

# Акустичні та мультимедійні системи

УДК 681.883.45

А.О. Безручко, В.С. Дідковський, Н.Д. Гладкіх, О.В. Коржик

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ

## ДО ПИТАННЯ ПРО ДЕФОРМУВАННЯ РІЗНОЧАСТОТНОГО ІМПУЛЬСНО-КОДОВОГО АКУСТИЧНОГО СИГНАЛУ В ПІДВОДНОМУ ЗВУКОВОМУ КАНАЛІ

*Визначено характер спотворення компонент різночастотного імпульсного коду в підводному звуковому каналі. Отримано результати викривлення сигналу для системи звукопідводного зв'язку на базі радіогідроакустичних буїв. Аналіз проведено для випадку поширення одномодового збудження. Встановлено і проілюстровано характер зміни просторово-часової структури інформаційного акустичного сигналу за рахунок дисперсії на різних відстанях розповсюдження. Проілюстровано, що при розповсюдженні у хвилеводі імпульсних акустичних сигналів в них накопичуються характерні спотворення типу «розмиття» імпульсу в часі і просторі. Як наслідок, зростає затримка енергонесучої частини в порівнянні з поширенням імпульсного сигналу при відсутності дисперсії. Вказані ефекти не беруться до уваги при використанні наближень променевої акустики, що може суттєво погіршувати якість розробки систем звукопідводного зв'язку.*

**Ключові слова:** звукопідводний зв'язок, гідроакустика, підводний звуковий канал, імпульсний сигнал, різночастотний код, хвилевод.

### Вступ

Поширення звуку в хвилеводних структурах спостерігається в природі і різноманітних технічних пристроях. До природних хвилеводів відносяться різні середовища, обмежені поверхнями, які добре відбивають звукові хвилі (наприклад, моря й океани, для яких верхньою межею є повітря, а нижньою – донні ґрунти). Крім того, зустрічаються хвилеводи, в яких межі визначені не різко, вони утворюються в товщі атмосфери, або океану за рахунок особливого розподілу значень швидкості звуку в їх перетині [1].

Характер хвилеводного поширення сигналу досить складний. Він визначається геометричною конфігурацією хвилеводу, властивостями граничних поверхонь і способом збудження хвильового руху. Необхідно підкреслити, що в переважній більшості робіт хвилеводне поширення вивчалось для гармонійного в часі сигналу. Тим не менш, реальний сигнал завжди має кінцеву в часі тривалість, або, іншими словами, являє собою певний імпульс [2].

Поширення імпульсу в хвилеводі супроводжується рядом специфічних ефектів, що викликає великий інтерес до вивчення саме нестационарних процесів. У даній статті розглянуто проходження звукового імпульсу в хвилеводах з найбільш простою геометрією границь [3 – 6].

**Основна мета дослідження** – визначити характер зміни сигналу, що був випромінений, при прийомі його на різних дистанціях від джерела; дослідити параметри сигналу, що найменше схильні до

зміни; визначити порядок використання частот для формування пачки імпульсів сигнал.

### Математична модель сигналу

Можна виділити дві причини, які обумовлюють використання як математичної моделі сигналу не поодинокий імпульс, а радіоімпульс.

По-перше, це дає можливість обмежити розгляд хвильового процесу інтервалом періоду проходження імпульсів  $T_1$ .

По-друге, такі сигнали широко застосовуються в локаційних пристроях різного призначення, наприклад, в локаторах з використанням електромагнітних або пружних хвиль, медичних сканерах і т.д. Цей підхід дозволяє найбільш просто використовувати дані про поширення гармонійного сигналу для отримання кількісних оцінок поширення імпульсу.

При поширенні імпульсного сигналу в хвилеводі його просторово-часова структура піддається впливу з боку хвилеводу завдяки двом основним механізмам. Один з них обумовлений тим, що хвилевід служить фільтром, оскільки на частотах, менше критичної, відповідна нормальна хвиля виявляється неоднорідною, а другий визначається дисперсією хвиль, що поширюються в хвилеводі. Прояв цих двох механізмів може мати свої особливості при поширенні різних сигналів [5, 6]. Запишемо математичний вираз для досліджуваного сигналу. Частота заповнення  $\omega_0$  на часовому проміжку тривалості імпульсу  $T_1$  постійна:

$$\begin{cases} \sin(\omega_0 t), & 0 \leq t \leq \tau_i, \\ 0, & \tau_i \leq t \leq T_i, \end{cases} \quad (1)$$

тут  $T_i$  – період слідування імпульсів. Представимо вихідний сигнал у вигляді ряду Фур’є:

$$p(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} C_k \exp(i\omega_k t), \quad (2)$$

де  $C_k$  – комплексна амплітуда, що розраховується за відомим співвідношенням, а частоти гармонік  $\omega_k = k\Omega_i$  кратні частоті слідування імпульсів  $\Omega_i$ .

При проведенні числових обрахунків зручно оперувати безрозмірними величинами. Для цього введемо широко вживані в радіотехніці параметри: шпаруватість  $q$ , кількість  $N$  періодів  $T_0$  основної частоти  $\omega_0 = 2\pi / T_0$ .

В такому випадку безрозмірний час буде визначатись, як  $t' = t / T_i$  и  $\tau_i = NT_0$ .

Тоді сигнал (1) і його Фур’є форма набудуть вигляду:

$$\begin{cases} \sin(2\pi Nt'), & 0 \leq t' \leq 1, \\ 0, & 1 \leq t' \leq q, \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \sin(2\pi Nt'), & 0 \leq t' \leq 1, \\ 0, & 1 \leq t' \leq q, \end{cases} \quad (4)$$

### Розповсюдження імпульсного сигналу в підводному звуковому каналі

Підводний звуковий канал фізично можна змодельовувати плоскопаралельним хвилеводом з «м’якими» стінками. Нехай в такому хвилеводі (рис. 1), в розрізі  $x = 0$  задається розподілення тиску, що відповідає першій моді хвилеводу з часовою залежністю (3). При  $x = 0$  тиск змінюється згідно з законом [5]:

$$\begin{cases} \sin(\pi z/h) \cdot \sin(\omega_0 t), & 0 \leq t \leq \tau_i, \\ 0, & \tau_i \leq t \leq T_i, \end{cases} \quad (5)$$

де  $h$  – ширина хвилеводу.

Хвилевід вважатимемо заповненим ідеальною рідиною з густиною  $\rho$  і та швидкістю звуку  $c$ .

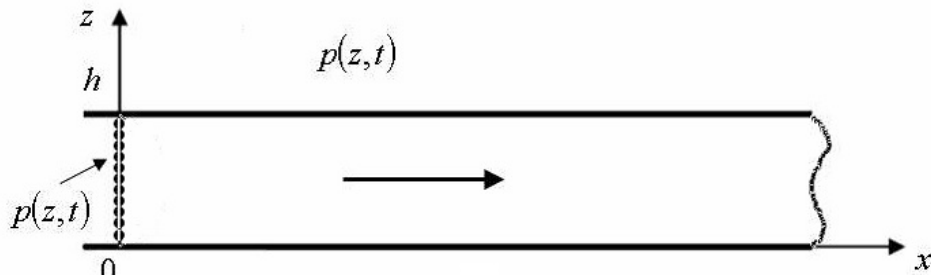


Рис. 1. Плоскопаралельний хвилевід

Оскільки задача симетрична відносно  $x = 0$ , розглядаємо частину  $x \geq 0$ .

Представимо вихідний сигнал в розрізі  $x = 0$  у вигляді ряду Фур’є, коли кожна складова ряду утворює першу моду хвилеводу з частотою  $\omega_k$ . Тоді поле в хвилеводі буде мати вигляд суперпозиції перших мод:

$$p(x, z, t) = \sin\left(\frac{\pi z}{h}\right) \cdot \sum_{k=-\infty}^{\infty} C_k \exp(i[\omega_k t - \gamma_k x]), \quad (6)$$

де  $\gamma_k$  – постійна розповсюдження  $k$ -ї складової, що має вигляд:

$$\gamma_k = \frac{\omega_k}{c} \sqrt{1 - \frac{\omega_{кр}^2}{\omega_k^2}}, \quad (7)$$

тут  $\omega_{кр} = \pi c / h$  – критична частота першої моди.

Використовуючи безрозмірні параметри, представимо вираз (7), що входить до формулі (6) таким чином:

$$\begin{aligned} \omega_k t - \gamma_k x &= \frac{2\pi}{q} kt' - \frac{2\pi}{Nq} kx' \sqrt{1 - \left(\frac{\omega_{кр}}{k\Omega_i}\right)^2}; \\ p(t', x', z) &= \sin(\pi z/h) \times \\ &\times \sum_{k=-\infty}^{\infty} C_k e^{\left\{ \text{хр} i \left[ \frac{2\pi}{q} kt' - \frac{2\pi}{Nq} kx' \sqrt{1 - \left(\frac{\omega_{кр}}{k\Omega_i}\right)^2} \right] \right\}}, \quad (8) \end{aligned}$$

$x' = x / \lambda_0 = x / cT_0$  – нормована відстань.

Зрозуміло, що через наявності дисперсії першої моди в ході розповсюдження сигналу в ньому будуть накопичуватись викривлення.

Очевидно, що їх характер суттєво залежить від нормованої критичної частоти першої моди  $\omega_{кр} / \Omega_i = \omega_{кр} / \omega_1$ , бо величина цього параметру визначає кількість нормальних хвиль, які будуть неоднорідними.

Відповідно, нормальні хвилі, для яких  $k > \omega_{кр} / \Omega_i$ , будуть однорідними, тобто такими, які створюють дальнє акустичне поле.

## Аналіз просторово-часових характеристик сигналу

В дослідженні була змодельована передача послідовності цифрового коду типу «ПС-0-1» в каналі з  $f_{кр} = 100$  Гц: пілот сигнал 100 Гц, частота для коду «1» 200 Гц, частота для коду «0» 300 Гц (рис. 2).

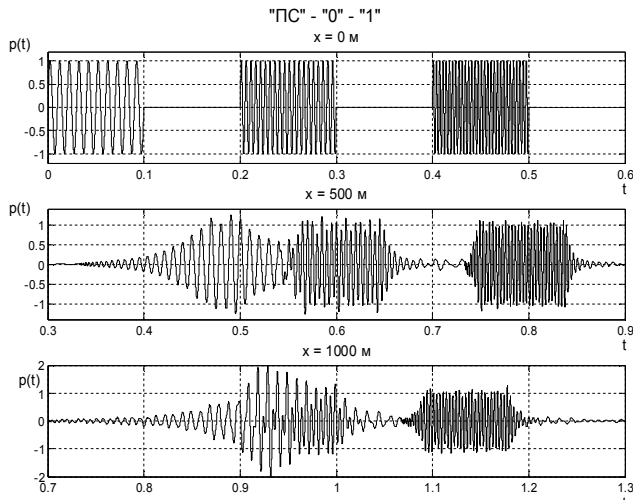


Рис. 2. Сигнал «ПС-0-1» в каналі

На рис. 3 зображено сигнали, що було випромінено і прийнято на відстанях 500 і 1000 м на частотах (100 Гц – рис. 3, а, 200 Гц – рис. 3, б, 300 Гц – рис. 3, в). На рисунку видно, що імпульс зазнає надлишкової затримки розповсюдження, що пояснюється дисперсією і затягування довжини імпульсу  $\delta$ .

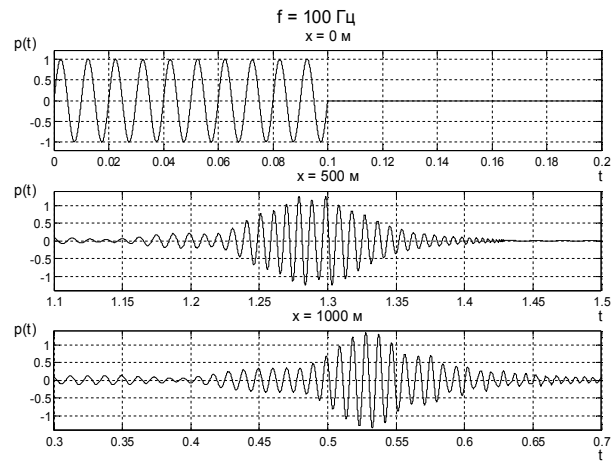
Представлені в статті розрахунки часових залежностей тиску в хвилеводі дають наочну картину характеру і ступеня спотворення форми вихідного сигналу в процесі його розповсюдження.

Загальний результат дослідження затягування коду «ПС-1-0» зведено до табл. 1.

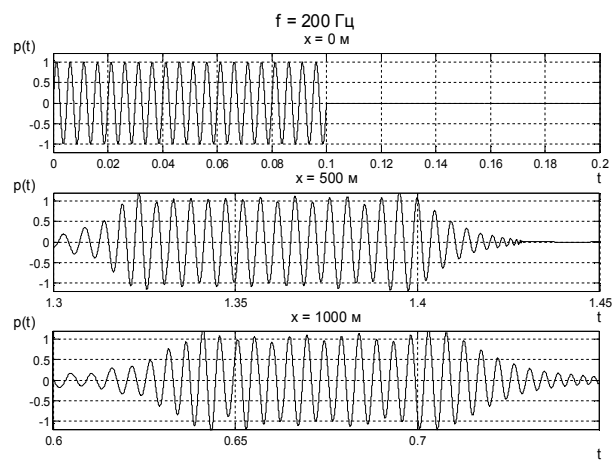
Спостерігається затягування імпульсу в області частот близьких до  $f_{кр}$ . З ростом частоти, вже не рівні  $f = 3f_{кр}$ , затягування майже не впливає на форму імпульсу. Найбільш сильно явище дисперсії проявляється в надлишковій затримці, яка залежить від частоти. Це спричиняє значне спотворення сигналу типу «ПС-1-0» за умови, що частоти розташовані в порядку спадання. У випадку, якщо частоти будуть зростати, спостерігатиметься зворотнє явище розтягування сигналу.

Однак, дані параметри задовольняють потреби сучасних засобів звукопідводного зв'язку, оскільки у серійних станціях допускають затримку сигналу до 120 с.

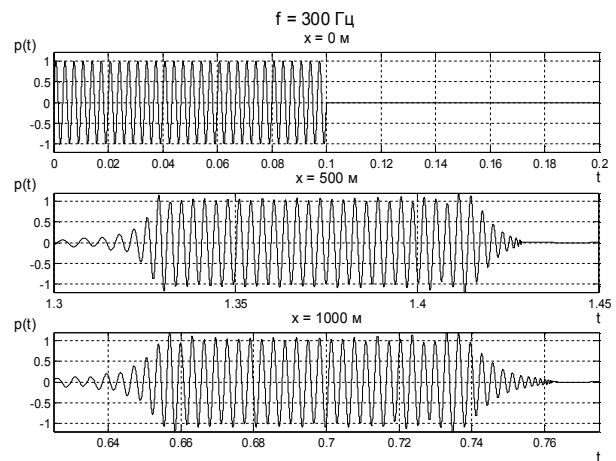
За результатом проведеного дослідження були отримані результати викривлення сигналу для системи ЗПЗ на базі радіогідроакустичних буїв.



а – частота  $f = f_{кр}$



б – частота  $f = 2f_{кр}$



в – частота  $f = 3f_{кр}$

Рис. 3. Акустичний імпульс в каналі

При робочих частотах  $f = f_{кр}, 2f_{кр}, 3f_{кр}$  (100 Гц, 200 Гц, 300 Гц) та заданому параметру виявлення при максимальній дальності 1000 м. випромінений сигнал типу «ПС-1-0» прийнятий абонентом не приданий до передачі інформації.

Тривалість акустичного імпульсу в каналі

Частота, Гц	Тривалість імпульсу, мс			$\delta$ , %		Надлишкова затримка, с	
	0 м	500 м	1000 м	500 м	1000 м	500 м	1000 м
«ПС» - 100	100	125	191	25,87	91	1,22	0,43
«0» - 200	100	150	115	5,92	15,5	1,3	0,615
«1» - 300	100	101	102	1,94	2,25	1,321	0,646
«ПС - 0 -1»	500	442	403	11,47	19,38	1,31	0,63

## Висновки

В результаті виконання роботи при дослідженні дисперсії сигналів з різними фіксованими частотами тонального заповнення встановлено таке:

– при поширенні у хвилеводі імпульсного сигналу його просторово-часова структура зазнає змін внаслідок дисперсії і впливу хвилеводу як фільтра;

– проілюстровано, що для умов поширення 1-ої моди, при розповсюдженні у хвилеводі вказаних зондуючі сигналів в них накопичуються характерні спотворення типу «розмиття» імпульсу в часі і просторі; як наслідок, зростає затримка енергонесучої частини в порівнянні з поширенням імпульсного сигналу при відсутності дисперсії;

– встановлено характер викривлення для досліджуваних сигналів на різних відстанях розповсюдження.

## Список літератури

1. Бреховских Л.М. Акустика океана / Л.М. Бреховских, Ю.П. Лысанов // Физика океана. Том 2. Гидродинамика океана. – М.: Наука, 1978. – С. 94-145.
2. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах / Л.М. Бреховских. – М.: Наука, 1973. – 343 с.
3. Исакович М.А. Общая акустика / М.А. Исакович. – М.: Наука, 1973. – 495 с.
4. Гринченко В.Т. Гармонические колебания и волны в упругих телах / В.Т. Гринченко, В.В. Мелешко. – К.: Наук. думка, 1981. – 284 с.
5. Буланая М.А. Особенности распространения звукового импульсного сигнала в плоском регулярном волноводе / М.А. Буланая, В.И. Вовк, В.Т. Гринченко, В.Т. Мацьпура // Акустичний вісник. – 2008. – Том 11, № 4. – С. 9-23.
6. Гринченко В.Т. Основы акустики / В.Т. Гринченко, І.В. Вовк, В.Т. Мацьпура. – К.: Наук. думка, 2007. – 640 с.

Надійшла до редколегії 20.08.2015

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. О.Г. Лейко, ДП Київський науково дослідний інститут гідроапаратури, Київ.

## К ВОПРОСУ О ДЕФОРМИРОВАНИИ РАЗНОЧАСТОТНЫХ ИМПУЛЬСНО-КОДОВЫХ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ В ПОДВОДНОМ ЗВУКОВОМ КАНАЛЕ

А.О. Безручко, В.С. Дидковский, Н.Д. Гладких, О.В. Коржик

*Определен характер искажения компонентов разночастотного импульсного кода в подводном звуковом канале. Получены результаты искажения сигнала для системы звукоподводной связи на базе радиогидроакустических буев. Анализ проведен для случая распространения одномодового возбуждения. Установлено и проиллюстрировано характер изменения пространственно-временной структуры информационного акустического сигнала за счет дисперсии на различных расстояниях распространения. Проиллюстрировано, что при распространении в волноводе импульсных акустических сигналов в них накапливаются характерные искажения типа «размытия» импульса во времени и пространстве. Как следствие, растет задержка энергонесущей части по сравнению с распространением импульсного сигнала при отсутствии дисперсии. Указанные эффекты не принимаются во внимание при использовании приближений лучевой акустики, что может существенно ухудшить качество разработки систем звукоподводной связи.*

**Ключевые слова:** звукоподводная связь, гидроакустика, подводный звуковой канал, импульсный сигнал, разночастотный код, волновод.

## ABOUT DEFORMING MULTIFREQUENCY PULSE-CODED ACOUSTIC SIGNALS IN THE UNDERWATER SOUND CHANNEL

A.O. Bezruchko, V.S. Didkovskiy, N.D. Hladkikh, O.V. Korzik

*Character of distortion for multifrequency pulse-coded pulse signal in the underwater sound channel is determined. The results for signal distortion in underwater communication system based on radiohydroacoustic buoys are obtained. Analysis conducted for the case of single-mode propagation excitation. The character of changes in the space-time structure of acoustic information signal due to dispersion at the different distances of propagation is established and illustrated. It is shown that when pulse propagation in the waveguide acoustic signals accumulate specific distortion similar to blurring the pulse in time and space. As a result, the delay of mean energy component increases compared with the spread pulse signal in the absence of dispersion. These effects are not taken into account when using beam acoustic approximations, which can significantly impair quality of development of underwater communication systems.*

**Keywords:** underwater communication, sonar, underwater sound channel, switching signal, multifrequency code, waveguide.