АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2002, том 48, № 1, с. 110–119

УДК 534.322

ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО КОМБИНИРОВАННОГО ПРИЕМНИКА

© 2002 г. В. А. Щуров, А. В. Щуров

Тихоокеанский океанологический институт РАН
690041 Владивосток, ул. Балтийская 43
E-mail: shchurov@mail.primorye.ru

Поступила в редакцию 29.12.99 г.

На основе экспериментальных данных, полученных в глубоком открытом океане с помощью двух четырехкомпонентных комбинированных гидроакустических приемников, расположенных на глубинах 150 и 300 м, проведен статистический анализ помехоустойчивости комбинированного приемника при наблюдении флуктуирующего тонального сигнала на фоне подводных динамических шумов. Получены теоретические выражения для соотношения сигнал/шум комбинированного приемника для взаимоспектральных уровней сигнала и шума для узкой и широкой полос частот. Введено понятие коэффициента усиления комбинированного приемника через функции обычной одноточечной когерентности для акустического давления и колебательной скорости частиц в акустической волне. Согласно полученным экспериментальным оценкам максимальный выигрыш отношения сигнал/шум для комбинированного приемника при мультипликативной обработке по сравнению с квадратичным детектором на основе гидрофона может составлять 15–16 дБ для горизонтального канала и до 30 дБ для вертикального канала комбинированного приемника при компенсации встречных потоков энергии сигнала и шума.

ВВЕДЕНИЕ

Основой измерительного устройства для измерения акустической интенсивности является комбинированный приемник. Он состоит из приемника давления (скалярного приемника) и трехкомпонентного приемника колебательной скорости или колебательного ускорения (векторного приемника). Создание более совершенных одиночных комбинированных приемников и комбинированных антенн является актуальным и в настоящее время [1–4].

Проблеме помехоустойчивости одиночного комбинированного приемника посвящено значительное число исследований. Однако в большинстве теоретических работ помехоустойчивость комбинированного приемника рассматривается только на основе направленных свойств дипольных характеристик отдельных каналов векторного приемника при аддитивной или мультипликативной обработках акустической информации [5, 6]. Значительная часть работ основана на методах математического моделирования (см., например, [7, 8]. Вопрос оценки помехоустойчивости комбинированного приемника на основе эксперимента, проведенного в реальном поле шумовой помехи, является в настоящее время особенно актуальным. В данной работе обсуждается мультипликативная обработка для четырехкомпонентного комбинированного приемника. В теоретической части получены выражения для отношения сигнал/шум и вводится понятие коэффициента усиления комбинированного приемника в узкой и широкой полосах частот при мультипликативной обработке. На основе экспериментальных данных проведен анализ помехоустойчивости комбинированного приемника в узкой полосе частот для динамического шума глубокого открытого океана. Экспериментальные исследования, обсуждаемые в данной работе, проводились на глубинах 150 м и 300 м, выше оси подводного звукового канала, лежащей на глубине 1200 м. Спектрально-энергетические характеристики подводного окружающего шума на данных глубинах существенно различаются, что и подтверждено многочисленными измерениями автора [9]. В статье дан анализ помехоустойчивости комбинированного приемника в шумовом поле различной степени изотропности (диффузности) в зависимости от времени усреднения. Помехоустойчивость комбинированного приемника в анизотропном (когерентном) поле шума рассмотрена для случая компенсации. Таким образом, статья посвящена интерпретации конкретных экспериментальных результатов на основе простой математической модели в спектральной области, подобно тому, как это делается для гидрофонных антенн (см., например, [10]). Подобный подход для случая измерения вектора интенсивности ранее нигде не применялся. Сигнал и шум считаем статистически независимыми стационарными гауссовскими процессами с нулевыми средними значениями.

1. ХАРАКТЕРИСТИКА НАПРАВЛЕННОСТИ КОМБИНИРОВАННОГО ПРИЕМНИКА

Преобразователи, используемые в векторных приемниках, расположены по ортогональным осям x, y, z декартовой системы координат и имеют следующие объемные характеристики направленности в сферической системе координат:

$$R_x = \sin\theta\cos\varphi, \quad R_y = \sin\theta\sin\varphi, \quad R_z = \cos\theta, \quad (1)$$

где φ – азимутальный угол, отсчитываемый от оси x, θ – полярный угол, отсчитываемый от оси z.

Характеристика направленности трехкомпонентного векторного приемника есть сфера:

$$R_x^2 + R_y^2 + R_z^2 = 1. \quad (2)$$

Таким образом, четырехкомпонентный комбинированный приемник, включающий в себя приемник давления и трехкомпонентный векторный приемник, имеет сферическую характеристику направленности, т.е. его "отклик" не зависит от углов φ, θ [9]. Комбинированный приемник можно считать точечной приемной системой, пока его геометрические размеры не превышают 1/2 длины волны на верхней частоте рабочего диапазона частот. Объемные характеристики направленности (1) векторного приемника идентичны во всем рабочем диапазоне частот, который для различных приемников может достигать величины от нескольких сотен Гц до 10 кГц [2, 6].

2. КОЭФФИЦИЕНТ УСИЛЕНИЯ КОМБИНИРОВАННОГО ПРИЕМНИКА В ЧАСТОТНОМ СПЕКТРЕ

Следуя [5, 10, 11], запишем соотношение сигнал/шум $SNR(PV)$ одиночного комбинированного приемника при мультипликативной обработке. При этом считаем сигнал и шум статистически независимыми стационарными гауссовскими процессами с нулевыми средними значениями.

$$SNR(PV) = \sqrt{\frac{B_0T_0}{2}}\sqrt{\frac{2W_{P,S}W_{V,S}}{W_{P,N}W_{V,N}(1 + R_{P,V}^2 - J_{P,V}^2)}}, \quad (3)$$

где $B_0 = \Delta f_0$ – полоса частотного анализа, причем $\Delta f_0 \ll f_0$, f_0 – частота тонального сигнала; T_0 – время усреднения; $W_{P,S}$, $W_{V,S}$, $W_{P,N}$, $W_{V,N}$ – мощности сигналов и шумов на входе каналов акустического давления p и колебательной скорости v; $R_{P,V}$ и $J_{P,V}$ – действительная и мнимая части нормированной взаимной корреляционной функции шума на выходе комбинированного приемника.

Если $P_N(t)$ и $V_N(t)$ – центрированные процессы в каналах p и v, то

$$W_{P,N} = \langle|P_N(t)|^2\rangle; \quad W_{V,N} = \langle|V_N(t)|^2\rangle;$$

$$R_{P,V} = \mathrm{Re}\langle P_N(t)V_N^*(t)\rangle/\sqrt{W_{P,N}W_{V,N}}, \quad (4)$$

$$J_{P,V} = \mathrm{Im}\langle P_N(t)V_N^*(t)\rangle/\sqrt{W_{P,N}W_{V,N}},$$

где $\langle\ldots\rangle$ – знак усреднения; * – обозначение комплексно сопряженной величины.

В формуле (3) разделим мощности сигнала и шума на полосу анализа. Получим $W_{P,S}/\Delta f_0$, $W_{V,S}/\Delta f_0$, $W_{P,N}/\Delta f_0$, $W_{V,N}/\Delta f_0$. Исходя из [12], определим следующие спектральные плотности при $\Delta f_0 \longrightarrow 0$ и $T_0 \longrightarrow \infty$: $W_{P,S}/\Delta f_0 \longrightarrow S_{P^2,S}$; $W_{V,S}/\Delta f_0 \longrightarrow S_{V^2,S}$; $W_{P,N}/\Delta f_0 \longrightarrow S_{P^2,N}$; $W_{V,N}/\Delta f_0 \longrightarrow S_{V^2,N}$. При этом $R_{P,V} \longrightarrow \cos\varphi_N$ и $J_{P,V} \longrightarrow \sin\varphi_N$, где φ_N – среднее значение разности фаз между акустическим давлением $P(t)$ и колебательной скорости $V(t)$ в шуме на частоте f_0. Пользуясь полученными выше соотношениями и теоремой о спектрах, приведем формулу (3) к виду

$$SNR(PV) = \sqrt{\frac{B_0T_0}{2}}\frac{S_{P,S}(f_0)S_{V,S}(f_0)\cos\varphi_S}{S_{P,N}(f_0)S_{V,N}(f_0)\cos\varphi_N}. \quad (5)$$

Поскольку мы считаем сигнал случайной функцией, в формуле (5) мы ввели $\cos\varphi_S$ (где φ_S – среднее значение разности фаз между $P_S(t)$ и $V_S(t)$ для сигнала на частоте f_0). Выражения $S_{P,S}(f_0)S_{V,S}(f_0)\cos\varphi_S = S_{PV,S}(f_0)$ и $S_{P,N}(f_0)S_{V,N}(f_0)\cos\varphi_N = S_{PV,N}(f_0)$ суть действительные части взаимных спектров сигнала и шума на частоте f_0, приведенные к полосе $B_0 = 1$ Гц.

Запишем (5) в логарифмическом виде:

$$SNR(PV) = 10\lg\sqrt{\frac{B_0T_0}{2}}\frac{S_{PV,S}(f_0)}{S_{PV,N}(f_0)}. \quad (6)$$

Исходя из (3), получим отношение сигнал/шум для одиночного гидрофона (квадратичного детектора):

$$SNR(P^2) = 10\lg\sqrt{\frac{B_0T_0}{2}}\frac{S_{P^2,S}(f_0)}{S_{P^2,N}(f_0)}, \quad (7)$$

где $S_{P^2,S}(f_0)$ и $S_{P^2,N}(f_0)$ – спектральная плотность потенциальной энергии сигнала и шума, приведенная к полосе $B_0 = 1$ Гц на частоте f_0.

Помехоустойчивость комбинированного приемника относительно квадратичного детектора:

$$SNR(PV/P^2) = \frac{SNR(PV)}{SNR(P^2)}. \quad (8)$$

Выражения (6), (8) удобны при исследовании в узкой полосе частот помехоустойчивости комбинированного приемника в спектральной области.

Заменим взаимоспектральные плотности $S_{PV,S}(f_0)$ и $S_{PV,N}(f_0)$ когерентной мощностью сигнала и шума [12]: $S_{PV,S}(f_0) = \gamma^2_{PV,S}(f_0)S_{P^2,S}(f_0)$; $S_{PV,N}(f_0) = \gamma^2_{PV,N}(f_0)S_{P^2,N}(f_0)$, где $\gamma^2_{PV,S}(f_0)$, $\gamma^2_{PV,N}(f_0)$ – функции обычной одноточечной когерентности сигнала и шума; $S_{P^2,S}(f_0)$, $S_{P^2,N}(f_0)$ – спектральные плотности мощности сигнала и шума. Тогда

$$SNR(PV) = 10\lg\sqrt{\frac{B_0T_0}{2}}\frac{\gamma^2_{PV,S}(f_0)S_{P^2,S}(f_0)}{\gamma^2_{PV,N}(f_0)S_{P^2,N}(f_0)} = 10\lg\frac{S_{P^2,S}(f_0)}{S_{P^2,N}(f_0)} + 10\lg\sqrt{\frac{B_0T_0}{2}}\frac{\gamma^2_{PV,S}(f_0)}{\gamma^2_{PV,N}(f_0)}. \quad (9)$$

В формуле (9) выражение $10\lg\frac{S_{P^2,S}(f_0)}{S_{P^2,N}(f_0)}$ есть $SNR(P^2)$ на выходе гидрофона комбинированного приемника; выражение

$$k = 10\lg\sqrt{\frac{B_0T_0}{2}}\frac{\gamma^2_{PV,S}(f_0)}{\gamma^2_{PV,N}(f_0)}, \quad (10)$$

согласно [10], эквивалентно выражению усиления антенной решетки $10\lg N$ (где N – число элементов в антенной решетке), мы назовем (по аналогии с [10]) коэффициентом усиления комбинированного приемника. Следовательно, усиление комбинированного приемника зависит от отношения функций когерентности сигнала и шума для давления и колебательной скорости частиц акустического поля, определяется полосой частот B_0 и временем усреднения T_0.

Оценим предельное теоретическое значение полученного выше коэффициента усиления комбинированного приемника. При полностью когерентном сигнале ($\gamma^2_{PV,N}(f_0) \longrightarrow 1$) и полностью изотропном (диффузном) шуме ($\gamma^2_{PV,S}(f_0) \longrightarrow 0$) он стремится к бесконечности. Реальное акустическое поле окружающего шума есть суперпозиция анизотропного (когерентного) и изотропного (диффузного) полей, поэтому функция когерентности реального окружающего шума $\gamma^2_{PV,N}(f)$ отлична от нуля и зависит от частоты. В реальных динамических шумах глубокого открытого океана (диапазон частот 200–1000 Гц) она может достигать минимальных значений 0.01–0.001 [9]. Таким образом, коэффициент усиления одиночного комбинированного приемника зависит от когерентных свойств сигнала и шума и при полностью когерентном сигнале и диффузном шуме может достигать значений 20–30 дБ.

Полученное выражение для коэффициента усиления комбинированного приемника является простым и удобным выражением при статистическом анализе экспериментальных данных в узкой полосе частот.

В случае, если сигнал является широкополосным, то соотношения (6), (7), (10) должны быть записаны в виде

$$SNR(PV) = 10\lg\sqrt{\frac{B_0T_0}{2}}\left\{\int_{f_1}^{f_2}S_{PV,S}(f)df\Big/\int_{f_1}^{f_2}S_{PV,N}(f)df\right\},$$

$$SNR(P^2) = 10\lg\sqrt{\frac{B_0T_0}{2}}\left\{\int_{f_1}^{f_2}S_{P^2,S}(f)df\Big/\int_{f_1}^{f_2}S_{P^2,N}(f)df\right\}, \quad (11)$$

$$k = 10\lg\sqrt{\frac{B_0T_0}{2}}\left\{\int_{f_1}^{f_2}\gamma^2_{PV,S}(f)df\Big/\int_{f_1}^{f_2}\gamma^2_{PV,N}(f)df\right\},$$

где f_2–f_1 – ширина полосы частот, занимаемая широкополосным сигналом.

3. ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ *SNR* КОМБИНИРОВАННОГО ПРИЕМНИКА В РЕАЛЬНОМ ПОЛЕ АКУСТИЧЕСКИХ ШУМОВ ОКЕАНА В УЗКОЙ ПОЛОСЕ ЧАСТОТ

Проводилось наблюдение тонального флуктуирующего сигнала с частотой $f_0 = 622$ Гц. Длительность временной реализации составляла 1800 с.

Условия эксперимента следующие: глубина места 4000 м; ось подводного звукового канала находится на глубине 1200 м; скорость приводного ветра 6–7 м/с; развитое ветровое волнение, зыбь; комбинированные приемники находились на глубинах 150 м и 300 м. Оси комбинированных приемников x и y расположены в горизонтальной плоскости, ось z направлена от поверхности ко дну. Тональный излучатель находится на глубине 100 м на расстоянии 4–6 км от приемной системы. За время наблюдения уровень изменяющегося сигнала в автоспектре давления имел превышение над спектральным уровнем шума от 0 до 6 дБ (для комбинированного приемника, расположенного на глубине 150 м).

Оси x и y ориентированы в океаническом полноводе таким образом, что горизонтальная компонента потока энергии $I_{+x,N}$ анизотропного поля

динамического шума направлена по оси $+x$; по направлению $-x$ направлена компонента потока энергии сигнала $I_{-x,S}$; поток энергии сигнала $I_{-y,S}$ от локального источника направлен по оси $-y$; поле динамического шума на частоте f_0 = 622 Гц вдоль оси y изотропно (диффузно).

По оси $+z$ направлена компонента потока энергии динамического поверхностного шума $I_{+z,N}$, по оси $-z$ направлена встречная компонента потока энергии сигнала $I_{-z,S}$. Во время проведения эксперимента научно-исследовательское судно находилось в дрейфе. В некоторые моменты времени дрейфующее судно находилось точно по оси y комбинированного приемника и тогда сигнал от излучателя в канале x комбинированного приемника не наблюдался. В вертикальной плоскости наблюдалась компенсация потоков энергии $I_{-z,S}$ и $I_{+z,N}$ [13–16].

3.1. Коэффициент усиления комбинированного приемника в динамическом шуме с преобладающей изотропной компонентой

Проводились исследования SNR комбинированного приемника на двух временных реализациях длительностью t = 1800 с соответствующих двум глубинам измерения (150 и 300 м) на центральной частоте f_0 = 622 Гц. Отношения сигнал/шум вычислялись через соответствующие спектральные плотности согласно формулам (6) и (7) для следующих величин: 1. Спектральной плотности потенциальной энергии – $SNR(P^2)$; 2. Y – компоненты спектральной плотности кинетической энергии – $SNR(V_y^2)$; 3. Y – компоненты спектральной плотности потока энергии – $SNR(PV_y)$.

Для квадратичного детектора скалярного приемника давления $SNR(P^2)$ использовано выражение (7).

Для Y-компоненты квадратичного детектора приемника колебательной скорости:

$$SNR(V_y^2) = 10\lg\sqrt{\frac{B_0T_0}{2}\frac{S_{V_y^2,S}(f_0)}{S_{V_y^2,N}(f_0)}}, \qquad (12)$$

где $S_{V_y^2,S}(f_0)$ и $S_{V_y^2,N}(f_0)$ – Y-компоненты спектральной плотности кинетической энергии сигнала и шума, приведенные к полосе 1 Гц на частоте f_0.

Для Y-компоненты плотности потока энергии:

$$SNR(PV_y) = 10\lg\sqrt{\frac{B_0T_0}{2}\frac{S_{PV_y,S}(f_0)}{S_{PV_y,N}(f_0)}}, \qquad (13)$$

где $S_{PV_y,S}(f_0)$ и $S_{PV_y,N}(f_0)$ – Y-компоненты спектральной плотности потока энергии сигнала и шума, приведены в полосе 1 Гц на частоте f_0.

Поскольку $E_k = E_{k,x} + E_{k,y} + E_{k,z}$, то отношение $SNR(V^2)$ возможно вычислять как для полной кинетической энергии, так и для ее составляющих вдоль соответствующих осей x, y, z. В нашем случае вычисляется только $SNR(V_y^2)$. Для вектора плотности потока энергии $\mathbf{I} = \mathbf{i}(PV_x) + \mathbf{j}(PV_y) + \mathbf{k}(PV_z)$ вычисляются $SNR(PV_y)$ и $SNR(PV_z)$. Использовались следующие времена усреднения спектров T_0 = 1; 1.4; 2; 5; 15; 30; 45; 60; 64; 75; 90; 100; 110; 150; 192; 200; 250; 300; 320 с. Усреднение выбрано экспоненциальным. Полоса анализа составляет 1 Гц. Вычислялись также для каждого T_0 средние значения $\langle SNR(P^2)\rangle$, $\langle SNR(V_y^2)\rangle$, $\langle SNR(PV_y)\rangle$.

Зависимости величин $\langle SNR(P^2)\rangle$, $\langle SNR(V_y^2)\rangle$, $\langle SNR(PV_y)\rangle$, осредненных по всей длине реализации длительностью 1800 с от времени усреднения T_0, представлены на рис. 1. Рисунок 1а соответствует глубине 150 м, рис. 1б – 300 м. Как следует из рис. 1, $\langle SNR(P^2)\rangle$ и $\langle SNR(V_y^2)\rangle$ достигают наибольшего значения за время усреднения $T_k \approx 5$ с и далее не зависят от времени усреднения.

Достоверные значения на глубине 150 м: $\langle SNR(P^2)\rangle$ = 2.5 дБ, $\langle SNR(V_y^2)\rangle$ = 7.3 дБ (разность уровней составляет 3.8 дБ); для глубины 300 м – $\langle SNR(P^2)\rangle$ = 6.6 дБ, $\langle SNR(V_y^2)\rangle$ = 11.2 дБ (разность уровней – 4.6 дБ).

Разность уровней между $\langle SNR(P^2)\rangle$ и $\langle SNR(V_y^2)\rangle$ объясняется дипольной характеристикой направленности каналов приемника колебательной скорости, коэффициент концентрации которой равен 3. Следовательно, выигрыш в идеальном изотропном поле шума для $SNR(V_y^2)$ по сравнению с $SNR(P^2)$ должен составлять 4.8 дБ. Отклонение от этого значения говорит о наличии в поле окружающего шума анизотропной компоненты. Величина отклонения для глубины 150 м составляет 1 дБ, а для глубины 300 м – 0.2 дБ. Отсюда следует, что на глубине 300 м поле шума более изотропно в горизонтальной плоскости, чем на глубине 150 м. А именно, на глубине 150 м 21% плотности энергии шума связан с анизотропным полем и 79% с изотропным; на глубине 300 м, соответственно 5 и 95%. Зависимость $\langle SNR(PV_y)\rangle$ от T_0 наблюдается также до некоторого $T_0 = T_k$ и далее практически не зависит от времени усреднения. Для $\langle SNR(PV_y)\rangle$ получена аппроксимирующая функция $(a + b\sqrt{T})$ (рис. 1). Функция имеет следующие параметры: 1. Для глубины 150 м a = 12.8; b = 7.7 с$^{-1/2}$. Времена усреднения, по которым строилась аппроксимирующая функция: T_0 = 1.4;

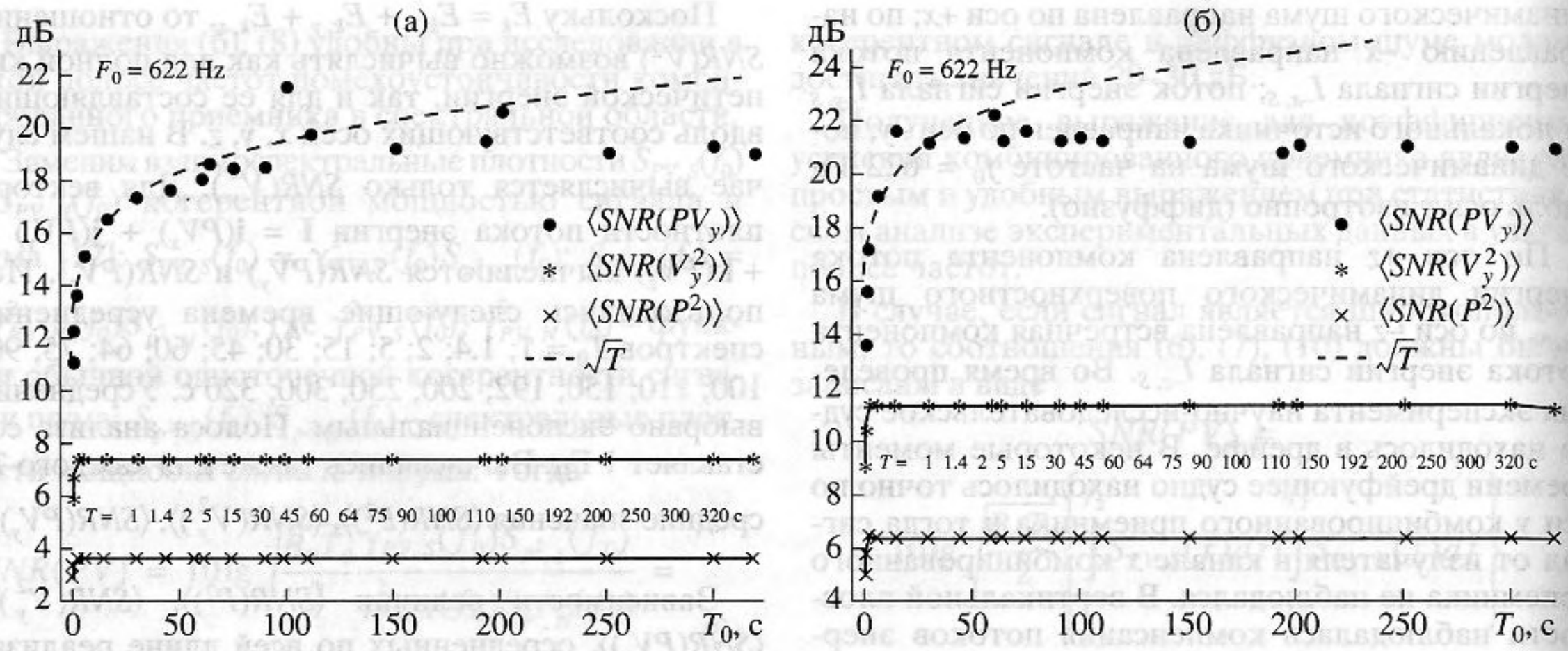

Рис. 1. Зависимость $\langle SNR(P^2)\rangle$, $\langle SNR(V_y^2)\rangle$, $\langle SNR(PV_y)\rangle$ от времени усреднения T_0. Глубина измерений: а – 150 м, б – 300 м. Пунктир – аппроксимирующая кривая $(a + b\sqrt{T})$, B_0 = 1 Гц.

2; 5; 15; 30; 45; 60; 64; 75; 90; 100; 110; 150 с. 2. Для глубины 300 м – $a = 37.5$; $b = 17.5$ с$^{-1/2}$. Времена усреднения соответственно равны T_0 = 1.4; 2; 5; 15; 30; 45; 60 с.

Экспериментальные точки $\langle SNR(PV_y)\rangle$ совпадают с аппроксимирующей кривой $(a + b\sqrt{T})$ до следующих времен усреднения: $T_0 = T_k \approx 120$ с для глубины 150 м и $T_0 = T_k \approx 60$ с для глубины 300 м. Как указывалось выше, для достижения максимальных значений $\langle SNR(P^2)\rangle$ и $\langle SNR(V_y^2)\rangle$ необходимое время усреднения $T_k \approx 5$ с, но для $\langle SNR(PV_y)\rangle$, как мы видим, время составляет $T_k \approx$ $\approx$ 60–120 с. Таким образом, чтобы реализовать максимальные значения $\langle SNR(PV_y)\rangle$, необходимо время усреднения в 12–24 раза больше, чем для реализации максимального значения $\langle SNR(P^2)\rangle$ или $\langle SNR(V_y^2)\rangle$. При этом выигрыш в помехоустойчивости комбинированного приемника относительно квадратичного детектора (согласно (8)) составит $SNR(PV_y/P^2) = \langle SNR(PV_y)\rangle - \langle SNR(P^2)\rangle \approx$ $\approx$ 15–16 дБ (рис. 1а, б). Как следует из рис. 1, при $T_0 \le T_k$ экспериментальные результаты совпадают с аппроксимирующей кривой $a + b\sqrt{T}$.

Для времени усреднения $T_0 \le T_k$ можно записать $\sqrt{\frac{T_0}{2}} S_{PV_y,S}(f_0)/S_{PV_y,N}(f_0) = (a + b\sqrt{T})$. Спектральную плотность потока энергии сигнала будем считать постоянной величиной на данной частоте f_0, т.е. $S_{PV_y,S}(f_0) = \text{const}$, $S_{PV_y,N}(f_0) = \sigma_N$ (где σ_N – среднеквадратичное отклонение плотности потока энергии шума в полосе 1 Гц на частоте f_0). Отсюда $\sigma_N \sim \text{const}/\sqrt{T}$. Таким образом, среднеквадратичное отклонение потока энергии изотропного поля динамического шума убывает как $1/\sqrt{T}$ (B_0 = 1 Гц).

3.2. Когерентные свойства потоков энергии сигнала и шума

Рассмотрим зависимость когерентных свойств сигнала и шума от времени усреднения T_0 для глубины измерения 150 м. Рассматриваем ту же самую временную реализацию длительности t = 1800 с, что и в разделе 3.1. Времена усреднения спектров T_0 = 3; 5; 15; 30; 45; 60; 75; 90; 100; 150; 192; 200; 250; 300; 320 с. Усреднение экспоненциальное. Исследуем свойства коэффициента усиления комбинированного приемника $k = 10\lg\sqrt{\frac{B_0 T_0}{2}\frac{\gamma^2_{PV,S}(f_0)}{\gamma^2_{PV,N}(f_0)}}$.

На рис. 2 приведены для всей реализации длительностью t = 1800 с функции когерентности сигнала $\gamma^2_{PV,S}(f_0)$ и шума $\gamma^2_{PV,N}(f_0)$ на частоте f_0 = = 622 Гц для трех (а, в, б) времен усреднения спектров T_0 = 5; 15; 30 с. Из рис. 2 следует, что функция когерентности сигнала на частоте f_0 = 622 Гц флуктуирует во времени, но функция когерентности шума постоянна (для конкретного времени усреднения) и уменьшается при увеличении времени усреднения.

На рис. 3 приведены зависимости от времени усреднения T_0 функции когерентности шума

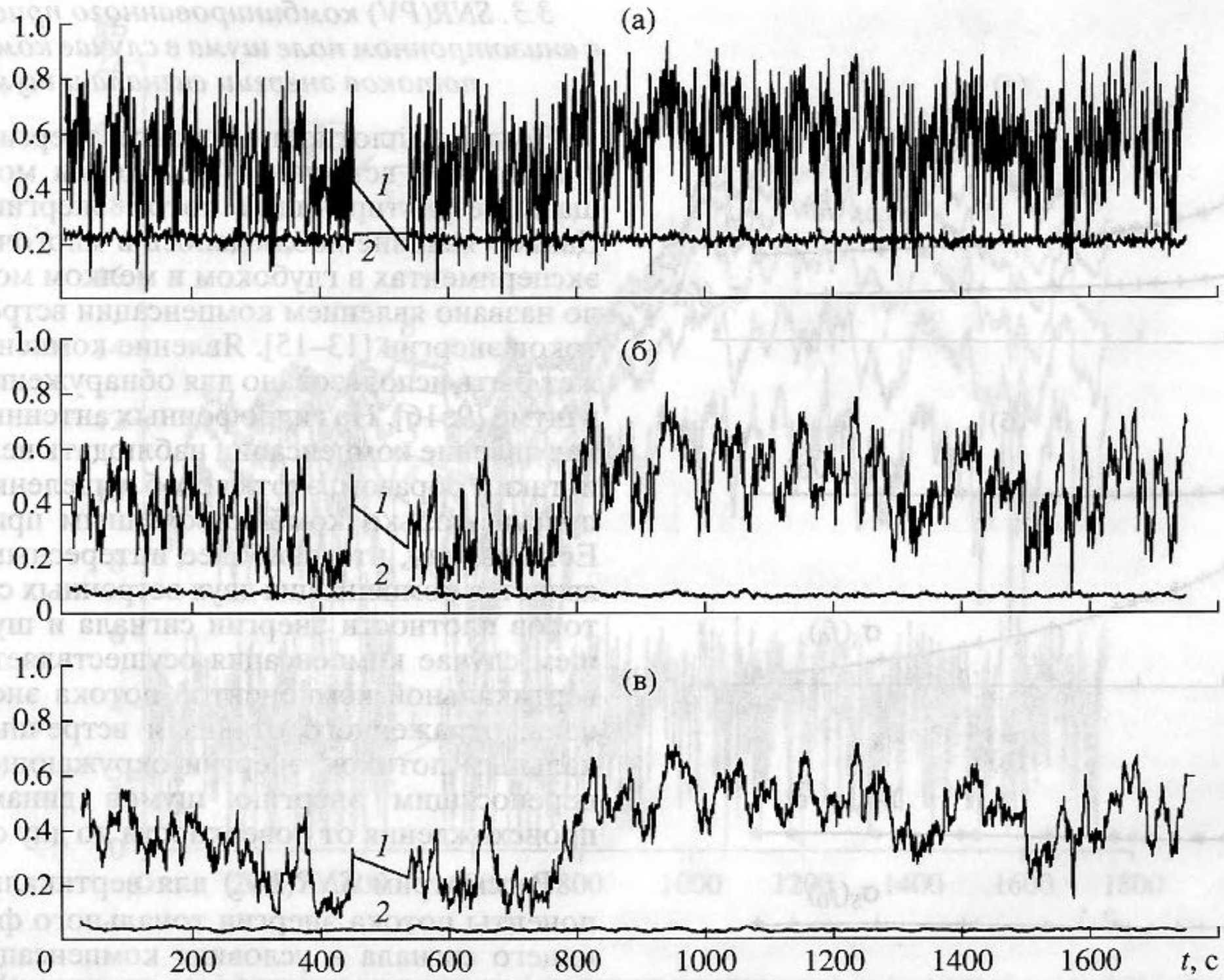

Рис. 2. Функция когерентности сигнала (*1*) $\gamma^2_{PV_y,S}(f_0)$ и шума (*2*) $\gamma^2_{PV_y,N}(f_0)$ на частоте f_0 = 622 Гц. Время усреднения спектров: а – 5 с, б – 15 с, в – 30 с. Полоса анализа 1 Гц. В интервале 450–510 с комбинированный приемник отключен (пауза радиоканала телеметрической системы).

$\gamma^2_{PV_y,N}(f_0)$ и его среднеквадратичное отклонение $\sigma_N(f_0)$, а также функция когерентности сигнала $\gamma^2_{PV_y,N}(f_0)$ и его среднеквадратичное отклонение $\sigma_S(f_0)$. Функция когерентности шума $\gamma^2_{PV_y,N}(f_0)$ и $\sigma_N(f_0)$ (рис. 3а) и функция когерентности сигнала $\gamma^2_{PV_y,S}(f_0)$ и $\sigma_S(f_0)$ вычислялись на двух временных интервалах реализации t_1 = 700–800 с (рис. 3б) и t_2 = 1200–1500 с (рис. 3в). Когерентность шума с ростом усреднения падает (рис. 3а). При усреднении с T_0 = 3 с $\gamma^2_{PV_y,N}(f_0) \pm \sigma_N(f_0) = 0.415 \pm 0.021$, но при усреднении с T_0 = 320 с $\gamma^2_{PV_y,N}(f_0) \pm \sigma_N(f_0) = 0.008 \pm 0.003$, так что уровень когерентности падает при этом на 17 дБ. Среднеквадратичное отклонение $\sigma_N(f_0)$ уменьшается при этом примерно на 8.5 дБ (от 0.021 до 0.003). Таким образом, по оси *y* мы имеем преобладающую диффузную компоненту шума. Когерентность сигнала (рис. 3б, 3в) при увеличении времени усреднения вначале уменьшается, но затем остается постоянной при времени усреднения до 320 с. Для слабого сигнала (рис. 3б) когерентность сигнала падает до времени усреднения 30 с и его среднеквадратичное отклонение $\sigma_S(f_0)$ уменьшается при увеличении времени усреднения. Для более мощного сигнала (рис. 3в) когерентность падает до времени усреднения 15 с и далее остается постоянной. Среднеквадратичное отклонение при этом также уменьшается до времени усреднения 15 с и далее остается постоянным. Вывод из рис. 3: когерентность сигнала при времени усреднения более 30 с есть величина постоянная, но когерентность шума уменьшается, уменьшается также и его среднеквадратичное отклонение.

Поскольку коэффициент усиления комбинированного приемника есть $10\lg\sqrt{\frac{B_0T_0}{2}\frac{\gamma^2_{PV,S}(f_0)}{\gamma^2_{PV,N}(f_0)}}$, то его величина должна расти в зависимости от увеличения времени усреднения. На рис. 4 приведена кривая коэффициента усиления комбинированного приемника в зависимости от времени *t* для временной реализации *t* = 1800 с при различных

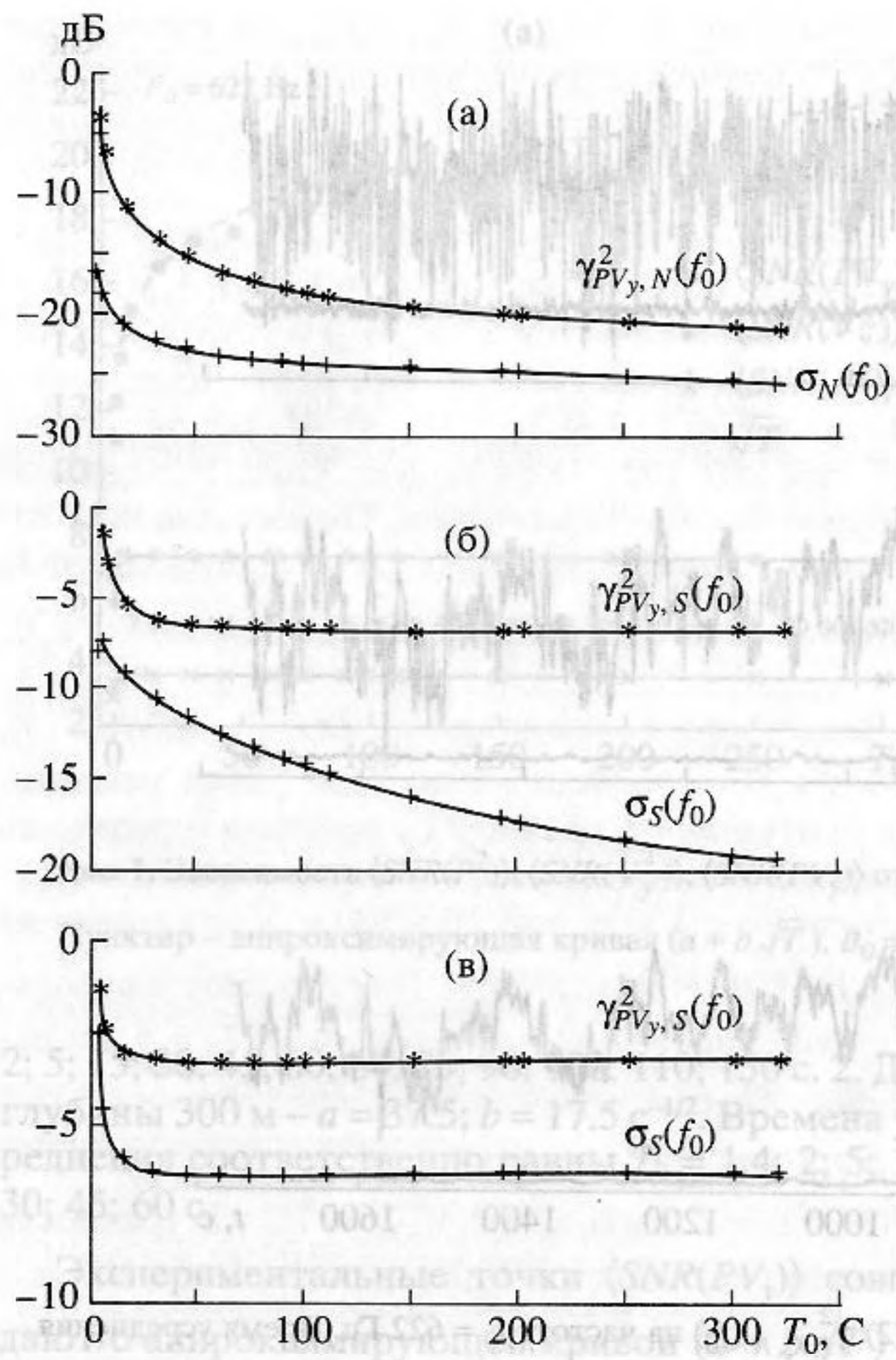

Рис. 3. Зависимость $\gamma^2_{PV_y,N}(f_0)$, $\sigma_N(f_0)$ и $\gamma^2_{PV_y,S}(f_0)$, $\sigma_S(f_0)$ от времени усреднения T_0. Уровень 0 дБ соответствует максимальному значению функции когерентности, равной единице.

временах усреднения T_0. Коэффициент усиления с течением времени t (но при T_0 = const) изменяется по величине, поскольку сигнал f_0 = 622 Гц флуктуирует, но с увеличением T_0 его величина растет. На рис. 5 представлена зависимость от T_0 коэффициента усиления комбинированного приемника, усредненная на двух интервалах времени: *1* – 700–800 с; *2* – 1200–1500 с. В данных интервалах превышение сигнала над шумом в спектрах давления постоянны. Знаки Δ, + обозначают экспериментальные точки. Сплошными кривыми обозначены аппроксимирующие зависимости $a + b\sqrt{T}$ (при B_0 = 1 Гц). Из рис. 5 следует, что зависимость $\left\langle 10\lg\sqrt{\frac{B_0T_0}{2}}\frac{\gamma^2_{PV,S}(f_0)}{\gamma^2_{PV,N}(f_0)}\right\rangle$ от T_0 аналогична зависимости $\langle SNR(PV_y)\rangle$ (рис. 1а, формула 13).

3.3. SNR(PV) комбинированного приемника в анизотропном поле шума в случае компенсации потоков энергии сигнала и шума

Векторы плотности потоков энергии сигнала и шума при встречном наложении могут обращать результирующий поток энергии в нуль. Данное явление наблюдалось в многочисленных экспериментах в глубоком и мелком морях и было названо явлением компенсации встречных потоков энергии [13–15]. Явление компенсации может быть использовано для обнаружения сигнала в шуме [9, 16]. На гидрофонных антенных решетках явление компенсации наблюдать невозможно и, таким образом, этот способ выделения сигнала присущ только комбинированным приемникам. Естественно, что наиболее интересным случаем является компенсация двух встречных слабых потоков плотности энергии сигнала и шума. В нашем случае компенсация осуществляется между вертикальной компонентой потока энергии сигнала, отраженного от дна и встречным вертикальным потоком энергии окружающего шума, переносящим энергию шумов динамического происхождения от поверхности ко дну океана.

Рассмотрим $SNR(PV_z)$ для вертикальной компоненты потока энергии тонального флуктуирующего сигнала в условиях компенсации. Пусть $S_{PV_z,N}(f_0)$ – компонента спектральной плотности потока энергии шума, идущего в направлении $+z$; $S_{PV_z,S}(f_0)$ – компонента спектральной плотности потока энергии сигнала, идущего в направлении $-z$. Сформируем $SNR(PV_z)$ следующим образом. Выражение $S_{PV_z,N}(f_0) - S_{PV_z,S}(f_0)$ равно результирующему потоку вдоль оси z; отнесем его к уровню шума $S_{PV_z,N}(f_0)$, так что

$$SNR(PV_z) = 10\lg\frac{S_{PV_z,N}(f_0) - S_{PV_z,S}(f_0)}{S_{PV_z,N}(f_0)} = 10\lg\left(1 - \frac{S_{PV_z,S}(f_0)}{S_{PV_z,N}(f_0)}\right). \quad (14)$$

В идеальном предельном случае полной компенсации $(S_{PV_z,S}(f_0))/(S_{PV_z,N}(f_0)) \longrightarrow 1$, тогда $SNR(PV_z) \longrightarrow -\infty$. При отсутствии сигнала $S_{PV_z,S}(f_0) = 0$ и $SNR(PV_z) = 0$. Таким образом, при компенсации встречных потоков энергии всегда $SNR(PV_z) < 0$. Рассмотрим пример реальной компенсации на частоте тонального сигнала f_0 = = 622 Гц. На рис. 6 приведены спектральные уровни S_{p^2} и S_{PV_z}. Время усреднения спектров 30 с. Усреднение экспоненциальное. Полоса анализа 1.5 Гц. Глубина "провала" в спектре S_{PV_z} (рис. 6) достигает –30 дБ, т.е. $SNR(PV_z)$ = –30 дБ. Физический

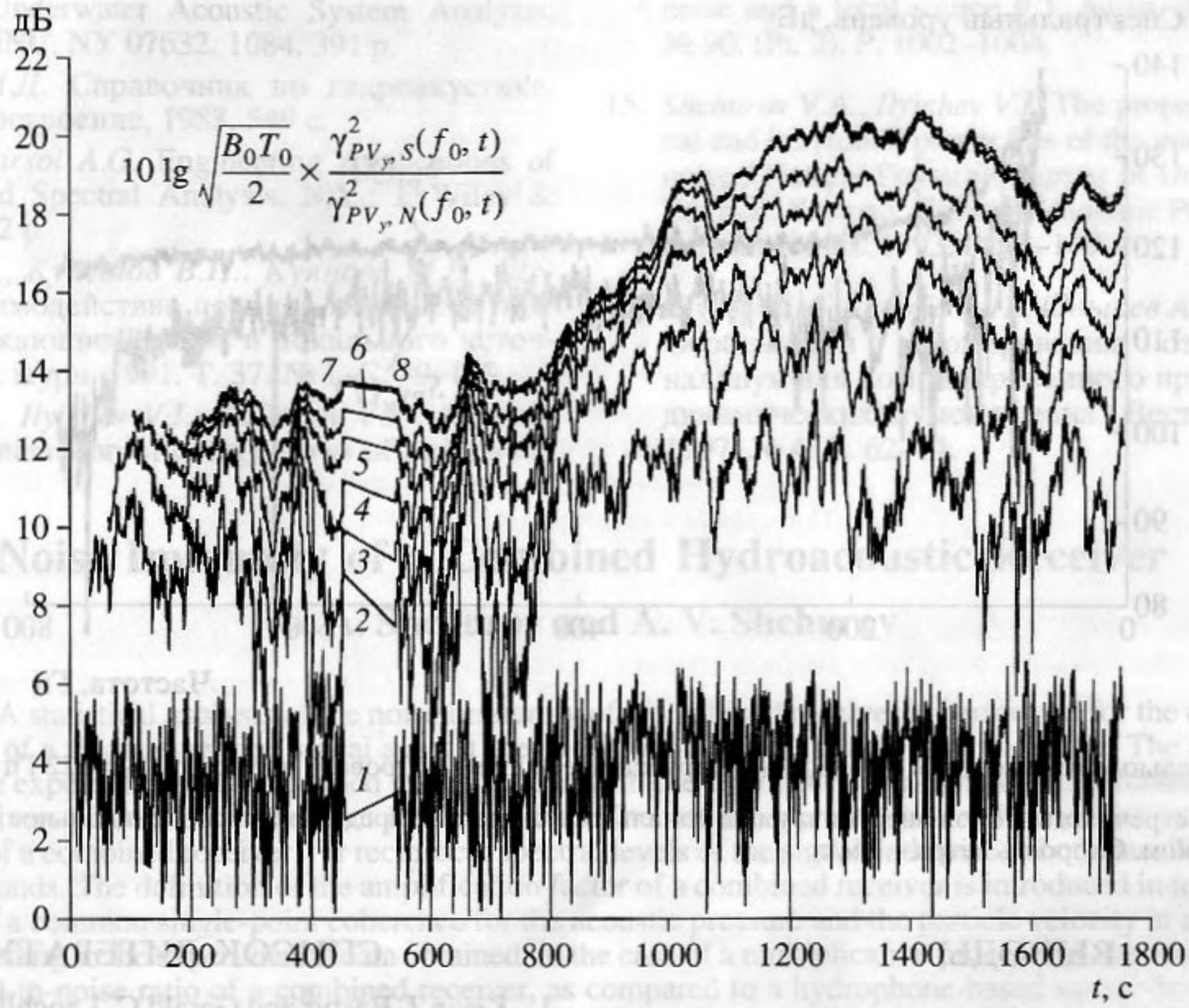

Рис. 4. Изменчивость коэффициента усиления комбинированного приемника на временной реализации длительностью $t = 1800$ с. Глубина измерения 150 м. Время усреднения спектров T_0; *1* – 5 с, *2* – 30 с, *3* – 50 с, *4* – 100 с, *5* – 150 с, *6* – 200 с, *7* – 300 с, *8* – 320 с. $B_0 = 1$ Гц.

смысл "провала" в спектре S_{PV_z} означает, что в полосе 1.5 Гц на частоте $f_0 = 622$ Гц результирующий поток энергии через единичную площадку, перпендикулярную к оси z и расположенную в точке приема, меньше в 10^3 раз (т.е. на 30 дБ) потока энергии окружающего шума при отсутствии сигнала. Таким образом, "провал" на частоте $f_0 = 622$ Гц указывает на присутствие слабого сигнала в окружающем шуме, поскольку величина скомпенсированного шумового потока энергии также мала.

Как показывает эксперимент [13–15], шумоподобные широкополосные сигналы, имеющие спектры $S_{P^2,S}$, подобные спектрам окружающего шума $S_{P^2,N}$, также идентифицируются при компенсации. Формула (14) для широкополосного сигнала в полосе f_2–f_1 имеет вид

$$SNR(PV_z) = 10\lg\left\{1-\int_{f_1}^{f_2} S_{PV_z,S}(f)df \Big/ \int_{f_1}^{f_2} S_{PV_z,N}(f)df\right\}.$$

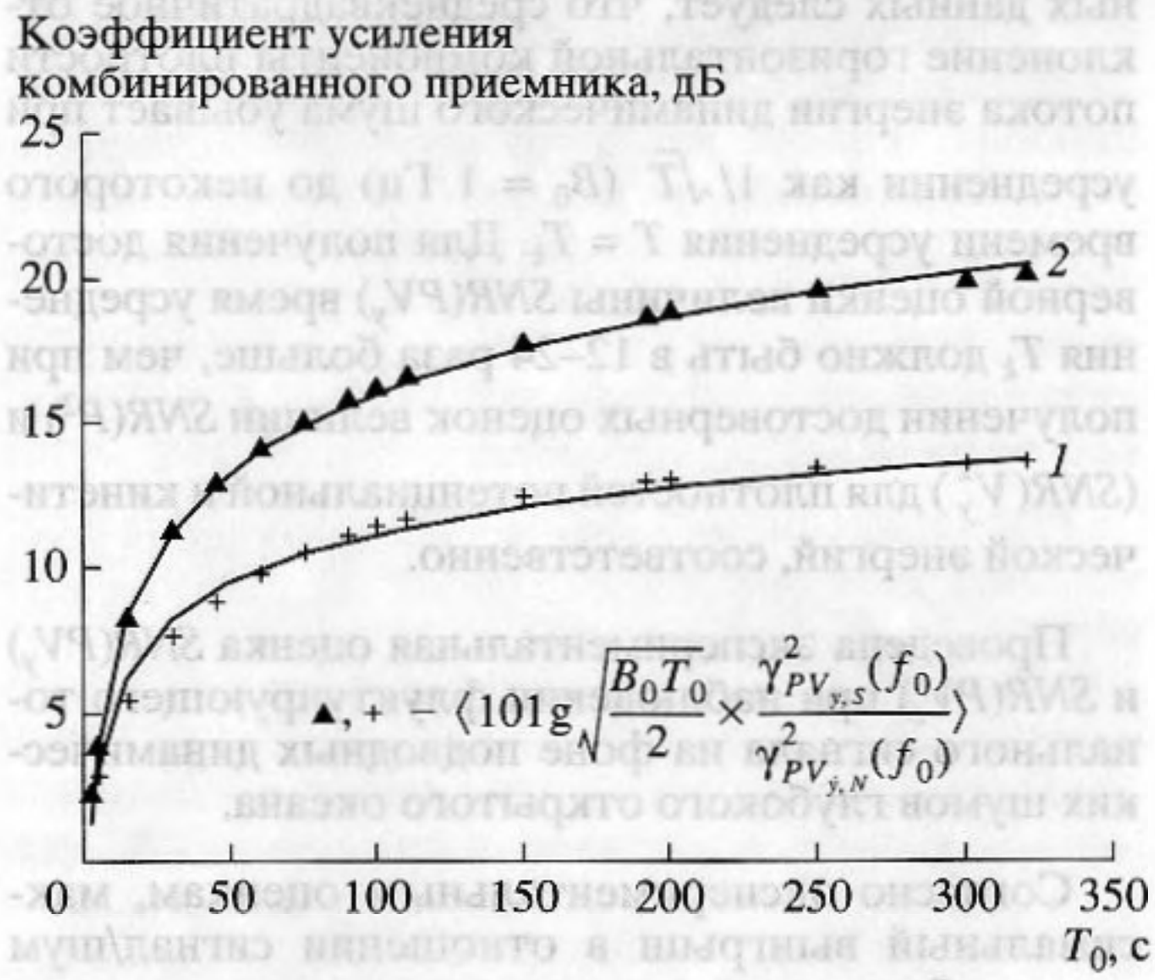

Рис. 5. Зависимость коэффициента усиления от времени усреднения T_0. Глубина измерения 150 м. + – соответствует интервалу времени 700–800 с. ▲ – соответствует интервалу времени 1200–1500 с на рис. 4. Сплошные кривые *1* и *2* соответствуют аппроксимирующим кривым $(a + b\sqrt{T})$, $B_0 = 1$ Гц.

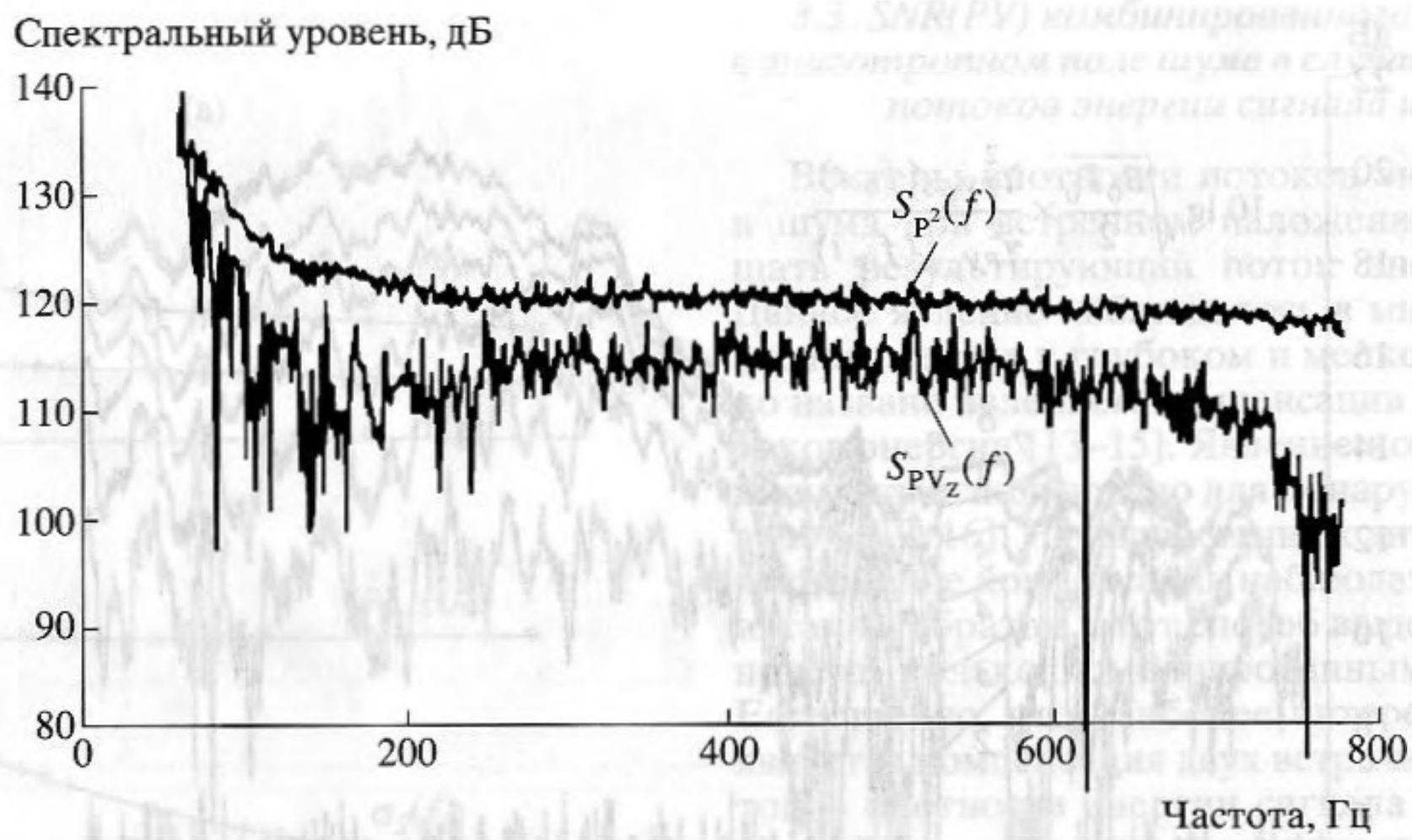

Рис. 6. Спектральные плотности $S_{P^2}(f)$, $S_{PV_z}(f)$ окружающего шума. "Провал" на частоте f_0 = 622 Гц есть результат компенсации встречных потоков энергии шума и тонального сигнала. Усреднение экспоненциальное – 30 с. Глубина измерения – 150 м. Скорость ветра – 7 м/с.

ВЫВОДЫ

Получены теоретические соотношения для *SNR*(*PV*) одиночного комбинированного приемника и введено понятие коэффициента усиления комбинированного приемника при мультипликативной обработке для узкой и широкой полос частот.

Из статистической обработки экспериментальных данных следует, что среднеквадратичное отклонение горизонтальной компоненты плотности потока энергии динамического шума убывает при усреднении как $1/\sqrt{T}$ (B_0 = 1 Гц) до некоторого времени усреднения $T = T_k$. Для получения достоверной оценки величины $SNR(PV_y)$ время усреднения T_k должно быть в 12–24 раза больше, чем при получении достоверных оценок величин $SNR(P^2)$ и ($SNR(V_y^2)$ для плотностей потенциальной и кинетической энергий, соответственно.

Проведена экспериментальная оценка $SNR(PV_y)$ и $SNR(PV_z)$ при наблюдении флуктуирующего тонального сигнала на фоне подводных динамических шумов глубокого открытого океана.

Согласно экспериментальным оценкам, максимальный выигрыш в отношении сигнал/шум для комбинированного приемника, измеряющего плотность потока энергии, перед гидрофоном, измеряющим плотность потенциальной энергии, составляет 15–16 дБ для горизонтальной и до 30 дБ для вертикальной плотности потока энергии в случае компенсации встречных потоков энергии сигнала и шума.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kevin J.* Bastyr and Gerald C. Lanchll Development of a velocity gradient underwater acoustic intensity sensor // J. Acoust. Soc. Amer. 1999. V. 106. № 6. P. 3178–3188.
2. *Скребнев Г.К.* Комбинированные гидроакустические приемники. С.-Пб.: Элмор, 1997. 200 с.
3. *D'Spain G.L.* Polarization of Acoustic Particle Motion in the Ocean and its Relation to Vector Acoustic Intensity / 2-nd Inter. Workshop on Acoust. Engin. And Technology. Harbin, China. 1999. P. 143–164.
4. *D'Spain G.L. et al.* Initial Analysis of the Data from the Vertical DIFAR Array // IEEE, Reprinted from Proc. of Mastering the Oceans through Technology. Newport. 1992. P. 346–351.
5. *Смарышев М.Д., Шендров Е.Л.* Помехоустойчивость плоских антенн в анизотропном поле помех // Акуст. журн. 1985. Т. 31. № 4. С. 502–506.
6. *Гордиенко В.А., Ильичев В.И., Захаров Л.Н.* Векторно-фазовые методы в акустике. М.: Наука, 1989. 223 с.
7. *Дороднова И.А., Ольшевский В.В.* Характеристики обнаружения гидроакустических сигналов на фоне помех при использовании комбинированных приемников / Модели и алгоритмы построения систем и комплексов обработки акустической информации. Сб. научных трудов ЛИАП. Под ред. В.И. Ильичева и А.П. Лукошкина. Л., 1990. С. 112–117.
8. *Пасечный С.В.* Сравнительная оценка помехоустойчивости плоских решеток и линейных комбинированных антенн в волноводе // Там же. С. 106–112.
9. *Щуров В.А.* Современное состояние и перспективы измерения акустической интенсивности в подводной акустике / Препринт. ТОИ ДВО РАН. Владивосток, 1998. 43 с.

10. *Burdic W.S.* Underwater Acoustic System Analysis. Prentice-Hall, INC. NY 07632, 1084. 391 p.
11. *Смарышев М.Д.* Справочник по гидроакустике. Гл. 8. Л.: Судостроение, 1988. 549 с.
12. *Bendat J.S., Pirsol A.G.* Engineering Applications of Correlation and Spectral Analysis. N.Y.: J. Wiley & Sons, 1980. 312 p.
13. *Ильичев В.И., Кулешов В.П., Куянова М.В., Щуров В.А.* Взаимодействие потоков мощности подводных окружающих шумов и локального источника // Акуст. журн. 1991. Т. 37. № 1. С. 99–103.
14. *Shchurov V.A., Ilyichev V.I., Kuleshov V.P., Kuyanova M.V.* The interaction of energy flows of underwater noise and a local source // J. Acust. Soc. Amer. 1991. № 90. (Pt. 2). P. 1002–1004.
15. *Shchurov V.A., Ilyichev V.I.* The properties of the vertical and horizontal power flos of the underwater ambient noise / Natural Physical Sources of Underwater Sound. Ed: B.R. Kerman. Kluwer Academic Publishers. Printed in Netherlands. 1993. P. 93–109.
16. *Щуров В.А., Дзюба В.П., Швырев А.Н., Щуров А.В.* Особенности формирования отношения сигнал/шум для комбинированного приемника в поле динамических шумов океана / Вестник ДВО РАН. 1997. № 4. С. 62–74.

Noise Immunity of a Combined Hydroacoustic Receiver

V. A. Shchurov and A. V. Shchurov

Abstract—A statistical analysis of the noise immunity of a combined receiver is performed for the case of the observation of a fluctuating tone signal against the background of underwater dynamic noise. The analysis is based on the experimental data obtained in deep ocean with the use of two four-component combined hydroacoustic receivers positioned at depths of 150 and 300 m. Theoretical expressions are obtained for the signal-to-noise ratio of a combined receiver, for reciprocal spectral levels of the signal and noise in both narrow and wide frequency bands. The definition of the amplification factor of a combined receiver is introduced in terms of the functions of a common single-point coherence for the acoustic pressure and the particle velocity in an acoustic wave. According to the experimental data obtained, in the case of a multiplicative processing, the maximal gain in the signal-to-noise ratio of a combined receiver, as compared to a hydrophone-based square-law detector, can reach 15–16 dB for the horizontal channel and 30 dB for the vertical channel of the combined receiver in the case of the compensation of opposing flows of the signal and noise energy.