

УДК 621.391.2

ОБНАРУЖЕНИЕ СЕЙСМОАКТИВНОГО ОБЪЕКТА В ОБЛАСТИ РАЗМЕЩЕНИЯ ОХРАННОЙ СИСТЕМЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО КРИТЕРИЯ ВАЛЬДА*

М. А. Григорьев, М. А. Райфельд

*Новосибирский государственный технический университет,
630073, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20
E-mail: rajfeld@mail.ru*

Изучается синтез последовательной процедуры принятия решения об обнаружении сейсмоактивного объекта на местности, определённой конкретным размещением системы охраны. Показано, что использование последовательного критерия Вальда при синтезе решающего правила позволяет обеспечивать заданные характеристики обнаружения, а также принимать решение с минимальной задержкой, что является важным требованием к охраняемым системам. Данная процедура применяется в сейсмической системе охраны для селекции обнаруженных объектов по их местоположению.

Ключевые слова: сейсмическая система охраны, проверка статистических гипотез, критерий отношения правдоподобия, последовательный обнаружитель, последовательный критерий Вальда.

DOI: 10.15372/AUT20160407

Введение. Среди множества разнотипных охраняемых систем особое место занимают системы, основанные на сейсмическом принципе. Они используются для решения широкого круга локационных задач: обнаружения нарушителя, оценки его местоположения, трассировки, а также определения класса нарушителя. Принцип работы сейсмической охраняемой системы достаточно прост [1, 2]. Если некий сейсмоактивный объект (нарушитель) оказывает влияние на поверхность грунта, то в области возмущения образуются сейсмоакустические волны. Одна из основных волн (поверхностная волна Рэлея) распространяется вдоль границы раздела сред (воздуха и земли). Сейсмоакустические волны влияют на специальные датчики (геофоны или акселерометры), которые формируют электрические сигналы, связанные с возмущающим воздействием на поверхность грунта. В результате достаточно сложной обработки сейсмоакустических сигналов решаются указанные выше локационные задачи. Технология оценки местоположения объекта с использованием сейсмических волн подобна той, что применяется в радиолокации. Таким образом, может быть реализован разностно-дальномерный метод [3–5]. С помощью группы определённым образом размещённых сейсмических датчиков, образующих навигационный треугольник (рис. 1), измеряются относительные задержки моментов прихода сейсмического сигнала на соответствующие датчики. Далее на основе полученных задержек и известной (или оцениваемой) скорости волны в грунте в результате решения системы уравнений [5] вычисляются координаты объекта. Из-за ошибок измерения задержек, вызванных шумами

*Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (государственное задание № 2014/138, проект № 1176).

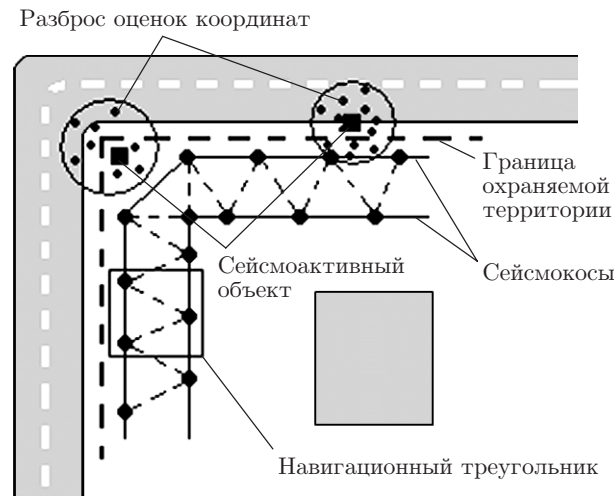


Рис. 1. Пространственно распределённая система охраны

и помехами в наблюдаемых данных, система навигационных уравнений не решается прямым способом. Вместо этого строится максимально правдоподобная оценка либо оценка по критерию минимума среднего квадрата ошибки координат объекта [4]. Перемещающийся шагами нарушитель создаёт импульсный сейсмический сигнал [6, 7]. Задача измерения задержки сигнала на различных датчиках сводится к измерению взаимных задержек импульсов шагов [5, 6]. Обычно сейсмодатчики группируются в пространственные структуры, называемые сейсмокосами. Это позволяет строить пространственно распределённые системы, располагаемые по периметру охраняемого объекта (см. рис. 1).

Постановка задачи. Рассмотрим подробнее одну из важных разновидностей задачи определения местоположения нарушителя. Иногда необходимо не оценивать точные текущие координаты местоположения сейсмоактивного объекта [3, 5], а принимать решения, связанные с нахождением нарушителя в определённой, строго контролируемой системе зоне с заданными вероятностями ошибок. Подобные проблемы приходится решать, если граница охраняемого объекта примыкает к активно посещаемой территории и зона отчуждения между контролируемой и разрешённой территориями по каким-либо причинам юридически не может быть создана. При этом на разрешённой территории могут проводиться сельскохозяйственные работы, размещаться «шумные» производства, проходить оживлённые дороги и т. д.

Сейсмоактивные объекты, находящиеся на такой территории, строго говоря, не являются нарушителями, тем не менее, поскольку точная граница обнаружения сейсмического датчика не определена и зависит от многих факторов (например, отношения сигнал/шум), система может фиксировать сигналы от объектов, расположенных вне охраняемой зоны. Это приводит к многочисленным ложным срабатываниям системы охраны, что снижает её эксплуатационные характеристики [7]. Очевидным способом борьбы с указанной проблемой является учёт координат обнаруживаемого объекта при принятии решения о нарушении (если координаты нарушителя соответствуют точке внутри зоны контроля). Алгоритм оценивания координат обычно строится на основе максимально правдоподобного критерия или критерия минимума среднего квадрата ошибки [8], и качество его работы определяется только близостью оценки к измеряемому параметру (в данном случае к истинным координатам обнаруженного объекта) по критерию среднего квадрата расстояния. Поэтому такой алгоритм не обеспечивает минимизации вероятностей ошибок первого

и второго рода (ложной тревоги α и пропуска цели β), связанных с обнаружением нарушителя в контролируемой зоне. Следовательно, для решения задачи нахождения нарушителя в зоне контроля необходимо использовать алгоритм на основе критерия обнаружения.

Синтез алгоритма принятия решения. Сделаем несколько предварительных замечаний о возможном построении сейсмической системы охраны, регистрирующей не всех нарушителей, находящихся вблизи от неё, а только тех, которые попадают в строго ограниченную зону контроля. Во многих практически важных случаях зона контроля может представлять собой свободное пространство между двумя линиями датчиков (рис. 2). Линию датчиков на границе с неохраняемой территорией назовём внешней, а противоположную, обращённую к охраняемому объекту, — внутренней. Рассмотрим один из возможных способов размещения сейсмических датчиков.

В качестве первичных статистик, на основе которых предполагается строить решающее правило, будем использовать задержки распространения сейсмических сигналов между любой парой датчиков Δt_{ij} , один из которых находится на внутренней линии, а другой на внешней: $\Delta t_{ij} = t_{j\text{внутр}} - t_{i\text{внешн}}$, где $t_{j\text{внутр}}$ и $t_{i\text{внешн}}$ — временные моменты прихода сейсмического сигнала на j -й датчик внутренней линии и на i -й датчик внешней линии соответственно. Выбор способа формирования первичных статистик интуитивно понятен. Допустим, что k -е датчики внешней и внутренней линий расположены друг против друга на расстоянии d (d — ширина полосы зоны контроля (см. рис. 2)). Тогда, если сейсмоактивный объект находится в неохраняемой области на прямой, проходящей через k -е датчики внешней и внутренней линий на расстоянии h от внешней линии, величина относительной задержки Δt_{kk} составит $\tau_d = d/v$, где τ_d — задержка на преодоление сейсмическим сигналом расстояния d , v — скорость волны в грунте. Поскольку $t_{k\text{внутр}} = t_{k\text{внешн}} + \tau_d$, величина $\Delta t_{kk} = \tau_d$ не зависит от h . Если нарушитель находится на той же линии, но в зоне контроля, то величина этой задержки будет определяться следующим образом: $t_{k\text{внешн}} = t + h/v$, $t_{k\text{внутр}} = t + (d - h)/v$ и $\Delta t_{kk} = \tau_d - 2h/v$, где t — момент воздействия на грунт. Так как величины h и v положительны, можно сделать вывод, что статистика Δt_{kk} , рассчитанная для случая внешнего по отношению к зоне контроля объекта, всегда больше статистики для объекта внутри зоны. Эта же закономерность выполняется и для некоторого количества пар датчиков, расположенных в непосредственной близости от датчиков с номером k . Предположим, что ошибки измерения временных задержек независимы, распределены по нормальному закону и имеют нулевое математическое ожидание и дисперсию σ_t^2 . Тогда многомерная гауссовская плотность относительных задержек для n датчиков внутренней и внешней линий системы, расположенных справа и слева от k -го датчика внешней линии,

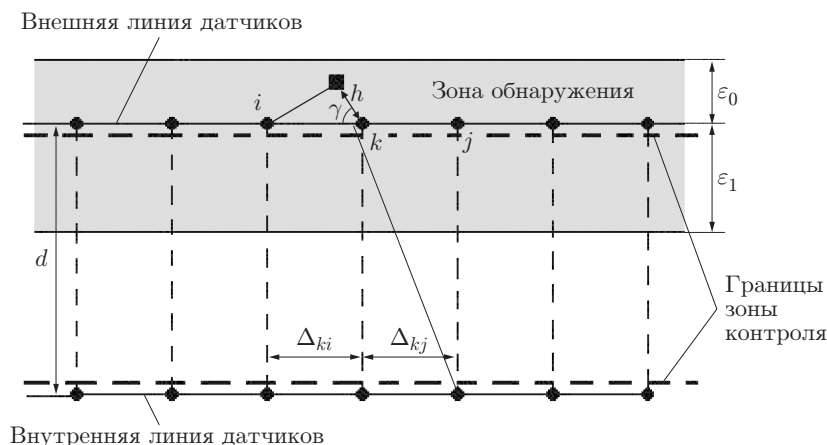


Рис. 2. Возможный способ формирования зоны контроля

наиболее близкого к сейсмоактивному объекту, представляется в виде

$$P(\{\Delta t_{i,j}\}) = \prod_{i=-n}^n \prod_{j=-n}^n P(\Delta t_{k+i,k+j}), \quad (1)$$

где $\{\Delta t_{i,j}\} = (\Delta t_{k-n,k-n}, \Delta t_{k-n,k-n+1}, \dots, \Delta t_{k,k-1}, \Delta t_{k,k}, \Delta t_{k,k+1}, \dots, \Delta t_{k+n,k+n-1}, \Delta t_{k+n,k+n})$, а $P(\Delta t_{k+i,k+j})$ — гауссовская одномерная плотность вероятности относительной задержки. Датчик внешней линии, расположенный ближе всех к сейсмоактивному объекту, может быть выявлен в результате измерения мощности импульса шага либо момента его прихода на датчики некоторой группы. Таким образом, номер k ближайшего к источнику сигнала датчика (среди N датчиков внешней линии) определяется следующим образом: $k = \min_{t_i}(t_1, t_2, \dots, t_N)$ либо $k = \max_{p_i}(p_1, p_2, \dots, p_N)$. Пусть сейсмоактивный объект находится на расстоянии h от ближайшего датчика в неохраемой области. Тогда в соответствии с рис. 2

$$t_{i\text{внешн}} = \sqrt{(\Delta_{ki} - h \cos(\gamma))^2 + (h \sin(\gamma))^2} / v; \quad (2)$$

$$t_{j\text{внутр}} = \sqrt{(\Delta_{kj} + h \cos(\gamma))^2 + (h \sin(\gamma) + d)^2} / v.$$

Здесь Δ_{ki} , Δ_{kj} — расстояния вдоль линии датчиков между i -м датчиком внешней линии и k -м датчиком этой же линии (находящимся ближе всех к источнику возмущения), а также j -м датчиком внутренней линии и k -м (противоположным ближайшему к сейсмоактивному объекту) соответственно; γ — угол между направлением на объект и внешней линией датчиков. Поскольку местоположение объекта обнаружения не определено и невозможно выделить какое-либо преимущественное направление на объект, распределение γ будем считать равномерным в диапазоне $[0, \pi]$. Найдём математическое ожидание относительной задержки Δt_{ij} (в предположении равномерного распределения γ). Имеем

$$\bar{t}_{i\text{внешн}} = \frac{1}{\pi v} \int_0^\pi \sqrt{(\Delta_{ki} + h \cos(\gamma))^2 + (h \sin(\gamma))^2} d\gamma = \frac{1}{\pi v} \int_0^\pi \sqrt{\Delta_{ki}^2 + h^2 + 2h\Delta_{ki} \cos(\gamma)} d\gamma; \quad (3)$$

$$\bar{t}_{j\text{внутр}} = \frac{1}{\pi v} \int_0^\pi \sqrt{\Delta_{kj}^2 + h^2 + d^2 + 2h\Delta_{kj} \cos(\gamma) + 2hd \sin(\gamma)} d\gamma.$$

Разлагая функцию под интегралом (3) в ряд Тейлора в предположении малости величины h по сравнению с расстоянием между датчиками при внешнем по отношению к охраняемой зоне расположении сейсмоактивного объекта, запишем

$$\Delta \bar{t}_{ij0} = \bar{t}_{j\text{внутр}} - \bar{t}_{i\text{внешн}} = \left(\sqrt{\Delta_{kj}^2 + d^2} - \Delta_{ki} + h/a_{kj} \right) / v, \quad (4)$$

где $a_{kj} = \pi \sqrt{\Delta_{kj}^2 + d^2} / 2d$. Получим математическое ожидание относительной задержки $\Delta \bar{t}_{ij}$ в случае нахождения сейсмоактивного объекта в контролируемой зоне (см. рис. 2). Значение $\Delta \bar{t}_{ij1}$ рассчитывается по формулам, аналогичным (3), (4). Можно показать, что

$$\Delta \bar{t}_{ij1} = \bar{t}_{j\text{внутр}} - \bar{t}_{i\text{внешн}} = \left(\sqrt{\Delta_{kj}^2 + d^2} - \Delta_{ki} - h/a_{kj} \right) / v. \quad (5)$$

Допустим, что ошибки измерения временных задержек подчиняются гауссовскому распределению с нулевым математическим ожиданием и дисперсией σ_t^2 . С учётом выражений (4), (5) распределение задержки прихода сигналов $P_0(\Delta t_{ij})$ и $P_1(\Delta t_{ij})$ на i -й и j -й датчики линии при различном (внешнем и внутреннем) положении нарушителя по отношению к зоне контроля представляется в следующем виде:

$$P_{0,1}(\Delta t_{ij}/h) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_t} \exp\left(-\left(\Delta t_{ij} - \left(\sqrt{\Delta_{kj}^2 + d^2} - \Delta_{ki} \pm h/a_{kj}\right)/v\right)^2 / 2\sigma_t^2\right). \quad (6)$$

В (6) знак «+» в показателе экспоненты соответствует плотности вероятности $P_0(\Delta t_{ij})$, а знак «-» — $P_1(\Delta t_{ij})$. Выражение для плотности вероятности относительных задержек $P_{0,1}(\Delta t_{ij})$ зависит от параметра h , который представляет собой расстояние между точкой возбуждения сейсмического колебания и ближайшим к ней k -м датчиком внешней линии. Будем считать параметр h случайной величиной с равномерным распределением в интервале $I = [0, \varepsilon]$. Задавая интервал I , определяем полосу шириной ε , прилегающую к внешней линии датчиков. Данная полоса ограничивает ожидаемую зону обнаружения сейсмоактивного объекта этой линией датчиков (см. рис. 2). Ширина полосы различна со стороны зоны контроля и внешней территории и составляет ε_1 и ε_0 соответственно. Предположение, что $\varepsilon_1 > \varepsilon_0$, обоснованно. Будем считать обнаружение состоявшимся только в том случае, если импульсы шагов нарушителя выявлены на датчиках обеих линий, т. е. нарушитель должен подойти достаточно близко к датчикам внешней линии, чтобы его шаги «услышала» и внутренняя линия датчиков. При нахождении нарушителя внутри зоны датчики внутренней и внешней линий оказываются в примерно равных условиях. Безусловное по отношению к параметру h распределение можно представить как

$$P_0(\Delta t_{ij}) = \int_0^{\varepsilon_0} P_0(\Delta t_{ij}/h)P(h)dh = \frac{1}{\varepsilon_0} \int_0^{\varepsilon_0} P_0(\Delta t_{ij}/h)dh; \quad (7)$$

$$P_1(\Delta t_{ij}) = \frac{1}{\varepsilon_1} \int_0^{\varepsilon_1} P_1(\Delta t_{ij}/h)dh.$$

В (7) нулевой уровень привязан к внешней линии датчиков, что в общем не является принципиальным. Подставляя (6) в (7) и вычисляя интеграл, получим выражение для распределения:

$$P_0(\Delta t_{ij}) = a_{kj}v(F(0, M_{0ij}, \sigma_{0ij}) - F(-\varepsilon_0, M_{0ij}, \sigma_{0ij}))/\varepsilon_0, \quad (8)$$

где $M_{0ij} = a_{kj}\left(\sqrt{\Delta_{kj}^2 + d^2} - \Delta_{ki} - \Delta t_{ij}v\right)$; $\sigma_{0ij} = a_{kj}\sigma_tv$; $F(x, M_0, \sigma_0)$ — функция нормального распределения с математическим ожиданием M_0 и среднеквадратическим отклонением σ_0 . По аналогии можно найти выражение для распределения

$$P_1(\Delta t_{ij}) = a_{kj}v(F(\varepsilon_1, M_{1ij}, \sigma_{1ij}) - F(0, M_{1ij}, \sigma_{1ij}))/\varepsilon_1. \quad (9)$$

Здесь $M_{1ij} = M_{0ij} = a_{kj}\left(\sqrt{\Delta_{kj}^2 + d^2} - \Delta_{ki} - \Delta t_{ij}v\right)$; $\sigma_{1ij} = \sigma_{0ij} = a_{kj}\sigma_tv$.

Выражение (3), полученное для датчиков внешней линии $\bar{t}_{i\text{внешн}}$, должно быть уточнено для датчика, ближайшего к нарушителю (при $i = k$), поскольку в таком случае $\Delta_{ki} = 0$, а значит, предполагать, что расстояние h мало по сравнению с Δ_{ki} , нельзя. При этом $\bar{t}_{i\text{внешн}} = h/v$ и

$$P_{0,1}(\Delta t_{kj}/h) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_t} \exp\left(\left(\Delta t_{kj} - \left(\sqrt{\Delta_{kj}^2 + d^2} - h(1 \mp 1/a_{kj})\right)/v\right)^2 / 2\sigma_t^2\right).$$

Здесь знак « $-$ » соответствует плотности вероятности $P_0(\Delta t_{ij})$, а знак « $+$ » — $P_1(\Delta t_{ij})$. Подставляя это выражение в (7) и вычисляя интеграл, получим уравнение для безусловных распределений $P_0(\Delta t_{kj})$ и $P_1(\Delta t_{kj})$:

$$P_0(\Delta t_{kj}) = b_{0kj}v(F(\varepsilon_0, M_{0kj}, \sigma_{0kj}) - F(0, M_{0kj}, \sigma_{0kj}))/\varepsilon_0. \quad (10)$$

Здесь $b_{0kj} = a_{kj}/(a_{kj} - 1)$; $M_{0kj} = b_{0kj}(\sqrt{\Delta_{kj}^2 + d^2} - \Delta t_{kj}v)$; $\sigma_{0kj} = b_{0kj}\sigma_tv$. По аналогии с (10) для распределения $P_1(\Delta t_{kj})$ имеем

$$P_1(\Delta t_{kj}) = b_{1kj}v(F(\varepsilon_1, M_{1kj}, \sigma_{1kj}) - F(0, M_{1kj}, \sigma_{1kj}))/\varepsilon_1, \quad (11)$$

где $b_{1kj} = a_{kj}/(a_{kj} + 1)$; $M_{1kj} = b_{1kj}(\sqrt{\Delta_{kj}^2 + d^2} - \Delta t_{kj}v)$; $\sigma_{1kj} = b_{1kj}\sigma_tv$. На основе измеренных относительных задержек импульса шага на группе датчиков $\{\Delta t_{i,j}\}$, расположенных на внутренних и внешних линиях системы, принимается решение о местоположении источника этого импульса. Проверка гипотез о нахождении объекта в зоне контроля (гипотеза H_1) либо вне её (гипотеза H_0) при использовании критерия отношения правдоподобия предполагает вычисление статистики критерия вида $\Lambda_1(\{\Delta t_{i,j}\}) = \ln(P_1(\{\Delta t_{i,j}\})/P_0(\{\Delta t_{i,j}\}))$ и её сравнение с нулевым порогом. Здесь $P_1(\{\Delta t_{i,j}\})$ и $P_0(\{\Delta t_{i,j}\})$ — многомерные плотности вероятности относительных задержек при различных положениях объекта. Они находятся в результате подстановки в (1) распределений (8)–(11). Индекс 1 в обозначении логарифма отношения правдоподобия свидетельствует о том, что решение принимается по единственному импульсу в сейсмическом сигнале (одному шагу нарушителя). В итоге получим следующее выражение для одношагового логарифма отношения правдоподобия:

$$\begin{aligned} & \Lambda_1(\{\Delta t_{i,j}\}) = \\ & = \sum_{i=-n, i \neq 0}^n \sum_{j=-n}^n \ln \left(\frac{\varepsilon_0(F(\varepsilon_1, M_{1k+i, k+j}, \sigma_{1k+i, k+j}) - F(0, M_{1k+i, k+j}, \sigma_{1k+i, k+j}))}{\varepsilon_1(F(0, M_{0k+i, k+j}, \sigma_{0k+i, k+j}) - F(-\varepsilon_0, M_{0k+i, k+j}, \sigma_{0k+i, k+j}))} \right) + \\ & + \sum_{j=-n}^n \ln \left(\frac{\varepsilon_0 b_{1k, k+j}(F(\varepsilon_1, M_{1k, k+j}, \sigma_{1k, k+j}) - F(0, M_{1k, k+j}, \sigma_{1k, k+j}))}{\varepsilon_1 b_{0k, k+j}(F(\varepsilon_0, M_{0k, k+j}, \sigma_{0k, k+j}) - F(0, M_{0k, k+j}, \sigma_{0k, k+j}))} \right). \quad (12) \end{aligned}$$

Анализируя ошибки первого и второго рода, сравним эффективность правила (12) с алгоритмом, напрямую оценивающим координаты обнаруженного объекта и определяющим принадлежность точки с этими координатами заданной зоне.

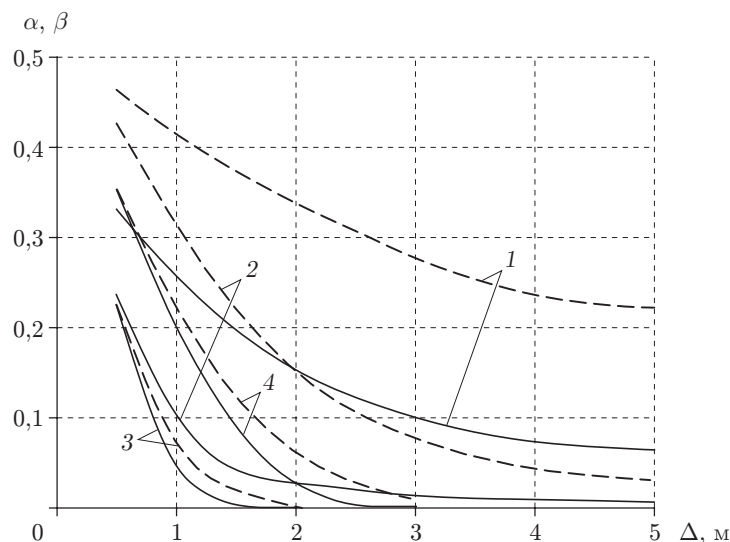


Рис. 3. Зависимости ошибок первого и второго рода от расстояния между нарушителем и внешней линией датчиков: кривые 1 — α , $\sigma = 2$ м; 2 — α , $\sigma = 1$ м; 3 — β , $\sigma = 1$ м; 4 — β , $\sigma = 2$ м (штриховые кривые — алгоритм, использующий прямую оценку координат нарушителя (максимально правдоподобный критерий), сплошные — критерий отношения правдоподобия Λ_1)

Графики зависимостей вероятностей ошибок α и β от расстояния Δ между нарушителем и внешней линией датчиков при двух значениях СКО оценок координат приведены на рис. 3. Расстояние между соседними датчиками в линии составляет 5 м, между линиями датчиков $d = 10$ м, группа состоит из пяти смежных датчиков линии (т. е. $N = 5$). Эффективность правила значительно повысится, если решение будет приниматься по нескольким шагам. Можно показать, что статистика отношения правдоподобия для M шагов трансформируется следующим образом:

$$\Lambda_M(\{\Delta t_{1,j}\}, \{\Delta t_{2,j}\}, \dots, \{\Delta t_{M,j}\}) = \sum_{l=1}^M \Lambda_1(\{\Delta t_{li,j}\}). \quad (13)$$

Правило принятия решения $L(\Lambda_M)$ с использованием статистики (13) может быть получено на основе критерия Неймана — Пирсона, обеспечивающего вероятности ложной тревоги на уровне не выше α при минимальной вероятности пропуска цели β (или максимальной вероятности правильного обнаружения $D = 1 - \beta$). Это правило предусматривает сравнение статистики Λ_M с порогом C , найденным в результате решения уравнения $\int_C^\infty P(\Lambda_M/H_0) = \alpha$. Критерий Неймана — Пирсона предполагает, что размер выборки (количество импульсов шагов), по которому принимается решение, фиксирован и равен M . В ситуации реальной работы охранной системы имеющийся объём не всегда достаточен для получения приемлемого значения D (при заданном α). Если на некоторых датчиках невозможно обнаружить импульс шага, например, из-за низкого отношения сигнал/шум, то наблюдение, связанное с этим импульсом, не может использоваться для принятия решения. То, что решающая статистика отношения правдоподобия по нескольким шагам допускает представление (13), позволяет применять последовательный критерий Вальда [9], с помощью которого можно вынести решение с заданным качеством за минимальное

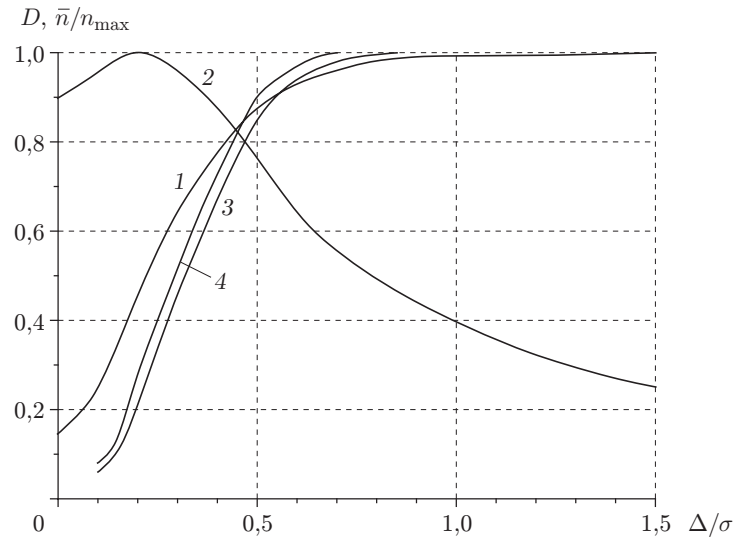


Рис. 4. Рабочие характеристики критериев Вальда и Неймана — Пирсона: кривая 1 — D , $\alpha = 5 \cdot 10^{-4}$, последовательный критерий Вальда; 2 — \bar{n}/n_{\max} , $n_{\max} = 18$ шагов, последовательный критерий Вальда; 3 — D , $\alpha = 5 \cdot 10^{-4}$, $n = 10$ шагов, критерий Неймана — Пирсона; 4 — D , $\alpha = 5 \cdot 10^{-4}$, $n = 15$ шагов, критерий Неймана — Пирсона

(нефиксированное) количество наблюдений (шагов нарушителя). Соответствующее последовательное решающее правило для k -го шага формулируется как

$$L_k = \begin{cases} H_0^*, & \Lambda_k(\mathbf{T}_1, \mathbf{T}_2, \dots, \mathbf{T}_k) < -c_0, \\ \text{Решение не принято}, & -c_0 \leq \Lambda_k(\mathbf{T}_1, \mathbf{T}_2, \dots, \mathbf{T}_k) \leq c_1, \\ H_1^*, & \Lambda_k(\mathbf{T}_1, \mathbf{T}_2, \dots, \mathbf{T}_k) > c_1. \end{cases} \quad (14)$$

На рис. 4 приведены рабочие характеристики алгоритма Вальда (зависимости вероятности правильного обнаружения $D = 1 - \beta$ от отношения расстояния между нарушителем и внешней линией датчиков к СКО измерения координат (т. е. Δ/σ) (кривая 1) и среднее количество шагов до принятия решения (кривая 2) при фиксированном значении вероятности ложной тревоги α). Для сравнения на том же графике показаны рабочие характеристики алгоритма принятия решения на основе критерия Неймана — Пирсона (кривые 3, 4), которые проигрывают последовательному правилу Вальда.

Заключение. Использование алгоритма принятия решения об обнаружении нарушителя в зоне контроля либо вне её даёт возможность существенно повысить надёжность работы сейсмической охранной системы в случае размещения на активно посещаемой территории. Применение процедуры обнаружения на основе последовательного критерия Вальда, которая может быть реализована в рамках сейсмической системы охраны, позволяет принимать решение по минимальному количеству шагов нарушителя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Магауенов Р. Г. Системы охранной сигнализации: основы теории и принципы построения: Учеб. пособие. М.: Горячая линия-Телеком, 2008. 496 с.
2. Сейсмические средства обнаружения. Теория и практика построения /Под ред. И. Н. Крюкова. М.: Радиотехника, 2014. 216 с.

3. **Алямкин С. А., Нежевенко Е. С.** Восстановление траектории движущегося объекта в сейсмической системе обнаружения при ограниченном количестве датчиков // Автоматика и телемеханика. 2014. № 2. С. 31–39.
4. **Райфельд М. А., Коробов В. В.** Оценка координат в сейсмической системе наблюдения при неточном знании скорости распространения сигнала в грунте // ДАН ВШ РФ. 2012. № 2. С. 87–94.
5. **Мархакшинов А. Л., Спектор А. А.** Оценивание локальных характеристик движения объекта в сейсмической системе охраны // Автометрия. 2009. **45**, № 5. С. 48–53.
6. **Liang Z., Wei J., Zhao J. et al.** The statistical meaning of kurtosis and its new application to identification of persons based on seismic signals // Sensors. 2008. **8**, N 8. P. 5106–5119. DOI: 10.3390/s8085106.
7. **Райфельд М. А., Спектор А. А.** Непараметрический метод обнаружения сигналов от сейсмически активных объектов // Автометрия. 2005. **41**, № 6. С. 88–97.
8. **Спектор А. А., Филатова С. Г.** Оценка временного положения импульсов в сейсмических системах наблюдения на основе марковской фильтрации // Автометрия. 2008. **44**, № 4. С. 68–74.
9. **Теория обнаружения сигналов** /Под ред. П. А. Бакута. М.: Радио и связь, 1984. 440 с.

Поступила в редакцию 25 ноября 2015 г.
