

ISSN 1028-821X. Radiofiz. Electron. 2020. Vol. 25, No. 2: 46–53

DOI: <https://doi.org/10.15407/rej2020.02.046>

УДК 621.396:621.391.82

PACS 42.30.sy

### О.В. Сытник

Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины

12, ул. Акад. Проскуры, Харьков, 61085, Украина

E-mail: [ssvp11@ire.kharkov.ua](mailto:ssvp11@ire.kharkov.ua)

## Алгоритм обработки сигналов в многоканальной РЛС для спасателей

**Предмет и цель работы.** Предметом исследования является система когерентной цифровой обработки сигналов радара, включающая ряд пространственно-разнесенных приемных пунктов и предназначенная для обнаружения подвижных объектов, скрытых за оптически непрозрачными препятствиями. Целью работы является синтез оптимальной в смысле минимума среднего байесовского риска структуры системы обработки сигналов, оценка эффективности ее работы и выработка рекомендаций по выбору параметров системы предварительной обработки сигналов.

**Методы и методология работы** основаны на анализе вероятностных характеристик полезных сигналов и помех, синтезе алгоритма обработки наблюдаемых реализаций сигналов по единому критерию качества – минимуму среднего значения потерь от неправильных решений. Задача обнаружения, оценивания числа и угловых координат подвижных объектов формулируется как статистическая задача. Алгоритм углового разрешения точечных целей строится по принципу проверки статистических гипотез. Априорная информация о характеристиках сигналов и помех при перемещении цели, а также об их вероятностных свойствах позволяет построить процедуру обработки сигналов, обеспечивающую разрешающую способность, превышающую энергетический предел разрешения, путем пространственного синтезирования апертуры системы наблюдения.

**Результаты работы.** Получены аналитические соотношения для процедуры, осуществляющей совместно операции обнаружения и измерения угла прихода сигнала. Оценки углового положения целей используются в алгоритме синтезирования апертуры. Показано, что при относительно высоких отношениях сигнал/шум и линейном однонаправленном перемещении целей возможно синтезирование апертуры в реальном масштабе времени.

**Заключение.** Разработан двухканальный алгоритм наблюдения за подвижными целями. На основе априорной информации о характере движения целей, оценках их углового положения и числа построена процедура пассивного синтезирования апертуры системы наблюдения. Приведены рекомендации по реализации алгоритмов для работы в реальном времени. Ил. 3. Библиогр.: 16 назв.

**Ключевые слова:** выборка, дискретная обработка, радиолокационная станция, спектральная функция, частота дискретизации, байесовский риск, алгоритм, критерий, белый шум.

При использовании метода зондирования радиосигналами для обнаружения объектов (например, человека за стеной обрушенного вследствие природной или техногенной катастрофы здания, или в задымленном помещении), скрытых непрозрачными для визуального наблюдения преградами, возникает задача идентификации цели на фоне отражений от окружающих предметов и измерения ее параметров [1–5]. Для обнаружения подобных объектов исполь-

зуют доплеровские радиолокационные станции (РЛС) [6] дециметрового диапазона длин волн и видеоимпульсные радары [7]. Угловое положение цели определяется весьма приблизительно из-за технических сложностей создания узконаправленных антенн в портативных доплеровских и, тем более, видеоимпульсных РЛС [8]. Поэтому каждая такая цель характеризуется, как правило, двумя параметрами отраженного сигнала: величиной задержки, опре-

деляющей расстояние между антенной локатора и целью, и доплеровским смещением частоты несущего колебания, обусловленным движением объекта или его частей. Причем, если объект перемещается относительно быстро (доплеровское смещение частоты несущего колебания составляет десятки герц), то задача идентификации цели может быть решена методами доплеровской селекции [2]. Однако когда спектральная плотность колебаний, обусловленных движением объекта, находится вблизи нулевых частот, где наблюдается значительный уровень низкочастотных шумов аппаратуры, а интенсивность полезного сигнала определяется положением объекта относительно антенны, однозначная идентификация целей становится проблематичной.

Если цель, хотя и медленно, но перемещается относительно антенны приемника РЛС, то появляется возможность использовать особенности пространственно-временного распределения поля отраженного сигнала для локализации координат цели. Перспективной в этом аспекте представляется идея пассивного синтеза апертуры антенны [9]. Для ее реализации необходимо: 1) чтобы в РЛС осуществлялись излучение и когерентный прием сигнала; 2) цель перемещалась относительно антенны передатчика; 3) блок обработки сигналов РЛС имел достаточный объем оперативной памяти для накопления пространственно-временных отсчетов отраженного от цели сигнала. В РЛС доплеровского типа, используемых для обнаружения людей за оптически непрозрачными препятствиями [10], нет необходимости кардинально изменять структуру аппаратной части при реализации пассивного синтеза, а следует лишь организовать обработку сигналов определенным образом. Информация о сигнале, отраженном от цели, и о его пространственно-временных характеристиках может быть использована для построения совместной процедуры обнаружения цели и измерения угла прихода отраженного сигнала.

**1. Постановка задачи синтеза оптимальной совместной процедуры обнаружения цели и измерения угла прихода отраженного сигнала.** Для оптимизации алгоритмов обнаружения сигналов от цели и измерения их параметров в общем случае могут использовать-

ся различные критерии качества [11], которые в конечном итоге определяют структуру обнаружителя или устройства (алгоритма) оценивания параметров сигнала. При формулировании статистической задачи совместного обнаружения и оценивания необходимо выбрать единый критерий качества, который подходит для обеих задач. Для задачи обнаружения и для задачи оценивания как нельзя лучше подходит байесовский критерий минимума среднего значения потерь от неправильных решений [12–16]. Поэтому в основу оптимальной совместной процедуры положен именно этот критерий.

Без потери общности изложения положим, что в зоне ответственности РЛС находится одна подвижная цель. Антенная система РЛС составлена из пяти ненаправленных пространственно-разнесенных антенн; сигналы антенных элементов  $A1$  и  $A2$ , а также  $A3$  и  $A4$  суммируются, как показано на рис. 1. Диаграмма антенны  $A5$  в первом приближении считается круговой. Данная антенная система является одной из простейших, обеспечивая наблюдение за сигналами с углами прихода волн в интервале  $[-\pi, \pi]$ . Кроме того, предположим, что синтезируемый алгоритм должен давать лишь два разнотипных решения – обнаружение сигнала, отраженного от цели, расположенной в точке  $O$ , и измерение угла  $\theta$  прихода отраженного сигнала по результатам наблюдений над колебаниями на выходах 1, 2, 3 (рис. 1). Для формулирования задачи в терминах теории статистических решений обозначим через  $x_i(t)$  аддитивную смесь сигнала и помехи на  $i$ -м выходе системы наблюдения,  $i = 1, 2, 3$ . При этом рассматриваются две взаимоисключающие гипотезы:

$$\begin{aligned} H_1 : x_i(t_j) &= s_i(t_j) + n_i(t_j), \\ H_0 : x_i(t_j) &= n_i(t_j), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $t_j = j \frac{T}{N}$ ,  $0 \leq t_j \leq T$ ,  $j = 1, 2, \dots, N$ ,  $i = 1, 2, 3$ ,  $T$  – интервал наблюдения;  $n_i(t_j)$  – независимые по  $i$  и  $j$  гауссовские случайные величины с нулевыми математическими ожиданиями и дисперсией  $\sigma^2$ ;  $s_i(t_j)$ ,  $0 \leq t \leq T$  – полезный сигнал на  $i$ -м выходе системы наблюдения.

Сигнал с выхода 3 представим в виде

$$s_3(t_j) = a_3(t_j) \cos(\omega t_j + \psi_0), \quad (2)$$

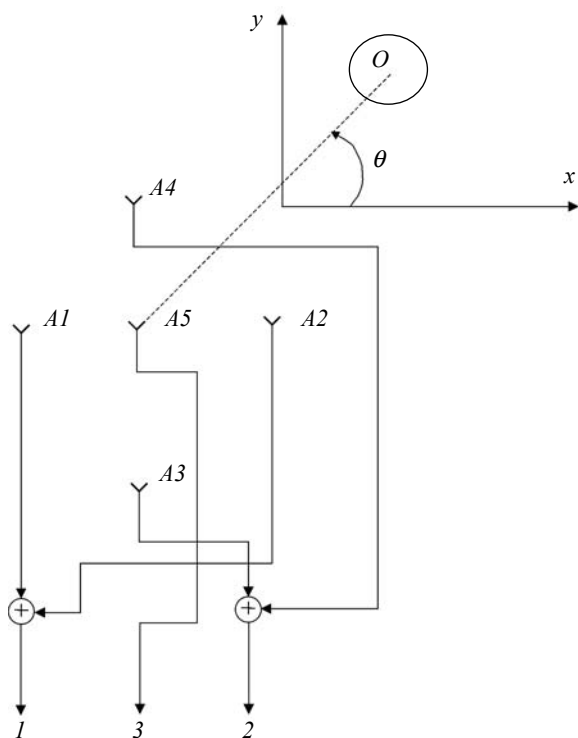


Рис. 1. Пространственное расположение антенн системы наблюдения при совместном обнаружении и измерении параметров цели

где  $a_3(t_j), \omega, \psi_0$  – соответственно амплитуда, круговая частота и фаза колебания.

Тогда для сигналов на выходах 1 и 2 будут справедливы соотношения

$$s_1(t_j) = a_1(t_j) \cos(\omega t_j + \psi_0) \sin(\theta); \tag{3}$$

$$s_2(t_j) = a_2(t_j) \cos(\omega t_j + \psi_0) \cos(\theta), \tag{4}$$

где угол  $\theta$  определяет направление на цель.

Предположим, что  $\theta$  является случайной величиной, априорная плотность вероятности  $W(\theta)$  которой равномерно распределена в диапазоне  $0 \leq \theta \leq 2\pi$ . Требуется по выборкам процессов  $\bar{X}_1, \bar{X}_2, \bar{X}_3$  объемом  $N$  элементов каждая принять одну из гипотез  $\{H_0, H_1\}$  и вычислить оценку  $\hat{\theta}$  значения параметра  $\theta$ .

**2. Синтез оптимальной процедуры обнаружения и измерения.** Статистическое решение задачи приводит к системе совместного обнаружения отраженного от цели сигнала и оценивания параметра  $\theta$ . В качестве единого критерия оптимальности такой системы удобно воспользоваться байесовским критерием минимума среднего риска  $R$  принятия неправильных решений. Байесовский критерий предпо-

лагает априорное задание матрицы потерь. В общем виде такую матрицу можно представить в виде

$$\bar{\pi}(\hat{\theta}, \hat{v}, \theta, v) = \begin{bmatrix} \pi_{00} & \pi_{01} \\ \pi_{10} & \pi_{11}(\hat{\theta} - \theta)^2 \end{bmatrix}, \tag{5}$$

где  $v$  – величина, принимающая значения 1 или 0, в зависимости от того, присутствует отклик от цели или нет;  $\hat{v}$  – оценка параметра  $v$ ;  $\hat{\theta}$  – оценка параметра  $\theta$ .

При такой матрице потерь задача совместного обнаружения и оценивания может рассматриваться как задача оценивания двух параметров  $\theta$  и  $v$ , из которых  $\theta$  является непрерывным, а  $v$  – дискретным. Очевидно, что процедура обработки сигнала должна быть организована так, чтобы при правильном оценивании параметра  $v=0$  оценка  $\hat{\theta}$  на выход не выдавалась, а потери принимались равными  $\pi_{00}$ . Если же принимается гипотеза  $\hat{v}=1$ , когда на самом деле  $v=0$  (ложное обнаружение), то  $\hat{\theta}$  выдается на выход устройства, а потери принимаются равными  $\pi_{01}$  и не зависят от величины оценки  $\hat{\theta}$  параметра  $\theta$ . При правильном обнаружении сигнала оценка  $\hat{\theta}$  выдается на выход устройства обработки, а потери зависят от точности оценивания, в частности от квадратичной функции  $\pi_{11}(\hat{\theta} - \theta)^2$ .

Апостериорный риск для случая, когда  $\hat{v}=0$ , принимает вид

$$R[\hat{v}=0, \hat{\theta}] = p_0 \int_0^{2\pi} \pi_{00} W_{0pr}(\theta) d\theta + p_1 \int_0^{2\pi} \pi_{01} W_{1pr}(\theta) d\theta, \tag{6}$$

где  $p_0, p_1$  – априорные вероятности принятия параметром  $v$  значений 0 или 1;  $W_{0pr}(\theta), W_{1pr}(\theta)$  – априорные плотности распределения вероятностей неизвестного непрерывного параметра  $\theta$ , определяющие совместную априорную плотность вероятности неизвестных параметров  $W_{pr}(v, \theta) = p_1 \delta(v-1) W_{1pr}(\theta) + p_0 \delta(v) W_{0pr}(\theta)$ ,  $\delta(\cdot)$  – дельта-функция.

Смысл функций  $W_{0pr}(\theta), W_{1pr}(\theta)$  заключается в том, что они описывают априорную плотность вероятности параметра  $\theta$  вне анализируемого сектора дальности и внутри его, соответственно.

Функция, описывающая апостериорный риск для  $\hat{\nu} = 1$ , по аналогии с выражением (6), может быть представлена в виде

$$R[\hat{\nu} = 1, \hat{\theta}] = p_0 \int_0^{2\pi} \pi_{10} W_{0pr}(\theta) d\theta + p_1 \int_0^{2\pi} \pi_{11} W_{1pr}(\theta) d\theta. \quad (7)$$

Синтез оптимальной в смысле минимума среднего байесовского риска процедуры обработки наблюдаемых сигналов состоит в совместной минимизации (6), (7), т. е.

$$\gamma^{opt}(\hat{\nu}, \hat{\theta}) = \arg \min \left\{ R[\hat{\nu} = 0, \hat{\theta}], R[\hat{\nu} = 1, \hat{\theta}] \right\}, \quad (8)$$

при  $\hat{\theta} \in [0, 2\pi]$  и  $\hat{\nu} \in [0, 1]$ .

При ограничениях на вид наблюдаемых сигналов (2)–(4) минимизация риска (8) дает выражение для оценки  $\hat{\theta}$  параметра  $\theta$  в явном виде:

$$\hat{\theta} = \left[ 2\pi I_0 \left( \frac{\sqrt{a_1^2 + a_2^2}}{\sigma^2} \right) \right]^{-1} \times \int_0^{2\pi} \theta \exp \left\{ \frac{\sqrt{a_1^2 + a_2^2}}{\sigma^2} \cos \left( \frac{\pi}{2} - \arctg \left( \frac{a_2}{a_1} \right) - \theta \right) \right\} d\theta, \quad (9)$$

где  $a_i = \sum_{j=1}^n x_i(t_j) U_0 \cos(\omega t_j + \psi)$ ,  $i = 1, 2$ .

Решающее правило о наличии или отсутствии цели с учетом (9) и (5) можно представить в виде следующих неравенств:

$$\exp \left( \frac{2a_3}{N_0} \right) I_0 \left( \frac{\sqrt{a_1^2 + a_2^2}}{N_0} \right) \geq \frac{p_0(\pi_{10} - \pi_{00})}{p_1[\pi_{01} - \pi_{11} W_{ps}(\hat{\theta})]} \exp \left( \frac{4b}{N_0} \right), \quad (10)$$

где  $a_3 = \sum_{j=1}^N x_3(t_j) U_0 \cos(\omega t_j + \psi)$ ,  $N_0$  – спектральная плотность шума;

$$W_{ps}(\hat{\theta}) = \int_0^{2\pi} (\theta - \hat{\theta})^2 \times$$

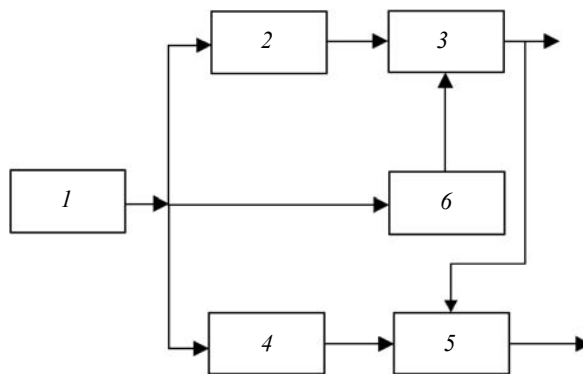


Рис. 2. Структура алгоритма обработки сигналов, реализующего совместно оптимальные операции обнаружения сигнала и оценивания направления на цель: 1 – накопление статистик  $a_1, a_2, a_3$ ; 2 – вычисление решающей статистики; 3 – пороговая обработка; 4 – вычисление оценки параметра; 5 – коммутатор; 6 – вычисление порога

$$\times \frac{\exp \left\{ \frac{2}{N_0} \right\} \left( \sqrt{a_1^2 + a_2^2} \right) \cos \left( \frac{\pi}{2} - \arctg \left( \frac{a_2}{a_1} \right) - \theta \right)}{2\pi I_0 \left( \frac{2\sqrt{a_1^2 + a_2^2}}{N_0} \right)} d\theta -$$

апостериорная плотность вероятности параметра  $\theta$ ;  $b = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N U_0^2 \cos^2(\omega t_j + \psi_0)$ . Причем, если левая часть неравенства больше или равна правой части, то считается справедливой гипотеза, что оценка параметра  $\hat{\nu} = 1$ , в противном случае принимается гипотеза  $\hat{\nu} = 0$ .

Структура алгоритма обработки сигналов, совместно реализующего оптимальные операции обнаружения сигнала и оценивания направления на цель согласно процедуре (10), приведена на рис. 2.

Реализации  $\bar{X}_1, \bar{X}_2, \bar{X}_3$  наблюдаемых процессов на выходах 1, 2, 3 антенной системы накапливаются в блоке 1 (рис. 2) на интервале наблюдения  $T$  для дальнейших вычислений решающей статистики в блоке 2 и принятия решения о наличии или отсутствии цели в анализируемом стробе пространства (блок 3). Решающая статистика вычисляется в соответствии с левой частью неравенства (10), правая часть которого используется для вычисления величины порога обнаружения в блоке 6. Оценка  $\hat{\theta}$  параметра  $\theta$ , вычисляемая в блоке 4 в соответствии с (9), выдается на выход обнаружителя только в случае, если принимается решение о том, что дискретный параметр  $\nu = 1$ .

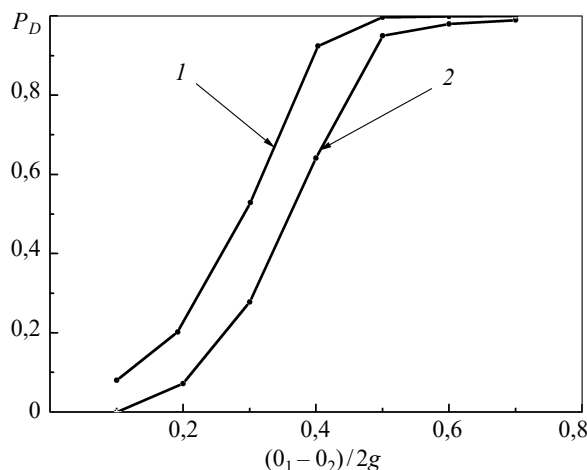


Рис. 3. Вероятность правильного обнаружения  $P_D$  объектов как функция углового расстояния между ними: кривая 1 – отношение сигнал/шум 20 дБ; кривая 2 – отношение сигнал/шум 16 дБ

В частном случае, когда  $\pi_{11} = 0$ , вместо неравенства (10) при обнаружении можно воспользоваться упрощенным неравенством следующего вида:

$$\ln \left[ I_0 \left( \frac{\sqrt{a_1^2 + a_2^2}}{\sigma} \right) \right] - \frac{a_3}{\sigma^2} \geq \ln \left[ \frac{p_0 \pi_{01}}{p_1 \pi_{10} \left( \exp \left\{ -b / \sigma^2 \right\} \right)^2} \right]. \quad (11)$$

В отличие от неравенства (10), неравенство (11) используется в ситуации, когда процедуры обнаружения и оценивания являются независимыми.

**3. Обобщение оптимальной процедуры совместного обнаружения и оценивания параметров сигналов на случай произвольного числа отражателей.** Представляет интерес обобщение рассмотренного статистического подхода к решению задачи совместного обнаружения и оценивания на случай произвольного числа каналов  $K$  системы наблюдения, каждый из которых на некоторой центральной частоте  $f_0$  имеет характеристику направленности  $\dot{G}(\theta)$ , являющейся комплексной функцией угла  $\theta$  наблюдения. В обобщенном виде сигнал «подсветки» целей можно записать как

$$s(t) = \sqrt{2E}U(t) \sin [2\pi f_0 t + \psi(t)], \quad 0 \leq t \leq \tau, \quad (12)$$

где  $E$  – энергия сигнала;  $U(t)$  – амплитудная

модуляция сигнала;  $\psi(t)$  – фазовая модуляция сигнала;  $\tau$  – длительность периода псевдослучайной последовательности, заданного функцией  $\psi(t)$ .

Предположим, что в зоне обзора системы наблюдения находится  $m$  отражателей (объектов) с угловыми направлениями  $\theta_i, i = 1, \dots, m$ . Тогда сигнал на выходе  $k$ -го канала

$$s_k(t) = \sum_{i=1}^m G(\theta_i - \theta) S_i U(t - \tau_i) \times \sin [2\pi(f_0 + F_i)t + \psi(t - \tau_i) - \varphi_i], \quad (13)$$

где  $S_i = \sqrt{2E_i}$  – амплитуда отраженного от  $i$ -го объекта сигнала «подсветки»;  $F_i$  – смещение частоты сигнала, обусловленное движением  $i$ -го объекта;  $\varphi_i$  – постоянный набег фазы сигнала  $i$ -го объекта.

Как и ранее, полагаем, что собственные шумы каналов системы наблюдения являются независимыми гауссовскими случайными процессами с равномерной в полосе частот наблюдения спектральной плотностью  $N_0$ . Основная задача системы состоит в том, чтобы оценить количество отражателей и их угловые координаты на основе анализа статистических гипотез. На пространственное расположение объектов накладываются ограничения

$$\theta_i \neq \theta_j, \quad i = 1, \dots, m, \quad j = 1, \dots, m \text{ и} \\ \theta - g \leq \theta_1 < \theta_2 < \dots < \theta_m \leq \theta + g, \quad (14)$$

где  $2g$  – угловая ширина сектора, в котором сосредоточены отражатели, совпадающая с угловой шириной диаграммы  $G(\theta)$ .

Для решения такой обобщенной задачи необходимо сформировать:

а) статистические гипотезы о сигналах в смеси с шумом

$$H_m : x_i(t) = s_i(t, m, \vec{\theta}_m, \vec{S}_m, \vec{\varphi}_m) + n_i(t), \quad (15)$$

где  $m$  – предполагаемое число объектов;  $\vec{\theta}_m$  – вектор угловых координат объектов;  $\vec{S}_m, \vec{\varphi}_m$  – векторы амплитуд и фаз сигналов, отраженных от объектов;

б) гипотезу о наличии только шума в наблюдаемой реализации

$$H_0 : x_i(t_j) = n_i(t_j). \quad (16)$$

В случае большого числа отражателей, находящихся в зоне ответственности системы на-

блюдения, ввести сколь-нибудь обоснованные коэффициенты в матрицу потерь не представляется возможным, поэтому решение задачи целесообразно искать в классе многоальтернативных задач максимального правдоподобия. Функционал отношения правдоподобия для гипотез (15) и (16) можно представить в следующем обобщенном виде:

$$L[\bar{X}(t); m, \bar{\theta}_m, \bar{S}_m] = C \exp \left\{ -\frac{E_0}{N_0} [\bar{X} - \bar{R}(\bar{\theta}_m)\bar{S}_m]^*T [\bar{X} - \bar{R}(\bar{\theta}_m)\bar{S}_m] \right\}, \quad (17)$$

где

$$C = \exp \left\{ \bar{X}^*T \bar{X} \frac{E_0}{N_0} \right\},$$

$$E_0 = \int_0^{\tau} U^2(t) \sin^2 [2\pi(f_0 + F)t + \psi(t)] dt, \quad \bar{R}(\bar{\theta}_m) -$$

матрица размером  $(K \times m)$ , элементами которой являются функции разностей угловых направлений  $r_{i,k}(\theta_i - \theta_k)$ ,  $i = 1, \dots, m$ ,  $k = 1, \dots, K$ .

Функционал отношения правдоподобия (17) содержит вектор  $\bar{S}_m$  мешающих неинформативных параметров, относительно которого он имеет квадратичную зависимость. Очевидно, что нахождение экстремума (17) для каждого конкретного значения  $\bar{\theta}_m$  численными методами не составляет никаких проблем.

Вероятность правильного обнаружения двух объектов, полученная путем численного моделирования процедуры совместного обнаружения и оценивания, как функция углового расстояния между объектами при различных отношениях сигнал/шум приведена на рис. 3.

Анализ результатов моделирования показывает, что при фиксированном угловом расстоянии между объектами вероятность их однозначного обнаружения и разрешения по угловым координатам монотонно возрастает с уве-

личением соотношения сигнал/шум. Многоканальность системы наблюдения позволяет превысить более чем в 2 раза рэлеевское ограничение по разрешению двух одинаковых по мощности сигналов при соотношениях сигнал/шум, превышающих 20 дБ.

**Выводы.** Таким образом, совместная процедура обнаружения и измерения параметров отраженных от цели сигналов синтезирована с учетом не только информации собственно об интенсивности отраженных сигналов, но и о пространственном распределении их полей. Это стало возможным благодаря статистическому подходу к решению задачи, когда для синтеза оптимального алгоритма привлекаются все сведения о вероятностных моделях сигналов и помех. При таком подходе задача разрешения сигналов при наличии помех формулируется как задача проверки статистических гипотез. Причем алгоритм углового разрешения точечных источников фактически является алгоритмом различения соответствующих гипотез, а понятие разрешающей способности предполагает задание численного значения такого параметра, как вероятность правильного разрешения (т. е. правильного указания числа целей). Поскольку при статистическом подходе для построения алгоритма разрешения привлекается более обширная информация о вероятностных характеристиках сигналов и помех, то есть основания ожидать, что при определенных условиях можно получить разрешающую способность, превышающую рэлеевский предел разрешения. В частности, величина такого превышения будет тем больше, чем выше отношение сигнал/шум на выходе системы наблюдения и обработки сигналов. Погрешность оценок направлений на отражатели характеризуется среднеквадратичной ошибкой, которая при высоких отношениях сигнал/шум практически совпадает с среднеквадратичным значением флуктуационной помехи.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Sytnik O.V. *Methods and Algorithms of Signal Processing for Rescuer's Radar*. Riga: Palmarium Academic Publishing, 2018. 73 p. ISBN 978-3-659-72434-3.
2. Sytnik O.V. Invariant Transformation in Identification Theory. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2003. Vol. 60, Iss. 10–12. P. 2032. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v60.i1012.30.
3. Sytnik O.V. Adaptive Radar Techniques for Human Breathing Detection. *J. Mechatron*. 2015. Vol. 3, N 4. P. 1–6.
4. Sytnik O.V. Digital Signal Processing in Doppler Radar for Rescuers to Detection of Human Breathing. *Radar Science and Technology*. 2013. Vol. 11, Iss. 2. P. 111–117. ISSN 1672-2337 CN 34-1264/TN.

5. Sytnik O.V., Vyzmitinov I.A., Myroshnychenko Ye.I., Kogut A.Ye. Rescue Radar's Signal Processing Method Based On Doppler Features of Phase Structure An Echo-Signal. *Proc. of 2011 IEEE CIE Int. Conf. on Radar* [Oct. 24–27, 2011, Chengdu, China]. Vol. 1. P. 246–249. DOI: 10.1109/CIE-Radar.2011.6159522.
6. Тартаковский А.Г. *Последовательные методы в теории информационных систем*: монография. Москва: Радио и связь, 1991. 280 с.
7. Хармут Х.Ф. *Несинусоидальные волны в радиолокации и радиосвязи*: монография. Москва: Радио и связь, 1985. 376 с.
8. Ахмед Н., Рао К.Р. *Ортогональные преобразования при обработке цифровых сигналов*: монография. Москва: Связь, 1980. 248 с.
9. Autrey S.W. Passive Synthetic Arrays. *J. Acoustic. Soc. Am.* 1988. Vol. 84, Iss. 2. P. 592–598.
10. Harmuth H.F. Fundamental Limits for Radio Signal with Large Bandwidth. *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* 1981. Vol. 23, Iss. 1. P.37–43. DOI: 10.1109/TEMC.1981.303919.
11. Dixon W.G., Massey F.J. *Introduction to Statistical Analysis*. N.Y.: McGraw-Hill, 1968. 536 p.
12. Biguesh M.; Gershman A. Training-based MIMO Channel Estimation: a Study of Estimator Tradeoffs and Optimal Training Signals. *IEEE Trans. Signal Process.* 2006. Vol. 54, Iss. 3. P. 884–893. DOI: 10.1109/TSP.2005.863008.
13. Lo N., Falconer D.D., Sheikh, A.H. Adaptive Equalization and Diversity Combining for Mobile Radio Using Interpolated Channel Estimates. *IEEE Trans. Veh. Technol.* 2018. Vol. 40, Iss. 3. P. 636–645. DOI: 10.1109/25.97518.
14. Otnes R.K., Enochson L. *Applied Time Series Analysis*. N.Y.: J. Willey, 1982. 428 p.
15. Proakis J., Salehi M. *Digital Communications*. 5<sup>th</sup> ed. McGraw-Hill Higher Education, 2013. 118 p.
16. Lathi B.P., Ding Z. *Modern Digital and Analog Communication Systems*. 4th ed. Oxford University Press, 2019. 325 p.

Стаття надійшла 20.11.2019

## REFERENCES

1. Sytnik, O.V., 2018. *Methods and Algorithms of Signal Processing for Rescuer's Radar*. Riga: Palmarium Academic Publ.
2. Sytnik, O.V., 2003. Invariant Transformation in Identification Theory. *Telecommunications and Radio Engineering*, **60**(10–12), pp. 2032. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v60.i1012.30.
3. Sytnik, O.V., 2015. Adaptive Radar Techniques for Human Breathing Detection. *J. Mechatron.*, **3**(4), pp. 1–6. DOI: 10.1166/jom.2015.1114.
4. Sytnik, O.V., 2013. Digital Signal Processing in Doppler Radar for Rescuers to Detection of Human Breathing. *Radar Science and Technology*, **11**(2), pp. 111–117.
5. Sytnik, O.V., Vyzmitinov, I.A., Myroshnychenko, Ye.I., Kogut, A.Ye., 2011. Rescue Radar's Signal Processing Method Based On Doppler Features of Phase Structure An Echo-Signal. In: *Proc. of 2011 IEEE CIE Int. Conf. on Radar*. Chengdu, China, 24–27 Oct. Vol. I. P. 246–249. DOI: 10.1109/CIE-Radar.2011.6159522.
6. Tartakovskiy, A.G., 1991. *Sequential methods in the theory of information systems*. Moscow: Radio & Svyaz' Publ. (in Russian).
7. Harmuth, X.F., 1985. *Nonsinusoidal waves in radar and radio communications*. Moscow: Radio & Svyaz' Publ. (in Russian).
8. Ahmed, N., Rao, K.R., 1980. *Orthogonal transformations in digital signal processing*. Moscow: Radio & Svyaz' Publ. (in Russian).
9. Autrey, S.W., 1988. Passive Synthetic Arrays. *J. Acoustic. Soc. Am.*, **84**(2), pp. 592–598.
10. Harmuth, H.F., 1981. Fundamental Limits for Radio Signal with Large Bandwidth. *Trans. Electromagn. Compat.*, **23**(1), pp. 37–43. DOI: 10.1109/TEMC.1981.303919.
11. Dixon, W.G., Massey, F.J., 1968. *Introduction to Statistical Analysis*. N.Y.: McGraw-Hill,
12. Biguesh, M., Gershman, A., 2006. Training-based MIMO Channel Estimation: a Study of Estimator Tradeoffs and Optimal Training Signals. *IEEE Trans. Signal Process.*, **54**(3), pp. 884–893. DOI: 10.1109/TSP.2005.863008.
13. Lo, N., Falconer, D.D., Sheikh, A.H., 2018. Adaptive Equalization and Diversity Combining for Mobile Radio Using Interpolated Channel Estimates. *IEEE Trans. Veh. Technol.*, **40**(3), pp. 636–645. DOI: 10.1109/25.97518.
14. Otnes, R.K., Enochson, L., 1982. *Applied Time Series Analysis*. N.Y.: J. Willey,
15. Proakis, J., Salehi, M., 2013. *Digital Communications*. 5<sup>th</sup> ed. McGraw-Hill Higher Education.
16. Lathi, B.P., Ding, Z., 2019. *Modern Digital and Analog Communication Systems*. 4th ed. Oxford University Press.

Received 20.11.2019

O.V. Sytnik

O.Ya. Usikov IRE of NASU  
12, Acad. Proskura St., Kharkiv, 61085, Ukraine

## SIGNAL PROCESSING ALGORITHM IN MULTICHANNEL RADAR FOR RESCUERS

**Subject and purpose.** The subject of the research is a system of coherent digital processing of radar signals such that includes a number of spatially spaced receiving points and is designed to detect moving objects hidden behind optically opaque obstacles. The aim of the work is to synthesize an optimal, in the sense of a minimum Bayesian risk average, signal structure in the processing system. The system performance is evaluated and recommendations as to the choice of signal preprocessing system parameters are developed.

**Methods and methodology** of the work are based on the analysis of probabilistic characteristics of the useful and interference signals and seek to synthesize an algorithm for processing observed signal implementations according to a single quality criterion of a minimum average loss from incorrect decisions. The task of detection and estimation of moving objects in terms of their number and angular coordinates is formulated as a statistical problem. The angular resolution algorithm for point targets is built on the principle of statistical hypothesis testing. The a priori information about the characteristics of useful and interference signals during the target movement and, also, about the target probabilistic properties allows a procedure of signal processing to be built through the spatial synthesis of the observation system aperture, offering a resolution exceeding the energy limiting resolution.

**Results.** Analytical relations have been obtained for the joint procedure of signal detection and arrival angle measurement. The estimated angular positions of the targets are used in the aperture synthesis algorithm. It has been shown that the real-time aperture synthesis is possible in the case of relatively high signal-to-noise ratios and linear and unidirectional movement of targets.

**Conclusions.** A two-channel algorithm for monitoring moving targets has been developed. Based on the a priori information about the nature of target movement and on the estimates of angular positions and numbers of the targets, a passive synthesis procedure for the observation system aperture has been constructed. Recommendations have been developed for algorithm implementations in real time.

**Key words:** *sampling, discrete processing, radar station, spectral function, sampling frequency, Bayesian risk, algorithm, criterion, white noise.*

*O.B. Ситнік*

Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України  
12, вул. Акад. Проскури, Харків, 61085, Україна

#### АЛГОРИТМ ОБРОБЛЕННЯ СИГНАЛІВ У БАГАТОКАНАЛЬНІЙ РЛС ДЛЯ РЯТУВАЛЬНИКІВ

**Предмет і мета роботи.** Предметом дослідження є система когерентного цифрового оброблення сигналів радара, яка включає декілька просторово-рознесених приймальних пунктів і призначена для виявлення рухомих об'єктів, прихованих за оптично непрозорими перешкодами. Метою роботи є синтез оптимальної в сенсі мінімуму середнього байєсівського ризику структури системи оброблення сигналів, оцінка ефективності її роботи та вироблення рекомендацій щодо вибору параметрів системи попереднього оброблення сигналів.

**Методи і методологія роботи** засновані на аналізі ймовірнісних характеристик корисних сигналів і завад, синтезі алгоритму оброблення спостережуваних реалізацій сигналів за єдиним критерієм якості – мінімуму середнього значення втрат від неправильних рішень. Завдання виявлення, оцінювання числа і кутових координат рухомих об'єктів формується як статистична задача. Алгоритм кутового розділення точкових цілей будується за принципом перевірки статистичних гіпотез. Априорна інформація про характеристики сигналів і завад при переміщенні цілі, а також про їх імовірнісні властивості дозволяє побудувати процедуру оброблення сигналів, що забезпечує роздільну здатність, яка перевищує енергетичну межу, шляхом просторового синтезування апертури системи спостереження.

**Результати роботи.** Отримано аналітичні співвідношення для процедури, що здійснює спільно операції виявлення і вимірювання кута надходження сигналу. Оцінки кутового положення цілей використовуються в алгоритмі синтезування апертури. Показано, що при відносно високих співвідношеннях сигнал/шум і лінійному односпрямованому переміщенні цілей можливе синтезування апертури в реальному масштабі часу.

**Висновок.** Розроблено двоканальний алгоритм спостереження за рухомими цілями. На основі априорної інформації про характер руху цілей, оцінок їх кутового положення і числа побудовано процедуру пасивного синтезування апертури системи спостереження. Наведено рекомендації щодо реалізації алгоритмів для роботи в реальному часі.

**Ключові слова:** *вибірка, дискретне оброблення, радіолокаційна станція, спектральна функція, частота дискретизації, байєсівський ризик, алгоритм, критерій, білий шум.*