

## ОБНАРУЖЕНИЕ ДИСКРЕТНЫХ СИГНАЛОВ В РАДИОСИСТЕМАХ С ОПТИМАЛЬНОЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРОЙ

*Паршин Ю.Н., Гусев С.И.*

### Введение

Важнейшие параметры системы, такие как помехоустойчивость, точность измерения угловых координат, разрешение источников излучения по угловым координатам и другие, определяются расположением датчиков сигнала в пространстве, то есть пространственной структурой (ПС) системы обработки. Поэтому оптимизация ПС должна проводиться с учетом всех факторов, характеризующих сигнально-помеховую обстановку и условия работы радиосистемы. Оптимизация расположения элементов антенной решетки производится по критерию максимума отношения сигнал-шум, максимального значения усредненного коэффициента покрытия [1,2], обеспечения нулей диаграммы направленности в заданных направлениях [3], минимума среднего квадрата рассогласования или максимума отношения сигнал-шум [4], а также с учетом возможностей практической реализации.

В настоящее время антенные решетки (АР) дают возможность реализовать управление геометрией и ПС радиосистемы. В работе [5] рассмотрены АР, в которых создание нулей диаграммы направленности (ДН) в направлении на источники помех осуществляется путем изменения расстояний между элементами как электрическим, так и механическим путем при сохранении положения главного максимума ДН [6,7]. Изменение числа и пространственного положения нулей ДН АР для радиорелейных и телевизионных систем, осуществляется коммутацией элементов АР [5], обеспечивающих подавление помех. При расположении вспомогательных элементов по кругу с максимальным диаметром достигается минимальная ширина ДН вспомогательной АР [2].

Одним из направлений, позволяющих оптимизировать ПС АР, является разработка АР с частичной адаптацией. Методы сокращения числа каналов адаптации используют разбиение всей АР на подрешетки с меньшим числом элементов [4,8,9] и адаптивным управлением сигналов с выходов подрешеток, или управление весовыми коэффициентами небольшого числа элементов [10]. Для устранения «мертвых» зон адаптации [11] предлагается минимизировать норму рассогласования между сигналом исходной АР и сигналом с выходов подрешеток путем оптимального формирования структуры подрешеток [4,12], что дает возможность уменьшить число каналов и получить выигрыш в отношении сигнал-помеха.

Важную роль имеет пространственная корреляция помех, зависящая от геометрии основной антенной решетки, координат источников помех, а также от ПС

*Проведен синтез и анализ оптимального обнаружения сигнала на фоне пространственно сосредоточенных помех с помощью антенной системы с изменяемой пространственной структурой. Показано, что координаты элементов антенной системы могут быть введены в задачу как неизвестные параметры сигнала и найдены методом максимального правдоподобия. На основе анализа последовательных выборок получены оценки пространственной структуры радиосистемы и оценена эффективность обнаружения при различном числе элементов антенной системы.*

вспомогательной АР [1]. Например, для случая двух помех установлено, что в линейной решетке наиболее выгодным оказывается размещение управляемых элементов на ее краях [10]. Погрешность установки весовых коэффициентов также может оказать большое влияние на эффективность устройства обработки, что следует учитывать при расположении управляемых элементов [13]. В частности, рекомендуется располагать управляемые элементы в центре АР, так как при этом степень подавления помех практически не зависит от погрешности установки весовых коэффициентов.

Пространственная структура АР влияет также и на скорость адаптивной подстройки весовых коэффициентов АР так, что для АР с регулярным пространственным расположением элементов [14] объем обучающей выборки может быть меньше, чем для АР произвольной геометрии [15]. Выбор элементов для адаптации может производиться с учетом возможностей практической реализации их управления, например, путем объединения сигналов по столбцам и по строкам элементов антенного полотна [11], а также случайным образом [8,16]. В работах [17, 18] методами целочисленного программирования синтезированы алгоритмы адаптации АР, в соответствии с которыми на каждом этапе процедуры адаптации осуществляется размещение в раскрыве АР единственного поворота фазы на величину дискрета управления в том из элементов АР, где оценка целевой функции достигает минимума. Для уменьшения числа управляемых элементов больших АР предлагается метод синтеза плоской волны [1], в соответствии с которым для формирования нулей выбираются наиболее существенные элементы, в которых различие между текущим и оптимальным значениями фазы превышает некоторую заданную величину.

Согласование пространственных структур наблюдаемого поля и радиосистемы позволяет существенно повысить их эффективность в условиях действия различных помех. Одним из способов такого согласования является разработка неэквидистантных антенных реше-

ток (НАР), что позволяет упростить радиосистему при сохранении высокой разрешающей способности по пространственным координатам путем сокращения числа используемых элементов, особенно в условиях наличия запретных зон на установку в апертуре отдельных элементов АР [19]. Одним из направлений разработки НАР является размещение элементов по законам циклических разностных множеств, а также их обобщений - относительных разностных множеств [20] на регулярной прямоугольной целочисленной сетке при фиксированном числе элементов АР и размере апертуры. Предложен алгоритм оптимизации расстановки элементов крупноапертурных линейных АР [21] и плоских [22] АР по критерию минимума уровня боковых лепестков в заданной области, причем предусмотрена возможность учета конечных размеров апертуры элементов АР. Выбор конфигурации расположения антенн, реализуемый в системах апертурного синтеза в радиоастрономии [23], преследует цель покрытия некоторой области при сканировании.

Таким образом, пространственная структура системы обработки существенно влияет на качество обработки, а ее оптимизация является важным резервом повышения эффективности и помехоустойчивости обработки полей. Появление микроэлектромеханических систем (МЭМС) [24] решает проблему создания реконфигурируемых антенных систем, является технологической основой для реализации алгоритмов оптимизации пространственных структур в соответствии с изменяющейся сигнально-помеховой обстановкой.

**Целью работы** является развитие метода оптимизации пространственных структур радиосистем, повышение качества обнаружения полезного сигнала в сложной помеховой обстановке. При этом задача определения значений параметров, характеризующих пространственную структуру, решается как задача статистического оценивания совместно с обнаружением полезного сигнала на основе данных, полученных в результате последовательных выборок наблюдаемого поля.

**Модели сигналов и помех, постановка задачи оптимизации ПС**

Общий подход к решению задачи оптимизации ПС антенных систем изложен в работе [25], в которой проводится синтез алгоритма вычисления максимально правдоподобной оценки пространственных координат  $\mathbf{X} = \{x_m, m = 1, \dots, M\} \in S$  элементов антенной системы при обнаружении сигналов на фоне помех. Непрерывное по пространству поле может быть аппроксимировано функциональным рядом, коэффициентами в котором являются  $M$  пространственных отсчетов комплексных огибающих с координатами  $r_m$ :

$$x_k(r) = \sum_{m=1}^M x_k^{(m)} \varphi_m(r, r_m) = \theta \sum_{m=1}^M s_k^{(m)} \varphi_m(r, r_m) + \sum_{m=1}^M v_k^{(m)} \varphi_m(r, r_m)$$

где  $\varphi_m(\bullet, \bullet)$  - ортонормированные базисные функции при пространственной дискретизации поля,  $s_k^{(m)} = s_k(r_m)$ ,  $v_k^{(m)} = v_k(r_m)$  - отсчет комплексной

огибающей наблюдаемых полей сигнала и помехи, представленных в дискретном времени,  $k = 1, \dots, K$  - номер отсчета во времени. При этом к пространственному отсчету поля добавляются собственные шумы системы обработки сигналов:

$$\mathbf{Y}_k = \{y_k^{(m)} = x_k^{(m)} + \xi_k^{(m)} = \theta s_k^{(m)} + v_k^{(m)} + \xi_k^{(m)}, m=1, \dots, M\},$$

где  $\xi_k^{(m)}$  - отсчет комплексных огибающих некоррелированных гауссовских шумов с дисперсией

$$D_\xi = \mathbf{M}\{|\xi_k^{(m)}|^2\}.$$

Решаемая задача состоит в определении параметра обнаружения сигнала  $\theta = \{0; 1\}$  совместно с вычислением оценок  $\hat{\mathbf{X}}$  координат пространственных отсчетов наблюдаемого поля, задающих ПС радиосистемы.

Для обнаружения сигнала при наличии неизвестных неинформационных параметров в наблюдаемом процессе разработаны различные методы [26]:

а) метод совместного оценивания параметров ПС и параметра обнаружения  $\theta$  путем решения экстремальной задачи [25]:

$$(\hat{\theta}, \hat{\mathbf{X}}) = \arg \max_{\theta, \mathbf{X} \in S} w(\mathbf{Y}_1^K | \theta, \mathbf{X}), \tag{1}$$

где  $w(\mathbf{Y}_1^K | \theta, \mathbf{X})$  - функция правдоподобия,  $\mathbf{Y}_1^K = \{\mathbf{Y}_k, k = 1, \dots, K\}$ ,

б) метод совместного обнаружения полезного сигнала и оценивания параметра ПС по критерию максимума отношения правдоподобия

$$\Lambda(\mathbf{X}) = \frac{w(\mathbf{Y}_1^K | 1, \mathbf{X})}{w(\mathbf{Y}_1^K | 0, \mathbf{X})};$$

$$\hat{\mathbf{X}} = \arg \max_{\mathbf{X} \in S} \Lambda(\mathbf{X}), \quad \hat{\theta} = \begin{cases} 1, & \Lambda(\hat{\mathbf{X}}) > h, \\ 0, & \Lambda(\hat{\mathbf{X}}) < h, \end{cases} \tag{2}$$

в) метод совместного обнаружения полезного сигнала и оценивания параметра ПС на основе обобщенного отношения правдоподобия:

$$\Lambda_0 = \frac{\max_{\mathbf{X} \in S} w(\mathbf{Y}_1^K | 1, \mathbf{X})}{\max_{\mathbf{X} \in S} w(\mathbf{Y}_1^K | 0, \mathbf{X})}, \quad \hat{\theta} = \begin{cases} 1, & \Lambda > h, \\ 0, & \Lambda < h, \end{cases} \tag{3}$$

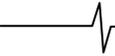
г) метод адаптации ПС с использованием классифицированной обучающей выборки  $\mathbf{Y}_a$  с последующим обнаружением сигнала по рабочей выборке  $\mathbf{Y}$ :

$$\hat{\mathbf{X}}_a = \arg \max_{\mathbf{X} \in S} w(\mathbf{Y}_{a1}^K | 1, \mathbf{X}) = \arg \max_{\mathbf{X} \in S} \Lambda(\mathbf{X}),$$

$$\hat{\theta} = \begin{cases} 1, & \Lambda(\hat{\mathbf{X}}_a) > h, \\ 0, & \Lambda(\hat{\mathbf{X}}_a) < h, \end{cases} \tag{4}$$

где  $h$  - порог обнаружения.

Доказано [25], что в случае отсутствия сигнала при воздействии одиночной пространственно сосредоточенной помехи отношение правдоподобия  $\Lambda_0(\mathbf{X})$  не зависит от  $\mathbf{X}$ . При воздействии нескольких точечных помех на многоэлементную АР и при достаточном разнесении угловых координат помех, влияние ПС



также незначительно. Поэтому оптимизация ПС целеобразна в случаях, когда эффективность имеющихся средств помехозащиты недостаточна, например, когда число источников помех больше числа элементов антенной решетки, а также в случае протяженных помех [27].

### Проблема неустойчивости экстремальной задачи оптимизации ПС

Наличие дифракционных максимумов диаграммы направленности АР приводит к многоэкстремальности целевой функции при синтезе оптимальных ПС [27], что позволяет отнести данную задачу к классу некорректно поставленных задач. Высокая чувствительность оптимальных ПС к отклонениям характеристик поля от предполагаемых не позволяет достигнуть предельной помехоустойчивости в случае нестационарных помех, а получаемые алгоритмы оптимизации обладают низкой вычислительной эффективностью [28]. Сильная зависимость оптимальных координат элементов АР от неточностей в исходных данных не позволяет непосредственно применить интерполяционные методы для определения координат антенной системы, что также приводит к увеличению вычислительных затрат.

Для устранения этих недостатков предложен регуляризованный алгоритм оптимизации [29], позволяющий получить робастные пространственные структуры. В качестве стабилизатора при оптимизации пространственной структуры принимается размер пространственной структуры  $\Gamma(\mathbf{X})$ , определяемый как расстояние данной пространственной структуры от некоторой средней точки этой структуры. Мера отличия одной пространственной структуры  $\mathbf{A} = \{a_m, m = 1, \dots, M\} \in D_M$  от другой  $\mathbf{B} = \{b_m, m = 1, \dots, M\} \in D_M$  есть метрика  $L(\mathbf{A}, \mathbf{B})$  в пространстве координат отсчетов  $r$  на некоторой поверхности  $S$ . На множестве  $D_M$  расстояние между двумя наборами из этого множества определяется следующим образом:

$$L(\mathbf{A}, \mathbf{B}) = \min_{\substack{1 \leq m_k \leq M \\ \forall k \neq j \\ m_k \neq m_j}} \{\rho(a_1, b_{m_1}) + \rho(a_2, b_{m_2}) + \dots + \rho(a_M, b_{m_n})\} \equiv \\ \equiv \min_{\pi \in S_M} \left\{ \sum_{m=1}^M \rho(a_m, b_{\pi(m)}) \right\},$$

где  $\rho(a, b) = \sqrt{(x_a - x_b)^2 + (y_a - y_b)^2 + (z_a - z_b)^2}$  -

расстояние между элементами наборов  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$ , а минимум берется по всем перестановкам из  $n$  элементов набора  $\mathbf{B}$ ;  $x_m, y_m, z_m$  характеризуют положение  $m$ -го пространственного отсчета в прямоугольной системе координат. Таким образом, наличие на множестве  $D_M$  расстояния  $L(\mathbf{A}, \mathbf{B})$  превращает его в метрическое пространство, что позволяет решать задачу различия ПС  $\mathbf{X} \in D_M$ . Другим вариантом сильно выпуклой непрерывной функции-стабилизатора является величина

$$\Gamma(\mathbf{X}) = L(\mathbf{X}, \mathbf{X}_0) = \sum_{m=1}^M \|x_m - x_0\|^2,$$

характеризующая степень отличия координат элементов АР от средней точки пространственной структуры

$$x_0 = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M x_m.$$

Если ввести дополнительное ограничение  $x_0 = 0$ , то ПС фиксируется в окрестности начала координат.

При формулировке задачи оптимизации ПС в качестве целевой функции  $\Phi(\mathbf{X})$  принимается один из показателей качества, используемых в экстремальных задачах а) - г), являющихся выпуклой в некоторой окрестности непрерывной функцией, имеющей непустое множество точек максимума  $\mathbf{X}^* \subset D_M$ :

$$\tilde{\mathbf{X}} = \arg \max_{\mathbf{X} \in D_M} \Phi_\alpha(\mathbf{X}), \quad (5)$$

$$\Phi_\alpha(\mathbf{X}) = \Phi(\mathbf{X}) - \alpha \Gamma(\mathbf{X}), \quad \alpha > 0$$

В типичных для оптимизации ПС ситуациях функция  $\Phi(\mathbf{X})$  является многоэкстремальной, поэтому в области определения  $S$  могут существовать несколько точек  $\tilde{\mathbf{X}}, 1 \leq i \leq I$ , каждая из которых имеет свою окрестность  $U_i(\tilde{\mathbf{X}})$  такую, что

$$\Phi_i(\tilde{\mathbf{X}}) \leq \Phi(\mathbf{X}), \quad \mathbf{X} \in S \cap U_i(\tilde{\mathbf{X}}), \text{ где } \tilde{\mathbf{X}} \text{ являются}$$

координатами локальных минимумов, одна из которых

$\tilde{\mathbf{X}}$  - координатой глобального максимума:

$$\tilde{\mathbf{X}} = \arg \max_{i=1, \dots, I} \Phi_\alpha(\tilde{\mathbf{X}}). \quad (6)$$

Для решения многомерной задачи (6) в работе используется подход на основе кластеризации области поиска, характерный для вычислительной математики [30, 31], при котором поиск решения сводится к одномерной многошаговой задаче с применением методов поиска локального экстремума:

$$x_m(j+1) = x_m(j) + \varepsilon \text{grad}_m \Phi_\alpha(\mathbf{X}(j)), \quad (7)$$

где  $j = 1, 2, \dots$  - номер шага,  $\varepsilon > 0$  - коэффициент сходимости градиентного алгоритма. Таким образом, решение многоэкстремальной задачи сводится к последовательному решению для всех  $M$  элементов АР  $I$  задач на локальный экстремум (5). Итерационный процесс (7) повторяется до достижения приращения ПС  $\|x_m(j+1) - x_m(j)\|^2$  не выше заданного. После этого производится уменьшение в два раза подобласти  $S_i$ , после чего поиск локального максимума повторяется. При этом возможны следующие правила остановки итерационных процессов по  $i$  и  $j$ :

а) итерации по шагам  $i$  или  $j$  прекращаются, если по обоим индексам изменение целевой функции  $\Phi_\alpha(\mathbf{X})$  не превышает заданного значения,

б) итерации по шагам  $i$  или  $j$  прекращаются, если по обоим индексам изменение ПС не превышает заданного значения,

в) итерации по шагам  $i$  или  $j$  прекращаются, если по обоим индексам изменения целевой функции  $\Phi_\alpha(\mathbf{X})$  и ПС не превышают заданного значения.

Для оценки топологии используется частота появления  $p(L)$  размера  $L$  оптимальной ПС, полученной при случайных начальных значениях  $\mathbf{X}_0, 1 \leq i \leq I$ , заданных с равномерной плотностью распределения вероятности на

$S_i$ . При отсутствии регуляризации ( $\alpha = 0$ ) для одной и той же сигнально-помеховой ситуации существуют несколько ПС  $\tilde{\mathbf{X}}$ , имеющих соизмеримые частоты появления. При увеличении коэффициента регуляризации до некоторого критического значения  $\alpha = \alpha_{кр}$  неустойчивость решений исчезает, а оптимальные ПС незначительно отличаются при малых изменениях параметров помехи, то есть становятся робастным.

Непрерывная зависимость оптимальных координат элементов АР, полученных при синтезе робастных ПС, от параметров сигнально-помеховой ситуации позволяет эффективно использовать интерполяционные методы для вычисления промежуточных значений координат элементов АР при сравнительно небольшом числе узлов интерполяции, где оптимальные ПС определяются заранее для всех комбинаций значений мощностей и угловых координат заданного числа источников помех.

Механическое перемещение элементов АР в пространстве обладает заметной инерционностью, которая должна учитываться при анализе динамического режима оптимизации ПС при нестационарных помехах. Для количественной оценки быстродействия перестройки ПС используется максимальное механическое перемещение элемента АР за один такт работы системы, а нестационарность помех оценивается угловым перемещением сектора расположения помех за тот же временной интервал. Результаты исследования зависимостей отношения сигнал-помеха, усредненного по начальным угловым координатам помех, от максимального перемещения элемента АР [32] показывают, что при малых значениях параметра быстродействия введение регуляризации обеспечивает выигрыш в помехоустойчивости по сравнению со случаем отсутствия регуляризации.

**Оптимизация пространственной структуры на последовательных выборках**

Использование всех пространственных отсчетов наблюдаемого поля из области  $S$  не в полной мере соответствует реальной ситуации, так как параметры ПС не являются параметрами наблюдаемых сигналов. Устранить это противоречие возможно при представлении наблюдений в виде последовательных выборок, в каждой из которых возможна реализация другой ПС [33]. Принцип последовательных выборок позволяет обосновать тестирование функции правдоподобия для различных ПС, определяя таким образом оптимальную ПС.

Рассмотрим наблюдаемое поле комплексных данных в виде совокупности  $N$  выборок, каждая из которых представляет собой последовательность  $K$  отсчетов во времени комплексных огибающих сигналов с выходов  $M$  элементов антенной решетки:

$$\mathbf{Y}_{nk} = \chi_n(\theta \mathbf{S}_{nk} + \mathbf{V}_{nk}) + \Xi_{nk}, \quad n = 1, \dots, N, \quad k = 1, \dots, K,$$

где  $\mathbf{S}_{nk} = \{s_{nk}^{(1)}, \dots, s_{nk}^{(M)}\}^T$  - полезный сигнал,

$$\mathbf{V}_{nk} = \{v_{nk}^{(1)}, \dots, v_{nk}^{(M)}\}^T \text{ помеха, } \Xi_{nk} = \{\xi_{nk}^{(1)}, \dots, \xi_{nk}^{(M)}\}^T -$$

стационарный гауссовский некоррелированный шум с дисперсией  $D_\xi$ . Помеха представляет собой гауссовский случайный процесс с независимыми значениями отсчетов во времени и в различных выборках. В пространственной области помеха характеризуется корреляционной матрицей  $\mathbf{R} = \mathbf{M}\{\mathbf{V}_{nk} \mathbf{V}_{nk}^H\}$ ,  $H$  - обозначает эрмитово сопряжение матрицы.

Совокупность выборок упорядочена в соответствии со значениями  $\mathbf{X}$  координат элементов антенной решетки, характеризующих ПС радиосистемы. Полагаем, что в поле наблюдаемых данных имеется одна выборка, соответствующая присутствию полезного сигнала и помехи, а параметр ПС равен  $\mathbf{X} = \mathbf{X}_0$ , то есть

$$\chi_n = \begin{cases} 1, & \mathbf{X} = \mathbf{X}_0 \\ 0, & \mathbf{X} \neq \mathbf{X}_0 \end{cases}.$$

Полезный сигнал представляет собой точечный источник излучения, ориентированный в направлении нормали к антенной решетке:  $\mathbf{S}_{nk} = \{a_{nk}, \dots, a_{nk}\}^T$ .

Для случая линейной антенной решетки, элементы которой имеют координаты  $\mathbf{X}$ , помеховая ситуация задается в виде  $P$  точечных источников гауссовских стационарных помех  $v_{nk}^{(p)}$  с дисперсией

$$D_v^{(p)} = \mathbf{M}\{|v_{nk}^{(p)}|^2\}$$

и угловым направлением  $\alpha_p$  относительно нормали к плоскости антенной решетки,  $p = 1, \dots, P$ . Для данной помеховой обстановки корреляционная матрица помех имеет вид:

$$\mathbf{R} = \begin{cases} R_{im} = \sum_{p=1}^P D_v^{(p)} \exp\left[j \frac{2\pi}{\lambda} x_i \sin \alpha_p (x_m - x_i)\right], \\ i, m = 1, \dots, M \end{cases},$$

где  $\lambda$  - длина волны.

В результате обработки поля наблюдаемых данных на последовательных выборках определяется оптимальное значение параметра ПС  $\tilde{\mathbf{X}}$ , а также выносится решение о наличии полезного сигнала  $\hat{\theta} = 1$  или об его отсутствии -  $\hat{\theta} = 0$ . Таким образом, решается задача совместного обнаружения-оценивания. Достаточной статистикой для данной задачи является логарифм отношения правдоподобия, который для детерминированного полезного сигнала

$$\mathbf{S}_{nk} = \{a, \dots, a\}^T = \mathbf{E}_{1M} a, \text{ где } \mathbf{E}_{1M} - \text{вектор,}$$

состоящий из единиц, имеет вид:

$$\lambda(\mathbf{X}_n) = - \sum_{k=1}^K (\mathbf{Y}_{nk} - \mathbf{E}_{1M} a)^H (\mathbf{R}(\mathbf{X}_n) + D_\xi \mathbf{I})^{-1} (\mathbf{Y}_{nk} - \mathbf{E}_{1M} a) + \sum_{k=1}^K \mathbf{Y}_{nk}^H (\mathbf{R}(\mathbf{X}_n) + D_\xi \mathbf{I})^{-1} \mathbf{Y}_{nk}, \quad (8)$$

а для случайного гауссовского сигнала  $\mathbf{S}_{nk} = \{s_{nk}, \dots, s_{nk}\}^T$  с независимыми значениями и дисперсией  $D_s$  принимает вид:

$$\lambda(\mathbf{X}_n) = K \ln \frac{\text{de}(\mathbf{R}(\mathbf{X}_n) + D_\xi \mathbf{I})}{\text{de}(\mathbf{R}(\mathbf{X}_n) + D_\xi \mathbf{I} + \mathbf{E}_{MM} D_s)} + \sum_{k=1}^K \mathbf{Y}_{nk}^H \left[ (\mathbf{R}(\mathbf{X}_n) + D_\xi \mathbf{I})^{-1} - (\mathbf{R}(\mathbf{X}_n) + D_\xi \mathbf{I} + \mathbf{E}_{MM} D_s)^{-1} \right] \mathbf{Y}_{nk}. \quad (9)$$

Отметим, что алгоритм обработки сигналов на последовательных выборках получен в предположении, что полезный сигнал и помеха содержатся только в одной выборке, соответствующей гипотетическому значению параметра. Статистики (8), (9) позволяют определить

оптимальную ПС как в режиме совместно с обнаружением сигнала (2), так и в режиме адаптации путем обучения по классифицированным выборкам при  $\theta=1$  (4).

Для проверки эффективности полученных алгоритмов рассмотрим зависимости (8), (9), полученные методом статистического моделирования. Последовательные выборки получены путем последовательного изменения положения одного из элементов антенной решетки и формирования реализации наблюдаемого процесса на выходе элементов линейной АР.

Результаты расчетов приведены на рис. 1. для детерминированного сигнала и на рис. 2 - для случайного сигнала. Верхний график на рисунках соответствует присутствию сигнала в наблюдаемых данных, нижний график – отсутствию сигнала. Вид зависимостей показывает, что оценка параметра ПС, полученная по критерию максимума отношения правдоподобия и классифицированной выборке при  $\theta=1$  дает также и минимальную ошибку обнаружения сигнала, так как расстояние между верхним и нижним графиками в этом случае максимально. При случайном полезном сигнале оптимальная ПС несколько отличается от ПС, полученной при детерминированном сигнале. Это указывает на зависимость ПС как от помеховой обстановки, так и от свойств полезного сигнала.

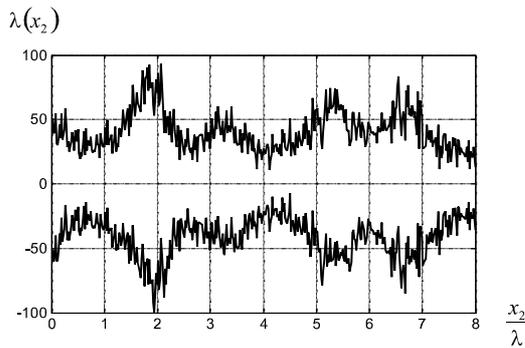


Рис. 1

$M = 3, P = 4, K = 100, D_{\xi} = 1, D_v^{(p)} = 1,$   
 $\alpha_1 = 0,6, \alpha_2 = 0,2, \alpha_3 = -0,1, \alpha_4 = -0,3,$   
 $x_1 = 0, x_3 = 8\lambda, a = 1$

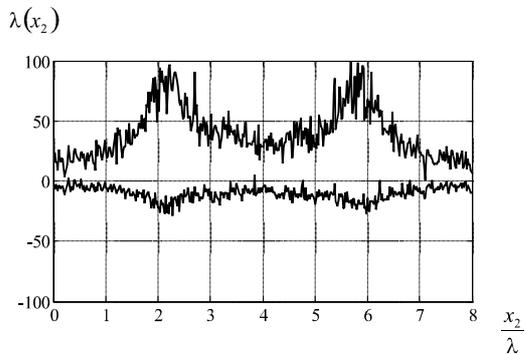


Рис. 2

$M = 3, P = 4, K = 100, D_{\xi} = 1, D_v^{(p)} = 1,$   
 $\alpha_1 = 0,6, \alpha_2 = 0,2, \alpha_3 = -0,1, \alpha_4 = -0,3,$   
 $x_1 = 0, x_3 = 8\lambda, D_s = 1$

На рис. 3 представлены зависимости нормированной среднеквадратической ошибки оценивания  $\sqrt{D_{\hat{x}}}/\lambda$  оптимального значения координаты одного из элементов АР от отношения помеха-шум  $D_v^{(p)}/D_{\xi}$  при числе помех на единицу больше числа элементов АР, количестве последовательных выборок  $N = 50(x_M - x_1)/\lambda$  и различных значениях амплитуды детерминированного сигнала. Из графиков следует, что точность оценивания координаты значительно улучшается при увеличении амплитуды сигнала, а также при увеличении мощности помех. С увеличением числа помех дисперсия ошибки оценивания координаты увеличивается, что объясняется усложнением помеховой обстановки.

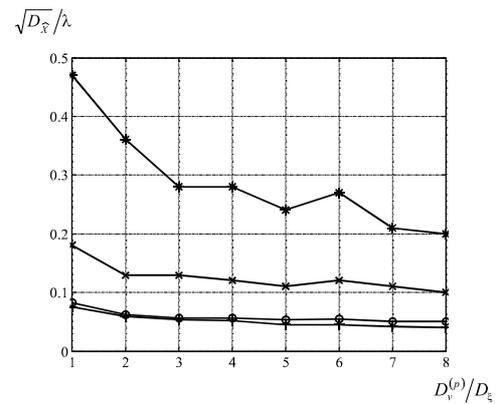


Рис. 3

—x—  $M=2, P=3, a=0,2$ ; —\*—  $M=3, P=4, a=0,2$ ;  
 —+—  $M=2, P=3, a=2$ ; —o—  $M=3, P=4, a=2$ ;

$D_{\xi} = 1, K = 100,$

$\alpha_1 = 0,6, \alpha_2 = 0,2, \alpha_3 = -0,1, \alpha_4 = -0,3$

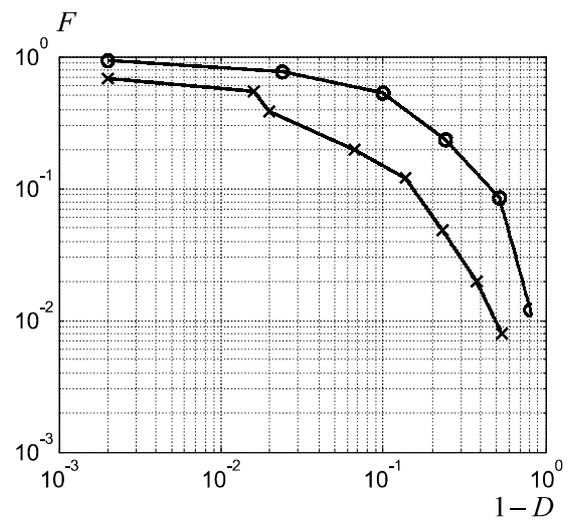


Рис. 4

—x—  $x_2 = 2,87\lambda,$  —o—  $x_2 = 4\lambda,$   
 $M = 2, P = 3, K = 100, D_{\xi} = 1, D_v^{(p)} = 1,$   
 $\alpha_1 = 0,6, \alpha_2 = 0,2, \alpha_3 = -0,1, x_1 = 0, a = 0,2$

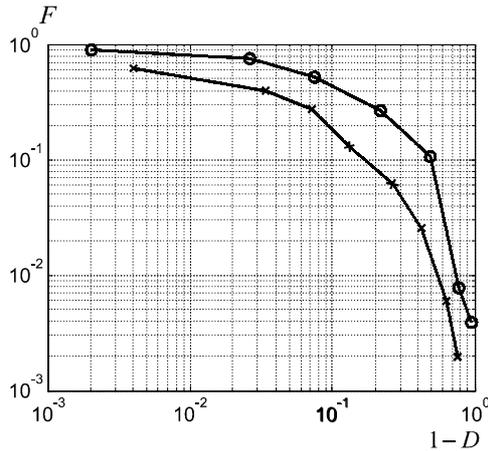


Рис. 5

$$\begin{aligned}
 & - \times - \quad x_2 = 1,38 \lambda, \quad - \circ - \quad x_2 = 4 \lambda, \\
 & M = 3, \quad P = 4, \quad K = 100, \quad D_\xi = 1, \quad D_v^{(p)} = 1, \\
 & \alpha_1 = 0,6, \quad \alpha_2 = 0,2, \quad \alpha_3 = -0,1, \quad \alpha_4 = -0,3, \\
 & x_1 = 0, \quad x_3 = 8 \lambda, \quad a = 0,2
 \end{aligned}$$

На рис. 4, 5 приведены результаты моделирования характеристик обнаружения - вероятности ложной тревоги  $F$  в зависимости от вероятности пропуска цели  $1-D$  при обнаружении детерминированного сигнала для случаев оптимальной и эквидистантной антенных решеток при различных числе помех и элементов АР. Оптимальное значение координаты  $x_2$  элемента АР получено в результате оценивания по классифицированной последовательной выборке на этапе обучения и соответствует максимуму логарифма отношения правдоподобия (4). Из сравнения графиков можно заключить, что оптимизация пространственной структуры дает уменьшение вероятности ошибки более чем в 3 раза по сравнению со случаем эквидистантной АР.

### Заключение

В результате исследований доказана возможность оптимизации ПС радиосистемы пространственно-временной обработки сигналов на основе анализа последовательных выборок наблюдаемых данных. Это обеспечивает возможность технической реализации полученных алгоритмов путем применения реконфигурируемых антенн. Предложен и обоснован метод синтеза робастных ПС на основе регуляризации экстремальной задачи, что позволяет использовать интерполяционные методы при оптимизации ПС, а также дает выигрыш при ограничении на динамические характеристики реконфигурируемой АР.

Показано, что критерий максимального правдоподобия, принятый при синтезе оптимальных ПС, приводит также к оптимизации алгоритма обнаружения в целом. Выигрыш от оптимизации существенно зависит от углового положения источника помех, что особенно заметно при перемещении помех в пространстве. Оптимальная ПС может служить эффективным средством повышения помехоустойчивости радиолокационных систем, телекоммуникационных систем, использующих ММО каналы, а также в антенных измерениях.

### Литература

- Chiba I., Mano S. Null forming method by phase control of selected array elements using plane-wave synthesis // Antennas and propagation. Int. Symp. Dig. Blacksburg-III, June, 15-19. - 1987. - V.1. - P.70-73.
- Mayhan J.T. Thinned array configuration for use with satellite-based adaptive antennas // IEEE Transactions on antennas and propagation. - 1980. - AP-28. - P. 846-856.
- Compton R.T. A method of choosing element patterns in an adaptive array // IEEE Transactions on antennas and propagation. - 1982. - AP-30. - P.489-493.
- Самойленко В.И., Грубрин И.В., Зарощинский О.И. Сокращение числа каналов адаптации антенных решеток // Изв. вузов СССР. Радиоэлектроника. - 1983. - Т.26, №1. - С.42-46.
- Джунь В.И., Шесняк С.С. Адаптивные антенные системы с подавлением помех по главному лепестку диаграммы направленности // Зарубежная радиоэлектроника. - 1988. - № 4. - С.3-15.
- Заявка 55-13165 Япония, МКИ H01q 21/08 / H01q 3/26. Антенное устройство для устранения электромагнитных помех / Ниппон хосо кёкай. - № 48-117375; Заявлено 20.10.73; Оpubл. 07.04.80. // Изобретения в СССР и за рубежом, 1980, № 19.
- Заявка 55-13166 Япония, МКИ H01q 21/22 / H01q 3/01. Система устранения электромагнитных помех / Ниппон хосо кёкай. - № 48-88842; Заявлено 09.08.73; Оpubл. 07.04.80. // Изобретения в СССР и за рубежом, 1980, № 19.
- Левшин В.П., Стручев В.Ф. Адаптивные фазированные антенные решетки с ограниченным числом степеней управления // Зарубежная радиоэлектроника. - 1982. - №1. - С.31-42.
- Зарощинский О.И., Кулешов И.И. Адаптация в больших антенных решетках // Изв.вузов СССР. Радиоэлектроника. - 1979. - Т.22, № 2. - С.47-53.
- Morgan D.R. Partially adaptive array technique // IEEE Transactions on antennas and propagation. - 1978. - V.AP-26, №6. - P.823-833.
- Chapman D.J. Partial adaptivity for the large array // IEEE Transactions on antennas and propagations. - 1976. - V.AP-24, №5. - P.685-696.
- Самойленко В.И., Грубрин И.В. Выбор каналов адаптации адаптивных антенных решеток // Изв. вузов СССР. Радиоэлектроника. - 1985. - Т.28, № 2. - С.51-55.
- Nitzberg R. OTH Radar aurora clutter rejection when adapting a fraction of the array elements // EASCON 1976 Record, IEEE Electronics and aerospace systems convention. September, 1976. November 1978. - P.823-833.
- Леховицкий Д.И., Раков И.Д., Данкевич В.М. Адаптивная защита от помех эквидистантных антенных решеток // Радиотехника. - 1989. - №7. - С. 73-77.
- Зарицкий В.И., Кокин В.Н., Леховицкий Д.И., Саломатин В.В. Рекуррентные алгоритмы адаптивной обработки при пространственной симметрии пространственно-временных каналов приема // Изв. вузов СССР. Радиофизика. - 1985. - Т.28, № 7. - С. 863-871.
- Wirth W.D. Suboptimal suppression of directional noise by a sensor array before beam forming // IEEE Transactions on antennas and propagations. - 1976. - V.AP-24, N5. - P. 741-744.
- Абрамович Ю.И., Данилов Б.Г. Синтез неэквидистантных антенных решеток в задачах разделения сигналов по на-

правлению прихода // Радиотехника и электроника. - 1975. - Т. 20, №3. - С. 635-639.

18. Абрамович Ю.И., Данилов Б.Г. Исследование эффективности коммутационных антенных решеток в задачах разделения сигналов по направлению прихода // Радиотехника и электроника. - 1977. - Т. 22, №1. - С.56-63.
19. Юрьев А.Н., Гончарова Г.И. Синтез неэквилидистантных антенных решеток по критерию минимума среднего уровня боковых лепестков диаграммы направленности // Радиотехника и электроника. - 1975. - Т. 20, №1. - С. 100-110.
20. Копилов Л.Е., Содин Л.Г. Синтез двумерных неэквилидистантных антенных решеток на основе теории разностных множеств // Радиотехника и электроника. - 1994. - Т. 39, №3. - С.380-389.
21. Бялый Л.И. Оптимальный синтез линейных антенных решеток // Антенны. Вып.27. / Под ред. А.А. Пистолькорса. - М.: Радио и связь, 1979. - С.52-60.
22. Бялый Л.И. Характеристики неэквилидистантных линейных решеток // Антенны. Вып.27. Сб. ст. под ред. А.А. Пистолькорса. - М.: Радио и связь, 1979. - С 60- 68.
23. Вопросы перспективной радиолокации. Коллективная монография / Под ред. А.В. Соколова. - М.: Радиотехника, 2003. - 512 с.
24. Варадан В., Виной К., Джозе К. ВЧ МЭМС и их применение. - М.: Техносфера, 2004. - 528 с.
25. Паршин Ю.Н., Гусев С.И. Оптимальный прием дискретных сообщений системой обработки с оптимальной пространственной структурой // Радиотехника и электроника. - 2000. - Т. 45, №3. - С. 305-312 .
26. Сосулин Ю.Г. Теория обнаружения и оценивания стохас-

тических сигналов. - М.: Советское радио, 1978. - 320 с.

27. Паршин Ю.Н., Гусев С.И. Формирование нулей диаграммы направленности антенной решетки методом максимального правдоподобия // Вестник Рязанской государственной радиотехнической академии, вып. 3, Рязань: РГРТА, 1997. С. 9-15.
28. Паршин Ю.Н., Гусев С.И. Влияние сигнально-помеховой ситуации на оптимальную пространственную структуру антенной системы // Вестник Рязанской государственной радиотехнической академии. Вып. 4. - Рязань: РГРТА, 1998. - С. 117-120.
29. Паршин Ю.Н., Лавров А.М., Гусев С.И. Синтез робастных пространственных структур радиосистем с использованием регуляризации // Вестник Рязанской государственной радиотехнической академии. Вып. 6. - Рязань: РГРТА, 2000. - С. 11-14 .
30. Стронгин Р.Г. Численные методы в многоэкстремальных задачах. - М.: Наука, 1978.
31. Васильев Ф. П. Методы решения экстремальных задач. - М.: Наука, 1981.
32. Паршин Ю.Н., Гусев С.И. Исследование динамического режима оптимизации пространственных структур радиосистем // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. Вып. 18. Рязань: РГРТУ, 2006. С. 22-26.
33. Паршин Ю.Н. Оптимизация пространственной структуры на последовательных выборках // XI международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь». Том 1. 12-14 апреля 2005. - Воронеж: ВГУ, 2005. - С. 60-66.

### Научно-исследовательская лаборатория

**«Цифровые технологии обработки сигналов в информационно-телекоммуникационных системах»**  
при кафедре телекоммуникаций и основ радиотехники  
тел. (4912) 96-10-95, e-mail: tor@rgpta.ryazan.ru



**Научный руководитель:** Витязев Владимир Викторович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой ТОР РГРТУ, зам. главного редактора научно-технического журнала «Цифровая обработка сигналов», сопредседатель Национального комитета международной научно-технической конференции и выставки «Цифровая обработка сигналов и ее применение DSPAO» (г. Москва), член редколлегии научно-технического журнала «Электросвязь», председатель рязанского отделения «Российского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи им А.С. Попова», член Президиума Центрального правления.

### Основные направления научных исследований коллектива:

- Разработка теории, методов и алгоритмов анализа-синтеза и преобразования сигналов с применением банков цифровых фильтров на основе эффектов прореживания по времени и по частоте.
- Разработка теории, методов и алгоритмов частотно-временной адаптивной обработки сигналов в телекоммуникационных системах.
- Разработка теории, методов и алгоритмов пространственно-частотно-временной обработки сигналов в задачах радиовидения.
- Разработка программного и аппаратного обеспечения мобильных устройств беспроводной передачи данных.

