

## Акустические приборы и системы

УДК 681.883.45

**А.В. Коржик**, д.-р. техн. наук, **В.С. Дидковский**, д.-р. техн. наук, **Н.Д. Гладких**

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»,  
ул. Политехническая 16, г. Киев-56, 03056, Украина.

### Распространение звукового импульсного информационного сообщения в плоскопараллельном волноводе с идеальными границами

*В плоскопараллельном волноводе с идеальными стенками рассмотрено распространение акустического сигнала в виде кодовой импульсной последовательности одномодовой пространственной структуры. Для сообщения в виде одиночного и пары радиоимпульсов с разночастотным тональным заполнением выявлены и показаны особенности временных и вероятностных характеристик передачи в зависимости от соотношения частот заполнения импульсов сообщения. Оценка вероятностных особенностей проведена для битовой ошибки в условиях меняющейся помехосигнальной ситуации, в которой спектральная плотность мощности помехи представлена шумами моря в выбранном диапазоне частот. Выявлены и показаны особенности временных характеристик и скорости распространения одиночного импульсного акустического сигнала типа «радиоимпульс с тональным заполнением» из структуры упрощенного информационного сообщения с сопутствующей оценкой эффектов передачи энергии по каналу.*

Библ. 13, рис. 15.

**Ключевые слова:** гидроакустическая связь; гидроакустика; волновод; групповая скорость.

#### Введение

Известно [10], что передача информации – физический процесс, посредством которого осуществляется перемещение знаков (сведений, способных предоставлять информацию) в пространстве или осуществляется физический доступ субъектов к знакам - символам. В области задач разработки систем цифровой связи серьезной проблемой является определение и использование критерия производительности связи, алфавит которой состоит из конечного и известного абоненту набора возможных сигналов. Одним из таких критериев является вероятность ошибочного детектирования, определя-

емого вероятностью битовой ошибки  $P_b$  [4]. При этом основными причинами увеличения вероятности битовой ошибки  $P_b$  в системах связи являются следующие:

- последствия фильтрации в канале приема (среда – приемник - приемный тракт);
- межсимвольная интерференция вследствие неидеальной передаточной характеристики канала;
- помеховая обстановка в среде распространения информационного сообщения и помехи приемного тракта [4].

Организация звукоподводной кодовой связи, как одного, из важных приложений общих задач связи, в силу необходимости учета многообразия физических факторов, определяющих особенности распространения акустических сигналов в подводных звуковых каналах, представляется весьма своеобразной и сложной проблемой подводной акустической телеметрии, актуальность которой не вызывает сомнения. При этом поле и объем исследований модельных представлений волноводных каналов как нелинейных объектов [2], предполагает решение широкого круга комплексных задач формирования акустических полей в волноводах при распространении акустических импульсных сигналов и их последовательностей в условиях дисперсии. Среди множества работ, посвященных этой проблематике, отметим работы [3, 7-9, 12]. При этом в работах [5,7,9] рассмотрены некоторые дисперсионные особенности распространения в волноводном канале волнового пакета в виде одиночного импульса с тональным заполнением, а также указано на то, что при формировании и передаче информационного сообщения в виде кодовой последовательности, состоящей из фиксированного числа импульсов, следует ожидать потерь достоверности не только за счет деформации каждого из импульсов-составляющих сообщения в отдель-

ности, но и за счет деформации импульсов пачки-сообщения в целом. В основе таких искажений – межсимвольная интерференция, вызванная взаимным наложением импульсов, затягиванием фронтов и потерей формы огибающей исходного сообщения [5]. Очевидно, что ситуация еще более усложнится при введении в информационное сообщение отличных по частоте сервисных единиц-составляющих: в виде “пилот-сигнала” и “частотного заполнения пауз” между структурными единицами последовательности. В связи с этим, представляется целесообразным учесть влияние дисперсии на достоверность передаваемого полиимпульсного сообщения в виде пары радиоимпульсов, выбрав в качестве критерия достоверности - вероятность битовой ошибки  $P_b$ , а затем оценить особенности скорости передачи сообщения, представленного в виде упрощенного волнового пакета, указав при этом пути оценки скорости распространения полиимпульсного сообщения.

Заметим, что на сегодня остается открытым вопрос детальной, углубленной оценки групповой скорости как фактора переноса энергии вдоль оси волноводного канала. Это связано с тем, что часто даже любой радиоимпульс из состава кодового сообщения трудно считать узкополосным настолько, чтобы выполнялись условия о малости отличия частотных компонент, формирующих импульсное акустическое возбуждение волновода. Разнообразие мнений, толкований, подходов к применимости терминов и физических понятий для описания скорости передачи звуковой энергии по каналу волновыми пакетами, приводит к тому, что результаты расчетов по формализованному соотношению для групповой скорости  $V_{ngr}$  (приведенному, например, в источниках [6,7]:

$$V_{ngr} = c \sqrt{1 - \left(\frac{\omega_{nkr}}{\omega}\right)^2}, \text{ где } \omega_{nkr} = 2\pi f_{nkr} - \text{критиче-}$$

ская частота  $n$ -ой нормальной волны,  $\omega$  – текущая частота,  $c$  – скорость звука), не дают точной картины.

Таким образом, складывается ситуация, когда не только фазовая, но и групповая скорость не могут достоверно характеризовать процесс распространения звуковых импульсов в волноводных каналах. В связи с этим, цель исследований может быть определена как изучение особенностей влияния дисперсии на достоверность приема информационного импульсного сообщения, представленного волновым пакетом, с последующей оценкой временных характеристик, групповой скорости и особенностей

передачи энергии по каналу распространения импульсного акустического сигнала.

Моделирование и основные соотношения ситуации распространения импульсного информационного сообщения в волноводе с идеальными границами

Рассмотрим ситуацию распространения в плоскопараллельном волноводе с идеальными границами информационного сообщения, символы которого представлены парой радиоимпульсов (рис.1).

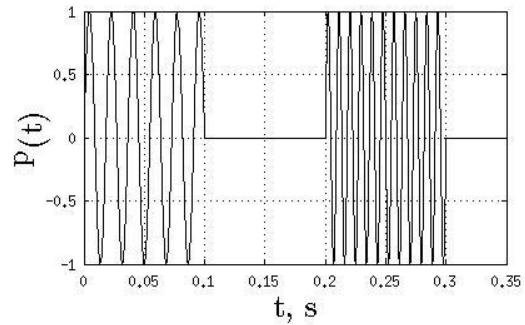


Рис. 1. Импульсы-символы информационного сообщения

При этом для оценки временных особенностей и групповой скорости в качестве объекта исследований выберем плоскопараллельный волноводный канал с абсолютно жесткими границами, в котором возможно распространение “импульсного представления” фиксированной моды колебаний со стандартной одномодовой пространственной структурой.

Пусть в плоскопараллельном волноводе с акустически жесткими границами (рис. 2) в сечении  $x=0$  задано распределение давления  $p(z,t)$ , отвечающее  $n$ -ой моде волновода и формируемое в виде акустических импульсов (то же справедливо и для одиночного импульса).

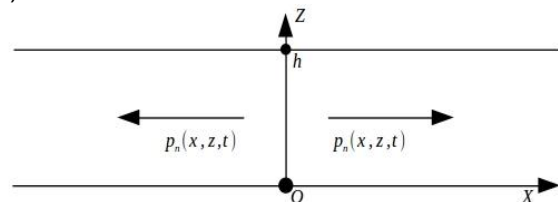


Рис. 2. Акустический канал, одномодовое возбуждение

Волновод заполнен идеальной жидкостью с плотностью  $\rho$  и скоростью звука  $c$ . Ширина волновода –  $h$ .

Акустическое возмущение  $p(z,x,t)$  распространяется в обе стороны от исходного сечения

$x=0$ . Симметричный характер поля относительно сечения  $x=0$  в дальнейшем будет учтен в определении фазовых соотношений при комплексном представлении поля, а для описания энергетических соотношений достаточным представляется рассмотрение поля волн распространяющихся в направлении возрастания координаты  $x$ :

Тогда, для каждого импульса – структурной единицы сообщения давление и колебательная скорость могут быть представлены соотношениями:

$$\begin{aligned} p_n(x, z, t) &= C_n \cos\left(\frac{n\pi z}{h}\right) e^{-i\omega t} e^{ikx}, \\ v_{nx}(x, z, t) &= \frac{1}{i\omega\rho} \frac{\partial p_n(x, z, t)}{\partial x} = \frac{k_n}{\omega\rho} C_n \cos\left(\frac{n\pi z}{h}\right) e^{-i\omega t} e^{ikx}, \\ v_{nz}(x, z, t) &= \frac{1}{i\omega\rho} \frac{\partial p_n(x, z, t)}{\partial z} = i \frac{k_n}{\omega\rho} C_n \frac{n\pi h}{z} \sin\left(\frac{n\pi z}{h}\right) e^{-i\omega t} e^{ikx}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $p_n(x, z, t)$  – давление для моды с номером  $n$ ;  $v_{nx}(x, z, t)$ ,  $v_{nz}(x, z, t)$  – компоненты колебательной скорости;  $C_n$  – некоторый коэффициент;  $k_n = k \sqrt{1 - \left(\frac{\omega_{nkr}}{\omega}\right)^2}$  – проекция волнового вектора  $k$  на ось  $Ox$  (волновое число моды  $n$ );  $k = \omega/c$  – модуль волнового вектора (волновое число);  $\omega_{nkr} = \frac{n\pi c}{h}$  – критическая частота  $n$ -й моды.

В тоже время импульсное представление формируемого импульсного сигнала в начальном сечении может быть записано соотношением [2, 9]:

$$p_n(x, z, t) = \begin{cases} C_n \cos\left(\frac{n\pi z}{h}\right) \sin(\omega_0 t) & t \in [0, \tau_i] \\ 0 & t \notin [0, \tau_i] \end{cases} \quad (2)$$

где  $\omega_0 = 2\pi f_0$ , где  $f_0$  – частота заполнения импульса,  $\tau_i$  – длительность импульса, которое с использованием конечного ряда Фурье в комплексной форме приводится к виду:

$$p_n(z, t) = \cos\left(\frac{n\pi z}{h}\right) \sum_{m=-M/2}^{m=M/2} D_m e^{i\omega t} \quad (3)$$

Каждая составляющая уравнения (3) образует в волноводе моду с номером  $n$  и с частотой  $\omega_m$  из ряда частот разложения  $\omega_m = m\omega_1$ , зависящей от размеров выборки  $M$ . При этом поле в волноводе с учетом выражений (1) –  $p_n(z, t)$  запишем как:

$$p_n(z, t) = \cos\left(\frac{n\pi z}{h}\right) \sum_{m=-M/2}^{m=M/2} D_m e^{i\omega t} H(x, z, m). \quad (4)$$

где с использованием результатов работы [3]

$H(x, z, m) = \cos\left(\frac{n\pi z}{h}\right) e^{-i\gamma_m x}$  – комплексная частотная характеристика волновода для которой постоянная распространения  $m$ -ой частотной составляющей  $\gamma_m$  имеет вид:

$$\gamma_m = \frac{\omega_m}{c} \sqrt{1 - \left(\frac{\omega_{nkr}}{\omega_m}\right)^2}. \quad (5)$$

Приведенные положения, безусловно, справедливы и для других типов граничных условий. Так, использование акустически мягких границ приводит к подобным соотношениям с тем отличием, что в выражениях (1) для  $p_n(x, z, t)$  и  $V_{nx}(x, z, t)$  множитель  $\cos\left(\frac{n\pi z}{h}\right)$  должен быть изменен на  $\sin\left(\frac{n\pi z}{h}\right)$ . Это же относится к выражениям (2), (3) и формуле для комплексной частотной характеристики волновода  $H(x, z, m)$ .

Оценка деформации волнового пакета, состоящего из одиночного радиоимпульса

Для моделирования ситуации распространения радиоимпульса с тональным заполнением в плоскопараллельных волноводах с акустически мягкими и акустически жесткими границами выберем нормальную волну с  $n=1$  для канала с критической частотой  $f_{nkr} = f_{1kr} = 50$  Гц. Длительность импульса выберем как  $\tau_i = 100$  мс, а частоты компонент кода, как  $f_{kr}$  и  $2f_{kr}$ . Точки наблюдения расположены на расстояниях  $x=0$  м; 50 м; 100 м. При этом достаточно ограничиться некоторым конечным числом коэффициентов ряда (4), которое не может быть больше  $2M-1$ .

Для определения числа членов разложения в ряд Фурье, воспользуемся соотношением для относительного среднеквадратичного отклонения [7]:

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\int_0^\tau p_n(z, t)^2 dt} \int_0^\tau \left[ p_n(z, t) - \cos\left(\frac{n\pi z}{h}\right) \sum_{m=-M/2}^{m=M/2} D_m e^{i\omega t} \right]^2 dt}$$

Вычислив по этому выражению относительное отклонение для случая  $M=1024$ , получаем значение  $\delta = 0.5\%$ , что полагаем весьма малым для выбранного числа членов суммирования.

Результаты численного моделирования ситуации деформации при распространении одиночного импульса из состава информационного

сообщения представлены на рис.3 для канала с акустически мягкими границами.

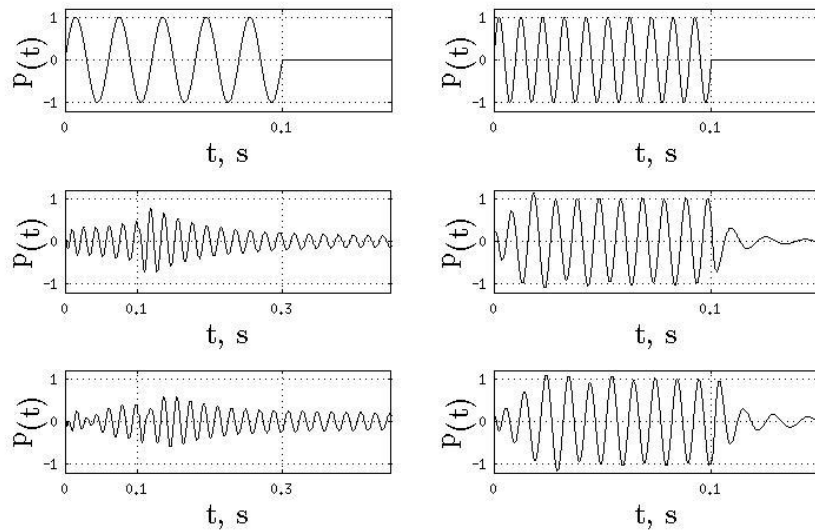


Рис. 3. Деформация импульса в волноводе  $f = [50,100]Гц, x = [0,50,100,200]м$

Как видно из результатов моделирования, наличие дисперсии в канале приводит к тому, что по мере удаления импульса от сечения  $x=0$  в пределах интервала восстановления – отличия в величинах фазовых скоростей распространения частотных компонент импульса увеличиваются, что способствует деформации сообщения. Отмечено также, что чем ближе частота заполнения импульса к критической ча-

стоте волновода, тем сильнее размытие фронтов импульса. Кроме того, с увеличением расстояния до точки наблюдения импульс затягивается по времени с одновременным увеличением величины задержки относительно временного интервала, соответствующего ситуации распространения такого же импульса в свободном пространстве (в отсутствие дисперсии).

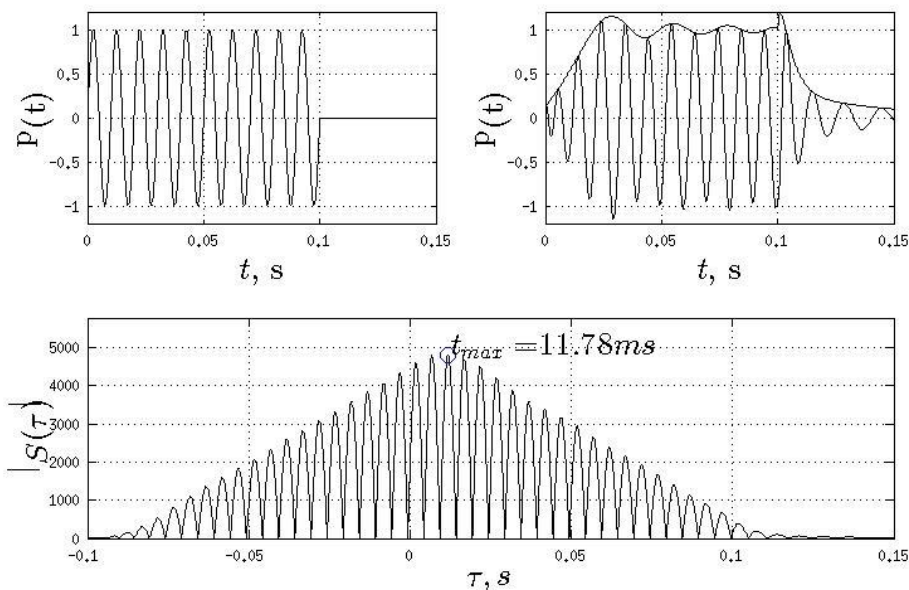


Рис. 4. Определение времени прихода сигнала

Для примера, в работе проведено математическое моделирование ситуации распространения звукового импульса, представленного радиоимпульсом с тональным заполнением частотой  $f_0 = 100 \text{ Гц}$  (рис. 3, рис. 4). Критическая частота волновода выбрана как  $f_{kr} = 50 \text{ Гц}$ , а длительность импульса  $\tau_i = \frac{N}{f_0} = 100 \text{ мс}$  ( $N$  – число периодов колебаний несущей частоты). Точка наблюдения размещена на расстояниях  $x = 0, 50, 100, 200 \text{ м}$  на оси волновода. Определение момента прихода импульса в точку наблюдения осуществлялось по вычислению максимума взаимно-корреляционной функции (ВКФ) опорного и прошедшего сигналов, формализованных в виде выражений (3), (4). Результаты расчетов времени прихода импульса в точку наблюдения  $x = 100 \text{ м}$  канала с критической частотой  $f_{kr} = 50 \text{ Гц}$  при работе на первой моде приведены на рис. 4. При этом исходный импульс содержал  $N = 10$  периодов, а деформированный затянутый по времени импульс в точке наблюдения характеризовался величиной  $N = 12 - 14$ . Максимум ВКФ (рис. 4) приходится на точку перехода через ноль 2-го периода сигнала, пришедшего в точку наблюдения. Такая точка перехода через ноль равнозначна обозначению начала опорного импульса и определяет задержку распространения по отношению к ситуации отсутствия дисперсии. Расчет положения максимума ВКФ для выбранных исходных расчетных данных показал значение  $t_{max} = 0,01178 \text{ с}$ .

Таким образом, полученные результаты говорят о том, что дисперсия в канале волновода оказывает существенное влияние на распространение сигналов, частотные составляющие которых существенно отличаются, а возникающие при этом изменения огибающей и временных характеристик сигнала затрудняют традиционную оценку групповой скорости. Заметим, что усложнение сообщения до нескольких импульсов кодовой последовательности, может привести к полной рассинхронизации сеанса связи и значительному увеличению битовой ошибки.

Оценка деформации волнового пакета, состоящего из пары радиоимпульсов

Пусть первый и второй импульсы исходящего ( $x = 0$ , рис. 1) информационного сообщения с учетом использованием конструкции (2) представлены в виде информационных символов кодового алфавита  $S_1(t)$  и  $S_2(t)$  как:

$$S_1(t) = \begin{cases} \sin(\omega_I t), & t \in [0, \tau_1] \\ 0, & t \notin [0, \tau_1] \end{cases}, \quad (6)$$

$$S_2(t) = \begin{cases} \sin(\omega_{II} t), & t \in [0, \tau_2] \\ 0, & t \notin [0, \tau_2] \end{cases},$$

где  $\tau_1, \tau_2$  – длительности соответствующих символов, которые в дальнейшем считаем одинаковыми  $\omega_I = 2\pi f_1$ ,  $\omega_{II} = 2\pi f_2$  – частоты заполнения (не исключая, в принципе, ситуации  $\omega_I = \omega_{II}$ ),  $T$  – интервал следования импульсов в последовательности). Условимся, что в соответствии с [4] представления прошедших по каналу символов (6), должны удовлетворять равенству:

$$\rho(\tau) = \frac{1}{E_b} \int_0^\tau \tilde{S}_1(t) \tilde{S}_2(t) dt \quad (7)$$

где  $\rho(\tau)$  – некоторая функция, характеризующая степень вероятностной взаимосвязи двух символов сообщения;  $\tilde{S}_1(t)$  – первый информационный символ,  $\tilde{S}_2(t)$  – второй информационный символ, которые вследствие дисперсии претерпели деформацию при прохождении по каналу от источника до некоторой точки наблюдения  $x_n$ ;  $E_b = \int_0^\tau \tilde{S}^2(t) dt$  – энергия одного символа;

Тогда в условиях изотропного шума со спектральной плотностью  $N_0$ , вероятность битовой ошибки  $P_b$  может быть, используя [4], определена по формуле:

$$P_b = Q\left(\sqrt{\frac{E_p(1-\rho)}{N_0}}\right) \quad (8)$$

где  $Q(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty e^{-t} dt$  – дополнительная функция ошибок Гаусса, аргументом которой выступает выражение  $x = \sqrt{\frac{E_p(1-\rho)}{N_0}}$ .

Очевидно, выражение (7) имеет смысл функции взаимной корреляции (ВКФ) с коэффициентом  $\rho(\tau)$ , для которой величина  $\tau$  определяется длительностью деформированного символа сообщения (6).

Соотношения частот заполнения импульсов сообщения  $f_1 < f_2$

Пусть несущие частоты символов сообщения соотносятся как  $f_1 < f_2$ . Результаты расчетов состояния составляющих сообщения в амплитудном представлении акустического давления  $p(t)$  для фиксированного положения точек наблюдения

$x = 0\text{ м}$ ,  $x = 22\text{ м}$ ,  $x = 474\text{ м}$ ,  $x = 600\text{ м}$ , значений частот  $f_1 = 55\text{ Гц}$ ,  $f_2 = 110\text{ Гц}$  в дисперсионных условиях, отвечающих исходным данным раздела, посвященного оценке деформации волнового пакета, состоящего из одиночного радиоимпульса, приведены на рис. 5

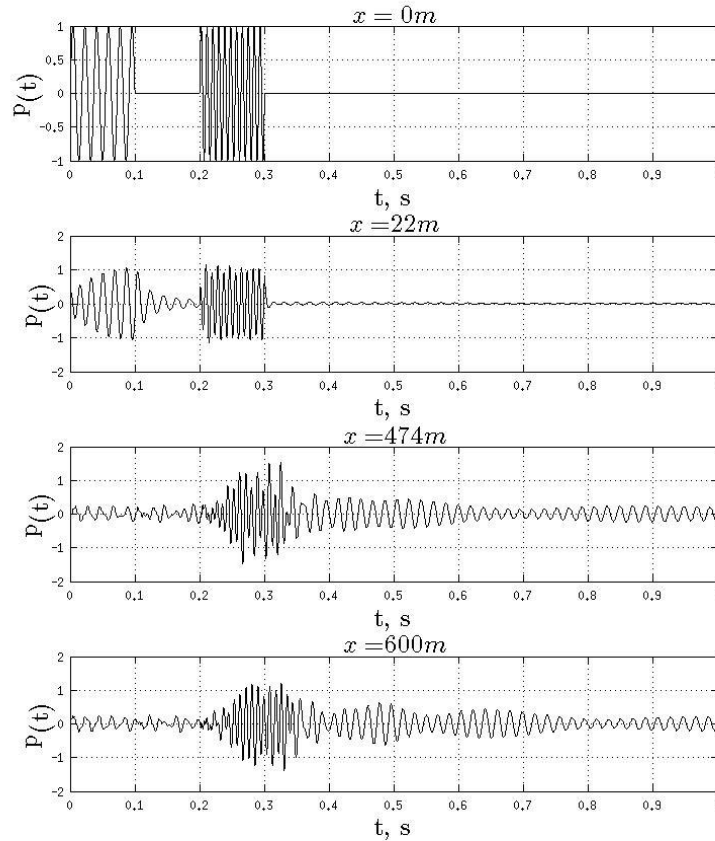


Рис. 5. Деформация сообщения в фиксированных точках наблюдения волноводного канала, возникающая вследствие дисперсии для  $f_1 = 55\text{ Гц}$ ,  $f_2 = 110\text{ Гц}$

Как видно из результатов моделирования, первый импульс сообщения постепенно догоняет второй импульс и в точке  $x = 474\text{ м}$  наблюдается их практически полное взаимное наложение. Кроме того, на дистанциях  $x > 474\text{ м}$  ( $x = 600\text{ м}$ ) первый импульс начинает опережать второй. Таким образом, мы имеем дело не только с дисперсионной деформацией каждой составляющей сообщения в отдельности и сообщения в целом, но также получаем суммарную сложную интерференционную картину результирующего давления в точке  $x = 474\text{ м}$ . Такой эффект приводит к практически полному разрушению сообщения и делает невозможным корректный прием исходной пачки импульсов на дистанциях  $x \geq 474\text{ м}$ .

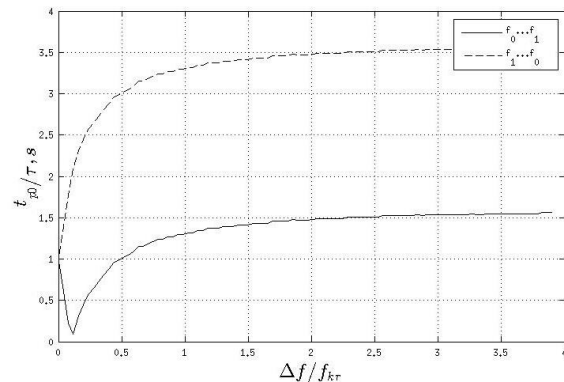


Рис. 6. Зависимости длительность паузы между деформированными импульсами пачки (кривая 1 – для случая  $f_1 > f_2$ , кривая 2 – для случая  $f_1 < f_2$ ) относительно с длительностью паузы исходного сообщения

Также иллюстрирует эту ситуацию приведенное на рис.7 изменение длительности паузы между деформированными импульсами пачки относительно с исходным недеформируемым сообщением в зависимости от разности частот  $f_1, f_2$ , отнесенной к критической частоте волновода на фиксированном расстоянии для  $f_1 < f_2$ . Как видно, минимум кривой 2 соответствует моменту наложения составляющих-символов сообщения. Дальнейшее продвижение по кривой 2 в сторону увеличения отношения разности частот к критической частоте волновода, показывает увеличение временного интервала между вторым импульсом сообщения и обогнавшим его – первым импульсом.

Не трудно заметить, что создавшаяся ситуация полного разрушения сообщения приведет к потере информации, что характеризуется определенной вероятностной ситуацией для которой определяемая соотношением (8) вероятность битовой ошибки  $P_b$  растет. При этом в области наложения составляющих сообщения, трудно ожидать равенства  $P_b$  единице из-за различных дисперсионных изменений длительностей разночастотных сигналов сообщения. Однако, при этом определяемое соотношением (7) значение ВКФ (рис. 7) увеличивается, стремясь к 1 ( $\rho(x) \rightarrow 1$ ). И на расстоянии  $x \approx 474\text{м}$   $\rho(x) = 1$ . При этом соответствующая битовая ошибка  $P_b$  в помеховых условиях, соответствующих среднестатистической шумовой обстановке мелкого моря [11] для выбранного при расчетах диапазона частот и представленная на рис. 8, - должна быть наибольшей. По сути, на рис. 8 представлено семейство параметрических кривых (параметром является расстояние  $x$ ), а критерием ошибки вида  $P_b$  является степень крутизны графических зависимостей.

Действительно, вероятность  $P_b$  определенная в предложенных условиях является наибольшей (кривая 2) для расстояния  $x = 474\text{м}$  и зависит не только от дисперсионных особенностей, но и от соотношения сигнал/помеха (SNR).

Далее, с уменьшением  $x$  крутизна кривой вероятности  $P_b$  снижается (кривые 1), что говорит о том, что в данных расчетных условиях наиболее предпочтительной является ситуация приема сообщения на расстояниях до 474 м.

Увеличение дистанции приема показывает, возможность отдельного наблюдения символов информационного сообщения (кривая 3), однако при этом информационный смысл исходного сообщения полностью потерян.

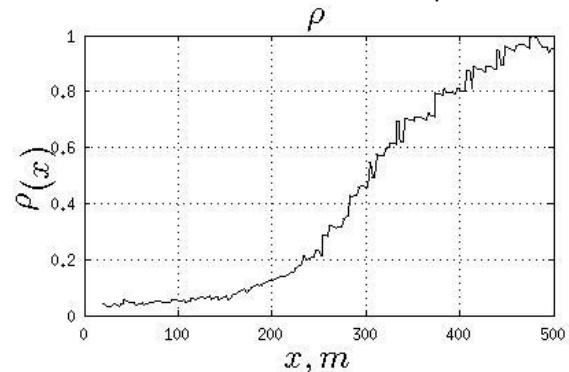


Рис. 7. Зависимость  $\rho_\tau \rightarrow \rho_x$  в точках наблюдения  $x$

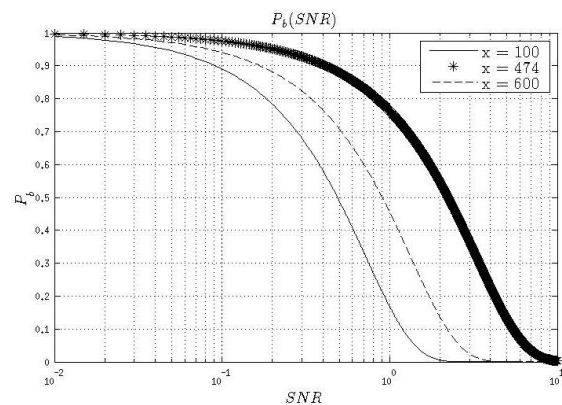


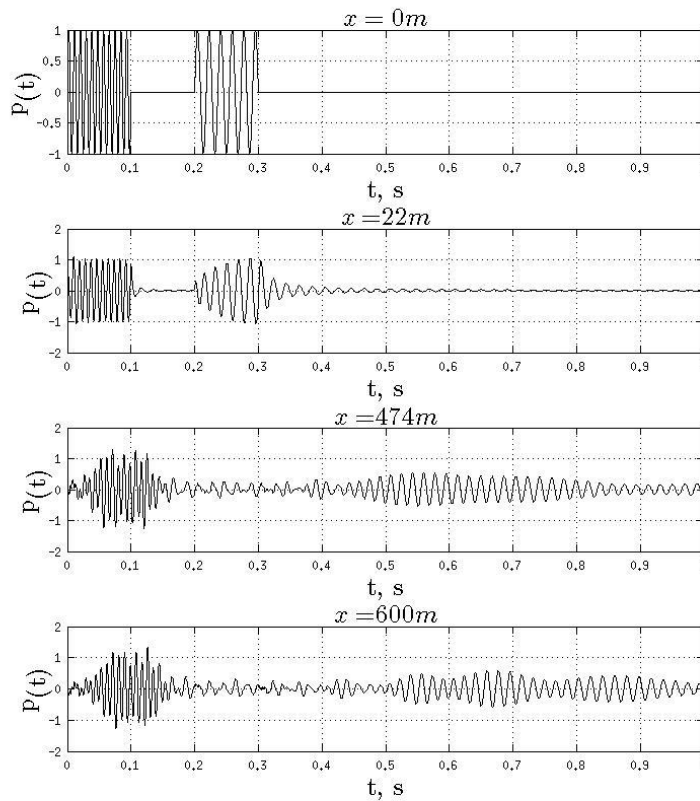
Рис. 8. Вероятность битовой ошибки в различных помеховых ситуациях (SNR – отношение сигнал/шум)

Соотношения частот заполнения импульсов сообщения  $f_1 > f_2$

Пусть несущие частоты символов сообщения соотносятся как  $f_1 > f_2$ . Результаты расчетов состояния составляющих сообщения в амплитудном представлении акустического давления  $p(t)$  для фиксированного положения точек наблюдения

$x = 0\text{м}, x = 100\text{м}, x = 474\text{м}, x = 600\text{м}$ , значений частот  $f_1 = 110\text{ Гц}, f_2 = 55\text{ Гц}$  в дисперсионных условиях, отвечающих исходным данным раздела, посвященного оценке деформации волнового пакета, состоящего из одиночного радиоимпульса, приведены на рис. 9.

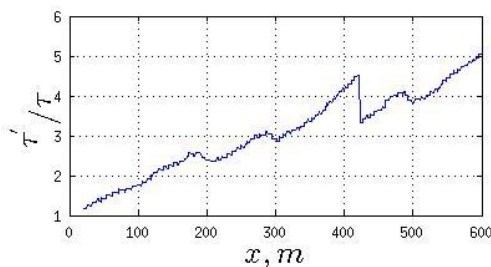




**Рис. 9. Деформация сообщения в фиксированных точках наблюдения волноводного канала, возникающая вследствие дисперсии для  $f_1 = 110 \text{ Гц}, f_2 = 55 \text{ Гц}$**

Как видно, с ростом  $x$  интервал между составляющими сообщения увеличивается. При этом дисперсионные деформации импульсов и сообщения в целом сохраняются, а эффект наложения исчезает.

Когда величина интервала следования деформированных составляющих превышает величину  $\tau' = 2\tau$  ( $\tau$  – интервал следования символов исходного сообщения) – сообщение разрушается, что исключает корректный прием исходной пачки импульсов на дистанциях  $x > 500 \text{ м}$ . Зависимость отношения  $\tau'/\tau$  от расстояния до точки наблюдения  $x$  приведена на рис. 10.



**Рис. 10. Зависимость относительного интервала следования составляющих сообщения от расстояния до точки наблюдения  $x$**

В отличие от случая наложения составляющих ( $f_1 < f_2$ ) вероятность битовой ошибки составит 0,5 поскольку теряется лишь один из символов сообщения.

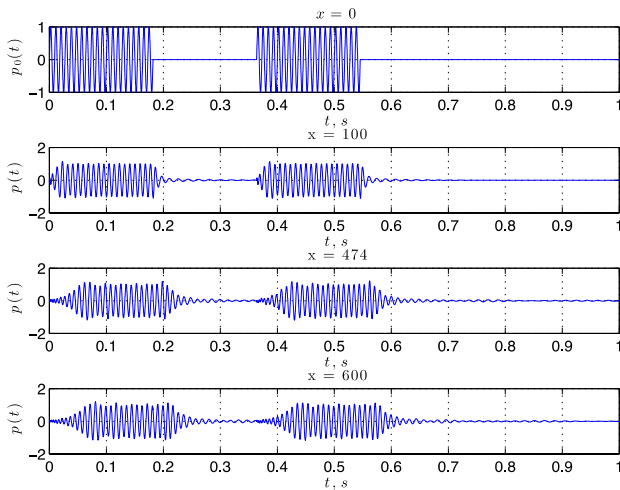
Соотношения частот заполнения импульсов сообщения  $f_1 = f_2$

Пусть несущие частоты символов сообщения соотносятся как  $f_1 = f_2 = f_{кр}$ . Результаты расчетов состояния составляющих сообщения в амплитудном представлении акустического давления  $p(t)$  для фиксированного положения точек наблюдения  $x = 0 \text{ м}, x = 100 \text{ м}, x = 474 \text{ м}, x = 600 \text{ м}$ , значений частот  $f_1 = f_2 = 110 \text{ Гц}$  в расчетных дисперсионных условиях, приведены на рис. 11.

Очевидно, что в случае равенства частот заполнения символов сообщения в выбранных расчетных условиях – деформации составляющих сообщения и сообщения в целом будут одинаковыми. При этом отдельное наблюдение составляющих сообщения сохраняется для любых расстояний, а его степень деформации определится свойствами канала, значением ча-



стоты заполнения, длительностью элемента сообщения, а также особенностями переноса энергии по каналу элементом сообщения. Вероятность битовой ошибки в этом случае определяется дисперсионными деформациями отдельных составляющих и помехо-сигнальными условиями.



**Рис. 11. Деформация сообщения в фиксированных точках наблюдения волноводного канала, возникающая вследствие дисперсии для  $f_1 = f_2 = 110$  Гц**

**Групповая скорость и скорость распространения импульсного сигнала**

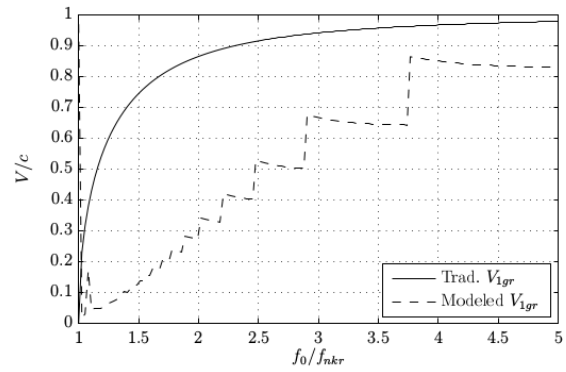
В соответствии с результатами расчетов и данных рис. 4, скорость распространения импульсного сигнала вдоль оси волновода  $V_{gp}$  (которую можно трактовать как некую трансформированную групповую скорость, сохраняя далее по тексту соотношение  $V = V_{gp} = V_{ngr}$ ) составит:

$$V = \frac{x}{t_{max} + \frac{x}{c}} = 1274,75 \frac{M}{c}. \quad (9)$$

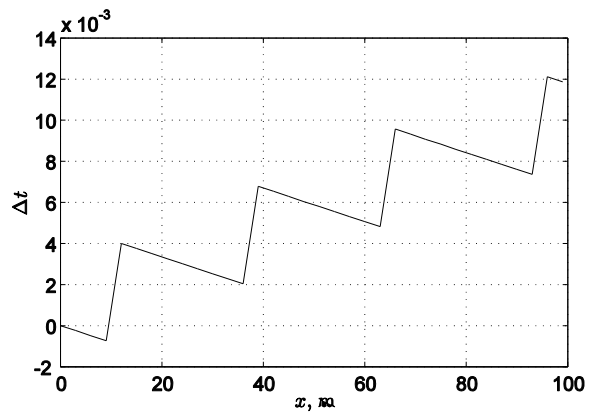
Для двухчастотного сообщения в виде первой нормальной волны ( $n=1$ ) зависимость групповой скорости  $V_{ngr}$  от частоты в диапазоне значений  $\frac{\omega_0}{\omega_{kr}} \in [1;5]$  приведена на рис. 12.

На рис. 13 приведена зависимость избыточного времени задержки импульсного сигнала от расстояния до точки наблюдения в диапазоне дистанций  $x \in [0;100]m$ . Под избыточным временем задержки подразумевается величина:

$$\Delta t(x) = t_{com}(x) - \frac{x}{c}, \quad (10)$$



**Рис. 12. Частотная зависимость групповой скорости распространения импульсного сигнала  $V_{1gr}$  в регулярном плоскопараллельном волноводе (мода 1,  $N=1$ )**



**Рис. 13. Зависимость избыточной задержки распространения от расстояния до приёмника**

где  $t_{com}(x)$  – время прихода сигнала в точку с координатами  $x$ .

Как видно из результатов моделирования учет наличия частотных компонент сообщения показывает ступенчатый характер изменения  $V_{1gr}$  с ростом частоты. Такие дисперсионные эффекты в виде своеобразных наклонных участков и чередующихся локальных максимумов и минимумов, требуют определенных комментариев. Приведем их, исходя из ситуации распространения в регулярном плоскопараллельном волноводе с жесткими стенками первой нормальной волны, формируемой как двухчастотное сообщение.

Классическое определение групповой скорости [6,9] предлагает трактовать групповую скорость (или скорость переноса энергии в гармонической волне) как отношение среднего за период потока мощности (интенсивности) к средней по объему плотности энергии. Поясним

особенности полученных зависимостей, используя терминологию интенсивности.

Используя уравнения (1), рассмотрим энергетические характеристик волнового пакета представленного в виде двухчастотного сигнала с компонентами  $\omega_I, \omega_{II}$ , имеющими амплитуды  $C_n^I, C_n^{II}$ . Представим нормальную волну  $p_n(x, z, t)$  в виде суперпозиции двух плоских волн:

$$p_n(x, z, t) = p_1 + p_2 \quad (11)$$

которые распространяются под одинаковыми углами к оси волновода  $\theta_n$  рис. 14.

Эти волны (волны Бриллюэна) [6, 9] имеют фазовую скорость, не зависящую от номера моды, однако значение угла  $\theta_n$  зависит от  $n$ . Таким образом, каждому значению  $\omega_I, \omega_{II}$  соответствуют свои углы  $\theta_n^I, \theta_n^{II}$ . Тогда для некоторой нормальной волны с частотой  $\omega$  и амплитудой  $C_n$ , зная давление

$$p_n(x, z, t) = p_1 + p_2 = \left( \frac{C_n}{2} e^{-i(\omega t - \frac{n\pi z}{h} - kx)} \right) + \left( \frac{C_n}{2} e^{-i(\omega t - \frac{n\pi z}{h} - kx)} \right) \quad (12)$$

и компоненту колебательной скорости:

$$W_{xn}^I(x, z, t) = \frac{(k_n^I(C_n^I)^2)}{2\omega_I\rho} \cos^2(\omega_I t - k_n^I x) \cos^2(k^I \cos(\theta_n^I) z), \quad (15)$$

$$k_n^I = k^I \sqrt{1 - \left( \frac{\omega_{nkr}}{\omega_I} \right)^2}, \quad \omega_I = \frac{\omega_{nkr}}{\cos(\theta_n^I)}, \quad k^I = \frac{\omega_I}{c}.$$

$$W_{xn}^{II}(x, z, t) = \frac{(k_n^{II}(C_n^{II})^2)}{2\omega_{II}\rho} \cos^2(\omega_{II} t - k_n^{II} x) \cos^2(k^{II} \cos(\theta_n^{II}) z), \quad (16)$$

$$k_n^{II} = k^{II} \sqrt{1 - \left( \frac{\omega_{nkr}}{\omega_{II}} \right)^2}, \quad \omega_{II} = \frac{\omega_{nkr}}{\cos(\theta_n^{II})}, \quad k^{II} = \frac{\omega_{II}}{c}.$$

Суммарная плотность потока мощности  $W_{x\Sigma}$  для случая, когда выбранные нормальные волны распространяются в одном направлении вдоль оси  $OX$ , представляется равенством:

$$W_{x\Sigma} = W_{xn}^I + W_{xn}^{II} + 2\rho V_{xn}^I V_{xn}^{II} \quad (17)$$

а добавка  $2\rho c V_{xn}^I V_{xn}^{II} = \Delta W_{xn}^{(I,II)}$  приводится к виду:

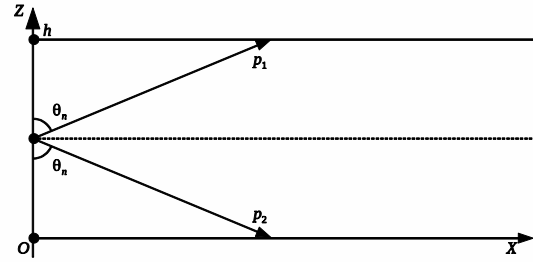


Рис. 14. Пример представления нормальной волны

$$V_{xn}(x, z, t) = \left( \frac{k_n C_n}{2\omega\rho} e^{-i(\omega t - \frac{n\pi z}{h} - kx)} \right) + \left( \frac{k_n C_n}{2\omega\rho} e^{-i(\omega t - \frac{n\pi z}{h} - kx)} \right) \quad (13)$$

можно отыскивать составляющую вектора плотности потока мощности вдоль оси волновода  $W_{xn}$ :

$$W_{xn}(x, z, t) = \Re[p_{nx}(x, z, t)]\Re[V_{xn}(x, z, t)];$$

$$W_{xn}(x, z, t) = \left( \frac{k_n C_n^2}{2\omega\rho} \cos^2(\omega t - k_n x) \cos^2\left(\frac{n\pi z}{h}\right) \right) \quad (14)$$

Для каждой пары волн Бриллюэна, определенных для частот  $\omega_I, \omega_{II}$  и соответствующих углов  $\theta_n^I, \theta_n^{II}$ , составляющие плотности потока мощности могут быть записаны как:

$$\Delta W_{xn}^{(I,II)} = 2\rho c V_{xn}^I V_{xn}^{II} = 2\rho c \Re[V_{xn}^I V_{xn}^{II}] =$$

$$= 2\rho c \left( \frac{k_n^I C_n^I}{2\omega_I\rho} \cos(\omega_I t - k_n^I x) \cos(k^I \cos(\theta_n^I) z) \right) \times$$

$$\times \left( \frac{k_n^{II} C_n^{II}}{2\omega_{II}\rho} \cos(\omega_{II} t - k_n^{II} x) \cos(k^{II} \cos(\theta_n^{II}) z) \right) \quad (18)$$

Суммарную интенсивность  $I_{x\Sigma}$ , как среднее за период значение плотности потока мощности, определим соотношением:

$$I_{x\Sigma} = W_{xn}^I + W_{xn}^{II} + W_{xn}^{(I,II)} \quad (19)$$

где период наблюдения для составляющей  $W_{xn}^I$  составит  $T_I = \frac{2\pi}{\omega_I}$ , для  $W_{xn}^{II}$  –  $T_{II} = \frac{2\pi}{\omega_{II}}$ , а для

$\Delta W_{xn}^{(I,II)}$  – период представим, как некоторую величину  $T_0$ , определяющую зону высокой корреляции сигналов с частотами  $\omega_I$  и  $\omega_{II}$  в области точки наблюдения. Действительно, некоторой паре частот можно поставить в соответствие величины углов формирования волн Бриллюэна, при которых две пары плоских волн одновременно поступают в область точки наблюдения (рис.15).

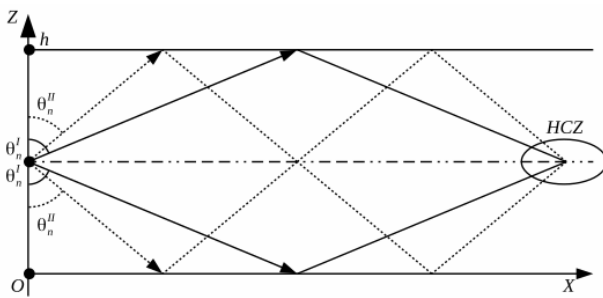


Рис. 15. Образование зоны высокой корреляции для двух пар волн Бриллюэна

Под HCZ имеется в виду зона высокой корреляции (High Correlation Zone). Суммарная интенсивность при этом будет:

$$I_{x\Sigma} = \frac{1}{T_1} \int_0^T \left( \frac{k_n^I(C_n^I)^2}{2\omega_I \rho} \cos^2(\omega_I t - k_n^I x) \cos^2(k^I \cos(\theta_n^I) z) \right) + \frac{1}{T_2} \int_0^T \left( \frac{k_n^{II}(C_n^{II})^2}{2\omega_{II} \rho} \cos^2(\omega_{II} t - k_n^{II} x) \cos^2(k^{II} \cos(\theta_n^{II}) z) \right) + \frac{1}{T_{np}} \int_0^T \left( \frac{k_n^I(C_n^I)^2}{2\omega_I \rho} \cos^2(\omega_I t - k_n^I x) \cos^2(k^I \cos(\theta_n^I) z) \right) \times \left( \frac{k_n^{II}(C_n^{II})^2}{2\omega_{II} \rho} \cos^2(\omega_{II} t - k_n^{II} x) \cos^2(k^{II} \cos(\theta_n^{II}) z) \right) dt \quad (20)$$

Интегралы (20) после преобразования сводятся к виду:

$$I_{x\Sigma} = \frac{k_n^I(C_n^I)^2}{2\omega_I \rho} \cos^2(k^I \cos(\theta_n^I) z) + \frac{k_n^{II}(C_n^{II})^2}{2\omega_{II} \rho} \cos^2(k^{II} \cos(\theta_n^{II}) z) + 2\rho c \frac{k_n^I(C_n^I)}{2\omega_I \rho} \frac{k_n^{II}(C_n^{II})}{2\omega_{II} \rho} \cos(k^I \cos(\theta_n^I) z) \cos(k^{II} \cos(\theta_n^{II}) z) \times \frac{1}{T_0} \int_0^T (\cos(\omega_I t - k_n^I x) \cos(\omega_{II} t - k_n^{II} x)) dt \quad (21)$$

Результаты интегрирования (интеграл в третьем слагаемом формулы (21) рассмотрим лишь для огибающей сигнала (разностной комбинационной частоты), представив их как:

$$\frac{1}{T_0} \int_0^T \cos(\omega_I t - k_n^I x) \cos(\omega_{II} t - k_n^{II} x) dt = \frac{\sin([\omega_I - \omega_{II}] T_0 - [k_n^I - k_n^{II}] x)}{2([\omega_I - \omega_{II}] T_0 - [k_n^I - k_n^{II}] x)} \quad (22)$$

Задавшись условием  $T_0 = \frac{2\pi}{\omega_I - \omega_{II}}$ , упростим

функцию в правой части представления (22):

$$\frac{\sin([\omega_I - \omega_{II}] T_0 - [k_n^I - k_n^{II}] x)}{2([\omega_I - \omega_{II}] T_0 - [k_n^I - k_n^{II}] x)} = \frac{\sin(k_n^I - k_n^{II} x)}{2(2\pi - (k_n^I - k_n^{II}) x)} \quad (23)$$

и укажем, что в силу свойств функции  $\sin(\dots)$  числитель принимает значение 0 при  $x = \frac{p\pi}{k_n^I - k_n^{II}}$ ,  $p = 0; 1; 2; \dots$ ; значение +1 при  $x = \frac{\pi / 2 + 2p\pi}{k_n^I - k_n^{II}}$  и значение -1 при  $x = \frac{3\pi / 2 + 2p\pi}{k_n^I - k_n^{II}}$ .

При этом знакопеременная добавка  $\langle \Delta W_{xn}^{I,II} \rangle$  показывает возникновение дополнительного знакопеременного потока и обуславливает возможное изменение направления распространения энергии. В ряде работ [3, 12] такая переориентация дополнительного потока ассоциируется с ситуацией возможного движения акустической энергии по замкнутому контуру с образованием вихря.

Таким образом, даже в случае формирования лишь двухчастотного сообщения в канале образуются области, в которых возможно приращение, уменьшение либо постоянство значенной интенсивности. При этом, существование в векторном поле акустической интенсивности локальных участков ситуации влияния на суммарную интенсивность знакопеременной добавки  $\langle \Delta W_{xn}^{I,II} \rangle$  предполагает создание локальных областей оттока энергии (изменения направления потока на противоположное), связанного с этим локального уменьшения скорости распространения импульса и (как следствие) временной задержки импульсного сигнала (рис 13).

Кроме того, максимизация интеграла (22) возможна при совпадении аргументов подынтегральных функций по фазе. Формально, сам интеграл (21) есть ВКФ двух разночастотных волн, возникновение и протяженность зоны высокой корреляции, для которой определится пространственной длительностью импульсов, а минимальное значение будет соответствовать поступлению в точку наблюдения одной из нормальных волн, представленными волнами Бриллюэна фиксированной частоты (угла). Значит, ситуация совпадения по времени прихода разночастотных нормальных волн в окрестность точки наблюдения  $x$ , которому в свою очередь соответствует увеличение добавки по интенсивности, должна приводить как к нарастанию интенсивности так и, соответственно, групповой скорости. Дальнейшее продвижение по каналу, либо изменение углов (частоты) приводит к расфазированию, уменьшению интенсивности и корреляции нормальных волн. Причем, в силу сохранения общей зависимости роста значения групповой скорости с увеличением частоты и периодичности в изменчивости интенсивности, картина “всплеск-снижение-всплеск” должна практически повторяться в виде ступеней, что и отражено на рис. 12. Добавим, что увеличение частоты (угла) приводит к стремлению волн Бриллюэна к оси канала, увеличению протяженности зоны высокой корреляции, а, значит, к более плавному расфазированию, дальнейшему сохранению огибающей, ее слабой деформации и уменьшению групповой скорости. В области частот  $\frac{\omega_0}{\omega_{kr}} > 5-6$  дисперсионная зависимость асимптотически стремится к значению скорости звука в жидкости, что соответствует классическим представлениям. Кроме того, исключение одной частотной компоненты или их малое отличие  $(\Delta\omega = |\omega_{II} - \omega_I| \ll \omega_{I,II})$ ,

( $\Delta k = |k_{II} - k_I| \ll k_{I,II}$ ) после несложных преобразований аргументов тригонометрических членов уравнений (20) – (22) приводит нас к привычному [6,9] трактованию групповой скорости вида  $\frac{\Delta\omega}{\Delta k}$ . Заметим так же, что отсутствие дисперсии исключает рассмотренные изменения в части фазовых и групповых скоростей, а также сопутствующей деформации импульсного кодового сообщения.

Таким образом, несоблюдение условия малости отличия частот  $\omega_I$  и  $\omega_{II}$ , которое традиционно определяет “групповую скорость”, приводит к трактовке ее применительно к широкополосным сигналам - как “скорость распространения импульса”, “техническая скорость” или “скорость распространения волнового пакета”. Безусловно, предложенное название трансформированной групповой скорости должно быть рассмотрено в контексте работ [1, 13], фактически являясь дискуссионным, и подлежит обсуждению заинтересованными исследователями.

## Выводы

В результате моделирования ситуации распространения в плоском волноводном канале одно- и двухчастотного импульсного информационного сообщения установлено, что выполнение условий построения сообщений вида  $f_1 < f_2$ ,  $f_1 > f_2$ ,  $f_1 = f_2$  при распространении по каналу обуславливает:

*При выполнении условия  $f_1 < f_2$ :*

- наличие дисперсии приводит не только к деформации самих импульсов, составляющих исходное сообщение, но и к возникновению аномалия вида “взаимное наложение” составляющих сообщения с последующим изменением порядка следования составляющих;
- вероятность битовой ошибки при этом стремится к наибольшему значению, однако не достигает единицы и изменяется в различных помеховых ситуациях.

*При выполнении условия  $f_1 > f_2$ :*

- наличие дисперсии приводит не только к деформации самих импульсов, составляющих исходное сообщение, но и к возникновению аномалия вида “расхождение” составляющих сообщения с потерей синхронизации и без изменения порядка следования;
  - вероятность битовой ошибки при этом стремится к значению 0.5 и зависит от степени деформации составляющих и значения SNR.
- При выполнении условия  $f_1 = f_2$ :

- наличие дисперсии приводит нас лишь к необходимости учета особенностей дисперсионной деформации составляющих сообщения, которая происходит без нарушения порядка следования и соответствующего разрушения сообщения;
- очевидно, что вероятность битовой ошибки при этом должна определяться степенью деформации составляющих и помеховой ситуацией.

Относительно особенностей распространения в волноводном канале одно- и двухчастотных составляющих сообщения установлено, что:

Наличие дисперсии в волноводном канале обуславливает не только изменение временных характеристик одноимпульсного сообщения (затягивание по длительности, размывка фронтов, задержка в распространении по сравнению с базовым сигналом), но и к деформации (в части огибающей) информационного сигнала, которая тем сильнее, чем больше отличие формирующих информационный сигнал частотных компонент  $\omega_I, \omega_{II}$ ;

Увеличение отличий компонент  $\omega_I, \omega_{II}$  приводит к существенному усложнению характера частотной зависимости групповой скорости. Такое усложнение связано с возникновением локальных максимумов и минимумов на частотной характеристике, наличие и характер которых (величина и протяженность) обусловлены совместным учетом:

- условий синфазности и расфазирования разночастотных нормальных волн в точках наблюдения на оси волновода;
- пространственных эффектов изменения направления взаимной составляющей суммарного потока мощности при работе с двухчастотным сигналом, которые условно определяют поле интенсивности в волноводе – как локально вихревое.

Расчетная ситуация показывает, что рассмотренные особенности формирования акустического поля импульсного сигнала в волноводном канале в силу меняющихся по длине канала пространственно-временных условий формирования суммарного потока мощности, предполагают использование вместо традиционного понятия “групповая скорость” – новой характеристики “скорость распространения импульса”, определяющей трансформированную групповую скорость и, соответственно, скорость переноса энергии импульсным акустическим сигналом.

#### Список использованных источников

1. *Sommerfeld A. Wave Propagation and Group Velocity.* / A. Sommerfeld, L. Brillouin., 1960.
2. *Kilfoyle D. B. The state of the art in underwater acoustic telemetry.* / D. B. Kilfoyle, A. B. Baggeroer. // IEEE Journal of Oceanic Engineering. – 2000. – №25. – С. 4–27.
3. *Mann J. A. Instantaneous and time-averaged energy transfer in acoustic fields.* / J. A. Mann, J. Tichy, A. J. Romano. // The Journal of the Acoustical Society of America. – 1987. – №82. – С. 17–30.
4. *Sklar B. Digital communications* / Boris Sklar. – NJ: Prentice Hall., 2001. – (2).
5. До питання про деформування різночастотного імпульсно-кодового акустичного сигналу в підводному звуковому каналі. / А. О. Безручко, В. С. Дідковський, Н. Д. Гладких, О. В. Коржик. // Системи обробки інформації. – 2015. – №10. – С. 12–15.
6. *Бреховских Л. М. Волны в слоистых средах* / Леонид Максимович Бреховских., 1957. – (Рипол Классик).
7. *Буланая М. А. Особенности распространения звукового импульсного сигнала в плоском регулярном волноводе* / М. А. Буланая, В. Т. Гринченко, В. Т. Мацыпура. // Акустичний Вісник. – 2008.
8. *Ластовенко О. Р. Моделирование передаточных и импульсных характеристик гидроакустических волноводов. Волновод с абсолютно отражающими границами.* / О. Р. Ластовенко, В. А. Лисютин, А. А. Ярошенко. // Акустичний Вісник. – 2007.
9. *Мелешко В. В. Теорія Хвилеводів* / В. В. Мелешко, В. Т. Мацыпура, А. Ф. Улітко. – Київ: Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет", 2013.
10. *Рид Р. Основы теории передачи информации* / Ричард Рид. – Москва: Издат. дом Вильямс., 2005.
11. *Урик Р. Д. Основы гидроакустики* / Роберт Дж. Урик. – Л: Судостроение, 1978.
12. *Щуров В. А. Вихри акустической интенсивности в мелком море.* / В. А. Щуров, В. П. Кулешов, А. В. Черкасов. // Акуст. журн.. – 2011. – №57. – С. 837–843.
13. *Элайсез М. Распространение волновых пакетов и частотно-зависимое внутреннее трение.* / М. Элайсез, Ф. Гарсия-Молинер // Физическая акустика. Принципы и методы. / М. Элайсез, Ф. Гарсия-Молинер. – М., 1972. – (5). – С. 192–253.

Поступила в редакцию 01 июня 2016 г.

УДК 681.883.45

**О.В. Коржик**, д.-р. техн. наук, **В.С. Дідковський**, д.-р. техн. наук, **Н.Д. Гладкіх**  
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,  
вул. Політехнічна 16, м. Київ-56, 03056, Україна.

## Розповсюдження звукового імпульсного інформаційного повідомлення в плоскопаралельному хвилеводі з ідеальними границями

*В плоскопаралельному хвилеводі з ідеальними стінками розглянуто розповсюдження акустичного сигналу у вигляді кодово-імпульсної послідовності одномодової просторової структури. Для повідомлення у вигляді одиночного і пари радіоімпульсів з різночастотним тональним заповненням виявлені і показані особливості часових і імовірнісних характеристик передачі в залежності від відношення частот заповнення імпульсів повідомлення. Оцінка імовірнісних особливостей проведена для бітової похибки в умовах перемінної завадо-сигнальної ситуації, де спектральна щільність потужності завади представлена шумами моря в обраному діапазоні частот. Виявлені і показані особливості часових характеристик і швидкості розповсюдження одиночного імпульсного акустичного сигналу типу "радіоімпульс з тональним заповненням" із структури спрощеного інформаційного повідомлення з оцінкою ефектів передачі енергії по каналу.*

Бібл. 13, рис. 15.

**Ключові слова:** гідроакустичний зв'язок; гідроакустика; хвилевід; групова швидкість.

UDC 681.883.45

**O. Korzhyk**, Dr.Sc., **V. Didkovskiy**, Dr.Sc., **N. Gladkikh**  
National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"  
vul. Polytehnichna 16, Kyiv-56, 03056, Ukraine.

## Propagation of sound pulse informational messages in planar waveguide with ideal boundaries

*Propagation of informational signal in the form of acoustic code-pulse sequence in the planar waveguide with ideal walls and spatial structure is observed. It is discovered and observed some time and bit-error probability peculiarities for the informational message as a single and a pair of radio pulses with frequency distribution in dependency of the frequency ratio of pulses. Evaluation of probabilistic features was made for bit-error in variable of conditions where noise spectral density power is represented by noise of the sea at the selected frequency range. It is discovered and mapped some peculiarities and temporal characteristics of the acoustic single pulse propagation velocity to the assessment of the effects of energy transfer through the channel. Ref. 13, Fig. 15.*

**Keywords:** hydroacoustic communication; sonar; waveguide group velocity.

### References

1. Sommerfeld, A., & Brillouin, L. (1960). Wave Propagation and Group Velocity.
2. Kilfoyle, D. B., & Baggeroer, A. B. (2000). The state of the art in underwater acoustic telemetry. Oceanic Engineering, IEEE Journal of, 25(1), 4-27.
3. Mann III, J. A., Tichy, J., & Romano, A. J. (1987). Instantaneous and time-averaged energy transfer in acoustic fields. The Journal of the Acoustical Society of America, 82(1), 17-30.
4. Sklar, B. (2001). Digital communications (Vol. 2). NJ: Prentice Hall.
5. Bezruchko, A. V., Didkovskiy, V. S., Gladkikh, N. D., & Korzhyk, O. V. (2015). On the deformation of frequency coded PCM acoustic signal underwater sound channel. Information processing systems. Information problems of the theory of acoustic, electronic and telecommunication systems, (10), 12-15.
6. Brekhovskikh, L. M. (1973). Waves in layered media. Ripol Classic.

- 
7. *Bulanaya, M. A., Vovk, I. V., Grinchenko, V. T., Matsypura, V. T.* (2008). Peculiarities of the sound pulse propagation in the planar regular waveguide. *Acoustics Bulletin*, (11), 9-23.
  8. *Lastovenko, O. R., Lisyutin, V. A., Yaroshenko, A. A.* (2007). Modeling of transfer and impulse responses of hydroacoustic waveguides. The waveguide with absolutely rigid boundaries. *Acoustics Bulletin*, (10), 59-69.
  9. *Meleshko, V. V., Matsipura, V. T., Ulitko, A. F.* (2013). Theory of waveguides.
  10. *Reed, Richard.* (2004). Fundamentals of Theory of Information Transmission. M: "Williams".
  11. *Urik, R.Dzh.* (1978). Basics of underwater acoustics. A: Shipbuilding.
  12. *Schurov, V. A., Kuleshov, V. P., Cherkasov, A. V.* (2011). Vortex properties of acoustic intensity in a shallow sea. *Acoustic magazine*, (57), 837-843.
  13. *Elaysez, M., Garcia-Moliner, F.* (1972). Distribution of wave packets and frequency dependent internal friction. In. *Physical Acoustics. The principles and methods*. V.5, pp.192-253.