АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 1996, том 42, № 2, с. 220 - 224

УДК 534

ФИЗИЧЕСКАЯ ПРИРОДА ШУМОВ АКУСТИЧЕСКИХ АНТЕНН В МЕЛКОМ МОРЕ

© 1996 г. В. А. Зверев

Институт прикладной физики РАН
603600 Н. Новгород, ул. Ульянова, 46

Поступила в редакцию 17.01.95 г.

Рассмотрен физический механизм формирования мультипликативного шума в антенне, учитывающий интерференционные эффекты. Показано, что этот механизм согласуется с результатами эксперимента. Этот шум влияет на возможность приема слабого сигнала на фоне сильного даже в том случае, когда эти сигналы разнесены по углу столь существенно, что антенна позволяет полностью отстроиться от сильного сигнала при приеме слабого.

Особенностям работы горизонтальных акустических антенн в мелком море и в береговом клине посвящен ряд работ (см., например, [1] и указанную там литературу). В этих работах исследованы вопросы влияния сложного модового состава акустического поля на работу горизонтальной антенны. Показано, что отклик антенны, фазируемой с помощью компенсатора или с помощью пространственного частотного анализа, работающей в мелком море или в береговом клине обладает сложным многолепестковым откликом на сигнал в виде одной плоской волны. Это явление, несмотря на сложный характер наблюдаемого или прогнозируемого отклика, поддается расчету при заданных параметрах границ волновода. В принципе, на основе отклика горизонтальной антенны на плоскую волну с заданными параметрами можно было бы решать и обратную задачу об определении характеристик волновода по измеренному отклику антенны. Это явление, рассмотренное в [1] и других работах, мы в силу его принципиальной предсказуемости не рассматриваем как шум антенны. Многолепесткового отклика антенны на плоскую волну, вызванного сложной модовой структурой поля, можно избежать путем ориентации антенны вдоль фронта плоской волны. Шумом антенны мы называем те отклонения фаз и амплитуд фиксируемых антенной сигналов от их значений в поле плоской волны, падающей на антенну, которые не поддаются расчету и не могут быть устранены ни путем специальной ориентации антенны, ни путем некоторой специальной калибровки и последующей корректировки. В этой статье показано, что при работе акустической горизонтальной антенны в мелком море, такой шум удается наблюдать. В качестве основной причины появления антенного шума в статье рассматривается неоднородность параметров волновода вдоль и поперек трассы распространения сигнала, принимаемого антенной. В [2] рассмотрен акустический шум, возникающий вследствие вариаций интерференционной картины. Здесь предлагается аналогичный физический механизм для объяснения физической природы шумов, возникающих в протяженных горизонтальных акустических антеннах, устанавливаемых в мелком море. Развиваемые соображения возникли при анализе экспериментальных данных, полученных с помощью такой антенны.

Речь идет об эксперименте, ряд итогов которого изложен в [3]. Опыт проведен в Балтийском море. Гибкая горизонтальная антенна нейтральной плавучести, содержащая 64 приемных элемента, отстоящих друг от друга на $\lambda/2$ (λ – длина волны), была растянута на глубине 20 метров при глубине моря около 70 метров. На расстоянии около 10 км от места расположения антенны на дне моря был установлен мощный излучатель, работающий в диапазоне 250 Гц. В обсуждаемом опыте излучатель работал в непрерывном режиме, излучая монохроматический сигнал мощностью порядка 1000 ватт. Отклик антенны на сигнал излучателя приведен в [3]. Расстояние до излучателя, λ и размер антенны таковы, что поле излучателя в свободном пространстве (без учета волновода и неоднородностей среды) должно представлять собой плоскую волну. В опыте отклик антенны выглядит таким только до уровня, который примерно на 20 дб лежит ниже максимума, представляющего собой отклик на излучатель. Начиная с уровня –20 дб наблюдаются существенные отклонения от отклика на плоскую волну, которые мы и называем шумом антенны. В [3] показано, что этот шум не может быть следствием рассеяния акустического сигнала на неоднородностях среды. Возникают вопросы, что же это за шум, какова его физическая природа, можно ли от него каким-то способом избавиться и т.п. Эти вопросы обсуждаются ниже.

Прежде, чем строить какие либо гипотезы, обратим внимание на параметры наблюдающегося шума. В [3] показано, что этот шум имеет слабо спадающий спектр к высоким пространственным частотам и простирается вплоть до частот, соответствующих углам приема излучения, составляющим угол 90 градусов относительно нормали к антенне. Приведем здесь картину шума, дополняющую приведенную в [3]. На рис. 1 и 2 дано распределение фазы вдоль антенны. Картина распределения фаз дана для непрерывного распределения фазы без скачков, обусловленных периодичностью функции $\exp(i\varphi)$ где φ – фаза. На рис. 1 дано распределение фазы таким, каким оно было в опыте. Наклон линии фазы обусловлен тем, что излучатель располагался под некоторым углом к антенне. На рис. 2 этот наклон убран путем вычитания прямой линии. На этом рисунке приведены распределения фазы для трех близких моментов времени.

Приведенные на рис. 2 распределения фаз вдоль антенны отличаются от прямой линии. Эти отличия, если их нельзя устранить с помощью какой-либо регулярной процедуры, являются источниками шумов антенны. Под шумом антенны мы понимаем наличие таких максимумов в угловом отклике антенны на сигнал достаточно удаленного источника, которому не соответствуют ни боковые лепестки отклика на этот источник, ни реально рассеянное в среде поле этого источника.

Перейдем к гипотезам о физической природе шумов. Наблюдаемые фазовые отклонения могут происходить не только в акустическом сигнале, принимаемом антенной, а быть результатом фазового разброса в устройствах съема информации. В данном случае это не может являться исчерпывающим объяснением наблюдаемого эффекта, так как сквозная система съема информации при изготовлении этой антенны была тщательно проверена и отрегулирована, и разброс фаз между элементами антенны не может превышать 0.05 радиан, причем эта величина не может изменяться со временем. Наблюдаемая величина фазовых отклонений флуктуирует и существенно превышает 0.05 радиан. Поэтому их причину следует искать в принимаемом акустическом сигнале.

Для этого обратимся к [2]. Там в качестве источника наблюдаемых флуктуаций была рассмотрена изменчивость интерференционной картины. В данном случае существует источник акустических шумов, подобный рассмотренному в [2]. Антенна может быть растянута под водой строго горизонтально и представлять собой идеальную прямую линию. Однако, интерференционная структура сигнала, который считывает антенна, может быть искривленной по отношению к морской поверхности и ее положение может со временем изменяться [2].

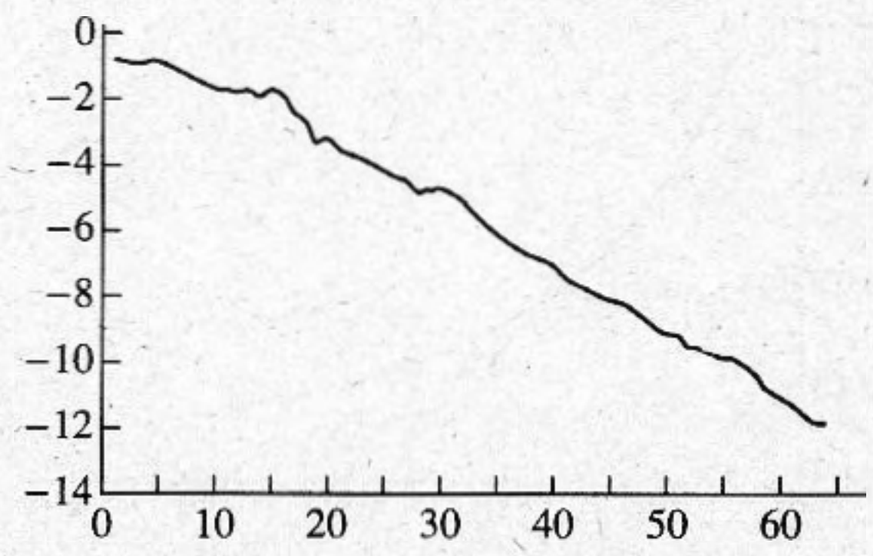

Рис. 1. Распределение фазы вдоль антенны в том виде, каким оно было в опыте. По оси абсцисс отложен номер приемного элемента антенны, а по оси ординат значения фазы в радианах.

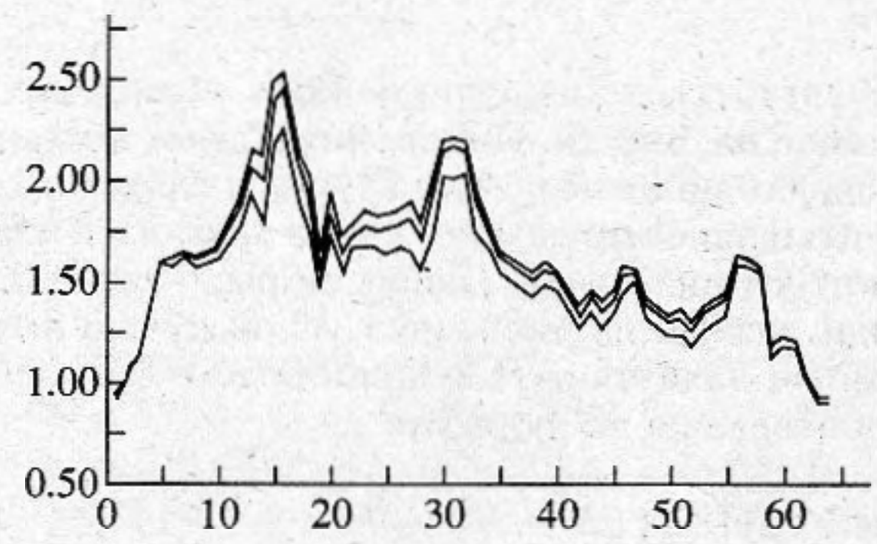

Рис. 2. Распределение фазы вдоль антенны после вычитания прямой линии, наклон которой определяет направление фазового фронта волны, приходящей от излучателя. Все остальное соответствует рис. 1. Показаны распределения фазы для трех близких моментов времени.

Приведем соответствующие оценки возможных отклонений фазы в антенне. Упростим задачу так, чтобы стало возможным получение оценок в таком сложном случае, каким является распространение сигнала в трехмерном волноводе. Это можно сделать, так как нам нужны грубые оценки возможных величин изменения фазы. Однако, и это достаточно сложная задача. Ее мы чрезвычайно упростим тем, что учтем не все изменения фазы, которые могут происходить на протяженной трассе, а только те, которые происходят вблизи антенны в результате интерференции прямого сигнала и одного ближайшего к антенне отражения от дна моря. При этом учтем только одну возможность вариации параметров, а именно изменение глубины моря. Тем самым мы уменьшим и, вероятно, даже существенно, оценки изменений фазы. Однако, если мы получим и в этом случае оценки, согласующиеся с экспериментом, то это покажет, что рассматриваемый нами механизм возникновения шумов в антенне может иметь место.

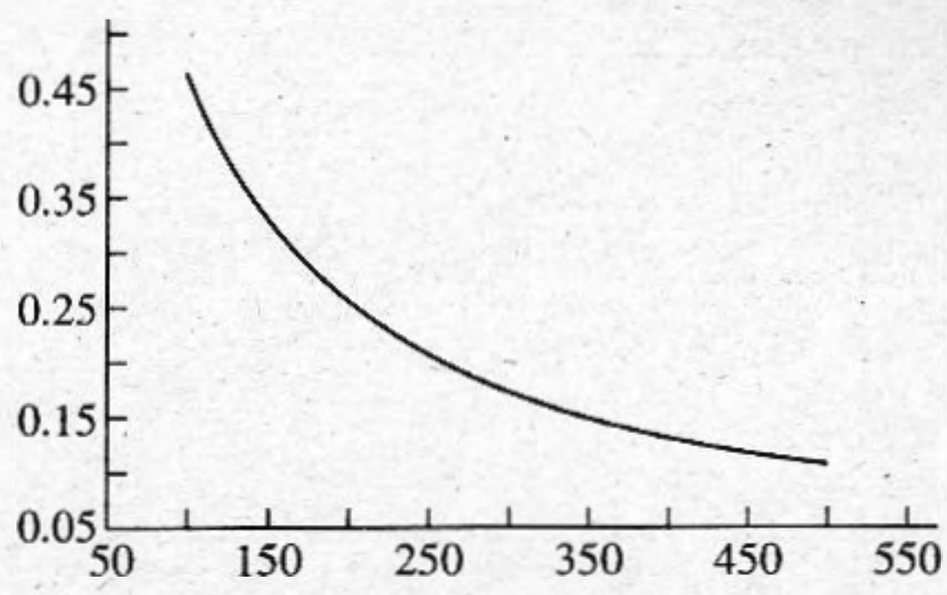

Рис. 3. Изменения фазы в радианах между прямым лучом и лучем, отраженным от дна при изменении глубины моря на один метр. Расстояние до точки отражения отложено вдоль оси абсцисс. Этот же график показывает угол, под которым сигнал отраженный от дна приходит к антенне.

Результаты таких упрощенных оценок представлены на рис. 3. Изменения фазы, которые происходят при изменении глубины моря на 1 м, рассчитывались по разности хода прямого и отраженного от дна лучей. Диапазон расстояний был выбран, исходя из диапазона углов лучей, которые могут захватываться волноводом. Эти оценки произведены по формуле

$$\Delta\varphi = 2\Pi/\lambda\,[\sqrt{R^2+H^2} - \sqrt{R^2+(H-1)^2}], \qquad (1)$$

где R – величина проекции вектора, проведенного от антенны к точке отражения от дна, на направление прямого луча, выраженная в метрах, H – расстояние в метрах от антенны до дна, λ – длина волны в метрах.

По поводу выбора диапазона углов следует сделать такое замечание. В мелком море волноводом захватываются лучи с широким спектром углов, однако, лучи с крутыми углами быстро затухают и остаются только те лучи, которые отражаются от дна под малыми углами. Однако, рассеяние на поверхности моря и дне непрерывно приводит к появлению лучей с крутыми углами и это оправдывает сделанный нами выбор диапазона углов. Кстати, приведенный график рис. 3 одновременно показывает и выраженные в радианах углы, под которыми приходят учитываемые нами лучи, отраженные от дна.

На основании формулы

$$R_f = (R\lambda)^{1/2} \qquad (2)$$

может быть определен размер зоны Френеля для точки отражения. Размер зоны Френеля является существенным параметром при тех оценках, которые мы делаем. Дело в том, что изменения фазы, определяемые формулой (1), справедливы для отражения от бесконечной плоскости и могут быть использованы для оценок фазы для неровностей дна вдоль антенны только для неровностей таких горизонтальных размеров, которые имеют порядок зоны Френеля или больше нее. В нашем случае важно то, что размер зоны Френеля в диапазоне изменения R составляет 8 - 18 полуволн, что существенно меньше длины антенны, равной 64 полуволнам, и это позволяет нам использовать оценки, полученные по формуле (1) для отражений от участков дна, смещенных вдоль антенны.

Учитывая результаты оценок, приведенные на рис. 3, и то, что мы не учли еще целый ряд факторов, которые могут привести как к увеличению фазовых изменений, так и к сокращению их масштаба, можно сделать вывод о том, что наблюдаемые шумы могут иметь ту физическую причину, которую мы рассматриваем. Увеличить значения наблюдаемых изменений фазы и сократить их пространственные масштабы может не только то, что глубина моря изменяется более, чем на метр, а, главным образом, возможность быстрого изменения фазы вблизи интерференционного минимума.

Наглядный вид антенного шума на рис. 2 вызывает соблазн и надежду на возможность устранения этого шума путем какой-то специальной обработки фазового распределения. Некоторые результаты такого исследования приведены на рис. 4. На этом рисунке сплошной линией представлен Фурье спектр шума, а пунктирными линиями тот же спектр, но после некоторой обработки фазового распределения. Мелким пунктиром показан спектр после сглаживания фазового распределения путем устранения из него самых низких частот. При этом диапазон изменений фазы сократился почти втрое, за счет того, что из фазового распределения была устранена его общая выпуклость, зависящая от времени. Эта выпуклость фазового распределения может иметь иную физическую трактовку, – это, возможно, изгиб гибкой антенны под влиянием течения. Крупным пунктиром показан результат устранения оставшихся после фильтрации наибольших выбросов фазы, превышающих 0.2 радиана. С этой целью были отключены 8 приемных элементов, в которых наблюдались наибольшие фазовые отклонения.

Как следует из рис. 4, все изменения уровня наблюдаемого шума, связанные с перечисленными выше операциями, проявляются на низких частотах, где уровень шума может быть снижен примерно на 10 дб. Однако, такое снижение не столь эффективно, так как при сглаживании уменьшается и уровень сигналов, принимаемых антенной с направлений, соответствующих этим частотам. Уровень шумов антенны во всех случаях не опускается ниже, оставаясь на уровне примерно – 30 дб по отношению к величине отклика антенны на излучатель.

Обратим внимание на значение рассматриваемого физического механизма шумов антенны.

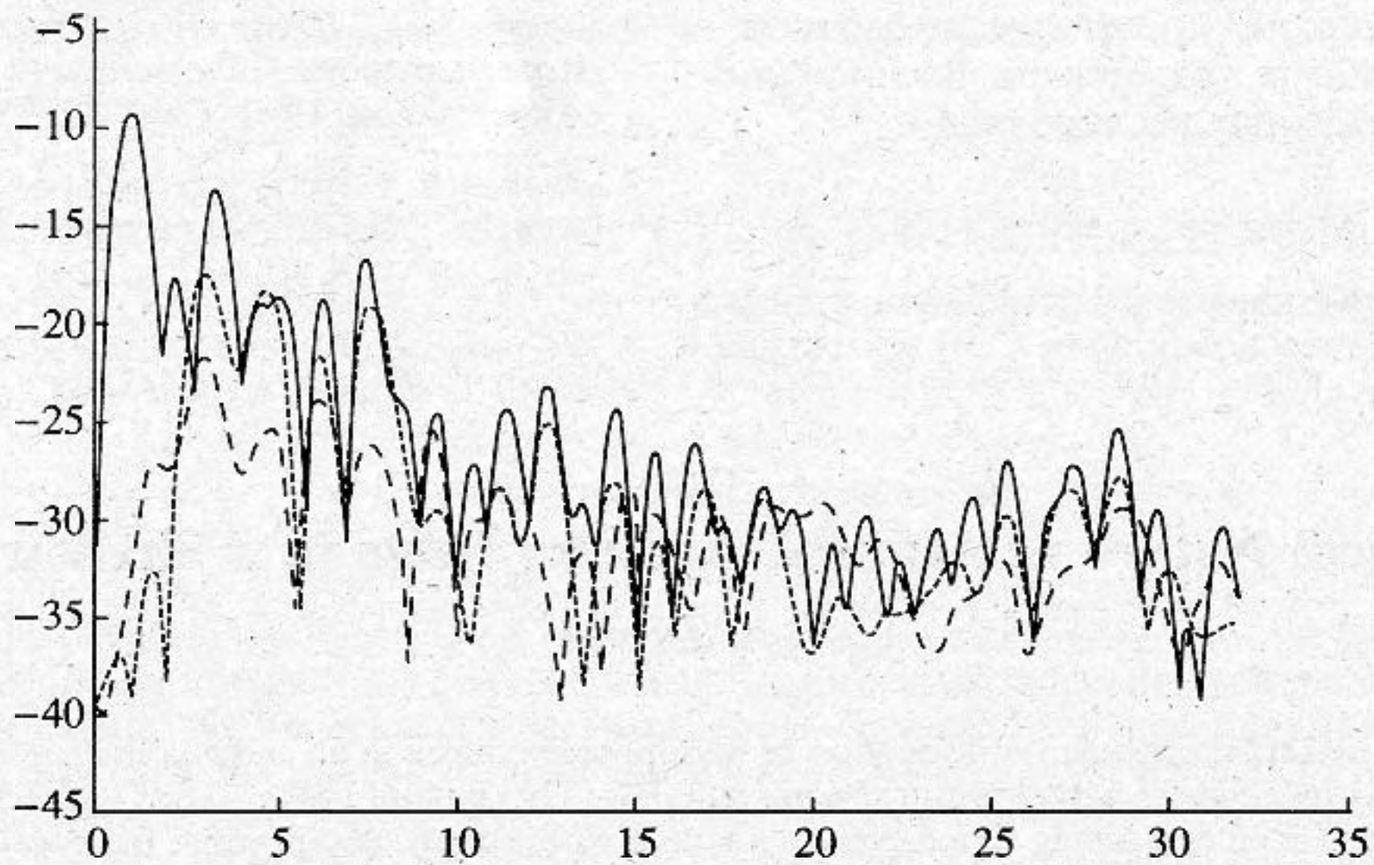

Рис. 4. Пространственный спектр распределения фазы на антенне в децибеллах к уровню сигнала излучателя, принимаемого антенной, в единицах разрешающей способности антенны (ширинах бокового лепестка). Сплошной линией показан спектр фазы, изображенной на рис. 2, мелким пунктиром – после фильтрации низких частот, а крупным пунктиром – после исключения выбросов фазы, превышающих 0.2 радиана.

При работе антенны в пассивном режиме по обнаружению слабых сигналов этот шум может быть абсолютно несущественным, а может стать такой сильной помехой, с которой нельзя не считаться. Этот шум, в отличие от обычно рассматриваемых акустических шумов, не аддитивен, а мультипликативен, т.е. он умножается на принимаемый сигнал. Его уровень в рассматриваемом нами случае, как видно из рис. 4, редко опускается ниже – 30 дб от уровня любого сигнала. Если акустическая антенна принимает сигналы, уровень которых превышает уровень естественных шумов моря, не более чем на 10 - 20 дб то мультипликативная помеха такого уровня не оказывает влияния на прием сигнала, и рассматриваемый нами механизм себя не проявляет. Но представим себе теперь, что наряду с теми слабыми сигналами, которые нас интересуют, в районе расположения антенны есть, хотя бы один сильный сигнал, пусть даже отстоящий от обнаруживаемого сигнала так далеко по углу, что он не должен являться для него помехой. Пусть уровень сильного сигнала таков, что он превышает интересующий нас сигнал более, чем на 30 дб. Антенна должной протяженности при соответствующей технике фазирования сигналов вполне в состоянии отстроиться от такой помехи. Такая возможность продемонстрирована в [4] с помощью математического моделирования. Там показано, что помеха с уровнем даже в 90 - 80 дб не мешает приему слабого сигнала, если он достаточно удален по углу. Однако, это только в том случае, когда мультипликативная помеха отсутствует. В результате действия мультипликативной помехи от сильного сигнала образуется шум, который в состоянии закрыть весь акустический горизонт в пределах обзора антенны до уровня – 30 дб от уровня сильного сигнала, что исключит возможность принять более слабый сигнал даже в том случае, когда в соответствии с теоретическими оценками, учитывающими уровни шумов, сигналов и возможности антенны, этот сигнал должен быть обязательно хорошо виден. Таким образом, в условиях большой неоднородности по уровням принимаемых сигналов рассматриваемую помеху нельзя не учитывать и борьба с ней выдвигается на первый план даже при обычном пассивном приеме акустических сигналов протяженной горизонтальной антенной.

Физическая природа обсуждаемого акустического шума, действующего в виде мультипликативной помехи, важна для того чтобы наметить эффективные меры для устранения этой помехи. Уже то обстоятельство, что этот шум имеет в своей основе регулярную интерференционную структуру, показывает, что с ним можно эффективно бороться. Некоторые меры можно указать сразу. Например, для уменьшения таких шумов не следует располагать антенну вблизи интерференционных минимумов. Можно в качестве элементов горизонтальной антенны использовать вертикальные антенны. Это позволит даже при простейшей обработке сигналов в вертикальном направлении, состоящей в усреднении, снизить уровень мультипликативных шумов, так как усредненная интерференционная структура не может иметь больших пространственных градиентов.

Автор благодарен Б.М. Салину, В.И. Турчину, И.Ш. Фиксу и другим сотрудникам ИПФ РАН, поставившим эксперимент, за его постановку,

помощь в обработке результатов и плодотворную дискуссию. Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Елисеевнин В.А.* Отклик горизонтальной линейной антенны в береговом клине. // Акуст. журн. 1991. Т. 37. № 6. С. 1148 - 1155.
2. *Зверев В.А., Лазарев В.А., Фокин В.Н., Шаронов Г.А.* Когерентность акустических волн в океане. // Акуст. журн. 1993. Т. 39. № 5. С. 834 - 840.
3. *Зверев В.А.* Исследование рассеяния акустических волн в присутствии интенсивных помех. // Акуст. журн. 1994. Т. 40. № 2. С. 253 - 256.
4. *Зверев В.А.* Антенна темного поля. // Акуст. журн. 1994. Т. 40. № 3. С. 401 - 404.

Physical Nature of Acoustic Antenna Noise in a Shallow Sea

V. A. Zverev

We consider a physical mechanism of formation of multiplicative noise in an antenna that allows for interference effects. This mechanism agrees with experimental data. This type of noise affects the reception of weak signal in the background of a strong signal even in a setting where these signals arrive from well-separated angles and the array can be tuned away from the strong signal.