирующих на каждый отдельный квант света. Наконец, современные компьютерные технологии позволяют реализовывать сложные алгоритмы в реальном времени. Тем самым появляются условия для увеличения точности устройств, производящих оптические измерения. В связи с этим возникает задача нахождения предельно возможной точности измерений, иными словами, задача нахождения характеристик эффективных оценок, а также исследование различных алгоритмов с целью определения условий, при которых эти алгоритмы близки к эффективным. Эта задача актуальна, поскольку область применения оптических измерений весьма обширна и продолжает расширяться.

Основой работы систем оптической локации, навигации и связи является обработка принимаемых оптических сигналов с целью определения местоположения объекта (дальности и направления на него), его скорости, ускорения и т. п. Оптический сигнал в виде потока фотонов поступает на вход фотодетектора, в результате чего на его выходе образуется поток фотоэлектронов. При весьма широких предположениях поток фотоэлектронов подчиняется распределению Пуассона. В любом случае образующийся поток фотоэлектронов является стохастическим. Кроме того, полезный сигнал, формирующийся в результате прохождения через неоднородности атмосферы и отражения посылаемого сигнала от цели, искажается в значительной мере случайным образом. Таким образом, задача обработки оптических сигналов является статистической задачей и ее естественно решать в рамках статистической радиофизики.

**Целью работы является** статистическое исследование нескольких близких к эффективным алгоритмов оценки параметров движения при оптическом зондировании цели, а также сравнение между собой их характеристик точности и сложности аппаратной реализации. Более детально цель работы сводится к следующему.

- ✓ Нахождение характеристик совместно-эффективных оценок дальности, скорости и ускорения в условиях параметрической априорной неопределенности.
- ✓ Исследование метода максимального правдоподобия (МП) в усло-

виях медленных и быстрых флуктуаций цели.

- ✓ Синтез квазиправдоподобного алгоритма и расчет его характеристик.
- ✓ Синтез квазиоптимального алгоритма и расчет его характеристик.
- ✓ Исследование влияния аномальных ошибок (пороговых явлений) на точность квазиправдоподобных и квазиоптимальных оценок.
- ✓ Подтверждение теоретических выводов и нахождение границ их применимости с помощью статистического моделирования.
- ✓ Проведение качественного сравнения сложности аппаратурной реализации исследуемых алгоритмов.

**Методы проведения исследования.** При решении задач, поставленных в диссертационной работе, использовались современные методы математического анализа, теории вероятностей и математической статистики, теории статистических решений и статистической радиофизики, методы моделирования на ЭВМ стохастических случайных процессов, а также алгоритмов их анализа.

**Научная новизна.** Получены асимптотические аналитические выражения для характеристик совместно-эффективных оценок параметров движения (дальности, скорости и ускорения) в условиях параметрической априорной неопределенности. Найдены асимптотические характеристики оценок максимального правдоподобия параметров движения в условиях параметрической априорной неопределенности как в случае медленных, так и быстрых флуктуаций. Синтезированы новые квазиправдоподобный и квазиоптимальный алгоритмы оценки параметров движения. Найдены характеристики синтезированных алгоритмов, включая пороговые. Показано, что для того чтобы характеристики точности оценок как алгоритма максимального правдоподобия в условиях быстрых флуктуаций, так и квазиоптимального алгоритма при условии совпадения форм интенсивности принимаемых и ожидаемых импульсов интенсивностей принимаемого и ожидаемого шумов, были близки к эффективным, необходимо обеспечивать большие значения отношения сигнал-шум для каждого импульса последовательности; а для достижения близости характеристик точности оценок максимального правдоподобия в условиях медленных флуктуаций, а также квазиправдоподобных оценок, к эффективным, необходимо обеспечить большие значения отношения сигнал-шум для последовательности импульсов в целом.

## **Научные положения, выносимые на защиту.**

- ✓ Характеристики точности совместно-эффективной оценки, а также структура и характеристики точности максимально правдоподобного, квазиправдоподобного и квазиоптимального алгоритмов.
- ✓ Обоснование асимптотической эффективности алгоритма максимального правдоподобия при любом количестве неизвестных неформативных регулярных параметров.
- ✓ Условия, при которых квазиправдоподобная и квазиоптимальная оценки являются асимптотически эффективными и состоятельными.
- ✓ Границы применимости квазиоптимального метода оценки посредством статистического моделирования.
- ✓ Рекомендации по выбору алгоритма оценки параметров движения, исходя из априорной информации, отношения сигнал-шум и требований к сложности аппаратурной реализации.

**Достоверность научных положений.** Достоверность полученных результатов подтверждается корректным использованием общетеоретических положений статистической радиофизики, а также теории вероятностей и математической статистики, результатами статистического моделирования на ЭВМ и совпадением результатов диссертации с известными в ряде частных случаев.

**Теоретическая и практическая ценность.** Установлено, что в условиях параметрической неопределенности оценка максимального правдоподобия является из рассматриваемых наиболее точной, но и наиболее сложно аппаратурно реализуемой, а квазиоптимальная оценка — наименее точной, но наиболее просто аппаратурно реализуемой. Полученные в работе характеристики позволяют сделать обоснованный выбор между предлагаемыми алгоритмами оценки параметров движения, исходя из априорной информации и требований к точности и сложности аппаратурной реализации. Найдены простые достаточные условия, накладываемые на форму интенсивности принимаемого и ожидаемого сигналов, гарантирующие состоятельность оценок. Разработан алгоритм статистического моделирования, позволяющий получать характеристики оценок. Результаты работы могут быть использованы для обработки измерений дальности высокоточными лазерными дальномерами с целью получения дополнительной информации о скорости и ускорении цели.

**Внедрение научных результатов.** Работа над диссертацией прово-

дилась в рамках научно-исследовательской тематики кафедры радиофизики Воронежского госуниверситета и была поддержана грантами РФФИ (проекты №13-01-97504 и №13-08-00735), а также грантами федеральной целевой программы “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” на 2009-2013 годы № 14.В37.25.2102 по теме “Разработка радиолокационных методов дистанционного зондирования и мониторинга морской поверхности и ледовой обстановки для обеспечения безопасности разработки новых энергоэффективных северных морских месторождений углеводородов и их добычи”, № 14.В37.25.2032 по теме “Разработка статистических методов обработки и анализа сверхширокополосных сигналов и полей при наличии случайных искажений в условиях комплексной априорной неопределенности” и № 14.В37.25.2015 по теме “Разработка методов статистического анализа нестационарных случайных процессов в условиях параметрической неопределенности при скачкообразно-плавном изменении их статистических характеристик”. Полученные результаты внедрены в научно-исследовательской и учебной работе на кафедре радиофизики Воронежского государственного университета.

**Апробация работы.** Основные положения диссертации были представлены в виде докладов и обсуждались на XV, XVII, XVIII, XIX, XX Международных научно-технических конференциях “Радиолокация, навигация, связь”, Воронеж, 2009, 2011, 2012, 2013, 2014 и XV Международной научно-технической конференции “Кибернетика и высокие технологии 21 века”, Воронеж, 2010.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 11 работ, из них 5 работ — в изданиях, рекомендованных ВАК для публикации результатов диссертационных работ.

**Личный вклад автора.** В совместных работах научному руководителю принадлежат постановка задач и определение направлений, в которых нужно вести исследования. Конкретизация решения поставленных теоретических задач, подробное проведение рассуждений, доказательства, расчетов и проведение статистического моделирование на ЭВМ принадлежат диссертанту.

**Структура и объем работы.** Диссертация изложена на 216 страницах и состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы из 133 названия и 38 рисунков.

## Основное содержание работы

Во введении к диссертации обсуждается актуальность темы исследования, приведен краткий обзор известных результатов по вопросам оптической локации, а также синтеза и анализа алгоритмов обработки оптических импульсов. Сформулирована тема работы, в аннотированном виде изложены основные результаты диссертационной работы.

**В первой главе** изучаются совместно-эффективные оценки и оценки максимального правдоподобия (МП) дальности, скорости и ускорения в условиях параметрической априорной неопределенности, связанной с наличием конечного числа неизвестных неинформативных параметров у рассеянной последовательности оптических импульсов и вызванной как быстрыми, так и медленными флуктуациями цели.

На протяжении всей диссертации предполагается, что излучается последовательность оптических импульсов с интенсивностью

$$s_N(t) = \sum_{k=0}^{N-1} \hat{s}(t - (k - \mu)\vartheta - \lambda), \quad (1)$$

где  $\hat{s}(t)$  — функция, описывающая интенсивность отдельного оптического импульса,  $\lambda$  — временное положение,  $\vartheta$  — период повторения импульсов. Параметр  $\mu$  определяет точку последовательности, с которой связано временное положение  $\lambda$ . Так, при  $\mu = 0$  величина  $\lambda$  определяет временное положение первого импульса, при  $\mu = (N - 1)/2$  — временное положение середины последовательности (1), а при  $\mu = N - 1$  — временное положение последнего импульса последовательности. Полезный сигнал возникает в результате рассеяния последовательности оптических импульсов (1) объектом, обладающим дальностью  $R_0$  и радиальными скоростью  $V_0$  и ускорением  $A_0$ . Всегда предполагается, что  $|V_0| \ll c$  и  $N\vartheta|A_0| \ll c$ , где  $c$  — скорость света. Подчеркнем, что индексом ноль всегда отмечаются истинные значения неизвестных параметров.

В главе 1 предполагается, что форма интенсивности рассеянного сигнала известна лишь с точностью до некоторого конечного числа неинформативных параметров. Если значения неинформативных параметров не меняются от импульса к импульсу, т.е. интенсивность рассеянной последовательности импульсов имеет вид

$$s(t, R_0, V_0, A_0, \vec{l}_0) = \sum_{k=0}^{N-1} s_0(t - 2R_0/c - (k - \mu)(1 + 2V_0/c)\vartheta - A_0(k - \mu)^2\vartheta^2/c, \vec{l}_0), \quad (2)$$

то флуктуации цели называют медленными. Здесь функция  $s_0(t, \vec{l}_0)$  описывает форму интенсивности одного рассеянного оптического импульса последовательности (2) и, в общем случае, отличается от  $\hat{s}(t)$  в (1),  $\vec{l}_0$  — вектор неинформативных параметров,  $c$  — скорость света. Если же значения неинформативных параметров разные у различных импульсов, т.е. форма интенсивности рассеянного сигнала имеет вид

$$s(t, R_0, V_0, A_0, \vec{L}_0) = \sum_{k=0}^{N-1} s_0(t - 2R_0/c - (k - \mu)(1 + 2V_0/c)\vartheta - A_0(k - \mu)^2\vartheta^2/c, \vec{l}_{0k}), \quad (3)$$

где  $\vec{l}_{0k}$  — набор неинформативных параметров для  $k$ -го импульса, а  $\vec{L}_0 = (l_{00}, \dots, l_{0N-1})$  — набор всех параметров, то флуктуации цели называют быстрыми.

Сигнал с интенсивностью (2) или (3) наблюдается на отрезке времени  $[0, T]$  на фоне оптического шума с постоянной интенсивностью  $\nu$ . Следовательно, обработке доступна реализация  $\pi(t)$  пуассоновского процесса с интенсивностью

$$\beta(t, R, V, A, \vec{l}) = s(t, R, V, A, \vec{l}) + \nu. \quad (4)$$

В главе 1 вычислены дисперсии и коэффициенты корреляции для эффективных оценок и оценок МП параметров  $R$ ,  $V$  и  $A$ , как в случае медленных флуктуаций цели, так и в случае быстрых, как при совместном, так и при отдельном определении всех трех параметров движения. Исследовано влияние на эти величины наличия неинформативных параметров.

Оценки максимального правдоподобия (МП) формируются на основе нахождения логарифма функционала отношения правдоподобия (ФОП)

$$L(R, V, A, \vec{l}) = \int_0^T \ln(1 + s(t, R, V, A, \vec{l})/\nu) d\pi(t) - \int_0^T s(t, R, V, A, \vec{l}) dt. \quad (5)$$

В качестве оценок МП параметров  $R_0$ ,  $V_0$ ,  $A_0$ ,  $\vec{l}$  используется положение наибольшего максимума логарифма ФОП

$$(\hat{R}, \hat{V}, \hat{A}, \hat{\vec{l}}) = \arg \sup_{\vec{l}} L(R, V, A, \vec{l}). \quad (6)$$



Например, дисперсии совместно-эффективных оценок  $R$ ,  $V$  и  $A$  в случае медленных флуктуаций определяются формулами

$$D(R|R_0, V_0, A_0, \vec{l}_0) = \frac{c^2}{\alpha} \frac{(M_0 M_4 + 2\rho_p M_1 M_3) M_2 - M_0 M_3^2 - \rho_p M_1^2 M_4 - \rho_p M_2^3}{4(1 - \rho_p) M_0 ((2M_1 M_3 + M_0 M_4) M_2 - M_2^3 - M_0 M_3^2 - M_1^2 M_4)},$$

$$D(V|R_0, V_0, A_0, \vec{l}_0) = \frac{c^2}{\alpha} \frac{M_0 M_4 - M_2^2}{4\vartheta^2 ((2M_1 M_3 + M_0 M_4) M_2 - M_2^3 - M_0 M_3^2 - M_1^2 M_4)},$$

$$D(A|R_0, V_0, A_0, \vec{l}_0) = \frac{c^2}{\alpha} \frac{M_0 M_2 - M_1^2}{\vartheta^4 ((2M_1 M_3 + M_0 M_4) M_2 - M_2^3 - M_0 M_3^2 - M_1^2 M_4)}.$$

В этих формулах  $M_\nu = \sum_{k=0}^{N-1} (k - \mu)^\nu$  и  $\alpha = \int_0^T \frac{1}{\nu + s_0(t; \vec{l}_0)} \left( \frac{\partial s_0(t; \vec{l}_0)}{\partial t} \right)^2 dt$ . Число  $\rho_p$  характеризует влияние наличия  $p$  неинформативных параметров. В случае  $p = 1, 2, 3$  для величины  $\rho_p$  приведены вычислительные формулы.

В случае быстрых флуктуаций аналогичные формулы выглядят следующим образом

$$D(R|R_0, V_0, A_0, \vec{L}_0) = \frac{c^2 (\widetilde{M}_2 \widetilde{M}_4 - \widetilde{M}_3^2)}{4 ((2\widetilde{M}_1 \widetilde{M}_3 + \widetilde{M}_0 \widetilde{M}_4) \widetilde{M}_2 - \widetilde{M}_2^3 - \widetilde{M}_0 \widetilde{M}_3^2 - \widetilde{M}_1^2 \widetilde{M}_4)},$$

$$D(V|R_0, V_0, A_0, \vec{L}_0) = \frac{c^2 (\widetilde{M}_0 \widetilde{M}_4 - \widetilde{M}_2^2)}{4\vartheta^2 ((2\widetilde{M}_1 \widetilde{M}_3 + \widetilde{M}_0 \widetilde{M}_4) \widetilde{M}_2 - \widetilde{M}_2^3 - \widetilde{M}_0 \widetilde{M}_3^2 - \widetilde{M}_1^2 \widetilde{M}_4)},$$

$$D(A|R_0, V_0, A_0, \vec{L}_0) = \frac{c^2 \widetilde{M}_0 \widetilde{M}_2 - \widetilde{M}_1^2}{\vartheta^4 ((2\widetilde{M}_1 \widetilde{M}_3 + \widetilde{M}_0 \widetilde{M}_4) \widetilde{M}_2 - \widetilde{M}_2^3 - \widetilde{M}_0 \widetilde{M}_3^2 - \widetilde{M}_1^2 \widetilde{M}_4)},$$

где  $\widetilde{M}_\nu = \sum_{k=0}^{N-1} \alpha_k (1 - \rho_{pk}) (k - \mu)^\nu$  и  $\alpha_k = \int_0^T \frac{1}{\nu + s_0(t; \vec{l}_{0k})} \left( \frac{\partial s_0(t; \vec{l}_{0k})}{\partial t} \right)^2 dt$ , а  $\rho_{pk}$  характеризует влияние на оценки наличия  $p$  неинформативных параметров, связанных с  $k$ -ым импульсом последовательности (3).

Исследованы отношения  $\chi$  дисперсий в случае наличия неинформативных параметров к случаю их отсутствия. Например,

$$\chi(R|R_0, V_0, A_0) = \frac{D(R|R_0, V_0, A_0, \vec{l}_0)}{D(R|R_0, V_0, A_0)}.$$

Величина  $\chi$  характеризует потери точности совместно-эффективных оценок, появляющиеся вследствие параметрической априорной неопределенности в случае медленных флуктуаций. На рис. 1 показана зависимость величины  $\chi_R(R|R_0) = (1 - \rho_p)^{-1}$  (являющейся наибольшей из всех

$\chi$ ) для случая импульса

$$s(t, \vec{l}) = af(t/\Delta, \Delta/\tau), \quad (7)$$

где

$$f(x, y) = \eta(x)[1 - \exp(-x)] - \eta(x - 1/y)[1 - \exp(-(x - 1/y))].$$

Форму интенсивности, близкую к (7), имеет оптический импульс в результате его уширения при распространении в рассеивающей среде.

Кривая 1 иллюстрирует проигрыш в точности оценки, когда неинформативным является параметр  $a$ . Кривые 2 и 3 иллюстрируют проигрыш в точности оценки, когда неинформативным является один параметр, соответственно,  $\tau$  или  $\Delta$ ; 4 —  $a$  и  $\tau$ ; 5 —  $a$  и  $\Delta$ ; 6 —  $\tau$  и  $\Delta$ ; 7 — все три параметра  $a$ ,  $\tau$  и  $\Delta$ .

Показано, что оценки МП являются асимптотически эффективными с ростом отношения сигнал-шум для любого конечного числа неизвестных регулярных неинформативных параметров как в случае медленных флуктуаций, так и в случае быстрых флуктуаций.

Проведено сравнение характеристик точности совместно-эффективных оценок и оценок МП параметров движения в условиях медленно и быстро флуктуаций.

**Во второй главе** рассмотрен квазиправдоподобный метод оценки дальности, скорости и ускорения. Рассчитаны характеристики квазиправдоподобных оценок с учетом пороговых явлений.

Предполагается, что интенсивность принимаемого сигнала имеет вид

$$s(t, \vec{l}_0) = \sum_{k=0}^{N-1} s_0(t - 2R_0/c - (k - \mu)(1 + 2V_0/c)\vartheta - A_0(k - \mu)^2\vartheta^2/c), \quad (8)$$

где  $\vec{l} = (R, V, A)$  — вектор дальности, скорости и ускорения, которые требуется оценить, а интенсивность  $s_0(t)$  принимаемого импульса в общем случае отличается от интенсивности  $\hat{s}(t)$  в зондирующем сигнале (1). Идея метода квазиправдоподобной оценки состоит в том, что применяется схема метода МП, но для синтеза алгоритма оценки используется не сигнал, совпадающий с неизвестным априори  $s_0(t, \vec{l})$ , а

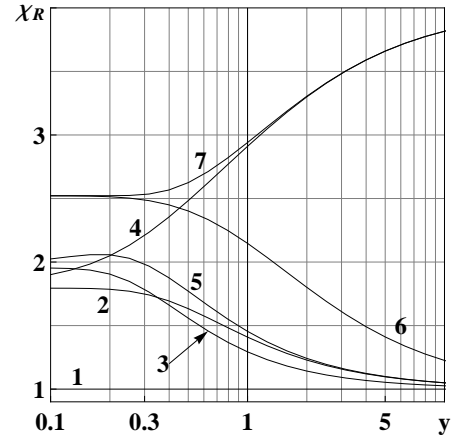


Рис. 1: Зависимость  $\chi_R(\Delta/\tau)$  при  $a/\nu = 1$

некоторый, отличающийся от него, предполагаемый (ожидаемый) сигнал

$$s_{1N}(t, \vec{l}) = \sum_{k=0}^{N-1} s_1(t - 2R/c - (k - \mu)(1 + 2V/c)\vartheta - A(k - \mu)^2\vartheta^2/c). \quad (9)$$

Здесь  $s_1(t)$  — предполагаемая форма интенсивности отдельного импульса рассеянного сигнала. Использование квазиправдоподобной оценки позволяет упростить техническую реализацию приемника по сравнению с приемником, осуществляющим оценку МП в условиях параметрической априорной неопределенности.

Вначале исследуются характеристики (дисперсии и коэффициенты корреляции) надежной квазиправдоподобной оценки. Получены условия несмещенности квазиправдоподобной оценки. Показано, что в случае несмещенности все характеристики квазиправдоподобной оценки отличаются от соответствующих характеристик оценки МП (рассмотренной в главе 1) одним и тем же множителем. Исследована зависимость этого множителя от формы интенсивности отдельных импульсов  $s_0(t)$  и  $s_1(t)$  в (8) и (9).

Далее обсуждаются характеристики квазиправдоподобных оценок в условиях, когда влияние аномальных ошибок является существенным.

Рассчитаны характеристики (смещение и рассеяние) с учетом аномальных ошибок. Получена формула для вероятности надежной оценки

$$P_0 = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\kappa\sqrt{2}}^{\infty} \exp\left[-\frac{(y - z_S)^2}{2} - \frac{\xi}{(2\pi)^2} \frac{y^2}{\kappa^2} \exp\left(-\frac{y^2}{2\kappa^2}\right)\right] dy,$$

где в случае несмещенной оценки

$$z_S = \frac{\sqrt{N} \int_0^T \ln(1 + s_1(t)/\nu_1) s_0(t) dt}{\sqrt{\nu \int_0^T \ln^2(1 + s_1(t)/\nu_1) (1 + s_0(t)/\nu) dt}},$$

$$\kappa^2 = \frac{\int_0^T \ln^2(1 + s_1(t)/\nu_1) dt}{\int_0^T \ln^2(1 + s_1(t)/\nu_1) (1 + s_0(t)/\nu) dt},$$

$$\xi = \frac{Q\vartheta^3}{\sigma_N^3 c^3 \nu_1^3} \frac{N(N^2 - 1)}{12} \sqrt{\frac{N(N^2 - 4)}{15}} \left[ \nu \int_0^T \left( \frac{\frac{ds_1(t)}{dt}}{1 + s_1(t)/\nu_1} \right)^2 dt \right]^{3/2},$$

$$\sigma_N^2 = \nu N \int_0^T \ln^2(1 + s_1(t)/\nu_1) dt,$$

$$Q = (R_{\max} - R_{\min})(V_{\max} - V_{\min})(A_{\max} - A_{\min}),$$

$[R_{\min}, R_{\max}]$ ,  $[V_{\min}, V_{\max}]$ ,  $[A_{\min}, A_{\max}]$  — априорные интервалы возможных значений дальности  $R_0$ , скорости  $V_0$  и ускорения  $A_0$ ;  $\nu$  — реальный, а  $\nu_1$  — предполагаемый уровни шума.

В предположении, что аномальные ошибки распределены в априорных интервалах равномерно, найдены характеристики (смещение и рассеяние) с учетом аномальных ошибок. Исследовано отношение вероятностей аномальной ошибки для квазиправдоподобной оценки и оценки МП.

**В третьей главе** исследовано применение квазиоптимального метода к оценке дальности, скорости и ускорения. Квазиоптимальный метод состоит в том, что в приемнике проводится оценка не непосредственно параметров движения  $R$ ,  $V$  и  $A$ , а времен прихода

$$\lambda_k = 2R/c + (k - \mu)(1 + 2V/c)\vartheta + A(k - \mu)^2\vartheta^2/c$$

отдельных импульсов. По оценкам времен прихода посредством метода МП рассчитываются оценки параметров движения  $R$ ,  $V$  и  $A$ . Параметры  $\lambda_k$  можно оценивать по мере поступления импульсов последовательности. Это позволяет для их оценки использовать один и тот же канал и тем самым существенно уменьшить количество каналов в приемнике. Предполагается, что форма интенсивности рассеянного сигнала имеет вид (8), а форма интенсивности ожидаемого сигнала имеет вид (9).

Выводятся формулы, выражающие оценки  $\hat{R}$ ,  $\hat{V}$  и  $\hat{A}$  параметров движения  $R$ ,  $V$  и  $A$  через МП оценки  $\hat{\lambda}_k$  времен прихода  $\lambda_{0k}$  отдельных импульсов:

$$\begin{pmatrix} \hat{R} \\ \hat{V} \\ \hat{A} \end{pmatrix} = \sum_{k=0}^{N-1} \begin{pmatrix} \delta_{Rk} \\ \delta_{Vk} \\ \delta_{Ak} \end{pmatrix} \hat{\lambda}_k - \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{c}{2} \\ 0 \end{pmatrix},$$

где

$$\begin{aligned} \delta_{Rk} &= \frac{c[(M_2M_4 - M_3^2) + (k - \mu)(M_2M_3 - M_1M_4) + (k - \mu)^2(M_1M_3 - M_2^2)]}{2[(2M_1M_3 + M_0M_4)M_2 - M_2^3 - M_0M_3^2 - M_1^2M_4]}, \\ \delta_{Vk} &= \frac{c[(M_2M_3 - M_1M_4) + (k - \mu)(M_0M_4 - M_2^2) + (k - \mu)^2(M_1M_2 - M_0M_3)]}{2\vartheta[(2M_1M_3 + M_0M_4)M_2 - M_2^3 - M_0M_3^2 - M_1^2M_4]}, \\ \delta_{Ak} &= \frac{c[(M_1M_3 - M_2^2) + (k - \mu)(M_1M_2 - M_0M_3) + (k - \mu)^2(M_0M_2 - M_1^2)]}{\vartheta^2[(2M_1M_3 + M_0M_4)M_2 - M_2^3 - M_0M_3^2 - M_1^2M_4]}. \end{aligned}$$

Найдены дисперсии и коэффициенты корреляции оценок параметров  $R$ ,  $V$  и  $A$ ; они оказываются совпадающими с соответствующими характеристиками надежных квазиправдоподобных оценок.

Затем квазиоптимальные оценки рассматриваются в условиях аномальных ошибок. Найдены характеристики (смещения и рассеяния) оценки времени прихода  $k$ -го импульса в условиях аномальной ошибки. Найдены вероятности  $P_{0k}$  надежной оценки времени прихода  $k$ -го импульса:

$$P_{0k} = \frac{1}{\sqrt{2\pi(1 + \varkappa_1^2)}} \int_0^{\infty} \exp\left[-\frac{(x - z_{1k} s)^2}{2(1 + \varkappa_1^2)} - \frac{\xi_k}{2\pi} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right)\right] dx,$$

где

$$\begin{aligned} \varkappa_1^2 &= \int_{-\infty}^{+\infty} \ln^2\left(1 + s_1(t)/\nu_1\right) s_0(t) dt / \int_{-\infty}^{+\infty} \ln^2\left(1 + s_1(t)/\nu_1\right) \nu dt, \\ z_{1k} s &= \int_{-\infty}^{+\infty} \ln\left(1 + \frac{s_1(t - \Delta_k)}{\nu_1}\right) s_0(t) dt / \sqrt{\int_{-\infty}^{+\infty} \ln^2\left(1 + \frac{s_1(t)}{\nu_1}\right) \nu dt}, \\ \xi_k &= (\Lambda_{k \max} - \Lambda_{k \min}) \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\left(\frac{ds_1}{dt}(t)\right)^2}{(s_1(t) + \nu_1)^2} dt / \int_{-\infty}^{+\infty} \ln^2\left(1 + \frac{s_1(t)}{\nu_1}\right) dt, \end{aligned}$$

$[\Lambda_{k \min}, \Lambda_{k \max}]$  — априорный интервал возможных значений времени прихода  $\lambda_k$ . С их помощью получены характеристики (смещения и рассеяния) оценок параметров  $R$ ,  $V$  и  $A$  с учетом аномальных ошибок.

Далее приводятся формулы для характеристик совместно-эффективных оценок, оценок МП и квазиоптимальных оценок в случае, когда оцениваются только два параметра движения — дальность и скорость. Основное назначение этих формул — подготовительный материал для статистического моделирования, проводимого в следующем параграфе.

В конце главы приводятся результаты статистического моделирования квазиоптимальных оценок времен прихода импульсов и оценок дальности и скорости. Они показали, что характеристики квазиоптимальных оценок удовлетворительно описываются теоретическими формулами при среднем количестве не менее 10 фотоэлектронов, принимаемых в течение длительности одного импульса, и подтвердили полученные результаты в области применимости допущенных предположений.

**В заключении** подводятся итоги по диссертации в целом, сделаны общие выводы и сформулированы основные результаты. Проведено качественное сравнение сложности аппаратной реализации рассмотренных алгоритмов.

На основе результатов, полученных в диссертационной работе, сделаны следующие теоретические и практические выводы:

- ✓ Оценки максимального правдоподобия параметров движения при наличии конечного числа произвольных регулярных неинформатив-

ных параметров, как в условиях медленных флуктуаций, так и в условиях быстрых флуктуаций, являются асимптотически эффективными.

- ✓ Для того чтобы характеристики точности оценок алгоритма максимального правдоподобия при медленных флуктуациях были близки к эффективным, необходимо обеспечивать большие значения отношения сигнал-шум, чего можно добиться, например, путем увеличения количества импульсов в последовательности.
- ✓ Для достижения близости характеристик точности оценок максимального правдоподобия к эффективным в условиях быстрых флуктуаций, необходимо обеспечить большие значения отношения сигнал-шум для каждого импульса последовательности, что, очевидно, реализовать увеличением количества импульсов невозможно.
- ✓ Наличие параметрической неопределенности приводит к необходимости усложнения аппаратной реализации устройства, осуществляющего обработку принимаемой реализации в соответствии с методом максимального правдоподобия, по сравнению с приемником, осуществляющим оценку максимального правдоподобия в условиях отсутствия параметрической априорной неопределенности.
- ✓ Квазиправдоподобный приемник в условиях априорной параметрической неопределенности проще аппаратно реализуем, чем приемник, осуществляющий оценку максимального правдоподобия. При этом квазиправдоподобные оценки в общем случае могут быть несостоятельными.
- ✓ Так как достаточные условия состоятельности оценок, накладываемые на форму интенсивности принимаемого и ожидаемого сигналов, являются довольно простыми, при аппаратной реализации квазиправдоподобного и квазиоптимального алгоритмов их следует учитывать.
- ✓ Надежная квазиоптимальная оценка обладает такими же характеристиками, что и надежная квазиправдоподобная оценка, но при этом предполагает более простую аппаратную реализацию. Поэтому в условиях высоких отношений сигнал-шум для каждого импульса последовательности, предпочтительнее использовать квазиоптимальную оценку.
- ✓ В области аномальных ошибок квазиоптимальная оценка может существенно проигрывать в точности квазиправдоподобной оценке.
- ✓ Квазиоптимальный алгоритм можно реализовать на основе обра-

ботки результатов последовательных измерений дальности высокоточными лазерными дальномерами, и тем самым получить дополнительную информацию о скорости и ускорении цели.

Полученные результаты имеют достаточно общий характер и могут быть использованы для обоснованного выбора между рассмотренными алгоритмами оценки параметров движения при различных ограничениях, накладываемых на условия приема и обработки сигнала: априорную неопределенность относительно формы сигнала, сложность аппаратурной реализации, требования к точности оценки, возможность использования существующих лазерных дальномеров, осуществляющих последовательные оценки дальности.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах [1–11].

## **Основные публикации по теме диссертации**

1. Трифонов А.П. Влияние неинформативных параметров на точность оценок дальности, скорости и ускорения при зондировании последовательностью оптических импульсов / А.П. Трифонов, А.В. Курбатов // Сборник докладов XV Международной научно-технической конференции “Радиолокация, навигация, связь”, Воронеж. — 2009. — Т. 1. — С. 282–290.
2. Трифонов А.П. Эффективность оценки параметров движения быстро флуктуирующей цели при зондировании последовательностью оптических импульсов / А.П. Трифонов, А.В. Курбатов // Сборник докладов XI Международной научно-технической конференции “Кибернетика и высокие технологии XXI века”, Воронеж. — 2010. — Т. 1. — С. 107–117.
3. Трифонов А.П. Квазиправдоподобная оценка дальности, скорости и ускорения при оптическом зондировании цели / А.П. Трифонов, М.Б. Беспалова, А.В. Курбатов // Сборник докладов XVII Международной научно-технической конференции “Радиолокация, навигация, связь”, Воронеж, 2011. — Т. 1. — С. 45–56.
4. Трифонов А.П. Влияние аномальных ошибок на точность квазиправдоподобных оценок параметров движения при оптическом зондировании цели / А.П. Трифонов, А.В. Курбатов // Сборник докладов XVIII Международной научно-технической конференции “Радиолокация, навигация, связь”, Воронеж, 2012. — Т. 1. — С. 205–214.

5. Трифонов А.П. Влияние наличия неинформативных параметров на эффективность оценок параметров движения цели при зондировании последовательностью оптических импульсов / А.П. Трифонов, А.В. Курбатов // Радиотехника и электроника. — 2013. — Т. 58, № 12. — С. 1212–1219.
6. Трифонов А.П. Квазиправдоподобная оценка параметров движения при зондировании последовательностью оптических импульсов / А.П. Трифонов, М.Б. Беспалова, А.В. Курбатов // Известия вузов. Радиоэлектроника. — 2013. — Т. 56, № 1. — С. 24–33.
7. Трифонов А.П. Характеристики квазиоптимальных оценок параметров движения цели по лазерным измерениям дальности / А.П. Трифонов, А.В. Курбатов // Сборник докладов XIX Международной научно-технической конференции “Радиолокация, навигация, связь”, Воронеж, 2013. — Т. 1. — С. 189–199.
8. Трифонов А.П. Оценка параметров движения быстро флуктуирующей цели при зондировании последовательностью оптических импульсов / А.П. Трифонов, А.В. Курбатов // Известия вузов. Радиоэлектроника. — 2013. — № 2. — С. 24–32.
9. Трифонов А.П. Пороговые характеристики квазиправдоподобных оценок параметров движения при зондировании последовательностью оптических импульсов / А.П. Трифонов, А.В. Курбатов // Известия вузов. Радиоэлектроника. — 2014. — № 1. — С. 40–49.
10. Трифонов А.П. Алгоритмы оценки параметров движения при зондировании цели последовательностью оптических импульсов / А.П. Трифонов, А.В. Курбатов // Сборник докладов XX Международной научно-технической конференции “Радиолокация, навигация, связь”, Воронеж, 2014. — Т. 1. — С. 133–142.
11. Трифонов А.П. Квазиоптимальная оценка параметров движения по лазерным измерениям дальности / А.П. Трифонов, А.В. Курбатов // Известия вузов. Радиофизика. — 2014. — Т. 57, № 4. — С. 319–332.

Работы [5, 6, 8, 9, 11] опубликованы в периодических изданиях, рекомендованных ВАК для публикации основных результатов диссертаций.