

И. Ф. ШИШКИН, А. Г. СЕРГУШЕВ

К ВОПРОСУ ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИБОРОВ ПОИСКА ОБЪЕКТОВ

Обсуждаются вопросы эффективности и качества приборов поиска различных объектов с использованием аппарата теории поиска. Рассматриваются такие характеристики, как вероятность обнаружения, служащая главным показателем качества прибора, и вероятность контакта, позволяющая учитывать влияние помех на процесс поиска. Выводятся уравнения для вероятности обнаружения и показателя, характеризующего производительность поиска.

Ключевые слова: поиск объектов, эффективность приборов поиска, вероятность обнаружения, вероятность контакта, производительность поиска.

Поиск различных объектов в окружающем пространстве — распространенная область применения технических средств. Для классификации приборов используются различные физические принципы, методы измерений, способы обработки и отображения информации и т.д. По виду и диапазону регистрируемых физических величин приборы поиска можно подразделить на оптические, радиотехнические, электрические, магнитные, акустические (в том числе, гидроакустические), химические, теплотрические, радиационные и т.п.; по режиму работы — на активные, полуактивные и пассивные; по дальности действия — на контактные и дистанционные; по способу применения — на стационарные и передвижные. Но даже такая, далеко не полная классификация показывает, что разработка, производство и эксплуатация приборов поиска составляет обширную сферу деятельности. В этих условиях обеспечение высокого качества выпускаемой продукции является сложной научной, технической и организационной задачей.

Согласно ГОСТ Р ИСО 9000-2000 „качество продукции — это степень соответствия собственных характеристик продукции требованиям“. Характеристики качества делятся на собственные и присвоенные. Этим же стандартом определен термин „управление качеством продукции“; одним из основных этапов управления является оценка качества.

Наиболее важное свойство, определяющее качество и эффективность приборов поиска, — способность обнаруживать те или иные объекты. Это свойство имеет вероятностно-статистическую природу, вследствие чего обнаружение объекта поиска относится к разряду случайных событий. При этом расчету может подлежать лишь вероятность обнаружения, которая характеризует степень использования продукции по назначению и поэтому является главным показателем эффективности и качества приборов поиска. Методу ее расчета и посвящена настоящая статья.

Целью поисковых действий является обнаружение объекта поиска [1]. При непрерывном пуассоновском поиске, как и в реальных условиях, обнаружение объекта за время t — случайное событие, характеризующееся вероятностью $P(t)$. Вероятность того, что объект не будет обнаружен за это время, равна $1 - P(t)$. Вероятность обнаружения объекта в последующий

бесконечно малый промежуток времени dt равна $\gamma(t)dt$. Следовательно, вероятность того, что объект поиска не будет обнаружен за время $t + dt$, определяется как

$$1 - P(t + dt) = [1 - P(t)][1 - \gamma(t)dt].$$

При $dt \rightarrow 0$ получается дифференциальное уравнение с разделяющимися переменными:

$$\frac{dP(t)}{dt} = \gamma(t)[1 - P(t)],$$

которое при начальном условии $P(0) = 0$ имеет решение

$$P(t) = 1 - \exp\left[-\int_0^t \gamma(t) dt\right],$$

где, по определению [1], $\int_0^t \gamma(t) dt = u(t)$ — математическое ожидание числа обнаружений за время поиска, т.е. потенциал обнаружения.

Таким образом, окончательно

$$P(t) = 1 - \exp[-u(t)]. \quad (1)$$

Вероятность обнаружения является неотрицательной функцией времени и монотонно возрастает с увеличением потенциала обнаружения.

Поскольку цель поиска состоит в обнаружении объекта, постольку вероятность обнаружения есть целевая функция. Ожидаемая мера достижения поставленной цели с помощью приборов поиска определяет их эффективность и качество, а вероятность обнаружения является количественной характеристикой, выражающей эту меру. Помимо соответствия цели этот показатель удовлетворяет и таким требованиям, как наглядность, простота вычисления, критичность к условиям применения и техническим характеристикам приборов поиска. Важным достоинством выбранного показателя является ограниченность его значений.

Из выражения (1) следует, что для вычисления вероятности $P(t)$ необходимо определить потенциал обнаружения $u(t)$. Так как

$$u(t_2) = \int_0^{t_2} \gamma(t) dt = \int_0^{t_1} \gamma(t) dt + \int_{t_1}^{t_2} \gamma(t) dt = u(t_1) + \int_{t_1}^{t_2} \gamma(t) dt,$$

а $\gamma(t) \geq 0$ (по определению) и $\int_{t_1}^{t_2} \gamma(t) dt \geq 0$, то при $t_2 > t_1$ $u(t_2) \geq u(t_1)$, т.е. потенциал обнаружения является монотонной возрастающей неотрицательной функцией времени. Для его вычисления необходимо знать интенсивность обнаружения $\gamma(t)$, которая при пуассоновском

поиске не зависит от времени: $\gamma(t) = \gamma = \text{const}$.

Это соответствует предположению о равномерной плотности распределения вероятности местоположения объекта поиска (α) в обследуемом пространстве. Если объект достоверно находится в пространстве поиска, то $\alpha = 1/Q$, где Q — геометрический размер пространства.

Отсюда

$$\gamma = \Pi/Q, \quad (2)$$

$$u(t) = \int_0^t \gamma dt = \Pi t / Q, \quad P(t) = 1 - \exp(-\Pi t / Q),$$

где Π — математическое ожидание площади, обследуемой в единицу времени, т.е. производительность поиска.

При поиске с возрастающей интенсивностью каждый участок пространства обследуется только один раз. Соответственно плотность равномерного распределения вероятности местоположения объекта в течение времени возрастает:

$$\alpha = \frac{1}{Q - \Pi t}, \quad \gamma(t) = \frac{\Pi}{Q - \Pi t}.$$

Подставляя в последнее выражение значение Π из уравнения (2), получаем

$$\gamma(t) = \frac{\gamma}{1 - \gamma t},$$

откуда следует, что потенциал обнаружения

$$u(t) = -\ln(1 - \gamma t),$$

а вероятность обнаружения равна потенциалу обнаружения при пуассоновском поиске:

$$P(t) = 1 - \exp[\ln(1 - \gamma t)] = \gamma t = \Pi t / Q.$$

Для вычисления значения Π и установления соответствия вероятности обнаружения объекта техническим характеристикам прибора поиска введем необходимые определения [2, 3].

Определение 1. Линией фронта поиска называется прямая, перпендикулярная вектору относительной скорости \mathbf{v}_p .

Определение 2. Проекция объекта поиска на линию фронта поиска есть фронтальная проекция цели $l_{фр}$.

Определение 3. Величина $F = 2D + l_{фр}$ — фронт поиска, где D — дальность действия прибора.

Производительность поиска при случайном курсе φ носителя прибора поиска относительно объекта с плотностью распределения курса $f(\varphi)$ определяется следующим образом:

$$\Pi = \int_0^{2\pi} f(\varphi) F(\varphi) v_p(\varphi) d\varphi.$$

Плотность распределения курса, как правило, равномерная:

$$f(\varphi) = \frac{1}{2\pi} \quad \text{при} \quad 0 < \varphi \leq 2\pi.$$

Таким образом, производительность поиска определяется двумя составляющими:

$$\Pi = \Pi_c + \Pi_{пр}.$$

Первая составляющая определяет собственную производительность поиска:

$$\Pi_c = 2D \mathbf{v}_p,$$

где вектор \mathbf{v}_p , с учетом $v_p = \sqrt{v_H^2 - v_C^2 - 2v_H v_C \cos \varphi}$, выражается через средние скорости объекта поиска (v_C), если он движется, и носителя прибора поиска (v_H) с помощью полного эллиптического интеграла второго рода $E(k, \pi/2)$:

$$\mathbf{v}_p = \frac{2(v_H + v_C)}{\pi} E(k, \pi/2), \quad k = \frac{2\sqrt{v_H v_C}}{v_H + v_C}.$$

Вторая составляющая $\Pi_{\text{пр}}$ определяет производительность поиска, приобретенную за счет пространственной протяженности объекта поиска (если он таковой обладает):

$$\Pi_{\text{пр}} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} [I_{\text{фр}}(\varphi)] \gamma_p(\varphi) d\varphi.$$

Величина $\Pi_{\text{пр}}$ характеризует постоянный выигрыш в эффективности при поиске протяженных объектов по сравнению с поиском объектов, относящихся к малоразмерным, и рассчитывается по специальной методике, приведенной в работах [2, 3].

Попадание объекта поиска в зону действия приборов поиска еще не означает, что он будет наверняка обнаружен. Функционирование приборов поиска подвержено воздействию помех, что и делает обнаружение объекта случайным событием. Это обусловлено тем, что полезный сигнал от объекта поиска регистрируется аппаратурой обнаружения на фоне случайных помех, и принятие решения о наличии полезного сигнала характеризуется вероятностью его правильного обнаружения. Вероятность правильного обнаружения тем выше, чем ниже некоторое пороговое значение сигнала на выходе устройства обнаружения. Поэтому при установке порога обнаружения сигнала должен использоваться критерий, позволяющий выбрать оптимальное значение порога, так как с его уменьшением растет вероятность ложных тревог. Вероятность правильного обнаружения при оптимальном пороге называется вероятностью контакта.

В режиме поиска основными задачами прибора являются обнаружение и распознавание объекта [4, 5]. Модель приемного устройства прибора поиска представляется в виде схемы оптимального обнаружителя и оптимальной схемы принятия решения в условиях неопределенности [4]. В этих условиях приемник должен обеспечивать принятие решения о справедливости или несправедливости одной из двух статистических гипотез о значении некоторого параметра λ , который априори неизвестен и определяет наличие или отсутствие полезного сигнала. Параметр λ может принимать только одно из двух значений: $\lambda=1$ (в принимаемом сигнале есть полезный сигнал от объекта поиска) и $\lambda=0$ (сигнал от объекта поиска отсутствует).

Разработанные к настоящему времени методы проверки параметрических гипотез позволяют принимать оптимальное решение на основе исследования отношения правдоподобия. Это отношение является во многих случаях достаточной статистикой для принятия решения о наличии в принимаемом сигнале полезного сигнала от объекта поиска [4, 5]. При этом решение о наличии полезного сигнала от объекта поиска принимается по результатам наблюдения принимаемого сигнала на интервале времени $(0, T)$, называемого реализацией. Иными словами, отношение правдоподобия содержит всю информацию о параметре λ , имеющуюся в реализации. Поясним это на конкретном примере принятия решения о параметре λ по результатам наблюдения напряжения (тока) $y(t)$ на выходе контактного датчика прибора поиска на конечном интервале времени $(0, T)$, что может быть записано следующим образом:

$$y(t) = \lambda s(t) + n(t); \quad 0 \leq t \leq T,$$

где $s(t)$ — ожидаемый сигнал, $n(t)$ — шум, представляющий собой реализацию случайного процесса гауссова типа.

Предположим, что существуют альтернативные гипотезы относительно параметра λ , а именно: $\lambda=0$, когда реализация сигнала $y(t)$ представляет собой только флюктуационный шум (гипотеза H_0); $\lambda=1$, если реализация содержит суперпозицию сигнала и флюктуационного шума (гипотеза H_1). Предположим, далее, что гипотезам H_0 и H_1 соответствуют многомерные плотности распределения вероятности: $p_0(y)$ и $p_1(y)$. Статистическая задача при-

нения решения в данном случае состоит в том, чтобы по результатам наблюдения реализации к моменту времени $t = T$ определить, какая из гипотез справедлива: H_0 или H_1 . Как отмечалось ранее, решение принимается на основе анализа отношения правдоподобия

$$m(y) = \frac{p_1(y)}{p_0(y)} \text{ при } t = T$$

путем сравнения его с некоторым пороговым значением m_0 .

Если $m(y) < m_0$, $t = T$, то принимается решение об отсутствии сигнала $s(t)$ в рассматриваемой реализации ($\lambda = 0$); если $m(y) > m_0$, полагается справедливой гипотеза H_1 , т.е. сигнал $s(t)$ в реализации присутствует.

Возможны два вида ошибок в рассматриваемой задаче: ошибка первого рода — полагается справедливой гипотеза H_1 , тогда как в действительности справедлива гипотеза H_0 , т.е. имеет место ложная тревога; ошибка второго рода — принимается гипотеза H_0 , тогда как справедлива гипотеза H_1 , т.е. прибором поиска допущен пропуск цели.

В зависимости от имеющейся информации о сигнале и помехе, а также принятого критерия обнаружения сигнала структура и характеристики оптимального приемника сигналов могут быть различными. Обычно в поисковых задачах используется критерий Неймана — Пирсона, в соответствии с которым при фиксированной вероятности ложной тревоги ($P_{л.тр}$) минимизируется вероятность пропуска объекта поиска или максимизируется вероятность его правильного обнаружения $P_{обн}$. Если $n(t)$ представляет собой реализацию белого гауссова шума, и речь идет об обнаружении, к примеру, радиосигнала, то в качестве отношения правдоподобия $m(y)$ может рассматриваться параметр q , определяемый соотношением [4]

$$q = \sqrt{2W/N},$$

где W — энергия сигнала, N — спектральная плотность шума.

Параметр q сравнивается с параметром h , который определяется принятым значением вероятности ложной тревоги $P_{л.тр}$.

В случае когда параметры сигнала полностью известны и шум белый, вероятность правильного обнаружения и вероятность ложной тревоги определяются следующими соотношениями:

$$P_{обн} = 0,5 - \Phi_0\left(\frac{h}{q} - q\right); \quad (3)$$

$$P_{л.тр} = 0,5 - \Phi_0\left(\frac{h}{q}\right); \quad (4)$$

$$\Phi_0(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x \exp(-r^2/2) dt, \quad (5)$$

где $\Phi_0(x)$ — функция Лапласа (находится из таблицы спецфункций).

Из уравнений (4), (5) следует, что при заданной вероятности ложной тревоги вероятность правильного обнаружения определяется только отношением энергии сигнала к спектральной плотности шума в момент времени $t = T$ и не зависит от формы сигнала. Последний может прерываться в течение интервала наблюдения и модулироваться. Важно при этом исключить потерю энергии сигнала в процессе его преобразования на интервале наблюдения $(0, T)$. Оптимальное устройство обработки сигнала и шума должно представлять собой согласованный фильтр.

Анализ формул (3)—(5) показывает, что при фиксированном значении энергии сигнала W путем увеличения спектральной плотности шума N вероятность правильного обнаружения радиосигнала может быть сколь угодно малой, даже в том случае, когда его параметры полностью известны, а приемник является оптимальным.

Изложенный в настоящей статье теоретический подход к оценке эффективности и качества приборов поиска объектов по характеристикам назначения в дальнейшем может быть использован для решения конкретных практических задач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Динер И. Я. Исследование операций. Л.: Изд-во ВМОЛТУА, 1969. 605 с.
2. Шишкин И. Ф., Сергушев А. Г. Эффективность поисковых средств // Проблемы машиноведения и машиностроения: Межвуз. сб. СПб.: СЗТУ, 2003. Вып. 30. С. 42—45.
3. Шишкин И. Ф., Сергушев А. Г. Теория поиска // Тр. Междунар. семинара „Интеграция информации и геоинформационные системы — 2005“ / Санкт-Петербург. Дом ученых РАН. СПб., 2005. С. 167—169.
4. Тихонов В. И. Статистическая радиотехника. М.: Радио и связь, 1982. 624 с.
5. Вакин С. А., Шустов Л. Н. Основы радиоэлектронной борьбы: Учеб. пособие. М.: Изд-во ВВИА, 1998. Ч. 1. 435 с.

Сведения об авторах

Игорь Федорович Шишкин

— д-р техн. наук, профессор; Северо-Западный государственный заочный технический университет, кафедра метрологии, Санкт-Петербург;
E-mail: kaf_metro@nwpi.ru

Алексей Геннадьевич Сергушев

— аспирант; Северо-Западный государственный заочный технический университет, кафедра метрологии, Санкт-Петербург;
E-mail: atel@fromgu.com

Рекомендована кафедрой
метрологии

Поступила в редакцию
19.11.08 г.