

ЛАЗЕРНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ: ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ

В. И. Хименко^а, доктор техн. наук, профессор

^аСанкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, РФ

Цель: обобщение и развитие результатов по формированию статистической радиооптики — единой статистической теории лазерных информационных систем и радиооптических методов получения, преобразования, передачи и обработки информации. **Результаты:** выделены основные трудности и показан противоречивый характер развития радиооптики. Предложена обобщенная модель радиооптической обработки информации и обоснован общий принцип построения статистической радиооптики. Рассмотрены фундаментальные пределы точности, связанные с квантовыми эффектами при регистрации оптических излучений; выполнен анализ особенностей влияния открытого атмосферного канала на работу лазерных систем информационного обмена; исследованы эффекты замираний при распространении лазерных излучений. **Практическая значимость:** формирование и развитие статистической теории лазерных информационных систем позволяет оптимизировать существующие и синтезировать качественно новые алгоритмы радиооптической обработки информации для систем лазерной связи, локации, навигации и управления.

Ключевые слова — обработка информации, статистическая радиооптика, фотоника, лазерные информационные технологии, обобщенные модели, вероятностный анализ, потенциальные характеристики.

Введение

В настоящее время уже нет особой необходимости обосновывать или оправдывать актуальность исследований в области радиооптики. За прошедшие после появления лазеров десятилетия накопилось много убедительных доказательств того, что методы радиофизики и радиотехники эффективно могут использоваться в оптическом диапазоне. В свою очередь, оптические методы активно внедряются в информационные технологии, системы интеллектуального управления, локацию, навигацию, вычислительную технику и технику связи. Разнообразное взаимное сочетание методов радио и оптики, электроники и фотоники дает основу для развития качественно новых лазерных технологий получения, преобразования, передачи и обработки больших массивов информации при высоком быстродействии и при использовании как аналоговых, так и цифровых представлений.

Одновременно с этими особенностями необходимо отметить, что общее развитие радиооптики сопровождается многочисленными парадоксами [1]. Некоторые из этих парадоксов достаточно наглядны, и их полезно выделить.

1. Уже на протяжении почти трех десятилетий в различных монографиях, учебниках и статьях обсуждаются преимущества оптического диапазона частот для передачи, преобразования и обработки информации. Однако многие из этих преимуществ оптики так и остаются до настоящего времени лишь «потенциальными» — нереализованными.

2. Одной из характерных особенностей развития современной науки и техники является

междисциплинарный подход к исследованиям и взаимопроникновение наук. За последние годы в смежных с радиофизикой и оптикой областях сформировались и активно развиваются новые самостоятельные направления исследований: оптическая электроника [2–4] и фотоника [5, 6], оптическая голография [7, 8], оптическая связь [9, 10], оптическая радиометрия [11], акустооптика и электрооптика [12–14], лазерная локация [15–17] и лазерная дальнометрия [18], лазерная спектроскопия [19], лазерная интерферометрия [20, 21], адаптивная оптика [22, 23], компьютерная оптика [24], информационная оптика [25]. Однако формирование многочисленных новых научных направлений до настоящего времени не привело к ожидаемым «революционным» преобразованиям техники.

3. Основным стимулом развития радиооптики всегда являлись информационные задачи — задачи измерений, передачи, приема, управления и обработки информации. Все эти задачи по своей постановке относятся к классу статистических задач. Однако, несмотря на это, статистическая оптика [26, 27], статистическая акустооптика [28], статистическая радиооптика [29, 30] и сегодня находятся лишь на этапе формирования.

4. Подавляющее большинство оптических процессов строится сегодня на основе эвристических принципов. Информационная оптика и лазерные информационные технологии в значительной степени развиваются по направлению исследования новых материалов и новых физических эффектов. В области передачи, управления и обработки информации оптика и фотоника стремятся повторить и улучшить уже существующие

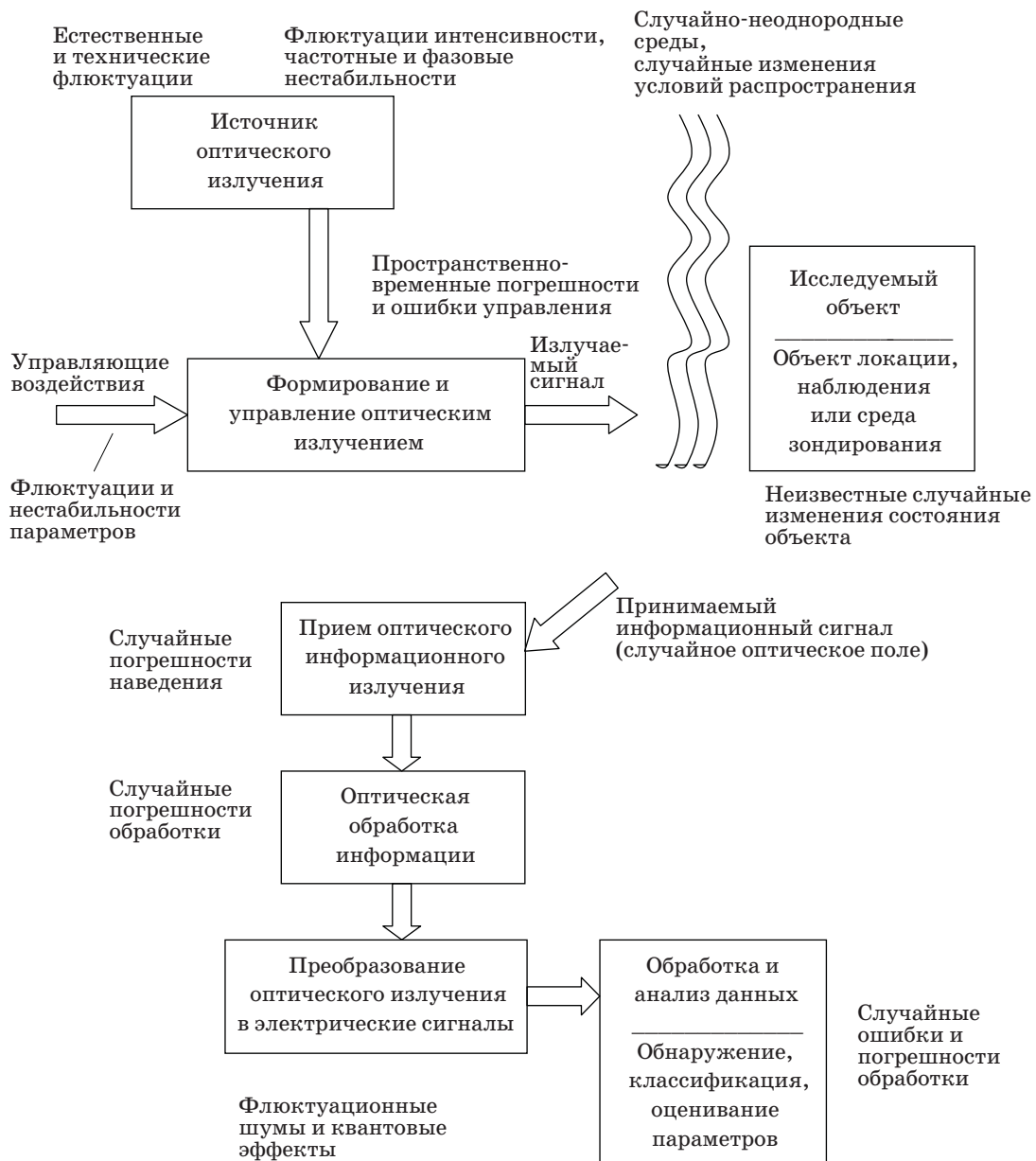
ющие радиоэлектронные системы или улучшить отдельные известные алгоритмы. Однако догнать радиотехнику и электронику эвристическими методами — весьма сомнительный путь. В современной статистической теории существуют хорошо освоенные общие методы оптимального синтеза и анализа информационных и информационно-управляющих систем.

Перечисление подобных противоречий в развитии радиооптики можно продолжать. Все они являются следствием значительного разрыва между физическими основами радиооптики, технологическими проблемами изготовления оптических компонентов и общей статистической теорией обработки информации.

Один из возможных путей устранения перечисленных противоречий — это обобщение многочисленных разрозненных результатов в области радиооптики и построение единой статистической теории лазерных информационных систем и радиооптических методов получения, преобразования, передачи и обработки информации.

Статистические явления в лазерных информационных системах

Построение любой радиооптической системы определяется содержанием и условиями решаемой задачи, видом информационных процессов, требуемыми алгоритмами обработки и анализа



■ Рис. 1. Обобщенная модель радиооптической системы получения, преобразования и обработки информации

данных. Большое разнообразие практических задач неизбежно приводит и к большому разнообразию существующих систем. Однако несмотря на это основной принцип построения радиооптической обработки информации условно можно представить в виде некоторой обобщенной модели. Рассмотрение таких моделей позволяет выделить характерные особенности и возможные подходы к общему анализу различных по своему назначению лазерных систем.

Независимо от конкретных алгоритмов обработки, при решении задач лазерной локации и лазерной навигации, лазерной связи, передачи и обработки информационных процессов, как правило, радиооптические системы содержат некоторые общие, типовые узлы и преобразования. К ним, в частности, относятся источники оптического излучения, операции формирования заданной пространственно-временной структуры излучения, операции управления оптическим излучением, операции приема, обработки и преобразования оптических полей в электрические сигналы. В целом структуру таких систем можно представить обобщенной моделью (рис. 1). Помимо основных преобразований, на этой модели указаны и некоторые случайные факторы, характерные для радиооптики.

Представленная упрощенная модель достаточно наглядно показывает, что случайных факторов и статистических явлений в радиооптике так же много, как и в других областях, связанных с проблемами передачи, приема и обработки информации. С одной стороны, это объясняется тем, что задачи обработки информации по своему содержанию относятся к классу статистических задач. С другой стороны, многие физические эффекты в радиооптике, связанные с генерацией и регистрацией оптических излучений, распространением излучения, формированием оптических изображений, взаимодействием оптических полей с веществом, носят принципиально статистический характер.

Тепловые источники оптического излучения по своей физической природе относятся к генераторам случайного поля. Квантовые генераторы, источники лазерного излучения в силу квантовых эффектов, при всей их стабильности и монохроматичности излучения, неизбежно обладают флуктуациями интенсивности, частотными и фазовыми нестабильностями.

Ясно, что любая реальная система не может быть идеальной. Оценка естественных флуктуаций, технических и технологических погрешностей, случайных внешних и внутренних воздействий может проводиться только на основе вероятностных и статистических методов. Реальные системы управления и обработки информации, как правило, работают в условиях высокой апри-

орной неопределенности и в сложной меняющейся помеховой обстановке. Без вероятностных моделей и статистических методов здесь трудно синтезировать оптимальные алгоритмы и трудно оценивать результаты обработки информационных процессов.

Особенности построения «статистической радиооптики»

Рассмотрение обобщенной модели показывает, что построение и развитие статистической теории лазерных информационных систем должно проходить по двум основным направлениям — вероятностного анализа и статистического синтеза.

Вероятностный анализ должен включать в себя несколько самостоятельных разделов:

- анализ источников радио- и оптического излучения;
- анализ принципов пространственно-временного управления излучением;
- анализ эффектов распространения лазерных излучений в случайно-неоднородных средах;
- анализ принципов ввода информационных сигналов в оптические системы обработки;
- анализ типовых операций радиооптической обработки;
- анализ операций приема и преобразования оптических излучений в электрические сигналы;
- анализ операций последдетекторной обработки сигналов.

Статистический синтез должен включать в себя следующие разделы:

- синтез оптимальной структуры информационных сигналов;
- синтез оптимальных алгоритмов передачи, приема и обработки информации.

Методы статистического синтеза должны позволять находить наилучшую структуру сигналов для достижения поставленной цели и наилучшую структуру радиооптических систем. Типовыми примерами подобных задач является синтез оптимальных сигналов для лазерных систем зондирования, локации, передачи информации или синтез оптимальных алгоритмов обнаружения, различения и оценивания параметров оптических излучений в сложной помеховой обстановке.

В свою очередь, чтобы решение задач вероятностного анализа и статистического синтеза было возможно, необходимо на основе теории случайных функций построить удобные для лазерных информационных технологий вероятностные модели процессов и вероятностные модели систем.

Важно подчеркнуть, что для формирования названных разделов статистической радиооптики накоплено уже много полезных результатов.

Во многих смежных с радиооптикой областях к настоящему времени созданы самостоятельные статистические теории. Наглядными примерами являются здесь статистическая физика [31, 32], статистическая радиофизика [29, 33] и статистическая радиотехника [34–36], статистическая радиолокация [37, 38], статистическая теория связи [39, 40], статистическая и общая теория оптимального управления [41–44]. Созданы хорошие основы для развития статистической теории лазерной связи [45, 46], статистической оптики [27, 30] и статистической акустооптики [28].

Все перечисленные направления создавались трудами многих исследователей на протяжении нескольких десятков лет (в основном после 40-х годов прошлого столетия). Часть полученных в смежных областях результатов может успешно использоваться и в радиооптике. Однако в самой радиооптике много своих отличительных особенностей, которые не рассматривались в смежных статистических теориях и без рассмотрения которых трудно оценить даже потенциальные возможности существующих лазерных систем и оптических процессоров.

Фундаментальные пределы точности в радиооптике

В радиооптике, фотонике и лазерных информационных системах, как и в любой другой области, существуют свои принципиальные ограничения — фундаментальные пределы. Эти пределы связаны с физикой используемых явлений и достаточно наглядно проявляются при анализе операций регистрации оптических полей или операций преобразования оптических излучений в информационные электрические сигналы.

В основе таких операций обычно лежит эффект фотоэмиссии, который по своей физической природе имеет принципиально вероятностный характер [27, 47]. При его описании оптическое поле представляется в виде совокупности фотонов, среднее число которых характеризует энергию поля. Каждый фотон при взаимодействии с фоточувствительной поверхностью детектора инициирует с некоторой вероятностью вылет электрона. Появление фотоэлектронов — носителей тока — приводит к появлению первичного тока детектора.

Хорошо известно [47], что если в интервале времени $[t_0, t_0 + T]$ на точечный фотодетектор с квантовой эффективностью η воздействует оптическое излучение с постоянной интенсивностью $I = I(t, r_0) = \text{const}$, то число фотоэлектронов n на выходе детектора характеризуется распределением Пуассона:

$$p(n; T) = \frac{1}{n!} (\eta IT)^n \exp(-\eta IT), \quad n = 1, 2, \dots \quad (1)$$

Этот результат показывает, что при фиксированных значениях η , I и T поток фотоотчетов $n(t)$ является случайным пуассоновским потоком событий, для которого математическое ожидание m_n и дисперсия σ_n^2 соответственно равны

$$m_n = M\{n(t)\} = \eta IT; \quad \sigma_n^2 = D[n(t)] = \eta IT. \quad (2)$$

В реальных (неидеализированных) ситуациях работа любой радиооптической системы происходит при случайных входных воздействиях. Если при этом интенсивность $I(t, r_0)$ в точке пространства с координатами r_0 описывается некоторой плотностью вероятности $p_I(I)$, то поток фотоотчетов $n(t)$ на выходе детектора будет характеризоваться распределением

$$p(n; T) = \frac{1}{n!} \int_0^\infty (\eta IT)^n \exp(-\eta IT) p_I(I) dI. \quad (3)$$

Это выражение соответствует известной формуле Манделя [48]; в статистической оптике [27, 29, 47] она лежит в основе большинства исследований по анализу процессов фотоэлектрического преобразования.

Вместе с тем плотность вероятности (3) по существу описывает здесь дважды стохастический пуассоновский поток (модель процесса Д. Кокса [49, 50]), и следовательно, независимо от конкретного вида функции $p_I(I)$ можно сразу же сделать некоторые общие выводы относительно статистики потока фотоотчетов $n(t)$.

Так, в частности, при любых распределениях $p_I(I)$ входной интенсивности $I(t, r_0)$ математическое ожидание и дисперсия числа фотоотчетов определяются как

$$m_n = M\{n(t)\} = \eta T m_I; \quad \sigma_n^2 = M\{n^2(t)\} - M^2\{n(t)\} = \eta T m_I + \eta^2 T^2 \sigma_I^2, \quad (4)$$

где m_I и σ_I^2 — параметры процесса $I(t, r_0)$.

Сравнение результатов (4) и (2) позволяет выделить одно из наиболее важных свойств потока фотоотчетов: случайные изменения интенсивности $I(t, r_0)$ входного оптического излучения всегда приводят к увеличению дисперсии выходного потока фотоэлектронов. Дисперсия σ_n^2 числа фотоотчетов $n(t)$ состоит из двух различных по физическому смыслу слагаемых. Первое из этих слагаемых $\eta T m_I$ связано с квантовыми флуктуациями при детектировании, а второе слагаемое $(\eta T)^2 \sigma_I^2$ пропорционально дисперсии σ_I^2 интенсивности $I(t, r_0)$ входного излучения и, следовательно, связано с волновыми характеристиками оптического поля.

Если в качестве меры рассеяния для потока фотоотчетов ввести коэффициент вариации

$$V_n = \frac{\sigma_n}{m_n} = \frac{D^{1/2}[n(t)]}{M\{n(t)\}}, \quad m_n > 0, \quad (5)$$

то на основании результатов (3) и (4) при случайных интенсивностях $I(t, r_0)$ для V_n будет справедливо общее выражение

$$V_n = (\eta T m_I)^{-1} \sqrt{n T m_I + (\eta T)^2 \sigma_I^2}. \quad (6)$$

Из него видно, что если флуктуации оптического поля малы и $\sigma_I \ll m_I$, то коэффициент V_n стремится к своей нижней границе:

$$V_n = V_{n \min} = (\eta T m_I)^{-1/2}, \quad (7)$$

а распределение фотоотсчетов (3) приближается к простому пуассоновскому распределению (1) с параметром $m_n = \sigma_n^2 = \eta T I$. Флуктуации потока $n(t)$ обусловлены при этом в основном эффектами фотоэмиссии. В случае «сильных» оптических полей, когда флуктуации интенсивности $I(t, r_0)$ возрастают и $\sigma_I > m_I$, а значение $(\eta T)^2 \sigma_I^2 \gg \eta T m_I$, для коэффициента вариации (6) можно записать

$$V_n = (\eta T m_I)^{-1} \sqrt{\eta T m_I + (\eta T)^2 \sigma_I^2} \approx \sigma_I m_I^{-1} = V_I. \quad (8)$$

Физически ясно, что в подобном случае рассеяние потока фотоотсчетов $n(t)$ определяется коэффициентом вариации V_I интенсивности излучения $I(t, r_0)$, т. е. случайные изменения интенсивности $I(t, r)$ вносят здесь основной вклад во флуктуации числа фотоотсчетов. Важно подчеркнуть, что при выполнении условия (8) дискретное распределение $p(n; T)$ будет приближаться к непрерывному распределению $p_I(I)$ интенсивности $I(t, r_0)$ или, более точно, к распределению процесса $I^*(t, r_0) = \eta T I(t, r_0)$. Квантовые эффекты фотоэлектрического преобразования здесь играют незначительную роль, и поток фотоотсчетов может рассматриваться как непрерывный случайный процесс $I^*(t, r_0)$.

Конкретизируем теперь вид оптического излучения и рассмотрим практически важную для задач обработки информации модель типа «сигнал плюс шум». Будем считать, что сигнал $s(t, r)$ представляет собой высокостабильное лазерное излучение, а шум $\xi(t, r)$ — тепловое гауссово поле. Для аддитивной смеси сигнала и шума плотность вероятности $p_I(I)$ интенсивности $I(t, r_0)$ в такой модели удобно представить в виде [28, 51]

$$p_I(I) = \frac{1}{\sigma_\xi^2} \exp\left(-\frac{a^2}{2}\right) \exp\left(-\frac{I}{\sigma_\xi^2}\right) I_0\left(a \sqrt{\frac{I}{\sigma_\xi^2}}\right), \quad (9)$$

где $a = A_s / \sigma_\xi$ — отношение сигнал/шум; $I_0(x)$ — функция Бесселя нулевого порядка от мнимого аргумента.

Подставив выражение (9) в формулу (3) и выполнив интегрирование, получим окончатель-

ный вариант для статистики потока фотоотсчетов

$$p(n; t) = \frac{k^n}{(1+k)^{n+1}} \exp\left(-a^2 \frac{k}{1+k}\right) L_n\left(-\frac{a^2}{1+k}\right), \quad (10)$$

$$k = \eta T \sigma_\xi^2,$$

где $L_n(y)$ — полиномы Лагерра [29, 34].

Распределение (10) позволяет для рассматриваемой модели $s(t, r_0) + \xi(t, r_0)$ определить основные параметры числа фотоотсчетов

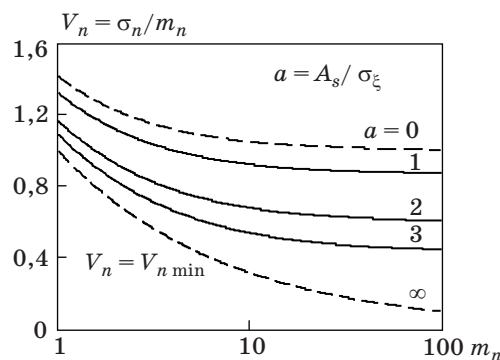
$$m_n = \eta T m_I = \eta T \left[\sigma_\xi^2 (1+a^2) \right];$$

$$\sigma_n^2 = m_n \left[1 + m_n \frac{1+2a^2}{(1+a^2)^2} \right];$$

$$V_n = \left[\frac{1}{m_n} + \frac{1+2a^2}{(1+a^2)^2} \right]^{1/2}. \quad (11)$$

В качестве иллюстрации на рис. 2 показан характер изменений коэффициента V_n в зависимости от величины m_n и параметра $a = A_s / \sigma_\xi$.

Из самого определения (5) коэффициента вариации V_n нетрудно заметить, что его величина непосредственно влияет на точность измерений параметров фотоотсчетов $n(t)$, а следовательно, и на точность измерения характеристик интенсивности $I(t, r)$ оптических излучений. В значительной степени именно этим определяется и практическая полезность приведенных в данном разделе результатов. Из формул (11) и рис. 2, в частности, видно, что при возрастании отношения сигнал/шум ($a \gg 1$) значение V_n приближается к своей нижней границе $V_n = V_{n \min}$, а при уменьшении этого отношения ($a \ll 1$) — возрастает до $V_n = V_{n \max}$. Тепловое гауссово излучение обладает наибольшей энтропией, и поэтому значение $V_{n \max}$ соответствует здесь верхней границе для V_n . Иначе говоря, кривые $V_{n \min}$ и $V_{n \max}$



■ Рис. 2. Зависимость коэффициента вариации V_n для числа фотоотсчетов $n(t)$ от соотношения сигнал/шум

задают здесь область допустимых значений для коэффициента вариации V_n и определяют своеобразные «границы точности» для процесса фотоэлектрической регистрации оптических излучений в режиме счета фотонов.

Влияние открытых атмосферных каналов на структуру лазерного излучения

Среди существующего разнообразия лазерных информационных систем целесообразно выделить самостоятельный класс систем с открытым ненаправленным каналом передачи информации.

Средой распространения лазерного излучения в таких каналах может быть свободное космическое пространство (космические каналы), атмосфера (атмосферные каналы), водная среда (подводные каналы). Необходимость исследования открытых каналов наиболее остро проявляется при создании систем лазерной локации и навигации, систем лазерного наведения, прицеливания и целеуказания, систем мобильной лазерной связи, систем лазерного зондирования атмосферы и тропосферы, систем лазерной диагностики различных неоднородных движущихся сред в аэро- и гидродинамике.



■ Рис. 3. Особенности влияния открытых атмосферных каналов на распространение лазерных излучений

Для оптического диапазона открытые каналы передачи представляют собой каналы распространения со случайно-неоднородными средами [52]. Условия распространения лазерного излучения в таких средах оказывают существенное влияние на потенциально достижимые характеристики лазерных систем, предельную дальность действия, эффективность передачи, приема и обработки информации.

Распространение лазерного излучения в условиях турбулентной атмосферы сопровождается, помимо энергетических потерь, эффектами случайного перераспределения энергии и появлением дополнительных амплитудных и фазовых флуктуаций. Такие флуктуации порождаются случайными пространственно-временными изменениями показателя преломления среды вдоль трассы распространения лазерного пучка [53].

Наиболее сложное и многофакторное воздействие атмосферы на распространение лазерных излучений наблюдается в открытых каналах при появлении в атмосфере частиц аэрозоля (облака, туманы, дымки, различные осадки, пыль, загрязнения, ...). Среда распространения становится при этом рассеивающей, и анализ оптических каналов существенно усложняется [52–54]. В каналах с рассеянием значительную роль начинают играть эффекты расходимости лазерного пучка, эффекты поглощения оптического излучения атмосферными газами, эффекты фазовых флуктуаций и амплитудных замираний, эффекты молекулярного и аэрозольного рассеяния. При построении лазерных информационных систем особое влияние оказывает явление аэрозольного рассеяния. Именно этим явлением в значительной степени ограничиваются предельные возможности открытых оптических каналов и именно эффектами аэрозольного рассеяния в значительной степени определяются энергетические потери в лазерных системах.

В целях систематизации и обобщения результатов на рис. 3 представлена структура основных эффектов, влияющих на распространение лазерных излучений в открытых атмосферных

каналах. Здесь выделены наиболее важные для построения физико-математических моделей и вероятностного анализа свойства атмосферного канала, которыми ограничиваются потенциальные возможности лазерных систем связи, управления, локации и навигации.

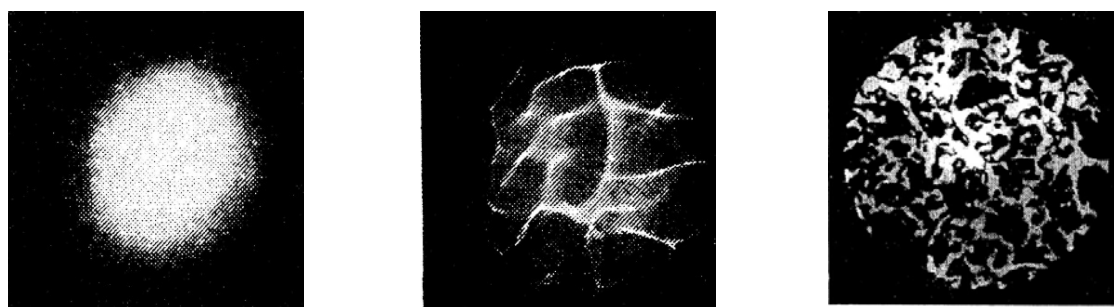
Эффекты случайных замираний в открытых каналах

Многофакторное случайное влияние атмосферных каналов на структуру оптического излучения приводит к снижению общей эффективности передачи, приема и обработки информации. При этом существенно усложняются исследования лазерных систем, и именно поэтому до настоящего времени многие вопросы вероятностного анализа остаются открытыми. Одним из таких вопросов является вопрос анализа эффектов случайных замираний в атмосферных каналах передачи информации.

Случайно-неоднородные среды порождают пространственно-временные искажения структуры лазерного излучения. В качестве иллюстрации на рис. 4 показаны примеры [29, 55] поперечного сечения лазерного луча после его прохождения через турбулентную атмосферу. Светлые и темные участки наглядно отражают здесь пространственную неоднородность интенсивности $I(t, r)$ излучения в некоторой произвольно выбранный момент времени $t = t_1$.

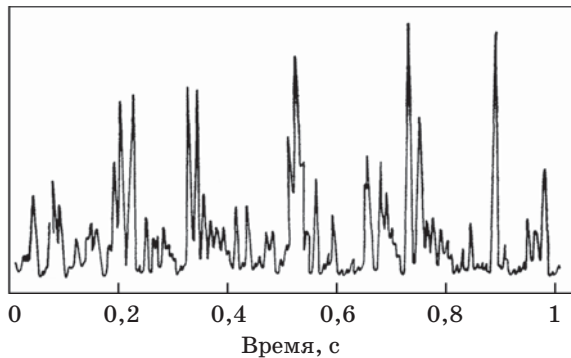
Если прием оптического излучения осуществляется в заданной точке пространства $r = r_0$, то неоднородность среды распространения будет приводить к фазовым и амплитудным флуктуациям оптического поля и соответствующим случайным изменениям временной структуры интенсивности $I(t, r_0)$. На рис. 5, а и б показан характер двух различных реализаций [56, 57] интенсивности $I(t, r_0)$, $t \in [0, T]$ лазерного излучения $I(t, r)$ на выходе канала распространения со случайно-неоднородной средой.

Важной особенностью для информационных систем является здесь то, что пространственно-

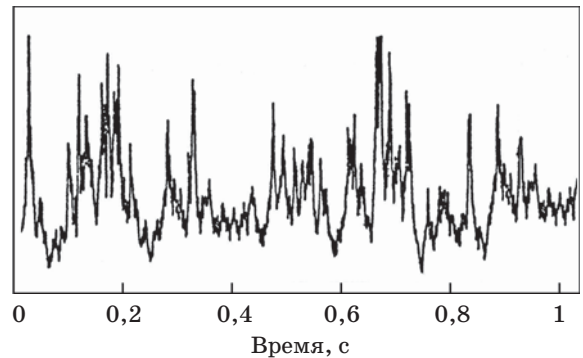


■ Рис. 4. Характер изменения пространственной структуры интенсивности лазерного луча при прохождении турбулентной атмосферы

а) $I(t, r_0)$



б) $I(t, r_0)$



■ **Рис. 5.** Случайные изменения интенсивности лазерного излучения (по данным экспериментальных исследований) при распространении в атмосфере в условиях неоднородной трассы над сушей (а) и на трассе Земля — космос (б)

временная неоднородность структуры оптического излучения порождает эффекты случайных замираний лазерного пучка при его распространении в открытых каналах. Многочисленные теоретические и экспериментальные исследования (например, [53, 56, 57]) позволяют считать, что в качестве основной вероятностной модели для случайных изменений интенсивности $I(t, r)$ может быть выбрана модель логарифмически нормального распределения

$$p_I(I) = (\sigma I \sqrt{2\pi})^{-1} \exp\left(-\frac{\ln^2 I}{2\sigma^2}\right),$$

$$I(t, r_0) \in (0, \infty). \quad (12)$$

В этой модели параметр σ связан с математическим ожиданием m_I и дисперсией σ_I^2 распределения:

$$m_I = M\{I(t, r_0)\} = e^{\sigma^2/2};$$

$$\sigma_I^2 = D[I(t, r_0)] = e^{\sigma^2} (e^{\sigma^2} - 1) = m_I^2 (m_I^2 - 1). \quad (13)$$

При рассмотрении эффектов замираний основной интерес обычно представляют средняя частота замираний и средняя длительность замираний. Эти характеристики зависят от вида распределения интенсивности $I(t, r_0)$, спектрально-корреляционных свойств лазерного излучения и порогового уровня H , относительно которого определяются замирания. Нахождение и вероятностный анализ таких характеристик может быть выполнен на основе общей теории выбросов случайных процессов [51, 58].

Так, в частности, определение среднего числа замираний процесса $I(t, r_0)$ относительно заданного порогового уровня H эквивалентно определению среднего числа отрицательных выбросов $N^-(H, T)$ случайной функции $I(t, r_0)$,

$t \in [t_0, t_0 + T] = [0, T]$ на уровне H . Для вычисления величины $N^-(H, T)$ здесь можно воспользоваться общей формулой [51]

$$N^-(H, T) = - \int_0^T dt \int_{-\infty}^0 I'(t, r_0) p(H, I'; t) dI', \quad (14)$$

в которой функция $p(H, I'; t)$ представляет собой совместную плотность вероятностей $p(I, I'; t) = p(I(t, r_0), I'(t, r_0))$ для значений процесса $I(t, r_0)$ и значений его производной $I'(t, r_0)$ в совпадающие моменты времени при условии $I(t, r_0) = H$.

Такой подход применительно к логарифмически нормальной модели (12), (13) позволяет получить общее выражение для среднего числа замираний $N^-(H, T)$ интенсивности лазерного излучения $I(t, r_0)$ на заданном интервале времени $[t_0, t_0 + T]$ длительностью T при выбранном пороговом уровне H :

$$N^-(H, T) = \frac{T}{2\pi\sigma} \left[\left(\frac{m_I^2 - 1}{m_I^2} \right) (-r_I''(0)) \right]^{1/2} \exp\left(-\frac{\ln^2 H}{2\sigma^2}\right),$$

$$H > 0. \quad (15)$$

Значение $-r_I''(0) = -\frac{1}{\sigma_I^2} \frac{d^2}{dt^2} R_I(\tau) \Big|_{\tau=0}$ определя-

ется здесь через корреляционную функцию $R_I(\tau) = \sigma_I^2 r_I(\tau)$ случайного процесса $I(t, r_0)$.

Если воспользоваться теперь результатами (15) и (12), то можно определить среднюю длительность замираний

$$\bar{\tau}^-(H) = \frac{P\{I(t, r_0) \leq H\}}{N^-(H, 1)} =$$

$$= 2\pi [-r_I''(0)]^{-1/2} \Phi\left(\frac{\ln H}{\sigma}\right) \exp\left(\frac{\ln^2 H}{2\sigma^2}\right) \quad (16)$$

и среднюю длительность отсутствия замираний процесса $I(t, r_0)$ на заданном пороговом уровне H

$$\bar{\tau}^+(H) = 2\pi[-r_I''(0)]^{-1/2} \left\{ 1 - \Phi\left(\frac{\ln H}{\sigma}\right) \right\} \exp\left(\frac{\ln^2 H}{2\sigma^2}\right),$$

$$H > 0, \quad (17)$$

где $\Phi(x) = (2\pi)^{-1/2} \int_{-\infty}^x \exp(-y^2/2) dy$ — интеграл вероятностей.

Полезно подчеркнуть, что по своему физическому смыслу входящий в формулы (15)–(17) параметр $-r_I''(0)$ связан со спектрально-корреляционными свойствами оптического излучения, и при исследовании замираний его удобно представить в виде [51, 59]

$$-r_I''(0) = -\frac{d^2}{d\tau^2} r_I(\tau) \Big|_{\tau=0} = \gamma^2 \Delta\omega_s^2, \quad (18)$$

где γ — коэффициент формы, а $\Delta\omega_s$ — эффективная ширина спектральной плотности $S(\omega)$ излучения. Если, помимо этого, ввести нормированный пороговый уровень $h = \ln H/\sigma$, то на основе формул (15)–(18) получим простые и удобные для практики результаты:

$$N^-(h, 1) = \frac{1}{2\pi} \gamma \Delta\omega_s \exp(h^2/2), \quad h = \ln H/\sigma;$$

$$\bar{\tau}^+(h) = 2\pi(\gamma \Delta\omega_s)^{-1} \{1 - \Phi(h)\} \exp(h^2/2);$$

$$\bar{\tau}^-(h) = 2\pi(\gamma \Delta\omega_s)^{-1} \Phi(h) \exp(h^2/2). \quad (19)$$

Приведенные результаты (19) наглядно отражают характер зависимости частоты и длительности замираний интенсивности лазерного излучения $I(t, r_0)$ от относительного уровня $h = \ln H/\sigma$, формы спектра (коэффициент γ) и эффективной ширины $\Delta\omega_s$ спектральной плотности $S(\omega)$ излучения.

Рассмотренная модель (12) относится к классу основных вероятностных моделей при описании открытых атмосферных каналов лазерных систем передачи информации. Полученные для этой модели результаты (15)–(19) позволяют достаточно полно исследовать случайную структуру замираний: оценивать вероятность появления замираний, среднюю частоту и среднюю длительность замираний, определять вероятность и среднюю длительность отсутствия замираний на заданном пороговом уровне.

Исследование вероятностной структуры замираний необходимо для анализа свойств и оценки потенциальных возможностей практического использования открытых атмосферных каналов для лазерных информационных систем.

Характеристики замираний существенно влияют на выбор структуры сигналов, выбор методов кодирования и синтез алгоритмов помехоустойчивого приема информации.

Заключение

Безусловно, в данной работе не ставилась цель решить все задачи радиооптики. Здесь лишь предложен один из возможных подходов к построению единой статистической теории лазерных информационных систем и радиооптических методов передачи, приема и обработки информации. Результаты рассмотрения фундаментальных пределов точности и исследование эффектов многофакторного случайного влияния открытых атмосферных каналов на структуру лазерного излучения показывают особенности решения характерных задач вероятностного анализа при построении лазерных информационных систем.

Общее развитие статистической радиооптики позволит:

- исследовать внутренние шумы и флуктуационные эффекты в лазерных системах;
- выполнить анализ работы радиооптических систем в реальной помеховой обстановке;
- определить фундаментальные пределы в радиооптике и оценить потенциальные возможности радиооптических процессоров;
- оптимизировать существующие алгоритмы и синтезировать качественно новые структуры лазерных систем информационного обмена, управления и обработки информации.

Это, в свою очередь, даст возможность рассматривать многие разрозненные задачи лазерной локации, навигации и управления, оптической связи, оптоэлектроники и фотоники с единых позиций — с позиций общей статистической теории обработки информационных процессов.

Работа выполнялась при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках проекта РФФИ № 13-07-12120.

Литература

1. **Khimenko V. I.** Radio-Optic Signal Processing: Principles of Statistical Theory // Proc. SPIE. 1993. Vol. 2051. P. 711–715.
2. **Ярив А.** Введение в оптическую электронику / пер. с англ. под ред. О. В. Богданкевича. — М.: Наука, 1983. — 398 с.
3. **Хаус Х.** Волны и поля в оптоэлектронике / пер. с англ. под ред. К. Ф. Шипилова. — М.: Мир, 1988. — 432 с.
4. **Якушенков Ю. Г.** Теория и расчет оптико-электронных приборов. — М.: Логос, 1999. — 480 с.

5. Ларкин А. И., Юу Ф. Т. С. Когерентная фотоника. — М.: Бином. Лаборатория знаний, 2007. — 319 с.
6. Салех Б., Тейх М. Оптика и фотоника. Принципы и применения: пер. с англ. — Долгопрудный: Интеллект, 2012. — 760 с.
7. Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голография / пер. с англ. под ред. Ю. И. Островского. — М.: Мир, 1973. — 688 с.
8. Оптическая голография / под ред. Г. Колфилда; пер. с англ. под ред. С. В. Гуревича. — М.: Мир, 1982. — 736 с.
9. Унгер Г. Г. Оптическая связь / пер. с нем. под ред. Н. А. Семенова. — М.: Связь, 1979. — 264 с.
10. Гауэр Дж. Оптические системы связи / пер. с англ. под ред. А. И. Ларкина. — М.: Радио и связь, 1989. — 504 с.
11. Основы оптической радиометрии / под ред. А. Ф. Котюка. — М.: Физматлит, 2003. — 544 с.
12. Корпел А. Акустооптика: пер. с англ. — М.: Мир, 1993. — 240 с.
13. Балакший В. И., Парыгин В. Н., Чирков Л. Е. Физические основы акустооптики. — М.: Радио и связь, 1985. — 279 с.
14. Ярив А., Юх П. Оптические волны в кристаллах / пер. с англ. под ред. Н. В. Сисакяна. — М.: Мир, 1987. — 616 с.
15. Лазерная локация / под ред. Н. Д. Устинова. — М.: Машиностроение, 1984. — 272 с.
16. Протопопов В. В., Устинов Н. Д. Лазерные локационные системы. — М.: Воениздат, 1987. — 175 с.
17. Основы импульсной лазерной локации / под ред. В. Н. Рождествина. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. — 512 с.
18. Лазерная дальнометрия / под ред. В. П. Васильева. — М.: Радио и связь, 1995. — 256 с.
19. Демтредер В. Лазерная спектроскопия / пер. с англ. под ред. И. И. Собельмана. — М.: Наука, 1985. — 608 с.
20. Коронкевич В. П., Соболев В. С., Дубнищев Ю. Н. Лазерная интерферометрия. — Новосибирск: Наука, 1983. — 214 с.
21. Джоунс Р., Уайкс К. Голографическая и спекл-интерферометрия / пер. с англ. под ред. Г. В. Скроцкого. — М.: Мир, 1986. — 328 с.
22. Воронцов М. А., Шмальгаузен В. И. Принципы адаптивной оптики. — М.: Наука, 1985. — 336 с.
23. Адаптивная оптика: сб. ст. / под ред. Э. А. Витриченко. — М.: Мир, 1980. — 456 с.
24. Методы компьютерной оптики / под ред. В. А. Соифера. — М.: Физматлит, 2003. — 688 с.
25. Информационная оптика / под ред. Н. Н. Евтихьева. — М.: Изд-во МЭИ, 2000. — 612 с.
26. О. Нейл Э. Введение в статистическую оптику / пер. с англ. под ред. П. Ф. Паршина. — М.: Мир, 1966. — 254 с.
27. Гудмен Дж. Статистическая оптика / пер. с англ. под ред. Г. В. Скроцкого. — М.: Мир, 1988. — 528 с.
28. Хименко В. И., Тигин Д. В. Статистическая акустооптика и обработка сигналов. — СПб.: Изд-во СПбГУ, 1996. — 292 с.
29. Ахманов С. А., Дьяков Ю. Е., Чиркин А. С. Введение в статистическую радиофизику и оптику. — М.: Наука, 1981. — 640 с.
30. Ахманов С. А., Дьяков Ю. Е., Чиркин А. С. Статистическая радиофизику и оптика. — М.: Физматлит, 2010. — 428 с.
31. Рейф Ф. Статистическая физика / пер. с англ. под ред. А. О. Вайсенберга. — М.: Наука, 1986. — 336 с.
32. Климонтович Ю. Л. Статистическая физика. — М.: Наука, 1995. — 608 с.
33. Рытов С. М. Введение в статистическую радиофизику. — М.: Наука, 1976. — 496 с.
34. Тихонов В. И. Статистическая радиотехника. — М.: Радио и связь, 1982. — 624 с.
35. Тихонов В. И., Харисов В. Н. Статистический анализ и синтез радиотехнических систем. — М.: Радио и связь, 2004. — 608 с.
36. Тихонов В. И. Оптимальный прием сигналов. — М.: Радио и связь, 1983. — 320 с.
37. Теоретические основы радиолокации / под ред. Я. Д. Ширмана. — М.: Сов. радио, 1970. — 560 с.
38. Сосулин Ю. Г. Теоретические основы радиолокации и радионавигации. — М.: Радио и связь, 1992. — 304 с.
39. Статистическая теория связи и ее практические приложения / под ред. Б. Р. Левина. — М.: Связь, 1979. — 288 с.
40. Информационные технологии в радиотехнических системах / под ред. И. Б. Федорова. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. — 768 с.
41. Острем К. Введение в стохастическую теорию управления / пер. с англ. под ред. Н. С. Райбмана. — М.: Мир, 1973. — 322 с.
42. Справочник по теории автоматического управления / под ред. А. А. Красовского. — М.: Наука, 1987. — 712 с.
43. Бесекерский В. А., Попов Е. П. Теория систем автоматического регулирования. — М.: Наука, 1975. — 768 с.
44. Бесекерский В. А. Цифровые автоматические системы. — М.: Наука, 1976. — 576 с.
45. Шереметьев А. Г. Статистическая теория лазерной связи. — М.: Связь, 1971. — 264 с.
46. Гальярди М., Карп Ш. Оптическая связь / пер. с англ. под ред. А. Г. Шереметьева. — М.: Связь, 1978. — 424 с.
47. Клаудер Дж., Сударшан Э. Основы квантовой оптики / пер. с англ. под ред. С. Ахманова. — М.: Мир, 1970. — 428 с.
48. Мандель Д., Вольф Э. Оптическая когерентность и квантовая оптика / пер. с англ. под ред. В. В. Самарцева. — М.: Физматлит, 2000. — 896 с.
49. Кокс Д., Льюис П. Статистический анализ последовательностей событий / пер. с англ. под ред. Н. П. Бусленко. — М.: Мир, 1969. — 312 с.

50. Кингман Дж. Пуассоновские процессы / пер. с англ. под ред. А. М. Вершика. — М.: МЦНМО, 2007. — 136 с.
51. Тихонов В. И., Хименко В. И. Выбросы траекторий случайных процессов. — М.: Наука, 1987. — 304 с.
52. Исимару А. Распространения и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах: пер. с англ. — М.: Мир, 1981. Т. 1. — 280 с.; Т. 2. — 318 с.
53. Зуев В. Е., Банах В. А., Покасов В. В. Оптика турбулентной атмосферы. — Л.: Гидрометеиздат, 1988. — 270 с.
54. Тимофеев Ю. М., Васильев А. В. Теоретические основы атмосферной оптики. — СПб.: Наука, 2003. — 474 с.
55. Прагт В. К. Лазерные системы связи / пер. с англ. под ред. А. Г. Шереметьева. — М.: Связь, 1972. — 232 с.
56. Зуев В. Е. Распространение видимых и инфракрасных волн в атмосфере. — М.: Сов. радио, 1970. — 496 с.
57. Оптическая связь (тематический выпуск)//ТИИЭР. 1970. Т. 58. № 10. — 372 с.
58. Тихонов В. И., Хименко В. И. Проблема пересечений уровней случайными процессами. Радиофизические приложения // Радиотехника и электроника. 1998. Т. 43. № 5. С. 501–523.
59. Хименко В. И. Временная когерентность и вероятностная структура интенсивности случайных оптических излучений // Информационно-управляющие системы. 2011. № 1(50). С. 2–8.

UDC 519.2:535

doi:10.15217/issn1684-8853.2015.5.43

Laser Information Systems: Developing a Statistical TheoryKhimenko V. I.^a, Dr. Sc., Tech., Professor, vih.13@yandex.ru^aSaint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaja St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation

Purpose: The goal of the paper is summarizing and developing the results in formation of statistical radio-optics which is a unified statistical theory of laser information systems and radio-optical methods of receiving, transformation, transmission and processing of information. **Results:** The main problems and the contradictory nature of radio-optics have been discussed. A generalized model is proposed for radio-optical information processing. A general principle of statistical radio-optics is substantiated. The fundamental accuracy limits associated with quantum effects when registering optical radiation are discussed. The impact of an open atmospheric channel on laser information exchange systems is analyzed. **Practical relevance:** The development of the statistical theory of laser information systems allows us to optimize the existing algorithms and to synthesize completely new algorithms of radio-optical information processing for the systems of laser communication, location, navigation and control.

Keywords — Information Processing, Statistical Radio-optics, Photonics, Laser Information Technologies, Generalized Models, Probabilistic Analysis, Potential Characteristics.

References

1. Khimenko V. I. Radio-Optic Signal Processing: Principles of Statistical Theory. *Proc. SPIE*, 1993, vol. 2051, pp. 711–715.
2. Yariv A. *Introduction to Optical Electronics*. Holt, Rinehart and Winston, 1977.
3. Haus H. *Waves and Fields in Optoelectronics*. New Jersey, Prentice-Hall, 1984.
4. Yakushenkov Yu. G. *Teoriia i raschet optiko-elektronnykh priborov* [Theory and Design of Optoelectronic Devices]. Moscow, Logos Publ., 1999. 480 p. (In Russian).
5. Larkin A. I., Yuu F. T. S. *Kogerentnaia fotonika* [Coherent Photonics]. Moscow, Binom. Laboratoriia znanii Publ., 2007. 319 p. (In Russian).
6. Saleh B. E. A., Teich M. C. *Fundamentals of Photonics*. New York, John Wiley and Sons, 2007.
7. Collier R. C., Burckhardt C. B., Lin L. H. *Optical Holography*. New York, Academic Press, 1971.
8. *Handbook of Optical Holography*. H. J. Caulfield (Ed.). New York, Academic Press, 1979.
9. Unger H.-G. *Optische Nachrichtentechnik*. Berlin, Elitera, 1976.
10. Gowar J. *Optical Communication Systems*. London, PrenticeHall, 1984.
11. *Osnovy opticheskoi radiometrii* [Fundamentals of Optical Radiometry]. A. F. Kotjuk (Ed.). Moscow, Fizmatlit Publ., 2003. 544 p. (In Russian).
12. Korpel A. *Acousto-optics*. New York, M. Dekker, 1988.
13. Balakshij V. I., Parygin V. N., Chirkov L. E. *Fizicheskie osnovy akustooptiki* [Physical Fundamentals of Acoustooptics]. Moscow, Radio i sviaz' Publ., 1985. 279 p. (In Russian).
14. Yariv A., Yeh P. *Optical Waves in Crystals*. New York, John Wiley and Sons, 1984.
15. *Lazernaia lokatsiia* [Laser Location]. N. D. Ustinov (Ed.). Moscow, Mashinostroenie Publ., 1984. 272 p. (In Russian).
16. Protopopov V. V., Ustinov N. D. *Lazernye lokatsionnye sistemy* [Laser Location System]. Moscow, Voenizdat Publ., 1987. 175 p. (In Russian).
17. *Osnovy impul'snoi lazernoii lokatsii* [Fundamentals of Impulse Laser Location]. V. N. Rozhdestvin (Ed.). Moscow, MGTU im. N. E. Baumana Publ., 2006. 512 p. (In Russian).
18. *Lazernaia dal'nometriia* [Laser Ranging]. V. P. Vasil'ev (Ed.). Moscow, Radio i sviaz' Publ., 1995. 256 p. (In Russian).
19. Demtroder W. *Laser Spectroscopy*. New York, Springer-Verlag, 1982.
20. Koronkevich V. P., Sobolev V. S., Dubnishhev Yu. N. *Lazernaia interferometriia* [Laser Interferometry]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1983. 214 p. (In Russian).
21. Jones R., Wykes C. *Holographic and Speckle Interferometry*. Cambridge, Cambridge University Press, 1983.
22. Voroncov M. A., Shmal'gauzen V. I. *Printsipy adaptivnoi optiki* [The Principles of Adaptive Optics]. Moscow, Nauka Publ., 1985. 336 p. (In Russian).
23. *Adaptivnaia optika. Sb. statei* [Adaptive Optics. Collection of Articles]. E. A. Vitrichenko (Ed.). Moscow, Mir Publ., 1980. 456 p. (In Russian).
24. *Metody komp'iuternoi optiki* [Computer Optics Methods]. V. A. Sojfer (Ed.). Moscow, Fizmatlit Publ., 2003. 688 p. (In Russian).

25. *Informatsionnaia optika* [Information Optics]. N. N. Evtihiev (Ed.). Moscow, MEI Publ., 2000. 612 p. (In Russian).
26. O'Neill E. L. *Introduction to Statistical Optics*. Massachusetts, Addison-Wesley Publishing Company, 1963.
27. Goodman J. *Statistical Optics*. New York, John Wiley and Sons, 1985.
28. Khimenko V. I., Tigin D. V. *Statisticheskaiia akustooptika i obrabotka signalov* [Statistical Acousto-Optics and Signal Processing]. SPbGU Publ., 1996. 292 p. (In Russian).
29. Ahmanov S. A., D'jakov Yu. E., Chirkin A. S. *Vvedenie v statisticheskuiu radiofiziku i optiku* [Introduction to Statistical Radiophysics and Optics]. Moscow, Nauka Publ., 1981. 640 p. (In Russian).
30. Ahmanov S. A., D'jakov Yu. E., Chirkin A. S. *Statisticheskaiia radiofizika i optika* [The Statistical Radiophysics and Optics]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2010. 428 p. (In Russian).
31. Reif F. *Statistical Physics: Berkeley Physics Course*. McGraw-Hill Book Company, 1967. Vol. 5.
32. Klimontovich U. L. *Statisticheskaiia fizika* [Statistical Physics]. Moscow, Nauka Publ., 1995. 608 p. (In Russian).
33. Rytov S. M. *Vvedenie v statisticheskuiu radiofiziku* [Introduction to Statistical Radiophysics]. Moscow, Nauka Publ., 1976. 496 p. (In Russian).
34. Tikhonov V. I. *Statisticheskaiia radiotekhnika* [Statistical Radiotechnics]. Moscow, Radio i sviaz' Publ., 1982. 624 p. (In Russian).
35. Tikhonov V. I., Harisov V. N. *Statisticheskii analiz i sintez radiotekhnicheskikh sistem* [Statistical Analysis and Synthesis of Radio Systems]. Moscow, Radio i sviaz' Publ., 2004. 608 p. (In Russian).
36. Tikhonov V. I. *Optimal'nyi priem signalov* [The Optimal Signal Reception]. Moscow, Radio i sviaz' Publ., 1983. 320 p. (In Russian).
37. *Teoreticheskie osnovy radiolokatsii* [Theoretical Foundations of Radiolocation]. Ya. D. Shirman (Ed.). Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1970. 560 p. (In Russian).
38. Sosulin Yu. G. *Teoreticheskie osnovy radiolokatsii i radio-navigatsii* [Theoretical Foundations Radiolocation and Radio Navigation]. Moscow, Radio i sviaz' Publ., 1992. 304 p. (In Russian).
39. *Statisticheskaiia teoriia sviazi i ee prakticheskie prilozheniia* [Statistical Communication Theory and its Practical Applications]. B. R. Levin (Ed.). Moscow, Sviaz' Publ., 1979. 288 p. (In Russian).
40. *Informatsionnye tekhnologii v radiotekhnicheskikh sistemakh* [Information Technologies in Radio Systems]. I. B. Fedorov (Ed.). Moscow, MGTU im. N. E. Bauman Publ., 2004. 768 p. (In Russian).
41. Astrom K. *Introduction to Stochastic Control Theory*. Academic Press, 1970. 322 p.
42. *Spravochnik po teorii avtomaticheskogo upravleniia* [Handbook of Control Theory]. A. A. Krasovskij (Ed.). Moscow, Nauka Publ., 1987. 712 p. (In Russian).
43. Besekerski V. A., Popov E. P. *Teoriia sistem avtomaticheskogo regulirovaniia* [The Theory of Automatic Control Systems]. Moscow, Nauka Publ., 1975. 768 p. (In Russian).
44. Besekerski V. A. *Tsifrovye avtomaticheskii sistem* [Digital Automatic System]. Moscow, Nauka Publ., 1976. 576 p.
45. Sheremet'ev A. G. *Statisticheskaiia teoriia lazernoi sviazi* [Statistical Theory of Laser Communication]. Moscow, Sviaz' Publ., 1971. 264 p. (In Russian).
46. Gagliardi R., Karp S. *Optical Communications*. New York, C. Wiley, 1976.
47. Klaude R. J., Sudarshan E. C. G. *Fundamentals of Quantum Optics*. New York, Benjamin, 1968.
48. Mandel L., Wolf E. *Optical Coherence and Quantum Optics*. Cambridge, Cambridge University Press, 1995.
49. Cox D. R., Lewis P. A. W. *The Statistical Analysis of Series of Events*. London, Methuen; New York, John Wiley, 1966.
50. Kingman J. F. C. *Poisson Processes*. Oxford, Clarendon press, 1993.
51. Tikhonov V. I., Khimenko V. I. *Vybrosy traektorii sluchainykh protsessov* [Trajectories Emissions of Stochastic Processes]. Moscow, Nauka Publ., 1987. 304 p. (In Russian).
52. Ishimaru A. *Wave Propagation and Scattering in Random Media*. Wiley-IEEE Press, 1999, vol. 1.
53. Zuev V. E., Banah V. A., Pokasov V. V. *Optika turbulentsnoi atmosfery* [Turbulent Atmosphere Optics]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1988. 270 p. (In Russian).
54. Timofeev Yu. M., Vasil'ev A. V. *Teoreticheskie osnovy atmosfernoii optiki* [Theoretical Foundations of Atmospheric Optics]. Saint-Petersburg, Nauka Publ., 2003. 474 p. (In Russian).
55. Pratt W. K. *Laser Communication Systems*. New York, Wiley, 1969.
56. Zuev V. E. *Rasprostranenie vidimykh i infrakrasnykh voln v atmosfere* [Distribution of Visible and Infrared Waves in the Atmosphere]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1970. 496 p. (In Russian).
57. *Opticheskaiia sviaz' (tematicheskii vypusk)* [The Optical Communications (Special Issue)]. *TIIER*, 1970, vol. 58, no. 10.
58. Tikhonov V. I., Khimenko V. I. The Problem of Levels Intersections of Stochastic Processes. Radiooptical Applications. *Radiotekhnika i elektronika*, 1998, vol. 43, no. 5, pp. 501–523 (In Russian).
59. Khimenko V. I. Time Coherence and Probability Structure of Random Optical Radiation Intensity. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2011, no. 1(50), pp. 2–8 (In Russian).