

УДК 621.371

## НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ ФЛУКТУАЦИЙ АМПЛИТУДЫ И УГЛОВ ПРИХОДА САНТИМЕТРОВЫХ И МИЛЛИМЕТРОВЫХ РАДИОВОЛН, РАСПРОСТРАНЯЮЩИХСЯ НАД МОРЕМ

*Л. М. Лобкова, Н. И. Мишарева, А. Г. Лукьянчук, А. И. Надобенко,  
В. П. Попов, В. П. Журавлев, А. В. Душенко, В. В. Стельмах,  
Л. И. Берхина*

Представлены результаты экспериментального исследования флуктуаций амплитуды и углов прихода радиоволн длиной 3,2 см и 8,6 мм на морской трассе протяженностью 9,6 км. В энергетических спектрах флуктуаций сигналов выявлены особенности, обусловленные влиянием неоднородностей атмосферы и взволнованной поверхности моря.

Энергетические спектры флуктуаций амплитуды и углов прихода радиоволн СВМ- и ММВ-диапазонов сравнительно полно исследованы как в теоретическом, так и в экспериментальном плане для случая распространения радиоволн в турбулентной атмосфере в пренебрежении влиянием подстилающей поверхности.

Значительно менее изучены указанные характеристики сигналов при распространении радиоволн над поверхностью моря; лишь в единичных работах [1-3] исследуются спектры флуктуаций сигнала, распространяющегося в прямом направлении. Однако исследования авторов [1-3] не охватывают многообразия гидрометеорологических условий на трассах, поэтому полученные результаты оказываются несопоставимыми и недостаточны для установления основных закономерностей в спектрах флуктуаций сигналов, обусловленных метеорологической обстановкой на трассе и состоянием морской поверхности.

Цель нашей работы состояла в восполнении указанного пробела. Следует заметить, что теория, позволяющая исследовать распространение радиоволн в столь сложных условиях, как морская трасса, в настоящее время не разработана. За теоретическую основу могут быть приняты, с одной стороны, результаты, обобщенные в монографии Басса и Фукса [4], где исследованы спектры сигналов, рассеянных на статистически неровной поверхности. С другой стороны, можно привлечь достижения из области распространения радиоволн в неоднородной атмосфере. Влияние этого фактора может оказаться существенным и на коротких трассах ввиду сложного строения атмосферы в приводном слое, наличия инверсий температуры и значительных градиентов показателя преломления, особенно в условиях теплых месяцев. Одна из задач наших исследований состояла в получении качественных оценок вклада различных физических процессов во флуктуации сигналов.

Для качественного описания процесса распространения радиоволн над морем воспользуемся приближенной двухлучевой моделью Введенского и представим поле  $E$  в месте приема как сумму полей  $E_1$  и  $E_2$ , соответствующих прямому и отраженному лучам.

Энергетический спектр флуктуаций поля может быть получен

фурье-преобразованием от корреляционной функции  $R(\tau)$ , которая, если предположить независимость процессов флуктуаций прямого и отраженного сигналов, определяется соотношением

$$R(\tau) = \overline{E_1(t)E_1^*(t+\tau)} + \overline{E_2(t)E_2^*(t+\tau)} = R_1(\tau) + R_2(\tau), \quad (1)$$

где  $R_1(\tau)$  и  $R_2(\tau)$  — соответственно временные корреляционные функции флуктуаций поля прямого и отраженного лучей. Черта сверху означает усреднение по времени. Обозначая через  $\Psi_A$  комплексную фазу поля, обусловленную влиянием тропосферы, а через  $\varphi_m$  — случайную фазу, связанную с воздействием взволнованной поверхности моря на отраженный сигнал, можем с точностью до постоянного коэффициента записать

$$R_2(\tau) = \overline{\exp\{j[\Psi_A(t) - \Psi_A(t+\tau)]\}} \overline{\exp\{j[\varphi_m(t) - \varphi_m(t+\tau)]\}}. \quad (2)$$

В результате статистического усреднения и фурье-преобразования (2) получим, что спектр отраженного луча представляет собой свертку составляющих энергетического спектра флуктуаций сигнала, связанных с процессами в тропосфере («тропосферная» компонента сигнала) и с волнением поверхности моря («морская» компонента). В случае, когда временной радиус корреляции «тропосферной» компоненты сигнала значительно превышает аналогичную величину для «морской» компоненты, форма результирующего спектра будет близка к энергетическому спектру флуктуации «морской» компоненты сигнала.

В процессе экспериментов были исследованы характеристики сигналов на волнах длиной 3,2 см ( $\lambda_1$ ) и 8,6 мм ( $\lambda_2$ ), распространявшихся над морем на трассе протяженностью 9,6 км, достаточно удаленной от береговой линии (минимальное удаление составляло 250—300 м на участке вблизи передающего пункта). Положение передающей антенны на волне  $\lambda_1$  можно было менять по высоте в пределах от 4 до 12 м над уровнем моря, на волне  $\lambda_2$  — от 4 до 8 м. Антенны двухканального приемника сантиметрового диапазона располагались на высотах 26 и 28 м, миллиметрового диапазона — на высотах 24 и 25 м над уровнем моря. Ширина диаграммы направленности по уровню половинной мощности в вертикальной плоскости составляла для передающих антенн 3°,3 ( $\lambda_1$ ) и 5°,5 ( $\lambda_2$ ), для приемных антенн 5° ( $\lambda_1$ ) и 5°,5 ( $\lambda_2$ ). Эксперименты выполнены при вертикальной поляризации.

Энергетические спектры флуктуаций амплитуды и углов прихода радиоволн рассчитывались методом преобразования Фурье от корреляционной функции случайного процесса с использованием фильтра скользящего среднего [5] и весовой функции Ханна [6]. Объем выборки составлял около 3000 отсчетов, максимальный сдвиг корреляционной функции был равен 120 отсчетам, при этом оценки спектральной плотности флуктуаций определялись с нормированной среднеквадратичной ошибкой около 20%. Продолжительность анализируемых реализаций менялась в пределах от 5 до 15 мин, что соответствовало нижней границе исследованных частот (0,02 ÷ 0,05) Гц, верхней границе — (2 ÷ 5) Гц.

Общий характер кривых спектральных плотностей флуктуаций амплитуды и углов прихода радиоволн длиной  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  близок к результатам других авторов, а именно: большая часть энергии флуктуаций сосредоточена в области, не превышающей 1 Гц [3]; в спектрах часто наблюдается несколько максимумов [1-3]; частотная зависимость спектральной плотности на спадающем участке кривой в большинстве случаев может быть аппроксимирована степенной функцией вида  $G \sim f^{-n}$ .

Величины  $n$ , определенные по данным наших экспериментов как средний наклон частотной зависимости спектральной плотности в логарифмическом масштабе по обеим осям, приведены в табл. 1.

Средние значения  $n$  для энергетических спектров флуктуаций сигналов

Длина волн, см	Вид флуктуаций	Количество проанализированных реализаций	$n$
3,2	амплитудные	133	2,60
3,2	углы прихода	112	2,57
0,86	амплитудные	68	2,21
0,86	углы прихода	68	2,47

Представленные в табл. 1 величины  $n$  близки к данным, полученным на чисто тропосферных трассах [7, 8], и превышают значения, приведенные в [2]. Примерно в 15% исследованных случаев получены спектры с  $n \geq 3$ , при этом регистрировалось наличие инверсных слоев на трассе по данным измерений в районе приемного и передающего пунктов. Возрастание  $n$  до 11/3 в условиях тропосферного волновода отмечено в [9]. Отмеченные особенности частотной зависимости спектральной плотности флуктуаций сигнала могут быть связаны с присутствием в сигнале чисто «тропосферной» компоненты.

Согласно работе [4], спектр флуктуаций принимаемого сигнала должен нести информацию о спектрах морского волнения. Для сравнения исследуемых спектров со спектрами морского волнения мы выделили в последних несколько характерных участков: (0,08 ÷ 0,12) Гц — начальный участок, где спектральная плотность либо незначительна по величине в случае ветрового волнения, либо может иметь максимум в случае волн зыби [10]; (0,13 ÷ 0,27) Гц — участок, в пределах которого находится главный максимум в спектре ветрового и смешанного волнения моря [10, 11]; (0,30 ÷ 0,50) Гц — участок, где возможно появление заметного максимума на начальном этапе развития волнения; (0,6 ÷ 1) Гц — высокочастотный участок ветрового волнения, где спектральная плотность сравнительно невелика. Взяв в качестве исходной величины наибольшее значение спектральной плотности  $G_k$  флуктуаций сигнала в пределах второго из указанных интервалов частот и пронормировав к нему наибольшие значения спектральных плотностей, определенные на остальных участках, мы получили возможность количественного сравнения формы спектров флуктуаций сигналов. Метод оценки формы спектров, использованный Бирдом [1], где сравнивается отношение частот, соответствующих спектральным плотностям на уровнях 0,1; 0,25 и 0,5 от мощности в главном максимуме спектра, не всегда можно было применить, так как в наших условиях, как и в работах [2, 3], частота главного максимума в спектре флуктуаций сигнала чаще всего оказывалась ниже частоты главного максимума в спектре морского волнения.

В табл. 2 приведены некоторые результаты расчетов относительных спектральных плотностей флуктуаций амплитуды сигналов. Через  $G_1$ ,  $G_2$  и  $G_3$  здесь обозначены нормированные к  $G_k$  наибольшие значения спектральных плотностей в пределах указанных выше первого, третьего и четвертого интервалов частот соответственно. Здесь же показана доля мощности флуктуаций  $W$ , приходящаяся в исследованных реализациях на интервал частот выше 0,08 Гц. Величины  $G_1$ ,  $G_2$ ,  $G_3$  и  $W$  получены усреднением по 5—15 реализациям, измеренным в сходных метеорологических условиях как в максимуме, так и в минимуме интерференционной картины поля. Нормированная среднеквадратичная ошибка расчета средних значений указанных величин составляла 20—30%.

Относительные формы спектров флуктуаций амплитуды радиоволны при различных метеорологических условиях

Дата измерения	Скорость ветра, м/с	Высота морской волны, м	Длина радиоволны, см	$G_1$	$G_2$	$G_3$	$W, \%$
20.2.1980	2-3	0,2-0,3	3,2	0,88	0,64	0,25	75
			0,86	1,00	0,70	0,34	74
14.3.1980	1-2	0,2	0,86	0,85	0,74	0,40	76
19.3.1980	0,5-1	0,1-0,2	3,2	0,81	0,53	0,39	73
(7+8).5.1979	0,5-1	0,1-0,2	3,2	2,1	0,29	0,10	12
			0,86	2,0	0,39	0,08	18
8.8.1979	2-3	0,2	0,86	2,1	0,50	0,10	15
16.2.1979	8-10	1,5	3,2	0,82	0,42	0,09	60
4.4.1979	8-17	2	0,86	1,8	0,35	0,08	68
23.8.1979	5-8	1	3,2	1,2	0,50	0,06	33
29.8.1979	7-9	1	3,2	1,1	0,45	0,15	41
"	"	1	0,86	2,0	0,41	0,12	61

Сравним результаты зимних и летних экспериментов при малой скорости ветра и слабом волнении моря. Как видно из табл. 2, в холодные месяцы свыше 70% мощности флуктуаций сигнала на волнах  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  сосредоточено в области частот, занимаемой спектрами морского волнения [10, 11], в то время как в теплые месяцы на эту область приходится около 15% мощности флуктуаций. Заметно отличаются и формы сравниваемых спектров: в холодные месяцы величина  $G_1$  значительно меньше, а величины  $G_2$  и  $G_3$  больше соответствующих величин, полученных в условиях теплых месяцев.

Для примера на рис. 1, 2 приведены образцы энергетических спектров флуктуаций амплитуды сигналов соответственно на волнах  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$

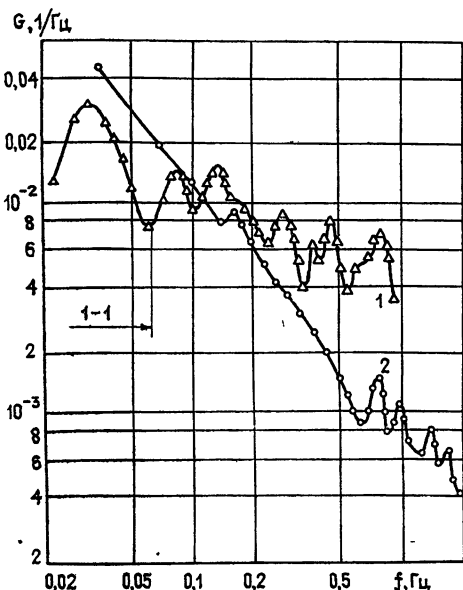


Рис. 1.

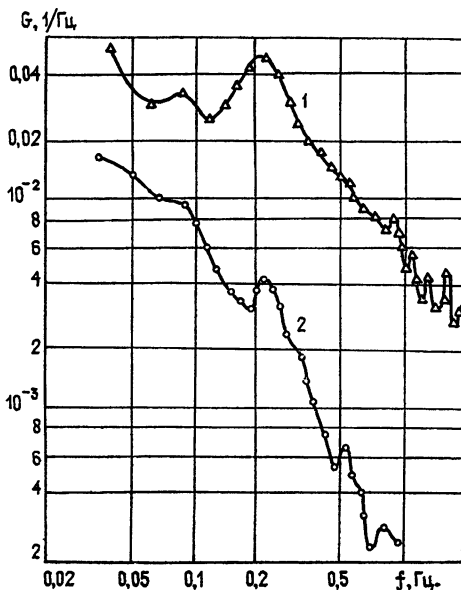


Рис. 2.

Рис. 1. Энергетические спектры флуктуаций амплитуды сигнала на волне  $\lambda_1$  за 19 марта 1980 г. (кривая 1) и за 7 мая 1979 г. (кривая 2); 1-1 — участок спектра, обусловленный влиянием тропосферы.

Рис. 2. Энергетические спектры флуктуаций амплитуды сигнала на волне  $\lambda_2$  за 20 февраля 1980 г. (кривая 1) и за 8 августа 1979 г. (кривая 2).

для холодного (кривые 1) и теплого (кривые 2) времени года при средней скорости ветра 1 м/с (рис. 1) и 2 м/с (рис. 2), для ветров юго-восточного (кривая 1, рис. 1), восточного (кривая 2, рис. 1) и северо-западного (кривые 1 и 2, рис. 2) направления. Спектральная плотность нормирована здесь к дисперсии амплитуды сигнала.

Грубые оценки показывают, что форма спектров в холодное время года в области частот выше  $\sim 0,07$  Гц близка к форме спектра слабого смешанного волнения моря [10]. Близость радиоспектра к спектру океанских волн для трассы протяженностью  $\sim 2$  км отмечал Бирд [1]

при выполнении условия  $\frac{h\Psi}{\lambda} \rightarrow 0$ , где  $h$  — высота морской волны,  $\Psi$  —

угол скольжения. Басс и Фукс показали, что при пологих неровностях и малых значениях параметра Рэлея спектр отраженного сигнала может содержать спектр колебаний отражающей поверхности [4], что справедливо в исследуемом диапазоне радиоволн.

Участок 1—1 (кривая 1, рис. 1), возможно, связан с «тропосферной» компонентой сигнала. С увеличением поперечной составляющей скорости ветра от 0,6 м/с (кривая 1, рис. 1) до 1,6 м/с (кривая 1, рис. 2) границы «тропосферной» и «морской» компоненты сигнала перекрываются ввиду расширения спектра «тропосферной» компоненты сигнала. Высказанное предположение подтверждается установленным расширением спектров флуктуаций сигналов, распространяющихся в турбулентной атмосфере, при увеличении поперечной составляющей скорости ветра [12].

Кривые 2 на рис. 1 и рис. 2 близки по форме к спектрам флуктуаций сигналов, распространяющихся на чисто тропосферных трассах [7, 8].

Отмеченные различия спектров флуктуаций сигналов, полученных в условиях теплого и холодного времени года при слабом волнении моря и малых скоростях ветра можно объяснить возрастающим влиянием инверсий температуры в приводном слое атмосферы в теплое время года. Глубокие замирания сигналов на морских трассах летом в тихую погоду отмечались неоднократно [13], что можно трактовать как преобладание «тропосферной» над «морской» компонентой сигнала в этих условиях.

Сравнение данных, относящихся к условиям холодных и теплых месяцев при умеренном и сильном ветре на трассе (табл. 2), показывает, что форма спектров флуктуаций сигнала практически одинакова, можно отметить лишь возрастание  $G_1$  как на волне  $\lambda_1$ , так и на  $\lambda_2$  в летних экспериментах.

Таблица 3

Относительная форма спектров флуктуаций амплитуды сигналов для случаев развивающегося волнения моря

Дата	Время	$v$ , м/с	НВ	$\lambda$ , см	$G_1$	$G_2$	$G_3$	$f_k$ , Гц
29.8.1979	17.10—17.20	8	СВ	3,2	1,5	0,90	0,17	0,25
	21.25—21.38	9	СВ	3,2	1,1	0,40	0,15	0,15
8.8.1979	5.10—5.21	1	СЗ	0,86	1,9	0,87	0,18	0,21
	7.27—7.44	1	СЗ	0,86	2,1	0,53	0,10	0,21
"	14.15—14.22	11	СЗ	0,86	2,3	0,30	0,05	0,15
	14.29—14.35	11	СЗ	0,86	2,4	0,32	0,11	0,14

Некоторые дополнительные выводы можно сделать, рассматривая изменение формы спектра флуктуаций сигнала по мере развития морского волнения. Соответствующие данные приведены в табл. 3, где по сравнению с табл. 2 дополнительно указано направление ветра (НВ)

и частота  $f_n$ , соответствующая положению максимума в спектре флуктуаций сигнала в пределах интервала 0,13—0,27 Гц.

Как видно из табл. 3, с развитием волнения моря уменьшается относительная интенсивность флуктуаций амплитуды сигнала в диапазоне 0,3—0,5 Гц и максимум в интервале 0,13—0,27 Гц смещается к нижней границе этого интервала. Оба отмеченных обстоятельства характерны для спектров развивающегося морского волнения [14], что позволяет предположить, что на нашей трассе в условиях умеренных скоростей ветра высокочастотный участок спектра флуктуаций радиосигналов на обеих волнах при частотах, превышающих  $\sim 0,2$  Гц, преимущественно связан с «морской» компонентой сигнала.

Отметим еще один факт, связанный с направлением ветра. Начальный этап развития ветрового волнения на нашей трассе при северо-восточном направлении ветра в большинстве случаев сопровождается появлением в спектрах флуктуаций амплитуды и углов прихода радиоволн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  максимума вблизи 0,25 Гц; для ветра северо-западного направления в этих условиях характерен максимум на частоте 0,21 Гц. Вероятно, это связано с ориентацией трассы (с З—ЮЗ на В—СВ) и с особенностями берегового рельефа, поскольку северо-западное направление соответствует условиям большего разгона волн, по сравнению с северо-восточным.

Низкочастотная область спектра флуктуаций сигналов до частот, не превышающих ориентировочно 0,05 Гц, в условиях умеренных скоростей ветра, вероятнее всего, сохраняет особенности, присущие «тропосферной» компоненте сигнала. В пользу этого говорит как отмеченное ранее возрастание спектральной плотности флуктуаций сигнала в области низких частот в условиях летних экспериментов (табл. 2), так и еще одно обстоятельство, связанное с положением главного максимума в спектрах флуктуаций сигналов. При анализе спектра флуктуаций скорости ветра, записанных в районе приемного пункта синхронно с записью флуктуаций амплитуды и углов прихода радиоволн  $\lambda_n$ , обнаружено совпадение главного максимума в спектре флуктуаций сигнала на частотах (0,03—0,06) Гц с максимумом в спектре флуктуаций скорости ветра (измерения выполнены при средней скорости ветра 13 м/с). В исследованиях на чисто тропосферных трассах отмечается, что флуктуации скорости ветра могут внести вклад в низкочастотную область спектра флуктуаций сигнала, распространяющегося в турбулентной атмосфере [15].

Форма спектра флуктуаций сигнала на участке от  $\sim 0,05$  до  $\sim 0,2$  Гц, вероятно, в наибольшей степени, по сравнению с другими участками, определяется формой свертки спектров «тропосферной» и «морской» компонент сигнала.

На основании анализа, выполненного в данной работе, можно сделать следующие выводы:

1. В спектрах флуктуаций амплитуды и углов прихода радиоволн длиной 3,2 см и 8,6 мм наблюдаются особенности, связанные с влиянием на сигнал в условиях эксперимента как состояния морской поверхности, так и состояния приводного слоя атмосферы.

2. На трассах протяженностью около 10 км оценка влияния состояния поверхности моря и атмосферы на флуктуации сигнала дала следующие результаты:

а) В условиях штилевой погоды флуктуации сигнала в холодные месяцы определяются преимущественно состоянием поверхности моря, в теплые месяцы — состоянием приводного слоя атмосферы.

б) В условиях умеренных скоростей ветра и при штормовой погоде можно предположить, что преимущественное влияние атмосферы сказывается до частот, не превышающих 0,05 Гц; влияние морского волнения становится определяющим на частотах выше  $\sim 0,2$  Гц.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Beard C. J.—IRE Trans. Ant. Propag., 1961, AP-9, № 9, p. 470.
2. Гонтарь И. Д., Дорфман Н. А., Тургенев И. С.—Изв. вузов — Радиофизика, 1973, 11, № 4, с. 502.
3. Балан М. Г., Горбач Н. В., Гутник В. Г., Кулемин Г. П., Мирошниченко Е. И., Педенко Ю. А., Разказовский В. Б. Тезисы докладов XII Всесоюзной конференции по распространению радиоволн.—М.: Наука, 1978, ч II, с. 218.
4. Басс Ф. Г., Фукс И. М. Рассеяние волн на статистически неровной поверхности.—М.: Наука, 1972.
5. Романенко А. Ф., Сергеев Г. А. Вопросы прикладного анализа случайных процессов.—М.: Сов. радио, 1968.
6. Бендат Дж., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов.—М.: Мир, 1974.
7. Бирд, Крейсс, Тэнк — ТИИЭР, 1969, 57, № 4, с. 83.
8. Thompson M. S., Harris D. J.—IEEE Trans. Aerospace and Electron System, 1970, 6, № 5, p. 645.
9. Сапогов С. А., Фукс И. М. Тезисы докладов XII Всесоюзной конференции по распространению радиоволн.—М.: Наука, 1978, ч. II, с. 40.
10. Давидан И. Н., Рожков В. А., Андреев Б. М., Лопатухин Л. И., Трапезников Ю. А. Вероятностные характеристики волнения, методы их анализа и расчета.—Л.: Гидрометеоздат, 1971.
11. Гарнакерьян А. А., Сосунов А. С. Радиолокация морской поверхности.—Ростов-на-Дону: Гос. ун-т, 1978.
12. Татарский В. И. Распространение волн в турбулентной атмосфере.—М.: Наука, 1967.
13. Beckman P., Spizzichino A. The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surface.—Oxford: Pergamon Press, 1963.
14. Пирсон В., Нейман Н., Джеймс Р.—В сб.: Ветровые волны.—М.: ИЛ, 1962, с. 253.
15. Lawrance R. S., Strobe J. W.—Proc. IEEE, 1970, 58, № 10, p. 1523.

Севастопольский приборостроительный институт

Поступила в редакцию  
11 ноября 1979 г.,  
после доработки  
11 июня 1980 г.

### SOME PECULIARITIES OF ENERGETIC SPECTRA OF AMPLITUDE AND ARRIVAL ANGLE FLUCTUATIONS OF cm AND mm WAVES PROPAGATING OVER THE SEA

*L. M. Lobkova, N. I. Mishareva, A. G. Luk'yanchuk, A. I. Nadobenko, V. P. Popov,  
V. P. Zhuravlev, A. V. Dushenko, V. V. Stel'makh, L. I. Berkhina*

Experimental results on radiowave amplitude and arrival angle fluctuations at the wavelength of 3.2 cm and 8.6 mm are given for the sea path of 9.6 km length. Some peculiarities of signal fluctuation energetic spectra are found out which are caused by atmosphere inhomogeneities and ruffled sea surface.

### ИНФОРМАЦИЯ О НОВЫХ КНИГАХ

Распространение волн и подводная акустика. /Под ред. Дж. Б. Келлера, Дж. С. Пападакиса. /Пер. с англ. Под ред. Л. М. Бреховских.—М.: Мир, 1980.—232 с.—2 р. 20 к.

Коллективная монография, написанная видными американскими специалистами (Келлером, Таппертом и др.), посвящена современным методам расчета звукового поля в океане. Подробно рассмотрен учет хаотических флуктуаций и горизонтальных неоднородностей среды. Излагаются различные приближенные методы вычисления звуковых полей.