



УДК 681.883.062, 621.396.96.001(07)

Е. Л. Шейнман, О. Н. Шувалова

## Анализ эффективности алгоритмов идентификации сигналов и оценки дистанции объектов, обнаруженных в разнесенных системах наблюдения

*Рассмотрены алгоритмы идентификации сигналов объектов, обнаруженных в разнесенных системах наблюдения, и оценки дистанции до объекта методом триангуляции. Определены границы применимости алгоритмов.*

### Интеграция, идентификация, триангуляция, эффективность, пассивный режим

При создании интегрированных систем подводного наблюдения (ИСПН) возникают задачи идентификации (отождествления) сигналов, обнаруженных системами наблюдения, находящимися на значительных расстояниях друг от друга, и оценки их координат. В общем случае системы наблюдения независимы друг от друга и могут иметь различные собственные скорости и курсы.

Одним из основных методов оценки координат объекта при разнесенных системах наблюдения является оценка дистанции до объекта методом триангуляции. Одним из основных методов идентификации является параметрическая идентификация сигналов объектов, основными параметрами которых являются пеленг объекта и его производные.

При отождествлении векторов параметров, поступающих из систем «а» ( $X_j^a$ ) и «b» ( $X_i^b$ ), для каждого вектора параметров определяются взаимные расстояния измерений  $dZ_{ij}^{ab}$  между оценками параметров [1], [2]:

$$dZ_{ij}^{ab} = (X_i^b - X_j^a)^T \left[ K(X_i)^b + K(X_j)^a \right]^{-1} (X_i^b - X_j^a),$$

где  $i, j$  – номера значений объектов в системах «а» и «b» соответственно;  $K(X_j)^a$ ,  $K(X_i)^b$  – соответствующие ковариационные матрицы векторов параметров. Объекты считаются проидентифицированными, если  $\min dZ_{ij}^{ab} < \varepsilon$ , где  $\varepsilon$  – заданное пороговое значение.

Для случая однопараметрической идентификации при совпадении фазовых центров антенн и при идентификации только по пеленгу объекты  $i$  и  $j$  считаются отождествленными, если

$$dZ_{i,j} = \frac{(\Pi_{j/a} - \Pi_{i/b})^2}{(\sigma\Pi_{j/a})^2 + (\sigma\Pi_{i/b})^2} \leq \varepsilon,$$

где  $\varepsilon$  – порог, выбираемый по заданной вероятности правильной идентификации объекта;  $\Pi_{j/a}$ ,  $\Pi_{i/b}$  – пеленги на  $j$ -й и  $i$ -й объекты, обнаруженные в системах «а» и «b» соответственно;  $\sigma\Pi_{j/a}$  – погрешность определения пеленга на  $j$ -й объект, обнаруженный в системе «а»;  $\sigma\Pi_{i/b}$  – погрешность определения пеленга на  $i$ -й объект, обнаруженный в системе «b»;  $(\Pi_{j/a} - \Pi_{i/b}) = d\Pi$  – истинное расстояние между пеленгами в разнесенных системах «а» и «b».

Оценка дистанции для отождествленных сигналов вырабатывается как решение треугольника по пеленгам объектов, измеренным в разнесенных системах, и расстоянию между ними по формуле

$$D_a = \frac{L_{ab} \sin(\Pi_{b/a} - \Pi_{i/b})}{\sin(\Pi_{j/a} - \Pi_{i/b})},$$

где  $L_{ab}$  – расстояние между фазовыми центрами разнесенных систем (база);  $\Pi_{b/a}$  – пеленг на систему «b» из системы «а»;  $\Pi_{j/a}$ ,  $\Pi_{i/b}$  – пеленги на  $j$ -й и  $i$ -й объекты, обнаруженные в системах «а» и «b» соответственно.

Такие алгоритмы идентификации можно использовать в следующих случаях:

– если имеется оценка дистанции хотя бы в одной из систем, что позволяет пересчитать координаты объекта к центру второй разнесенной системы,

– объект находится на большом расстоянии от обеих рассматриваемых систем, что приводит к близким значениям пеленга объекта, обнаруженного в двух системах, и позволяет проводить идентификацию по совпадениям пеленгов.

Однако в ряде случаев эти требования не выполняются, а при отсутствии достаточно точной оценки дистанции в обеих системах возникает противоречие в условиях, для которых эффективны параметрическая идентификация и триангуляционная оценка дистанции.

С учетом этого была поставлена задача оценки эффективности и определения области применимости приведенных ранее алгоритмов оценки дистанции и идентификации сигналов объектов, обнаруженных в разнесенных пассивных системах наблюдения.

В работе [3] рассматривалась аналогичная задача, для которой производился расчет погрешностей оценок информационных параметров методом линеаризации, учитывающим члены первого порядка ряда Тейлора. Для ряда функций возникает сомнение в применимости метода линеаризации в связи с тем, что диапазон изменений случайных аргументов не настолько мал, чтобы в его пределах функция могла быть с достаточной точностью линеаризована. В связи с этим для оценки погрешностей определения параметров представляет интерес уточненный метод линеаризации, учитывающий члены разложения ряда более высокого порядка [4].

Дисперсия оценки функции нескольких слу-

чайных аргументов  $Y = \varphi(x_1, x_2, \dots, x_n)$  методом линеаризации в первом приближении определяется по формуле

$$D_{Y1} = \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial \varphi}{\partial x_i} \right)_m^2 D_{xi}.$$

Здесь  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$  – система  $n$  случайных величин, для которой заданы числовые характеристики: математические ожидания  $(m_{x1}, m_{x2}, \dots, m_{xn})$  и дисперсии  $D_{xi}, i = 1, \dots, n$ .

Уточненная формула дисперсии оценки функции имеет вид

$$D_{Y2} = \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial \varphi}{\partial x_i} \right)_m^2 D_{xi} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_i^2} \right)_m^2 D_{xi}^2 + \sum_{i < j} \left( \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_i \partial x_j} \right)_m D_{xi} D_{xj}.$$

Последние 2 члена представляют собой «поправку на нелинейность функции» и могут служить для оценки точности метода линеаризации при вычислении дисперсии.

Отсюда СКО оценки дистанции в первом приближении имеет вид

$$\sigma_{D1} = \sqrt{(L_{ab}A)^2 \sigma_{\Pi_{b/a}}^2 + (-L_{ab}BC)^2 \sigma_{\Pi_{j/a}}^2 + (-L_{ab}A + L_{ab}BC)^2 \sigma_{\Pi_{i/b}}^2 + (B)^2 \sigma_{L_{ab}}^2},$$

$$\text{где } A = \frac{\cos(\Pi_{b/a} - \Pi_{i/b})}{\sin(\Pi_{j/a} - \Pi_{i/b})}; \quad B = \frac{\sin(\Pi_{b/a} - \Pi_{i/b})}{\sin(\Pi_{j/a} - \Pi_{i/b})},$$

$$C = \cos(\Pi_{j/a} - \Pi_{i/b}).$$

СКО оценки дистанции по уточненной формуле имеет вид

$$\sigma_{D2} = \sqrt{(L_{ab}A)^2 \sigma_{\Pi_{b/a}}^2 + (-L_{ab}BC)^2 \sigma_{\Pi_{j/a}}^2 + (-L_{ab}A + L_{ab}BC)^2 \sigma_{\Pi_{i/b}}^2 + (B)^2 \sigma_{L_{ab}}^2 + \left[ \frac{(-L_{ab}B)^2 \sigma_{\Pi_{b/a}}^4 + \left( L_{ab}B + \frac{2L_{ab}BC}{F^2} \right)^2 \sigma_{\Pi_{j/a}}^4 + \left( \frac{-2L_{ab}AC}{F} + \frac{2L_{ab}BC}{F^2} \right)^2 \sigma_{\Pi_{i/b}}^4 + 0 \cdot \sigma_{L_{ab}}^4}{2} \right] + \left( -\frac{L_{ab}AC}{F} \right)^2 \sigma_{\Pi_{b/a}}^2 \sigma_{\Pi_{j/a}}^2 + \left( L_{ab}B + \frac{L_{ab}AC}{F} \right)^2 \sigma_{\Pi_{b/a}}^2 \sigma_{\Pi_{i/b}}^2 + (A)^2 \sigma_{\Pi_{b/a}}^2 \sigma_{L_{ab}}^2 + \left( -L_{ab}B - \frac{L_{ab}BC}{F^2} + \frac{L_{ab}AC}{F} \right)^2 \sigma_{\Pi_{j/a}}^2 \sigma_{\Pi_{i/b}}^2 + \left( -\frac{AC}{F} \right)^2 \sigma_{\Pi_{j/a}}^2 \sigma_{L_{ab}}^2 + \left( \frac{AC}{F} - A \right)^2 \sigma_{\Pi_{i/b}}^2 \sigma_{L_{ab}}^2},$$

где  $F = \sin(\Pi_{j/a} - \Pi_{i/b})$ .

Относительная погрешность оценки дистанции (в процентах) вычисляется по формуле

$$\sigma D_{\text{отн}} = \frac{\sigma D}{D}.$$

Оценка эффективности алгоритмов идентификации объектов и оценки дистанции методом триангуляции производилась для следующих входных данных: приемные системы разнесены друг относительно друга на некоторое расстояние (база) и находятся в неподвижном состоянии. Расчеты производились при двух вариантах размера базы – 1 и 3 км. Цель движется равномерно и прямолинейно. Скорость и курс цели во всех вариантах ее начального положения будут равны 6 м/с и 90° соответственно.

На рис. 1 представлено начальное положение приемных систем и цели, где  $v, K$  – скорость и курс цели соответственно;  $A, B$  – приемные системы «а» и «б» соответственно;  $D_a$  – расстояние от цели до системы «а»;  $D_b$  – расстояние от цели до системы «б»;  $\Pi_a$  – пеленг системы «а» относительно цели;  $\Pi_b$  – пеленг системы «б» относительно цели;  $L$  – расстояние между приемными системами «а» и «б».

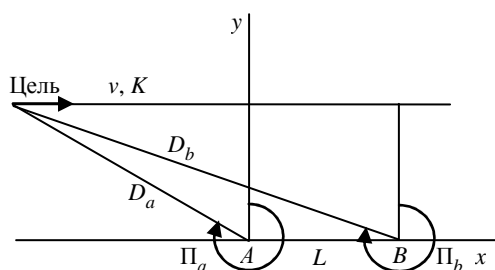


Рис. 1

В начальном положении приемные системы «а» и «б» и цель имели следующие координаты:

- при размере базы 1 км система «а» имеет координаты (0;0), система «б» – (1000; 0);
- при размере базы 3 км система «а» имеет координаты (0;0), система «б» – (3000; 0);
- цель при размере базы 1 км на дистанциях от разнесенной системы наблюдения 3, 5, 10, 30, 50, 100 км в начальном положении удалена на 10.3 км от начала координат по оси X влево;
- цель при размере базы 3 км на дистанциях от разнесенной системы наблюдения 3, 5, 10, 30, 50, 100 км в начальном положении удалена на 9.3 км от начала координат по оси X влево.

Будем рассматривать первые 60 мин движения цели относительно приемных систем в двух случаях: первая и вторая системы имели постоянные и равные между собой погрешности определения пеленга, равные 1° ( $\sigma\Pi_a = \sigma\Pi_b = 1^\circ$ ) и 3° ( $\sigma\Pi_a = \sigma\Pi_b = 3^\circ$ ) во всем диапазоне углов прихода сигнала.

Дистанция от разнесенной системы наблюдения, включающей в себя две приемные системы «а» и «б», представляет собой кратчайшее расстояние между целью и линией базы.

Погрешности триангуляционных оценок дистанции определялись с помощью метода линеаризации (первое приближение) и уточненного метода линеаризации (второе приближение) [4]. Для анализа эффективности алгоритма идентификации оценивались зависимости взаимного расстояния  $dZ$  между пеленгами систем наблюдения.

На рисунках приведены:

– зависимости истинного расстояния между пеленгами ( $d\Pi$ ) в разнесенных системах от времени на дистанциях от разнесенной системы наблюдения: 1 – 3 км, 2 – 5 км, 3 – 10 км, 4 – 30 км, 5 – 50 км, 6 – 100 км при размерах базы:  $a$  – 1 км;  $b$  – 3 км (рис. 2, а, б);

– зависимости расстояния между пеленгами ( $dZ$ ) в разнесенных системах «а» и «б» от времени на дистанциях от разнесенной системы наблюдения: 1 – 3 км, 2 – 5 км, 3 – 10 км, 4 – 30 км, 5 – 50 км, 6 – 100 км с учетом погрешности измерений и при пороге алгоритма идентификации  $\varepsilon = 3$ , для размеров базы:  $a$  – 1 км;  $b$  – 3 км при  $\sigma\Pi_a = \sigma\Pi_b = 1^\circ$  (рис. 3 а, б);  $\sigma\Pi_a = \sigma\Pi_b = 3^\circ$  (рис. 4, а, б);

– зависимости среднеквадратических погрешностей ( $\sigma D_1$  – в первом приближении на дистанциях от разнесенной системы наблюдения: 1 – 3 км, 3 – 5 км, 5 – 10 км;  $\sigma D_2$  – во втором приближении на дистанциях от разнесенной системы наблюдения: 2 – 3 км, 4 – 5 км, 6 – 10 км) оценки дистанции методом триангуляции от времени при размерах базы:  $a$  – 1 км;  $b$  – 3 км при:  $\sigma\Pi_a = \sigma\Pi_b = 1^\circ$  (рис. 5, а, б);  $\sigma\Pi_a = \sigma\Pi_b = 3^\circ$  (рис. 6, а, б);

– зависимости относительных погрешностей ( $\sigma D_{\text{отн}1}$  – в первом приближении на дистанциях от разнесенной системы наблюдения: 1 – 3 км, 3 – 5 км, 5 – 10 км;  $\sigma D_{\text{отн}2}$  – во втором приближении на дистанциях от разнесенной системы наблюдения: 2 – 3 км, 4 – 5 км, 6 – 10 км) оценки дистанции методом триангуляции от времени при размерах базы:  $a$  – 1 км;  $b$  – 3 км при:  $\sigma\Pi_a = \sigma\Pi_b = 1^\circ$  (рис. 7, а, б);  $\sigma\Pi_a = \sigma\Pi_b = 3^\circ$  (рис. 8, а, б).

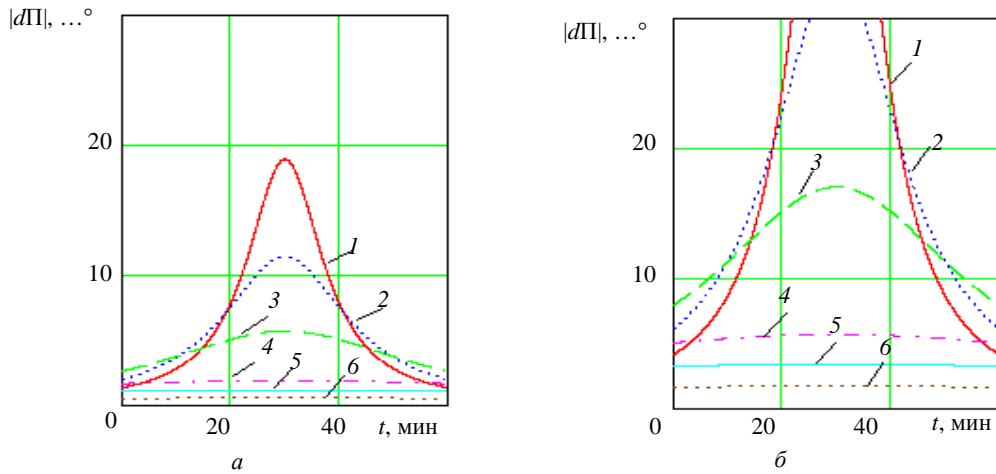


Рис. 2

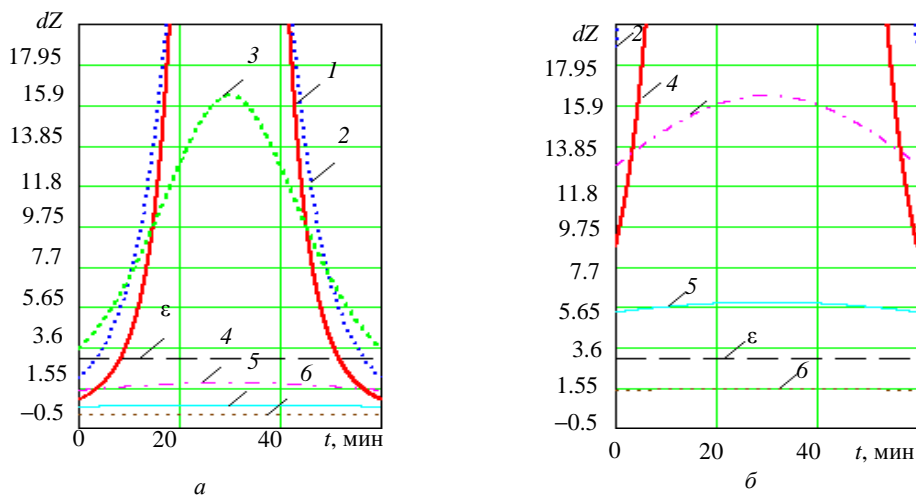


Рис. 3

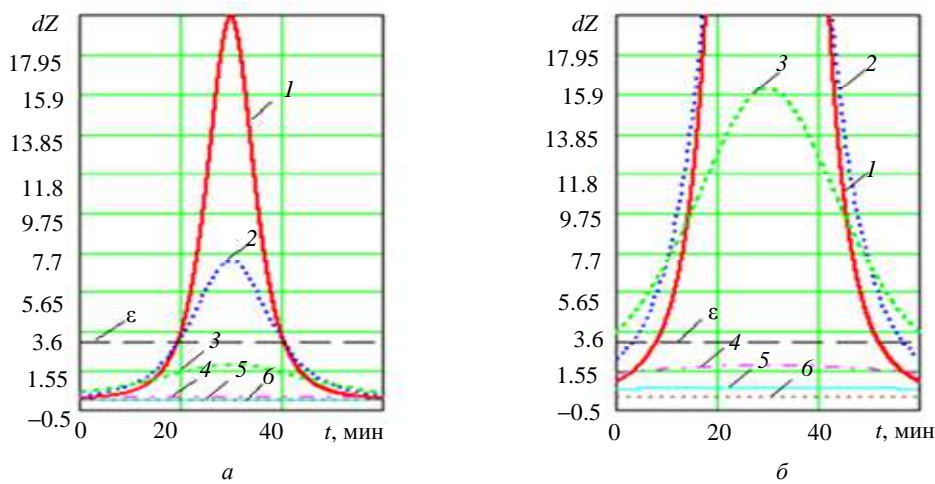


Рис. 4

Для анализа зависимости погрешности оценки дистанции от отношения дистанции от разнесенной системы наблюдения к расстоянию между антеннами постановка задачи будет несколько изменена.

Задаются следующие начальные координаты:

- при размере базы 1 км система «а» находится в начале координат, система «б» удалена на 1 км по оси  $X$  вправо, цель удалена на 0.5 км по оси  $X$  вправо;

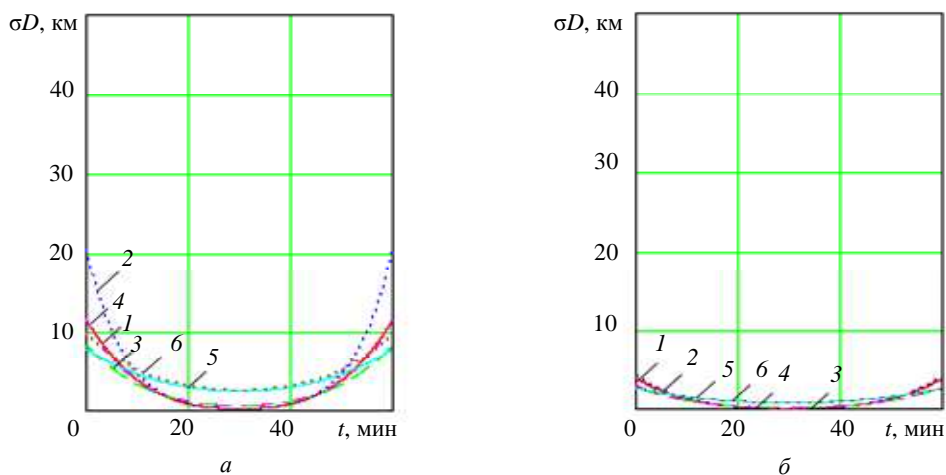


Рис. 5

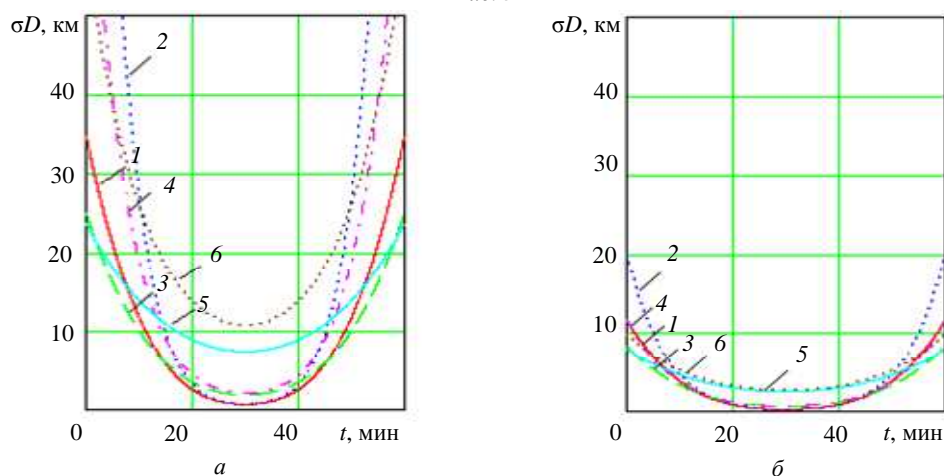


Рис. 6

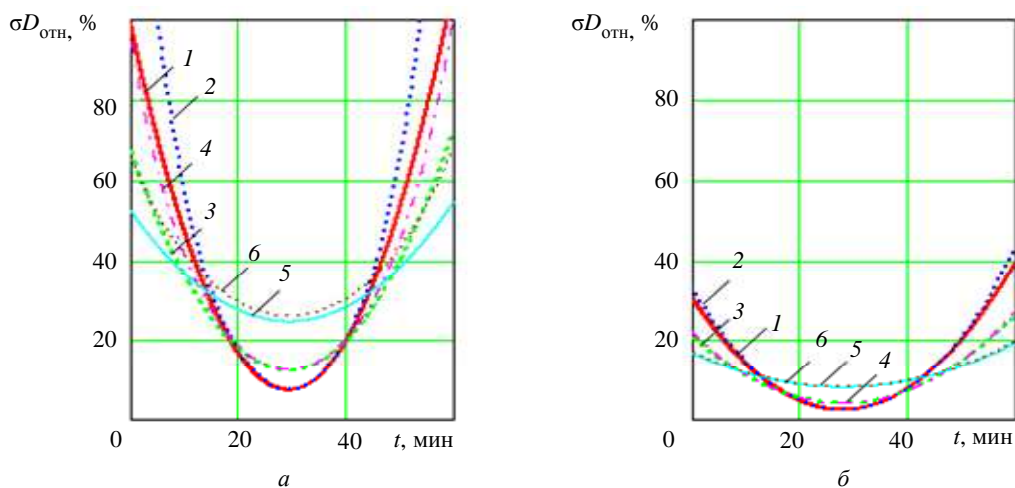


Рис. 7

• при размере базы 3 км система «а» находится в начале координат, система «б» удалена на 3 км по оси X вправо, цель удалена на 1.5 км по оси X вправо.

При этом цель будет двигаться со скоростью 1 м/с и курс ее движения будет 0°.

Приведены зависимости относительных СКО ( $\sigma D_{отн1}$  – в первом приближении – кривая 1,  $\sigma D_{отн2}$  – во втором приближении – кривая 2)

оценки дистанции до цели от отношения дистанции от разнесенной системы наблюдения к расстоянию между антеннами для размеров базы 1 и 3 км соответственно при:  $\sigma \Pi_a = \sigma \Pi_b = 1^\circ$  (рис. 9, а, б);  $\sigma \Pi_a = \sigma \Pi_b = 3^\circ$  (рис. 10, а, б).

На основании приведенных расчетов (рис. 3, 4) можно сделать вывод, что объект может быть идентифицирован при рассмотренной траектории

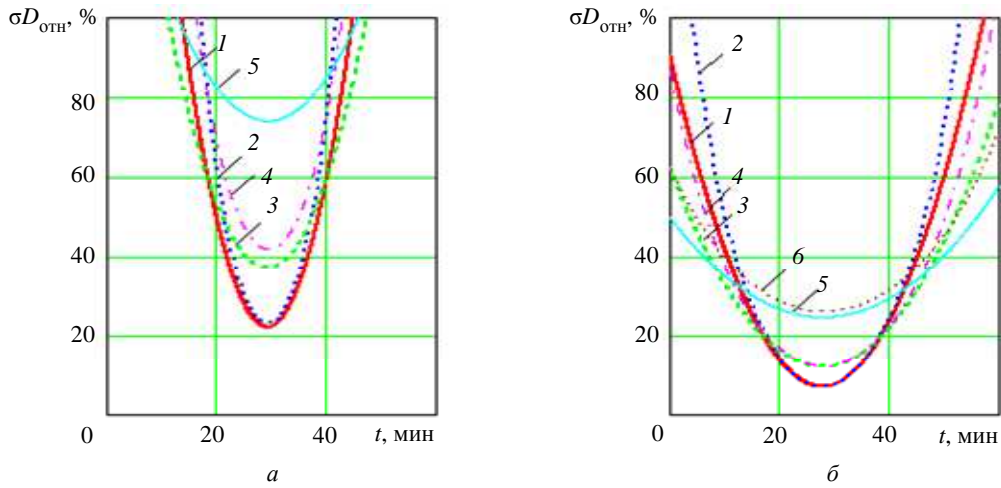


Рис. 8

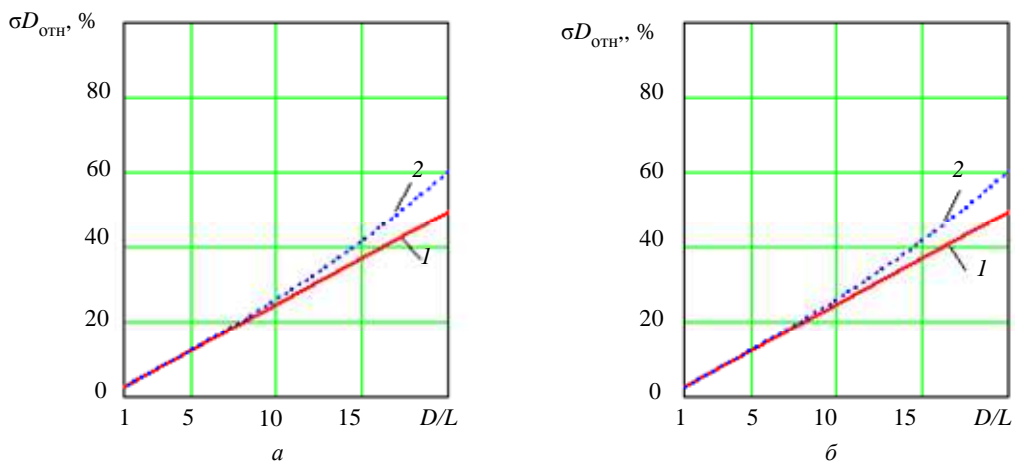


Рис. 9

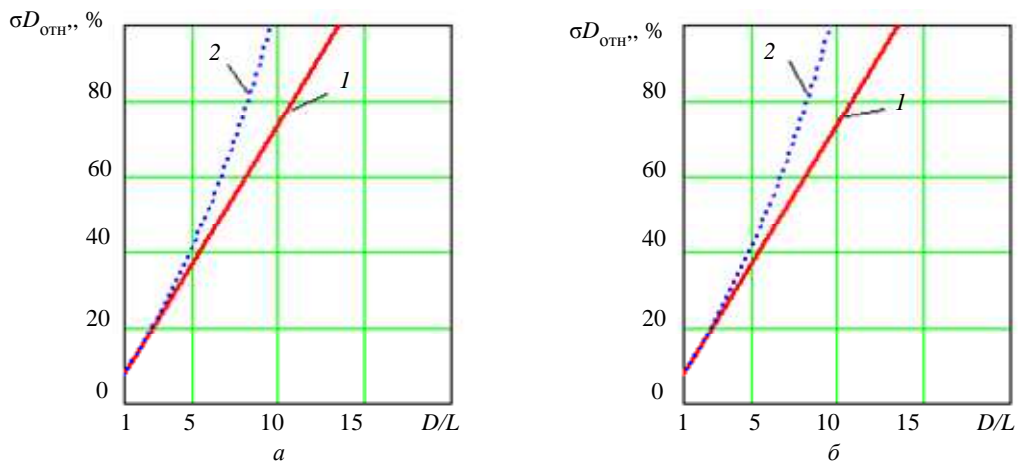


Рис. 10

движения в любой момент времени, если расстояние до объекта превышает размер базы примерно в 8 раз при погрешности пеленга  $3^\circ$ , а при погрешности пеленга  $1^\circ$  – если расстояние до объекта превышает размер базы примерно в 24 раза.

С уменьшением дистанции от цели до разнесенной системы уменьшается участок движения цели, на котором она может быть идентифицирована. Например, при погрешности пеленга  $1^\circ$  и

размере базы 1 км (рис. 3 а) цель может быть идентифицирована на дистанции от разнесенной системы наблюдения 5 км на углах  $62\dots65^\circ$  относительно перпендикуляра от центра базы и дистанциях 10.6...11.9 км от цели до центра базы (что соответствует участкам движения цели от 0 до 4 мин и от 56 до 60 мин). При дистанции от разнесенной системы наблюдения 3 км (рис. 3, б) объект может быть идентифицирован на углах

69...74° относительно перпендикуляра от центра базы и дистанциях 8.5...11.2 км от цели до центра базы (что соответствует участкам движения цели от 0 до 8 мин и от 52 до 60 мин). Другими словами, идентификация по рассматриваемому алгоритму более эффективна на боковых углах, отличных от перпендикуляра от центра базы (для мобильных носителей – углах, отличных от траверсного).

Объективное расстояние между пеленгами при заданном пороге идентификации, равном 3, при погрешностях оценки пеленга систем «а» и «b», равных 1°, должно быть меньше 2...3°, а при погрешностях оценки пеленга систем «а» и «b», равных 3°, – меньше 7...8°. Однако на близких расстояниях разница пеленгов от разнесенных систем наблюдения значительна, особенно на направлениях, близких к траверсным, а измеренные расстояния между пеленгами могут быть при этом значительно больше, в том числе за счет погрешности измерения. Такой разброс пеленгов не позволяет эффективно проводить идентификацию объектов, обнаруженных различными системами наблюдения.

Сравнение двух способов оценки погрешности дистанции методом триангуляции показало, что во втором приближении и среднеквадратическая (рис. 5, 6), и относительная (рис. 7, 8) погрешности выше, чем в первом. Различие между ними увеличивается на боковых углах, отличных от перпендикуляра от центра базы (для мобильных носителей – углах, отличных от траверсного). Другими словами, на траверсных углах определять погрешность оценки дистанции методом триангуляции можно используя первое приближение, а на боковых углах необходимо использовать уточненный метод линеаризации.

Например, относительные СКО оценки дистанции при погрешностях оценки пеленга систем «а» и «b», равных 1°, и размере базы 1 км (рис. 7, а) при дистанции от разнесенных систем, равной 3 км, очень близки на углах 0...61° относительно перпендикуляра от центра базы и дистанциях 3...6.2 км от цели до центра базы (что

соответствует участкам движения цели от 15 до 45 мин) и различаются на углах 61...74° относительно перпендикуляра от центра базы и дистанциях 6.2...11.2 км от цели до центра базы (что соответствует участкам движения цели от 0 до 15 мин и от 45 до 60 мин). Относительные СКО оценки дистанции методом триангуляции во втором приближении значительно превышают относительные СКО в первом приближении.

Видно, что с увеличением дистанции от цели до разнесенной системы наблюдения увеличивается различие между относительными СКО оценки дистанции методом триангуляции в первом и во втором приближениях (рис. 9, 10). Например, при погрешностях оценки пеленга систем «а» и «b», равных 1°, и размере базы 1 км (и 3 км тоже) (рис. 9) относительные СКО оценки дистанции в первом и втором приближениях близки при отношении дистанции от разнесенной системы наблюдения к расстоянию между антеннами (базе), не превышающем 8. Здесь для оценки погрешностей достаточно первого приближения метода линеаризации. При отношении дистанции от разнесенной системы наблюдения к расстоянию между антеннами (базе), превышающем 8, появляется значительное различие между данными погрешностями. Другими словами, для более точной оценки дистанции следует пользоваться уточненным методом линеаризации.

Проведенный анализ показал, что оценка дистанции методом триангуляции эффективна только в тех случаях, когда пеленги объектов сильно различаются, однако в этом случае нельзя осуществлять идентификацию сигналов по близости пеленгов объектов, измеренных в разнесенных приемных системах.

В связи с этим следует совместно решать задачи идентификации и триангуляции, с расширением области применимости триангуляционного метода оценки дистанции для решения задачи идентификации объектов, обнаруженных в разнесенных системах наблюдения [5].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузьмин С. З. Основы теории цифровой обработки радиолокационной информации. М.: Сов. радио, 1974.
2. Жандаров А. М. Идентификация и фильтрация измерений состояния стохастических систем. М.: Наука, 1979.

3. Шейнман Е. Л. Анализ алгоритмов идентификации сигналов и оценки дистанции объектов, обнаруженных в разнесенных системах наблюдения // VIII Междунар. конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» (ГА-2006). СПб., 2006. С. 475–478.

4. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. М.: Наука, 1969.

5. Шейнман Е. Л. Идентификация сигналов объектов в интегрированных системах подводного

наблюдения //Юбилейная науч.-техн. конф. «Проблемы прикладной гидроакустики», Таганрог, 2004. С. 27-32.

E. L. Sheinman, O. N. Shuvalova

## A STUDY OF EFFECTIVENESS OF SIGNAL IDENTIFICATION ALGORITHMS AND DISTANCE ESTIMATIONS OF THE OBJECTS WHICH HAVE BEEN DETECTED IN SURVEILLANCE SYSTEMS, TAKING PLACE ON DISTANCE

*Algorithms of signal identification of the objects, which have been detected in surveillance systems, taking place on distance from each other, and estimation of the object distance by a triangulation method, are considered. Conditions of algorithms applicability are determined.*

**Integration, identification, triangulation, efficiency, passive mode**

УДК 620.179.161

К. Е. Аббакумов, Н. В. Степаненко

## Моделирование электроакустического тракта теневого метода ультразвукового контроля при использовании бесконтактных датчиков

*Проведено моделирование электроакустического тракта теневого метода ультразвукового контроля при использовании бесконтактных датчиков. Получены результаты, на основе которых можно оценить влияние пространственной ориентации катушки датчика на результат контроля.*

**Ультразвуковой контроль, листовой прокат, теневой метод, электромагнитный акустический преобразователь**

При проектировании большинства видов аппаратуры для дефектоскопии и других видов неразрушающего контроля с использованием упругих волн наибольшее предпочтение отдается варианту, связанному с получением и анализом уравнений электроакустического или акустического тракта.

Ультразвуковая дефектоскопическая аппаратура основана на принципах действия, связанных с особенностями распространения упругих волн в веществе контролируемого изделия. К таким особенностям относятся: рассеяние на неоднородностях, изменения скоростей распространения и поглощения ультразвука, эффект Доплера, флуктуации направления распространения волн при рефракции и др. Часть общего функционального приборного тракта, в котором осуществляется из-

меряемое взаимодействие ультразвука с веществом или объектом, принято называть акустическим трактом прибора [1], [2]. Понятие акустического тракта и способы его аналитического описания введены в практику инженерного проектирования дефектоскопической аппаратуры И. Н. Ермоловым в ряде работ [3]. Если в рассмотрение включаются процессы преобразования электрических сигналов в акустические, то образуется модель, которую принято называть электроакустическим трактом прибора. Эта характеристика наиболее полно учитывает возможности аппаратных средств уже с учетом согласования работы преобразователей не только с исследуемой средой, но и с электронными устройствами. Для удобства анализа иногда электроакустический тракт условно разделяется на 3 части: часть, связанная с режимом возбужде-