

ОСОБЛИВОСТІ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ АКУСТИЧНИХ ІМПУЛЬСІВ У ПІДВОДНОМУ ЗВУКОВОМУ КАНАЛІ

В. С. ДІДКОВСЬКИЙ, Н. Д. ГЛАДКІХ, О. В. КОРЖИК

*Національний Технічний Університет України
«Київський Політехнічний Інститут», Київ*

В роботі визначено характер спотворення компонент різночастотного імпульсного коду в підводному звуковому каналі. Отримано результати викривлення акустичного сигналу для системи трьох-частотного звукопідводного кодового зв'язку. Аналіз проведено для випадку поширення одномодового збудження в пласкому хвилеводі з акустично м'якими стінками. Встановлено і проілюстровано характер зміни просторово-часової структури інформаційного акустичного сигналу за рахунок дисперсії на різних відстанях розповсюдження. Для аналізу ступеню затягування імпульсу використовувалося виділення обвідної сигналу за допомогою перетворення Гілберта. Показано, що при розповсюдженні у хвилеводі імпульсних акустичних сигналів в них накопичуються характерні спотворення типу «розмиття» імпульсу в часі і просторі. Крім того, з'являється частотно-залежна затримка енергонесучої частини, у порівнянні з поширенням імпульсного сигналу у вільному полі. Такі ефекти особливо сильно проявляються в області частот, близьких до критичної частоти хвилеводу, і мало впливають на сигнали, основна частота яких в три і більше раз вища за критичну, що проілюстровано в роботі. Для системи різночастотного кодового гідроакустичного зв'язку це означає, що у випадку, коли низькочастотний символ коду буде випромінено перед високочастотним символом, можливе «стискання» кодової послідовності. Таке «стискання» сильно спотворює сигнал, аж до втрати можливості його декодування. В протилежному випадку, спостерігається розтягування кодової послідовності настільки, що можливе прийняття хибного рішення про завершення сеансу зв'язку до його фактичного завершення. Вказані ефекти не беруться до уваги при розрахунках з використанням наближень променевої акустики, що може суттєво погіршувати якість розробки систем звукопідводного зв'язку. В роботі пропонується ряд рекомендацій, що дозволяє уникнути чи мінімізувати вплив дисперсії для системи низькочастотного гідроакустичного зв'язку.

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.

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СИГНАЛУ

Розглянемо сигнал, що являє собою послідовність радіоімпульсів з періодом слідування T_i , і набір з трьох різночастотний радіоімпульсів з однаковими інтервалами між ними, які являють собою інформаційний пакет з таким же періодом слідування. Такі сигнали широко застосовуються в локаційних пристроях різного призначення, наприклад, в локаторах з використанням електромагнітних або пружних хвиль, медичних сканерах, засобах гідроакустичного зв'язку і т.д.

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 і швидко затухає, а другий визначається дисперсією хвиль, що поширюються в хвилеводі. Запишемо математичний вираз для досліджуваного сигналу. Частота заповнення ω_0 на часовому проміжку тривалості імпульсу τ_i 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. Фур'є образ сигналу дозволяє представити сигнал складної форми, як суму простих для аналізу компонент і має вигляд:

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

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

РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ІМПУЛЬСНОГО СИГНАЛУ В ПІДВОДНОМУ ЗВУКОВОМУ КАНАЛІ

Підводний звуковий канал, що утворено за рахунок неоднорідності, слоїстості середовища, фізично можна представити 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]:

$$\begin{cases} \sin\left(\frac{\pi z}{h}\right) \cdot \sin(\omega_0 t), & 0 \leq t \leq \tau_i \\ 0 & , \tau_i \leq t \leq T_i \end{cases} \quad (3)$$

де h – ширина хвилеводу.

Хвилевід вважатимемо заповненим ідеальною рідиною з густиною ρ і та швидкістю звуку c . 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 ω_k . Тоді поле в хвилеводі буде мати вигляд суперпозиції перших мод [4, 5]:

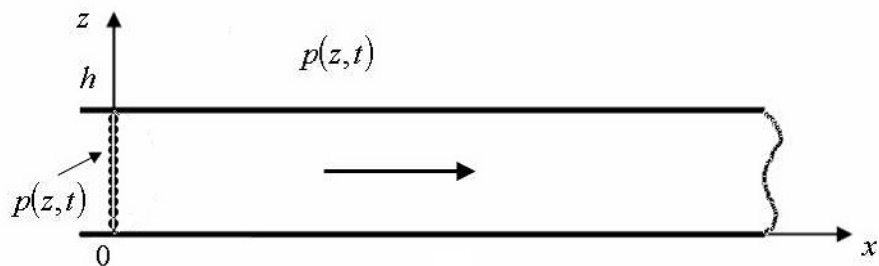


Рис. 1. Плоскопаралельний хвилевід

$$p(x, z, t) = \sin\left(\frac{\pi z}{h}\right) \cdot \sum_{k=-\infty}^{\infty} C_k \exp[i(\omega_k t - \gamma_k x)] \quad (4)$$

де γ_k – постійна розповсюдження k -ої складової, що має вигляд:

$$\gamma_k = \frac{\omega_k}{c} \sqrt{1 - \frac{\omega_{кр}^2}{\omega_k^2}} \quad (5)$$

Тут $\omega_{кр} = \pi c/h$ – критична частота першої моди. 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 – 1 - 0» і «0 - 1 - ПС» в каналі з $f_{кр} = 100$ Гц. Пілот сигнал – 100 Гц, частота для коду «1» – 200 Гц, частота для коду «0» – 300 Гц;

На (Рис.1) зображено сигнали, що було випромінено і прийнято на відстанях 500 і 1000 м. На рисунку видно, що імпульс зазнає надлишкової затримки розповсюдження, що пояснюється дисперсією і розмиттям імпульсу.

Для того, щоб визначити довжину імпульсу, використовується виділення обвідної сигналу з використанням перетворення Гілберта і компарація по рівню 0,707. Також приведемо відношення довжини сигналу в каналі до його початкової довжини у відсотках і надлишкову затримку розповсюдження. Надлишкова затримка розповсюдження визначається, як різниця між часом розповсюдження сигналу в точку прийому у вільному просторі і часом розповсюдження в каналі. На рисунках за «0» по вісі абсцис прийнято час приходу сигналу, що розповсюджувався в точку прийому в умовах вільного поля. Загальний результат дослідження зведено до таблиці 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 форми сигналу типу «ПС-1-0» за умови, що частоти розташовані в порядку зростання. У випадку, якщо частоти будуть спадати, спостерігатиметься зворотнє явище розтягування сигналу.

Табл. 1. Тривалість акустичного сигналу, відносне подовження сигналу, надлишкова затримка сигналу.

Частота, Гц	Тривалість імпульсу, мс			δ , %		Надлишкова затримка, с	
	0 м	500 м	1000 м	500 м	1000 м	500 м	1000 м
«ПС» - 100	100	70	51	29,2	48,4	0,45	0,89
«0» - 200	100	90	85	9,42	14,43	0,36	0,71
«1» - 300	100	93	93	6	9,3	0,34	0,69
«ПС - 0 - 1»	500	390	282	21,9	43,5	0,45	0,7
«1 - 0 - ПС»	500	574	658	14,8	31,6	0,34	0,69

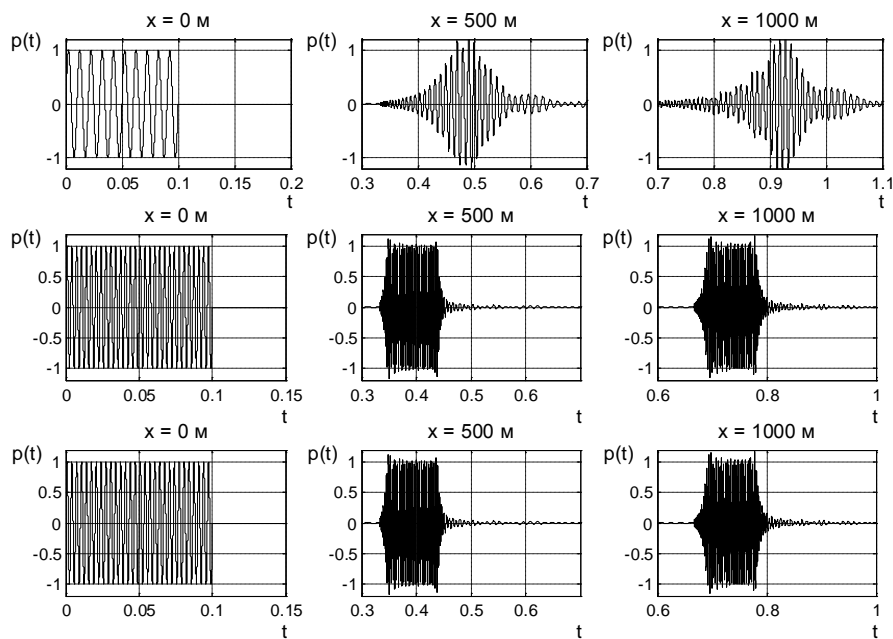


Рис.2. Акустичний імпульс в каналі на частоті $f = f_{кр}, 2f_{кр}, 3f_{кр}$

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 трьох-частотного звукопідводного зв'язку. При робочих частотах $f = f_{кр}, 2f_{кр}, 3f_{кр}$ (100 Гц, 200 Гц, 300 Гц) при максимальній дальності 1000 м. випромінений сигнал типу «ПС-1-0» прийнятий абонентом не приданий до передачі інформації. Для компенсації впливу дисперсії рекомендується використовувати частоти, що в три і більше раз перевищують критичну частоту хвилеводу, а також використовувати паузи, які не мають тонового заповнення між імпульсами в інформаційному сигналі. Це дозволить уникнути «заповзання» тону, що заповнює паузи на інформаційні складові сигналу. Крім того, необхідно враховувати надлишкову затримку, що сягає 890 мс на відстані в 1000 м для критичної частоти хвилеводу.

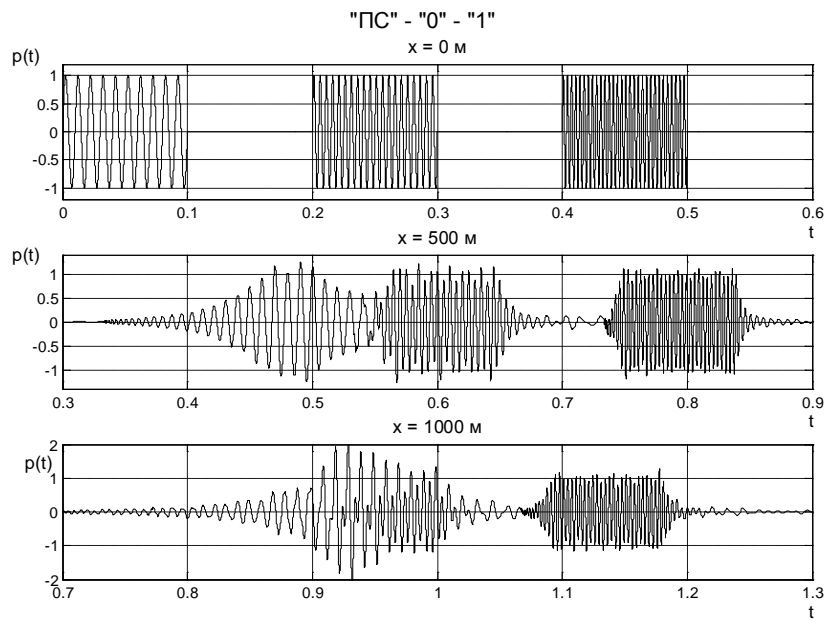


Рис.3. Сигнал «ПС-1-0» в каналі.

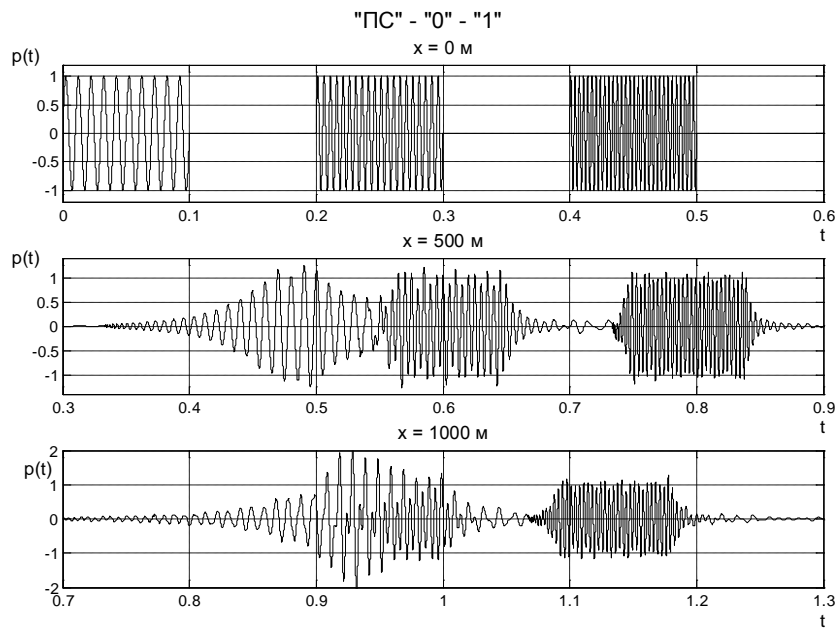


Рис.3. Сигнал «ПС - 1 - 0» в каналі.

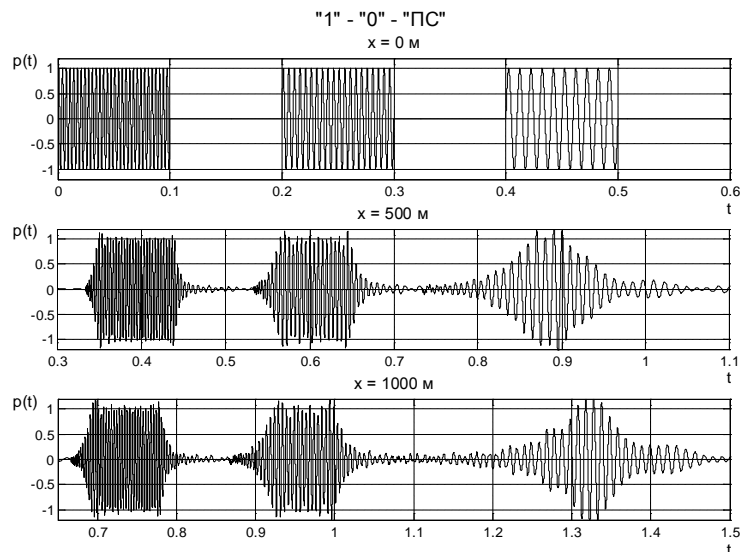


Рис.4. Сигнал «0 -1- ПС» в каналі.

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;
- надано рекомендації, які слід враховувати при розробці гідроакустичних засобів, що працюють в гідроакустичних каналах.

ЛІТЕРАТУРА

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