

Физические поля корабля, океана и атмосферы

Научная статья
УДК 534.874.1
<https://doi.org/10.24866/2227-6858/2021-4/39-47>

П.П. Унру

УНРУ ПЕТР ПЕТРОВИЧ – старший преподаватель, unrupp@gmail.com,
<https://orcid.org/0000-0002-3765-1419>
Департамент электроники, телекоммуникации и приборостроения
Политехнического института
Дальневосточный федеральный университет
Владивосток, Россия

Метод адаптации диаграмм направленности гидроакустических антенных решеток под текущие условия нестационарного подводного канала связи

Аннотация: Гидроакустический канал связи отличается значительной и нестационарной многолучевостью, что делает разработку помехоустойчивой и высокоскоростной гидроакустической системы связи весьма нетривиальной задачей. В работе представлен авторский метод адаптации диаграмм направленности гидроакустических антенных решеток под текущие условия канала. Его новизна – в структуре пилот-сигнала, предназначенного для определения оптимального угла наклона передающей диаграммы направленности, и способе его приема и обработки. Приводятся результаты проведенных автором математического моделирования и экспериментальной оценки эффективности предлагаемого метода.

Ключевые слова: гидроакустическая связь, гидроакустические антенные решетки, сигнальная обработка, ортогональное частотное мультиплексирование

Для цитирования: Унру П.П. Метод адаптации диаграмм направленности гидроакустических антенных решеток под текущие условия нестационарного подводного канала связи // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2021. № 4(49). С. 39–47. <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2021-4/39-47>

Введение

Гидроакустическая связь – единственный способ беспроводной передачи данных под водой на дистанциях более 100 м, благодаря малому затуханию сигнала по сравнению с радио и оптическими системами подводной связи. В зависимости от используемого частотного диапазона акустические волны могут быть использованы для установления связи на дальностях до сотен километров. Благодаря этому свойству гидроакустические системы связи получили широкое распространение в решении задач передачи данных и навигации под водой. На их основе создано большое количество подводных информационно-навигационных систем для автономных подводных аппаратов [8], в том числе и подводные сенсорные сети [2].

Одним из способов повышения помехоустойчивости и пропускной способности высокоскоростной гидроакустической системы связи (ГАСС) является использование многоэлементных антенных решеток как на передающей, так и приемной стороне. Подобные антенные системы – основа для внедрения технологий фазового сопряжения [9], ММО (Multiple Input Multiple Output) [7], пространственного разделения каналов [12], разнесенного приема [13] и формирования луча (Beamforming) [5]. Более того, разработка ГАСС с использованием нескольких антенн на передающей и приемной стороне открывает широкие возможности по внедрению адаптивных решений, способных подстраиваться под текущие условия гидроакустического канала связи за счет изменения форм и угла наклона диаграмм направленности (ДН).

Первой широко распространенной технологией адаптации ДН под условия конкретной акватории является связь с обращением времени (Time Reversal Communication) [4], которая заключается в «отражении» звукового сигнала на основе простого анализа гидроакустического канала связи путем фиксации времени прихода сигнала на элементы приемной антенной решетки. Приемник, оснащенный антенной решеткой, фиксирует время и направления прихода многолучевых компонент сигнала с помощью антенной решетки и при ответе использует их для фокусировки поля на передатчике. Таким образом, по направлению, соответствующему приходу последней многолучевой компоненты, сигнал отправляется в первую очередь, а по первому – в последнюю.

Ранние реализации ГАСС с обращением времени [3] наглядно продемонстрировали потенциал технологии и невысокую вычислительную сложность. Однако оставались трудности, связанные с остаточной межсимвольной интерференцией и несоответствием реальной и измеренной импульсной характеристики канала.

Следующим этапом развития ГАСС с адаптивными антенными решетками стали системы гидроакустической связи на основе ММО и Beamforming [11, 6]. В гидроакустической технике данные технологии применяются в основном в области гидролокаторов. Их использование при передаче данных весьма ограничено и сосредоточено в области связи в вертикальном направлении при информационном обмене с донными станциями, а также для передачи данных между стационарными узлами с использованием длинных линейных антенн. Как в первом, так и втором случае формирование луча требует передачи служебных пакетов и сигналов. Некоторые технологии [10] предусматривают двукратный двухсторонний обмен такими пакетами, которые могут занимать канал связи на длительное время с учетом скорости распространения акустических колебаний в водной среде.

Цель настоящей статьи – разработать метод оценки ГА канала связи для выбора оптимального наклона ДН с точки зрения снижения битовой вероятности ошибки угла, не предусматривающего передачи дополнительных оценочных и пилот-сигналов, кроме сигналов RTS (Request To Send) и CTS (Clear to Send) типового протокола доступа к среде [1].

Описание метода оценки оптимального угла наклона ДН

Для управления и адаптации ДН под условия различных акваторий необходимо провести оценку ГА канала связи, чтобы определить наиболее оптимальный угол наклона ДН передающей системы с точки зрения минимизации негативных многолучевых эффектов и, как следствие, снижения битовой вероятности ошибки при последующей передаче данных. Естественно, наиболее точным была бы последовательная оценка каждого из выбранных наклонов ДН пилот-сигналами. Но такой подход нельзя считать эффективным с точки зрения использования временного ресурса канала связи. Таким образом, ставится вопрос о разработке некоего параллельного метода оценки оптимального угла, при котором путем передачи одного пилот-сигнала, несущего в том числе функции служебных пакетов RTS/CTS MAC-протокола, выполнялся бы анализ выбранного количества углов наклона ДН передающей системы.

При успешной разработке такого пилот-сигнала алгоритм оценки оптимального угла наклона ДН будет следующим:

- 1) перед непосредственной передачей данных гидроакустический модем формирует оценочный пилот-сигнал с последующей отправкой в канал связи;
- 2) по получению пилот-сигнала приемный модем выполняет его оценку по набору параметров и формирует численную оценку нисходящего канала связи по выбранным углам наклона ДН передающей антенной системы;
- 3) по результатам оценки выбирается угол наклона ДН, который должен обеспечить наименьшую битовую вероятность ошибки по результатам оценки пилот-сигнала;
- 4) для оценки восходящего канала связи приемный модем также формирует оценочный пилот-сигнал (который в том числе содержит информацию о номере выбранного на предыдущем шаге угла наклона ДН) и передает в канал;

5) передающий ГА модем получает пилот-сигнал и по аналогичному алгоритму осуществляет оценку восходящего канала.

Таким образом выполняется двухсторонняя оценка канала связи, за счет которой для передающей и приемной антенной системы выбираются оптимальные углы наклона ДН.

Формирование и обработка пилот-сигнала

Поскольку метод оценки предполагает параллельный анализ каналов, сформированных каждым из выбранных углов наклона ДН, с целью выбора оптимального, очевидным решением видится использование ортогонального частотного мультиплексирования. При использовании данного метода уплотнения сигнал состоит из набора ортогональных поднесущих, разделенных на величину, обратную длительности сигнала. При выборе такого метода формирования сигналов можно выделить N поднесущих, которые разделяются на n_A групп, где n_A – количество углов наклона ДН для оценки. Каждая из групп включает в себя k поднесущих. Оставшиеся свободными поднесущие используются для передачи служебных данных сигналов RTS/CTS. В таком случае формирование сигнала для оценки n -го угла будет выполняться согласно следующему выражению:

$$P_n(t) = \sum Stx[n] \cdot e^{j2\pi f[n]t} \cdot g(t), \quad (1)$$

где $Stx[n]$ – символы сигнального созвездия для модуляции поднесущих, выделенных для n -го угла, $f[n]$ – частоты поднесущих, выделенных для n -го угла, $g(t)$ – функция формирования огибающей сигнала. Необходимо отметить, что набор поднесущих для формирования каждой угловой составляющей P_n выбирается случайным образом. Все N поднесущих разделяются на $[N/n_A]$ групп. На одну группу приходится одна поднесущая, выбираемая случайным образом, для каждого из n_A угловых составляющих. Поднесущие, соответствующие различным угловым составляющим, разделяются как минимум одной нулевой поднесущей.

Теперь необходимо выполнить фазирование каждого из сигналов для передачи с заданным углом наклона ДН. Для каждого из сигналов P_n задается свой временной сдвиг Δt_n для излучения с каждого из M элементов передающей антенной системы, рассчитываемый для центральной частоты f_c пилот-сигнала. После формирования сигналы излучаются в канал связи, где каждый из n_A составляющих пилот-сигнала проходит по многолучевому каналу, сформированному средой и параметрами передающей антенной системы. На приемной стороне выполняется процесс приема и последующей обработки пилот-сигнала и выработка решения о наиболее оптимальном угле наклона ДН передающей системы. В первую очередь выполняется согласованная фильтрация принятого сигнала x банком n_A согласованных фильтров, выход которых определяется соотношением:

$$y_n[m] = \sum_{i=-\infty}^{\infty} h_n[m-i] \cdot x[i], \quad (2)$$

где $h_n[1 \dots N] = P_n[N \dots 1]$ – импульсная характеристика каждого из n_A согласованных фильтров. Основной целью согласованной фильтрации является определение времени прихода каждого из P_n сигналов. Поскольку пик выхода согласованного фильтра приходится на конец пилот-сигнала, то его начало должно определяться следующим соотношением:

$$Arr_n = \max_t y_n(t) - t_s. \quad (3)$$

Времена прихода различных угловых компонент используются для когерентного восстановления символов Stx , переданных в пилот-сигнале. Данная операция выполняется с помощью квадратурного демодулятора путем выделения квадратурных составляющих каждой из k поднесущих каждого из n_A углов:

$$\begin{aligned} Irx[n, k] &= \int_0^{t_s} x[Arr_n: Arr_n + t_s] \cdot \Re(e^{i2\pi f[n, k]t}) dt, \\ Qrx[n, k] &= \int_0^{t_s} x[Arr_n: Arr_n + t_s] \cdot (-\Im(e^{i2\pi f[n, k]t})) dt. \end{aligned} \quad (4)$$

Из полученных значений затем формируются символы – точки на сигнальном созвездии:

$$Srx[n, k] = Irx[n, k] + iQrx[n, k]. \quad (5)$$

Решение о выборе того или иного угла наклона ДН принимается на основе анализа принятых точек сигнального созвездия. Мы рассмотрели несколько критериев оценки принятого пилот-сигнала и его угловых составляющих, из которых выбрали следующие:

- 1) среднее расстояние Cd между соответствующими переданными Stx и принятыми Srx символами каждой из n_A угловых составляющей пилот-сигнала (рис. 1а);
- 2) средний угол Ca между соответствующими переданными Stx и принятыми Srx символами каждой из n_A угловых составляющей пилот-сигнала (рис. 1б).

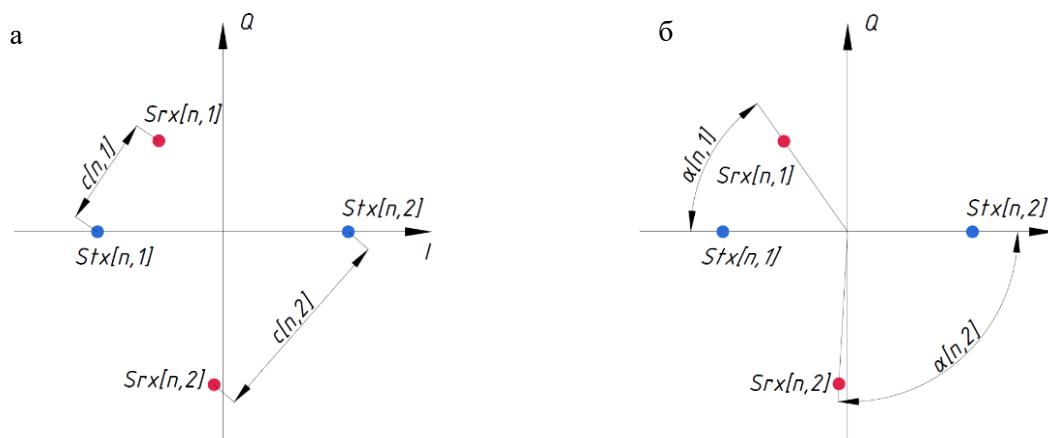


Рис. 1. Расстояние (а) и угол (б) между принятыми и переданными символами

Точность критериев определения оптимального угла наклона ДН была установлена по результатам математического моделирования. Итоговый критерий оценки оптимального угла наклона ДН по результатам анализа определяется по принципу «больше-лучше» следующим соотношением:

$$C_n = \left(\frac{Cd_n + Ca_n}{\min(Cd + Ca)} \right)^{-1}. \quad (6)$$

Математическое моделирование

Разработанный метод был протестирован в среде Matlab. Главная цель моделирования – определить эффективность предложенного метода и применимости в условиях различных гидроакустических каналов связи. Поэтапно моделирование можно описать следующим образом.

В первую очередь для моделирования были выбраны три акватории по доступным в интернете океанографическим данным (<https://www.ncei.noaa.gov/access/world-ocean-database/datawodgeo.html>, <https://data.gov.ie/dataset/marine-institute-ctd>), откуда получены распределения солёности и температуры по глубине, которые использовались для расчета профиля скорости звука по формуле Вилсона. Рассчитанные профили скорости звука были использованы для создания файлов среды с целью определить импульсную характеристику гидроакустических каналов в рассматриваемых акваториях. В рамках моделирования оценивалось использование антенн ПИ2, которые обладают остротой направленного действия (ОНД) по уровню 0,7 ≈ 72°. При объединении двух подобных антенн в систему с соосным расположением и разнесением на длину волны, ОНД для центральной частоты 12 кГц составит ≈ 28°. При моделировании также учитывался рельеф дна и форма поверхности.

Далее по формулам, указанным выше, были сформированы оценочные пилот-сигналы со следующими параметрами:

- 1) частотный диапазон: 8–16 кГц;

- 2) количество углов наклона ДН n_A для оценки: 11;
- 3) перечень углов наклона ДН для оценки: $(-10^\circ, -8^\circ, \dots, 10^\circ)$;
- 4) количество поднесущих на каждый из n_A угловых составляющих: 39;
- 5) длительность оценочного пилот-сигнала: 0,2 с.

Каждая из угловых компонент преамбулы подверглась операции свертки с набором импульсных характеристик соответствующего канала. В данном случае набор включал 11 импульсных характеристик по количеству углов наклона ДН двухэлементной системы. Полученные на приемнике компоненты суммировались и проходили через процедуру оценки, направленную на определение наиболее оптимального угла передачи сигнала. Итогом данного этапа стал массив под название *Est* размерностью $n_i \times n_A$, где n_i – количество итераций. Массив содержит численные оценки каждого из углов наклона ДН передающей антенной системы.

На следующем этапе выполнялось моделирование передачи данных гидроакустической системой связи со следующими параметрами:

- 1) частотный диапазон: 8–16 кГц;
- 2) длительность символа: 0,2 с;
- 3) количество поднесущих:
 - всего: 1 600;
 - пилотных: 200;
 - нулевых: 400;
 - информационных: 1 000;
- 4) вид манипуляции поднесущих: относительная двоичная фазовая (DBPSK);
- 5) вид уплотнения: ортогональное частотное (OFDM).

Выполнялось формирование полученных OFDM символов, после чего они аналогично подвергались свертке с набором импульсных характеристик. В данном случае к набору из 11 характеристик добавляется еще одна, соответствующая случаю передачи сигнала с одноэлементной антенны с широким углом раскрытия ДН. Результатом данного этапа становится массив BER размерностью $n_i \times n_A + 1$. После чего выполнялся анализ полученных массивов.

Выбранные для моделирования акватории различались как по глубине, так и вертикальному распределению скорости звука (рис. 2). Кроме того, для акваторий были выбраны разные глубины погружения передающего и приемного ГА модемов, а также дистанция передачи данных (см. таблицу).

Параметры моделей выбранных акваторий

Номер акватории	Максимальная глубина, м	Дистанция передачи, км	Заглубление передатчика, м	Заглубление приемника, м
Акватория № 1 (юго-западная часть залива Петра Великого)	61	2	3	55
Акватория № 2 (залив г. Носиро, Япония)	101	1,5	101	3
Акватория № 3 (восточное побережье полуострова Камчатка)	545	3	3	525



Рис. 2. Вертикальный профиль скорости звука для акваторий: а – № 1, б – № 2, в – № 3

После моделирования выполнялась проверка соответствия результатов оценки (рис. 4) оптимального угла наклона ДН и полученных бытовых вероятностей ошибок для каждого усредненного по символам отношения сигнал-шум. Далее, для наглядности, результаты оценки для каждой акватории будут представлены в виде графиков. Целью обработки результатов была оценка:

- 1) вероятность выбора наиболее выгодного с точки зрения минимизации битовой вероятности ошибки угла наклона ДН двухэлементной антенной системы;
- 2) вероятность выбора такого угла наклона ДН, при котором достигается битовая вероятность ошибки меньше, чем при использовании одноэлементной широконаправленной антенны.

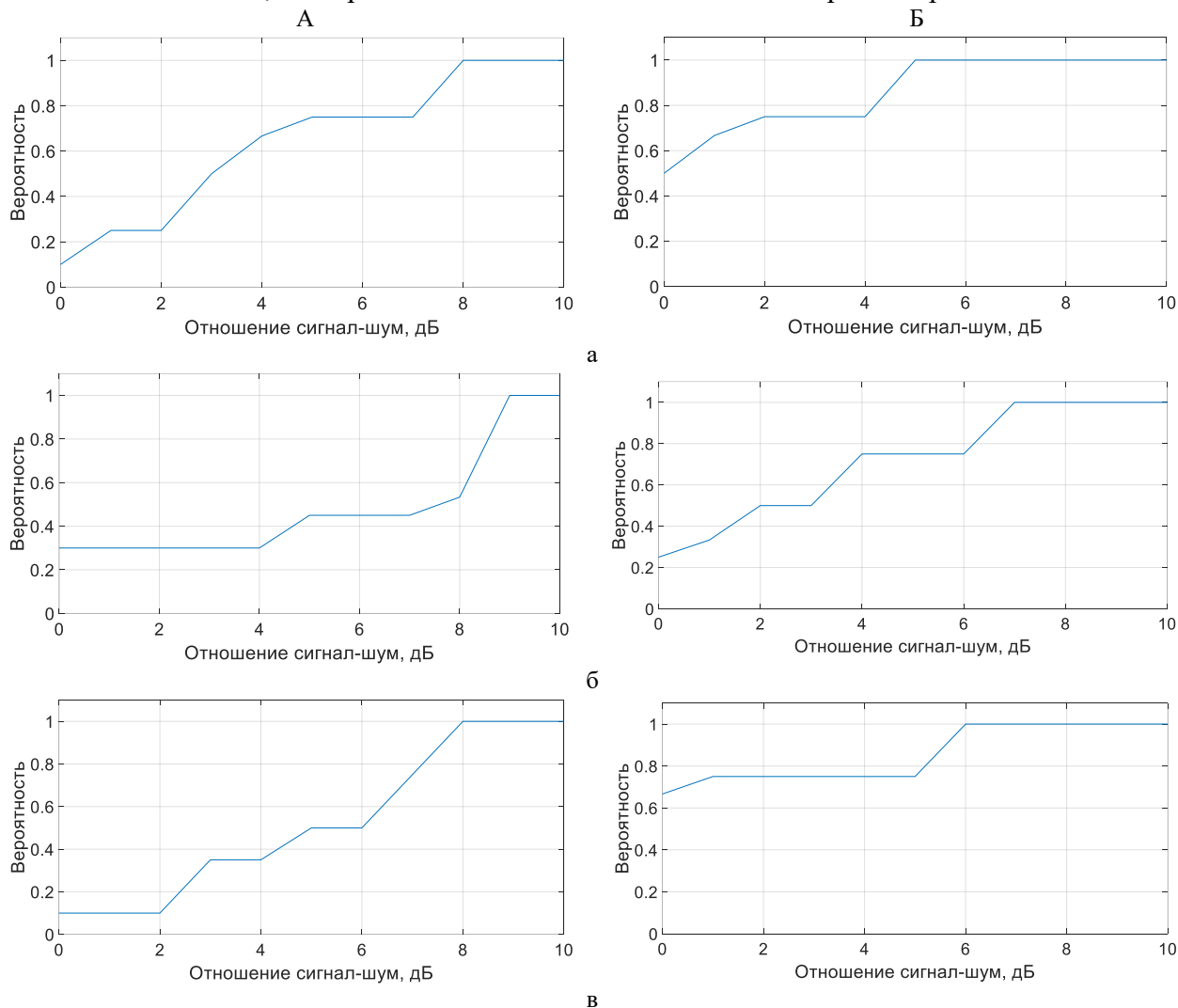


Рис. 3. Вероятность определения лучшего с точки зрения битовой вероятности ошибки угла наклона ДН (А) и угла наклона ДН антенной системы, обеспечивающего меньшую по сравнению с одноэлементной антенной битовую вероятность ошибки (Б) для акваторий: а – № 1, б – № 2, в – № 3

По результатам выполненного модельного эксперимента можно с уверенностью сказать, что предложенный нами метод адаптации ДН ГА антенных систем позволяет с высокой долей вероятности определить угол наклона ДН, обеспечивающий повышение помехоустойчивости всей системы. В зависимости от акватории вероятность меняется, однако в диапазоне высокого и среднего отношения сигнал-шум эта вероятность не падает ниже 75%. Также в рамках эксперимента выполнена оценка повышения помехоустойчивости системы при внедрении метода. При корректном выборе угла наклона ДН, обеспечивающего наименьшую битовую вероятность ошибки, повышение помехоустойчивости по параметру отношение сигнал-шум можно оценить в 2–8 дБ (рис. 4).

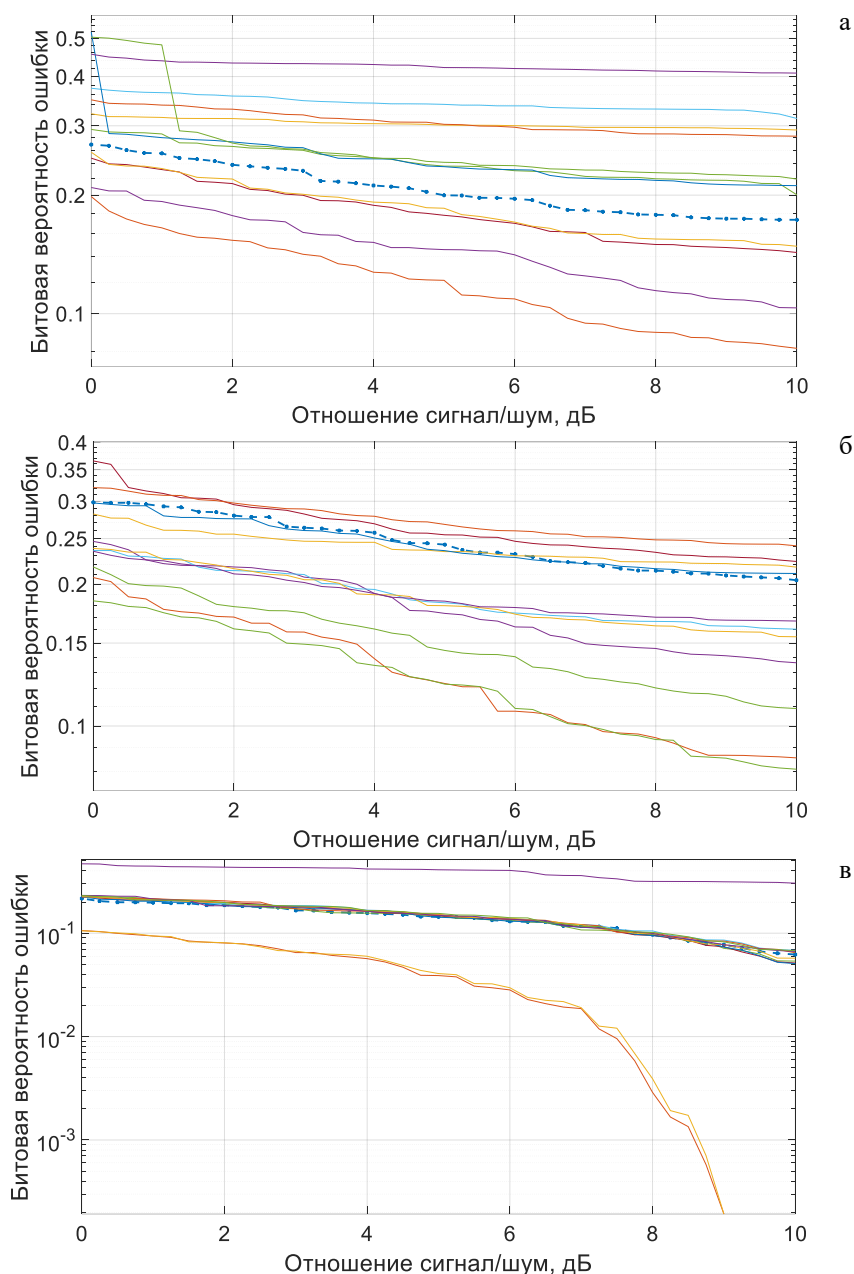


Рис. 4. Зависимость битовой вероятности ошибки от отношения сигнал/шум для различных конфигураций антенной системы и углов наклона ДН для акваторий: а – № 1, б – № 2, в – № 3.

Условные обозначения: — — одноэлементная система; угол наклона: — угол наклона -10° ; — угол наклона -8° ; — угол наклона -6° ; — угол наклона -4° ; — угол наклона -2° ; — угол наклона 0° ; — угол наклона 4° ; — угол наклона 6° ; — угол наклона 8° ; — угол наклона 10°

Заключение

В работе представлен авторский метод адаптации ДН многоэлементных антенн ГАСС, реализованный путем передачи многочастотного пилот-сигнала, предназначенного для оценки углов наклона ДН передающей системы. Приведены аналитические выражения для формирования пилот-сигнала, его оценки и формирования решения. Предлагаемый метод протестирован в среде математического моделирования Matlab с использованием данных натурных измерений параметров акваторий и программы Bellhop, входящей в пакет Acoustic Toolbox. Метод показал высокую потенциальную эффективность по снижению битовой вероятности ошибки в акваториях с различными параметрами, которую можно оценить в 2–8 дБ по отношению сигнал/шум.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Перегудов М.А., Стешковой А.С. Модель централизованно-зарезервированного доступа к среде в сетях цифровой радиосвязи // Информатика и автоматизация. 2020. № 19(6). С. 1332–1356. doi:10.15622/ia.2020.19.6.8
2. Awan K.M. et al. Underwater wireless sensor networks: A review of recent issues and challenges. *Wireless Communications and Mobile Computing*. 2019: Article ID 6470359. doi:10.1155/2019/6470359
3. Flynn J.A. et al. Multichannel equalization by decision-directed passive phase conjugation: Experimental results. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 2004;29(3):824-836. doi:10.1109/JOE.2004.831618
4. Jackson D.R., Dowling D.R. Phase conjugation in underwater acoustics. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1991;89(1):171-181. doi:10.1121/1.400496
5. Li J. et al. Cross power spectral density based beamforming for underwater acoustic communications. *Ocean Engineering*. 2020;(216):107786. doi:10.1016/j.oceaneng.2020.107786
6. Li J. et al. Optimal beamforming design for underwater acoustic communication with multiple unsteady sub-Gaussian interferers. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2019;68(12):12381-12386. doi:10.1109/TVT.2019.2945007
7. Qiao G. et al. MIMO-OFDM underwater acoustic communication systems – A review. *Physical Communication*. 2017;(23):56-64. doi:10.1016/j.phycom.2017.02.007
8. Rodionov A.Y., Kulik S.Y., Unru P.P. Some trial results of the hydro acoustical communication system operation for AUV and ASV group control and navigation. *Proceedings of the MTS/IEEE OCEANS 2016 Monterey*. 2016, 1-8. doi:10.1109/OCEANS.2016.7761076
9. Song H.C. An overview of underwater time-reversal communication. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 2015;41(3):644-655. doi:10.1109/JOE.2015.2461712
10. Rahmati M., Pompili D. SSFB: Signal-space-frequency beamforming for underwater acoustic video transmission. *Proceedings of the IEEE 14th International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems*. 2017, 180-188. doi:10.1109/MASS.2017.71
11. Tao J. DFT-precoded MIMO OFDM underwater acoustic communications. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 2017;43(3):805-819. doi:10.1109/JOE.2017.2735590
12. Yang T.C. Spatially multiplexed CDMA multiuser underwater acoustic communications. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 2015;41(1):217-231. doi:10.1109/JOE.2015.2412993
13. Yoshizawa S., Tanimoto H., Saito T. Data selective rake reception for underwater acoustic communication in strong multipath interference. *Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2017. Article ID 5793507. doi:10.1155/2017/5793507

FEFU: SCHOOL of ENGINEERING BULLETIN. 2021. N 4/49

Physical Fields of Ship, Ocean and Atmospherewww.dvfu.ru/en/vestnikis

Original article

<https://doi.org/10.24866/2227-6858/2021-4/39-47>

Unru P.

PETR P. UNRU, Senior Lecturer, unrupp@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3765-1419>
 Polytechnic Institute
 Far Eastern Federal University
 Vladivostok, Russia

Method for directional pattern adaptation of hydroacoustic antenna array to the current conditions of a non-stationary underwater communication channel

Abstract: An underwater acoustic communication channel is known its substantial and non-stationary multipath properties complicating the design of noise-sustainable and high-speed underwater acoustic communication systems (UACS). The paper presents the method for adapting the directional pattern of underwater acoustic antenna arrays to the current state of the channel. Its novelty is in the structure of the pilot signal intended to determine the optimal inclination angle of the transmitting antenna array and the algorithm of its reception

and processing. The description of method is accompanied by numerical modeling and experimental results efficiency evaluation of proposed method.

Keywords: underwater acoustic communication, antenna, signal processing, frequency multiplexing

For citation: Unru P. Method for directional pattern adaptation of hydroacoustic antenna array to the current conditions of a non-stationary underwater communication channel. FEFU: School of Engineering Bulletin. 2021;(49):39-47. (In Russ.). <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2021-4/39-47>

REFERENCES

1. Peregudov M.A., Steshkovi A.S. The model of centralized and reserved medium access in the wireless communication networks. *Informatics and Automatization*. 2020;19(6):1332–1356. doi:10.15622/ia.2020.19.6.8
2. Awan K.M. et al. Underwater wireless sensor networks: A review of recent issues and challenges. *Wireless Communications and Mobile Computing*. 2019: Article ID 6470359. doi:10.1155/2019/6470359
3. Flynn J.A. et al. Multichannel equalization by decision-directed passive phase conjugation: Experimental results. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 2004;29(3):824–836. doi:10.1109/JOE.2004.831618
4. Jackson D.R., Dowling D.R. Phase conjugation in underwater acoustics. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1991;89(1):171–181. doi:10.1121/1.400496
5. Li J. et al. Cross power spectral density based beamforming for underwater acoustic communications. *Ocean Engineering*. 2020;(216):107786. doi:10.1016/j.oceaneng.2020.107786
6. Li J. et al. Optimal beamforming design for underwater acoustic communication with multiple unsteady sub-Gaussian interferers. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2019;68(12):12381–12386. doi:10.1109/TVT.2019.2945007
7. Qiao G. et al. MIMO-OFDM underwater acoustic communication systems: A review. *Physical Communication*. 2017;(23):56–64. doi:10.1016/j.phycom.2017.02.007
8. Rodionov A.Y., Kulik S.Y., Unru P.P. Some trial results of the hydro acoustical communication system operation for AUV and ASV group control and navigation. *Proceedings of the MTS/IEEE OCEANS 2016 Monterey*. 2016, 1–8. doi:10.1109/OCEANS.2016.7761076
9. Song H.C. An overview of underwater time-reversal communication. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 2015;41(3):644–655. doi:10.1109/JOE.2015.2461712
10. Rahmati M., Pompili D. SSFB: Signal-space-frequency beamforming for underwater acoustic video transmission. *Proceedings of the IEEE 14th International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems*. 2017, 180–188. doi:10.1109/MASS.2017.71
11. Tao J. DFT-precoded MIMO OFDM underwater acoustic communications. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 2017;43(3):805–819. doi:10.1109/JOE.2017.2735590
12. Yang T.C. Spatially multiplexed CDMA multiuser underwater acoustic communications. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 2015;41(1):217–231. doi:10.1109/JOE.2015.2412993
13. Yoshizawa S., Tanimoto H., Saito T. Data selective rake reception for underwater acoustic communication in strong multipath interference. *Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2017. Article ID 5793507. doi:10.1155/2017/5793507