

## ВЫВОДЫ

1. Для получения необходимого отношения сигнал-шум на выходе рассматриваемого класса ОЭС разрешающая способность оптической системы должна выбираться соизмеримой со средним размером случайных образований анализируемого случайного поля. Повышение разрешающей способности оптики, так же как и ее дефицит, ведет к уменьшению отношения сигнал-шум. Кроме того, ОЭС более критична к улучшению разрешающей способности оптической схемы (см. рис.2).

2. При выборе модели поля необходимо учитывать, что если размер фоновых образований соизмерим с разрешающей способностью оптической системы, то представление поля локально-изотропной моделью соответствует значительно большему отношению сигнал-шум на выходе ОЭС (см. рис. 3).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Левшин В. Л. Характеристики пространственной фильтрации некоторых видов оптико-электронных сканирующих устройств пеленгации.— «Техническая кибернетика», 1967, № 3, с. 144—156.
2. Агоуап. The technique of the spatial filtering.— «Proc. IRE», 1959, vol. 47, № 9, p. 1561—1568.
3. Шестов Н. С. Выделение оптических сигналов на фоне случайных помех. М., «Сов. радио», 1967.
4. Малкевич М. С., Малков И. П., Пахомова Л. А., Розенберг Г. В., Фарапонова Т. П. Определение статистических характеристик радиационных полей над облаками.— «Космические исследования», 1964, т. 2, вып. 2, с. 257—265.
5. Ator J. T. Image velocity sensing with parallel-slit reticles.— «JOSA», 1963, vol. 53, № 12, p. 1416—1422.
6. Мухамедьяров Р. Д., Комаров Г. А. О двух моделях представления яркостных случайных полей.— «Радиотехника и электроника», 1973, т. XVIII, № 5, с. 1068—1072.
7. Тихонов В. И. Статистическая радиотехника. М., «Сов. радио», 1966.

*Поступила в редакцию 12 июня 1974 г.*

УДК 62-506.9

А. П. ДОРОШЕНКО, А. С. ЧЕРЕПАХА

(Харьков)

## ОСОБЕННОСТИ КОРРЕЛЯЦИОННОГО АНАЛИЗА СИГНАЛОГРАММ, ЗАПИСАННЫХ МЕТОДОМ ШИРОКОЙ ТРАССЫ

Проблема надежной классификации одномерных сигналов актуальна при решении ряда современных технических задач (обработка акустических сигналов и радиосигналов, распознавание речи, диагностика сигналов медицинских приборов и др.).

Широкое распространение в задачах классификации получил корреляционный критерий сравнения, при котором сигналы классифицируются по оценкам наилучшего в каком-либо смысле приближения входного сигнала к одному из эталонных. Последнее время получают все большее распространение методы пространственной согласованной фильтра-

ции, основанные на представлении (записи) одномерных сигналов в виде изображений (сигналограмм). Запись сигналограмм одномерных сигналов может осуществляться методами переменной плотности, переменной площади и широкой трассы [1]. Сигналограммы, записанные методами переменной плотности и переменной площади, дают корреляционные функции, близкие к идеальным корреляционным функциям соответствующих сигналов. Функции корреляции сигналограмм, записанных методом широкой трассы, существенно отличны от идеальных корреляционных функций одномерных сигналов, формирующих сигналограммы. Эти отличия обусловили выбор именно этого метода представления одномерного сигнала в виде изображения в устройстве для автоматической настройки радиоэлектронной аппаратуры [2], в устройстве моделирования электрических сигналов [3] и др.

Формирование сигналограмм методом широкой трассы основано на преобразовании временного параметра  $t$  в пространственную координату  $x$  декартовой системы координат изображения. При этом функции  $f(t)$  одномерного сигнала соответствует пространственная координата  $y$  смещения трассы, а двумерный сигнал  $F(x, y)$  на участке, ограниченном кривыми  $y(x) + \varepsilon/2$  и  $y(x) - \varepsilon/2$ , принимает значения, отличные от значений его на остальной площади сформированного изображения (здесь  $\varepsilon$  — ширина трассы).

Для эффективного использования корреляционного анализа сигналограмм, записанных методом широкой трассы, необходимо располагать параметрами, количественно характеризующими особенности этого метода, распространяющиеся на сигналы любой (произвольной) формы, а также выяснить возможность распространения результатов, полученных при рассмотрении равномерного закона распределения двумерного сигнала  $F(x, y)$  по ширине трассы, на случай нормального закона распределения (последний имеет место при формировании сигналограмм с помощью обычных электронно-лучевых трубок [4]).

Ниже приведено решение поставленных задач.

Сигнал произвольной формы может быть представлен суммой гармонических составляющих ряда Фурье. При этом, рассматривая функции взаимной корреляции, для получения практических выводов достаточно ограничиться верхней и нижней спектральными составляющими. Поэтому рассмотрим функции корреляции сигналограмм, сформированных одномерным сигналом  $f(t) = \sin t$ . В случае распределения двумерного сигнала по ширине трассы по закону равномерной плотности сигналограммы сигнала  $f(t)$  представляют двоичные изображения, двумерный сигнал которых принимает условное значение «1» на участках, ограниченных кривыми сверху  $y = \sin x + \varepsilon/2$  и снизу  $y = \sin x - \varepsilon/2$ , где  $y$  — координата по оси амплитуд;  $x$  — координата по оси времени;  $\varepsilon$  — ширина трассы.

Так как сигналограммы являются двоичными изображениями, взаимная корреляция соответствует площади, на которой двумерный сигнал принимает значение «1» одновременно на обоих участках коррелируемых сигналограмм. В случае равенства частот двух сигналов  $f_1(t) = f_2(t) = \sin t$  и при единичном взаимном масштабе ( $M := 1$ ) сигналограмм, взаимно смещенных на величину  $C$  в направлении оси амплитуд, функцию одномерной свертки  $R(\xi)$  в направлении оси времени описывают следующие выражения ( $x \in [\xi/2, \xi/2 + \pi]$ ):

при  $\xi \in [0, 2 \arcsin((C - \varepsilon)/2)]$  и  $0 < \varepsilon < C$

$$R(\xi) = 0; \quad (1)$$

при  $\xi \in [0, 2 \arcsin((\varepsilon - C)/2)]$  и  $C < \varepsilon \leq 2C$ ,  
а также  $\xi \in [0, 2 \arcsin(C/2)]$  и  $\varepsilon > 2C$

$$R(\xi) = \pi(\varepsilon - C); \quad (2)$$

при  $\xi \in (2 \arcsin((\varepsilon - C)/2), 2 \arcsin(C/2)]$  и  $0 < \varepsilon < 2C$

$$R(\xi) = \int_{\xi/2}^{x_3} dx \int_{\sin(x-\xi)-\varepsilon/2+C}^{\sin x + \varepsilon/2} dy; \quad (3)$$

при  $\xi \in (2 \arcsin(C/2), 2 \arcsin((\varepsilon + C)/2)]$  и  $0 < \varepsilon \leq 2C$ ,

а также  $\xi \in (2 \arcsin((\varepsilon - C)/2), \arcsin((\varepsilon + C)/2)]$  и  $\varepsilon > 2C$

$$R(\xi) = \int_{\xi/2}^{x_1} dx \int_{\sin x - \varepsilon/2}^{\sin(x-\xi) + \varepsilon/2 + C} dy + \int_{x_1}^{x_3} dx \int_{\sin(x-\xi) - \varepsilon/2 + C}^{\sin x + \varepsilon/2} dy; \quad (4)$$

при  $\xi \in (2 \arcsin(C/2), 2 \arcsin((\varepsilon - C)/2)]$  и  $\varepsilon > 2C$

$$R(\xi) = \int_{\xi/2}^{x_1} dx \int_{\sin x - \varepsilon/2}^{\sin(x-\xi) + \varepsilon/2 + C} dy + \int_{x_1}^{(\varepsilon/2) + \pi} dx \int_{\sin(x-\xi) - \varepsilon/2 + C}^{\sin x + \varepsilon/2} dy; \quad (5)$$

при  $\xi \in (2 \arcsin((\varepsilon + C)/2), \pi]$

$$R(\xi) = \int_{x_2}^{x_1} dx \int_{\sin x - \varepsilon/2}^{\sin(x-\xi) + \varepsilon/2 + C} dy + \int_{x_1}^{x_3} dx \int_{\sin(x-\xi) - \varepsilon/2 + C}^{\sin x + \varepsilon/2} dy, \quad (6)$$

где  $x_1, x_2, x_3$  — корни уравнений соответственно:

$$\sin x = \sin(x - \xi) + C; \quad x_1 = \xi/2 + \arccos(C / (2 \sin(\xi/2)));$$

$$\sin x - \varepsilon/2 = \sin(x - \xi) + \varepsilon/2 + C; \quad x_2 = \xi/2 + \arccos((\varepsilon + C) / (2 \sin(\xi/2)));$$

$$\sin x + \varepsilon/2 = \sin(x - \xi) - \varepsilon/2 + C, \quad x_3 = \xi/2 + \arccos((C - \varepsilon) / (2 \sin(\xi/2))).$$

Рассмотрим вычисление значений функции одномерной свертки сигналограмм неединичного масштаба ( $M \neq 1$ ) в направлении оси амплитуд. Функцию одномерной свертки  $R(\xi)$  описывают следующие выражения ( $C=0$ ;  $x \in [-\pi, \pi]$ ):

при  $\xi \in [0, \pi]$  и  $\varepsilon \geq M+1$ ,

а также  $\xi \in [0, \arcsin((1+M^2-\varepsilon^2)/(2M))]$  и  $|M-1| < \varepsilon < M+1$

$$R(\xi) = \int_{-\pi}^{x_1^{(0)}} dx \int_{M \sin(x-\xi) - \varepsilon/2}^{\sin x + \varepsilon/2} dy + \int_{x_1^{(0)}}^{x_1^{(1)}} dx \int_{\sin x - \varepsilon/2}^{M \sin(x-\xi) + \varepsilon/2} dy + \int_{x_1^{(1)}}^{\pi} dx \int_{M \sin(x-\xi) - \varepsilon/2}^{\sin x + \varepsilon/2} dy; \quad (7)$$

при  $\xi \in [0, \pi]$  и  $\varepsilon \leq |1-M|$ ,

при  $\xi = \pi$  и  $\varepsilon = M+1$ ,

а также  $\xi \in [\arccos((1+M^2-\varepsilon^2)/(2M)), \pi]$  и  $|M-1| < \varepsilon < M+1$

$$R(\xi) = 2 \left\{ \int_{x_2}^{x_1^{(1)}} dx \int_{\sin x - \varepsilon/2}^{M \sin(x-\xi) + \varepsilon/2} dy + \int_{x_1^{(1)}}^{x_3} dx \int_{M \sin(x-\xi) - \varepsilon/2}^{\sin x + \varepsilon/2} dy \right\}, \quad (8)$$

где  $x_1^{(n)}$ ,  $x_2, x_3$  — корни уравнений соответственно;

$$\sin x = M \sin(x - \xi); \quad x_1^{(n)} = -\varphi + \pi n; \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots;$$

$$\sin x - \varepsilon/2 = M \sin(x - \xi) + \varepsilon/2;$$

$$x_2 = -\varphi + \arcsin(\varepsilon / (1 + M^2 - 2 \cos \xi)^{1/2}) + \pi;$$

$$\sin x + \varepsilon/2 = M \sin(x - \xi) - \varepsilon/2;$$

$$x_3 = -\varphi - \arcsin(\varepsilon / (1 + M^2 - 2 \cos \xi)^{1/2}) + \pi,$$

причем  $\varphi = \arcsin M \sin \xi / (1 + M^2 - 2 \cos \xi)^{1/2}$ .

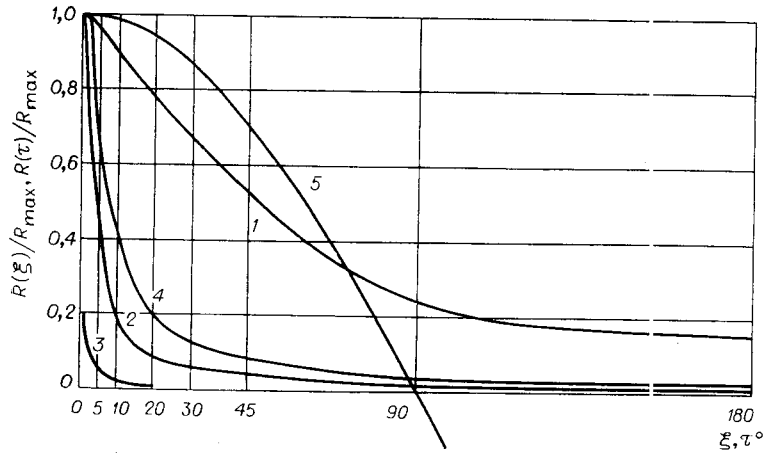


Рис. 1. Графики функций  $R(\xi)/R_{\max}$  и  $R(\tau)/R_{\max}$ :  
 кривая 1 —  $\varepsilon=A$ ,  $C=0$ ,  $M=1$ ; 2 —  $\varepsilon=0,1A$ ,  $C=0$ ,  $M=1$ ; 3 —  $\varepsilon=0,01A$ ,  $C=0$ ,  $M=1$ ;  
 4 —  $\sigma=0,1A$ ,  $C=0$ ,  $M=1$ ; 5 —  $R(\tau)/R_{\max}$ .

На рис. 1 приведены функции одномерной свертки  $R(\xi)/R_{\max}$  для случаев  $C=0$ ,  $M=1$  и  $\varepsilon=A$ ;  $\varepsilon=0,1A$ ;  $\varepsilon=0,001A$  ( $A$  — максимальная амплитуда отклонения середины трассы,  $R_{\max}$  — максимальное значение функции  $R(\xi)$ ), полученные на основании вычислений по формулам (1) — (6).

Для сигналограмм с распределением двумерного сигнала по нормальному закону функция корреляции  $R(\xi)$  может быть моделирована путем суммирования множества корреляционных моментов, вычисленных для сигналограмм с различной шириной трассы, взятых с «весами», зависящими от ширины трассы по нормальному закону, для каждого отдельного значения смещения  $\xi$ . Вычисление нормированных значений функции одномерной свертки  $R(\xi)/R_{\max}$  сигналограмм с распределением двумерного сигнала по нормальному закону с дисперсией  $\sigma=0,1A$  при аппроксимации шестью участками ( $\varepsilon=0,05\sigma$ ;  $\varepsilon=0,35\sigma$ ;  $\varepsilon=0,65\sigma$ ;  $\varepsilon=1,35\sigma$ ;  $\varepsilon=2,05\sigma$ ;  $\varepsilon=2,75\sigma$ ) дает значения, приведенные на рис. 1 (кривая 4).

Для сравнения на рис. 1 дана кривая 5, соответствующая нормированной функции свертки  $R(\tau)/R_{\max}$  одномерного сигнала  $f(t)=\sin t$ .

Кривые 1 и 2 (рис. 2) характеризуют поведение функций свертки  $R(\xi)/R_{\max}$  взаимно смещенных на величины  $C=0,05A$  и  $C=0,2A$  сиг-

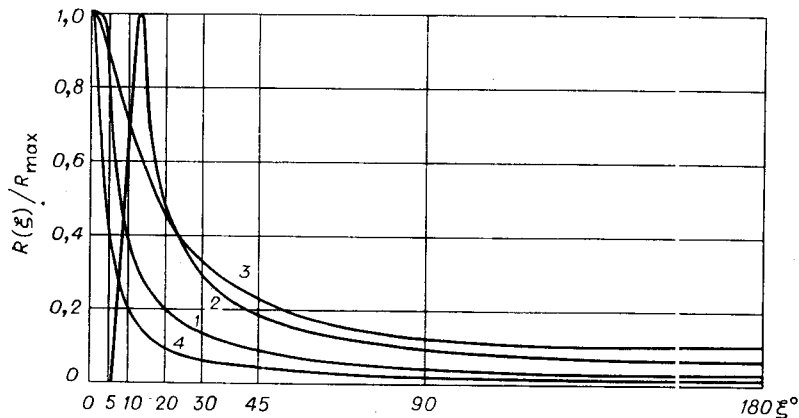


Рис. 2. Графики функций  $R(\xi)/R_{\max}$  для  $\varepsilon=0,1A$ :  
 кривая 1 —  $C=0,05A$ ,  $M=1$ ; 2 —  $C=0,2A$ ,  $M=1$ ; 3 —  $C=0$ ,  $M=1,2$ ; 4 —  $C=0$ ,  $M=1$ .

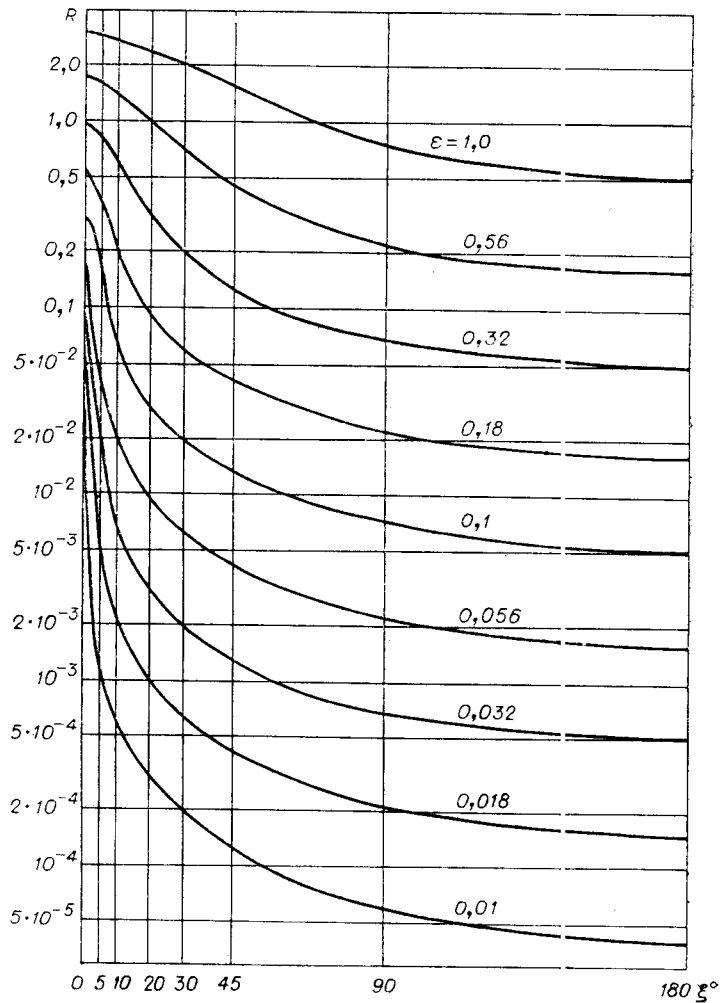


Рис. 3. Семейство кривых для определения оптимальной ширины трассы.

налограмм; кривая 3 характеризует функцию свертки  $R(\xi)/R_{\max}$  сигналограмм со взаимным масштабам  $M=1,2$ , кривая 4 соответствует случаю  $C=0$  и  $M=1$  (приведена для сравнения).

На рис. 3 приведено семейство ненормированных функций одномерной свертки  $R(\xi)$  в случае  $C=0$  и  $M=1$ , вычисленных для сигналограмм единичной амплитуды  $A=1$  на участке  $x \in [0, \pi]$  при ширине  $\epsilon$  трассы, равной 1,0; 0,56; 0,32; 0,18; 0,1; 0,056; 0,032; 0,018; 0,01.

На основании анализа рис. 3 возможен выбор оптимальной ширины  $\epsilon$  трассы сигналограммы. С одной стороны, уменьшение ширины трассы позволяет увеличить крутизну функции корреляции в области малых смещений  $\xi$ . С другой стороны, увеличение ширины трассы приводит к возрастанию отношения сигнал/шум. Оптимальная ширина  $\epsilon$  трассы может быть определена по кривым рис. 3 как минимальная ширина  $\epsilon$ , обеспечивающая заданное отношение сигнал/шум в заданной области изменения смещения  $\xi$  сигналограмм.

Анализ графиков позволяет сделать следующие выводы:

1. Корреляционный анализ сигналограмм, записанных методом широкой трассы, особенно эффективен для разделения близких по фор-

ме сигналов благодаря высокой крутизне фронтов функций свертки в области малых смещений по временной оси.

2. Максимальная крутизна фронтов функций свертки взаимно смещенных по оси амплитуд сигналограмм при прочих равных условиях выше, чем у несмещенных.

3. Смещенные по оси амплитуд сигналограммы имеют нулевое значение функций свертки при смещении, большем, чем ширина трассы.

4. Закон распределения двумерного сигнала по ширине трассы незначительно уменьшает крутизну фронта функции свертки сигналограмм, записанных методом широкой трассы.

5. Крутизна фронтов функций свертки сигналограмм неединичного масштаба незначительно меньше крутизны фронтов функций свертки сигналограмм единичного масштаба.

6. Координаты максимумов функций свертки смещенных по оси амплитуд сигналограмм не совпадают с координатами максимумов функций свертки несмещенных сигналограмм.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Иванченков В. П., Ковалев Г. Г., Кувшинов А. М. Анализ различных способов записей при корреляционной обработке измерительной информации.— Материалы семинара «Применение оптико-электронных приборов в контрольно-измерительной технике». М., изд. МДНТП им. Ф. Э. Дзержинского, 1976, с. 71—74.
2. Гаращенко В. П., Рябышкин Б. С., Афримзон А. Ф. Оптические корреляторы и их применение.— В кн.: Итоги исследований по кибернетике к 50-летию Советской власти. Томск, изд. Томского ун-та, 1968, с. 137—160.
3. Joseph W. Grouillette. Electronic curve follower and analog computer.— Пат. США, кл. 235—189, № 2980332, заявл. 26.10.1956, опубл. 18.04.61.
4. Миллер В. А., Куракин Л. А. Приемные электронно-лучевые трубки. М., «Энергия», 1971. 360 с.

*Поступила в редакцию 24 июня 1976 г.;  
окончательный вариант — 2 февраля 1977 г.*

УДК 62—503.5

**С. А. ВИКУЛИН, М. П. КРУЧЕК, Е. В. НОВОСЕЛОВ,  
О. Л. СОКОЛОВ, О. И. СУДАВНАЯ**  
(Ленинград)

#### ОБ ОЦЕНКЕ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖУЩЕГОСЯ ИСТОЧНИКА ЗВУКА

Оценка параметров движущегося источника звука является одной из актуальных задач прикладной радиотехники и акустики [1]. Для различных приложений известны общие принципы построения функций, описывающих поведение измеряемого объекта (сигнала, устройства и т. д.) [2, 3]. Здесь в отличие от результатов [2, 3] ставится цель не только оценить параметры движения источника, но и предсказать его положение в различные моменты времени, в частности момент сближения источника с приемником.

Введем обозначения:  $P^2(t_1) = P_1^2$ ,  $P^2(t_2) = P_2^2$ , ...,  $P^2(t_n) = P_n^2$  — значения квадрата звукового давления, измеренные в моменты времени  $t_1, t_2, \dots, t_n$ ;  $P^2(t)$  — квадрат звукового давления на входе приемника;  $P_{0п}^2$  — постоянный шумовой фон среды;  $P_{0с}^2(t)$  — квадрат звукового давления источника на единичном расстоянии от него.