УДК 621.396.96

РЕШАЮЩЕЕ ПРАВИЛО ОБНАРУЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ НА ФОНЕ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

д.т.н. Б.В. Храбростин, А.И. Омельченко, А.Ф. Катасонов

В статье предложен вариант учета мультипликативной помехи на примере многолучевого распространения электромагнитной волны при синтезе решающего правила обнаружения объектов на фоне подстилающей поверхности. Полученные результаты могут быть использованы при разработке алгоритмов обнаружения при воздействии мультипликативных помех, а также объектов на фоне подстилающей поверхности.

Задачу обнаружения объектов на фоне подстилающей поверхности можно сформулировать как задачу проверки гипотез о наличии в объеме разрешения сигнала, отраженного от подстилающей поверхности (гипотеза $\mathbf{H_0}$), либо сигнала, отраженного от подстилающей поверхности и обнаруживаемого объекта (гипотеза $\mathbf{H_1}$).

При использовании метода полного поляризационного зондирования пространства (ППЗП) осуществляется обработка поляризационных векторов рассеяния (ПВР), составленных из соответствующих поляризационных матриц рассеяния (ПМР) [1].

Положим, что за фиксированное время наблюдения $\mathbf{T}$ измеряется $\mathbf{N}$ отсчетов ПВР данного объема разрешения. Единичный отсчет ПВР $\dot{\vec{\mathbf{S}}}_{\mathbf{изм}}(\mathbf{t_i})$ $\mathbf{i=1...N}$ можно представить в виде:

$$\dot{\vec{\mathbf{S}}}_{\mathbf{изм}}(\mathbf{t_i}) = \dot{\vec{\mathbf{S}}}_{\mathbf{П2}}(\mathbf{t_i}) + \dot{\vec{\mathbf{S}}}_{\mathbf{ш}}(\mathbf{t_i}) + \mathbf{a} \cdot \dot{\mathbf{P}}(\mathbf{t_i}) \cdot \dot{\vec{\mathbf{S}}}_{\mathbf{об}}(\mathbf{t_i}), \qquad (1)$$

где $\dot{\vec{\mathbf{S}}}_{\mathbf{ш}}(\mathbf{t_i})$ - ПВР внутреннего шума приемного устройства, **a**=0 – цель отсутствует, **a**=1 – цель присутствует,

$$\dot{\mathbf{P}} = \begin{Vmatrix} \dot{p}_{11} & \dot{p}_{12} & \dot{p}_{13} & \dot{p}_{14} \\ \dot{p}_{21} & \dot{p}_{22} & \dot{p}_{23} & \dot{p}_{24} \\ \dot{p}_{31} & \dot{p}_{32} & \dot{p}_{33} & \dot{p}_{34} \\ \dot{p}_{41} & \dot{p}_{42} & \dot{p}_{43} & \dot{p}_{44} \end{Vmatrix} = \begin{Vmatrix} \dot{a}_{11}\cdot\dot{a}_{11} & \dot{a}_{21}\cdot\dot{a}_{11} & \dot{a}_{11}\cdot\dot{a}_{21} & \dot{a}_{21}\cdot\dot{a}_{21} \\ \dot{a}_{11}\cdot\dot{a}_{12} & \dot{a}_{21}\cdot\dot{a}_{12} & \dot{a}_{11}\cdot\dot{a}_{22} & \dot{a}_{21}\cdot\dot{a}_{22} \\ \dot{a}_{12}\cdot\dot{a}_{11} & \dot{a}_{22}\cdot\dot{a}_{11} & \dot{a}_{12}\cdot\dot{a}_{21} & \dot{a}_{22}\cdot\dot{a}_{21} \\ \dot{a}_{12}\cdot\dot{a}_{12} & \dot{a}_{22}\cdot\dot{a}_{12} & \dot{a}_{12}\cdot\dot{a}_{22} & \dot{a}_{22}\cdot\dot{a}_{22} \end{Vmatrix} \text{ -}$$

матрица помехи, составленная из элементов $\dot{\mathbf{a}}_{\mathbf{ij}}$ $\mathbf{(i,j=1...4)}$ матрицы $\dot{\mathbf{A}} = (\mathbf{I} + \dot{\mathbf{S}}_{\mathbf{П1}})$ [2]; $\dot{\vec{\mathbf{S}}}_{\mathbf{об}}$ - истинное значение ПВР объекта; $\dot{\vec{\mathbf{S}}}_{\mathbf{П1}}$ - ПВР участка подстилающей поверхности П1, $\dot{\vec{\mathbf{S}}}_{\mathbf{П2}}$ - ПВР участка подстилающей поверхности П2 (рис.1).

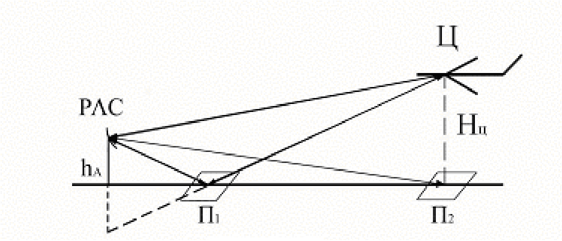

Рис. 1. Формирование отраженного сигнала

Положим, что соседние во времени отсчеты $\dot{\vec{\mathbf{S}}}_{\mathbf{изм}}(\mathbf{t_i})$ некоррелированы, а слагаемые, входящие в (1) независимы, тогда выражения для поляризационных ковариационных матриц (ПКМ) ПВР $\dot{\vec{\mathbf{S}}}_{\mathbf{изм}}$, при **a**=0 и **a**=1 имеют соответственно вид:

$$\dot{\mathbf{M}}_{\mathbf{0}} = \dot{\mathbf{M}}_{\mathbf{П2}} + \dot{\mathbf{M}}_{\mathbf{ш}};$$

$$\dot{\mathbf{M}}_{\mathbf{1}} = \dot{\mathbf{M}}_{\mathbf{П2}} + \dot{\mathbf{M}}_{\mathbf{ш}} + \dot{\mathbf{M}}_{\mathbf{SP}},$$

где $\dot{\mathbf{M}}_{\mathbf{П2}}$ - ПКМ участка подстилающей поверхности П2; $\dot{\mathbf{M}}_{\mathbf{ш}}$ - ПКМ внутреннего шума приемника; $\dot{\mathbf{M}}_{\mathbf{SP}}$ - ПКМ объекта с учетом участка подстилающей поверхности П1.

Значение ПКМ $\dot{\mathbf{M}}_{\mathbf{П2}}$ и $\dot{\mathbf{M}}_{\mathbf{ш}}$, а точнее их оценки, как правило находятся на этапе обучения, например как оценки максимального правдоподобия. Нахождение значения ПКМ $\dot{\mathbf{M}}_{\mathbf{SP}}$ связано с некоторыми трудностями. По сути рассматриваемая ПКМ есть ковариационная матрица истинного ПВР обнаруживаемого объекта с учетом воздействия мультипликативной помехи, которая может быть описана матрицей $\dot{\mathbf{P}}$ (1) [2].

Для нахождения значения ПКМ $\dot{\mathbf{M}}_{\mathbf{SP}}$ можно предложить следующую методику.

Решение предлагается найти для элемента $\dot{\mathbf{m}}_{\mathbf{SPij}}$ (**i,j**=1…4) матрицы $\dot{\mathbf{M}}_{\mathbf{SP}}$. Из (1) можно сказать, что элемент $\dot{\mathbf{S}}_{\mathbf{измi}}$ (**i**=1…4) вектора $\dot{\vec{\mathbf{S}}}_{\mathbf{изм}}$ равен:

$$\dot{\mathbf{S}}_{\mathbf{измi}} = \dot{\vec{\mathbf{P}}}_{\mathbf{i}}^{\mathbf{T}} \cdot \dot{\vec{\mathbf{S}}}_{\mathbf{об}} = \sum_{\mathbf{m=1}}^{\mathbf{4}} \dot{\mathbf{P}}_{\mathbf{im}} \cdot \dot{\mathbf{S}}_{\mathbf{обm}}, \qquad (2)$$

где $\dot{\vec{\mathbf{P}}}_{\mathbf{i}}$ – вектор, составленный из **i**-й строки матрицы $\dot{\mathbf{P}}$.

Положим, что известны значения ПВР объекта $\dot{\vec{\mathbf{S}}}_{\mathbf{об}}$, а также матрицы помехи $\dot{\mathbf{P}}$.

Согласно [3] элемент $\dot{\mathbf{m}}_{\mathbf{SPij}}$ матрицы $\dot{\mathbf{M}}_{\mathbf{SP}}$ равен :

$$\dot{\mathbf{m}}_{\mathbf{SPij}} = \mathbf{cov}\{\dot{\mathbf{S}}_{\mathbf{измi}}, \dot{\mathbf{S}}_{\mathbf{измj}}\}, \tag{3}$$

где $\mathbf{cov}\{\cdot\}$ – ковариация.

Очевидно, что ПВР $\dot{\vec{\mathbf{S}}}_{\mathbf{об}}$ и векторы помехи $\dot{\vec{\mathbf{P}}}_{\mathbf{i}}$ независимы. С учетом этого, после математических преобразований выражение для нахождения элементов ковариационной матрицы $\dot{\mathbf{m}}_{\mathbf{SPij}}$ принимает вид

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{m}}_{\mathbf{SPij}} = \sum_{\mathbf{m=1}}^{\mathbf{4}}\sum_{\mathbf{n=1}}^{\mathbf{4}}\Big(\mathbf{cov}\{\dot{\mathbf{p}}_{\mathbf{im}}, \dot{\mathbf{p}}^{*}_{\mathbf{jn}}\} + \mathbf{E}\{\dot{\mathbf{p}}_{\mathbf{im}}\}\cdot\mathbf{E}\{\dot{\mathbf{p}}^{*}_{\mathbf{jn}}\}\Big)\cdot\Big(\mathbf{cov}\{\dot{\mathbf{S}}_{\mathbf{обm}}, \dot{\mathbf{S}}^{*}_{\mathbf{обn}}\} + \\ + \mathbf{E}\{\dot{\mathbf{S}}_{\mathbf{обm}}\}\cdot\mathbf{E}\{\dot{\mathbf{S}}^{*}_{\mathbf{обn}}\}\Big) - \Big[\mathbf{E}\{\dot{\vec{\mathbf{P}}}^{\mathbf{T}}_{\mathbf{i}}\}\cdot\mathbf{E}\{\dot{\vec{\mathbf{S}}}_{\mathbf{об}}\}\Big]\cdot\Big[\mathbf{E}\{\dot{\vec{\mathbf{P}}}^{\mathbf{T}}_{\mathbf{j}}\}\cdot\mathbf{E}\{\dot{\vec{\mathbf{S}}}_{\mathbf{об}}\}\Big]^{*}.\end{aligned} \tag{4}$$

В выражении (4) можно ввести новые обозначения:

$\mathbf{cov}\{\dot{\mathbf{p}}_{\mathbf{im}}, \dot{\mathbf{p}}^{*}_{\mathbf{jn}}\} = \dot{\mathbf{t}}^{\mathbf{ij}}_{\mathbf{mn}}$ (**i,j,m,n**=1…4) –**m,n** - элемент ковариационной матрицы $\dot{\mathbf{T}}^{\mathbf{ij}}$ векторов $\dot{\vec{\mathbf{P}}}_{\mathbf{i}}$ и $\dot{\vec{\mathbf{P}}}_{\mathbf{j}}$;

$\mathbf{E}\{\dot{\mathbf{p}}_{\mathbf{im}}\} = \dot{\mu}_{\mathbf{pim}}$ – **m** - элемент вектора математического ожидания $\dot{\vec{\mu}}_{\mathbf{pi}}$ вектора $\dot{\vec{\mathbf{P}}}_{\mathbf{i}}$;

$\mathbf{cov}\{\dot{\mathbf{S}}_{\mathbf{обm}}, \dot{\mathbf{S}}^{*}_{\mathbf{обn}}\} = \dot{\mathbf{m}}_{\mathbf{обmn}}$ – **m,n** - элемент ковариационной матрицы $\dot{\mathbf{M}}_{\mathbf{об}}$ ПВР $\dot{\vec{\mathbf{S}}}_{\mathbf{об}}$;

$\mathbf{E}\{\dot{\mathbf{S}}_{\mathbf{обm}}\} = \dot{\mu}_{\mathbf{Sобm}}$ – **m** - элемент вектора математического ожидания $\dot{\vec{\mu}}_{\mathbf{Sоб}}$ ПВР $\dot{\vec{\mathbf{S}}}_{\mathbf{об}}$.

С учетом введенных обозначений выражение (4) принимает вид:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{m}}_{\mathbf{SPij}} = \sum_{\mathbf{m=1}}^{\mathbf{4}}\sum_{\mathbf{n=1}}^{\mathbf{4}}\Big(\dot{\mathbf{t}}^{\mathbf{ij}}_{\mathbf{mn}} + \dot{\mu}_{\mathbf{Pim}}\cdot\dot{\mu}^{*}_{\mathbf{Pjn}}\Big)\cdot\Big(\dot{\mathbf{m}}_{\mathbf{обmn}} + \dot{\mu}_{\mathbf{Sобm}}\cdot\dot{\mu}^{*}_{\mathbf{Sобn}}\Big) - \\ - \Big(\dot{\vec{\mu}}^{\mathbf{T}}_{\mathbf{Pi}}\cdot\dot{\vec{\mu}}_{\mathbf{Sоб}}\Big)\cdot\Big(\dot{\vec{\mu}}^{\mathbf{T}}_{\mathbf{Pj}}\cdot\dot{\vec{\mu}}_{\mathbf{Sоб}}\Big)^{*}.\end{aligned} \tag{5}$$

В рассматриваемом случае проверки гипотез ПКМ $\dot{\mathbf{M}}_{\mathbf{0}}$ и $\dot{\mathbf{M}}_{\mathbf{1}}$ различны, обе плохо обусловлены, имеют размерность (4Х4) [1]. В этой связи, для решения поставленной задачи можно использовать метод прямого сведения к сингулярной матрице [4].

Суть этого метода в следующем. Пусть найдены все собственные числа $\lambda_{\mathbf{i}}$ и нормированные собственные векторы матрицы $\dot{\mathbf{M}}$, отбросив (**n-r**) собственных векторов $\dot{\vec{b}}_i$, соответствующих наименьшим собственным числам λ_i, получим **r**-плоскость $\mathbf{L}(\dot{\mathbf{M}})$, проекция совокупности $\dot{\vec{S}}$ в которую будет иметь вырожденную ковариационную матрицу $\dot{\mathbf{M}}$ сингулярный скелет матрицы $\dot{\mathbf{M}}$.

Построение сингулярного скелета целесообразно проводить [4] для матрицы $\dot{\mathbf{M}} = \dot{\mathbf{M}}_0 + \dot{\mathbf{M}}_1$. Предположим, что найдена матрица $\dot{\mathbf{B}}$, составленная из **r** нормированных собственных векторов, соответствующих **r** наибольшим собственным значениям матрицы $\dot{\mathbf{M}}$. Применяя преобразование

$$\dot{\vec{Y}} = \dot{\mathbf{B}}^{*T} \cdot \dot{\vec{S}}, \tag{6}$$

получим ПВР $\dot{\vec{Y}} \in \mathbf{L}(\dot{\mathbf{M}})$, ПКМ которого будет невырожденной.

При определении закона распределения выборки для каждой гипотезы положим, что отношение сигнал/шум $\mathbf{q}^2_{\text{сш}}$ и сигнал/помеха $\mathbf{q}^2_{\text{сп}}$ подчиняются следующим условиям:

$$\mathbf{q}^2_{\text{сш}} = \frac{\mathbf{sp}(\dot{\mathbf{M}}_{\text{об}})}{\mathbf{sp}(\dot{\mathbf{M}}_{\Pi 2})} >> \mathbf{1}; \tag{7}$$

$$\mathbf{q}^2_{\text{сп}} = \frac{\mathbf{sp}(\dot{\mathbf{M}}_{\text{ц}})}{\mathbf{sp}(\dot{\mathbf{M}}_{\Pi 2})} << \mathbf{1}, \tag{8}$$

где $\mathbf{sp}(\dot{\mathbf{M}})$ - спектр матрицы $\dot{\mathbf{M}}$.

Так как уровень помех полагается достаточно высоким (8), то для любой из гипотез ($\mathbf{H}_0$ и $\mathbf{H}_1$) суммарный ПВР $\dot{\vec{S}}$, а следовательно и $\dot{\vec{Y}}$ будет формироваться суммой большого числа сигналов со сравнимыми мощностями, отраженными от отдельных отражающих элементов подстилающей поверхности. Другими словами, для любой из проверяемых гипотез считаем, что имеем выборку из многомерного нормального распределения с вектором математического ожидания $\dot{\vec{\mu}}_0$, $\dot{\vec{\mu}}_1$ и ПКМ $\dot{\mathbf{M}}_0$, $\dot{\mathbf{M}}_1$, для **a**=0 и **a**=1 соответственно.

Распределения выборочных значений ПВР соответствующих гипотезам $\mathbf{H}_0$ и $\mathbf{H}_1$ представляется в следующем виде [5]:

$$\mathbf{w}_0(\dot{\vec{Y}}) = (2\pi)^{-\frac{3}{2}} \cdot \left|\dot{\mathbf{K}}_0\right|^{-\frac{1}{2}} \cdot \exp\left\{-\frac{1}{2} \cdot (\dot{\vec{Y}} - \dot{\vec{\mu}}_0)^{*T} \cdot \dot{\mathbf{K}}_0^{-1} \cdot (\dot{\vec{Y}} - \dot{\vec{\mu}}_0)\right\};$$

$$\mathbf{w}_1(\dot{\vec{Y}}) = (2\pi)^{-\frac{3}{2}} \cdot \left|\dot{\mathbf{K}}_1\right|^{-\frac{1}{2}} \cdot \exp\left\{-\frac{1}{2} \cdot (\dot{\vec{Y}} - \dot{\vec{\mu}}_1)^{*T} \cdot \dot{\mathbf{K}}_1^{-1} \cdot (\dot{\vec{Y}} - \dot{\vec{\mu}}_1)\right\},$$

где $\dot{\mathbf{K}}_{\mathbf{i}} = \dot{\mathbf{B}}^{*\mathbf{T}} \cdot \dot{\mathbf{M}}_{\mathbf{i}} \cdot \dot{\mathbf{B}}$ ($\mathbf{i}$=0,1).

Таким образом, логарифм отношения правдоподобия можно записать в виде [5]:

$$\mathbf{l} = \frac{\mathbf{N}}{\mathbf{2}} \frac{\left|\dot{\mathbf{K}}_{\mathbf{0}}\right|}{\left|\dot{\mathbf{K}}_{\mathbf{1}}\right|} + \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{2}} \sum_{\mathbf{i=1}}^{\mathbf{N}} \left[\left(\dot{\vec{\mathbf{Y}}}_{\mathbf{i}} - \dot{\vec{\mu}}_{\mathbf{1}} \right)^{*\mathbf{T}} \cdot \dot{\mathbf{K}}_{\mathbf{1}}^{-1} \cdot \left(\dot{\vec{\mathbf{Y}}}_{\mathbf{i}} - \dot{\vec{\mu}}_{\mathbf{1}} \right) - \left(\dot{\vec{\mathbf{Y}}}_{\mathbf{i}} - \dot{\vec{\mu}}_{\mathbf{0}} \right)^{*\mathbf{T}} \cdot \dot{\mathbf{K}}_{\mathbf{0}}^{-1} \cdot \left(\dot{\vec{\mathbf{Y}}}_{\mathbf{i}} - \dot{\vec{\mu}}_{\mathbf{0}} \right) \right]. \quad (9)$$

При сравнении значения отношения правдоподобия l со значением порога **C** принимается решение о наличии в разрешаемом объеме обнаруживаемого объекта. Значение порога **C** вычисляется в зависимости от выбранного критерия проверки статистических гипотез.

Представленное решающее правило может быть использовано для повышения эффективности обнаружения маловысотных неподвижных и малоскоростных объектов на фоне различного типа подстилающей поверхности, в частности, методом статистического моделирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Мартынчук А.А., Зубрицкий Г.Н., Храбростин Б.В. Применение метода полного поляризационного зондирования в РЛС // Сб. научн. тр. 6 межд. научн. конф. – Харьков: ХГПУ. – 1998. – Вып. 6, ч.1. – С. 351 - 354.*
2. *Омельченко А.И., Катасонов А.Ф. Методика учета влияния подстилающей поверхности на измеренную поляризационную матрицу рассеяния объекта. // Радиотехника. – ХНУРЭ. – 2001. – Вып. 121. – С. 65 - 68.*
3. *Вентцель Е. С. Теория вероятностей. – М.: Наука, 1964. –576 с.*
4. *Либенсон М. Н., Хесин А. Я., Янсон Б. А. Автоматизация распознавания телевизионных изображений. – М.: Энергия, 1975. – 356 с.*
5. *Фомин Я. А., Тарловский Г. Р. Статистическая теория распознавания образов. – М.: Радио и связь, 1986. – 160 с.*

Поступила 14.01.2002

ХРАБРОСТИН Борис Владимирович*, доктор техн. наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник. В 1969 году закончил ВИРТА ПВО. Область научных интересов – исследования в области обработки радиолокационной информации с использованием поляризационных отличий.*

ОМЕЛЬЧЕНКО Андрей Игоревич*, адъюнкт ХВУ. В 1997 году закончил ХВУ. Область научных интересов – исследование возможности обнаружения объектов на фоне подстилающей поверхности по поляризационным признакам.*

КАТАСОНОВ Александр Федорович*, адъюнкт ХВУ. В 1997 году закончил ХВУ. Область научных интересов – исследование возможности использования поляризационных различий для обнаружения объектов при воздействии различных типов радиолокационных помех.*