

Н. А. Дударенко, О. С. Нуйя-Осипцева, А. В. Ушаков, М. И. Филиппов

## УПРАВЛЕНИЕ ОДНОКАНАЛЬНЫМИ ОБЪЕКТАМИ С ПОМОЩЬЮ СКАЛЯРНОГО ДВОИЧНОГО КАНАЛА СВЯЗИ

Рассмотрены способы формирования модельных представлений в задачах построения цифрового дистанционного управления техническими объектами типа „многомерный вход—многомерный выход“. Представлены методики и перспективные направления решения указанных проблем.

*Ключевые слова:* цифровое дистанционное управление, канал связи, размерность системы.

**Введение. Постановка задачи.** В задачах дистанционного управления используются современные сетевые технологии. На пути проектировщиков таких систем встает ряд довольно сложных проблем.

В настоящей статье рассматриваются проблемы цифрового дистанционного управления линейными непрерывными объектами, связанными с регулятором цифровой сетью произвольной структуры. Предполагается использование сетевой технологии Industrial Ethernet или близкой к ней по характеристикам. Представленные в статье варианты построения цифрового дистанционного управления (ЦДУ) позволят создавать дискретные модели процессов, протекающих в системах автоматического управления дистанционно рассредоточенными объектами типа „многомерный вход—многомерный выход“ (МВМВ).

Будем рассматривать системы управления множеством дистанционно рассредоточенных объектов, связанных с регулятором посредством цифрового дистанционного последовательного (скалярного) канала связи типа „дуплекс“. Начнем рассмотрение с объектов управления типа „одномерный вход—одномерный выход“ (ОВОВ), затем, модифицировав полученные результаты, перенесем их на объекты МВМВ-типа. Определим проблемы, возникающие при синтезе ЦДУ и модельных представлений. Структура рассматриваемой системы представлена на рис. 1 (здесь ОУ — объект управления, Н — наблюдатель, Р — регулятор, ПК — преобразователь кодов, ОКС — обратный канал связи, ПКС — прямой канал связи).

**ЦДУ в системе „одномерный вход—одномерный выход“.** При цифровом дистанционном управлении могут возникать следующие проблемы.

1. Необходимость использовать наблюдатель вектора состояния объекта. Даже если состояние объекта управления полностью измеримо, скалярное описание дискретного канала связи (ДКС) позволяет использовать наблюдатель. Еще одной причиной использования подобной структуры системы управления является упрощение конструкции, так как в ином случае для каждого состояния объекта управления потребовался бы отдельный канал связи.

2. Увеличение размерности дискретной модели среды ЦДУ в связи с необходимостью преобразования двоичных кодов типа „параллельный—последовательный“, и наоборот (рис. 2).

3. Необходимость использования помехозащищенных кодов (ПЗК) в режиме исправления ошибок из-за наличия помех в прямом и обратном каналах связи системы управления.

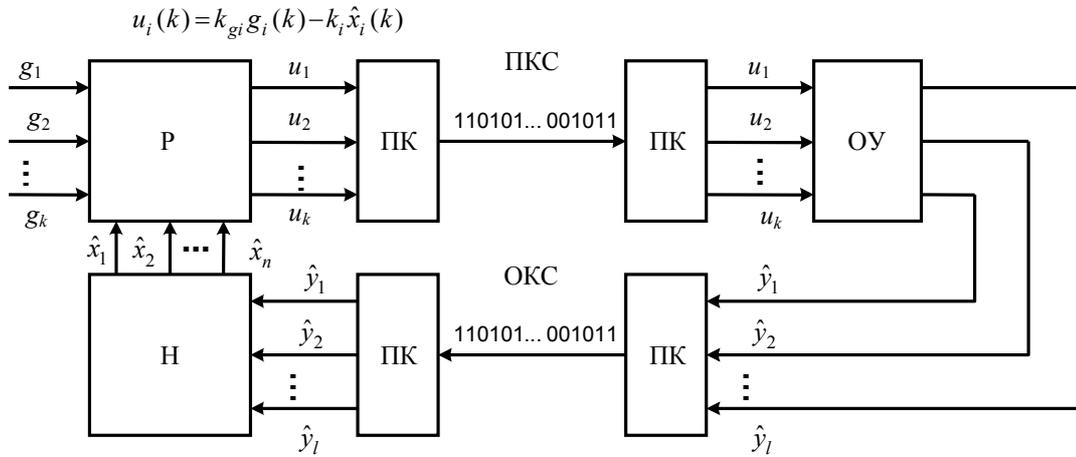


Рис. 1

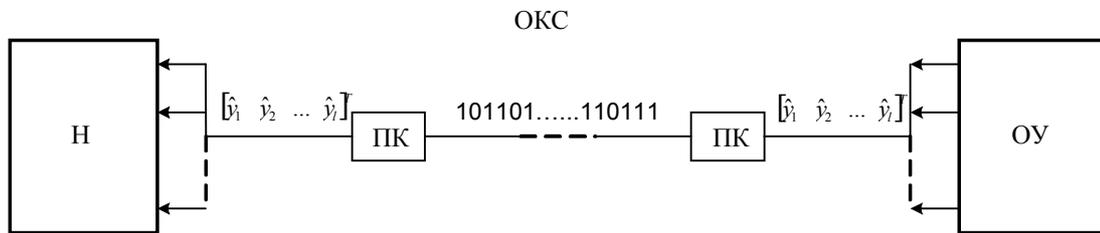


Рис. 2

Системы с подобной структурой и их модельные представления были рассмотрены в статье [1]. Преобразование аналоговых сигналов в цифровые и обратно, кодирование этих сигналов с использованием ПЗК требует времени. Для учета временных затрат вводится агрегированный интервал дискретности

$$\Delta t_a = 2(n_p + m)\Delta t,$$

где  $\Delta t = 1/f$  — длительность бита кода,  $n_p$  и  $m$  — число информационных и проверочных разрядов соответственно.

Размерность объекта управления в целом возрастает, так как требуется построить модели прямого и обратного каналов связи, после чего получить общее модельное представление „канальная среда—объект управления“ размерностью  $n+2$ , где  $n$  — размерность исходного непрерывного линейного объекта.

Таким образом, система становится совокупностью прямого канала связи, дискретного представления объекта управления и обратного канала связи:

$$\left. \begin{aligned} x_{\text{ПКС}}(k+1) &= u_{\text{ПКС}}(k), \\ y_{\text{ПКС}}(k) &= x_{\text{ПКС}}(k), \end{aligned} \right\} \left. \begin{aligned} x_{\text{ОКС}}(k+1) &= u_{\text{ОКС}}(k), \\ y_{\text{ОКС}}(k) &= x_{\text{ОКС}}(k), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} x(k+1) &= \bar{A}x(k) + \bar{B}u_{\text{ОУ}}(k), \\ y(k) &= \bar{C}x(k), \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где матрицы  $\bar{A}$ ,  $\bar{B}$ ,  $\bar{C}$  рассчитываются в соответствии со следующими соотношениями:

$$\bar{A} = e^{A\Delta t_a}, \quad \bar{B} = A^{-1}(\bar{A} - I)B, \quad \bar{C} = C, \quad (3)$$

$A$ ,  $B$ ,  $C$  — матрицы исходной непрерывной модели в форме „вход—состояние—выход“. Отметим, что передаточные функции для ПКС и ОКС представляют собой простейшую задержку  $z^{-1}$  на интервал дискретности, равный  $\Delta t_a$ .

Полученная таким образом агрегированная дискретная система управления будет иметь следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} x_a(k+1) &= A_a x_a(k) + B_a u_{\text{ПКС}}(k), \\ y(k) &= C_a x_a(k), \\ \hat{y}(k) &= \hat{C}_a x(k), \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

для которой вектор состояния  $x_a = [x_{\text{ОКС}} \quad x_{\text{ДОУ}} \quad x_{\text{ПКС}}]^T$  размерности  $n_a = n + 2$ . Матрицы  $A_a, B_a, C_a, \hat{C}_a$  формируются в следующем виде:

$$C_a = [0 \quad \dots \quad \bar{C} \quad \dots \quad 0], \quad \hat{C}_a = [1 \quad \dots \quad 0 \quad 0], \quad B_a = [0 \quad 0 \quad \dots \quad 1]^T, \quad (5)$$

$$A_a = \begin{bmatrix} 0 & \bar{C} & 0 \\ 0 & \bar{A} & \bar{B} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

На основе данной модели формируется модальное управление в форме матрицы линейных стационарных обратных связей.

Задача учета фактора помех в каналах связи решается стандартными средствами теории помехозащитного кодирования из условия задания допустимой вероятности искажения бита посылки и кратности исправляемой ошибки. Расширяя код посылки за счет введения проверочных разрядов, можно увеличить агрегированный интервал дискретности  $\Delta t_a$  полученной модели.

**ЦДУ в системе „многомерный вход—многомерный выход“.** Следует отметить, что проблемы, освещенные ранее, актуальны и для систем управления класса МВМВ-типа. Однако возникают и некоторые другие проблемы, связанные с особенностями данных систем.

Для начала рассмотрим возможность организации передачи вектора управляющих воздействий с помощью последовательного (скалярного) канала связи. По определению, объекты МВМВ-типа имеют несколько точек приложения управляющих воздействий, следовательно, передавать необходимо не скалярное управление  $u$ , как это было в предыдущем случае, а вектор управления  $U = [u_1 \quad \dots \quad u_r]$ . Простейший способ организации передачи вектора управления по последовательному каналу связи заключается в разделении сеанса (времени) доступа к линии связи между его элементами. Данная структура посылки без служебной информации, присущей конкретному протоколу, представлена на рис. 3.

Таким же образом следует организовать обратный канал связи к наблюдателю.

Если одной посылки не хватает для передачи всего вектора управления или если требуется доставить управляющее воздействие различным адресатам (при маршрутизации посылки), то следует передавать его за несколько сеансов, что приводит к увеличению времени, за которое объект отреагирует на сигнал.

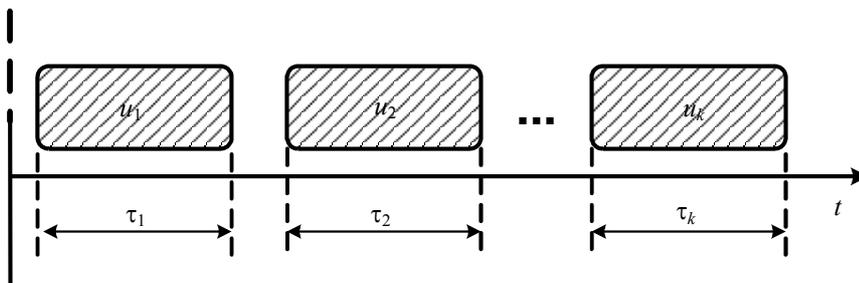


Рис. 3

Рассмотрим вопросы модельного представления системы управления с ОУ МВМВ-типа. Как и при представлении системы „одномерный вход—одномерный выход“, будем

агрегировать канал связи и дискретное описание ОУ. Однако в данном случае имеет место более сложная структура цифровой сети и самого ОУ. Если бы речь шла о соединении регулятора и ОУ типа „точка в точку“, можно было бы представлять систему так же, как это делается для случая ОВОВ. Однако в многомерных распределенных системах управления имеет место сложная структура цифровой сети, требующая маршрутизации посылки для доставки управляющих воздействий нужному адресату. Более того, как отмечалось ранее, вполне вероятным кажется вариант, когда весь управляющий вектор не поместится в одну „посылку“. Таким образом, очевидно, что предыдущее модельное представление неадекватно.

Для представления каждого канала управления многомерной распределенной системы будем использовать модель, учитывающую запаздывание ЭВМ [2]. В данной модели управляющее воздействие остается в памяти канала на один такт:

$$u_i(t) = \begin{cases} u_i(k-1), & kT \leq t < kT + \tau, \\ u_i(k), & kT + \tau \leq t < (k+1)T, \end{cases} \quad (7)$$

где  $i=1, \dots, r$ ,  $u_i(k)$  — значение  $i$ -го управляющего воздействия, принятого в момент времени  $t=kT$ ,  $\tau$  — запаздывание, с которым управляющее воздействие поступает в канал управления,  $T$  — интервал дискретности. Будем считать  $\tau=Ti$  ( $i=1, \dots, r$ ), что соответствует запоминанию управляющего воздействия на один такт. Интервал дискретности  $T$  задается как медианная составляющая интервала  $[T_{\min}; T_{\max}]$  оценок задержек на передачу и обработку информации в прямом и обратном каналах связи.

Задавая таким образом управляющее воздействие, запишем основное уравнение для одного канала управления многомерной системы:

$$x(kT+T) = e^{AT} x(kT) + \int_{kT}^{kT+\tau} e^{A(kT+T-\theta)} Bu(\theta) d\theta, \quad (8)$$

$$x(kT) = x(k), \quad e^{AT} = \bar{A}, \quad (9)$$

$$x(k+1) = \bar{A}x(k) + \left( \int_{kT}^{T+\tau} e^{A(kT+T-\theta)} d\theta \right) Bu(k-1) + \left( \int_{kT+\tau}^{kT+T} e^{A(kT+T-\theta)} d\theta \right) Bu(k), \quad (10)$$

$$B(\tau) = \left( \int_{kT+\tau}^{kT+T} e^{A(kT+T-\theta)} d\theta \right) B = (\bar{A}e^{-A\tau} - I)A^{-1}B, \quad (11)$$

$$B_1(\tau) = \left( \int_{kT}^{kT+\tau} e^{A(kT+T-\theta)} d\theta \right) B = \bar{A}(I - e^{-A\tau})A^{-1}B. \quad (12)$$

Таким образом, разностное уравнение для одного канала агрегированного ОУ примет следующий вид:

$$x(k+1) = Ax(k) + B_1(\tau)u(k-1) + B(\tau)u(k) \quad (13)$$

или

$$\begin{bmatrix} x(k+1) \\ x'(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{A} & B_1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ x'(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ I \end{bmatrix} u(k). \quad (14)$$

Уравнение (13) описывает канал управления с запаздыванием, структурная схема которого представлена на рис. 4.

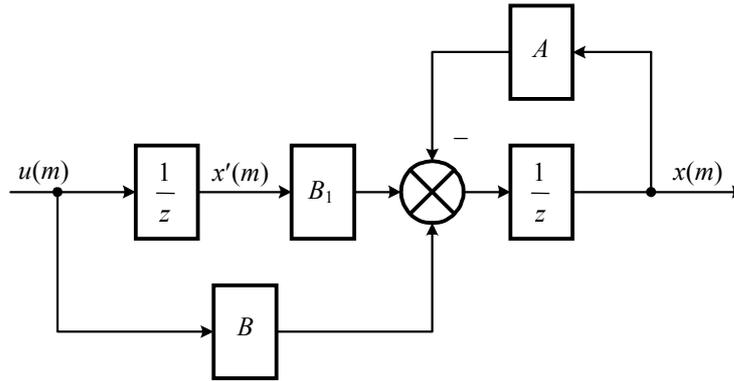


Рис. 4

Обратим внимание на увеличение размерности и проблему вычислительной устойчивости матричного уравнения подобия (Сильвестра). Из уравнений (11), (12) видно, что каждый агрегированный канал многомерного ОУ увеличивает размерность. Таким образом, после учета свойств канальной среды в ПКС и агрегирования с ОКС размерность модели многомерного ОУ станет больше на  $r$ , где  $r$  — размерность вектора управления исходного объекта. В связи с этим встает проблема решения уравнения подобия типа Сильвестра для формирования модального управления (математические пакеты типа MatLab дают адекватное решение уравнения Сильвестра для систем размерностью  $n < 6-7$ ).

Рассмотрим теперь проблему задержек в каналах связи и возможность ее минимизации. Для минимизации задержек в ПКС и ОКС требуется сократить размеры передаваемой информации. В работах [3, 4] предлагается ряд приемов по решению данной проблемы: передача не полных значений управляющих воздействий  $u_i$ , а только их приращений  $\Delta u_i$  (к примеру, по три бита); создание специальных конечномерных наблюдателей, определяющих попадание параметров в определенный интервал из конечного множества интервалов значений; спорадический характер передачи в ОКС и ПКС; динамическое перераспределение управляющих воздействий, т.е. передача тех воздействий, которые более важны на данный момент.

Еще одним возможным решением задачи сокращения трафика может быть перенос управляющей логики ближе к ОУ и передача не вектора управляющих воздействий, а программы управления для локального регулятора, скажем, в виде вектора собственных чисел эталонной системы. Размер данных при этом остается тем же, но частота сеансов связи значительно уменьшается.

**Заключение.** Минимизация задержек отмеченными способами в каналах связи позволят улучшить качество синтезированного управления. Анализ задачи построения ЦДУ дистанционно рассредоточенными многомерными объектами показал, что для решения выявленных проблем достаточно возможностей аппарата пространства состояний.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Боженкова Н. Ю., Осипцева О. С., Ушаков А. В. Фактор канальной среды в задаче синтеза цифрового дистанционного управления непрерывным объектом // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 3. С. 21—25.
2. Синтез дискретных регуляторов при помощи ЭВМ / В. В. Григорьев, В. Н. Дроздов, В. В. Лаврентьев, А. В. Ушаков. Л.: Машиностроение, 1983.
3. Goodwin G. C., Haimovich H., Quevedo D. E., Welsh J. S. A moving horizon approach to networked control system design // IEEE Transact. on Automatic Control. 2004.

4. *Quevedo D. E., Goodwin G. C., Welsh J. S.* Minimizing down-link traffic in networked control systems via optimal control techniques // Proc. of 42nd IEEE Conf. on Decision and Control. Maui, Hawaii, USA, 2003.

**Сведения об авторах**

- Наталья Александровна Дударенко** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра систем управления и информатики;  
E-mail: dudarenko@yandex.ru
- Ольга Святославовна Нуйя-Осипцева** — канд. техн. наук; фирма Siemens, Санкт-Петербург; ведущий специалист
- Анатолий Владимирович Ушаков** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра систем управления и информатики;  
E-mail: Ushakov-AVG@yandex.ru
- Максим Игоревич Филиппов** — студент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра систем управления и информатики

Рекомендована кафедрой  
систем управления и информатики

Поступила в редакцию  
01.07.09 г.