В.В. Меньших,
доктор физико-математических наук,
профессор

В.В. Горлов

АЛГОРИТМ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЕЙСТВИЙ ОРГАНОВ ВНУТРЕННИХ ДЕЛ ПРИ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ ОБСТОЯТЕЛЬСТВАХ КРИМИНАЛЬНОГО ХАРАКТЕРА

THE ALGORITHM FOR SIMULATION OF ACTIONS OF LAW-ENFORCEMENT BODIES UNDER EXTRAORDINARY CIRCUMSTANCES OF A CRIMINAL NATURE

Описаны матрично-логическая модель и построенный на её основе алгоритм имитации действий органов внутренних дел при чрезвычайных обстоятельствах криминального характера.

The article describes the matrix-logical model and created on its basis the algorithm for simulation of actions of the law-enforcement bodies under extraordinary circumstances of a criminal nature.

Введение. Деятельность ОВД при чрезвычайных обстоятельствах криминального характера резко отличается от повседневной деятельности. Для действий при чрезвычайных обстоятельствах ОВД вводят особый режим функционирования, создают специальную группировку сил и средств, применяют специальную систему управления силами и средствами, используют специальные приемы и методы работы. Порядок действий планируется заранее и уточняется в ходе выполнения задач в зависимости от складывающейся оперативной обстановки [1].

Как показывает практика, могут существовать несколько вариантов порядка действий ОВД при чрезвычайных обстоятельствах криминального характера, поэтому актуальной является задача выбора оптимального варианта. Решение задачи оптимизации, как правило, базируется на некоторой математической модели. В [2—5] показано, что эффективным математическим аппаратам для разработки таких моделей являются сети Петри. Однако возможности классических сетей Петри [6] ограничены, что делает необходимой модернизацию этих сетей с учётом особенностей решаемой задачи.

Данная статья посвящена разработке алгоритма имитационного моделирования действий ОВД при чрезвычайных обстоятельствах криминального характера, основанного на матрично-логической модели, построение и обоснование которой проведено с помощью аппарата сетей Петри. Этот алгоритм должен учитывать возможности языков программирования по реализации логических функций.

Особенности моделей, описывающих действия ОВД. Выполнение ОВД оперативно-служебных задач можно представить как процесс смены состояний в зависимости от событий, возникающих при чрезвычайных обстоятельствах криминального характера в дискретные моменты времени. Данный процесс описывается моделью, представляющей собой сеть Петри [2—5]. В общем случае сеть Петри представляет собой пятёрку $S=(P,T,I,O,\mu)$ с множествами позиций P, переходов T, функциями входов I, выходов O, маркировки позиций μ [5].

Применительно к рассматриваемой задаче позиции сети соответствуют либо одному из альтернативных состояний ОВД, либо одному из событий, влияющих на изменение состояний, т. е. $P = D \cup R$, где D — множество состояний ОВД, R — множество событий. Маркировка позиции, соответствующей состоянию, моделирует нахождение ОВД в этом состоянии, маркировка позиции, соответствующей событию, моделирует наступление данного события. Следовательно, каждую позицию достаточно маркировать не более чем одной фишкой, что позволяет использовать аппарат математической логики для описания маркировок сети [5].

Модель описывает процесс смены состояний ОВД в зависимости от наступления того или иного события. Это означает, что выполнение перехода зависит от условий, изображённых на рис. 1.

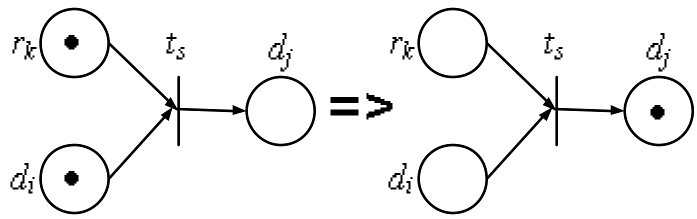

Рис. 1. Фрагмент сети Петри, моделирующий переход из состояния d_i в состояние d_j при появлении события r_k

Данная модель обладает рядом особенностей, вытекающих из особенностей предметной области.

1) Каждый переход имеет ровно два входа (один из позиции, соответствующей состоянию, другой — из позиции, соответствующей событию) и ровно один выход (в позицию, соответствующую состоянию), т. е. $|I(t_s)| = 2$ и $|O(t_j)| = 1$.

2) В сети отсутствуют кратные дуги (позиции характеризуют отдельные состояния или наличие либо отсутствие события, поэтому передвижение фишек более чем по одной дуге не имеет смысла.

3) В каждый момент времени маркирована одна и только одна позиция, соответствующая состоянию, т. к. ОВД всегда находятся только в одном из состояний.

4) Возникновение того или иного события влечёт изменения состояния. Но, поскольку можно перейти только в одно состояние, то следует исключить остальные возможности. Пусть $r_{k_1}, r_{k_2}, ..., r_{k_l}$, где $l \le n_2$ — возможные альтернативные события. Тогда из соответствующих им позиций маркирована может быть только одна.

Последние две особенности накладывают ограничения на маркировку сети.

Заметим, что из достаточности маркировки позиций не более чем одной фишкой, в частности, вытекает исключение необходимости использования кратных дуг, что позволяет использовать аппарат математической логики для описания изменения маркировок сети.

Матрично-логическая модель функционирования сети. Описанные выше особенности сети позволяют разработать модель её функционирования в виде действий над логическими матрицами. Для уменьшения громоздкости формул будем использовать одни и те же обозначения для позиций сети и функций их маркировки.

Маркировку позиций зададим вектор-строкой $\mu = (D \| R)$, где $D = (d_1, d_2, ..., d_{n_1})$,

$$d_i = \begin{cases} 1, \text{если позиция } d_i \text{ маркирована,} \\ 0, \text{если иначе.} \end{cases}$$

$$R = (r_1, r_2, ..., r_{n_2}),$$

$$r_k = \begin{cases} 1, \text{если позиция } r_k \text{ маркирован а,} \\ 0, \text{если иначе.} \end{cases}$$

$\|$ — операция конкатенации.

Входы позиций будем описывать матрицей $\Phi = (\Phi^D \| \Phi^R)$, где

$$\varphi_{sj}^D = \begin{cases} 1, \text{если позиция } d_j \text{ является входом для перехода } t_s, \\ 0, \text{если иначе;} \end{cases}$$

$$\varphi_{sk}^R = \begin{cases} 1, \text{если позиция } r_k \text{ является входом для перехода } t_s, \\ 0, \text{если иначе.} \end{cases}$$

Выходы позиций будем описывать матрицей $\Psi = \left(\Psi^D \middle\| \Psi^R\right)$, где

$$\psi_{sj}^D = \begin{cases} 1, \text{если позиция } d_j \text{ является выходной для перехода } t_s, \\ 0, \text{если иначе.} \end{cases}$$

Так как ни одна позиция, соответствующая событию, не является выходом для какого-либо перехода t_s, то $\psi_{sk}^R = 0$. Это делает размерность матриц Ф и Ψ одинаковой, что позволяет применять к ним матричные логические операции.

Обозначим $\xi^{t_s} = \left(\xi_1^{t_s}, \xi_2^{t_s}, ..., \xi_m^{t_s}\right)$ вектор-строку, соответствующую переходу t_s, координаты которой определяются по следующему правилу:

$$\xi_j^{t_s} = \begin{cases} 1, \text{если } s = j, \\ 0, \text{если иначе.} \end{cases}$$

Заметим, что все введенные матрицы являются $(0,1)$-матрицами. Для произвольных $(0,1)$-матриц $A = \left(a_{ij}\right)_{\substack{i=1,...,s \\ j=1,...,l}}$ и $B = \left(b_{jk}\right)_{\substack{j=1,...,l \\ k=1,...,p}}$ определена следующая операция логического умножения $C = A \otimes B$, такая, что $C = \left(c_{ik}\right)_{\substack{i=1,...,s \\ k=1,...,p}}$, где

$$c_{ik} = \bigvee_{j=1,...,l} \left(a_{ij} \wedge b_{jk}\right) = \left(a_{i1} \wedge b_{1k}\right) \vee \left(a_{i2} \wedge b_{2k}\right) \vee ... \vee \left(a_{il} \wedge b_{lk}\right).$$

Из приведённого описания логического умножения матриц следует, что $\xi^{ts} \otimes (\Phi \vee \Psi)$ представляет собой i-ю строку матрицы $\Phi \vee \Psi$, соответствующую переходу t_s, то есть равно $[\Phi \vee \Psi]^{t_s}$:

$$[\Phi \vee \Psi]^{t_s} = \left(\theta_1^{t_s}, \theta_2^{t_s}, ..., \theta_{n_1}^{t_s} \parallel \eta_1^{t_s}, \eta_2^{t_s}, ..., \eta_{n_2}^{t_s}\right), \text{ где}$$

$$\theta_j^{t_s} = \begin{cases} 1, \text{если } d_j \in I(t_s) \cup O(t_s), \\ 0, \text{если иначе}; \end{cases}$$

$$\eta_k^{t_s} = \begin{cases} 1, \text{если } r_k \in I(t_s), \\ 0, \text{если иначе.} \end{cases}$$

Для описания процесса функционирования сети необходимо определить операцию смены маркировки. Поскольку вся сеть Петри является объединением фрагментов, аналогичных изображенным на рис. 1, опишем операцию применительно к отдельному фрагменту.

Пусть

$\mu = \left(d_1, d_2, ..., d_{n_1} \middle\| r_1, r_2, ..., r_{n_2}\right)$ — вектор-строка, соответствующая маркировкам позиций до выполнения перехода t_s,

$\mu' = \left(d'_1, d'_2, ..., d'_{n_1} \middle\| r_1, r_2, ..., r_{n_2}\right)$ — вектор-строка, соответствующая маркировкам позиций после выполнения перехода t_s.

Найдем, как изменится маркировка μ после выполнения перехода t_s.

Рассмотрим все возможные случаи.

1) Пусть d_i — входная позиция перехода t_s. Из анализа содержания задачи следует, что взаимосвязь между переменными описывается закономерностью, показанной в табл. 1.

Таблица 1

d_i	$r_k \wedge \theta_i \wedge \eta_k \wedge \theta_j$	d'_i
0	0	0

0	1	0
1	0	1
1	1	0

Данная закономерность может быть описана с помощью логической функции

$$d'_i = d_i \overline{\rightarrow} \left(r_k \wedge \theta_i \wedge \eta_k \wedge \theta_j \right), \qquad (1)$$

где $\overline{\rightarrow}$ — операция логической коимпликации.

2) Пусть r_k — входная позиция перехода t_s. Из анализа содержания задачи следует, что взаимосвязь между переменными описывается закономерностью, показанной в табл. 2.

Таблица 2

r_k	$d_i \wedge \theta_i \wedge \eta_k \wedge \theta_j$	r'_k
0	0	0
0	1	0
1	0	1
1	1	0

Данная закономерность может быть описана с помощью логической функции

$$r'_k = r_k \overline{\rightarrow} \left(d_i \wedge \theta_i \wedge \eta_k \wedge \theta_j\right). \qquad (2)$$

3) Пусть d_j — выходная позиция перехода t_s. Из анализа содержания задачи следует, что взаимосвязь между переменными описывается закономерностью, показанной в табл. 3.

Таблица 3

d_j	$d_i \wedge r_k \wedge \theta_i \wedge \eta_k \wedge \theta_j$	d'_j
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

Данная закономерность может быть описана с помощью логической функции

$$d'_j = d_j \vee \left(d_i \wedge r_k \wedge \theta_i \wedge \eta_k \wedge \theta_j\right) \qquad (3)$$

Таким образом, можно определить логическую операцию ∇_{t_s} по следующему правилу:

координата d_i вектора μ' соответствует входной позиции перехода t_s, измененного по формуле (1);

координата r_k вектора μ' соответствует входной позиции перехода t_s, измененного по формуле (2);

координата d_j вектора μ' соответствует выходной позиции перехода t_s, измененного по формуле (3).

Остальные координаты не изменяются.

Таким образом, изменение маркировки μ после выполнения перехода t_s определяется по следующей формуле:

$$\mu' = \mu \nabla_{t_s} [\Phi \vee \Psi]^{t_s}. \qquad (4)$$

Отметим важное свойство операции ∇_{t_s}: если до её выполнения было маркировано только одно состояние, то после выполнения будет маркировано тоже только одно состояние.

Моделирование ограничений на значения логических переменных, описывающих маркировку сети. Полученная матрично-логическая модель содержит в практически интересных случаях очень большое количество переменных. Вместе с тем, как показывает анализ, многие комбинации значений переменных недопустимы. Ограничения на комбинации значений можно определить на основе выявленных выше особенностей 3) и 4) рассматриваемой сетевой модели.

Определим функцию допустимости нахождения ОВД в одном из состояний. Из анализа особенности 3) следует, что в каждый момент времени ОВД может находиться в одном и только одном состоянии. Это может быть описано закономерностью, показанной в табл. 4.

Таблица 4

d_1	d_2	...	d_{n_1}	$f\left(d_1,\ldots,d_{n_1}\right)$

1	0	...	0	1
0	1	...	0	1
...	...	...	...	...
0	0	...	1	1
Все остальные комбинации				0

Данную функцию удобно задать в виде совершенной дизъюнктивной нормальной формы [6]:

$$f\left(d_1,...,d_{n_1}\right)=d_1\overline{d_2}\,...\overline{d_{n_1}}\vee\overline{d_1}\,d_2...\overline{d_{n_1}}\vee...\vee\overline{d_1}\,\overline{d_2}...d_{n_1}\,. \qquad (5)$$

Определим функцию допустимости появления одного из возможных альтернативных событий $r_{k_1}, r_{k_2},..., r_{k_l}$. Из анализа особенности 4) следует, что в каждый момент времени может появиться не более одного события, что может быть описано закономерностью, показанной в табл. 5.

Таблица 5

r_{k_1}	r_{k_2}	...	r_{k_l}	$g_k\left(r_{k_1}, r_{k_2},..., r_{k_l}\right)$
0	0		0	1
1	0	...	0	1
0	1	...	0	1
...	...	...	...	...
0	0	...	1	1
Все остальные комбинации				0

Данную функцию так же удобно задать в виде совершенной дизъюнктивной нормальной формы:

$$g_k\left(r_{k_1}, r_{k_2},..., r_{k_l}\right)=\overline{r_{k_1}}\,\overline{r_{k_2}}...\overline{r_{k_l}}\vee r_{k_1}\overline{r_{k_2}}...\overline{r_{k_l}}\vee\overline{r_{k_1}}\,r_{k_2}...\overline{r_{k_l}}\vee...\vee\overline{r_{k_1}}\,\overline{r_{k_2}}...r_{k_l}\,. \qquad (6)$$

Ограничения на значения логических переменных выполняются, если $f\left(d_1,...,d_{n_1}\right)=1$ и найдётся k, для которого $g_k\left(r_{k_1}, r_{k_2},..., r_{k_l}\right)=1$.

Алгоритм имитационной модели. Рассмотрим алгоритм использования полученных выше соотношений для имитации действий ОВД при возникновении чрезвычайных обстоятельств криминального характера. Будем считать, что имитация осуществляется в продолжении T тактов времени длительностью Δt каждый. Определим вектор-строку $H=(h_1, h_2,..., h_{n_1})$, где h_i — количество тактов времени, в течение которых ОВД находился в состоянии d_i. На каждом такте моделирования маркирована только одна позиция, соответствующая состоянию ОВД. Поэтому вектор-строка H+D учитывает, в каком из состояний находился ОВД в данный такт времени.

Укрупнённая блок-схема алгоритма имитации описана на рис. 2.

При программной реализации разработанной матрично-логической модели может возникнуть необходимость преобразования операции логической коимпликации в операции стандартного базиса в связи с тем, что данная операция не поддерживается некоторыми языками программирования. Это может быть осуществлено с помощью следующего преобразования: $x\overline{\to}y \sim x\wedge\overline{y}$.

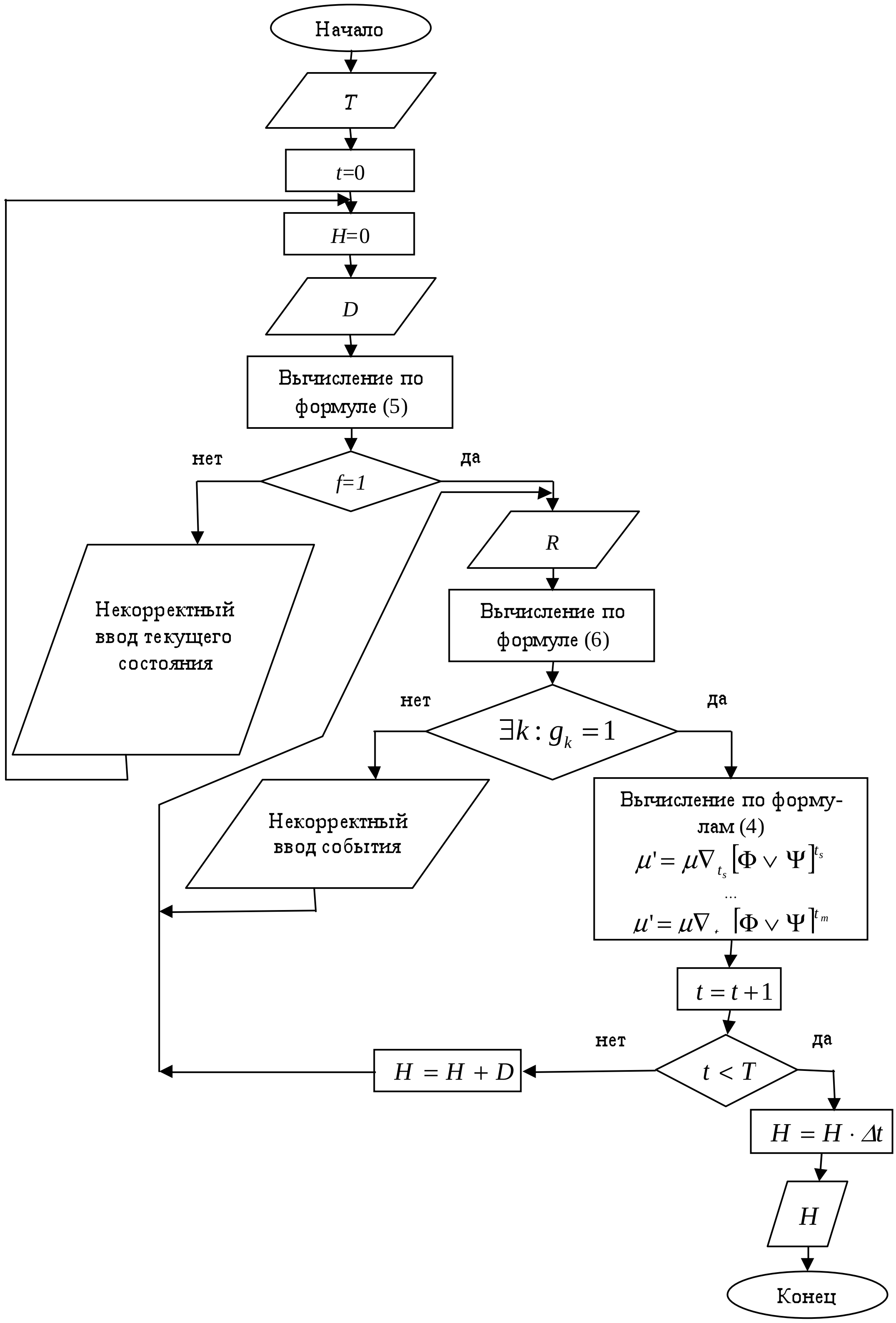

Рис. 2. Укрупнённая блок-схема алгоритма имитации

Таким образом, логическая функция (1) может быть преобразована к виду

$$d'_i = d_i \overline{\rightarrow} r_k \wedge \theta_i \wedge \eta_k \wedge \theta_j \sim d_i \wedge \left(\overline{r_k \wedge \theta_i \wedge \eta_k \wedge \theta_j}\right) \sim d_i \wedge \left(\overline{r_k} \vee \overline{\theta_i} \vee \overline{\eta_k} \vee \overline{\theta_j}\right), \qquad (7)$$

а логическая функция (2) может быть преобразована к виду

$$r'_k = r_k \overline{\to d_i \wedge \theta_i \wedge \eta_k \wedge \theta_j} \sim r_k \wedge \left(\overline{d_i \wedge \theta_i \wedge \eta_k \wedge \theta_j}\right) \sim r_k \wedge \left(\overline{d_i} \vee \overline{\theta_i} \vee \overline{\eta_k} \vee \overline{\theta_j}\right). \quad (8)$$

Заключение. Разработанные матрично-логическая имитационная модель действий органов внутренних дел при чрезвычайных обстоятельствах криминального характера и алгоритм имитации могут быть использованы для создания компьютерной имитационной модели, позволяющей оценивать эффективность различных вариантов действий ОВД, оптимизировать действия ОВД в условиях чрезвычайных обстоятельств криминального характера и обучать сотрудников ОВД таким действиям [3, 4]. В данной модели используются логические операции стандартного базиса, что позволяет реализовать его с использованием любого современного языка программирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бондаревский И.И. Специальная тактика: учебник. — М.: ЦОКР МВД России, 2005. — 368 с.
2. Меньших В.В., Лунев Ю.С., Самороковский А.Ф. Алгоритм имитационного моделирования действий органов внутренних дел и подразделений ОВД при возникновении чрезвычайных обстоятельств // Вестник Воронежского института МВД России. — 2007. — № 2. — С. 125 — 129.
3. Меньших В.В., Пьянков О.В., Самороковский А.Ф. Использование ситуационных центров для обучения действиям в кризисных ситуациях // Информационная безопасность регионов. — 2011. — Вып. 2(9). — С. 104—107.
4. Меньших В.В., Пьянков О.В., Самороковский А.Ф. Использование современных информационных технологий для обучения действиям в кризисных ситуациях // Вестник Воронежского института МВД России. — 2011. — № 3. — С. 154—161.
5. Меньших В.В., Самороковский А.Ф., Горлов В.В., Корчагин А.В. Модель действий органов внутренних дел по обеспечению общественной безопасности при чрезвычайных обстоятельствах криминального характера на примере массовых беспорядков // Информатизация и информационная безопасность правоохранительных органов: сборник трудов XXII Всероссийской научной конференции. — М.: Академия управления МВД России, 2013. — С. 105—109.
6. Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем: пер. с англ. — М.: Мир, 1984. — 264 с.
7. Меньших В.В. Дискретная математика: учебное пособие. — Воронеж: ВИ МВД России, 2013. — 157 с.