

С. Т. Барась<sup>1</sup>  
О. В. Войцеховська<sup>1</sup>  
Г. М. Щербатюк<sup>1</sup>

## ФЛУКТУАЦІЇ ЧАСТОТИ ДОППЛЕРІВСЬКОГО СИГНАЛУ

<sup>1</sup>Вінницький національний технічний університет

*Оцінювання флуктуацій частоти заповнення доплерівського сигналу є важливою задачею в контексті визначення складових вектора швидкості носія гідроакустичним лагом.*

*Проаналізовано математичну модель доплерівського сигналу з точки зору механізму його формування, а також обґрунтовано переважний вплив на його несучу частоту парціального сигналу, який відповідає осі характеристики спрямованості антени. Показано, що крім осевого парціального луносигналу з найвищим рівнем, мають місце бокові парціальні луносигнали з відмінними від «осевої» частотами, які разом з осевим парціальним луносигналом формують остаточний доплерівський луносигнал, що надходить на вхід приймального тракту доплерівського лага.*

*Наведено результати експериментальних досліджень доплерівських сигналів, які свідчать про низький рівень флуктуацій доплерівських зсувів частоти, що створює передумови для високої потенційної точності визначення складових вектора швидкості носія. Показано, що флуктуації несучої частоти доплерівського сигналу, яка безпосередньо визначається швидкістю носія, є незначними. Наведено результати обробки масивів частот, отриманих під час роботи лага з донними сигналами, у вигляді середньоквадратичних значень флуктуацій частоти доплерівського сигналу. Вони показують, що несуча частота доплерівського луносигналу достатньо стабільна не тільки у межах луносигналу, але й на всьому інтервалі проведених вимірювань. Також подано графічні залежності доплерівських зсувів по різних променях янусної характеристики, які дозволяють оцінити результати вимірювань частоти та її флуктуацій в доплерівському сигналі на якісному рівні. Отримані при цьому достатньо низькі похибки вимірювання доплерівських зсувів частоти характеризують високі метрологічні характеристики доплерівських лагів.*

**Ключові слова:** доплерівський сигнал, математична модель, флуктуації частоти, експеримент.

### Вступ

Відомо, що випромінений і згодом відбитий від перешкоди в реальних умовах імпульс з високочастотним заповненням внаслідок взаємодії з середовищем поширення та впливом руху джерела випромінювання зазвичай у точці прийому має ознаки вузькосмугового сигналу. Прикладом є доплерівський сигнал гідроакустичного вимірювача швидкості (лага).

Несуча частота доплерівського сигналу є його найважливішим параметром, оскільки вона має переважний вплив на точність вимірювання складових вектора швидкості носія. Тому так важливо знати поведінку цієї частоти у доплерівському сигналі, а саме — рівень її флуктуацій. Ця проблематика розглянута в роботах [1]—[5]. Зокрема в [1] досліджуються фізичні аспекти формування луносигналу, що має безпосередній вплив на структуру доплерівського сигналу. У статті [2] викладено аналіз роботи промислового зразка доплерівського лага в реальних умовах експлуатації в аспекті досяжних значень похибок вимірювання складових вектора швидкості. В роботах зазначається, що від точності вимірювання несучої частоти доплерівського сигналу безпосередньо залежить точність визначення складових вектора швидкості носія. У цьому контексті важливо детальніше дослідити тонку структуру доплерівського сигналу, з'ясувати рівень флуктуацій його несучої частоти та визначити ефективні методи її вимірювання.

Пряме використання для оцінювання флуктуацій частоти заповнення таких сигналів теорії вузькосмугових сигналів з обмеженим спектром дає незадовільні результати [6]. Похибки вимірювання складових вектора швидкості виявляються суттєво нижчими, ніж це випливає зі співвідношень, які базуються на згаданій теорії. Тому є підстави для певного удосконалення цих розрахункових співвідношень. Отже, метою роботи є уточнення математичної моделі доплерівського

сигналу з урахуванням механізму його формування та експериментальне визначення рівня флуктуацій частоти, що в сукупності створює передумови для отримання адекватних розрахункових співвідношень.

### Обґрунтування математичної моделі доплерівського луносигналу

Математичною моделлю вузькосмугового сигналу може бути будь-яка з таких аналітичних залежностей [7]:

$$\begin{aligned} s_1(t) &= z_1(t) \cos \omega_0 t; \\ s_2(t) &= z_2(t) \sin \omega_0 t, \end{aligned} \quad (1)$$

де  $z_1(t)$  і  $z_2(t)$  — низькочастотні сигнали, спектр яких зосереджений навколо нульової частоти, а  $\cos \omega_0 t$  і  $\sin \omega_0 t$  — «швидкі» множники, причому частота  $\omega_0$  має достатньо велике значення порівняно з шириною спектру низькочастотного сигналу.

Легко побачити, що формули (1) мають вигляд амплітудно-модульованих сигналів, у яких функції  $z_1(t)$  і  $z_2(t)$  характеризують змінні у часі амплітуди, а частота  $\omega_0$  є несучою частотою модульованого коливання.

Як зазначається в [7], з фізичної точки зору вузькосмугові сигнали є квазігармонічними коливаннями. Отже, комплексна обвідна для вузькосмугового сигналу грає таку ж роль, як і комплексна амплітуда простого гармонічного коливання. Водночас комплексна обвідна залежить від часу, тобто вектор обвідної на комплексній площині змінюється як за модулем, так і за напрямком. Це і пояснює механізм появи відповідних змін у тонкій структурі доплерівського сигналу.

Закон зміни у часі миттєвої частоти вузькосмугового сигналу описується математичною моделлю

$$\omega_s(t) = \omega_0 + \frac{B'_S(t)A_S(t) - A'_S(t)B_S(t)}{A_S^2(t) + B_S^2(t)}. \quad (2)$$

Формула (2) показує, що миттєва частота вузькосмугового сигналу визначається алгебраїчною сумою деякої сталої центральної частоти  $\omega_0$  та флуктуаційної складової, яка залежить від миттєвих значень його синфазної і квадратурної амплітуд та їх перших похідних по часу.

Поєднаємо складові формули (2) з механізмом формування доплерівського сигналу [8].

Доплерівський луносигнал, що надходить на вхід приймального тракту, можна уявити у вигляді суми парціальних луносигналів, розсіяних окремими елементарними ділянками озвученого дна. Кількість елементарних ділянок, що формують парціальні луносигнали, визначається формою характеристики спрямованості. Рівень парціальних сигналів з відхиленням від осі у будь-який бік зменшується, оскільки зменшується рівень пелюстки характеристики спрямованості. У загальному випадку можуть бути створені умови, коли сумарний луносигнал формується лише близькими до осі характеристики спрямованості парціальними сигналами, а можуть бути такі умови, коли спектр парціальних сигналів суттєво розширюється. Можливі певні проміжні варіанти. Таким чином, осьовий парціальний луносигнал, який слід вважати потенційно з найвищим рівнем, «обростає» боковими парціальними луносигналами з відмінними від «осьової» частотами, і вся ця сукупність парціальних луносигналів формує остаточний доплерівський луносигнал, який надходить на вхід приймального тракту доплерівського лага. Отже, у формулі (2) частота  $\omega_0$  є несучою частотою доплерівського сигналу, причому вона дорівнює частоті заповнення парціального сигналу, що відповідає осі характеристики спрямованості антени лага («осьова» частота). Бокові парціальні луносигнали визначають синфазну  $A_S(t)$  та квадратурну  $B_S(t)$  амплітуди комплексної обвідної і безпосередньо впливають на миттєве значення частоти доплерівського сигналу, точніше — визначають знак і значення другого доданку у формулі (2), тобто у той чи інший бік змінюють значення миттєвої частоти  $\omega_0$  або його не змінюють.

### Результати дослідження

Перейдемо до результатів експериментальних досліджень флуктуацій частоти доплерівського сигналу, які виконувалися у різних акваторіях Світового океану.

Дослідження доплерівського сигналу проводились за методикою, наведеною в [9]. Під час досліджень ставилась задача визначення в реальних умовах плавання середньоквадратичної похибки

вимірювання частоти в реальному доплерівському сигналі. Результати цих досліджень повинні також встановити ступінь адекватності математичної моделі доплерівського сигналу. В аспекті такої постановки задачі потрібно встановити збіг результатів експерименту з дисперсією флуктуацій частоти, яка впливає з уявлення доплерівського сигналу у вигляді вузькосмугового випадкового процесу [6].

Звернемо увагу на осцилограми реальних доплерівських сигналів за імпульсного випромінювання, рис. 1 і рис. 2. Обидві осцилограми зняті на виході тракту проміжної частоти за різного часу розгортки осцилографа, причому в обох випадках застосовувалась синхронізація розгортки зовнішнім імпульсом, який попередньо затримувався відносно імпульсу випромінювання.

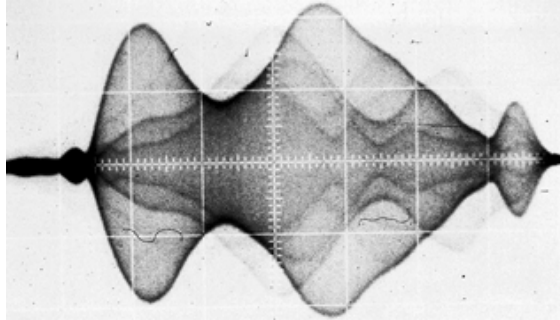


Рис. 1. Осцилограма доплерівського луносигналу:

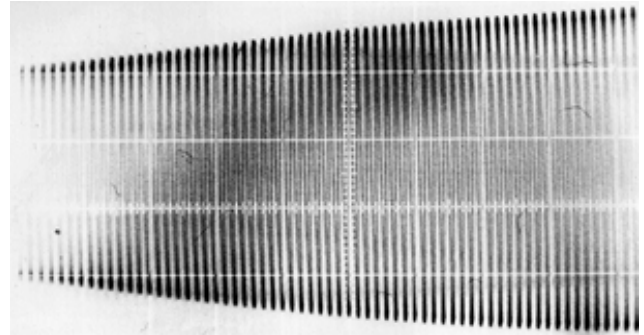


Рис. 2. Осцилограма тонкої структури фрагмента доплерівського луносигналу:  $f_{\text{ПЦ}} = 35$  кГц;  $T_{\text{розг}} = 0,2$  мс/кл

На осцилограмі, показаній на рис. 1, добре помітні амплітудні флуктуації (поведінка обвідної), причому через наявність післясвітіння екрану осцилографа це спостерігається в усіх циклах випромінювання-приймання. На рис. 2 зображена осцилограма, яка дозволяє на якісному рівні розглянути і проаналізувати внутрішню структуру луносигналу. Це невеликий фрагмент реального луносигналу (час розгортки осцилографа відповідно зменшений), на якому можна відмітити несталість амплітуди і одночасно практичну незмінність частоти заповнення.

Перейдемо до кількісних результатів досліджень.

В таблицю зведено результати обробки декількох масивів частот, отриманих під час роботи лага з донними сигналами.

#### Середньоквадратичні значення флуктуацій частоти доплерівського сигналу

Робота лага по дну $f_0 = 69813$ Гц; $C = 1500$ м/с; $\Delta\alpha = 3^\circ$ ; $\alpha_0 = 67^\circ$							
1. Банка Кобб (Тихий океан) Глибина — 27 м; хитавиця — $2^\circ$ ; $\tau = 30$ мс; $\tau_{\text{инт}} = 10$ мс; $V = 10$ вузлів				2. Східно-Китайське море Глибина 100... 150 м; хитавиця — до $3^\circ$ ; $\tau = 100$ мс; $\tau_{\text{инт}} = 40$ мс; $V = 14$ вузлів			
№ масиву даних	$\sigma_\Phi^*$ , Гц	$\sigma_f^*$ , Гц	$\sigma_f$ , Гц формула (3)	№ масиву даних	$\sigma_\Phi^*$ , Гц	$\sigma_f^*$ , Гц	$\sigma_f$ , Гц формула (3)
M1A	1,1	0,79	17,5	МС-16	0,85	0,9	10,8
M1Б	1,2	0,85	17,5	МС-17	0,7	0,8	10,8
M2A	1,0	0,8	17,5	МС-19	0,72	0,8	10,8
M2Б	1,0	0,74	17,5	МС-20	0,8	0,85	10,8

Згідно з методикою [9] в таблиці позначено:  $\sigma_\Phi^*$  — середньоквадратичне відхилення частоти заповнення луносигналу, розраховане з використанням експериментальних даних по окремих променях характеристики спрямованості (ХС) лага;  $\sigma_f^*$  — середньоквадратичне відхилення частоти заповнення луносигналу, розраховане з використанням експериментальних даних за сумарним доплерівським зсувом в двох променях янусної характеристики лага;  $\sigma_f$  — середньоквадратичне відхилення частоти заповнення луносигналу, розраховане для аналогічних попередніх умов роботи лага за формулою [6]

$$\sigma_f = F_g \frac{\sqrt{\lambda \cdot \Delta\alpha \cdot \sin \alpha_0}}{4 \cos \alpha_0 \sqrt{V \cdot T_0}}, \quad (3)$$

де  $F_g$  — доплерівський зсув частоти;  $\lambda$  — довжина хвилі;  $\Delta\alpha$  — ширина головного променя ХС антени;  $\alpha_0$  — кут нахилу променя ХС відносно горизонту;  $V$  — швидкість носія;  $T_0$  — тривалість інтервалу усереднення.

В таблиці також використано такі позначення:  $\tau$  — тривалість імпульсу випромінювання;  $\tau_{\text{інт}}$  — тривалість інтервалу вимірювання, в межах якого відбувається процес вимірювання частоти;  $C$  — швидкість ультразвуку у воді;  $f_0$  — робоча частота

З таблиці видно, що величина експериментальних середньоквадратичних значень флуктуацій частоти доплерівського сигналу знаходиться близько до величини 1 Гц. Аналогічні значення, розраховані за формулою (3), лежать у межах 10...18 Гц. Таким чином, має місце різниця орієнтовно на порядок. Це безумовне свідчення того, що формула (3), наведена у [6], не може бути поширена на всі типи моделей доплерівського сигналу. Порядок експериментальних значень середньоквадратичних відхилень частоти дозволяє стверджувати, що несуча частота доплерівського сигналу достатньо стабільна не тільки у межах луносигналу, але і на всьому інтервалі вимірювань, який охоплює багато циклів випромінювання-приймання.

Малі значення середньоквадратичних відхилень несучої частоти доплерівського сигналу є підставою для високоточного вимірювання власне частоти, яка є основним чинником, що впливає на точність вимірювання складових вектора швидкості доплерівським лагом. Значимо у цьому контексті, що цифровий обчислювальний пристрій лага для отримання хорошої точності вимірювання частоти вхідного сигналу, повинен реалізувати алгоритм статистичної обробки масивів частот, схожий на методику обробки експериментальних даних [9].

На рис. 3 і 4 показані графічні залежності доплерівських зсувів по різних променях янусної характеристики, експериментально виміряних в 25...30 циклах випромінювання-приймання, які відбувалися поспіль. Саме такі графіки дозволяють наочно оцінити результати вимірювань частоти і її флуктуацій в доплерівському сигналі на якісному рівні. Очевидно, за значних флуктуацій частоти отримати такі гладкі графічні залежності було б неможливо.

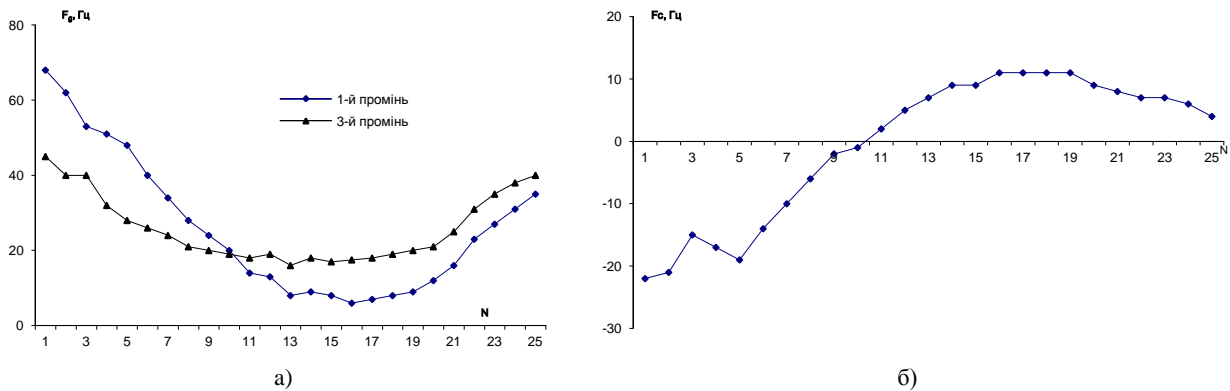


Рис. 3. Робота лага по дну. Судно в дрейфі, хитавиця (2...3)°

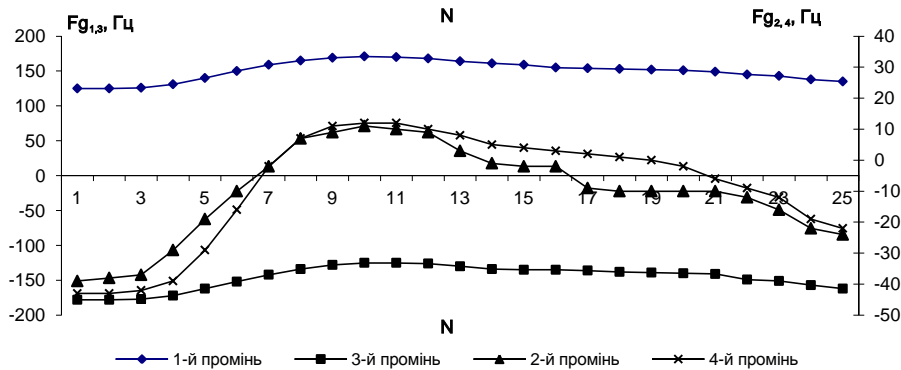


Рис. 4. Робота лага по дну. Швидкість 10,5 вузлів, хитавиця (2...3)°

Отже, дослідження показали, що експериментально визначені середньоквадратичні відхилення частоти  $\sigma_f^*$  на порядок менші середньоквадратичних відхилень частоти  $\sigma_f$ , розрахованих за теоретичною формулою (3). Це означає, що математична модель доплерівського сигналу, з якої отримана формула (3), потребує певного уточнення. Воно полягає у тому, що математичну формулу слід обов'язково наповнювати фізичним змістом. У цьому випадку йдеться про те, що у межах тривалості луносигналу існують ділянки, які можна розглядати як амплітудно-модульований сигнал з практично незмінною несучою частотою. Отримані результати характеризують незначні флуктуації «осьової» (несучої) частоти доплерівського сигналу саме на таких ділянках доплерівського сигналу і саме ці ділянки визначаються у кінцевому вигляді значенням швидкості носія.

### Висновки

1. Проаналізовано математичну модель доплерівського луносигналу і показано, що його миттєва частота визначається «осьовою» частотою та додатковою частотою, що є функцією синфазної  $A_s(t)$  та квадратурної  $B_s(t)$  амплітуд комплексної обвідної доплерівського сигналу.

2. Показано, що комплексна обвідна — це результат інтерференції великої кількості парціальних луносигналів, які є результатом розсіювання сигналу елементарними площадками у межах озвученої ділянки дна. Зміна кількості та амплітуд парціальних імпульсів приводить до зміни значень і поведінки складових комплексної обвідної.

3. Показано на основі результатів експериментальних досліджень, що флуктуації «осьової» частоти доплерівського сигналу, яка безпосередньо визначається швидкістю носія, є незначними. Середньоквадратичні відхилення несучої частоти доплерівського сигналу на визначальних ділянках лежать у межах 1 Гц. Це створює передумови для високої потенційної точності визначення складових вектора швидкості.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] А. П. Мартынюк, «Дискретная модель эхо-сигнала доплеровского лага», *Гідроакустичний журнал. Проблеми, методи та засоби досліджень Світового океану*, № 8, с. 45-57, 2011.
- [2] К. П. Львов и П. И. Малеев, «Возможные пути совершенствования малогабаритных доплеровских лагов», *Навигация и гидрография*, № 26, с. 21-29, 2008.
- [3] С. Т. Барась, и О. В. Онишук, «Предварительная обработка и измерение частоты эхо-сигналов доплеровского лага», *Гідроакустичний журнал. Проблеми, методи та засоби досліджень Світового океану*, № 8, с. 35-44, 2011.
- [4] А. А. Горшков, «Стенд для испытания доплеровского гидроакустического лага», на 65-й *Международной молодежной научно-технической конференции «Молодежь. Наука. Инновации»*, Владивосток, 2017, с. 21-25.
- [5] B. Zhao, M. Blanke, and R. Skjetne, "Particle Filter ROV Navigation using Hydroacoustic Position and Speed Log Measurements," in *Proceedings of the American Control Conference*, 2012, pp. 6209-6215.
- [6] В. И. Бородин, Г. Е. Смирнов, Н. А. Толстяков, и Г. В. Яковлев, *Гідроакустические навигационные средства*. Ленинград: Судостроение, 1983.
- [7] С. И. Баскаков, *Радиотехнические цепи и сигналы*. Москва: Высшая школа, 1988, 448 с.
- [8] С. Т. Барась, *Прикладні аспекти побудови гідроакустичних доплерівських лагів*. Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008, 241 с.
- [9] С. Т. Барась, «Методика експериментальних досліджень флуктуацій частоти доплерівського сигналу гідроакустичного лага в реальних умовах плавання», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 4, с. 105-109, 2003.

Рекомендована кафедрою телекомунікаційних систем та телебачення ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 28.05.2019

**Барась Святослав Тадіонович** — канд. техн. наук, доцент, професор кафедри телекомунікаційних систем та телебачення, e-mail: barasst03@gmail.com ;

**Войцеховська Олена Валеріївна** — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри телекомунікаційних систем та телебачення, e-mail: vojcehovska.o.v@vntu.edu.ua ;

**Щербатюк Ганна Миколаївна** — інженер факультету інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем. Вінницький національний технічний університет, Вінниця

S. T. Baras<sup>1</sup>  
 O. V. Voitsekhovska<sup>1</sup>  
 H. M. Shcherbatiuk<sup>1</sup>

## Frequency Fluctuations of the Doppler Signal

<sup>1</sup>Vinnitsia National Technical University

*An estimate of the fluctuations in the frequency of filling the Doppler signal is an important task in the context of determining the components of the velocity vector of a carrier by a hydroacoustic log.*

*The mathematical model of the Doppler echo signal is analyzed from the point of view of the mechanism of its formation. The dominant influence on its carrier frequency of the partial signal corresponding to the axis of the antenna's radiation pattern is substantiated. It is shown that in addition to the axial partial echo signal with high level, there are side partial echoes with different from "axial" frequencies, which, together with the axial partial echo signal, form the final Doppler echo signal arriving at the entrance to the receiver of the Doppler lag.*

*The results of experimental studies of Doppler signals are presented in the paper. They testify to the low level of fluctuations of Doppler frequency shifts, which creates prerequisites for a high potential accuracy of determining the components of the velocity vector of carrier. It is shown that the fluctuations of the carrier frequency of the Doppler echo signal, which directly determines the carrier velocity, are negligible. The results of the processing of the frequency arrays obtained during the operation of the lag with the bottom signals in the form of the mean square values of the fluctuations of the frequency of the Doppler signal are given. They show that the carrier frequency of the Doppler signal is quite stable not only within the echo, but also over the entire range of measurements. Graphical dependences of Doppler shifts on different rays of a Janus configuration are also presented. They allow us to estimate the results of measurements of frequency and its fluctuations in the Doppler signal at a qualitative level. The rather low errors of the measurement of Doppler frequency shifts, which were obtained at the same time, characterize the high metrological characteristics of the Doppler logs.*

**Keywords:** Doppler signal, mathematical model, frequency fluctuations, experiment.

**Baras Sviatoslav T.** — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Professor of the Chair of Telecommunication Systems and Television, e-mail: barasst03@gmail.com ;

**Voitsekhovska Olena V.** — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Telecommunication Systems and Television, e-mail: vojcehovska.o.v@vntu.edu.ua ;

**Shcherbatiuk Hanna M.** — Engineer of the Department of Information Communications, Radio Electronics and Nanosystems

C. T. Барась<sup>1</sup>  
 Е. В. Войцеховская<sup>1</sup>  
 А. Н. Щербатюк<sup>1</sup>

## Флуктуации частоты доплеровского сигнала

<sup>1</sup>Винницкий национальный технический университет

*Оценка флуктуаций частоты заполнения доплеровского сигнала является важной задачей в контексте определения составляющих вектора скорости носителя гидроакустическим лагом.*

*Проанализирована математическая модель доплеровского эхосигнала с точки зрения механизма его формирования, а также обосновано преобладающее влияние на его несущую частоту парциального сигнала, соответствующего оси характеристики направленности антенны. Показано, что кроме осевого парциального эхосигнала с высоким уровнем, имеют место боковые парциальные эхосигналы с отличными от «осевой» частотами, которые вместе с осевым парциальным эхосигналом формируют окончательный доплеровский эхосигнал, поступающий на вход приемного тракта доплеровского лага.*

*Приведены результаты экспериментальных исследований доплеровских сигналов, свидетельствующие о низком уровне флуктуаций доплеровских сдвигов частоты, что создает предпосылки для высокой потенциальной точности определения составляющих вектора скорости носителя. Показано, что флуктуации несущей частоты доплеровского эхосигнала, непосредственно определяющей скоростью носителя, незначительны. Приведены результаты обработки массивов частот, полученных в период работы лага с донными сигналами в виде среднеквадратических значений флуктуаций частоты доплеровского сигнала. Они показывают, что несущая частота доплеровского сигнала достаточно стабильна не только в пределах эхосигнала, но и на всем интервале проведенных измерений. Представлены графические зависимости доплеровских сдвигов по разным лучам янусной характеристики, которые позволяют оценить результаты измерений частоты и ее флуктуаций в доплеровском сигнале на качественном уровне. Полученные при этом достаточно низкие погрешности измерения доплеровских сдвигов частоты характеризуют высокие метрологические характеристики доплеровских лагов.*

**Ключевые слова:** доплеровский сигнал, математическая модель, флуктуации частоты, эксперимент.

**Барась Святослав Тاديонович** — канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры телекоммуникационных систем и телевидения, e-mail: barasst03@gmail.com ;

**Войцеховская Елена Валериевна** — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры телекоммуникационных систем и телевидения, e-mail: vojcehovska.o.v@vntu.edu.ua ;

**Щербатюк Анна Николаевна** — инженер факультета инфокоммуникаций, радиоэлектроники и наносистем