

А.Н. Мартьянов, доктор технических наук, профессор  
И.С. Дробот, доктор педагогических наук, доцент

## **Метод мониторинга состояния операторов сложных военно-технических систем**

*Показана возможность применения современного метода принятия решений в режиме реального времени при динамическом анализе статистических данных, получаемых в результате мониторинга состояния операторов сложных военно-технических систем. Решена задача скорейшего обнаружения внешнего деструктивного воздействия на состояние военнослужащих. Предложено асимптотическое выражение для оценки эффективности найденного рекуррентного алгоритма.*

### **Введение**

Обеспечение надежности деятельности специалистов, мониторинг состояния субъектов деятельности, выявление эффектов деструктивных воздействий, профилактика и защита от них являются актуальными задачами для обеспечения работы операторов сложных технических, в том числе военно-технических, систем.

Профессиональная надежность субъекта деятельности характеризуется его способностью к сохранению оптимальных рабочих параметров (работоспособности, бдительности, помехоустойчивости и т. п.) в условиях неопределенности в течение заданных промежутков времени и при различных усложнениях обстановки.

Одним из объективных способов оценки уровня готовности к профессиональной деятельности человека является оценка психофизиологических показателей организма в процессе деятельности [1], его динамических стереотипов в соответствии с теорией функциональных систем [2]. В соответствии с данной теорией весь континуум деятельности разбивается на отдельные дискретные отрезки – системокванты. Системокванты имеют черты функциональной системы и проявляются в виде поведенческих и психических актов, как последовательно сменяемые друг друга стадии, с учетом внутренних связей между элементами деятельности [3, 4].

Состояние субъектов деятельности, в качестве которых могут выступать военнослужащие и гражданский персонал, выполняющие задачи государственной важности (дежурные смены и расчеты стратегических ядерных сил, участники парада и др.), необходимо оценивать с использованием системы комплексного мониторинга.

В состав комплексной системы целесообразно включать аппаратно-программные диагностические комплексы (например, ВИКА-БОС, Метатрон, Имедис-Эксперт и др.), объективно отражающие динамику уровня психического и физического здоровья военных специалистов и позволяющие обрабатывать первичные данные обследования, получать результат в виде количественных показателей, осуществлять интерпретацию результатов.

Ранее психофизиологическая аппаратура не позволяла быстро и точно оценить неосознанные действия, но определение системоквантов жизнедеятельности обеспечивает структурирование не только процесса деятельности, но и профессионализации специалистов. С использованием специального аппаратно-программного комплекса (АПК) проводились последовательно с дискретным шагом во времени (онлайн) измерения психофизиологических параметров операторов во время выполнения технологических операций (событий).

По результатам измерений АПК строится полипараметрический образ состояния оператора. Полипараметрический образ имеет устойчивый характер для каждой технологической операции, что позволяет утверждать о его соответствии понятию системокванта по К.В. Судакову. Определение по совокупности полипараметрических образов изменения напряженности функционирования внутреннего органа или системы позволяет установить место наименьшего сопротивления организма (интервал изменения напряженности такого органа или системы значительно больше, чем у других). Типичная запись последовательности наблюдений представлена на рисунке 1.



Рисунок 1 – Результаты мониторинга события (технологической операции)

Результаты исследований показали, что в некоторый момент времени психофизиологическое состояние субъектов деятельности, находящихся в пределах ограниченного района (территории), резко изменяется, что может свидетельствовать о мощном внешнем воздействии. Этот момент времени необходимо определить с минимальной задержкой с тем, чтобы принять срочные медикаментозные или организационные меры с целью предотвращения нештатных ситуаций.

Для обеспечения профессиональной надежности операторов сложных военно-технических систем весьма актуальна разработка методов скорейшего обнаружения внешних деструктивных воздействий. В статье будет рассмотрена задача скорейшего обнаружения момента появления источника внешних деструктивных воздействий (ИВДВ) на состояние военнослужащих.

Общей чертой различных методов обнаружения ИВДВ является фиксированный объем выборки отсчетов, по которой вычисляется достаточная статистика и сравнивается с порогом.

Целью классических схем обнаружения является минимизация вероятности пропуска при ограничении на вероятность ложной тревоги. В этой статье в дополнение к вероятности обнаружения будет приниматься во внимание задержка обнаружения. Естественно, и в такой постановке вероятность обнаружения должна быть сбалансирована с вероятностью ложной тревоги.

Поскольку в данной ситуации на первый план выступает минимизация времени до обнаружения, то следует воспользоваться методами последовательного анализа [5]. В классической задаче последовательного анализа, развитого Вальдом [6], рассматривается различение двух гипотез по последовательности статистически однородных случайных отсчетов. Все отсчеты бе-

ругся из одного и того же распределения, остается только идентифицировать соответствующее распределение.

В рассматриваемом сценарии случайные наблюдения не являются однородными, и необходимо поднять тревогу как раз тогда, когда появляется неоднородность. В нашей постановке начало активности ИВДВ в неизвестный момент времени будет изменять распределение результатов анализа мониторинга состояния военнослужащих. Поэтому следует воспользоваться современной теоретической схемой обнаружения изменения распределения вероятностей, которая хорошо приспособлена к этой задаче.

### Модель

В условиях информационного противоборства большие информационные системы вынуждены вести постоянный комплексный мониторинг состояния военнослужащих (дежурных смен, расчетов). Обработка наблюдений производится в настоящее время с помощью цифровых ЭВМ. Поэтому наблюдаемые данные будем моделировать случайными процессами с дискретным временем. Дискрет по времени берется такой величины, чтобы соседние отсчеты были статистически независимыми.

Предположим, что комплексный мониторинг осуществляется путем реализации мероприятий диагностики медицинского, психофизиологического, психологического характера в определенной последовательности, связанной с периодичностью заступления на боевое дежурство (тренировкой парадных расчетов), которую можно выразить через последовательные отсчеты  $Y_i, i=1, 2, \dots, n$ . Если ИВДВ отсутствует, то  $Y_i = W_i$ , где  $W_i$  есть белый гауссов шум с дисперсией  $\sigma^2$ . Если же появляется ИВДВ, тогда  $Y_i = X_i + W_i$ , где  $X_i$  есть отсчет случайного поля обнаружения результатов влияния ИВДВ на состояние военнослужащих. Также предполагается, что  $X_i$  есть белый гауссов шум со средним 0 и дисперсией  $P$ . Величина  $P$  есть мощность воздействия на входе системы мониторинга. Рассматривается сценарий, в котором и  $\sigma^2$  и  $P$  известны точно.

Таким образом, сначала наблюдения следуют распределению  $F_0$  с соответствующей функцией плотности  $f_0$ . В неизвестный момент времени  $\theta$  вследствие появления ИВДВ распределение меняется на  $F_1$  с соответствующей функцией плотности  $f_1$ . В нашем случае ИВДВ меняет плотность  $\begin{pmatrix} 0, \sigma^2 \\ f_0 N \end{pmatrix}$  на плотность  $\begin{pmatrix} 0, \sigma^2 + P \\ f_1 N \end{pmatrix}$ . Здесь  $\begin{pmatrix} m, D \\ N \end{pmatrix}$  – плотность нормального распределения с математическим ожиданием  $m$  и дисперсией  $D$ .

Предположение о гауссовости распределений для данного примера является обоснованным, поскольку ИВДВ широкополосный (имеет много степеней свободы) и поэтому распределение вероятностей нормализуется.

### Критерий

Основываясь на наблюдениях  $Y = \{Y_1, \dots, Y_n\}$ , в каждый момент времени  $i$  система мониторинга пытается различить следующие две гипотезы:  $H_0: Y_i = W_i, i=1, \dots, n$ ;  $H_1: \exists \theta \in [1, n]$ , такого что:

$$Y_i = \begin{cases} W_i, & i=1, \dots, \theta-1, \\ X_i + W_i, & i=\theta, \dots, n. \end{cases}$$

Пусть  $\tau$  обозначает момент времени, когда система мониторинга поднимает тревогу. Если  $\tau > \theta$ , то  $y = \tau - \theta$  есть задержка обнаружения. С другой стороны, событие  $\{\theta < \tau\}$  есть ложная

тревога, и  $\dot{T}_0 = E_{f_0} \{ \tau \}$  есть среднее время до ложной тревоги. Величина  $\dot{T}_0$  зависит от стратегии обнаружения и  $f_0$ .

После условного усреднения относительно события, что ИВДВ начинает воздействие в момент времени  $\theta$ , и относительно наблюдавшейся до момента времени  $\theta$  последовательности  $Y_1^\theta = \{ Y_1, \dots, Y_\theta \}$ , задержка обнаружения  $y = \tau - \theta$  будет случайной величиной, значение которой зависит также и от поведения выборок после  $\theta$ . Определим условное среднее времени задержки обнаружения как  $\dot{T}_{1,c} = E_{f_1} \{ y = \tau - \theta \vee \tau \geq \theta, Y_1^\theta \}$ .  $\dot{T}_{1,c}$  есть случайная величина, поскольку  $\theta$  и  $Y_1^\theta$  случайны. Можно назначить априорное распределение для  $\theta$  и затем определить среднюю задержку путем усреднения по распределению  $\theta$  и  $Y_1^\theta$ . Однако, в нашем примере невозможно назначить подходящее априорное распределение. В дальнейшем, следуя подходу в [7], будем рассматривать сценарий по наихудшему случаю. В частности, рассмотрим наихудший случай задержки:

$$\dot{T}_{1,c} = \max_{\theta \geq 1} E_{f_1} \{ y = \tau - \theta \vee \tau \geq \theta, Y_1^\theta \}. \tag{1}$$

Мы выбираем стратегию, которая минимизирует  $\dot{T}_1$ , оставляя в то же время  $\dot{T}_0$  больше, чем заранее устанавливаемый порог  $\dot{T}_{1h}$ . Таким образом, мы формулируем задачу обнаружения источника помех как следующую оптимизационную задачу:  $\min_{\tau} \dot{T}_1 = \max_{\theta \geq 1} E_{f_1} \{ y = \tau - \theta \vee t_a \geq \tau, Y_1^\tau \}$ , при условии, что

$$\dot{T}_0 \geq \dot{T}_{1h}. \tag{2}$$

### Алгоритм скорейшего обнаружения

Для получения алгоритма скорейшего обнаружения воспользуемся классической статистической отношением правдоподобия. Поскольку  $P$  и  $\sigma^2$  известны, то полностью определены плотности  $f_0 N(0, \sigma^2)$  и  $f_1 N(0, \sigma^2 + P)$  до и после изменения свойств наблюдаемого процесса. Поэтому также полностью определено логарифмическое отношение правдоподобия:

$$l(y) = \sum_{i=1}^n \ln \left\{ \frac{f_1(y_i)}{f_0(y_i)} \right\} = \sum_{i=1}^n \ln \left\{ \frac{\frac{1}{\sqrt{2\pi(P+\sigma^2)}} \exp \left\{ \frac{-y_i^2}{2(P+\sigma^2)} \right\}}{\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp \left\{ \frac{-y_i^2}{2\sigma^2} \right\}} \right\} = \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{Py_i^2}{2(P+\sigma^2)\sigma^2} + \frac{1}{2} \ln \frac{\sigma^2}{P+\sigma^2} \right\}. \tag{3}$$

Исследуем поведение математических ожиданий (сносов) слагаемых этой суммы до начала действия воздействия и после ее появления. До начала действия источника воздействия:

$$E_{f_0} \{ l(y_i) \} = \int f_0(y) \ln \left\{ \frac{f_1(y_i)}{f_0(y_i)} \right\} dy = \frac{P}{2(P+\sigma^2)} + \frac{1}{2} \ln \left\{ \frac{\sigma^2}{P+\sigma^2} \right\} = -D(f_0 \| f_1) \leq 0,$$

где  $D(f_0 \| f_1) = \frac{-P}{2(P+\sigma^2)} - \frac{1}{2} \ln \left\{ \frac{\sigma^2}{P+\sigma^2} \right\}$  есть расходимость Кульбака-Лейблера между  $f_0$  и  $f_1$ .

Легко видеть, что последнее выражение всегда отрицательное. Действительно, используя очевидное неравенство  $\ln x < x - 1$ ,  $x < 1$ , получаем:

$$\frac{P}{2(P+\sigma^2)} + \frac{1}{2} \ln \left\{ \frac{\sigma^2}{P+\sigma^2} \right\} < \frac{P}{2(P+\sigma^2)} + \frac{1}{2} \left( \frac{\sigma^2}{P+\sigma^2} - 1 \right) = 0.$$

После появления воздействия:

$$E_{f_1}\{l(y_i)\} = \int f_1(y) \ln \left\{ \frac{f_1(y_i)}{f_0(y_i)} \right\} dy = D(f_1||f_0) \geq 0,$$

где  $D(f_1||f_0) = \frac{P}{2\sigma^2} - \frac{1}{2} \ln \left\{ \frac{P+\sigma^2}{\sigma^2} \right\}$  есть расхожимость Кульбака-Лейблера между  $f_1$  и  $f_0$ .

Пользуясь аналогичным неравенством  $-\ln x > 1 - x, x > 1$ , имеем:

$$D(f_0||f_1) = \frac{P}{2\sigma^2} - \frac{1}{2} \ln \left\{ \frac{P+\sigma^2}{\sigma^2} \right\} > \frac{P}{2\sigma^2} + \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{P+\sigma^2}{\sigma^2} \right) = 0.$$

Таким образом, до неизвестного момента времени  $\theta$ ,  $l(y)$  имеет отрицательный снос, в то время как после момента изменения  $l(y)$  имеет положительный снос. На рисунке 2 показана графическая иллюстрация типичной смоделированной реализации  $l(y)$ .

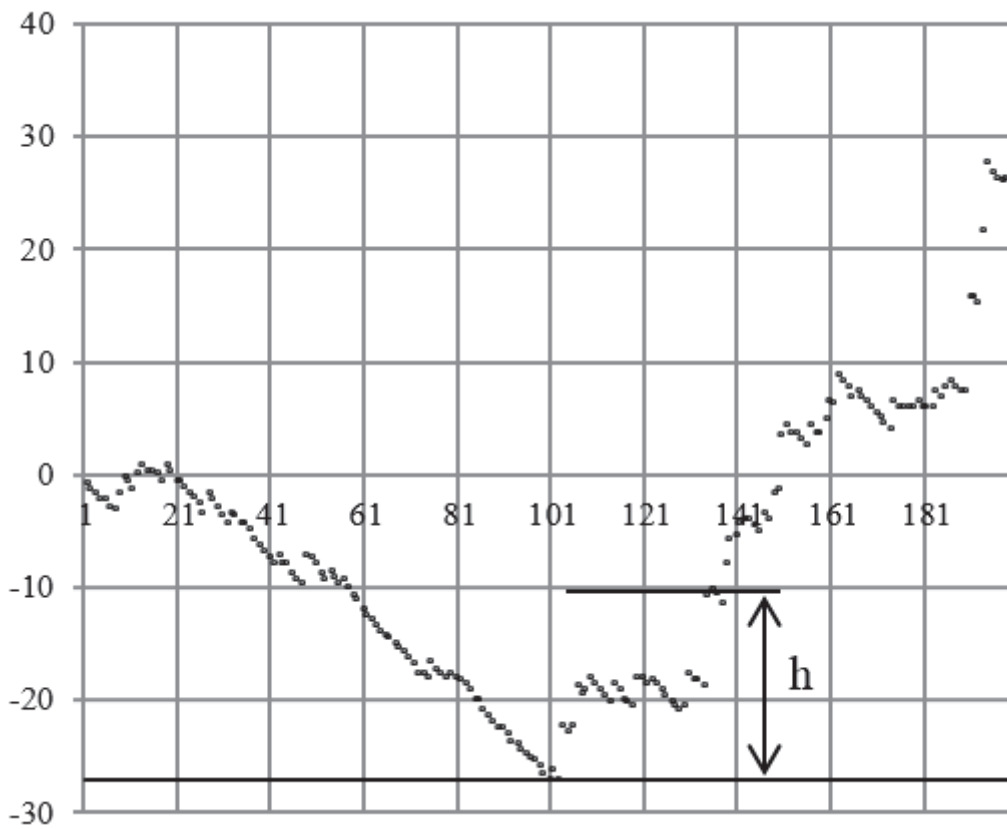


Рисунок 2 – Типичная реализация CUSUM статистики для  $\theta=100, \sigma^2=1, P=3$

Так как до разладки  $l(y_i)$  в среднем дрейфует вниз (рисунок 2), а после разладки – вверх, то предлагается на каждом шаге  $i$  сравнивать разницу  $l(y_n) - \min_{i \leq n} l(y_1)$  и как только она станет значимой, т. е. превысит порог  $h$ , подавать сигнал о разладке. В этом случае алгоритм (2) имеет эквивалентную запись  $s_n = (y_n) - \min_{i \leq n} l(y_1), \tau = \inf\{n \geq 1: s_n \geq h\}$ .

Поэтому интуитивный алгоритм для обнаружения ИВДВ состоит в сравнении с порогом  $h$  со значением следующего выражения:

$$s_n = \max_{k \leq n} \left\{ \sum_{i=1}^n l(y_i) - \sum_{i=1}^k l(y_i) \right\} = \max_{k \leq n} \sum_{i=k+1}^n l(y_i).$$



Если  $s_n$  больше, чем  $h$ , то объявляется тревога, поскольку  $l(y)$ , как показано, имеет положительный снос после  $k$ -го отсчета. Мы можем записать:

$$s_{n+1} = \max_{k \leq n+1} \left\{ \sum_{i=k+1}^{n+1} l(y_i) \right\} = \max_{k \leq n} \left\{ \max_{i=k+1}^{n+1} \left\{ \sum_{i=k+1}^{n+1} l(y_i) \right\}, 0 \right\} = \max_{k \leq n} \left\{ \max_{i=k+1}^{n+1} \left\{ \sum_{i=k+1}^{n+1} l(y_i) \right\} + l(y_{n+1}), 0 \right\} = \{s_n + l(y_{n+1})\}^+ \quad (4)$$

Здесь использовано обозначение  $x^+ = \max(0, x)$ . С помощью (4) можно рекуррентно вычислить  $s_n$ , полагая  $s_0 = 0$ .

В итоге алгоритм работает следующим образом: устройство обработки после каждого отсчета с использованием (3) вычисляет  $l(y)$ , затем получает статистику  $s_n$  в соответствии с (4), и сравнивает эту статистику с порогом  $h$ . Если  $s_n$  больше, чем  $h$ , то алгоритм объявляет, что ИВДВ присутствует.

Полученный алгоритм есть модификация алгоритма кумулятивных сумм (CUMulative SUM) Пейджа, который первоначально был им предложен в 1954 году. Из результатов в [7], известно, что CUSUM алгоритм минимизирует  $\dot{T}_1$  среди всех алгоритмов обнаружения, которые удовлетворяют  $\dot{T}_0 \geq \dot{T}_{th}$  для произвольного  $\dot{T}_{th}$ .

### Оценка эффективности алгоритма

Для получения требуемых соотношений между порогом  $h$ , средним временем до ложной тревоги  $\dot{T}_0$  и максимальной задержкой обнаружения  $\dot{T}_1$  следует воспользоваться результатами из последовательного анализа. Следуя [4]-[5], можно вывести весьма простые асимптотические границы для  $\dot{T}_1$  и  $\dot{T}_0$ :

$$\dot{T}_0 \geq e^h. \quad (5)$$

Асимптотически, если  $h$  велико, имеем:

$$\dot{T}_1 \frac{h}{D(f_1 \| f_0)}. \quad (6)$$

Отсюда по заданному времени до ложной тревоги  $\dot{T}_0$  мы можем приближенно вычислить соответствующий порог  $h$ , используя (5). Задержка обнаружения для наихудшего случая тогда будет ограничена величиной (6).

### Заключение

Исследован алгоритм скорейшего обнаружения момента начала воздействия на состояние военнослужащих. Предлагаемый алгоритм оказывается рекуррентным и может быть относительно просто реализован, что имеет существенное практическое значение. Предложено простое асимптотическое выражение для оценки максимального значения времени задержки между моментами обнаружения и появления источника внешних деструктивных воздействий на состояние военнослужащих.

### Список использованных источников

1. Титов В.Б., Емельянова В.О., Кривоконь В.И. Биокоррекция. Модели, приборы, системы. – Ставрополь: Пресса, 1997. – 190 с.
2. Анохин П.К. Узловые вопросы теории функциональных систем. – М.: Наука, 1980. – 197 с.
3. Системокванты физиологических процессов / Под ред. К.В. Судакова. – М.: Международный гуманитарный фонд армяноведения им. акад. Ц.П. Агаяна, 1997.

4. Классина С.Я. Психологические воздействия как средство реабилитации функционального состояния человека при психоэмоциональном напряжении // Вестник новых медицинских технологий. – 2014. – № 1.

5. Алексеев А.И., Мартьянов А.Н. Теория передачи информации в условиях помех. – М.: МО СССР, 1975.

6. Вальд А. Последовательный анализ. – М.: ГИФМЛ, 1960.

7. Ширяев А.Н. Вероятностно-статистические методы в теории принятия решений. – М.: ФМОП МЦНМО, 2011.