

Charakterystyka fazowa

John Murray

Wprowadzenie do tematu

Strojenie aktywnych systemów głośnikowych w celu otrzymania płaskiej charakterystyki fazowej jest tak ezoteryczną czynnością, że niektórzy producenci nawet nie wiedzą jak to zrobić

Jednym z bardziej nadużywanych pojęć w naszym zawodzie jest „charakterystyka fazowa”. Często gdy słyszę „ten głośnik ma bardzo liniową charakterystykę fazową” zastanawiam się, na ile osoba wypowiadająca te słowa wie, o czym tak naprawdę mówi, gdyż w wielu przypadkach jest to zasłyszany i często beźmyślnie powtarzany slogan. Czymże więc jest ta charakterystyka fazowa? Co wpływa na to, że coś ma dobrą charakterystykę fazową? Co to jest zła charakterystyka fazowa? Jak można poprawić charakterystykę fazową? Czy ma to znaczenie? Czy potrafimy usłyszeć różnicę?

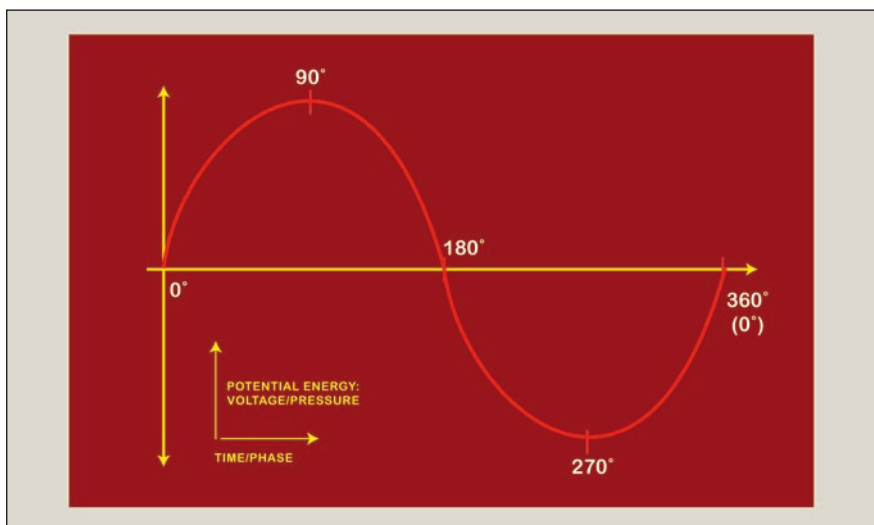
Nie jest to łatwe zadanie, ale chciałbym spróbować przybliżyć naszym Czytelnikom pojęcie fazy, objaśnić metody jej regulacji i opisać jej wpływ na jakość dźwięku. Strojenie aktywnych systemów głośnikowych w celu otrzymania płaskiej charakterystyki fazowej, jest tak ezoteryczną czynnością, że niektórzy producenci systemów nagłośnieniowych nawet nie wiedzą jak to

zrobić. Jednakże jest wiele zestawów głośnikowych z najwyższej półki jakościowej, które są strojone pod kątem uzyskania płaskiej charakterystyki fazowej. Często efekt finalny określany jest jako „liniowa charakterystyka fazowa”, co brzmi bardzo high-endowo, sprawia wrażenie techno-paplarni i w założeniach ma wywołać zamierzony efekt na potencjalnych nabywcach. Uważam jednak, że płaska charakterystyka fazowa jest bardziej ścisłym pojęciem. Jeśli stół jest płaski (w przeciwieństwie do pochylonego), łatwo zauważyć różnicę. Ale pochylony stół wciąż może mieć „liniową” powierzchnię. Tak więc w moim rozumieniu, płaska charakterystyka fazowa jest charakterystyką liniową bez nachylenia.

Mam nadzieję, że ten artykuł pomoże Wam nie tylko zrozumieć podstawowe pojęcia związane z fazą, ale też rozpoznać, kiedy ktoś będzie wygadywał bzdury na ten temat.

PODSTAWY

Na wstępie trzeba zaznaczyć, że w tym wypadku **faza** to nie to samo co **polaryzacja**. Faza sygnału występuje zawsze względem jakiegoś poziomu odniesienia i jest ona zarówno względna, jak i całkowicie biegunowa. Dodatkowo ciśnienie na membranie mikrofonu, które skutkuje wychyleniem membrany głośnika do przodu (w stronę słuchacza) oznacza, że system jest, z absolutnego punktu widzenia, spolaryzowany dodatnio (pozytywnie). Jeśli membrany w dwóch głośnikach wychylają się jednocześnie w przód i w tył, są wzajemnie spolaryzowane, niezależnie od swoich polaryzacji absolutnych. Odwrotna polaryzacja odwraca przebieg czasowy sygnału (obraca w pionie – względem osi poziomej – sygnał na oscyloskopie) równo dla wszystkich częstotliwości. Faza nie może być „dodatnia” czy „pozytywna”, „ujemna” bądź „negatywna” ani też „odwrócona”.



Rysunek 1. Fala sinusoidalna.

Może być tylko „przesunięta” w czasie względem sygnału referencyjnego. **Przesunięcie fazy (fazowe)** skutkuje późniejszym przybyciem sygnału, w stosunku do sygnału referencyjnego.

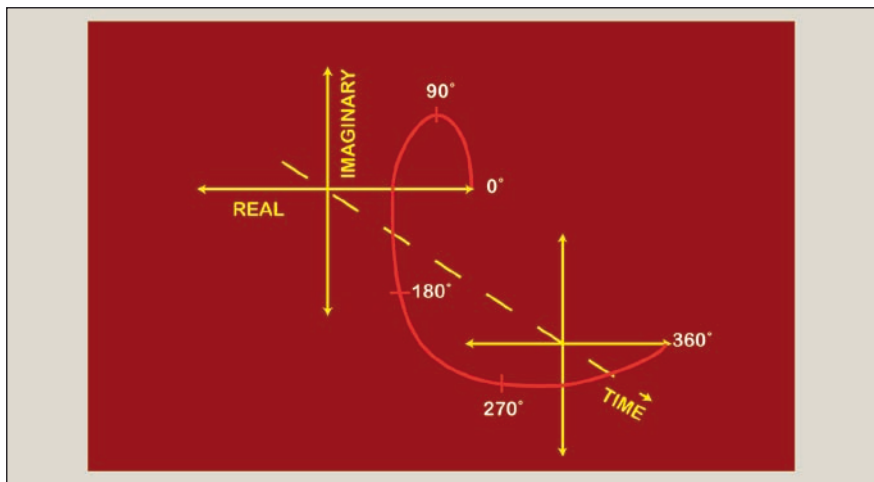
Rysunek 1 przedstawia typowy wygląd sygnału sinusoidalnego, z zaznaczonymi stopniami fazy. Jest to widok dwuwymiarowy, reprezentowany przez trójwymiarową spiralę z **rysunku 2**. **Rysunek 3** ukazuje okrąg ze stopniami fazy równomiernie rozmieszczonymi od 0 do 360 stopni. Wyobraź sobie generator mocy, który wytwarza 50 cykli fali sinusoidalnej zasilania AC. Wytwarza je poprzez ruch obrotowy w czasie. Może to być wykreślone jako spirala. A więc kiedy sygnał jest opóźniony w czasie w stosunku do innego, przesunięcie fazy wynosi tyle, ile wynosi przesunięcie opóźnionego sygnału na spirali.

Dla małych częstotliwości, z dużymi długościami fal (λ), jak np. 100Hz, 90-stopniowe ($1/4 \lambda$) przesunięcie fazy wymaga 2,5-milisekundowego (850mm) opóźnienia sygnału. Dla dużych częstotliwości, z krótkimi falami, jak np. 10kHz, to samo 90-stopniowe przesunięcie fazy skutkuje tylko 25ms (8,5mm) opóźnieniem sygnału. A więc duże przesunięcie fazowe dla dużych częstotliwości skutkuje bardzo małym opóźnieniem sygnału, podczas gdy relatywnie małe przesunięcie fazowe, powoduje znacznie większe opóźnienie sygnału dla małych częstotliwości. Pokazuje to, w jak dużym stopniu faza jest zależna od częstotliwości, podczas gdy polaryzacja jest od niej niezależna.

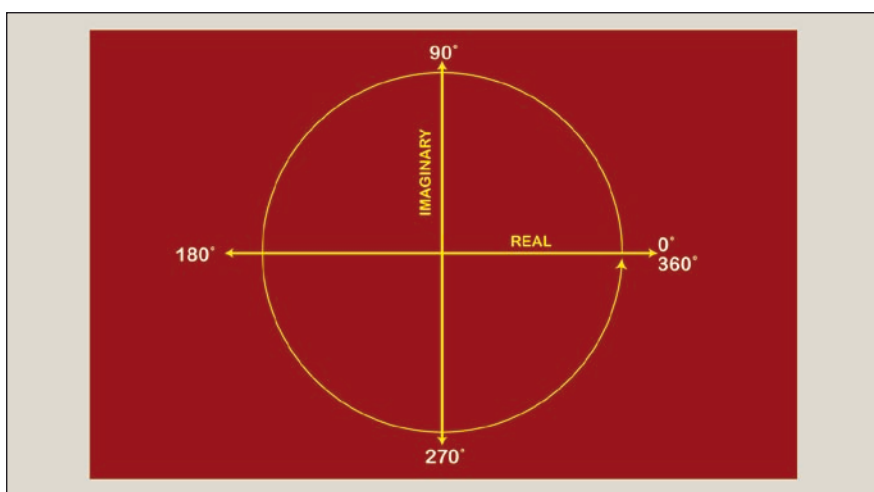
INTERFERENCJE FAZOWE

Założmy sytuację, kiedy dwa źródła sygnału tworzą kombinację dwóch sygnałów, z których jeden jest opóźniony w stosunku do drugiego. Różne przesunięcia fazy dla różnych częstotliwości powodują wówczas powstawanie filtra grzebieniowego. **Rysunek 4** przedstawia efekt filtra grzebieniowego wynikający z sumowania dwóch identycznych sygnałów, z których jeden jest opóźniony o 1 milisekundę. Wcięcia w charakterystyce częstotliwościowej są spowodowane przez dwa sygnały o jednakowym poziomie, które są przesunięte względem siebie o 180 stopni. Powoduje to całkowite stłumienie energii dla częstotliwości odpowiadających tym wcięciom.

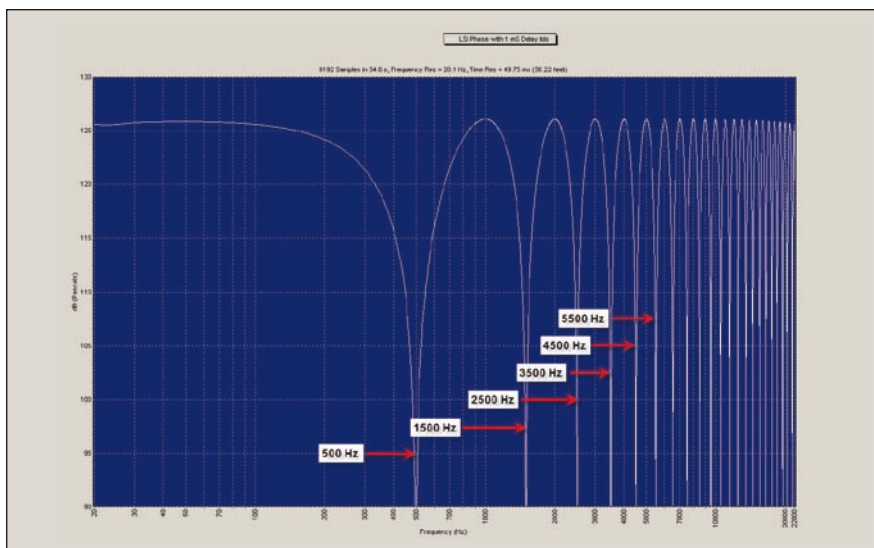
Zauważ, że pierwsze wcięcie w charakterystyce występuje przy 500Hz. Dzieje się tak dlatego, że 1-milisekundowe opóźnienie jest dokładnie połową fali dla 500Hz i to powoduje sumowanie się dwóch sygnałów w przeciwfazie (czyli de facto odejmowanie) dla tej



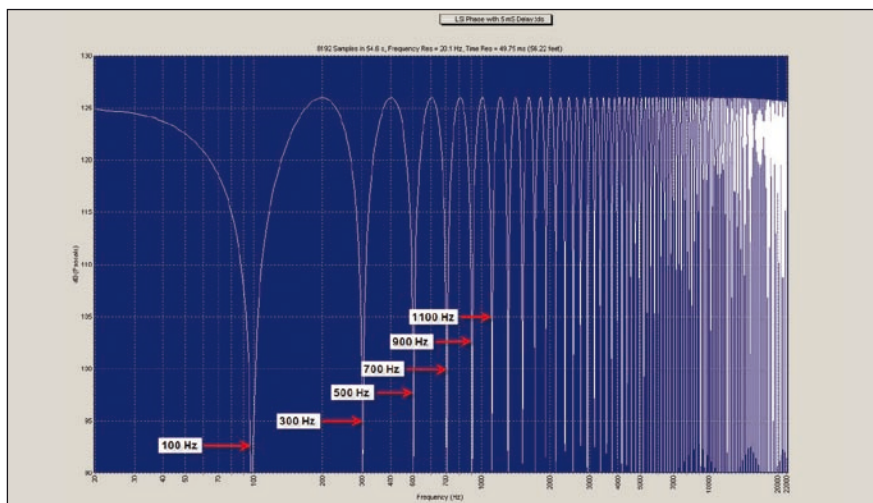
Rysunek 2. Trójwymiarowa prezentacja fali sinusoidalnej w postaci spirali fazowej.



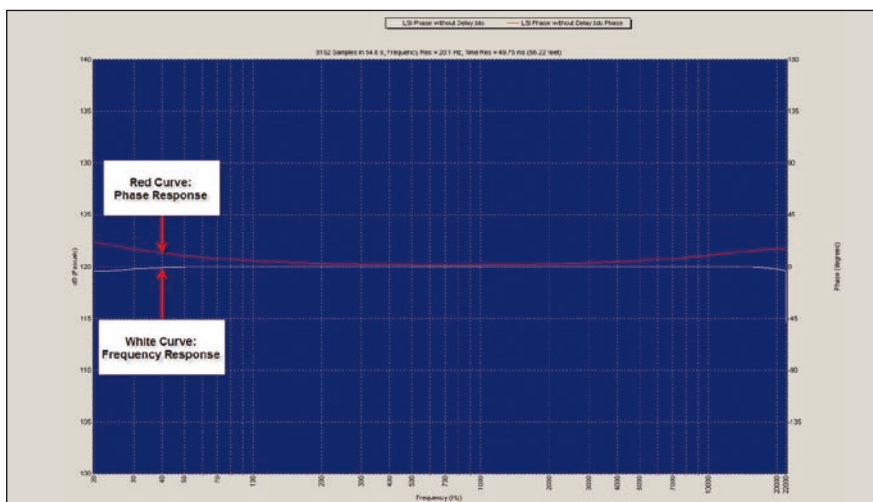
Rysunek 3. Koło fazowe. Końcowy widok spirali fazowej fali sinusoidalnej.



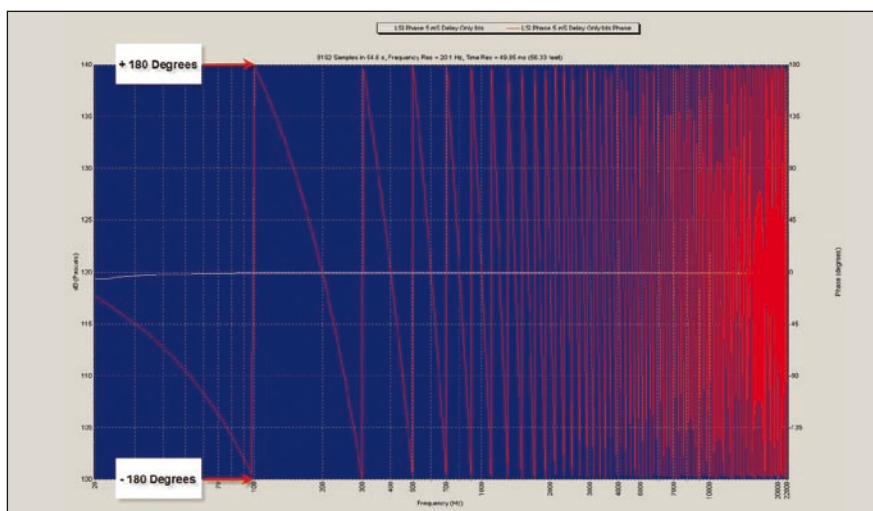
Rysunek 4. Efekt filtra grzebieniowego wynikający z sumowania dwóch identycznych sygnałów, z których jeden jest opóźniony o 1 milisekundę.



Rysunek 5. Filtr grzebieniowy powstały w wyniku dodania 5 milisekund opóźnienia do drugiego kanału.



Rysunek 6. Krzywa charakterystyki fazowej oryginalnego, nieopóźnionego sygnału, umieszczona wraz z krzywą charakterystyki częstotliwościowej.



Rysunek 7. Opóźnienie fazy w stosunku do sygnału testowego. Krzywa fazy zmierza ku pionowym liniom w miejscach, gdzie występują wcięcia na charakterystyce częstotliwościowej.

długości fali. Kolejne sekwencje wcięć występują przy 1500Hz, 2500Hz, 3500Hz, 4500Hz, 5500Hz itd. Schemat tego jest taki, że odległości pomiędzy kolejnymi wcięciami wynikają z częstotliwości, dla której wielkość opóźnienia drugiego kanału jest równa długości fali. W tym przypadku 1ms równa się 1000Hz (1000 cykli na sekundę oznacza 1 cykl w czasie 1ms). Inną prawidłowością tego schematu jest to, że pierwsze wcięcie w charakterystyce wystąpi zawsze w połowie częstotliwości przerw pomiędzy wcięciami.

Rozważmy inny przykład. Dodajemy 5-milisekundowe opóźnienie do sygnału drugiego kanału. 5ms jest okresem fali o częstotliwości 200Hz ($1/0,005 = 200\text{Hz}$). W związku z tym pierwsze wcięcie filtra grzebieniowego nastąpi dla 100Hz ($1/2 \cdot 1 = 100\text{Hz}$). Kolejne sekwencje wystąpią dla 300Hz ($100 + 200$), 500Hz ($100 + 200 + 200$), 700Hz ($100 + 200 + 200 + 200$), 900Hz, 1100Hz itd. Schemat ten został zaprezentowany na rysunku 5.

KRZYWE CHARAKTERYSTYKI FAZOWEJ

Rysunek 6 przedstawia krzywą odpowiedzi (charakterystyki) fazowej oryginalnego, nieopóźnionego sygnału, umieszczoną wraz z krzywą charakterystyki częstotliwościowej. Zauważ, że charakterystyka fazowa i częstotliwościowa są odniesione do przestrajanego sygnału sinusoidalnego generowanego przez system pomiarowy. Ponieważ są one zasadniczo płaskie względem sygnału testowego, możemy wywnioskować, że sygnał jest w fazie z sygnałem opóźnionym. Jeśli pokażemy charakterystykę częstotliwościową i fazową samego opóźnionego sygnału, będziemy mogli zauważyć opóźnienie fazy w stosunku do sygnału testowego (rysunek 7). Krzywa fazy zmierza ku pionowym liniom w miejscach, gdzie występują wcięcia na charakterystyce częstotliwościowej. Oznacza to, że faza w tym punkcie wynosi ± 180 stopni, gdzie opóźniony i referencyjny sygnał są względem siebie przesunięte o $+180$ lub -180 stopni.

ZAWIJANIE FAZY

Przyczyną pojawiania się pionowych linii łączących punkty $+180$ i -180 stopni jest standardowe uproszczenie przedstawiania fazy, polegające na jej „zawijaniu” na wykresie. Na rysunku 8 „odwinęliśmy” fazę, aby pokazać jej prawdziwą formę. Pokazuje to, że 5-milisekundowe opóźnienie powoduje o wiele większe przesunięcie fazy dla fal krótkich niż dla długich. 5ms opóźnienia to tylko 90-stopniowe ($1/4 \cdot 1$) przy 50Hz przesunięcie fazy,

podczas gdy dla 5kHz wynosi ono aż 9000 stopni, albo inaczej 25 długości fali. Patrząc na wykres charakterystyki częstotliwościowej/fazowej, często łatwo jest zapomnieć o jej logarytmicznych zmianach.

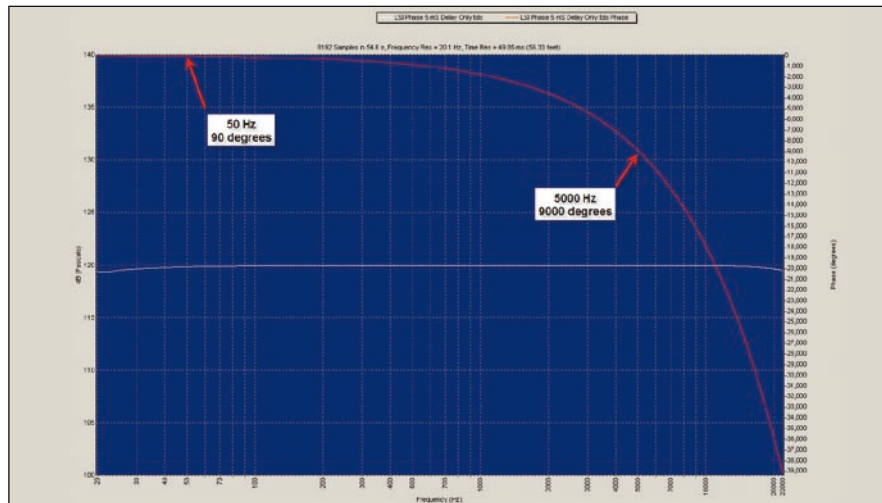
Faza opóźnionego sygnału jest przesunięta w stosunku do sygnału oryginalnego, nieopóźnionego, o 180 stopni tylko dla częstotliwości 100Hz. W innych miejscach wcięć charakterystyki częstotliwościowej, gdzie „zawijany” wykres z **rysunku 7** przechodzi w pionowe linie, przesunięcie fazy wynosi 180 stopni plus wielokrotność 360 stopni. Przykładowo, przesunięcie fazy przy 300Hz wynosi 540 stopni (180 + 360) a przy 500Hz 900 stopni (180 + 360 + 360). To powoduje, i jednocześnie wyjaśnia, takie a nie inne usytuowanie wcięć w charakterystyce częstotliwościowej naszego filtra grzebieniowego.

KOHERENTNE I NIEKOHERENTNE SUMOWANIE FAZ

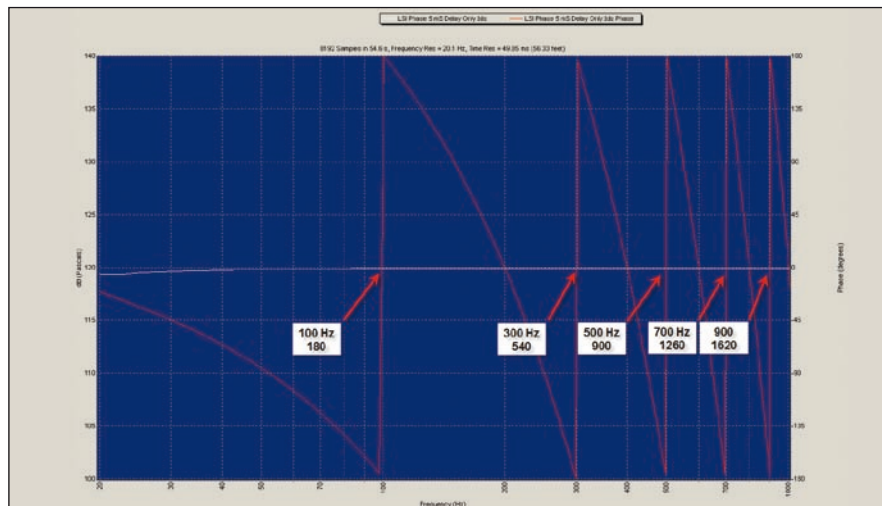
Rysunek 10 jest charakterystyką częstotliwościową oryginalnego sygnału, naniesioną na charakterystykę filtra grzebieniowego, powstałego z sumowania się tego sygnału z sygnałem opóźnionym. Zwróć uwagę, że szczyty „górek” pomiędzy wcięciami, są o 6dB wyżej niż te same punkty obu sygnałów występujących osobno. Są to te miejsca, w których sygnały występują w fazie i sumują się koherentnie, dając w efekcie 6-decybelowe podbicie. Przy 90-stopniowej różnicy faz podbicie to wynosi 3dB. Przy 120 stopniach przesunięcia faz, nie występuje ani podbicie ani słumienie sygnału z uwagi na to, że wypadkowa zsumowanych fal wypada dokładnie między dwoma sygnałami. Przy 180 stopniach sygnały akustyczne mogą znosić się nawzajem o 30 lub 40dB. Z elektronicznego punktu widzenia, będzie to niemalże całkowite wyłumienie, większe niż 100dB w stosunku do sygnału oryginalnego. Jeśli uśrednimy pole powierzchni powstałe pod krzywą filtra grzebieniowego, uwzględniając podbicia i wycięcia charakterystyki, rezultatem tego będzie sygnał o poziomie o 3dB wyższym niż poziom pojedynczego sygnału. To jest niekoherentne sumowanie i wynosi ono zawsze 3dB dla uśrednionego pasma.

FAZA A KIERUNKOWOŚĆ

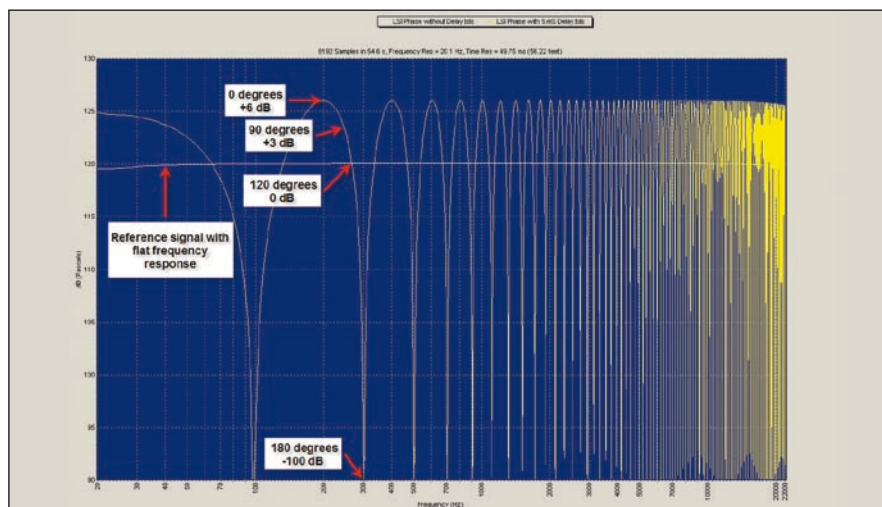
Co filtrowanie grzebieniowe ma wspólnego z wykresem kierunkowym? Odpowiedzią jest usytuowanie źródeł względem siebie. **Rysunek 11** przedstawia dwa idealne punktowe, wszechkierunkowe źródła umieszczone w odległości 172cm (5ms różnicy przy



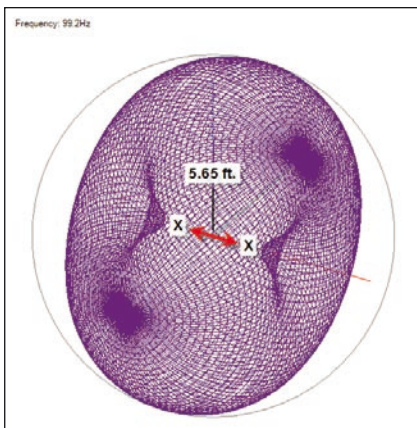
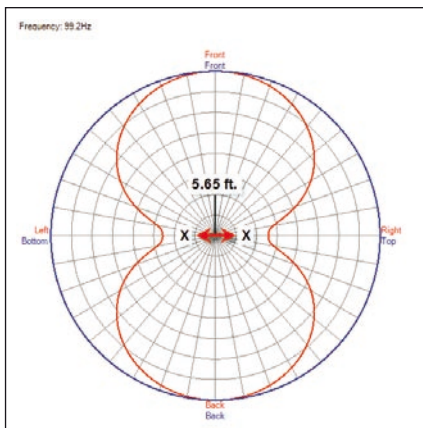
Rysunek 8. Odpowiednik ilustracji z rysunku 7, ale z „odwinięciem” charakterystyki fazowej.



Rysunek 9. 5 milisekund opóźnienia dodane do drugiego sygnału. Można zaobserwować przesunięcie fazy o 180 stopni przy 100Hz, o 540 stopni przy 300Hz, 900 stopni przy 500Hz itd.



Rysunek 10. Charakterystyka częstotliwościowa oryginalnego sygnału naniesiona na charakterystykę filtra grzebieniowego, powstałego z sumowania się tego sygnału z sygnałem opóźnionym.



Rysunek 11. Dwa idealne punktowe, wszechkierunkowe źródła umieszczone w odległości 172cm (5ms różnicy przy prędkości dźwięku 344m/s). Podziękowania dla Bruce'a Olsons z Olson Sound Design.

Stosując cyfrowe opóźnienie sygnału możemy sterować wiązką dźwięku w subwooferach, źródłach dipolowych lub kierunkowych źródłach liniowych

prędkości dźwięku 344m/s). Charakterystyka kierunkowa przy 100Hz ujawnia duże zagłębienia po obu bokach źródeł, gdzie przesunięcie faz obu źródeł względem siebie wynosi 180 stopni. Rysunek ten nie pokazuje idealnego wytłumienia, co wynika z narzuconego przez program pomiarowy wygładzania pomiędzy 5-stopniowymi próbkami. Jeśli jednak postawisz kalibrowany mikrofon w jednym z punktów „zerowych” charakterystyki kierunkowej i zmierzysz charakterystykę częstotliwościową idealnie płaskich źródeł, tak aby nie „cieniowały” się nawzajem, wyjdzie dokładnie charakterystyka 5-milisekundowego filtra grzebienowego. Stosując cyfrowe opóźnianie sygnału w celu sterowania wzajemnymi relacjami fazowymi, i w ten sposób zmieniając ustawowanie źródeł względem siebie, możemy osiągnąć sterowanie wiązką dźwięku w subwooferach, źródłach dipolowych lub kierunkowych źródłach liniowych. Ale to już jest temat na inny artykuł.

Mam nadzieję, że macie już większą orientację w temacie fazy i ogólne spojrzenie na to, jak „to” działa. Następnym naszym krokiem w zdobywaniu wiedzy na ten temat będzie rozpatrzenie zniekształceń fazowych w typowych zwrotnicach, jak możemy to skorygować i jakie może nam to przynieść korzyści.

John Murray, redaktor techniczny Live Sound International, jest weteranem z 30-letnim doświadczeniem w dziedzinie audio, pracującym dla takich firm jak EV, MediaMatrix i TOA. Posiada na swoim koncie dwie prace naukowe w AES, zasiada w czterech grupach roboczych w Syn-Aud-Con, jest także instruktorem NCSA i adiunktem na ICIA InfoComm. Kontakt: jmurray@livesoundinit.com.

audio·tech

Wojciech Lipczyński
Profesjonalne nagłośnienie koncertowe

- * koncerty czołowych wykonawców sceny muzycznej
- * muzyka symfoniczna
- * telewizyjne programy muzyczne i rozrywkowe
- * plenerowe widowiska „światło-dźwięk”, wielkie widowiska sportowe
- * wydarzenia reklamowe i medialne, imprezy biznesowe

- * światowej klasy systemy nagłośnieniowe line array „CODA AUDIO”
- * cyfrowe konsole dźwięku „YAMAHA”
- * bezprzewodowe indywidualne systemy odstuchu dousznego

Profesjonalizm, doświadczenie i kultura muzyczna naszych realizatorów gwarantuje najwyższą jakość naszych usług.

AUDIO-TECH Wojciech Lipczyński

ul. Fiołkowa 4/160A
31-357 Kraków
tel: 602 214 269
tel. fax: 012 413 14 31
www.audio-tech.com.pl
biuro@audio-tech.com.pl