

Оптимизация архитектурных решений реинжиниринга распределенной информационной управляющей системы

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»

Постановка задачи исследования

Управление распределенными объектами (например: территориально распределенная компания) требует постоянного совершенствования корпоративной системы управления [1], что осуществляется в виде реинжиниринга сетевой архитектуры информационной управляющей системы [2].

Рассмотрим постановку задачи оптимизации компонентной архитектуры модернизируемой распределенной ИУС (РИУС).

Известно множество компонент, используемых для модернизации РИУС (набор из n модулей). Задана структура РИУС в виде топологического графа. Считаем, что для каждого e -го типа модуля известны оценки по критериям производительности $C_e^{(1)}$, надежности $C_e^{(2)}$, стоимости $C_e^{(3)}$ и т.д., $e=1, \mu$. Для соединения e -го и S -го модулей предварительно оценена телекоммуникационная связь: $C_{eS}^{(1)}, C_{eS}^{(2)}, C_{eS}^{(3)}, \dots$. Необходимо найти такое распределение модулей по вершинам графа (узлам) модернизируемой структуры РИУС, при котором отдельно рассматриваемый критерий реинжиниринга принял оптимальное значение. Затем решим задачу многокритериальной оптимизации для всего набора критериев реинжиниринга архитектуры РИУС.

Решение задачи исследования

Представим граф топологии структуры РИУС в виде матрицы смежности $\|K_{ij}\|$, $i, j=1, r$, где r – число вершин графа. Учитывая свойство симметричности элементов матрицы относительно диагонали, будем принимать во внимание только те элементы, которые удовлетворяют условию $i < j$.

Введем булевы переменные:

$$X_{ei} = \begin{cases} 1, & \text{если модуль } e\text{-го типа помещен} \\ & \text{в } i\text{-ю вершину графа (узел)} \\ & \text{структуры РИУС;} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Учитывая условия задачи, получим ограничения:

$$\sum_{e=1}^{\mu} X_{ei} = 1, \quad i = \overline{1, r}; \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^r X_{ei} \leq r_e, \quad e = \overline{1, \mu}; \quad (2)$$

где r_e – число модулей e -го типа, $\sum_{e=1}^{\mu} r_e = n$.

Введем вспомогательные переменные:

$$Y_{S_j} = \begin{cases} 1, \text{ если модуль } S\text{-го типа} \\ \text{помещен в } j\text{-ю вершину} \\ \text{графа структуры РИУС;} \\ 0, \text{ в противном случае.} \end{cases}, Z_{e_i S_j} = \begin{cases} 1, \text{ если модуль } e\text{-го типа} \\ \text{помещен в } i\text{-ю вершину графа,} \\ \text{а модуль } S\text{-го типа - в } j\text{-ю;} \\ 0, \text{ в противном случае.} \end{cases}$$

Наложим на переменные $Y_{S_j}, Z_{e_i S_j}$ ограничения:

$$X_{e_i} - Y_{S_j} = 0, i, j = \overline{1, r}; S, e = \overline{1, \mu}; i \neq j, e \neq S; \quad (3)$$

$$r \cdot X_{e_i} - \sum_{j=1}^r \sum_{S=1}^{\mu} Z_{e_i S_j} = 0, i = \overline{1, r}; e = \overline{1, \mu}; \quad (4)$$

$$r \cdot Y_{S_j} - \sum_{i=1}^r \sum_{e=1}^{\mu} Z_{e_i S_j} = 0, j = \overline{1, r}; S = \overline{1, \mu}.$$

Условие (3) означает, что значения переменных X_{e_i} и Y_{S_j} полностью совпадают, а условия (4) показывают, что $Z_{e_i S_j}$ принимает значение «1» только тогда, когда $X_{e_i} = Y_{S_j} = 1$. Тогда оценка результатов реинжиниринга архитектуры РИУС по К-му критерию качества с учетом телекоммуникационных связей:

$$C^{(K)} = \sum_{i=1}^r \sum_{e=1}^{\mu} C_e^{(K)} X_{e_i} + \sum_{j=1}^r \sum_{i=1}^r \sum_{S=1}^{\mu} \sum_{e=1}^{\mu} C_{eS}^{(K)} K_{ij} Z_{e_i S_j}.$$

Необходимо минимизировать критерий $C^{(K)}$, который представим в компактном виде:

$$\sum_{i,e} C_e^{(K)} X_{e_i} + \sum_{i,j,e,S} C_{eS}^{(K)} K_{ij} Z_{e_i S_j}, \quad (5)$$

при ограничениях:

$$\begin{aligned} \sum_e X_{e_i} &= 1, i = \overline{1, r}; \\ \sum_i X_{e_i} &\leq r_e, e = \overline{1, \mu}; \\ X_{e_i} - X_{S_j} &= 0, i, j = \overline{1, r}; e, S = \overline{1, \mu}; i \neq j, e \neq S; \\ r \cdot X_{e_i} - \sum_{j,S} Z_{e_i S_j} &= 0; i = \overline{1, r}; S = \overline{1, \mu}; \\ r \cdot Y_{S_j} - \sum_{j,e} Z_{e_i S_j} &= 0; j = \overline{1, r}; S = \overline{1, \mu}; \\ \sum_{i,e} C_e^{(K')} X_{e_i} + \sum_{i,j,e,S} C_{eS}^{(K')} K_{ij} Z_{e_i S_j} &\leq C_0^{(K')}, K' = \overline{1, M-1}. \end{aligned} \quad (6)$$

где (6) – ограничения на значения остальных $M-1$ критериев.

На первом этапе проведем независимые оптимизации по отдельным критериям реинжиниринга РИУС, т.е. решим задачу (5), (1)-(4), (6) по всем $K = \overline{1, M}$. Затем преобразуем каждый критерий (относительное нормирование) для использования в многокритериальной оптимизации:

$$\bar{e}^{(K)} = \alpha_K \left[\frac{C^{(K)} - C^{(K)*}}{C_0^{(K)} - C^{(K)*}} \right] = \frac{\alpha_K \left[\sum_{i,e} C^{(K)} e x_{e_i} + \sum_{i,j,e,s} C^{(K)} e s K_{ij} Z_{e_i s_j} - C^{(K)*} \right]}{C_0^{(K)} - C^{(K)*}} =$$

$$= \sum_{i,e} \bar{e}^{(K)} e x_{e_i} + \sum_{i,j,e,s} \bar{e}^{(K)} e s K_{ij} Z_{e_i s_j} - Q^{(K)},$$

где

$$\bar{e}_e^{(K)} = \frac{\alpha_K C^{(K)} e}{C_0^{(K)} - C^{(K)*}}, \bar{e}_{es}^{(K)} = \frac{\alpha_K C^{(K)} e s}{C_0^{(K)} - C^{(K)*}}, Q^{(K)} = \frac{C^{(K)*}}{C_0^{(K)} - C^{(K)*}}, K = \overline{1, M},$$

α_K – весовые коэффициенты, отражающий значимость K -го критерия реинжиниринга РИУС, $\alpha_K \geq 0$, $\sum_{K=1}^M \alpha_K = 1$; $C^{(K)*}$ – оптимальное значение K -го критерия найденного на первом этапе.

Тогда для глобального критерия оценки реинжиниринга РИУС, полученного путем суммирования взвешенных отдельных критериев, необходимо минимизировать:

$$\sum_K \left(\sum_{i,e} \bar{e}^{(K)} e x_{e_i} + \sum_{i,j,e,s} \bar{e}^{(K)} e s K_{ij} Z_{e_i s_j} - Q^{(K)} \right), \quad (7)$$

при ограничениях (1)-(4), (6).

Усложним задачу (7), (1)-(4), (6). Пусть в каждом узле топологического графа структуры РИУС реализуется некоторая новая (модернизируемая) функциональная задача (ФЗ).

Предположим, что для каждой новой ФЗ имеется m_i версий, $l = \overline{1, m_i}$. Введем булевы переменные:

$$X_{l e_i} = \begin{cases} 1, & \text{если выбрана } l\text{-я версия } i\text{-й ФЗ} \\ & \text{и модуль } e\text{-го типа помещен} \\ & \text{в } i\text{-ю вершину графа РИУС;} \\ 0, & \text{в противном случае;} \end{cases}$$

$$Y_{p s_j} = \begin{cases} 1, & \text{если выбрана } p\text{-я версия } j\text{-й ФЗ} \\ & \text{и модуль } S\text{-го типа помещен} \\ & \text{в } j\text{-ю вершину графа РИУС;} \\ 0, & \text{в противном случае;} \end{cases}$$

$$Z_{l e_i p s_j} = \begin{cases} 1, & \text{если выбраны } l\text{-я версия } i\text{-й ФЗ} \\ & \text{и } p\text{-я версия } j\text{-й ФЗ, модуль } e\text{-го} \\ & \text{типа помещен в } i\text{-ю вершину графа} \\ & \text{РИУС, а модуль } S\text{-го типа} \\ & \text{в } j\text{-ю вершину;} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Наложим на переменные X_{le_i} , Y_{ps_j} , $Z_{le_i ps_j}$ ограничения, имеющие такой же смысл, что и ограничения (1)-(4):

$$\sum_{e,l} X_{le_i} = 1, \quad i = \overline{1,r}; \quad (8)$$

$$\sum_{e,l} X_{le_i} \leq r_e, \quad e = \overline{1,\mu}; \quad (9)$$

$$X_{le_i} - Y_{ps_j} = 0; \quad i, j = \overline{1,r}; \quad e, s = \overline{1,\mu}; \quad l, p = \overline{1,m_i}; \quad (10)$$

$$i \neq j; \quad e \neq s; \quad l \neq p;$$

$$r \cdot X_{le_i} - \sum_{j,s,p} Z_{le_i ps_j} = 0, \quad i = \overline{1,r}; \quad l = \overline{1,\mu}; \quad l = \overline{1,m_i};$$

$$r \cdot Y_{ps_j} - \sum_{j,s,p} Z_{le_i ps_j} = 0, \quad j = \overline{1,r}; \quad s = \overline{1,\mu}; \quad p = \overline{1,m_i}. \quad (11)$$

Тогда для минимизации глобального критерия реинжиниринговые РИУС в виде суммы взвешенных локальных критериев, необходимо найти минимум:

$$\begin{aligned} & \sum_K (\sum_{i,e,l} \bar{e}^{(K')} le_i X_{le_i} + \sum_{i,j,e,s,l,p} \bar{e}^{(K')} le_i ps_j K_{ij} Z_{le_i ps_j} + \\ & + \sum_{i,e,l} \bar{e}^{(K'')} le_i X_{le_i} + \sum_{i,j,e,s,l,p} \bar{e}^{(K'')} es K_{ij} Z_{le_i ps_j} - Q^{(K')} - Q^{(K'')} \end{aligned} \quad (12)$$

при ограничениях (8)-(11) и

$$\sum_{i,e,l} \bar{e}^{(K')} le_i X_{le_i} + \sum_{i,j,e,s,l,p} \bar{e}^{(K')} le_i ps_j K_{ij} Z_{le_i ps_j} \leq C_0^{(K')}, \quad K' = \overline{1,a}; \quad (13)$$

$$\sum_{i,e,l} \bar{e}^{(K'')} le_i X_{le_i} + \sum_{i,j,e,s,l,p} \bar{e}^{(K'')} es K_{ij} Z_{le_i ps_j} \leq C_0^{(K'')}, \quad K'' = \overline{a+1,M}; \quad (14)$$

Усложним задачу оптимизации реинжиниринга архитектуры РИУС. Пусть имеется набор наименований (типов) модулей, участвующих в модернизации РИУС. В этом случае модули определенного наименования могут помещаться только в разрешенных вершинах топологического графа РИУС. Введем матрицу маски $\|q_{e_i}\|$, где

$$q_{e_i} = \begin{cases} 1, & \text{если разрешено помещать в } i\text{-ю} \\ & \text{вершину графа } e\text{-й тип} \\ & \text{модуля РИУС;} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

С учетом матрицы маски задача (5), (1)-(4), (6), будет выглядеть следующим образом, необходимо найти минимум:

$$\sum_{i,e} C_e^{(K)} q_{e_i} x_{e_i} + \sum_{i,j,e,s} C^{(K)} es K_{ij} Z_{e_i s_j}, \quad (15)$$

при ограничениях

$$\sum_e q_{e_i} x_{e_i} = 1, \quad i = \overline{1,r}; \quad (16)$$

$$\sum_i q_{e_i} x_{e_i} \leq r_e, \quad e = \overline{1, \mu}; \quad (17)$$

$$q_{e_i} x_{e_i} - y_{s_j} = 0, \quad i, j = \overline{1, r}; \quad e, s = \overline{1, \mu}; \quad i \neq j; \quad e \neq s; \quad (18)$$

$$r \cdot q_{e_i} x_{e_i} - \sum_{j, s} Z_{e_i s_j} = 0, \quad i = \overline{1, r}; \quad e = \overline{1, \mu}; \quad (19)$$

$$r \cdot y_{s_j} - \sum_{i, e} Z_{e_i s_j} = 0, \quad j = \overline{1, r}; \quad s = \overline{1, \mu}. \quad (20)$$

Рассмотрим многоуровневую детализацию архитектуры модернизируемой РИУС. Будем проводить оптимизацию реинжиниринга последовательно по каждому уровню, начиная с нижних уровней детализации. Тогда в качестве компонент рассматриваемого уровня реинжиниринга выступают подграфы структуры РИУС соседнего нижнего уровня. Построим матрицы смежностей для каждого подграфа $G_{\rho_\Omega}^\Omega$, где Ω – номер уровня детализации структуры РИУС $\Omega = \overline{1, Q}$, ρ_Ω – номер подграфа Ω -го уровня $\rho_\Omega = \overline{1, r_\Omega}$.

Объединим отдельные матрицы подграфов и построим общую матрицу смежностей с учетом всех ρ_Ω :

$$\| \bar{K}_{ij} \|, \quad i < j, \quad i, j = \overline{1, n^\Omega},$$

где n^Ω – число вершин графа $G^\Omega, G^\Omega = \bigcup_{\rho_\Omega} G_{\rho_\Omega}^\Omega$; $n^\Omega \leq r_{\Omega-1}$ – число вершин Ω -го уровня не больше, чем количество подграфов $(\Omega - 1)$ -го уровня.

Рассмотрим в качестве примера задачу (15)-(20). Необходимо минимизировать:

$$\sum_{i, e} C^{(K)} e q_{e_i} x_{e_i} + \sum_{i, j, e, s} C^{(K)} e s \bar{K}_{ij} Z_{e_i s_j}, \quad (21)$$

при ограничениях (16)-(20), где $i, j = \overline{1, n^\Omega}$, $e, s = \overline{1, \mu_{\Omega-1}}$, $\mu_{\Omega-1}$ – число типов модулей (подграфов $(\Omega - 1)$ -го уровня).

Список литературы

1. Петров Э.Г., Чайников С.И., Овезгельдиев А.О. Методология структурного системного анализа и проектирования крупномасштабных ИУС. – Харьков: «Рубикон». – 1997. – 140с.
2. Ткачук Н.В. Концепция интерпретированной среды реинжиниринга сложных информационно-управляющих систем // Проблемы управления и информатики. – 2003. – «1. – С. 74-83.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. зав. каф. А.Ю. Соколов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Харьков.