

---

# DIGITAL DELAY

## PRZEWODNIK PO

# CYFROWYCH LINIACH OPÓŹNIAJĄCYCH

**Dlaczego cyfrowe linie opóźniające?** Z najbardziej zrozumiałym dźwiękiem spotkamy się podczas rozmowy twarzą w twarz z drugą osobą. Dźwięk jest głośny i bezpośredni a kierunek jego emisji jest zgodny z ustawieniem mówiącego. Najbardziej wyraziście brzmiące systemy dźwiękowe są tymi, których dźwięk przypomina nam właśnie brzmienie takiej bezpośredniej rozmowy. Jeśli osiągnięcie takiego efektu jest naszym celem, to linia opóźniająca stanie się niezbędną.

Są zasadniczo trzy różne zastosowania linii opóźniających. Pierwszym i najważniejszym jest **zsynchronizowanie głośników**, by zapobiec powstawaniu nadmiernego pogłosu i echa. Po drugie, w celu uniknięcia zniekształceń biorących się z **efektu filtra grzebieniowego**, po trzecie zaś do **zgrania** obrazu dźwiękowego tak, by zdawał się on pochodzić od wykonawcy a nie z głośników.

### Synchronizacja głośników

Dźwięk przemieszcza się w powietrzu z prędkością ok. 340 metrów na sekundę lub, jak kto woli, ok. 34 cm na milisekundę. Z drugiej zaś strony, sygnały elektryczne płyną do głośników przez system dźwiękowy z prędkością milion razy większą. Głównym więc zadaniem dla linii opóźniającej jest zsynchronizowanie wielu głośników tak, by dźwięki przebywając różne odległości dochodziły do uszu słuchacza w tym samym czasie. Efektem zsynchronizowania głośników jest znaczne zmniejszenie pogłosu i echa, co znacznie poprawia wyrazistość brzmienia.

### Synchronizowanie sygnałów

Istnieje co najmniej kilka typów przyrządów umożliwiających precyzyjne zmierzenie czasu potrzebnego na dotarcie sygnału z głośnika do określonego miejsca na widowni. Większość z nich jest bardzo skomplikowana a ich koszt wysoki. Szczęśliwie jednak istnieją narzędzia prostsze, wystarczające w większości przypadków.

W roku 1930 inżynierom opracowującym nagłośnienie kinowe udało się zsynchronizować głośniki nisko- i wysokotonowe za pomocą sygnału przypominającego trzask. Tak długo przemieszczali głośniki aż słychać było tylko jeden trzask przychodzący jednocześnie z obu źródeł. Możemy również w dzisiejszych czasach posłużyć się podobną metodą i jako źródła trzasku użyć prostej dziecięcej zabawki - klikera. Ten niezwykle prosty przedmiot zbudowany jest z dwóch pasków metalu i naciśnięty wydaje z siebie gwałtowny, głośny trzask. Kliker przydaje się również przy synchronizowaniu dźwięku bezpośredniego (ze sceny) z dźwiękiem pochodzącym z głośników.

Jako alternatywę, można do synchronizowania dwóch głośników (dwóch szerokopasmowych, lub sekcji nisko- i wysokotonowej) wykorzystać urządzenie sprawdzające zgodność fazy (*phase checker*) dwóch źródeł. Większość tego rodzaju przyrządów zawiera generator impulsu i odbiornik a poza tym są one tanie i posiadają inne – oprócz wspomnianego - zastosowania.

### Opóźnienie (grupowe) konwersji

Przetwarzanie sygnału z postaci analogowej na cyfrową i odwrotnie zawsze wprowadza pewne opóźnienie. Takie opóźnienie, często nazywane opóźnieniem grupowym, wynika ze stosowania konwersji analogowo-cyfrowej i ma przeciętnie wartość od ok. 0.9 do 5 milisekund. Można zauważyć, że linie opóźniające Sabine jako minimalne możliwe opóźnienie podają długość czasu konwersji i w przypadku POWER-Q wartość ta wynosi 1,38 ms. Brak opóźnienia uzyskamy tylko w trybie pominięcia urządzenia (*bypass*).

Nie wszyscy producenci podają minimalny czas obróbki sygnału przez ich urządzenia, choć opóźnienie to trzeba uwzględnić przy synchronizowaniu głośników. Przed przystąpieniem do synchronizowania głośników należy się więc upewnić, że wszystkie urządzenia cyfrowe są włączone. Należy pamiętać o tym również przy dodawaniu urządzeń cyfrowych do systemu i uwzględniać wprowadzane przez nie opóźnienie.

### Głośniki wiszące centralnie

Głośniki wiszące centralnie oferują wiele zalet w porównaniu do zazwyczaj stosowanego ustawiania ich po lewej i prawej stronie sceny. Najbardziej oczywistą jest ta, że ich odległość od słuchaczy najbliższych scenie i do stojących najdalej jest w miarę równa co sprawia, że jedni i drudzy słyszą dźwięk o podobnej głośności. Centralny zespół głośników oferuje ponadto jeszcze dwie zalety związane z obrazem akustycznym.

Badania wykazały, że ludzie są w stanie wykryć bardzo małe przemieszczenie się źródła sygnału w poziomie lecz nasza wrażliwość na podobne przemieszczenie się źródła w płaszczyźnie pionowej jest znacznie mniejsza. To sugeruje, że bardziej skłonni jesteśmy wzrokowo przypisać obraz dźwiękowy wykonawcy jeśli głośniki wiszą nad sceną, niż gdyby stały one po jej bokach.

Wszyscy słuchacze stojący bliżej wykonawcy niż głośników centralnych słyszeć będą najpierw dźwięk dochodzący bezpośrednio ze sceny a dopiero potem z głośników. To dodatkowo sprawi, że dźwięk utożsamiany będzie bardziej z wykonawcą niż z nagłośnieniem (patrz efekt pierwszeństwa opisany poniżej).

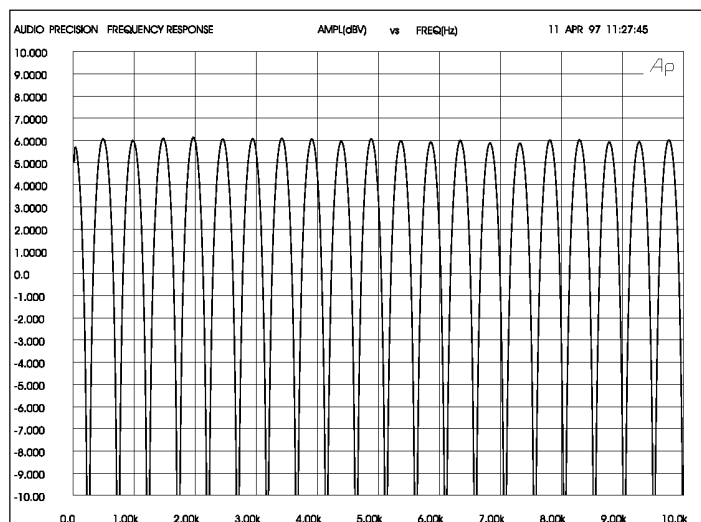
### Efekt filtru grzebieniowego

Wiele osób zapewne pamięta doświadczenia z fizyki w szkole średniej, gdzie w kuwecie z wodą demonstrowano zjawiska związane z rozchodzeniem się fal pochodzących z dwóch źródeł punktowych. Fale z jednego źródła tworzyły widoczne wzory interferencyjne z falami z drugiego źródła. Tam, gdzie spotykały się fale o zgodnej fazie stawały się one większe, zaś w innych miejscach następowało ich wzajemne wygaszenie się, gdyż szczyt jednej fali spotykał się z doliną drugiej. Doświadczenia te pokazywały, że największe zafalowanie powstawało w miejscach, w których interferowały fale o jednakowych amplitudach.

Podobna interferencja powstaje w systemie dźwiękowym, kiedy pojawi się w nim opóźniony sygnał, który zostanie następnie zmiksowany z sygnałem oryginalnym. Efektem interferencji jest tu tzw. FILTR GRZEBIENIOWY, nazywany tak z powodu kształtu charakterystyki przypominającej zęby grzebienia (rysunki 1 i 2). Istnieje wiele sytuacji, w których dochodzi do powstania filtru grzebieniowego. Na przykład dzieje się tak, gdy odtwarzamy nagranie przez dwa głośniki i ten, który znajduje się dalej interferuje z tym, który znajduje się bliżej. Filtr grzebieniowy powstaje także wtedy, gdy wykonawca zbierany jest przez dwa mikrofony jednocześnie, jeden bliżej od drugiego. Zjawisko to wprowadzamy również miksując w konsoli sygnał powracający z efektu cyfrowego z sygnałem oryginalnym.

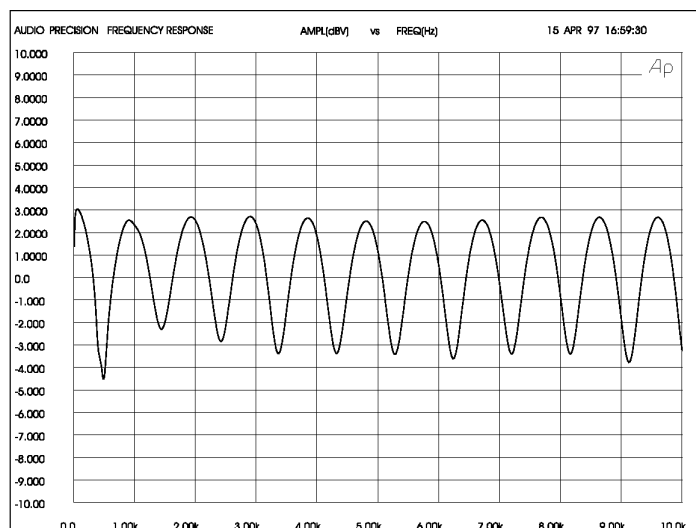
#### Rys. 1: FILTR GRZEBIENIOWY

Sygnał wejściowy zmieszany z identycznym, opóźnionym o 2 ms. (Obydwa sygnały mają identyczną amplitudę. Maksymalne wzmocnienie filtru +6 dB, maks. tłumienie  $-\infty$ .)



#### Rys. 2: FILTR GRZEBIENIOWY.

Sygnał wejściowy zmieszany z identycznym, opóźnionym o 2 ms. (Sygnał opóźniony o amplitudzie o 10 dB mniejszej. Maksymalne wzmocnienie filtru +2.5 dB, maksymalne tłumienie -3 dB.) Redukcja amplitudy sygnału opóźnionego zmniejsza intensywność występowania zjawiska.



### Obliczanie częstotliwości filtru grzebieniowego

Częstotliwości, na których następuje wzajemne osłabianie i wzmacnianie się sygnałów zależą od wielkości opóźnienia (czyli różnicy czasu pomiędzy pojawieniem się sygnału oryginalnego i opóźnionego). Pierwsze osłabienie pojawia się na częstotliwości  $f = 1/(2t)$  Hz, gdzie  $t$  jest czasem opóźnienia w sekundach. Osłabienia pojawiają się co  $1/t$  Hz. Rys. 3 pokazuje zmianę częstotliwości filtru grzebieniowego w zależności od zmiany opóźnienia.

**Rys. 3:**

Filtr grzebieniowy „zacieśnia się” w miarę wzrostu czasu opóźnienia.

Czas opóźnienia = 0.002 s		Czas opóźnienia = 0.003 s		Czas opóźnienia = 0.004 s	
Oslabienie [Hz]	Wzmocnienie [Hz]	Oslabienie [Hz]	Wzmocnienie [Hz]	Oslabienie [Hz]	Wzmocnienie [Hz]
250	500	167	333	125	250
750	1000	500	667	375	500
1250	1500	833	1000	625	750
1750	2000	1167	1333	875	1000
2250	2500	1500	1667	1125	1250
2750	3000	1833	2000	1375	1500
3250	3500	2167	2333	1625	1750
3750	4000	2500	2667	1875	2000
4250	4500	2833	3000	2125	2250

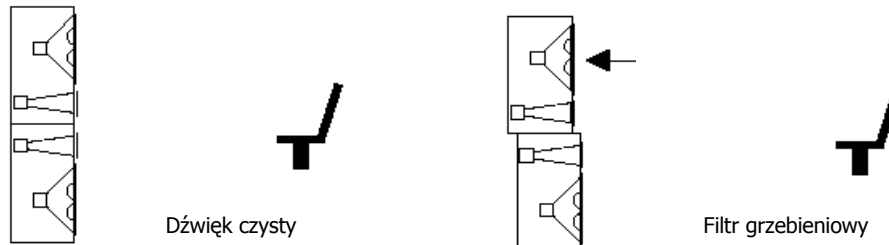
### Amplituda filtru grzebieniowego

Jeśli sygnały oryginalny i opóźniony mają tę samą amplitudę, to wzmacnienia osiągają wartość +6 dB zaś dla częstotliwości, gdzie sygnały znajdują się w przeciwfazie następuje całkowita likwidacja sygnału (tłumienie o  $\infty$ ).

Filtry grzebieniowe sprawiają wiele kłopotów. Częstotliwości, na których następuje wzmacnienie skłonne są powodować sprzężenia, zaś miejsca osłabienia powodują, że sygnał wydaje się słaby i przekorygowany.

Proponujemy wykonać prosty eksperyment, który pozwoli nam usłyszeć efekt filtru grzebieniowego.

**Rys. 4:** Filtr grzebieniowy zauważalnie wpływa na brzmienie.



Postawmy jedna na drugą dwie identyczne szerokopasmowe kolumny tak, jak to pokazano na rysunku 4. Precyzyjnie ustawmy je tak by głośniki wysokotonowe położone były blisko siebie i w jednakowej od nas odległości i podłączmy całość monofonicznie. Stańmy przed nimi teraz i posłuchajmy naszej ulubionej, dobrze (szerokopasmowo) nagranej płyty. Następnie poprośmy kogoś, by powoli zaczął odsuwać górną kolumnę. Następująca teraz degradacja dźwięku spowodowana jest przez powstający filtr grzebieniowy. Efekt jest najbardziej wyrazisty przy zastosowaniu dobrej jakości głośników.

### Korygowanie efektu filtra grzebieniowego

Efekt filtra grzebieniowego jest w pewnym stopniu nieunikniony w każdym systemie dźwiękowym i nie może być usunięty za pomocą korekcji. Na szczęście większość tego rodzaju problemów może być zredukowana do minimum dzięki zsynchronizowaniu sygnałów i redukcji amplitudy sygnału opóźnionego. Poniższe przykłady pokazują szereg praktycznych zastosowań.

### Effekt pierwszeństwa: Synchronizacja obrazu akustycznego

W swojej pracy z 1951 roku Helmut Haas opisał serię eksperymentów demonstrujących nasze słyszenie sygnałów opóźnionych i echa. Podczas eksperymentów słuchacz usytuowany był pomiędzy parą głośników w odległości 3 metrów od każdego z nich; głośniki odwrócone były o  $45^\circ$  – jeden w prawo, drugi w lewo. Kiedy odtwarzano nagranie z obu głośników jednocześnie, słuchacz lokalizował obraz dźwiękowy (kierunek, z którego wydaje się pochodzić dźwięk) dokładnie pośrodku między głośnikami.

Kiedy Haas opóźnił sygnał dochodzący do jednego z głośników o czas zawierający się w przedziale 5 – 35 milisekund, słuchacz obserwował przesunięcie się obrazu akustycznego w stronę głośnika, który słyszał jako pierwszy. Podczas gdy opóźniony głośnik nie wnosił wiele do odbieranego kierunku pochodzenia dźwięku, to samo nagranie sprawiało wrażenie bycia pełniejszym, o większej głośności.

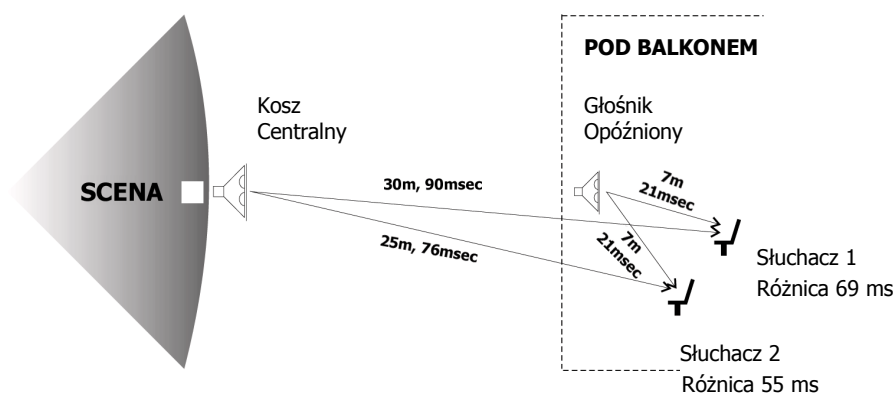
Haas pokazał, że żeby obraz dźwiękowy powrócił na środek, należy sygnał doprowadzony do opóźnionego głośnika wzmocnić o około 8 – 10 dB (zwiększyć jego głośność dwukrotnie). Zwiększenie głośności ponad ten poziom, lub zwiększenie opóźnienia ponad 35 ms powodują, że opóźniony sygnał zaczyna być odbierany jako echo.

Zjawisko przemieszczania się obrazu dźwiękowego w kierunku, z którego dźwięk dolatuje do nas jako pierwszy nazywamy efektem pierwszeństwa. Zjawisko zaś które sprawia, że dwa oddzielne sygnały o czasie opóźnienia do 35 ms słyszane są jako jeden dźwięk - nazywane jest efektem Haasa, choć branża dźwiękowców używa często wymiennie tych dwóch terminów.

## TRZY ZASTOSOWANIA CYFROWYCH LINII OPÓZNIAJĄCYCH

### Zastosowanie I: Głośniki pod balkonem

**Rys. 5 :** Schematyczny rysunek ilustrujący zastosowanie głośników pod balkonem



Rysunek 5 pokazuje typową sytuację, w której wykonawca jest nagłaśniany przez centralnie wiszący nad sceną zestaw (klastę) głośników. Prawie każdy na widowni cieszyć się będzie dobrym brzmieniem nagłaśnienia za wyjątkiem osób siedzących pod balkonem, w jego cieniu. By to nadrobić dodajemy głośnik pod balkonem.

Mamy więc zapewnioną odpowiednią głośność pod balkonem, ale dźwięk z dwóch różnych głośników dolatuje do uszu słuchacza w odstępie 55 do 70 ms. Obydwa sygnały wraz ze swoimi echem tworzą niezrozumiałą kafeonię. Należy więc opóźnić dźwięk z kolumny pod balkonem aby zsynchronizować oba sygnały. Czy ustawiamy opóźnienie w POWER-Q na 55 czy na 70 ms? Zapewne geometria miejsca nie pozwoli nam na dokładne zsynchronizowanie dźwięku we wszystkich punktach na widowni i będziemy musieli osiągnąć kompromis.

Po pierwsze, rozważmy rodzaj programu, z którym będziemy mieli do czynienia. W przypadku słowa mówionego największą zrozumiałość osiągniemy synchronizując głośniki pomocnicze z głównymi z dokładnością do ok. 10 ms, czyli w naszym przypadku ustawiając czas opóźnienia na 69 – 71 ms. Jeśli materiałem jest muzyka, możemy wówczas pozwolić sobie na nieco większy pogłos.

Musimy następnie wyeliminować zniekształcenia powstałe wskutek efektu filtru grzebieniowego. Po znalezieniu linii prostej, na której poziomy dźwięk z głośników głównych i pomocniczego będą sobie równe (patrz rozdział 15) użyjemy POWER-Q do precyzyjnego zsynchronizowania głośników wzdłuż tej linii, co wyeliminuje najbardziej słyszalne zniekształcenia. Efekt filtru grzebieniowego poza wyznaczoną linią jednakowej głośności jest mniej słyszalny, ponieważ sygnał głośniejszy jest w mniejszym stopniu zakłócany przez sygnał słabszy.

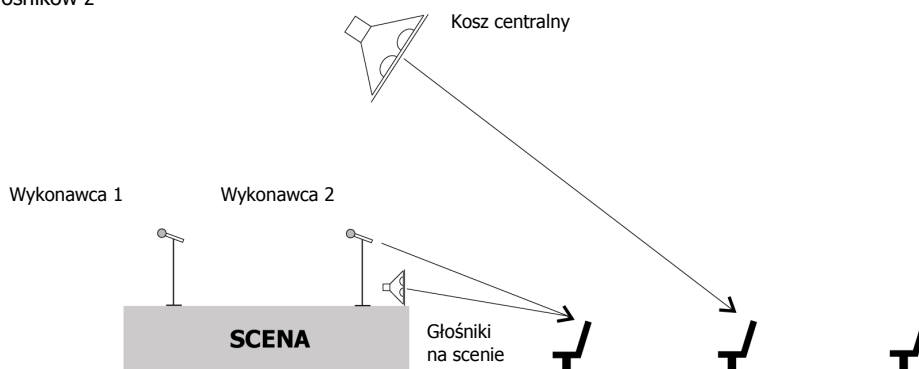
Jako ostatnie możemy eksperymentalnie dodać opóźnienie rzędu 5 – 10 ms, które powinno wzmocnić efekt pierwszeństwa dla widzów siedzących najbliżej sceny.

Pamiętajmy, że każde ustawienie będzie nieco kompromisowe i że ostatecznym sędzią będzie nasze ucho. Sprawdźmy więc brzmienie nagłaśnienia w wielu różnych miejscach na widowni i skorygujmy najważniejsze błędy.

## Zastosowanie II: Głośniki centralne i pomocnicze.

Rysunek 6 ilustruje typową sytuację, w której głównymi elementami są: scena, stojący na niej mikrofon, centralna grupa (klastery) głośników i głośniki pomocnicze stojące po bokach sceny. Na świecie istnieją tysiące podobnych instalacji, które „obywają” się bez linii opóźniających. Ale z pomocą POWER-Q możemy poprawić klarowność i wydobyć z istniejącego systemu nową jakość brzmienia, nie wydając przy tym dużych pieniędzy. Użyjmy POWER-Q w celu precyzyjnego zsynchronizowania wrażeń wzrokowych z wrażeniami słuchowymi co sprawi, że wzmacniany dźwięk będzie wydawał się pochodzić od wykonawcy a nie z głośników.

**Rys. 6 :** Synchronizowanie centralnego klastra głośników z przednimi głośnikami pomocniczymi.



Znajdźmy miejsce na środku widowni, gdzie centralnie wiszące głośniki są o 6 – 8 dB głośniejsze niż dźwięk dochodzący bezpośrednio ze sceny. Opóźnimy je teraz tak, by dźwięk od nich przychodził do nas 5 do 8 ms po dźwięku bezpośrednim. Eksperymentujemy omijając POWER-Q przyciskiem *bypass*, obserwując jak źródło pozorne przemieszcza się od głośników do wykonawcy i z powrotem. Rezultat powinien być znakomity, ponieważ i nasz wzrok i słuch będą otrzymywać te same wrażenia kierunkowe, a występ zaprezentuje się w sposób bardziej naturalny i ekscytujący. Dzięki temu zabiegowi najlepsze miejsca na widowni staną się jeszcze lepsze.

A co z głośnikami pomocniczymi? Ich celem jest poprawić klarowność i komfort odsłuchu pierwszym rzędom na bokach widowni, gdzie dźwięk z centralnej grupy głośników często nie dociera. Dodajmy więc około 8 ms opóźnienia tym głośnikom, czerpiąc korzyści z efektu pierwszeństwa.

Sugerując wartość 8 ms zakładamy, że wykonawca znajduje się blisko brzegu sceny. Bywa jednak i tak, że scena ma ponad 10 m głębokości i w jej głębi również znajduje się inny wykonawca a bezpośredni dźwięk jego (jej) głosu dociera do pierwszych rzędów o 25 ms później, niż od wykonawcy z brzegu sceny. Możemy i wówczas wykorzystać efekt pierwszeństwa podłączając linię opóźniającą o 25 ms w tor insertowy miksera dla tego wykonawcy.

Z pewnością wykorzystywanie zalet efektu pierwszeństwa nie jest tak oczywiste dla publiczności jak usuwanie sprzężeń, ale miło jest wiedzieć, że ktoś starał się uczynić wszystko co było możliwe, by odbiór występu stał się przyjemnością.

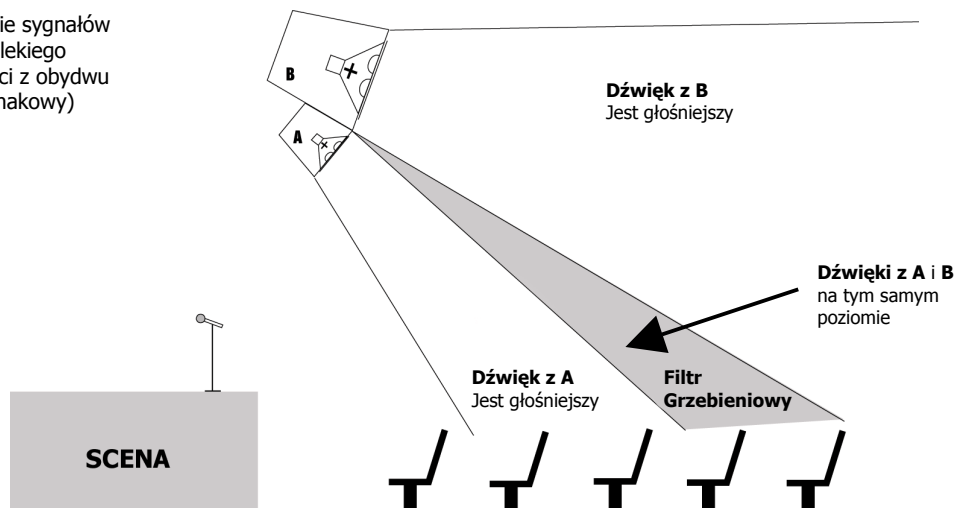
## Zastosowanie III: Synchronizowanie sygnałów z głośników bliskiego i dalekiego zasięgu.

W celu prawidłowego nagłośnienia dużego audytorium często stosujemy dwa różne typy głośników szerokopasmowych: są to zgromadzone w centralnym klastrze i skierowane nieco ku dołowi głośniki bliskiego zasięgu, oraz wiszące nieco wyżej głośniki dalekiego zasięgu, z których sygnał dociera na tyły widowni. Jest prawie niemożliwe takie mechaniczne ich ustawienie, które pozwoliłoby wyeliminować efekt filtra grzebieniowego w polu jednakowej słyszalności obu systemów. Podobne zjawisko ma miejsce przy ustawieniu głośników na obu (lewym i prawym) skrajach sceny.

Jak wiemy, nie jest możliwe usunięcie filtra grzebieniowego za pomocą skorygowania charakterystyki systemu ale i tu POWER-Q jest w stanie sobie z tym poradzić i to bez ujemnego wpływu na zrównoważenie pasma dla pozostałej publiczności. Znajdźmy oś promieniowania, na której sygnał z obu typów głośników jest sobie równy. Tu właśnie efekt filtra grzebieniowego jest najbardziej wyraźny. Teraz precyzyjnie ustawmy opóźnienie w POWER-Q tak, by dźwięk z obu systemów docierał w to miejsce jednocześnie. Dzięki POWER-Q możemy to zrobić z dokładnością do 20 mikrosekund.

Tej samej procedury możemy użyć w celu precyzyjnego zsynchronizowania sygnałów w ramach klastra głośników jednego rodzaju.

**Rys. 7** : Synchronizowanie sygnałów z głośników bliskiego i dalekiego zasięgu. (Poziom głośności z obydwu typów głośników jest jednakowy)



## OBLICZANIE OPÓŹNIENIA PRZY UŻYCIU ODLEGŁOŚCI

Obliczanie opóźnienia przy użyciu pomiarów odległości jest powszechnie używanym i akceptowanym sposobem. Na dobry początek, oblicz opóźnienie (delay) przy 1 ms na stopę (foot) pomiędzy głośnikami. Użyj następujących wzorów dla precyzyjnego obliczenia.

$$\text{Opóźnienie (ms)} = 1000 \left( \frac{\text{D odległość w metrach}}{344} \right)$$

Te pomiary zakładają standardową temperaturę (20°C) i ciśnienie (760 mm Hg). Dźwięk podróżuje słabiej w zimniejszym i bardziej suchym powietrzu i w wyższym ciśnieniu. Na przykład, szybkość dźwięku zmniejsza się o około 0.61 metra na sekundę gdy temperatura spadnie z 20°C do 0°C.