

Proste eksperymenty z ultradźwiękami

W artykule przedstawiono przykłady eksperymentów, jakie można wykonać z falami ultradźwiękowymi: pomiar ich długości, prędkości i natężenia oraz badanie zjawisk odbicia i interferencji. Szczególny nacisk położono na prostotę eksperymentów i ich realizację stosunkowo tanim kosztem. Dzięki temu mogą być zaadaptowane zarówno w akademickiej pracowni fizycznej, jak i na potrzeby niższych poziomów nauczania.

■ ADAM BUCZEK, KRZYSZTOF ŁAPSA, MAREK WEISS

1. Wstęp

Eksperymenty z ultradźwiękami zwykle kojarzą się z potrzebą zastosowania skomplikowanego i drogiego sprzętu generacyjno-detekcyjnego. Rzeczywiście, w zaawansowanych aplikacjach niezbędna jest precyzyjna aparatura, zwłaszcza w zakresie wysokich częstotliwości.

Do celów dydaktycznych można jednak zastosować bardzo tanie (w cenie około dziesięciu złotych) nadajniki i odbiorniki ultradźwiękowe, dostępne w handlu elektronicznym. Z ich pomocą możliwe jest wykonanie eksperymentów z dziedziny zjawisk falowych. Zjawiska dyfrakcji, interferencji czy odbicia fal najczęściej kojarzone są jedynie ze światłem, dlatego istotne jest pokazywanie ich również dla innych typów fal.

W niniejszym artykule przedstawiono zastosowane rozwiązania techniczne i otrzymane rezultaty eksperymentalne. Doświadczenia nie są nowatorskie, ale szczególny nacisk położono na prostotę i niski koszt eksperymentów, tak aby mogły być zrealizowane nawet na podstawowym poziomie nauczania. Można je jednak rozbudować nawet do formy przydatnej w pokazach czy pracowni fizycznej na poziomie akademickim.

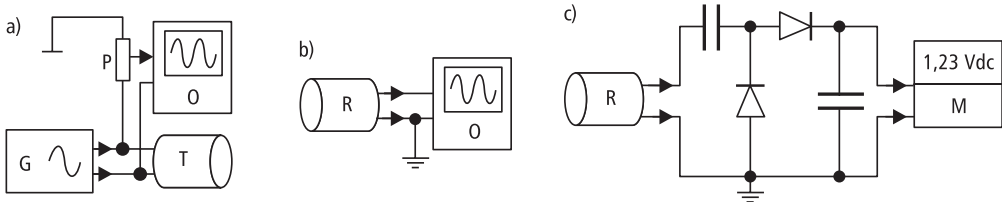
2. Układy generacji i detekcji ultradźwięków

W opisywanych doświadczeniach zastosowano nadajniki 40ST12 oraz odbiornik 40SR12 o średnicach zewnętrznych 12 mm, powszechnie dostępne w sklepach z elektroniką i przez internet [1].

Nadajnik wymagał dostarczenia sygnału zmiennego o częstotliwości f około 40 kHz. Ponieważ charakteryzuje się wysoką impedancją o charakterze pojemnościowym (1800 pF), był zasilany bezpośrednio z analogowego generatora funkcyjnego, mogącego dostarczyć przebiegi o amplitudzie około 20 V_{pp} (rys. 1a). W sytuacjach wymagających wyższych mocy można między generatorem a nadajnikiem zastosować odpowiedni wzmacniacz, jednak w opisywanych eksperymentach okazał się on niepotrzebny.

W przypadku doświadczenia z interferencją, dwa nadajniki połączono równolegle z generatorem. Aby obydwa generowały sygnały w tej samej fazie, musiały być połączone ze sobą te same zaciski nadajników (wspólnie dwa zaciski zwarte z obudową oraz wspólnie dwa pozostałe zaciski nadajników).

Niektóre eksperymenty wymagały równoległego połączenia oscyloskopu z wyjściem generatora. Aby nie przekroczyć zakresu po-



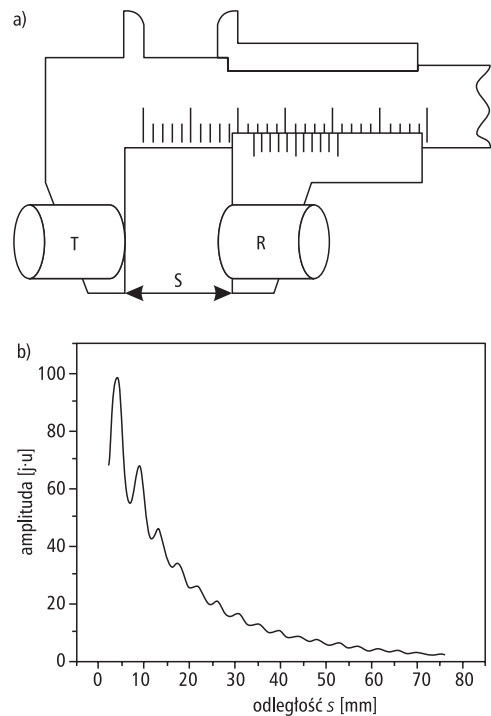
Rys. 1. Schematy połączeń elektronicznych nadajnika i odbiornika: a) połączenie generatora (G) z nadajnikiem (T) oraz z oscyloskopem (O) (poprzez potencjometr zabezpieczający (P) rzędu $100\text{ k}\Omega$); b) połączenie odbiornika (R) z oscyloskopem (O); c) połączenie odbiornika (R) z multimetrem lub interfejsem komputerowym (M) poprzez powielacz-prostownik napięcia. Zastosowane elementy powielacza-prostownika: kondensatory 100 nF (ceramiczne), diody BAV21. W celu redukcji zakłóceń układy odbiorników powinny być dodatkowo połączone z przewodem ochronnym sieci (o ile nie są podłączone z nim poprzez stosowane przyrządy: oscyloskop lub multimetr)

miarowego oscyloskopu, można podłączyć go poprzez potencjometr (rys. 1a).

Na detektorze uzyskuje się stosunkowo wysoki sygnał (kilka woltów) przy odległości od nadajnika rzędu centymetrów. Zatem, gdy istniała konieczność obserwacji odbieranych przebiegów zmiennych, łączono go bezpośrednio z oscyloskopem (rys. 1b). Natomiast, gdy potrzebne było monitorowanie wartości napięcia stałego będącego miarą amplitudy odbieranego sygnału, wówczas stosowano prosty układ dwukrotnego powielacza oraz prostownika napięcia, połączonego z multimetrem uniwersalnym lub interfejsem komputerowym (rys. 1c).

3. Pomiar względnego natężenia fali w funkcji odległości

W układzie przedstawionym na rysunku 2a nadajnik i odbiornik zamocowano naprzeciw siebie do końcówek pomiarowych suwmiarki. Generator jest wówczas połączony tylko z nadajnikiem. Odbiornik można połączyć z oscyloskopem z możliwością pomiarów parametrów przebiegu (amplitudy) (rys. 1b) lub z multimetrem czy interfejsem komputerowym (względny pomiar amplitudy) (rys. 1c). Suwmiarka umożliwia dokładny odczyt, ustawianej ręcznie, bieżącej odległości między nadajnikiem i odbiornikiem. Zastosowanie zestawu komputerowego jest wygodniejszą formą pomiaru i daje prawie natychmiastowy wynik. Wymaga on jednak wykorzystania czujnika położenia. Na rysunku 2b za-



Rys. 2. a) Schemat konfiguracji nadajnika i odbiornika przy pomiarach natężenia oraz długości fali ultradźwiękowej, b) zależność amplitudy fali w funkcji położenia odbiornika, zarejestrowana przy użyciu zestawu komputerowego

prezentowano zależność względnej amplitudy fali ultradźwiękowej od odległości między nadajnikiem i odbiornikiem. Jak widać, na spadek amplitudy spowodowany zwiększaniem się odległości nakłada się dodatkowy efekt interferencyjny, wynikają-

Tabela 1. Zmierzone położenia odbiornika i wyznaczone na tej podstawie połowy długości fali

s [mm]	12,55	16,70	20,80	25,00	29,15	33,35	37,55	41,75	45,90	50,10	54,25	58,45	62,55	66,80
$\lambda/2$ [mm]	–	4,15	4,10	4,20	4,15	4,20	4,20	4,20	4,15	4,2	4,15	4,20	4,10	4,25

cy z tworzenia się fali stojącej pomiędzy nadajnikiem i odbiornikiem. Mierząc odległość pomiędzy kolejnymi maksimami (strzałkami) lub minimami (węzłami), można więc również w przybliżeniu wyznaczyć długość fali ultradźwiękowej.

4. Pomiar długości fali metodą przesunięcia fazowego

W konfiguracji pokazanej na rysunku 2a możliwe jest również wykonanie klasycznego eksperymentu pomiaru długości fali metodą przesunięcia fazowego [2]. Generator połączony jest z nadajnikiem oraz kanałem oscyloskopu (rys. 1a), natomiast odbiornik – z drugim kanałem tego samego oscyloskopu (rys. 1b) ustawionego w tryb pracy „X–Y”. W ten sposób na ekranie obserwuje się figurę Lissajous (elipsę, okrąg lub linię prostą), prezentującą przesunięcie fazowe między sygnałem nadawanym a odbieranym.

Przy zmianie odległości pomiędzy nadajnikiem a odbiornikiem notowano położenia odbiornika s , dla których figura Lissajous była linią prostą, co odpowiadało

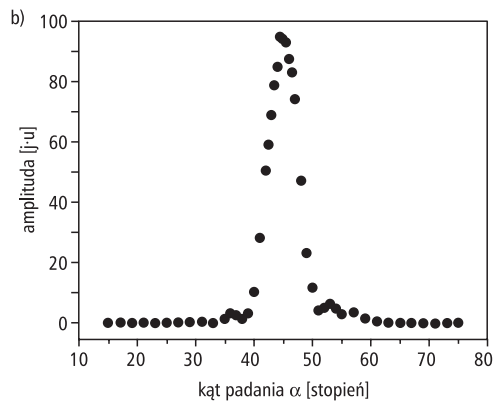
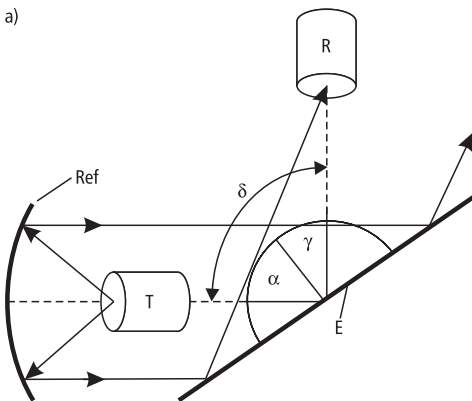
różnicy faz pomiędzy falami $0, \pi, 2\pi, 3\pi...$ Odległość pomiędzy kolejnymi punktami pomiarowymi była więc równa połowie długości fali $\lambda/2$. Z zależności $V = f \cdot l$ można było obliczyć prędkość rozchodzenia się fali ultradźwiękowej.

W tabeli 1 przedstawiono odczytane położenia odbiornika s , dla których obserwowano na ekranie oscyloskopu linię prostą, oraz wyliczone na tej podstawie połowy długości fali ultradźwiękowej.

Korzystając z uzyskanych wartości, wyznaczono średnią długość fali oraz niepewność maksymalną pomiaru $\lambda = (8,346 \pm 0,072)$ mm. Znajomość długości oraz częstotliwości fali ultradźwiękowej $f = (41150 \pm 100)$ Hz umożliwiła wyliczenie jej prędkości propagacji $V = (343 \pm 4)$ m/s. Otrzymany wynik jest zgodny z obliczoną teoretycznie wartością prędkości fal akustycznych w powietrzu $V = 345,3$ m/s (dla temperatury panującej w laboratorium $t = 24^\circ\text{C}$) [2].

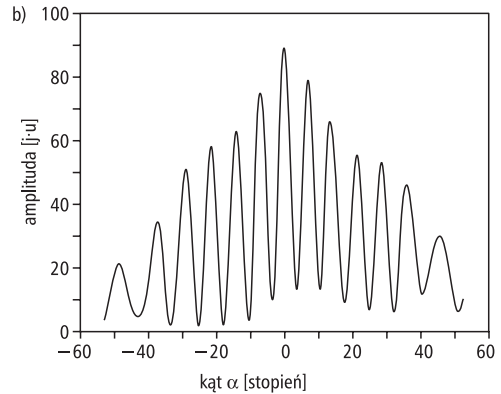
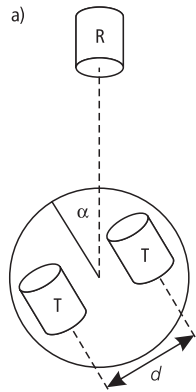
5. Badanie zjawiska odbicia ultradźwięków

Na rysunku 3a przedstawiono schematycznie układ do badania zjawiska odbicia fal



Rys. 3. a) Schemat układu do badania prawa odbicia fal ultradźwiękowych, b) zmierzona zależność amplitudy fali od kąta padania α dla $\delta = 90^\circ$

Rys. 4. a) Schemat układu do badania zjawiska interferencji fal ultradźwiękowych, b) zarejestrowany efekt interferencyjny



ultradźwiękowych. Ze względu na to, że nadajnik jest pseudo-punktowym źródłem fal ultradźwiękowych, umieszczono go w ognisku reflektora (Ref) w celu uzyskania fali płaskiej. Jako reflektor zastosowano zwykłą szklaną pokrywę od garnka o promieniu krzywizny około 45 cm. Ultradźwięki odbijały się od metalowego ekranu (E) umieszczonego na obrotowym stoliku wyposażonym w skalę kątową. Nadajnik wraz z reflektorem oraz odbiornik umieszczono na obrotowych ramionach umożliwiających zmianę kąta δ .

Dla wybranego kąta δ dokonano pomiarów poprzez obrót stolika z ekranem. Zgodnie z prawem odbicia, maksymalną amplitudę sygnału odbitego otrzymuje się dla warunku, gdy kąt padania $\alpha = \delta/2 = \gamma$. Na rysunku 3b przedstawiono uzyskane wyniki pomiarowe dla $\delta = 90^\circ$.

6. Badanie zjawiska interferencji fal ultradźwiękowych

W obserwacjach interferencji fal świetlnych zwykle stosuje się jedno źródło światła oraz szereg szczelin na drodze do detektora. W przypadku badań fal ultradźwiękowych wytwarzanych przez nadajnik 40ST12 jest to również możliwe, jednak odbierany sygnał jest stosunkowo słaby. Bardziej efektywne jest wykorzystanie dwu lub więcej nadajników emitujących fale spójne. Uzyskanie takich źródeł jest bardzo proste (wystarczy równolegle połączyć nadajniki z generatorem).

Na rysunku 4a przedstawiono schematycznie układ do badania interferencji fal ultradźwiękowych. Naprzeciwko odbiornika umieszczone są dwa nadajniki znajdujące się na obrotowym stoliku wyposażonym w skalę kątową. Odległość między nadajnikami d jest regulowana. W uproszczonej wersji ćwiczenia obracano powoli stolik, znajdując położenia kątowe odpowiadające kolejnym maksimum interferencyjnym. Uzyskane doświadczalnie kąty α_m można porównać z wartościami teoretycznymi obliczonymi ze wzoru:

$$d \sin \alpha_m = m \lambda \quad (1)$$

gdzie $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ oznacza rząd interferencji, a λ jest długością fali.

Dysponując większą ilością czasu, można wykonać dokładne pomiary amplitudy sygnału w funkcji kąta α , uzyskując w ten sposób obraz interferencyjny. W przypadku laboratorium studenckiego najlepszym rozwiązaniem jest zastosowanie czujnika rejestrującego położenie kątowe nadajników, połączonego z interfejsem komputerowym.

Rysunek 4b prezentuje obraz interferencyjny uzyskany dla dwóch nadajników położonych w odległości $d = 70 \pm 1$ mm, generujących fale ultradźwiękowe o długości $\lambda = 8,346 \pm 0,072$ mm.

W tabeli 2 przedstawiono średnie kąty α_m uzyskane doświadczalnie oraz – dla porównania – wartości tych kątów obliczone ze wzoru (1).

Tabela 2. Kąty α_m uzyskane na podstawie wyników doświadczalnych (rys. 4b) oraz odpowiadające im wartości teoretyczne obliczone ze wzoru (1)

m	1	2	3	4	5	6
$\alpha_{m(\text{dośw.})}$ [°]	6,9	13,9	21,3	28,8	36,6	46,8
$\alpha_{m(\text{teoret.})}$ [°]	6,8	13,8	21,0	28,5	36,6	45,7

Uwagi praktyczne:

- ze względu na to, że odbiornik ma wąską charakterystykę częstotliwościową, przed przystąpieniem do eksperymentów należy dostroić generator w celu uzyskania maksymalnego sygnału,
- w doświadczeniach z interferencją fal kluczowe jest precyzyjne ustawienie równoległości nadajników, a ich obrót musi się odbywać dokładnie w jednej płaszczyźnie z odbiornikiem,
- przed przystąpieniem do doświadczenia z interferencją fal warto dla porównania zarejestrować kątowy rozkład amplitudy sygnału, stosując jeden nadajnik.

7. Podsumowanie

W artykule przedstawiono kilka prostych eksperymentów z ultradźwiękami. Można je zrealizować w formie opisanej powyżej lub rozbudować zgodnie z indywidualnymi potrzebami. W wersji najprostszej liniowe lub kątowe zmiany położenia elementów oraz odczyt stosownych parametrów odbywają się całkowicie manualnie, natomiast rozbudowane rozwiązania mogą polegać na sterowaniu i odczycie przy pomocy silników krokowych i komputerowych interfejsów pomiarowych.

Przy pomocy przedstawionych rozwiązań można zrealizować kolejne doświadczenia. Zastosowanie hermetycznej komory pozwoliłoby na przeprowadzenie opisanych eksperymentów i wyznaczenie odpowiednich parametrów (np. prędkości ultradźwięków) w zależności od ciśnienia czy rodzaju gazu.

Odpowiednio skonstruowana rura z przepływającym gazem powinna umożliwić zaobserwowanie efektu Dopplera. Jest to powszechnie stosowane z profesjonalnych przepływomierzach. Ciekawe może

być umieszczenie w układzie pomiarowym dodatkowych substancji ciekłych lub stałych i zbadanie ich wpływu na propagację ultradźwięków.

W artykule skupiono się na pomiarze parametrów ultradźwięków: ich prędkości i długości fali, jednak opisane eksperymenty, przy znanych powyższych wielkościach, mogą być zastosowane również do pomiaru przesunięć liniowych lub kątowych elementów ze stosownie zamontowanymi nadajnikami i odbiornikami. W szczególności zauważono, że konfiguracja zgodna z rysunkiem 2a pozwala, przy pomocy metody figur Lissajous (rozdział 4), na obserwację zmian względnych położenia nadajnika i odbiornika, odległych nawet o około 2 m. Można to zastosować w zdalnych pomiarach położenia i prędkości obiektów w innego typu eksperymentach. Alternatywą może być impulsowa praca nadajnika i budowa układu przypominającego sonar.

**ADAM BUCZEK, KRZYSZTOF ŁAPSA,
MAREK WEISS**

Wydział Fizyki Technicznej, Politechnika Poznańska
adam.buczek@put.poznan.pl

LITERATURA

- [1] http://www.cyfronika.com.pl/t/product_info.php?products_id=12107&language=pl
- [2] H. Szydłowski, *Pracownia Fizyczna*, PWN, Warszawa 1989