

Nowe spojrzenie na liniowość w kolumnach głośnikowych RCF

W tej białej księdze omówimy znaczenie wykluczenia zniekształceń fazowych w systemach wzmacniania dźwięku, oraz w jaki sposób RCF umożliwił, poprzez przetwarzanie FiRPHASE, osiągnąć liniowość fazową częstotliwości bez irytujących opóźnień czasowych.

Krótką historia percepcji fazy

Prawo akustyczne Georga Ohma (1843) stwierdza, że dźwięk muzyczny jest postrzegany przez ucho jako zestaw kilku składowych czystych tonów harmonicznym. Później Von Helmholtz zgodził się z prawem Ohma i pogłębił swoje przyszłe badania, mówiące, że percepcja auralna zależy tylko od widma amplitudy dźwięku i jest niezależna od kątów fazowych różnych uzupełnień zawartych w widmie.

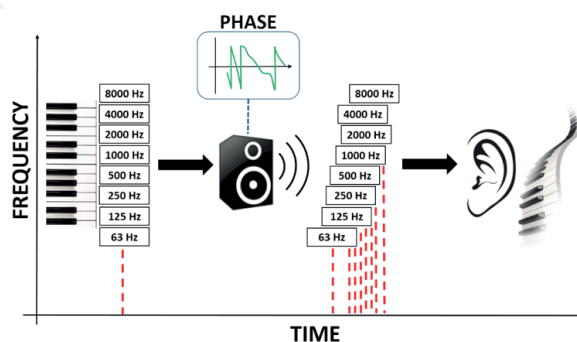
W 1841 r. August Seebeck, naukowiec z Uniwersytetu w Dreźnie, dowodził, że w jego eksperymentach różnice w fazie są wyraźnie słyszalne. Brak fundamentalnego efektu wyjaśnia, w jaki sposób postrzeganie wysokości dźwięku może być zmienione przez różnice fazowe harmonicznym. Debata trwała przez dwadzieścia lat w czasopiśmie naukowym *Annalen der Physik und Chemie*, wtedy Seebeck zmarł w młodym wieku i jego wiedza została zapomniana aż do 1959r., kiedy Schroeder, w swojej pracy zatytułowanej „Nowe wyniki dotyczące czułości fazy monofonicznej” (1959), wykazał ten fenomen. Schroeder stwierdza, że wniosek Ohma jest nieprawidłowy i jest tylko prawdziwy w niektórych konkretnych przypadkach. Postuluje wówczas efekt maskowania faz Schroedera: po prostu zmieniając poszczególne składowe fazy dwóch sygnałów o identycznych obwiedniach, możliwe jest uzyskanie silnej percepcji różnicy wysokości dźwięku, na przykład podczas odtwarzania melodii.

Dzisiaj mamy kilka demonstracji, które sprzeciwiają się wcześniejszej wierze, że ludzkie ucho jest głuche na fazę, jak dzieło Lipshitz i wsp. W *Journal of Audio Engineering Society* w 1982 roku: „Odkryliśmy, że zniekształcenie faz w średnim paśmie można usłyszeć nie tylko na prostych

kombinacjach sinusoid, ale także na wielu wspólnych sygnałach akustycznych”. Wskazał, że problemy te istnieją, ale mogą być subtelne i projektanci przetworników mogą podejmować inteligentną decyzję co do znaczenia (a nie istnienia) efektów fazowych.

W innej, późniejszej konferencji AES w 1996 r. Johansen & Rubak stwierdził, że „wniosek powinien brzmieć: nie możemy pozwolić, aby nadmiar fazy był zaniedbywany i musimy poruszać się w zagadnieniu korekcji w inny sposób”.

Percepcję widma fazowego badano także w odniesieniu do wielu tematów, takich jak akustyka hali koncertowej, percepcja wysokości dźwięku, identyfikacja samogłosek, maskowanie, przetwarzanie mowy i rendering biauralny.



Rys.1 - Przykładowy obraz monoauralnych zakłóceń fazowych generowanych przez system dźwiękowy, który może być wytworzony przez przetworniki, EQ, zwrotnice i wzmacniacze.

0° Liniowość fazy

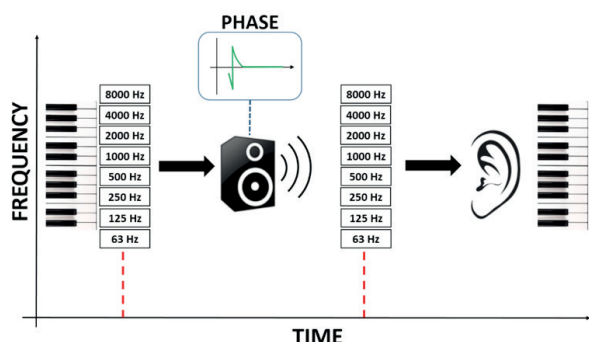
Liniowość fazy stałej grupy opóźnienia opisują charakterystykę systemów liniowych, w których wszystkie składowe widma sygnału przemieszczają się przez ten układ z tą samą prędkością. W szczególnym przypadku system liniowo fazowy może być nazywany „faza - 0°”: wszystkie składowe widma sygnału docierają do wyjścia w tym samym czasie.

W systemie o liniowej odpowiedzi częstotliwościowej i fazie 0° kształt sygnału wyjściowego

jest idealnie dokładną repliką sygnału wejściowego, przy czym wielkość zależy tylko od wzmocnienia systemu.

Wielodrożne kolumny głośnikowe i tradycyjne analogowe lub cyfrowe filtry drugiego rzędu są typowymi przykładami systemów nieliniowo fazowych z pewną ilością „rozmycia czasowego” ze względu na całą charakterystykę przejścia sumy elektrycznej lub odpowiedzi akustycznej.

Celem projektanta głośników jest dostarczenie „transparentnego” dźwięku, w którym głośnik może odtworzyć dźwięk możliwie najbardziej zbliżony do oryginału, co jest istotną cechą aplikacji głosowych. Jakakolwiek charakterystyka dźwięku, taka jak korekcja lub zniekształcenia, powinny być dokonywana przez np. muzyków i inżynierów dźwięku, dając im swobodę prezentowania publicznie własnego brzmienia. W klasycznych zastosowaniach muzycznych dźwięk może być przetwarzany doskonale, bez zmian.



Rys. 2 - Wizualne przedstawienie systemu idealnie liniowego

Problem fali kwadratowej

Głośnik o 0° fazy dostarcza słuchaczowi wszystkie częstotliwości w tym samym czasie, bez względnych opóźnień, w wyniku prawdziwej rekonstrukcji oryginalnego dźwięku. Jednym z najbardziej istotnych i słyszalnych efektów w przejściu między „nie 0° fazy” a „ 0° fazy” jest optymalna rekonstrukcja transjentów. Zastanówmy się nad werblem lub uchwyceniu strun gitary: dużo energii i częstotliwości w bardzo małej ilości czasu. Jeśli częstotliwość uderzenia lub podciągnięcia przychodzą na ucho nie zbite, ale nieco rozproszone w czasie, impuls traci energię, dynamikę, detale. Można to zrozumieć za pomocą fali kwadratowej, która jest sumą głównej fali sinusoidalnej i pewnej liczby parzystych harmonicznych w wyższych częstotliwościach. Jeśli harmoniczne są opóźnione w odniesieniu do podstawy, rekonstrukcja nie powiedzie się.

	Oryginalny sygnał fali kwadratowej na wejściu głośnika	
(a)	Sygnał fali kwadratowej rekonstruowany przez głośnik z harmonicznymi poza fazą	
(b)	Sygnał fali kwadratowej rekonstruowany przez głośnik z harmonicznymi w fazie	

Tabela 1 - Wizualny przykład rekonstrukcji fali prostokątnej z (a) systemu zniekształconego w fazie i (b) systemu spójnego w fazie.

Głośnik jest wykonany nie tylko z przetworników, ale filtrów wyrównujących oraz zwrotnicy odgrywających fundamentalną rolę w końcowym efekcie. Filtry analogowe lub cyfrowe filtry II rzędu powodują zniekształcenia fazowe wokół częstotliwości, na której działają, dodając je do tych już obecnych w przetwornikach.

Filtry FIR dla linearyzacji fazy

Współczesne układy DSP w celu dostarczenia sygnału o 0° fazy, umożliwiają wstępną kompensację tych zniekształceń fazowych. Najbardziej użytecznym i wydajnym sposobem jest użycie filtrów FIR (Finite Impulse Response - filtry o Skończonej Odpowiedzi Impulsowej). Filtr FIR jest tylko zbiorem współczynników, reprezentatywnych jako odpowiedź impulsowa (IR) w dziedzinie czasowej. Cyfrowy sygnał audio jest filtrowany, a tym samym zmodyfikowany przez FIR jako matematyczna operacja zwaną „splo-tem”.

Ten rodzaj filtrów wprowadza opóźnienie, czas potrzebny do przesłania sygnału przez całą długość filtra. Na szczęście opóźnienie czasowe jest równe dla wszystkich częstotliwości (brak relatywnych opóźnień między poszczególnymi częstotliwościami): w tym konkretnym przypadku są one nazwane fazą liniową. Filtr FIR z liniowym filtrem fazowym może manipulować korekcją amplitudy sygnału bez zniekształcenia jego fazy, może działać jako Biała Księga FiRPHASE z filtrów II rzędu bez ich skutków ubocznych w fazie sygnału. Na przykład filtry FIR mogą być

używane do filtru zwrotnicy zamiast wspólnych filtrów dolno i górno przepustowych II rzędu, osiągając bardzo strome zbocza bez modyfikacji fazy.

Problem opóźnień filtrów FIR

Niestety, nie wszystko złoto co się świeci: używanie filtrów FIR ma swoją cenę. Najmniejsza częstotliwość kontrolowana przez filtr (jego rozdzielczość) jest proporcjonalna do długości filtra pod względem próbek, a tym samym do opóźnienia wprowadzanego w łańcuchu DSP. Jak pokazano w Tabeli 2, minimalna długość filtra użyteczna do zarządzania wszystkimi słyszalnymi częstotliwościami powoduje opóźnienie wynoszące 21 ms (przy częstotliwości próbkowania 48 kHz), opóźnienie niedopuszczalne w przypadku występów na żywo. Zastosowanie tego rodzaju filtrów staje się kompromisem między rozdzielczością a opóźnieniem.

Biorąc pod uwagę cenę pod kątem opóźnień, filtry FIR mogą być wykorzystane do skorygowania dużej części odchyżeń fazowych od 0° tworząc pewien rodzaj delty Diraca (filtr pełno przepustowy): impuls, który nie wpływa na widmo amplitudowe sygnału, ale modyfikuje fazę, aby

tymczasowo wyrównać składowe częstotliwości dźwięku.

Tymczasowe wyrównanie elementów częstotliwości jest wyraźnie widoczne w warunkach pomiarów odpowiedzi impulsowych. Wyrównanie faz zwiększa dynamikę sygnału odtwarzanego przez głośnik, ponieważ energia jest skoncentrowana w tym samym czasie i nie rozproszona, jak w przypadku braku filtru FIR. Projekt filtru FIR dla tego konkretnego celu powinien rozpocząć się od dokładnego pomiaru fazy głośnika.



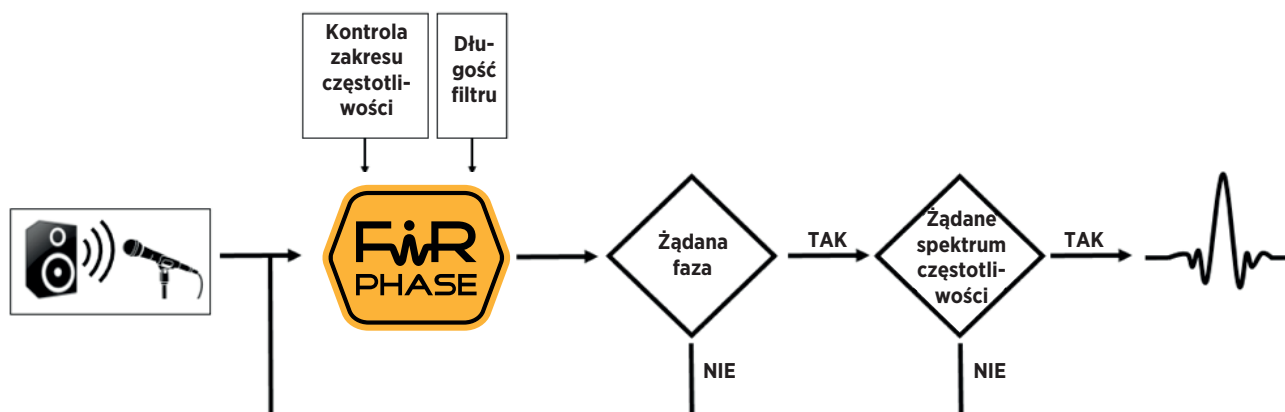
Rys.3 - Suma fazy filtru FIR z fazą głośnika

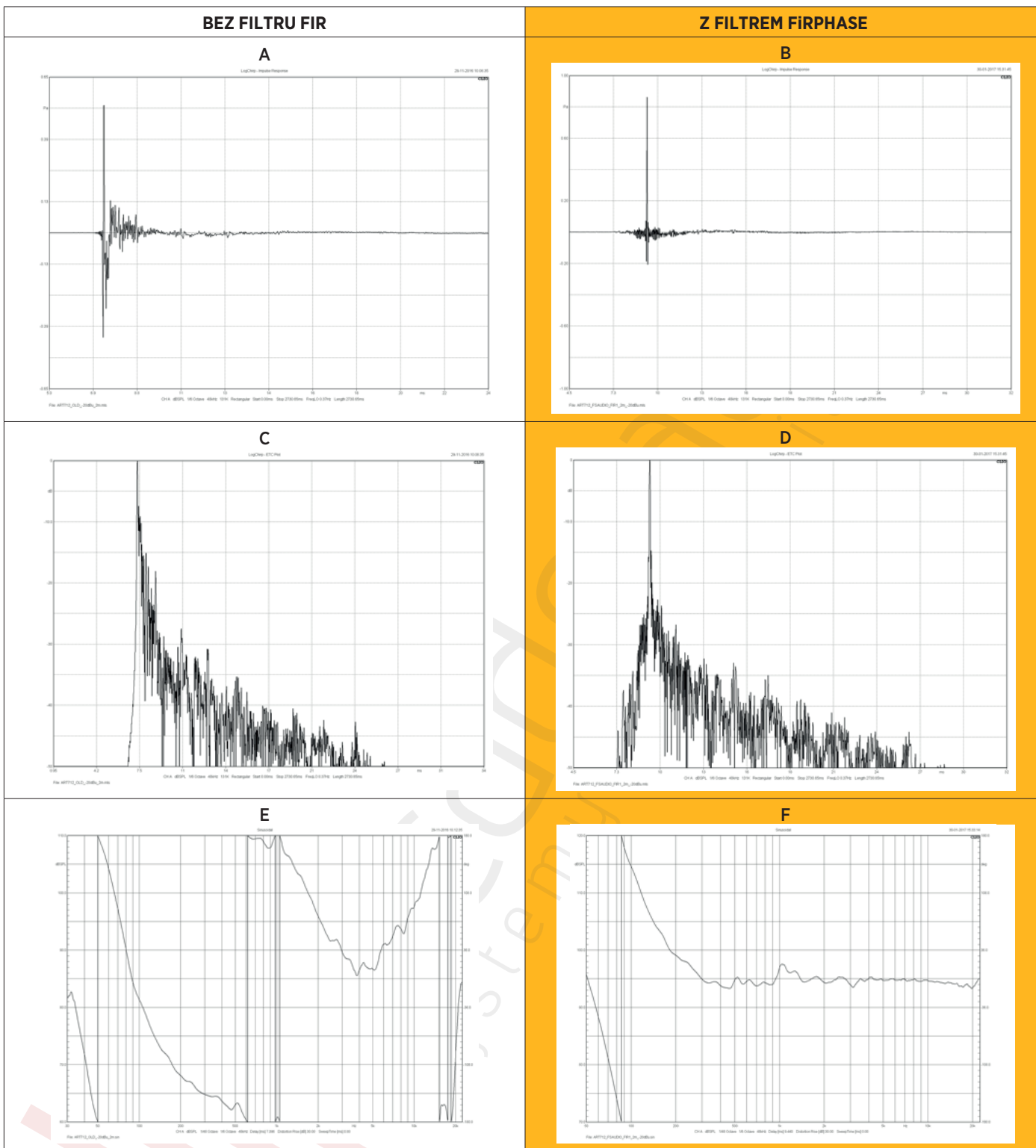
FiRPHASE

Proces RCF FiRPHASE używa tych pomiarów i próbuje odwrócić fazę głośnika bez dotykania korekcji amplitudy. Sercem zaawansowanej techniki wykorzystywanej przez FiRPHASE jest metoda rekurencyjna (metoda Mniejszych Kwadratów) w połączeniu z własnym algorytmem RCF, który oblicza najlepsze współczynniki filtru FIR ustawione zgodnie z wymuszeniami amplitudy i fazy. Algorytm koryguje fazę i amplitudę (w razie konieczności), biorąc pod uwagę słabe punkty przetworników, rezonanse lub tłumienia spowodowane obudową głośnika. Ta technika pozwala projektantom na głęboką kontrolę fazy w średnich i niskich częstotliwości przy użyciu stosunkowo niewielkich filtrów, osiągając wyższą rozdzielczość niż tą sugerowaną przez teorię.

	Częst. próbk. 48 kHz		Częst. próbk. 96 kHz	
Liczba uderzeń	Rozdziel. (Hz)	Opóźnienie (ms)	Rozdziel. (Hz)	Opóźnienie (ms)
32	1500	0.33	3000	0.17
256	188	2.7	375	1.3
1024	47	11	94	5.3
2048	23	21	47	11
4096	12	43	23	21

Tabela.2 - Opóźnienia wprowadzane przez filtry FIR





Rys. 4 A - Odpowiedź impulsowa bez filtru FIR, B - Odpowiedź impulsowa z filtrem FIR, C - Krzywa Czasowa Energii bez FIR, D - Krzywa Czasowa Energii za filtrem FIR, E - Wykres fazy bez FIR, F - Wykres fazy za filtrem FIR

ŹRÓDŁA
 Alcántara, J. I., Holube, I., & Moore, B. C. (1996). Effects of phase and level on vowel identification: data and predictions based on a nonlinear basilar-membrane model. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 100(4 Pt 1), 2382-92. <https://doi.org/10.1121/1.417948>
 Breebaart, J., Nater, F., & Kohlrausch, A. (2010). Spectral and spatial parameter resolution requirements for parametric, filter-bank-based HRTF processing. *AES: Journal of the Audio Engineering Society*, 58(3), 126-140.
 Chappel, R., Schwerin, B., & Pallwal, K. (2015). Phase distortion resulting in a just noticeable difference in the perceived quality of speech. *Speech Communication*, 81, 138-147. <https://doi.org/10.1016/j.specom.2016.04.005>
 Griesinger, D. (2010). Phase coherence as a measure of acoustic quality part 1. *Proceedings 20th International ICA*, (August), 1-7.
 Hopkins, K. (2008). The role of temporal fine structure information in the perception of complex sounds for normal-hearing and hearing-impaired subjects, (November).
 Johansen, L. G., & Rubak, P. (1996). The Excess Phase in Loudspeaker / Room Transfer functions: Can it be Ignored in Equalization Tasks? 100th Audio Engineering Society Convention.
 Kohlrausch, a., & Sander, A. (1995). Phase effects in masking related to dispersion in the inner ear. II. Masking period patterns of short targets. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 97(3), 1817-1829. <https://doi.org/10.1121/1.413097>
 Koya, D. (n.d.). Aural Phase Distortion Detection Presented by Daisuke Koya In Fulfillment of the Master's of Science Thesis Requirement.
 Krauss, G. J. (2006). Advantages of FIR Filters in Digital Loudspeaker Controllers. *Aes*.
 Lipshitz, S. P., Pockock, M., & Vanderkooy, J. (1982). On the Audibility of Midrange Phase Distortion in Audio Systems. *J. Audio Eng. Soc*, 30(9), 580-595. Retrieved from <http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=3824>
 Lokki, T., Pätynen, J., Tervo, S., Siltanen, S., & Savioja, L. (2011). Engaging concert hall acoustics is made up of temporal envelope preserving reflections. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 129(6), EL223-L228. <https://doi.org/10.1121/1.3579145>
 Mowlae, P., Saedi, R., & Stylianou, Y. (2016). Advances in phase-aware signal processing in speech communication. *Speech Communication*, 81, 1-29. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.specom.2016.04.002>
 Plomp, R., & Smoorenburg, G. (1970). Frequency analysis and periodicity detection in hearing. *Perception*, 1-6. Retrieved from <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Frequency+Analysis+and+Periodicity+Detection+in+Hearing#0>
 Pöbloth, H., & Kleijn, W. B. (1999). On phase perception in speech. 1999 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. *Proceedings. ICASSP99 (Cat. No.99CH36258)*, 1, 29-32 vol.1. <https://doi.org/10.1109/ICASSP1999.758054>
 Turner, R. S. (1977). The Ohm-Seebeck dispute. Hermann von Helmholtz, and the origins of physiological acoustics. *British Journal for the History of Science*, 10(34 Pt 1), 1-24. <https://doi.org/10.1017/S0007087400015089>
 Welti, T. (2015). Factors that Influence Listeners' Preferred Bass and Treble Balance in Headphones.