УДК 621.396.96

АЛГОРИТМЫ ОПТИМАЛЬНОГО И КВАЗИОПТИМАЛЬНОГО ОБНАРУЖЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ОБЛАСТЕЙ С ХАРАКТЕРНЫМИ ЗАКОНАМИ ОТРАЖЕНИЯ В МПРСА

А.В. Ксендзук
(Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»)

Разработаны алгоритмы оптимального и квазиоптимального обнаружения пространственно-протяженных и точечных областей с характерными законами отражения в многопозиционных радиолокационных системах с синтезированием апертуры антенны (МПРСА).

оптимальное и квазиоптимальное обнаружение, многопозиционные радиолокационные системы, пространственно-протяженные и точечные области

Введение. Задачи определения областей с характерными законами отражения электромагнитного поля (задачи обнаружения объектов) необходимы для решения широкого круга практических задач – управление и сопровождение транспортных средств, для экологического мониторинга, обнаружения районов экологических катастроф и многих других [1].

Существующие методы обнаружения ограничены моностатическими РСА [2] либо многопозиционными системами без синтеза апертуры, [3]. По этой причине актуальными являются задачи синтеза алгоритмов обнаружения в многопозиционных РСА [4].

Цель работы. Разработка оптимальных и квазиоптимальных алгоритмов обнаружения точечных и протяженных областей многопозиционными системами с синтезированием апертуры антенны.

Алгоритм оптимального обнаружения. Задачи обнаружения точечных и протяженных объектов многопозиционными системами с синтезированием апертуры антенны могут быть рассмотрены как частный случай задач комплексирования, [5] с учетом ряда особенностей дальнейшей интерпретации. Рассмотрим их решение для активных многопозиционных систем на основании алгоритмов оптимальной совместной обработки.

Уравнение наблюдения (при аппроксимации модели поверхности статической во временной области) зададим в виде вектора, координаты которого

$$u_i(t)/a(\mathbf{r},\mathbf{r}_0) = \sum_{k=1...Tr} \mathrm{Re}\int_D \dot{F}^0_{ik}(\mathbf{r})\, a(\mathbf{r},\mathbf{r}_0)\, \dot{S}_{ik}(t,\mathbf{r})\, d\mathbf{r} +$$

$$+\sum_{k=1\ldots Tr}\mathrm{Re}\int_D \dot{F}_{ik}^{D}(r)\,[1-a(r,r_0)]\,\dot{S}_{ik}(t,r)\,dr+\sum_{k=1\ldots Tr} n_{ik}(t) \qquad (1)$$

представлены суммой сигнальной $\sum_{k=1\ldots Tr}\mathrm{Re}\int_D \dot{F}_{ik}^{0}(\mathbf{r})\,a(\mathbf{r},\mathbf{r}_0)\,\dot{S}_{ik}(\mathbf{t},\mathbf{r})\,d\mathbf{r}$ (отраженной от объекта), фоновой $\sum_{k=1\ldots Tr}\mathrm{Re}\int_D \dot{F}_{ik}^{D}(\mathbf{r})\,[1-a(\mathbf{r})]\,\dot{S}_{ik}(t,\mathbf{r})\,d\mathbf{r}$ (отраженной от подстилающей поверхности) и шумовой $\sum_{k=1\ldots Tr} n_{ik}(t)$ компонент; $a(\mathbf{r},\mathbf{r}_0)$ – индикаторная функция наличия объекта в $\mathbf{r}\in D$. Точку $\mathbf{r}_0$ назовем особой точкой объекта (центр тяжести, радиолокационный центр тяжести и др.). В дальнейших выражениях функцию $a(\mathbf{r})$ опустим за счет использования записи $\dot{F}_{ik}^{0}(\mathbf{r},\mathbf{r}_0)$.

Модель отражения от объекта зададим многомерной характеристикой, зависящей, в частности, от бистатических углов приемника Θ_R, передатчика Θ_T, ориентации объекта Θ_0 в виде

$$\dot{\mathbf{F}}(\mathbf{r},\mathbf{r}_0)=F^0(\mathbf{r},\mathbf{r}_0)\,\dot{\boldsymbol{\eta}}(\mathbf{r},\mathbf{r}_0,\boldsymbol{\beta},\Theta_0,\boldsymbol{\Theta}_R,\boldsymbol{\Theta}_T), \qquad (2)$$

где $\dot{\boldsymbol{\eta}}(\mathbf{r},\boldsymbol{\beta},\Theta_0,\boldsymbol{\Theta}_R,\boldsymbol{\Theta}_T)$ – вектор функций, координаты которого с точностью до нормировки совпадают с амплитудно-фазовой диаграммой отражения от объекта; $\boldsymbol{\beta}$ – вектор дополнительных входных параметров модели объекта для заданной МПРСА (поляризация, несущая частота и др.).

Оптимальный алгоритм обнаружения синтезируем на основании определения отношения правдоподобия по результатам совместной оценки среднего реального значения комплексного коэффициента отражения $F^0(\mathbf{r},\mathbf{r}_0)$ объекта с учетом того, что функция $F^0(\mathbf{r},\mathbf{r}_0)$ – вещественная величина:

$$\begin{aligned}\mathrm{Re}\int_0^T\!\!\int_0^T \mathbf{u}^T(t_1)\,\mathbf{R}_u^{-1}(t_1,t_2)\,\dot{\mathbf{S}}_\eta^{*}(t_2,\boldsymbol{\gamma},\mathbf{r}_1,\mathbf{r}_0)\,dt_1dt_2 &= \frac{1}{2}\int_D F^0(\mathbf{r},\mathbf{r}_0)\times\\ \times\,\mathrm{Re}\int_0^T\!\!\int_0^T \dot{\mathbf{S}}_\eta^{T}(t_1,\boldsymbol{\gamma},\mathbf{r})\,\mathbf{R}_u^{-1}(t_1,t_2)\,\dot{\mathbf{S}}_\eta^{*}(t_2,\boldsymbol{\gamma},\mathbf{r}_1,\mathbf{r}_0)\,dt_1dt_2d\mathbf{r},&\end{aligned} \qquad (3)$$

где в координатах $S_{\eta i}(t,\boldsymbol{\gamma},\mathbf{r},\mathbf{r}_0)$ учитываются множители $\dot{\boldsymbol{\eta}}(\mathbf{r},\mathbf{r}_0,\boldsymbol{\beta},\Theta_0,\boldsymbol{\Theta}_R,\boldsymbol{\Theta}_T)$, входящие в модель объекта

$$\dot{S}_{\eta i}(t,\boldsymbol{\gamma},\mathbf{r},\mathbf{r}_0)=\sum_{k=1\ldots Tr}\dot{\eta}_{ik}(\mathbf{r},\mathbf{r}_0,\gamma_{ik})\,\dot{S}_{ik}(t,\mathbf{r}).$$

Для аддитивной модели уравнения наблюдения результат оптимальной совместной обработки (3) представим в виде суммы сигнальной $I^0(\mathbf{r},\mathbf{r}_0)$, фоновой $I^D(\mathbf{r},\mathbf{r}_0)$ и шумовой $I^N(\mathbf{r})$ компонент

$$I(\mathbf{r},\mathbf{r}_0) = I^0(\mathbf{r})a(\mathbf{r},\mathbf{r}_0) + I^D(\mathbf{r})[1-a(\mathbf{r},\mathbf{r}_0)] + I^N(\mathbf{r},\mathbf{r}_0),$$

где входящие в $I(\mathbf{r})$ элементы определяются выражениями:

$$I^0(\mathbf{r}_1,\mathbf{r}_0) = \frac{1}{2}\int_D F^0(\mathbf{r},\mathbf{r}_0)\,\mathrm{Re}\sum_{\substack{i,j=1\ldots Rc\\ k,m=1\ldots Tr}} \dot{\eta}_{ik}(\mathbf{r},\mathbf{r}_0,\boldsymbol{\gamma})\,\dot{\eta}^*_{jm}(\mathbf{r}_1,\mathbf{r}_0,\boldsymbol{\gamma})\,\Psi^R_{ikjm}(\mathbf{r},\mathbf{r}_1)\,d\mathbf{r}; \quad (4)$$

$$I^D(\mathbf{r}_1,\mathbf{r}_0) = \frac{1}{2}\int_D \mathrm{Re}\sum_{\substack{i,j=1\ldots Rc\\ k,m=1\ldots Tr}} F^D_{ik}(\mathbf{r})\,\dot{\eta}^*_{jm}(\mathbf{r}_1,\boldsymbol{\gamma})\,\Psi_{R\,ijkm}(\mathbf{r},\mathbf{r}_1)\,d\mathbf{r}; \quad (5)$$

$$I^N(\mathbf{r}_1,\mathbf{r}_0) = \mathrm{Re}\sum_{\substack{i,j=1\ldots Rc\\ m=1\ldots Tr}} \eta^*_{jm}(\mathbf{r}_1,\mathbf{r}_0,\boldsymbol{\gamma})\int_0^T\!\!\int_0^T n_i(t_1)\,R^{-1}_{u\,ij}(t_1,t_2)\,\dot{S}^*_{jm}(t_2,\mathbf{r}_1)\,dt_1dt_2; \quad (6)$$

$$\Psi_{R\,ijkm}(\mathbf{r},\mathbf{r}_1) = \int_0^T\!\!\int_0^T \dot{S}_{ik}(t_1,\mathbf{r})\,R^{-1}_{u\,ij}(t_1,t_2)\,\dot{S}^*_{jm}(t_2,\mathbf{r}_1)\,dt_1dt_2. \quad (7)$$

Предложенный алгоритм обнаружения объектов на основании оптимальной совместной оценки среднего значения комплексного коэффициента отражения содержит следующие основные операции: декорреляция принимаемых процессов во временной области путем применения матричного преобразования с ядром $\mathbf{R}_u^{-1}(t_1,t_2)$, в котором учитываются корреляционные связи во временной области; согласованная фильтрация декоррелированного входного процесса с модифицированными опорными сигналами $\dot{\mathbf{S}}^*_\eta(t,\boldsymbol{\gamma},\mathbf{r},\mathbf{r}_0)$, учитывающими амплитудно-фазовую диаграмму отражения от объекта; формирование опорного изображения объектов I_0 для модифицированных опорных сигналов с учетом декоррелирующего преобразования во временной и пространственной областях; декорреляция полученного выходного эффекта пространственными окнами $R_I^{-1}(\mathbf{r}_1,\mathbf{r}_2)$, зависящими от статистических характеристик отражений от подстилающей поверхности, статистических характеристик вектора аддитивных помех и от пространственных функций неопределенности результата совместной обработки; формирование порога, в котором используются изображения объекта, полученные в многопозиционной системе для заданного вектора модифицированных полезных сигналов с учетом статистических характеристик отражений от поверхности и помех во временной области.

Частные случаи оптимального обнаружения. Введем понятие ортогональности сигналов для заданной группировки и пространственной конфигурации МПРСА. Сигналы передатчиков назовем ортогональными, если для двух произвольных приемников выполняется равенство

$$\int_0^T\int_0^T \dot S_{ik}(t_1,\mathbf{r})\, R^{-1}_{uij}(t_1,t_2)\, \dot S^*_{im}(t_2,\mathbf{r}_1)\, dt_1dt_2 = \begin{cases} 0, & k \neq m; \\ \Psi^R_{ik}(\mathbf{r},\mathbf{r}_1), & k = m. \end{cases} \qquad (8)$$

При выполнении (8) выражения для сигнального и помеховых эффектов упрощаются до суммы по одноименным передатчикам

$$I^0(\mathbf{r}_1,\mathbf{r}_0) = \frac{1}{2}\int_D F^0(\mathbf{r}) \operatorname{Re} \sum_{\substack{i,j=1...Rc \\ k=1...Tr}} \dot\eta_{ik}(\mathbf{r},\mathbf{r}_0)\, \dot\eta^*_{jk}(\mathbf{r}_1,\mathbf{r}_0)\, \Psi_{Rijk}(\mathbf{r},\mathbf{r}_1)\, d\mathbf{r}\,; \qquad (9)$$

$$I^D(\mathbf{r}_1,\mathbf{r}_0) = \frac{1}{2}\int_D \operatorname{Re} \sum_{\substack{i,j=1...Rc \\ k=1...Tr}} F^D_{ik}(\mathbf{r})\, \dot\eta^*_{jk}(\mathbf{r}_1,\mathbf{r}_0)\, \Psi_{Rijk}(\mathbf{r},\mathbf{r}_1)\, d\mathbf{r}\,; \qquad (10)$$

$$I^N(\mathbf{r}_1,\mathbf{r}_0) = \operatorname{Re} \sum_{\substack{i,j=1...Rc \\ m=1...Tr}} \eta^*_{jm}(\mathbf{r}_1,\mathbf{r}_0,\boldsymbol{\gamma}) \int_0^T\int_0^T n_i(t_1)\, R^{-1}_{uij}(t_1,t_2)\, \dot S^*_{jm}(t_2,\mathbf{r}_1)\, dt_1dt_2\,. \qquad (11)$$

При этом корреляционные функции, необходимые для комплексирования, будут определяться выражениями:

$$R_{uij}(t_1,t_2) \cong \frac{1}{2}\operatorname{Re}\int_{D`} \sigma^D_{Aij}(\mathbf{r}) \sum_{k=1...Tr} \dot S_{ik}(t_1,\mathbf{r})\, \dot S_{jk}{}^*(t_2,\mathbf{r}`)\, d\mathbf{r} + R_{nij}(t_1,t_2)\,; \qquad (12)$$

$$\begin{aligned} R_I(\mathbf{r}_1,\mathbf{r}_2) \cong \frac{1}{8} &\sum_{\substack{i,j,p,q=1...Rc \\ k,l=1...Tr}} \operatorname{Re} \int_D\int_D < F^D_{ik}(\mathbf{r})\, F^{D^*}_{pl}(\mathbf{r}`) > \dot\eta^*_{jk}(\mathbf{r}_1,\mathbf{r}_0)\, \dot\eta_{ql}(\mathbf{r}_2,\mathbf{r}_0) \times \\ &\times \int_0^T\int_0^T\int_0^T\int_0^T \dot S_{ik}(t,\mathbf{r})\, \dot S^*_{pl}(\grave t_1,\mathbf{r}`)\, R^{-1}_{uij}(t_1,t_2)\, R^{-1}_{upq}(\grave t_1,\grave t_2)\, \dot S^*_{jk}(t,\mathbf{r}_1) \times \\ &\times \dot S_{ql}(\grave t_2,\mathbf{r}_2)\, dt_1dt_2d\grave t_1d\grave t_2 d\mathbf{r}d\mathbf{r}` + \frac{1}{2} \sum_{\substack{i,j,p,q=1...Rc \\ k,m=1...Tr}} \int_0^T\int_0^T < n_i(t_1) n_p(\grave t_1) > \times \\ &\times \operatorname{Re}\int_0^T\int_0^T R^{-1}_{uij}(t_1,t_2)\, \dot S^*_{\eta jm}(t_2,\mathbf{r}_1,\mathbf{r}_0)\, R^{-1}_{upq}(\grave t_1,\grave t_2)\, \dot S_{\eta qk}(\grave t_2,\mathbf{r}_2,\mathbf{r}_0)\, d\grave t_1 d\grave t_2 dt_1 dt_2\,. \end{aligned} \qquad (13)$$

Обнаружение точечных объектов. Для случая обнаружения точечных объектов, представим их коэффициент отражения в виде $\dot{\mathbf{F}}(\mathbf{r},\mathbf{r}_0) = F^0(\mathbf{r}_0)\dot{\boldsymbol{\eta}}(\mathbf{r}_0,\boldsymbol{\gamma})\delta(\mathbf{r}-\mathbf{r}_0)$. При этом опорное изображение таких объектов на основании будет представлять собой взвешенную сумму пространственных функций неопределенности с учетом декорреляции:

$$I^0[\mathbf{r}_1 / a(\mathbf{r}_0)] = \frac{1}{2} F^0(\mathbf{r}_0)\,\mathrm{Re} \sum_{\substack{i,j=1...Rc \\ k,m=1...Tr}} \dot{\eta}_{ik}(\mathbf{r}_0)\, \dot{\eta}^*_{jm}(\mathbf{r}_1)\, \Psi_{R\,ikjm}(\mathbf{r}_0, \mathbf{r}_1)\,. \qquad (14)$$

Сам алгоритм обнаружения с учетом декорреляции в пространственной области упростится до сравнения результата обработки входного векторного процесса для точки $\mathbf{r}_0$ с порогом, представляющим собой оценку средней УЭПР объекта

$$\frac{1}{16}[F^0(\mathbf{r}_0)]^2\,\mathrm{Re} \sum_{\substack{i,j,p,q=1...Rc \\ k,m,l,n=1...Tr}} \dot{\eta}_{ik}(\mathbf{r}_0)\, \dot{\eta}_{pl}(\mathbf{r}_0) \int_D \dot{\eta}^*_{qn}(\mathbf{r}_2) \times$$

$$\times \Psi_{R\,plqn}{}^*(\mathbf{r}_0, \mathbf{r}_2) \int_D \dot{\eta}^*_{jm}(\mathbf{r}_1)\, \Psi_{R\,ikjm}(\mathbf{r}_0, \mathbf{r}_1)\, R_I^{-1}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2)\, d\mathbf{r}_1 d\mathbf{r}_2\,. \qquad (15)$$

Если модель аддитивных помех предполагает их независимость в различных приемных каналах и модель поверхности характеризуется малым уровнем взаимных корреляционных связей между различными бистатическими парами, матрицу $\mathbf{R}_u(t_1, t_2)$ можно полагать диагональной и упростить алгоритм обнаружения до

$$\frac{1}{4}\iiint_{DDD} F^0(\mathbf{r},\mathbf{r}_0)\, R_I^{-1}(\mathbf{r}_1,\mathbf{r}_2)\,\mathrm{Re} \sum_{i,j=1...Rc} \int_0^T\!\!\int_0^T u_i(t_1)\, R_{u\,ii}^{-1}(t_1,t_2)\, \dot{S}^*_{\eta i}(t_2,\boldsymbol{\gamma},\mathbf{r}_1,\mathbf{r}_0)\, dt_1 dt_2 \times$$

$$\times \int_0^T\!\!\int_0^T \dot{S}_{\eta j}{}^*(t_1,\boldsymbol{\gamma},\mathbf{r},\mathbf{r}_0)\, R_{u\,jj}^{-1}(t_1,t_2)\, \dot{S}_{\eta j}(t_2,\boldsymbol{\gamma},\mathbf{r}_2,\mathbf{r}_0)\, dt_1 dt_2 d\mathbf{r} d\mathbf{r}_1 d\mathbf{r}_2 \underset{\hat{a}=0}{\overset{\hat{a}=1}{\gtrless}} \iiiint_{DDDD} \frac{F^0(\mathbf{r},\mathbf{r}_0)}{16} \times$$

$$\times F^0(\mathbf{r}',\mathbf{r}_0)\, R_I^{-1}(\mathbf{r}_1,\mathbf{r}_2)\,\mathrm{Re} \sum_{i,j=1...Rc} \int_0^T\!\!\int_0^T \dot{S}_{\eta i}(t_1,\boldsymbol{\gamma},\mathbf{r},\mathbf{r}_0)\, R_{u\,ii}^{-1}(t_1,t_2)\, \dot{S}^*_{\eta i}(t_2,\boldsymbol{\gamma},\mathbf{r}_1,\mathbf{r}_0)\, dt_1 dt_2 \times$$

$$\times \int_0^T\!\!\int_0^T \dot{S}_{\eta j}{}^*(t_1,\boldsymbol{\gamma},\mathbf{r}',\mathbf{r}_0)\, R_{u\,jj}^{-1}(t_1,t_2)\, \dot{S}_{\eta j}(t_2,\boldsymbol{\gamma},\mathbf{r}_2,\mathbf{r}_0)\, dt_1 dt_2 d\mathbf{r} d\mathbf{r}' d\mathbf{r}_1 d\mathbf{r}_2 + \ln(l_0)$$

выполнения операций взвешенного суммирования результатов обработки во временной области исключительно для одноименных каналов приема.

Квазиоптимальные алгоритмы. Для корректного выполнения операций по обнаружению объектов на основании оптимальной совместной обработки в многопозиционной системе с синтезированием апертуры антенны необходимо наличие априорной информации. Эта информация включает в себя сведения об амплитудно-фазовой диаграмме отражения от объекта, статистических характеристиках отражений от фона (подстилающей поверхности), данные об ориентации объекта и статистических характеристиках аддитивной помехи на входе приемных устройств.

Во многих практических случаях все либо часть этих параметров неизвестна. В этом случае необходимо применять квазиоптимальные алгоритмы обнаружения, которые также могут использоваться для сужения области поиска объектов, что обеспечит более быстрое выполнение операций интерпретации.

При отсутствии электродинамической модели подстилающей поверхности, учитывающей необходимую априорную информацию о поведении $\mathbf{R}_{\mathrm{I\,ij}}(\mathbf{r}_1,\mathbf{r}_2)$ алгоритм обнаружителя упрощается до взвешенного суммирования произведений декоррелированных РЛИ с опорными изображениями $\mathrm{I}_{\mathrm{i}}^{0}(\mathbf{r})$ и сравнению их с адаптивным порогом. Аппроксимация матрицы $\mathbf{R}_{\mathrm{I}}(\mathbf{r}_1,\mathbf{r}_2)$ диагональной $\hat{\mathbf{R}}_{\mathrm{I}}(\mathbf{r}_1,\mathbf{r}_2)=\mathrm{diag}\{\mathbf{R}_{\mathrm{I}}(\mathbf{r}_1,\mathbf{r}_2)\}$ приводит к ухудшению качества работы обнаружителя.

Оптимальный алгоритм оценки комплексного коэффициента отражения для произвольной бистатической пары при отсутствии сведений о недиагональных элементах корреляционной матрицы запишем в виде

$$\dot{\mathrm{I}}_{\mathrm{ik}}(\mathbf{r}_1)=\int_0^T\!\!\int_0^T \mathrm{u}_{\mathrm{i}}(\mathrm{t}_1)\,\mathrm{R}_{\mathrm{u\,ik}}^{-1}(\mathrm{t}_1,\mathrm{t}_2)\,\dot{\mathrm{S}}_{\mathrm{ik}}^{*}(\mathrm{t}_2,\mathbf{r}_1)\,\mathrm{dt}_1\mathrm{dt}_2=\dot{\mathrm{I}}_{\mathrm{ik}}^{0}(\mathbf{r}_1)+\dot{\mathrm{I}}_{\mathrm{ik}}^{\mathrm{N}}(\mathbf{r}_1)+\dot{\mathrm{I}}_{\mathrm{ik}}^{\mathrm{IS}}(\mathbf{r}_1),$$

где выделена интерференционная межканальная компонента $\dot{\mathrm{I}}_{\mathrm{ik}}^{\mathrm{IS}}(\mathbf{r}_1)$, зависящая от степени ортогональности сигналов.

При отсутствии априорных данных о фазовой структуре диаграммы отражения объекта операции обнаружения необходимо выполнять по результатам оценки $|\dot{\mathrm{I}}_{\mathrm{ik}}(\mathbf{r}_1)|$ либо $|\dot{\mathrm{I}}_{\mathrm{ik}}(\mathbf{r}_1)|^2$. Для реальных покровов плотность вероятности помехи, являющейся функцией пространственных координат, в общем случае не может быть задана аналитически. Приближенные функционалы, использующиеся для описания $\dot{\mathrm{I}}_{\mathrm{ik}}^{\mathrm{N}}(\mathbf{r}_1)$, базируются на различных эмпирических предположениях и результатах экспериментов, [6]. Здесь мы используем гауссовскую модель, которая является наиболее «слабой» по отношению к аналогичным предположениям относительно векторного процесса $\mathbf{u}(\mathrm{t}_1)$, $\mathrm{u}_{\mathrm{i}}(\mathrm{t}_1)$ и $\mathrm{I}_{\mathrm{i}}(\mathbf{r}_1)$. В рамках этой аппроксимации плотность вероятности распределения $|\dot{\mathrm{I}}_{\mathrm{ik}}(\mathbf{r}_1)|$ представим стационарным (в широком смысле) рэлеевским законом

$$\mathrm{p}(|\,\mathrm{I}_{\mathrm{ik}}(\mathbf{r}_1,\mathbf{r}_2)\,|)=\frac{\mathrm{I}_{\mathrm{ik}}(\mathbf{r}_1)\,\mathrm{I}_{\mathrm{ik}}(\mathbf{r}_2)}{\mathrm{D}_{\mathrm{I}}^{2}[1-\mathrm{R}_{\mathrm{I}}(\mathbf{r}_1-\mathbf{r}_2)]}\exp\left\{-\frac{\mathrm{I}_{\mathrm{ik}}{}^{2}(\mathbf{r}_1)+\mathrm{I}_{\mathrm{ik}}{}^{2}(\mathbf{r}_2)}{2\mathrm{D}_{\mathrm{I}}[1-\mathrm{R}_{\mathrm{I}}(\mathbf{r}_1-\mathbf{r}_2)]}\right\}\times$$

$$\times I_0\left\{\frac{I_{ik}(\mathbf{r}_1)I_{ik}(\mathbf{r}_2)}{D_I}\cdot\frac{R_I(\mathbf{r}_1-\mathbf{r}_2)}{1-R_I{}^2(\mathbf{r}_1-\mathbf{r}_2)}\right\}, \qquad (16)$$

где $I_0\{\}$ – функция Бесселя; $R_I(\mathbf{r}_1-\mathbf{r}_2)$ – корреляционная функция.

В первом случае по каждому из РЛИ, полученных в бистатической паре, выносится решение о наличии либо отсутствии объекта в соответствии с правилом

$$\int_D\int_D \Big|\int_0^T\int_0^T u_{ik}(t_1)\, R_{uik}^{-1}(t_1,t_2)\, \dot{S}_{ik}^{*}(t_2,\mathbf{r}_1)\, dt_1 dt_2 \Big|\, R_I^{-1}(\mathbf{r}_1,\mathbf{r}_2) I^0(\mathbf{r}_0,\mathbf{r}_2)\, d\mathbf{r}_1 d\mathbf{r}_2 \underset{\hat{a}=0}{\overset{\hat{a}=1}{\gtrless}} l_0 . \qquad (17)$$

Выводы. Представленные в работе оптимальные и квазиоптимальные алгоритмы обнаружения позволяют с высокой эффективностью решать задачи обнаружения и идентификации областей с характерными законами отражения электромагнитного поля. Квазиоптимальные алгоритмы позволяют выполнить обнаружение при неполных априорных данных. Дальнейшим развитием работы является модификация полученных алгоритмов для многочастотных, поляризационных систем с аналитическим определением качественных показателей обнаружения.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Егоров В.В., Федотова З.К. Задачи, программы и космические системы исследования Земли // Итоги науки и техники. Сер. Исследование Земли из космоса. – 1987. – Т. 1. – С. 180 – 194.*
2. *Special Issue on Automatic Target Recognition // Lincoln Laboratory Journal. – Spring 1993. – Vol. 6, N 1.*
3. *Многопозиционные радиотехнические системы / В.С. Кондратьев, А.Ф. Котов, Л.Н. Марков. – М.: Радио и связь, 1986. – 264 с.*
4. *Ксендзук А.В. Аналитическое и численное определение качественных показателей функционирования радиолокационных систем дистанционного зондирования // Электромагнитные волны и электронные системы. – М. – 2004. – Т. 9, № 5. – С. 35 – 41.*
5. *Ксендзук А.В. Критерии и алгоритмы оптимизации обработки в системах дистанционного зондирования // Вестник Харьковского национального университета им. В.Н. Каразина. – Х.: ХНУ, 2004. – № 646. – С. 116 – 119.*
6. *Ксендзук А.В. Принципы и алгоритмы имитационного статистического моделирования пространственно-временных процессов и их обработки в радиолокационных системах с синтезированием апертуры антенны // Вестник Харьковского национального университета им. В.Н. Каразина. – Х.:ХНУ, 2004. – № 622. – С. 102 – 105.*

Поступила 20.10.2005

Рецензент: доктор технических наук, профессор В.К. Волосюк,
Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ».