

Научная статья

DOI: 10.15593/2224-9397/2024.1.02

УДК 528.8

Х.Г. Асадов, Н.Ш. Абилова, Л.И. Нуриева

Национальное аэрокосмическое агентство, Баку,
Азербайджанская Республика

МЕТОД СТРУКТУРНО-БЛОЧНОГО СИНТЕЗА СИСТЕМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

В стандарте ISO TS16949:2009 нестабильность самого изучаемого объекта или процесса четко отделена от неопределённостей, вызванных самой измерительной системой. Следовательно, методологию анализа измерительных систем можно считать вполне пригодной для применения к системам дистанционного зондирования, если обобщенным объектом измерения считать сумму самого объекта и влияние внешних факторов, воздействующих на этот объект, приводящих как к систематическим, так и случайным погрешностям измерений. **Цель исследования:** построение общей структурно-блочной модели системы дистанционного зондирования и дальнейшая оптимизация указанной модели. **Методы:** использован принцип системного анализа, заключающийся в построении возможных моделей, дальнейшей оптимизации этих моделей и синтезе наилучшего варианта построения системы. **Результаты:** показано, что системный подход к анализу системы дистанционного зондирования и дальнейший синтез оптимальной модели обеспечивают формирование максимальной величины отраженного сигнала путем определения оптимальных взаимосвязей в системе. Разработаны две модели и соответствующие методики анализа и оптимизации систем дистанционного зондирования в двух разновидностях: а) для систем с одним воздействующим фактором; б) для систем с двумя взаимосвязанными воздействующими факторами. В качестве примера сформулирована и решена задача анализа оптимизации и синтеза системы дистанционного зондирования морской поверхности по второй модели синтеза. **Практическая значимость** предлагаемого метода в конкретной сфере применения состоит в выявлении двух воздействующих факторов: внешнего фактора – скорости ветра, воздействующего на коэффициент отражения, и внутреннего фактора – высоты волн. При этом внешнее воздействие создает внутреннее воздействие – морские волны, высота которых так или иначе воздействует на результат дистанционного зондирования. Таким образом, задача оптимизации конкретизируется и переводится на вопрос о нахождении оптимальной взаимосвязи между внешним и внутренним воздействующими факторами.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, синтез, измерительные системы, оптимизация, морская поверхность.

H.H. Asadov, N.S. Abilova, L.I. Nuriyeva

National Aerospace Agency, Baku, Republic of Azerbaijan

METHOD OF STRUCTURAL-BLOCK SYNTHESIS OF REMOTE SENSING SYSTEMS

In the ISO TS16949:2009 standard, the instability of the studied object or process itself is clearly separated from the uncertainties caused by the measuring system itself. Consequently, the methodology of analysis of measuring systems can be considered quite suitable for application to remote sensing systems if the generalized object of measurement is considered to be the sum of the object itself and the influence of external factors affecting this object, leading to both systematic and random measurement errors. The **purpose** of the study. The purpose of this work is to build a general structural block model of a remote sensing system and further optimize this model. **Methods.** The principle of system analysis is used, which consists in building possible models, further optimizing these models and synthesizing the best option for building a system. **Results.** It is shown that a systematic approach to the analysis of the remote sensing system and the further synthesis of the optimal model ensures the formation of the maximum value of the reflected signal by determining the optimal relationships in the system. Two models and corresponding methods of analysis and optimization of remote sensing systems have been developed in two varieties: (a) for systems with one influencing factor (b) for systems with two interrelated influencing factors. As an example, the problem of analyzing the optimization and synthesis of a remote sensing system of the sea surface using the second synthesis model is formulated and solved. The **practical significance** of the proposed method in a specific field of application is to identify. There are two influencing factors-an external factor-wind speed affecting the reflection coefficient and an internal factor-wave height. At the same time, the external impact creates an internal impact-sea waves, the height of which somehow affects the result of remote sensing. Thus, the optimization problem is concretized and translated into the question of finding the optimal relationship between external and internal influencing factors.

Keywords: remote sensing, synthesis, measurement systems, optimization, sea surface

1. Актуальность

Хорошо известно, что одним из основных принципов системного анализа являются оптимизация и синтез наилучшего варианта построения системы на базе разработанной общей модели рассматриваемого объекта [1]. Моделирование функционирования какой-либо системы в первую очередь предполагает определение основных общих показателей, которые характеризуют все элементы множества подобных систем. Если речь идет о системном анализе измерительных систем, то можно говорить о множестве подобных измерительных систем образующих некоторый подкласс систем. Ветвь теории систем, изучающая закономерности приложения этой теории ко всем подклассам измерительных систем в научной литературе обозначена как «Анализ измерительных систем (АИС)» [2–5]. Согласно [2], АИС является экспериментальным и математическим методом определения степени влияния изменений в пределах измерительного процесса на общую изменчивость всего про-

цесса. АИС также определяет способность измерительной системы генерировать точные данные и адекватность достигаемой точности для достижения поставленной цели. АИС обеспечивает измерение пяти параметров: смещаемость результатов, стабильность, воспроизводимость, линейность и надежность. В работе [3] отмечается что качество полученных измерительных данных определяется степенью стабильности условий, в пределах которых осуществляются измерения. Если окружающая среда и измерительная система находятся во взаимодействии, то результат проведенных измерений невысок.

Согласно [4], АИС является средством, используемым для идентификации и количественной оценки различных компонентов суммарных изменений в пределах рассматриваемой измерительной системы. Целью исследований по АИС является всесторонняя валидация качества данных, выдаваемых измерительной системой (с учетом влияния таких факторов, как измерительной прибор, процедура измерений, окружающая среда и сам оператор), и оценка возможностей, работоспособности и неопределенности генерируемой измерительной системой по видам измерений. Согласно [5], общая изменчивость σ_0 (variability) полученных измерительных данных является суммой изменчивости самого измеряемого процесса σ_1 и изменчивостью характеристик самой измерительной системы σ_2 , т.е.

$$\sigma_0^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2. \quad (1)$$

При этом

$$\sigma_2^2 = \sigma_3^2 + \sigma_4^2, \quad (2)$$

где σ_3 – погрешность из-за низкой повторяемости; σ_4 – погрешность из-за низкой воспроизводимости.

Таким образом, если учесть, что АИС был охарактеризован в качестве важного требования в стандарте качества QS9000, а также в ISO TS16949:2009, а также то, что в АИС нестабильность самого изучаемого объекта или процесса четко отделена от неопределённостей, вызванных самой измерительной системой, то методологию АИС можно считать вполне пригодной для применения к системам дистанционного зондирования если обобщенным объектом измерения считать сумму самого объекта и влияние внешних факторов, воздействующих на этот объект, приводящих как к систематическим, так и случайным погрешностям измерений. Так, например, в работе [6] отмечается, что системы дистанционного зондирования состоят из трех основных подсистем:

- 1) подсистема изучаемой сцены (объекта);
- 2) подсистема, образованная самим сенсором, осуществляющим измерения;
- 3) подсистема, осуществляющая обработку данных. Как отмечается в работе [6], для улучшения общего понимания всего зондируемого процесса или объекта система зондирования должна быть разделена на отдельные идентифицируемые части и далее, учитывая возможный синергизм от комбинаций моделей, может быть построена общая модель системы.

С учетом вышеизложенного целями настоящей работы являются построение общей структурно-блочной модели системы дистанционного зондирования и дальнейшая оптимизация указанной модели.

С методической точки зрения актуальность проводимого синтеза связана с тем, что общая задача синтеза измерительных систем, представляемая отдельно по обычным измерительным системам и системам дистанционного зондирования, должна быть дополнена универсальной методикой, объединяющей обычные и дистанционные системы измерения.

С практической точки зрения актуальность синтеза оптимальной структуры систем дистанционного зондирования бесспорна, так как вся деятельность по оптимизации осуществляется с целью достижения наилучшего решения поставленной задачи, согласно сформированному критерию оптимизации.

2. Материалы и методы

Рассмотрим обобщенную модель оптоэлектронного измерителя интегрирующего типа [7–11]. Признак интегрирования можно представить в качестве общего свойства сканирующих оптоэлектронных систем, формирующих изображение, так как формирование полезного сигнала осуществляется методом интегрирования формирующихся электрических зарядов на фоточувствительном сенсоре (рис. 1).

При этом величина формируемого сигнала зависит как от измеряемой величины y , так и от внешнего воздействия x . При этом фактор x воздействует как на измеряемую величину, так и на всю систему. Следовательно, итоговый сигнал, формируемый системой в течение времени интегрирования, определится как

$$F_1 = \int_0^{t_{\max}} F(x, y) dt, \quad (3)$$

где t_{\max} – время интегрирования.

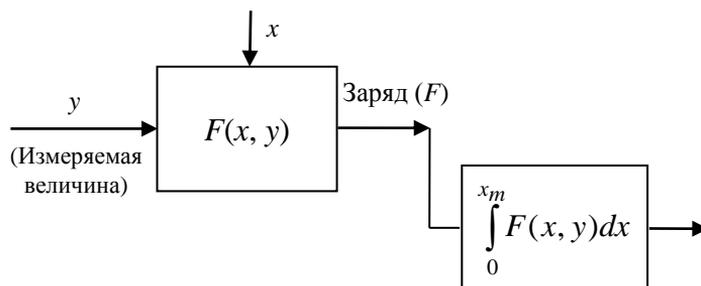


Рис. 1. Обобщенная модель оптоэлектронного измерителя интегрирующего типа

В дальнейшем для упрощения математических выкладок примем модель линейной связи между временем интегрирования и величиной x .

Рассмотрим предлагаемые модели систем дистанционного зондирования.

Модель 1. Система с внешним воздействующим фактором

Введем в рассмотрение функционал качества системы дистанционного зондирования F_{01} , неявно зависящий от измеряемого параметра y и внешнего воздействующего фактора x , влияющего на y в виде:

$$F_1 = \int_0^{x_{\max}} F(x, y(x)) dx. \quad (4)$$

При этом (4) является базовой математической моделью некоторого подкласса систем дистанционного зондирования, качество работы которых может быть характеризовано этим выражением. Целью проводимого синтеза оптимальной системы является определение оптимальной функции $y(x)_{\text{opt}}$, при которой F_1 достиг бы экстремального значения. Для решения данной задачи несколько сузим класс непрерывных и дважды дифференцируемых функций до некоторого подкласса таких же функций, удовлетворяющих условию:

$$F_2 = \int_0^{x_{\max}} y(x) dx = C; C = \text{const}. \quad (5)$$

Таким образом, поиск $y(x)_{\text{opt}}$ будем осуществлять в подклассе функций, удовлетворяющих ограничительному условию (5). С учетом (4) и (5) составим задачу Лагранжа, по схеме:

$$F_0 = F_1 + \lambda F_2. \quad (6)$$

С учетом (4), (5), (6) получим:

$$F_{01} = \int_0^{x_{\max}} F(x, y(x)) dx + \lambda \left[\int_0^{x_{\max}} y(x) dx - C \right]. \quad (7)$$

Решение задачи (7) согласно методу Эйлера–Лагранжа должно удовлетворять условию [12–15]:

$$\frac{d\{F(x,y(x))+\lambda y(x)\}}{dy(x)} = 0. \quad (8)$$

Таким образом, зная конкретный вид функционала $F(x, y(x))$, можно определить оптимальную функцию $y(x)_{\text{opt}}$ и тем самым синтезировать оптимальный вариант системы дистанционного зондирования.

Модель 2. Система дистанционного зондирования с внешним и внутренним воздействующими факторами

Рассматривается система с двумя воздействующими факторами: а) внешний воздействующий фактор (x): б) внутренний воздействующий фактор (z).

В этой модели функционал качества системы дистанционного зондирования имеет вид:

$$F_{02} = \int_0^{z_{\text{max}}} F(z, y(x), x(z)) dz. \quad (9)$$

При этом считаем, что зависимость $y(x)$ известна, и требуется определить оптимальную взаимосвязь $x(z)$, которая аналогично (4) удовлетворяет условию:

$$F_2 = \int_0^{z_{\text{max}}} x(z) dz = C_1; \quad C_1 = \text{const}. \quad (10)$$

При этом целевой функционал оптимизации имеет вид:

$$F_{02} = \int_0^{z_{\text{max}}} F(z, y(x), x(z)) dz + \lambda \left[\int_0^{z_{\text{max}}} x(z) dx - C_1 \right]. \quad (11)$$

Решение задачи (11) согласно методу Эйлера и Лагранжа удовлетворяет условию:

$$\frac{d[F(z,y(x),x(z))+\lambda x(z)]}{dx(z)} = 0. \quad (12)$$

Таким образом, при известном $F(z, y(x), x(z))$ можно вычислить оптимальную функцию $x(z)$ и тем самым синтезировать оптимальный вариант системы по модели 2. Рассмотрим конкретный вариант синтеза оптимальной системы зондирования на примере оптических радиационных измерений применительно к морской поверхности.

Целью зондирования морской поверхности является определение степени загрязнения морской поверхности органическими загрязнителями путем измерения коэффициента отражения поверхности на определенной длине волны.

Зондирование морской поверхности осуществляется лазерным лучом [16–19]. Схема проведения зондирования морской поверхности показана на рис. 2.

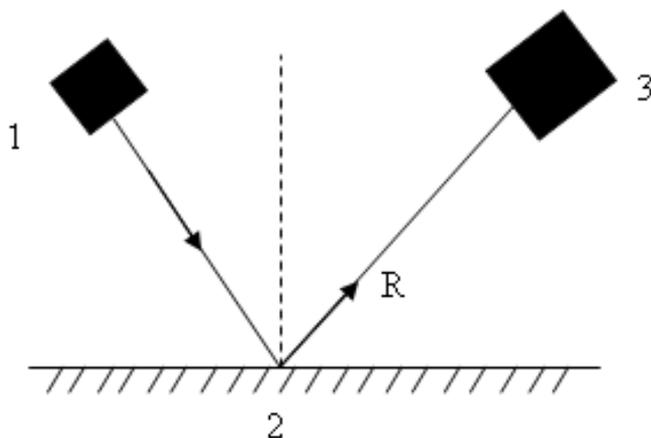


Рис. 2. Схема проведения дистанционного зондирования морской поверхности: 1 – лазерный источник; 2 – поверхность моря; 3 – приемное устройство

Согласно работе [20], отраженный оптический сигнал R с поверхности моря в конкретном рассматриваемом случае определяется как

$$R = A - B \cdot \rho(w), \quad (13)$$

где A и B – радиационные потоки, характеризующие конкретные условия проводимого измерительного эксперимента; w – скорость ветра; $\rho(w)$ – коэффициент отражения поверхности моря.

Отметим, что зависимость между коэффициентом отражения поверхности моря ρ и скоростью ветра w хорошо изучена [21–25]. Следовательно, здесь применима вторая модель оптимизации систем зондирования.

Согласно [26], имеет место следующее регрессионное соотношение между w и $\rho(w)$:

$$\rho(w) = 0,0256 + 0,00039w + 0,000034w^2. \quad (14)$$

Известны различные виды функциональной взаимосвязи между высотой морских волн и скоростью ветра, в частности, линейная взаимосвязь [26]. С учетом вышеизложенного задачу оптимизации и последующего синтеза сформулируем следующим образом: следует определить такой вид взаимосвязи $w = w(h)$, при котором R мог бы

достигь экстремума. С учетом (9)–(14) подынтегральную функцию в целевом функционале представим в сепарабельном виде:

$$F = \int_0^{h_{\max}} [A - B(0,025 + 0,00039w(h) + 0,000034w^2(h))] h dh. \quad (15)$$

Для вычисления $w(h)_{\text{opt}}$ наложим на эту функцию следующее интегральное ограничение:

$$\int_0^{h_{\max}} w(h) dh = C_1; C_1 = \text{const}. \quad (16)$$

С учетом (15) и (16) составим следующий целевой функционал F_0 :

$$F_0 = \int_0^{h_{\max}} [A - B(0,025 + 0,00039w(h) + 0,000034w^2(h))] h dh + \\ + \lambda \left[\int_0^{h_{\max}} w(h) dh - C_1 \right]. \quad (17)$$

Решение оптимизационной задачи (17) согласно методу Эйлера и Лагранжа должно удовлетворить условию:

$$\frac{d\{-[0,00039w(h)+0,000034w^2(h)]h+\lambda w(h)\}}{dw(h)} = 0. \quad (18)$$

Из (18) получаем:

$$[-0,00039 + 0,000034w(h)]h + \lambda = 0. \quad (19)$$

Из (19) находим:

$$w(h) = -\frac{0,00039h+\lambda}{0,000034h}. \quad (20)$$

С учетом (16) и (20) получим:

$$\int_{h_{\min}}^{h_{\max}} \left[-\frac{0,00039h+\lambda}{0,000034h} \right] dh = C_1. \quad (21)$$

Из (21) имеем:

$$(h_{\max} - h_{\min})a_1 + a_2\lambda \ln\left(\frac{h_{\max}}{h_{\min}}\right) = C_1. \quad (22)$$

где $a_1 = -\frac{0,00039}{0,000034}$; $a_2 = \frac{1}{0,000034}$.

Из (22) находим:

$$\lambda = \frac{(C_1 - (h_{\max} - h_{\min})a_1)}{a_2 \ln\left(\frac{h_{\max}}{h_{\min}}\right)}. \quad (23)$$

Учитывая (23) в (20) запишем:

$$w(h) = \frac{0,00039h + \frac{(C_1 - (h_{\max} - h_{\min})a_1)}{a_2 \ln\left(\frac{h_{\max}}{h_{\min}}\right)}}{0,000034h} = a_1 - \frac{C + (h_{\max} - h_{\min})|a_1|}{h \ln\left(\frac{h_{\max}}{h_{\min}}\right)}. \quad (24)$$

Очевидно, что при решении (24) F_0 достигает максимума, так как вторая производная подинтегрального выражения в (17) по искомой функции является отрицательной величиной. Полученный результат (24) позволяет определить оптимальное соотношение между скоростью ветра и высотой волн, при котором система проксимального зондирования формирует измерительный сигнал максимальной величины.

3. Обсуждение

Таким образом, рассмотренная система дистанционного зондирования морской поверхности может быть представлена в виде блок-схемы, включающей внешний излучатель, объект исследования (морская поверхность), воздействующие факторы: внешний фактор – скорость ветра и внутренний воздействующий фактор – высота волн (рис. 3). Таким образом, новизна в рассматриваемом примере морского зондирования заключается в наличии двух воздействующих факторов – внешнего фактора – скорости ветра, воздействующего на состояние поверхности моря, т.е. на коэффициент отражения, и внутреннего фактора – высоты волн. При этом внешнее воздействие создает внутреннее воздействие-морские волны, высота которых, так или иначе воздействует на результат проксимального зондирования. В рассматриваемом случае задача оптимизации переводится на вопрос о нахождении оптимальной взаимосвязи между внешним и внутренним воздействующими факторами.

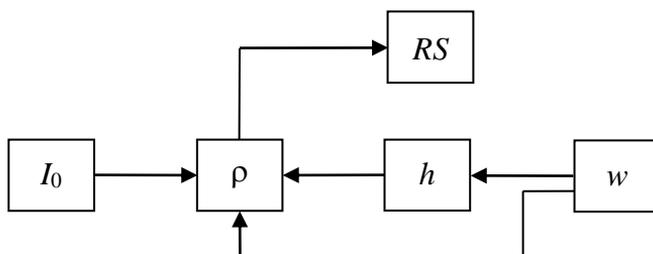


Рис. 3. Блочное представление оптимизированной системы дистанционного зондирования морской поверхности: I_0 – внешнее излучение; ρ – коэффициент отражения; h – высота волн; w – скорость ветра; RS – система зондирования

Таким образом, системный подход к анализу системы дистанционного зондирования морской поверхности и дальнейший синтез оптимальной модели обеспечивают формирование максимальной величины отраженного сигнала путем определения оптимальных взаимосвязей в системе.

Заключение

Показано, что элементы теории анализа измерительных систем, являющейся ветвью общей теории систем, могут быть применены к системам дистанционного зондирования. Разработаны методики анализа и оптимизации систем дистанционного зондирования в двух разновидностях: а) для систем с одним воздействующим фактором; б) для систем с двумя взаимосвязанными воздействующими факторами. В качестве примера сформулирована и решена задача анализа оптимизации и синтеза системы дистанционного зондирования морской поверхности по второй модели синтеза.

Библиографический список

1. Спицина, И.А. С40 Системный анализ и моделирование информационных систем: учеб. пособие / И.А. Спицина, К.А. Аксенов. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2021. – 118 с.
2. Measurement system analysis (MSA). – URL: <https://lssimplified.com/measurement-system-analysis-msa-overview/>
3. Measurement system analysis (MSA): Fourth edition. – URL: <https://otc.com.my/main-course/measurement-system-analysis-msa-4th-edition/>
4. Measurement system analysis guideline. – URL: <https://sixsigmastudyguide.com/measurement-systems-analysis/>
5. Montgomery, D.C. Statistical quality control: a modern introduction / D.C. Montgomery. – 6th ed. – New York, 2009.
6. Kerekes, J.P. Modeling, simulation and analysis of optical remote sensing systems / J.P. Kerekes, D.A. Landgrebe // School of electrical engineering purdue university, 1989.
7. Yang, Q. Design of front-end amplifier for optical receiver in 0.5 micrometer CMOS technology / Q. Yang // MSc Thesis, University of Hawaii, Hawaii, 2005.
8. Principles and features of single-photon avalanche diode arrays / F. Zappa, S. Tisa, A. Tosi, S. Cova // Sensors and Actuators A. – 2007. – Vol. 140, No. 1. – P. 103–112. DOI: 10.1016/j.sna.2007.06.021
9. Kamrani, E. Premature edge breakdown prevention techniques in APD fabrication / E. Kamrani, F. Lesage, M. Sawan // The 10th IEEE International NEWCAS Conference, Montreal, 17–20 June 2012, Montreal. – P. 345–348. DOI: 10.1109/NEWCAS.2012.6329027

10. Kamrani, E. Fully integrated CMOS avalanche photodiode and distributed-gain TIA for CWfNIRS / E. Kamrani, M. Sawan // The IEEE Biomedical Circuits and Systems Conference (BioCAS2011). – San Diego, 10–12 November 2011. – P. 317–320. DOI: 10.1109/BioCAS.2011.6107791
11. Kamrani, E. Tunable, lowpower, high-gain transimpedance amplifier for fNIRS photoreceiver front-end / E. Kamrani, A. Sultana, M. Sawan // The 54th IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS). – Seoul, 7–10 August 2011. – P. 1–4. DOI: 10.1109/MWSCAS.2011.6026338
12. Эльсгольц, Л.Э. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление / Л.Э. Эльсгольц. – М.: Наука, 1974. – С. 432.
13. Галеев, Э.М. Оптимизация: теория, примеры, задачи / Э.М. Галеев, В.М. Тихомиров. – М.: Элиториал УРСС, 2000. – 320 с.
14. Экланд, И. Выпуклый анализ и вариационные проблемы / И. Экланд, Р. Темам. – М.: Мир, 1979.
15. Алексеев, В.М. Сборник задач по оптимизации. Теория. Примеры. Задачи: учеб. пособие / В.М. Алексеев, Э.М. Галеев, В.М. Тихомиров. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 256 с.
16. Automatic extraction of building boundaries using aerial LiDAR data / R.S. Wang, Y. Hu, H.Y. Wu, J. Wang // Journal of Applied Remote Sensing. – 2016. – 10 (1). – P. 16–22.
17. Measurements of the time-varying freesurface profile across the swash zone obtained using an industrial LIDAR / C.E. Blenkinsopp, M.A. Mole, I.L. Turner, W.L. Peirson // Coastal Engineering. – 2010. – 57. – P. 1059–1065.
18. Allis, M.J. Application of LIDAR as a measurement tool for waves / M.J. Allis, W.L. Peirson, M.L. Banner // Proceedings of the Twenty-first International Offshore and Polar Engineering Conference. – USA, Maui, Hawaii, International Society of Offshore and Polar Engineers. – 2011. – P. 19–24.
19. Application of LiDAR technology for measurement of time-varying free-surface profiles in a laboratory wave flume / C.E. Blenkinsopp, I.L. Turner, M.J. Allis, W.L. Peirson, L.E. Garden // Coastal Engineering. – 2012. – 68. – P. 1–5.
20. In situ determination of the remote sensing reflectance: an inter-comparison / G. Zibordi, K. Ruddick, I. Ansko, G. Moore, S. Kratzer, J. Icely, A. Reinart // Ocean Sci. – 2012. – 8. – P. 567–586.

21. Laws, R. Rough seas and time-lapse seismic / R. Laws, E. Kragh // *Geophysical Prospecting*. – 2002. – 50, no. 2. – P. 195–208.
22. Orji, O. Imaging the sea surface using a dual-sensor towed streamer / O. Orji, W. Söllner, L.J. Gelius // *Geophysics*. – 2010. – 75, no. 6. – V111–V118.
23. Orji, O. Effects of time-varying sea surface in marine seismic data / O. Orji, W. Söllner, L.J. Gelius // *Geophysics*. – 2012. – Vol. 77 (3). – P. P33–P43.
24. On data-independent multicomponent interpolators and the use of priors for optimal reconstruction and 3D up/down separation of pressure wavefields / K. Özdemir, A. Özbek, D.-J. Van Manen, M. Vassallo // *Geophysics*. – 2010. – 75, no. 6. – WB39–WB51.
25. Parkes, G. Acquisition system that extracts the earth response from seismic data / G. Parkes, S. Hegna // *First Break*. – 2011. – 29, no. 12. – P. 81–87.
26. Seaborne measurements of near infrared water-leaving reflectance – the similarity spectrum for turbid waters / K. Ruddick, V. De Cauwer, Y. Park, G. Moore // *Limnol. Oceanogr.* – 2006. – 51. – P. 1167–1179.

References

1. Spitsina I.A. Aksenov K.A. S40 Sistemnyi analiz i modelirovanie informatsionnykh sistem [C40 System analysis and modeling of information systems]. Ekaterinburg: Ural'skii universitet, 2021, 118 p.
2. Measurement system analysis (MSA), available at: <https://lssimplified.com/measurement-system-analysis-msa-overview/>
3. Measurement system analysis (MSA): Fourth edition, available at: https://otc.com.my/main-course/measurement-system-analysis-msa-4th-edition/
4. Measurement system analysis guideline, available at: <https://sixsigmastudyguide.com/measurement-systems-analysis/>
5. Montgomery D.C. Statistical quality control: a modern introduction. 6th ed. New York, 2009.
6. Kerekes J.P., Landgrebe D.A. Modeling, simulation and analysis of optical remote sensing systems. School of electrical engineering purdue university, 1989.
7. Yang Q. Design of front-end amplifier for optical receiver in 0.5 micrometer CMOS technology. MSc Thesis, University of Hawaii, Hawaii, 2005.

8. Zappa F., Tisa S., Tosi A., Cova S. Principles and features of single-photon avalanche diode arrays. *Sensors and Actuators A*, 2007, vol. 140, no. 1, pp. 103-112. DOI: 10.1016/j.sna.2007.06.021

9. Kamrani E., Lesage F., Sawan M. Premature edge breakdown prevention techniques in APD fabrication. *The 10th IEEE International NEWCAS Conference, Montreal, 17-20 June 2012, Montreal*, pp. 345-348. DOI: 10.1109/NEWCAS.2012.6329027

10. Kamrani E., Sawan M. Fully integrated CMOS avalanche photodiode and distributed-gain TIA for CWfNIRS. *The IEEE Biomedical Circuits and Systems Conference (BioCAS2011). San Diego, 10-12 November 2011*, pp. 317-320. DOI: 10.1109/BioCAS.2011.6107791

11. Kamrani E., Sultana A., Sawan M. Tunable, lowpower, high-gain transimpedance amplifier for fNIRS photoreceiver front-end. *The 54th IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS). Seoul, 7-10 August 2011*, pp. 1-4. DOI: 10.1109/MWSCAS.2011.6026338

12. El'sgol'ts L.E. *Differentsial'nye uravneniia i variatsionnoe ischislenie [Differential equations and calculus of variations]*. Moscow: Nauka, 1974, 432 p.

13. Galeev E.M., Tikhomirov V.M. *Optimizatsiia: teoriia, primery, zadachi [Optimization: theory, examples, tasks]*. Moscow: Elitorial URSS, 2000, 320 p.

14. Ekland I., Temam R. *Vypuklyi analiz i variatsionnye problemy [Convex analysis and variational problems]*. Moscow: Mir, 1979.

15. Alekseev V.M., Galeev E.M., Tikhomirov V.M. *Sbornik zadach po optimizatsii. Teoriia. Primery. Zadachi [A collection of optimization problems. Theory. Examples. Tasks]*. 2nd ed. Moscow: FIZMATLIT, 2007, 256 p.

16. Wang R.S., Hu Y., Wu H.Y., Wang J. Automatic extraction of building boundaries using aerial LiDAR data. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2016, 10 (1), pp. 16-22.

17. Blenkinsopp C.E., Mole M.A., Turner I.L., Peirson W.L. Measurements of the time-varying freesurface profile across the swash zone obtained using an industrial LIDAR. *Coastal Engineering*, 2010, 57, pp. 1059-1065.

18. Allis M.J., Peirson W.L., Banner M.L. Application of LIDAR as a measurement tool for waves. *Proceedings of the Twenty-first International Offshore and Polar Engineering Conference. USA, Maui, Hawaii, International Society of Offshore and Polar Engineers, 2011*, pp. 19-24.

19. Blenkinsopp C.E., Turner I.L., Allis M.J., Peirson W.L., Garden L.E. Application of LiDAR technology for measurement of time-varying free-surface profiles in a laboratory wave flume. *Coastal Engineering*, 2012, 68, pp. 1-5.

20. Zibordi G., Ruddick K., Ansko I., Moore G., Kratzer S., Icely J., Reinart A. In situ determination of the remote sensing reflectance: an inter-comparison. *Ocean Sci.*, 2012, 8, pp. 567-586.

21. Laws R., Kragh E. Rough seas and time-lapse seismic. *Geophysical Prospecting*, 2002, 50, no. 2, pp. 195-208.

22. Orji O., Söllner W., Gelius L.J. Imaging the sea surface using a dual-sensor towed streamer. *Geophysics*, 2010, 75, no. 6, V111-V118.

23. Orji O., Söllner W., Gelius L.J. Effects of time-varying sea surface in marine seismic data. *Geophysics*, 2012, vol. 77 (3), pp. P33-P43.

24. Özdemir K., Özbek A., Van Manen D.-J., Vassallo M. On data-independent multicomponent interpolators and the use of priors for optimal reconstruction and 3D up/down separation of pressure wavefields. *Geophysics*, 2010, 75, no. 6, WB39-WB51.

25. Parkes G., Hegna S. Acquisition system that extracts the earth response from seismic data. *First Break*, 2011, 29, no. 12, pp. 81-87.

26. Ruddick K., De Cauwer V., Park Y., Moore G. Seaborne measurements of near infrared water-leaving reflectance - the similarity spectrum for turbid waters. *Limnol. Oceanogr.*, 2006, 51, pp. 1167-1179.

Сведения об авторах

Асадов Хикмет Гамид оглы (Баку, Азербайджанская Республика) – доктор технических наук, профессор НИИ аэрокосмической информатики Национального аэрокосмического агентства (AZ1145, Баку, ул. С.С. Ахундова, 1, e-mail: asadzade@ Rambler.ru).

Абилова Наргиз Шамил гызы (Баку, Азербайджанская Республика) – докторант (аспирант), заместитель начальника отдела НИИ аэрокосмической информатики Национального аэрокосмического агентства (AZ1145, Баку, ул. С.С. Ахундова, 1, e-mail: nergiz.ebilova36@gmail.com).

Нуриева Лале Имран гызы (Баку, Азербайджанская Республика) – заместитель начальника отдела НИИ аэрокосмической информатики Национального аэрокосмического агентства (AZ1145, Баку, ул. С.С. Ахундов, 1, e-mail: nuieva.l@inbox.ru).

About the authors

Asadov Hikmet Hamid (Baku, Republic of Azerbaijan) – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Research Institute of Aerospace Informatics of the National Aerocosmic Agency (AZ1145, Baku, S.S. Akhundova str., 1, e-mail: asadzade@rambler.ru).

Abilova Nargiz Shamil gizi (Baku, Republic of Azerbaijan) – Doctoral student (post-graduate student), Deputy the head of the department Research Institute of Aerospace Informatics of the National Aerocosmic Agency (AZ1145, Baku, S.S. Akhundova str., 1, e-mail: nergiz.ebilova36@gmail.com).

Nurieva Lale Imran gizi (Baku, Republic of Azerbaijan) – Deputy the head of the department of the Research Institute of Aerospace Informatics of the National Aerocosmic Agency (AZ1145, Baku, S.S. Akhundova str., 1, e-mail: nurieva.l@inbox.ru).

Поступила: 24.01.2024. Одобрена: 28.02.2024. Принята к публикации: 20.04.2024.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов по отношению к статье.

Вклад авторов. Авторы сделали равноценный вклад в подготовку статьи.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:
Асадов, Х.Г. Метод структурно-блочного синтеза систем дистанционного зондирования / Х.Г. Асадов, Н.Ш. Абилова, Л.И. Нуриева // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2024. – № 49. – С. 25–39. DOI: 10.15593/2224-9397/2024.1.02

Please cite this article in English as:

Asadov H.H., Abilova N.S., Nuriyeva L.I. Method of structural-block synthesis of remote sensing systems. *Perm National Research Polytechnic University Bulletin. Electrotechnics, information technologies, control systems*, 2024, no. 49, pp. 25-39. DOI: 10.15593/2224-9397/2024.1.02