

18. *Stojanovic M., Catipovic J.A., Proakis J.G.* Reduced-complexity spatial and temporal processing of underwater acoustic communication signals, *J. Acoust. Soc. Am.*, 1995, Vol. 98, pp. 961-972.
19. *Akyildiz I.F., Pompili D., Melodia T.* Underwater Acoustic Sensor Networks: Research Challenges, *Ad Hoc Networks (Elsevier)*, March 2005, Vol. 3, No. 3, pp. 257-279.
20. *Catipovic J., Brady D., and Echemendy S.* Development of underwater acoustic modems and networks, *Oceanography*, Mar. 1993, Vol. 6, pp. 112-119.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор С.П. Тарасов.

**Вишневецкий Вячеслав Юрьевич** – Южный федеральный университет; e-mail: vuvishnevetsky@sfedu.ru; 347922, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2, корп. Е; тел.: +78634371795; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники; к.т.н.; доцент.

**Колесник Денис Александрович** – e-mail: denkolesnik@sfedu.ru; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники; аспирант.

**Старченко Ирина Борисовна** – ООО «Параметрика»; e-mail: ibstarchenko@gmail.com; г. Таганрог, ул. Инструментальная, 47; тел.: +79185068497; д.т.н.; профессор; научный руководитель.

**Vishnevetskiy Vyacheslav Yurievich** – Southern Federal University; e-mail: vuvishnevetsky@sfedu.ru; 2, Shevchenko str., build. E, Taganrog, 347922, Russia; phone: +78634 371795; the department of electrohydroacoustic and medical technology; cand. of eng. sc.; associate professor.

**Kolesnik Denis Aleksandrovich** – e-mail: denkolesnik@sfedu.ru; the department of electrohydroacoustic and medical technology; postgraduate.

**Starchenko Irina Borisovna** – ООО Parametrica; e-mail: ibstarchenko@gmail.com; phone: +79185068497; 47, Instrumental'naya str., Taganrog, Russia; dr. of eng. sc., professor; academic advisor.

УДК 534.2

DOI 10.23683/2311-3103-2018-6-67-75

**А.Е. Анищенко, Г.В. Солдатов, А.В. Лотарев, А.Ю. Вареникова**

### **СПОСОБ ФОРМИРОВАНИЯ ФАЗОМАНИПУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ АНТЕННОЙ\***

*В силу технического прогресса в развитии морской инфраструктуры появляется необходимость передачи информации через водную среду на десятки и сотни тысяч метров. Цель данного исследования – разработка нового принципа фазовой манипуляции для звуко-подводной связи с использованием параметрической антенны. Показана принципиальная возможность использования разностной частоты параметрической гидроакустической антенны для формирования сигналов с фазовой манипуляцией. Рассмотрены два способа формирования фазовой манипуляции – при помощи изменения фазы частот накачки и с помощью кратковременного изменения частоты на участке разностной волны. Использование существующего способа фазовой манипуляции через изменение фаз сигналов накачки приводит к неконтролируемым переходным процессам в сигнале разностной частоты. Использование второго способа фазовой манипуляции сигнала разностной частоты через кратковременное изменение частот накачки и соответственно появление измененного участка сигнала разностной частоты, сдвигающего фазу основного сигнала в сторону уменьшения или в сторону увеличения позволяет управлять переходным процессом уменьшая количество амплитудных выбросов. Проведены экспериментальные исследования как в гидроакустическом бассейне, так и в море с учетом наличия природных гидрологических условий подтвердившие теоретические положения. Расчеты показали, что использование укороченной измененной части сигнала разностной частоты параметрической антенны*

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-32-00813.

*приводит к необходимости чрезмерного увеличения частоты накачки (сотни кГц) что может превышать ширину полосы пропускания параметрической антенны. Использование увеличенного участка позволяет увеличивать частоту незначительно (на десятки или даже единицы кГц), что дает практически неограниченные возможности для выбора угла манипуляции.*

*Звукоподводная связь; фазовая манипуляция; параметрическая антенна; цифровая связь.*

**A.E. Anishchenko, G.V. Soldatov, A.V. Lotarev, A.Y. Varenikova**

### **WAY OF FORMATION OF PHASE MANIPULATED SIGNALS BY HYDROACOUSTIC PARAMETRICAL ANTENNA**

*Owing to technical progress in development of sea infrastructure the need of information transfer through the water environment on tens and hundreds of thousands of meters appears. Objective of this research is the development of the new principle of phase manipulation for sound underwater connection with use of the parametrical antenna. The basic possibility of use of intercarrier frequency of the parametrical hydroacoustic antenna for forming of signals with phase manipulation is shown. Two ways of forming of phase manipulation are the following: by means of phase change of pumping rates and by means of impermanent update of frequency on section of a differential wave are considered. Use of the existing way of phase manipulation through change of phases of signals of pumping leads to uncontrollable transition processes in a signal of intercarrier frequency. Use of the second way of phase manipulation of a signal of intercarrier frequency through impermanent update of pumping rates and respectively emergence of the changed section of the signal of intercarrier frequency shifting a phase of a base signal towards reduction or towards increase allows to manage transition process reducing the number of amplitude emissions. Natural experiments both in the control and measuring hydroacoustic pool, and in the sea taking into account existence of natural hydrological conditions the confirmed theoretical provisions are made. Calculations showed that use of the shortened changed part of a signal of intercarrier frequency of the parametrical antenna results in need of excessive increase in pumping rate (hundreds of kHz) that can exceed band width of transmission of the parametrical antenna. Use of the increased section allows increasing frequency slightly (by tens or even units of kHz) that gives almost unlimited opportunities for the choice of an angle of manipulation.*

*Sound underwater communication; phase manipulation; parametrical antenna; digital communication.*

**Введение.** В существующей морской инженерной практике большую популярность приобрели устройства передачи информации через водную среду – гидроакустические модемы. Передаваемая информация используется в различных процессах – подводной навигации, управлении автоматизированной техникой и т.д. [1, 2]. Дальность действия этих модемов при благоприятных условиях распространения составляет порядка сотен-тысяч метров [8, 9, 11, 14]. В условиях мелкого моря дальность действия гидроакустических модемов очень сильно зависит от условий распространения акустических сигналов. Однако, развитие робототехники, подводных дронов, работающих самостоятельно на больших удалениях от носителей, поднимает вопрос о разработке новых принципов дальней звукоподводной связи – для передачи информации на десятки или сотни тысяч метров [4, 6, 7, 12].

В ряде случаев гидрологические условия создают благоприятные условия для распространения гидроакустических волн на дальние и сверхдальние расстояния [21]. Используя параметрическую антенну, одним из полезных свойств которой является возможность формирования очень узкой диаграммы направленности сигнала, а также его низкочастотность (то есть он затухает намного медленней), мы можем значительно увеличить дистанцию передачи сигналов звукоподводной связи.

Сигнал можно модулировать различными принципами – амплитудными, частотными, фазовыми, подробно рассмотренными в соответствующей литературе [7, 10, 13, 15, 16].

**Постановка задачи.** В настоящей работе рассматриваются вопросы генерации сигналов с фазовой манипуляцией. Генерация акустических сигналов с фазовой модуляцией затруднена в связи с узкой полосой пропускания традиционных гидроакустических антенн. Широкая полоса параметрической антенны позволит существенно сократить время переходного процесса, возникающего после изменения фазы сигналов, подаваемых на излучающую антенну. Исследованию возможности уменьшения влияния переходного процесса на спектр сигнала и посвящена настоящая работа. Необходимо разработать способы генерации фазоманипулированных сигналов с помощью параметрической антенны.

Принцип формирования сигналов следующий: излучатель состоит из преобразователя, генерирующего высокочастотные волны накачки, и участка водной среды в которой происходит их взаимодействие. В результате нелинейного взаимодействия между волнами накачки образуется волна разностной частоты  $F = f_2 - f_1$ . Высокочастотные волны накачки затухают в пределах области взаимодействия, в то время как волна разностной частоты распространяется на значительные расстояния [5]. Амплитуда и фаза волны разностной частоты зависит от амплитуд и фаз волн накачки.

**Способ фазовой модуляции 1.** Фазовая модуляция волны разностной частоты осуществляется путем изменения фазы волн накачки, как показано на рис. 1.

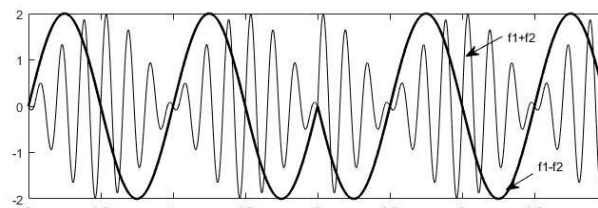


Рис. 1. Способ фазовой модуляции

На графиках на рис. 2 видны переходные процессы при изменении фазы на 180 градусов. Частота разностного сигнала равна 15 кГц. На верхнем графике приведена осциллограмма сигнала накачки. На нижнем приведены прямой сигнал, опорный сигнал (для наглядного представления фазового сдвига), и сигнал на выходе демодулятора, амплитуда которого пропорциональна фазе. Из рисунка видно, что переходной процесс длится немного больше 1 периода. Сигнал разностной частоты показан с задержкой, обусловленной групповой задержкой пассивного фильтра низких частот.

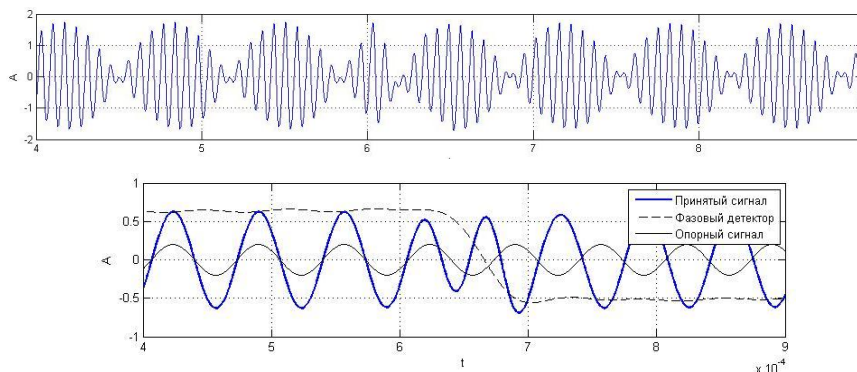


Рис. 2. Осциллограмма сигнала накачки, прямой сигнал, опорный сигнал и сигнал на выходе демодулятора

На рис. 3 показана фазовая модуляция QPSK 0.2мс/2битf (10 кб/с). На верхнем графике показана осциллограмма принятого сигнала, на нижнем – результат фазовой демодуляции.

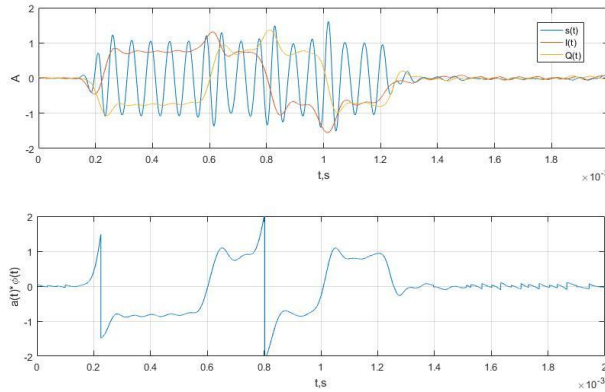


Рис. 3. Фазовая модуляция QPSK 0.2мс/2битf (10 кб/с)

**Способ фазовой модуляции 2.** Предлагается рассмотреть способ фазовой модуляции параметрической акустической волны, осуществляемый посредством изменения частот накачки. При необходимости произвести изменение фазы сигнала разностной частоты, частоты накачки временно меняются таким образом, чтобы создать в сигнале разностной однократный период другой частоты, после чего восстанавливаются предыдущие параметры разностной. Длина измененной волны будет меньше, вследствие чего восстановление сигнала произойдет раньше по времени, то есть начало волны разностной будет смещено на величину разницы между длинами волн измененного и неизменного сигнала разностной. Меняя длину измененного периода можно варьировать момент восстановления разностной а следовательно фазу сигнала.

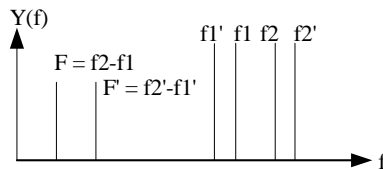


Рис. 4. Принцип изменения разностной частоты через изменение частот накачки

Ниже приведена таблица изменения отношений амплитуд основного сигнала  $A_0$  и измененного в сторону уменьшения периода  $A_1$ , а также основного и измененного в сторону увеличения  $A_2$  при разных значениях устанавливаемой фазы  $\varphi$ .

Исходя из соотношений

$$A_1 \sim \frac{\varepsilon A_0^2 \alpha^2 F_1^2 l_3}{8 \rho_0 c_0^4 z} \cos \Omega \tau; \quad A_0 \sim \frac{\varepsilon A_0^2 \alpha^2 \Omega^2 l_3}{8 \rho_0 c_0^4 z} \cos \Omega \tau \quad (1)$$

$$F_1 = \Omega \frac{360}{\varphi}; \quad F_2 = \Omega \frac{\varphi}{360}; \quad (2)$$

$$\frac{A_1}{A_0} = \frac{F_1^2}{\Omega^2}; \quad \frac{A_2}{A_0} = \frac{F_2^2}{\Omega^2} \quad (3)$$

Можно сделать вывод, что средняя частота остается постоянной, значит в формуле (1) ничего изменяться не будет, следовательно соотношение амплитуд для разных частот разностной будет определяться в этой формуле параметром  $\Omega$ , а для того чтобы определить насколько уменьшить или увеличить частоту относительно фазового сдвига используем формулы F1 и F2. По этим формулам был произведен расчет частот накачек, необходимых для введения фазового сдвига. Результаты расчета приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

**Зависимость частот накачек и амплитуды переходного процесса от сдвига фазы путем уменьшения периода сигнала**

$\varphi$	f1	f2	F1	A1/A0
45°	$f1 = f_{cp} - 4 \Omega$	$f2 = f_{cp} + 4 \Omega$	8 $\Omega$	64
90°	$f1 = f_{cp} - 2 \Omega$	$f2 = f_{cp} + 2 \Omega$	4 $\Omega$	16
135°	$f1 = f_{cp} - 1,34\Omega$	$f2 = f_{cp} + 1,33\Omega$	2,67 $\Omega$	7,1
180°	$f1 = f_{cp} - \Omega$	$f2 = f_{cp} + \Omega$	2 $\Omega$	4
225°	$f1 = f_{cp} - 0,8 \Omega$	$f2 = f_{cp} + 0,8 \Omega$	1,6 $\Omega$	2,56
270°	$f1 = f_{cp} - 0,65 \Omega$	$f2 = f_{cp} + 0,65 \Omega$	1,33 $\Omega$	1,69
315°	$f1 = f_{cp} - 0,6 \Omega$	$f2 = f_{cp} + 0,6 \Omega$	1,14 $\Omega$	1,3

Таблица 2

**Зависимость частот накачек и амплитуды переходного процесса от сдвига фазы путем увеличения периода сигнала**

$\varphi$	f1	f2	F2	A2/A0
45°	$f1 = f_{cp} + 1/64 \Omega$	$f2 = f_{cp} - 1/64 \Omega$	1/8 $\Omega$	1/64
90°	$f1 = f_{cp} + 1/16 \Omega$	$f2 = f_{cp} - 1/16 \Omega$	1/4 $\Omega$	1/16
135°	$f1 = f_{cp} + 0,19 \Omega$	$f2 = f_{cp} - 0,19 \Omega$	0,38 $\Omega$	1/9
180°	$f1 = f_{cp} + 1/4 \Omega$	$f2 = f_{cp} - 1/4 \Omega$	1/2 $\Omega$	0,25
225°	$f1 = f_{cp} - 0,312 \Omega$	$f2 = f_{cp} + 0,312 \Omega$	0,625 $\Omega$	0,39
270°	$f1 = f_{cp} - 0,0375 \Omega$	$f2 = f_{cp} + 0,375 \Omega$	0,75 $\Omega$	0,56
315°	$f1 = f_{cp} - 0,438 \Omega$	$f2 = f_{cp} + 0,438 \Omega$	0,875 $\Omega$	0,76

**Выводы.** Создать фазоманипулированный сигнал можно двумя способами – изменением фаз волн накачки и кратковременным изменением их частот. Во втором случае есть также два способа – использование суженного или расширенного измененного участка волны разностной частоты. При использовании первого варианта, путем сужения одного периода разностной частоты через увеличение его частоты, необходимо менять частоту накачек в больших пределах. Диапазон фазовых задержек будет зависеть от полосы пропускания антенны. При малых фазовых сдвигах будут возникать импульсы амплитуда которых значительно превышает амплитуду полезного сигнала. В случае использования увеличенного (расширенного) периода измененной части сигнала, как показано в табл. 2, антенна может работать при любых значениях фаз при незначительном изменении частот накачек параметрической антенны и, следовательно, данный способ позволяет передать фазоманипулированный сигнал без ограничений. Представленный способ является оптимальным способом фазовой манипуляции разностной частоты гидроакустического сигнала параметрической антенны.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Акуличев В.А., Каменев С.И., Моргунов Ю.Н.* Применение сложных акустических сигналов в системах связи и управления подводными объектами // Доклады академии наук. – 2009. – Т. 426, № 6. – С. 821-823.
2. *Полетаев А.С.* Модем гидроакустической связи // Глобальный научный потенциал. – 2013. – № 5 (26). – С. 64-68.
3. *Бондарева Ж.Ю., Кравчук Д.А.* Применение широкополосных сигналов в гидроакустических системах связи в мультиагентной системе мониторинга морского шельфа // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 9 (146). – С. 256-258.
4. *Иваницкий А.М., Сухарьков О.В.* Гидроакустические антенны дальней цифровой связи для волноводных каналов Черного моря // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2013. – № 1. – С. 34-42.
5. *Литвинцева А.В., Оболонин М.А.* Использование линейного предсказателя речи в программной модели низкоскоростного вокодера для передачи речи по гидроакустическому каналу связи // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 3. – С. 10.
6. *Кебкал А.Г., Кебкал К.Г., Комар М.А.* Эмулятор системы цифровой гидроакустической связи и позиционирования для разработки и тестирования пользовательских приложений // Подводные исследования и робототехника. – 2013. – № 2 (16). – С. 48-55.
7. *Рыбина М.С., Скакунов В.Н.* Разработка метода обработки сигналов для цифровых систем гидроакустической связи // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2014. – Т. 10, № 26 (153). – С. 86-90.
8. *Hladkih N.D.* Experimental realization of digital sonar communication (part 1) // Электроніка та зв'язок. – 2014. – Т. 19, № 1 (78). – С. 95-101.
9. *Hladkih N.D.* Experimental realization of digital sonar communication (part 2) // Электроніка та зв'язок. – 2014. – Т. 19, № 2 (79). – С. 94-100.
10. *Унру П.П., Стаценко Л.Г., Родионов А.Ю.* Использование адаптивного ортогонального частотного мультиплексирования гидроакустических каналах связи при модуляции передаваемого сигнала // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2014. – № S12-3. – С. 118-123.
11. *Денисов В.Е.* Анализ искажений высокочастотных импульсных акустических сигналов в гидроакустическом канале связи // Российский технологический журнал. – 2015. – № 1 (6). – С. 123-133.
12. *Криволапов Г.И., Чернецкий Г.А.* О повышении достоверности передачи информации в цифровых гидроакустических каналах связи низкого качества // Технические проблемы освоения Мирового океана. – 2005. – № 1. – С. 229-232.
13. *Прибылов В.П., Чернецкий Г.А.* Об эффективности систем передачи информации с обратной связью в гидроакустических каналах связи // Технические проблемы освоения Мирового океана. – 2005. – № 1. – С. 238-242.
14. *Кебкал К.Г., Кебкал В.К., Кебкал А.Г.* Цифровые гидроакустические сети для условий связи с произвольно большими задержками соединения и разрывами соединений: экспериментальное исследование // Технические проблемы освоения Мирового океана. – 2016. – Т. 6. – С. 269-281.
15. *Матвиенко Ю.В.* Гидроакустические средства навигации и связи подводных аппаратов ИПМТ ДВО РАН // Технические проблемы освоения Мирового океана. – 2005. – № 1. – С. 6-12.
16. *Нелепа А.А., Родионов А.Ю.* Гидроакустическая система связи с частотно-импульсной эхо-компенсацией // Технические проблемы освоения Мирового океана. – 2016. – Т. 6. – С. 299-303.
17. *Захаров И.С., Жибя Г.В., Смоляков А.А., Сай С.В.* Коды Рида-Соломона в составе кодирующих конструкций для использования в гидроакустических каналах связи // Информационные технологии XXI века: Сб. научных трудов. – Хабаровск, 2017. – С. 33-41.
18. *Filippov V.I., Chernetskiy G.A.* Application of error – correcting coding in hydroacoustic communication channels // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. – 2017. – Т. 10, № 3. – С. 377-387.

19. Карнов М.А. Формирователь сигнала для передатчика гидроакустической системы связи // Смотр-конкурс научных, конструкторских и технологических работ студентов Волгоградского государственного технического университета: Тезисы докладов. В 2-х ч. Редакция: А.В. Навроцкий (отв. ред.) [и др.]. – 2017. – С. 5.
20. Филиппов Б.И. Алгоритм функционирования системы измерения дистанции с использованием гидроакустического канала связи // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2016. – № 4. – С. 87-98.
21. Есупов И.Б., Тарасов С.П., Чулков В.Л. Параметрическая гидроакустическая антенна – перспективный инструмент для мониторинга океана на протяженных трассах // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – 2014. – Т.7, № 2. – С. 46-57.

#### REFERENCES

1. Akulichev V.A., Kamenev S.I., Morgunov Yu.N. Primenenie slozhnykh akusticheskikh signalov v sistemakh svyazi i upravleniya podvodnymi ob"ektami [Application of complex acoustic signals in communication and control systems of underwater objects], *Doklady akademii nauk* [Reports of the Academy of Sciences], 2009, Vol. 426, No. 6, pp. 821-823.
2. Poletaev A.S. Modem gidroakusticheskoy svyazi [Hydroacoustic communication modem], *Global'nyy nauchnyy potentsial* [Global scientific potential], 2013, No. 5 (26), pp. 64-68.
3. Bondareva Zh.Yu., Kravchuk D.A. Primenenie shirokopolosnykh signalov v gidroakusticheskikh sistemakh svyazi v mul'tiagentnoy sisteme monitoringa morskogo shel'fa [The use of broadband signals in sonar systems of communication in multi-agent system of monitoring of the sea shelf], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2013, No. 9 (146), pp. 256-258.
4. Ivanitskiy A.M., Sukhar'kov O.V. Gidroakusticheskie anteny dal'ney tsifrovoy svyazi dlya volnovodnykh kanalov Chernogo morya [Hydroacoustic long-range digital communication antenna for waveguide channels of the Black sea], *Naukovi pratsi ONAZ im. O.S. Popova* [Scientific works of Odessa national Academy of communications. O.S. Popov], 2013, No. 1, pp. 34-42.
5. Litvintseva A.V., Obolonin M.A. Ispol'zovanie lineynogo predskazatelya rechi v programmnoy modeli nizkoskorostnogo vokodera dlya peredachi rechi po gidroakusticheskomu kanalu svyazi [Using a linear speech predictor in a software model of a low-speed vocoder for speech transmission over a hydroacoustic communication channel], *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education], 2013, No. 3, pp. 10.
6. Kebkal A.G., Kebkal K.G., Komar M.A. Emulyator sistemy tsifrovoy gidroakusticheskoy svyazi i pozitsionirovaniya dlya razrabotki i testirovaniya pol'zovatel'skikh prilozheniy [Emulator of digital hydroacoustic communication and positioning system for development and testing of user applications], *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater research and robotics], 2013, No. 2 (16), pp. 48-55.
7. Rybina M.S., Skakunov V.N. Razrabotka metoda obrabotki signalov dlya tsifrovyykh sistem gidroakusticheskoy svyazi [Development of a method of signal processing for digital systems sonar communications], *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [News of Volgograd state technical University], 2014, Vol. 10, No. 26 (153), pp. 86-90.
8. Hladkiy N.D. Experimental realization of digital sonar communication (part 1), *Электроника та зв'язок* [Electronics and communications], 2014, Vol. 19, No. 1 (78), pp. 95-101.
9. Hladkiy N.D. Experimental realization of digital sonar communication (part 2), *Электроника та зв'язок* [Electronics and communications], 2014, Vol. 19, No. 2 (79), pp. 94-100.
10. Unru P.P., Statsenko L.G., Rodionov A.Yu. Ispol'zovanie adaptivnogo ortogonal'nogo chastotnogo mul'tipleksirovaniya gidroakusticheskikh kanalakh svyazi pri modulyatsii peredavaemogo signala [The use of adaptive orthogonal frequency multiplexing of hydroacoustic communication channels in the modulation of the transmitted signal], *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)* [Mining information and analytical Bulletin (scientific and technical journal)], 2014, No. S12-3, pp. 118-123.
11. Denisov V.E. Analiz iskazheniy vysokochastotnykh impul'snykh akusticheskikh signalov v gidroakusticheskom kanale svyazi [Analysis of distortions of high-frequency pulse acoustic signals in the hydroacoustic communication channel], *Rossiyskiy tekhnologicheskii zhurnal* [Russian technology magazine], 2015, No. 1 (6), pp. 123-133.

12. Krivolapov G.I., Chernetskiy G.A. O povyshenii dostovernosti peredachi informatsii v tsifrovyykh gidroakusticheskikh kanalakh svyazi nizkogo kachestva [About increase of reliability of information transfer in digital hydroacoustic communication channels of low quality], *Tekhnicheskie problemy osvoeniya Mirovogo okeana* [Technical problems of development of the world ocean], 2005, No. 1, pp. 229-232.
13. Pribylov V.P., Chernetskiy G.A. Ob effektivnosti sistem peredachi informatsii s obratnoy svyaz'yu v gidroakusticheskikh kanalakh svyazi [On the efficiency of information transmission systems with feedback in hydroacoustic communication channels], *Tekhnicheskie problemy osvoeniya Mirovogo okeana* [Technical problems of development of the world ocean], 2005, No. 1, pp. 238-242.
14. Kebkal K.G., Kebkal V.K., Kebkal A.G. TSifrovyye gidroakusticheskie seti dlya usloviy svyazi s proizvol'no bol'shimi zaderzhkami soedineniya i razryvami soedineniy: eksperimental'noe issledovanie [Digital sonar network for the communication conditions with arbitrarily large delays of the connections and disconnects: a pilot study], *Tekhnicheskie problemy osvoeniya Mirovogo okeana* [Technical problems of development of the world ocean], 2016, Vol. 6, pp. 269-281.
15. Matvienko Yu.V. Gidroakusticheskie sredstva navigatsii i svyazi podvodnykh apparatov IPMT DVO RAN [Hydroacoustic means of navigation and communication of underwater vehicles ipmt Feb RAS], *Tekhnicheskie problemy osvoeniya Mirovogo okeana* [Technical problems of development of the world ocean], 2005, No. 1, pp. 6-12.
16. Nelepa A.A., Rodionov A.Yu. Gidroakusticheskaya sistema svyazi s chastotno-impul'snoy ekhokompensatsiyey [Hydro-acoustic communication system with pulse-frequency echo suppression], *Tekhnicheskie problemy osvoeniya Mirovogo okeana* [Technical problems of development of the world ocean], 2016, Vol. 6, pp. 299-303.
17. Zakharov I.S., Zhiba G.V., Smolyakov A.A., Say S.V. Kody Rida-Solomona v sostave kodiruyushchikh konstruksiy dlya ispol'zovaniya v gidroakusticheskikh kanalakh svyazi [Reed-Solomon codes as part of coding structures for use in hydroacoustic communication channels], *Informatsionnye tekhnologii XXI veka: Sb. nauchnykh trudov* [Information technologies of the XXI century: Collection of scientific works]. Khabarovsk, 2017, pp. 33-41.
18. Filippov B.I., Chernetskiy G.A. Application of error – correcting coding in hydroacoustic communication channels, *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii* [Journal of Siberian Federal University. Series: Equipment and technologies], 2017, Vol. 10, No. 3, pp. 377-387.
19. Karpov M.A. Formirovatel' signala dlya peredatchika gidroakusticheskoy sistemy svyazi [Signal generator for hydroacoustic communication system transmitter], *Smotr-konkurs nauchnykh, konstruktorskiykh i tekhnologicheskikh rabot studentov Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta: Tezisy dokladov* [Review competition of scientific, design and technological works of students of Volgograd state technical University: Abstracts]: In 2 part. Editorial board: A.V. Navrotskiy (exec. ed.) [and others], 2017, pp. 5.
20. Filippov B.I. Algoritm funktsionirovaniya sistemy izmereniya distantsii s ispol'zovaniem gidroakusticheskogo kanala svyazi [The algorithm of the distance measurement system using a hydroacoustic communication channel], *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika* [Bulletin of Astrakhan state technical University. Series: Management, computer engineering and Informatics], 2016, No. 4, pp. 87-98.
21. Esipov I.B., Tarasov S.P., Chulkov V.L. Parametricheskaya gidroakusticheskaya antenna – perspektivnyy instrument dlya monitoringa okeana na protyazhennykh trassakh [Parametric hydroacoustic antenna-a promising tool for monitoring the ocean on long routes], *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika* [Fundamental and applied Hydrophysics], 2014, Vol.7, No. 2, pp. 46-57.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор М.Ю. Медведев.

**Анищенко Александр Евгеньевич** – Южный федеральный университет; e-mail: scerry@mail.ru; 347900, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2, корп. Е, к. 301; тел.: +79508518721; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники; аспирант.



**Солдатов Геннадий Валерьевич** –e-mail: gsoldatov@sfedu.ru; тел.: +79185886600; ассистент.

**Лотарев Александр Владимирович** – e-mail: lotarev@sfedu.ru; тел.: +79882519791; аспирант.

**Вареникова Анастасия Юрьевна** – e-mail: avarenikova@sfedu.ru; тел.: +79613185768; инженер.

**Anischenko Aleksander Evgenievich** – Southern Federal University; e-mail: scerry@mail.ru; 2, Shevchenko street, Bldg. E, к. 301; Taganrog, 347900, Russia; phone: +79508518721; the department of hydro-electro-acoustic and medical; graduate student.

**Soldatov Gennadii Valerievich** – e-mail: gsoldatov@sfedu.ru; phone: +79185886600; assistant.

**Lotarev Aleksander Vladimirovich** – e-mail: lotarev@sfedu.ru; phone: +79882519791; graduate student.

**Varenikova Anastasia Yrievna** – e-mail: avarenikova@sfedu.ru; phone: +79613185768; engineer.

УДК 534.2

DOI 10.23683/2311-3103-2018-6-75-84

**Г.В. Солдатов, В.Ю. Нерук, М.В. Лагута**

### **СПОСОБ РАСШИРЕНИЯ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ АНТЕННЫ\***

*Целью настоящей работы является демонстрация возможности расширения диаграммы направленности гидроакустической параметрической антенны с помощью внутримпульсного сканирования акустическим лучом. Опыт разработки и испытаний параметрических антенн показал, что наиболее эффективной генерации волн разностной частоты удастся добиться при излучении узконаправленных пучков шириной несколько градусов на максимальной мощности антенны накачки. Дальнейшее увеличение ширины диаграммы направленности при тех же рабочих частотах приводит к падению уровня сигналов накачки и уменьшению длины зоны нелинейного взаимодействия, а значит и к существенному снижению уровня сигнала разностной частоты. Расширить диаграмму направленности, сохранив при этом размер излучающей поверхности антенны и уровень излучаемого сигнала, можно с помощью внутримпульсного сканирования. Внутримпульсное сканирование осуществлялось путем последовательного излучения коротких импульсов с поворотом диаграммы направленности антенны в плоскости сканирования. Для проведения экспериментальных исследований была разработана гидроакустическая параметрическая излучающая система, состоящая из многоканальной антенны накачки и модулей генераторов-усилителей мощности. Экспериментальные исследования были проведены на уникальной научной установке «Имитационно-натурный гидроакустический комплекс» ЮФУ. Были проведены измерения диаграмм направленности параметрической антенны на разностной частоте. С помощью предлагаемого метода удалось увеличить ширину главного максимума параметрической антенны примерно в 2 раза. В работе показано изменение огибающей излучаемого сигнала в зависимости от направления излучения. Экспериментальные исследования показали принципиальную возможность расширения диаграммы направленности параметрической антенны с помощью внутримпульсного сканирования акустическим лучом при неизменных размерах излучаемой поверхности антенны накачки.*

*Нелинейная акустика; параметрическая антенна; акустические измерения; диаграмма направленности; параметрический профилограф.*

---

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-32-00813.