





HP Pavilion 14-d1102dx  
14" диагональ экрана  
Intel Core™ i5-3210

# ЗВУК решает **все**

СИСТЕМА  **beatsaudio** и ГОД БЕСПЛАТНОЙ МУЗЫКИ  
ОТ UNIVERSAL MUSIC ТОЛЬКО НА КОМПЬЮТЕРАХ HP.

Купите компьютер HP для развлечений и присоединяйтесь  
к HP Music club<sup>1</sup>.

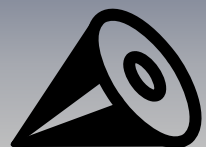
[hpmusic.ru](http://hpmusic.ru)

Everybody On 



CORE™ i5

Умный.  
И это видно.



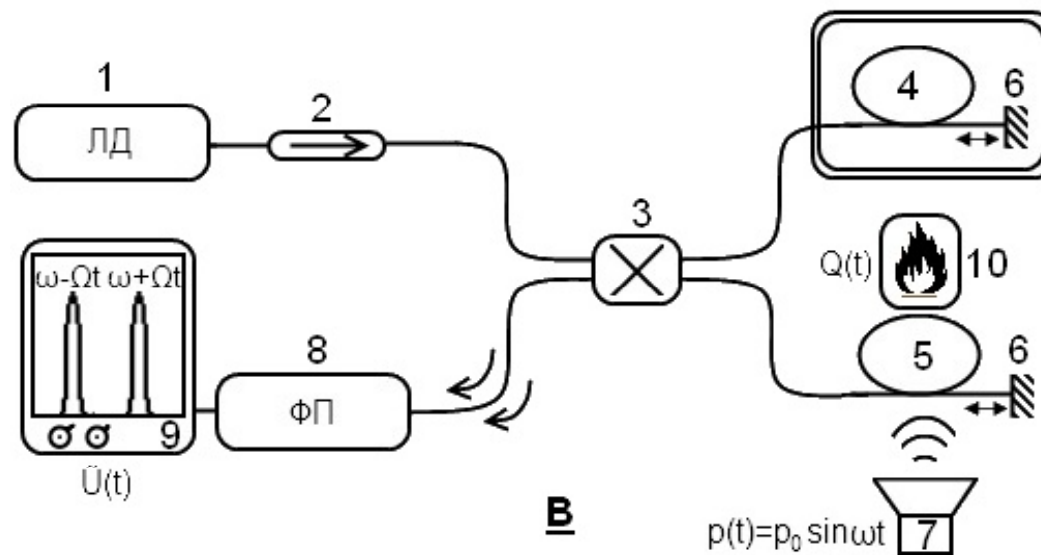
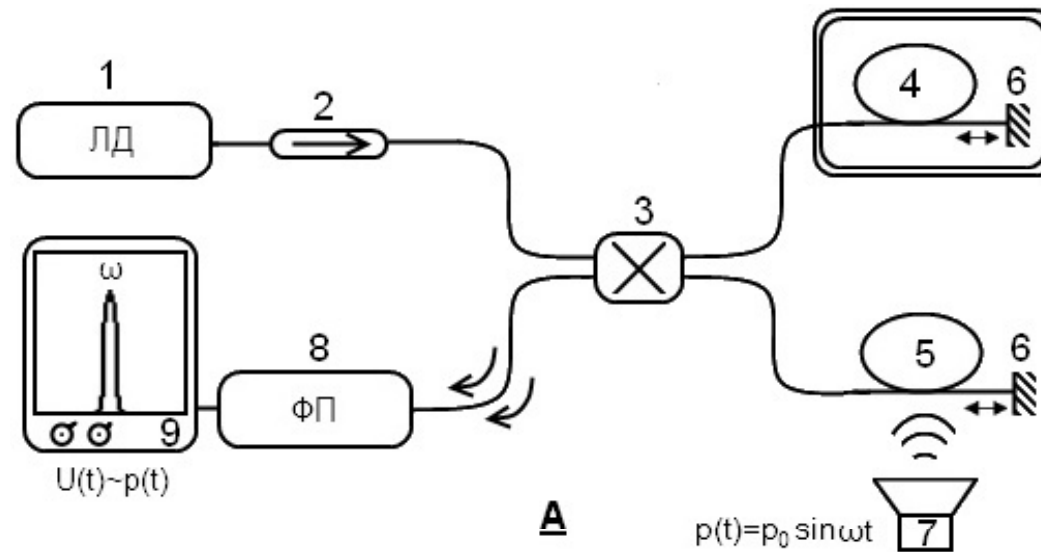
**НЦВО**

**ВКВО-2011**

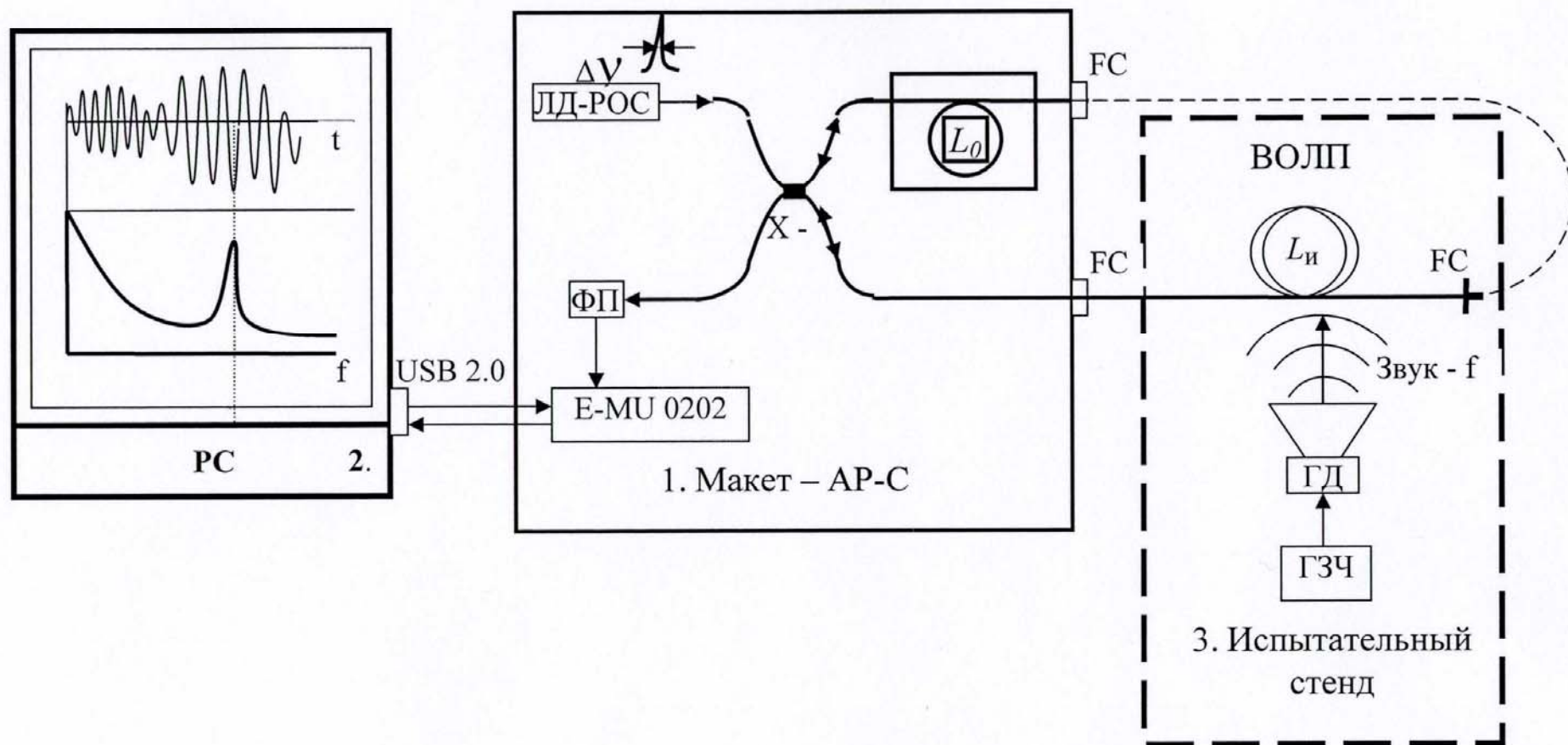
**ТЕРМОАКУСТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В  
ВОЛОКОННЫХ ИНТЕРФЕРОМЕТРАХ  
И ДАТЧИКИ НА ЕГО ОСНОВЕ**

**Беловолов М.И., Беловолов А.М., Дианов Е.М.,  
Туртаев С.Н.**

## Схема эксперимента



## Схема установки





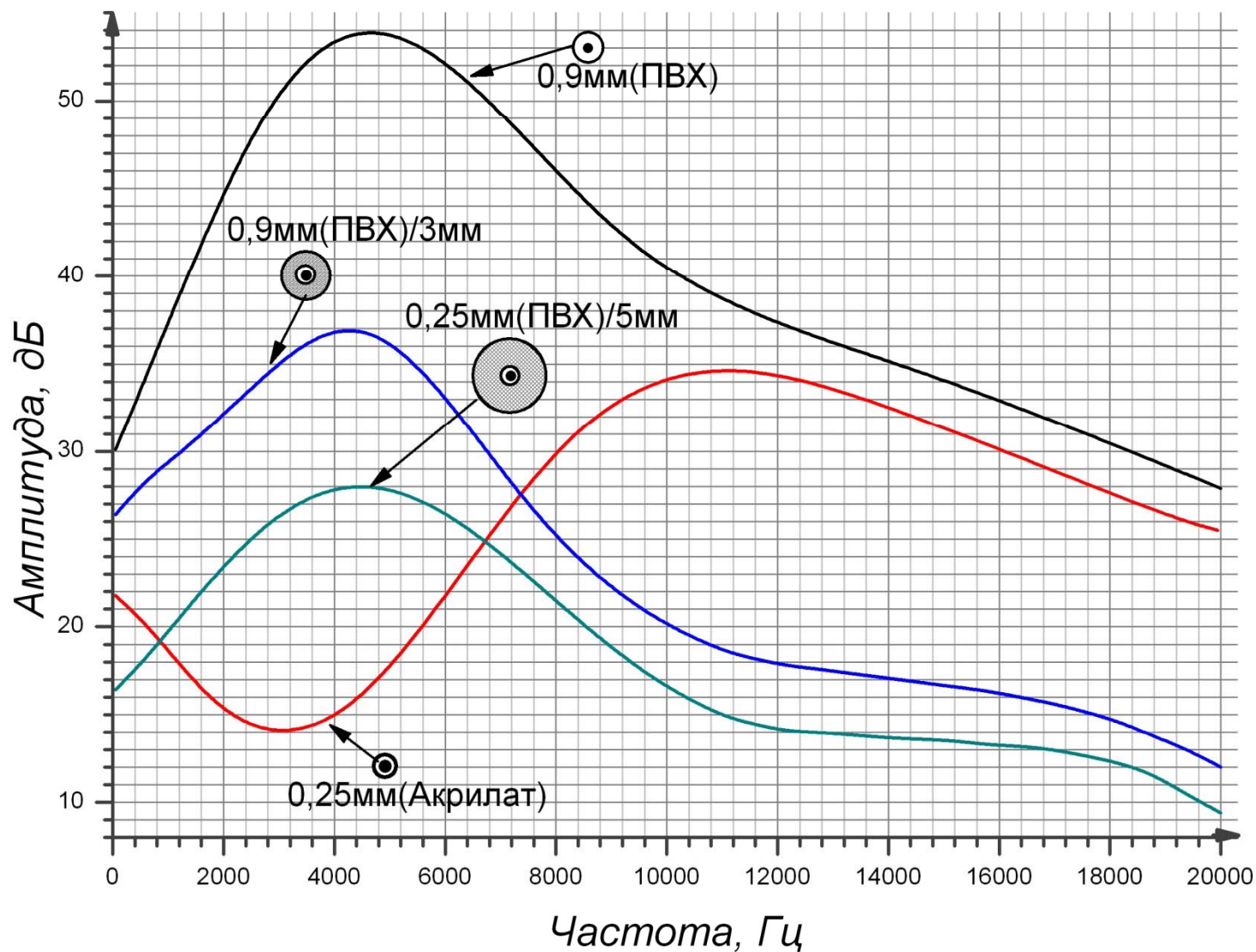






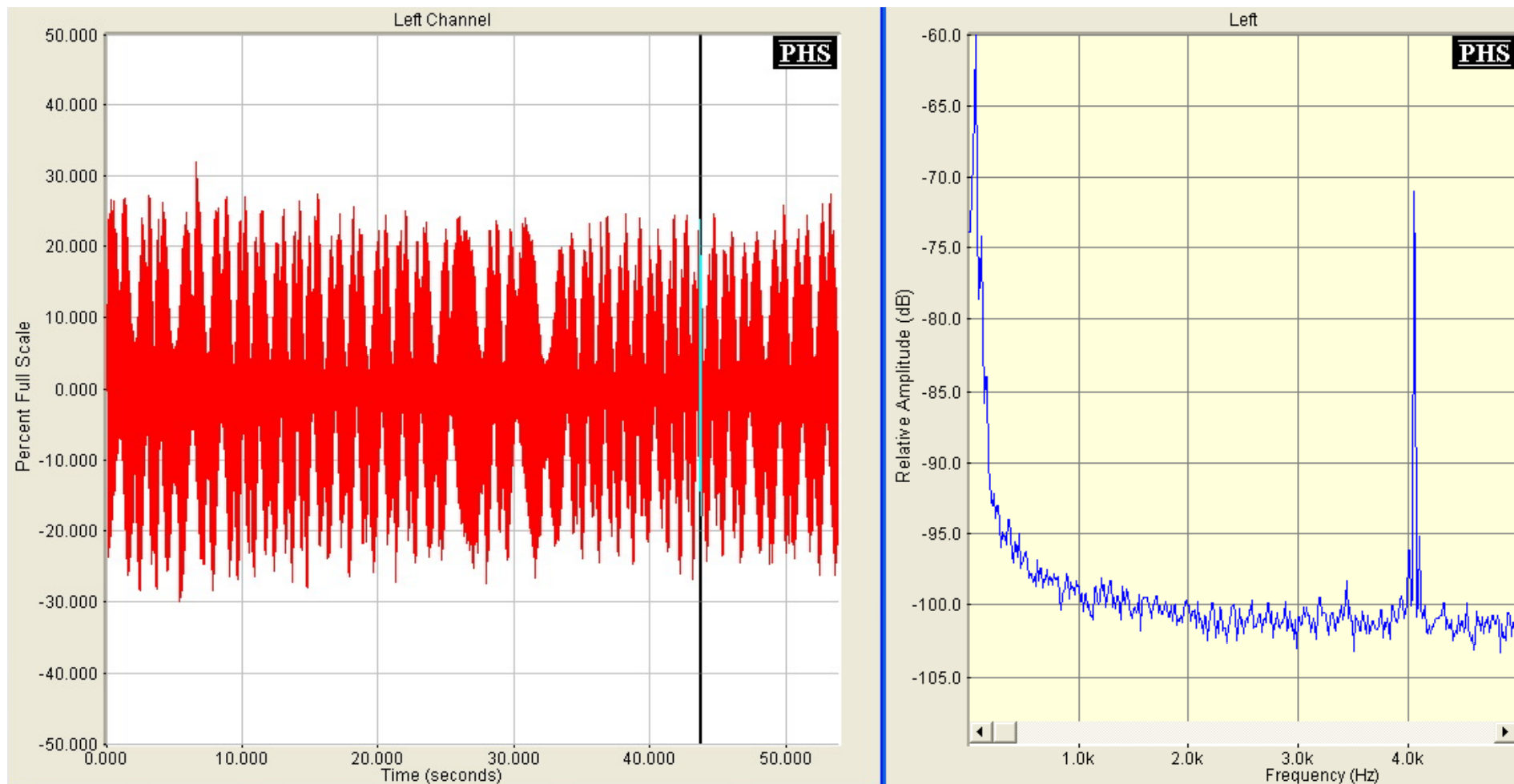


# Акустические АЧХ многовитковых элементов ( $\varnothing$ 10 см, L = 10 м) из типовых оптических волокон и кабелей

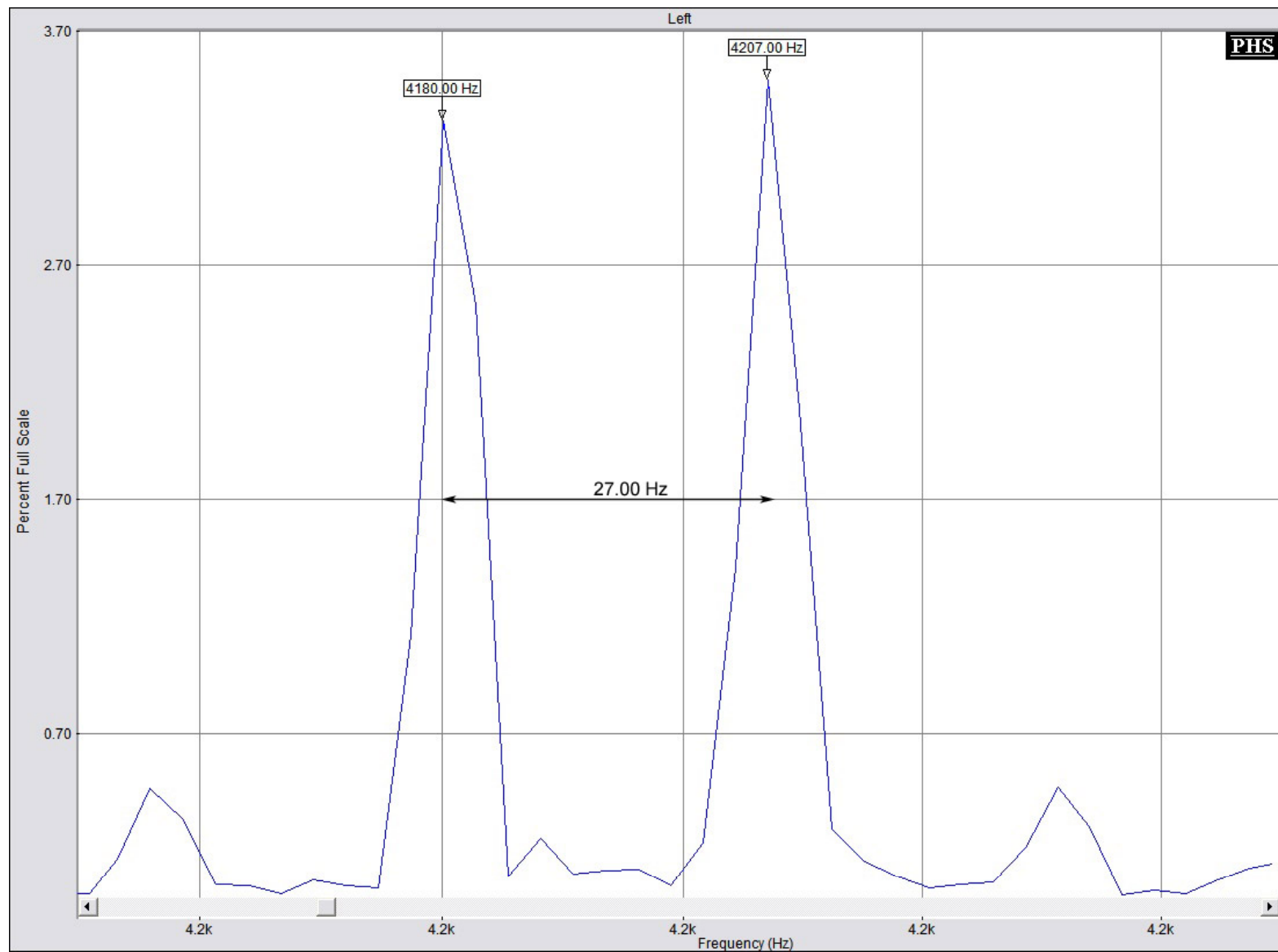




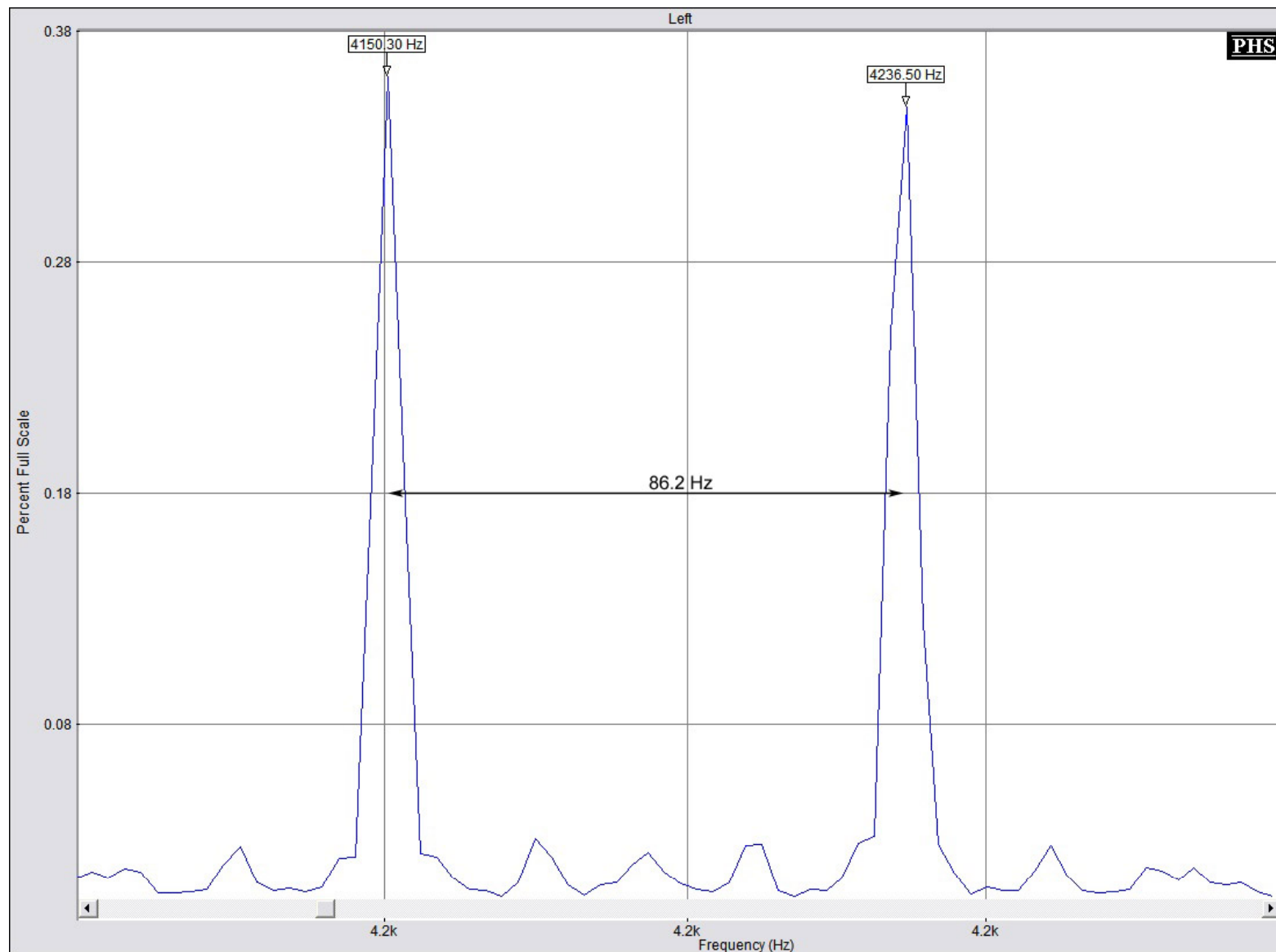
# Запись акустического сигнала при термоакустическом эффекте и мгновенный спектр звука на 4 кГц



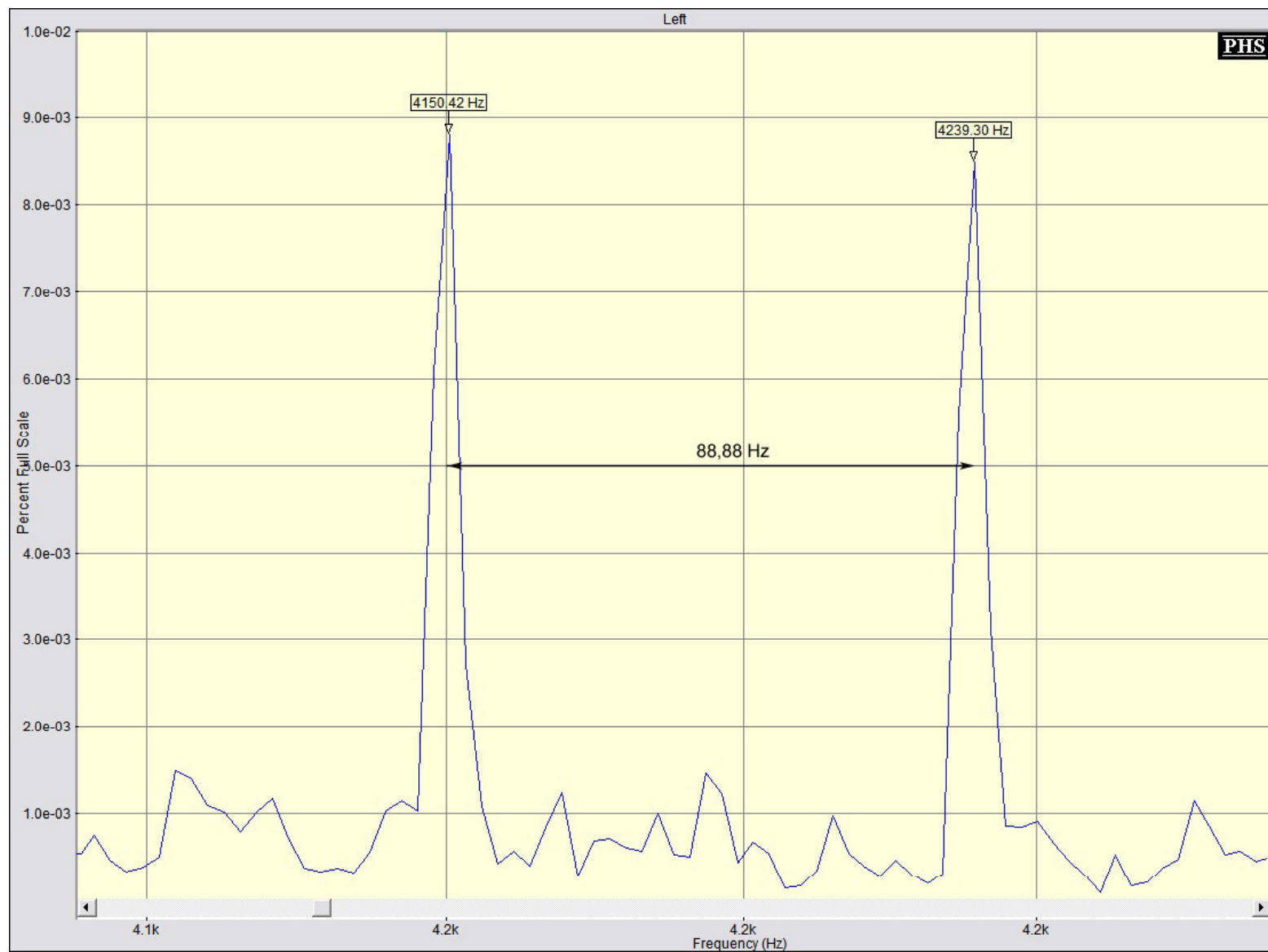
# Рука экспериментатора, поднесенная к виткам-датчикам



# Спичка, зажженная около витков-датчиков акустических сигналов

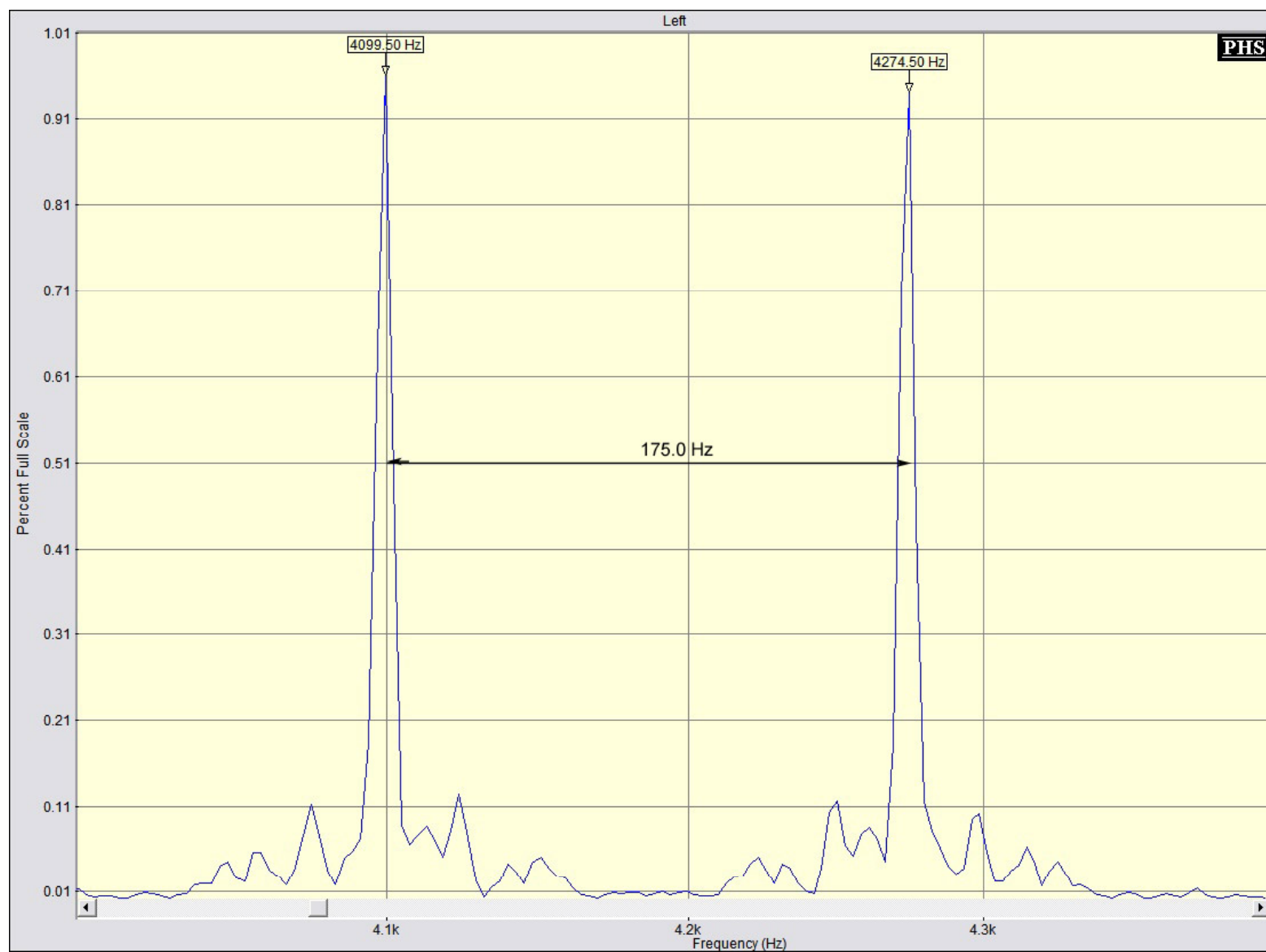


# ВОЛП – 1 (d = 250 мкм, акрилат)

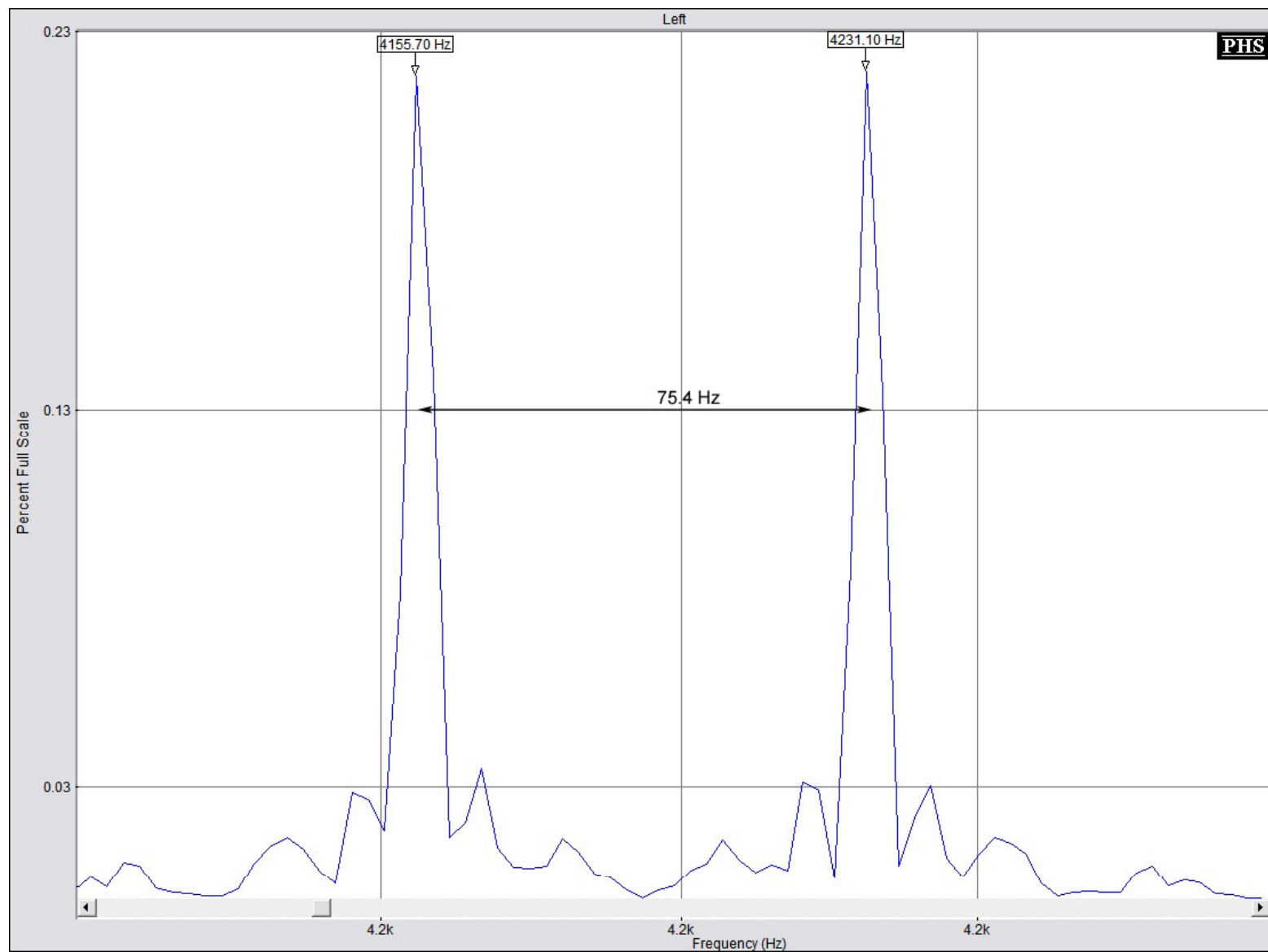




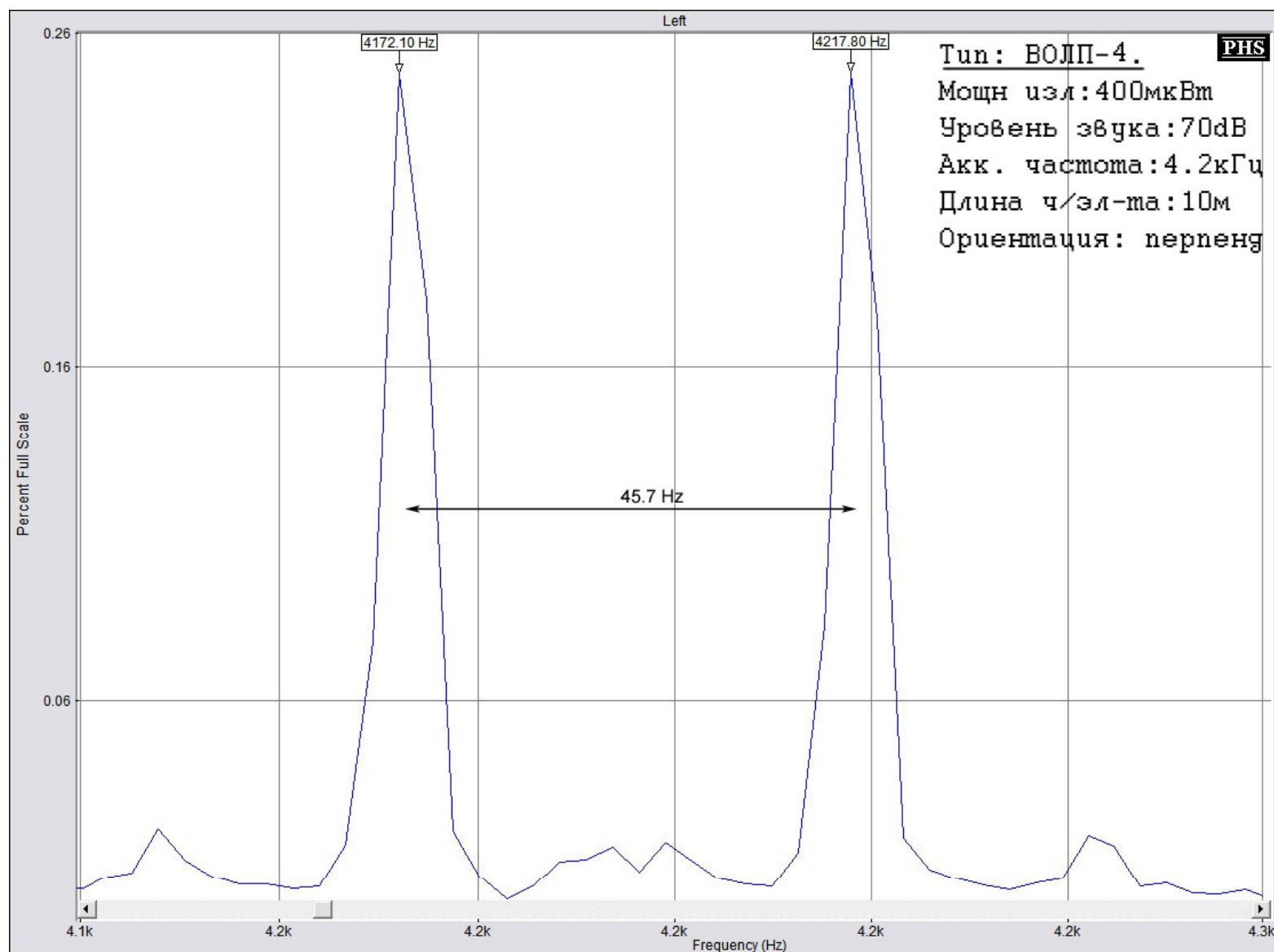
# ВОЛП - 2 (900 мкм, ПВХ)



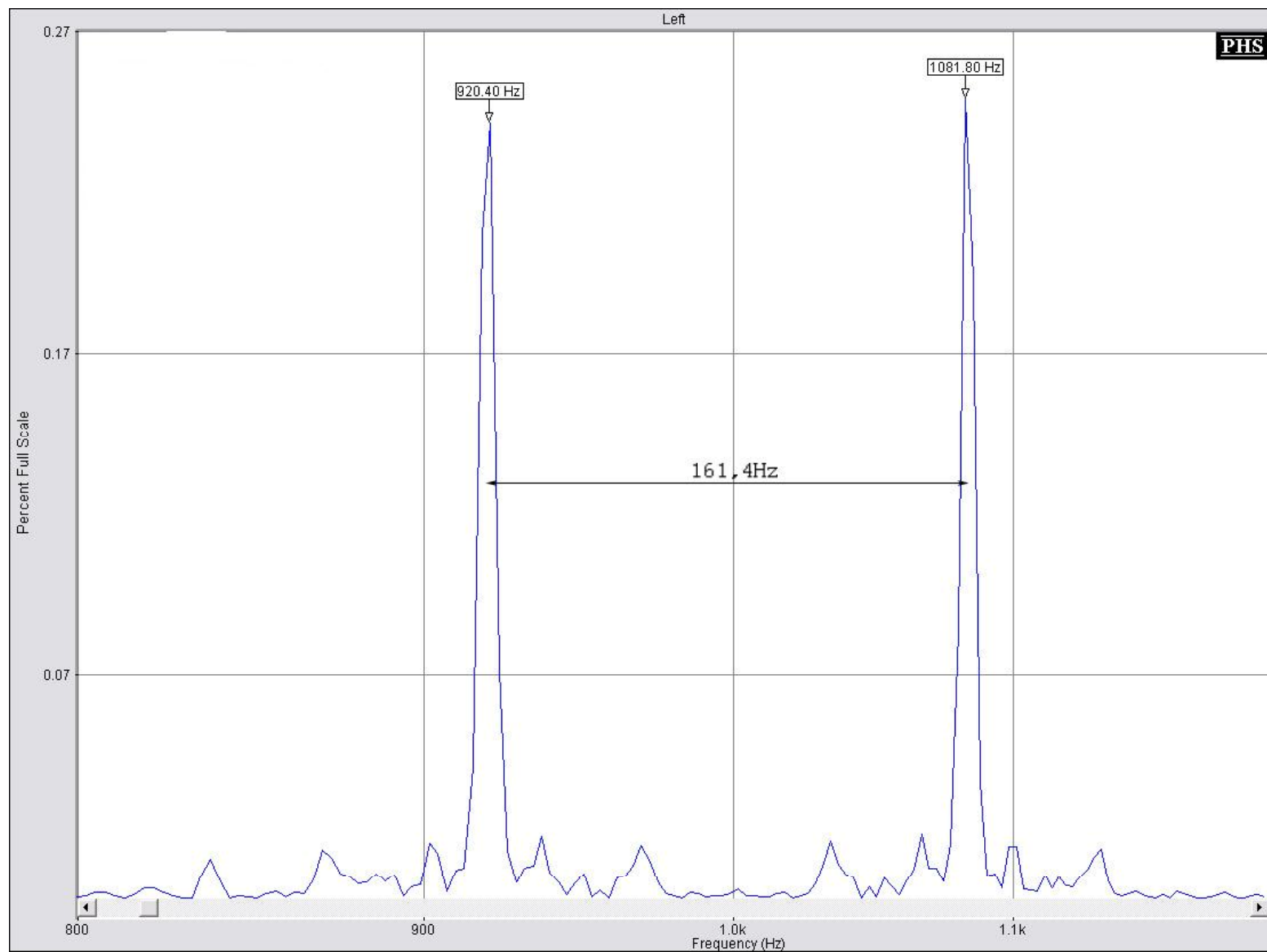
# ВОЛП-3 (900 мкм, ПВХ, кабель 3 мм)



# ВОЛП - 4 (900 мкм, ПВХ, кабель 5 мм)

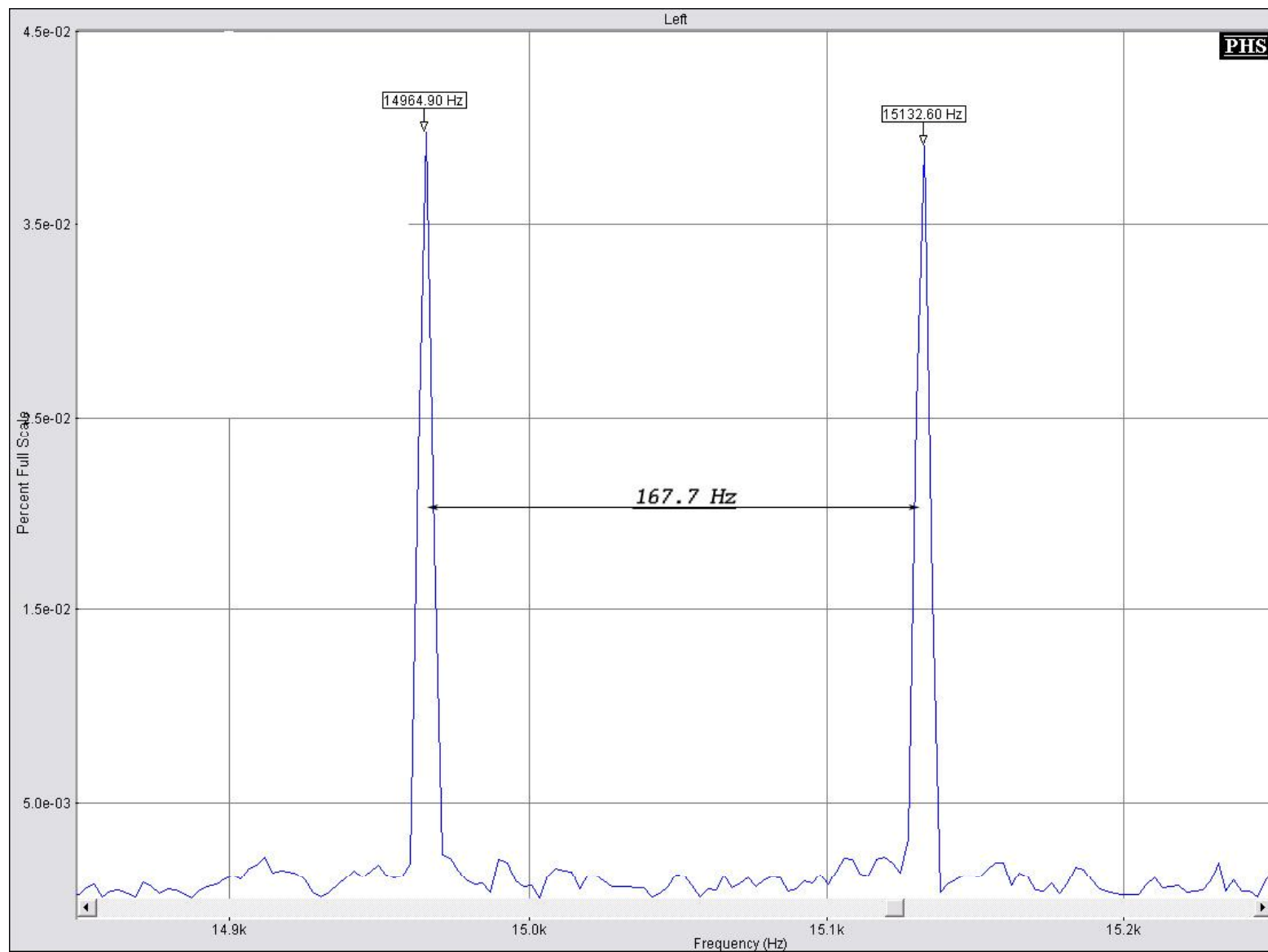


# ВОЛП - 2, $f = 1$ кГц

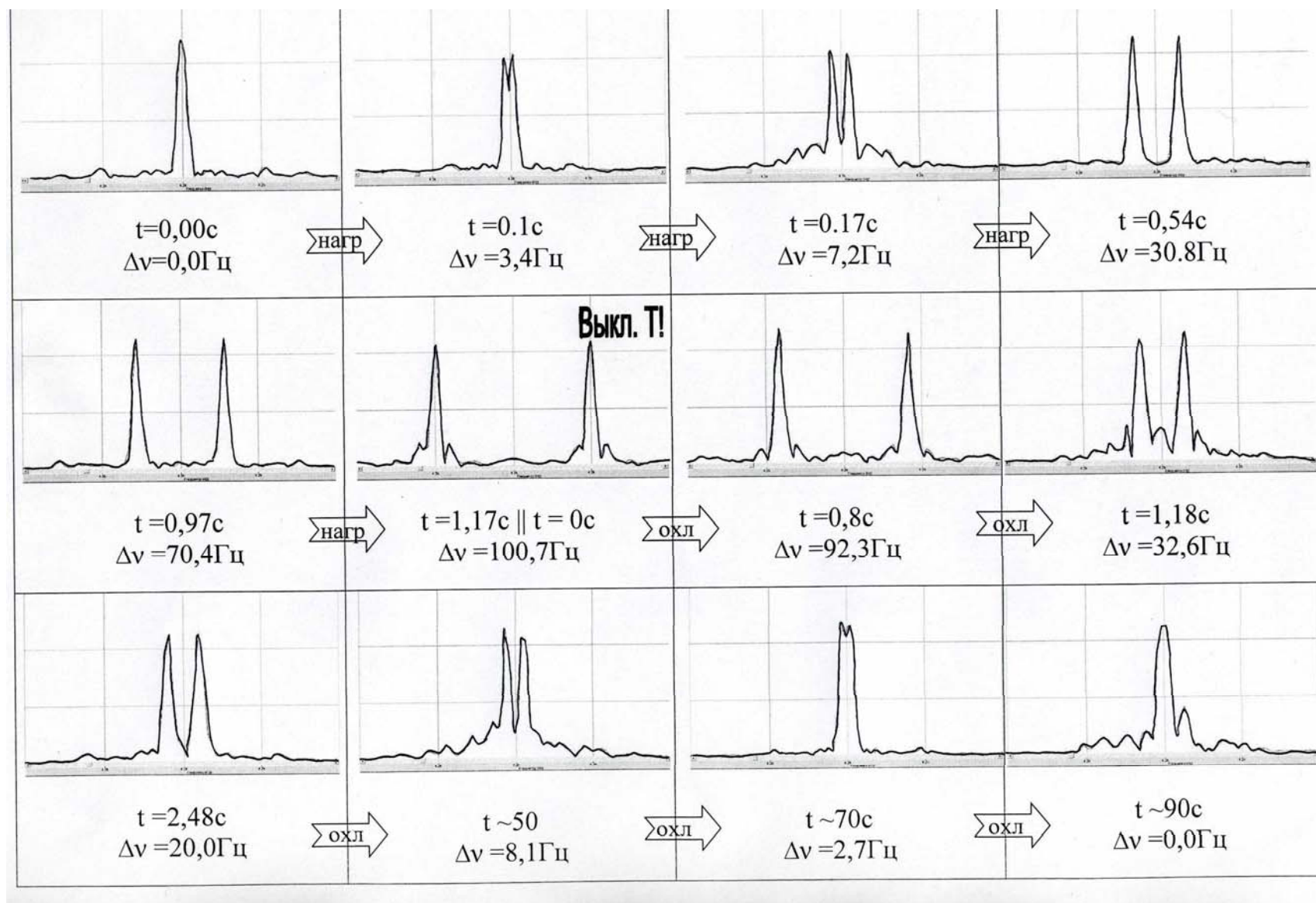


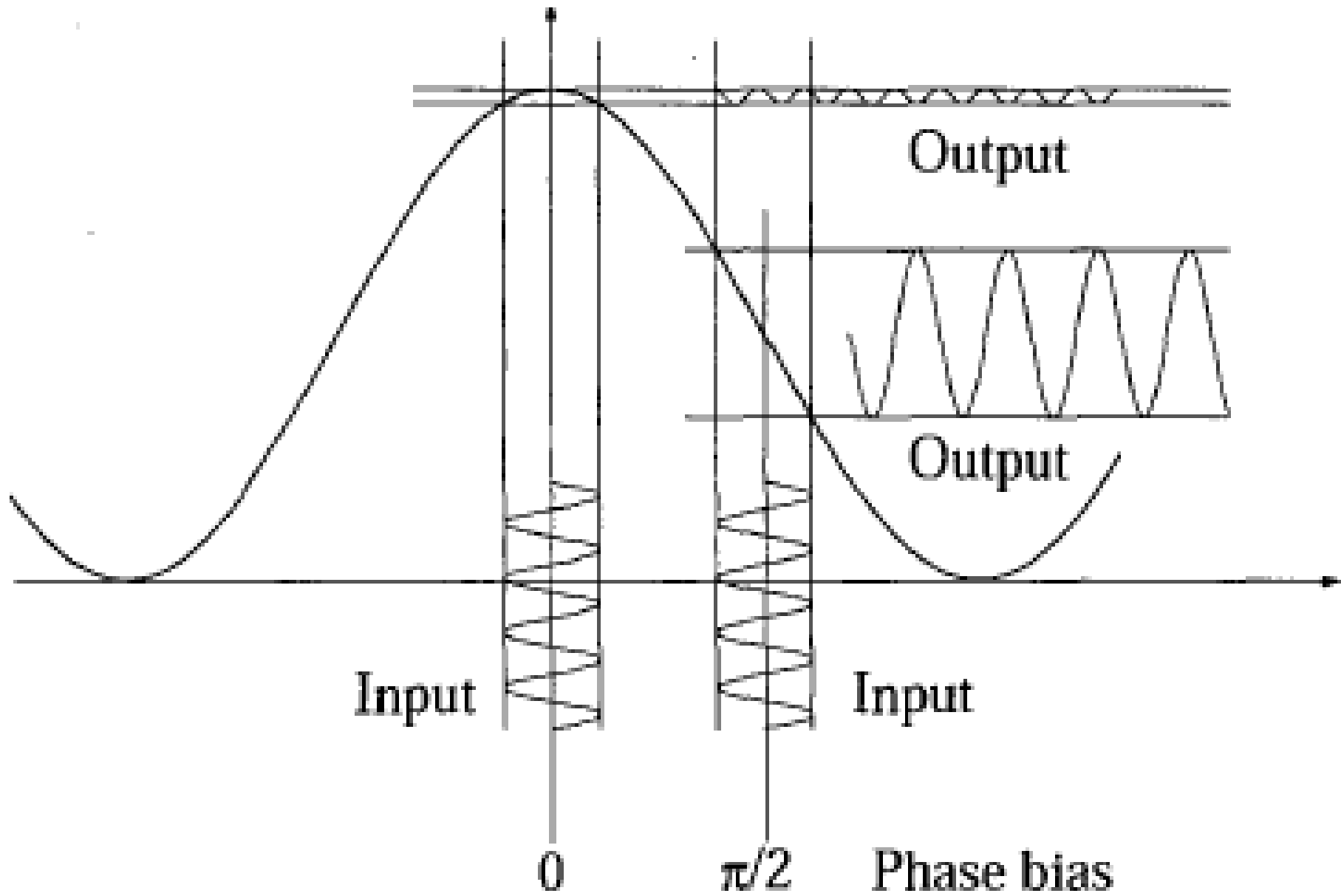


# ВОЛП - 2, $f = 15$ кГц



# Динамика нагрева и охлаждения плеча с ВОЛП-2 (пламя зажигалки)





# Теоретический анализ

$$E(x, y, z, t) = E(x, y) \exp \left[ j \left( \omega_0 t + \varphi_0 + \int_0^z \beta(s, t) ds \right) \right], \quad (1)$$

$$\Delta\varphi(t) = \Delta\varphi_1 + 2 \cdot \int_{z_0}^{z_0+L} \beta(s, t) ds, \quad (2)$$

где  $\Delta\varphi_1$  – постоянная составляющая разности фаз.

При изотропном акустическом и тепловом воздействии на ОБ

$$\beta(z, t) \approx \beta(z, 0) + \frac{\partial\beta}{\partial p}(z, 0) \cdot \delta p(z, t) + \frac{\partial\beta}{\partial T}(z, 0) \cdot \delta T(z, t). \quad (3)$$

Подставляя (3) в (2) и включая независимые от  $t$  слагаемые в  $\Delta\varphi_1$  получим;

$$\Delta\varphi(t) \approx \Delta\varphi_1 + \delta\varphi_p(t) + \delta\varphi_T(t), \quad (4)$$

где

$$\delta\varphi_p(t) = 2 \cdot \int_{z_0}^{z_0+L} \frac{\partial\beta}{\partial p}(s, 0) \cdot \delta p(s, t) ds \approx 2 \cdot \frac{\partial\beta}{\partial p}(0, 0) \int_{z_0}^{z_0+L} \delta p(s, t) ds, \quad (5)$$

$$\delta\varphi_T(t) = 2 \cdot \int_{z_0}^{z_0+L} \frac{\partial\beta}{\partial T}(s, 0) \cdot \delta T(s, t) ds \approx 2 \cdot \frac{\partial\beta}{\partial T}(0, 0) \int_{z_0}^{z_0+L} \delta T(s, t) ds, \quad (6)$$

$$\delta p(z, t) = \delta p_0(z) \cdot \sin \omega t, \quad (7)$$

где  $\delta p_0$  – амплитуда звукового давления в точках прохождения ОБ,  $\omega$  – частота акустической волны.

Подставляя (7) в (5) получим

$$\delta\varphi_p(t) \approx \left[ 2 \cdot \frac{\partial\beta}{\partial p}(0, 0) \int_{z_0}^{z_0+L} \delta p_0(s) ds \right] \cdot \sin \omega t = \varphi_{p0} \sin \omega t. \quad (8)$$

$$\delta\varphi_{p0} \ll 2\pi. \quad (9)$$



### Локальный нагрев.

$\delta T(z,t)$  не является знакопеременной по длине ОВ, и воздействие на фазу интерферометра не будет усредняться. Поэтому за время  $\tau$  измерения одиночного спектра сигнала на выходе интерферометра вполне возможна ситуация

$$\delta\varphi_T(t+\tau) - \delta\varphi_T(t) \gg 2\pi. \quad (10)$$

Если за время  $\tau$  можно ограничиться линейным по времени приближением для зависимости  $\delta T(z,t)$  от  $t$ , то с точностью до независимого от времени слагаемого получим из (6):

$$\delta\varphi_T(t) \approx \Omega t, \quad \text{где} \quad \Omega = 2 \cdot \frac{\partial\beta}{\partial T}(0,0) \int_{z_0}^{z_0+L} \frac{\partial(\delta T)}{\partial t}(s,0) ds. \quad (11)$$

Таким образом, суммарная разность фаз (4) состоит из независимого от времени слагаемого, малого слагаемого вида (8), пропорционального усредненному по ОВ звуковому давлению, а также приблизительно линейно зависящего от времени слагаемого (11), которое за время  $\tau$  может быть много больше, чем  $2\pi$ .

Оценки:

$$\Delta\varphi/(\Delta T \cdot L) \cong 100 \text{ рад/}^\circ\text{C} \cdot \text{м}$$

$$\Delta\varphi/(\Delta P \cdot L) \cong -4 \cdot 10^{-5} \text{ рад/Па} \cdot \text{м}$$

(G.B.Hocker. Fiber-optic sensing of pressure and temperature. Appl.Optics, 1979, Vol.18(9), 1445-1448)

$$\Delta\varphi_T = 1000 \text{ рад} \sim 300 \text{ периодов биений (полос)}, \text{ при } \Delta T = 1^\circ\text{C}, L = 10 \text{ м}$$

$$\Delta\varphi_p \leq -10^{-4} \text{ рад} \ll 2\pi, \text{ при } \Delta P = 0,2 \text{ Па (80 дБ)}, L = 10 \text{ м}$$

**B.J.White, et.al., Optical-Fiber Thermal Modulator, IEEE J. of  
Lihtwave Techn., 1987, Vol.LT-5(9), 1169-1175.**

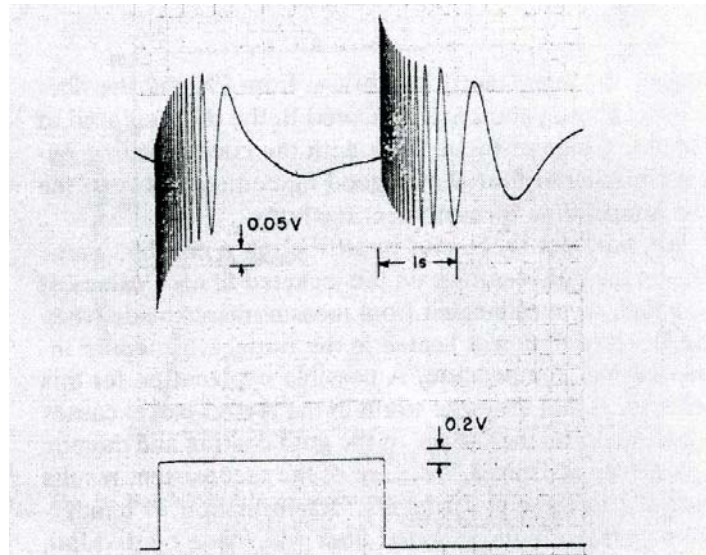
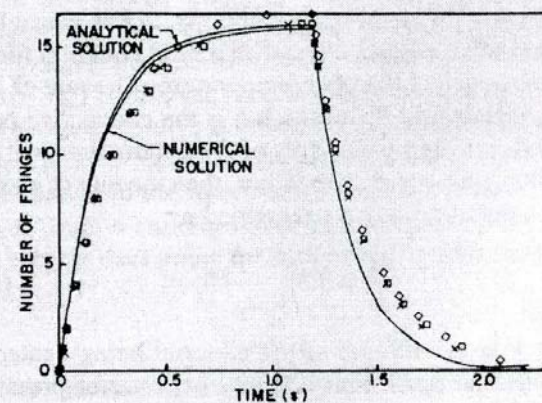


Fig. 3. Interference fringes (upper trace) produced when a 0- to 41.5-mA square wave (lower trace) was applied to a 3.2-cm-long gold-coated bare fiber.





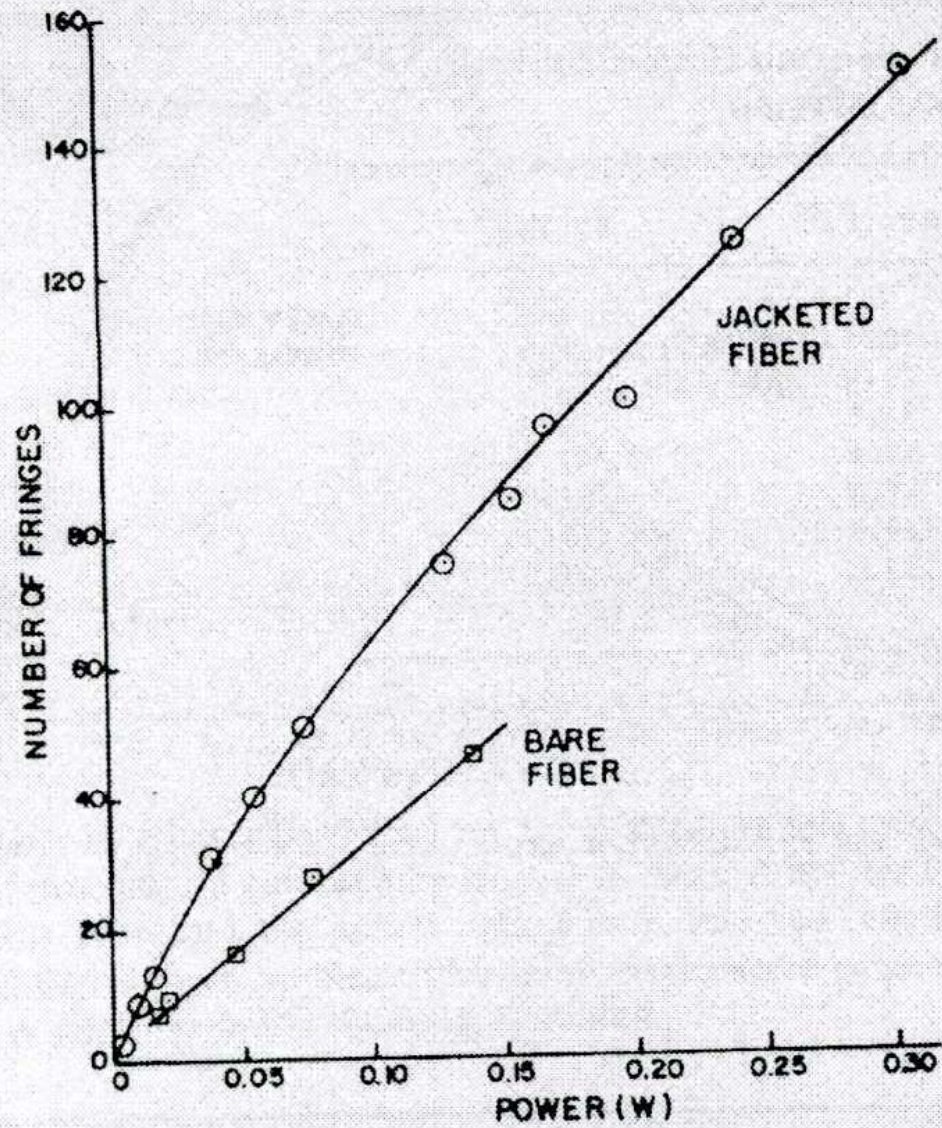


Fig. 7. Number of fringes produced as a function of input power to the jacketed and bare fibers.

Рабочая характеристика интерферометра является нелинейной и имеет вид

$$U(t) \sim I_c + I_o + 2\sqrt{I_c I_o} \cdot \cos(\Delta\varphi(t)), \quad (12)$$

где  $I_c$  и  $I_o$  – мощности опорной и сигнальной мод на входе X-разветвителя соответственно. Подставляя (4) в (12), опуская независящую от времени составляющую фазового сдвига (что эквивалентно выбору начала отсчета времени), и учитывая, что из (9) имеем приближенные равенства

$$\sin \delta\varphi_p(t) \approx \delta\varphi_p(t), \text{ и } \cos \delta\varphi_p(t) \approx 1, \quad (13)$$

для переменной составляющей напряжения на выходе детектора интерферометра получим:

$$\tilde{U}(t) \sim 2\sqrt{I_c I_o} \cdot [\cos \delta\varphi_T(t) + \delta\varphi_p(t) \sin \delta\varphi_T(t)]. \quad (14)$$

Подставляя в (14) выражения (8) и (11), для рассматриваемого случая одновременного гармонического акустического воздействия и нагрева участка ОВ, получим:

$$\begin{aligned} \tilde{U}(t) &\sim 2\sqrt{I_c I_o} \cdot [\cos \Omega t + \delta\varphi_{p0} \sin \omega t \sin \Omega t] = \\ &= 2\sqrt{I_c I_o} \cdot \left[ \cos \Omega t + \frac{\delta\varphi_{p0}}{2} \cos[(\omega - \Omega)t] - \frac{\delta\varphi_{p0}}{2} \cos[(\omega + \Omega)t] \right]. \quad (15) \end{aligned}$$

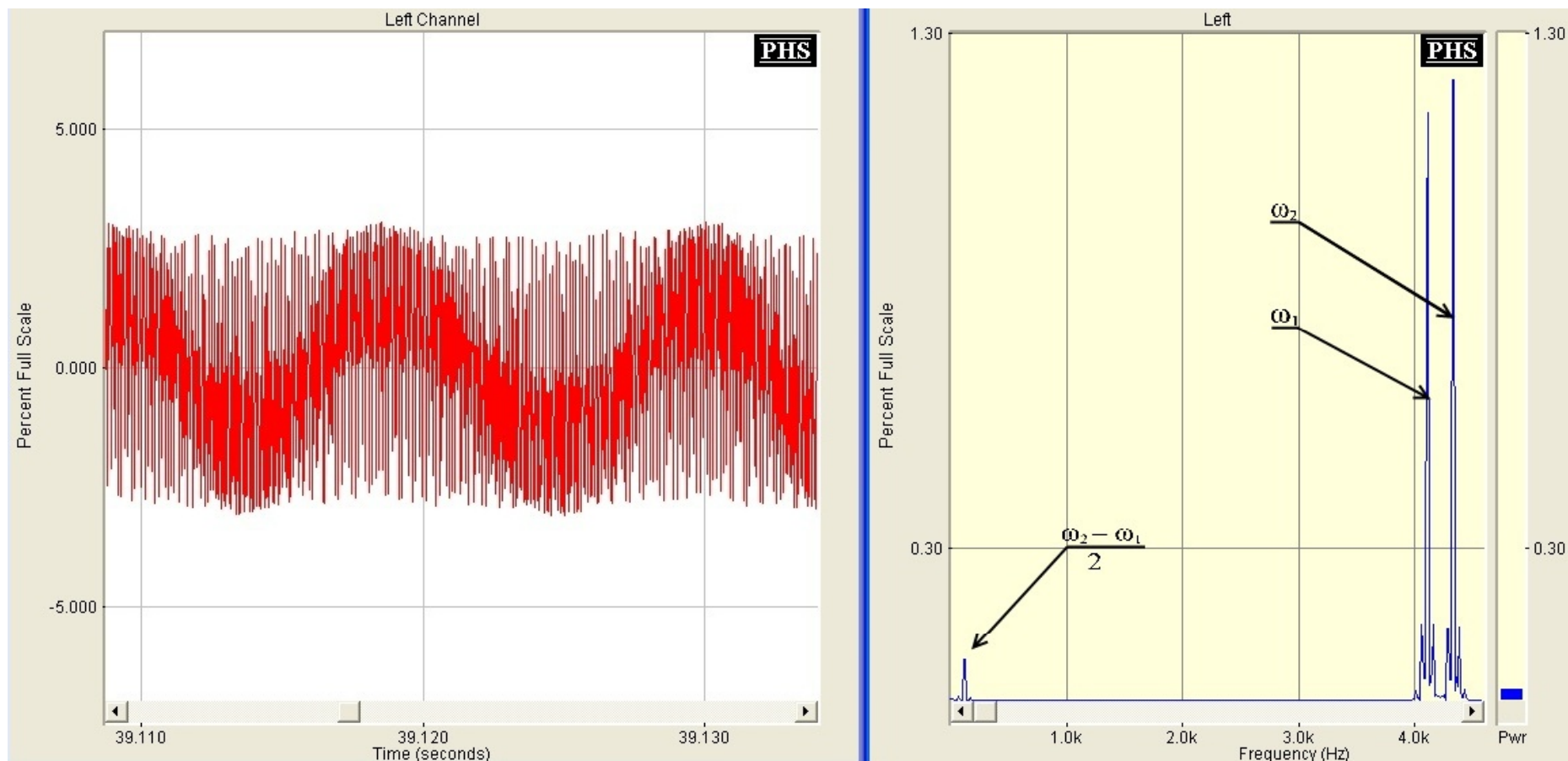
На спектре: 1 – новая частота  $\Omega$

2 – расщепление на 2 частоты :  $(\omega - \Omega)$  и  $(\omega + \Omega)$  !

Эффект – нелинейная модуляционная характеристика волоконного интерферометра.



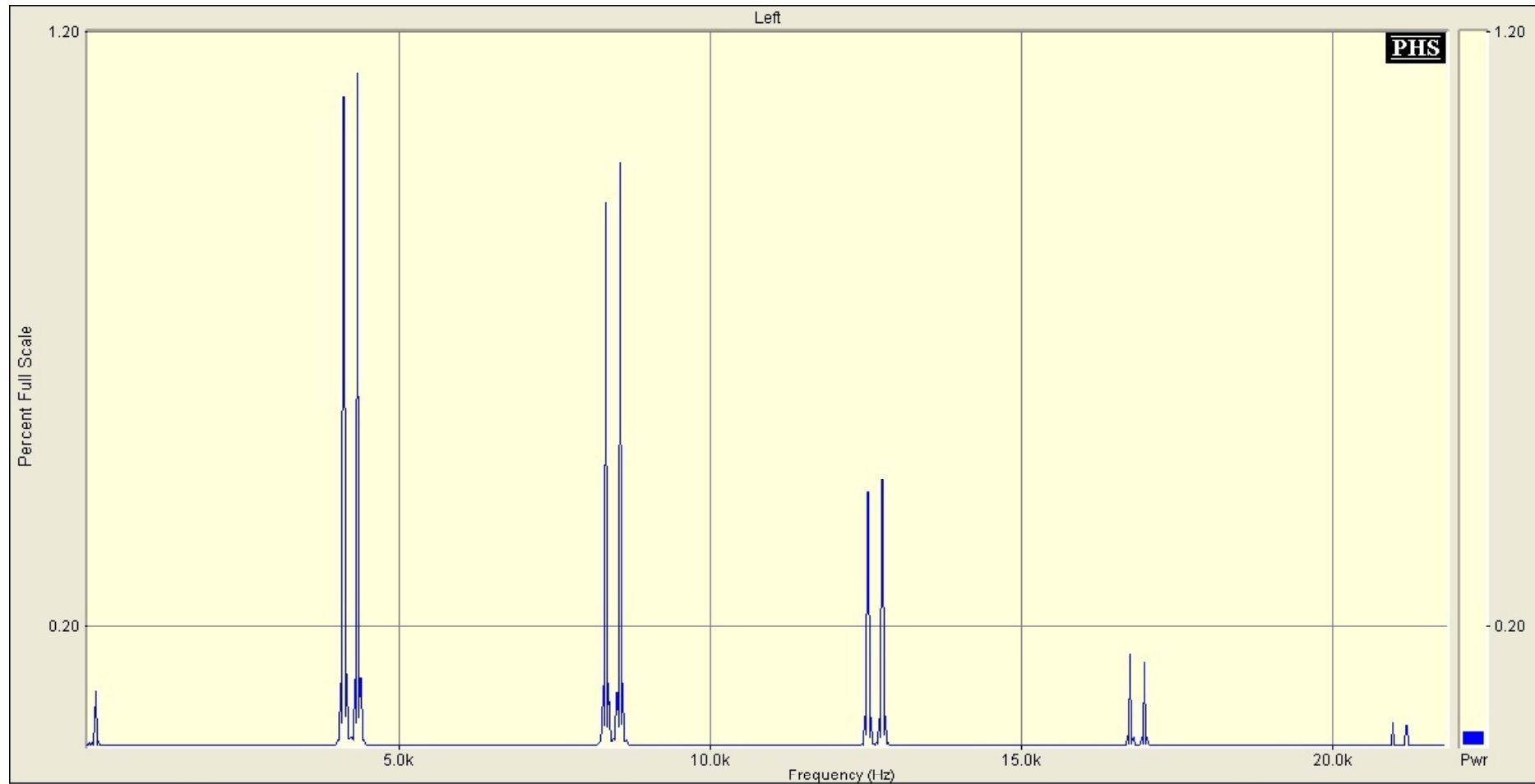
# Спектр акустического сигнала при ТА-эффекте: расщепление основной частоты звука на 4 кГц и разностная частота $\Omega(t)$



## Звук «решает» все

Гармонический звук на любой частоте в пределах АЧХ  
позволяет измерять температуру по расщеплению  $\Omega(t)$

Основа мультиплексирования многих датчиков с частотным разделением





## Заключение

1. Впервые экспериментально обнаружено, что при воздействии гармонического акустического сигнала с частотой  $\omega$  на измерительное плечо интерферометра Майкельсона, и одновременном нагреве/охлаждении участка измерительного плеча, на спектре выходного сигнала интерферометра наблюдается расщепление гармоника с частотой  $\omega$  на две спектральные составляющие  $\omega \pm \Omega(t)$ , где зависимость  $\Omega(t)$  является медленной, с характерным временем и динамикой нагрева/остывания оптического волокна (ОВ).

2. Обнаруженный термоакустический эффект объясняется нелинейностью рабочей характеристики интерферометра и наличием двух составляющих разности фаз: «медленной», обусловленной изменением оптического пути в измерительном плече за счет нагрева/охлаждения, и быстрой – за счет модуляции разности фаз из-за воздействия акустического сигнала на ОВ. Величина расщепления регистрируемой частоты звука  $\Delta\omega = 2\Omega(t)$  определяется скоростью смещения рабочей точки интерферометра, вызванной изменением локального нагрева волокна в измерительном плече интерферометра. Показана возможность отдельной регистрации основной частоты  $\Omega(t)$  термического воздействия в спектре комбинированного акустического сигнала интерферометра.

3. Термоакустический эффект в волоконных интерферометрах с удобным для измерений частотным откликом может использоваться для создания высокочувствительных ( $\Delta T \sim 0,001 - 1$  оС) распределенных и локальных волоконных датчиков и регистраторов быстрых изменений температурных режимов работы механизмов и технологических процессов, для регистрации аварийных и техногенных процессов на трубопроводах и коммуникациях, сопровождающихся изменением температуры, а также механических изменяемых напряжений, модулирующих оптический путь сигналов в измерительном плече интерферометра.

4. Возможность расщепления частотного спектра регистрируемых сложных акустических сигналов необходимо учитывать при обнаружении и распознавании источников звука по их частотным портретам.