

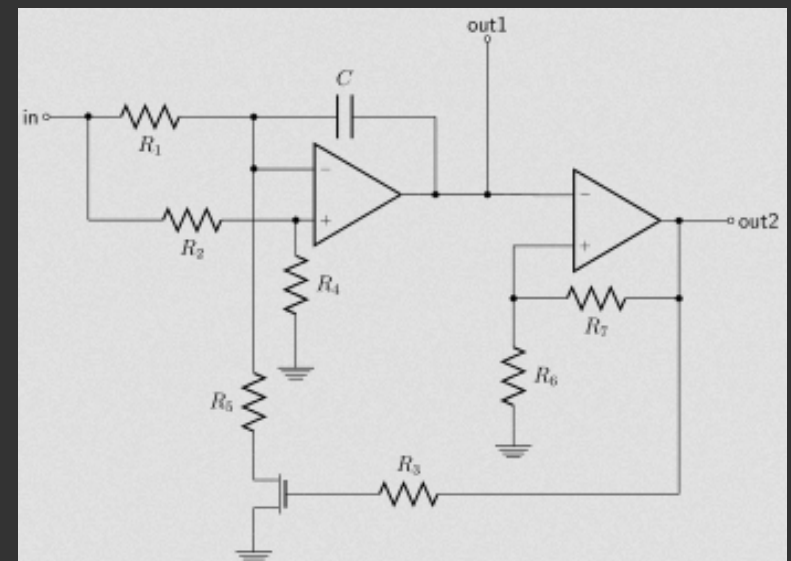
Elektroniczne instrumenty muzyczne

SYNTEZA TABLICOWA

Cyfrowe generatory

Analogowe generatory VCO

- Niedoskonałości analogowych układów w synteźatorach subtraktywnych przyczyniały się do ciekawego, „ciepłego” ich brzmienia.
- Główny problem : niestabilność częstotliwości, a więc i wysokości dźwięku – instrument fałszuje!
- Typową przyczyną było nagrzewanie się układów.
- Problem szczególnie wyraźny w instrumentach polifonicznych (wielogłosowych).



Analogowe generatory VCO

Jak działa typowy generator analogowy VCO?

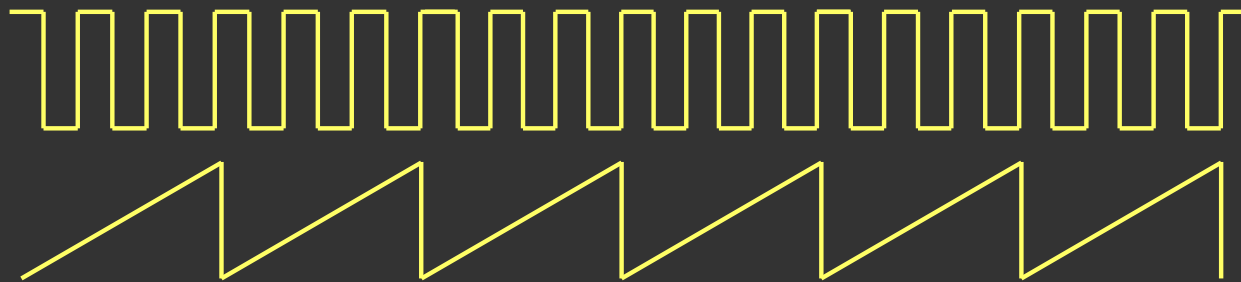
- Kondensator jest ładowany prądem.
- Komparator wykrywa że napięcie osiągnęło wartość progową, rozładowuje kondensator.



- W ten sposób powstaje fala piłokształtna. Z niej można łatwo uzyskać inne kształty, np. przez całkowanie.
- Ponieważ komparator bada napięcie, zmiany szybkości ładowania kondensatora (np. wpływ temperatury) powodują zmianę okresu i częstotliwości sygnału.

Generatory sterowane cyfrowo

- DCO – *Digitally Controlled Oscillator*
- Komparator został zastąpiony przez element cyfrowy:
 - generator wytwarza ciągi impulsów o wysokiej cz.
 - licznik impulsów mierzy czas jednego okresu.



- Wysoka precyzja okresu sygnału.
- Reszta generatora jest nadal analogowa, czyli pozostają np. niedoskonałości kształtu fali (i dobrze!).

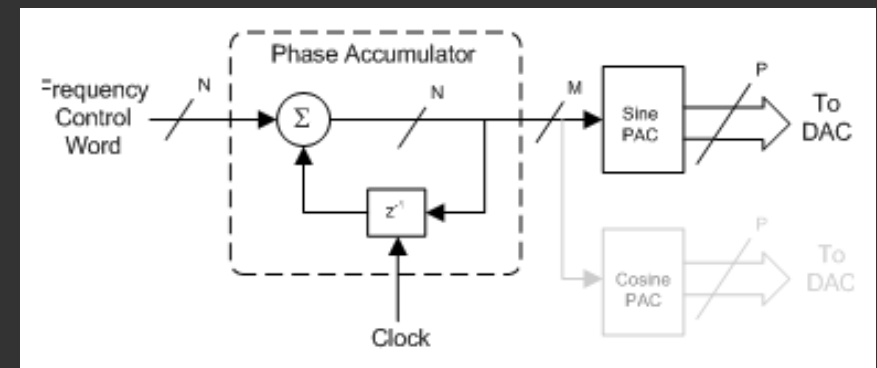
Cyfrowe generatory

W pełni cyfrowe generatory sygnałów (*direct digital synthesizer*), również nazywane DCO:

- generator i licznik impulsów – wyznacza częstotliwość,
- akumulator fazowy – „tworzy” falę piłokształtną,
- kształtowanie sygnału – inne fale niż „piła”,
- konwerter cyfrowo-analogowy.

Zalety: stabilność.

Wada: tracimy analogowe „niedoskonałości”,
dźwięk staje się bardziej „zimny”.



Cyfrowe generatory

Licznik fazowy wytwarza falę **piłokształtną** poprzez sumowanie amplitud impulsów. Inne kształty fali:

- **prostokątna:**
 - progowanie fali piłokształtnej, albo:
 - sumowanie piły z kopią przesuniętą w czasie.
- **trójkątna:** całkowanie (czyli sumowanie) wartości sygnału prostokątnego (zwykle tylko w LFO),
- **sinusoidalna:** konwerter fazowo-amplitudowy (faza sinusa ma kształt piły), sinusy były rzadko używane w syntezatorach z DCO.

Syntezaory wykorzystujące DCO

DCO były stosowane w większości analogowych syntezatorów w latach 80 (Roland, Korg, Akai, itp.).

Korg Poly-61 (1982)



Roland Juno
6 / 60 / 106
(1982-84)

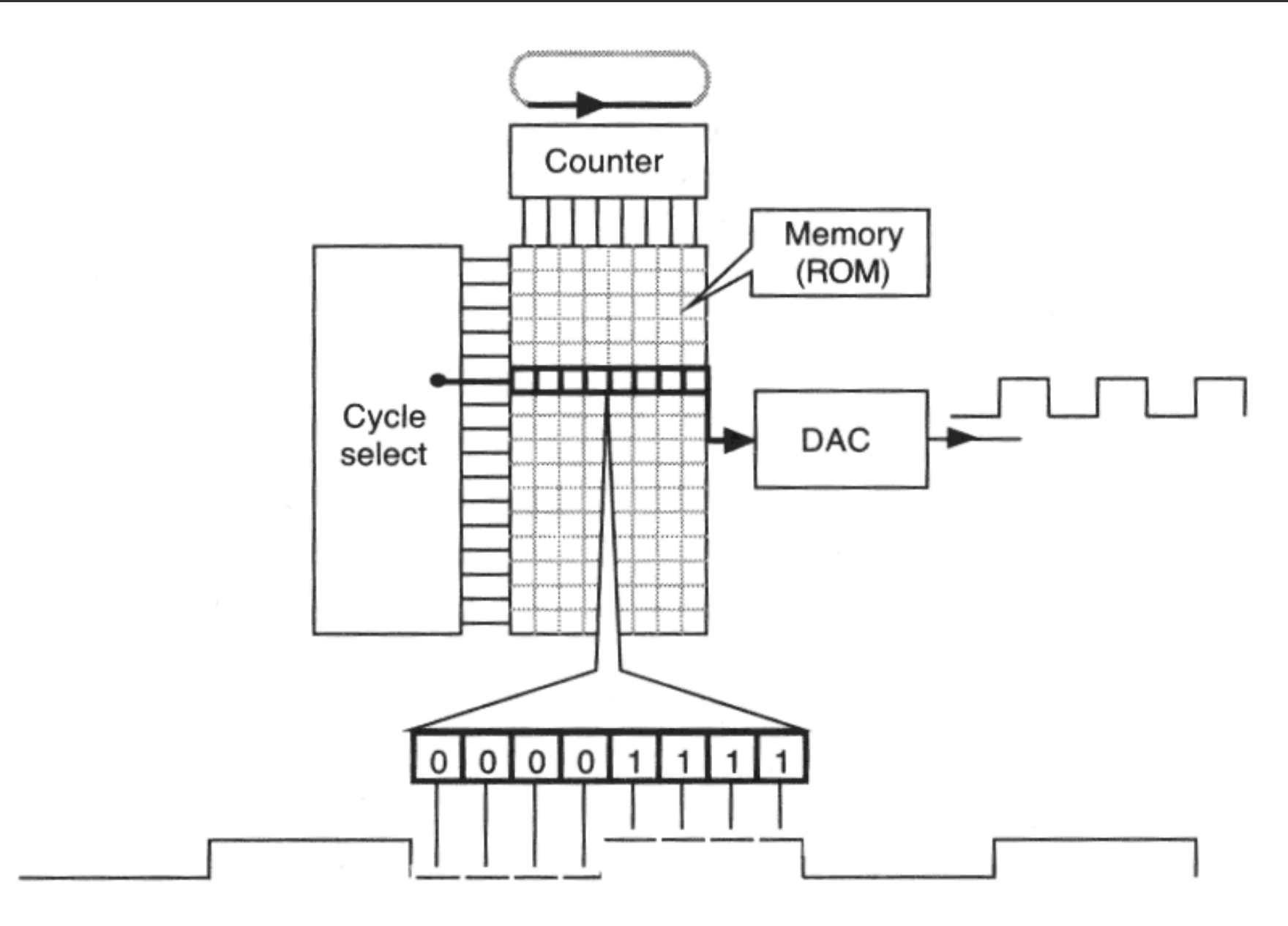


Pamięć RAM jako generator cyfrowy

Zupełnie nowe podejście.

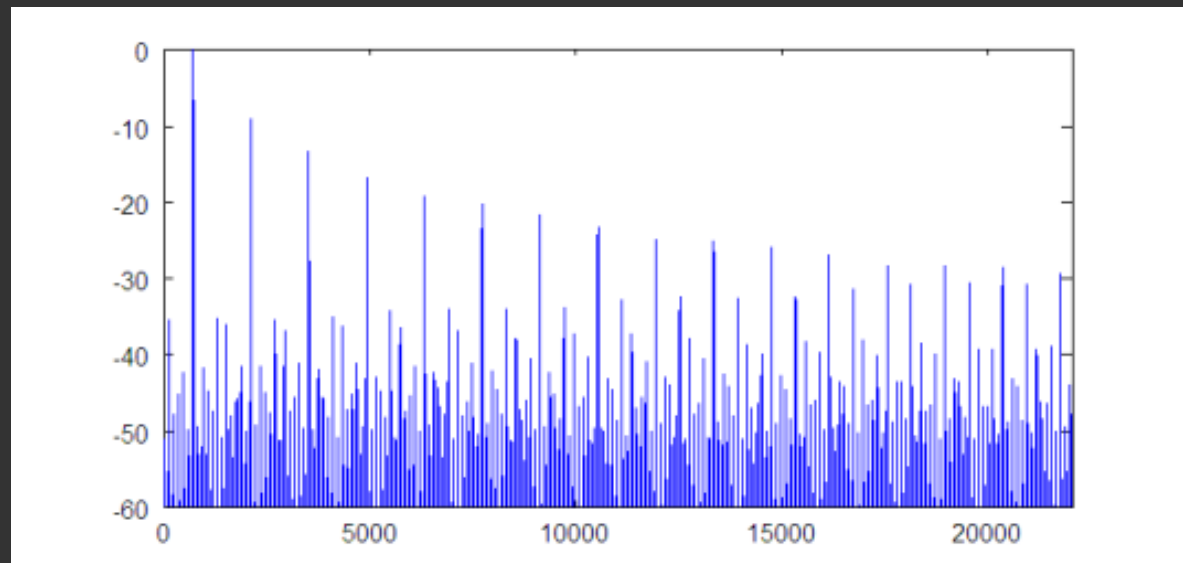
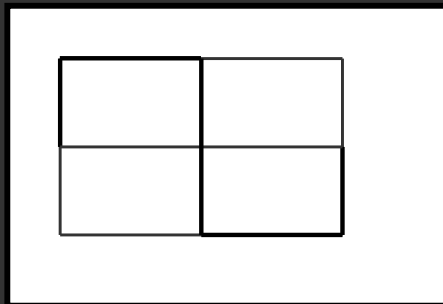
- Sygnały zapisane w pamięci (RAM lub ROM).
- Jeden okres (lub jego połowa, jeżeli symetryczny).
- „Generowanie”: odczyt z RAM i zapętlenie.
- Możliwość tworzenia dowolnych kształtów fali, nie tylko 4 podstawowych (więcej możliwości brzmieniowych).
- Problemy:
 - transpozycja – zmiana wysokości,
 - aliasing (zakładkowanie) widma.

Pamięć RAM jako generator cyfrowy



Problem aliasingu

- Sygnały zapisane w pamięci mogą mieć szerokie widmo.
- Jeżeli składowe widmowe przekroczą częstotliwość Nyquista ($F_s/2$), nastąpi **aliasing** – nałożenie kopii widma.
- Efektem jest zniekształcenie barwy dźwięku, wprowadzenie nieharmoniczności.
- Nie da się zrobić cyfrowo fali prostokątnej tak:

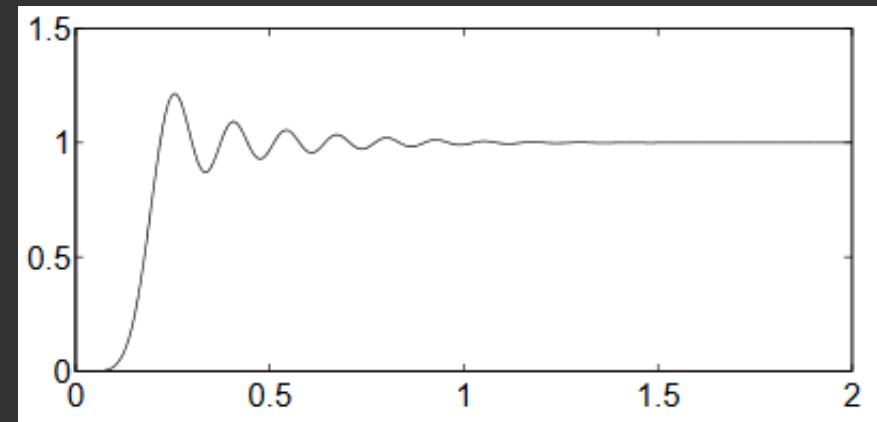


Problem aliasingu

Aby uniknąć aliasingu należy zapisywać w pamięci sygnały o ograniczonym widmie (*bandlimited signals*).

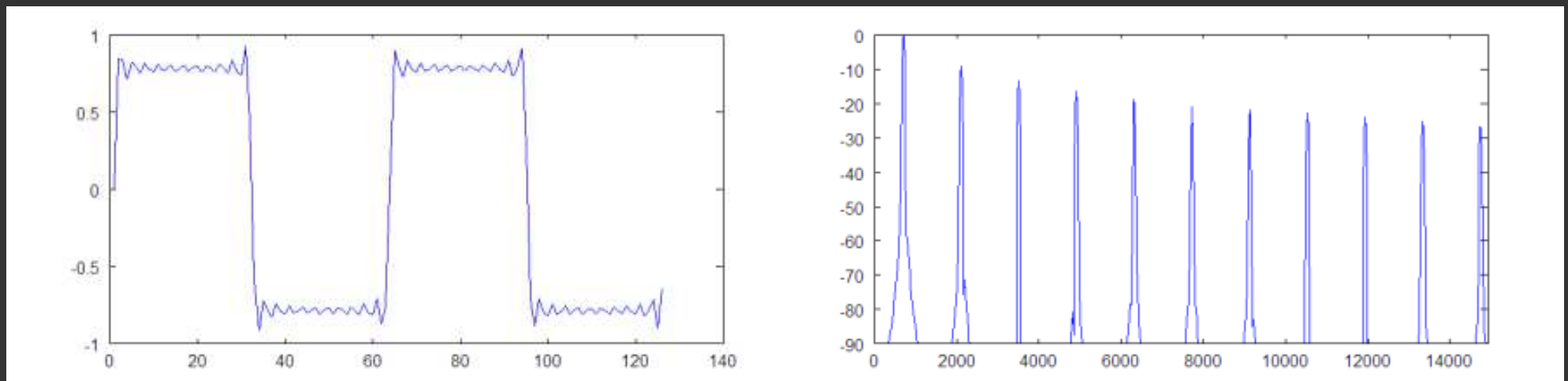
Wybrane metody:

- **Szereg Fouriera** – sumowanie harmoniczných do $F_s/2$ – złożone obliczeniowo.
- **BLIT** (*band limited impulse train*): obliczanie ciągu impulsów o ograniczonym paśmie, z niego oblicza się inne kształty fali (całkowanie, sumowanie, itp).
- **MinBLEPS** – generuje się zwykły kształt fali z aliasingiem, w miejscach gwałtownej zmiany amplitudy wstawia się impuls minimalnofazowy (odczytany z tablicy).



Problem aliasingu

- Sygnały o ograniczonym paśmie mają przebieg czasowy odbiegający od „idealnego”.
- Wynika to z braku składowych o wysokich częstotl.
- W miejscach gwałtownych zmian amplitudy pojawiają się oscylacje (efekt Gibbsa).
- Np. fala prostokątna 1 kHz uzyskana metodą sumowania składowych sinusoidalnych do 22 kHz wygląda tak:



Problem zmiany wysokości dźwięku

- Odczytując próbki z pamięci ze stałą częstotliwością uzyskamy tylko jedną wysokość dźwięku.
- Mamy zapisane N próbek okresu sygnału. Jeżeli odczytamy kolejno każdą próbkę, uzyskamy sygnał o częstotliwości:

$$f = f_s / N,$$

np. $f_s = 48 \text{ kHz}$, $N = 1024$: $f = 46,875 \text{ Hz}$

- Potrzebujemy innej wysokości dla każdego klawisza.
- Nie jest praktyczne zapisywanie w pamięci sygnału o każdej potrzebnej wysokości.
- Jak dokonać **transpozycji**, czyli otrzymać dźwięk o dowolnej wysokości?

Problem zmiany wysokości dźwięku

Metoda nr 1: przez zmianę **szybkości odczytu** próbek (szybszy odczyt – większa częstotliwość).

- Metoda stosowana w synteźatorach z analogowym przetwarzaniem – sygnał z generatora przepuszczany jest przez przetwornik cyfrowo-analogowy.
- Transpozycja przez zmianę szybkości konwersji C/A.
- Przykład: $N = 128$, chcemy $f = 440$ Hz $\rightarrow f_s = 56,32$ kHz.
- Problemy:
 - przetwornik C/A musi działać bardzo szybko, szczególnie dla wysokich częstotliwości dźwięku,
 - filtr rekonstrukcyjny musi być ustawiany na $f_s/2$.

Problem zmiany wysokości dźwięku

Metoda nr 2: przez zmianę **kroku** odczytywania próbek z tablicy: większy krok to wyższa częstotliwość.

- Metoda stosowana w cyfrowych układach syntezy.
- Aby uzyskać dowolną częstotliwość f , należy przesunąć wskaźnik odczytu o wartość:

$$s = f \cdot N / f_s$$

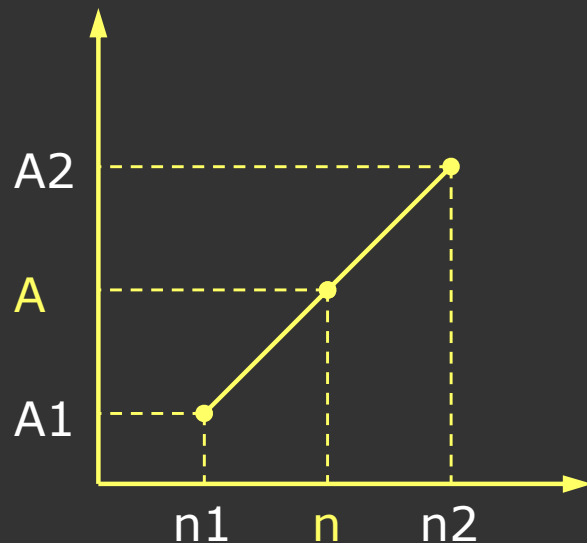
np. $f = 440 \text{ Hz}$, $N = 1024 \rightarrow s = 9,386$ (dla $f_s = 48 \text{ kHz}$)

$$f = 1 \text{ kHz}, \quad N = 1024 \rightarrow s = 21,333$$

- W ogólnym przypadku, krok s jest liczbą niecałkowitą.
- Musimy stosować **interpolację** (liniową, wielomianową, itp.)
- Interpolacja powoduje zniekształcenia sygnału. Im więcej zapisanych próbek na okres, tym lepiej.

Interpolacja liniowa

- Szukany indeks próbki n leży między $n1$ i $n2$
($n2 - n1 = 1$)
- Wartości zapisane w pamięci:
($n1, A1$) i ($n2, A2$)
- Szukamy (n, A) metodą interpolacji liniowej:
$$A = A1 + (n - n1)(A2 - A1)$$



Transpozycja a aliasing

- Uwaga: jeżeli mamy sygnał o pełnym paśmie i dokonamy zmiany wysokości w górę:
 - widmo rozciągnie się w prawo,
 - wystąpi aliasing!
- Zmiana wysokości w dół też może spowodować aliasing. Ponadto pozbywamy się składowych o wysokich cz.
- Nie wystarczy zapewnić że sygnał zapisany w pamięci nie powoduje aliasingu. Metoda zmiany wysokości również musi mieć zabezpieczenie przed aliasingiem.
- W synteźatorach z lat 80. stosujących pamięć jako generator cyfrowy, problem aliasingu występował.

Praktyczne generatory cyfrowe

Praktyczny sposób konstrukcji cyfrowych generatorów sygnałów okresowych (odczyt próbek z pamięci):

- osobna kopia okresu sygnału dla każdej oktawy, z odpowiednią liczbą próbek na okres (np. 2048, 1024, ...)
- pasmo częstotliwości zajęte przez sygnał: do $f_s/4$,
- transpozycja w górę w obrębie oktawy („dojeżdżamy” do $f_s/2$),
- aliasing nie występuje,
- zasadniczy problem: zmiany barwy między poziomami sygnału (jeden ma pełne pasmo, drugi tylko połowę), mogą być słyszalne.

Praktyczne generatory cyfrowe (2)

Można dopuścić pewną „ilość” aliasingu:

- pasmo częstotliwości zajęte przez sygnał: do $f_s/3$, dla $f_s = 48$ kHz: do 16 kHz.
- transpozycja w górę w obrębie oktawy,
- powstaje aliasing powyżej $f_s/3$,
- mniej zauważalne zmiany barwy (zyskujemy 4 kHz),
- zakłada się że składowe po aliasingu, powyżej 16 kHz, maskowane przez „głośniejsze” składowe, nie będą zauważalne przez słuchaczy,
- problem: osoby o czułym słuchu mogą to wychwycić.

Synteza tablicowa (wavetable)

Zasada działania syntezy tablicowej:

- kształty fal (*wave*) zapisane w pamięci,
- tablica fal (*wavetable*) zawiera wiele (np. 60) fal,
- przejście między kolejnymi falami jest płynne, od najprostszego (#0) do najbardziej złożonego (#59),
- do wyboru jest wiele tablic,
- konwersja cyfrowego sygnału na analogowy,
- dalsze przetwarzanie przez filtry VCF i modulatory LFO i EG, tak samo jak w syntezie subtraktywnej.

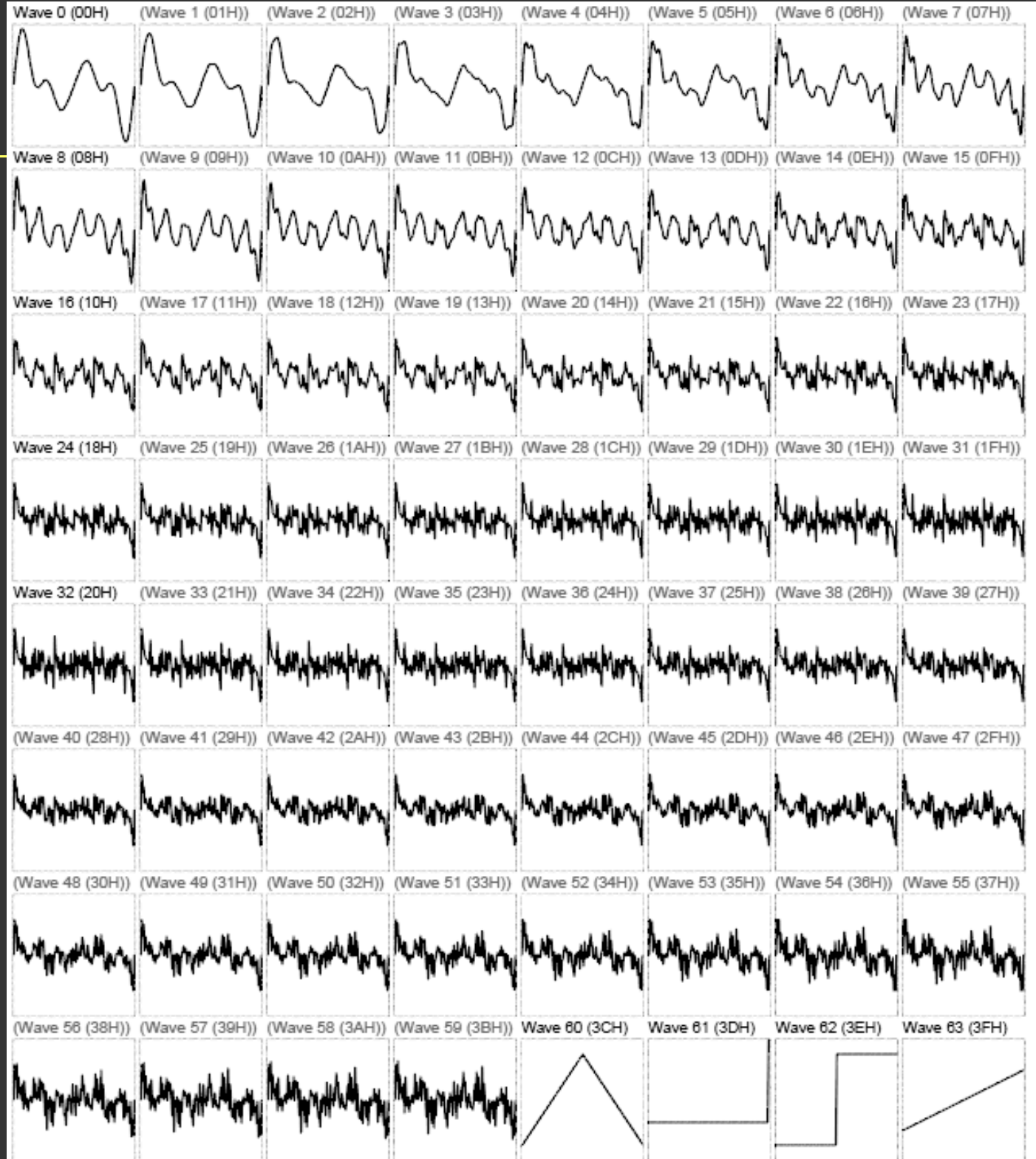
Zasadniczy etap tworzenia brzmień odbywa się w generatorze tablicowym!

Synteza tablicowa (wavetable)

- **Fala** (*wave*) – zbiór próbek jednego okresu wybranego kształtu sygnału, jest zapętłany.
- **Tablica** (*wavetable*) – zbiór pewnej liczby fal, najczęściej o podobnym kształcie i o wzrastającej liczbie harmonicznym (coraz gęstsza i jaśniejsza barwa).
- Sposób odczytu fal z tablicy:
 - jedna zapętłona fala,
 - suma różnych fal,
 - zmiana odczytywanej fali w trakcie generowania dźwięku – przemiatanie fali (*table sweep*)
 - ta funkcja decyduje o charakterystycznym brzmieniu syntezy tablicowego.

Wavetable

Przykład
tablicy fal



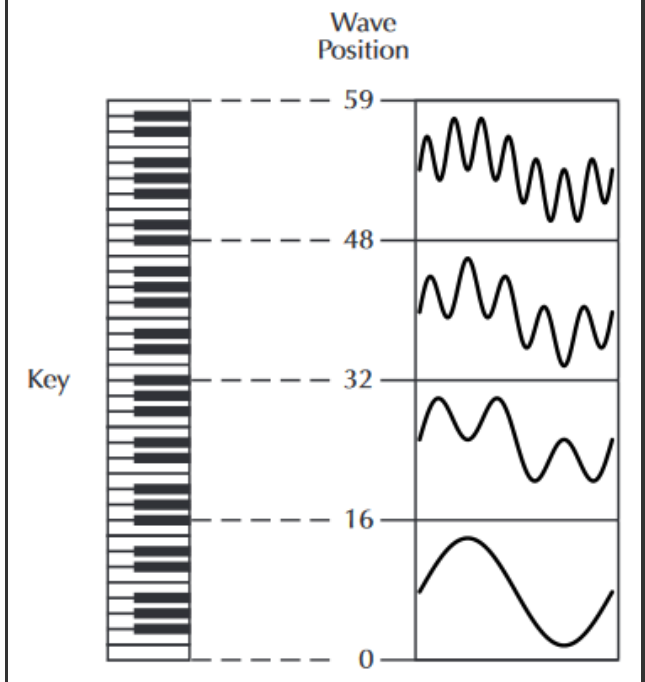
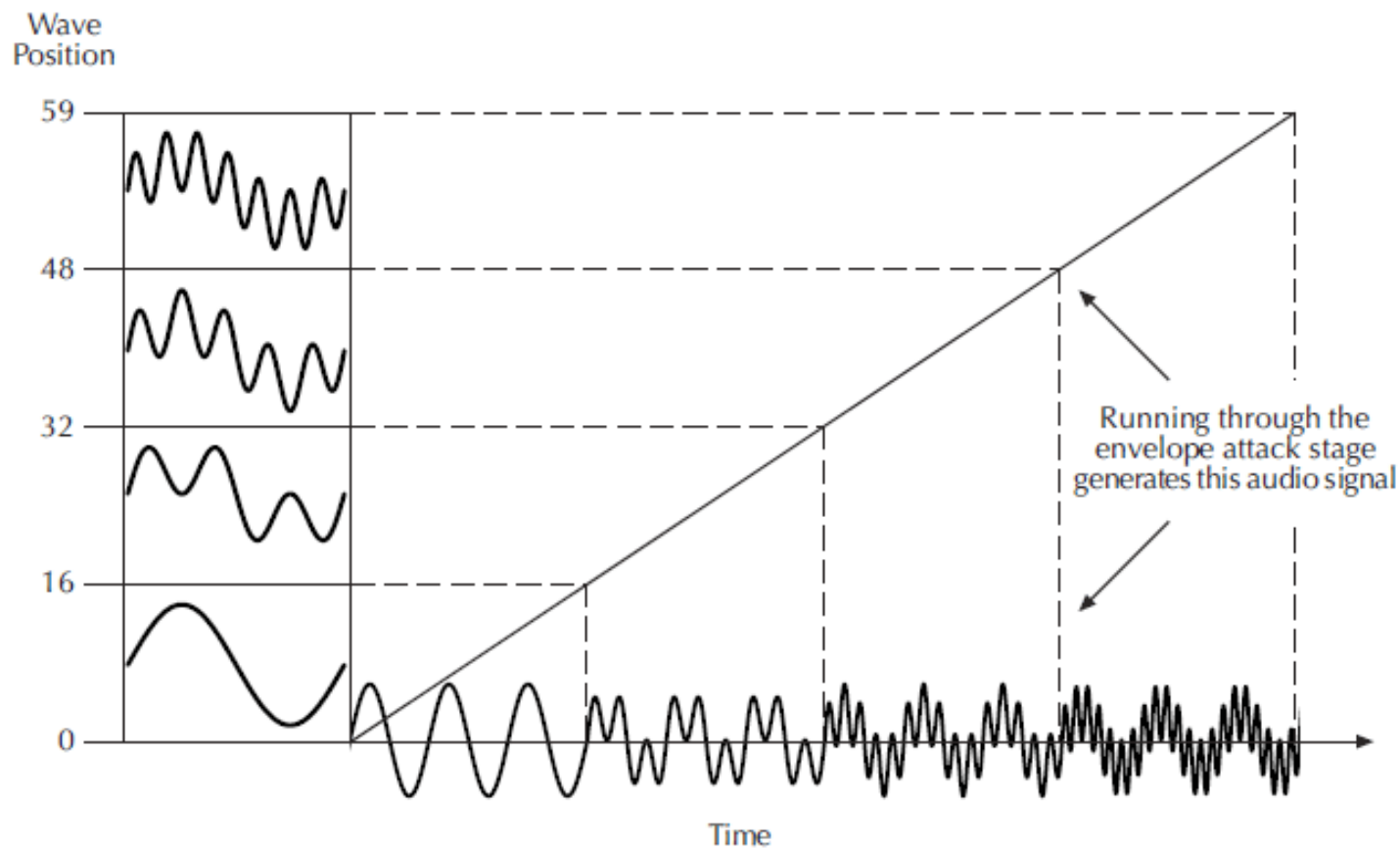
Przemiatanie tablicy

Odczyt fal z tablicy metodą przemiatania:

- **generator obwiedni:**
 - wartość sygnału zmienia indeks odczytywanej fali,
 - modyfikacja brzmienia w fazie ataku,
- **LFO:**
 - cykliczna modulacja indeksu odczytywanej fali,
 - zmiana barwy w fazie podtrzymania,
- klawiatura: bardziej złożone fale dla niższych klawiszy, mniej złożone dla wyższych – ograniczenie aliasingu,
- sterowniki, np. pokrętło *modulation*.

Odczyt fal z tablicy

Modulacja indeksu fali za pomocą obwiedni i klawiatury.



Instrumenty PPG

Syntezę tablicową zastosowano w instrumentach PPG (Wolfgang Palm).

- *Wavecomputer 360* (1980) - pierwsza implementacja syntezy tablicowej (*wavetable*).
- *Wave 2* (1981-87) - 30 tablic, 64 fale w każdej tablicy, w sumie 1920 kształtów fali dla każdego z 8 generatorów (głosów), analogowe VCF i VCO.
- *Wave 2.2* i *Wave 2.3* - usprawnienia (więcej fal i głosów, MIDI, cyfrowe przetwarzanie, próbki instrumentów).

Instrumenty PPG

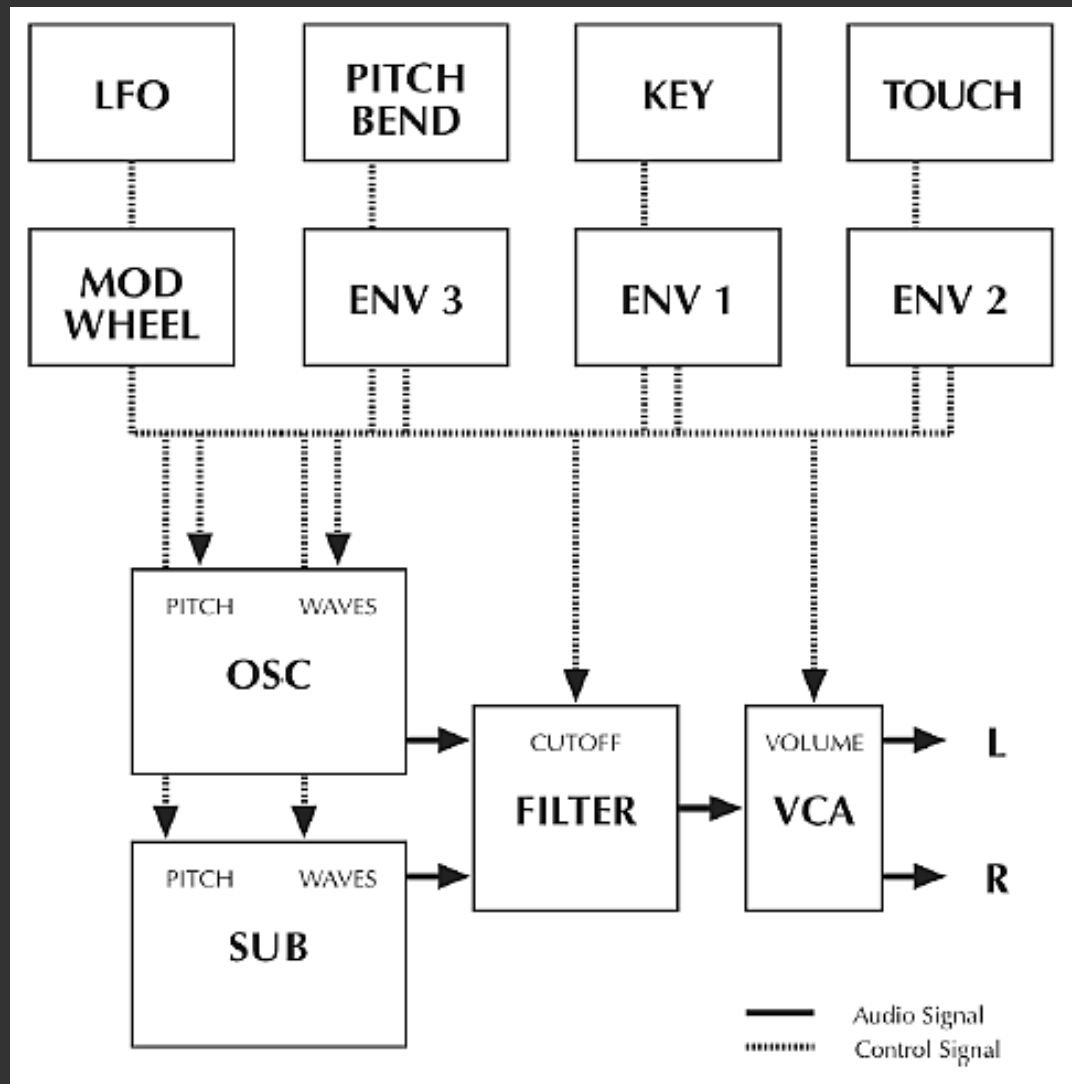
Wave 2.0



Waveterm:
komputer do
projektowania
własnych fal

Instrumenty PPG

Schemat instrumentu PPG Wave



PPG - generatory wavetable

- W danej chwili mamy do dyspozycji:
 - jedną z 29 tablic, zawierającą 60 fal
 - + 4 fale podstawowe (trójkąt, impuls, prostokąt, piła)
 - dodatkową tablicę (*upper wavetable*)
 - zbiór 64 typowych fal, zawsze dostępny.
- Można odgrywać dwie fale jednocześnie.
- Można było projektować własne fale.
- Możliwe było też tworzenie fal na podstawie wgranych krótkich próbek dźwięku, nazywanych transjentami (*transients*) – uproszczony sampling.

Synteza tablicowa - wady i zalety

Zalety w stosunku do metody subtraktywnej:

- większa różnorodność sygnałów dostępnych w generatorze cyfrowym,
- możliwość dynamicznej zmiany barwy w generatorze,
- stabilność wysokości dźwięku.

Wady:

- ograniczenia pamięci – tylko krótkie sygnały,
- kłopotliwa zmiana wysokości dźwięku,
- problem aliasingu,
- bardziej stabilne, „zimne” brzmienie.

Literatura

- Martin Russ: *Sound Synthesis and Sampling*. Focal Press, Oxford 1996.
- Robert Bristow-Johnson: *Wavetable Synthesis. A Fundamental Perspective*. 101st AES Conv.,. 1996.
- Dokumentacja syntezy PPG Wave:
<http://www.hermannseib.com/english/synths/ppg/docs.htm>
- Dokumentacja instrumentu Waldorf Wave 3.V (VST)
<http://tiny.pl/glhnmm>
- Wikipedia (wersja angielska)
- Program PPG Wave Simulator (VST):
<http://www.hermannseib.com/english/synths/ppg/wavesim.htm>
- Ear Level: Wavetable oscillator
<http://www.earlevel.com/main/category/digital-audio/oscillators/wavetable-oscillators/>
- Tim Stilson, Julius Smith: *Alias-free digital synthesis of classic analog waveforms (BLIT)*.
<https://ccrma.stanford.edu/~stilti/papers/blit.pdf>
- Eli Brandt: *Hard sync without aliasing (MinBLEPs)*.
<https://www.cs.cmu.edu/~eli/papers/icmc01-hardsync.pdf>