

А.Д. Шульженко, А.А. Нечай

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТРЕБУЕМЫХ ЗНАЧЕНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Статья посвящена вопросу априорного определения значений основных характеристик системы цифровой обработки данных дистанционного зондирования Земли в радиолокационном диапазоне для обеспечения качества ее функционирования, при этом оценивание выполняется по одному ключевому параметру – длительность обработки поступающих данных. На него оказывают влияние несколько параметров системы, которые названы частными атрибутами качества. Рассматривается агрегированная математическая модель системы цифровой обработки, частные атрибуты качества ее функционирования, их взаимосвязь с ключевым параметром. Показана методика оценивания качества функционирования системы цифровой обработки, с применением которой определяются требуемые и допустимые значения ее технических характеристик. Данное пространство практически определяет ограничения для анализа действующих и проектирования перспективных систем такого рода. С практической точки зрения изложенный материал полезен как заказчику разработки системы, так и исполнителю проекта, так как может быть применен для предъявления требований к новой системе и для анализа возможности функционирования старой системы в новых условиях помимо анализа проекта. Статья может быть рекомендована специалистам в области схемотехники применительно к разработке систем обработки радиолокационных сигналов.

Ключевые слова: система цифровой обработки данных, агрегированная модель, частные атрибуты качества, качество функционирования системы цифровой обработки данных, методика оценивания качества.

A.D. Shulzhenko, A.A. Nechai

METHODOLOGY FOR DETERMINING THE QUALITY OF FUNCTIONING OF THE DIGITAL PROCESSING SYSTEM OF REMOTE SENSING DATA OF THE EARTH

The article is devoted to the issue of a priori determination of the values of the main characteristics of the Earth remote sensing data processing system in the radar range to ensure the quality of its functioning, while the assessment is performed according to one key parameter - the processing time of the incoming data. It is influenced by several parameters of the system, which are called private attributes of quality. An aggregated mathematical model of a digital processing system, particular attributes of the quality of its functioning, and their relationship with a key parameter are considered. The methodology for assessing the quality of the functioning of the digital processing system is shown, with the use of which the required and permissible values of its technical characteristics are determined. This space practically defines the limitations for the analysis of existing and design of promising systems of this kind. From a practical point of view, the presented material is useful both for the customer of the system development and for the project executor, since it can be used to present requirements for a new system and to analyze the possibility of the old system functioning in new conditions, in addition to analyzing the project. The article can be recommended for reading to specialists in the field of circuitry in relation to the development of systems for processing radar signals.

Keywords: digital data processing system, aggregated model, partial attributes of quality, quality of DPS functioning, quality assessment methodology.

Шульженко Анастасия Дмитриевна

начальник научно-исследовательской лаборатории. Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург. Сфера научных интересов: обработка данных дистанционно зондирования Земли, распределенные вычислительные системы. Автор более 10 опубликованных научных работ.

Электронный адрес: ana.dmi38@gmail.com

Нечай Александр Анатольевич

преподаватель Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург; преподаватель Ленинградского государственного университета имени А.С. Пушкина, Санкт-Петербург. Сфера научных интересов: информационные технологии, информационная безопасность. Автор более 90 опубликованных научных работ.

Электронный адрес: webexpromt@mail.ru

Введение

Система цифровой обработки (далее – СЦО) данных дистанционного зондирования Земли (далее – ДЗЗ) является сложной вычислительной системой, качество функционирования которой зависит от многих параметров (атрибутов). Получение результирующей оценки качества по многим параметрам является сложной математической задачей принятия решения по нескольким критериям. Целью данной статьи является разработка математического обеспечения оценивания качества системы цифровой обработки данных ДЗЗ, которое включает в изложенном ракурсе рассмотрения модель системы и методу оценивания гарантированного значения показателя качества ее функционирования.

Агрегированная математическая модель системы цифровой обработки

Агрегированная математическая модель системы цифровой обработки данных включает в себя две составляющие – модель вычислительной системы и модель условий ее применения [1].

Приступая к математическому моделированию СЦО, необходимо определить три группы спецификаций:

- атрибуты процесса функционирования, определяющие качество результата;
- атрибуты системы, влияющие на качество ее функционирования;
- характеристики условий функционирования системы.

Целевой эффект функционирования вычислительной системы в общем смысле определяется расходом ресурсов R по трем составляющим: техническим, энергетическим и технологическим:

$$R = C, E, Teh. \quad (1)$$

Будем считать, что в наземном комплексе обработки возможно обеспечить любой объем энергетической составляющей, таким образом, $R = C, Teh$. Вектор атрибутов, характеризующих качество функционирования СЦО, включает целевой эффект функционирования вычислительной системы $\mathcal{V} = \mathcal{V}(R)$ и затраты операционного времени на обработку полного объема поступивших данных τ :

Методика определения требуемых значений характеристик системы цифровой обработки ...

$$Y = \mathcal{V}, \tau . \tag{2}$$

Атрибутами системы являются ее эксплуатационно-технические характеристики, проектные параметры, а также характеристики процесса функционирования, влияющие на качество функционирования [10]. Для вычислительных систем, к которым относится и система цифровой обработки данных ДЗЗ [11], эксплуатационно-техническими характеристиками являются: производительность узлов обработки $П_y$, пропускная способность каналов информационного обмена с окружением C_k , пропускная способность каналов внутреннего информационного обмена $C_{u.o}$ и объем оперативной памяти $V_{o.n}$. Для процесса функционирования СЦО атрибутами являются количество операций K_{on} , требуемых для обработки всего поступившего объема данных [12], и количество потоков параллельной обработки N_{nom} , на которое можно разделить процесс. Таким образом, вектор управляемых атрибутов системы A' , влияющих на качество ее функционирования, выглядит следующим образом:

$$A' = K_{on}, N_{nom}, V_{o.n}, П_y, C_{u.o}, C_k . \tag{3.1}$$

К дополнительным проектным параметрам системы, оказывающим влияние на длительность ее функционирования [13], относятся: разрядность вычислений r , основание алгоритмов обработки радиолокационных сигналов f , топология взаимосвязей узлов обработки S и протокол передачи данных по каналам информационного обмена Pr . Исходя из этого вектор неуправляемых (в рамках текущего исследования) атрибутов A'' системы имеет вид

$$A'' = r, f, S, Pr . \tag{3.2}$$

Полный вектор атрибутов можно представить как

$$A = A', A'' . \tag{4}$$

Характеристики условий функционирования СЦО составляют вектор B' . К ним относятся параметры, с которыми запускается выполнение целевой функции обработки: длительность зондирующего импульса t_{imp} , частота дискретизации F_d , период повторения зондирующего импульса T_{pi} , длительность зондирования t_c , длина волны λ , ширина спектра сигнала F_{sp} , высота орбиты H , реализуемое и требуемое разрешение $resol$ по дальности и азимуту [14]. Все указанные параметры должны быть учтены при обработке поступающих радиолокационных данных [15]. Таким образом, вектор характеристик условий функционирования выглядит следующим образом:

$$B' = t_{imp}, F_d, T_{pi}, t_c, \lambda, F_{sp}, H, resol . \tag{5}$$

Далее необходимо определить связь трех групп спецификаций из шага 1: зависимость параметров функционирования системы (2) от параметров самой системы (3), (4) и условий функционирования (5), а также от организации процесса функционирования [16], которая выражается в виде плана задействования системы $Plan$ при известном информационном потоке.

Подставляя (1) в (2), получим вектор характеристик функционирования системы:

$$Y = V(C, Tec), \tau . \tag{6}$$

Зафиксируем техническую структуру C и технологические возможности T_{ec} как неизменяемый набор характеристик. Варьируемым параметром оставим операционное время τ . Получаем зависимость для управляемых атрибутов A' :

$$\frac{K_{on}}{N_{nom}} / \Pi_y = \tau \left| \begin{array}{l} V_{o.n} > 2V_{pzz} \\ C_{u.o} > \Pi_{обр} \\ C_k > \Pi_{обр} \end{array} \right. \quad (7)$$

С учетом неуправляемых атрибутов A'' зависимость выглядит следующим образом:

$$\frac{K_{on}(f)}{N_{nom}} / \Pi_{обр}(\Pi_y(r), S, Pr) = \tau \left| \begin{array}{l} V_{o.n} > 2V_{pzz} \\ C_{u.o} > \Pi_{обр} \\ C_k > \Pi_{обр} \end{array} \right. \quad (8)$$

Условия функционирования системы B' определяют априорный объем поступающих данных, количество потоков, на которые может быть распараллелена обработка, и количество операций на поток, которое потребуется для обработки данных. С учетом этих условий зависимость (8) трансформируется в зависимость (принимая для расчета объема поступивших данных V_{pzz} , что запись ведется в k квадратурах, поляризация k_p – полная, разрядность АЦП r_a , разрешение $resol$ по азимуту и дальности одинаковое)

$$\begin{aligned} V_{pzz} &= k k_p r_a F_d \frac{T_{pi}}{T_{cmp}} t_c; \\ N_{nom} &= N_{nom}(resol) = F_d \frac{T_{pi}}{T_{cmp}} t_c / resol^2; \\ \frac{K_{on}(f, V_{pzz})}{N_{nom}(resol)} / \Pi_{обр}(\Pi_y(r), S, Pr) &= \tau \left| \begin{array}{l} V_{o.n} > 2V_{pzz} \\ C_{u.o} > \Pi_{обр} \\ C_k > \Pi_{обр} \end{array} \right. \quad (9) \end{aligned}$$

После определения зависимостей всех спецификаций друг от друга определяется математическая модель целевого функционирования СЦО. Она включает в себя реализуемый функционал системы со всеми его параметрами (агрегатами) и закон распределения показателя качества процесса функционирования.

Целевое функционирование СЦО есть выполнение технологической цепочки обработки поступающих данных ДЗЗ. Она основывается на синтезировании радиолокационного изображения (далее – РЛИ).

Алгоритм синтеза радиолокационного изображения [2] в математическом эквиваленте имеет следующий вид:

- вычисление опорных функций по дальности f , азимуту g ;
- вычисление спектра зарегистрированного сигнала $\dot{U}(r'', x'')$ и опорной функции по дальности f по числу импульсов: $F_r[\dot{U}(r'', x'')]$, $F_r[f]$;
- вычисление Фурье-образа (БПФ) функции свертки по дальности $F_r[h] = F_r[\dot{U}(r'', x'')] F_r[f]$;
- вычисление функции свертки по дальности $h = F_r^{-1}[F_r[h]]$;

Методика определения требуемых значений характеристик системы цифровой обработки ...

- вычисление спектра функции свертки по дальности по числу отсчетов $F_x[h], F_x[g]$;
- вычисление БПФ функции свертки по азимуту $F_x[U(r', x')] = F_x[h] \cdot F_x[g]$;
- вычисление функции свертки по азимуту для получения итогового РЛИ $U(r', x')$:

$$U(r', x') = F_x^{-1} [F_x [U(r', x')]].$$

Исходя из приведенного алгоритма математический эквивалент синтеза РЛИ можно представить как

$$U(r', x') = F_x^{-1} [F_x [F_r^{-1} [F_r [\dot{U}(r'', x'')]] F_r [f]]] F_x [g]. \tag{10}$$

При этом обработка может быть выполнена как на одном узле, так и на нескольких с распараллеливанием либо по данным [3], либо по участкам алгоритма.

Агрегаты функциональных элементов представляют собой функции, объединяющие их техническую и технологическую структуру [6], набор значимых характеристик (атрибутов) (4), набор условий функционирования (5) и набор условий применения. Набор условий применения B'' представляет собой план задействования ресурсов $Plan$, построенный на основе информации [7] о периодичности поступления входных потоков. В случае нестационарного информационного потока (11) набор условий применения имеет вид

$$P_m(t_0, t) = \frac{a^m}{m!} e^{-a}, m = 0, 1, \dots, n. \tag{11}$$

$$B'' = B''(Plan(P_m)). \tag{12}$$

Таким образом, агрегат [1] функционального элемента системы

$$\alpha = \alpha(C, Tec; A, B', B''). \tag{13}$$

Модель целевого функционирования системы [8] также содержит описание закона распределения показателя качества $Y(6)$. В общем виде он может быть описан выражением

$$\Phi_{\hat{Y}, \hat{\tau}}(Y, \tau) = P\left[\left(\hat{Y} \geq Y\right) \cap \left(\hat{\tau} \leq \tau\right)\right]. \tag{14}$$

В завершение моделирования вычислительной системы разрабатывается блок управления качеством СЦО и ее функционирования, который представляет собой подвектор управляемых компонент (16) вектора атрибутов системы (15) и способы управления ими:

$$X = A, B'; \tag{15}$$

$$U = A', B' \subseteq X. \tag{16}$$

К способам управления компонентами вектора U относятся стратегии их изменения для достижения требуемого результата [9]. При этом из компонент вектора B' управляемым компонентом является только выходное разрешение РЛИ *resol*, которое может быть изменяемо по правилу: если время обработки данных превышает предельно допустимое, ухудшаем разрешение, что приведет к снижению количества параллельных потоков обработки и количества операций на поток, то есть к снижению операционного времени обработки.

Затем начинается описание второй части агрегированной модели СЦО – модели условий ее применения. Первыми учитываются требуемые значения показателя качества целевого функционирования.

Требуемое значение показателя качества описывается вектором Z :

$$Z = V_m, \tau_m. \quad (17)$$

Здесь V_m – необходимые ресурсы и технологии для выполнения целевой функции; τ_m – требуемое потребителем информации ограничение на время выполнения целевой функции.

После этого определяется связь требований к качеству функционирования системы и условий ее функционирования. Условие функционирования приведено в виде формулы (11) и характеризует входной поток данных как нестационарный пуассоновский. Исходя из этого определим закон распределения промежутка времени T между наступлениями соседних событий [3].

Пусть первое событие появилось в момент времени t_0 . При этом условии закон распределения времени T между этим событием и последующим находится следующим образом:

$$F_{t_0}(t) = PT < t = 1 - PT > t. \quad (18)$$

$PT > t$ – вероятность того, что на участке от t_0 до $t_0 + t$ не появится ни одного события:

$$PT > t = e^{-a} = e^{-\int_{t_0}^{t_0+t} \lambda(t) dt}. \quad (19)$$

Подставляя (21) в (20), получим

$$F_{t_0}(t) = 1 - e^{-\int_{t_0}^{t_0+t} \lambda(t) dt}. \quad (20)$$

Дифференцируя (20), найдем плотность распределения потоков:

$$f_{t_0}(t) = \lambda(t_0 + t) e^{-\int_{t_0}^{t_0+t} \lambda(t) dt} \Big|_{t > 0}. \quad (21)$$

В формулах (11), (18)–(21) использованы обозначения:

a – математическое ожидание числа событий на участке от t_0 до $t_0 + t$, $a = \int_{t_0}^{t_0+t} \lambda(t) dt$;
 $\lambda(t)$ – мгновенная плотность потока, $\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{m(t + \Delta t) - m(t)}{\Delta t}$.

Знание этих законов позволяет определить количество требуемых параллельно функционирующих вычислительных ресурсов обработки N :

$$\begin{cases} V = V(C, Tec) & \tau \leq T \\ V = V(NC, Tec) & \tau > T \end{cases}. \quad (22)$$

Таким образом, искомая связь требований к качеству и условий функционирования СЦО определяется системой (22) и выражением

$$N = \frac{\tau}{T}. \quad (23)$$

Методика определения требуемых значений характеристик системы цифровой обработки ...

Далее определяется подвектор управляемых компонент вектора характеристик условий применения СЦО B'' и способы управления ими [1]. Таким образом, с учетом шага 4 моделируется способ управления требуемым качеством целевого функционирования системы.

С учетом рассматриваемых условий поступления входного потока вектор B'' пуст. Следовательно, управление требуемым качеством функционирования СЦО ограничивается описанным в шаге 4(уравнение (16)).

В конце определяются соотношения между компонентами векторов – определяющего качество результата целевого функционирования Y и определяющего требования к качеству Z :

$$V \geq V_m; \quad \tau \leq \tau_m. \tag{24}$$

В полученной при выполнении данного алгоритма агрегированной математической модели СЦО приведена взаимосвязь управляемых компонент вектора A' (3.1) и показателя качества ее целевого функционирования (6).

Методика оценивания качества функционирования системы цифровой обработки дистанционного зондирования Земли

Шаг 1. Формулирование критерия оценивания качества результата целевого функционирования:

$$G_{цр} : Y \in \{Z\} \cong U. \tag{25}$$

Шаг 2. Вычисление показателя эффективности функционирования системы в виде вероятности достижения ее цели:

$$P_{дц} = P(Y \in \{Z\}). \tag{26}$$

Шаг 3. Определение требований к эффективности функционирования (минимально допустимое значение вероятности достижения цели) $P_{дц}^{мп}$.

Шаг 4. Формулирование и реализация критерия пригодности системы по степени достижения целевого эффекта:

$$G_{цэ} : P_{дц} \geq P_{дц}^{мп}. \tag{27}$$

Шаг 5. Непосредственное оценивание эффективности функционирования СЦО по формулам (25)–(27).

Выполнение пятого шага приведенной методики в указанной общей формулировке подразумевает под собой выполнение нескольких действий:

1. Формирование n -мерной области допустимых значений управляемых атрибутов системы, при которых гарантированно удовлетворяется условие $P_{дц} \geq P_{дц}^{мп}$.
2. Вычисление каждого из n значений управляемых атрибутов оцениваемой системы.
3. Построение нормированной точки в n -мерном пространстве и анализа ее положения.

Сформируем область допустимых значений управляемых атрибутов системы $A' = K_{он}, N_{ном}, V_{о.п}, П_y, C_{и.о}, C_k$.

В общем виде синтез РЛИ состоит из четырех преобразований Фурье (далее – БПФ) и двух сверток радиоголограммы с опорами [2].

Количество операций K_{on} зависит от объема потока, выраженного в количестве отсчетов N (рассчитывается от объема радиолограммы) и алгоритма обработки:

$$N = \frac{V_{pzz}}{r_a} = k k_p F_d \frac{T_{pi}}{T_{cmp}} t_c. \quad (28)$$

Математическая сложность БПФ по основанию 2 составляет $\frac{3N}{2} \log_2 N$ операций [5]. Следовательно, общее количество операций рассчитывается в рассматриваемом случае как

$$K_{on2} = 2N + 4 \frac{3N}{2} \log_2 N = 2N + 6N \log_2 N. \quad (29)$$

Отношение количества операций к объему обрабатываемых данных при одном потоке обработки составляет производительность алгоритма:

$$\frac{K_{on}}{N} = \frac{2N + 6N \log_2 N}{N} = 2 + 6 \log_2 N. \quad (30)$$

При возможности организации распараллеливания обработки по данным значимым параметром является удельная сложность алгоритма на потоке, которая определяется соотношением

$$\frac{K_{on}}{N_{nom}}. \quad (31)$$

Количество потоков параллельной по данным обработки при этом определяется требуемым разрешением итогового радиолокационного изображения.

Полученная удельная сложность алгоритма (31) является значимой характеристикой только во взаимосвязи с производительностью вычислительного устройства Π_y , при этом наиболее удобной в данном случае мерой производительности устройства является MIPS. Чем меньше соотношение

$$t_{обр} = \frac{K_{on}}{N_{nom}} / \Pi_y, \quad (32)$$

тем выше производительность аппаратно-программного вычислительного комплекса. Именно формула (32) определяет время обработки поступающих данных при условии поступления данных по каналам внешнего информационного обмена без очередей, достаточных объема оперативной памяти и пропускной способности каналов внутреннего обмена.

При наличии i узлов параллельной обработки и $i(i-1)/2$ каналов внутреннего информационного обмена (то есть при наличии полносвязной сети) выражение (32) приобретает вид

$$t_{обр} = \sum_i \frac{K_{oni}}{N_{nomi}} / \Pi_{yi} + \sum_{i(i-1)/2} \frac{V_{ij}}{C_{ij}}. \quad (33)$$

С учетом задержки на прием и передачу данных по каналу внешнего информационного обмена

$$t_{обр} = \frac{V_{pzz}}{C_k} + \sum_i \frac{K_{oni}}{N_{nomi}} / \Pi_{yi} + \sum_{i(i-1)/2} \frac{V_{ij}}{C_{uоij}} + \frac{V_{рли}}{C_k}. \quad (34)$$

Исходя из приведенных соотношений (28)–(34) и ограничения $t_{обр} \leq T_{lim}$ получаем логичные граничные значения для формирования области допустимых значений:

Методика определения требуемых значений характеристик системы цифровой обработки ...

$$\begin{aligned}
 K_{on} &\leq 2kk_p F_d \frac{T_{pi}}{T_{cmp}} t_c + 6kk_p F_d \frac{T_{pi}}{T_{cmp}} t_c \log_2 kk_p F_d \frac{T_{pi}}{T_{cmp}} t_c ; \\
 N_{nom} &\leq F_d \frac{T_{pi}}{T_{cmp}} t_c / resol^2 ; \\
 \Pi_y &\geq \frac{2 + 6 \log_2 kk_p F_d \frac{T_{pi}}{T_{cmp}} t_c}{F_d \frac{T_{pi}}{T_{cmp}} t_c / resol^2} ; \\
 C_x &\geq \frac{2 + 6 \log_2 kk_p F_d \frac{T_{pi}}{T_{cmp}} t_c}{F_d \frac{T_{pi}}{T_{cmp}} t_c / resol^2} ; \\
 C_{uo} &\geq \frac{2 + 6 \log_2 kk_p F_d \frac{T_{pi}}{T_{cmp}} t_c}{i \cdot F_d \frac{T_{pi}}{T_{cmp}} t_c / resol^2} ; \\
 V_{on} &\geq 2kk_p F_d \frac{T_{pi}}{T_{cmp}} t_c r_a .
 \end{aligned}$$

Видно, что четыре из шести вводимых атрибутов системы зависят от количества операций K_{on} . При этом само количество операций, которые могут быть выполнены за отведенное время, ограничивается удельной производительностью аппаратной части и количеством потоков распараллеливания данных, зависящих от их объема. Пользуясь эффектом поглощения [1], можно упростить векторный показатель качества, свернув первые три его составляющие в атрибут удельной производительности аппаратно-программного устройства [4]:

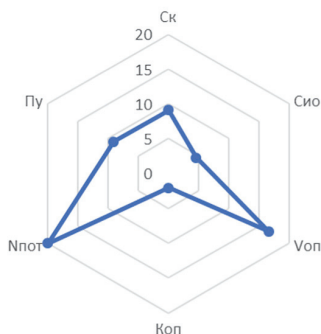
$$\Pi'_y \geq \frac{Nr_a}{T_{lim}} .$$

Пропускная способность каналов внешнего информационного обмена должна быть не менее, чем эта же характеристика Π'_y , выраженная в объеме данных, обрабатываемых в единицу времени для входного узла. Пропускная способность каналов внутреннего информационного обмена должна превышать производительность узла, следующего за работающим, также выраженную в объеме информации, обрабатываемой в единицу времени.

Исходное пространство допустимых значений принимает вид, представленный на Рисунке 1.

Допустимыми значениями, исходя из условий задачи, являются значения, находящиеся вне синей черты. Применение разработанного математического обеспечения позволяет провести моделирование системы цифровой обработки данных и оценить качество ее целевого функционирования по управляемым атрибутам, что соответствует достижению цели исследования.

Пространство допустимых значений атрибутов

**Рисунок 1.** Пространство допустимых значений атрибутов системы

Заключение

Рассматривается оценивание качества системы цифровой обработки данных ДЗЗ при использовании параллельной по данным обработки. При использовании параллелизмами участков алгоритмов оценка количества операций будет более сложной. Однако изменение формулы не вносит изменений в саму суть методики, поэтому она может быть насыщена дополнительными оценками. К примеру, регулировка значений, которые представлены в виде вектора A'' неуправляемых характеристик, имеет огромную значимость при практическом проектировании и реализации системы цифровой обработки. Разработка методики выбора дополнительных проектных параметров системы является направлением дальнейших исследований.

Литература

1. Борисов А.А., Краснов С.А., Нечай А.А. Технология блокчейн и проблемы ее применения в различных информационных системах // Вестник Российского нового университета. Серия: Сложные системы: модели, анализ и управление. 2018. № 2. С. 63–67.
2. Гладышев А.И., Зимовец А.И., Нечай А.А., Обухов А.В. Применение Big Data для анализа околоземного космического пространства // Вестник Российского нового университета. Серия: Сложные системы: модели, анализ и управление. 2020. № 4. С. 127–134.
3. Лоскутов А.И., Дуников А.С., Артюшкин А.Б., Нечай А.А. Математическая модель системы символической синхронизации наземной приемно-регистрирующей станции телеметрической информации в условиях флуктуаций амплитуды сигнала // Вестник Российского нового университета. Серия: Сложные системы: модели, анализ и управление. 2017. № 1. С. 11–19.
4. Морозов А.А., Тимофеев А.В. Эффективность параллельной реализации алгоритма Radix-4 быстрого преобразования Фурье. М.: Высшая школа экономики, 2015. 1(1): 69–82.
5. Мысливец Е.Г., Пучкова И.А., Нечай А.А., Антонов Д.А. Синтез модели автоматизированной информационной системы радиоэлектронного мониторинга объектов наблюдения на основе логико-алгебраического подхода // Вестник Российского нового университета. Серия: Сложные системы: модели, анализ и управление. 2020. № 4. С. 135–142.

Методика определения требуемых значений характеристик системы цифровой обработки ...

6. Нечай А.А. Формирование безопасной информационной среды // Актуальные проблемы современности: наука и общество. 2019. № 4 (25). С. 43–44.
7. Нечай А.А., Борисов А.А., Борисова Ю.И. Точечный анализ данных дистанционного зондирования земли средствами языка программирования Python // Вестник Российского нового университета. Серия: Сложные системы: модели, анализ и управление. 2019. № 1. С. 49–55.
8. Новиков А.Н., Нечай А.А., Малахов А.В. О подходе к обоснованию рациональной номенклатуры эталонной базы измерительных комплексов на основе нечетких моделей // Вестник Российского нового университета. Серия: Сложные системы: модели, анализ и управление. 2017. № 1. С. 72–79.
9. Новиков А.Н., Нечай А.А., Малахов А.В. Математическая модель обоснования вариантов реконфигурации распределенной автоматизированной контрольно-измерительной системы // Вестник Российского нового университета. Серия: Сложные системы: модели, анализ и управление. 2016. № 1-2. С. 56–59.
10. Петухов Г.Б., Якунин В.И. Методологические основы внешнего проектирования целенаправленных процессов и целеустремленных систем. М.: АСТ. 2006. 502 с.
11. Полончик О.А., Артюшкин А.Б., Нечай А.А., Полончик Е.О. Радиолокационные системы дистанционного зондирования земли на базе спутников со стабилизацией вращением // Вестник Российского нового университета. Серия: Сложные системы: модели, анализ и управление. 2017. № 1. С. 35–41.
12. Рабинер Л., Гулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов. М.: Мир, 1978. 834 с.
13. Свинарчук А.А., Нечай А.А. Использование квантовых вычислений при выборе управленческого решения // Вестник Российского нового университета. Серия: Сложные системы: модели, анализ и управление. 2018. № 2. С. 31–36.
14. Шаймарданов А.М., Нечай А.А., Лепехин С.В. Математические модели систем автоматического управления с широтно-импульсной модуляцией // Вестник Российского нового университета. Серия: Сложные системы: модели, анализ и управление. 2019. № 2. С. 27–39.
15. Ширококов В.В., Нечай А.А. Алгоритм планирования энергосберегающей параллельной обработки информации с учетом информационной важности и времени поступления задач // Вестник Российского нового университета. Серия: Сложные системы: модели, анализ и управление. 2017. № 1. С. 88–93.
16. Шульженко А.Д. Полимодельный принцип построения высокопроизводительной системы обработки данных дистанционного зондирования Земли // Globus: технические науки. 2020. № 3(34). С. 13–20.

References

1. Borisov A.A., Krasnov S.A., Nechaj A.A. (2018) *Tekhnologiya blokchejn i problem ee primeneniya v razlichnyh informacionnyh sistemah* [Blockchain technology and problems of its application in various information systems]. *Vestnik Rossijskogo novogo universiteta. Seriya: Slozhnye sistemy: modeli, analiz i upravlenie*, vol. 2, pp. 63–67 (in Russian).

2. Gladyshev A.I., Zimovec A.I., Nechaj A.A., Obuhov A.V. (2020) *Primenenie Big Data dlya analiza okolozemnogo kosmicheskogo prostranstva* [Application of Big Data for near-Earth space analysis]. *Vestnik Rossijskogo novogo universiteta. Seriya: Slozhnye sistemy: modeli, analiz i upravlenie*, vol. 4, pp. 127–134 (in Russian).
3. Loskutov A.I., Dunikov A.S., Artyushkin A.B., Nechaj A.A. (2017) *Matematicheskaya model' sistemy simvol'noj sinhronizacii nazemnoj priemno-registriruyushchej stancii telemetricheskoy informacii v usloviyah fluktuacij amplitudy signala* [Mathematical model of the symbolic synchronization system of a ground-based receiving and recording station of telemetric information under conditions of signal amplitude fluctuations]. *Vestnik Rossijskogo novogo universiteta. Seriya: Slozhnye sistemy: modeli, analiz i upravlenie*, vol. 1, pp. 11–19 (in Russian).
4. Morozov A.A., Timofeev A.V. (2016) *Effektivnost' parallel'noj realizacii algoritma Radix-4 bystrogo preobrazovaniya Fur'e* [Efficiency of parallel implementation of the Radix-4 fast Fourier transform algorithm]. *Vysshaya shkola ekonomiki Publishing*, vol. 14, no. 1, pp. 69–82 (in Russian).
5. Myslivec E.G., Puchkova I.A., Nechaj A.A., Antonov D.A. (2020) *Sintez modeli avtomatizirovannoj informacionnoj sistemy radioelektronnogo monitoringa ob'ektov nablyudeniya na osnove logiko-algebraicheskogo podhoda* [Synthesis of a model of an automated information system for electronic monitoring of surveillance objects based on a logical-algebraic approach]. *Vestnik Rossijskogo novogo universiteta. Seriya: Slozhnye sistemy: modeli, analiz i upravlenie*, vol. 4, pp. 135–142 (in Russian).
6. Nechaj A.A. (2019) *Formirovanie bezopasnoj informacionnoj sredy* [Formation of a secure information environment]. *Aktual'nye problemy sovremennosti: nauka i obshchestvo*, vol. 4, pp. 43–44 (in Russian).
7. Nechaj A.A., Borisov A.A., Borisova Yu.I. (2019) *Tochechnyj analiz dannyh distancionnogo zondirovaniya zemli sredstvami yazyka programirovaniya Python* [Point analysis of Earth remote sensing data by means of the Python programming language]. *Vestnik Rossijskogo novogo universiteta. Seriya: Slozhnye sistemy: modeli, analiz i upravlenie*, vol. 1, pp. 49–55 (in Russian).
8. Novikov A.N., Nechaj A.A., Malahov A.V. (2016) *Matematicheskaya model' obosnovaniya variantov rekonfiguracii raspredelennoj avtomatizirovannoj kontrol'no-izmeritel'noj sistemy* [Mathematical model of substantiation of reconfiguration options for a distributed automated control and measuring system]. *Vestnik Rossijskogo novogo universiteta. Seriya: Slozhnye sistemy: modeli, analiz i upravlenie*, vol. 1-2, pp. 56–59 (in Russian).
9. Novikov A.N., Nechaj A.A., Malahov A.V. (2017) *O podhode k obosnovaniyu racional'noj nomenklatury etalonnoj bazy izmeritel'nyh kompleksov na osnove nechetkih modelej* [On the approach to substantiating the rational nomenclature of the reference base of measuring complexes based on fuzzy models]. *Vestnik Rossijskogo novogo universiteta. Seriya: Slozhnye sistemy: modeli, analiz i upravlenie*, vol. 1, pp. 72–79 (in Russian).
10. Petuhov G.B., Yakunin V.I. (2006) *Metodologicheskie osnovy vneshnego proektirovaniya celenapravlennyh processov i celeustremlyonnyh system* [Methodological Foundations of External Design of Purposeful Processes and Purposeful Systems]. Moscow, AST Publishing, 502 p. (in Russian).

Методика определения требуемых значений характеристик системы цифровой обработки ...

11. Polonchik O.L., Artyushkin A.B., Nechaj A.A., Polonchik E.O. (2017) *Radiolokacionnye sistemy distancionnogo zondirovaniya zemli na baze sputnikov so stabilizaciej vrashcheniem* [Radar systems for remote sensing of the Earth based on satellites with rotation stabilization]. *Vestnik Rossijskogo novogo universiteta. Seriya: Slozhnye sistemy: modeli, analiz i upravlenie*, vol. 1, pp. 35–41 (in Russian).
12. Rabiner L., Gould B. (1978) *Teoriya i primeneniye cifrovoj obrabotki signalov* [Theory and application of digital signal processing]. Moscow, Mir Publishing, 834 p. (in Russian).
13. Svinarchuk A.A., Nechaj A.A. (2018) *Ispol'zovanie kvantovykh vychislenij pri vybore upravlencheskogo resheniya* [The use of quantum computing in choosing a management solution]. *Vestnik Rossijskogo novogo universiteta. Seriya: Slozhnye sistemy: modeli, analiz i upravlenie*, vol. 2, pp. 31–36 (in Russian).
14. Shajmardanov A.M., Nechaj A.A., Lepekhin S.V. (2019) *Matematicheskie modeli sistem avtomaticheskogo upravleniya s shirotno-impul'snoj modulyaciej* [Mathematical models of automatic control systems with pulse width modulation]. *Vestnik Rossijskogo novogo universiteta. Seriya: Slozhnye sistemy: modeli, analiz i upravlenie*, vol. 2, pp. 27–39 (in Russian).
15. Shirobokov V.V., Nechaj A.A. (2017) *Algoritm planirovaniya energosberegayushchej parallel'noj obrabotki informacii s uchetom informacionnoj vazhnosti i vremeni postupleniya zadach* [An algorithm for planning energy-saving parallel processing of information, taking into account the information importance and time of receipt of tasks]. *Vestnik Rossijskogo novogo universiteta. Seriya: Slozhnye sistemy: modeli, analiz i upravlenie*, vol. 1, pp. 88–93 (in Russian).
16. Shulzhenko A.D. (2020) *Polimodel'nyj princip postroeniya vysokoproizvoditel'noj sistemy obrabotki dannykh distancionnogo zondirovaniya zemli* [Polymodel principle of constructing a high-performance system for processing earth remote sensing data]. *Globus: tekhnicheskie nauki*, no. 3 (34), pp. 13–20 (in Russian).