

## УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ ГЛИБИН В СИСТЕМІ МОНІТОРИНГУ ВОДНИХ ОБ'ЄКТІВ СУШІ

*Розглянуто новий спосіб вимірювання глибин водних об'єктів, заснований на методі імпульсної гідролокації, коли частота випромінюваних імпульсів змінюється таким чином, щоб результуюча частота відбитих від дна та випромінюваних імпульсів була подвоєною відносно частоти випромінюваних; при цьому результуюча частота поділяється навпіл і порівнюється з частотою випромінюваних імпульсів, фіксуючи співпадання цих частот.*

**Ключові слова:** моніторинг, вимірювання глибин водних об'єктів, імпульсна гідролокація.

**Вступ.** Вимірювання глибин водних об'єктів виконується різними методами, основі яких становить застосування ручних, механічних або акустичних приладів. До ручних приладів відносять рейку водомірну або нівелірну, гідрометричну штангу, ручний лот. Механічний метод передбачає застосування лота, що кріпиться до лебідки з відліковим пристроєм. На іншому кінці лота знаходиться гідрометричний тягар. При вимірюванні глибини тягар опускають за допомогою лебідки до поверхні води і виставляють лічильник глибин на нуль. Потім опускають тягар до дна і зчитують з лічильника глибину. Базовим методом для моніторингу водних об'єктів є ехолотний промір, що дозволяє вирішувати такі задачі:

- визначення глибин і характеру рельєфу дна водних об'єктів;
- побудови поздовжніх і поперечних профілів дна водних об'єктів;
- побудови плану русла річки або ложа водойми;
- картографування потужності придонних відкладів;
- виявлення затоплених об'єктів;
- вивчення геологічної будови ділянок водних переходів;
- визначення товщі льодяного покриву.

Принцип дії ехолота базується на визначенні глибин за інтервалом часу проходження ультразвукового імпульсу від випромінювача до дна водного об'єкта і в зворотному напрямку [1].

Тривалість розповсюдження звуку у воді визначається фазовим, частотним, імпульсним способами або їх поєднанням. Найбільш точним є фазовий спосіб, який припускає створення безперервних гармонійних коливань однієї частоти вздовж лінії від випромінювача до дна і в зворотному напрямку. Різниця фаз між випромінюваними (прямими) і прийнятими (відбитими) коливаннями пропорційна відстані, тобто глибині. Точність визначення відстаней у водному середовищі фазовим способом становить 2мм, але недоліком фазового способу є складність апаратури для виключення багатозначності, причиною якої є те, що для досягнення необхідної точності вимірювання глибини використовуються частоти, при яких різниця фаз вміщує в собі певне число періодів, яке фазометри визначити не можуть, оскільки вони дозволяють вимірювати різницю фаз тільки в межах одного періоду [2].

Сутність частотного способу полягає в тому, що випромінювачем посиляється сигнал, модульований за частотою, яка лінійно змінюється від свого початкового значення до максимального, а потім зменшується до початкового. Порівнюючи частоти на приймачі і випромінювачі, визначається час проходження зондуючого сигналу. Похибки визначення відстаней (глибин) становлять близько 2% від глибини за умови відсутності різких перепадів у рельєфі дна [2].

Імпульсний спосіб заснований на імпульсній модуляції випромінюваного сигналу і визначенні часу проходження імпульсу до дна і в зворотному напрямку. Похибка визначення глибин цим способом складає від 0,5 до 3%.

В ехолотах використовується імпульсний метод або частотний. Під час вимірювання глибин ехолотом виникають похибки, пов'язані з неточним визначенням часу і швидкості розповсюдження акустичних хвиль у воді. В середньому інструментальна похибка ехолота становить 1-2,5% від вимірюваної глибини [3].

#### Матеріали і методи дослідження

На основі проведеного аналізу існуючих способів вимірювання глибин ехолотом пропонується удосконалити методику ехолотування з використанням нового пристрою [4]. Він базується на застосуванні методу імпульсної гідролокації і відрізняється тим, що частота імпульсів, які випромінюються, змінюється таким чином, щоб результуюча частота прийнятих імпульсів, які складаються з відбитих від дна та випромінюваних, була подвоєною відносно частоти випромінюваних імпульсів. При цьому результуюча частота поділяється навпіл, а одержана частота порівнюється з частотою випромінюваних імпульсів, фіксуючи співпадання цих частот. Глибина визначається за формулою

$$2H = \frac{V \cdot n}{2f}, \quad (1)$$

де  $H$  – глибина;

$V$  – швидкість розповсюдження ультразвуку в воді;

$f$  – частота прийнятих імпульсів (прямих і відбитих);

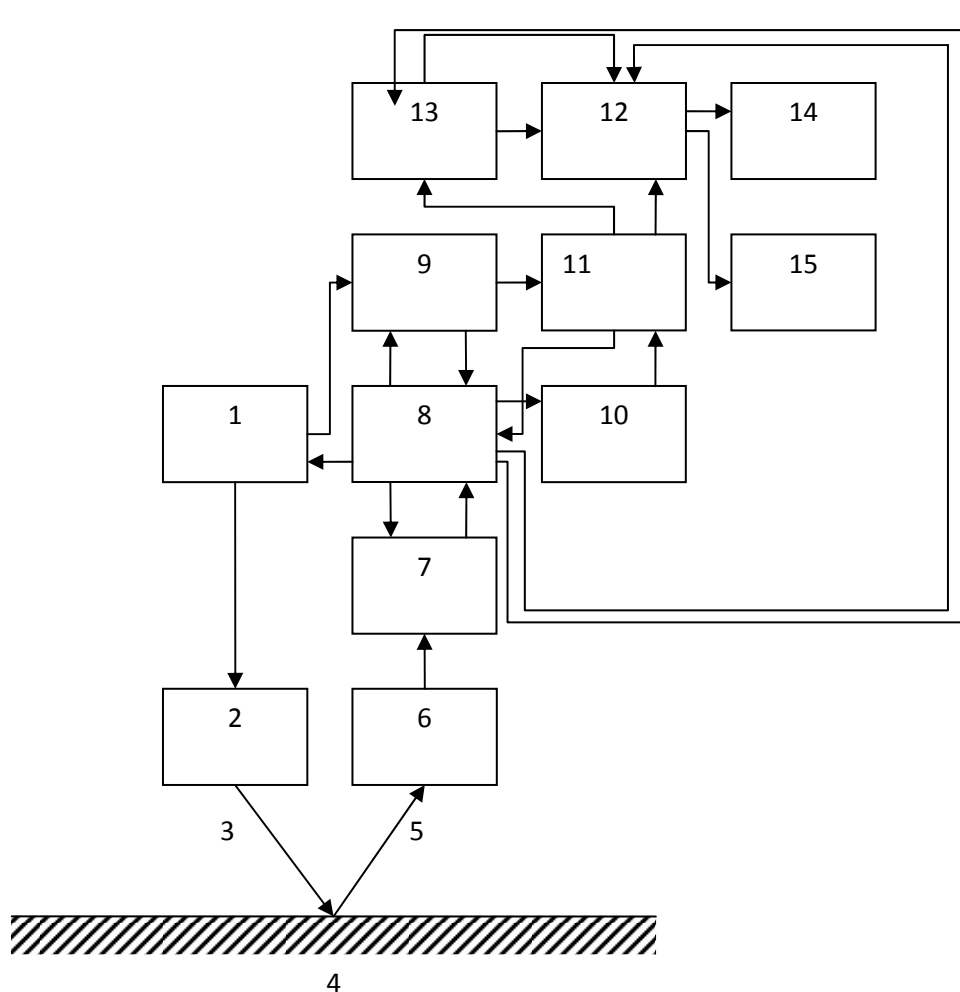
$n$  – кількість повних довжин хвиль частоти  $f$ , що укладаються у вимірюваній відстані  $H$ .

Значення  $n$  підбирається шляхом ітерацій до отримання значення  $H$ , враховуючи, що  $n$  – непарне число.

Блок-схема запропонованого пристрою представлена на рис.1.

Пристрій встановлюється на борту промірного судна. Блоком генерації електричних імпульсів 1, що керується блоком 8 по частоті, виробляються електричні імпульси, які діють на електричне поле випромінювача 2. Вібратором випромінювача 2 виробляються ультразвукові імпульси, що посилаються в напрямку дна водного об'єкта. Відбившись від дна, ультразвукові імпульси досягають вібратора приймача 6, де перетворюються на електричні сигнали з частотою випромінювання. Електричні імпульси з блоку 6 підсилюються в блоці 7 і передаються до блоку 8. У той же час електричні імпульси з блоку 1 передаються до блоку регулювання потужності випромінюваного (прямого) сигналу 9, а потім - до блоку 8. Таким чином, до блоку 8 надходять відбиті від дна водойми імпульси з приймача 6 і випромінювані, тобто прямі.

У блоці 8 вимірюються часові інтервали між прямими і відбитими імпульсами, визначається характер зміни частоти випромінювання (збільшення або зменшення) і виробляється сигнал, що керує зміною частоти. Цей сигнал посилається до блоку 1, який містить пристрій зміни частоти випромінювання. Зміна частоти випромінювання блоком 1 в якийсь момент призводить до рівності часових інтервалів між прийнятими блоком 8 перетвореними імпульсами. У цей момент блоком 8 формуються імпульси з подвійною частотою відносно частоти імпульсів, що генеруються блоком 1, і випромінюються вібратором випромінювача 2, тобто формується робоча частота, яка передається до блоку поділу частоти 10, де частота імпульсу зменшується вдвічі. З блоку 10 імпульс зі зменшеною вдвічі частотою надходить до блоку порівняння частот 11, куди також подається імпульс з блоку 1 з частотою випромінювання (через блок 9).



1 – блок генерації електричних імпульсів з механізмом зміни частот; 2 – випромінювач ультразвукових імпульсів; 3 – напрям випромінюваного імпульсу; 4 – дно водойми; 5 – відбитий від дна ультразвуковий (акустичний) імпульс; 6 – приймач ультразвукових імпульсів; 7 – підсилювач потужності імпульсів; 8 – блок вимірювання часових інтервалів, управління частотою випромінювання та формування частоти прямих (випромінюваних) та відбитих імпульсів, що чергуються; 9 – блок регулювання потужності прямого (випромінюваного) імпульсу; 10 – блок поділу частоти; 11 – блок порівняння частоти; 12 – блок обчислення глибини; 13 – блок приблизного визначення глибини; 14 – блок індикації; 15 – блок запису і збереження інформації.

Рис.1–Блок-схема пристрою для вимірювання глибин водних об'єктів.

У блоці 11 відбувається порівняння частот імпульсів, що надійшли. У момент точного збігу частот імпульсів з блоку 11 до блоку 8 подається команда про фіксацію частоти, що сформувалась з прямих і відбитих імпульсів, і передачу її значення для визначення відстані. З блоку 8 у блок обчислення глибини 12 передається сигнал з частотою, на якій зафіксовано співпадання. У блоці 12 відбувається контрольне вимірювання частоти сигналу, що надійшов з блоку 8, і з урахуванням приблизного значення глибини, яка визначається у блоці 13, обчислюється глибина водойми для даної промірної вертикалі та передається в блок індикації 14 і в блок запису і збереження інформації 15.

Приблизне значення глибини можна одержати при вимірюванні в блоці 8 часового інтервалу між одержаним першим прямим імпульсом (з блоку 1 через блок 9) і першим відбитим (прийнятим блоком 6 і переданим блоком 8 через блок 7) в серії імпульсів.

Другим варіантом визначення приблизного значення глибини може бути застосування традиційного ехолотування.

Точне визначення глибини також можливе при фіксації збігу частот в блоці 11 при двох значеннях робочої частоти в блоці 8.

**Результати дослідження та їх аналіз.** Формування і взаємодія одержаних частот в описаній схемі вимірювань полягає у наступному.

Частота випромінюваних (прямих) імпульсів  $f_{\text{ПР}}$  дорівнює

$$f_{\text{ПР}} = \frac{1}{T}, \quad (2)$$

$T$  – період проходження імпульсів.

Частота відбитих імпульсів  $f_B$  буде такою ж

$$f_B = \frac{1}{T}. \quad (3)$$

Під час прийому прямих і відбитих імпульсів у приймальний канал будуть надходити дві однакові частоти  $f_{\text{ПР}}$  і  $f_B$ , що мають деяку різницю фаз, яка може бути виражена в часовій затримці  $\tau$ .

Якщо плавно змінювати частоту  $f_{\text{ПР}}$ , виникає момент, при якому величина затримки буде дорівнювати половині періоду проходження імпульсів. При цьому частота проходження послідовності прямих і відбитих імпульсів  $f_1$  буде дорівнювати

$$f_1 = \frac{1}{T_1} = 2 \frac{1}{T}, \quad (4)$$

$T_1$  – період частоти  $f_1$ .

Таким чином, у приймальному каналі одержують частоту  $f_1$  у два рази вищу, ніж  $f_{\text{ПР(1)}}$

$$f_1 = 2f_{\text{ПР(1)}}. \quad (5)$$

При цьому блок 8 сформує подвійну частоту щодо частоти, поданої блоком 1, і передає цей сигнал у блок поділу частоти 10. У блоці 10 отримана частота поділяється на два, після чого знижені вдвічі частоти передають у блок 11 для порівняння частот. У блок 11 також надходить сигнал з блоку 1 з частотою випромінювання (через блок 9). Таким чином, у блоці 11 відбувається порівняння частот: частоти, отриманої в блоці 8 і поділеної навпіл у блоці 10, з частотою генератора 1 до виконання умови:  $\frac{f_1}{2} = f_{\text{ПР(1)}}$ ,

тобто до збігу цих частот. В цей момент із блоку 11 у блок 8 передається сигнал про збіг частот, а блок 8 надає в блок обчислення глибин 12 значення цих частот. Також із блоку 8 подаються у блок 12 значення виправлень на температуру, солоність водного середовища. Ці дані можна ввести в блок 8 за допомогою ручного набору чи безпосередньо від відповідних датчиків. У блоці 12 виконується контрольне вимірювання одержаної з блоку 8 частоти і з урахуванням приблизного значення глибини, яке надає блок 13, потім визначається глибина водойми для даної промірної вертикалі і подається в блок індикації 14, а також в блок запису і збереження інформації 15.

Момент настання подвійної частоти можна отримати, використовуючи наближений гармонічний аналіз [5]. Якщо для деякої сукупності значень  $x$  сума  $n$  членів  $S_n(x)$  при  $n \rightarrow \infty$  прямує до певної границі  $S(x)$ , то для цих  $x$  маємо збіжний ряд Фур'є даної функції  $f(x)$ :

$$S(x) = \frac{a_0}{2} + a_1 \cos x + a_2 \cos 2x + \dots + a_n \cos nx + b_1 \sin x + b_2 \sin 2x + \dots + b_n \sin nx + \dots, \quad (6)$$

де  $a_0, a_n, b_n$  - коефіцієнти, які визначаються за формулами Ейлера-Фур'є:

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) dx, \quad (7)$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos nx dx, \quad (8)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \sin nx dx, \quad (9)$$

$n=1,2,3, \dots$

Якщо генератор електричних імпульсів випромінює трикутні однополярні (одновершинні) імпульси, тоді такі імпульси повністю задовольняють умову Діріхле і може розкладатись в ряд Фур'є за формулами Бесселя (10) [5].

Час  $T=2\pi$  проходження прямими і відбитими акустичними імпульсами вимірюваної відстані  $2H$  поділено на 20 рівних частин ( $2n=20$ ); абсциси точок поділу  $x_k = \frac{kT}{2n}$ ; ординати точок поділу  $f(x_k) = y_k$  ( $k=0, 1, \dots, 2n$ ).

Тоді можна записати

$$n \cdot a_0 = \sum_{k=0}^{2n-1} y_k, \quad n \cdot a_m = \sum_{k=0}^{2n-1} \left( y_k \cos \frac{k \cdot m \cdot \pi}{n} \right), \quad n \cdot b_m = \sum_{k=0}^{2n-1} \left( y_k \sin \frac{k \cdot m \cdot \pi}{n} \right), \quad (10)$$

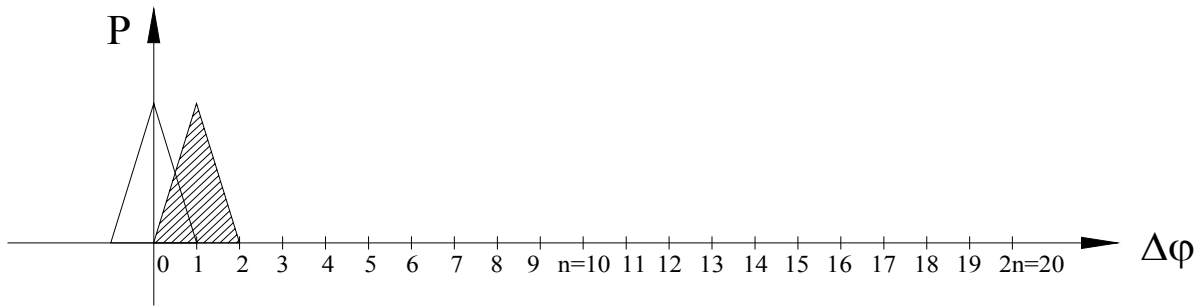
$m=1,2, \dots, n$ .

Наведемо дещо іншу форму ряду Фур'є:

$$S(x) = \frac{a_0}{2} + A_1 \sin(\omega x + \varphi_1) + A_2 \sin(2\omega x + \varphi_2) + \dots + A_n \sin(n \omega x + \varphi_n) + \dots, \quad (11)$$

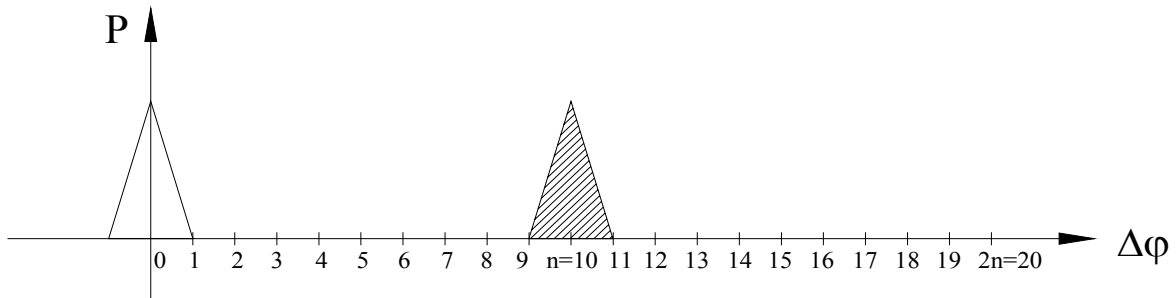
$A_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}$  і  $\text{tg } \varphi_k = \frac{a_k}{b_k}$  - відповідно амплітуда і тангенс початкової фази  $k$ -ої гармоніки.

При плавній зміні частоти проходження імпульсів змінюється часовий інтервал між прямим і відбитим імпульсами, тобто змінюється різниця фаз. На рис. 2-4 зображені випадки, коли відбитий імпульс займає положення відповідно:  $k=1, 10$  та  $19$ . Результати обчислень коефіцієнтів  $a_i$  і  $b_i$  наведені в табл. 1. Для зручності обчислень береться потужність імпульсу  $P=1$ .



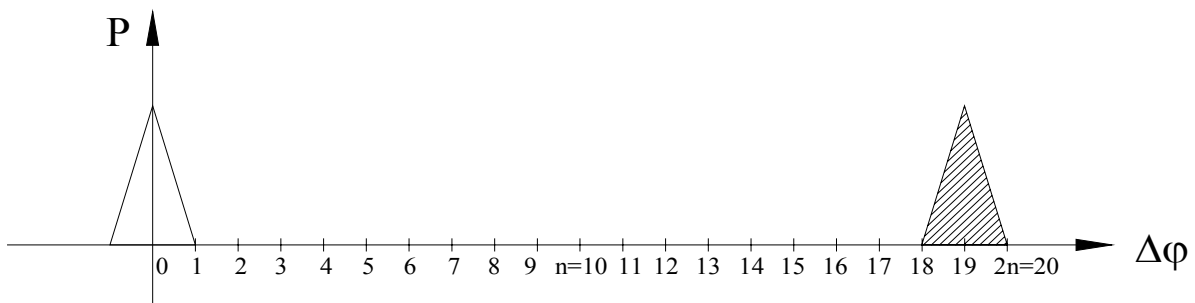
трикутники: заштрихований – відбитий імпульс, не заштрихований – прямий імпульс,  
P – потужність імпульсу,  $\Delta\varphi$  – різниця фаз між прямим і відбитим імпульсами

Рис. 2 – Прямий і відбитий імпульси ( $k=1$ ).



трикутники: заштрихований – відбитий імпульс, не заштрихований – прямий імпульс,  
P – потужність імпульсу,  $\Delta\varphi$  – різниця фаз між прямим і відбитим імпульсам

Рис. 3 – Прямий і відбитий імпульси ( $k=10$ ).



трикутники: заштрихований – відбитий імпульс, не заштрихований – прямий імпульс,  
P – потужність імпульсу,  $\Delta\varphi$  – різниця фаз між прямим і відбитим імпульсами

Рис. 4 – Прямий і відбитий імпульси ( $k=19$ ).

Таблиця 1 – Значення коефіцієнтів Фур'є  $a_i$  та  $b_i$ 

№ позиції відбитого імпульсу	Значення коефіцієнтів Фур'є у формулах Бесселя									
	$a_1$	$b_1$	$a_2$	$b_2$	$a_3$	$b_3$	$a_4$	$b_4$	$a_5$	$b_5$
0	0.2	0	0.2	0	0.2	0	0.2	0	0.2	0
1	0.195	0.031	0.181	0.059	0.159	0.081	0.131	0.095	0.1	0.1
2	0.181	0.059	0.131	0.095	0.069	0.095	0.019	0.059	0	0
3	0.159	0.081	0.069	0.095	0.005	0.031	0.019	-0.059	0.1	-0.1
4	0.131	0.095	0.019	0.059	0.019	-0.059	0.131	-0.095	0.2	0
5	0.1	0.1	0	0	0.1	-0.1	0.1	-0.1	0.1	0.1
6	0.069	0.095	0.019	-0.059	0.181	-0.059	0.131	0.095	0	0
7	0.041	0.081	0.069	-0.095	0.195	0.031	0.019	0.059	0.1	-0.1
8	0.019	0.059	0.131	-0.095	0.131	0.095	0.019	-0.059	0.2	0
9	0.005	0.031	0.181	-0.059	0.041	0.081	0.131	-0.095	0.1	0.1
10	0	0	0.2	0	0	0	0.2	0	0	0
11	0.005	-0.031	0.181	0.059	0.041	-0.081	0.131	0.095	0.1	-0.1
12	0.019	-0.059	0.131	0.095	0.131	-0.095	0.019	0.059	0.2	0
13	0.041	-0.081	0.069	0.095	0.195	-0.031	0.019	-0.059	0.1	0.1
14	0.069	-0.095	0.019	0.059	0.181	0.059	0.131	-0.095	0	0
15	0.1	-0.1	0	0	0.1	0.1	0.2	0	0.1	-0.1
16	0.131	-0.095	0.019	-0.059	0.019	0.059	0.131	0.095	0.2	0
17	0.159	-0.081	0.069	-0.095	0.005	-0.031	0.019	0.059	0.1	0.1
18	0.181	-0.059	0.131	-0.095	0.069	-0.095	0.019	-0.059	0	0
19	0.195	-0.031	0.181	-0.059	0.159	-0.081	0.131	-0.095	0.1	-0.1

Результати обчислень значень амплітуд  $A_i$  наведені в табл. 2.

Таблиця 2 – Значення амплітуд  $A_i$ 

№ позиції відбитого імпульсу	Значення амплітуд				
	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$
1	2	3	4	5	6
0	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200
1	0.198	0.190	0.178	0.162	0.141
2	0.190	0.162	0.118	0.062	0
3	0.178	0.118	0.031	0.062	0.141
4	0.162	0.062	0.062	0.162	0.200
5	0.141	0	0.141	0.200	0.141
6	0.118	0.062	0.190	0.162	0
7	0.091	0.118	0.198	0.062	0.141
8	0.062	0.162	0.162	0.062	0.200
9	0.031	0.190	0.091	0.162	0.141

Продовження табл.2.

1	2	3	4	5	6
10	0	0.200	0	0.200	0
11	0.031	0.190	0.091	0.162	0.141
12	0.062	0.162	0.162	0.062	0.200
13	0.091	0.118	0.198	0.062	0.141
14	0.118	0.062	0.190	0.162	0
15	0.141	0	0.141	0.200	0.141
16	0.162	0.062	0.062	0.162	0.200
17	0.178	0.118	0.031	0.062	0.141
18	0.190	0.162	0.118	0.062	0
19	0.198	0.190	0.178	0.162	0.141

На рис.5 зображено залежність амплітуд гармонік від різниці фаз прямих і відбитих імпульсів.

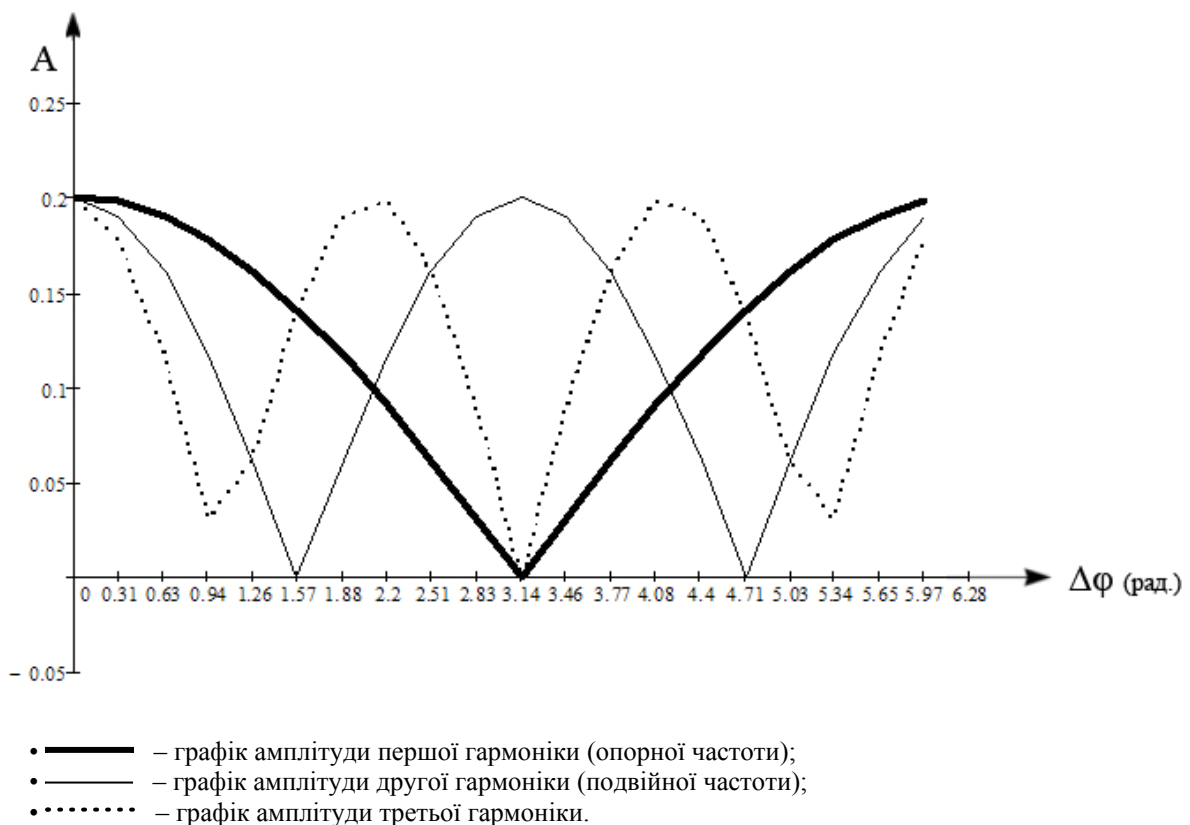


Рис.5 – Залежність амплітуд гармонік від різниці фаз прямих і відбитих імпульсів.

Як видно з рис.5, при різниці фаз  $\Delta\varphi = \pi$  мінімум амплітуди першої гармоніки відповідає моменту, коли різниця фаз між прямими (випромінюваними) і відбитими імпульсами дорівнює половині періоду проходження імпульсів і також відповідає моменту появи подвійної частоти відносно частоти прямих імпульсів.

Слід зазначити, що мінімум частоти прямих імпульсів для фіксації моменту появи подвійної частоти (максимуму другої гармоніки) безпосередньо використовувати не доцільно, оскільки поява цього моменту може бути і фіктивною. Наприклад, коли випадково може бути перекритий відбивач акустичних імпульсів, пристрій, який мав би



фіксувати мінімум амплітуди першої гармоніки, зафіксував би цей "мінімум" і відповідно фіктивне значення подвійної частоти (якої у цьому випадку, звичайно, і немає).

**Висновки.** Описаний спосіб вимірювання відстаней у водному середовищі дозволяє одержати підвищення точності промірних робіт гідроакустичними апаратами за рахунок виключення вимірювання різниці фаз між прямими і відбитими імпульсами при використанні для вимірювання сигналів збігу частот: результуючої частоти прийнятих імпульсів, що складається з відбитих від дна та випромінюваних (тобто прямих), яка поділена навпіл, та частоти випромінюваних імпульсів (тобто прямих).

**Перспективи.** Розроблений спосіб потребує подальшої деталізації, досліджень і випробувань зразків. Цей спосіб може бути особливо ефективним при пошуках підводних об'єктів.

### Список літератури

1. *Волосецький Б.І.* Інженерна геодезія. / Б. І. Волосецький . – Л.: “Львівська політехніка”, 2003. – 143с.
2. *Костецька Я.М.* Геодезичні прилади. Частина II. Електронні геодезичні прилади: Підручник для студентів геодезичних спеціальностей вузів / Я.М. Костецька . – Львів: ІЗМН, 2000. – 324 с.
3. *Руководство по топографической съемке шельфа и внутренних водоемов.* – ГКИНП-11-157-88. – М., ЦНИГАиК, 1989. – 515 с.
4. Пат. 86480 Україна, МПК (2009) G01J 11/00. Пристрій для вимірювання відстаней у водному середовищі / В. О. Боровий, В. Г. Бурачек, Ю. П. Куреньов, Л. С. Мамонтова; заявник та патентовласник Чернігівський державний інститут економіки і управління. – № а 2007 07121; заявл.25.06.2007; опубл.27.04.2009. Бюл.№8 .
5. *Бронштейн И.Н.* Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И.Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. – М.: Наука, гл. ред. физ.-мат. литературы, 1981. – 721 с.

**Усовершенствование методов измерения глубин в системе мониторинга водных объектов суши.**  
**Мамонтова Л.С.**

*Рассмотрен новый способ измерения глубин водных объектов, который основан на методе импульсной гидролокации, когда частота излучаемых импульсов изменяется таким образом, чтобы результирующая частота отраженных от дна и излучаемых импульсов была удвоена относительно частоты излучаемых импульсов; при этом результирующая частота делится пополам и сравнивается с частотой излучаемых импульсов, фиксируя совпадение этих частот.*

**Ключевые слова:** мониторинг, измерения глубин водных объектов, импульсная гидролокация.

**Improvement of the depths measurement methods in the monitoring system of land water objects.**

**Mamontova L.S.**

*We consider a new way of measuring the depth of groundwater, which is based on the method of pulsed sonar when changing frequency emitted impulses so that the resulting frequency of the impulses reflected and emitted from the bottom was doubled relative to the frequency emitted impulses, while the resulting frequency is divided in half and compared with the frequency of emitted impulses, fixing coincidence of these frequencies.*

**Keywords:** monitoring, measuring, the depths of water objects, sonar impulse.