

УДК 519.711, 65.51

ИНТЕРВАЛЬНОСТЬ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМ ДИСТАНЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ, ПОРОЖДАЕМАЯ РЕЖИМОМ ОБНАРУЖЕНИЯ ОШИБОК В КАНАЛЕ СВЯЗИ

О.С. Нуйя^а, Р.О. Пешчеров^а, А.В. Ушаков^а

^а Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

Адрес для переписки: rpeshcherov@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 15.12.16, принята к печати 30.04.17

doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-3-506-513

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Нуйя О.С., Пешчеров Р.О., Ушаков А.В. Интервальность параметров систем дистанционного управления, порождаемая режимом обнаружения ошибок в канале связи // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2017. Т. 17. № 3. С. 506–513. doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-3-506-513

Аннотация

Предмет исследования. Исследованы проблемы организации цифрового дистанционного управления непрерывным техническим объектом, сопровождаемого возможностью возникновения системной интервальности дискретного модельного представления этого объекта. Установлено, что указанная системная интервальность порождается канальной средой, функционирующей в режиме обнаружения ошибок. Показано, что причиной системной интервальности, состоящей в интервальности такого системного параметра, как интервал дискретности, с которым происходит информационный обмен между объектом управления и устройством цифрового дистанционного управления, является процедура повтора передачи кодовых посылок в случае обнаружения их искажений. **Метод.** Количественная оценка относительной интервальности интервала дискретности состоит в виртуальном переводе используемых помехозащищенных кодов из режима обнаружения ошибок в режим исправления ошибок с кратностью, равной кратности обнаруживаемых. Метод основан на универсальном положении К. Шеннона о зависимости скорости передачи информации от характеристик шумовой среды в канале связи при заданной информационной надежности, характеризуемой допустимой вероятностью ложного приема. **Основные результаты.** Устранена необходимость вводить в состав системы цифрового дистанционного управления аппаратные средства количественного контроля повторений передач кодовых посылок с целью оценки интервальности такого системного параметра, как интервал дискретности. Получено аналитическое решение этой задачи. **Практическая значимость.** Предложенный метод применим ко всем интерфейсам, использующим CRC-технологии для защиты цифровой информации от помех.

Ключевые слова

канал связи, непрерывный объект, интервал дискретности, помехозащита, обнаружение, исправление, относительная интервальность

Благодарности

Работа подготовлена при поддержке Правительства Российской Федерации (Грант 074-U01), Министерства образования и науки Российской Федерации (Проект 14. Z50.31.0031), гранта Президента Российской Федерации №14.Y31.16.9281-НШ.

PARAMETER INTERVALITY OF REMOTE CONTROL SYSTEMS GENERATED WITH ERROR DETECTION MODE IN COMMUNICATION CHANNEL

O.S. Nuyya^а, R.O. Peshcherov^а, A.V. Ushakov^а

^а ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

Corresponding author: rpeshcherov@mail.ru

Article info

Received 15.12.16, accepted 30.04.17

doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-3-506-513

Article in Russian

For citation: Nuyya O.S., Peshcherov R.O., Ushakov A.V. Parameter intervality of remote control systems generated with error detection mode in communication channel. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2017, vol. 17, no. 3, pp. 506–513 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-3-506-513

Abstract

Subject of Research. The paper deals with the problems of digital remote control of continuous technical object, followed by the possibility of system intervality of this plant discrete model representation. The specified system intervality is generated by a channel area, operating in the error detection mode. System intervality consists of such system parameter intervality as discreteness interval. The exchange of information between the control plant and a digital remote control occurs with this discreteness interval. It is shown that the causal factor of system intervality is a retransmission procedure of the code parcels in the case of their distortion detection. **Method.** The quantitative assessment of relative intervality of such system parameter as discreteness interval is a virtual translation of used noise-immune codes from error detection mode into error correction mode; multiplicity of corrected errors is equal to the multiplicity of detectable ones. The method is based on the generic C. Shannon's position about the dependence of information transmission speed on the characteristics of the noise environment in the communication channel for specified information reliability, characterized by an acceptable probability of false acceptance. **Main Results.** We have shown that the need is eliminated to enter quantitative control hardware of repetitions of transmissions of code packages into the system of digital remote control in order to assess intervality of such system parameter as discreteness interval. We have obtained the solution of this problem analytically. **Practical Relevance.** The proposed method for quantitative assessment of relative intervality of such system parameter as discreteness interval can be applied to all interfaces that use CRC-technology of digital information noise-protection.

Keywords

communication channel, continuous plant, discreteness interval, noise-protection, detection, correction, relative intervality

Acknowledgements

The paper was prepared with the support of the Government of the Russian Federation (Grant 074-U01) and the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (Project 14. Z50.31.0031), grant of the President of the Russian Federation No.14.Y31.16.9281-ННШ

Введение

Современное цифровое дистанционное управление технологическим оборудованием может осуществляться с использованием как коммутируемой канальной среды, так и выделенной, реализующей режим онлайн-управления [1–3]. Нетрудно понять, что характер использования указанных канальных сред существенным образом определяется уникальностью обслуживаемого технологического оборудования. Для задач управления бытовыми технологическими средствами¹ можно использовать коммутируемую канальную среду, основными системными недостатками которой являются ожидание доступа к среде и невысокий уровень помехозащищенности передаваемой информации. Управление уникальным технологическим оборудованием, как правило, осуществляется с использованием выделенной канальной среды, причем организация помехозащиты в ней может быть построена и в режиме обнаружения ошибок с запросом на повторение передачи [4], и в режиме исправления ошибок без запроса на повторение передачи [1–3]. Если сравнить эти два режима организации помехозащиты, то системно они отличаются тем, что в режиме исправления ошибок обмен информацией между устройством управления и обслуживаемым технологическим оборудованием осуществляется с фиксированным интервалом дискретности. В режиме обнаружения ошибок в силу фактора повторов информационных посылок обмен информацией между устройством управления и обслуживаемым технологическим оборудованием будет осуществляться не с фиксированным, а с переменным (интервальным) интервалом дискретности. Необходимо отметить, что в последнее время канальная среда, реализуемая средствами современной интерфейсной техники, широко использует помехозащиту в режиме обнаружения, обеспечиваемую CRC-технологией [4].

К сожалению, фактор интервальности такого системного параметра, как интервал дискретности, с которым осуществляется обмен информацией между передающей и приемной сторонами, даже на уровне формирования алгоритмов синтеза цифрового управления непрерывным технологическим оборудованием пока в большинстве случаев игнорируется разработчиками систем дистанционного управления. Следует считать это системной некорректностью, которую пришло время исправить.

Предварительные сведения. Обоснование принятого способа решения проблемы

Для организации цифрового управления непрерывным техническим объектом (НТО)

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t), \mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t), \quad (1)$$

где \mathbf{x} , \mathbf{u} , \mathbf{y} – соответственно вектора состояния, управления, выхода; \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{C} – матрицы состояния, управления и выхода размерностей $\dim(\mathbf{x}) = n$, $\dim(\mathbf{u}) = r$, $\dim(\mathbf{y}) = m$, $\dim(\mathbf{A}) = n \times n$, $\dim(\mathbf{B}) = n \times r$, $\dim(\mathbf{C}) = m \times n$ (в дальнейшем $r = m = 1$), необходим переход к его дискретному представлению. Дискретное представление НТО (1) строится в рекуррентной форме:

$$\mathbf{x}(k+1) = \bar{\mathbf{A}}\mathbf{x}(k) + \bar{\mathbf{B}}\mathbf{u}(k), \mathbf{y}(k) = \mathbf{C}\mathbf{x}(k), \quad (2)$$

где k – дискретное время, выраженное в числе интервалов дискретности длительности Δt , именуемое интервалом дискретности, а матрицы (2) связаны [5] с матрицами НТО (1) соотношениями

¹<http://smarhome.spb.su/>

$$\bar{\mathbf{A}} = \exp(\mathbf{A} \cdot \Delta t), \bar{\mathbf{B}} = (\bar{\mathbf{A}} - \mathbf{I}) \mathbf{A}^{-1} \mathbf{B}, \bar{\mathbf{C}} = \mathbf{C}. \quad (3)$$

Если в представлении матричной экспоненты $\exp(\mathbf{A} \cdot \Delta t)$ бесконечным рядом ограничиться первыми двумя членами, то матрицы дискретной системы (2) примут вид

$$\bar{\mathbf{A}} = \mathbf{I} + \mathbf{A} \cdot \Delta t, \bar{\mathbf{B}} = \Delta t \cdot \mathbf{B}, \bar{\mathbf{C}} = \mathbf{C}. \quad (4)$$

Нетрудно видеть, что как в форме (3), так и в упрощенной форме (4) матрицы состояния и управления дискретного представления (2) непрерывного технического объекта (1) зависят от величины интервала дискретности.

Остановимся на проблеме назначения длительности Δt интервала дискретности. Эта проблема зависит от организации цифрового управления НТО. Если цифровое управление НТО является локальным, т.е. вычисленное значение сигнала управления $\mathbf{u}(k)$ передается в приемный регистр хранения с целью его дальнейшего цифро-аналогового преобразования (АЦП) в усилительно-преобразовательной части НТО с помощью параллельной шины, то $\Delta t = \Delta t_b$, где Δt_b – длительность бита, с тактом которого функционирует используемый микроконтроллер в составе системы цифрового управления НТО. Если цифровое управление НТО является дистанционным, т.е. вычисленное значение сигнала управления $\mathbf{u}(k)$ передается в приемный регистр хранения с целью его дальнейшего АЦП в усилительно-преобразовательной части НТО последовательно с помощью канальной среды (КС), то интервал дискретности будет составлять величину $\Delta t = n_c \Delta t_b$, где n_c – число разрядов передаваемого последовательного кода.

Надо отметить, что n_c – это полное число разрядов помехозащищенного кода (ПЗК), с помощью которого ведется информационный обмен в канальной среде. При этом $n_c = k_c + m_c$, где k_c – число информационных разрядов кода из ряда (8,12,16,24,32), m_c – число проверочных разрядов кода. При фиксированном числе информационных разрядов k_c полное число n_c разрядов ПЗК определяется числом проверочных разрядов m_c этого кода. Число проверочных разрядов зависит от того, какой режим помехозащиты используется в конкретной КС. Если используется режим исправления искажений ПЗК ошибок кратности s , то число проверочных разрядов будет удовлетворять условию $m_c = m_s$. Если используется режим обнаружения искажений ПЗК ошибок кратности r , то число проверочных разрядов будет удовлетворять условию $m_c = m_r$. При этом, если $s = r$, то выполняется условие $m_s > m_r$ [6–9]. Таким образом, при использовании ПЗК в режиме исправления он длиннее, чем ПЗК, используемый в режиме обнаружения. При этом ПЗК в режиме исправления доставляет вычисленное значение сигнала управления $\mathbf{u}(k)$ одной кодовой посылкой, а ПЗК в режиме обнаружения может доставить вычисленное значение сигнала управления $\mathbf{u}(k)$ одной кодовой посылкой, а может – и несколькими кодовыми посылками, которые повторяются до тех пор, пока не будет принята кодовая посылка без искажений. Тем не менее, как показал К. Шеннон [6], в среднем время на кодовую посылку, доставляющую значение сигнала управления $\mathbf{u}(k)$ в приемный регистр хранения усилительно-преобразовательной части НТО, будет одинаковым как в случае использования ПЗК в режиме исправления искажений, так и в случае использования ПЗК в режиме обнаружения. Но в режиме обнаружения обмен информацией будет происходить с интервалом дискретности $\Delta t = \gamma n_r \Delta t_b$, где γ – число повторов кодовых посылок, порождаемых фактом обнаружения в них искажений. Всякий раз γ будет своим, своим будет и интервал дискретности $\Delta t = \gamma n_r \Delta t_b$, причем для медианного значения γ_0 числа повторов кодовых посылок выполняется равенство $\gamma_0 n_r \Delta t_b = n_s \Delta t_b$.

Все сказанное влечет за собой в силу соотношений (3)–(4) интервальность параметров матриц состояния и управления дискретного представления НТО. Проблема синтеза непрерывных систем для случая НТО с интервальными матрицами состояния и управления их векторно-матричного представления (1) имеет достаточно полное решение [10–12]. Для систем цифрового дистанционного управления, имеющих в своем составе дискретные объекты вида (3)–(4) с интервальными матрицами состояния и управления, интервальность элементов которых порождается интервальностью интервала дискретности, алгоритмическое обеспечение синтеза еще предстоит создавать.

Основной результат. Использование положений теории К. Шеннона для количественной оценки интервальности интервала дискретности в случае организации помехозащиты в режиме обнаружения искажений

Изложение основного результата начнем со сравнительного анализа интерфейсов, использующих помехозащиту передаваемой цифровой информации в режиме обнаружения искажений на основе CRC-

технологии. В таблице представлены параметры часто используемых интерфейсов^{1,2,3} в системах цифрового дистанционного управления локального характера, помехозащита в которых реализуется на основе CRC-технологии, использующей режим обнаружения искажений. В проблемно-ориентированном виде параметрами являются: неприводимый образующий полином (НОП) ПЗК, максимальная длина физической среды и скорость передачи информации при указанной длине физической среды интерфейса.

Интерфейс	CRC	НОП	Максимальная длина физической среды	Скорость передачи
RS-485	CRC-8	$x^8 + x^5 + x^4 + 1$	1200 м	62,5 кбит/с
CAN	CRC-15	$x^{15} + x^{14} + x^{10} + x^8 + x^7 + x^4 + x^3 + 1$	5000 м	10 кбит/с
USB 2.0	CRC-16	$x^{16} + x^{15} + x^2 + 1$	5 м	480 Мбит/с

Таблица. Сравнительный анализ интерфейсов

Как указывалось выше, основой механизма системной интервальности, состоящей в интервальности такого системного параметра, как интервал дискретности, с которым происходит информационный обмен между объектом управления и устройством формирования сигнала цифрового дистанционного управления, является процедура повтора передачи кодовых посылок в случае обнаружения их искажений (например, средствами CRC-технологии). Воспользуемся концепцией К. Шеннона [6] о том, что при заданной шумовой среде в каналах связи и при заданной допустимой вероятности приема ложной команды для обеспечения последнего условия требуется увеличение длительности передачи информации по сравнению со случаем отсутствия помех в канале связи. Это увеличение технически может быть реализовано в двух формах:

1. увеличение времени передачи за счет увеличения числа повторов в режиме обнаружения ошибок;
2. увеличение времени передачи за счет увеличения числа проверочных разрядов помехозащищенного кода, приводящих к увеличению его размерности, что требует большего времени для его передачи.

В соответствии с теорией передачи информации по каналам связи с помехами К. Шеннона оба способа увеличения длительности передачи должны дать один и тот же результат в среднем на передаваемую посылку. Это положение является ключевым для количественной оценки возникающей интервальности такого системного параметра, как интервал дискретности цифрового дистанционного управления при использовании канальной среды в режиме обнаружения ошибок.

Сказанное можно обобщить в форме алгоритма оценки относительной интервальности такого системного параметра, как интервал дискретности, порождаемой повторами при реализации помехозащиты кодов сигналов управления (измерения) в режиме обнаружения ошибок.

Алгоритм

- 1.1. Выбрать тип интерфейса (из ряда RS, CAN, USB и др.).
- 1.2. Выяснить, каким НОП $g(x)$ сопровождается технология CRC-помехозащиты данного интерфейса.
- 1.3. По числу ненулевых элементов НОП $g(x)$ [7–9] оценить минимальное кодовое расстояние d , которым наделяются ПЗК, используемые для передачи кодовых посылок сигналов управления.
- 1.4. По степени $\deg\{g(x)\}$ образующего многочлена $g(x)$ оценить число $m_r = \deg\{g(x)\}$ проверочных разрядов с целью вычисления полного числа $n_r = k_c + m_r$ разрядов ПЗК, где k_c – число информационных разрядов кода, обеспечивающего обнаружение ошибок кратности r .
- 1.5. По значению оцененного в п.1.3 минимального кодового расстояния оценить кратность r обнаруживаемой ошибки в силу соотношения: $r=d-1$.
- 1.6. По значению r осуществить «виртуальный перевод» используемого интерфейса в режим исправления ошибок кратности $s = r$.
- 1.7. С использованием БЧХ-технологии [7–9] сформировать неприводимый образующий полином $g_s(x)$, гарантирующий исправление ошибок кратности s .
- 1.8. По степени НОП $g_s(x)$ оценить число m_s проверочных разрядов формируемого виртуального ПЗК с целью вычисления полного числа n_s разрядов ПЗК, обеспечивающего исправления ошибок кратности $s = r$.

¹http://www.escortgps.ru/files/duoj_protocol.pdf,

² ru.wikipedia.org/wiki/Controller_Area_Network

³ ru.wikipedia.org/wiki/USB#USB_2.0

1.9. Сформировать каноническое [13] интервальное представление в форме $[\Delta t] = [\underline{\Delta t}, \overline{\Delta t}]$ такого параметра, как интервал дискретности Δt обмена информацией в задаче цифрового дистанционного управления, где $\underline{\Delta t}$ – его левая граничная реализация, $\overline{\Delta t}$ – его правая граничная реализация, представленные в числе битов кодовой посылки.

1.10. Перейти от канонического представления [13] п.1.9 такого интервального системного параметра, как интервал дискретности, к трехкомпонентному представлению [10–12] интервального числа. В этом случае интервальное представление интервала дискретности принимает вид $[\Delta t] = \Delta t_0 + [\Delta(\Delta t)] = \Delta t_0 + [\underline{\Delta\Delta t}, \overline{\Delta\Delta t}]$, где Δt_0 – медианная составляющая интервала дискретности, определяемая соотношением $\Delta t_0 = \Delta t_b \cdot n_s$, а $[\Delta(\Delta t)]$ – интервальная составляющая интервала дискретности с симметричными, но разными по знаку левым и правым граничными компонентами: $\underline{\Delta\Delta t} = (n_r - n_s) \Delta t_b$, $\overline{\Delta\Delta t} = (n_s - n_r) \Delta t_b$. Такое представление интервального интервала дискретности позволяет вычислить оценку его относительной интервальности, задаваемой в форме $\delta_r \Delta t = |\Delta\Delta t| / |\Delta t_0|$.

1.11. Передать значение медианной составляющей Δt_0 интервала дискретности разработчикам алгоритма синтеза, средствами которого осуществляется проектирование цифрового дистанционного управления при медианном значении интервала дискретности [9–12, 14–16].

1.12. Интервальную составляющую $[\Delta(\Delta t)]$ использовать для оценки относительной интервальности такого системного параметра, как интервал дискретности, а также при проведении экспериментального исследования системы цифрового дистанционного управления на предмет оценки ее влияния на качество процессов.

Иллюстративные примеры

Положения настоящей работы в виде приведенного алгоритма проиллюстрируем примерами. Вычислим величину оценки относительной интервальности такого параметра, как интервал дискретности, в задаче цифрового дистанционного управления непрерывным объектом, порождаемой канальной средой, используемой в режиме обнаружения ошибок. Решаем задачу на примерах трех интерфейсов: RS-485 (Вариант 1), CAN (Вариант 2), USB 2.0 (Вариант 3), следуя приведенному алгоритму:

Для Варианта 1.

1.1. Выбираем интерфейс типа RS-485.

1.2. Устанавливаем, что используемая в этом интерфейсе технология помехозащиты CRC-8 осуществляется с НОП $g(x) = x^8 + x^5 + x^4 + 1$.

1.3. Оцениваем по числу ненулевых элементов НОП $g(x)$ минимальное кодовое расстояние, которое равно $d=4$.

1.4. Оцениваем число проверочных разрядов помехозащищенного кода по степени НОП $g(x)$, которое принимает значение $m_r = 8$, и вычисляем при числе информационных разрядов $k_c = 16$ полное число разрядов $n_r = k_c + m_r = 24$; таким образом, используемый ПЗК имеет вид (24,16).

1.5. По значению минимального кодового расстояния оцениваем кратность r обнаруживаемых ошибок, которое оказывается равным $r=d-1 = 3$.

1.6. Ставим задачу наделять ПЗК свойством исправлять ошибки кратности $s=r=3$.

1.7. С помощью БЧХ-технологии формируем НОП $g_s(x) = x^{15} + x^{11} + x^{10} + x^9 + x^8 + x^7 + x^5 + x^3 + x^2 + x + 1$, обеспечивающий кратность исправляемой ошибки $s=3$.

1.8. По степени НОП $g_s(x)$ оцениваем число $m_s = 15$ проверочных разрядов формируемого виртуального ПЗК с целью вычисления полного числа $n_s = 31$ разрядов ПЗК (31,16).

1.9.,1.10. Переходим от канонического интервального представления п.1.9 такого системного параметра, как интервал дискретности, к трехкомпонентному представлению

$$[\Delta t] = 31 + [-7 \ 7] = \Delta t_0 + [\underline{\Delta(\Delta t)}, \overline{\Delta(\Delta t)}].$$

1.11. Передаем медианное значение интервала дискретности $\Delta t_0 = 31$, выраженное в числе битов кода, для разработки цифрового устройства формирования сигнала дистанционного управления при медианном значении интервала дискретности.

1.1. Формируем оценку относительной интервальности такого системного параметра, как интервал дискретности: $\delta_r \Delta t = 7/31 = 0,226$ (22,6%).

Для Варианта 2.

1.1. Выбираем интерфейс типа CAN.

1.2. Устанавливаем, что используемая в этом интерфейсе технология помехозащиты CRC-16 осуществляется с НОП $g(x) = x^{15} + x^{14} + x^{10} + x^8 + x^7 + x^4 + x^3 + 1$.

1.3. Оцениваем по числу ненулевых элементов НОП $g(x)$ минимальное кодовое расстояние, которое равно $d=8$.

1.4. Оцениваем число проверочных разрядов помехозащищенного кода по степени НОП $g(x)$, которое принимает значение $m_r = 15$, и вычисляем при числе информационных разрядов $k_c = 16$ полное число разрядов $n_r = k_c + m_r = 31$, т.е. используемый ПЗК принимает вид (31,16).

1.5. По значению минимального кодового расстояния оцениваем кратность r обнаруживаемых ошибок, которое оказывается равным $r=d-1 = 7$.

1.6. Ставим задачу наделить ПЗК свойством исправлять ошибки кратности $s=r=7$.

1.7. С помощью БЧХ-технологии формируем НОП $g_s(x) = x^{36} + x^{35} + x^{34} + x^{33} + x^{31} + x^{30} + x^{28} + x^{25} + x^{24} + x^{22} + x^{20} + x^{19} + x^{14} + x^8 + x^5 + 1$, обеспечивающий кратность исправляемой ошибки $s=7$.

1.8. По степени НОП $g_s(x)$ оцениваем число $m_s = 36$ проверочных разрядов формируемого виртуального ПЗК с целью вычисления полного числа $n_s = 31$ разрядов ПЗК (52,16).

1.9.,1.10. Переходим от канонического интервального представления п.1.9 такого системного параметра, как интервал дискретности, к трехкомпонентному представлению

$$[\Delta t] = 52 + [-21, 21] = \Delta t_0 + \left[\underline{\Delta(\Delta t)}, \overline{\Delta(\Delta t)} \right].$$

1.11. Передаем медианное значение интервала дискретности $\Delta t_0 = 52$, выраженное в числе битов кода, для разработки цифрового устройства формирования сигнала дистанционного управления при медианном значении интервала дискретности.

1.12. Формируем оценку относительной интервальности такого системного параметра, как интервал дискретности: $\delta, \Delta t = 21/52 = 0,404(40,4\%)$.

Для Варианта 3.

1.1. Выбираем интерфейс типа USB 2.0.

1.2. Устанавливаем, что используемая в этом интерфейсе технология помехозащиты CRC-16 осуществляется с НОП $g(x) = x^{16} + x^{15} + x^2 + 1$.

1.3. Оцениваем по числу ненулевых элементов НОП $g(x)$ минимальное кодовое расстояние, которое равно $d=4$.

1.4. Оцениваем число проверочных разрядов помехозащищенного кода по степени НОП $g(x)$, которое принимает значение $m_r = 16$, и вычисляем при числе информационных разрядов $k_c = 16$ полное число разрядов $n_r = k_c + m_r = 32$, т.е. используемый ПЗК принимает вид (32,16).

1.5. По значению минимального кодового расстояния оцениваем кратность r обнаруживаемых ошибок, которое оказывается равным $r=d-1 = 3$.

1.6. Ставим задачу наделить ПЗК свойством исправлять ошибки кратности $s=r=3$.

1.7. С помощью БЧХ-технологии формируем НОП $g_s(x) = x^{18} + x^{17} + x^{16} + x^{15} + x^9 + x^7 + x^6 + x^3 + x^2 + x + 1$, обеспечивающий $s=3$ кратность исправляемой ошибки.

1.8. По степени НОП $g_s(x)$ оцениваем число $m_s = 18$ проверочных разрядов формируемого виртуального ПЗК с целью вычисления полного числа $n_s = 34$ разрядов ПЗК (34,16).

1.9.,1.10. Переходим от канонического интервального представления п.1.9 такого системного параметра, как интервал дискретности, к трехкомпонентному представлению

$$[\Delta t] = 34 + [-2, 2] = \Delta t_0 + \left[\underline{\Delta(\Delta t)}, \overline{\Delta(\Delta t)} \right].$$

1.11. Передаем медианное значение интервала дискретности $\Delta t_0 = 34$, выраженное в числе битов кода, для разработки цифрового устройства формирования сигнала дистанционного управления при медианном значении интервала дискретности.

1.12. Формируем оценку относительной интервальности такого системного параметра, как интервал дискретности: $\delta, \Delta t = 2/34 = 0,059(5,9\%)$.

На примере трех произвольно выбранных интерфейсов, использующих технологию CRC защиты передаваемой информации в режиме обнаружения ошибок, установлено наличие интервальности такого системного параметра, а как интервал дискретности. Для корректного использования указанных интерфейсов в составе систем цифрового дистанционного управления непрерывными объектами получена оценка относительной интервальности такого системного параметра, как интервал дискретности, принимающая

значения в диапазоне от 5,9% до 40,4%. Полученные значения оценки относительной интервальности такого системного параметра, как интервал дискретности, должны учитываться при разработке устройства цифрового дистанционного управления непрерывным техническим объектом.

Заключение

В работе предложено аналитическое решение задачи оценки влияния повторений передач кодовых посылок на интервальность такого системного параметра, как интервал дискретности. Интервальность этого важного системного параметра в задаче цифрового дистанционного управления непрерывным объектом, порождаемая канальной средой, используемой в режиме обнаружения ошибок, имеет важное значение. На основании рассмотренных примеров величина оценки относительной интервальности интервала дискретности оказалась различной, но она должна учитываться при разработке систем цифрового дистанционного управления непрерывными техническими объектами.

Литература

1. Андриевский Б.Р., Матвеев А.С., Фрадков А.Л. Управление и оценивание при информационных ограничениях: к единой теории управления, вычисления и связи // Автоматика и телемеханика. 2010. № 4. С. 34–99.
2. Лихолетова Е.С., Нуйя О.С., Пешчеров Р.О., Ушаков А.В. Пропускная способность канала связи как гарантия качества цифрового дистанционного управления непрерывным техническим объектом // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58. № 9. С. 751–758. doi: 10.17586/0021-3454-2015-58-9-751-758
3. Liholetova E.S., Nuiya O.S., Peshcherov R.O., Ushakov A.V. Factors of the channel medium, problem of digital remote control of continuous technological resources // Proc. 3rd Int. Conf. on Circuits, Systems, Communications, Computers and Applications. Florence, 2014. P. 68–72.
4. Koopman P., Chakravarty T. Cyclic Redundancy Code (CRC) polynomial selection for embedded networks // Proc. Int. Conf. on Dependable Systems and Networks. Florence, Italy, 2004. P.145–154
5. Zadeh L.A., Desoer C.A. Linear System Theory: the State Space Approach. 4th ed. NY: Dover Publ., 2008. 656 p.
6. Shannon C.E. A mathematical theory of communication // Bell System Technical Journal. 1948. V. 27. P. 379–423. doi: 10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x
7. Codes, Systems and Graphical Models. Eds. J. Rosenthal, B. Marcus. NY, Springer, 2001. 515 p.
8. Ushakov A.V., Liholetova E.S. Formation of correction signals of systematic codes distortion based on quasisyndromes in the algorithmic recurrent decode environment in the rate of channel time: the case of multiple errors // Journal of Automation and Information Sciences. 2014. V. 46. N 6. P. 20–36. doi: 10.1615/JAutomatInfScien.v46.i6.30
9. Ушаков А.В., Быстров П.С., Нуйя (Осипцева) О.С. Цифровое дистанционное управление: сетевые технологии и алгоритмы. Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing, 2013. 365 с.
10. Akunov T.A., Slita O.V., Sudarchikov S.A., Ushakov A.V. Median control of continuous dynamic plants with interval parameters // Journal of Computer and Systems Sciences International. 2013. V. 52. N 4. P. 535–541. doi: 10.1134/S1064230713040011
11. Быстров С.В., Слита О.В., Сударчиков С.А., Ушаков А.В. Обеспечение робастности пьезопривода с использованием метода управляемой относительной интервальности // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59. № 7. С. 534–541. doi: 10.17586/0021-3454-2016-59-7-534-541
12. Akunov T.A., Aleksandrova S.A., Slita O.V., Sudarchikov S.A., Ushakov A.V. Problem of qualitative investigation of the Kharitonov robust stability of continuous systems // Journal of Automation and Information Sciences. 2016. V. 48. N 8. P. 46–55. doi: 10.1615/JAutomatInfScien.v48.i8.50
13. Шарый С.П. Конечномерный интервальный анализ. М.: Изд-во XYZ, 2007. 700 с.
14. Нуйя О.С., Пешчеров Р.О., Ушаков А.В. Фактор аппаратной среды передачи сигнала управления объекту в задаче синтеза дискретных систем // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Т.

References

1. Andrievsky B.R., Matveev A.S., Fradkov A.L. Control and estimation under information constraints: toward a unified theory of control, computation and communications. *Automation and Remote Control*, 2010, vol. 71, no. 4, pp. 572–633. doi: 10.1134/S000511791004003X
2. Liholetova E.S., Nuiya O.S., Peshcherov R.O., Ushakov A.V. Capacity of communication channel as a guarantee of quality of digital remote control over continuous technical plant. *Journal of Instrument Engineering*, 2015, vol. 58, no. 9, pp. 751–758. doi: 10.17586/0021-3454-2015-58-9-751-758
3. Liholetova E.S., Nuiya O.S., Peshcherov R.O., Ushakov A.V. Factors of the channel medium, problem of digital remote control of continuous technological resources. *Proc. 3rd Int. Conf. on Circuits, Systems, Communications, Computers and Applications*. Florence, 2014, pp. 68–72.
4. Koopman P., Chakravarty T. Cyclic Redundancy Code (CRC) polynomial selection for embedded networks. *Proc. Int. Conf. on Dependable Systems and Networks*. Florence, Italy, 2004, pp.145–154.
5. Zadeh L.A., Desoer C.A. *Linear System Theory: the State Space Approach*. 4th ed. NY, Dover Publ., 2008, 656 p.
6. Shannon C.E. A mathematical theory of communication. *Bell System Technical Journal*, 1948, vol. 27, pp. 379–423. doi: 10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x
7. *Codes, Systems and Graphical Models*. Eds. J. Rosenthal, B. Marcus. NY, Springer, 2001, 515 p.
8. Ushakov A.V., Liholetova E.S. Formation of correction signals of systematic codes distortion based on quasisyndromes in the algorithmic recurrent decode environment in the rate of channel time: the case of multiple errors. *Journal of Automation and Information Sciences*, 2014, vol. 46, no. 6, pp. 20–36. doi: 10.1615/JAutomatInfScien.v46.i6.30
9. Ushakov A.V., Bystrov P.S., Nuiya (Osipseva) O.S. *Digital Remote Control: Network Technologies and Algorithms*. Saarbrücken, LAP Lambert Academic Publishing, 2013, 365 p. (In Russian)
10. Akunov T.A., Slita O.V., Sudarchikov S.A., Ushakov A.V. Median control of continuous dynamic plants with interval parameters. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2013, vol. 52, no. 4, pp. 535–541. doi: 10.1134/S1064230713040011
11. *Bystrov S. V., Slita O. V., Sudarchikov S. A., Ushakov A. V.* Ensuring piezoelectric drive robustness using the method of controlled relative interval frequency. *Journal of Instrument Engineering*, 2016, vol. 59, no. 7, pp. 534–541. (In Russian). doi: 10.17586/0021-3454-2016-59-7-534-541
12. Akunov T.A., Aleksandrova S.A., Slita O.V., Sudarchikov S.A., Ushakov A.V. Problem of qualitative investigation of the Kharitonov robust stability of continuous systems. *Journal of Automation and Information Sciences*, 2016, vol. 48, no. 8, pp. 46–55. doi: 10.1615/JAutomatInfScien.v48.i8.50
13. Sharyi S.P. *The Finite Interval Analysis*. Moscow, XYZ Publ., 2007, 700 p. (In Russian)
14. Nuyya O.S., Peshcherov R.O., Ushakov A.V. Hardware environment factor for control signal transfer to a plant in the synthesis problem of discrete systems. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*,

15. № 4. С. 685–694. doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-4-685-694
15. Nair G.N., Fagnani F., Zampieri S., Evans R.J. Feedback control under data rate constraints: an overview // *Proc. IEEE*. 2007. V. 95. N 1. P. 108–137. doi: 10.1109/JPROC.2006.887294
16. Abdallah C.T., Tanner H.G. Complex networked control systems: introduction to the special section // *IEEE Control Systems Magazine*. 2007. V. 27. N 4. P. 30–32. doi: 10.1109/MCS.2007.384128
- 2015, vol. 15, no. 4, pp. 685–694. (In Russian) doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-4-685-694
15. Nair G.N., Fagnani F., Zampieri S., Evans R.J. Feedback control under data rate constraints: an overview. *Proc. IEEE*, 2007, vol. 95, no. 1, pp. 108–137. doi: 10.1109/JPROC.2006.887294
16. Abdallah C.T., Tanner H.G. Complex networked control systems: introduction to the special section. *IEEE Control Systems Magazine*, 2007, vol. 27, no. 4, pp. 30–32. doi: 10.1109/MCS.2007.384128

Авторы

Нуйя Ольга Святославовна – кандидат технических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, olga.nuyya@gmail.com

Пещеров Руслан Олегович – аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, rpeshcherov@mail.ru

Ушаков Анатолий Владимирович – доктор технических наук, профессор, профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Ushakov_AVG@yandex.ru

Authors

Olga S. Nuyya – PhD, Associate professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, olga.nuyya@gmail.com

Ruslan O. Peshcherov – postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, rpeshcherov@mail.ru

Anatoliy V. Ushakov – D.Sc., Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Ushakov_AVG@yandex.ru