

Дистанционные измерения. Определение опорных значений характеристик природного объекта

В. В. АЛЕКСЕЕВ, А. А. МИНИНА, П. И. КРУПКО

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
им. Ульянова (Ленина), С.-Петербург, Россия, e-mail: vvalekseyev@mail.ru

Рассмотрены вопросы создания базы эталонных объектов для построения систем контроля состояния, идентификации и предупреждения аварийных (чрезвычайных) ситуаций и оценки их последствий (протекание, нанесенный ущерб) на основе анализа и моделирования в геоинформационных системах.

Ключевые слова: данные дистанционных измерений, береговая линия, опорная характеристика, законы распределения, геоинформационные системы.

The problems of creation of reference objects database for construction of control systems for monitoring of state, identification and prevention of emergency situations and estimation of consequences of those (passing, damage) based on the analysis and modeling in information systems — has been considered.

Key words: remote measurements data, coastline, reference characteristic, distribution laws, geoinformation systems.

В связи с развитием аэрокосмической техники данные дистанционных измерений (ДДИ) используют для решения широкого круга задач. Например, ДДИ из космоса позволяет оперативно оценивать состояние техногенных и природных объектов (технических сооружений, транспортных систем, морей и рек), местоположение и динамику опасных процессов, выбирать маршруты следования судов и т. д. Использование ДДИ существенно снижает затраты на построение систем мониторинга и поддержки решений в управляющих системах. Однако необходима оценка достоверности анализируемых данных, а следовательно, и проработка вопросов метрологического обеспечения данного вида измерений. Отсутствие системы эталонов и практическая недоступность их формирования в данной области требуют создания базы опорных (образцовых) объектов [1], которую можно использовать для оценки текущего состояния контролируемых объектов.

Рассмотрим поставленные вопросы в применении к системе контроля состояния, идентификации и предупреждения чрезвычайных ситуаций (ЧС) и оценки последствий ЧС на примере анализа ДДИ в геоинформационной системе (ГИС). Базовой процедурой программно-алгоритмического обеспечения для анализа ДДИ на основе ГИС является регистрация изменений состояния различных типов объектов, анализ и идентификация ситуаций с целью их дальнейшей классификации и выделения опасных процессов, предупреждения их негативного влияния.

Различные объекты в зависимости от решаемой задачи имеют разные характеристики, которые необходимо контролировать. Актуальна задача вычисления опорного значения характеристики объекта, так как его определение значительно влияет на точность измерений и анализа, а также на достоверность идентификации той или иной ситуации.

Объекты контроля и их классификация. Система анализа (СА) работает с характеристиками природных и техногенных объектов, имеющих географическую привязку, а также следующие информативные параметры: геометрические (форма, размер, тень), яркостные (фототон, уровень яркости, цвет, спектральный образ), структурные (текстура, структура, рисунок) [2]. Форма не зависит от условий съемки, тень позволяет оценивать пространственную форму объекта на одиночном снимке, особенно при определении параметров рельефа. По выраженности границы тени определяют профиль водораздельных поверхностей, бровок эрозионных форм, гребней форм эолового рельефа, а по размеру, протяженности — относительную высоту, длину форм рельефа или техногенных объектов. Размер — один из параметров, который можно применять для идентификации объекта, причем для измерения текущих изменений часто требуется не абсолютный, а относительный размер.

Структурные параметры отражают реально существующие ландшафтные рисунки, природные и техногенные объекты. На снимке эти параметры представляют совокупность изображений объектов и их частей определенной формы, размера и тона (цвета), положения и повторяемости элементов. Благодаря этим свойствам структурные параметры мало зависят от условий освещения, сезона и технических условий съемки, несмотря на изменчивость отдельных составляющих изображения, поэтому их принято считать надежными (дешифровочными) идентификационными параметрами.

Яркостные параметры связаны со спектральной отражательной способностью, фиксируемой на снимке в зависимости от вида съемки. На панхроматических и зональных (в относительно узкой части спектра) снимках интегральная или спектральная яркость объектов закодирована уровнями яркости (яркостью) шкалы из определенного числа сту-

пений (например, 256; 2048). На многозональном снимке различия в спектральной яркости объектов отображаются набором уровней яркости в съемочных зонах — спектральных образах, — а на цветных синтезированных снимках — цветом.

В геоинформационных технологиях для описания местоположения объекта и его параметров (геометрических, структурных, спектральных), при представлении результатов дистанционных измерений используют вектор географических координат. Это в значительной степени определяет точность измерений, решение задачи поиска, выделения и фильтрации областей точек одинакового цвета, дает возможность работать с параметрами, отражающими текущее состояние контролируемого объекта, его изменение во времени, влияние одного объекта на другой — будь то береговая линия водного объекта или зона зеленых насаждений города [3]. В зависимости от типа объекта его характеристики могут изменяться при определенных условиях или быть постоянными (мало изменяющимися). Такими характеристиками могут обладать как природные, так и техногенные объекты.

Далее техногенные объекты (стационарные и подвижные) и природные (территориальные системы и экосистемы различного типа) будем различать.

Объекты обоих видов можно описать вектором параметров, определяющим тип и свойства объектов [4]:

$$\mathbf{O}_{mk} = \{\mathbf{G}_{mk}, \mathbf{S}_{mk}, \mathbf{B}_{mk}, \mathbf{F}_{mk}, \mathbf{\Omega}_{mk}\},$$

где k — номер объекта в базе данных; $\mathbf{G}_{mk}$ — вектор географических координат объекта; $\mathbf{S}_{mk}$ — множество геометрических признаков; $\mathbf{B}_{mk}$ — множество структурных признаков; $\mathbf{F}_{mk}$ — множество спектральных признаков; $\mathbf{\Omega}_{mk}$ — множество других контролируемых параметров объекта. Для каждого параметра должны быть определены ограничения (диапазон изменения) в пространстве и времени.

Объекты могут иметь сложную структуру, их характеристики получают с помощью различных методов и средств. Например, географические координаты, геометрические размеры и структурные признаки — с помощью кадастровой съемки или другими методами. Однако достаточно часто такие работы оказываются дорогими, особенно для объектов с различающимися сезонными характеристиками или сложной административной структурой.

В связи с перечисленными выше причинами авторами разработан алгоритм вычисления опорных характеристик контролируемых стационарных объектов на основе статистического анализа ДДИ.

Формирование опорных характеристик объекта. Водные объекты (ВО) — одни из наиболее важных для СА. Они подвержены периодическим сезонным, а также случайным природным и техногенным воздействиям. Проведем анализ построения опорных характеристик на их примере.

К водным объектам относят: море, залив, озеро, разлив, водоем (естественный или искусственный), водоток (большой, средний, малый), болото и др.

К характеристикам ВО $\mathbf{O}_V = \{\mathbf{G}_V, \mathbf{S}_V, \mathbf{B}_V, \mathbf{F}_V\}$ относят: вектор географических координат $\mathbf{G}_V$, описывающих профиль береговой линии; площадь S_V ; зоны разной интенсивности цвета в различных спектральных областях съемки $\mathbf{B}_V (\mathbf{F}_V) = \{\mathbf{G}_{Vf} = \{g_{Vf}\}, \mathbf{S}_{Vf} = \{s_{Vf}\}\}$; $\mathbf{F}_V$ — все остальные.

Рассмотрим одну из характеристик для ВО Финский залив (ФЗ) — «береговая линия» $\mathbf{O}_{V6}$. Она зависит от сезонных изменений в природе, рельефа местности и уровня грунтовых вод: талых вод весной (уровнем снега в системе водосбора, градиентом температур атмосферного воздуха в весенний период; количеством осадков в системе водосбора ВО летом; количеством осадков в системе водосбора ВО, ветровой обстановкой (нагонная волна с Балтийского моря) осенью; количеством осадков в системе водосбора ВО, температурой, ветровой обстановкой зимой.

Основные процессы, оказывающие воздействие на береговую линию, определяются географическим местом положения ВО и его взаимодействием с соседними, их водосборами. Поэтому описать ВО можно только на географической основе, обеспечивающей анализ взаимодействия территориальных объектов. Так как на территории объекта могут происходить различные события, которые необходимо идентифицировать и позиционировать в соответствии с зоной влияния того или иного фактора, определение опорной характеристики является необходимой задачей. Очевидно, что при разных условиях опорная характеристика ВО должна иметь различные значения. Для каждого сезона должны быть определены нормальные метеорологические условия (НМУ), при которых можно говорить о создании некоторой опорной характеристики.

Таким образом, характеристика береговой линии ВО должна состоять из совокупности сезонных характеристик соответственно для весны, лета, осени, зимы:

$$\mathbf{G}_{V6} = \{\mathbf{G}_{V6.в}, \mathbf{G}_{V6.л}, \mathbf{G}_{V6.о}, \mathbf{G}_{V6.з}\}.$$

Алгоритм определения опорной характеристики «береговая линия». Рассмотрим принципы построения опорной характеристики «береговая линия» ВО для летнего сезона, как наиболее стабильного и безоблачного для Северо-Западного региона. Для упрощения будем считать $\mathbf{G}_{V6.л} = \mathbf{G}_V$. Характеристика профиля ВО «береговая линия» представляет совокупность точечных измерений (пикселей) $\mathbf{G}_V = \{\mathbf{X}_V = \{x_{Vl}\}\}$, где $l \in L_V$, L_V — множество точек характеристики.

Этап 1. Выбор серии измерений. Для формирования опорной характеристики ВО необходимо произвести серию из S измерений при НМУ, которые должны быть определены, как условия близкие к среднестатистическим данным для заданного географического района за большой период наблюдений. Для этого необходимо привести к векторному виду серию растровых снимков анализируемой области, сделанных в одном сезоне с некоторой периодичностью. В результате измерений получим совокупность значений характеристики ВО (ансамбля данных), каждое из которых отличается от другого из-за погрешностей.

Результатом серии измерений является массив данных:

$$\mathbf{X}_V = \{\mathbf{X}_{Vc} = \{x_{Vcl} = \{x_{Vclш}, x_{Vclд}\}\}\},$$

где $x_{Vclш}$, $x_{Vclд}$ — значения широты и долготы в первой точке в c -м измерении.

Этап 2. Вычисление координат и неопределенности измерений опорной характеристики. Обозначим $x_{Vcl} = x_c$, $x_{Vclш} = x_{сш}$, $x_{Vclд} = x_{сд}$. В качестве координат опорного значения точки вектора береговой линии возьмем оценки среднего значения из ансамбля выборов

$$\left. \begin{aligned} x'_{сш} &= C^{-1} \sum_c x_{сш}, \quad c = 1, \dots, C; \\ x'_{сд} &= C^{-1} \sum_c x_{сд}, \quad c = 1, \dots, C. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Разброс результатов ДДИ

$$\left. \begin{aligned} D(x_{сш}) &= C^{-1} \sum_c (x_{сш} - x'_{ш})^2, \quad c = 1, \dots, C; \\ D(x_{сд}) &= C^{-1} \sum_c (x_{сд} - x'_{д})^2, \quad c = 1, \dots, C. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Этап 3. Определение закона распределения плотности вероятностей неопределенностей (разброса результатов дистанционных измерений). Зададим доверительный интервал для опорного значения характеристики в случае симметричного закона распределения неопределенности:

$$\left\{ \begin{aligned} x'_{ш} &= x'_{ш} \pm k\sigma(x_{сш}) = x'_{ш} \pm k\sqrt{D(x_{сш})}, \\ x'_{д} &= x'_{д} \pm k\sigma(x_{сд}) = x'_{д} \pm k\sqrt{D(x_{сд})}. \end{aligned} \right.$$

Этап 4. Определение опорной характеристики ВО. После проверки на состоятельность анализируемых выборок (на промах — выхода значений за заданный интервал) и удаления из анализа соответствующих измерений получим окончательное значение координат и доверительного интервала опорной характеристики контролируемого ВО:

$$\mathbf{G}_V^0 = \left\{ \mathbf{X}_V^0 = \left\{ \mathbf{x}_{VI}^0 = \left\{ x'_{Vлш} = x'_{Vлш} \pm k\sigma(x'_{Vлш}), \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. x'_{Vлд} = x'_{Vлд} \pm k\sigma(x'_{Vлд}) \right\} \right\} \right\}.$$

Рассмотрим ниже реализацию приведенного алгоритма для ВО ФЗ с использованием ДДИ за весенне-летний период нескольких лет.

Этап 1. Выбор серии измерений. На основании анализа НМУ выбраны пять ($C = 5$) реализаций: июнь 1985 г., май 1989 г., август 1990 г., июль 1994 г., июнь 2011 г. Используются ДДИ спутника LANDSAT 5, четвертый измерительный канал.

Этап 2. Вычисление координат и неопределенности измерений опорной характеристики. Отметим, что выбранные результаты дистанционных измерений имеют различную точность, которая зависит от плавающей разрешающей способности измерительных каналов, равной 30 м и методов приведения к векторному виду. В результате выбранные характеристики имеют различное количество точек аппроксимации: 10511, 18712, 10540, 10006, 9420. Все выбранные характеристики удовлетворяют требованиям по точности аппроксимации анализируемой характеристики.

С целью формирования ансамбля реализаций выбран следующий алгоритм определения области расположения анализируемых точек на ансамбле выборок для оценки погрешности результатов дистанционных измерений.

1. В качестве основной характеристики выберем ту, которая имеет минимальное число точек аппроксимации $\mathbf{G}_{V1}$. Остальным присвоим номера в ходе измерений $\mathbf{G}_{V2}$, $\mathbf{G}_{V3}$, $\mathbf{G}_{V4}$, $\mathbf{G}_{V5}$. Далее найдем кратчайшее расстояние между точками с координатами (x_1, y_1) и (x_2, y_2) соответствующих выборок, между вычисленными точками определим координаты середины (x_{21}, y_{21}) ;

2. Найдем кратчайшее расстояние между серединой (x_{21}, y_{21}) и третьей выборкой; вычислим координату точки в третьей выборке (x_3, y_3) ; определим координаты середины между точками (x_{21}, y_{21}) и (x_3, y_3) ; далее получим координаты середины (x_{321}, y_{321}) .

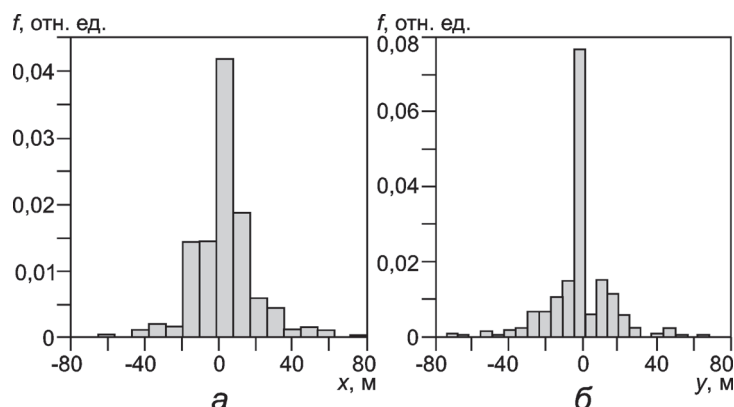


Рис. 1. Распределение плотности вероятностей разброса координат опорных значений точек по долготе и широте береговой линии в северной части

3. Найдем кратчайшее расстояние между серединой (x_{321}, y_{321}) и четвертой выборкой; вычислим координату точки в четвертой выборке (x_4, y_4) ; определим координаты середины между точками (x_{321}, y_{321}) и (x_4, y_4) ; получим еще одну точку (x_{4321}, y_{4321}) .

4. Вычисления в пунктах 1—3 повторим по количеству имеющихся в распоряжении выборок (чем их больше, тем точнее результат).

5. Найдем среднее между точками (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , (x_3, y_3) ... (x_n, y_n) . Полученное значение $(\bar{x}, \bar{y})$ будем считать базовым для рассматриваемой характеристики «береговая линия»

$$\mathbf{G}_{VФЗ}^0 = \left\{ \mathbf{X}_{VФЗ}^0 = \left\{ \mathbf{x}_{VФЗ}^0 = \left\{ x'_{VФЗш} = \bar{x}, x'_{VФЗд} = \bar{y} \right\} \right\} \right\}.$$

Результат анализа показан на рис. 1.

6. Определим разброс результатов измерений как разность между $(x_n - \bar{x}, y_n - \bar{y})$ для каждой из найденных в пп. 1—4 точек в соответствии с (1), (2).

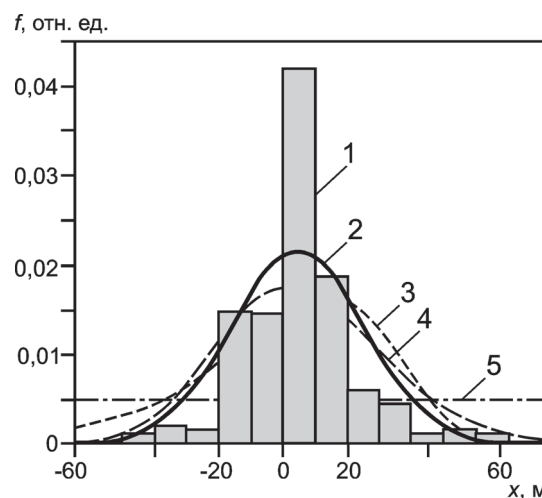


Рис. 2. Эмпирический (1) и теоретические законы распределения по оси X

2 — нормальное; 3 — распределение Гамбеля; 4 — общее распределение Гамбеля; 5 — равномерное

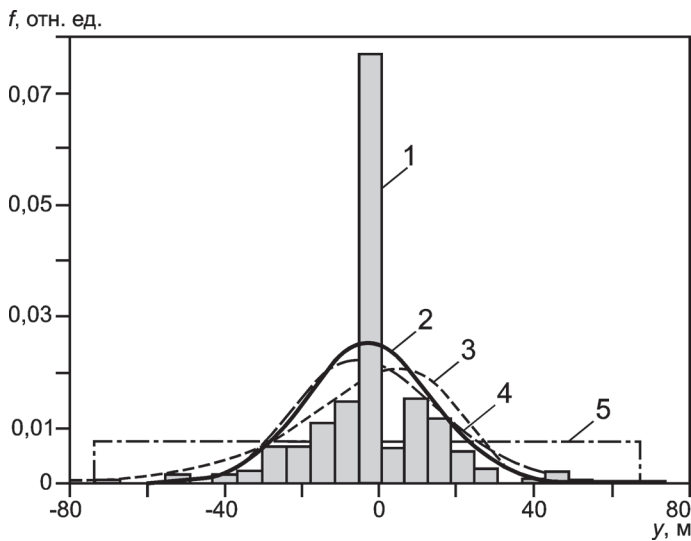


Рис. 3. Эмпирический и теоретические законы распределения по оси Y (см. обозначения на рис. 2)

Этап 3. Определение закона распределения плотности вероятностей неопределенности (разброса результатов дистанционных измерений). Для полученного массива данных, содержащих разброс результатов измерений $(x_n - \bar{x}, y_n - \bar{y})$ построены гистограммы распределения плотностей вероятности. На рис. 1 показаны результаты анализа для характеристики «береговая линия» ВО Финский залив на нескольких участках, имеющих различную географическую направленность (пример, иллюстрирующий разброс координат опорных значений точек по долготе X и широте Y береговой линии в северной части Финского залива).

Подберем теоретический закон распределения и его параметры. Вид теоретического закона распределения определяется исходя из вида гистограммы. Реализуем проверку для четырех подходящих непрерывных распределений: равномерного; нормального; распределения Гамбела; обобщенного распределения Гамбела.

На рис. 2, 3 показаны суммарная гистограмма эмпирического распределения плотности вероятностей разброса координат опорных значений точек по долготе и широте и все анализируемые теоретические плотности распределения [5].

Из проверки по критерию согласия Колмогорова (рис. 4) следует, что из перечисленных выше распределений для данного эмпирического закона распределения по осям X, Y подходит нормальный закон со следующими параметрами: $m = 2,54$; $\sigma = 18,64$ для оси X; $m = -2,63$; $\sigma = 16,09$ для оси Y. Критический уровень значимости для эмпирического закона равен $2,64 \cdot 10^{-10}$ по оси X, $4,51 \cdot 10^{-15}$ по оси Y.

В этом случае полученная характеристика имеет заданные метрологические свойства (математическое ожидание результатов измерений не превышает ± 4 м) и может использоваться как опорная — «рабочий эталон» для проведения дистанционных измерений и решения задач оценки изменения состояния объекта, идентификации аварийных ситуаций, предупреждения ЧС.

Этап 4. Определение опорной характеристики «береговая линия» ВО ФЗ. Реализовав приведенный алгоритм

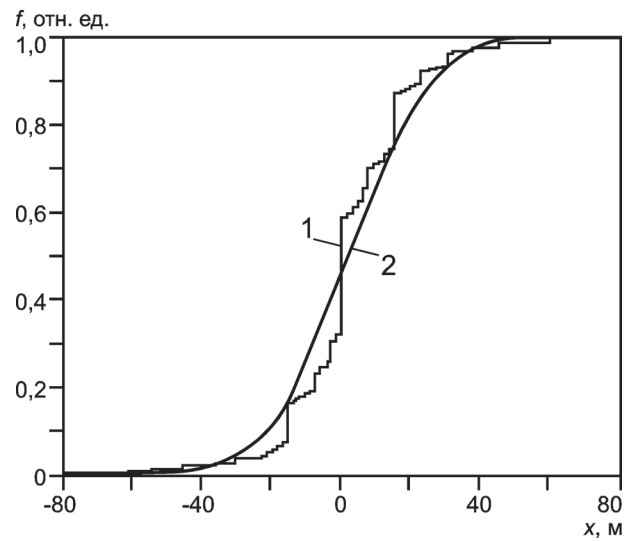


Рис. 4. Выбор наиболее подходящего теоретического закона распределения

для всех точек получим опорную характеристику «береговая линия» ВО. Проверив на состоятельность анализируемые выборки и удалив лишние из анализа соответствующих измерений, найдем окончательное значение координат и доверительного интервала опорной характеристики (равного $k\sigma$, где k зависит от значения доверительной вероятности) «береговая линия» ВО ФЗ [6]:

$$G_{V\Phi 3}^o = \left\{ X_{V\Phi 3}^o = \left\{ x_{V\Phi 3/l}^o = \left\{ x_{V\Phi 3/lw}^o = x'_{V\Phi 3/lw} \pm k\sigma(x_{V\Phi 3/cw}^o), \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. x_{V\Phi 3/l}^o = x'_{V\Phi 3/l} \pm k\sigma(x_{V\Phi 3/cd}^o) \right\} \right\} \right\},$$

где $l \in L_V$, L_V — множество точек характеристики «береговая линия» ВО ФЗ.

Таким образом, с помощью рассмотренного алгоритма могут быть созданы векторные опорные характеристики стационарных природных объектов, которые могут стать основой для моделирования и анализа как текущего состояния объектов, так и для оценки их взаимного влияния.

Работа выполнена при поддержке проекта № 14.574.21.0043, выполняемого на кафедре ИИСТ СПбГЭТУ по ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014—2020 годы», по теме «Проведение прикладных исследований, направленных на создание интеллектуальной информационно-измерительной системы комплексной безопасности участка обращения локомотива» (шифр заявки «2014-14-576-0048-010»).

Литература

1. Чуновкина А. Г., Слаев В. А., Степанов А. В., Звягин Н. Д. Оценивание неопределенности измерений при использовании программ обработки данных // Измерительная техника. 2008. № 7. С. 3—8.
2. Лабутина И. А., Балдина Е. А. Использование данных дистанционного зондирования для мониторинга экосистем ООПТ: Методическое пособие. М., 2011.

3. **Сташевский С. Ю.** Алгоритм векторизации растровых изображений в общем виде // Автоматизированные системы обработки информации, управления и проектирования: Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУРа), 2004. С. 124—130.

4. **Kumaravel S., Ramkumar T., Gurunnam B., Suresh M.** Quantitative estimation of shoreline changes using remote sensing and GIS: A case study in the parts of Cuddalore district, East coast of Tamil Nadu, India. // Int. J. Environmental Sciences. 2012. V. 2. N. 4. P. 2482—2490.

5. **Tang Yanli.** The Application of GIS and RS for Coastline Change Detection and Risk Assessment to Enhanced Sea Level Rise. Yellow River delta, China.

6. **Armah F. A.** GIS-based Assessment of Short Term Shoreline Changes in the Coastal Erosion-Sensitive Zone of Accre, Ghana // J. Environmental Sciences. 2011. V. 5. N. 7. P. 643—654.

Дата принятия 24.03.2015 г.

ОПТИКО-ФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

535.231.63

Метрологическое обеспечение измерений средней мощности оптического излучения в волоконно-оптических системах связи и передачи информации

А. И. ГЛАЗОВ, В. С. ИВАНОВ, М. Л. КОЗАЧЕНКО, С. В. ТИХОМИРОВ

Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений,
Москва, Россия, e-mail: mkozachenko@vniiofi.ru

Рассмотрены развитие метрологического обеспечения в области измерений средней мощности оптического излучения в спектральном диапазоне 0,6—1,7 мкм для волоконно-оптических систем связи и передачи информации, создание Государственного первичного специального эталона единиц длины и времени распространения сигнала в световоде, средней мощности, ослабления и длины волны для волоконно-оптических систем связи и передачи информации ГЭТ 170—2011.

Ключевые слова: эталон, излучение, волоконно-оптические системы передачи информации, средняя мощность, ослабление, длина волны.

The problems associated with the development of the field of metrological assurance of measurements of optical radiation average power in the spectral range of 0,6—1,7 microns for optical fiber communication and information transfer systems, the creation of the State primary standard 170-GET.

Key words: standard, radiation, fiber-optical communication transfer systems, average power, attenuation, wavelength.

В настоящее время область метрологии волоконно-оптических систем связи и передачи информации (ВОСП) продолжает быстро развиваться, что находит отражение не только в расширении динамических диапазонов характеристик передаваемого по световодам излучения, но и в увеличении перечня параметров, характеризующих эти системы. Примером служит разработанный Государственный первичный специальный эталон единиц длины и времени распространения сигнала в световоде, средней мощности, ослабления и длины волны для волоконно-оптических систем связи и передачи информации ГЭТ 170—2011. Такое развитие связано с интенсивным поиском наиболее эффективных решений основных задач, направленных на увеличение объемов, скорости и качества передаваемой информации. Главным являлись измерения амплитудно-частотных (АЧХ) и спек-

тральных характеристик излучения. Естественно, что измерительная аппаратура, оптические схемы, алгоритмы измерительных процессов и методики, применяемые в этой области, широко использовались на практике. В то же время повышение точности измерений средней мощности оптического излучения не являлось решающим, поэтому накопление опыта по измерениям происходило не столь интенсивно. В этом и кроются основные причины недостатков, выявленных при исследовании высокоточных средств измерений (СИ) средней мощности излучения в ВОСП [1]. Например, при проведении различных метрологических работ основное внимание традиционно уделяли быстрдействию измерительной аппаратуры и подавлению факторов, вызывающих искажения АЧХ передаваемого и измеряемого излучений, а оценке потерь излучения на различных участках и эле-