

УДК 621.398

Е. Н. Саладаев, кандидат технических наук, доцент, Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева

АДАПТИВНОЕ КОДИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ В МУЛЬТИАГЕНТНЫХ СИСТЕМАХ МОНИТОРИНГА МНОГОМЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМАХ ОБЪЕКТОВ

В распределенных системах возникает необходимость контроля процессов в удаленных объектах систем. При этом требуется обеспечить мониторинг распределенных многомерных нестационарных процессов, компоненты которых в различной степени влияют на качество функционирования рассматриваемых системы [1].

Рассмотрим многоканальную систему мониторинга процессов в распределенной системе из m объектов контроля и управления O_1, \dots, O_m [2], архитектура которой представлена на рисунке.

Сенсорами AS_1, \dots, AS_m на объектах системы воспринимаются контролируемые параметры состояния объектов $\bar{\lambda}_j(t)$ ($j = \overline{1, m}$) и формируются многомерные процессы $\bar{S}_j(t) = A_j \bar{\lambda}_j(t)$, отображающие значения контролируемых параметров состояния объектов $\bar{\lambda}_j(t)$ ($j = \overline{1, m}$), где A_j – оператор первичного преобразования параметров $\bar{\lambda}_j(t)$ состояния объекта O_j , $r\lambda(j)$ ($j = \overline{1, m}$)-размерности процессов $\bar{\lambda}_j(t)$ в контролируемых объектах.

Верность представления контролируемых процессов можно представить как расстояние в гильбер-

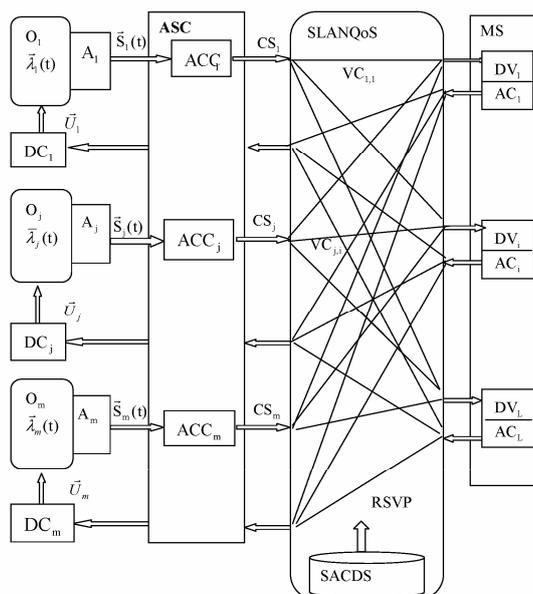
товом пространстве между образом $R\bar{\lambda}_i$ действительных процессов в объектах и представлением этих процессов агенту управления [3] $R^*\bar{\lambda}_i$ с учетом относительных коэффициентов $QS(i)$ качества представления i -й компоненты кодируемого процесса в j -м объекте.

При апертурном сжатии показатель верности представления i -й компоненты контролируемого векторного процесса $\bar{S}_j(t)$ определяется задаваемой апертурой сжатия $\varepsilon(j, i)$, т. е. $\rho(i) = \varepsilon(j, i)$. Вектор представления $\bar{C}_{ji}(k)$ компоненты процесса $\bar{S}_j(t)$ на временном интервале $t \in [t_k, t_k + \tau]$ представляется

$$\text{как } C_{ji}(k, \tau) = \arg \min \left\{ \rho \left[S_{ij}(t_k + \tau), \sum_{l=0}^{r_{ij}} c_l \varphi_l(\tau) \right] \right\}, \text{ где}$$

$\{\varphi_l(\tau)\}$ – система базисных функций представления процесса; r_{ij} – размерность вектора представления. На каждом k -м временном интервале кодируемый процесс $\bar{S}_j(t)$, $t \in [t_k, t_k + T_k]$, представляется векто-

$$\text{ром } \bar{C}_{ji}(k) = \arg \min \left\{ \rho \left[\bar{S}_j(t), \sum_{l=0}^{r_{ij}} c_l \varphi_l(\tau) \right] \right\}.$$



Архитектура системы контроля и управления распределенными объектами

Последовательности векторов представления процессов $\vec{C}_{ji}(k)$ формируют потоки данных CS_{ji} , которые через устанавливаемые виртуальные каналы VC_{ji} сети передачи данных $SLANQoS$ поступают на устройства представления контролируемых процессов DV_i ($i = \overline{1, L}$) агентов управления системы. Кодирование процессов с апертурным сжатием обеспечивает воспроизведение сжатых процессов с некоторой задаваемой при кодировании апертурой (погрешностью) ε . Увеличение ε повышает коэффициент сжатия (уменьшает поток данных с объекта) при увеличивающейся погрешности воспроизведения контролируемых процессов. В каждом устройстве DV_i ($i = \overline{1, L}$) формируются представления $\vec{R}_1 - \vec{R}_L$ задаваемых компонентов контролируемых многомерных процессов $\vec{S}_j(t)$ в объектах $\{O_i\}$, используемые для реализации управления системой распределенных объектов.

В рассматриваемой системе, представленной на рисунке, агентам управления AC_1, \dots, AC_L для реализации функций управления объектами необходима информация о процессах в объектах управления O_1, \dots, O_m в определенных аспектах, т. е. l -му агенту управления для реализации некоторой функции управления необходима информация о некотором множестве параметров объектов

$$\vec{\Lambda}_j^T(t) = \{\Lambda_j^1(t), \Lambda_j^2(t), \dots, \Lambda_j^{R(l)}(t)\},$$

где $Rn(l)$ – размерность вектора параметров $\vec{\Lambda}_j(t)$. Набор параметров объектов O_1, \dots, O_m , представляемых l -му агенту управления для реализации его функций управления, определяется списком отображаемых (представляемых) параметров LVP_j . Список параметров LVP_j ($l = \overline{1, L}$) представляет собой матрицу отображения параметров объектов системы l -му агенту управления $LVP_j = \|VP_j(j, i)\|$, где $VP_j(j, i) = 1$, если i -й параметр j -го объекта представляется l -му агенту управления, и $VP_j(j, i) = 0$ в противном случае. Интенсивность потока данных (*data streams*) $CS_{j,l}$ в виртуальном канале $VC_{j,l}$ определяется интенсивностью формирования существенных отсчетов процессов компонентов процессов $\vec{S}_j(t)$, представляемых l -му агенту управления.

$$CS_{j,l} = \sum_{i=1}^{r\lambda(j)} CD(j, i) VP_j(j, i),$$

где $CD(j, i)$ – интенсивности потоков данных i -й компоненты процесса $\vec{S}_j(t)$ после апертурного сжатия.

Функционал качества функционирования рассматриваемой системы определим как

$$J(\mathbf{E}) = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \frac{QR(l)}{Rn(l)} \sum_{j=1}^m \left\{ \sum_{i=1}^{r\lambda(j)} VP_j(j, i) \cdot Q\lambda(j, i) \cdot \varepsilon^2(j, i) \right\}, \quad (1)$$

где $Rn(l)$ – размерность образа процесса $\vec{\Lambda}_j(t)$, представляемого системой мониторинга l -му агенту управления; $r\lambda(j)$ – размерность процесса в j -м объекте; $VP_j(j, i)$ – элементы матрицы представления (отображения) параметров объектов агентам управления; $Q\lambda_j(j, i)$ – матрица относительных коэффициентов качества представления i -й компоненты кодируемого процесса j -го объекта в l -м образе процессов в системе $\vec{\Lambda}_j(t)$, представляемых l -му агенту (оператору) управления. Адаптивность системы мониторинга к изменяющимся динамическим характеристикам процессов в объектах заключается в целенаправленном изменении апертур сжатия \mathbf{E} с целью минимизации функционала (1) при имеющихся ограничениях на пропускную способность сети $SLAN$.

Процессы $\vec{S}_j(t)$ устройствами адаптивного преобразования и кодирования сигналов ACC_j ($j = \overline{1, m}$) преобразуются в потоки данных (*data streams*) $CS_{j,l}$, которые через устанавливаемые виртуальные каналы $VC_{j,l}$ сети передачи данных $SLANQoS$ системы с задаваемыми параметрами качества QoS поступают на устройства представления контролируемых процессов DV_i ($l = \overline{1, L}$) агентов управления [4] системы AC_1, \dots, AC_L . В каждом устройстве DV_i ($l = \overline{1, L}$) формируются представления $R\vec{\Lambda}_1 - R\vec{\Lambda}_L$ задаваемых компонентов контролируемых многомерных процессов $\vec{S}_j(t)$ в объектах $\{O_j\}$, используемые для реализации управления системой распределенных объектов.

Качество (верность) представления контролируемых процессов агенту управления можно представить как расстояние в некотором метрическом пространстве между образом $R\vec{\Lambda}_j$ действительных процессов в объектах и представлением этих процессов агенту управления $R^*\vec{\Lambda}_j$.

В рассматриваемой системе агентам управления AC_1, \dots, AC_L для реализации функций управления объектами $\varphi_1, \dots, \varphi_L$ необходима информация о процессах в объектах управления O_1, \dots, O_m в определенных аспектах, т. е. l -му агенту управления для реализации некоторой функции управления $\vec{C}_l = \varphi_l(\vec{\Lambda}_j)$ ($l = \overline{1, L}$) необходима информация о некотором множестве параметров объектов

$$\vec{\Lambda}_j^T(t) = \{\Lambda_j^1(t), \Lambda_j^2(t), \dots, \Lambda_j^{R(l)}(t)\},$$

где $Rn(l)$ – размерность вектора параметров $\vec{\Lambda}_j(t)$. Набор параметров объектов O_1, \dots, O_m , представляемых l -му агенту управления для реализации его

функций управления, определяется списком отображаемых (представляемых) параметров LVP_j . Список параметров LVP_l ($l = \overline{1, L}$) представляет собой матрицу отображения параметров объектов системы l -му агенту управления $LVP_l = \|VP_l(j, i)\|$, где $VP_l(j, i) = 1$, если i -й параметр j -го объекта представляется l -му агенту управления, и $VP_l(j, i) = 0$ в противном случае. Размерность матриц отображения параметров объектов системы агентам управления $LVP - (m \cdot r\lambda m)$, где m – количество объектов системы мониторинга; $r\lambda m = \max_j [r\lambda(j)]$ – максимальная размерность векторов параметров $\bar{\lambda}_j(t)$ объектов контроля ($j = \overline{1, m}$).

Введем векторы частот дискретизации многомерных процессов в объектах

$$\overline{FD}_j^T = \{Fd_j(1), Fd_j(2), \dots, Fd_j(r\lambda(j))\} \quad (j = \overline{1, m})$$

и векторы верхних границ спектров компонентов многомерных процессов в объектах

$$\overline{Fc}_j^T = \{Fc_j(1), Fc_j(2), \dots, Fc_j(r\lambda(j))\} \quad (j = \overline{1, m}).$$

Векторы \overline{Fc}_j определяются спектрами процессов в контролируемых объектах

$$\overline{W}_j^T(f) = \{W_j^1(f), W_j^2(f), \dots, W_j^{r\lambda(j)}(f)\},$$

где $W_j^i(f)$ – спектральная плотность i -й компоненты процесса в j -м объекте. Векторы \overline{FD}_j и \overline{Fc}_j связаны преобразованиями MKd_j , где MKd_j – диагональные матрицы коэффициентов передискретизации с диагональными элементами $Kd_j(i)$ ($i = \overline{1, r\lambda(j)}$, $Kd_j(i) \geq 1$).

$MKd_j = \|Kd_j(i, l)\|$, $Kd_j(i, l) = Kd_j(i)$, если $l = i$, и $Kd_j(i, l) = 0$, если $l \neq i$.

$$\overline{FD}_j = 2 \cdot MKd_j \cdot \overline{Fc}_j \quad (j = \overline{1, m}). \quad (2)$$

Следует отметить, что качество представления процессов повышается с увеличением значений коэффициентов Kd_j . Можно показать, что

$$\rho\lambda_j^0(i) = \frac{\rho\lambda_j^0(i)}{1 + (Kd_j(i) - 1) \cdot CIF_j(i)}, \quad (3)$$

где $\rho\lambda_j^0(i)$ – показатель верности (среднеквадратичная погрешность) представления i -й компоненты процесса в j -м объекте при $Kd_j(i) = 1$; $Kd_j(i)$ – коэффициент передискретизации i -й компоненты процесса в j -м объекте ($Kd_j(i) \geq 1$); $CIF_j(i)$ – коэффициент, определяемый видом и порядком интерполирующего фильтра, обеспечивающего восстановление

(представление агенту управления) i -й компоненты процесса в j -м объекте и видом спектра $W_j^i(f)$ i -й компоненты воспроизводимого процесса $\bar{\lambda}_i(t)$. Показатель верности (среднеквадратичная погрешность) представления i -й компоненты процесса в j -м объекте $\rho\lambda_j^0(i)$ при $Fd_j(i) = 2 \cdot Fc_j(i)$ определяется способом восстановления дискретизируемых процессов, т. е. восстанавливаемыми (интерполирующими) фильтрами устройств представления контролируемых процессов DV_l ($l = \overline{1, L}$) агентам управления системы AC_1, \dots, AC_L .

Функционал качества представления процессов в объектах системы мониторинга агентам управления можно представить в виде

$$QR\Delta = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L QR(l) \cdot PR\Delta^2(l), \quad (4)$$

где $PR\Delta(l)$ – показатель верности представления многомерных процессов в объектах системы в заданном аспекте l -му агенту управления; $QR(l)$ – приоритет l -го агента управления.

$$PR\Delta(l) = \frac{1}{Rn(l)} \sum_{j=1}^m \left\{ \sum_{i=1}^{r\lambda(j)} VP_l(j, i) \cdot Q\lambda_i(j, i) \cdot \rho\lambda^2(j, i) \right\}, \quad (5)$$

где $Rn(l)$ – размерность образа процесса $\bar{\lambda}_l(t)$, представляемого системой мониторинга l -му агенту управления; $r\lambda(j)$ – размерность процесса в j -м объекте; $VP_l(j, i)$ – матрица представления (отображения) параметров объектов агентам управления; $Q\lambda_i(j, i)$ – матрица относительных коэффициентов качества представления i -й компоненты кодируемого процесса j -го объекта в l -м образе процессов в системе $\bar{\lambda}_l(t)$, представляемых l -му агенту управления; $\rho\lambda_i(j, i)$ – показатель верности представления i -й компоненты кодируемого процесса j -го объекта в l -м образе процессов в системе. В матрице представления (отображения) параметров объектов l -му агенту управления $VP_l(j, i)$ элементы равны единицы, если i -я компонента кодируемого процесса j -го объекта представляется l -му агенту управления, и равны нулю, если i -я компонента кодируемого процесса j -го объекта не представляется l -му агенту управления.

При этом $\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{r\lambda(j)} VP_l(j, i) = Rn(l)$.

Показатель верности представления многомерных процессов в объектах системы в заданном аспекте l -му агенту управления представляется в виде

$$PR\Delta(l) = \frac{1}{Rn(l)} \sum_{j=1}^m \left\{ \sum_{i=1}^{r\lambda(j)} VQ\lambda_i(j, i) \cdot \rho\lambda^2(j, i) \right\}.$$

С учетом (3)

$$PR\Delta(l) = \frac{1}{Rn(l)} \sum_{j=1}^m \left\{ \sum_{i=1}^{r\lambda(j)} \frac{VQ\lambda_i(j, i) \cdot [\rho\lambda^0(j, i)]^2}{\{1 + [Kd_l(j, i) - 1] \cdot CIF_l(j, i)\}^2} \right\}. \quad (6)$$

Функционал качества представления процессов в объектах системы мониторинга агентам управления (4) преобразуем к виду

$$QR\Delta = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \frac{QR(l)}{Rn(l)} \sum_{j=1}^m \left\{ \sum_{i=1}^{r\lambda(j)} \frac{VQ\lambda_l(j,i) \cdot [\rho\lambda^0(j,i)]^2}{\{1 + [Kd_l(j,i) - 1] \cdot CIF_l(j,i)\}^2} \right\}. \quad (7)$$

В системе мониторинга процессов в распределенных объектах должно быть сформировано NVC виртуальных каналов для передачи синхронных потоков данных с m объектов контроля к L агентам управления. Количество виртуальных каналов $NVC = m \cdot L$. При этом скорость передачи данных в виртуальных каналах постоянная, а задержки в них $T_{jl} < T_{jl}^m$, где T_{jl} – задержка передачи данных с j -го объекта l -му агенту управления; T_{jl}^m – предельно допустимое значение задержки, определяемое алгоритмом управления объектом. Интенсивности потоков данных (*data streams*) системы между объектами контроля O_1, \dots, O_m и агентами управления AC_1, \dots, AC_L в сети передачи данных системы $SLAN$ определяются матрицей $MCS = \|CS_{j,l}\|$ ($j = \overline{1, m}, l = \overline{1, L}$) размерности $m \cdot L$.

Интенсивность потока данных (*data streams*) CS_{jl} в виртуальном канале VC_{jl} определяется как

$$CS_{jl} = \sum_{i=1}^{r\lambda(j)} VP_l(j,i) \cdot Fd_l(j,i) \cdot n(j,i), \quad (8)$$

где $VP_l(j,i)$ – элементы матриц отображения параметров объектов агентам управления; $Fd_l(j,i)$ – частота дискретизации кодирования i -го компонента процесса в j -м объекте; $n(j,i)$ – разрядность кодирования i -го компонента процесса в j -м объекте. Учитывая, что $Fd_l(j,i) = 2 \cdot Kd_l(j,i) \cdot Fc(j,i)$, выражение (8) преобразуется к виду

$$CS_{jl} = 2 \cdot \sum_{i=1}^{r\lambda(j)} VP_l(j,i) \cdot Kd_l(j,i) \cdot Fc(j,i) \cdot n(j,i). \quad (9)$$

Суммарная нагрузка сети $SCS = \sum_{j=1}^m \sum_{l=1}^L CS_{jl}$ должна быть не более полной производительности сети CSM , т. е.

$$SCS = \sum_{j=1}^m \sum_{l=1}^L CS_{jl} \leq CSM. \quad (10)$$

Оптимизация системы заключается в минимизации функционала (7) при ограничении (10), т. е.

$$QR\Delta = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \frac{QR(l)}{Rn(l)} \times \sum_{j=1}^m \left\{ \sum_{i=1}^{r\lambda(j)} \frac{VQ\lambda_l(j,i) \cdot [\rho\lambda^0(j,i)]^2}{\{1 + [Kd_l(j,i) - 1] \cdot CIF_l(j,i)\}^2} \right\} = \min_{\{Kd_l(j,i)\}} \quad (11)$$

при ограничении $\sum_{j=1}^m \sum_{l=1}^L CS_{jl} \leq CSM$.

Для обеспечения возможностей синхронизации потоков данных в системе будем считать, что $Fd_l(j,i) = Fd^0 \cdot 2^{Z_l(j,i)}$, где $Z_l(j,i)$ – целое положительное число; $Z_l(j,i)$ – уровень иерархии скорости кодирования i -го параметра процесса в j -м объекте при передаче его l -му агенту управления; Fd^0 – базовая (минимальная) частота кодирования процессов в системе.

$Fd^0 \geq 2 \cdot Fc^0$, где $Fc^0 = \min_{\{j,i\}} \{Fc(j,i)\}$ – ширина спектра наименее динамичного компонента процессов в объектах системы. Тогда $Kd_l(j,i) = KF(j,i) \cdot 2^{Z_l(j,i)}$, где $KF(j,i) = Fd^0 / 2 \cdot Fc(j,i)$; $Fc(j,i)$ – верхняя граница спектра i -го параметра процесса в j -м объекте. Учитывая ограничения на частоты дискретизации $Fd_l(j,i) = Fd^0 \cdot 2^{Z_l(j,i)} \geq 2 \cdot Fc(j,i)$, получаем, что $Z_l(j,i) \geq \log_2 \left[\frac{2 \cdot Fc(j,i)}{Fd^0} \right]$. Тогда функционал качества (7) преобразуется к виду

$$\frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \frac{QR(l)}{Rn(l)} \times \sum_{j=1}^m \left\{ \sum_{i=1}^{r\lambda(j)} \frac{VQ\lambda_l(j,i) \cdot [\rho\lambda^0(j,i)]^2}{\{1 + [KF(j,i) \cdot 2^{Z_l(j,i)} - 1] \cdot CIF_l(j,i)\}^2} \right\} = \min_{\{Z_l(j,i)\}} \quad (12)$$

при $\sum_{j=1}^m \sum_{l=1}^L CS_{jl} \leq CSM$

$$\text{и } Z_l(j,i) \geq \log_2 \left[\frac{2 \cdot Fc(j,i)}{Fd^0} \right],$$

где $CS_{jl} = 2 \cdot \sum_{i=1}^{r\lambda(j)} VP_l(j,i) \cdot Kd_l(j,i) \cdot Fc(j,i) \cdot n(j,i)$. (13)

Решение задачи поиска оптимальных параметров $Z_l(j,i)$ ($l = \overline{1, L}, j = \overline{1, m}, i = \overline{1, r\lambda(j)}$) системы мониторинга процессов в распределенной системе объектов заключается в поиске минимума (12) при ограничениях (13). Поиск минимума функционала (12) при ограничении (13) осуществляется с использованием штрафных функций методом градиентного поиска. Искомые значения матриц $Z_l(j,i)$ должны быть целыми числами. Решение рассматриваемой задачи производится методом целочисленного программирования [5]. При этом методом целочисленного программирования в окрестности экстремума $Z_l^*(j,i)$ определяется целочисленные матрицы $Z_l(j,i)$, наиболее близкие к $Z_l^*(j,i)$ и удовлетворяющие имеющемуся ограничению (13). Далее определяются искомые оптимальные параметры $Z_l^*(j,i)$ ($l = \overline{1, L}, j = \overline{1, m}$).

При этом компоненты многомерных процессов в объектах мониторинга с более высокими требованиями к качеству представления агентам управления кодируются с более высокой точностью, чем компоненты с менее жесткими требованиями к ка-

честву представления, при имеющихся ограничениях на пропускную способность каналов связи системы.

Библиографические ссылки

1. *Саладаев Е. Н.* Многопользовательский мониторинг процессов в распределенных объектах // Труды LVIX научной сессии РСНТО РЭС им. А. С. Попова, посвященной Дню радио. – Т. 1. – М. : Инсвязиздат, 2004. – С. 110–112.

Получено 11.12.2014

2. *Саладаев Е. Н.* Адаптивная система кодирования многомерных процессов // Системы управления и информационные технологии. – 2007. – № 2(28). – С. 62–67.

3. Intelligent Agents – Theories, Architectures, and Languages / Eds. M. Wooldridge, N. R. Jennings. – Springer-Verlag, 1995. – Vol. 890. – P. 289.

4. Intelligent Agents ; M. Wooldridge, J. P. Mueller, M. Tambe. – Springer-Verlag, 1996. – Vol. 1037. – 356 p.

5. *Раскин Л. Г.* Анализ сложных систем и элементы теории оптимального управления. – М. : Сов. радио, 1976. – 344 с.