УДК 621.396.6

В.Е. САВАНЕВИЧ

Объединенный научно-исследовательский институт Вооруженных Сил, Украина

РЕШАЮЩЕЕ ПРАВИЛО ОБНАРУЖЕНИЯ ДЕТЕРМИНИРОВАННОЙ ТРАЕКТОРИИ

Получены решающие правила обнаружения детерминированной траектории космического объекта с известной и неизвестной ЭПР при наличии и отсутствии порогов в устройствах первичной обработки (УПО). На основе результатов статистического моделирования делается вывод о возможности использования в качестве достаточной статистики суммы квадратов амплитуд отметок при высоких порогах в УПО и малом числе обзоров.

радиолокационные станции, обнаружение детерминированной траектории космического объекта, пороги в устройствах первичной обработки

Введение

В настоящее время в полной мере проявилось противоречие между перспективами развития космических объектов (КО) как объектов локации и локационных средств. С одной стороны продолжают уменьшаться габариты КО. С другой – практически исчерпаны возможности по наращиванию количественных характеристик (потенциала) локационных средств. Разрешение указанного противоречия возможно исключительно за счет разработки алгоритмов обработки локационной информации максимально свободных от ее потерь.

В работах [1, 2] для повышения показателей качества обнаружения траекторий КО предлагалось использовать послепороговое некогерентное накопление. При этом предполагалось, что статистикой обнаружителя траектории КО является сумма квадратов амплитуд отметок (сигналов, превысивших порог в устройствах первичной обработки). Использование указанной выше статистики обосновывалось ее использованием в обнаружителях, основанных на некогерентном накоплении. Соответствующее решающее правило (РП) не синтезировалось, оптимальная статистика не определялась. Показатели качества соответствующих обнаружителей рассчитывались при условии, что статистика задана.

Целью статьи является синтез решающего правила обнаружителя траектории.

Постановка задачи

Космический объект находится в зоне обзора (ЗО) T обзоров. На каждом обзоре для анализа отбирается по одному элементарному объему разрешения (ЭОР). При наличии объекта в ЗО на каждом обзоре имеет место отраженный от него сигнал. Рассматривается случай сигнала, флюктуирующего со случайными амплитудой и начальной фазой с амплитудным множителем, распределенным по закону Релея [3].

Флюктуации амплитуд относятся к классу медленных, не искажающих структуру сигнала [3]. Сигналы на разных обзорах независимы. Предполагается, что обнаружение таких сигналов (на каждом обзоре) производится путем сравнения с порогом значения модуля корреляционного интеграла [3], которое вычисляется квадратурным детектором. Модуль корреляционного интеграла A на выходе квадратурного детектора распределен по закону Релея с дисперсиями 1 и 1 + $0{,}5q^2$ при наличии и отсутствии объекта соответственно:

$$P_{y/0}(A) = A\exp\left(-A^2/2\right);$$

$$P_{y/\theta_m}(A)=\frac{A}{1+0{,}5q^2}\exp\left(-\frac{A^2}{2+q^2}\right), \qquad (2)$$

где $q^2=\dfrac{2Э}{N_0}$ – отношение сигнал/шум (ОСШ) сигнала по мощности; $Э$ – энергия сигнала; N_0 – спектральная плотность шума.

ОСШ сигнала t-го обзора определяется выражением

$$q_t^2=П_{РЛС}(\varepsilon,\gamma)\frac{\sigma_ц}{(d_t/d_0)^4}, \qquad (3)$$

где $П_{РЛС}(\varepsilon,\gamma)$ – потенциал радиолокационной станции (РЛС), зависящий от азимута ε и угла места γ объекта, вычисленный на дальности d_0; $\sigma_ц$ – эффективная площадь рассеивания (ЭПР) объекта; d_t – дальность до объекта на t-м обзоре.

С учетом того, что логарифм отношения правдоподобия, соответствующий выражениям (1), (2) и используемый в обнаружителе сигнала, пропорционален квадрату модуля корреляционного интеграла, предполагается, что он является одним из параметров отметки и называется квадратом ее амплитуды.

Существует $N_{лт}$ диапазонов дальности, на каждом из которых установлено свое значение порога в устройствах первичной обработки (УПО). Условная вероятность формирования на t-м обзоре отметки равна [3]:

$$D_t=F_t^{1/(1+0{,}5q_t^2)}, \qquad (4)$$

где F_t – условная вероятность ложной тревоги в ЭОР на дальности d_t.

Необходимо синтезировать правило, в соответствии с которым принимается решение о наличии (отсутствии) объекта в ЗО в соответствии с одним из критериев байесовской группы, либо по критерию Неймана-Пирсона [4].

Решающее правило может быть синтезировано в предположении о наличии либо отсутствии порога в УПО; в предположении о том, что объект движется (ОСШ от обзора к обзору изменяется) либо находится в одном и том же ЭОР ($q_t=q$ для $t=\overline{1,T}$); в предположении о том, что ЭПР объекта $\sigma_ц$ известна (известна совокупность значений q_t) либо не известна. В ряде случаев допустим отход от оптимальных правил в пользу реализуемости обнаружителя.

Решающее правило обнаружения неподвижного объекта при отсутствии порогов в УПО [3] имеет вид

$$\sum_{t=1}^{T}A_t^2\ge П_1, \qquad (5)$$

где $$П_1=\frac{4+2q^2}{q^2}(\ln П_0+T\ln(1+0{,}5q^2)), \qquad (6)$$

а $П_0$ – порог, определяемый исходя из заданного критерия обнаружения [4].

В РП (5) в качестве статистики используется сумма квадратов амплитуд отметок, сформированных на T обзорах, причем при использовании критерия Неймана-Пирсона отпадает необходимость знания ОСШ и, как следствие, ЭПР объекта.

Решающее правило обнаружения движущегося объекта с известной ЭПР при отсутствии порогов в УПО. Так как пороги в УПО отсутствуют, то $F_t=1$, $D_t=1$. Однако ОСШ сигнала на t-м обзоре определяется выражением (3) и зависит от дальности d_t. Логарифм отношения правдоподобия по данным T обзоров можно представить выражением

$$\ln l=\sum_{t=1}^{T}\ln(1+0{,}5q_t^2)+\sum_{t=1}^{T}\frac{q_t^2}{4+2q_t^2}A_t^2. \qquad (7)$$

Соответствующее (7) решающее правило имеет следующий вид:

$$\sum_{t=1}^{T}\lambda_t A_t^2>П_2, \qquad (8)$$

где λ_t – весовой множитель t-го обзора, равный

$$\lambda_t=\frac{q_t^2}{4+2q_t^2}; \qquad (9)$$

$$П_2=\ln П_0+\ln\prod_{t=1}^{T}(1+0{,}5q_t^2). \qquad (10)$$

Следовательно, решающее правило обнаружения движущегося объекта с известной ЭПР при отсутствии порогов в УПО (8) предписывает использовать в качестве решающей статистики взвешенную сумму квадратов амплитуд отметок. Причем весовые множители на обзорах определяются ОСШ соответствующих сигналов (дальностями объектов на различных обзорах). Значение весовых множителей (9) тем больше, чем меньше дальность объекта на данном обзоре. Выражение (9) с учетом выражения (3) можно записать в виде

$$\lambda_t = \frac{\Pi_{РЛС}(\varepsilon,\gamma)\sigma_ц}{4(d_t/d_0)^4 + 2\Pi_{РЛС}(\varepsilon,\gamma)\sigma_ц}.$$

Таким образом, для использования решающего правила обнаружения движущегося объекта с известной ЭПР при отсутствии порогов в УПО (8) необходимо знать ЭПР объекта (предполагается, что дальности известны, так как отметка содержит код дальности с достаточной для реализации (8) точностью). Данное требование на практике является достаточно жестким. Однако в ряде случаев известна ЭПР обнаруживаемого объекта.

Решающие правила обнаружения движущегося и неподвижного объекта с известной ЭПР при наличии порогов в УПО. За T зондирований из-за наличия порогов в УПО только K раз будет сформирована отметка ($K \le T$). Перенумеруем обзоры (зондирования) так, что порог в УПО превышен на K первых из них. Выражения для вероятности формирования K отметок на определенных обзорах, при условии наличия и отсутствия объекта имеют вид:

$$P^{(УПО)}_{y/\theta_m} = \prod_{i=1}^{K} D_{t(i)} \prod_{i=K+1}^{T} (1 - D_{t(i)});$$

$$P^{(УПО)}_{y/0} = \prod_{i=1}^{K} F_{t(i)} \prod_{i=K+1}^{T} (1 - F_{t(i)}). \tag{11}$$

Закон распределения кода амплитуды отметки при наличии и отсутствии объекта согласно (1), (2) определяется выражением

$$P_{y/\theta_m}(A_t) = \frac{1}{D_t} 1(A_t - \Pi_{УПОFt}) \frac{A_t}{1+0{,}5q_t^2} \exp\left(-\frac{A_t^2}{2+q_t^2}\right),$$

$$P_{y/0}(A_t) = \frac{1}{F_t} 1(A_t - \Pi_{УПОFt}) A_t \exp\left(-A_t^2/2\right), \tag{12}$$

где $1(x-y) = \begin{cases} 1, \text{ при } x \ge y; \\ 0, \text{ при } x < y; \end{cases}$

$\Pi_{УПОFt} = \sqrt{-2\ln F_t}$ – значение порога в УПО на t-м обзоре.

Теперь можно записать выражение для совместного закона распределения формирования K отметок на определенных обзорах с соответствующими амплитудами:

$$P_{y/\theta_m} = \prod_{i=1}^{K} D_{t(i)} \frac{1}{D_{t(i)}} 1\left(A_{t(i)} - \Pi_{УПОFt(i)}\right) \times$$
$$\times \frac{A_{t(i)}}{1+0{,}5q_{t(i)}^2} \exp\left(\frac{-A_{t(i)}^2}{2+q_{t(i)}^2}\right) \prod_{i=K+1}^{T} (1 - D_{t(i)}); \tag{13}$$

$$P_{y/0} = \prod_{i=1}^{K} F_{t(i)} \frac{1}{F_{t(i)}} 1\left(A_{t(i)} - \Pi_{УПОFt(i)}\right) A_{t(i)} \times$$
$$\times \exp\left(-A_{t(i)}^2/2\right) \prod_{i=K+1}^{T} \left(1 - F_{t(i)}\right). \tag{14}$$

Условие $A_{t(i)} \ge \Pi_{УПОFt(i)}$ для амплитуды отметки выполняется всегда, поэтому единичную функцию $1(A_{t(i)} - \Pi_{УПОFt(i)})$ в дальнейшем можно опустить.

На основе выражений (13), (14) можно записать выражение для логарифма отношения правдоподобия

$$\ln l = -\sum_{i=1}^{K} \ln\left(1 + 0{,}5q_{t(i)}^2\right) + \sum_{i=1}^{K} \frac{q_{t(i)}^2}{4+2q_{t(i)}^2} A_{t(i)}^2 +$$
$$+ \sum_{i=K+1}^{T} \ln \frac{1 - D_{t(i)}}{1 - F_{t(i)}}. \tag{15}$$

При этом решающее правило обнаружения движущегося объекта с известной ЭПР при наличии порогов в УПО имеет вид

$$\sum_{i=1}^{K} \lambda_{t(i)} A_{t(i)}^2 \ge \ln \Pi_0 + \sum_{i=1}^{K} \ln\left(1 + 0{,}5q_{t(i)}^2\right) -$$
$$- \sum_{i=K+1}^{T} \ln \frac{1 - D_{t(i)}}{1 - F_{t(i)}}, \tag{16}$$

где $\lambda_{t(i)}$ определяется выражением (9).

В частном случае неподвижного объекта РП (16) примет вид

$$\sum_{i=1}^{K} A_{t(i)}^2 \geq \frac{4+2q^2}{q^2} \times$$
$$\times\left(\ln \Pi_0 + K\ln(1+0{,}5q^2) - (T-K)\ln\frac{1-D}{1-F}\right). \quad (17)$$

Решающие правила (16), (17), синтезированные с учетом наличия порога в УПО, имеют статистики, соответствующие решающим правилам (8), (5), синтезированным в предположении об его отсутствии. В качестве данных статистик используется либо взвешенная сумма квадратов амплитуд отметок (движущийся объект), либо их простая сумма (неподвижный объект). Однако теперь данные статистики необходимо сравнивать с переменным порогом, который зависит от количества сформированных отметок (числа сигналов, статистики которых превысили порог в УПО). Данный порог тем меньше, чем меньше было сформировано отметок, и тем больше, чем больше условная вероятность правильного обнаружения сигнала, или в более общем случае (следуя (4), (3)) – чем больше ЭПР объекта.

Общий вид решающего правила обнаружения объекта с неизвестной ЭПР. При неизвестной ЭПР должно быть использовано правило совместного обнаружения-оценивания [5], называемое в прикладной статистике подстановочным [6] и являющееся субоптимальным [7].

Идея подстановочного РП заключается в том, что в РП, полученное для случая известной ЭПР, подставляют оценки $\hat{q}_t(\hat{\sigma}_ц)$. Подстановочное решающее правило, с учетом того, что описание выборки при отсутствии объекта не зависит от ЭПР, имеет вид [4, 5]:

$$\max_{\hat{\sigma}_ц} \ln l(\sigma_ц) \geq \ln \Pi_0$$

или

$$\ln l(\hat{\sigma}_ц) \geq \ln \Pi_0, \quad (18)$$

где
$$\hat{\sigma}_ц = \arg\max_{\sigma_ц} \ln l(\sigma_ц). \quad (19)$$

Оценка ЭПР объекта. Для нахождения оценки ЭПР объекта $\hat{\sigma}_ц$ необходимо взять производную от логарифма отношения правдоподобия по ЭПР $\sigma_ц$ и приравнять ее к нулю. В случае движущегося объекта и наличия порогов в УПО производная от логарифма отношения правдоподобия по ЭПР объекта определяется выражением

$$\frac{\partial \ln l}{\partial \sigma_ц} =$$
$$= \sum_{i=1}^{K}\left(\frac{2\Pi_{РЛС}(\varepsilon,\gamma)A_{t(i)}^2(2(d_{t(i)}/d_0)^4}{4(2(d_{t(i)}/d_0)^4+\Pi_{РЛС}(\varepsilon,\gamma)\sigma_ц)^2} + \right.$$
$$\left.\frac{\Pi_{РЛС}(\varepsilon,\gamma)\sigma_ц) - 2\Pi_{РЛС}^2(\varepsilon,\gamma)\sigma_ц A_{t(i)}^2}{4(2(d_{t(i)}/d_0)^4+\Pi_{РЛС}(\varepsilon,\gamma)\sigma_ц)^2}\right) -$$
$$-\sum_{i=1}^{K}\left(\frac{2(d_{t(i)}/d_0)^4}{2(d_{t(i)}/d_0)^4+\Pi_{РЛС}(\varepsilon,\gamma)\sigma_ц} \times \right.$$
$$\left.\times\frac{2\Pi_{РЛС}(\varepsilon,\gamma)(d_{t(i)}/d_0)^4}{4(d_{t(i)}/d_0)^4}\right) +$$
$$+\sum_{i=K+1}^{T}\frac{-1}{1-F_{t(i)}^{\left(\frac{2(d_{t(i)}/d_0)^4}{2(d_{t(i)}/d_0)^4+\Pi_{РЛС}(\varepsilon,\gamma)\sigma_ц}\right)}} \times$$
$$\times(\ln F_{t(i)})F_{t(i)}^{\left(\frac{2(d_{t(i)}/d_0)^4}{2(d_{t(i)}/d_0)^4+\Pi_{РЛС}(\varepsilon,\gamma)\sigma_ц}\right)}(-1) \times \quad (20)$$
$$\times\frac{2(d_{t(i)}/d_0)^4\Pi_{РЛС}(\varepsilon,\gamma)}{\left(2(d_{t(i)}/d_0)^4+\Pi_{РЛС}(\varepsilon,\gamma)\sigma_ц\right)^2} =$$
$$= \sum_{i=1}^{K}\frac{\Pi_{РЛС}(\varepsilon,\gamma)A_{t(i)}^2(d_{t(i)}/d_0)^4}{(2(d_{t(i)}/d_0)^4+\Pi_{РЛС}(\varepsilon,\gamma)\sigma_ц)^2} -$$
$$-\sum_{i=1}^{K}\frac{\Pi_{РЛС}(\varepsilon,\gamma)}{2(d_{t(i)}/d_0)^4+\Pi_{РЛС}(\varepsilon,\gamma)\sigma_ц} + \Pi_{РЛС}(\varepsilon,\gamma)H,$$

где
$$H = 2\sum_{i=K+1}^{T}\ln F_{t(i)}\frac{F_{t(i)}^{h_{t(i)}}}{1-F_{t(i)}^{h_{t(i)}}} \times$$
$$\times\frac{(d_{t(i)}/d_0)^4}{(2(d_{t(i)}/d_0)^4+\Pi_{РЛС}(\varepsilon,\gamma)\sigma_ц)^2};$$

$$h_{t(i)} = \frac{2(d_{t(i)}/d_0)^4}{2(d_{t(i)}/d_0)^4+\Pi_{РЛС}(\varepsilon,\gamma)\sigma_ц}.$$

В предположении, что $\Pi_{РЛС}(\varepsilon, \gamma) \neq 0$ после объединения первых двух сумм (20) в одну и приведения подобных можно записать уравнение максимального правдоподобия для нахождения ЭПР объекта

$$\Pi_{РЛС}(\varepsilon,\gamma)\sigma_ц \sum_{i=1}^{K} \frac{1}{(2(d_{t(i)}/d_0)^4 + \Pi_{РЛС}(\varepsilon,\gamma)\sigma_ц)^2} = \\ = H + \sum_{i=1}^{K} \frac{(d_{t(i)}/d_0)^4}{(2(d_{t(i)}/d_0)^4 + \Pi_{РЛС}(\varepsilon,\gamma)\sigma_ц)^2}\left(A_{t(i)}^2 - 2\right). \quad (21)$$

Уравнение (21) можно решить методом последовательных приближений [8], для чего его удобно переписать в виде

$$\hat{\sigma}_ц = \frac{1}{\Pi_{РЛС}(\varepsilon,\gamma)} \times \\ \times \frac{\sum_{i=1}^{K} \frac{(d_{t(i)}/d_0)^4\left(A_{t(i)}^2 - 2\right)}{(2(d_{t(i)}/d_0)^4 + \Pi_{РЛС}(\varepsilon,\gamma)\sigma_ц)^2} + H}{\sum_{i=1}^{K} \frac{1}{(2(d_{t(i)}/d_0)^4 + \Pi_{РЛС}(\varepsilon,\gamma)\sigma_ц)^2}}. \quad (22)$$

В случае неподвижного объекта и наличия порогов в УПО соответствующее уравнение максимального правдоподобия принимает вид

$$\hat{q}^2 = \frac{1}{K}\sum_{i=1}^{K} A_{t(i)}^2 - 2 + 2\frac{T-K}{K}\ln F \frac{F^{1/(1+0,5q^2)}}{1 - F^{1/(1+0,5q^2)}}. \quad (23)$$

При отсутствии порогов в УПО уравнение максимального правдоподобия для нахождения ЭПР движущегося объекта, аналогичное (22), имеет вид

$$\hat{\sigma}_ц = \frac{1}{\Pi_{РЛС}(\varepsilon,\gamma)} \frac{\sum_{t=1}^{T} \frac{(d_t/d_0)^4 (A_t^2 - 2)}{(2(d_t/d_0)^4 + \Pi_{РЛС}(\varepsilon,\gamma)\hat{\sigma}_ц)^2}}{\sum_{t=1}^{T} \frac{1}{(2(d_t/d_0)^4 + \Pi_{РЛС}(\varepsilon,\gamma)\hat{\sigma}_ц)^2}}. \quad (24)$$

Так как на практике

$$(2(\mathrm{d_t}/\mathrm{d_0})^4 + \Pi_{РЛС}(\varepsilon,\gamma)\sigma_ц)^2 \approx (\Pi_{РЛС}(\varepsilon,\gamma)\sigma_ц)^2,$$

то уравнение (24) существенно упрощается:

$$\hat{\sigma}_ц = \frac{1}{T\,\Pi_{РЛС}(\varepsilon,\gamma)} \sum_{t=1}^{T} (d_t/d_0)^4 (A_t^2 - 2). \quad (25)$$

В случае обнаружения неподвижного объекта при отсутствии порогов в УПО оценка (25) с учетом (3) заменяется оценкой ОСШ

$$\hat{q}^2 = \frac{1}{T}\sum_{t=1}^{T} A_t^2 - 2. \quad (26)$$

Оценки (25) и (26) являются аналогами оценок (22) и (23) в предположении об отсутствии порога в УПО. Их использование при наличии порога в УПО приводит к существенным ошибкам в оценках. Так, уравнение (23) при $K = T$ преобразуется в уравнение (26). Так как $\ln F << 0$, третье слагаемое (23) всегда отрицательное. Поэтому использование в качестве оценки только первых двух слагаемых (23), т.е. использование оценки (26) на основе K отметок ($K \le T$), приводит к завышенной оценке ОСШ в серии обзоров. Использование оценки (25), не учитывающей наличие порогов в УПО, по K сформированным отметкам, вместо оценки (22), также приводит к существенному завышению ЭПР объекта. Последнее вытекает из отрицательной определенности слагаемого H, стоящего в знаменателе (22).

Решающее правило обнаружения объекта с неизвестной ЭПР. РП (18) обнаружения неподвижного объекта с неизвестной ЭПР при отсутствии порогов в УПО имеет вид (5). Причем порог Π_1 определяется выражением (6) с учетом замены в нем значения отношения сигнал/шум q^2 его оценкой $\hat{q}^2$, полученной согласно (26).

РП (18) обнаружения неподвижного объекта с неизвестной ЭРП при наличии порогов в УПО в процедуре совместного обнаружения-оценивания имеет вид РП обнаружения при известном ОСШ сигналов (17). Однако вместо q и D в нем используются их оценки: (23) и $\hat{D} = F^{1/(1+0,5\hat{q}^2)}$ соответственно.

РП (18) обнаружения движущегося объекта без учета порогов в УПО имеет вид РП (8), при этом значения λ_t и Π_2 определяются на основе оценки $\hat{\sigma}_ц$, полученной из решения уравнения максимального правдоподобия (25):

$$\lambda_t = \frac{g}{4T(d_t/d_0)^4 + 2g}; \quad (27)$$

$$\Pi_2 = \ln \Pi_0 + \ln \prod_{t=1}^{T}\left(1 + \frac{g}{2T(d_t/d_0)^4}\right), \quad (28)$$

где $g = \sum_{t=1}^{T} (d_t / d_0)^4 (A_t^2 - 2)$.

В свою очередь правило обнаружения движущегося объекта с неизвестной ЭПР при наличии порогов в УПО является подстановочным аналогом правила (16), использующим оценку ЭПР (22).

Локально оптимальные РП. Для использования критерия Неймана-Пирсона в условиях неизвестной ЭПР объекта можно применить локально оптимальные РП [9]. Их использование оптимально при конкретном значении ЭПР объекта. Их применение для других значений ЭПР обосновано монотонной зависимостью отношения правдоподобия от ЭПР (ОСШ). При использовании локально оптимальных РП отсутствует необходимость оценки ЭПР объекта с помощью процедур (22) – (26), что приводит к существенному упрощению правил обнаружения движущихся объектов.

Анализ результатов статистического моделирования. Прежде всего, по результатам статистического моделирования было выявлено, что при $q_t = q$ правило, использующее простую сумму квадратов амплитуд отметок, выигрыша практически не дает. Относительно использования при обнаружении движущихся объектов весовых коэффициентов λ_t., во-первых, согласно определения (9) при $q_t \geq 4$ весовые множители λ_t не зависят от отношения сигнал/шум сигналов (не зависят от ЭПР объекта и дальности до него) $\lambda_t = \lambda = 0{,}5$ для $t = \overline{1,T}$. Во-вторых, из результатов статистического моделирования следует вывод о том, что использование весовых множителей при наличии порога в УПО, соответствующем $F \leq 10^{-3}$ выигрыша не дает. При $F = 1 \ldots 10^{-2}$ имеет место небольшой выигрыш в показателях качества обнаружения (рис. 1 – 3). Он тем больше, чем быстрее движется объект (ср. рис. 1 и 2) и чем больше циклов накопления (рис. 3). Все приведенные кривые обнаружения соответствуют условной вероятности ложного обнаружения траектории 10^{-6}; порогу в УПО, соответствующему условной вероятности ложной тревоги $F_t = 10^{-1}$; потенциалу на дальности $d_0 = 100$, равному 1; линейной траектории с начальным положением x_0 и приращением координаты объекта за цикл обзора Δx. На всех рисунках левой кривой соответствует подстановочный аналог правила (16), а правой – правила, использующего в качестве статистики сумму квадратов амплитуд отметок без учета числа сформированных за T обзоров отметок [1, 2].

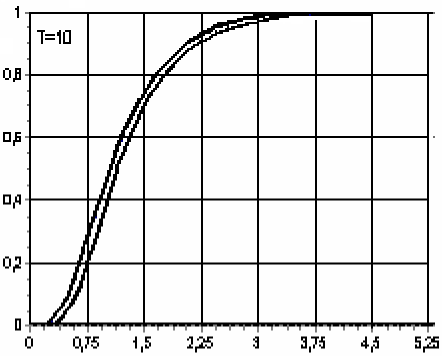

Рис. 1. Кривые обнаружения объекта с параметрами $x_0 = 105$, $\Delta x = 5$

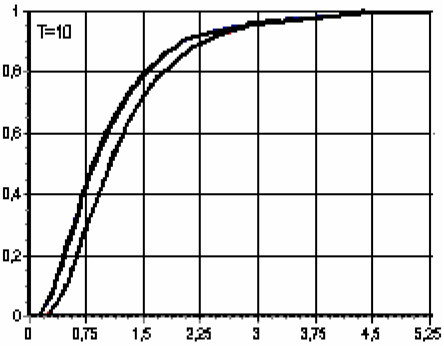

Рис. 2. Кривые обнаружения объекта с параметрами $x_0 = 140$, $\Delta x = 10$

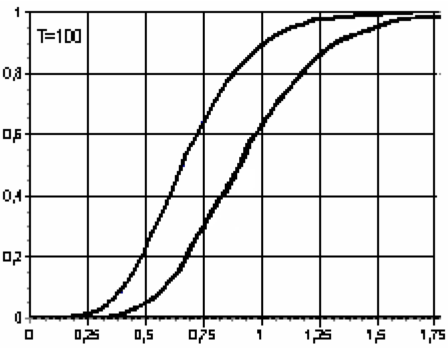

Рис. 3. Кривые обнаружения объекта с параметрами $x_0 = 149$, $\Delta x = 1$

Выводы

В работе получены решающие правила обнаружения детерминированной траектории с известной и неизвестной ЭПР при наличии и отсутствии порогов в УПО. При этом было выяснено, что достаточными статистиками являются количество сформированных на *T* обзорах отметок и взвешенная сумма квадратов их амплитуд. Анализ результатов статистического моделирования свидетельствует, что при высоких порогах в УПО и малом числе обзоров даже для быстро движущихся объектов в качестве статистики достаточно использовать сумму квадратов амплитуд отметок, что и было сделано в работах [1, 2]. По-прежнему нерешенной остается задача разработки решающих правил обнаружения неизвестного числа близких малоразмерных объектов, на чем целесообразно сконцентрировать дальнейшие исследования.

Литература

1. Деденок В.П., Писаренок Г.Г., Саваневич В.Е. Обнаружение объектов с локально неизменными параметрами движения // Збірник наукових праць міжнародного симпозіуму «Імовірнісні моделі та обробка випадкових сигналів і полів». – Т. 2, ч. 1 / Під ред. Я. Драгана. – Львів – Харків –Тернопіль. – 1993. – С. 98 – 104.

2. Саваневич В.Є., Пугач А.В., Рибачук О.І. Показники якості післяпорогового некогерентного виявлення в області // Збірник наукових праць ХВУ. – Х.: ХВУ. – 2001. – Вип. 2 (32). – С. 50 – 52.

3. Ширман Я.Д., Лосев Ю.И., Минервин Н.Н. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория. Справочник / Под ред. Я.Д. Ширмана. – М.: МАКВИС, 1998. – 828 с.

4. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. – М.: Радио и связь, 1989. – 656 с.

5. Трифонов А.П., Шинаков Ю.С. Совместное различение сигналов и оценка их параметров на фоне помех. – М.: Радио и связь, 1986. – 264 с.

6. Айвазян С.А., Бухштабер В.М., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика: Классификация и снижение размерности. – М.: Финансы и статистика, 1989. – 607 с.

7. Гупал А.М., Пашко С.В., Сергиенко И.В. Эффективность байесовской процедуры классификации объектов // Кибернетика и системный анализ. – 1995. – № 4. – С. 76 – 89.

8. Демидович Б.П., Марон И.А. Основы вычислительной математики. – М.: Наука, 1970. – 664 с.

9. Леман Э. Проверка статистических гипотез: Пер. с англ. / Под ред. Ю.В. Прохорова. – М.: Наука, 1979. – 408 с.

Поступила 6.01.2005

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О.И. Сухаревский, Объединенный научно-исследовательский институт Вооруженных Сил, Харьков.