

УДК 681.88

С.Л. Литвиненко

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОДСИСТЕМЫ
ПАССИВНОЙ ГИДРОЛОКАЦИИ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ
НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ С УЛЬТРАКОРОТКОЙ БАЗОЙ**

Рассмотрены результаты экспериментальных исследований по определению направления на источник навигационного сигнала, выполненных в рамках разработки гидроакустической навигационной системы с ультракороткой базой. Целью экспериментов являлась проверка научно-технических решений, направленных на повышение точности определения местоположения подводных объектов. Приведены и проанализированы данные экспериментов по оценке горизонтального и вертикального углов направления на источник сложного навигационного сигнала, проведенных как в условиях испытательного гидроакустического бассейна, так и в условиях Ладожского озера.

Гидроакустическая навигационная система; ультракороткая база; последовательность максимальной длины; частотная манипуляция методом Костаса; разреженная антенная решетка; вертикальное распределение скорости звука.

S.L. Litvinenko

**EXPERIMENTAL RESEARCH OF PASSIVE SONAR SUBSYSTEM FOR
ULTRA SHORT BASE LENGTH HYDROACOUSTIC POSITIONING SYSTEM**

Experimental results on navigation signal direction of arrival estimation for development an ultra short base length hydroacoustic positioning system are shown. The object of experiments was a verification of scientific and technical decisions is intended for increasing underwater objects positioning accuracy. The experimental data of complex navigation signal source directions of arrival horizontal and vertical angles estimation in experiment tank and Lake Ladoga environment are shown and analyzed.

Hydroacoustic positioning system; ultra short base length (USBL); maximum length sequence; Costas frequency coding, sparse antenna array; vertical sound speed profile.

Представлены результаты экспериментальных исследований, выполненных в рамках работ по совершенствованию гидроакустических навигационных систем (ГАНС) с ультракороткой базой (УКБ), выпускаемых ОАО НИИ «Гидросвязи «Штиль». Целью экспериментов являлась проверка научно-технических решений, направленных на повышение точности определения местоположения подводных объектов, включающих: совершенствование алгоритмов определения направления на источник сигнала; использование алгоритма коррекции вертикального угла и дальности с учетом искажений траектории акустического луча в вертикальной плоскости по данным о вертикальном распределении скорости звука (ВРСЗ); применение сложных навигационных сигналов (СНС) с хорошими корреляционными свойствами; применение новых антенных решеток (АР).

В качестве алгоритма определения направления на источник сигнала исследовался один из методов сверхразрешения, а именно: MUSIC (MUltiple Signal Classification) – метод многосигнальной классификации [6].

Применение метода многосигнальной классификации для определения направления на источник сигнала (ИС) основано на пространственно-временной узкополосности анализируемого сигнала, точности и всенаправленности преобразователей АР. Ввиду относительной удаленности ИС от АР, по сравнению с размерами АР, фронт волны считается плоским. С АР связывается трехмерная система прямоугольных координат, так, что ось *OZ* направлена вниз. Горизонтальный

угол α отсчитывается от положительного направления оси OX по часовой стрелке, если смотреть на плоскость OXY сверху. Вертикальный угол ε отсчитывается от плоскости OXY вниз. Вектор нормали к плоскости фронта волны, распространяющейся от источника сигнала к АР, задается выражением

$$v(\alpha, \varepsilon) = -[\cos(\varepsilon)\cos(\alpha) \quad \cos(\varepsilon)\sin(\alpha) \quad \sin(\alpha)]^T, \quad (1)$$

Задержка сигнала, принимаемого преобразователем с номером i , задается выражением

$$\Delta t_i = 1/c \cdot v(\alpha, \varepsilon)^T \cdot r_i, \quad (2)$$

характеризующим задержку прихода фронта волны к преобразователю относительно начала координат АР. Здесь c – скорость звука, r_i – радиус вектор акустического центра преобразователя.

Анализ сигналов, принятых преобразователями АР, основан на понятии направляющего вектора [6], который характеризует воздействие сигнала одного источника на N преобразователей АР и выражается как

$$sv(\alpha, \varepsilon) = \left[\exp\left(-j\frac{2\pi f_0}{c} v(\alpha, \varepsilon)^T r_1\right) \cdots \exp\left(-j\frac{2\pi f_0}{c} v(\alpha, \varepsilon)^T r_N\right) \right]^T, \quad (3)$$

где f_0 – частота сигнала; c – скорость звука; $r_1 \cdots r_N$ – радиус-векторы акустических центров преобразователей.

Если источников сигналов несколько, то их сигналы суммируются на преобразователях АР. Воздействия на АР сигналов M источников объединяются в направляющую матрицу:

$$D(\alpha, \varepsilon) = [sv_1(\alpha_1, \varepsilon_1) \cdots sv_M(\alpha_M, \varepsilon_M)]. \quad (4)$$

Дискретный сигнал длиной L отсчетов (по размеру кадра анализа), принятый АР, можно записать как

$$X = D(\alpha, \varepsilon) \cdot S + n, \quad (5)$$

где $X(N \times L)$ – матрица сигналов преобразователей АР, $S(M \times L)$ – матрица сигналов, излученных M источниками, $n(N \times L)$ – матрица помех, принятых АР.

Оценка направлений на источники сигналов ведется на основе корреляционного анализа. Оценка корреляционной матрицы по сигналам преобразователей получается путем усреднения по кадрам анализа следующим образом:

$$\hat{R}_{XX} = \frac{1}{N_{fr}} \sum_{fr=1}^{N_{fr}} X_{fr} X_{fr}^H, \quad (6)$$

Корреляционная матрица принятых АР-сигналов, при условии, что помеха пространственно изотропна и считается белым Гауссовым шумом с нулевым средним и дисперсией σ_n^2 , выражается как

$$R_{XX} = E\{X \cdot X^H\} = D(\alpha, \varepsilon) \cdot R_{SS} \cdot D^H(\alpha, \varepsilon) + \sigma_n^2 I = U \Lambda U^H = U_S \Lambda_S U_S^H + \sigma_n^2 U_n U_n^H. \quad (7)$$

В (4) U_S – матрица собственных векторов R_{XX} , задающая подпространство сигналов, U_n – матрица собственных векторов, задающая подпространство помехи. Разделение собственных векторов подпространств сигнала и помехи производится на основе значений собственных чисел λ_i из Λ . M наибольших собственных чисел соответствуют собственным векторам U_S подпространства сигналов, а оставшиеся $N - M$ – собственным векторам U_n подпространства помехи. Направ-

ляющие вектора источников сигналов $D(\alpha, \varepsilon)$ содержатся в подпространстве сигнала и ортогональны к подпространству шума, поэтому можно записать $U_N D(\alpha, \varepsilon) = 0$, тогда функция псевдоспектра метода многосигнальной классификации выражается как

$$P(\alpha, \varepsilon) = 1 / |D^H(\alpha, \varepsilon) U_N U_N^H D(\alpha, \varepsilon)|. \quad (8)$$

Функция $P(\alpha, \varepsilon)$ будет иметь локальные максимумы в точках, соответствующих направлениям на каждый источник сигнала. Выполнив поиск этих точек, мы получим значения $(\alpha_j, \varepsilon_j)$, задающие направления на источники сигналов. Пример оценки направления источник-сигнала в одном из экспериментов на Ладожском озере показан на рис. 1,а. На рис. 1,б показаны пеленгационные характеристики по горизонтальному и вертикальному углам, являющиеся срезами функции псевдоспектра по горизонтали и вертикали в точке максимума.

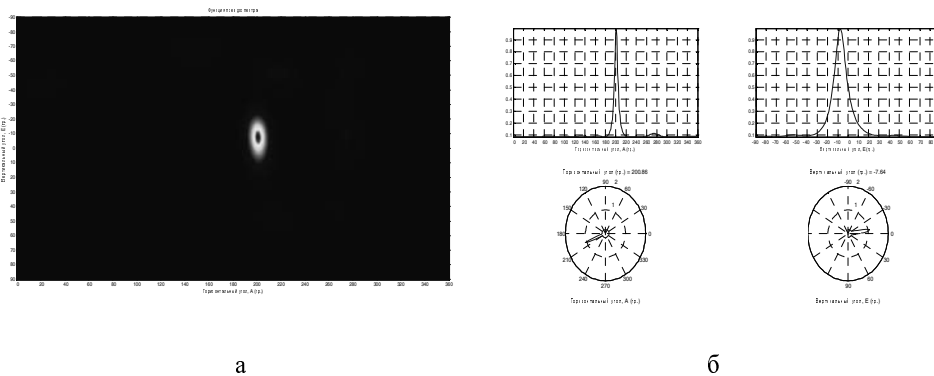


Рис. 1. Результат оценки направления источник-сигнала в одном из экспериментов на Ладожском озере с помощью метода MUSIC: а – функция псевдоспектра, полученная с использованием алгоритма MUSIC; б – пеленгационные характеристики по горизонтальному и вертикальному углам

Для использования преимуществ СНС в тракт обработки сигнала вводится согласованный фильтр [2]. Применение согласованной фильтрации приводит к модификации метода многосигнальной классификации путем введения согласованной фильтрации, в результате чего в матрицу сигналов $X(N \times L)$ из (5) входят не сами сигналы преобразователей АР, а выходы согласованных фильтров, подключенных к каждому каналу АР.

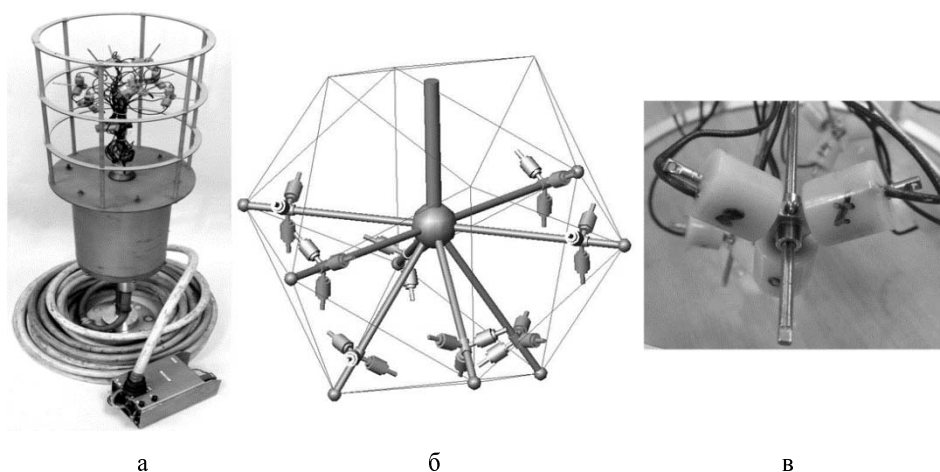
В качестве СНС исследованы сигналы с псевдослучайной фазовой манипуляцией по закону последовательности максимальной длины [1], сигналы с частотной манипуляцией по методу Костаса [5] и комбинированные ФМ-ЛЧМ-сигналы, которые позволяют получить высокое значение ОСШ на входе алгоритма определения направления, высокое временное разрешение и выполнять фильтрацию во временной области для выделения прямого луча.

Экспериментальные работы велись в три этапа: 1) модельные эксперименты; 2) эксперименты на испытательном бассейне ОАО «Концерн «Океанприбор»»; 3) натурные экспериментальные исследования на Ладожском полигоне Карельского филиала ОАО «Концерн «Океанприбор»».

Анализ экспериментальных данных проводился с использованием специально разработанного программного комплекса [3].

На этапе модельных экспериментов была протестирована работоспособность алгоритмов пассивной гидролокации и построены пеленгационные характеристики (одновременно по горизонтальному и вертикальному углам) для различных вариантов АР и доказана работоспособность разреженной сферической звукопрозрачной АР диаметром 160 мм. В данной АР преобразователи расположены группами по 3 элемента. Каждый преобразователь группы находится в вершине равностороннего треугольника. Расстояния между преобразователями внутри каждой группы соответствуют половине длины волны на максимальной частоте сигнала 30 кГц. Центры групп расположены в 12 вершинах икосаэдра на расстояниях, больших половины длины волны сигнала. Таким образом, достигается компромисс между желанием получить пеленгационную характеристику без боковых максимумов и в то же время увеличить диаметр АР, используя небольшое количество преобразователей [2].

Для проведения натуральных экспериментов был изготовлен программно-аппаратный комплекс пеленгования, который состоит из АР в сборе с предварительными усилителями, блока АЦП, программного обеспечения для записи сигналов АР и их анализа. Для имитации маяка использовался гидроакустический излучатель, блок ЦАП и компьютер с программой воспроизведения требуемых сигналов. По экономическим соображениям была изготовлена лишь полусферическая АР с 24 преобразователями (8 вершин икосаэдра, рис. 2).



*Рис. 2. Конструкция гидроакустической антенной решетки:
а – экспериментальный образец антенны в сборе с предварительными усилителями и блоком АЦП; б – модель антенной решетки в системе автоматизированного проектирования; в – тройка гидроакустических преобразователей*

Конструкция АР позволяет изменять диаметр полусферы от 160 до 200 мм. Модуль АЦП выполнен в виде трех восьмиканальных блоков USB-3000, работающих на частоте 100 кГц на канал.

В ходе экспериментов на испытательном бассейне производилась запись сигналов преобразователей при различных углах поворота АР с минимальным шагом $0,1^\circ$ по горизонтальному углу, а также при различных вертикальных углах с минимальным шагом $0,1^\circ$. В качестве навигационного сигнала использовался сложный сигнал с комбинированной ФМ-ЛЧМ несущей, фазовая манипуляция производилась по закону М-последовательности. Центральная частота сигнала составляла

22,5 кГц, база 2^9-1 . По данным статистической обработки данных экспериментов, заключавшихся в изменении горизонтального угла поворота макета АР, установлено, что значения среднеквадратической ошибки (СКО) определения горизонтального угла находятся в пределах 0,2–0,4°. Для вертикального угла значения СКО находятся в пределах 0,4–0,6°. Большая величина СКО во втором случае объясняется тем, что макет АР представляет собой полусферу, т.е. апертура АР по горизонтали шире, чем по вертикали. Обнаружена неравномерность в средней ошибке и СКО при анализе данных, полученных с направлений, отличающихся значениями углов больше, чем на 30°, что говорит о неточностях в установке преобразователей, приведших к тому, что координаты акустических центров преобразователей АР не совпадают с расчетными. Это говорит о необходимости калибровки АР.

Третий этап экспериментальных исследований проводился в условиях естественного водоема в конце июля 2011 года в сложных гидролого-акустических условиях мелководья в заливе Риеккаланлахти Ладожского озера. В экспериментах оценивалось направление на гидроакустический излучатель, закрепленный на катере, дрейфующем под действием ветра. Излучатель закреплялся на тросе на различных глубинах. Глубина погружения АР варьировалась в диапазоне от 3 до 7 м, а излучателя – от 4 до 12 м. АР была установлена на поворотном-опускном механизме плавлаборатории, пришвартованной недалеко от берега. Глубина места в районе испытаний составляла около 20 м. Направление на точку закрепления излучателя на катере фиксировалось с помощью теодолита, а дистанция измерялась лазерным дальномером. Измерения проводились в начальной и конечной точках траектории дрейфа катера. Время дрейфа фиксировалось секундомером. Была проведена серия экспериментов, в которых дистанция до катера изменялась в пределах 150–200 м. За время в среднем равное 5 мин, направление на катер изменялось на 30–35°. За это время излучалось примерно 75 импульсов СНС одного типа. В экспериментах использовались сигналы с ФМ по закону М-последовательности и ЧМ по методу Костаса. Центральная частота сигнала составляла 22,5 кГц. База сигналов варьировалась от 2^8-1 до $2^{10}-1$. В данных экспериментах были испытаны два макета АР: первый описан выше, второй представляет собой сферическую звукопрозрачную АР диаметром 70 мм с преобразователями, расположенными в 12 вершинах икосаэдра.

Анализ данных по горизонтальному и вертикальному углу представлял различную сложность, так как в первом случае лучевая картина распространения звука в водоеме не имела существенного влияния на результаты, а во втором – при определении вертикального угла – необходимо использовать данные вертикального распределения скорости звука (ВРСЗ) [4] (рис. 3).

Необходимо отметить, что на всех рисунках и во всех таблицах приведены результаты для одного и того же эксперимента, параметры которого приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры одного из экспериментов, данные по которому приведены в иллюстрациях

тип СНС – фазоманипулированный по закону М-последовательности	
Тип АР – звукопрозрачная полусферическая с 24 преобразователями диаметром 160 мм	
Центральная частота СНС	22,5 кГц
Ширина полосы СНС	5 кГц
База СНС	$2^{10}-1$
Время дрейфа катера	304 с

Окончание табл. 1

тип СНС – фазоманипулированный по закону М-последовательности	
Дистанция в начальной точке	190 м
Дистанция в конечной точке	138 м
Угловое перемещение	36°
Угловая скорость	0,12 °/с
Межимпульсный угол (для импульсов одного типа)	0,48 °/с
Количество импульсов (для импульсов одного типа)	75
Глубина погружения АР	4 м
Глубина погружения излучателя	12 м

По результатам анализа экспериментальных данных в 3-х сериях экспериментов были получены следующие значения среднеквадратической ошибки (СКО) определения горизонтального угла: 0,35°, 0,43°, 0,56°. Это хорошо согласуется с выводами, сделанными при анализе данных пеленгования источника сигнала в условиях испытательного бассейна.

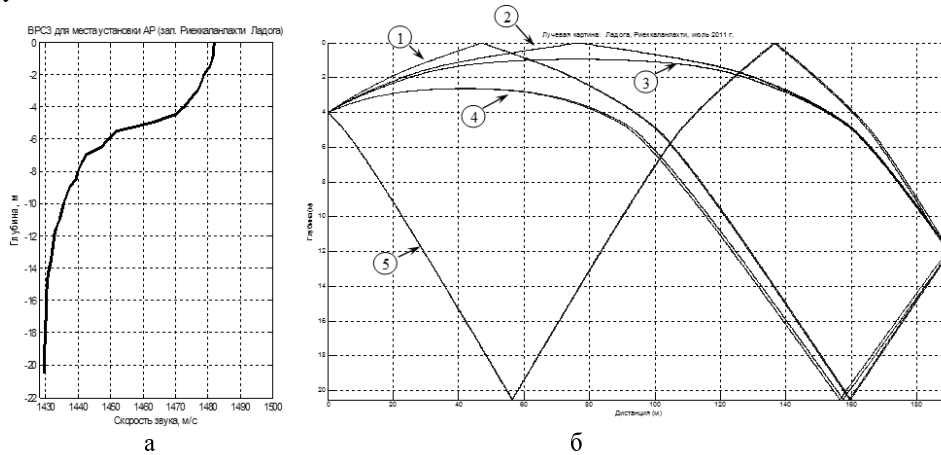


Рис. 3. Вертикальное распределение скорости звука в месте проведения испытаний (а) и лучевая картина в начальной точке траектории движения катера в одном из экспериментов (б), см. табл. 1

Угловое перемещение катера и соответствующие значения ошибок определения горизонтальных углов для одного из экспериментов показано на рис. 4,б. На рис. 4,а крестиками синего цвета показаны значения горизонтальных углов, вычисленные с помощью алгоритма MUSIC при отключенном согласованном фильтре, а кружками черного цвета показаны значения горизонтальных углов, вычисленные тем же алгоритмом, но по сигналу с выходов согласованных фильтров. На рис. 4,б черной пунктирной линией показаны значения СКО оценки значений горизонтальных углов для включенного согласованного фильтра и синей пунктирной линией – для отключенного согласованного фильтра. Как видно из рис. 4,б в случае использования согласованной фильтрации значение СКО (равное 0,43° в данном эксперименте) в два раза меньше, чем без её использования. Это объясняется присутствием нескольких лучевых компонент в сигнале, а применение согласованной фильтрации позволяет отделить основной луч от отраженных, в тех случаях, когда задержка между лучами больше разрешающей способности СНС.

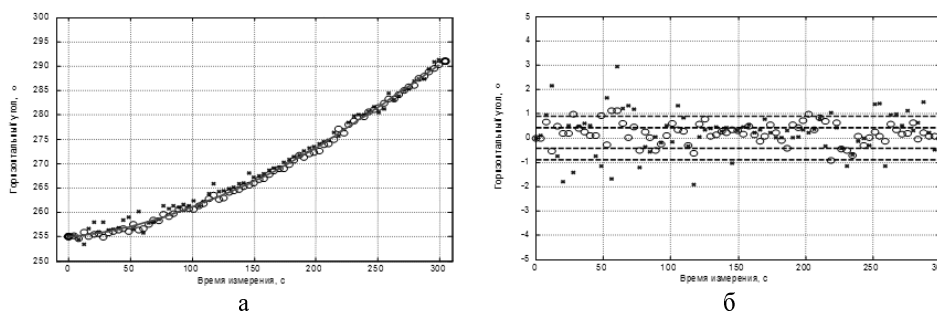


Рис. 3. Угловое перемещение (в системе координат теодолита) катера с излучателем относительно точки приема (а) и отклонения значений горизонтальных углов от среднего (б) по данным одного из экспериментов (см. табл. 1). Обозначения см. в тексте

При анализе данных оценки направления на источник сигнала по вертикальному углу было проведено сопоставление полученных результатов с лучевыми картинками распространения звука в водоеме, построенных по ВРСЗ, измеренному в точке установки АР (см. рис. 3). Лучевые картины строились только для 5–6 лучей, имеющих не более двух отражений от поверхностей. Данные по параметрам лучей, показанных на рис. 3, приведены в табл. 2. Особый интерес представляют лучи №2 и №3, так как они не отражались от дна, а значит, для расчета их траекторий не требуется знание профиля дна и состава его грунта. Поэтому лишь они могут использоваться для определения вертикального угла, соответствующего лучу, по которому возможно определение местоположение источника сигнала.

Таблица 2

Результаты расчета параметров лучей по ВРСЗ для начальной точки траектории движения катера в одном из экспериментов

Глубина погружения АР		4 м			
Глубина погружения излучателя		12 м			
Дистанция по горизонтали		190 м			
№ луча на рис. 3	№ луча по задержке	Время распространения сигнала, мс	Задержка луча относительно первого пришедшего, мс	Угол прихода луча к АР, °	Тип луча
1	4	132,898	3,164	-7,365	1 отраж. от пов-ти и 1 отраж. от дна
2	2	129,751	0,018	-6,571	1 отраж. от пов-ти
3	1	129,733	0,000	-6,273	водный
4	3	132,802	3,069	-4,725	1 отраж. от дна
5	5	135,613	5,880	10,850	1 отраж. от пов-ти и 1 отраж. от дна

По данным из табл. 2 видно, что для начальной точки эксперимента водный луч, обозначенный как №3, искривляется по направлению поверхности воды и приходит к АР не под положительным вертикальным углом (положительные значения вертикального угла отсчитываются вниз), как ожидалось бы для расположения источника сигнала на глубине 12 м и АР на глубине 4 м, а под углом $-6,3^\circ$. Данный луч приходит к АР первым. Примерно с таким же вертикальным углом $-6,6^\circ$ приходит луч №2, отраженный от поверхности воды. Разница в задержках

данных лучей составляет 18 мкс, что значительно меньше разрешающей способности СНС. Это приводит к незначительному раздвоению максимума ВКФ и невозможности разделения данных лучей с помощью временной фильтрации. Остальные лучи имеют большие задержки и могут быть успешно отфильтрованы по времени их прихода, благодаря использованию СНС.

Параметры лучей, вычисленные по ВРСЗ, интересно сравнить с результатами оценки вертикальных углов описанным выше методом. Для этого в табл. 3 приведены значения вертикальных углов для начальных точек траектории движения катера в обсуждаемом эксперименте.

Таблица 3

Результаты оценки вертикальных углов для начальных точек траектории движения катера эксперимента с параметрами из табл. 1

№ точки	1	2	3	4	5	Среднее
Вертикальный угол	-7,7°	-6,0°	-6,0°	-7,1°	-7,5°	-6,9°

Расчет вертикальных углов прихода сигнала к АР по экспериментальным данным дает среднее значение -6,9° для пяти точек из начала непрерывной записи сигнала эксперимента (см. табл. 3). Данное значение согласуется с расчетами по ВРСЗ (см. табл. 2) и отличается на 0,5° от среднего значения угла между лучами №2 и №3. Среднее значение взято из-за того, что в данном случае пространственно-временное разрешение лучей невозможно.

Кроме того, были построены и проанализированы графики изменений импульсных характеристик канала (ИХК) распространения навигационного сигнала (см. рис. 4). ИХК построены путем вычисления огибающей взаимной корреляционной функции (ВКФ).

Интересно сопоставить данные по задержкам лучей, рассчитанным по ВРСЗ (см. табл. 2) и задержкам между первым и вторым четкими максимума ИХК (см. рис. 4,б). Согласно данным табл. 2 первый отраженный от дна луч (луч №3) приходит через 3 мс после основного. Это значение задержки соответствует задержке ~ 3 мс между первым и вторым максимумами ИХК, показанными на рис. 4,б. В данном случае максимум соответствует именно донному отражению, а не отражению от берегов, так как путь источник-дно-приемник короче, чем путь источник-берег-приемник.

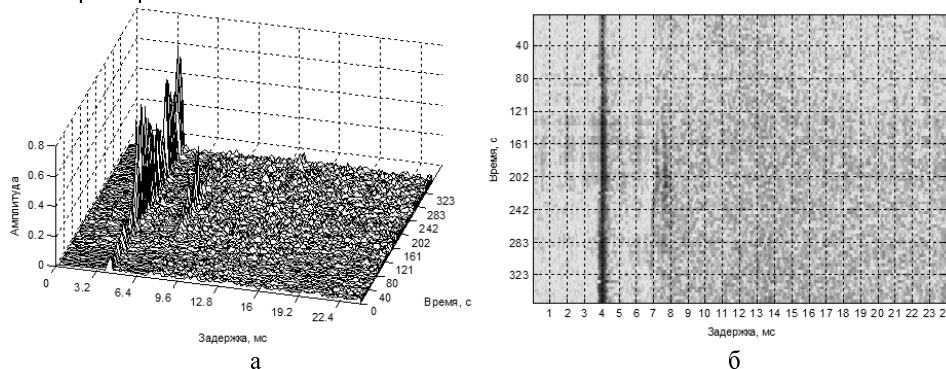


Рис. 4. Изменение импульсной характеристики канала во время проведения одного из экспериментов: а – изометрическая проекция; б – вид сверху

По данным анализа ИХК и лучевых картин были сделаны следующие выводы: 1) основной максимум ИХК соответствует нескольким лучам; 2) лучи в основном максимуме ИХК невозможно разделить временной фильтрацией для данной

ширины полосы навигационного сигнала; 3) ИХК претерпевает сильные изменения во времени; 4) во всех экспериментах присутствует прямой водный луч, который преломлен таким образом, что имеет выпуклость по направлению к поверхности воды и его вертикальный угол прихода к АР для всех соотношений глубин погружения АР и источника сигнала принимает отрицательные значения (положительные значения вертикального угла соответствуют направлению вниз); 5) в большинстве экспериментов вертикальный угол водного луча и луча, имеющего одно отражение от поверхности воды, имеют приблизительно равные значения; 6) из-за специфического профиля скорости звука в месте проведения экспериментов, в отдельных экспериментах изменению расстояния в десятки метров соответствует изменение вертикального угла на десятые доли градуса; 7) данные по относительным задержкам распространения сигнала по лучам, полученные по расчету лучевой картины, хорошо согласуются с данными, полученными при анализе ИХК, несмотря на то, что в расчетах дно считалось плоским, так как точные данные о профиле дна не были известны.

Расхождения в результатах расчетов вертикального угла с помощью предложенного метода и результатах расчетов вертикального угла прихода водного луча по лучевым картинам, построенным по данным измерений ВРСЗ в месте проведения экспериментов, для четырех измерений составляют $0,7^\circ$, $0,5^\circ$, $0,2^\circ$ и $0,5^\circ$. На двух измерениях расхождение с программой расчета лучевой картины составляет $\sim 3,5^\circ$.

Таким образом, результаты обработки данных натурных экспериментов показывают возможность применения ГАНС УКБ на основе разработанного метода определения направления на источник сигнала и разработанной АР в условиях мелководья в сложных гидролого-акустических условиях.

Для повышения точности определения направления на источник сигнала и вычисления координат источника сигнала требуется: 1) при производстве АР выполнять ее калибровку; 2) наличие данных ВРСЗ в момент приема сигнала; 3) наличие данных по ориентации АР в пространстве; 4) в условиях мелководья – наличие данных по профилю дна и его акустических свойств на траектории распространения сигнала.

Экспериментальные исследования, проведенные в испытательном бассейне и естественном водоеме, показали работоспособность выбранных решений, а также возможность высокоточного определения направления на источник сигнала на их основе. На следующем этапе работ планируется изготовление маяков-ответчиков с СНС и испытание ГАНС в целом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Варакин Л.Е.* Системы связи с шумоподобными сигналами. – М.: Радио и связь, 1985. – 384 с.
2. *Литвиненко С.Л.* Метод гидроакустического позиционирования для системы с ультракороткой базой // Труды X Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». – СПб.: Наука, 2010. – С. 94-96.
3. *Литвиненко С.Л.* Система моделирования и анализа сигналов пространственной гидроакустической антенной решетки для разработки комплексов пассивной гидролокации и позиционирования // Труды второй молодежной конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». – СПб., 2011. – С. 76-77.
4. *Хортон Дж. У.* Основы гидролокации: Пер. с англ. – Л.: Судпромгиз, 1961. – 484 с.
5. *Levanon N., Mozeson E. Radar Signals.* – New Jersey.: John Wiley & Sons, Inc., 2004. – 412 p.
6. *Van Trees H.L.* Optimum Array Processing: Part IV of Detection, Estimation, and Modulation Theory. – New York.: John Wiley & Sons, Inc., 2002. – 1444 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.С. Лукьянов.

Литвиненко Сергей Леонидович – ОАО «НИИ гидросвязи “Штиль”»; e-mail: serlin@list.ru; 400081, г. Волгоград, ул. Ангарская, д. 17а; тел.: +7 8442499850; к.т.н.; заместитель генерального директора по научной работе.

Litvinenko Sergey Leonidovich – JSC «Research Institute of Hydrocommunication “Shtil”»; e-mail: serlin@list.ru; 17a, Angarskaya, Volgograd, 400081, Russia, phone: +78442499850; cand. of eng. sc.; deputy director.

УДК 621.396

М.С. Шкуркин

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К ТОЧНОСТНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ КОМПЛЕКСОВ БЛИЖНЕЙ ЗОНЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ ДИАГРАММ НАПРАВЛЕННОСТИ АПЕРТУРНЫХ АНТЕНН

Представлены результаты расчетно-аналитической оценки допустимых значений погрешности измерений амплитудно-фазового распределения поля для случая сверхширокополосных и монохроматических измерительных комплексов ближней зоны с планарным сканированием, при которых суммарная погрешность измерений амплитудных диаграмм направленности апертурных антенн не будет превышать заданных значений. Показано, что для восстановления боковых лепестков амплитудных диаграмм направленности апертурных антенн с относительным уровнем минус 40 дБ с погрешностью не более $\pm 1,2$ дБ необходимо обеспечить погрешность измерений амплитудных характеристик сверхкоротких импульсов не более 1,5 % от максимального значения амплитуды и временных характеристик не более 4,5 % от длительности фронта импульса.

Ближняя зона; погрешность измерений; антенные измерительные комплексы ближней зоны.

M.S. Shkurkin

ESTIMATION OF THE UNCERTAINTIES IN CASE AMPLITUDE AND TIME CHARACTERISTIC PULSE INSTABILITY EFFECT IN TIME DOMAIN TECHNIQUE OF THE PLANAR NEAR-FIELD MEASURING

This paper describes about magnitudes of the time domain and frequency domain measurement errors of the near-field antenna measurement systems with planar scanning are available for correct directivity antenna measures. The results are obtained by near-field/far-field simulate programming for pulse characteristic measurement errors and complex amplitude measurement errors. In this paper are shown how to obtain required accuracy $\pm 1,2$ dB in case measuring of minus 40 dB level side lobes of antennas directivity pattern by ultra wideband and narrow-banded near-field measurement systems. For this requiring the amplitudes uncertainty are 1,5 % and time characteristics uncertainty are 4,5 % for ultra wideband measurement systems are obtained.

Near-field; near-field antenna measurement system; near-field measurement error.

В условиях постоянного развития средств и методов измерений нормируемых характеристик антенн к настоящему моменту времени можно наблюдать достаточно активное использование антенных измерительных комплексов (ИК), реализующих методы измерений в ближней зоне (БЗ) – амплифазометрический и коллимагорный. При этом различают ИК БЗ, функционирующие на основе гармонических сигналов (узкополосные), и ИК БЗ, функционирующие на основе сверхкоротких импульсных сигналов (сверхширокополосные – СШП).

Обеспечение единства, требуемой точности и достоверности результатов измерений характеристик антенн на всех этапах их жизненного цикла является целью метрологического обеспечения антенных измерительных комплексов. Одним из путей достижения указанной цели является установление требований и нормирование их метрологических характеристик.