

О. С. Громашева, В. А. Юхновский

*Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева ДВО РАН
Россия, 690041, Владивосток, ул. Балтийская, 4; e-mail: gromasheva@poi.dvo.ru*

О выборе частоты и мощности излучаемых сигналов, фазоманипулированных по М-последовательностям

Получена 19.02.2010, опубликована 20.05.2010

При проведении томографических исследований океана зондирование среды может осуществляться сложными фазоманипулированными по М-последовательностям сигналами. В статье дано теоретическое обоснование выбора достаточной мощности излучаемого сигнала для различных частот, обеспечивающих необходимое соотношение сигнал/помеха. Приведенные в работе соотношения позволяют оценить допустимые погрешности эксперимента, определить параметры акустических систем для исследования морской среды.

Ключевые слова: сложные фазоманипулированные сигналы, псевдослучайные М-последовательности, соотношение сигнал/помеха.

ВВЕДЕНИЕ

Более десяти лет на морском гидрофизическом полигоне ТОИ ДВО РАН МЭС «Мыс Шульца» в районе бухты Витязь проводятся экспериментальные работы с целью изучения прохождения акустических сигналов на стационарных и квазистационарных трассах. Одновременно измеряются гидрофизические параметры среды. Результаты экспериментальных и теоретических исследований [1] показали, что полученные в измерениях характеристики акустических сигналов хорошо коррелируют с изменяющимися гидрофизическими параметрами, которые определяют свойства морской среды. В качестве излучаемых сигналов наряду с тональными используются сложные сигналы, сформированные на основе М-последовательностей. М-последовательностями называют последовательности максимальной длины или максимально возможного периода (равного $N=2^n-1$), генерируемые n -каскадным двоичным сдвиговым регистром с линейной обратной связью. Наиболее важная особенность М-последовательности состоит в том, что ее автокорреляционная функция равна N при отсутствии сдвига и -1 для всех остальных значений сдвига ($1 \leq i < N$), т.е. оптимальна в классе возможных автокорреляционных функций двоичных последовательностей периода $N=2^n-1$. Сигналы в виде несущей, фаза которых манипулирована М-последовательностью (в англоязычной литературе такой сигнал называют М-последовательностью на несущей) обладают практически теми же

свойствами, что и модулирующая последовательность. Такие сигналы принято считать наилучшими тестовыми сигналами в силу простоты реализации, точной повторяемости, малых ошибок, связанных со свойствами такого сигнала.

Применение таких сигналов в качестве зондирующих позволило разделить модовую структуру, одновременно определить пространственные и частотно-временные характеристики морской среды, которые в свою очередь зависят от поверхностных и внутренних волн, течений, изменчивости скорости звука по трассе распространения сигнала. Прием сигналов осуществляется полем радиогидроакустических буев с передачей информации по радиоканалу. Излучение производится на разных частотах, с использованием широкополосных и резонансных излучателей. Эксперименты проводились в различных помеховых ситуациях, связанных с погодными условиями, либо обусловленных техногенными причинами. Правильный выбор мощности излучения для используемых частот обеспечит достоверные измерения на трассах различной протяженности с разным уровнем помех. Полученные в работе соотношения позволяют определять параметры акустических систем для исследования морской среды.

1. ОБОСНОВАНИЯ ВЫБОРА МОЩНОСТИ

Для обеспечения достаточной мощности в разной помеховой ситуации и на различных дистанциях при проведении горизонтального зондирования среды нужно знать выражение для отношения сигнал/помеха в зависимости от частоты. Отношение сигнал/помеха определим как отношение пикового значения интенсивности сигнала после его взаимно-корреляционной обработки с эталонным сигналом $u(t)$ к дисперсии помехи [1]. Так как сигналы, пришедшие в точку приема по разным лучам, в результате обработки разделяются во времени, то будем рассматривать сигнал, пришедший по одному из лучей. Обозначим его $P_s s(t)$, где $s(t)$ — функция, описывающая циклически повторяющийся с периодом T фазоманипулированный зондирующий сигнал единичной амплитуды; P_s — амплитуда сигнала в точке приема. Его функция взаимной корреляции с эталонным сигналом $u(t)$ записывается в виде $R_s(t) = P_s T \sum_{k=-\infty}^{\infty} C_k^2 \exp\left(j \frac{2\pi k}{T} t\right)$.

Отсюда видно, что максимальное значение $R_{s\max}$ взаимно-корреляционной функции $R_s(t)$ равно $R_{s\max} = P_s T \sum_{k=-\infty}^{\infty} C_k^2$. Если перейти от спектрального представления $R_{s\max}$ к временному, то получим $R_{s\max} = P_s \int_{-T/2}^{T/2} s^2(t) dt$.

Найдем выражение для дисперсии шумовой помехи [2]. Пусть $x(t)$ — функция, описывающая какую-либо ее реализацию. В результате взаимно-корреляционной обработки этой реализации с эталонным сигналом будем иметь $n(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) u(\tau - t) d\tau$.

Возведя $n(t)$ в квадрат и выполнив статистическое усреднение по ансамблю реализаций шумовой помехи, получим

$$\sigma_n^2 = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} B_x(\tau, \tau') u(\tau - t) u(\tau' - t) d\tau d\tau', \quad (1)$$

где σ_n^2 — дисперсия помехи после взаимно-корреляционной обработки; $B_x(\tau, \tau')$ — функция автокорреляции шумовой помехи $x(t)$.

Шумы моря, которые играют роль шумовой помехи, можно считать стационарными в широком смысле слова. Поэтому $B_x(\tau, \tau') = B_x(\tau - \tau')$ и $B_x(\tau - \tau') = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_x(\omega) \exp[j\omega(\tau - \tau')] d\omega$, где $G_x(\omega)$ — энергетический спектр (спектральная плотность) шумов моря. Подставив это выражение в интеграл (1), получим $\sigma_n^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_x(\omega) |G(\omega)|^2 d\omega$.

Для упрощения дальнейших вычислений примем, что спектральная плотность $G_x(\omega)$ равномерна в пределах полосы частот, занимаемой спектром зондирующего сигнала, и равна $G_0/2$, где G_0 — значение односторонней спектральной плотности на несущей частоте зондирующего сигнала. Тогда

$$\sigma_n^2 = \frac{G_0}{2} \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |G(\omega)|^2 d\omega = \frac{G_0}{2} \int_{-\infty}^{\infty} u^2(t) dt = \frac{G_0}{2} \int_{-T/2}^{T/2} s^2(t) dt.$$

Теперь для отношения сигнал/помеха можно записать

$$q^2 = R_{s_{\max}}^2 / \sigma_n^2 = 2P_s^2 \int_{-T/2}^{T/2} s^2(t) dt / G_0.$$

Так как сигнал $s(t)$ имеет единичную амплитуду, то $\int_{-T/2}^{T/2} s^2(t) dt = T/2$. В результате получаем следующую формулу для отношения сигнал/помеха

$$q^2 = P_s^2 T / G_0. \quad (2)$$

Высокую разрешающую способность по времени можно получить, если вместо фазоманипулированного сигнала, промодулированного M -последовательностью, использовать в качестве зондирующего импульса один элемент этого сигнала (то есть прямоугольный импульс с синусоидальным заполнением длительностью $\tau_0 = n_0 / f_0$, где n_0 — число периодов несущей частоты f_0 , содержащееся в одном элементе фазоманипулированного сигнала) и осуществлять взаимно-корреляционную обработку принятого сигнала с таким же импульсом единичной амплитуды. При этом функция взаимной корреляции будет иметь такую же форму, что и в случае фазоманипулированного сигнала [3].

Найдем отношение сигнал/помеха при излучении прямоугольного импульса с синусоидальным заполнением, обозначив амплитуду сигнала, пришедшего в точку приема по рассматриваемому лучу, P_{1s} .

Максимальное значение функции взаимной корреляции этого сигнала с эталонным равно

$$R_{1s\max} = P_{1s} \int_{-\tau_0/2}^{\tau_0/2} \sin^2 2\pi f_0 t dt = P_{1s} \tau_0 / 2. \quad (3)$$

Дисперсию помехи после взаимно-корреляционной обработки находим способом, примененным выше для случая использования фазоманипулированного сигнала. В результате получаем

$$\sigma_n^2 = \frac{G_0}{2} \int_{-\tau_0/2}^{\tau_0/2} \sin^2 2\pi f_0 t dt = G_0 \tau_0 / 4. \quad (4)$$

Теперь, на основании формул (2) и (4), можно записать следующее выражение для отношения сигнал/помеха

$$q^2 = P_{1s}^2 \tau_0 / G_0. \quad (5)$$

Как видно из формул (2) и (5), для того, чтобы после оптимальной обработки принятого сигнала обеспечивалось одинаковое отношение сигнал/помеха при использовании фазоманипулированных и прямоугольных зондирующих импульсов, должно выполняться следующее соотношение

$$P_s^2 T = P_{1s}^2 \tau_0. \quad (6)$$

Амплитуды приходящих сигналов P_s и P_{1s} пропорциональны давлениям, создаваемым вблизи источника звука (например, на расстоянии 1 м). Поэтому величины P_s^2 и P_{1s}^2 пропорциональны акустической мощности источника, а величины $P_s^2 T$ и $P_{1s}^2 \tau_0$ – энергии акустического излучения. Это позволяет на основании соотношения (6) заключить, что для обеспечения одинакового отношения сигнал/помеха энергия, приходящаяся на один цикл излучения, должна быть одинакова, а акустические мощности должны отличаться в $P_{1s}^2 / P_s^2 = T / \tau_0 = N = 2^n - 1$ раз, где N – число элементов в одном периоде фазоманипулированного зондирующего сигнала. Если фазоманипулированный сигнал формируется десятикаскадным регистром сдвига, то $n=10$ и $N=1023$. Это означает, что для получения отношения сигнал/помеха, которое наблюдается при использовании фазоманипулированного сигнала, в случае излучения прямоугольного импульса потребуется мощность в 1023 раза большая. Таким образом, фазоманипулированные сигналы позволяют реализовать высокую разрешающую способность по времени при малой мощности излучения. Они позволяют также иметь одновременно достаточно высокую разрешающую способность по частоте, которая определяется периодом T и, следовательно, числом элементов N в M -последовательности, модулирующей по фазе зондирующий сигнал. У прямоугольного импульса с синусоидальным заполнением длительностью τ_0 разрешение по частоте будет (по порядку величин) в N раз меньше.

Запишем выражение для отношения сигнал/помеха (2) в виде функции от частоты заполнения f_0 зондирующего сигнала. Обозначим W_a мощность акустического излучения источника звука. Для ненаправленного источника $W_a = 2\pi P_1^2 / \rho c$, где P_1 — амплитуда давления, создаваемого источником на расстоянии 1 м. Отсюда $P_1 = (W_a \rho c / 2\pi)^{1/2}$.

Амплитуда сигнала при распространении на расстояние R уменьшается как вследствие расхождения фронта волны, так и вследствие частотнозависимого затухания звука в морской среде. Ослабление сигнала за счет расхождения фронта волны учитывается коэффициентом $F(R)^{1/2} / R$, где $F(R)$ — фактор фокусировки для луча, по которому распространяется сигнал. Если расстояние измеряется в км, то этот коэффициент будет равен $F(R)^{1/2} 10^{-3} / R$.

Ослабление сигнала из-за затухания звука будем описывать коэффициентом затухания $\beta(f_0) = 0,036 f_0^{3/2}$ дБ/км, где f_0 — несущая частота сигнала в кГц. Поэтому уменьшение амплитуды сигнала вследствие затухания будем учитывать коэффициентом $10^{-0,0018 f_0^{3/2} R}$.

С учетом этих коэффициентов имеем для амплитуды сигнала в точке приема:

$$P_s = P_1 \frac{F(R)^{1/2}}{R} 10^{-3} 10^{-0,0018 f_0^{3/2} R} = \left[\frac{W_a \rho c F(R)}{2\pi R^2} \right]^{1/2} 10^{-3} 10^{-0,0018 f_0^{3/2} R}.$$

Энергетический спектр $G_x(\omega)$ шумов моря, которые в данном случае являются основными помехами приему сигналов, на частотах выше 1...2 кГц обычно описывают функцией

$$G_x(2\pi f) = A(u) / f^n, \quad (7)$$

где $A(u)$ — коэффициент, зависящий от скорости ветра u .

Для оценки параметров $A(u)$ и n , входящих в формулу (7), были использованы зависимости спектрального уровня шумов моря от частоты для скоростей ветра 2,5; 5; 7,5; 10 м/с [4]. После аппроксимации этих зависимостей функцией (7) в диапазоне частот 2–10 кГц с использованием метода наименьших квадратов получены следующие значения параметров:

$$n = 2,16; A(2,5) = 0,22 \cdot 10^{-6}; A(5) = 1,2 \cdot 10^{-6}; A(7,5) = 5,5 \cdot 10^{-6}; A(10) = 12 \cdot 10^{-6}.$$

При этих значениях параметров частота в формуле (7) выражается в кГц, а спектральная плотность $G_x(2\pi f)$ — в Па²/Гц. Теперь для отношения сигнал/помеха можно записать:

$$q^2 = \frac{W_a \rho c F(R) T}{2\pi R^2 A(u)} f_0^{2,16} 10^{-(6 + 0,0036 f_0^{3/2} R)}. \quad (8)$$

Таким образом, обеспечение необходимого соотношения сигнал/помеха позволяют уменьшить мощность зондирующего сигнала в $N-1$ раз по отношению к импульсным сигналам, обеспечивающим ту же необходимую точность определения времени прихода сигналов.

2. ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ЧАСТОТЫ ЗАПОЛНЕНИЯ СИГНАЛА

Найдем выражение для оптимальной частоты заполнения сигнала, приравняв нулю производную от q^2 по f_0 и решить полученное уравнение относительно f_0 .

Параметры сигнала, характеризующие его разрешающую способность по времени и частоте выбираются в зависимости от решаемой задачи заранее. Поэтому период T циклического излучения сигнала, определяющий разрешающую способность по частоте, при дифференцировании следует считать постоянной величиной. Учитывая это, получаем

$$f_{opt} = 31,13 / R^{2/3}. \quad (9)$$

Рассчитанные значения оптимальных частот в зависимости от протяженности трасс распространения звука приведены в таблице 1.

Таблица 1

Значения оптимальных частот в зависимости от протяженности трасс

R , км	2	4	6	8	12
f_{opt} , кГц	19,61	12,35	9,43	7,78	5,94

Мощность акустического излучения определяется из выражения (8)

$$W_a = \frac{2\pi R^2 A(u) q^2}{\rho c F(R) T} f_0^{-2,16} 10^{6+0,0036 f_0^{3/2} R}. \quad (10)$$

Чтобы найти мощность W_{a0} , обеспечивающую заданное превышение сигнала над уровнем помех на оптимальной частоте, подставим (9) в это соотношение. Тогда получим

$$W_{a0} = 15,8 \cdot 10^3 \frac{A(u) R^{3,44} q^2}{\rho c F(R) T}. \quad (11)$$

Используя эту формулу, оценим мощность акустического излучения для различных значений q и R , приняв $\rho = 1000$ кг/м³, $c = 1500$ м/с, $F(R)=1$, $T=1$ с. Скорость ветра u положим равной 10 м/с ($A(u) = A(10) = 12 \cdot 10^{-6}$), то есть рассмотрим случай сильного ветра, когда наблюдается значительное волнение (состояние поверхности моря около 5 баллов). Результаты вычислений приведены в таблице 2, где мощность дана в ваттах, а также на рис. 1.

Как видно из формулы (10), требуемая мощность излучения обратно пропорциональна фактору фокусировки $F(R)$ и периоду T циклического излучения зондирующего сигнала, что позволяет легко найти мощность излучения для любых значений величин $F(R)$ и T .

Таблица 2

Мощность акустического излучения для различных значений отношения сигнал/помеха на различных дистанциях

$R, \text{ км}$ q	2	4	6	8	12
10	$1,37 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$6,0 \cdot 10^{-3}$	0,016	0,065
20	$5,5 \cdot 10^{-4}$	$6,0 \cdot 10^{-3}$	0,024	0,065	0,26
30	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$13 \cdot 10^{-3}$	0,054	0,14	0,59
40	$2,2 \cdot 10^{-3}$	0,024	0,096	0,26	1,0
50	$3,4 \cdot 10^{-3}$	0,037	0,15	0,40	1,6

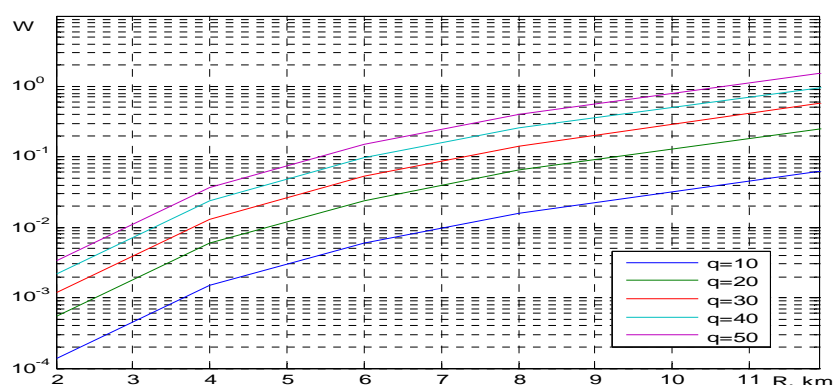


Рис.1. Зависимость мощности акустического излучения от расстояния для различных значений отношения сигнал/помеха q

Проанализируем влияние отклонения несущей частоты f_0 от оптимального значения f_{opt} на величину требуемой мощности излучения.

Обозначим через α отношение несущей частоты к ее оптимальному значению, то есть $\alpha = f_0 / f_{opt}$. Тогда, для отношения мощностей, обеспечивающих на этих частотах при прочих равных условиях одинаковое отношение сигнал/помеха, можно на основании формул (9) и (10) записать $\frac{W_a}{W_{a0}} = \frac{1}{\alpha^{2,16}} 10^{0,625(\alpha^{3/2}-1)}$.

Результаты вычислений позволили построить зависимость отношения мощностей $\frac{W_a}{W_{a0}}$ от отношения несущей частоты к ее оптимальному значению $\alpha = f_0 / f_{opt}$. Данная зависимость приведена на рис.2.

Из полученных выражений видно, что использование в экспериментальных исследованиях зондирующих сигналов в диапазоне оптимальных частот и близких к оптимальным позволяет уменьшать требуемую мощность.

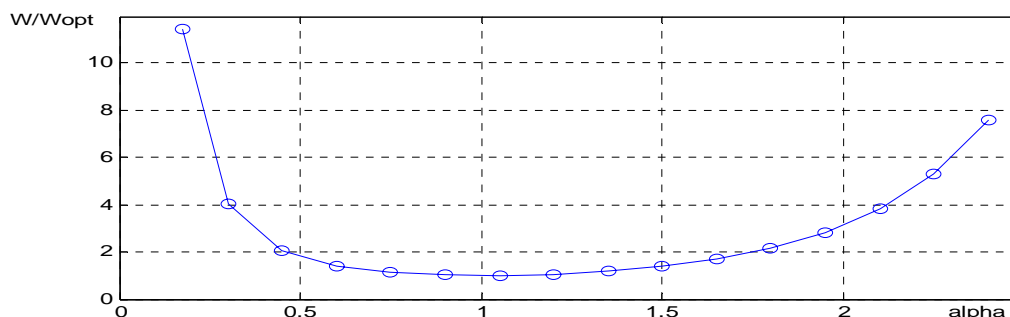


Рис. 2 Зависимость отношения мощностей W_a/W_{a0} к отношению несущей частоты к ее оптимальному значению $\alpha = f_0 / f_{opt}$.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве иллюстрации справедливости теоретически полученных соотношений можно привести фрагмент результатов обработки данных, полученных в береговой экспедиции на МЭС «Мыс Шульца» отряда акустической томографии в период с 24 мая по 24 ноября 2006 г. Основные экспериментальные исследования проводились по различным трассам. В данной работе рассмотрим одну из них, протяженность которой составила 15 км. [4].

В эксперименте был задействован низкочастотный широкополосный излучатель с полосой от 20 до 1000 Гц, который опускался на глубину 15 м. В качестве задающего генератора использовался портативный компьютер, на котором в одном файле были представлены все режимы излучения для одного погружения излучателя. Структура излучаемых сигналов приведена на рис. 3

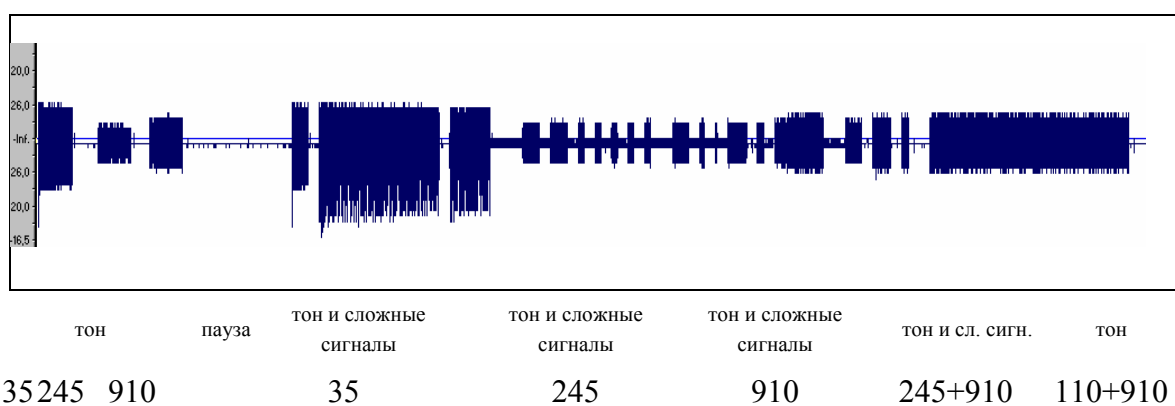


Рис. 3. Структура сигнала, излученного в эксперименте 24–25 сентября 2006 г. Цифрами представлена частота в герцах для каждого фрагмента излучения

Зондирование морской среды осуществлялось тональными и сложными фазоманипулированными М-последовательностями сигналами, принимаемыми гидрофонами радиогидроакустических буюв. Заглубление гидрофонов составляло 20 м, буй устанавливался на расстоянии 2,5...5 км друг от друга по трассе с изменяющейся глубиной от 60 до 32 м. На береговом посту осуществлялся приём сигналов по радиоканалам и их регистрация с помощью многоканальной платы АЦП L-780 на жёсткий диск компьютера Pentium 4.

Обработка данных проводилась с помощью специально разработанного математического обеспечения спектральными и корреляционными методами. В качестве примера приведем результаты корреляционной обработки принятых сложных фазманипулированных сигналов, излучаемых на частотах 245 Гц и 910 Гц, позволившие оценить времена прихода сигналов на гидрофоны РГБ [5].

Фрагменты расчёта взаимнокорреляционных функций принятых сигналов с эталонными сигналами приведены на рисунках 4 и 5.

Радиогидроакустические буй №01, №2 и №3 были расположены по трассе на одной прямой. Гидрофон РГБ №01 находился на расстоянии 5 км от излучателя, буй №02 был удален на 7,5 км, РГБ №03 — на 10 км от излучателя.

На рис. 4 приведена взаимнокорреляционная функция эталонного сигнала на частоте 245 Гц и принятого сигнала, состоящего из тонального сигнала (15 с), утроенной посылки фазоманипулированного сигнала, сформированной на основе 7-разрядной М-последовательности (10 периодов на символ) и следующей за ней пяти одиночных посылок.

На рис. 5 приведен результат корреляционной обработки на частоте 910 Гц эталонного сигнала и принятого сигнала, состоящего из тонального сигнала (15 с), утроенной посылки фазоманипулированного сигнала, сформированной на основе 9 разрядной М-последовательности и следующей за ней одиночной посылки. Анализ результатов обработки показал, что все корреляционные максимумы хорошо разрешаются, что позволило определить время прихода сигналов ко всем гидрофонам РГБ.

Уровень корреляционного шума, определяемый присутствием тонального сигнала, повышается с расстоянием на частоте 245 Гц. Частота 910 Гц является менее чувствительной для шума тонального сигнала при корреляционной обработке. Для расстояний порядка 5 км для РГБ №1 наиболее близкой к оптимальной является частота 910 Гц, для буй №3 при расстоянии 10 км – частота 245 Гц.

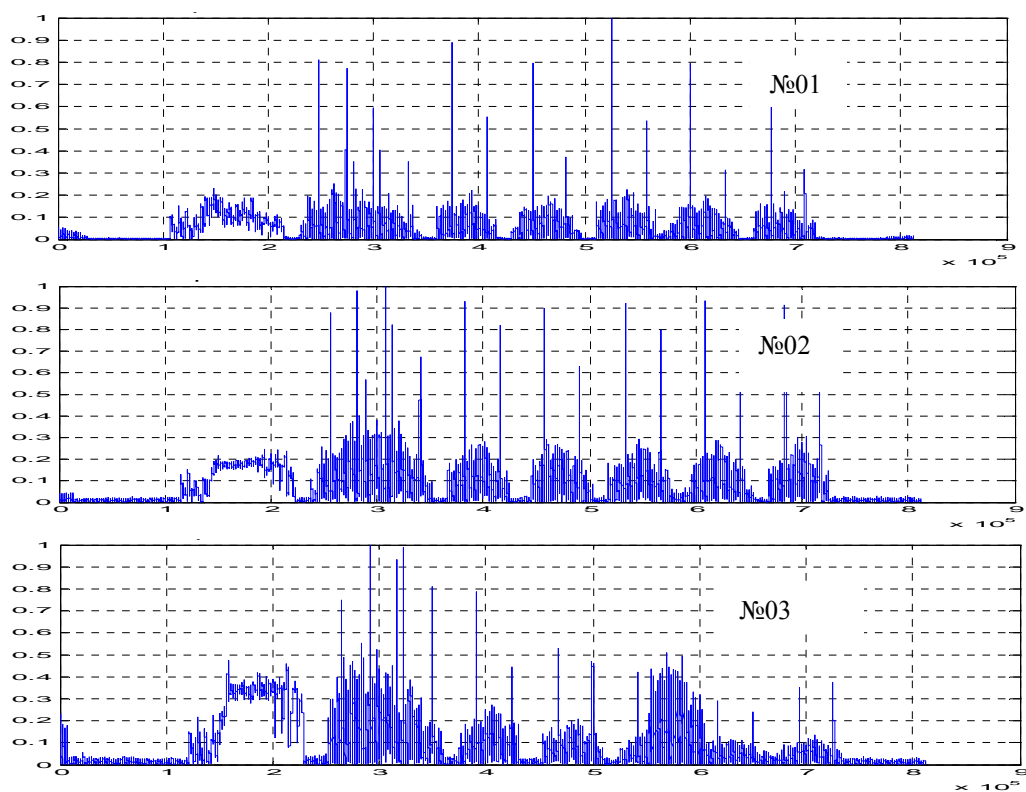


Рис. 4. Пример корреляционной обработки принятых сигналов для излучения 245 Гц

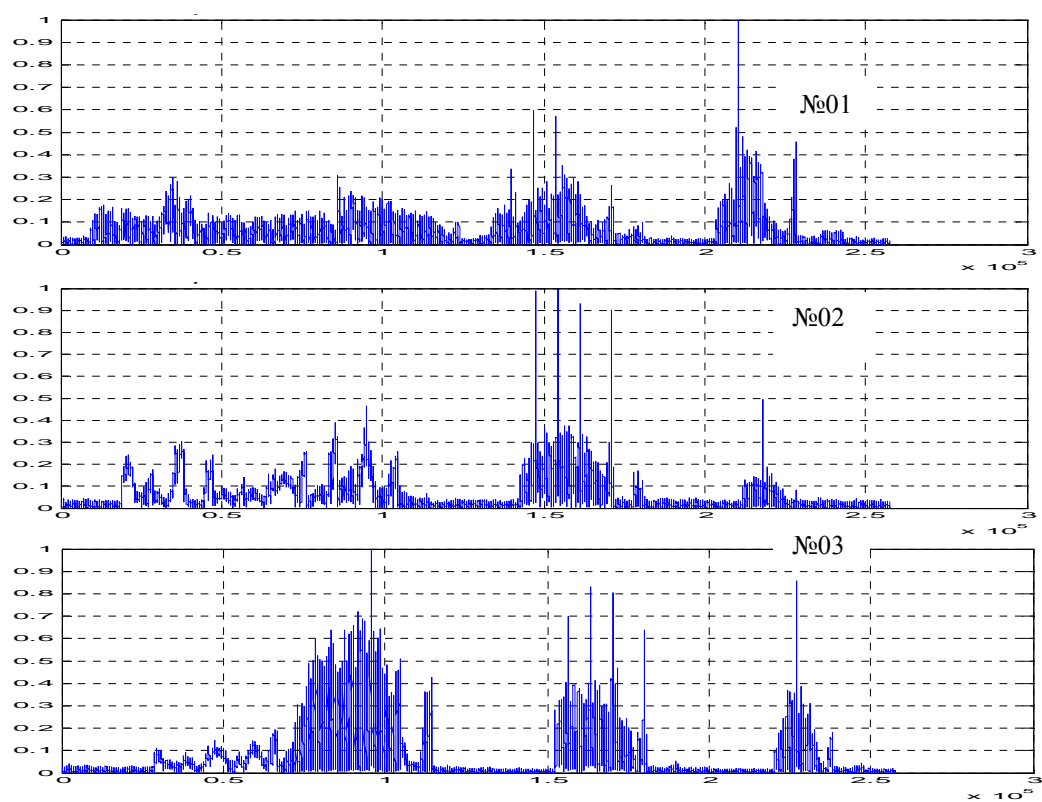


Рис. 5. Пример корреляционной обработки принятых сигналов для излучения 910 Гц

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе дано обоснование выбора достаточной мощности сигнала для различных частот, обеспечивающих необходимое соотношение сигнал/помеха. Проблема выбора параметров излучения является актуальной при планировании экспериментов. К сожалению, технически не всегда удастся реализовать излучение с оптимальной частотой и мощностью, однако, используя полученные соотношения, можно оценить допустимые погрешности эксперимента. Правильно подобранные мощности и частоты позволяют определить характеристики акустических сигналов, времена приходов, доплеровский сдвиг частоты и определить влияние гидрофизических характеристик среды на изменение параметров принятых сигналов.

Данную работу мы хотим посвятить памяти нашего учителя и коллеги, к.ф.-м.н. В. А. Захарова, который внес большой вклад в развитие данных исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зверев В. А., Стромков А. А. Выделение сигналов из помех численными методами Н. Новгород: ИПФ РАН. 2001. 188 с
2. Громашева О. С., Захаров В. А., Юхновский В. А. Влияние соотношения сигнал/помеха на корреляционные свойства сложных фазоманипулированных сигналов //Сб.тр. Юбилейной X научной шк.-сем. «Акустика океана» ак. Л. М. Бреховских (XIV сессии РАО). 2004, с. 354–357
3. Ширман Я. Д., Манжос В. Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. М.: Радио и связь, 1981, 416 с
4. Громашева О. С., Захаров В. А., Кошелева А. В., Ли Б. Я., Шор Ю. Л., Юхновский В. А. Томографические исследования в шельфовой зоне Японского моря // Дальневосточные моря России. М.: Наука, 2007. Кн. 4: Физические методы исследования, с. 111–128.
5. Громашева О. С., Бачинский К. В., Кошелева А. В., Ли Б. Я., Юхновский В. А. Экспериментальные исследования звукового канала в шельфовой зоне Японского моря с применением поля дрейфующих буев // 3-я Всероссийская научно-техническая конференция «Технические проблемы освоения Мирового океана». Владивосток, 22-25 сентября 2009 г., с. 267–272.