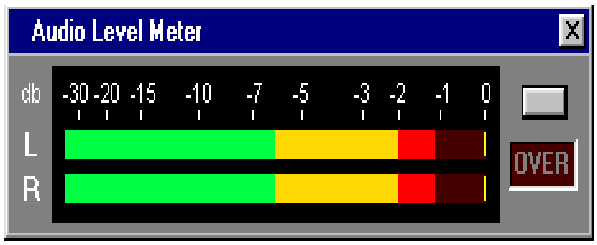
Szkolne doświadczenia wspomagane komputerowo z wykorzystaniem karty dźwiękowej

Układy doświadczalne

Z punktu widzenia opisu fali akustycznej istotne są rozkłady natężenia dźwięku w czasie. Ich wartości chwilowe umożliwiają dokładną analizę częstotliwościową sygnału, a z wykorzystaniem wsparcia maszyny matematycznej jaką dostarczają komputery umożliwia to nam badanie spektrum poszczególnych dźwięków wręcz „na żywo". Daje to bezpośrednią możliwość poznawania działania instrumentów muzycznych, analizy głosek wypowiadanych przez różne osoby czy wykonywanie pomiarów w postaci czystych – szkolnych doświadczeń akustycznych.
Komputer może być doskonałym generatorem dźwięku. Tworzenie przy pomocy oprogramowania fal akustycznych o prostym czy złożonym przebiegu połączone z możliwością ich usłyszenia łączy w sobie typowo sensoryczne aspekty poznania z abstrakcją opisujących falę wzorów.

W pomiarach z akustyki istotną zmorą eksperymentatora są zniekształcenia sygnału akustycznego powodowane zazwyczaj odbiciami od powierzchni leżących blisko układu doświadczalnego. Typowym przykładem jest stół na którym ustawiamy głośniki. Rozwiązaniem jest ustawianie głośników/mikrofonów na statywach, dzięki czemu odbite fale będą tak osłabione że ich wpływ na sygnał mierzony zmniejszy się.

Jeżeli to możliwe to oczywiście najlepszym źródłami dźwięków do analizy harmonicznej są kamertony. Natomiast wykorzystanie instrumentów muzycznych niesie ze sobą odrębne walory edukacyjne. Prostotę i codzienność źródeł dźwięku można odnaleźć w różnego rodzaju dzwonkach (dzwoneczek wędkarski) czy pustych lub napełnianych cieczą szklanych naczyniach (szklanka z wodą). W czasie doświadczeń należy zwrócić też uwagę uciążliwość odtwarzanego dźwięku, by nie zakłócał on toku lekcji.



Rys. 7. Program umożliwiający kontrolę natężenia dźwięku
http://www.darkwood.demon.co.uk/PC/meter.html

Podstawowe oprogramowanie systemowe

Dostępność i różnorodność oprogramowania pełniącego rolę interfejsu do karty dźwiękowej jest największa w systemach serii Windows. Nie oznacza to jednak braku możliwości wykonywania takich pomiarów z poziomu coraz bardziej popularnego Linux - a jak i systemów MacOs. We wszystkich rozwiązaniach system operacyjny udostępnia tylko zasoby jakimi dysponuje karta dźwiękowa obsługiwana przez

odpowiedni program sterujący „driver". Drugim nieodłącznym elementem systemu jest „mikser" – najprostszy program umożliwiający wybór źródła sygnału przy nagrywaniu (opcja wybierz), określenia źródeł wysyłających w danym momencie sygnał na wyjście karty (opcja wycisz) czy określenia poziomów wzmocnienia poszczególnych sygnałów i balansu głośności miedzy nimi (w przypadku sygnału stereo). W systemie Windows rolę taką pełni program *Sndvol32.exe*. Istotnym jest zauważenie że po rozwinięciu menu Opcje/Właściwości możemy niezależnie regulować parametry nagrywania i odtwarzania. Producenci sprzętu często uzupełniają możliwości miksera o graficzną wizualizacje poziomu sygnałów w postaci „zapalających się" wielokolorowych wskaźników imitujących diody sprzętu audio.

Funkcje oprogramowania „pomiarowego"

Brak wskaźników natężenia dźwięku z angielska zwanych „volume meter" można nadrobić darmowym oprogramowaniem możliwym do uzyskania z Internetu (http://www.darkwood.demon.co.uk/PC/meter.html). Istotna jest możliwość dokładnego odczytu zmian rejestrowanego natężenia w skali decybelowej czy elementy „zatrzaskujące" największą chwilową jego wartość, połączone z możliwością czyszczenia znaczników lub wskazujące średnie natężenie dźwięku na osi czasu (http://www.sound-snooper.com/en/download.php). Należy pamiętać jednak że programy te wykorzystują raczej pomiar ciągły jako cos podlegającego uśrednieniu w określonym niezbyt (stosunkowo) krótkim czasie.
Aby była możliwa dokładna analiza przebiegu fali akustycznej musimy się jednak zaopatrzyć w program (dla przykładu: http://www.goldwave.com/) który umożliwi nam rejestrację sygnału audio w wybranej liczbie kanałów (mono lub stereo), z określoną ilością próbek (6000, ... ,44100, ... 192000 – propozycja oprogramowania na komputerze autora) i dobraną rozdzielczością przetwarzania ADC (8, 16, 32 bity). Możliwość zapisu zarejestrowanych dźwięków pozwala także na rozszerzenie możliwości pracy z danymi dla większej ilości eksperymentatorów (udostępnianie w sieci), porównywanie swoich doświadczeń (wymiana danych pomiarowych) czy wreszcie prezentację przetworzonych/wygenerowanych danych (odtwarzanie).
Dane pomiarowe których postacią jest jedno lub dwuwymiarowa tablica opisująca rozkład w czasie natężeń dźwięku jest obiektem na którym możemy dokonywać operacji edytorskich w postaci kasowania, kopiowania, przenoszenia i powielania fragmentów nagrania. Powiększanie osi czasu nagranego sygnału powinno umożliwić obejrzeć przebieg czasowy zmian natężenia w postaci „pojedynczych" przebiegów i ich podstawową analizę.
Często programy rozszerzone są o zbiór filtrów/funkcji pozwalających na operacje matematyczne czy morfologiczne. Umożliwiają one od prostego wzmacniania sygnału czy jego normalizacji stosowanie różnorakich filtrów akustycznych np. dodawanie echa, zanik w czasie itd. W tej grupie rozwiązań na podkreślenie zasługuje umożliwiający tworzenie spektrogramów –widm częstotliwościowych z wykorzystaniem transformaty Fouriera. Część programów jako swoją główna funkcjonalność posiadają właśnie możliwość przeważania danych „na żywo" umożliwiając obserwację na osi czasu zmian spektrum dźwięku które reprezentowane bywa w postaci wykresów 3D czy barwnych poziomic.
Jeszcze inną grupą programów są generatory. Najprostsze z nich pozwalają „na żywo" zmieniać natężenie i częstotliwość generowanego dźwięku niezależnie od kanału, wybór kształtu generowanej fali (sinus, prostokąt, trójkąt, piła, itd.). Te bardziej zaawansowane pozwalają składać falę z dowolnych częstotliwości oraz zapis tak powstałych próbek, co może być bardzo przydatne szczególnie w czasie prezentacji, czy przygotowywania eksperymentu

(oprogramowanie tego typu jest załączone do podręcznika fizyki szkoły średniej wydawnictwa WSIP).
Przy odtwarzaniu zapisanych nagrań dobrze jest korzystać z oprogramowania pozwalającego na : (i) powtarzanie odtwarzanej ścieżki (repeat) czy (ii) ustalanie tak zwanej listy do odtwarzania (playlist); (iii) zmiany tonów – opcja ta pozwala wyrobić intuicję w zakresie słyszenia tonów o poszczególnych częstotliwościach. Przykładowym programem służącym do tego celu jest WinAmp (http://www.winamp.com/)

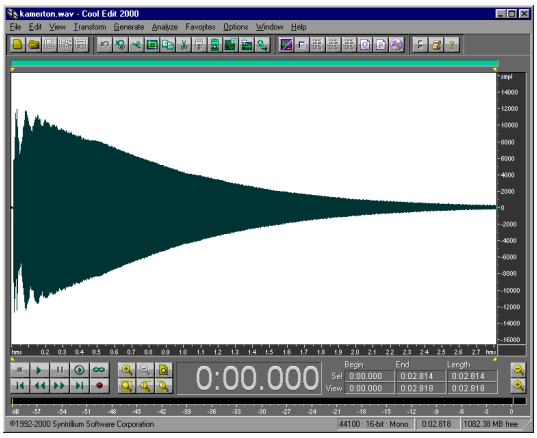
Odczyt i analiza danych pomiarowych

Pomiary natężenia dźwięku może się odbywać jako bezpośredni odczyt wartości n – bitowej próbki przetwornika ADC. Większość interfejsów programowych zamienia te wielkości na znormalizowane natężenie dźwięku wyrażane jako część jedności czy w procentowym udziale w skali (maksimum jest największą wartością natężenia którą zarejestrować może karta). Często też spotyka się używaną w akustyce skalę decybelową. Po powiększeniu danych na osi czasu jesteśmy w stanie odczytać wartości dla dowolnej próbki.
Na osi czasu dysponujemy dokładnością ściśle powiązaną z wcześniej ustalonym w czasie nagrywania próbkowaniem i tak dla najczęściej używanej częstotliwości 44100 próbek na sekundę otrzymujemy odległość między kolejnymi dwoma na poziomie 0.00002 s (dwóch stutysięcznych). Dzięki takiej rozdzielczości możemy wyznaczyć częstotliwość fali bezpośrednio z pomiarów długości jej pojedynczych okresów. Jeżeli używane oprogramowanie nie udostępnia możliwości obliczeń arytmetycznych w takich sytuacjach przydatne stają się program typu „kalkulator".
Gdy mamy potrzebę pracy nad danymi z wykorzystaniem własnych, niestandardowych funkcji/przekształceń, możemy wyeksportować do plików tekstowych dane w postaci kolumn liczb naturalnych, gdzie czas między próbkami ma stały skok (zazwyczaj nie jest to kolejna kolumna danych lecz informacja o częstotliwości próbkowania). Tak zapisane wyniki pozwalają wykorzystać zarówno arkusze kalkulacyjne jaki i programy algebry komputerowej nie wspominając już o programach pisanych we własnym zakresie. Rozwiązania takie sprawdzają się także do obróbki/wizualizacji danych które nie są bezpośrednim wynikiem pomiarów z kartą dźwiękową, a wynikiem częściowej analizy problemu (dane z pomiarów częstotliwości w funkcji długości struny)

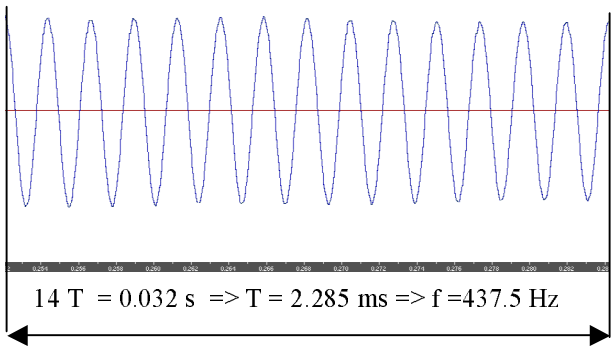
Pomiar częstotliwości fali dźwiękowej

Celem doświadczenia jest określenie częstotliwości fali dźwiękowej poprzez wyznaczenie okresu pojedynczej zmiany amplitudy fali, oraz z wykorzystaniem oprogramowania umożliwiającego prezentacje widma częstotliwości.

Poza komputerem wyposażonym w kartę dźwiękową i mikrofon niezbędne jest potrzebne jest źródło dźwięku. Powinno posiadać dobrze określoną częstotliwość podstawową. Najlepszym rozwiązaniem jest kamerton, ale bardziej codzienne źródła w formie różnego rodzaju dzwonków, instrumentów muzycznych (gitara) czy szklanych naczyń o czystym brzmieniu mogą się okazać bardziej dostępne.



a)

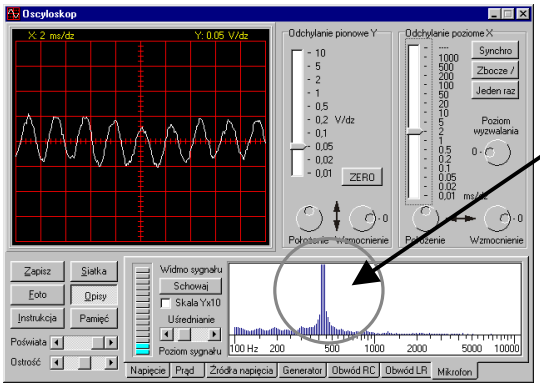


32 ms

b)

Rys. 7. Zarejestrowany mikrofonem dźwięk kamertonu a) wybrzmiewanie w czasie 2.8 s b) powiększenie osi czasu. Czas trwania 14 –tu zmian to 0.032s co pozwala wyznaczyć częstotliwość źródła f=437.5 Hz (częstotliwość nominalna kamertonu f_n=435 Hz). Użyto programu CoolEdit [*]

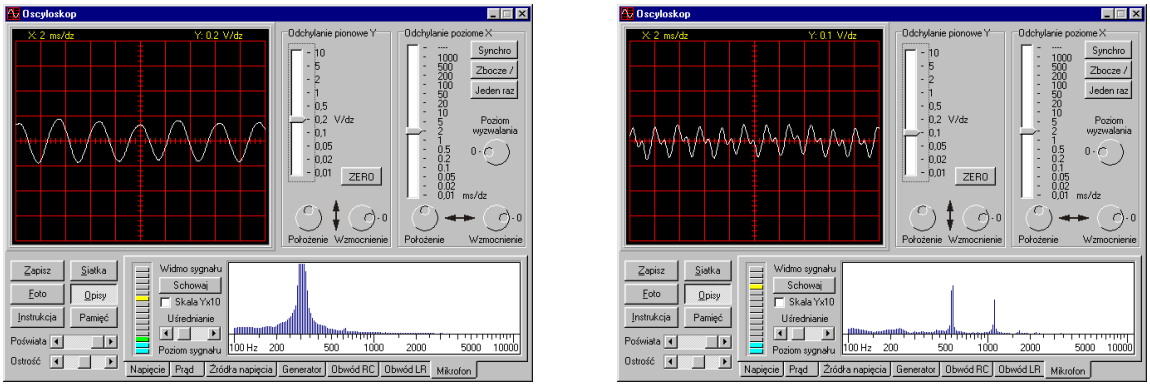
Po wybraniu w mikserze mikrofonu jako źródła rejestrowanego sygnału, ustawiamy nasz czujnik (mikrofon) blisko źródła dźwięku i regulujemy jego wzmocnienie tak by nie było widocznych przesterowań (by natężenie dźwięku nie przekraczało najwyższego poziomu rejestrowanego przez kartę dźwiękową). W razie potrzeby oddalamy mikrofon od źródła co jest lepszym rozwiązaniem niż regulacja poziomu nagrywanego sygnału. Uruchamiamy nagrywanie i generujemy dźwięk np.: uderzamy młoteczkiem kamerton. Rejestrujemy pełen wygasający sygnał – na rysunku 7a dźwięk zapisywano przez 2.8 sekundy. Kończymy nagrywanie i powiększamy oś czasu (rys. 7b) tak by widoczne były pojedyncze przebiegi fali akustycznej. Wyznaczamy czas trwania N kolejnych okresów widocznych na ekranie i na ich podstawie wyznaczamy T fali jako wartość średnią dla N okresów. Kolejnym krokiem jest wyznaczenie częstotliwości ze wzoru f=1/T. W przypadku pomiaru dla kamertonu o nominalnej częstotliwości f_n=435Hz otrzymaliśmy tą metodą f=437.5 Hz przy uśrednianiu dla N=14 okresów.



Rys.8 Spektrogram sygnału z kamertonu wykonany w oprogramowaniu z podręcznika [1]. Oprogramowanie dostarcza funkcje oscyloskopu połączone z komputerowym tworzeniem widma badanego sygnału

Inną metodą jest zastosowanie programów wyposażonych w funkcją tworzenia spektrogramów. Przy ich pomocy jesteśmy w stanie „na żywo” śledzić częstotliwość generowanego dźwięku odczytując wartość głównego piku (głównej częstotliwości tworzącej). Na rysunku 8 zarejestrowano wyniki analizy dźwięku kamertonu z wykorzystaniem programu Oscyloskop [1].
W podobny można badać dźwięki pochodzące z innych źródeł np. gitary akustycznej, rys.9. Z analizy tego rysunku widoczne jest podwojenie częstotliwości podstawowej wynikające ze

skrócenia struny o połowę. Skrócona struna wydawała dźwięk w którym można wydzielić dwie częstotliwości : 600Hz (podstawowa) i 1200 Hz.



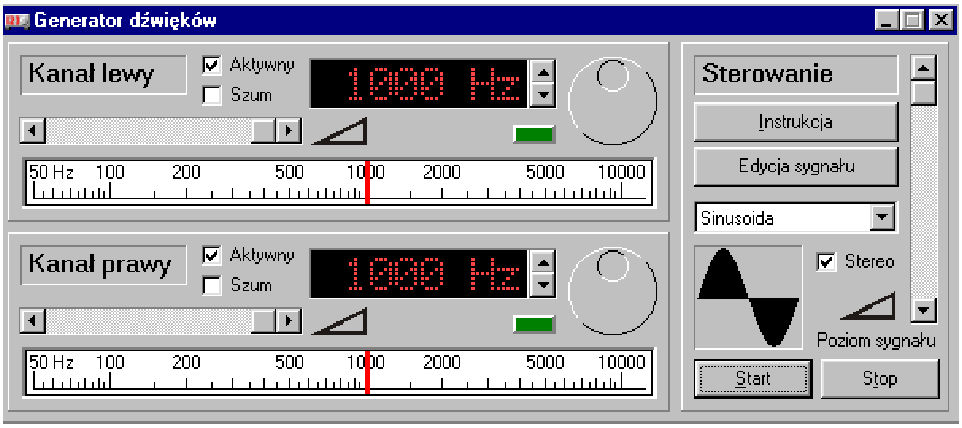
a) b)

Rys.9. Wynik pomiaru częstotliwości a) struny o pełnej długości $f_p \approx$ 300Hz b) struny skróconej do połowy $f_p \approx$ 600Hz (przyciśnięta na gryfie), f_p –częstotliwość podstawowa

Interferencja dźwięku

Interferencja przestrzenna i wyznaczenie prędkości dźwięku

Celem doświadczenia jest demonstracja efektu interferencji przestrzennej fal akustycznych oraz wyznaczenie prędkości dźwięku przez określenie długości fali akustycznej z wykorzystaniem mikrofonu. Wykorzystane będą w tym celu możliwości generacji dźwięku przez komputer.



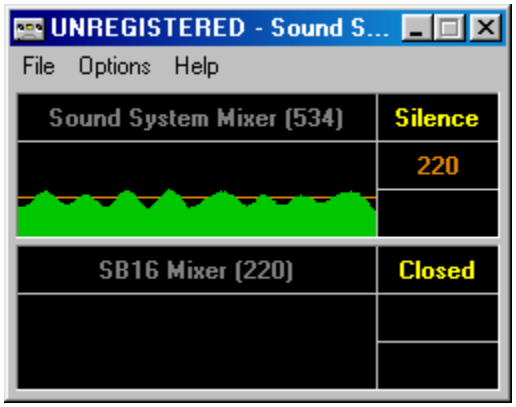
Rys. 10. Generator umożliwiający sterowanie częstotliwością, natężeniem i kształtem generowanej fali [1]

Dwa komputerowe głośniki (wyjście stereo) ustawiamy na jednej linii tak by były zwrócone w stronę słuchaczy. Generujemy falę dźwiękową o częstotliwości np. f_G=2000 Hz co odpowiada stosunkowo dużą (w porównaniu z przyrządami pomiarowymi) długości λ= 17 cm. Jako detekor wykorzystywany jest : (i) mikrofon oraz (ii) ucho eksperymentatora - odbiorca dźwięku będzie mógł zmieniając położenie ucha zauważyć wzmocnienia i osłabienia

interferujących fal. Aby słyszalny efekt był bardziej wyraźny można zasłonić jedno ucho, dzięki czemu mamy większą selektywność przestrzenną słuchacza. Elementem doświadczenia jest też porównanie wrażeń słuchowych w których istnieją jedno lub dwa źródła wysyłające fale akustyczne. Możemy zasłonić fizycznie jedno ze źródeł i powtórzyć „nasłuchiwanie" przestrzennej modulacji. Rozwiązaniem programowym jest wyłączenie jeden z kanałów przy pomocy miksera, lub generującego falę oprogramowania.

Prędkość dźwięku

Do wyznaczenia prędkości dźwięku posłużymy się tym samym zestawem jak w poprzednim przypadku koncentrując się bardziej na przestrzennej ilościowej analizie interferujących fal. Zmieniamy nieco geometrię układu. Głośniki (wzbudzane przez program Generator [1] np. f_G=2000 Hz) ustawiamy frontową częścią naprzeciwko siebie w odległości około 1 –1.3 m. W przestrzeni wytwarza się stabilny rozkład fali dźwiękowej. Przesuwając mikrofon wzdłuż linii łączącej oba głośniki rejestrujemy (z wykorzystaniem np. programu http://www.sound-snooper.com/en/download.php) zmiany natężenia dźwięku, wyniki pomiarów ilustruje rys. 11. Można w ten sposób określić odległość pomiędzy ekstremami natężenia fali dźwiękowej co pozwala ustalić jej długość λ. Znając częstotliwość generowanego dźwięku i pamiętając o zależności $v_d = \lambda * f_G$ wyznaczamy prędkość dźwięku z dokładnością około 5%.

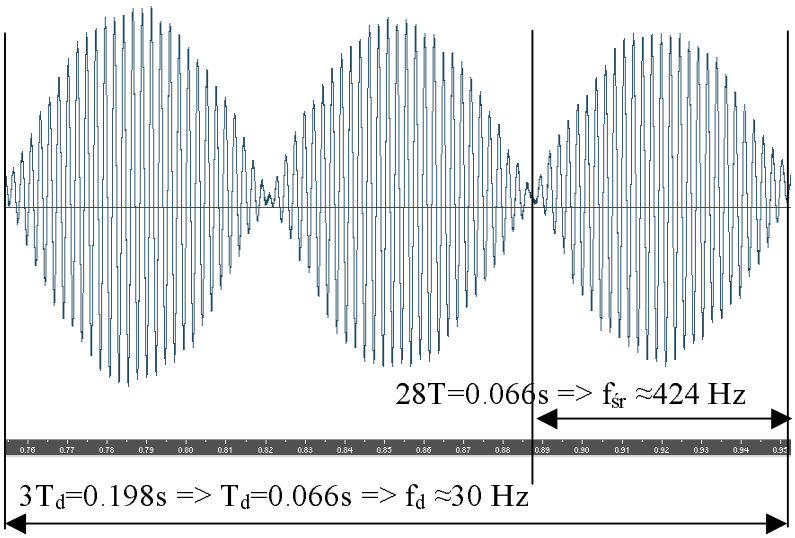


Rys. 11 Program umożliwiający śledzenie zmian natężenia w czasie (http://www.sound-snooper.com/en/download.php). Widzimy zmiany amplitudy dźwięku rejestrowane w czasie jednostajnego przesuwania mikrofonem między głośnikami. Program ten ułatwia przestrzenną lokalizację położeń minimów i maksimów interferujących fal.

Interferencja w czasie – dudnienia

Celem doświadczenia jest demonstracja efektu interferencji dwóch fal akustycznych (o różnych częstościach f_{G1} i f_{G2}) oraz wyznaczenie częstotliwości dudnień.
Klasyczne wyposażenie (w postaci pary kamertonów z których jeden ma zmienioną długość widełek) zastępujemy komputerem wraz z oprogramowaniem. Generujemy dwie fale o różnych częstotliwościach np. f_{G1} = 440Hz i f_{G2}= 410Hz .
Wskazana jest najpierw analiza jakościowa efektu – uchem eksperymentatora. W pierwszym etapie eksperymentu proponuje się rejestrację fali od pojedynczych głośników (np. zasłaniając na przemian oba źródła wyciszamy jedną z fal). Słuchacz rejestruje jedynie falę o ustalonym natężeniu i określonej częstotliwości. W drugim etapie do eksperymentatora dociera fala z obu głośników. Słuchacz odbiera wyraźne zamiany natężenia dźwięku nazywane dudnieniami.

Do ilościowej analizy efekt dudnień wykorzystywany jest mikrofonu oraz możliwość jednoczesnego generowania i rejestracji dźwięków (full-duplex), wyniki ilustruje rys. 12. Zarejestrowany sygnał można opisać przy pomocy wzoru
$A(t) = 2\,A\,\mathrm{Cos}[\pi(f_{G1} - f_{G2})t]\,\mathrm{Sin}[\pi(f_{G1}+f_{G2})t]$.



Rys. 12. Wynik rejestracji dudnień. Na podstawie tego wyniku jesteśmy w stanie wyznaczyć częstotliwość dudnień oraz wypadkowej fali akustycznej. Użyto programu CoolEdit [*]

Odnośniki:

- Opisy doświadczeń z wykorzystaniem karty dźwiękowej:
  http://physics.uwb.edu.pl/labfiz/rozne/VILO/pomiar-dzwieku.html
  http://ifnt.fizyka.amu.edu.pl/dydaktyka/konkurs/f2/instrumenty/instrumenty.doc
  http://ifnt.fizyka.amu.edu.pl/dydaktyka/konkurs/f2/spadanie.doc
  http://ifnt.fizyka.amu.edu.pl/dydaktyka/konkurs/f2/predkosc1/predkosc1.doc
  http://ifnt.fizyka.amu.edu.pl/dydaktyka/konkurs/f2/karta_swiatlo.doc
- [*]http://www.goldwave.com/ - odpowiednik programu CoolEdit który stał się ostatnio własnością firmy Adobe i jest dostępny pod nazwą „Adobe Audition" http://www.adobe.com/products/audition/main.html
- Informacje na temat kart dźwiękowych i oprogramowanie
  http://www.audioscientific.com/
  http://members.chello.se/jpo/index.html
  http://www.dazyweblabs.com/index.html
  http://www.stud.fh-hannover.de/~heineman/freeware.htm
- Strony wydawnictwa WSIP
  http://www.wsip.com.pl/serwisy/czasfiz/strony/bink.htm,
  http://www.wsip.com.pl/oip/fizyka_3/programy.html

1 Jan Mostowski, Włodzimierz Natorf, Nina Tomaszewska, *Fizyka i astronomia*, Wydawnictwo Szkolne i Pedagogiczne, Warszawa 2002.