

УДК 621.396

## МОДИФИЦИРОВАННЫЙ АЛГОРИТМ ОБНАРУЖЕНИЯ СИГНАЛА, ОТРАЖЕННОГО ОТ НАЗЕМНОЙ ДВИЖУЩЕЙСЯ ЦЕЛИ, В РСА С ФАР

**Филатов А.А.**, к.т.н., доцент, E-mail: faa\_1959@mail.ru  
МГТУ МИРЭА, Концерн «Вега», Москва, Россия

**Аннотация.** На основе марковской теории нелинейного оценивания решена задача синтеза пространственно-многоканального измерителя углового положения движущейся наземной цели для РСА с ФАР. Постановка задачи синтеза предусматривала наличие отраженного сигнала с определенной доплеровской частотой. В данной статье рассмотрены алгоритмы, которые могут быть применены для решения этой задачи.

**Ключевые слова:** траекторный сигнал; отношение правдоподобия; подстилающая поверхность; доплеровская частота; радиальная скорость цели; угловое положение цели; пороговое устройство.

## A MODIFIED ALGORITHM FOR DETECTING THE SIGNAL REFLECTED FROM THE GROUND TARGETS IN SAR USING PHASED ARRAY RADAR SYSTEM

**Filatov A.A.**, PhD., ass.prof., E-mail: faa\_1959@mail.ru  
MSTU MIREA, Corporation "Vega", Moscow, Russia

**Abstract.** The problem of synthesis of spatial multi-channel angular position meter for moving ground targets for SAR with PAR is solve by applying the Markov nonlinear estimation theory. Synthesis problem involves for reflected signal with a certain Doppler frequency. This article describes the algorithms that can be applied to solve this problem.

**Keywords:** trajectory signal; the credibility relation; spreading surface; doppler frequency; radial speed of the purpose; the angular provision of the purpose; the threshold device.

В РСА ухудшение характеристик обнаружения связано в основном с фоновой составляющей местности [3]. Сигналы цели и подстилающей поверхности складываются аддитивно, вследствие чего действие флуктуирующего фона можно рассматривать как аддитивную некоррелированную с сигналом от цели помеху, а задачу обнаружения малоразмерных целей на фоне подстилающей поверхности свести к задаче обнаружения флуктуирующего сигнала цели на фоне аддитивного шума.

Траекторный сигнал РСА в  $m$ -ом элементе ФАР можно записать [4]:

$$\dot{U}_m(t) = \sum_{l=1}^L \dot{\varepsilon}_l G(\beta_l) \exp\{-j\varphi_l(t)\} \exp\{-j\varphi_m(\beta_l)\} + \dot{n}_m(t), \quad (1)$$

$$\text{где } \varphi_l(t) = 2k \left( v_{\text{дог}} t + a_r \frac{t^2}{2} \right), \quad \varphi_m(\beta_l) = -k \cdot (m-1) \cdot d_s \cdot \sin\beta_l.$$

Будем считать, что если в  $l$ -ом разрешаемом элементе поверхности присутствует цель, то модуль комплексного коэффициента переотражения  $|\dot{\epsilon}_l|$  распределен по закону Райса, в случае отсутствия цели - по релеевскому закону. Случайная фаза в обоих случаях имеет распределение равной вероятности.

Как правило, оптимальная процедура обнаружения в радиолокации сводится к формированию отношения правдоподобия [5]:

$$z\{\dot{U}(t)\} = \frac{F[u/\gamma = 1]}{F[u/\gamma = 0]} > h_0, \tag{2}$$

где  $\gamma=1$  означает, что есть сигнал;  $\gamma=0$  - нет сигнала;  $F[\cdot]$  - функционал правдоподобия (ФПВ).

Принимая во внимание, что ФПВ комплексного пространственно-временного белого шума имеет вид [6]

$$F\{\dot{n}(t)\} = C_0 \exp\left\{ \frac{1}{2N_0} \sum_{m=1-\infty}^M \int |\dot{n}_m(t)|^2 dt \right\},$$

отношение правдоподобия для РСА с ФАР запишем в виде:

$$z\{\dot{U}(t)\} = \frac{\exp\left\{ -\frac{1}{2N_0} \sum_{m=1-\infty}^M \int |\dot{U}_m(t) - \dot{S}_m(t)|^2 dt \right\}_{\gamma=1}}{\exp\left\{ -\frac{1}{2N_0} \sum_{m=1-\infty}^M \int |\dot{U}_m(t) - \dot{S}_m(t)|^2 dt \right\}_{\gamma=0}} = \frac{\exp\left\{ \frac{1}{N_0} \operatorname{Re} \sum_{m=1-\infty}^M \int \dot{U}_m(t) \dot{S}_m^*(t) dt - \frac{1}{2N_0} \sum_{m=1-\infty}^M \int |\dot{S}_m(t)|^2 dt \right\}_{\gamma=1}}{\exp\left\{ \frac{1}{N_0} \operatorname{Re} \sum_{m=1-\infty}^M \int \dot{U}_m(t) \dot{S}_m^*(t) dt - \frac{1}{2N_0} \sum_{m=1-\infty}^M \int |\dot{S}_m(t)|^2 dt \right\}_{\gamma=0}}, \tag{3}$$

где  $\operatorname{Re}(\cdot)$  - вычисление реальной части;  $*$  - комплексное сопряжение.

Вычитаемое в числителе определяет отношение (сигнал + фон местности)/шум, а в знаменателе - фон местности/шум. От наблюдения они не зависят, поэтому их можно включить в пороговое значение. И, учитывая

$$\int_{-T_c/2}^{T_c/2} \exp[j2k v_{ic} (\beta_i - \beta_l)t] dt = 0 \quad \text{при } i \neq l,$$

отношение правдоподобия (2) можно записать через условное отношение правдоподобия

$$z \left\{ \frac{\dot{U}(t)}{f_{\partial\theta}, |\dot{\varepsilon}_{u\phi}|, |\dot{\varepsilon}_{\phi}|, \varphi_{u\phi}, \varphi_{\phi}} \right\} = \frac{\exp \left\{ \frac{1}{N_0} \operatorname{Re} \int_{-T_c/2}^{T_c/2} \dot{U}_{\Sigma i}(t) \dot{\varepsilon}_{u\phi}^* G(\beta_i) \exp[j\varphi_i(t)] dt \right\}}{\exp \left\{ \frac{1}{N_0} \operatorname{Re} \int_{-T_c/2}^{T_c/2} \dot{U}_{\Sigma i}(t) \dot{\varepsilon}_{\phi}^* G(\beta_i) \exp[j\varphi_i(t)] dt \right\}} > h_1, \quad (4)$$

где  $\dot{U}_{\Sigma i}(t)$  - сигнал на выходе при условии, что максимум ДНА на прием формируется в направлении  $\square$ .

Вводя обозначения  $\varepsilon_{u\phi} = |\dot{\varepsilon}_{u\phi}|$ ,  $\varepsilon_{\phi} = |\dot{\varepsilon}_{\phi}|$  и

$$W = \left| \int_{-T_c/2}^{T_c/2} \dot{U}_{\Sigma i}(t) G(\beta_i) \exp[j\varphi_i(t)] dt \right|, \quad \chi = \frac{\operatorname{Re} \int_{-T_c/2}^{T_c/2} \dot{U}_{\Sigma i}(t) G(\beta_i) \exp[j\varphi_i(t)] dt}{\left| \int_{-T_c/2}^{T_c/2} \dot{U}_{\Sigma i}(t) G(\beta_i) \exp[j\varphi_i(t)] dt \right|},$$

условное отношение правдоподобия (4) запишется:

$$z \left\{ \frac{\dot{U}(t)}{f_{\partial\theta}, \varepsilon_{u\phi}, \varepsilon_{\phi}, \varphi_{u\phi}, \varphi_{\phi}} \right\} = \frac{\exp \left[ \frac{1}{N_0} \cdot \varepsilon_{u\phi} \cdot W \cdot \cos(\chi + \varphi_{u\phi}) \right]}{\exp \left[ \frac{1}{N_0} \cdot \varepsilon_{\phi} \cdot W \cdot \cos(\chi + \varphi_{\phi}) \right]} > h_1. \quad (5)$$

Для устранения влияния на процедуру обнаружения сопутствующих случайных параметров  $\varepsilon_{u\phi}, \varepsilon_{\phi}, \varphi_{u\phi}, \varphi_{\phi}$  проведем по ним усреднение [5].

Усредним числитель. Для чего запишем:

$$\int_0^{\infty} \frac{\varepsilon_{u\phi}}{D_{u\phi}} \exp \left( -\frac{\varepsilon_{u\phi}^2 + \varepsilon_{\phi}^2}{2D_{u\phi}} \right) I_0 \left( \frac{\varepsilon_{u\phi} \cdot \varepsilon_{\phi}}{D_{u\phi}} \right) \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \exp \left\{ \varepsilon_{u\phi} \frac{W}{N_0} \cos(\chi + \varphi_{u\phi}) \right\} d\varphi_{u\phi} d\varepsilon_{u\phi},$$

где  $I_0(\cdot)$  - функция Бесселя нулевого порядка от мнимого аргумента;

$\varepsilon_{\phi} = M \{ \varepsilon_{u\phi} \}$ , M - операция вычисления математического ожидания.

Учитывая известные табличные интегралы [7]

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} e^{x \cos(\chi+y)} dy = I_0(x), \quad \int_0^{\infty} x e^{-\alpha x^2} I_0(\mu x) dx = \frac{1}{2\alpha} \exp\left(\frac{\mu^2}{4\alpha}\right), \quad (6)$$

$$\int_0^{\infty} x e^{-\alpha x^2} I_0(\mu x) J_0(\nu x) dx = \frac{1}{2\alpha} \exp\left(\frac{\mu^2 - \nu^2}{4\alpha}\right) J_0\left(\frac{\mu\nu}{2\alpha}\right), \quad (7)$$

и, принимая во внимание  $I_0(x) = J_0(jx)$ , т.к.  $I_n(x) = j^{-n} J_n(jx)$ , получим числитель в виде:

$$C_1 \cdot \exp\{[C_2 - C_3] \cdot W^2\},$$

$$\text{где } C_1 = \frac{D_{\psi\phi}}{D_{\psi\phi} + 2D_{\psi}}; \quad C_2 = \frac{D_{\psi\phi} D_{\psi}}{2N_0^2 \cdot (D_{\psi\phi} + 2D_{\psi})}; \quad C_3 = \frac{D_{\psi\phi}}{N_0^2}.$$

Усредняя знаменатель при помощи интегралов (6), получим:

$$\exp(C_4 \cdot W^2)$$

$$\text{где } C_4 = \frac{D_{\psi}}{2N_0^2}.$$

Принимая во внимание, что  $C_1$  не зависит от наблюдения, внесем его в пороговое значение и условное отношение правдоподобия запишем:

$$z \left[ \frac{\dot{U}(t)}{f_{\text{дс}}} \right] = \frac{\exp[(C_2 - C_3) \cdot W^2]}{\exp(C_4 \cdot W^2)} > h'. \quad (8)$$

В целях упрощения [2] прологарифмируем (8) и поскольку константы  $C_2$ ,  $C_3$  и  $C_4$  можно добавить к значению  $\ln(h')$  имеем:

$$z \left[ \frac{\dot{U}(t)}{f_{\text{дс}}} \right] = \left| \int_{-T_c/2}^{T_c/2} \dot{U}_{\Sigma_i}(t) \cdot G(\beta_i) \cdot \exp[j\phi_i(t)] dt \right|_{d_0}^{d_1} > h. \quad (9)$$

Доплеровская частота является случайной величиной, зависящей от возможной  и углового положения цели , поэтому (9) есть условное отношение правдоподобия для фиксированных  $v_{rc}$  и .

Аппроксимируя радиальную скорость цели и ее угловое положение независимыми случайными величинами  $v_{rc} \in [-v_{rc\text{max}} \dots + v_{rc\text{max}}]$  и  $\beta_{\text{цл}} \in \left[-\frac{\theta_0}{2} \dots + \frac{\theta_0}{2}\right]$  с вероят-

ностями  $p(v_{ru_i}) = p(v_{ru} = v_{ru_i})$ ,  $i = \overline{1, I}$  и  $p(\beta_{ul}) = p(\beta_u = \beta_{ul})$ ,  $l = \overline{1, L}$  соответственно, априорные плотности вероятностей  $\square$  и  $\beta_{ul}$  можно представить

$$p_{pr}(v_{ru}) = \sum_i p_i \cdot \delta(v_{ru} - v_{ru_i}), \quad p_{pr}(\beta_u) = \sum_l p_l \cdot \delta(\beta_u - \beta_{ul}),$$

а отношение правдоподобия получить усреднением условного отношения правдоподобия:

$$\begin{aligned} z[\dot{U}(t)] &= \int_{v_{ru}} \int_{\beta_u} z\left[\frac{\dot{U}(t)}{v_{ru}, \beta_u}\right] \sum_i \sum_l p_i \delta(v_{ru} - v_{ru_i}) p_l \delta(\beta_u - \beta_{ul}) dv_{ru} d\beta_u = \\ &= \sum_i \sum_l p_i \cdot p_l \cdot z\left[\frac{\dot{U}(t)}{v_{ru_i}, \beta_{ul}}\right]. \end{aligned} \tag{10}$$

Полученный алгоритм является многоканальным, содержащим  $i$ -каналов по скорости и  $l$ -каналов по углу. В каждом из каналов формируется условное отношение правдоподобия. Число каналов определяется выбранным диапазоном изменения скорости цели и угловой разрешающей способности РСА. Каждый канал оканчивается пороговым устройством. Такая система позволяет одновременно обнаруживать сигналы и приближенно оценивать параметры целей по номерам каналов.

Реализация такого типа обнаружителя, имеет существенные технические трудности. Одна из проблем заключается в необходимости формирования веерной ДНА с максимумами в направлениях на геометрические центры разрешаемых элементов поверхности.

Раскроем запись сигнала на выходе ФАР в (9):

$$\dot{U}_{\Sigma i}(t) = \sum_m \dot{U}_m(t) \cdot \exp[jk(m-1)d_s \sin \beta_i]. \tag{11}$$

В случаях практического применения РСА  $\beta \in \left[-\frac{\theta_0}{2}, \dots, \frac{\theta_0}{2}\right] \ll 1$ . Тогда, экспоненциальный множитель можно разложить в ряд Маклорена относительно  $\beta = \beta_0 = 0$  и ограничиться при этом линейным членом:

$$\begin{aligned} \sum_m \exp[jk(m-1)d_s \sin \beta_i] &= \sum_m \exp[jk(m-1)d_s \sin \beta_0] - \\ &- \sum_m jk \cdot (m-1) \cdot d_s \cdot \beta_i \cdot \exp[jk \cdot (m-1) \cdot d_s \cdot \sin \beta_i]. \end{aligned} \tag{12}$$

Первая сумма определяет суммарную диаграмму направленности с максимумом в направлении угла  $\beta_0$ , а вторая - разностную ДНА в направлении  $\beta_i$ . При этом условное отношение правдоподобия (9) запишется:

$$z \left[ \frac{\dot{U}(t)}{f_{\delta\epsilon}} \right] = \left| \int_{-T_c/2}^{T_c/2} \dot{U}_{\Sigma 0}(t) \cdot G(\beta_i) \cdot \exp[j\varphi_i(t)] dt - \int_{-T_c/2}^{T_c/2} \dot{U}_{\Delta 0}(t) \cdot G(\beta_i) \cdot \exp[j\varphi_i(t)] dt \right|^2 \begin{matrix} d_1 \\ > \\ < \\ d_0 \end{matrix} h, \quad (13)$$

где  $\dot{U}_{\Sigma 0}(t)$  и  $\dot{U}_{\Delta i}(t)$  - сигналы суммарного и разностного каналов, ориентированных максимумами на центр формируемого кадра.

Доплеровскую частоту можно аппроксимировать дискретной случайной величиной  $f_{\delta\epsilon} \in [-f_{\delta\max}, \dots, +f_{\delta\max}]$  с вероятностями  $p(f_{\delta i}) = p(f_{\delta} = f_{\delta i})$ ,  $i = \overline{1, I}$ . Априорная плотность вероятностей для доплеровской частоты может быть представлена в виде суммы:

$$p_{pr}(f_{\delta\epsilon}) = \sum_i p_i \cdot \delta(f_{\delta\epsilon} - f_{\delta i}).$$

Отношение правдоподобия, определяющее алгоритм обнаружения в данном случае, после усреднения имеет вид:

$$z[\dot{U}(t)] = \sum_i p_i \cdot z \left[ \frac{\dot{U}(t)}{f_{\delta i}} \right]. \quad (14)$$

Схема обнаружителя в соответствие с результатами (13) и (14) представлена на рисунке 1.

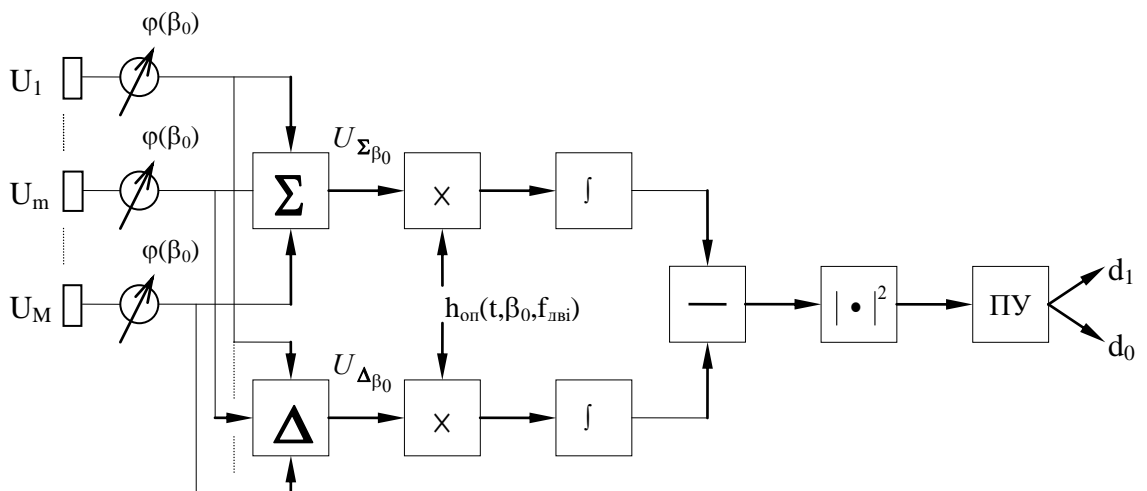


Рисунок 1 — Обнаружитель по схеме суммарно-разностной обработки

Так как  $\beta \ll 1$ , то при разложении  $exp$  (12) вторым слагаемым можно пренебречь и тогда получим следующий алгоритм обнаружения:

$$z[\dot{U}(t)] = \sum_i \left| \int_{-T_c/2}^{T_c/2} \dot{U}_{\Sigma 0}(t) \cdot G(\beta_i) \cdot \exp[j\varphi_i(t)] dt \right|^2 \begin{matrix} d_1 \\ > \\ < \\ d_0 \end{matrix} h. \quad (15)$$

Его схема представлена на рисунке 2 и процесс обнаружения заключается в том, что сигнал на квадратичном выходе каждого  $i$ -ого доплеровского фильтра сравнивается с порогом.

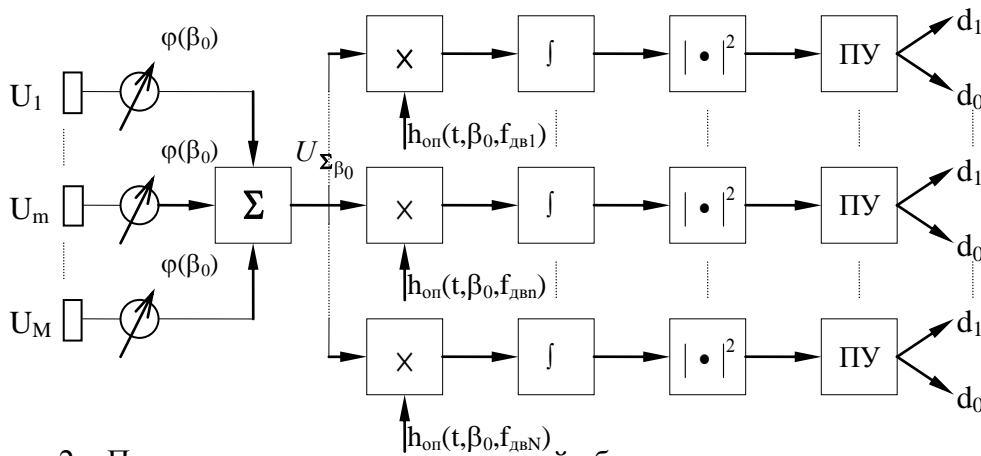


Рисунок 2 – Пространственно-одноканальный обнаружитель

Анализ показал, что пространственно-многоканальный обнаружитель, разработанный на основе модифицированного алгоритма обнаружения, позволяет осуществлять обнаружение высоконтрастных медленно движущихся наземных целей на фоне подстилающей поверхности и имеет высокие потенциальные характеристики за счет отдельной пространственной обработки сигнала цели и сигнала, отраженного от местности и неподвижных объектов на ней, с дальнейшей частотной фильтрацией. Однако следует учитывать, что эффективность обнаружения зависит не только от отношения сигнал/фон, но и от скорости движения цели.

Полученные алгоритмы позволяют строить систему обработки РСА в виде совместного обнаружения и оценивания местоположения движущихся целей. Отличительная

особенность состоит в том, что одновременно происходит оценка подстилающей поверхности и делает такую систему обработки подстраиваемой (адаптивной) под особенности местности.

### Список литературы

1. Карпов О.А., Филатов А.А. Обобщенный фильтр Калмана-Бьюси в задаче пространственно-временной обработки сигналов РСА. НММ по цифровой обработке сигналов. – М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 1995.
2. Ярлыков М.С., Миронов М.А. Марковская теория оценивания случайных процес- сов. – М.: Радио и связь, 1993.
3. Радиолокационные системы воздушной разведки, дешифрирование радиолокационных изображений. Учебник / Карпов О.А., Толстов Е.Ф., Филатов А.А. и др.; Под ред. Л.А.Школьного. – М.: ВВИА им. Н.Е.Жуковского, 2008.
4. Толстов Е.Ф., Филатов А.А. Модель пространственно-временного сигнала, создаваемого движущейся точечной целью в РСА. НММ по цифровой обработке сигналов. – М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 1995.
5. Тихонов В.И., Харисов В.Н. Статистический анализ и синтез радиотехнических систем: Учеб. пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 1991.
6. Карпов О.А., Толстов Е.Ф., Филатов А.А. Идентификация движущихся целей в РСА и пути ее решения методами статистического синтеза. Цифровая обработка сигналов. Научно-методические материалы. – М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 2003.
7. Градштейн И.С., Рыжик И.М. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. – М.: Наука, 1971.