

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 2)

В роботі представлено результати проведення експерименту по передачі даних через гідроакустичний канал за допомогою методу квадратурної фазової маніпуляції з розширенням спектру. В експерименті використовувалась чотирьох-позиційна фазова модуляція. Дані передавались на швидкостях 1, 2, 4, 8 кбіт/с. За результатами експерименту побудовані криві розподілення інформаційних значень фази акустичного сигналу, проведено порівняння квантилів розподілення отриманих даних і квантилів нормального розподілення, проведено тести Яркі-Бера і Ліллієфорса, проведено оцінку математичного очікування, стандартного відхилення і імовірності бітрової помилки. Бібл. 10, рис. 13, табл. 3.

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

### Вступ

В першій частині даної статті було розглянуто методологію проведення експерименту, визначено оптимальну за Найквістом довжину імпульсу для обраного методу, визначено спосіб виявлення сигналу на фоні завад. В цій статті розглянемо демодуляцію отриманої послідовності, побудуємо розподілення отриманих значень інформаційних зсувів фази і визначимо їх імовірнісні характеристики.

Для оцінки закону розподілення скористаємось тестами Ліллієфорса і Яркі-Бера. В роботі також побудовано квантилі розподілення інформаційної складової фази і їх порівняння із квантилями розподілення нормального закону.

Нагадаємо, що саме фазова складова сигналу  $\varphi_i$  кодує інформацію передаваної послідовності.

Отже, після детектування отримано корисний сигнал із суміші сигналу і завад [6]. Надалі необхідно провести демодуляцію отриманої послідовності.

### Демодуляція

Для демодуляції отриманого сигналу часто використовують синхронно-квадратурний детектор (СКД) [2, 3, 7, 8, 10]. На рис. 1 приведено схематичне зображення СКД і принцип його роботи.

СКД складається з двох каналів. В першому каналі електричний сигнал перемножується на синфазний йому сигнал і проходить через інтегратор, на виході отримуємо  $R_c$  – синфазний компонент, пропорційний реальній частині вхідного сигналу. У другому каналі відбувається перемножування на сигнал у квадратурі і після інтегрування отримуємо  $R_s$  – протифазний компонент, пропорційний уявній складовій сигналу. Арктангенс відносини цих величин дає миттєве значення фази сигналу.

Така проста схема дозволяє виділити значення фази сигналу в певний момент часу, який визначається на етапі детектування і відповідає початку чергового імпульсу. СКД є стійким до спотворень, що викликані багатопроменевістю розповсюдження акустичного сигналу і фоновим шумом, однак спотворення, що викликані ефектом Допплера можуть суттєво вплинути на роботу детектора. Похибка, яка виникає в результаті дії ефекту Допплера під часу руху носіїв зв'язку на невеликих швидкостях (такий рух є результатом дії хвиль і вітру на плавзасоби і сягає величин до 6-ти вузлів) сягає значень до  $1^0$  і нею можна знехтувати [5].

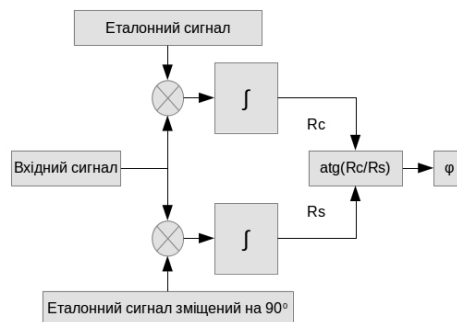
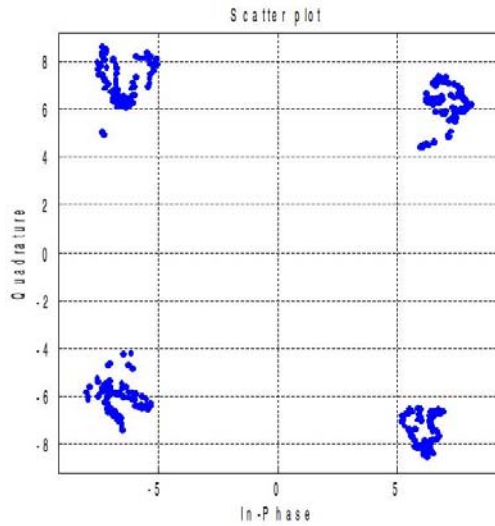


Рис 1. Схема роботи синхронно-квадратурного детектора

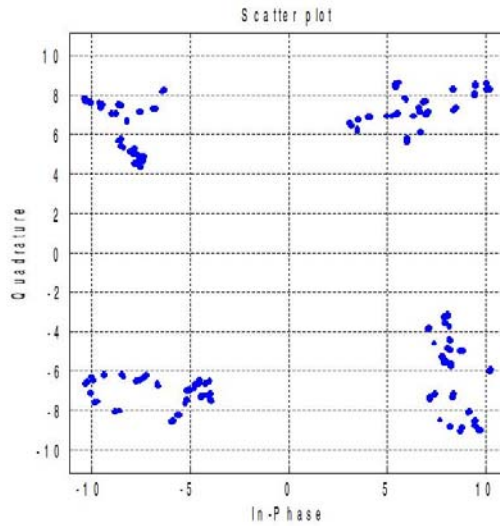
**Результати проведення експерименту**

В результаті проведеного експерименту було отримано розподілення фази  $\varphi_i$  прийнятого сигналу. Для зручності сприйняття результатів представимо фазове розподілення у вигляді

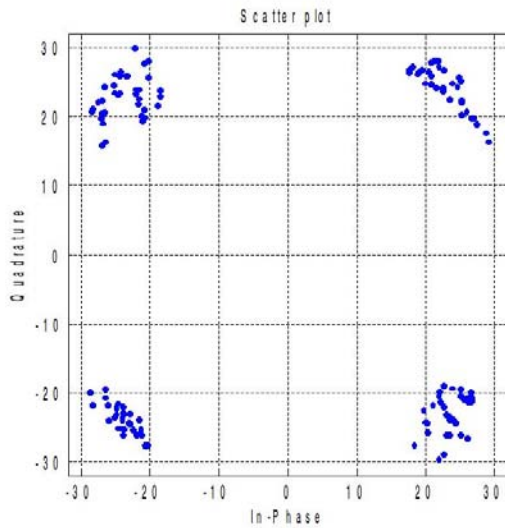
графіку, де по осі абсцис відкладається компонент  $R_c$ , що є пропорційним реальній частині вхідного сигналу, по осі ординат –  $R_s$ , що пропорційно уявній частині. На графіку осі позначено, як синфазну і квадратурну відповідно.



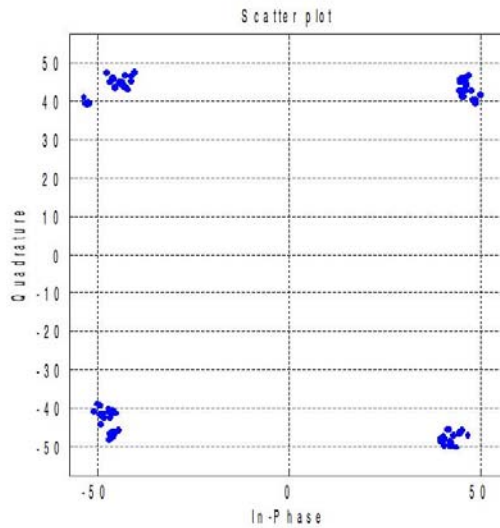
**Рис. 2.** Зображення розподілення  $\varphi_i$  на швидкості 8 кбіт/с



**Рис. 3.** Зображення розподілення  $\varphi_i$  на швидкості 4 кбіт/с



**Рис. 4.** Зображення розподілення  $\varphi_i$  на швидкості 2 кбіт/с



**Рис. 5.** Зображення розподілення  $\varphi_i$  на швидкості 1 кбіт/с

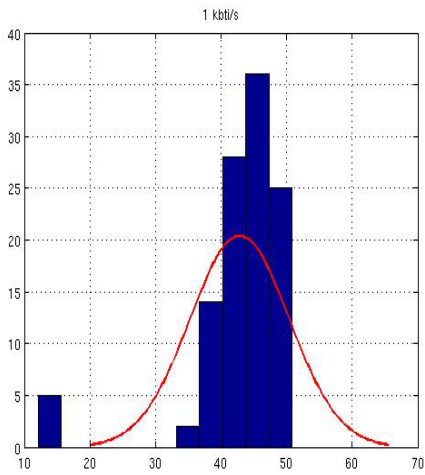


Рис. 6. Зображення розподілу значень фази 1 кбіт/с

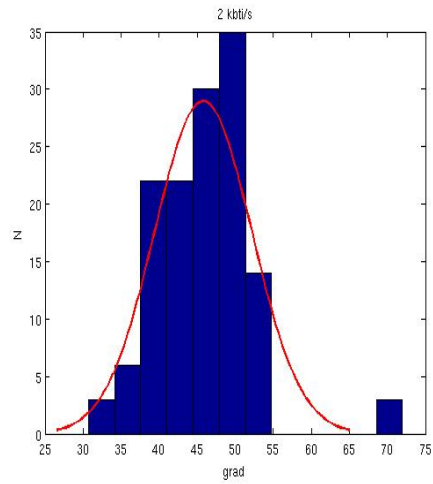


Рис. 7. Зображення розподілу значень фази 2 кбіт/с

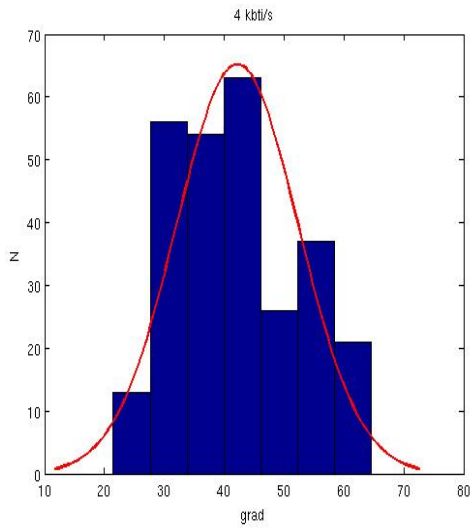


Рис. 8. Зображення розподілу значень фази 4 кбіт/с

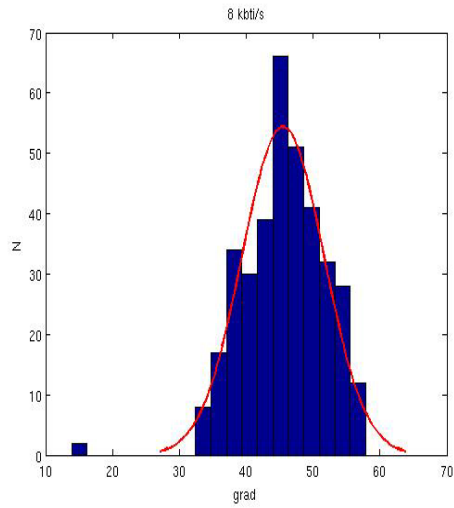


Рис. 9. Зображення розподілу значень фази 8 кбіт/с

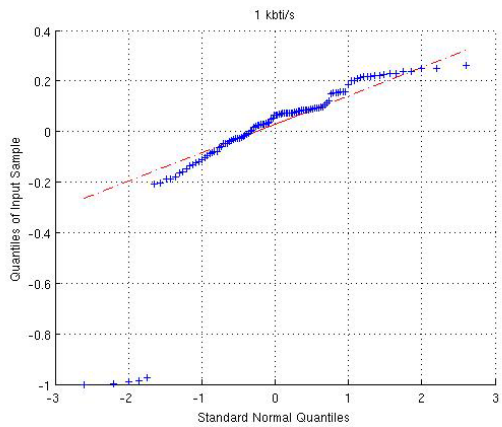


Рис. 10. Квантілі розподілення нормального закону і отриманих даних 1 кбіт/с

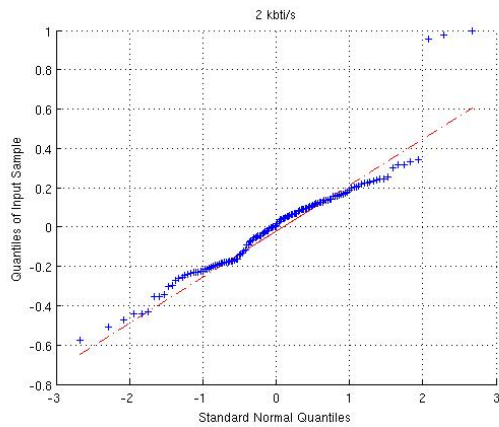


Рис. 11. Квантілі розподілення нормального закону і отриманих даних 2 кбіт/с

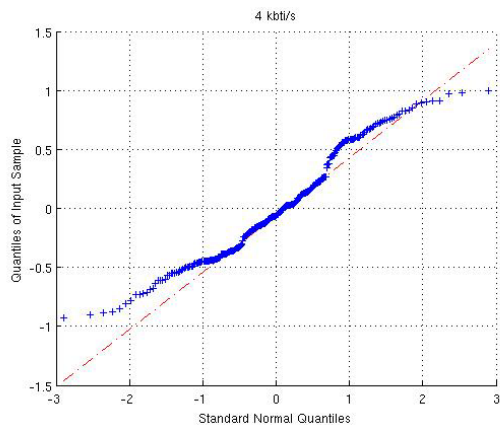


Рис. 12. Квантили розподілення нормального закону і отриманих даних 4 кбіт/с

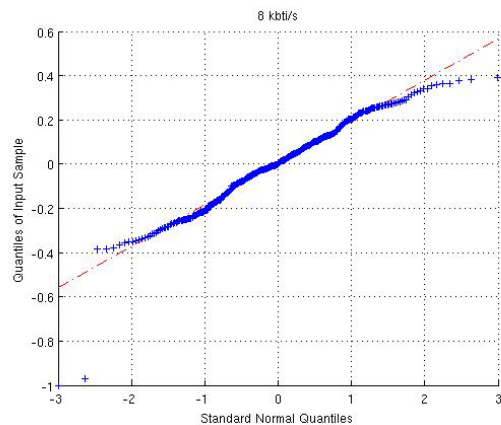


Рис. 13. Квантили розподілення нормального закону і отриманих даних 8 кбіт/с

З рис. 2-5 видно загальну тенденцію, що із зменшенням швидкості передачі даних зменшується відхилення значення фази від передаваного.

Щоб оцінити отриманий результат необхідно визначити за яким законом розподілу розміщені значення відхилення фази. Для початку побудуємо гістограми розподілення фази, їх зображено на рисунках 6-9. Далі побудуємо квантили розподілення отриманих послідовностей і порівняємо їх з квантилями нормального закону розподілення, рисунки 10-13. Ці кроки дають наочне представлення про характер розподілу. Останнім кроком буде проведення тестів Яркі-Бера і Ліллієфорса, які дають числові характеристики.

На цьому етапі прийнято гіпотезу, що отримані розподілення є нормальними.

Для подальшого аналізу проведено нормування отриманих даних, фазу сигналу приведено до  $45^{\circ}$ . Проведено 2 тести на відповідність випадкової вибірки експериментальних даних нормальному закону розподілення. Це тести Яркі-Бера і Ліллієфорса. В результаті роботи цих тестів маємо 4 цифри, що відповідають:

- Н – приймає значення “0” у випадку, коли нульова гіпотеза може бути прийнята і “1”, у випадку неприйнятності нульової гіпотези з обраним рівнем значимості.
- Р – рівень значимості, що відповідає вибіркового рівню значимості статистики  $\chi^2$ .
- JBSTAT/LSTAT – отриманий рівень статистики  $\chi^2$ .
- CV – критичний рівень статистики  $\chi^2$ .

Таблиця 1. Тест Яркі-Бера

Швидкість передачі даних	8	4	2	1
H	1	0	1	1
P	0,001	0,0106	0,001	0,001
JBSTAT	124,2203	11,2222	113,4350	541,6184
CV	14,2699	14,9294	16,4923	16,8719

Таблиця 2. Тест Ліллієфорса

Швидкість передачі даних	8	4	2	1
H	0	1	0	1
P	0,1098	0,001	0,0089	0,001
LSTAT	0,0430	0,0763	0,0904	0,1852
CV	0,0647	0,0746	0,1049	0,1159

Підсумовуючи результати тестів можна зробити висновок, що отримані вибірки для швидкостей передачі даних 2, 4 і 8 кбіт/с розподілені за нормальним законом, що підтверджено тестами Яркі-Бера для 4 кбіт/с і Лиллієфорса для 2 і 8 кбіт/с. В певній мірі це обумовлено впливом міжсимвольної інтерференції в електричній частині каналу зв'язку. Про 1 кбіт/с можна сказати, що результати розподілені не за нормальним законом, це, очевидно, пов'язано зі стаціонарністю умов проведення експерименту. Якщо профіль багатопроменевості каналу буде більш динамічним, чого складно добитись в умовах басейну, імовірно, дані будуть розподілені нормально.

**Таблиця 3. Імовірнісні характеристики отриманих даних**

Швидкість передачі даних	1	2	4	8
МО фази, град	45,68	42,4	45	44,3
СКВ фази, град	5,64	10,1	6	3,59
Оцінка нормованого СКВ фази	0,2462	0,2445	0,4547	0,1933
Вихідне відношення сигнал/шум, дБ	6,08	6,11	3,42	7,13
Імовірність бітової помилки	$5,56 \cdot 10^{-5}$	$5,23 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$5,40 \cdot 10^{-6}$

Для більшості прикладних застосувань рівня імовірності бітової помилки порядку  $10^{-5}$  достатньо для надійної роботи системи зв'язку. [5] Це дає можливість уникнути додаткових кроків по захисту від завад. В окремих випадках може виникнути необхідність в більш заводозахищеному зв'язку, тоді використовуються коди з надмірністю.

### Висновок

В роботі представлено результати проведення експерименту по передачі даних через гідроакустичний канал за допомогою методу квадратурної фазової маніпуляції з розширенням спектру. В експерименті використовувалась чотирьох-позиційна фазова модуляція і розширення спектру сигналу. Дані передавались на швидкостях 1, 2, 4, 8 кбіт/с між двома парними оборотними електроакустичними перетворювачами в басейні, на відстані 2,5 метрів.

За результатами експерименту побудовані криві розподілення інформаційних значень фази акустичного сигналу, проведено порівняння квантилів розподілення отриманих даних і квантилів нормального розподілення, проведено тести Яркі-Бера і Лиллієфорса, проведено оцінку математичного очікування, стандартного відхилення і імовірності бітової помилки.

Для подальшого аналізу розраховано математичне очікування (МО) фази, розраховано середньо-квадратичне відхилення (СКВ). Також розраховано оцінку вихідного відношення сигнал/шум, та імовірність бітової помилки за формулами [9]:

$$\frac{E_b}{N_0} = 10 \cdot \log\left(\frac{1}{\sigma^2}\right) \quad (4)$$

$$P_b = Q\left(\sqrt{2 \cdot \frac{E_b}{N_0}}\right) \quad (5)$$

$$Q(x) = \frac{1}{2\pi} \int_x^{\infty} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt$$

Отримані значення імовірності бітової помилки порядку  $10^{-5}$  достатні для надійної роботи системи зв'язку [7]. Це дає можливість уникнути додаткових кроків по захисту від завад при роботі на швидкостях 1, 2 кбіт/с. Саме ці значення розраховані із обмеження смуги частот за Найквістом.

В результаті визначено, що отримані вибірки для швидкостей передачі даних 4, 8 і 2 кбіт/с розподілені за нормальним законом, що підтверджено тестами Яркі-Бера для 4 кбіт/с і Лиллієфорса для 8 і 2 кбіт/с. Це обумовлено впливом міжсимвольної інтерференції і є цілком передбачуваним явищем при перевищуванні обмежування Найквіста. Про 1 кбіт/с можна сказати, що результати розподілені не за нормальним законом.

В експериментах, які проводились в польових умовах, фаза розподілена за нормальним законом [1, 2, 4, 8]. Однак, при поясненні цього факту до уваги не приймалися такі важливі акустичні фактори, як дисперсія швидкості звуку і особливості розповсюдження складних акустичних сигналів у хвилеводі.

Як видно з експерименту, саме міжсимвольна інтерференція обумовлює нормальний характер розподілу значень фази. В подальшому буде оцінено вплив вищезазначених факторів.

**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.* et al. Modeling and Experimental Validation of Basic Characteristics of Underwater Acoustic Communication based on Signals with Sweep-Spread Spectrum.
3. *Kebkal K.G.* Evaluation of underwater acoustic channel capacity in conjunction with application of sweep-spread carrier signals. [Електронний ресурс]: IEEE Proceedings OCEANS'07 / K.G. Kebkal, A.G. Kebkal, R. Bannasch – 80 Min / 700 MB. – Publisher: Piscataway, NJ, USA: IEEE Operations Centre, 2007. – 1 електрон. орт. диск(CDROM): кольор.; 12 см. – Систем. вимоги: Pentium; 32 Mb RAM; Windows 98/NT/2000/XP. – OCEANS'07 IEEE Aberdeen Conference Proceedings, Aberdeen, Scotland, 18-21 June 2007, "Marine Challenges: Coastline to Deep Sea". – ISSN: 1-4244-0635-8.
4. *Stojanovic M., Catipovic J.A., Proakis J.G.* Phase-coherent digital communications for underwater acoustic channels // IEEE J. Ocean. Eng. – Piscataway, NJ, USA: IEEE Operations Center, 1994. – Vol. 19. – P. 100 – 111.
5. *Гладких Н.Д.* Оценка влияния доплеровского расширения полосы частот на ошибку оценки фазы гидроакустического (ГА) сигнала. // Электроника и связь. – 2012, – № 6, – С.85 – 94.
6. *Гладких Н.Д.* Експериментальна реалізація цифрового гідроакустичного зв'язку (частина 1) // Электроника и связь. — 2013, — № 6, — С.хх — хх.
7. *Кебкал К.Г., Дидковский В.С.* Анализ путей развития средств цифровой гидроакустической связи. Монография.- Севастополь, 2010. – 168с.
8. Результаты цифровой гидроакустической связи в мелкой воде между судном и подводным аппаратом. К.Г. Кебкал, А.Г. Кебкал, НИЦ ВСУ «Государственный океанариум»
9. *Скляр Б.* Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Б. Скляр – М.: «Вильямс», 2003. – 1104 с.
10. 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 25 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 цифровой гидроакустической связи (часть 2)**

*В работе представлены результаты проведения эксперимента по передаче данных через гидроакустический канал с помощью метода квадратурной фазовой манипуляции с расширением спектра. В эксперименте использовалась четырех-позиционная фазовая модуляция. Данные передавались на скоростях 1, 2, 4, 8 кбит/с. По результатам эксперимента построены кривые распределения информационных значений фазы акустического сигнала, проведено сравнение квантилей распределения полученных данных и квантилей нормального распределения, проведены тесты Ярки-Бера и Лиллиефорса, проведена оценка математического ожидания, стандартного отклонения и вероятности битовой ошибки. Библиограф. 10, рис. 13, табл. 3.*

**Ключевые слова:** гидроакустика, гидроакустический связь, квадратурная фазовая манипуляция, передача данных, гидроакустический канал.

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 (part 2)

*This paper presents the results of an experiment on sonar data transfer through the channel by the method of quadrature phase shift keying spread-spectrum. In the experiment it was used the four-way phase modulation. Data were transferred at speeds of 1, 2, 4, 8 kbit/s. According to the experiment it was curves constructed distribution curves of information values of the phase of the acoustic signal, it was made the comparison of the data distribution quantile and quantile of the normal distribution, were provided tests of Yarki-Baer and Lilliefors, it was made the estimation of the expectation, standard deviation and probability of bit errors. References. 10, figures 13, tables 3.*

**Keywords:** *hydroacoustics, hydroacoustic communication, quadrature phase shift keying, data, sonar channel.*

### References

1. *Chen G., Y. Chen, J.L. Zhang (2001) "Statistical characteristics of sound channel in shallow water" 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., 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.*
4. *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.*
5. *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)*
6. *Gladkikh N. D. (2013) "Experimental realization of digital sonar communication (part 1)" Electronics and Communication., 2014. Number 1. 95-101. (Ukr)*
7. *Kebkal K. G., Didkovsky V.S. (2010), "Analysis of the ways of development of digital sonar communication". Monografiya.-Sevastopol. P. 168. (Rus)*
8. *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".*
9. *Sklar B. (2003), "Digital communications. The theoretical basis and practical application", B. Sklar - M.: "Williams". P.1104. (Rus)*
10. *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)*