

## Гидроакустическая система со сложными сигналами для связи и позиционирования подводных аппаратов

В.И.Каевицер<sup>1</sup>, П.П.Пивнев<sup>2</sup>, С.П.Тарасов<sup>2</sup>, А.В.Элбакидзе<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН,  
Фрязинский филиал, г. Фрязино

<sup>2</sup> Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону

**Аннотация:** Рассмотрен метод локального позиционирования подводных аппаратов гидроакустической системой с линейно-частотно-модулированными зондирующими сигналами. Метод основан на измерении дальности до объекта и вычислении углов прихода эхо-сигналов на две или более разнесенные антенны. Для увеличения энергетичности и помехозащищенности применены сигналы с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ). Приведена схема буксирования подводного аппарата с акустическим маяком и расположение гидроакустического интерферометра с двумя приемными антеннами на буксирующем судне. Экспериментально показана возможность практического использования данного метода для высокоточного измерения пространственного положения подводного буксируемого или автономного аппарата относительно надводного судна и, соответственно, возможность географической привязки получаемых подводным аппаратом акустических изображений и профилограмм морского дна. Представлены результаты натурных испытаний экспериментальной системы позиционирования ее тестирование при работах в прибрежной зоне небольшого водоема. Представлена структурная схема аппаратуры локального позиционирования. Приведены примеры экспериментальных распределений модуля мощности эхосигналов по дальности, при корреляционной обработке ЛЧМ сигналов акустического маяка. В работе также предложено для связи между автономными необитаемыми подводными аппаратами (АНПА) движущимися «в стае» использование траверзных узконаправленных широкополосных параметрических систем. Описаны основные технические характеристики системы и приведены экспериментально измеренные в гидроакустическом бассейне диаграммы направленности антенны на средней частоте накачки и на разностных частотах. Представлены особенности распространения сигналов в мелком море.

**Ключевые слова:** гидроакустические системы, интерферометрический гидролокатор бокового обзора, системы локального позиционирования, параметрическая антенна, система передачи данных, широкополосная антенна.

### Введение

При проведении гидрографических изысканий проблема высокоточного картирования морского дна решается с помощью гидролокационных комплексов, включающих в себя различные типы эхолотов и гидролокаторов бокового обзора, устанавливаемых на борту гидрографических судов. В открытом море для позиционирования гидролокационного комплекса и

определения его географического положения, как правило, используются глобальные навигационные системы ГЛОНАСС / GPS. При хорошей видимости спутников и использовании алгоритмов коррекции дифференциального режима погрешность определения координат гидрографического комплекса составляет 1-2 метра, что на небольших глубинах (до 200 метров) обеспечивает при картировании дна необходимую точность определения координат подводных объектов. На больших глубинах для получения детальных изображений морского дна гидролокационные комплексы приближаются ко дну путем установки на буксируемые за судном или автономные подводные аппараты (ПА). При этом возникает проблема определения пространственного положения аппаратуры съемки относительно буксирующего или сопровождающего судна. Для этих целей используются акустические системы подводного позиционирования на основе различных систем – подводные акустические маяки, судовые системы подводного позиционирования на основе интерферометрических систем с различной базой для пеленгации сигналов акустического ответчика, установленного на подводном аппарате. Коммерческие системы подводного позиционирования обычно используют тональные импульсные посылки. Это ограничивает возможность их применения в сложной помеховой обстановке и на больших дальностях из-за ограниченной энергетики и возможных амплитудных ограничений в приемных трактах. Известно [1,2], что применение сигналов со сложной модуляцией и оптимальных методов обработки принимаемых сигналов существенно улучшают надежность работы локационных систем. В работе проведено исследование возможностей и некоторых особенностей пеленгования ПА с установленным на нем маяком-ответчиком с ЛЧМ сигналом, запускаемым по команде с буксирующего или сопровождающего судна по кабелю либо акустическому каналу. Приводятся результаты экспериментальных измерений по

---

пеленгованию подводного аппарата находящегося вблизи дна при высоком уровне помех от сигналов рассеянных дном.

В работе также предлагается для передачи информации использование узконаправленных широкополосных параметрических систем и представлены результаты макетирования параметрической антенны связи для автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА).

### **Основная часть**

При проведении гидрографических изысканий на больших глубинах применяются различные типы эхолотов и гидролокаторов бокового обзора, устанавливаемые на буксируемые за судном или автономные подводные аппараты. Поскольку работа комплекса происходит под водой на значительных глубинах, электронные блоки должны быть помещены в герметичные отсеки. Для этих целей в ФИРЭ им. В.А.Котельникова РАН совместно кафедрой электрогидроакустической и медицинской техники ИНЭП ЮФУ был разработан гидролокатор бокового обзора (ГБО) для малогабаритного буксируемого носителя. ГБО разработан по принципу, описанному ранее в работах для автономного катера [4], но в новой конструкции, приведенной на рис. 1. Кроме того в состав электронного блока включены – плата, обеспечивающая работу акустического маяка, плата измерения крена – дифферента и датчик заглубления. Поскольку вместо радиоканала используется буксирующий кабель – трос, то изменены протоколы обмена данными между подводной и бортовой частями комплекса.



Рис. 1. – Внешний вид малогабаритного многофункционального гидролокационного комплекса для подводного буксируемого аппарата

Вторая проблема при работе буксируемого ГБО это определение пространственного положения аппаратуры съемки относительно буксирующего или сопровождающего судна. Эта задача решается акустическими системами подводного позиционирования на основе интерферометрических систем с различной базой для пеленгации сигналов акустического маяка-ответчика, установленного на ПА. Коммерческие системы подводного позиционирования обычно используют тональные импульсные посылки. Это ограничивает возможность их применения в сложной помеховой обстановке и на больших дальностях из-за ограниченной энергетики и возможных амплитудных ограничений в приемных трактах. Применение сигналов со сложной модуляцией и оптимальных методов обработки принимаемых сигналов существенно улучшают надежность работы локационных систем.

Проведено исследование возможностей и некоторых особенностей пеленгования ПА с установленным на нем маяке-ответчике с ЛЧМ сигналом. Акустический маяк на ПА запускается с буксирующего или

сопровождающего судна по кабелю либо акустическому каналу. Как показано на рис. 2, пространственное положение акустического маяка может быть определено путем решения стандартной задачи триангуляции. Дополнительными данными при картировании дна являются измерения датчиков заглубления Н1, крена, дифферента и курса, установленных на ПА и результаты эхолотных измерений глубины под аппаратом Н2. При наличии измерений дальности от маяка до двух или более приемных антенн расчетным путем находятся угловые координаты объекта относительно буксирующего судна и по ним, с учетом измерений судовых спутниковых навигационных систем, вычисляется его положение, привязанное к географическим координатам [1].

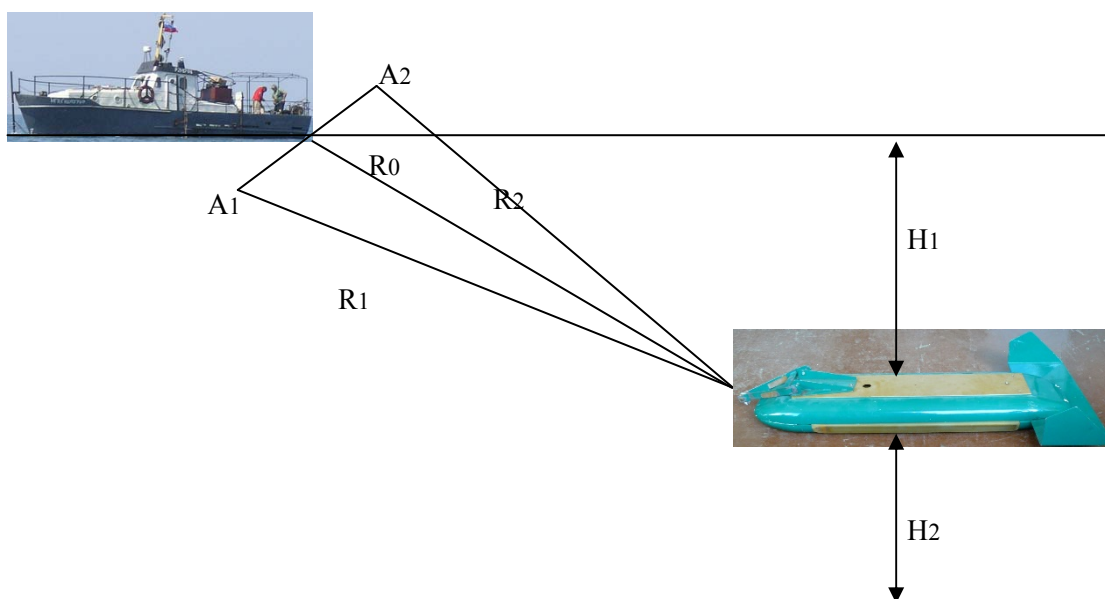


Рис. 2. – Схема буксирования ПА с акустическим маяком и расположение двух антенного акустического интерферометра на буксирующем судне. База интерферометра:  $d = A1 A2$

Экспериментальная проверка работы системы локального позиционирования проводилась с использованием аппаратуры комплекса, блок - схема которого приведена на рис. 3. В комплексе использованы специально разработанные модули и программное обеспечение.

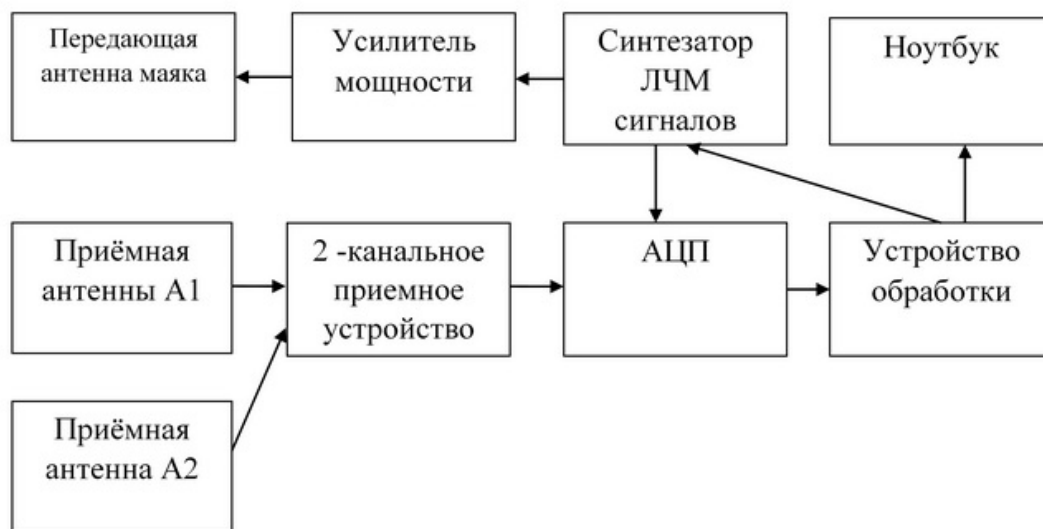


Рис.3. – Структурная схема аппаратуры локального позиционирования

Для оценки возможности практического применения предложенной системы позиционирования было выполнено ее тестирование при работах в прибрежной зоне небольшого водоема. В ходе испытаний радиоуправляемый катер, перемещался по обследуемой акватории параллельно линии А1, А2 и буксировал антенну акустического маяка. Его пространственное положение вычислялось по измерениям дальностей  $R_1$  и  $R_2$  до гидроакустических антенн А1 и А2. Полученная информация регистрировалась и в дальнейшем подвергалась цифровой когерентной обработке.

На рис. 4 приведены примеры принятых антеннами интерферометров сигналов акустического маяка, получаемых при корреляционной обработке. В зависимости от условий съемки эхосигнал содержит один пик либо 2-3 пика. Это связано с приемом кроме прямого сигнала маяка отражений от

поверхности воды. На рис. 5 показаны результаты вычислений изменения расстояний от маяка ПА до антенн А1 и А2, вычисленное по положению первых максимумов модулей корреляционных функций, примеры которых показаны на рис. 4. По горизонтальной оси отложена дальность, а по вертикальной оси номер строки излучения - приема.

Как видно на рис. 4(а) сигнал имеет вид близкий к функции  $\sin x/x$ , то есть кроме основного пика имеется много боковых, спадающих по амплитуде, а на рис. 4(б) представляет сумму таких функций, разнесенных по дальности.

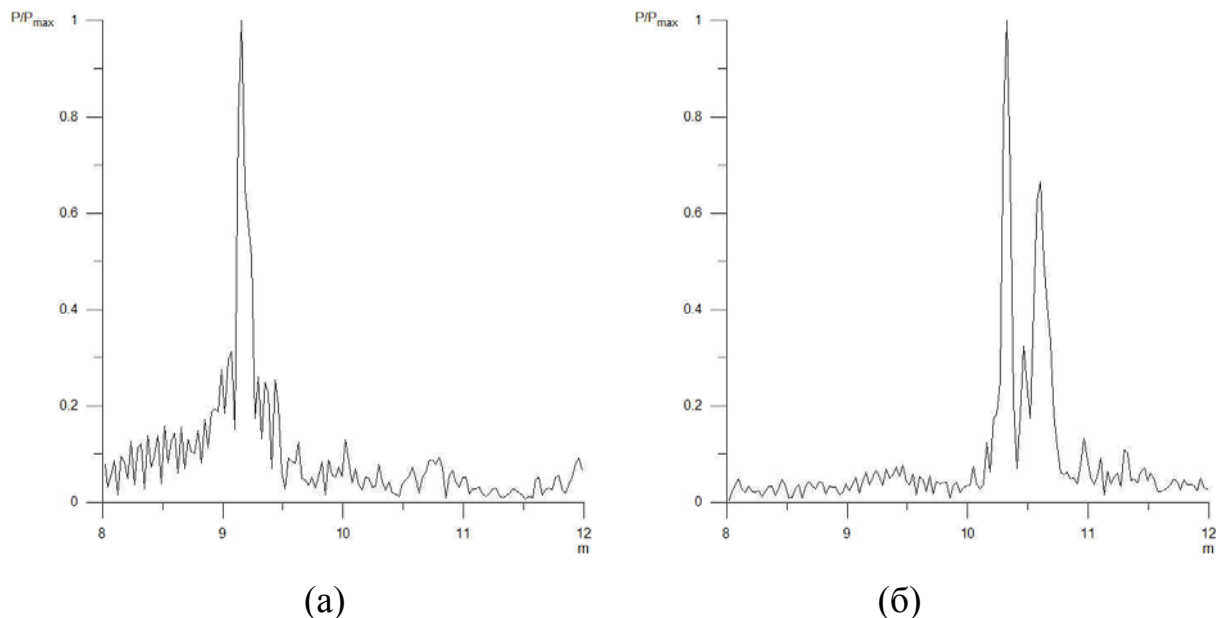


Рис.4. – Примеры экспериментальных распределений модуля мощности эхосигналов по дальности, при корреляционной обработке ЛЧМ сигналов акустического маяка

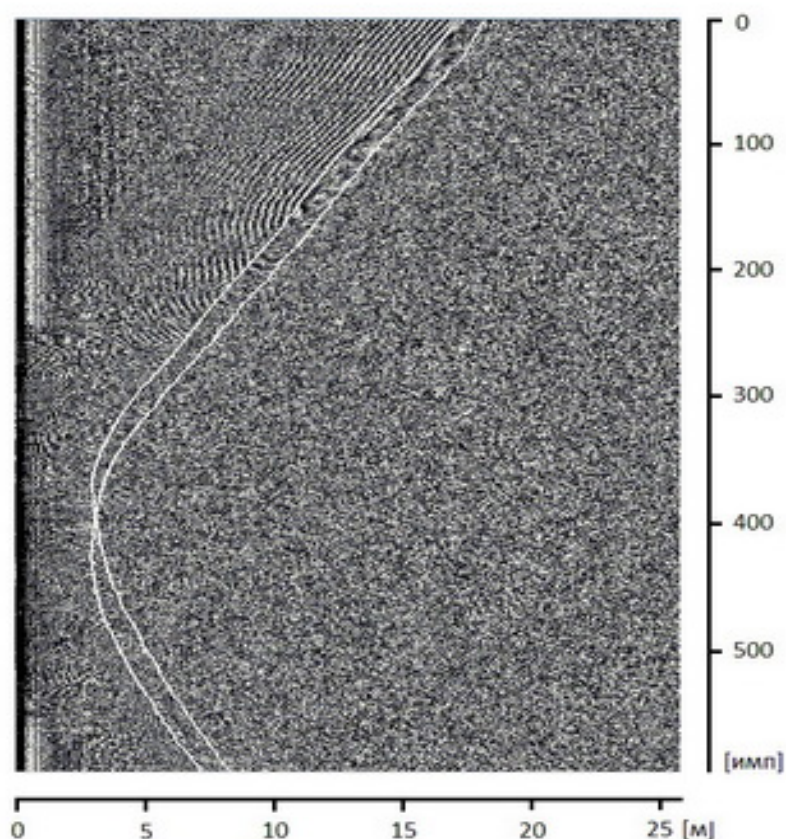


Рис.5. – Линии изменения дальности от маяка до антенн А1 и А2 и полутоновое изображение разности фаз сигналов интерферометра

На полутоновом изображении разности фаз (рис. 5) видна область, где хорошо заметна периодическая интерферометрическая структура. Это связано с высокочастотным периодическим заполнением корреляционной функции, что приводит к появлению интерферограммы в области перекрытия ЛЧМ посылок, принимаемых интерферометром. При большой энергетике ЛЧМ сигнала эта периодичность хорошо просматривается и в зоне боковых лепестков разностной корреляционной функции и может быть использована для уточнения измерений.



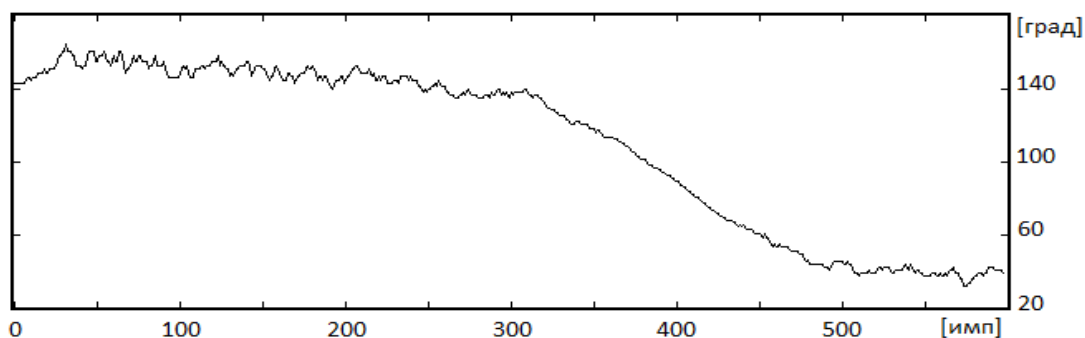


Рис. 6. – Изменение углового положения маяка-ответчика при движении катера. База интерферометра  $d=1.5$  метра

На рис. 6 показаны результаты вычислений изменения углового положения маяка, буксируемого радиоуправляемым катером параллельно линии базы интерферометра, по измерениям расстояний от маяка до приемных антенн. На точность определения углового положения маяка, как видно на рис. 6, в значительной степени влияет его ориентация по отношению к приемным антеннам. Из графика следует, что наилучшая точность наблюдается в направлении перпендикулярном базе интерферометра. В диапазоне  $45^{\circ}$  относительно этого направления погрешность измерения углового положения маяка увеличивается незначительно. В направлениях вдоль базовой линии определение углового положения объекта становится практически невозможным. Очевидно, что точность измерения угла, повышается с увеличением расстояния между антеннами А1 и А2. Для решения задач, где требуется точное пеленгование ПА при углах 0-360 градусов, необходимо применение большего числа антенн, разнесенных по плоскости по крайней мере на углы 90 градусов.

Испытания предложенной системы локального позиционирования показали возможность ее применения для определения местоположения ПА с точностью, достаточной для обеспечения картографической съемки



морского дна гидролокационными комплексами площадной съемки, устанавливаемыми на ПА. Система обладает существенными преимуществами по энергетическому потенциалу и помехозащищенности в сравнении с системами позиционирования ПА, использующими тонально импульсные зондирующие сигналы акустических маяков.

Еще одной проблемой при эксплуатации подводных аппаратов является их взаимодействие при работе в «стаи», особенно в условиях мелководья.

Мелководье вносит «свои коррективы» в распространение акустических волн, затрудняя при этом горизонтальную локацию. Перечислим основные проблемы мелководья при горизонтальном распространении акустических волн:

- наличие неоднородностей в виде пузырьков, взвеси частиц донных отложений и планктона;
- наличие волноводной дисперсии, когда групповая скорость распространения сигнала изменяется с частотой;
- многолучевость распространения акустических волн.

Учесть это можно в «траверзной» параметрической системе связи.

Подсистема гидроакустической связи предназначена для информационного обмена между подвижными подводными носителями. Параметрическая «траверзная» система связи является излучает узконаправленный луч с углом раскрытия 3 град., который может поворачиваться вдоль движения судна в диапазоне  $\pm 10$  град. Система связи работает в двух частотных диапазонах 250-300 кГц (для передачи данных на расстоянии до 300 м.) и 10-40 кГц обеспечивая при этом устойчивую связь с соседним аппаратом на расстоянии до 1,5 км в условиях мелководья.

Мелководье, при горизонтальном распространении гидроакустического сигнала является гидроакустическим каналом связи.

---

Гидроакустический канал, как известно, имеет принципиальные отличия от радио и проводных каналов связи [5]. Для него характерны следующие особенности:

- зависимость коэффициента затухания гидроакустических сигналов от частоты;
- малые скорости распространения;
- многолучевое распространение.

Высокая направленность параметрической антенны значительно улучшает ситуацию с многолучевостью.

Мелкое море (морской волновод) обладает частотной дисперсией скорости распространения акустического сигнала. Величина дисперсии зависит от профиля скорости звука по глубине и от толщины волновода. Частотная дисперсия приводит либо к разрушению коротких широкополосных импульсов, которые распространяются на достаточно протяженные расстояния, либо к концентрации энергии акустического сигнала в коротком интервале времени, если частотная модуляция сигнала соответствует условиям дисперсии в среде. В таком случае можно говорить о том, что происходит фокусировка или сжатие акустического сигнала во времени [11].

Таким образом, необходимо использование сложных сигналов, согласованных с волноводом, так как дисперсия в волноводе приводит к изменениям структуры сигнала, что может быть использовано в пространственной обработке сигналов для их сжатия и тем самым повышение дальности гидроакустических систем [15].

Ниже, на рисунке 7 представлен макет антенны накачки. На рис. 8 представлена диаграмма направленности (ДН) антенны на частотах накачки (270 кГц), а на рис. 9 диаграммы направленности на разностных частотах 5-25 кГц.

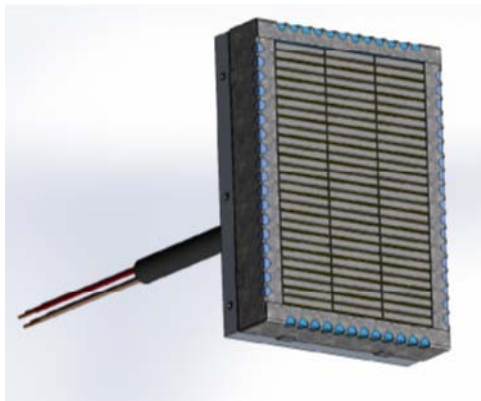


Рис.7. – Макет антенны накачки

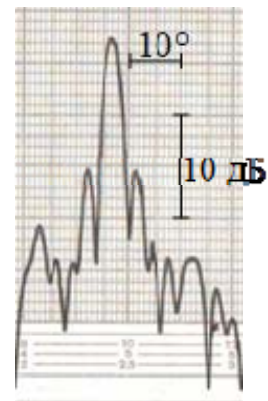


Рис.8. – ДН макета на частоте 270кГц

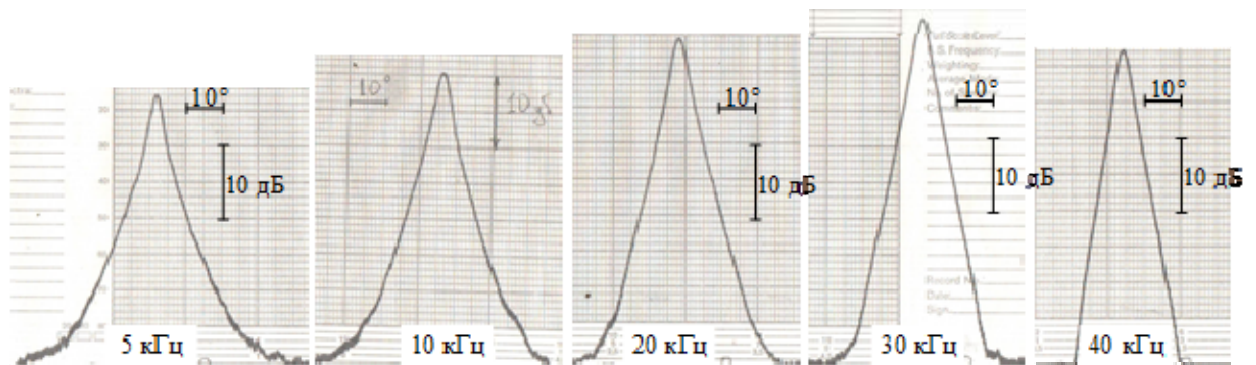


Рис. 9. – ДН макета на разностных частотах

Из рис. 8 и 9 видно, что ширина основного лепестка ДН на уровне 0,707 остается постоянной во всем диапазоне разностных частот и на частотах накачки.

### Выводы

Натурные испытания системы локального позиционирования показали возможность ее применения для определения местоположения ПА с достаточной точностью. Существенными плюсами представленной системы являются преимущества по энергетическому потенциалу и помехозащищенности в сравнении с системами позиционирования ПА, использующими тонально импульсные зондирующие сигналы акустических

маяков. С учетом того, что позиционирование ПА в основных практических случаях осуществляется по «точечному» источнику акустического излучения, эффективность системы может быть существенно повышена применением алгоритмов сверх разрешения спектрального оценивания и учета фазовых измерений интерферометра.

С помощью параметрических антенн может быть с успехом решена задача передачи информации между АНПА в условиях мелководья на значительные расстояния.

### Литература

1. Каевицер В.И., Разманов В.М., Кривцов А.П., Смольянинов И.В., Долотов С.А. Дистанционное зондирование морского дна акустическими сигналами с линейной частотной модуляцией // Радиотехника, 2008. - № 8. - С.35-42.
2. Теоретические основы радиолокации / Под ред. Я.Д. Ширмана. -М.: Советское радио, 1970. - 560 с.
3. Каевицер В.И., Кривцов А.П., Разманов В.М., Смольянинов И.В., Элбакидзе А.В., Денисов Е.Ю. Дистанционно управляемый катер с гидролокатором бокового обзора для картографирования дна малых водоемов // Известия ЮФУ. Технические науки, 2016. -№ 10. - С.80-91.
4. Тарасов С.П., Воронин В.А., Воронин А.В., Пивнев П.П. Построение широкополосных антенн систем передачи данных малогабаритных автономных подводных аппаратов. Радиолокационные системы специального и гражданского назначения 2015-2017. - М.: Радиотехника, 2016. - С. 779-790.
5. Федосов В.П., Тарасов С.П., Пивнев П.П., Воронин В.В., Кучерявенко С.В., Легин А.А., Ломакина А.В., Франц В.А. Сети связи для подводных автономных роботизированных комплексов. Монография. - Ростов-на-Дону - Таганрог, 2018. - 178 с.

6. Пивнев П.П., Лукьянченко А.А. Особенности построения гидролокатора траверзного обзора с параметрическим режимом для экологического мониторинга и оценки рыбных запасов на мелководье // Сборник трудов Второй Всероссийской молодежной школы-семинара «Экология, проблемы приморских территорий», 2017. - С. 50-55.

7. Новиков Б. К. Руденко О. В. Тимошенко В. И. Нелинейная гидроакустика. - Л.: Судостроение, 1981. - 264 с.

8. Esipov I. B., Tarasov S. P., Voronin V. A., Popov O. E. Nonlinear Acoustics — Fundamentals and Applications, 18-th International Symposium on Nonlinear Acoustics. Stockholm, Sweden, 7—10 July 2008. - P. 393.

9. Есипов И.Б., Попов О.Е., Сизов И.И. Перспектива применения методов нелинейной акустики для гидрофизических исследований на протяженных трассах. Ученые записки физического факультета Московского университета. 2014. № 6. С. 146342-1-146342-7.

10. Бреховских Л. М., Лысанов Ю.П. Теоретические основы акустики океана.- Л.: Гидрометеиздат, 1982. - 264 с.

11. Есипов И.Б., Попов О.Е., Кенигсбергер Г.В., Сизов И.И. Параметрическая антенна для гидрофизических исследований на протяженных трассах. Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2016. Т. 80. № 10. С. 1340-1349.

12. Mikhalevsky P. Basin-Wide High Arctic Acoustic Network – status and possibilities. Proceedings of the 1st International Conference and Exhibition on Underwater Acoustics. (Corfu, Greece, 2013). P. 325.

13. Демидов А.И., Комочков Р.Ш., Мосолов С.С., Скнаря А.В., Тутынин Е.В. Широкополосные технологии в отечественной гидролокации: необходимость и возможность реализации. Известия ЮФУ. Технические науки. 2011. № 9 (122). С. 46-51.

14. Мосолов С.С., Скноря А.В., Тутьнин Е.В, Залогин Н.Н. Некоторые аспекты и перспективы применения сложных сигналов в гидроакустике // IV Всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь». – М.: ИРЭ РАН, 29 ноября - 3 декабря 2010. - С. 170-174.

15. Воронин В.А., Пивнев П.П., Тарасов С.П. Широкополосные гидроакустические антенны систем экологического мониторинга водной среды и придонных осадочных пород // Инженерный вестник Дона, 2015, №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2015/3476](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2015/3476).

16. Тарасов С.П., Тимошенко В.И., Воронин В.А., Кириченко И.А., Пивнев П.П., Солдатов Г.В., Волощенко А.П., Эсси-Эзинг А.С., Обыденная В.А., Франчук Д.А. Измерение фазочастотной характеристики приемной антенны многолучевого эхолота в условиях гидроакустического бассейна // Инженерный вестник Дона, 2012, №4 (часть 1). URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p1y2012/1227](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p1y2012/1227).

### References

1. Kaevicer V.I., Razmanov V.M., Krivcov A.P., Smol'yaninov I.V., Dolotov S.A. Radiotekhnika, 2008. № 8. pp.35-42.

2. Teoreticheskie osnovy radiolokacii. Pod red. YA.D. SHirmana. [Theoretical bases of a radar-location. Under the editorship of Ya.D. Shirman.] М.: Sovetskoe radio, 1970. 560 p.

3. Kaevicer V.I., Krivcov A.P., Razmanov V.M., Smol'yaninov I.V., EHLbakidze A.V., Denisov E.YU. Izvestiya YUFU. Tekhnicheskie nauki, 2016. № 10. pp.80-91.

4. Tarasov S.P., Voronin V.A., Voronin A.V., Pivnev P.P. Postroenie shirokopolosnyh antenn sistem peredachi dannyh malogabaritnyh avtonomnyh podvodnyh apparatov. Radiolokacionnye sistemy special'nogo i grazhdanskogo naznacheniya 2015-2017 [Creation of broadband antennas of transmitting systems

of these small-sized independent submersibles. Radar-tracking systems of special and civil appointment 2015-2017]. M.: Radiotekhnika, 2016. pp. 779-790.

5. Fedosov V.P., Tarasov S.P., Pivnev P.P., Voronin V.V., Kucheryavenko S.V., Legin A.A., Lomakina A.V., Franc V.A. Seti svyazi dlya podvodnyh avtonomnyh robotizirovannyh kompleksov. Monografiya [Communication networks for underwater autonomous robotic complexes. Monograph]. Rostov-na-Donu - Taganrog, 2018. 178 p.

6. Pivnev P.P., Luk'yanchenko A.A. Osobennosti postroeniya gidrolokatora traverznogo obzora s parametricheskim rezhimom dlya ehkologicheskogo monitoringa i ocenki rybnyh zapasov na melkovod'e. Sbornik trudov Vtoroj Vserossijskoj molodezhnoj shkoly-seminara «EHkologiya, problemy primorskih territorij» [Features of creation of a sonar of the traverzny review with the parametrical mode for environmental monitoring and assessment of fish stocks in shallow water. The Collection of works of the Second All-Russian youth workshop "Ecology, problems of seaside territories"], 2017. pp. 50-55.

7. Novikov B. K. Rudenko O. V. Timoshenko V. I. Nelinejnaya gidroakustika [Nonlinear underwater acoustics]. L.: Sudostroenie, 1981. 264 p.

8. Esipov I. B., Tarasov S. P., Voronin V. A., Popov O. E. Nonlinear Acoustics. Fundamentals and Applications, 18-th International Symposium on Nonlinear Acoustics. Stockholm, Sweden, 7-10 July 2008. p. 393.

9. Esipov I.B., Popov O.E., Sizov I.I. Uchenye zapiski fizicheskogo fakul'teta Moskovskogo universiteta. 2014. № 6. p. 146342-1-146342-7.

10. Brekhovskih L. M., Lysanov YU. P. Teoreticheskie osnovy akustiki okeana [Theoretical bases of acoustics of the ocean]. L.: Gidrometeoizdat, 1982. 264 p.

11. Esipov I.B., Popov O.E., Kenigsberger G.V., Sizov I.I. Izvestija Rossijskoj akademii nauk. Serija fizicheskaja. 2016. T. 80. № 10. p. 1340-1349.





12. Mikhalevsky P. Basin-Wide High Arctic Acoustic Network – status and possibilities. Proceedings of the 1st International Conference and Exhibition on Underwater Acoustics. (Corfu, Greece, 2013). p. 325.

13. Demidov A.I., Komochkov R.Sh., Mosolov S.S., Sknarja A.V., Tutynin E.V. Izvestija JuFU. Tehnicheskie nauki. 2011. № 9 (122). p. 46-51.

14. Mosolov S.S., Sknarya A.V., Tutynin E.V, Zalogin N.N. Nekotorye aspekty i perspektivy primeneniya slozhnyh signalov v gidroakustike. IV Vserossijskaya konferenciya «Radiolokaciya i radiosvyaz'» [Some aspects and the prospects of application of the difficult signals in an underwater acoustics. The IV All-Russian conference "Radar-location and Radio Communication"]. M.: IREH RAN, 29 noyabrya - 3 dekabrya 2010. pp. 170-174.

15. Voronin V.A., Pivnev P.P., Tarasov S.P. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2015, №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2015/3476](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2015/3476).

16. Tarasov S.P., Timoshenko V.I., Voronin V.A., Kirichenko I.A., Pivnev P.P., Soldatov G.V., Voloshchenko A.P., EHssi-EHzing A.S., Obydennaya V.A., Franchuk D.A. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2012, №4 (part 1). URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p1y2012/1227](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p1y2012/1227).