АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2003, том 49, № 1, с. 71–76

УДК 534

Посвящается другу и соратнику Л.М. Лямшеву

КАЧЕСТВЕННОЕ ОТЛИЧИЕ СИГНАЛА ОТ ПОВЕРХНОСТНОЙ РЕВЕРБЕРАЦИИ ПРИ КОГЕРЕНТНОМ НАКОПЛЕНИИ ИМПУЛЬСОВ АКТИВНОЙ ЛОКАЦИИ

© 2003 г. В. А. Зверев, П. И. Коротин

Институт прикладной физики РАН
603600 Нижний Новгород, ул. Ульянова 46
E-mail: zverev@hydro.appl.sci-nnov.ru

Поступила в редакцию 14.12.2001 г.

Показано, что внешне неотличимые по форме и уровню импульсы, отраженные от двигающейся дискретной цели (сигнал) и обусловленные рассеянием на взволнованной водной поверхности (поверхностная реверберация), имеют качественное отличие, проявляющееся в процессе их когерентного накопления. Сигнал и поверхностная реверберация по-разному нарастают по мере роста интервала их когерентного сложения. Количественно эта разница состоит в том, что сигнал обладает существенно меньшей дисперсией отклонений от линейного закона возрастания, чем реверберация. Эффект наблюдался в натурном эксперименте и моделировался численно.

Основной помехой активной локации, от которой нельзя уйти путем увеличения мощности посылаемого в среду зондирующего импульса, является реверберация. Донную реверберацию удается существенно ослабить в том случае, если искомая цель движется так, что имеется доплеровское смещение в отраженном сигнале. Смещение частоты отраженного сигнала, получающееся благодаря движению цели, является качественным отличием принимаемого сигнала от донной реверберации. Для того, чтобы воспользоваться этой возможностью, достаточно применить так называемое чересперiодное вычитание, широко применяемое в радиолокации для тех же целей [1]. Чересперiодное вычитание обладает частотной характеристикой, исключающей нулевую доплеровскую частоту, что существенно ослабляет примыкающие к нулю частоты и вклад донной реверберации. Возникает возможность наблюдения целей, имеющих уровень поля рассеяния намного ниже уровня донной реверберации [2–4].

В случае поверхностной реверберации, которая обладает спектром в том же диапазоне, что и доплеровское смещение частоты полезного сигнала, чересперiодная обработка сигнала становится малоэффективной. Эффективность удается поднять применением когерентного накопления принятых импульсов. Когерентное накопление импульсов заключается в спектральном Фурье-анализе ряда из выборок в импульсной последовательности, имеющих одинаковое запаздывание относительно импульса посылки (сигналы одной дальности). Спектр такой последовательности является разложением по частотам доплеровского смещения (ЧДС) сигнала. В случае равномерного движения дискретной цели в течение всего интервала спектрального разложения спектр ее ЧДС является дискретным. Если движение поверхности являлось бы абсолютно хаотичным, то спектр ЧДС был бы сплошным. Тогда когерентное накопление приводило бы к выигрышу в отношении сигнал/реверберация такому же, который получается при спектральном выделении сигнала дискретной частоты на фоне шума, имеющего сплошной спектр. В действительности движение поверхности не является абсолютно хаотичным. Оно обладает спектром, в котором реально присутствуют весьма узкие максимумы. Чтобы это обстоятельство существенно снижало выигрыш, достигаемый за счет когерентного накопления, совсем необязательно, чтобы эти участки приходились бы точно на ЧДС сигнала. В общем случае ни дальность, ни скорость движения объекта локации заранее неизвестна. Поэтому, заметив какой-то сигнал, обладающий узким спектром ЧДС, как правило, нельзя считать, что это отраженный от объекта сигнал, а не реверберация. Если волнение поверхности, направление волн и локации таковы, что появляется реверберация, обладающая узкими максимумами в ЧДС, то сигнал на этом фоне может быть выделен только в том случае, если его уровень существенно (как правило, более чем на 10 дБ) превышает ревербе-

рацию. Это условие является существенным ограничением возможного поперечника рассеяния уверенно выделяемых сигналов.

Задачей статьи является показать, основываясь на эксперименте, как можно отличить сигналы, отраженные от объекта локации, от реверберации, обладающей узким спектром ЧДС, локализованной по дальности и имеющей сравнимый или даже больший уровень. Основная идея, положенная в основу исследования, состоит в том, что регулярные сигналы, обладающие дискретным спектром, по некоторым свойствам существенно отличны от узкополосных сигналов, случайных в своей основе, сформированных из сигналов сплошного спектра. Очевидно, что сигнал, обладающий дискретным спектром, может быть синхронизирован с частотой его временного квантования так, что в результате его Фурье-спектр займет всего одну или несколько отсчетных точек, а в остальных точках будут нули. С узкой спектральной линией, сформированной из сигнала со сплошным спектром, этого не получится ни при какой синхронизации. Узкополосный шум не может быть равен нулю ни в каком конечном частотном диапазоне. К сожалению, этот признак регулярного сигнала дискретного спектра нельзя широко использовать при отделении сигнала от реверберации, так как он накладывает слишком жесткие требования на когерентность сигнала.

Мы воспользовались другим отличием, накладывающим гораздо меньшие требования на когерентность. Известно, что узкополосный сигнал при увеличении времени когерентного накопления на его собственной частоте растет линейно в пределах времени его когерентности. По достижении этого времени дальнейший рост прекращается. Сигнал и реверберационный отклик могут иметь разные интервалы когерентности. Это можно оценить количественно путем измерения дисперсии отклонения роста амплитуды от линейности на выходе фильтра, настроенного так, чтобы его отклик при максимальном времени накопления был бы максимальным. Чем раньше начнется отклонение от линейного роста, тем больше будет величина дисперсии отклонений. Для экспериментальных данных показано, что отличия в дисперсии нарастания сигнала по мере увеличения времени когерентного накопления у полезного сигнала и у реверберации, имеющей на плоскости "дальность–частота" примерно такой же вид, могут достигать 7–8 раз за время накопления в несколько секунд.

Начнем рассмотрение с эксперимента. Опыт был поставлен на Горьковском водохранилище. Глубина места в районе проведения опыта порядка 7–8 метров. Схема локационного эксперимента – бистатическая. Длительность излучаемого импульса составляет 2 мс, период следования 400 мс, частота излучения 2 кГц. Прием велся линейной горизонтальной антенной решеткой длиной 6 м, состоящей из 32 отдельных гидрофонов. Сигналы регистрировались в широкой полосе с каждого отдельного гидрофона антенной решетки, так что антенну можно было при желании фазировать, выделяя определенное направление приема. Объектом локации служила пустотелая цилиндрическая труба с балластом длиной около 8 м, диаметром 0.6 м, которая буксировалась весельной лодкой на глубине 3 м с постоянной скоростью порядка 0.5 м/с в различных направлениях и при различном удалении от излучателя и приемной антенны.

С помощью обработки, состоящей в фазировании антенны, чересперио́дном вычитании и когерентном накоплении, уверенно выделяется сигнал, рассеянный объектом на фоне всех видов реверберации. Обработка обеспечивает существенное (порядка 10 дБ) превышение уровня отклика над всеми пиками помехи на плоскости "дальность–азимут" при всех возможных ЧДС. За сигналом можно было следить в течение почти всего галса. Координаты рассеяния импульсов образуют последовательность, полностью согласующуюся с графиком движения объекта локации.

Для того, чтобы поставить опыт, о котором идет речь, пришлось загрубить обработку с тем, чтобы сигнал сравнялся бы с реверберацией. Для этого достаточно отказаться от фазировки антенны и сложить обработанные сигналы со всех приемников антенны по модулю (некогерентно). Полученная картина на плоскости "дальность–ЧДС" показана на рис. 1. По этой картине были определены доплеровские частоты и дальности двух наиболее заметных импульсов. Один из них, координаты которого в точности совпадали с координатами самого большого импульса при когерентном сложении сигналов с гидрофонов антенной решетки, был полезным сигналом.

Для определения дисперсии отклонения роста сигналов от линейного закона нарастания амплитуды с увеличением длительности когерентного накопления, обработка сигналов велась следующим образом. Формировалась функция:

$$F(n, m) = \\ = [f[m, r, n+1] - f(m, r, n)]\exp(i2\pi nw). \quad (1)$$

Здесь n – номер посылки импульса, m – номер приемного гидрофона; f – комплексный сигнал с приемного гидрофона номера m за время посылки импульса номера n; r – координата дальности исследуемого импульса; w – частота доплеровского смещения исследуемого импульса. Разность в квадратных скобках (1) формирует алгоритм чересперио́дного вычитания, а экспонента нужна для последующего когерентного накопления сиг-

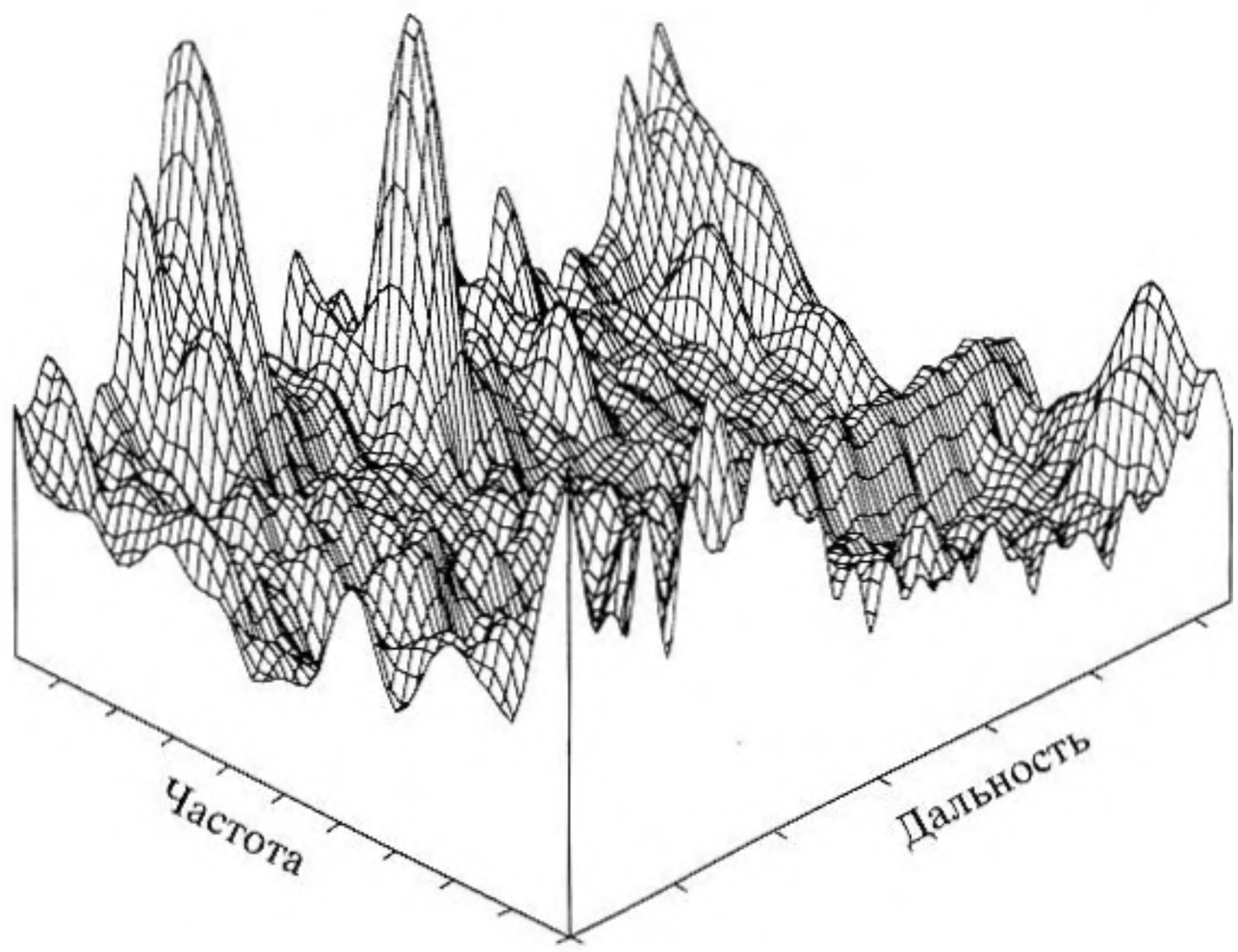

Рис. 1. Картина импульсов на плоскости "дальность – доплеровская частота".

нала на выделенной частоте доплеровского смещения w.

Дальнейшая обработка представляет собой суммирование (1) по n с переменным верхним пределом суммирования t. Эта операция совершается по формуле:

$$S(m, t) = \sum_{n=0}^{n=t} F(n, m). \qquad (2)$$

На следующем этапе осуществляется некогерентное сложение сигналов со всех приемных гидрофонов антенной решетки:

$$U(t) = \sum_{m} |S(m, t)|. \qquad (3)$$

Функция (3) линейно нарастает в пределах когерентности сигнала. Наша задача заключается в оценке дисперсии уклонений от линейного роста. Это можно сделать путем использования функции, названной нами уклонением:

$$Q(t) = \frac{U(t)}{\max(U(t))} - \frac{t}{N}. \qquad (4)$$

Здесь N – максимальное значение верхнего предела суммирования в (2) или максимальное значение t. Заключительной операцией является вычисление дисперсии уклонения:

$$D = \sqrt{\sum_{t} (Q(t) - \langle Q(t) \rangle)^2}. \qquad (5)$$

Вид функции уклонения (4) для двух выбранных импульсов на картине рис. 1 показан на рис. 2. Значения дисперсий уклонений получились следующими. Для реверберации $D = 0.136$, а для полезного сигнала $D = 0.019$. Отношение дисперсий уклонений для реверберации и полезного сигнала получилось 7. Это довольно заметная разница с учетом того, что на рис. 1 оба импульса по форме неотличимы.

Для того, чтобы разобраться в физической сущности получившейся разницы в уклонениях, было выполнено численное моделирование явления.

Задача, ставившаяся перед численным моделированием, аналогична задаче, решавшейся в [5, 6]. Надо было построить математическую модель, позволяющую получить значения уклонений и дисперсией уклонений, близких к тем, которые наблюдались в эксперименте. При математи-

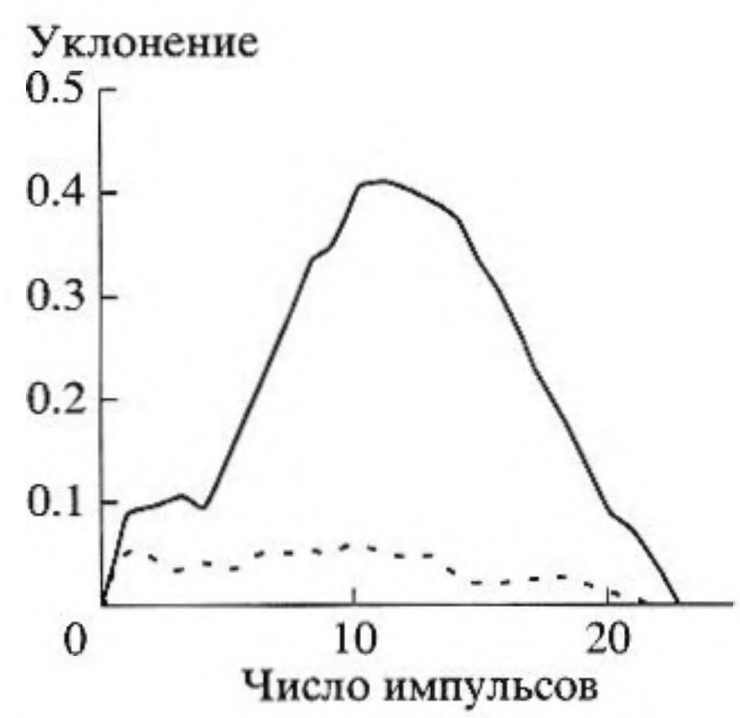

Рис. 2. Отклонение от линейного закона увеличения амплитуды импульса с ростом числа импульсов накопления в натурном опыте. Сплошная линия – реверберация. Пунктир – сигнал.

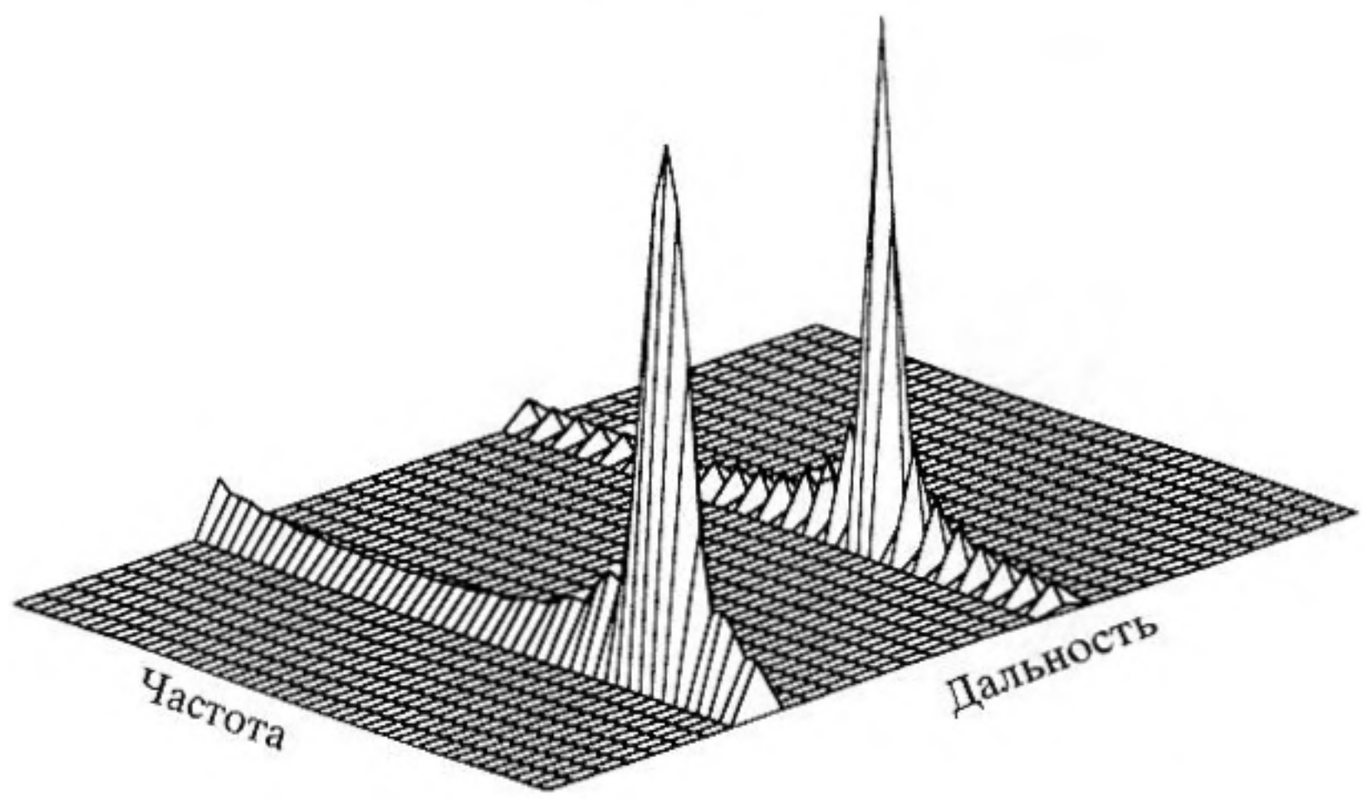

Рис. 3. Картина импульсов на плоскости "дальность–доплеровская частота" при численном эксперименте.

ческом моделировании сигнал и реверберация формировались из непрерывного сигнала $A(v)$. Вид функций $A(v)$ для сигнала и помехи выбирался различным, а во всем остальном формирование сигналов происходило одинаково.

Функция $A(v)$ для сигнала выбиралась в виде:

$$S(v) = \exp\left(i\frac{2\pi}{768}4v\right)MS(v). \qquad (6)$$

А для реверберации в виде:

$$R(v) = \exp\left(i\frac{2\pi}{768}8v\right)MR(v). \qquad (7)$$

Экспоненты от комплексного аргумента обеспечивают получение доплеровских частот, различных для сигнала и реверберации. Модулирующие функции определяют форму спектра. Этим функциям придавался вид:

$$MS(v) = \exp(-0.0006v), \qquad (8)$$

$$MR(v) = \cos\left(\pi\frac{v}{960}\right) \quad \text{при} \quad v < 480, \qquad (9)$$

$$MR(v) = 0 \quad \text{при} \quad v \geq 480. \qquad (10)$$

Для сигнала модулирующая функция была взята в виде убывающей экспоненты. Таким образом, в качестве модели полезного сигнала был взят гармонический экспоненциально затухающий сигнал. Такая модель хорошо согласуется с данными эксперимента. Для моделирования реверберации такая модель не годится ни при каком значении затухания сигнала. Вид функции уклонения (4) при этом сильно отличается от того, который показан на рис. 2. Не годится также и статистическая модель, построенная так, как это сделано в [5, 6] на основе формирования случайной функции с узкополосным спектром. Удовлетворительные результаты получены с моделью в виде отдельного цуга гармонического колебания конечной длительности. В этом случае функция уклонения (4) получается треугольной формы, такой, в которую можно вписать экспериментальную зависимость, показанную на рис. 2. Если придать конечному цугу плавную огибающую (по закону косинуса), то получается зависимость, по всем параметрам похожая на ту, которая показана на рис. 2 для реверберации. Такой модели соответствует моделирующая функция вида (9)–(10).

Из всего массива данных длиной $v = 768$ значений формировалась матрица $B(\xi, n)$, имеющая 32 столбца с номерами ξ и 24 строки с номерами n. Переменная ξ имеет значение дальности, а переменная n имеет тот же смысл, что и выше – номера посылки. Матрица формировалась по формуле:

$$B(\xi, n) = A(\xi + 32n). \qquad (11)$$

Из матрицы $B(\xi, n)$ формировался импульсный сигнал путем придания в матрице значения 1 для одного единственного значения ξ. Для сигнала это значение выбрано $\xi = 20$, а для реверберации $\xi = 8$. После этого матрицы сигнала и реверберации суммировались (при этом значения матрицы реверберации умножались на 2) и подвергались преобразованию Фурье (когерентному накоплению) по 24 значениям n.

Пользуясь указанной процедурой, из гармонических сигналов с различной амплитудной модуляцией были сформированы импульсы, показанные на плоскости "дальность–ЧДС" на рис. 3. Законы амплитудной модуляции импульсов (8) и (9), (10) показаны на рис. 4. На этом рисунке значения v, отложенные вдоль горизонтали, поделены на 32.

Для определения функции уклонений в модельном опыте использовалась процедура, определяемая выражением (4), в котором роль функ-

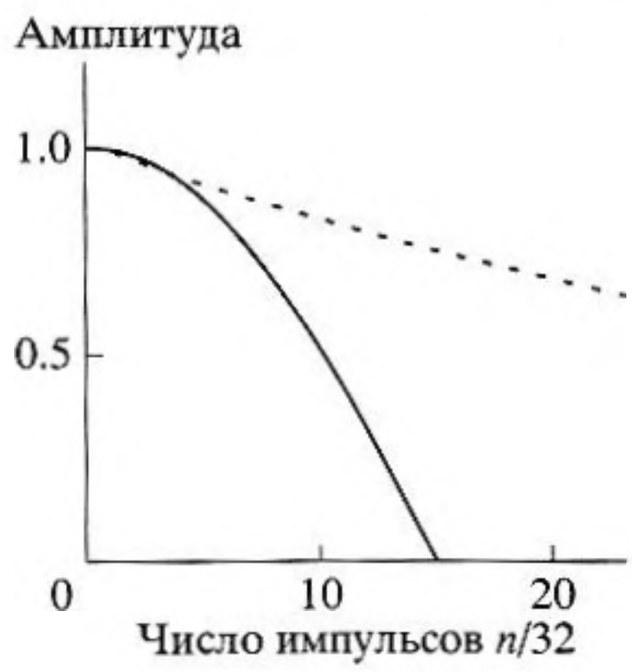

Рис. 4. Убывание амплитуды сигнала с ростом числа накапливаемых импульсов в численном опыте. Изображены функции $MR(v)$, определяемая (9) и (10) (сплошная линия), и $MS(v)$, определяемая (8) (пунктир).

Рис. 5. Уклонение от линейного закона увеличения амплитуды импульса с ростом числа импульсов накопления в численном опыте. Сплошная линия – реверберация. Пунктир – сигнал.

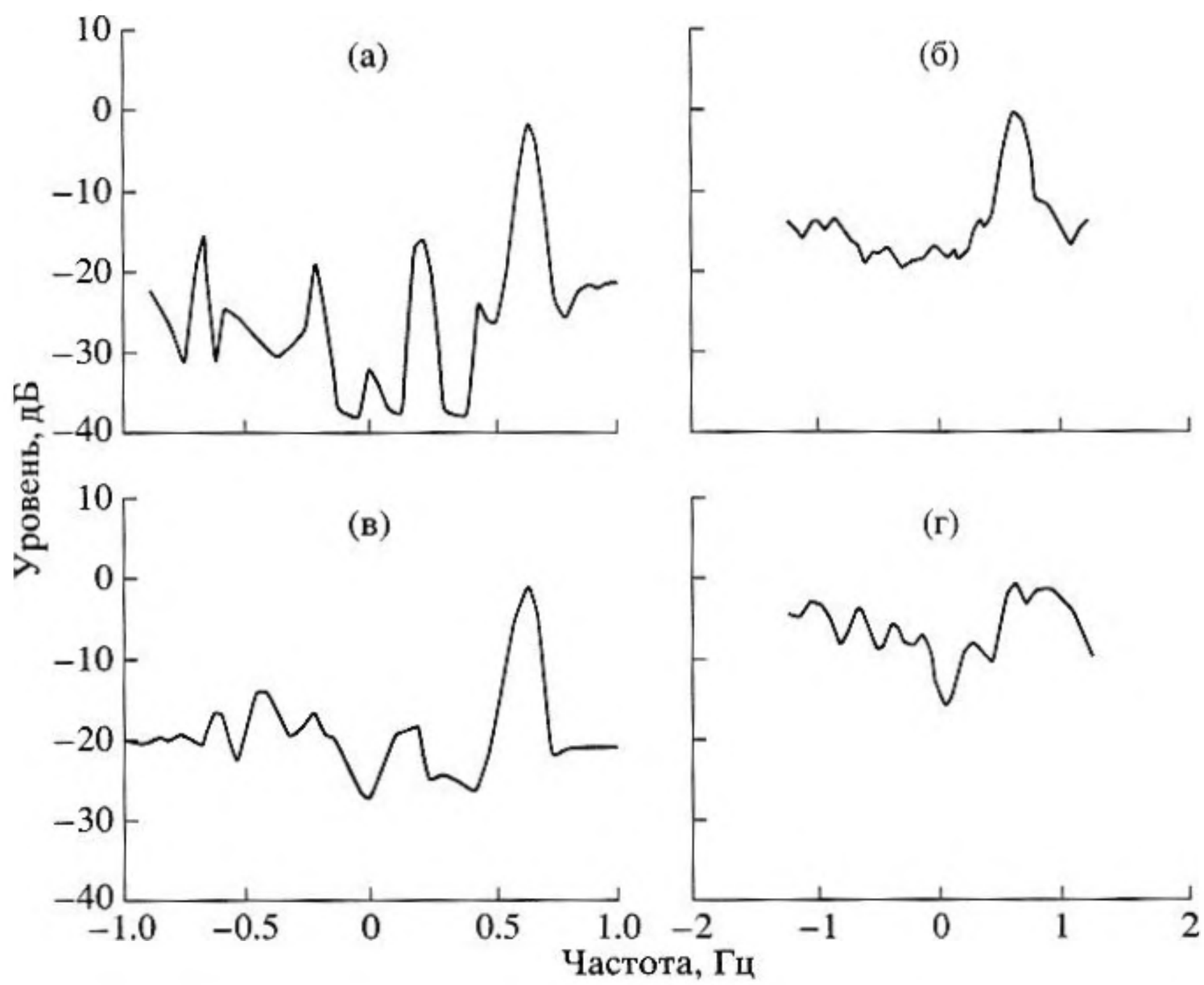

Рис. 6. Дисперсии уклонений и максимумы амплитуд импульсов на плоскости "дальность–азимут" в зависимости от ЧДС. Дисперсии уклонений отложены с обратным знаком на (а) для 225-й секунды и на (в) для 300-й секунды. Максимумы амплитуд показаны на (б) для 225-й секунды и на (г) для 300-й секунды.

ции $F(n, m)$, определяемой (1), для реверберации играла функция:

$$FR(n) = B(8, n)\exp(i2\pi n w_R). \qquad (12)$$

А для сигнала ту же роль играла функция:

$$FS(n) = B(20, n)\exp(i2\pi n w_S), \qquad (13)$$

где w_R, w_S – частоты, обращающие в максимум отклики на рис. 3 для реверберации и сигнала соответственно.

На рис. 5 показаны функции уклонений модельных сигналов. Дисперсии уклонений получились следующими. Для численной модели реверберации $D = 0.142$, а для численной модели сигнала $D = 0.018$. Их отношение близко к 8.

Рис. 6 показывает практический эффект от использования дисперсии уклонений при выделении сигналов из реверберации. На этом рисунке показаны результаты обработки принятых локационных сигналов для двух интервалов времени

длительностью около 4 с, один из которых начинается в момент 225 с (А) от начала движения объекта локации, а другой – в момент 300 с (Б). Сигналы обрабатывались путем когерентного сложения сигналов со всех гидрофонов антенны и всех 24 импульсов.

Рис. 6 получился следующим образом. На плоскости "дальность–азимут" при одном фиксированном значении ЧДС определялся максимальный сигнал. Для этого сигнала определялись его абсолютный уровень и дисперсия уклонений. После этого значение ЧДС немного изменялось и снова определялся максимум сигнала для всей плоскости "дальность–азимут". По полученным таким образом значениям строился график на рис. 6. В момент А поперечник рассеяния объекта локации был существенно больше, чем в момент Б. Поэтому на рис. 6б сигнал выделяется достаточно хорошо по уровню. В момент Б поперечник рассеяния был настолько мал, что сигнал по уровню уже не выделяется. Зато в момент Б сигнал надежно выделяется по дисперсиям уклонений.

Таким образом, отличия в когерентности реверберации от сигнала можно использовать для снижения порога обнаружения и выделения сигнала на фоне реверберации. Эти отличия можно объяснить тем, что реверберация формирует импульс, внешне сходный с сигналом, за счет более короткого цуга когерентных импульсов. Поэтому для уверенного отделения реверберации от сигнала указанным выше способом надо стремиться к тому, чтобы время когерентного накопления было бы больше времени цуга реверберации и чтобы объект локации в течение всего этого времени двигался бы прямолинейно и равномерно. Этот способ представляется перспективным и оригинальным и в сравнении с результатами последних работ других авторов в данном направлении, например [8].

Авторы благодарны Б.М. Салину, А.Л. Матвееву, В.И. Турчину за обсуждение результатов. Работа поддержана РФФИ (проекты № 00-15-96741, № 99-02-16401 и № 02-02-17056).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Современная радиолокация: Пер. с англ. / Под редакцией Кобзарева Ю.Б. М.: Сов. радио, 1969.
2. *Зверев В.А.* Акустическое темное поле // Акуст. журн. 2000. Т. 46. № 1. С. 75–83.
3. *Зверев В.А., Коротин П.И., Матвеев А.Л., Салин Б.М., Турчин В.И.* Обращенный апертурный синтез в акустическом темном поле // Акуст. журн. 2000. Т. 46. № 5. С. 650–657.
4. *Зверев В.А., Коротин П.И., Матвеев А.Л., Митюгов В.В., Орлов Д.А., Салин Б.М., Турчин В.И.* Экспериментальные исследования дифракции звука на движущихся неоднородностях в мелководных условиях // Акуст. журн. 2001. Т. 47. № 2. С. 227–237.
5. *Stephen R.A.* Modelling sea surface scattering by the time-domain finite-difference method // J. Acoust. Soc. Amer. 1996. V. 100. № 4. P. 2070–2078.
6. *Зверев В.А.* Формирование акустического изображения на основе его численной модели // Акуст. журн. 2000. Т. 46. № 6. С. 796–803.
7. *Зверев В.А., Литвак Н.В.* Численное моделирование случайных акустических сигналов // Акуст. журн. 1999. Т. 45. № 6. С. 807–815.
8. *Makris N.C., Ratilal P.* A unified model for reverberation and submerged object scattering in a stratified ocean waveguide // J. Acoust. Soc. Amer. 2001. V. 109. № 3. P. 909–941.

Qualitative Difference Between the Signal and the Surface Reverberation in Active Location with a Coherent Cumulation

V. A. Zverev and P. I. Korotin

Institute of Applied Physics, Russian Academy of Sciences,
ul. Ul'yanova 46, Nizhni Novgorod, 603600 Russia
e-mail: zverev@hydro.appl.sci-nnov.ru

Abstract—It is shown that outwardly similar (in shapes and levels) pulses reflected from a moving discrete target (the signal) and produced by sound scattering from the waved water surface (the surface reverberation) have a qualitative difference, which manifests itself in coherent cumulation of signals. The signal and the surface reverberation differently increase as the interval of their coherent summation grows. Quantitatively, this difference consists in that the signal has a much smaller variance of deviations from the linear law of its increase. The effect is observed both in in-field experiments and in numerical simulations.