

УДК 681.883.41

## ПОХИБКИ ВИМІРЮВАННЯ ЧАСТОТИ ЗАПОВНЕННЯ ЕХО-СИГНАЛІВ ДОПЛЕРІВСЬКОГО ЛАГА

© С.Т. Барась, О.В. Онищук, А.І. Войтенко, 2008

Вінницький національний технічний університет

Розглянуто похибки вимірювання доплерівських зсувів частоти в ехо-сигналах гідроакустичного лага. Виділені джерела випадкової складової похибки, отримані аналітичні залежності для середньоквадратичних значень флуктуацій частоти, а також інструментальної похибки. Виконаний аналіз складових і результуючої похибок вимірювань, наведені графічні залежності, а також результати розрахунків похибок по фізичних моделях доплерівських сигналів у порівнянні з теоретичними даними. Показана ефективність використання методу часової фрагментації при вимірюванні частоти та сформульовані підходи щодо досягнення мінімальної похибки шляхом оптимізації тривалості вимірювальних інтервалів.

Рассмотрены погрешности измерения доплеровских сдвигов частоты в эхо-сигналах гидроакустического лага. Выделены источники случайной составляющей погрешности, получены аналитические зависимости для среднеквадратических значений флуктуаций частоты, а также инструментальной погрешности. Выполнен анализ составляющих и результирующей погрешностей измерений, приведены графические зависимости, а также результаты расчетов погрешностей по физическим моделям доплеровских сигналов в сравнении с теоретическими данными. Показана эффективность использования метода временной фрагментации при измерении частоты и сформулированы подходы по достижению минимальной погрешности путем оптимизации длительности измерительных интервалов.

Errors in measuring Doppler frequency shifts in echo-signals of an acoustic log have been considered. The sources of the random error component have been discriminated and analytical dependences for the root mean square values of frequency fluctuations have been obtained as well as the instrumental error. Constituents and resultant errors of measurements have been analyzed and the curves have been adduced, besides, the computational results of errors in the physical analogues of Doppler signals in comparison with the theoretical data have been presented. The efficiency of the temporal fragmentation method in measuring frequency has been demonstrated and the approaches in attaining minimal errors by means of optimization of measuring intervals duration have been formulated.

## ДОПЛЕРІВСЬКИЙ ЕХО-СИГНАЛ, ПОХИБКА ВИМІРЮВАННЯ, ФЛУКТУАЦІЇ ЧАСТОТИ, ЛАГ, СТРОБУВАННЯ

Похибки вимірювання частоти заповнення доплерівських ехо-сигналів, що виникають при роботі лага в реальних умовах експлуатації, можуть бути традиційно поділені на випадкові та систематичні.

Систематичні похибки виникають внаслідок дії хитавиці (статичних кренів та диферентів), через відмінність фактичної швидкості ультразвуку в зоні розташування антен лага від прийнятої при їх проектуванні, через деформацію спектру доплерівського ехо-сигналу при роботі в умовах „глибокого моря”, а також внаслідок специфічних впливів параметрів апаратури [1]. Функціональні залежності, які описують систематичні похибки, в основному відомі [2, 3], тому в процесі експлуатації доплерівського лага вони можуть повністю або частково компенсуватися. Саме так, наприклад, компенсується похибка, яка виникає внаслідок неточного значення (зокрема, нестабільності) опорної частоти при використанні модифікованого методу підрахунку нулів. Вимірювання частоти заповнення у сигналах протилежних променів янусної характеристики спрямованості у цьому випадку

дають рівні за величиною та знаком похибки, що викликає їх практично повну взаємну компенсацію при визначенні сумарного доплерівського зсуву.

Дана робота присвячена аналізу випадкової складової похибки вимірювання частоти заповнення ехо-сигналів доплерівського лага. Саме ця складова похибки вважається визначальною з точки зору забезпечення необхідної точності вимірювань складових вектора швидкості носія і саме її значення характеризує потенційні можливості доплерівського лага. Перш ніж перейти до аналізу зазначеної складової похибки, зробимо певні пояснення.

По-перше, зазначимо, що аналіз стосуватиметься розробленого методу часової фрагментації доплерівського ехо-сигналу [4]. Цей метод передбачає використання адаптації порогів стробування ехо-сигналу і проведення вимірювань частоти заповнення лише в певних його фрагментах.

По-друге, будемо спиратися на раніше визначену класифікацію джерел випадкової похибки вимірювання частоти. Відповідно до цієї класифікації складовими випадкової похибки вимірювання доплерівських зсувів частоти є флуктуації частоти заповнення доплерівського ехо-сигналу, зумовлені його природою (процесом формування сигналів, шумами середовища і апаратури лага тощо), а також випадкова складова інструментальної похибки методу вимірювання частоти заповнення ехо-сигналу. Саме на аналізі цих похибок і зосередимось.

### **Аналіз флуктуацій частоти заповнення доплерівських ехо-сигналів**

В результаті експериментальних та теоретичних досліджень основних параметрів ехо-сигналів доплерівського лага встановлено, що частота заповнення змінюється фрагментарно протягом тривалості їх існування. Ці зміни зумовлені безпосередньою природою ехо-сигналів, тобто особливостями формування та розповсюдження їх у водному середовищі. З точки зору вимірювання доплерівських зсувів частоти зазначені флуктуації, як уже зазначалось, є одним із джерел випадкової похибки.

Для зменшення впливу флуктуацій високочастотного заповнення ехо-сигналів на похибку вимірювання доплерівських зсувів частоти запропоновано метод часової фрагментації, який передбачає виконання процесу вимірювання в тих фрагментах ехо-сигналу, де амплітуда його обвідної приймає максимальні значення. Для виділення цих фрагментів необхідно виконати порогове стробування ехо-сигналу. Якщо амплітуда обвідної  $A(t)$  доплерівського ехо-сигналу змінюється від мінімального  $A_{min}$  до деякого максимального значення  $A_{max}$  по гармонійному закону з частотою  $F_{обв}$ , то значення порогу стробування може вибиратись в діапазоні від  $A_{min}$  до  $A_{max}$ . Нехай  $A_{min}=0$ , тоді значення порогу стробування відносно максимального значення обвідної буде змінюватись від нуля до одиниці:

$$C = \frac{A(t)}{A_{max}} = \frac{1 + \cos(\pi F_{обв} t)}{2}, \quad (1)$$

де  $C$  – відносне значення порогу стробування ехо-сигналу;

$A_{max}$  – максимальне значення амплітуди обвідної ехо-сигналу;

$F_{обв}$  – частота коливання обвідної ехо-сигналу.

Тоді згідно з методом часової фрагментації протягом одного періоду коливання обвідної можна виділити фрагмент, орієнтація і тривалість якого будуть залежати від значення порогу стробування  $C$ . На рис. 1 наведено графік, який відображає взаємозв'язок тривалості вимірювального інтервалу з відносним значенням порогу стробування  $C$ . З графіка видно, що із зменшенням відносного порогу  $C$  відбувається збільшення інтервалу вимірювання  $\tau_i$  і навпаки.

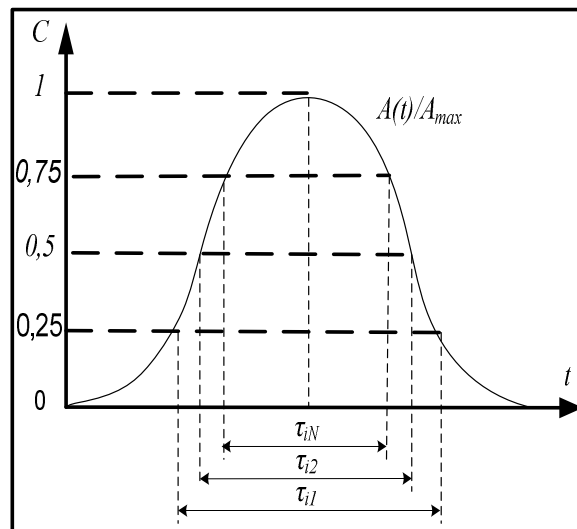


Рис. 1 – Зв'язок тривалості вимірювального інтервалу зі значенням порогового рівня стробування

При дослідженні методу часової фрагментації з використанням фізичних моделей доплерівських ехо-сигналів встановлено, що зміна порогу стробування впливає на рівень флуктуацій частоти заповнення, яка визначається в межах виділеного фрагменту. Таким чином, проаналізуємо залежність флуктуацій частоти доплерівського ехо-сигналу від значення відносного порогу стробування. Для цього скористаємось математичною моделлю ехо-сигналу [5], на основі якої були виявлені закони зміни основних параметрів доплерівських ехо-сигналів і був запропонований метод часової фрагментації при вимірюванні частоти.

Згідно з математичною моделлю частотний склад доплерівського ехо-сигналу визначається виразом:

$$f_{\Sigma} = f_0 \frac{1 + \frac{V}{c} \cos \alpha_0}{1 - \frac{V}{c} \cos \alpha_0} + F_d \sin \alpha_0 \sin \frac{\gamma}{2} \frac{|A_1^2 - A_m^2|}{A^2(t)}, \quad (2)$$

де  $A_1$ ,  $A_m$  – амплітуди парціальних ехо-сигналів, які визначають межі ширини характеристики спрямованості антени лага;

$\gamma$  – кут між парціальними ехо-сигналами, який дорівнює ширині характеристики спрямованості антени.

З виразу (2) видно, що частотний склад доплерівського ехо-сигналу характеризується двома частотними компонентами.

Одна частотна компонента, яка визначається першим доданком виразу (2), має близький до фіксованого значення вигляд. Різниця між значенням цієї частоти та робочою частотою лага дорівнює доплерівському зсуву частоти. Важливо також зазначити, що частота, яка визначається цим доданком, відповідає центральній осі характеристики спрямованості антени лага, тобто є найбільш адекватною швидкості руху об'єкту плавання. Очевидно, точність визначення положення першої компоненти на частотній осі найбільш впливає на точність визначення доплерівським лагом складових вектора швидкості об'єкту плавання.

Друга частотна компонента спектру доплерівського сигналу, що визначається другим доданком виразу (2), має змінне в часі значення, яке залежить від абсолютних значень доплерівського зсуву частоти, швидкості об'єкту плавання, кутів характеристики спрямованості лага, амплітуд парціальних ехо-сигналів, які приймають участь у формуванні даного сигналу, а також амплітуди обвідної ехо-сигналу в цілому. Проаналізуємо цю компоненту більш детально.

Насамперед зазначимо, що значення другої компоненти набагато менше від значення першої, оскільки у її складі відсутня робоча частота лага.

Знак другої частотної компоненти залежить від співвідношення між амплітудами парціальних ехо-сигналів, які формують доплерівський ехо-сигнал. Згідно з методом феноменологічного моделювання, який покладено в основу моделі доплерівського ехо-сигналу, через кінцеву ширину характеристики спрямованості та дифузний характер розсіюючої поверхні дна, амплітуди парціальних ехо-сигналів будуть мати відносно близькі але відмінні значення. Якщо мати на увазі, що значення миттєвих амплітуд парціальних ехо-сигналів є випадковими (релеєвський закон розподілу), то знак другого доданку виразу (2) буде змінюватись за випадковим законом.

Зрештою, зміна в часі амплітуди обвідної ехо-сигналу, квадрат якої знаходиться в знаменнику другого доданку виразу (2), змінює значення другої частотної компоненти ехо-сигналу в часі. Очевидно, діапазон цих змін буде залежати від глибини амплітудної модуляції ехо-сигналу, і в цілому буде визначати певну смугу частот.

Отже, частотна компонента, яка визначається другим доданком виразу (2), приймає випадкові значення, діапазон змін яких визначається глибиною амплітудної модуляції доплерівського ехо-сигналу та відношенням між амплітудами парціальних ехо-сигналів, які формують даний сигнал. Очевидно, такий характер другої частотної компоненти буде ускладнювати процес визначення положення першої частотної компоненти на частотній осі.

Вплив другої частотної компоненти виражається у тому, що її значення змінюється випадковим чином у межах певної смуги частот. З точки зору вимірювання частоти заповнення ехо-сигналу друга частотна компонента вносить неоднозначність у процес вимірювання і характеризує можливі межі зміни флуктуацій частоти ехо-сигналу.

Враховуючи діапазон можливих змін значень другої частотної компоненти, який фактично дорівнює ширині спектру доплерівського ехо-сигналу, а також випадковість відносних значень амплітуд парціальних ехо-сигналів, які впливають на значення другої компоненти в цілому, будемо в подальшому спиратись на нормальний закон розподілу миттєвих значень частоти з математичним очікуванням, значення якого визначається першою компонентою (2). У зв'язку з цим другий доданок виразу (2) можна використати в якості моделі, яка характеризує середньоквадратичні значення флуктуацій частоти заповнення доплерівського ехо-сигналу. Отже, представимо другий доданок виразу (2) у такому вигляді:

$$\sigma_{\phi_1} = F_D \cdot \sin \alpha_0 \cdot \sin \frac{\gamma}{2} \cdot \frac{1 - M^2}{M^2 + 2M \cos(2\pi F_{обс} t) + 1}, \quad (3)$$

де  $M$  – глибина амплітудної модуляції доплерівського ехо-сигналу.

З виразу (3), зокрема, видно, що середньоквадратичне значення флуктуацій частоти зменшується із збільшенням амплітуди обвідної (тобто збільшенням  $M$ ). З фізичної точки зору це означає, що високочастотне заповнення в інтервальних фрагментах доплерівського ехо-сигналу, які відповідають максимальним значенням амплітуди обвідної, характеризується мінімальними флуктуаціями частоти.

З виразів (1) та (3) знайдемо:

$$\sigma_{\phi_1} = F_D \cdot \sin \alpha_0 \cdot \sin \frac{\gamma}{2} \cdot \frac{1 - M^2}{M^2 + 2M(2C - 1) + 1}. \quad (4)$$

За допомогою виразу (4) розглянемо динаміку зміни середньоквадратичних значень флуктуацій частоти ехо-сигналу при різних значеннях глибини амплітудної модуляції та змінних значеннях відносного порогу протягом півперіоду коливання його обвідної.

На рис. 2 наведено просторовий графік, на якому по осі абсцис відкладено середньоквадратичні значення флуктуацій частоти ехо-сигналу, по осі ординат – значення відносного порогу стробування ехо-сигналу, по осі абсцис – значення глибини амплітудної модуляції ехо-сигналу. З цього графіка видно, що значення флуктуацій частоти доплерівського ехо-сигналу, зумовлені його природою, змінюються в широкому діапазоні від одиниць до десятків герц.

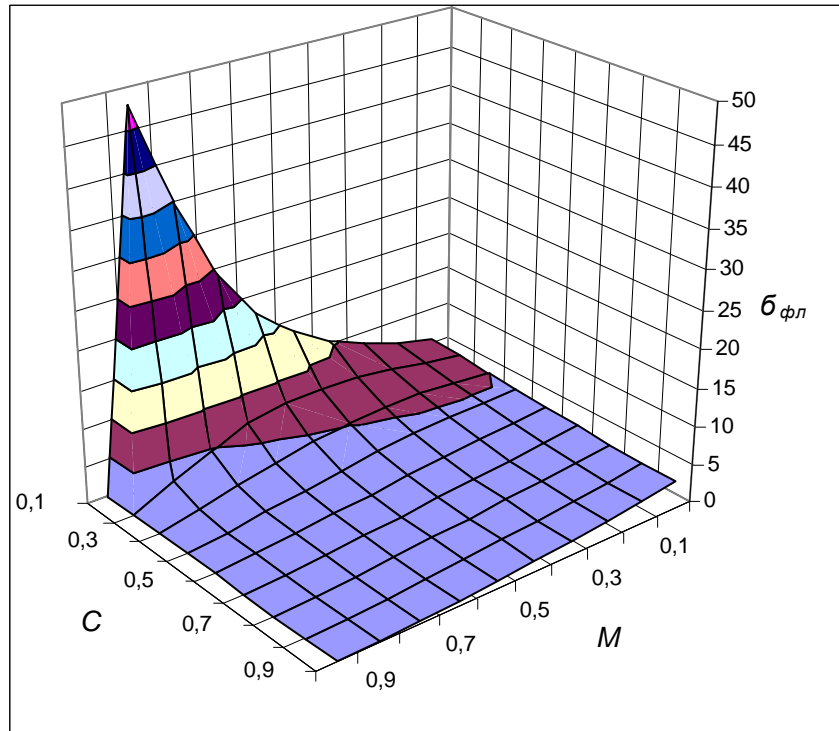


Рис. 2 – Динаміка змін середньоквадратичних значень флуктуацій частоти заповнення доплерівського ехо-сигналу

На просторовому графіку можна виділити дві домінуючі зони. У дальній лівій зоні графіку, яка відповідає меншим значенням відносного порогу стробування та малим значенням глибини амплітудної модуляції, спостерігається різке збільшення середньоквадратичних значень флуктуацій частоти до десятків герц. У зоні, яка знаходиться в ближній правій частині графіку, і яка відповідає більшим значенням амплітуди обвідної ехо-сигналу та більшим значенням відносного порогу стробування, спостерігається зменшення флуктуацій частоти до одиниць герц. Таким чином, графік на рис. 2 відображає характер і закони зміни флуктуацій частоти, значення яких залежать від порогу стробування доплерівського ехо-сигналу. Отже, правильне використання методу часової фрагментації може забезпечити зменшення середньоквадратичних значень флуктуацій частоти заповнення доплерівського ехо-сигналу до одиниць герц.

На завершення установимо граничні середньоквадратичні значення, які може приймати вираз (4). Максимальні значення флуктуацій будуть мати місце у тому випадку, коли вимірювальний фрагмент охоплює весь сигнал, тобто відносно значення порогу стробування дорівнює нулю. Тоді останній множник виразу (4) стає рівним одиниці і у цілому вираз (4) приймає вигляд, яким тривалий час користувалися для визначення потенційної точності вимірювання доплерівських зсувів частоти. Можна стверджувати, що така формула віддзеркалювала рівень флуктуацій частоти у межах всього ехо-сигналу, включаючи і фрагменти з мінімальними значеннями обвідної.

Очевидно, мінімальне значення флуктуацій можна отримати у тому випадку, коли знаменник виразу (4) приймає максимальне значення, тобто відносне значення порогу стробування дорівнює або близьке одиниці, тоді:

$$\sigma_{\text{флmin}} = F_{\text{д}} \cdot \frac{\gamma^3}{8 \cdot \text{tg} \alpha_0}. \quad (5)$$

Розрахунки, виконані за допомогою (4), показують, що середньоквадратичні флуктуації частоти ехо-сигналу можуть бути зменшені до десятих і сотих долей герца, якщо застосовувати метод часової фрагментації доплерівського ехо-сигналу. Формула (4) може бути використана для визначення потенційної точності вимірювання частоти заповнення ехо-сигналів доплерівського лагу.

#### **Аналіз інструментальної похибки модифікованого методу підрахунку нулів**

В якості методу вимірювання частоти у виділених фрагментах доплерівського ехо-сигналу зручно використовувати модифікований метод підрахунку нулів вхідної частоти  $f$  [4]. Для його реалізації виділяється часовий інтервал  $\tau_i$ , який визначається цілим числом періодів  $n_i$  вимірювального сигналу:

$$\tau_i = n_i \cdot T_i = \frac{n_i}{f}. \quad (6)$$

Цей інтервал «заповнюється» імпульсами еталонної частоти  $f_{em}$ , яка вибирається якомога більшою по відношенню до вхідної частоти  $f$ . Не важко впевнитись, що у цьому випадку частота вхідного сигналу визначається за формулою:

$$f' = \frac{n_i}{n_e \cdot T_{em}} = \frac{n_i}{n_e} f_{em}, \quad (7)$$

де  $f'$  – несуча частота вхідного сигналу, що є результатом вимірювання (на відміну від дійсної частоти  $f$ );

$n_e$  – кількість періодів еталонної частоти у межах часового інтервалу  $\tau_i$ .

Зазначимо, що тривалість інтервалу, у якому вимірюється частота, буде мати дещо інше значення, оскільки його фактична тривалість визначається цілим числом періодів еталонної частоти:

$$\tau'_i = n_e \cdot T_{em} = \frac{n_e}{f_{em}}. \quad (8)$$

Очевидно, що в загальному випадку похибка вимірювання частоти з використанням даного методу виникає через відмінність між вимірним інтервалом  $\tau_i$  та його точним значенням  $\tau_i$ . Причини вказаної відмінності різні: похибка дискретності, яка є результатом некогерентності сигналів вхідної несучої частоти та еталонної частоти, похибки перетворення синусоїди в меандр, флуктуації фронтів меандру через дію шумів тощо. Отже, можна записати:

$$n_e \cdot T_{em} = n_n \cdot T_n \pm \Delta t, \quad (9)$$

де  $\Delta t$  – похибка у визначенні істинної тривалості інтервалу вимірювання.

Тоді вираз (7) з урахуванням (9) буде мати такий вигляд:

$$f' = \frac{n_i}{\ddot{i}_i \cdot \dot{O}_i \pm \Delta t}. \quad (10)$$

Абсолютну похибку вимірювання частоти можна знайти як різницю між істинним значенням частоти  $f$  (7) та вимірним  $f'$  (10):

$$\Delta f = f - f' = \frac{1}{T_i} - \frac{n_i}{n_i \dot{O}_i \pm \Delta t} = f \left( 1 - \frac{n_i \dot{O}_i}{n_i \dot{O}_i \pm \Delta t} \right). \quad (11)$$

Використавши вираз (6) і перейшовши до середньоквадратичних значень похибок вимірювання інтервалу вимірювання  $\sigma_i$  та частоти  $\sigma_{in}$ , отримаємо остаточний вираз для середньоквадратичної похибки вимірювання частоти модифікованим методом підрахунку періодів:

$$\sigma_{ii} = f \cdot \left( 1 - \frac{\tau_s}{\tau_s + \sigma_i} \right). \quad (12)$$

Як показано в [6], середньоквадратичне значення флуктуацій тривалості інтервалу вимірювання  $\sigma_i$  для випадку модифікованого методу підрахунку періодів частоти доплерівського ехо-сигналу з урахуванням некорельованості флуктуацій вхідної частоти та частоти еталонного генератора описується формулою:

$$\sigma_i = \frac{1}{3} \sqrt{\frac{3}{2(1+a_c)^2} \cdot f^2 + T_{em}^2}, \quad (13)$$

де  $a_c$  – співвідношення сигнал/шум.



Підставивши (13) у (12), отримаємо остаточну формулу для середньоквадратичної похибки вимірювання несучої частоти імпульсного сигналу методом підрахунку періодів в умовах дії шумів:

$$\sigma_{in} = f \cdot \left\{ 1 - \frac{\tau_i}{\tau_i + \frac{1}{3} \sqrt{\frac{3}{2} [f(1+a_c)]^{-2} + T_{em}^2}} \right\}. \quad (14)$$

З формули (14) видно, що інструментальна середньоквадратична похибка вимірювання частоти ехо-сигналу залежить від тривалості вимірювального інтервалу та відношення сигнал/шум.

Відповідно до методу часової фрагментації, тривалість вимірювального фрагменту залежить від порогу стробування. З (1) знайдемо:

$$\tau_i(C) = \frac{\arccos(2C-1)}{\pi F_{обв}}. \quad (15)$$

Графічне зображення формули (15) наведено на рис. 3.

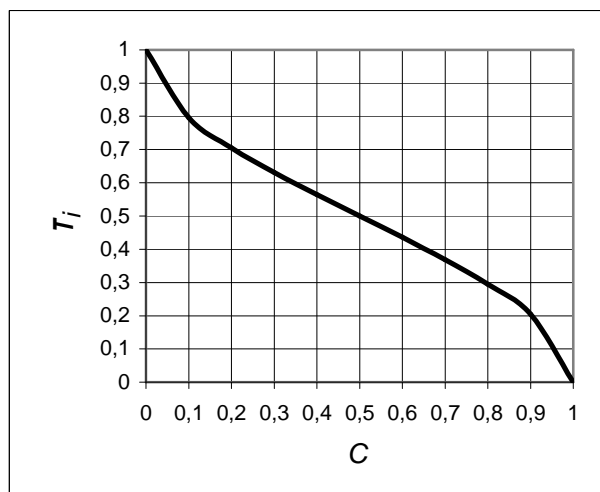


Рис. 3 – Залежність тривалості вимірювального інтервалу від рівня порогу стробування

З нього видно, що тривалість вимірювального інтервалу залежить від відносного значення порогу стробування, причому протягом основної (середньої) частини цього графіку зберігається майже лінійна залежність тривалості вимірювального інтервалу від значення порогу стробування. Лише в крайніх зонах відбувається порушення їх взаємної лінійності. Підставимо (15) в (14) і отримаємо:

$$\sigma_{in}(C, a_c) = f - f \frac{\arccos(2C-1)}{\pi F_{обв}} \frac{\pi F_{обв}}{\arccos(2C-1) + \frac{1}{3} \sqrt{\frac{3}{2} [f(1+a_c)]^2 + T_{em}^2}}. \quad (16)$$

Отриману залежність (16) відображає просторовий графік, рис. 4. На ньому по осі аплікату відкладено значення інструментальної середньоквадратичної похибки вимірювання частоти ехо-сигналу, по осі абсцис – відносне значення порогу стробування доплерівського ехо-сигналу, по осі ординат – відношення сигнал/шум.

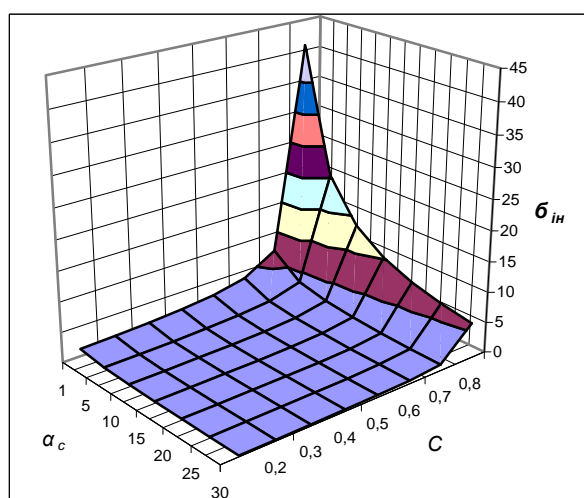


Рис. 4 – Динаміка зміни інструментальної похибки вимірювання частоти ехо-сигналу

З цього графіку видно, що одночасне зменшення тривалості вимірювального інтервалу та відношення сигнал/шум призводить до збільшення інструментальної похибки до десятків герц. Ситуація покращується, якщо збільшувати значення одного з зазначених параметрів. При цьому відбувається зменшення інструментальної похибки до одиниць герц. Найсприятливіші умови для вимірювання частоти зазначеним методом спостерігаються при перевищенні відношення сигнал/шум п'яти та використанні інтервальних вимірювальних фрагментів більших 10 мс. При цьому інструментальна середньоквадратична похибка вимірювання частоти ехо-сигналу складає десяті долі герца.

Формула (16) дає теоретичну оцінку похибки вимірювання частоти заповнення фрагменту радіосигналу модифікованим методом підрахунку нулів в умовах дії шумів. У зв'язку з цим доцільним буде навести розрахункові значення, виконані за цією формулою, а також експериментальні дані вимірювань частоти імпульсного радіосигналу при різних значеннях його тривалості і різних відношеннях сигнал/шум.

Для отримання експериментальних даних в лабораторних умовах виконувались дослідження частоти заповнення радіоімпульсів, які мали несучу частоту 10 кГц. За допомогою генератора шуму створювались різні співвідношення сигнал/шум. Відносні

значення порогу стробування вибирались такими, що інтервал вимірювання приймав значення 10 і 100 мс. Вимірювачі частоти працювали з кварцовим еталонним генератором на 10 МГц, тобто  $T_{eq}=0,1$  мкс. Результати розрахунків та експериментальних даних наведені в табл. 1.

Таблиця 1. Теоретичні і експериментальні результати вимірювання частоти імпульсного ехо-сигналу в умовах дії завад модифікованим методом підрахунку нулів

$a_c$	1		5		10		20	
$\tau_i, \text{мс}$	10	100	10	100	10	100	10	100
$\sigma_{in}, \text{Гц}$ (ф-ла 16)	20,4	2,0	6,8	0,68	3,7	0,37	1,9	0,19
$\sigma'_f, \text{Гц}$ (експеримент)	21,0	2,2	7,0	0,8	4,0	0,4	1,9	0,2

Аналізуючи дані, наведені в табл. 1, слід зазначити досить хороший збіг експериментальних даних з результатами розрахунків за формулою (16).

### Визначення результуючої випадкової похибки

Враховуючи відсутність кореляції між частотними флуктуаціями та інструментальною похибкою, результуючу випадкову похибку вимірювання частоти заповнення доплерівського ехо-сигналу знайдемо за правилом векторного додавання зазначених похибок [7]:

$$\sigma_f(C, M, a_c) = \sqrt{\sigma_{\text{фл}}^2(C, M) + \sigma_{\text{ін}}^2(C, a_c)}. \quad (17)$$

З виразу (17) видно, що результуюча середньоквадратична похибка залежить від значення порогу стробування ехо-сигналу, відношення сигнал/шум, глибини амплітудної модуляції ехо-сигналу. В реальних умовах плавання глибина амплітудної модуляції ехо-сигналів може сягати одиниці, тому тривалість інтервалу вимірювання та відношення сигнал/шум можуть змінюватися в широких межах. З цих причин проаналізуємо значення результуючої похибки вимірювання частоти доплерівського сигналу при різних значеннях відносного порогу стробування та різних значеннях співвідношення сигнал/шум.

З використанням виразів (17), (16) та (4) отримаємо аналітичний вираз для результуючої похибки:

$$\sigma_f(C, M, a_c) = \left\{ F_D \cdot \sin \alpha_0 \cdot \sin \left( \frac{\gamma}{2} \right) \cdot \frac{1 - M^2}{M^2 + M[2C - 1] + 1} \right\}^2 + \left\{ f - f \frac{\arccos(2C - 1) / (\pi F_{обс})}{\arccos(2C - 1) / (\pi F_{обс}) + \frac{1}{3} \sqrt{\frac{3}{2}} [f(1 + a_c)]^{-2} + T_{em}^2}} \right\}^2 \quad (18)$$

Розглянемо графічну залежність результуючої середньоквадратичної похибки вимірювання частоти при різних відношеннях сигнал/шум та при різних значеннях порогу стробування доплерівського ехо-сигналу, отриману за допомогою формули (18) і наведену на рис. 5.

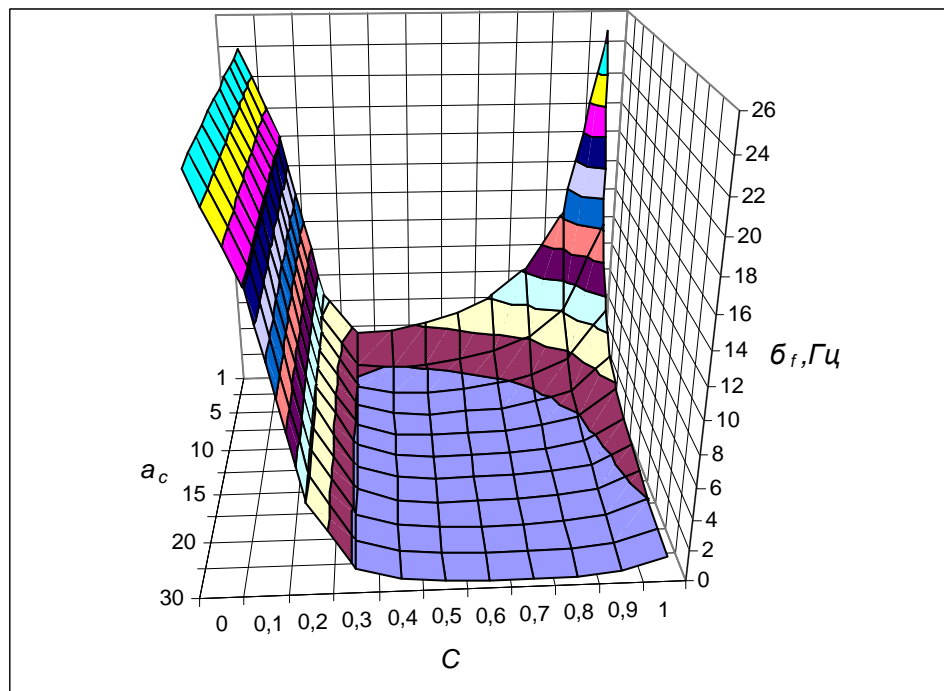


Рис.5 – Динаміка зміни результуючої середньоквадратичної похибки вимірювання частоти ехо-сигналу доплерівського лага

З наведеного графіка видно, що із зменшенням відношення сигнал/шум та із збільшенням відносного порогу стробування, що супроводжується зменшенням інтервалу вимірювання, збільшується вплив інструментальної складової на результуючу похибку вимірювання частоти. При цьому у дальній правій частині просторового графіку значення результуючої похибки вимірювання частоти доплерівського ехо-сигналу сягають десятків герц, а флуктуації частоти заповнення ехо-сигналу майже відсутні, оскільки процес вимірювання відбувається у коротких інтервальних фрагментах, які відповідають максимальним значенням амплітуди обвідної доплерівського ехо-сигналу.

Із зменшенням відносного порогу стробування зменшується вклад інструментальної складової похибки вимірювання частоти, але збільшуються власні флуктуації частоти доплерівського ехо-сигналу, що призводить до зростання результуючої похибки до десятків герц у лівій частині просторового графіку, рис. 5. Очевидно, із зменшенням значення відносного порогу стробування інтервальні фрагменти захоплюють ті зони ехо-сигналу, які відповідають мінімальним значенням обвідної, що призводить до збільшення флуктуацій частоти.

З проведеного аналізу зрозуміло, що для досягнення найвищої точності вимірювання частоти необхідно забезпечити компроміс, який полягає в одночасному зменшенні обох складових результуючої похибки вимірювання частоти заповнення доплерівського ехо-сигналу. Цього можна досягти шляхом встановлення оптимального з точки зору похибки вимірювання частоти значення відносного порогу стробування. З просторового графіку, наведеного на рис. 5, видно, що мінімальне значення результуючої похибки спостерігається у центральній зоні цього графіку за умови, що відносно значення порогу стробування змінюється від 0,4 до 0,8, а відношення сигнал/шум приймає значення більше 5. При цьому значення результуючої середньоквадратичної похибки вимірювання частоти доплерівського ехо-сигналу методом часової фрагментації та модифікованим методом підрахунку нулів складає одиниці герц.

### **Оцінювання теоретичних та експериментальних похибок вимірювання частоти заповнення доплерівських ехо-сигналів**

Наведені рекомендації щодо забезпечення точного вимірювання частоти були апробовані на фізичних моделях доплерівських ехо-сигналів, які за своєю структурою є адекватними реальним доплерівським сигналам [5]. Виконаємо відповідні вимірювання та порівняємо їх з результатами натурних досліджень та розрахунками, виконаними за теоретичними формулами.

Таким чином, до фізичних моделей доплерівських ехо-сигналів, отриманих після дії шумів та слідкуючої вузькосмугової фільтрації, був застосований метод часової фрагментації зі значенням порогу стробування, який вдвічі менший максимального значення обвідної [4, 8]. У виділених фрагментах виконувалося вимірювання частоти заповнення модифікованим методом підрахунку нулів. Результати вимірювання по декількох десятках ехо-сигналів заносились в спеціальний масив, який оброблявся з використанням методів статистичної обробки, наведених у роботі [9]. Результати розрахунків середньоквадратичної похибки вимірювання частоти  $\sigma'_f$  наведені в табл. 3.

Для порівняння в табл. 2 наведені розрахунки середньоквадратичної похибки вимірювання доплерівських зсувів частоти  $\sigma_f$  за формулою (18), а також експериментальні середньоквадратичні значення флуктуацій частоти заповнення реальних доплерівських ехо-сигналів  $\sigma_{екс}$ , отримані в натурних умовах плавання [10]. Розрахунки зазначених варіантів похибок наведені для декількох значень співвідношень сигнал/шум  $a_c$ , двох значень

тривалості імпульсів випромінювання  $\tau_{випр}$  та двох значень швидкості руху носія. Зробимо короткий коментар щодо табл. 2.

Таблиця 2. Теоретичні та експериментальні значення середньоквадратичних похибок вимірювання частоти доплерівських ехо-сигналів

$a_c$	$f_0 = 70000 \text{ Гц}, H = 27 \text{ м}, \tau_{випр} = 30 \text{ мс}, \tau_i = 10 \text{ мс}, V = 5 \text{ м/с}$			$f_0 = 70000 \text{ Гц}, H = 100-150 \text{ м}, \tau_{випр} = 100 \text{ мс}, \tau_i = 40 \text{ мс}, V = 7 \text{ м/с}$		
	$\sigma_f, \text{ Гц}$	$\sigma'_f, \text{ Гц}$	$\sigma_{фекс}, \text{ Гц}$	$\sigma_f, \text{ Гц}$	$\sigma'_f, \text{ Гц}$	$\sigma_{фекс}, \text{ Гц}$
5	2,6	2,83		0,75	0,82	
10	1,23	1,25		0,37	0,50	
20	0,65	0,66	1,1	0,19	0,31	0,9

Для забезпечення коректності порівняльного аналізу при виборі глибин та швидкостей об'єкта плавання виконувалася прив'язка до даних натурних досліджень [10]. По-друге, тривалості імпульсів випромінювання вибиралися відповідно до прийнятих глибин. По-третє, розрахунки середньоквадратичних значень похибок  $\sigma'_f, \sigma_{фекс}$  велися по масивах з 20-ти моделей та реальних доплерівських ехо-сигналів відповідно.

Аналіз результатів виконаних розрахунків показує, що метод часової фрагментації доплерівських ехо-сигналів та модифікований метод підрахунку нулів забезпечують зменшення похибки вимірювання частоти заповнення доплерівського ехо-сигналу до одиниць герц. Необхідно зазначити, що ці значення такого ж порядку, що і теоретично оцінені. Такі ж результати отримані і в процесі натурних випробувань, оскільки ці вимірювання проводилися також у межах всього інтервалу існування доплерівського ехо-сигналу.

Оцінки похибок вимірювання частоти, що отримані з використанням моделей доплерівських ехо-сигналів, виявилися достатньо близькими до теоретичних значень. З іншого боку, встановлена відповідність між середньоквадратичними значеннями похибок вимірювання частоти по реальних доплерівських ехо-сигналах та їх моделях.

Отже, рекомендації стосовно підвищення точності вимірювання частоти на основі часової фрагментації демонструють низьку (близьку до теоретичної) середньоквадратичну похибку вимірювання доплерівських зсувів.

Встановлено, що визначальною складовою похибки вимірювання частоти заповнення ехо-сигналу доплерівського лага є випадкова складова. Аналітичні дослідження показали, що її значення визначається власними флуктуаціями високочастотного заповнення ехо-сигналу, та інструментальною похибкою, яка в свою чергу залежить від низки чинників, зокрема, співвідношення сигнал/шум, абсолютного значення еталонної частоти, тривалості вимірювального інтервалу. Показано, що власні флуктуації високочастотного заповнення ехо-сигналу та інструментальна похибка залежать від значення порогу стробування ехо-сигналу, причому із збільшенням значення порогу інструментальна похибка збільшується, а

власні флуктуації частоти ехо-сигналу – зменшуються і навпаки. Існує оптимальне значення порогу фрагментації, при якому результуюча похибка вимірювання частоти заповнення ехо-сигналу приймає мінімальні значення, які становлять одиниці герц. Функціональні пристрої доплерівського лага повинні мати можливість реалізувати на практиці оптимізацію порогу стробування шляхом адаптації його значення до реальних ехо-сигналів.

## **Література**

1. Барась С.Т. Аналіз джерел похибки вимірювання складових вектора швидкості судна // Вісник ВПІ. – 2000. – №2. – С. 81 – 85.
2. Барась С.Т., Мартинюк А.П. Зменшення систематичної похибки вимірювання горизонтальних складових вектора швидкості носія доплерівським лагом // Вісник ВПІ. – 2007. – №6. – С. 11 – 15.
3. Корякин Ю.А., Смирнов С.А., Яковлев Г.В. Гидроакустика на рубеже столетий. Корабельная гидроакустическая техника. Состояние и актуальные проблемы. – Спб.: Наука, 2003. – 615 с.
4. Барась С.Т., Онищук О.В., Яблонський В.Ф. Використання фізичної моделі доплерівського сигналу для оцінки похибки вимірювання частоти його заповнення при часовій фрагментації // Вісник Хмельницького національного університету. – 2008. – №4 (113). – С.27-33.
5. Барась С.Т., Онищук О.В. Феноменологічна модель доплерівського сигналу гідроакустичного лага // Проблемы, методы и средства исследований Мирового океана: Сб. докладов второй международной научно-практической конференции / НАН Украины, Научно-технический центр панорамных акустических систем. R11; 2008. R11; Запорожье. R11; С.122-131.
6. Барась С.Т., Костюк О.А., Лободзінська Р. Ф. Оптимізація часової діаграми роботи гідроакустичного доплерівського лага.// МНТЖ ВОТТП – 2000. №2. – С.87 – 91.
7. Бурдун Г.Д., Марков Б.Н. Основы метрологии. – М.: Изд-во стандартов, 1972. – 318 с.
8. Вимірювач частоти гідроакустичного доплерівського лага / О.В.Онищук, С.Т.Барась. – А.с. №31064. Заявлено 19.11.2007. Опубліковано 25.03.2008. – Бюл. №6. – 2008.
9. Барась С.Т. Методика експериментальних досліджень флуктуацій частоти доплерівського сигналу гідроакустичного лага в реальних умовах плавання // Вісник ВПІ. – 2003. – №4. – С. 105-109.
10. Барась С.Т. Аналіз результатів експериментальних досліджень флуктуацій частоти доплерівського сигналу гідроакустичного лага в реальних умовах плавання // Вісник ВПІ. – 2003. – №5. – С. 81-85.