

АСАДОВ ХИКМЕТ ГАМИД ОГЛЫ, АБИЛОВА НАРГИЗ ШАМИЛ ГЫЗЫ, НУРИЕВА ЛАЛЕ ИМРАН ГЫЗЫ

## МЕТОД СТРУКТУРНО-БЛОЧНОГО СИНТЕЗА СИСТЕМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Национальное Аэрокосмическое Агентство  
г. Баку, Азербайджанская Республика

*В статье предлагается подход к решению задачи синтеза систем дистанционного зондирования. Высказывается мнение о том, что системы дистанционного зондирования, составляющие особый подкласс измерительных систем должны быть оптимизированы согласно принципам и положениям теории анализа измерительных систем. Эта теория, являющаяся ветвью общей теории систем, применима к задачам анализа и синтеза систем дистанционного зондирования. Разработана обобщенная методика анализа и оптимизации систем дистанционного зондирования. В качестве примера сформулирована и решена задача анализа оптимизации и синтеза системы дистанционного зондирования морской поверхности.*

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

### Введение

Хорошо известно, что одним из основных принципов системного анализа является 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 процесса. 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. Согласно [4], целью исследований по АИС является всесторонняя валидация качества данных, выдаваемых измерительной системой (с учетом влияния таких факторов как измерительная прибор, процедура измерений, окружающая среда и сам оператор) и оценка возможностей, работоспособности и неопределенности генерируемой измерительной системой по видам измерений. Согласно [5], общая изменчивость  $\sigma_0$  (variability) полученных измерительных данных является суммой изменчивости самого измеряемого процесса  $\sigma_1$  и изменчивостью характеристик самой измерительной системы  $\sigma_2$ , 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  $\sigma_3$  – погрешность из-за низкой повторяемости;  $\sigma_4$  – 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 отделены от неопределенностей, 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 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.

В работе [6] представлена таксономия воздействующих эффектов в графическом виде применительно к системам дистанционного зондирования (рис. 1).

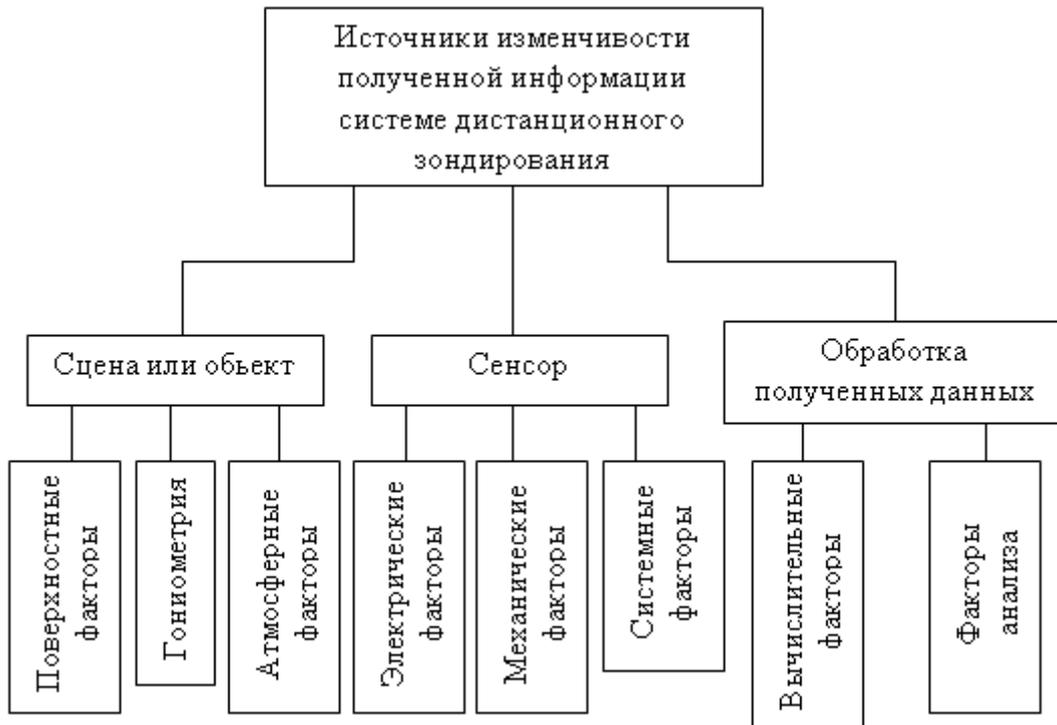


Рисунок 1. Таксономия факторов, влияющих на изменчивость информационного содержания полученных измерительных данных

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 в настоящей работе сделана попытка построения общей структурно-блочной модели системы дистанционного зондирования.

### Материалы и методы

Введем на рассмотрение функционал качества системы дистанционного зондирования,  $F_0$  неявно зависящий от измеряемого параметра  $y$  и фактора  $x$ , влияющего на  $y$  в виде

$$F_1 = \int_0^{x_{\max}} F(x, y(x)) dx. \quad (3)$$

При этом (3) 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  $y(x)_{opt}$  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:

$$F_2 = \int_0^{x_{\max}} y(x) dx = C; \quad C = \text{const}. \quad (4)$$

Таким образом, поиск  $y(x)_{opt}$  будем осуществлять в подклассе функций, удовлетворяющих ограничительному условию (4). С учетом (3) и (4) составим задачу Лагранжа, по схеме:

$$F_0 = F_1 + \lambda F_2. \quad (5)$$

С учетом (3), (4), (5) получим:

$$F_0 = \int_0^{x_{\max}} F(x, y(x)) dx + \lambda \left[ \int_0^{x_{\max}} y(x) dx - C \right]. \quad (6)$$

Решение задачи (6) согласно методу Эйлера-Лагранжа должна удовлетворять условию [7]:

$$\frac{d\{F(x, y(x)) + \lambda y(x)\}}{dy(x)} = 0. \quad (7)$$

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

Рассмотрим конкретный вариант синтеза оптимальной системы зондирования на примере оптических радиационных измерений применительно к морской поверхности.

Согласно работе [8], отраженный оптический сигнал  $R$  с поверхности моря в конкретном рассматриваемом случае определяется как:

$$R = A - B \cdot \rho(w), \tag{8}$$

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

Согласно [9] имеет место следующее регрессионное соотношение между  $w$  и  $\rho(w)$ :

$$\rho(w) = 0,0256 + 0,00039w + 0,000034w^2. \tag{9}$$

Что касается зависимости между высотой морских волн  $h$  и  $w$ , то согласно [10] существует следующая регрессионная зависимость:

$$h = 0,08w^2 - 0,17w + 0,48; R^2 = 0,82. \tag{10}$$

Вместе с тем, известны и другие виды функциональной взаимосвязи [9], в частности, линейная взаимосвязь между  $h$  и  $w$ . С учетом вышесказанного задачу оптимизации и последующего синтеза сформулируем следующим образом. Следует определить такой вид взаимосвязи  $w = w(h)$ , при котором  $R$  мог бы достиг экстремума. С учетом (7)-(10) подынтегральную функцию целевого функционала представим в сепарабельном виде:

$$F = \int_0^{h_{max}} [A - B(0,025 + 0,00039w(h) + 0,000034w^2(h))] h dh. \tag{11}$$

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

$$\int_0^{h_{max}} w(h) dh = C_1; C_1 = const. \tag{12}$$

С учетом (11) и (12) составим следующий целевой функционал  $F_0$ :

$$F_0 = \int_0^{h_{max}} [A - B(0,025 + 0,00039w(h) + 0,000034w^2(h))] h dh + \lambda \left[ \int_0^{h_{max}} w(h) dh - C_1 \right]. \tag{13}$$

Решение оптимизационной задачи (13) согласно методу Эйлера и Лагранжа должна удовлетворять условию:

$$\frac{d \left\{ -[0,00039w(h) + 0,000034w^2(h)] h + \lambda w(h) \right\}}{dw(h)} = 0. \tag{14}$$

Из (14) получаем:

$$\left[ -0,00039 + 0,000034w(h) \right] h + \lambda = 0. \tag{15}$$

Из (15) находим:

$$w(h) = -\frac{0,00039h + \lambda}{0,000034h}. \tag{16}$$

С учетом (12) и (16) получим:

$$\int_{h_{min}}^{h_{max}} \left[ -\frac{0,00039h + \lambda}{0,000034h} \right] dh = C_1. \tag{17}$$

Из (17) имеем:

$$(h_{max} - h_{min}) a_1 + a_2 \lambda \ln \left( \frac{h_{max}}{h_{min}} \right) = C_1, \tag{18}$$

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

Из (18) находим:

$$\lambda = \frac{(C_1 - (h_{max} - h_{min}) a_1)}{a_2 \ln \left( \frac{h_{max}}{h_{min}} \right)}. \tag{19}$$

Учитывая (17) в (16) запишем:

$$w(h) = \frac{0,00039h + \frac{(C_1 - (h_{max} - h_{min}) a_1)}{a_2 \ln \left( \frac{h_{max}}{h_{min}} \right)}}{0,000034h} = a_1 - \frac{C + (h_{max} - h_{min}) |a_1|}{h \ln \left( \frac{h_{max}}{h_{min}} \right)}. \tag{20}$$

Очевидно, что при решении (20)  $F_0$  достигает максимума, т.к. вторая производная подынтегрального выражения в (13) по искомой функции является отрицательной величиной.

### Обсуждение

Таким образом рассмотренная система дистанционного зондирования морской поверхности может быть представлена в виде блок-схемы, включающей внешний излучатель, объект исследования (морская поверхность), воздействующий фактор (высота волн); воздействующий фактор (скорость ветра) (рисунок 2).

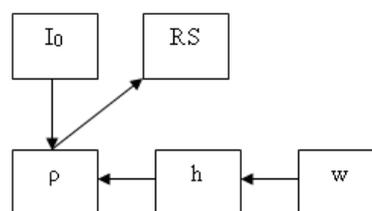


Рисунок 2. Блочное представление оптимизированной системы дистанционного зондирования морской поверхности. Принятые обозначения:  $I_0$  – внешнее излучение;  $\rho$  – коэффициент отражения;  $h$  – высота волн;  $w$  – скорость ветра; RS – система зондирования

Таким образом, системный подход к анализу системы дистанционного зондирования морской

поверхности и дальнейший синтез оптимальной модели, обеспечивает 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. Разработана обобщенная методика анализа и оптимизации систем дистанционного зондирования. В качестве примера сформулирована и решена задача анализа оптимизации и синтеза системы дистанционного зондирования морской поверхности.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Спицина, И.А.** С40 Системный анализ и моделирование информационных систем : учеб. пособие / И.А. Спицина, К.А. Аксенов; М во науки и высшего образования РФ. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2021. – 118 с.
2. **Measurement system analysis (MSA):** <https://lssimplified.com/measurement-system-analysis-msa-overview/>
3. **Measurement system analysis (MSA):** Fourth edition. <https://otc.com.my/main-course/measurement-system-analysis-msa-4th-edition/>
4. **Measurement system analysis guideline:** <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.
7. **Эльсгольц Л.Э.** Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление. – М. Наука. – 1974. – С. 432.
8. **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. 8. 567-586. 2012.
9. **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. 51. 1167-1179. 2006.