

УДК 681.883.45

Н.Д. Гладкіх

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут",
пр. Перемоги, 37, Київ-56, 03056, Україна.

Експериментальна реалізація цифрового гідроакустичного зв'язку (частина 1)

В роботі розглянуто метод здійснення цифрового гідроакустичного зв'язку за допомогою квадратурної фазової маніпуляції з розширенням спектру, представлено методологію проведення експерименту по передачі цифрових даних через гідроакустичний канал. Також показано схеми вимірювального стенду, аналітичний вираз випромінюваного сигналу, методологію виявлення сигналу, спосіб розрахунку довжини імпульсу.

В експерименті використовувалась чотирьох-позиційна фазова модуляція з розширенням спектру за допомогою частотної модуляції за лінійним законом. Дані передавалися на швидкостях 1, 2, 4, 8 кбіт/с. Випробування проводилися в басейні при фіксованому положенні засобів зв'язку. Бібл. 12, рис. 5.

Ключові слова: *гідроакустика, гідроакустичний зв'язок, фазова маніпуляція, передача даних, гідроакустичний канал, виявлення сигналу.*

Вступ

За оцінками фахівців Міжнародної гідрографічної організації, тільки на 16% площі Світового океану проведені зйомки, які дозволяють визначати підводну топографію, для 22% є дані, які дають підстави аналізувати основні елементи морського дна, а на 62% є лише деяка інформація про морське дно. Звичайно ж, такої інформації мало і існує необхідність більш детального вивчення Світового океану. У зв'язку з чим, давно назріла проблема створення гідроакустичного вимірювального комплексу здатного працювати в складі підводних мереж, взаємодіяти в оперативному режимі з оператором та іншими гідроакустичними (ГА) пристроями (незаселені підводні апарати, кораблі забезпечення, морські буї тощо). [12]

Засоби цифрового гідроакустичного (ГА) зв'язку є важливою складовою такого вимірювального комплексу і дозволяють здійснювати оперативний обмін інформацією між декількома учасниками підводної інформаційної мережі [8].

Питання розвитку і становлення гідроакустичного зв'язку широко розкривається в роботі [8].

В даній роботі також приводиться варіант класифікації сучасних засобів ГА зв'язку і їх порівняльна характеристика на основі проведених експериментів. З результатами деяких з них можна ознайомитись в роботах [1-6, 9 10]. В висновках до роботи [8] приведена рекомендація по вибору оптимальної системи обміну інформацією через ГА канал серед існуючих. Саме цими рекомендаціями і пояснюється вибір методу квадратурної фазової маніпуляції з розширенням спектру.

Загальним для багатьох сучасних експериментальних робіт в області передачі даних [1-6, 9 10] є відсутність пояснення до деяких аспектів методології здійснення передачі даних. В результаті чого виникають наступні питання:

- як розрахувати довжину акустичного імпульсу?
- яким чином відбувається виявлення акустичного сигналу на фоні завад?
- в який спосіб отримано оцінки фази прийнятого сигналу, тобто проведено демодуляцію?
- дані стосовно розміщення електроакустичних перетворювачів відносно один одного і обмежувальних поверхонь відсутні, або приблизні.

Дана стаття дає відповідь на вищезазначені питання.

Об'єктом дослідження є цифровий гідроакустичний зв'язок, реалізований за допомогою методу подвійної фазової маніпуляції, чотирьох-позиційної фазової модуляції.

Мета дослідження полягає у вирішенні наступних задач:

- Детальне пояснення способу практичної реалізації гідроакустичного зв'язку методом квадратурної фазової маніпуляції з розширенням спектру.
- Проведення розрахунку довжини акустичного імпульсу.
- Отримання експериментального підтвердження правильності використання обмеження за Найквістом для розрахунку довжини акустичного імпульсу.
- Передача даних через ГА канал обраним методом за умови фіксованого розміщення

ЕАП в каналі, геометрія якого є добре відомою.

– Аналіз характеристик отриманого сигналу.

Метод передачі даних полягає в одночасно використанні квадратурної фазової модуляції акустичного сигналу для передачі інформації та частотної модуляції для розширення спектру. Крім квадратурної фазової маніпуляції на практиці також застосовують подвійну фазову маніпуляцію, або М-арну в загальному випадку [11]. В даному експерименті використовувалась саме квадратурна ($M=4$), виходячи із зручності представлення результатів і їх подальшої обробки. Зазвичай фазовий член ϕ_i може приймати M дискретних значень і визначається наступним чином [11]:

$$\phi_i = \frac{2\pi i}{M} \quad i = 1, \dots, M.$$

В загальному вигляді такий акустичний сигнал можна представити формулою [12]:

$$x(t) = \sin\left(\omega_H t + \left[\frac{\omega_B - \omega_H}{\tau} \cdot t^2\right] + \phi_i\right), \quad (1)$$

де $x(t)$ – це акустичний сигнал, A – це амплітуда сигналу, ω_H, ω_B – нижня і верхня кругова частота частотно-модульованого сигналу, τ – довжина одного імпульсу, що містить 2 біти інформації (для чотирьох-позиційної фазової модуляції), ϕ_i – зсув фази, що обумовлений значенням біту інформації.

В роботі використовувався сигнал з частотною модуляцією в межах 25-65 кГц. Сигнал представлено на рис. 1. На верхньому графіку зображено $x(t)$, на нижньому — залежність частоти акустичного сигналу від часу:

$$f(t) = 2\pi\omega,$$

$$\omega = \omega_H + \left(\frac{\omega_B + \omega_H}{\tau}\right)t.$$

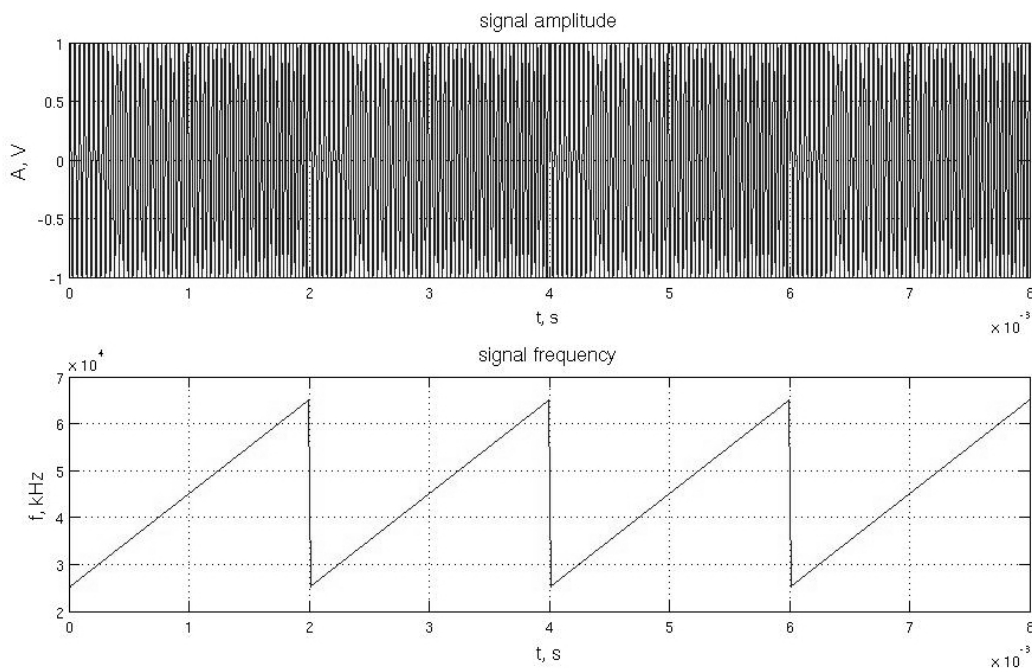


Рис. 1. Графіки амплітудної та частотно залежної послідовності чотирьох імпульсів з квадратурною фазовою маніпуляцією і частотною модуляцією в смузі 25-65 кГц

У чотирьох-позиційній фазовій модуляції використовуються чотири значення фази несуттєвого коливання. У цьому випадку зсув фази ϕ_i сигналу $x(t)$, описуваного виразом (1) повинен приймати чотири дискретні значення [11]. В цьому експерименті, наприклад, використовувалися: $45^0, 135^0, 225^0, 315^0$.

Фаза в експерименті вимірюється аналітичним методом, за допомогою синхронно-квадратурного детектора [12].

Результатом експерименту є отримання розподілу значень фази сигналу і на основі імовірнісних характеристик розрахунок значення середньоквадратичного відхилення, визначення імовірності бітової помилки і оцінка пропускну здатності каналу зв'язку.

Проведення експерименту

Експеримент проводився в басейні, рис 2. Об'єм басейну можна назвати ревербераційною камерою, оскільки його стінки виконано із орг

скла і вони добре відбивають акустичні хвилі. Габаритні розміри вимірювального простору: 4 м в довжину, 2 м – ширина, 2.5 м – висота.



Рис. 2. Ілюстрація місця проведення експерименту, басейн на цокольному поверсі ТУ Берліну, EvoLogics GmbH, Ackerstrasse 76, 13355 Berlin, Germany

Відомо, що основний вклад в спотворення акустичного сигналу вноситься копіями випроміненого сигналу, що приходять до приймача з випадковими затримками і накладаються на основний промінь [1-6, 12]. Результати такого експерименту дають можливість випробувати розроблену систему в умовах, близьких до умов мілкого моря, яке також характеризується високим ступенем багатопроменевості розповсюдження акустичного сигналу. Крім того, методи захисту від завад, які дадуть змогу здійснювати ГА зв'язок в такому каналі можна буде випробувати в польових експериментах.

Для передачі даних використовувалася пара електроакустичних перетворювачів, що працюють на частотах 25-65 кГц. В обраній смузі частот формується акустичний сигнал з подвійною фазовою маніпуляцією. За умови, що один стан фази імпульсу кодує 2 біти, швидкість передачі

даних залежить від довжини імпульсу наступним чином [11]:

$$C = \frac{2}{T} \quad (2)$$

де T – це довжина одного імпульсу.

Експеримент проводився з використанням імпульсів довжинами: 2000, 1000, 500, 250 мкс, що відповідають таким швидкостям передачі даних: 1, 2, 4, 8 кбіт/с. Фазовий зсув між двома сусідніми імпульсами складав $45^{\circ}, 135^{\circ}, 225^{\circ}, 315^{\circ}$.

Схема вимірювального стенду представлено на рис 3. Стенд складався з таких блоків: персональний комп'ютер (ПК), цифро-аналоговий і аналого-цифровий перетворювач (ЦАП/АЦП), підсилювач тракту генерації, електроакустичні перетворювачі (ЕАП) 1 і 2, попередній підсилювач, підсилювач тракту прийому.

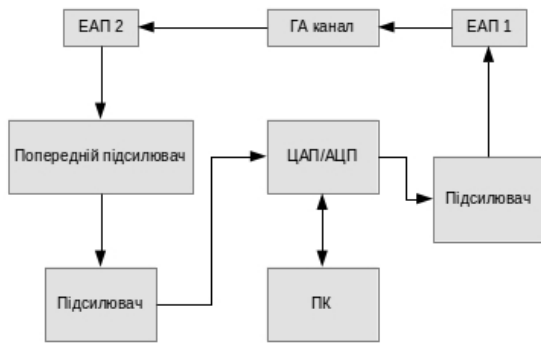


Рис 3. Схематичне зображення вимірювального стенду

ЕАП розміщувалися на відстані в 2,5 м один від одного і на глибині 1 м від поверхні води, більш детально розміщення ЕАП зображено на рис. 4.

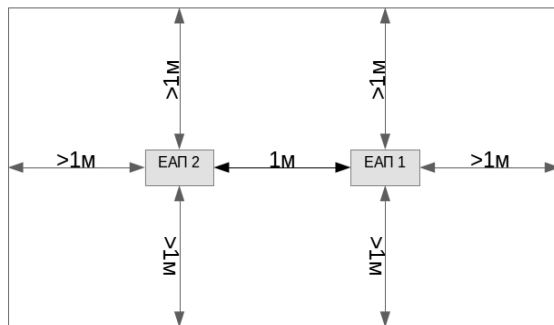


Рис 4. Розміщення ЕАП відносно стінок басейну

Для генерації електричного сигналу використовувався генератор послідовності імпульсів, створений за допомогою програмного комплексу LabView з лінійною частотною модуляцією за законом (1). Генератор формував пакет (набір) послідовних імпульсів заданої довжини з заданим зсувом фаз між сусідніми імпульсами. Цифровий сигнал на виході ПК переводився в аналоговий вигляд за допомогою ЦАП/АЦП і після підсилення випромінювався ЕАП 1. Після розповсюдження акустичного сигналу в ГА каналі приймач ЕАП 2 перетворював акустичні коливання в електричний сигнал, що після підсилення і цифрування в блоці ЦАП/АЦП потрапляв на вхід ПК. Збереженні в пам'яті ПК прийняті сигнали оброблялися в три етапи:

- Виявлення початку передаваного сигналу на фоні шумових завад.
- Демодуляція отриманої послідовності за допомогою синхронно-квадратурного детектора.

- Детектування, прийняття рішення відносно інформації, що міститься в передаваній послідовності імпульсів.

Визначення довжини імпульсу

Для передачі інформації використовується квадратурна фазова модуляція. Тобто когерентна система зв'язку. Для таких систем характерним є виникнення явища міжсимвольної інтерференції, коли сусідні символи впливають один на одного, що спотворює їх форму і вносить додаткові завади. Чим коротшим буде один імпульс, тим вища швидкість передачі даних буде отримана в каналі (2). Однак, із зменшенням довжини імпульсу зростають спотворення, які обумовлені міжсимвольною інтерференцією. Щоб вплив міжсимвольної інтерференції та отримати високу швидкість передачі даних скористуємось обмеженням смуги частот за Найквістом, а саме для випадку квадратурної фазової маніпуляції [11]:

$$f_B - f_H = \frac{1}{2T} \quad (3)$$

де f_B, f_H – верхня і нижня частота доступної смуги частот, T – довжина імпульсу.

Для смуги робочих частот ЕАП (26-65 кГц) $T = 1,25$ (мс). Для оцінки впливу міжсимвольної інтерференції проведемо експеримент з імпульсами довжиною: 0.25, 0.5, 1, 2 мс.

Виявлення

В обраному методі передачі даних виявлення акустичного сигналу відбувається за допомогою узгодженого фільтра, більш відомого, як корелятор. Вихід корелятору можна описати виразом [11]:

$$z(\tau) = \int_0^{\infty} x(t)y(t)dt \quad (4)$$

де

$$y(t) = \sin\left(\omega_H t + \left[\frac{\omega_B - \omega_H}{T} \cdot t^2\right] + \phi_{random}\right) + n$$

сигнал на вході ЕАП приймача, ϕ_{random} – випадкове зміщення фази, n – шум каналу.

Електричний сигнал на вході детектора має вигляд представлений на рис. 5. Там же зображено функцію кореляції прийнятого сигналу з одним еталонним імпульсом, параметри якого відповідають параметрам передаваного сигналу.

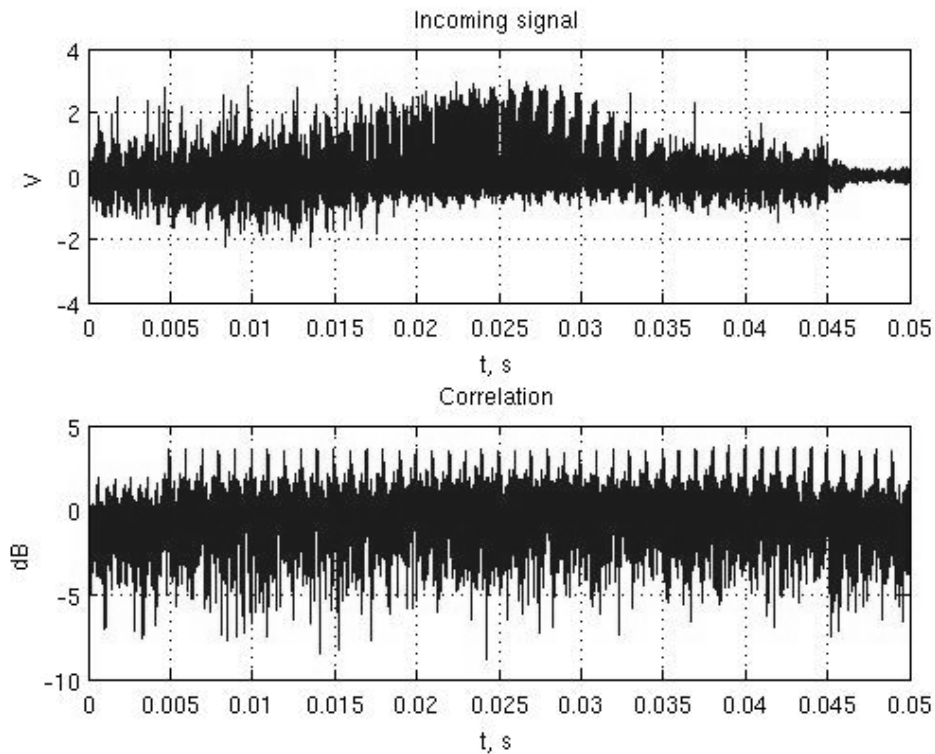


Рис 5. Графічне зображення прийнятого сигналу та функція кореляції прийнятого сигналу з еталонним імпульсом

Як видно з рис. 5, визначити початок послідовності імпульсів виходячи з форми прийнятого сигналу є непростою задачею. На функції кореляції досить легко бачити послідовність із 45 максимумів, що відповідають 45 імпульсам в передаваному пакеті даних.

За першим максимумом легко можна віднайти початок сигналу. Якщо різниця між двома сусідніми максимумами не відповідає довжині одного імпульсу, можна зробити висновок про наявність спотворення, що викликано ефектом Доплера. В даному експерименті, по причині стаціонарності ЕАП, такого не спостерігалось.

Слід зазначити, що в кожному конкретному випадку рівень порогу і початковий фазовий зсув першого імпульсу необхідно визначати окремо, вручну. Це пов'язано з випадковим значенням початкової фази акустичного сигналу і динамікою характеристик гідроакустичного каналу. В практичних додатках цей процес можна автоматизувати за допомогою використання кількох синхронних імпульсів, параметри яких будуть відомі приймальному пристрою априорно.

Висновок

Для реалізації засобів ГА зв'язку найбільш доцільним є використання цифрового зв'язку на основі фазової модуляції (наприклад метод

КФМ, що обрано в експерименті) з розширенням спектру за допомогою частотної модуляції по лінійному закону [8, 10, 12]. Цей метод зарекомендував себе, як такий, що забезпечує найбільш високу швидкість і достовірність передачі даних через гідроакустичний канал в складних умовах мілкого моря [1, 2, 5, 8, 12].

В роботі розраховано оптимальну за Найквістом довжину імпульсу для сигналу в смузі частот 25-65 кГц, вона становить 1.25 мс.

Дані передавались на швидкостях 1, 2, 4, 8 кбіт/с між двома парними електроакустичними перетворювачами в басейні, на відстані 2,5 метрів при їх фіксованому розташуванні.

В роботі представлено методологію виявлення сигналу на фоні завад за допомогою корелятору.

В наступній статті буде розглянуто демодуляцію отриманої послідовності і проведено обробку отриманих даних, представлено результати аналізу імовірнісних характеристик розподілу інформаційної складової фази сигналу ϕ_i .

Список використаних джерел

1. Chen G. Statistical characteristics of sound channel in shallow water / G. Chen, Y. Chen, J.L. Zhang // J. Acoust. Soc. Am. – Melville,

- NY: ASA Acoustical Society of America, 2001. – Vol. 109, No. 5, Pt. 2. – P. 2451.
2. *Kebkal, A. K., Kebkal, K. G., Kebkal, O. G., & Komar, M.* (2012), Modeling and Experimental Validation of Basic Characteristics of Underwater Acoustic Communication based on Signals with Sweep-Spread Spectrum.
 3. *Kebkal, K. G., Bannasch, R., Kebkal, O. G., Panfilov, A. I., & Wischnewski, R.* (2009). 3D acoustic imaging applied to the Baikal neutrino telescope. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 602(1), 177-179.
 4. *Kebkal K. G., Bannasch R.* Sweep-spread carrier for underwater communication over acoustic channels with strong multipath propagation //The Journal of the Acoustical Society of America. – 2002. – Т. 112. – С. 2043.
 5. *Kebkal, K., Kebkal, A., & Bannasch, R.* (2007, June). Evaluation of underwater acoustic channel capacity in conjunction with application of sweep-spread carrier signals. In OCEANS 2007-Europe (pp. 1-6). IEEE.
 6. *Stojanovic, M., Catipovic, J. A., & Proakis, J. G.* (1994). Phase-coherent digital communications for underwater acoustic channels. Oceanic Engineering, IEEE Journal of, 19(1), 100-111.
 7. *Гладких Н.Д.* Оценка влияния доплеровского расширения полосы частот на ошибку оценки фазы гидроакустического (ГА) сигнала // Электроника и связь. 2012. №6. С. 85-92.
 8. *Кебкал К.Г., Дидковский В.С.* Анализ путей развития средств цифровой гидроакустической связи. Монография.- Севастополь, 2010. – 168с.
 9. *Абаренов С.П.* Некоторые результаты экспериментов по передаче сигналов управления и цифровой информации по гидроакустическим каналам связи на мелководье и вблизи отражающих границ / С. П. Абаренов [и др.] // Научное и техническое обеспечение исследований и освоения шельфа Северного Ледовитого океана : Всерос. науч.-техн. конф. - Новосибирск, 2010. - С. 175-179
 10. *Кебкал К.Г.* Результаты цифровой гидроакустической связи в мелкой воде между судном и подводным аппаратом. / К.Г. Кебкал, А.Г. Кебкал, НИЦ ВСУ «Государственный океанариум».
 11. *Скляр Б.* Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Б. Скляр – М.: «Вильямс», 2003. – 1104 с.
 12. *Кебкал К.Г.* Теоретичне обґрунтування і практична реалізація засобів цифрового зв'язку для гідроакустичних середовищ з характеристиками підвищеної складності [Текст] : автореф. дис. д-ра техн. наук : 05.09.08 / Кебкал Костянтин Георгійович ; Нац. техн. ун-т України "Київ. політехн. ін-т". - К., 2011. - 40 с. : рис., табл.

Поступила в редакцию 30 декабря 2013 г.

УДК 681.883.45

Н.Д. Гладких

Национальный технический университет Украины " Киевский политехнический институт",
пр. Победы, 37, Киев-56, 03056, Украина.

Экспериментальная реализация цифрового гидроакустического СВЯЗИ

Представлены методология проведения эксперимента по передаче цифровых данных через гидроакустический канал в квадратурной фазовой манипуляции с расширением спектра.

Приведены схемы измерительного стенда, аналитическое выражение для излучаемого сигнала, методологию обнаружения сигнала, графики излученного и принятого сигналов, временную зависимость частоты сигнала, график корреляции полученного сигнала с опорным.

Данные передавались на скоростях 1, 2, 4, 8 кбит/с. Испытания проводились в бассейне.
Библ. 12, рис. 5.

Ключевые слова: гидроакустика, гидроакустический связь, фазовая манипуляция, передача данных, гидроакустический канал обнаружения сигнала.

UDC 681.883.45

N.D. Hladkih

National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute",
etc., 37, 56, Kyiv, 03056, Ukraine.

Experimental realization of digital sonar communication

In this article it is presented a methodology of the experimental transmission of digital data through the hydroacoustic channel. A signal with quadrature phase-shift keying and spread-spectrum is used. It is presented a scheme of measuring stand, analytical expression for the emitted signal, signal detection methodology, graphics of radiated and received signals, the time dependence of the signal frequency, graphic of correlation of the received signal with the reference impulse. Data were transferred at speeds of 1, 2, 4, 8 kbit/s. Measurements were made in the pool. References. 12, Fig. 5.

Keywords: sonar, sonar communications, phase shift keying, data, hydroacoustic channel signal detection.

References

1. *Chen G.* (2001), "Statistical characteristics of sound channel in shallow water". J. Acoust. Soc. Am. – Melville, NY: ASA Acoustical Society of America, Vol. 109, No. 5, Pt. 2. P. 2451.
2. *Kebkal, A. K., Kebkal, K. G., Kebkal, O. G., & Komar, M.* (2012), "Modeling and Experimental Validation of Basic Characteristics of Underwater Acoustic Communication based on Signals with Sweep-Spread Spectrum."
3. *Kebkal, K. G., Bannasch, R., Kebkal, O. G., Panfilov, A. I., & Wischnewski, R.* (2009), "3D acoustic imaging applied to the Baikal neutrino telescope". Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 602(1), pp. 177-179.
4. *Kebkal K. G., Bannasch R.* (2002), "Sweep-spread carrier for underwater communication over acoustic channels with strong multipath propagation", The Journal of the Acoustical Society of America. Vol. 112. Pp. 20-43.
5. *Kebkal, K., Kebkal, A., & Bannasch, R.* (2007, June). "Evaluation of underwater acoustic channel capacity in conjunction with application of sweep-spread carrier signals." In OCEANS 2007-Europe (pp. 1-6). IEEE.
6. *Stojanovic, M., Catipovic, J. A., & Proakis, J. G.* (1994), "Phase-coherent digital communications for underwater acoustic channels." *Oceanic Engineering*, IEEE Journal of, 19(1), Pp.100-111.
7. *Gladkikh N. D.* (2012), "Assessing the impact of the expansion of the Doppler for error estimation phase of hydroacoustic (HA) signal", *Electronics and Communication*. Number 6. Pp. 85-92. (Rus)
8. *Kebkal K. G., Didkovsky V.S.* (2010), "Analysis of the ways of development of digital sonar communication". Monografiya.-Sevastopol. P. 168. (Rus)
9. *Abarenov S.P.* (2010), "Some results of experiments on the transfer of control signals and digital information over sonar communication channels in shallow water near the reflectors", Scientific and technical support for research and development of the shelf of the Arctic Ocean: Vseros. scientific and engineering. conf. Novosibirsk. Pp. 175-179
10. *Kebkal K.G., Kebkal A.G.* (2012), "The results of digital communication sonar in shallow water between the ship and underwater vehicle". KG Kebkal, AG Kebkal SIC APU "State Oceanarium".
11. *Sklar B.* (2003), "Digital communications. The theoretical basis and practical application", B. Sklar - M.: "Williams". P.1104. (Rus)
12. *Kebkal K.G., Konstantin G.* (2011), "The theoretical basis and practical implementation of digital communication for media with sonar characteristics of high complexity". Abstract. Thesis. ... Dr. techn. Sciences: 05.09.08 Nat. Sc. University of Ukraine "Kyiv. Polytechnic. Inst." K. P. 40. (Rus)