
УДК 621.396.969: 681.884

В. В. Орлов, канд. техн. наук, **А. Ю. Коваленко**
Институт компьютерных систем
Одесского национального политехнического университета
(Украина, 65044, Одесса, пр. Шевченка, 1,
тел.(048) 7468168, E-mail: vorlov@ukr.net)

Моделирование конфигурации сети датчиков для устранения неоднозначности определения координат в пассивной локации

(Статью представил д-р техн. наук А. С. Огир)

Исследована задача определения местоположения источника излучения по временным задержкам сигналов, принимаемых в сети пространственно разнесенных датчиков. Разработан критерий оптимизации для устранения неоднозначности определения координат и приведены типовые примеры расстановки датчиков.

Досліджено задачу визначення місця розташування джерела випромінювання за часовими затримками сигналів, що приймаються в мережі просторово рознесених датчиків. Розроблено критерій оптимізації для усунення неоднозначності визначення координат і наведено типові приклади розставляння датчиків.

К л ю ч е в ы е с л о в а: пассивная локация, сеть датчиков, неоднозначность, определение координат.

Задача определения координат источника излучения с помощью систем пассивной локации связана с рядом приложений: мониторинг гроз [1], обнаружение опасных объектов импульсного акустического излучения [2, 3], пеленгация источников радиоизлучений [4], контроль за ядерными испытаниями, исследования вулканических акустических сигналов, инфразвуковых колебаний от движения тайфунов, контроля целостности трубопроводов и др. При этом важно определить критерии и методы объединения данных для повышения эффективности локации источников излучения с учетом пространственной конфигурации сети датчиков [5].

В настоящее время широко применяются разностно-дальномерные алгоритмы определения координат [2—4] источника излучения, основанные на измерении временных задержек между сигналами, поступающими на пространственно разнесенные датчики. В случае удаленных источников излучения полагают, что фронт волны близок к плоскому и коорди-

наты рассчитывают методами триангуляции [1]. Однако в условиях, когда размер базы соизмерим с расстоянием до источника излучения, фронт волны является сферическим. Это обуславливает построение математической модели, содержащей систему уравнений, нелинейность которых порождает несколько решений и неоднозначность при определении местоположения источника излучения [4, 5].

Исследуем влияние пространственной конфигурации сети датчиков на точность расчета координат источника излучения сигнала в контролируемой зоне.

Положим, что ложные пиковые сигналы отсутствуют, верно вычислены взаимно корреляционные функции процессов на выходах выбранных пар датчиков и по ним рассчитаны временные задержки $T_{i,j}$, $T_{k,m}$ сигнала между парами датчиков i и j , k и m . Расчет координат источника излучения (x, y) будем проводить на основе решения системы нелинейных (гиперболических) уравнений, составленных по временным задержкам обнаруженных сигналов от L пар датчиков.

Наиболее распространенная модель системы пеленгации для определения координат источника излучения состоит из $L=2$ баз, содержащих по два датчика каждая [2]. Поиск источника излучения (x, y) в декартовых координатах при произвольных известных координатах датчиков $x_i, y_i, i = 1, \dots, 4$, выполняем с учетом связи временных задержек $T_{1,2}, T_{3,4}$ каждой пары и расстояний r_1, r_2, r_3, r_4 от точки излучения до датчиков $r_{34} = r_3 - r_4 = cT_{3,4}$, $r_{12} = r_1 - r_2 = cT_{1,2}$, где c — скорость распространения звуковой волны. Координаты цели (x, y) описываются математической моделью в виде системы двух гиперболических уравнений, составленных в соответствии с теоремой Пифагора:

$$\begin{aligned} r_{12} = r_1 - r_2 &= \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2} - \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2}, \\ r_{34} = r_3 - r_4 &= \sqrt{(x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2} - \sqrt{(x_4 - x)^2 + (y_4 - y)^2}. \end{aligned} \quad (1)$$

Дальностно-угломерные способы вычисления координат имеют несколько видов неоднозначностей, возникающих по следующим причинам.

1. Различие дискретного пространства в полярной и декартовой системах координат. При этом одна пара временных задержек $t = T_{1,2}, \tau = T_{3,4}$ в (1) соответствует нескольким рядом расположенным элементам разрешения (ячейкам) $t, \tau \rightarrow x_i, i = 1, \dots, N_{t,\tau}$, в декартовой системе координат.

2. Прямое решение системы (1) методом возведения в квадрат. При этом возникает несколько решений, порождающих разброс ложных точек, существенно удаленных от источника излучения. В частности, существенная неоднозначность наблюдается при аналитическом решении (1) в

результате двойного возведения уравнений в квадрат. Это порождает до четырех решений, представленных векторами $S_i = (x_i, y_i)^T$, $i = 1, \dots, 4$, из которых три — ложные и не соответствуют истинным координатам источника излучения. Необходимо заметить, что получение точных аналитических выражений даже для наиболее простой реализации сети из $L=2$ баз, содержащих произвольно расположенные $M=3$ датчика (две пары датчиков, один из них общий), приводит к неоднозначности в виде двух решений [6].

Для упрощения расчетов координат с погрешностью менее половины размера элемента разрешения предлагается подход, основанный на сеточной дискретизации карты соответствия временных задержек $T_{1,2}, T_{3,4} \rightarrow x, y$ каждой точке в декартовой системе координат, рассчитанной заранее по (1). Это позволяет исключить необходимость решения системы гиперболических уравнений, если ограничен размер сетки координат целей для всех возможных задержек $T_{1,2}, T_{3,4}$ с учетом размера ячейки контролируемой зоны. Нетрудно определить требования к размеру сетки и памяти, необходимой для ее хранения.

Рассмотрим пример большой зоны контроля, характерной для акустической артиллерийской разведки [2], проводимой на квадрате $D_x = D_y = 10$ км. При частоте дискретизации $f = 1000$ Гц и скорости распространения звуковой волны приблизительно 330 м/с размер элемента разрешения по дальности составляет $d = v/f = 0,33$ м. Тогда для хранения $N_x N_y = D_x D_y / d^2 \approx 10^9$ ячеек карты соответствия (ячейка занимает $8 \cdot 4 = 36$ байт) необходимо приблизительно 36 Гбайт памяти, что реализуемо на современной элементной базе.

Для исследования неоднозначности рассмотрим пример неоптимального размещения сети датчиков в контролируемой зоне (рис. 1) в виде квадрата со стороной $x_{\max} = y_{\max} = 2$ м, на которой базы параллельны, причем пара датчиков 1 и 2 составляет первую базу размером

$$B_1 = B(1,2) = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2},$$

а пара датчиков 3 и 4 — вторую базу:

$$B_2 = B(3,4) = \sqrt{(x_3 - x_4)^2 + (y_3 - y_4)^2}.$$

Акустический сигнал оцифрован с частотой дискретизации $f = 1000$ Гц, что при скорости распространения звуковой волны 330 м/с соответствует элементу разрешения по дальности $d = v/f = 0,33$ м. На рис. 1, а видно, что любая позиция источника излучения на штриховой линии, проходящей через центры баз, приводит к одинаковым задержкам сигналов $T_{1,2} = t_1 -$

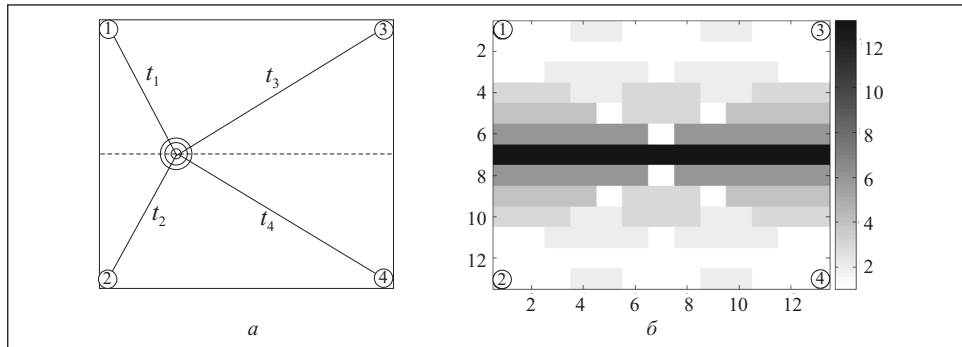


Рис. 1. Пример неоднозначного определения координат на плоскости зоны контроля: *a* — схема размещения датчиков и источника излучения; *б* — местоположение неоднозначно определяемых элементов (по шкале интенсивности)

$-t_2=0, T_{3,4}=t_3-t_4=0$. Тогда множество решений (1) представляет собой совокупность всех элементов, расположенных на штриховой линии. Это порождает существенную неоднозначность в определении местоположения источника излучения, так как источник находится только в одной ячейке на этой прямой, а остальные решения являются ложными.

На рис. 1, *б* представлена карта зоны контроля с расположением неоднозначных элементов в декартовой системе координат, на которой проведена дискретизация элементов разрешения. По шкале интенсивности определяется кратность неоднозначности (число ложных решений, соответствующих одной паре задержек). Как видно, при задержке $t=T_{1,2}=0$ на базе B_1 и $\tau=T_{3,4}=0$ на базе B_2 наблюдается наибольшая кратность неоднозначности $N_{t,\tau}=N_{0,0}$, равная 13-ти элементам разрешения или размеру контролируемой зоны. При других задержках неоднозначность меньше, а на белых квадратах координаты источника определяются однозначно. Из анализа рис.1, *a* и *б* следует, что необходимо определить конфигурацию датчиков, обеспечивающую минимальное число элементов разрешения, соответствующих каждой паре временных задержек.

Для сравнения конфигураций систем необходимо определить критерий неоднозначности, учитывающий точностные характеристики оценки местоположения цели. Если принято решение о наличии сигнала по временным задержкам $t=T_{1,2}, \tau=T_{3,4}$, то в декартовой системе координат оно может соответствовать ($N_{t,\tau} > 0$) нескольким точкам $S_i(x_i, y_i), i = 1, \dots, N_{t,\tau}$. Среднее значение и дисперсия оценки координат определяются следующими выражениями:

$$\bar{S}_{t,\tau} = \sum_{i=1}^{N_{t,\tau}} S_i(x_i, y_i); \quad \sigma_{t,\tau}^2 = (N_{t,\tau})^{-1} \sum_{i=1}^{N_{t,\tau}} [\bar{S}_{t,\tau} - S_i(x_i, y_i)]^2.$$

При однозначном соответствии $t, \tau \rightarrow x, y$ одному элементу разрешения (ячейки) достигается минимальная ошибка $\sigma_{t, \tau} = 0$. При наличии неоднозначности, когда одной паре угломерных координат $t, \tau \rightarrow x_i, y_i, i = 1, \dots, N_{t, \tau}$, соответствует две и более сомкнутых ячеек в декартовой системе координат, $\sigma_{t, \tau} > 0$, а величина неоднозначности эквивалентна снижению разрешающей способности и точности оценки местоположения цели. Если ячейки не соприкасаются, то среднеквадратическая ошибка $\sigma_{t, \tau}$ существенно возрастает, что соответствует появлению ложных целей. Эти особенности позволяют численно оценить неоднозначность и определить эффективность размещения датчиков, как сумму ошибок, охватывающих возможные положения цели. В качестве критерия неоднозначности принимаем квадрат ошибки, равный сумме дисперсий по всем возможным задержкам в контролируемой зоне:

$$\sigma^2 = \sum_{t=1}^{T_{1\max}} \sum_{\tau=1}^{T_{2\max}} w_{t, \tau} \sigma_{t, \tau}^2,$$

где $w_{t, \tau}$ — весовой множитель важности ячеек, охватываемых задержками t, τ ; $T_{i\max} = B_i / c, i = 1, 2$, — максимальные задержки сигналов на базах B_i i -й пары датчиков. Тогда определение конфигурации M датчиков сводится к выбору координат датчиков в виде векторов X, Y размера M и выбору баз $B_i, i = 1, L$, по парам датчиков. Задача оптимизации сводится к минимизации функционала от дисперсии ошибки и имеет вид

$$\min_{X, Y} \sigma(X, Y, B_1, B_2, \dots, B_L) \quad (2)$$

при ограничениях на максимальные размеры баз B_i и контролируемой зоны $x_{\max}, y_{\max}: B_i \leq B_{\max}, i = 1, L; x_i \leq x_{\max}, y_i \leq y_{\max}, i = 1, M$. Оптимум достигается в результате целочисленного перебора всех значений X, Y и баз $B_i, i = 1, L$, по сетке контролируемой зоны с элементом разрешения $d = v / f$. В общем случае максимально возможное число баз определяется числом датчиков $L = M(M-1)/2$, а математическая модель системы пеленгации (1) усложняется и содержит максимум L уравнений:

$$r_{ij} = r_i - r_j = cT_{ij} = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} - \sqrt{(x_j - x)^2 + (y_j - y)^2},$$

$$i, j = 1, 2, \dots, M; i \neq j.$$

На практике часто складывается ситуация, в которой при заданной конфигурации, необходимо выбрать пары датчиков для баз с минимальной неоднозначностью.

Исследуем эффективность определения конфигурации, содержащей минимальное число датчиков $M = 3$, необходимое для определения место-

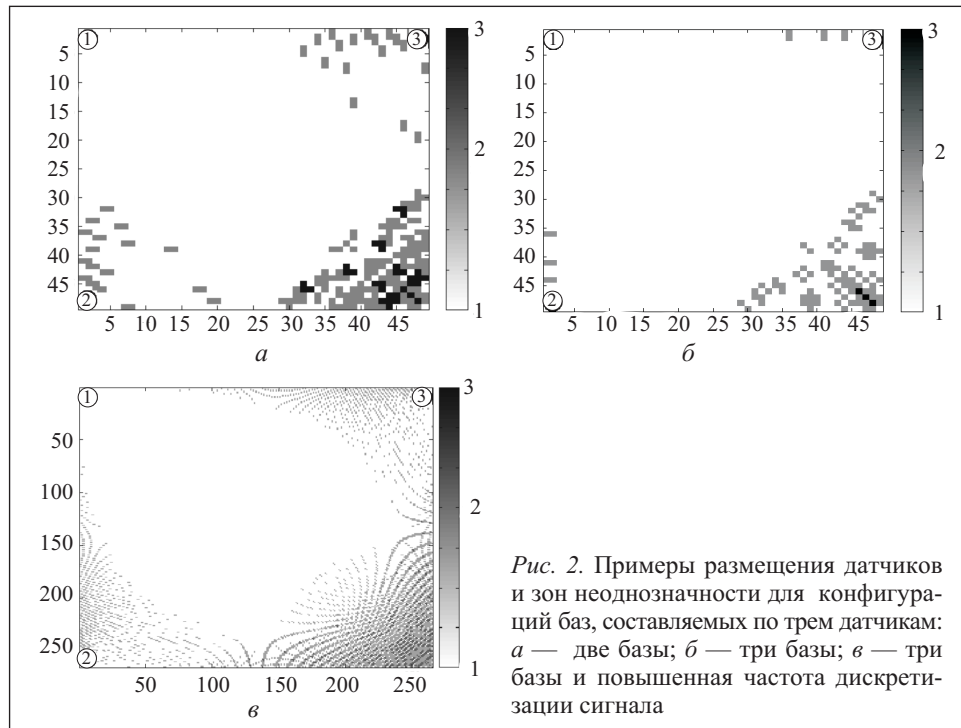


Рис. 2. Примеры размещения датчиков и зон неоднозначности для конфигураций баз, составляемых по трем датчикам: а — две базы; б — три базы; в — три базы и повышенная частота дискретизации сигнала

положения цели. На рис. 2, а показана конфигурация «угол» на сторонах квадратной зоны, в которой применяются две базы. Первая из них, $B_1 = B(1,2)$, содержит датчики 1 и 2, вторая, $B_2 = B(2,3)$ — датчики 2 и 3. Как видим, зоны неоднозначности содержат до трех элементов разрешения и концентрируются в трех зонах.

Повышение эффективности возможно в результате использования всех возможных баз на данной конфигурации датчиков. На рис. 2, б показан результат применения третьей дополнительной базы $B_3 = B(1,3)$, для которой необходимо ввести третье уравнение в систему (1). Это существенно уменьшает неоднозначность и среднеквадратическая ошибка σ уменьшается в четыре раза. На рис. 2, в представлены зоны неоднозначности для системы с высоким разрешением, отличающейся от системы, изображенной на рис. 2, а, повышением частоты дискретизации f в пять раз. Как видно из рис. 2, а и 2, в, контуры неоднозначности сохранены, что позволяет проводить исследования на моделях с низким разрешением, уменьшая при этом вычислительные затраты на поиск оптимальной конфигурации.

На рис. 3 показано размещение четырех датчиков по конфигурации «крест» $B_1 = B(1,3)$, $B_2 = B(2,4)$. Для системы, представленной на рис. 3, а, базами являются диагонали квадрата. В этом случае размер базы превы-

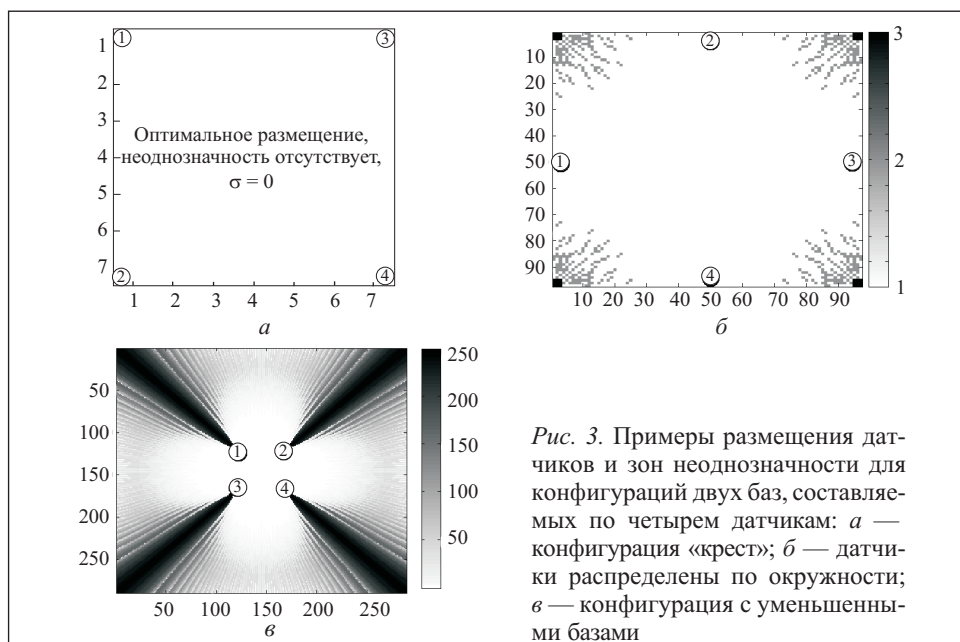


Рис. 3. Примеры размещения датчиков и зон неоднозначности для конфигураций двух баз, составленных по четырем датчикам: *а* — конфигурация «крест»; *б* — датчики распределены по окружности; *в* — конфигурация с уменьшенными базами

шает сторону квадрата зоны контроля, что позволяет полностью исключить неоднозначность. Если датчики распределены по окружности, вписанной в квадрат (см. рис. 3, *б*), то размер базы уменьшается до стороны квадрата и сохраняется неоднозначность по краям зоны контроля.

Существенное увеличение неоднозначности возникает при использовании малых баз относительно контролируемой зоны (см. рис. 3, *в*). На практике такая ситуация соответствует применению систем обнаружения снайперов [3]. В таких системах микрофоны размещены на шлеме охранника, при этом база ограничена размерами шлема (приблизительно 0,2 м), а зона контроля занимает сотни метров. Из рис. 3, *в* следует, что наихудший случай соответствует местоположению стрелка на диагоналях квадрата, при этом определяется только направление источника выстрела с точностью до 9 градусов.

Примером другого размещения четырех датчиков является конфигурация «линия» с равномерным шагом (рис. 4). Как видно из рис. 4, *а*, в случае использования двух баз, $B_1 = B(1,2)$ и $B_2 = B(3,4)$, существует ряд недостатков, которые связаны с малыми размерами баз и их неоптимальным размещением в зоне контроля. Оптимизация осуществляется вследствие выбора баз без изменения положения датчиков. Применение третьей базы ($L = 2, B_3 = B(2,3)$) позволяет уменьшить ошибку в четыре раза (см. рис. 4, *б*), а использование четвертой базы ($L = 4, B_4 = B(1,4)$) — уменьшить ее еще в 1,5 раза (см. рис. 4, *в*).

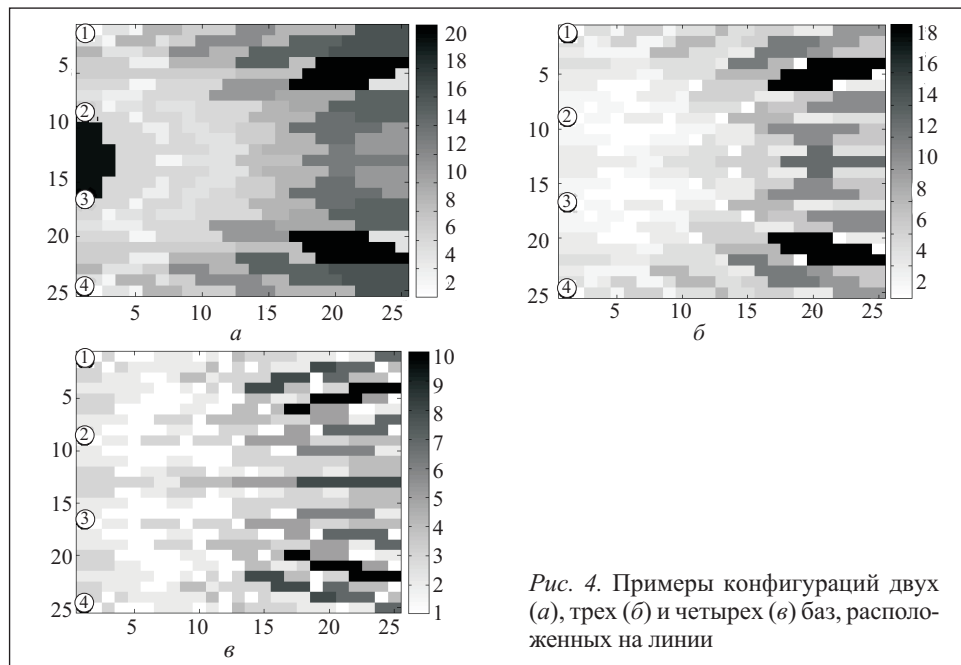


Рис. 4. Примеры конфигураций двух (а), трех (б) и четырех (в) баз, расположенных на линии

Следует заметить, что для больших зон контроля, например в задачах артиллерийской акустической разведки с зонами до 10—30 км, не всегда можно применять большие базы вида $B_4 = B(1, 4)$. Это связано с возможным снижением корреляции сигналов вследствие искажений сигналов, вносимых различными путями распространения до поступления на входы датчиков, а также с уменьшением отношения сигнал/шум на входах датчиков.

Выводы. Результаты проведенных исследований по определению местоположения источника излучения позволяют сделать следующие выводы.

1. Разработан критерий и сформулирована задача оптимизации конфигурации сети датчиков с учетом ограничений на размеры контролируемой зоны.

2. Установлено, что минимальная неоднозначность наблюдается при выполнении следующих требований к расстановке датчиков: выбор максимального числа баз по возможным сочетаниям пар датчиков; увеличение размера баз в результате разнесения пар датчиков на максимально возможные расстояния; обеспечение ортогональности линий баз, т.е. приближение к конфигурации «крест».

Рассмотренный метод математического моделирования конфигурации позволяет обоснованно осуществлять построение сети датчиков и прогнозировать точностные характеристики пассивной локации в контролируемой зоне.

The task under investigation is determination of disposition of emission source according to the temporal delays of the signals accepted in the network of sensors diversity. The criterion of efficiency for optimization of placing of sensors and the standard examples of network configuration are worked out.

1. *Снегуров А. В., Снегуров В. С., Щукин Г. Г.* К программе построения грозопеленгационной сети Росгидромета // Тр. НИЦ ДЗА. Вып. 5(553). — СПб. : Гидрометеоздат, 2004. — С. 207—222.
2. *Тарасов В. А., Кропачев Д. А.* Корреляционная пассивная звуковая локация // Технологии и конструирование в электронной аппаратуре. — 2002. — № 2. — С. 29—34.
3. *Carrapezza E. M. et al.* DARPA Counter Sniper Program Phase I Acoustic Systems Demonstration Results// SPIE. — 1997. — Vol. 2938.— Aug. — P. 299—310.
4. *Курикса А. А.* Анализ однозначности и точности оценки угловых координат источника в малоэлементном интерферометре // Межгосударственная акционерная корпорация «Вымпел». Научные статьи. <http://www.vimpel.ru/analizl.htm>.
5. *Yann Meurisse, Jean-Pierre Delmas* Bounds for Sparse Planar and Volume Arrays // IEEE Trans. on Information Theory. — 2001. — Vol. 47, № 1. — P. 464—468.
6. *Орлов В. В.* Обнаружение местоположения источника излучения на основе корреляционной пространственной обработки // Радиоелектроніка. Інформатика. Управління. — 2003. — № 2. — С. 42—46.

Поступила 28.09.09;
после доработки 03.12.09

ОРЛОВ Владимир Викторович, канд. техн. наук, доцент кафедры компьютеризованных систем управления Ин-та компьютерных систем Одесского национального политехнического университета. В 1980 г. окончил Одесский политехнический ин-т. Область научных исследований — математическое моделирование адаптивных систем обнаружения и распознавания сигналов.

КОВАЛЕНКО Андрей Юрьевич, ассистент кафедры компьютеризованных систем управления Ин-та компьютерных систем Одесского национального политехнического университета, который окончил в 2002 г. Область научных исследований — анализ и оптимизация адаптивных систем.

