

Н. С. ВИНОГРАДОВ, Ф. В. РОЖИН, О. С. ТОНАКАНОВ

## ПРОСТРАНСТВЕННАЯ КОРРЕЛЯЦИЯ ОДНОЙ МОДЕЛИ ДОННОЙ РЕВЕРБЕРАЦИИ ПРИ УЗКОПОЛОСНОМ СИГНАЛЕ И ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ОРИЕНТАЦИИ ПРИЕМНОЙ БАЗЫ

Приводятся результаты теоретического расчета пространственных функций корреляции донной реверберационной помехи на паре горизонтально разнесенных приемников. Приводятся пространственно-корреляционные функции для горизонтального разнесения ненаправленных приемников и для различных вариантов пространственной ориентации диполей относительно друг друга и относительно диаграммы направленности излучения. Расчеты показывают, что соответствующим выбором диаграмм направленности излучения и приема можно ослабить мешающее воздействие реверберационной помехи, обладающей свойствами, заложеными в теоретических ограничениях.

Вопросам пространственной корреляции морской реверберации посвящено достаточно большое количество работ, наиболее широкое исследование свойств ревербераций содержится в [1]. К данным работам в смысле постановки задачи близки исследования пространственных свойств собственных шумов моря, и в частности [2, 3].

В настоящем сообщении рассматривается теоретическая модель донной реверберации при узкополосной послылке. Переход к широкополосным сигналам требует дополнительного интегрирования по диапазону заданных частот. Одним из признаков, отличающих эхо-сигналы от реверберационной помехи, является разный вид их пространственно-корреляционных функций. При определенных предположениях относительно характера и расположения элементарных рассеивателей в пространстве корреляционные функции могут быть вычислены.

Теоретическое рассмотрение проводится при следующих предположениях.

Принята идеализированная диаграмма направленности излучения

$$R(\varphi) = \begin{cases} 1 & \text{при } \psi \geq \varphi \geq \psi \\ 0 & \text{при } \psi < \varphi < -\psi \end{cases} \quad (1)$$

Рассеиватели принимаются ненаправленными, статистически независимыми, равномерно заполняющими плоскость дна.

При коротком импульсном облучении в каждый момент времени рассеянные сигналы приходят в приемник от узкой полосы дна, сере-

дна которого характеризуется углом  $\theta$ , отсчитываемым от вертикали к дну. Тогда коэффициенты пространственной корреляции для реверберации при узкополосной посылке, воспринимаемой парой приемников, расположенных на расстоянии  $d$  на горизонтальной базе, перпендикулярной оси излучения, можно вычислить и представить в аналитическом виде формулой

$$\rho = \frac{\int_{-\psi}^{\psi} R_1(\varphi) R_2(\varphi) \cos(kd \sin \theta \sin \varphi) d\varphi}{\left( \int_{-\psi}^{\psi} R_1^2(\varphi) d\varphi \int_{-\psi}^{\psi} R_2^2(\varphi) d\varphi \right)^{1/2}}, \quad (2)$$

где  $R_1(\varphi)$  и  $R_2(\varphi)$  — характеристики направленности приемников,  $k$  — волновое число.

Рассмотрим следующие варианты характеристики направленности приемников:

1.  $R_1 = \cos(\varphi - \varphi_0)$ ,  $R_2 = \cos(\varphi + \varphi_0)$  — пара ортогональных дипольных приемников, оси которых повернуты на угол  $\varphi_0$  относительно оси излучения;

2.  $R_1 = \cos(\varphi - \varphi_0)$ ,  $R_2 = \sin(\varphi - \varphi_0)$  — пара дипольных приемников, развернутых симметрично относительно оси излучения;

3.  $R_1 = \cos(\varphi - \varphi_0)$ ,  $R_2 = \cos \varphi$  — один из приемников пары повернут на угол  $\varphi_0$  относительно оси излучения;

4.  $R_1 = R_2 = 1$  — пара ненаправленных приемников.

Расчеты по формуле (2) проводились на ЭВМ БЭСМ-4 для указанных вариантов диаграмм направленности приемников. Ниже будут рассмотрены полученные закономерности пространственной корреляции при различных  $kd$ , углах  $\theta$  и  $\varphi$ , а также различных углах облучения пространства  $\psi$ .

Для ненаправленных приемников возможно изменение трех параметров  $kd$ , азимутального углового облучения  $\psi$  и вертикального угла облучения дна  $\theta$ . На рис. 1 показана зависимость коэффициента корреляции  $\rho$  от  $kd$  для значения  $\theta = 60^\circ$ . Корреляционные функции имеют вид затухающих осцилляций и, как показывают расчеты, идентичны для разных  $\psi$ ; замечается уменьшение значения  $kd$  для первого нуля функции корреляции с ростом  $\theta$ . При рассмотрении удаленных участков дна ( $\theta \geq 60^\circ$ ) зависимость от угла  $\theta$  оказывается слабой. В функции азимутального угла облучения (угол пространственного размещения рассеивателей) коэффициент корреляции  $\rho$  имеет первый нуль при изотропном размещении рассеивателей ( $\psi/2 = 180^\circ$ ) и  $\theta = 60^\circ$  при  $kd = 0,9\pi$ . Волновой интервал корреляции растет с уменьшением  $\psi$ , достигая значения, близкого к  $2\pi$  при  $\psi = \pm 30^\circ$ . На рис. 1 дан вид корреляционных функций для дискретных значений углов облучения  $\psi$ . Здесь и далее на графиках указана полуширина облучения пространства  $\psi/2$ . Отметим, что при  $\psi = \pm 90$  и  $\pm 180^\circ$  нули корреляционных функций практически совпадают, отличие состоит в амплитудах последующих осцилляций.

Рассмотрим линейное разнесение дипольных приемников (характеристики направленности по отношению к оси излучения описываются функцией  $\cos \chi$ ). Вид корреляционных функций  $\rho$  при дискретных углах облучения ( $\psi = \pm 30 \div 180^\circ$ ) для двух направленных по оси излучения дипольных приемников показан на рис. 2 ( $\theta = 60^\circ$ ). Спад осцилляций более быстрый и первый нуль достигается при больших значениях  $kd$ , чем для ненаправленных приемников. Изменение угла поворота одного

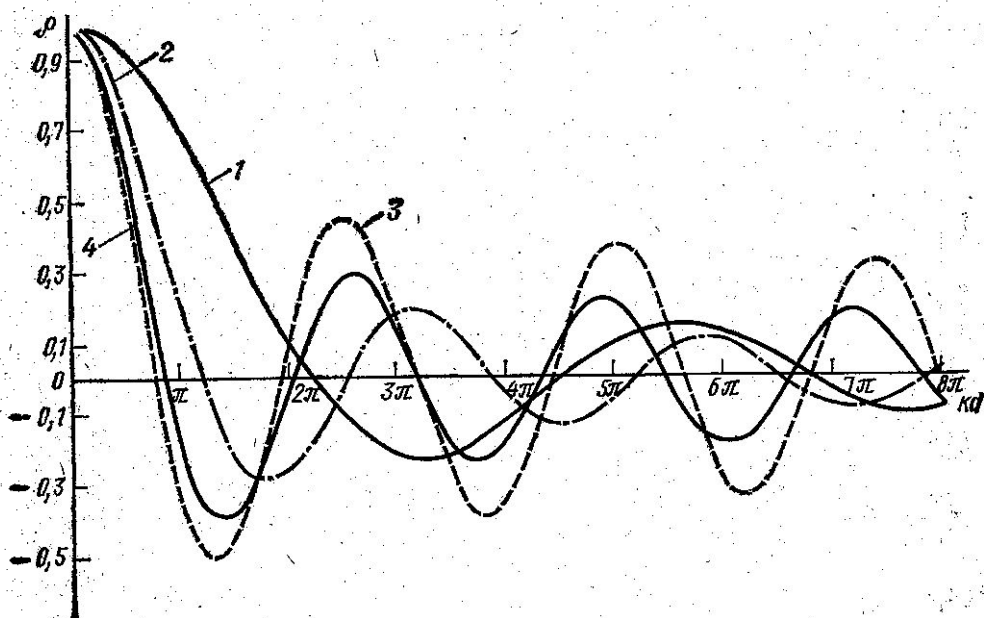


Рис. 1. Зависимость коэффициента корреляции  $\rho$  от  $kd$  для  $\theta=60^\circ$ . 1 —  $\Psi/2=30$ , 2 —  $\Psi/2=60$ , 3 —  $\Psi/2=120$ , 4 —  $\Psi/2=180^\circ$

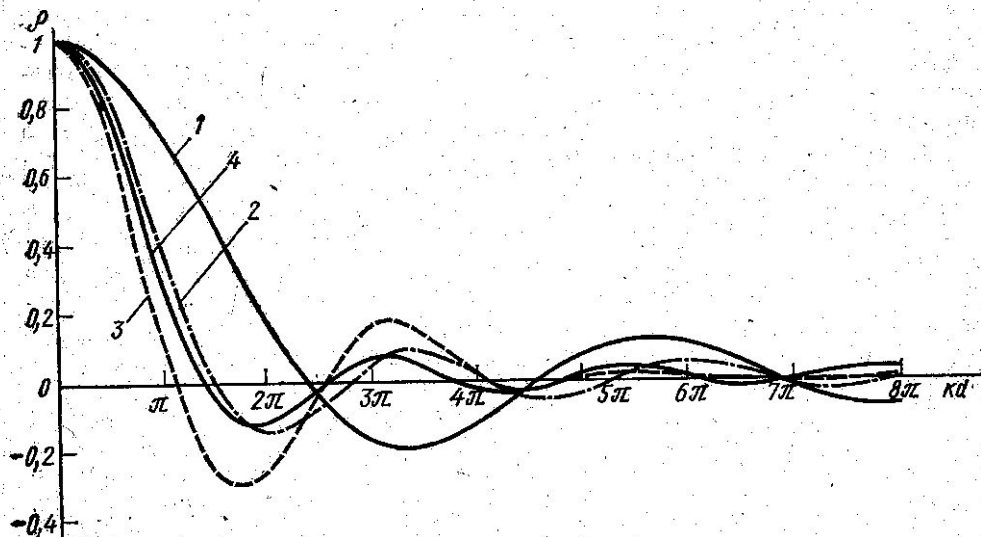


Рис. 2. Вид корреляционных функций  $\rho$  при различных дискретных углах облучения (кривая 3 при  $\Psi/2=150^\circ$ , остальные обозначения те же, что на рис. 1)

диполя относительно другого на угол  $\leq 45^\circ$ , как показывают расчеты, мало меняет вид корреляционных функций, практически не влияет на положение нулей и несколько уменьшает амплитуды последующих осцилляций. Картина существенно меняется при развороте диполей на  $90^\circ$  в разные стороны. Функции корреляции  $\rho$  приобретают сильно осциллирующий характер с малым затуханием при увеличении  $kd$ .

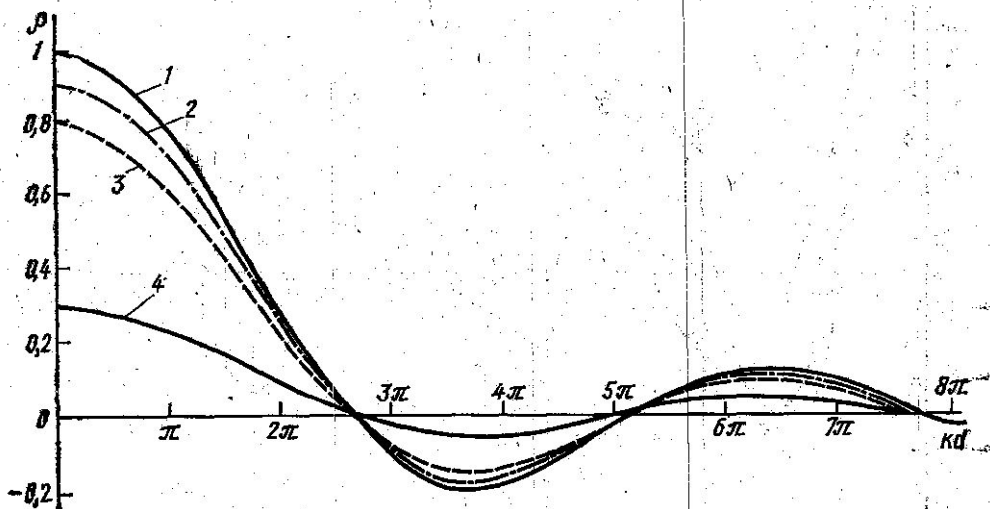


Рис. 3. Результаты расчета коэффициента корреляции  $\rho$  для различных углов: 1 —  $\varphi_0 = 10^\circ$ , 2 —  $\varphi_0 = 60^\circ$ , 3 —  $\varphi_0 = 70^\circ$ , 4 —  $\varphi_0 = 85^\circ$

Исследуем вид корреляционных функций для пары дипольных приемников при различной угловой ориентации друг относительно друга и направлении максимума диаграммы направленности одного из них по оси излучения. Для угла облучения в азимутальной плоскости  $\pm 26^\circ$ , угла  $\varphi = 60^\circ$  результаты расчета коэффициентов корреляции  $\rho$  в функции  $kd$  для различных углов  $\varphi_0$  между максимумами диаграмм направленности двух дипольных приемников показаны на рис. 3. Видно, что при соосном расположении диполей корреляция имеет максимальное значение при  $kd = 0$ ; при  $kd$ , отличном от нуля, корреляция определяется диаграммами излучения и приема. С увеличением угла  $\varphi$  между осями диаграмм направленности диполей корреляция падает и при  $\varphi_0 = 90^\circ$  она равна нулю при любых значениях  $kd$ . Таким образом, при симметричном расположении пары ортогональных приемников относительно оси излучения и направлении максимума диаграммы направленности одного из них по оси излучения при любых углах облучения пространства в азимутальной и вертикальной плоскостях корреляция на паре ортогональных диполей равна нулю. Это дает возможность избежать влияния реверберационной помехи при корреляционном приеме.

Пусть два дипольных приемника ориентированы так, что максимумы их направленности горизонтальны и совпадают с осью излучения. Далее приемники разворачиваются относительно оси излучения на одинаковый угол  $\varphi_0$  в противоположных направлениях. Угол  $\varphi_0$  изменяется в пределах  $0 \leq \varphi_0 \leq 90^\circ$ . Для предложенного случая при азимутальном угле облучения  $\varphi = \pm 26^\circ$  и  $\varphi = 60^\circ$  результаты расчета корреляционных функций реверберации в функции  $kd$  показаны на рис. 4 при различных углах разворота диполей  $\varphi_0$  относительно оси излучения. Корреляцион-

ные функции имеют вид затухающих осцилляций при достаточно сложной зависимости от угла  $\varphi_0$ , которая связана с взаимным расположением диаграмм направленности излучения и приема. С увеличением угла разворота  $\varphi_0$  начальная амплитуда коэффициента корреляции при  $kd=0$  уменьшается (в зависимости от  $kd$  функции сохраняют осциллирующий вид). При заданных диаграммах направленности приема и

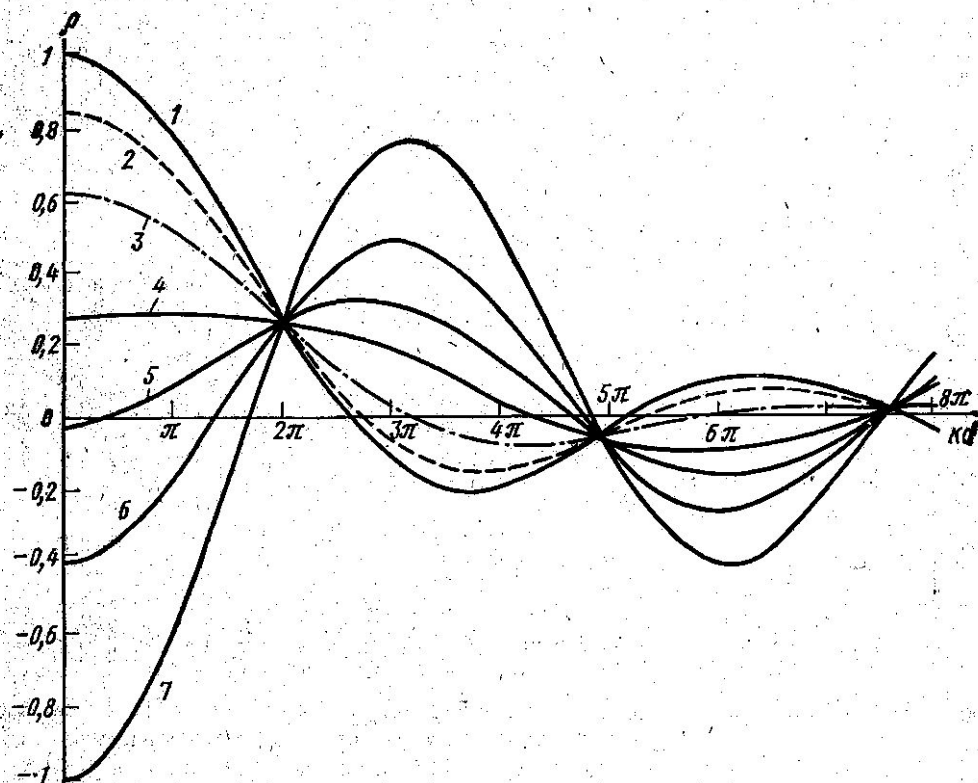


Рис. 4. Результаты расчета корреляционных функций ревербрации: 1 —  $\varphi_0=0$ , 2 —  $\varphi_0=45$ , 3 —  $\varphi_0=60$ , 4 —  $\varphi_0=70$ , 5 —  $\varphi_0=75$ , 6 —  $\varphi_0=80$ , 7 —  $\varphi_0=90^\circ$

излучения существует определенное значение угла  $\varphi_0$  (в рассматриваемом случае  $\varphi_0 \approx 75^\circ$ ), когда коэффициент корреляции по реверберационной помехе при  $kd=0$  также обращается в нуль. Этот факт важен, так как дает возможность защиты от мешающего действия реверберационной помехи при корреляционном приеме. Далее с ростом  $\varphi_0$  знак корреляции меняется и при  $\varphi_0=90^\circ$  коэффициент корреляции достигает значения  $-1$ . При отрицательных начальных значениях корреляции спад осцилляций медленнее в функции  $kd$ .

Рассмотрим пару ортогональных диполей при различной ориентации относительно оси излучения и при разных углах облучения пространства.

Расчеты показывают, что для ортогональной пары диполей, вращающихся относительно оси излучения на угол  $\varphi_0$ , коэффициенты корреляции  $\rho$  при изменении угла  $\varphi_0$  от  $45^\circ$  до  $0^\circ$  изменяются в функции  $kd$  как осциллирующие функции с большим затуханием, причем  $\rho$  имеет максимальное значение при  $\varphi_0=45^\circ$  и равна нулю при  $\varphi_0=0^\circ$ , так как в этом случае реализуется случай симметричного расположения диа-

грамм направленности каждого из диполей относительно оси излучения. При  $90^\circ > \varphi_0 > 45^\circ$  картина аналогична описанной выше и является зеркальным отображением относительно оси абсцисс коэффициентов корреляции  $\rho$  при  $0^\circ < \varphi_0 < 45^\circ$ .

Исследуем зависимость корреляции на ортогональной паре диполей при различном угле облучения пространства (разное угловое простран-

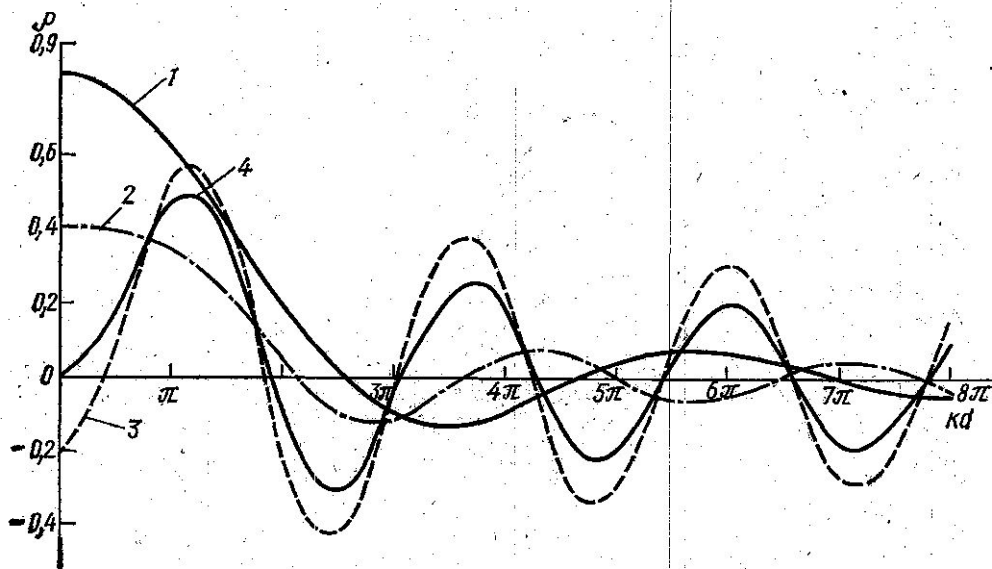


Рис. 5. Коэффициенты корреляции. Обозначения те же, что на рис. 1

ственное распределение рассеивателей). Пусть ортогональная пара развернута относительно оси облучения на угол  $45^\circ$ . На рис. 5 показаны коэффициенты корреляции в функции  $kd$  при  $\theta = 60^\circ$  и углах облучения  $\psi = \pm 30, 60, 150$  и  $180^\circ$ , т. е. от сектора в  $60^\circ$  до ненаправленного излучения. В силу симметрии диаграмм направленности приемников вид корреляционных функций при  $\psi/2 = 90$  и  $180^\circ$  идентичен, и на графиках нанесена одна кривая, которая имеет особенность при  $kd=0$ . В этой точке  $\rho=0$ , т. е. размещение ненаправленных отражателей можно считать изотропным, для которого на ортогональной паре корреляция называется равной нулю [3].

Все приведенные результаты расчета относятся к большим угловым размерам области распределения рассеивателей, что характерно для реверберационной помехи. Если представить себе малые угловые размеры пространства, где размещены рассеиватели, то это будет эквивалентно некоторым малым рассеивающим площадкам или объектам. При этом можно положить, что эти объекты имеют так же, как и дно отражающие свойства, т. е. некоррелированные отражатели ненаправленного типа. Представляется интересным сравнить корреляционные функции от рассеивателей, сосредоточенных в малом азимутальном угле, с рассмотренными выше (корреляционные функции отражающих площадок с малыми угловыми размерами — сосредоточенные отражатели с корреляционными функциями реверберационной помехи).

Расчет малых угловых размеров рассеивателей ( $2^\circ \leq \psi \leq 10^\circ$ ) для различных типов расположения дипольных приемников и для пары

ненаправленных приемников показал, что в данных случаях спад корреляционных функций слабеет с ростом  $kd$  и тем слабее, чем меньше угловые размеры отражателя. В качестве примера укажем, что при угловом размере области рассеяния, равном  $4^\circ$ , коэффициент корреляции спадает при  $kd=8$  до величины  $\rho=0,9$  как для пары ненаправленных приемников, так и для пары ортогональных дипольных приемников, развернутых в горизонтальной плоскости максимумами диаграмм направленности относительно направления на малый рассеиватель на угол  $45^\circ$  (в вертикальной плоскости угол  $\phi=60^\circ$ ).

Таким образом, теоретические расчеты показывают, что, выбирая соответствующим образом характеристики направленности приемников и их ориентацию в пространстве и варьируя угол облучения, можно добиться наилучшего соотношения между помехой и полезным отражением в случае корреляционной обработки поступающей информации.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ольшевский В. В. Статистические свойства морской реверберации. М., 1966.
2. Крон Б., Шерман Ч. В сб.: Некоторые проблемы обнаружения сигнала, маскируемого флюктуационной помехой. М., 1965, с. 114—128.
3. Захаров Л. Н., Киршов В. А., Рожин Ф. В. «Акустический журнал», 1972, 18, 49—52.

Поступила в редакцию  
2.3 1976 г.

Кафедра  
акустики