

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК СЛОЖНЫХ ФАЗОМАНИПУЛИРОВАННЫХ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ НА СТАЦИОНАРНЫХ ТРАССАХ РАЗЛИЧНОЙ ПРОТЯЖЕННОСТИ

С.И. Каменев

Тихоокеанский океанологический институт  
им. В.И.Ильичева ДВО РАН

Представлены результаты экспериментальных исследований по распространению сложных фазоманипулированных акустических сигналов (М-последовательностей) на стационарных трассах в Японском море и приведены результаты обработки таких сигналов в виде функций временной когерентности, характеризующей стабильность канала распространения, усредненных спектров и корреляционных функций.

## ВВЕДЕНИЕ

В основе широкого применения сложных фазоманипулированных сигналов для зондирования морских акваторий при решении задач акустической томографии полей течений и температуры, звукоподводной связи и телеметрии лежат уникальные свойства этих сигналов, позволяющие исследовать особенности импульсных характеристик волноводов, приемных и излучающих акустических систем [1,2]. Особый интерес представляет вопрос оценки стабильности приходов акустической энергии в точку приема для определения возможности их использования в задачах реконструкции гидрофизических параметров волновода, повышения помехоустойчивости при передаче информации и др.

В гидроакустических экспериментах, проводимых на стационарных трассах различной протяженности в Японском море, используется комплекс стационарных, мобильных и автономных акустических излучателей, размещаемых на шельфе вблизи п-ова Гамова в районе расположения акустико-гидрофизического полигона Тихоокеанского океанологичес-

кого института им. В.И. Ильичева ДВО РАН и работающих в диапазоне частот 250-12500 Гц. Приемные системы размещаются на шельфе на дистанциях 2-20 км и вдоль трассы мыс Шульца - банка Кита-Ямато (380 км).

В совместном американо-корейско-российском эксперименте (JESAEX), результаты которого анализируются ниже, приемные системы были установлены в районе о-ва Улындо, на банке Кита-Ямато и вблизи береговой черты м. Шульца. Кроме излучателей сложных фазоманипулированных сигналов с центральными частотами 250 и 366 Гц, работавших в прибрежной зоне шельфа, использовался автономный излучатель с частотой 260 Гц, расположенный на шельфовом сбросе и работавший как в сторону шельфа, так и в сторону глубокого моря.

Сигнальные фреймы в экспериментах представляли собой серии периодически продолженных 511-символьных М-последовательностей с характеристическим полиномом  $X^9+X^4+1$  и длительностями символов, равными 4-8 периодам указанных выше несущих частот.

## ■ Временная когерентность

Свойства сложных фазоманипулированных сигналов в виде М-последовательностей достаточно полно описываются функцией неопределенности [1,2]:

$$\chi(\tau, \omega_d) = \frac{1}{E} \int_{-\infty}^{\infty} s(t + \tau) s^*(t) \exp(-j\omega_d t) dt,$$

где  $E = \int_{-\infty}^{\infty} |s(t)|^2 dt$  – энергия сигнала  $s(t)$ .

На рис. 1 представлены функции неопределенности двух зондирующих сигналов: 250 Гц – 8 периодов на символ и 2500 Гц – 4 периода на символ.

Для оценки временной стабильности характеристик гидроакустического канала в случае сигналов произвольного типа используется следующее выражение [3]:

$$\psi(\tau) = \frac{1}{T\sigma_0\sigma_n} \int_0^T R_0(\tau_1) R_n(\tau_1 \pm \tau) d\tau_1,$$

где  $R_0$  и  $R_n$  – результат свертки опорного зондирующего сигнала с принятыми в нулевой и  $n$ -й момент времени сигналами соответственно;  $\sigma_0$  и  $\sigma_n$  – стан-

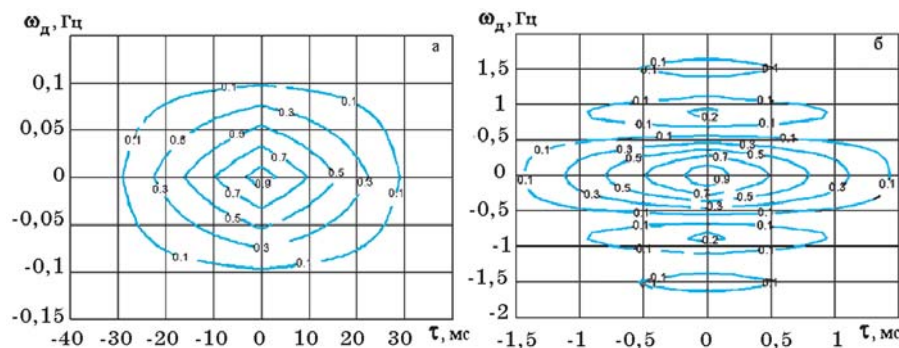


Рис. 1. Функция неопределенности: а – 250 Гц, 8 пер./симв.; б – 2500 Гц, 4 пер./симв.

дартные отклонения  $R_o$  и  $R_n$  соответственно;  $T$  – время усреднения, равное длительности сигнала в точке приема. Далее методика оценки временной когерентности сводится к нахождению максимальных значений огибающей функции  $\psi(\tau)$  для последовательных моментов приходов сигналов. Свойство линейности оператора свертки и дельта-подобность функции неопределенности применяемых сигналов позволяют упростить методику расчета, положив в приведенном выражении в качестве функций  $R_o$  и  $R_n$  собственно принятые в нулевой и  $n$ -й момент времени сигналы соответственно.

На рис. 2 представлены результаты расчета функции когерентности для длинной (м. Шульца – о-в Улындю) и короткой (шельф) трасс.

Глубина места на приемном конце трассы в первом случае составляла 476 м, один из гидрофонов возвышался над дном на 13 м, другой монтировался на дне, в течение 1 ч излучались периодические 511-символьные М-последовательности с длиной символа 8 периодов частоты 250 Гц и паузой, равной длине одной последовательности. Во втором случае использовался одиночный гидрофон на расстоянии 1 м от дна при глубине места 76 м, в течение суток осуществлялось ежеминутное двухчастотное зондирование М-последовательностями дли-

ной 511 символов, состоящих из 4 периодов несущей частоты. Расстояние между корреспондирующими точками составляло в первом случае 558 км, во втором – 15 км.

Как видно из рис. 2, а, очень хорошая когерентность (потери менее 10%) для водного гидрофона наблюдалась свыше 20 мин и 15 мин – для системы

в целом. На короткой трассе (рис. 2, б) для частоты 366 Гц 90%-ная когерентность имела место почти 2 ч и практически отсутствовала для частоты 2500 Гц. При снижении требований к когерентности, например для систем обнаружения или первичной синхронизации в системе связи, интервал стабильности отклика канала можно определить как время, за которое пиковое значение функции когерентности уменьшается в  $e$  раз. Для сигнала с частотой 2500 Гц он составил 11 мин, а для сигнала 366 Гц канал оставался относительно стабильным в течение 3 ч.

Сравнительная оценка стабильности приходов ежеминутно излучаемых сложных фазоманипулированных сигналов на 15-километровой трассе для ряда частот иллюстрируется рис. 3.

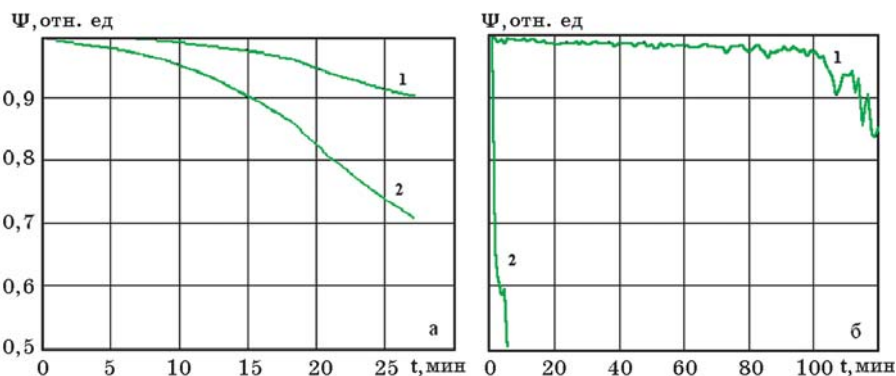


Рис. 2. Функция когерентности: а – дистанция 558 км, частота 250 Гц (1 – водный гидрофон, 2 – донный гидрофон); б – дистанция 15 км (1 – частота 366 Гц, 2 – частота 2500 Гц)

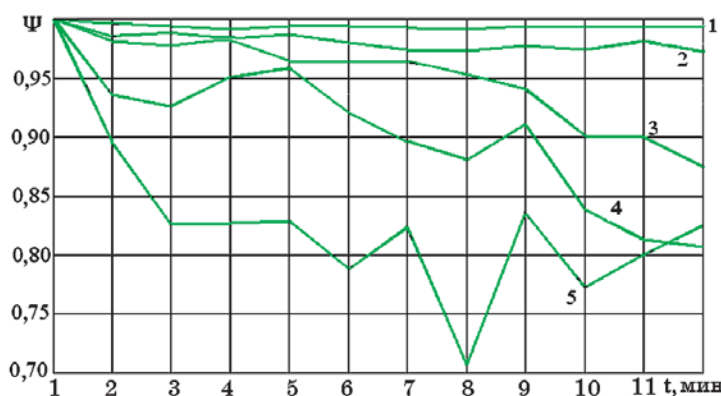


Рис. 3 Функция когерентности на дистанции 15 км для частот: 1 – 250 Гц; 2 – 600 Гц; 3 – 900 Гц; 4 - 1000 Гц; 5 – 1600 Гц

## ■ Трансформация спектров

Исходя из принятых в теории систем представлений о функции когерентности [4] последняя может быть вычислена через взаимный спектр и автоспектры сигналов, принятых в нулевой и  $n$ -й моменты времени. С этой точки зрения полезно рассмотреть особенности спектров принятых сложных фазоманипулированных сигналов при разных условиях распространения.

На рис. 4 приведены усредненные по десяти реализациям спектры периодической 511-символьной  $M$ -последовательности с длиной символа, равной

5 периодам несущей частоты 260 Гц. Первый спектр (рис. 4, а) соответствует сигналу, зарегистрированному вблизи излучателя, который был размещен на шельфовом сбросе на глубине 90 м; второй спектр (рис. 4, б) – сигналу, принятому на дистанции 360 км (банка Кита-Ямато). Таким образом, имели место условия распространения данного сигнала в глубоком (3000 м) океане. Особенностью спектра сигнала, принятого на банке, является характерное увеличение уровня несущей – превышение составляет порядка 10 дБ над уровнем огибающей, что свидетельствует о нарушении баланса положительных

и отрицательных символов, составляющих последовательность. Такой уровень несущей частоты соответствует фазовому углу манипуляции, близкому к  $\pm 45^\circ$ . Иными словами, противоположные символы становятся ортогональными. Это, с одной стороны, ухудшает корреляционные свойства сигнала и требует усложнения системы обработки. С другой стороны, проще решаются вопросы обнаружения сигнала и коррекции эффекта Доплера.

Заметим, что баланс в  $M$ -последовательности изначально нарушен: число положительных и отрицательных символов отличается на единицу, что приводит к появлению в спектре широкополосного сигнала несущей частоты с уровнем  $1/L$ , где  $L$  – число символов последовательности (511 в нашем случае). Введение фазового сдвига  $\pm \arctg(\sqrt{L}) = 87^\circ 46'$  вместо  $\pm 90^\circ$ , улучшая корреляционные свойства периодически продолженной последовательности (нулевой уровень боковых лепестков вместо  $1/L$ ), увеличивает уровень несущей до уровня огибающей спектра, еще больше нарушая баланс. Волновод как система с высокой частотной избирательностью привносит свои искажения, которые накапливаются на больших дистанциях и приводят к результату, показанному на рис. 4, б.

Пример трансформации спектра сложного фазоманипулированного сигнала в виде  $M$ -последовательности при других условиях распространения приведен на рис. 5, где спектры также усреднялись по десяти реализациям. Излучатель размещался вблизи береговой черты на глубине 38 м и излучал периодическую 511-символьную  $M$ -последовательность

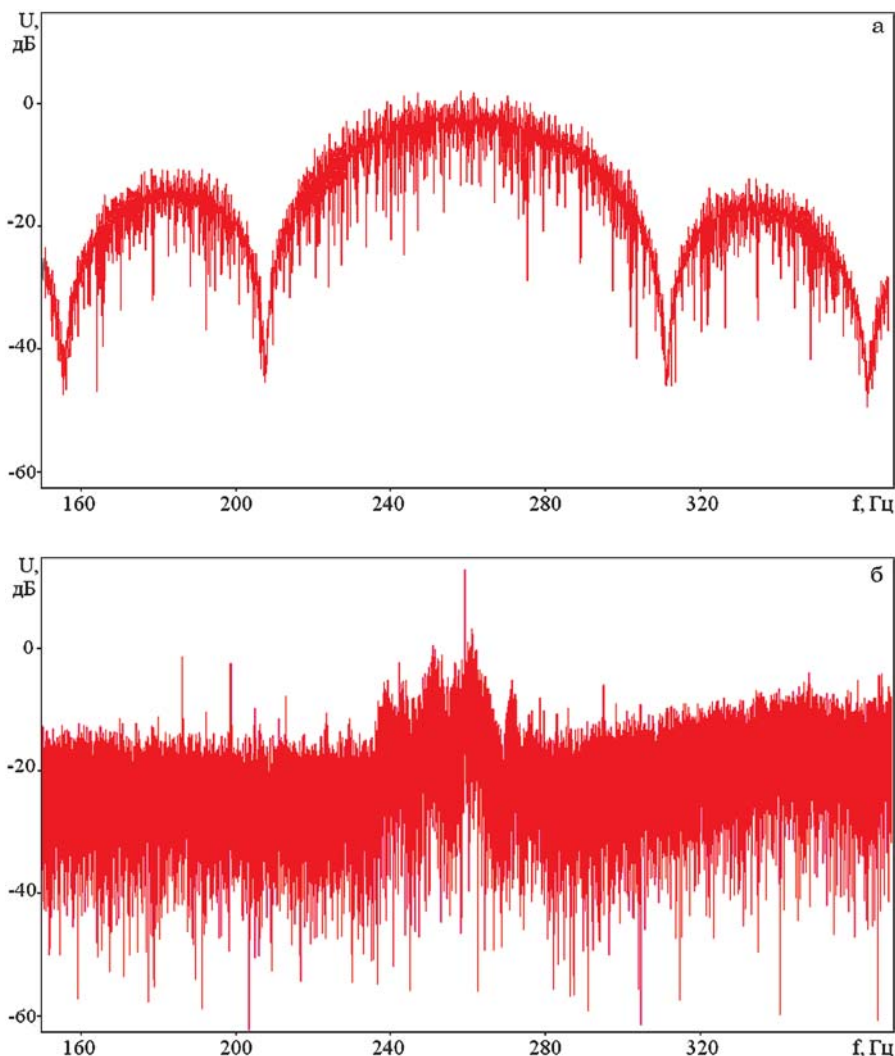


Рис. 4. Спектр сигнала 260 Гц: а – вблизи излучателя; б – на дистанции 360 км

с несущей частотой 366 Гц и длиной символа 8 периодов. Прием сигналов осуществлялся системами, расположенными на шельфе (рис. 5, а) и на банке Кита-Ямато (рис. 5, б). Расстояние между корреспондирующими точками составляло 20 км и 380 км соответственно. Первый случай соответствует распространению в мелком море и характеризуется типичными искажениями спектра, связанными с многолучевостью. Во втором случае выявлен эффект устойчивого формирования нулей в спектре, соответствующих второй гармонике частоты повторения символов. Этот эффект свидетельствует об ограниченной кумуляции сигнала при распространении по горизонтально-неоднородной трассе, состоящей из мелководного (шельф с глубинами 40-90 м) и глубоководного (глубины до 3000 м) участков.

Сказанное хорошо интерпретируется в терминах кинематических характеристик пространственно-временной интерференционной структуры акустического поля [5]. При этом используется представление об инварианте пространственно-частотной интерференционной структуры, определяемой в координатах частота – расстояние  $(\omega, r)$  в окрестности точки  $(\omega_0, r_0)$  как  $\beta = (\Delta\omega/\omega_0)/(\Delta r/r_0)$  или как зависимость групповой скорости от фазовой  $C_g(C\phi)$ :  $\beta = -\partial(1/C\phi)/\partial(1/C_g)$ . Для плоского волновода с однородным заполнением типичное значение инварианта  $\beta \approx 1$ , для волновода с выраженным канальным профилем инвариант  $\beta \approx -3$ . В случае шельфа, представляемого в виде трехмерного клина с однородным заполнением, инвариант определяется глубинами мест постановки излучателя

$hs$  и приемника  $h$  соответственно:  $\beta = hs/h$ .

При выходе отдельных нормальных волн, взаимодейство-

вавших с границами волновода, из шельфа в глубокое море происходит изменение зависимости групповой скорости от

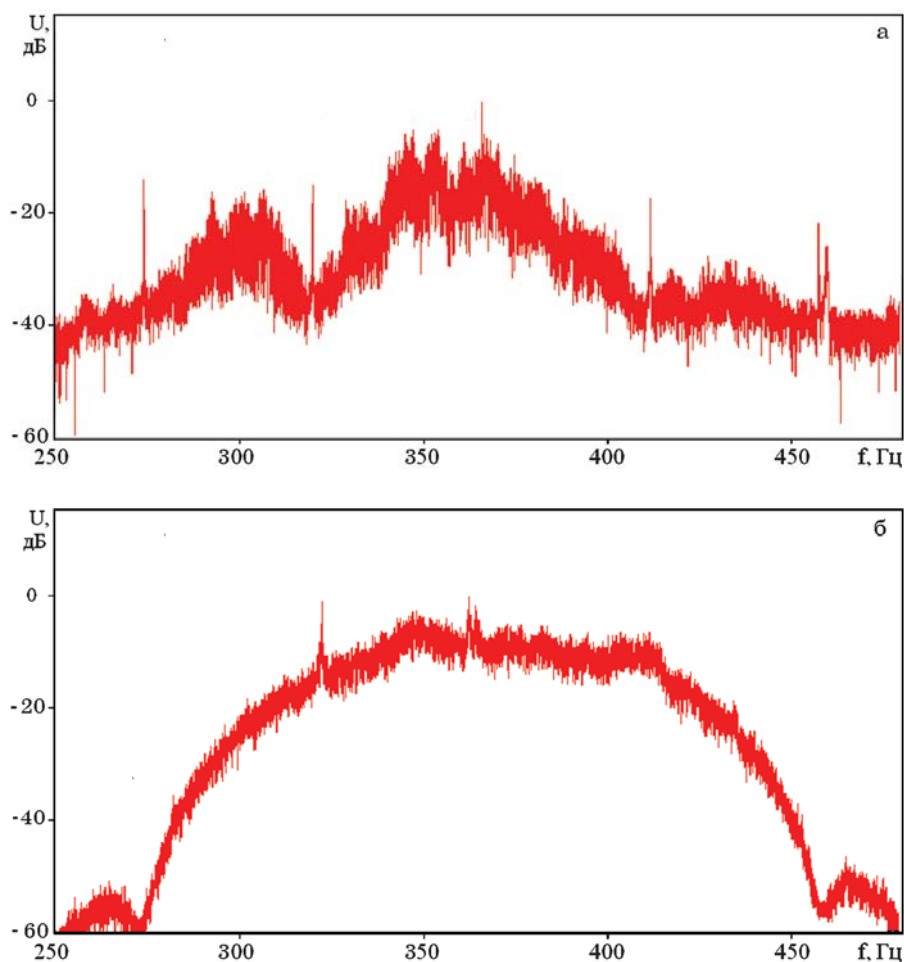


Рис. 5. Спектр сигнала 366 Гц: а – на дистанции 20 км; б – на дистанции 380 км

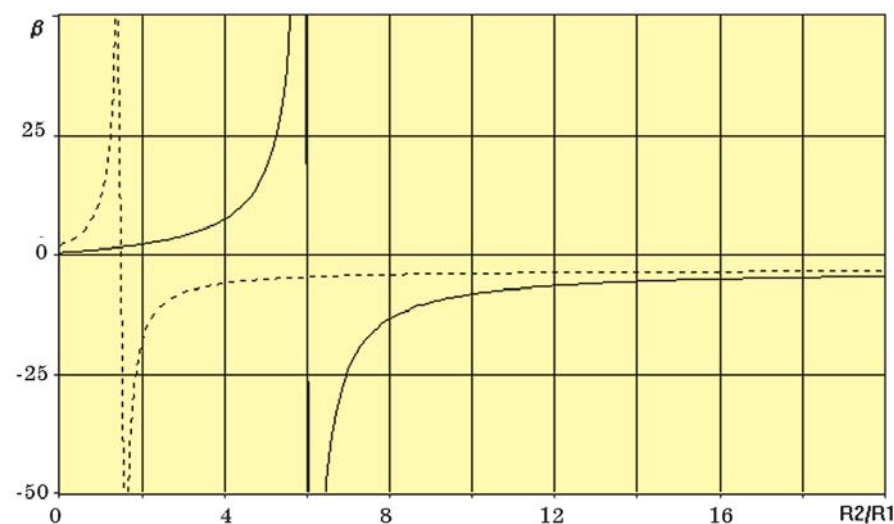


Рис. 6. Эффект фокусировки (объяснение в тексте)

фазовой. При этом если шельфовый участок нормальной волны составлял по дистанции  $R1$  и характеризовался инвариантом  $\beta1$ , а глубоководный -  $R2$  и  $\beta2$  соответственно, то для среднего по трассе  $(R1+R2)$  инварианта будем иметь  $1/\beta=R1/\beta1+R2/\beta2$ . На рис. 6 построена соответствующая зависимость для  $\beta1=0,5$  и  $\beta2=-3$  (сплошная кривая). Отметим особенность: разрыв на этой зависимости, который и свидетельствует об эффекте фокусировки конкретной нормальной волны для фикси-

рованной частотной компоненты широкополосного сигнала. Для всего набора нормальных мод и частотных компонент характерен разброс значений инварианта, поэтому указанная особенность будет «размазана» по дистанции – явление хроматической аберрации в оптике. Например, если инвариант для шельфа протяженностью 20 км лежит в пределах  $0,5...1$ , а для глубоководного участка равен  $-3...-4$ , то зона фокусировки составит 60-160 км.

Можно также показать, что источник, находящийся в глубоководном участке, будет, при некоторых условиях, подобным рассмотренным, создавать эффект фокусировки в точке приема на шельфе (пунктирная кривая на рис. 6).

### ■ Корреляционные функции

Одна из спроектированных в рамках эксперимента приемных систем была короткобазисной и состояла из четырех размещенных в углах горизонтального квадрата гидрофонов. Стороны квадрата размером 0,6 м были ориентированы под углами  $0^\circ$  и  $90^\circ$  в направлении излучения. Система размещалась вблизи береговой черты на глубине 38 м у дна. Автономный излучатель размещался на дне на расстоянии 15 км от излучателя на кромке шельфа с глубиной 76 м. Излучался фазоманипулированный сигнал, состоящий из 511 символов, длина символа составляла пять периодов несущей частоты 260 Гц. Излучалось десять посылок с периодом повторения, равным длине последовательности.

Результат обработки амплитудной информации для данного эксперимента приведен на рис. 7 в виде последовательности корреляционных откликов всей посылки с нормировкой на максимальное значение. Главные максимумы на рисунке соответствуют приходам водной волны со средней скоростью порядка 1500 м/с. Также отмечается предвестник существенно меньшей амплитуды, имеющий скорость около 1800 м/с, который связан, по-видимому, с возникновением грунтовой волны при распространении мощного сигнала (около 5 кПа/м) из широкой части волновода в узкую. Рис. 8 показывает ту же последовательность в увеличенном по амплитуде и времени масштабе. Видна более мелкая структура

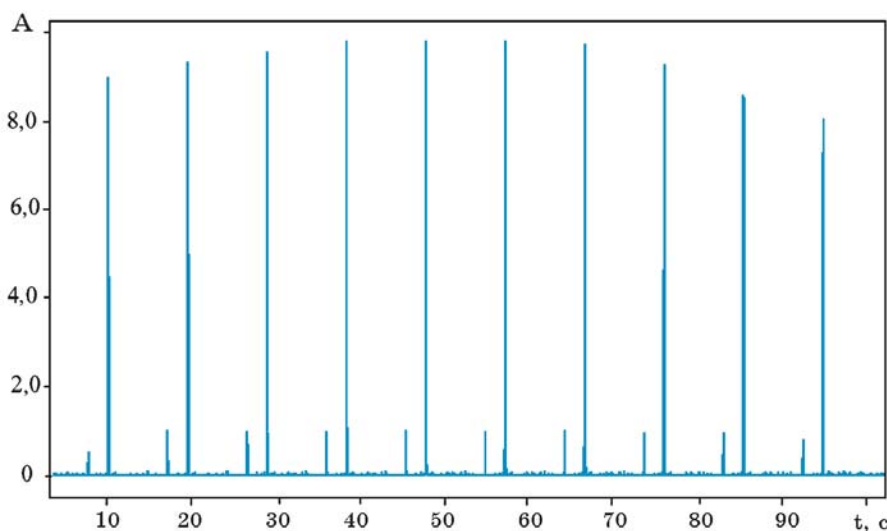


Рис. 7. Корреляционные отклики на гидрофоне короткой базы на шельфе

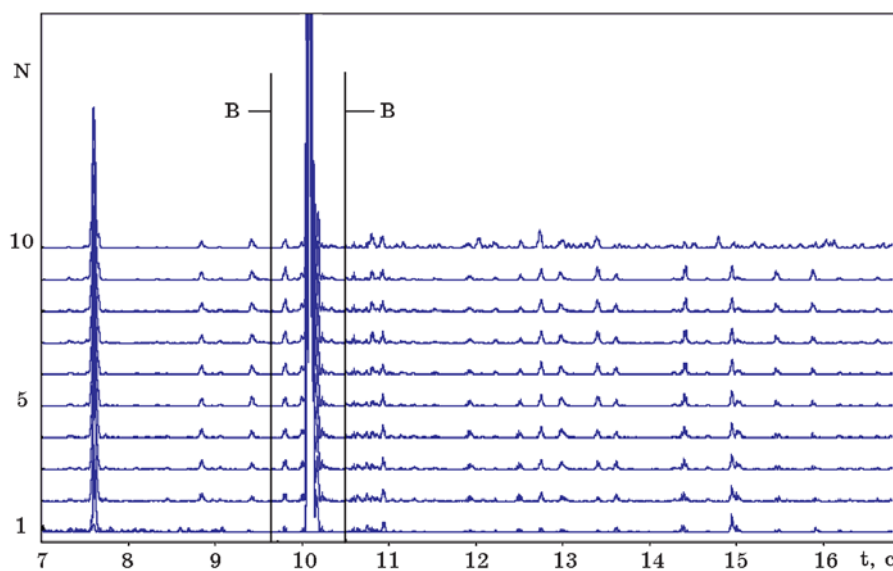


Рис. 8. Корреляционные отклики рис. 7 в увеличенном временном и амплитудном масштабах. N – номер посылки

поздних приходов, отличающаяся высокой временной когерентностью в пределах длительности посылки (около 98 с).

Сравнение рис. 9 и 10, где показана окрестность главных максимумов (фрагмент В-В рис. 8) и соответствующие разности фаз  $\varphi$  сигналов, принятых гидрофонной парой, ориентированной на источник, показывает наличие регулярных изменений разности фаз как для больших уровней, так и для существенно меньших. Очевидно, что этот результат может быть использован как классификационный признак или критерий обнаружения. Полагая, что  $\Delta\varphi \approx \omega\Delta r/C\varphi$ , где  $\omega$  - круговая частота,  $\Delta r$  - база,  $C\varphi$  - фазовая скорость, мы имеем возможность измерять как групповое, так и фазовое время, объективно увеличивая число информативных признаков, характеризующих исследуемые динамические процессы.

Качество ориентации нашей измерительной системы в пространстве характеризует рис. 11, на котором приведены разности фаз на базе, нормальной к направлению распространения сигнала. Видно, что в окрестностях приходов эта разность практически равна нулю.

Излучение описанного выше излучателя регистрировалось в глубоководном районе (глубины порядка 3000 км) вблизи банки Кита-Ямато опущенным на глубину 60 м с борта обеспечивающего судна одиночным гидрофоном. Специализированная обработка позволила выделить приходы полезного сигнала в условиях шумов и дрейфа. На рис. 12, 13, 14 показаны соответственно: нормированная посылка (десять последовательностей), посылка в увеличенном амплитудном и временном масштабах и окрестность главных максимумов.

Отметим сильную амплитудную нестабильность и времен-

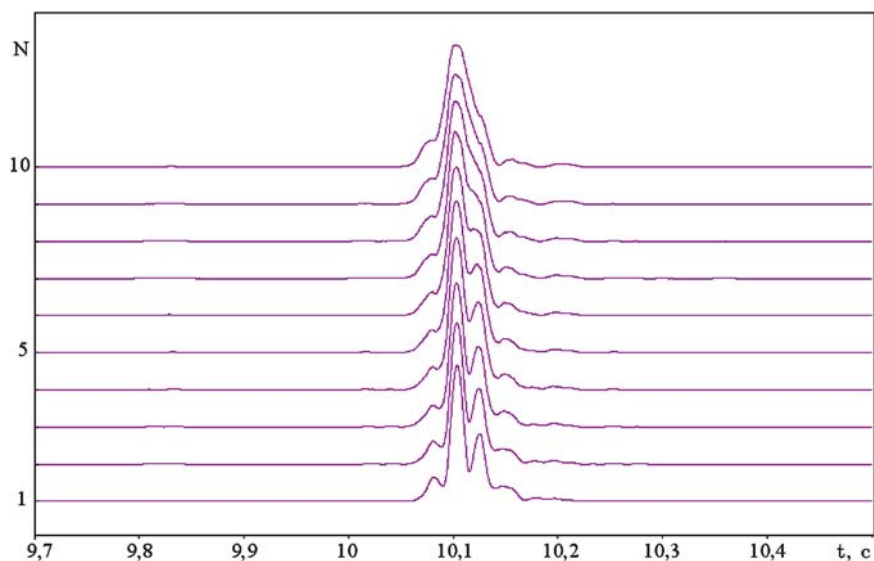


Рис. 9. Фрагмент В-В рис. 8

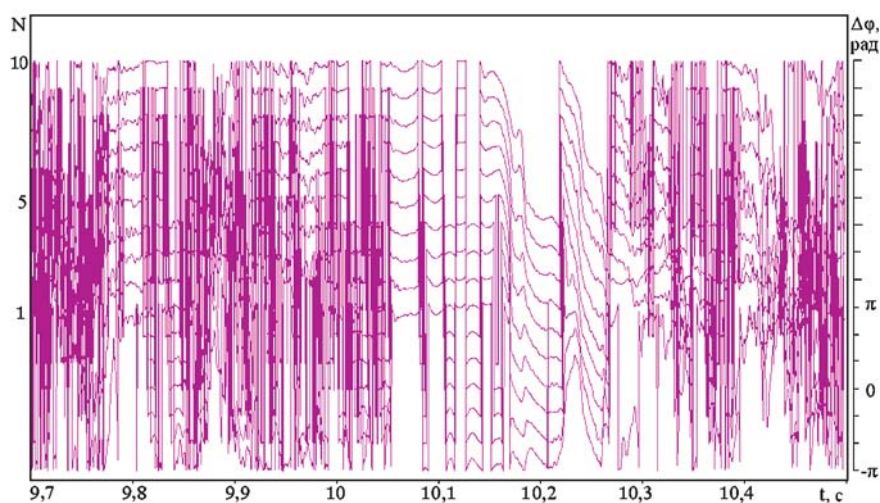


Рис. 10. Разности фаз сигналов, принятых гидрофонной парой, ориентированной на источник. Кривые смещены на  $\pi/3$

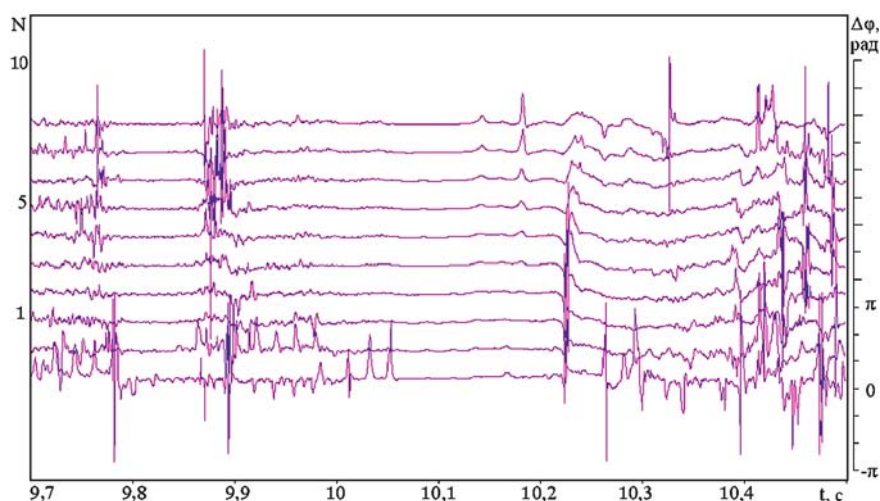


Рис. 11. Разности фаз сигналов, принятых гидрофонной парой, нормальной к направлению на источник. Кривые смещены на  $\pi/3$

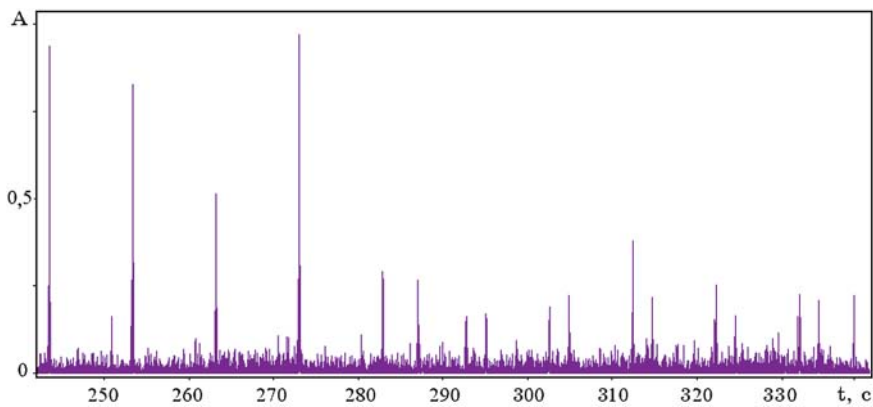


Рис. 12. Корреляционные отклики на заглубленном гидрофоне в глубоком море

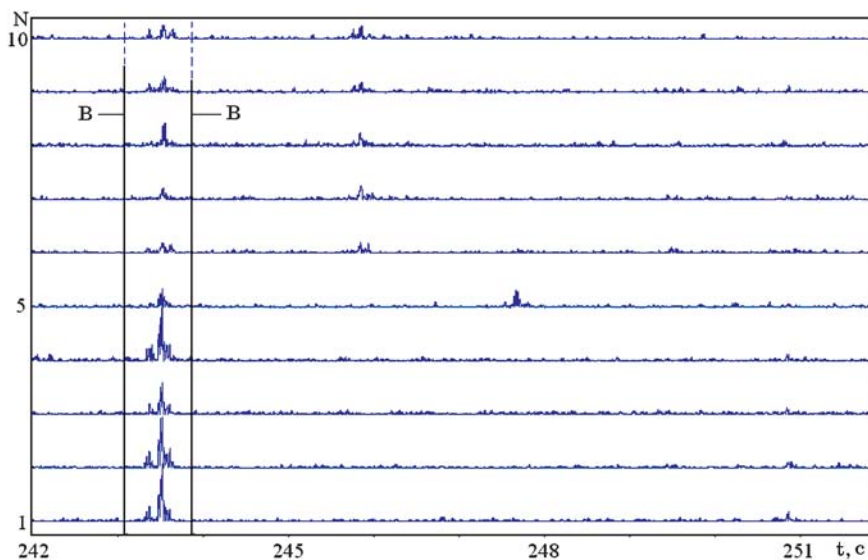


Рис. 13. Корреляционные отклики рис. 12 в увеличенном временном и амплитудном масштабах. N – номер посылки

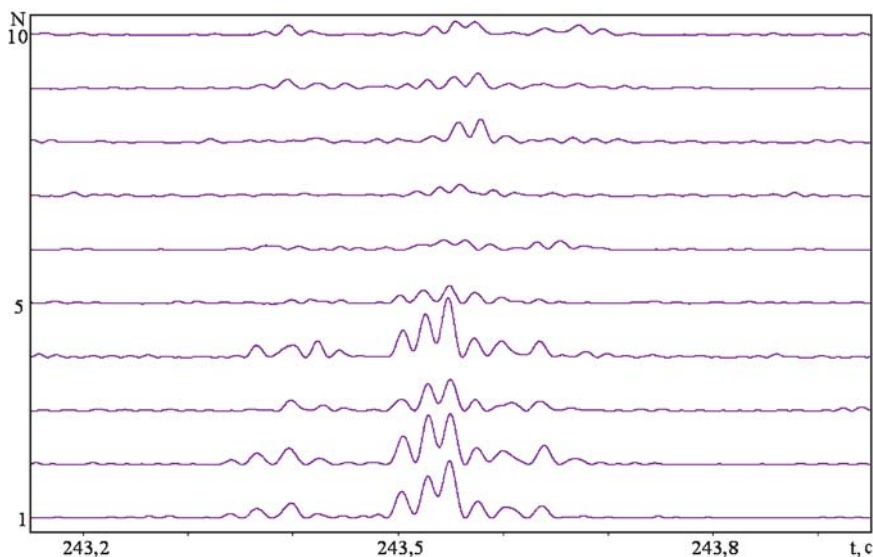


Рис. 14. Фрагмент В-В рис. 13

ную когерентность отдельных приходов. Видно также наличие затягивания сигнала, отличное от рассмотренного выше распространения на шельфе, что связано, во-первых, с большой разницей в дистанциях, во-вторых, с различием гидрологических условий. На шельфе существовали полусуточные вариации профиля скорости звука от полной изотермии до отрицательного градиента, в глубоком море наблюдался подводный звуковой канал с мигрирующей в пределах 200-400 м осью.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные результаты спектральной, фазовой и корреляционной обработки сложных фазоманипулированных зондирующих сигналов показали эффективность используемых методов. Выявленные особенности спектров, функций когерентности и корреляционных функций сложных сигналов могут быть использованы при построении алгоритмов обработки в системах гидроакустической телеметрии и связи.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Ширман Я.Д., Манжос В.Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. М.: Радио и связь, 1981. 416 с.
2. Вакман Д.Е. Сложные сигналы и принцип неопределенности в радиолокации М.: Сов. радио, 1965. 303 с.
3. Кулаков А.В., Попов Р.Ю. Определение интервалов временной стабильности параметров гидроакустического канала // Акуст. журн. 2000. Т. 46, № 5. С. 671-678.
4. Папулис А. Теория систем и преобразований в оптике. М.: Мир, 1971. 495 с.
5. Каменев С.И. Инвариант пространственно-частотной интерференционной структуры акустического поля в задачах мониторинга динамических процессов в шельфовой зоне моря // Фундаментальные и прикладные вопросы естествознания: Матер. Всерос. межвуз. науч.-техн. конф. Владивосток: Тихоокеанский военноморской институт им. С.О. Макарова, 2003. Т. 1. С. 103-105.