

УДК 534.2

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВАРИАЦИИ ОЦЕНКИ МОЩНОСТИ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА В РЕАЛЬНЫХ ОКЕАНИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

© 1995 г. А. И. Машошин

Лаборатория прикладных акустических исследований
189620 Санкт-Петербург, Пушкин-4, а/я 10

Поступила в редакцию 12.07.94 г.

Приведены результаты эксперимента по определению коэффициента вариации оценки мощности широкополосных шумов морских судов на выходе акустической антенны. Осуществлено их сравнение с теоретическими расчетами. Предложено эмпирическое выражение для коэффициента вариации оценки мощности гидроакустического сигнала в реальных океанических условиях.

Точность измерения параметров гидроакустического сигнала является одним из основных факторов, влияющих на эффективность работы гидроакустической аппаратуры различного назначения. Вместе с тем в большинстве публикаций по гидроакустике учет точности измерения параметров сигнала осуществляется с использованием известных выражений статистической радиотехники, получаемых исходя из идеализированных моделей сигналов и помех, не в полной мере учитывающих особенности их реальных аналогов, что в результате приводит к завышению прогнозируемой эффективности аппаратуры.

В статье приводятся результаты эксперимента, поставленного с целью определения точности измерения в реальных условиях морской среды одного из параметров гидроакустического сигнала – его мощности.

В общих чертах эксперимент состоял в следующем. С борта НИС, лежащего в дрейфе в районе судоходной трассы, на заданную глубину опускалась гидроакустическая антенна, сигнал с выхода которой был заведен в бортовую аппаратуру. При обнаружении сигнала проходящего судна антенна фазировалась в направлении его прихода и далее сопровождала его, пока это было возможно. В процессе сопровождения при помощи специального устройства циклически измерялась мощность сигнала в относительных единицах в заданных частотных полосах. С использованием массивов полученных оценок рассчитывались коэффициенты вариации оценки мощности сигнала в функции отношения сигнал/помеха (ОСП), которые затем сравнивались с соответствующими теоретическими зависимостями, полученными для идеализированных моделей сигналов и помех.

Остановимся более подробно на методике эксперимента. Приемная антенна состояла из двух широкополосных приемников давления, закрепленных на жесткой горизонтальной штанге. Расстояние между фазовыми центрами приемников составляло 1.5 м. Были приняты специальные меры по стабилизации антенны в пространстве. Заглубление антенны составляло 50 - 100 м и выбиралось исходя из максимизации ОСП в текущих условиях.

Схема обработки принимаемых антенной сигналов приведена на рис. 1. Аналоговые сигналы с выхода приемников Пр-1 и Пр-2 в блоках Ус-1 и Ус-2 подвергались усилению и частотной коррекции, обеспечивающих идентичность частотных характеристик обоих каналов и одновременно отбеливающих спектр помехи. В блоках АЦП-1 и АЦП-2 сигналы преобразовывались в цифровую форму, после чего поступали на вход октавных спектроанализаторов СА-1, СА-2 и СА-3, из которых СА-1 и СА-2 работали в режиме вычисления энергетического спектра, а СА-3 – в режиме вычисления взаимного спектра. При этом полосы анализа и время накопления спектров ($T = 10$ с) для всех трех СА были идентичными. Значения накопленных энергетических спектров,

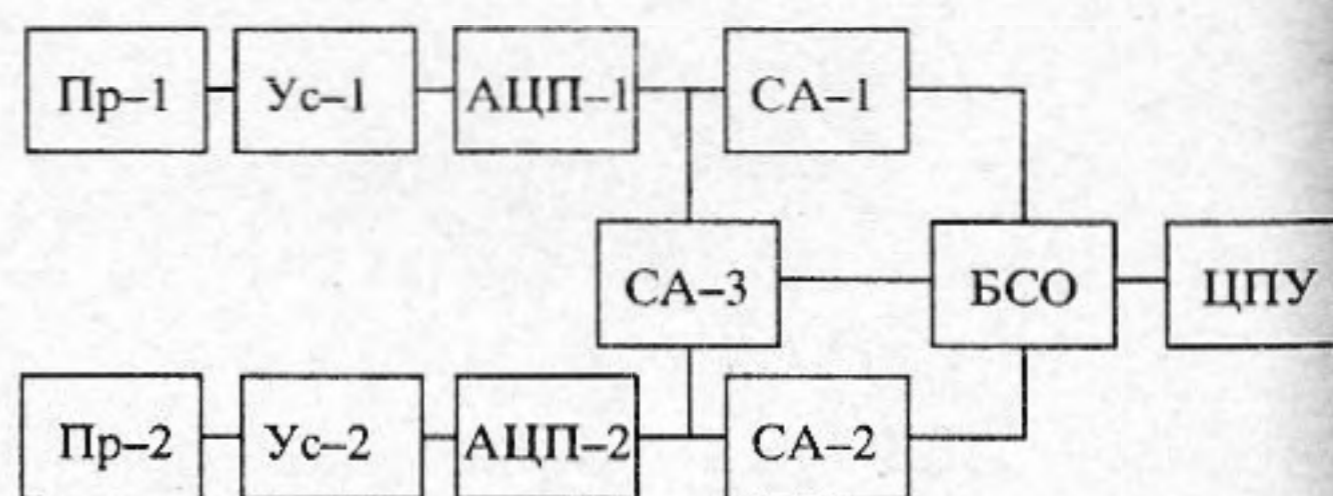


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки.

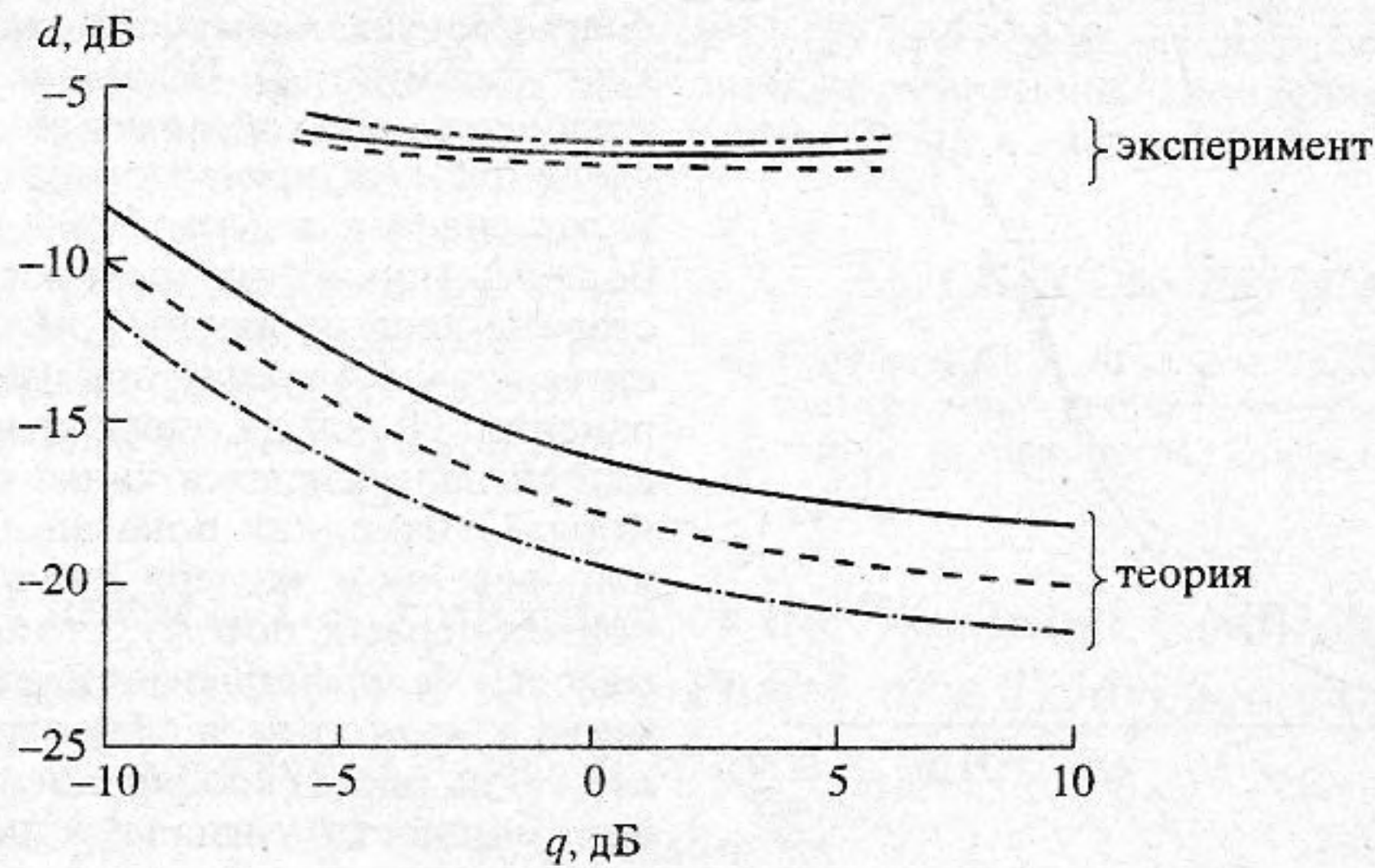


Рис. 2. Экспериментальная и теоретическая зависимости коэффициента вариации (d , дБ) оценки мощности сигнала от отношения сигнал/помеха (q , дБ) для октавных полос 1 - 2 кГц (сплошная линия), 2 - 4 кГц (штриховая линия) и 4 - 8 кГц (штрихпунктирная линия).

вычисленные на последовательных интервалах времени в СА-1 и СА-2 и накопленных действительных частей взаимных спектров, вычисленных в СА-3, поступали в блок статистической обработки (БСО). Действительные и мнимые части взаимных спектров, вычисленные в СА-3, поступали также в блок фазировки антенны в направлении прихода сигнала проходящего судна (этот блок на рис. 1 не приведен).

В БСО с использованием 30-и последовательных накопленных спектров, поступивших из СА-1, СА-2, СА-3 на интервале в 5 мин, вычислялись:

– коэффициент вариации оценки мощности спектральной составляющей сигнала в i -й полосе частот:

$$d_i = \left(\frac{B_{i3}}{M_{i3}^2} - 1 \right)^{1/2}, \quad i = 1, \dots, P; \quad (1)$$

– коэффициент корреляции оценок мощностей сигнала в i -й и j -й полосах частот:

$$r_{ij} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N S_{ik3} S_{jk3} - M_{i3} M_{j3}}{\sqrt{(B_{i3} - M_{i3}^2)(B_{j3} - M_{j3}^2)}}, \quad (2)$$

$i, j = 1, \dots, P, \quad i \neq j;$

– ОСП на выходе антенны в i -й полосе частот:

$$q_i = \frac{4M_{i3}}{M_{i1} + M_{i2}}, \quad i = 1, \dots, P. \quad (3)$$

В формулах (1) - (3):

$$M_{il} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N S_{ikl}, \quad B_{il} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N S_{ikl}^2$$

S_{ikl} – спектральный отсчет в i -й полосе частот на k -м 10-секундном интервале накопления на выходе l -го СА; N – число интервалов накопления, используемых при расчете d_i , r_{ij} и q_i ($N = 30$); P – число частотных полос.

Рассчитанные по формулам (1) - (3) данные регистрировались на цифropечатающем устройстве (ЦПУ). В лабораторных условиях данные, зарегистрированные для каждого 5-минутного интервала, упорядочивались в порядке возрастания параметра q_i и сглаживались скользящим окном шириной 3 дБ вдоль оси q . Кроме того, при сглаживании осуществлялось вычисление скользящего среднеквадратического разброса экспериментальных замеров коэффициента вариации относительно его среднего.

Эксперимент в соответствии с описанной методикой проводился в трех районах: в Баренцевом море в весенний период (условия приповерхностного звукового канала), в Северной Атлантике в летний период (условия ДЗАО) и в Средиземном море в летний период (условия ДЗАО). Волнение моря во всех районах составляло в среднем 3.5 балла со среднеквадратическим отклонением 1.2 балла. Всего в трех районах было обработано 474 5-минутных реализаций сигналов 102 судов, проходящих от приемной системы на расстоянии от единиц до нескольких десятков километров.

Результаты эксперимента, усредненные по всем 474 реализациям, приведены на рис. 2 и 3. На рис. 2 с пометкой “эксперимент” изображены полученные по описанной методике сглаженные зависимости коэффициента вариации от ОСП в трех октавных частотных полосах 1 - 2 кГц, 2 - 4 кГц и 4 - 8 кГц. Для сравнения на рис. 2 теми же

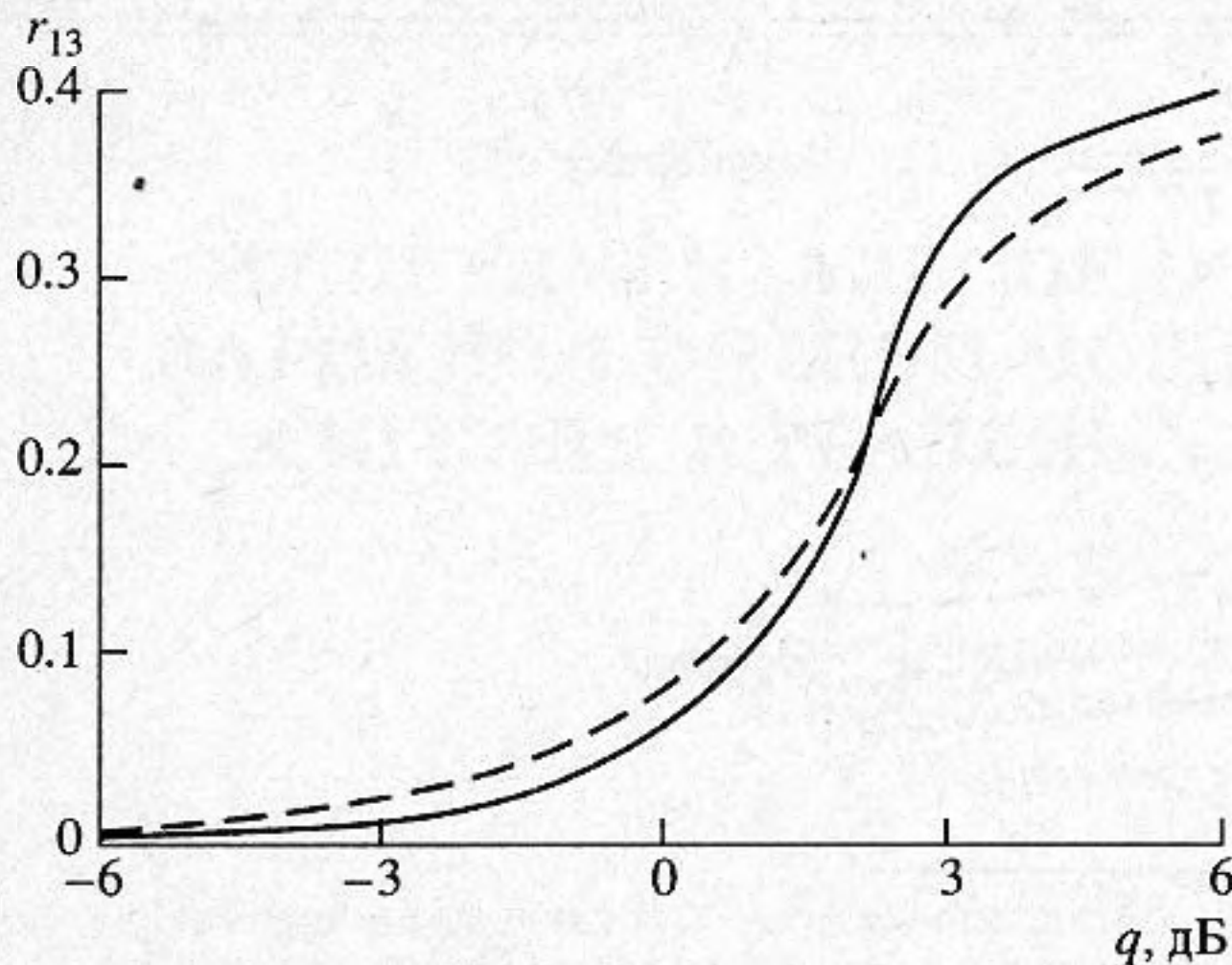


Рис. 3. Зависимости коэффициента корреляции (r) оценок мощности сигнала в частотных полосах 1 - 2 кГц и 4 - 8 кГц от отношения сигнал/помеха в полосе 1 - 2 кГц (сплошная линия) и в полосе 4 - 8 кГц (штриховая линия).

линиями с пометкой "теория" нанесены теоретические зависимости, рассчитанные по формуле [1]

$$d_{\text{теор}}^2 = \frac{(1 + q^{-1})^2 + q^{-2}}{\Delta f_3 T}, \quad (4)$$

где $d_{\text{теор}}$ – коэффициент вариации оценки мощности стационарного сигнала в присутствии стационарной помехи: q – ОСП на выходе сумматора антенны (по мощности); Δf_3 – эквивалентная полоса частот в герцах, T – время накопления в секундах. Среднеквадратический разброс коэффициента вариации относительно скользящего среднего составил – 10 дБ независимо от ОСП.

Для выявления зависимости коэффициента вариации оценки мощности сигнала от гидроакустических условий все имеющиеся реализации были сгруппированы по трем ранее названным районам, а внутри каждого района – по степени волнения моря. Для каждой группы были построены зависимости, аналогичные рис. 2. Однако статистически значимых различий между ними и экспериментальными зависимостями на рис. 2 обнаружено не было.

На рис. 3 изображены сглаженные зависимости коэффициента корреляции оценок мощности сигнала в полосах частот 1 - 2 и 4 - 8 кГц от ОСП в полосе 1 - 2 кГц (сплошная линия) и от ОСП в полосе 4 - 8 кГц (штриховая линия).

Сравнение экспериментальных и теоретических кривых на рис. 2 показывает их существенное отличие, достигающее 10 - 15 дБ, что, по-видимому, объясняется нестационарностью реальных сигналов и помех. В пользу этой гипотезы, в частности, свидетельствует тот факт, что результаты лабораторных экспериментов по схеме рис. 1 со статисти-

онарными сигналом и помехой строго соответствуют формуле (4). Поскольку расхождение теоретических и экспериментальных зависимостей увеличивается при возрастании ОСП, т.е. когда вклад сигнала в суммарный процесс становится больше, можно предположить, что в большей степени нестационарным является сигнал вследствие его флуктуаций при излучении и распространении. Одной из очевидных причин флуктуаций сигнала является качка судов при волнении моря. Однако, как показал анализ, эта причина в проведенном эксперименте не является основной: во-первых, потому, что не обнаружена зависимость коэффициента вариации от волнения моря, а во-вторых, в силу ограниченного (не более 0.4 на рис. 3) коэффициента корреляции оценок мощности сигнала в неперекрывающихся частотных полосах (флуктуации сигнала, обусловленные качкой, имеют коэффициент корреляции в разных частотных полосах, близкий к единице). При этом следует оговориться, что, возможно, сделанный вывод справедлив только для выбранной величины времени накопления спектров (10 с).

На рис. 2 обращает на себя внимание также то обстоятельство, что экспериментальные кривые, соответствующие трем частотным полосам, практически совпадают, хотя их теоретические аналоги, ввиду различия эквивалентных полос Δf_3 для каждой полосы отличаются друг от друга. Причиной этого может служить известный факт увеличения флуктуаций сигнала с ростом частоты.

Аппроксимацией зависимости коэффициента вариации оценки мощности сигнала от ОСП в реальных условиях, учитывающей теоретические результаты и обеспечивающей хорошее согласование с результатами описанного эксперимента, может служить зависимость

$$d_{\text{реал}}^2 = \frac{3\sigma_A^4 + 2\sigma_A^2 q^{-1} + q^{-2}}{\Delta f_3 T}, \quad (5)$$

соответствующая модели смеси сигнала и помехи вида

$$y_{c+n}(t) = A(t)x_c(t) + x_n(t), \quad (6)$$

где $x_c(t)$, $x_n(t)$ – стационарные сигнал и помеха с нулевыми средними и дисперсиями σ_c^2 и σ_n^2 соответственно; $A(t)$ – случайная функция с нулевым средним и дисперсией σ_A^2 , описывающая медленные флуктуации амплитуды сигнала. Причем $\sigma_A = 3.2$ для полосы 1 - 2 кГц; $\sigma_A = 4.0$ для полосы 2 - 4 кГц и $\sigma_A = 4.7$ для полосы 4 - 8 кГц; $q = \frac{\sigma_c^2}{\sigma_n^2}$.

Таким образом, проведенный эксперимент по определению коэффициента вариации оценки

мощности широкополосного гидроакустического сигнала в реальных океанических условиях позволил установить существенное отличие экспериментальных зависимостей от теоретических, достигающее 10 - 15 дБ. Предложенная аппроксимация (5) учитывает теоретические закономерности и обеспечивает хорошее согласование с результатами эксперимента. Вместе с тем требуется экспериментальное подтверждение аппроксима-

ции (5) при временах накопления сигнала, отличных от времени накопления, использованного в проведенном эксперименте (10 с).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грибанов Ю.И., Мальков В.Л. Выборочные оценки спектральных характеристик стационарных случайных процессов. М.: Энергия, 1978.

Experimental Determination of the Variation Coefficient of the Estimates Obtained for the Power of a Hydroacoustic Signal under Actual Open-Sea Conditions

A. I. Mashoshin

This paper presents the results of an experiment on determining the coefficient of variation of the estimates obtained for the power of wideband signals from sea-craft at the output of an acoustic antenna. The results are compared with theoretical calculations. An empirical expression is suggested for the variation coefficient of the estimates obtained for the power of a hydroacoustic signal under actual open-sea conditions.