Akustyka mowy

KODOWANIE I KOMPRESJA SYGNAŁU MOWY

Katedra Systemów Multimedialnych, Politechnika Gdańska
Autor: Grzegorz Szwoch, kwiecień 2016

Potrzeba kompresji mowy

Cyfrowy sygnał mowy bez kompresji:

- duża przepływność bitowa,
- czas transmisji – powstawanie opóźnień.

Kompresja mowy:

- zmniejszenie przepływności (mniejsze opóźnienia z powodu transmisji), ale:
- wprowadzenie opóźnień związanych z:
  - kodowaniem i dekodowaniem,
  - buforowaniem próbek (przetwarzanie blokowe).

Kodowanie i kompresja

- Kompresja – zmniejszenie liczby danych potrzebnych do zapisania istotnych informacji. Może być bezstratna lub (częściej w przypadku mowy) stratna.
- Kodowanie – zapis potrzebnych informacji za pomocą liczb (bitów) przesyłanych w strumieniu wyjściowym.

Kodek = koder + dekoder

- koder: kompresja, kodowanie
- dekoder: dekodowanie, dekompresja

Pojęcia podstawowe

- Algorytm kodowania – sposób kompresji i kodowania sygnału, np. LPC-10, CELP
- Standard kodowania – dokument opisujący praktyczną implementację algorytmu, opublikowany w celu zapewnienia kompatybilności, np. G.729
- Kodek – oprogramowanie i ew. sprzęt, implementujący algorytm kodowania (może opierać się na standardzie, ale nie musi), np. kodek Speex

Kodeki mowy

Uniwersalne kodeki sygnału nie sprawdzają się w przypadku mowy:

- zbyt duża przepływność,
- jeżeli ograniczymy przepływność: zbyt słaba jakość (zniekształcenia kompresji).

Kodeki mowy są dostosowane do specyficznych właściwości sygnału mowy:

- wąskie pasmo,
- fragmenty dźwięczne i bezdźwięczne,
- formantowość części dźwięcznych,
- entropia sygnału mowy

Zastosowania kodeków mowy

- Telefonia mobilna
- Telefonia internetowa (VoIP)
- Komunikatory internetowe
- Telekonferencje
- Rejestratory mowy
- Archiwizacja nagrań mowy

Typy kodeków mowy

Kodeki sygnałowe (*waveform*)

- operują na próbkach sygnału
- zachowują sygnał dźwiękowy
- wysokie przepływności (mała kompresja)

Kodeki parametryczne (źródłowe)

- kodowanie: analiza sygnału, wyodrębnienie parametrów
- transmisja parametrów sygnału i modelu
- dekodowanie: synteza mowy na podstawie otrzymanych parametrów
- niższe przepływności (większa kompresja)

Kodowanie sygnałowe

Kodeki sygnałowe wykorzystują:

- nieliniowe kodowanie
  - rozkład amplitud sygnału mowy skupia się w zakresie małych wartości,
  - potrzebna większa rozdzielczość dla zakresu małych wartości
- ADPCM: kodowanie różnic między próbkami (usunięcie korelacji, zmniejszenie entropii)
  - kodowany jest błąd predykcji
  - małe wartości – wydajne kodowanie
  - adaptacyjny dobór sposobu kwantyzacji

Nieliniowe kodowanie

- Sygnał mowy ma duży zakres dynamiki
- Przy liniowej kwantyzacji, ciche fragmenty mowy „giną” w szumie
- Stosunek między amplitudą sygnału a odbieraną przez człowieka głośnością jest logarytmiczny (spełnia prawo Webera-Fechnera)
- Nieliniowe kodowanie sygnału mowy pozwala na jego bardziej skuteczne kodowanie

Standardy nieliniowego kodowania

Kompresja (w sensie kompresji dynamiki)
- nieliniowe przekształcenie liniowych wartości amplitudy na wartości zakodowane.

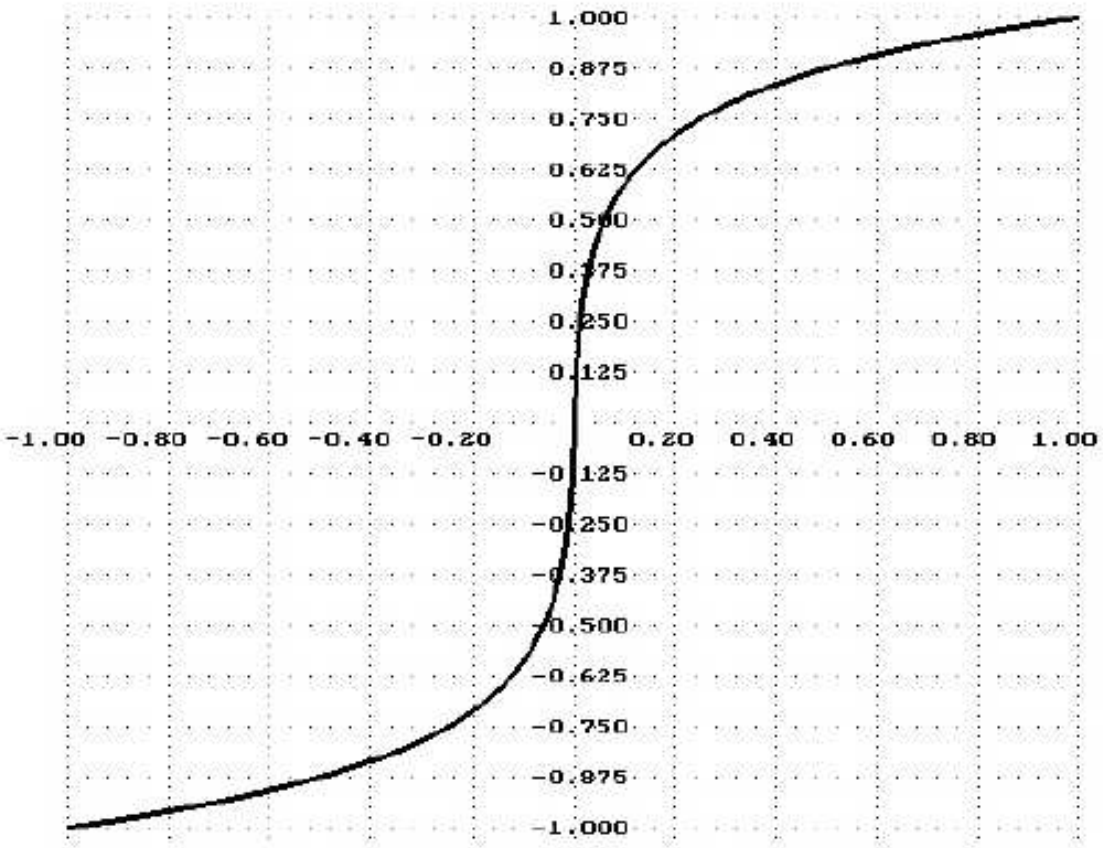
Dwa standardy kodowania:

- μ-law (μ czytamy [miu]) – starszy standard, stosowany w USA i Japonii
- A-law: nowszy standard, stosowany w Europie.

Przy połączeniach międzynarodowych, jeżeli jedna strona używa A-law, druga też musi to zrobić.

Standard μ-law

$$F(x) = \mathrm{sgn}(x) \cdot \frac{\ln(1 + \mu \cdot |x|)}{\ln(1 + \mu)} \qquad dla \quad -1 \le x \le 1$$



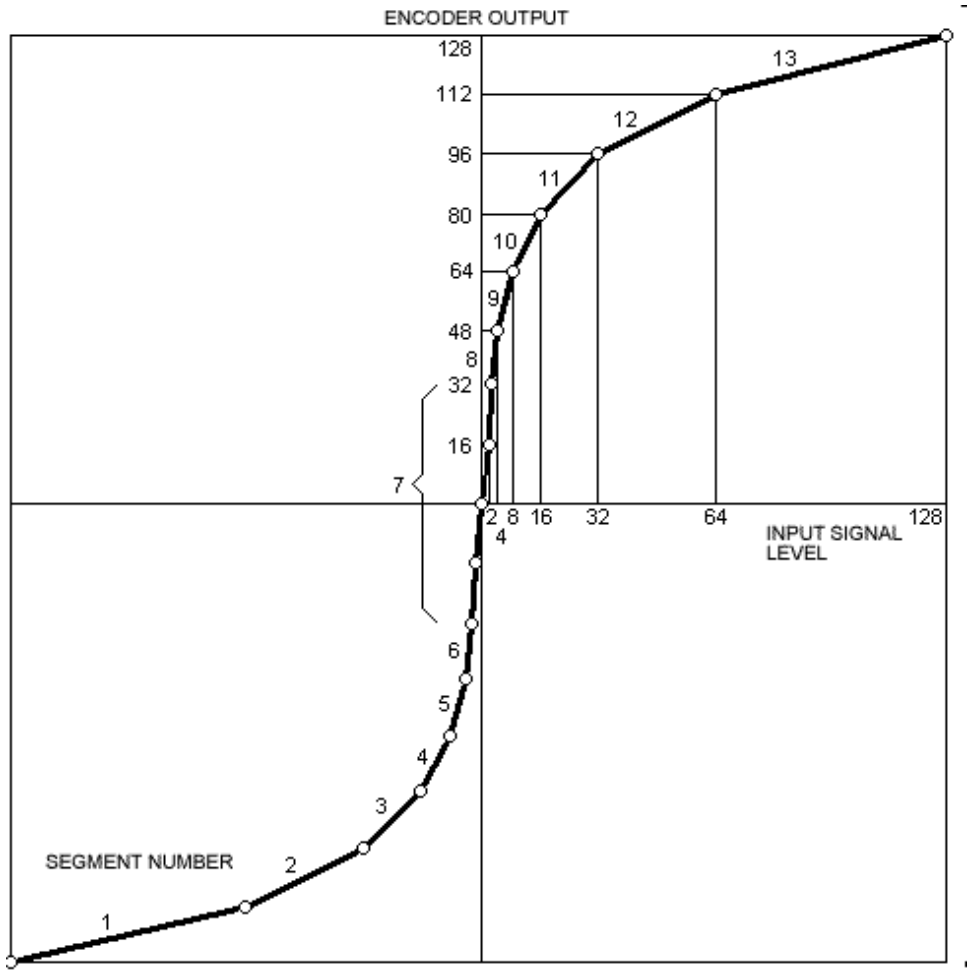
μ = 255

Standard A-law

$$F(x) = \mathrm{sgn}(x) \cdot \frac{A \cdot |x|}{1 + \ln(A)} \qquad dla \quad \frac{1}{A} \le x \le 1 \quad oraz \quad -1 \le x \le -\frac{1}{A}$$

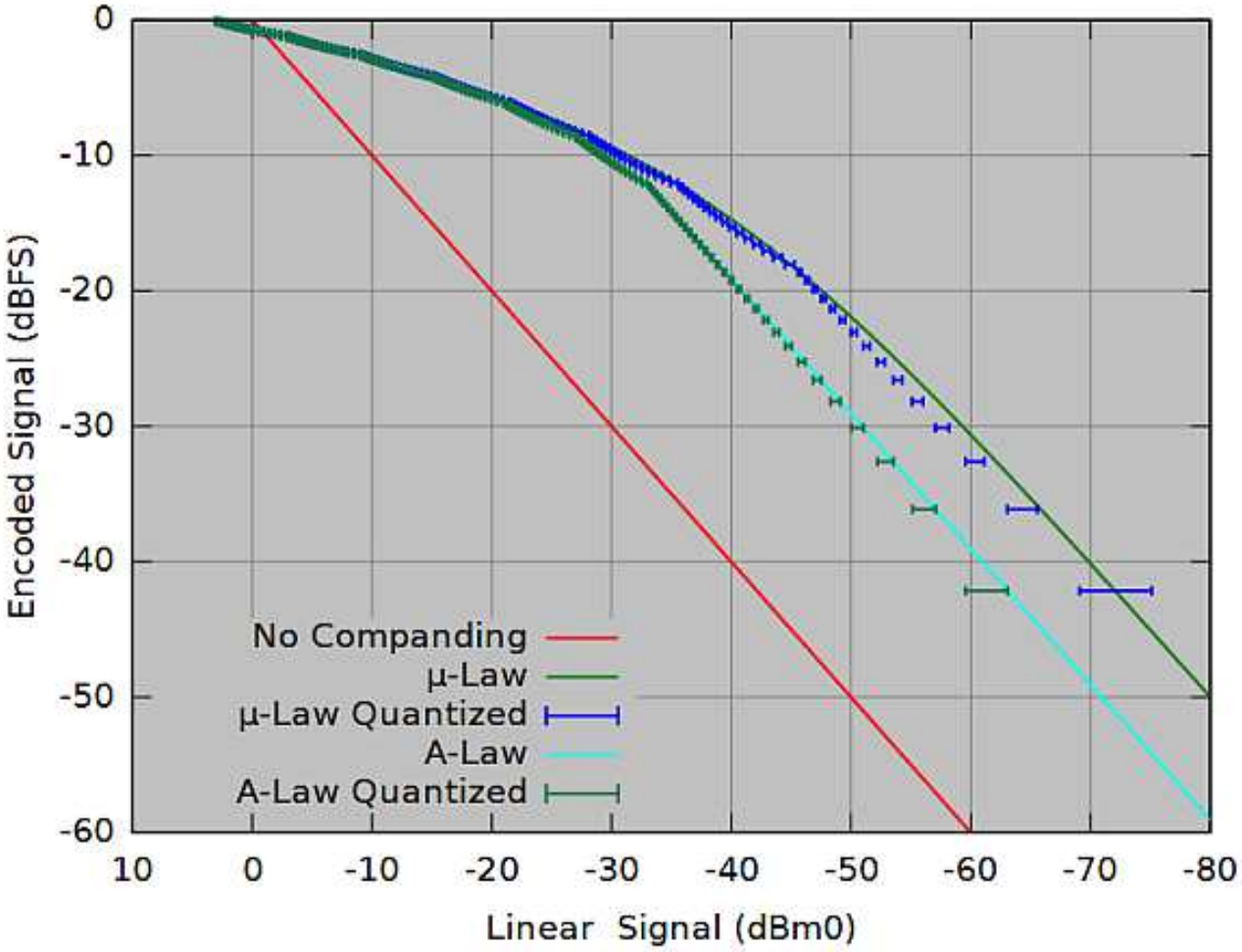
$$F(x) = \mathrm{sgn}(x) \cdot \frac{1 + \ln(A \cdot |x|)}{1 + \ln(A)} \qquad dla \quad -\frac{1}{A} \le x \le \frac{1}{A}$$

A = 87,5



Porównanie standardów

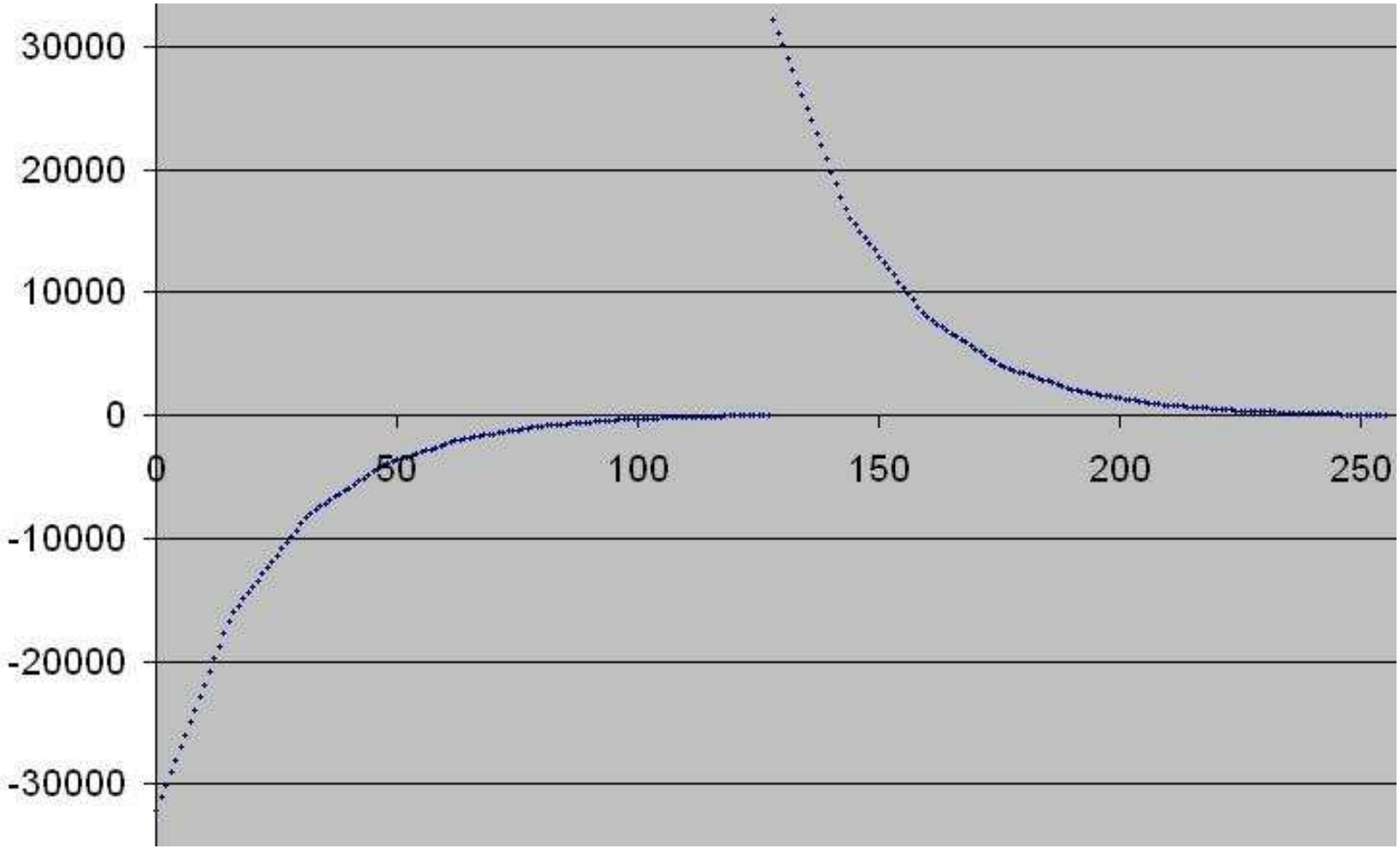
Wykres poziomu sygnału wejście-wyjście



Źródło: Wikipedia

Ilustracja kodowania nieliniowego

Wartości liniowe (oś pionowa) i wartości zakodowane w μ-law (oś pozioma)



Źródło: Wikipedia

Zysk z nieliniowego kodowania

Korzyści:

- zwiększenie dynamiki sygnału o ok. 24 dB, dzięki zwiększeniu precyzji kodowania dla małych amplitud,
- dzięki temu jakość sygnału zakodowanego w μ-law lub A-law na 8 bitach odpowiada jakości sygnału zakodowanego liniowo na 12 bitach
- a zatem przy tej samej dostępnej przepływności mamy lepszą jakość mowy niż przy kodowaniu liniowym

Kodowanie różnicowe (DPCM)

W sygnale mowy dominują składowe o niskich częstotliwościach – małe zmiany amplitudy sąsiednich próbek.

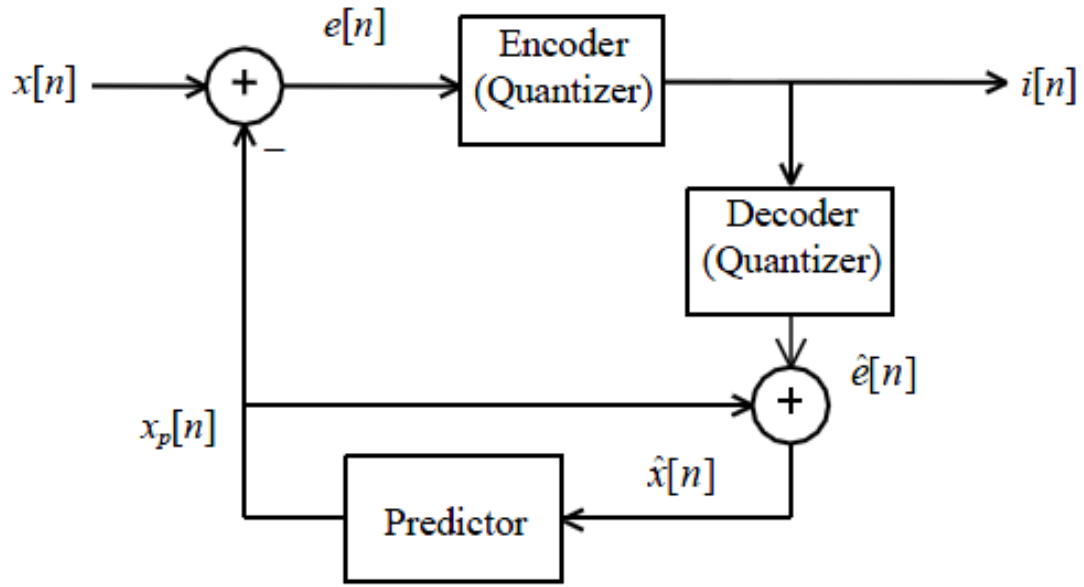
Kodowanie różnicowe DPCM – dwie metody:

- kodowanie (zwykle nieliniowe) różnicy między bieżącą a poprzednią wartością sygnału;
- kodowanie różnicy między rzeczywistą wartością próbki a wartością estymowaną (przewidywaną) za pomocą pewnego modelu

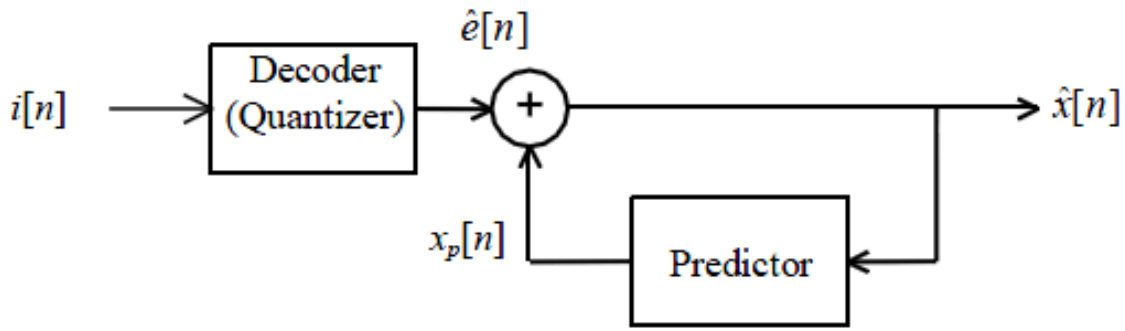
Zalety: mniej bitów potrzebnych do zakodowania, zysk dynamiki 4 – 11 dB.

DPCM

Kodowanie



Dekodowanie



ADPCM (adaptacyjne kodowanie różnicowe)

ADPCM – *adaptive differential pulse modulation coding*

- Najczęściej używana metoda w kodekach sygnałowych. Rozwinięcie DPCM.
- Błąd predykcji jest normalizowany (skalowany)
- Kodowanie dostosowuje się do zmiennych właściwości sygnału
- Dalsze zmniejszenie przepływności bitowej i poprawa dynamiki (SNR)

Kodeki sygnałowe

- G.711 – PCM, nieliniowe kodowanie,
  8 kHz, 8 bit $\Rightarrow$ przepł. 64 kbit/s
  (słowa 14-bitowe kodowane na 8 bitach)
- G726 – ADPCM z nieliniowym kodowaniem,
  tryby: 16, 24, 32, 40 kbit/s
- G722 – sub-band ADPCM, osobne
  przetwarzanie w pasmach częstotliwości,
  przepł. 48, 56, 64 kbit/s

Kodowanie parametryczne

Wytwarzanie sygnału mowy:

- pobudzenie
  - ton krtaniowy (elementy dźwięczne)
  - szum (elementy bezdźwięczne)
- trakt głosowy
  - filtracja pobudzenia

Kodowanie parametryczne – kodujemy:

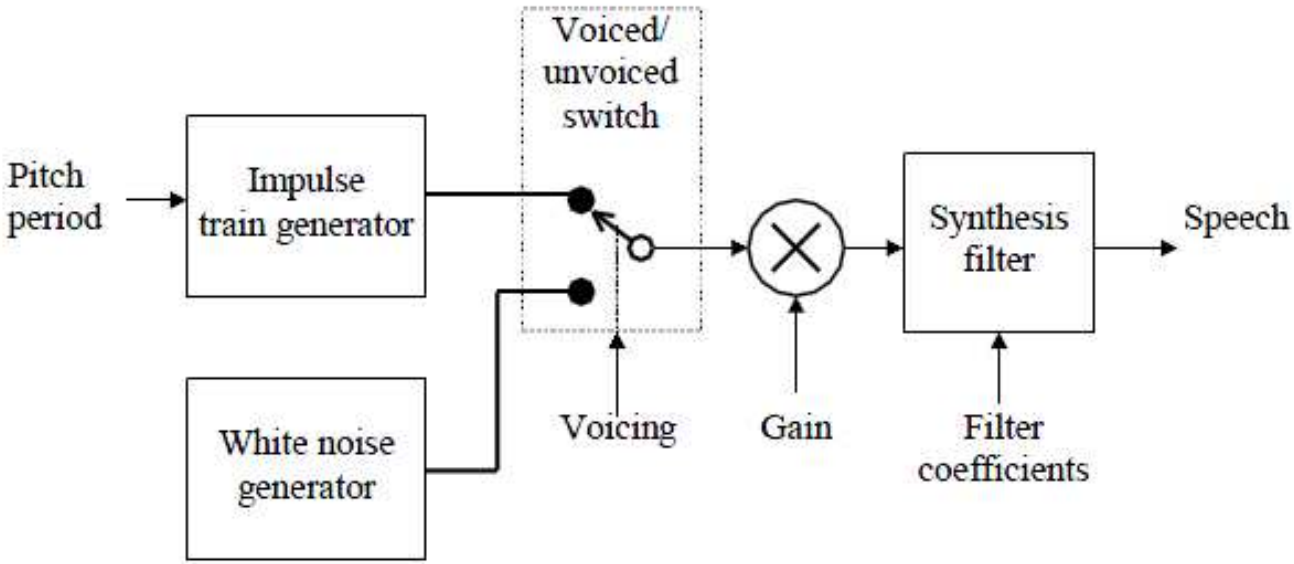
- typ pobudzenia
- parametry modelu traktu głosowego

Predykcja liniowa (LPC)

- Niemal wszystkie kodeki parametryczne wykorzystują liniowe kodowanie predykcyjne LPC (*linear predictive coding*)
- filtr LPC modeluje trakt głosowy dla bloku próbek sygnału mowy
- parametry filtru są kodowane i przesyłane dla każdego bloku (ramki) próbek
- resynteza za pomocą filtru LPC:

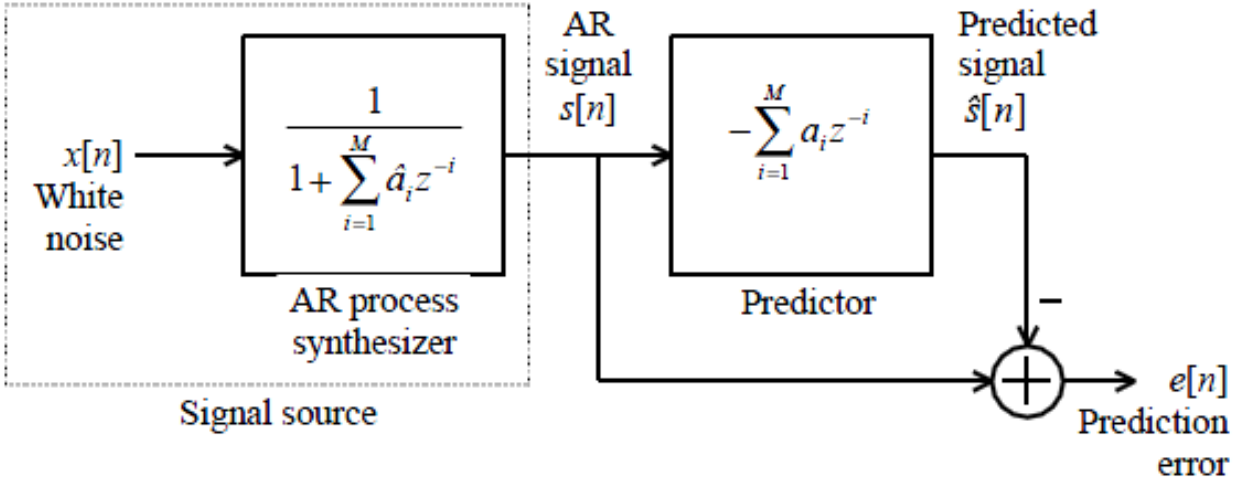
$$H(z) = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^{M} a_i z^{-i}}$$

Model LPC wytwarzania mowy

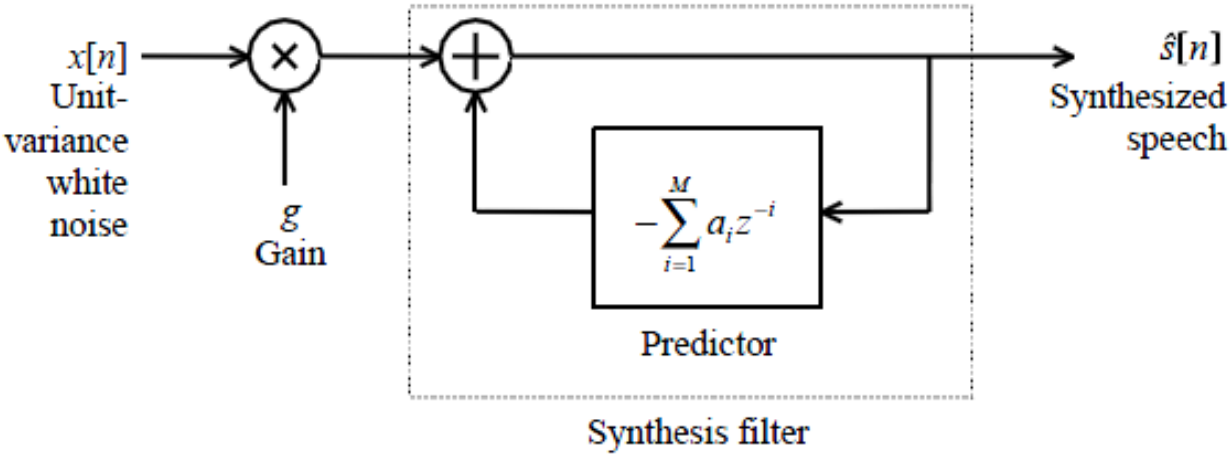


Predykcja liniowa (LPC)

Predykcja



Synteza

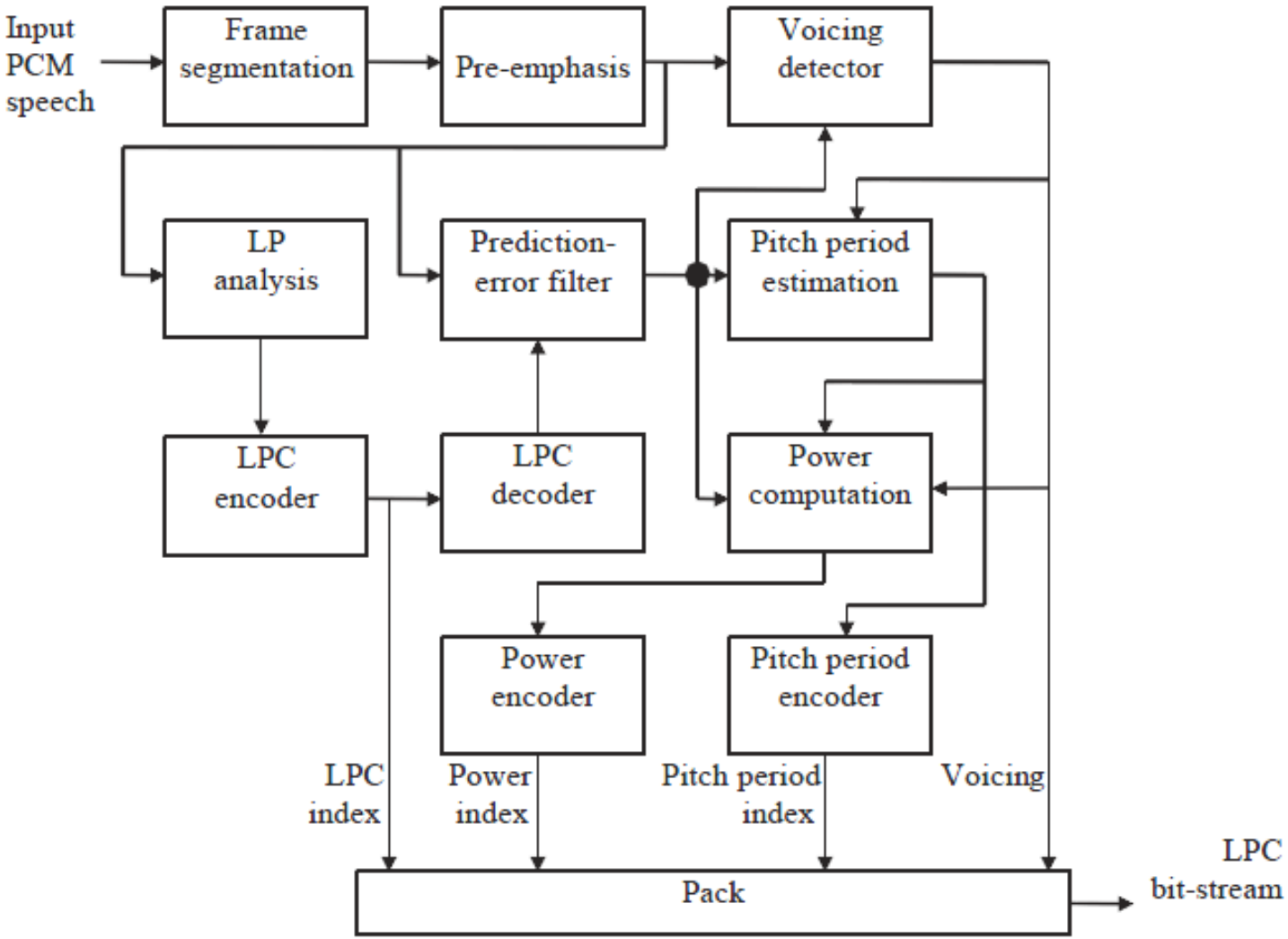


Kodek FS-1015 (LPC-10)

Kodowanie:

- sygnał 8 kHz, 12 bit/próbkę
- podział na ramki po 180 próbek (22,5 ms)
- preemfaza – podbicie wysokich częstotliwości
- klasyfikacja ramek
  - dźwięczne: LPC 10. rzędu (LPC-10)
  - bezdźwięczne: LPC 4. rzędu
- wyznaczenie współczynników predykcji
- kwantyzacja współczynników
- wyznaczenie wysokości dźwięku
- kodowanie, wysłanie

Koder FS-1015



Koder FS-1015

Zakodowany strumień – dla jednej ramki:

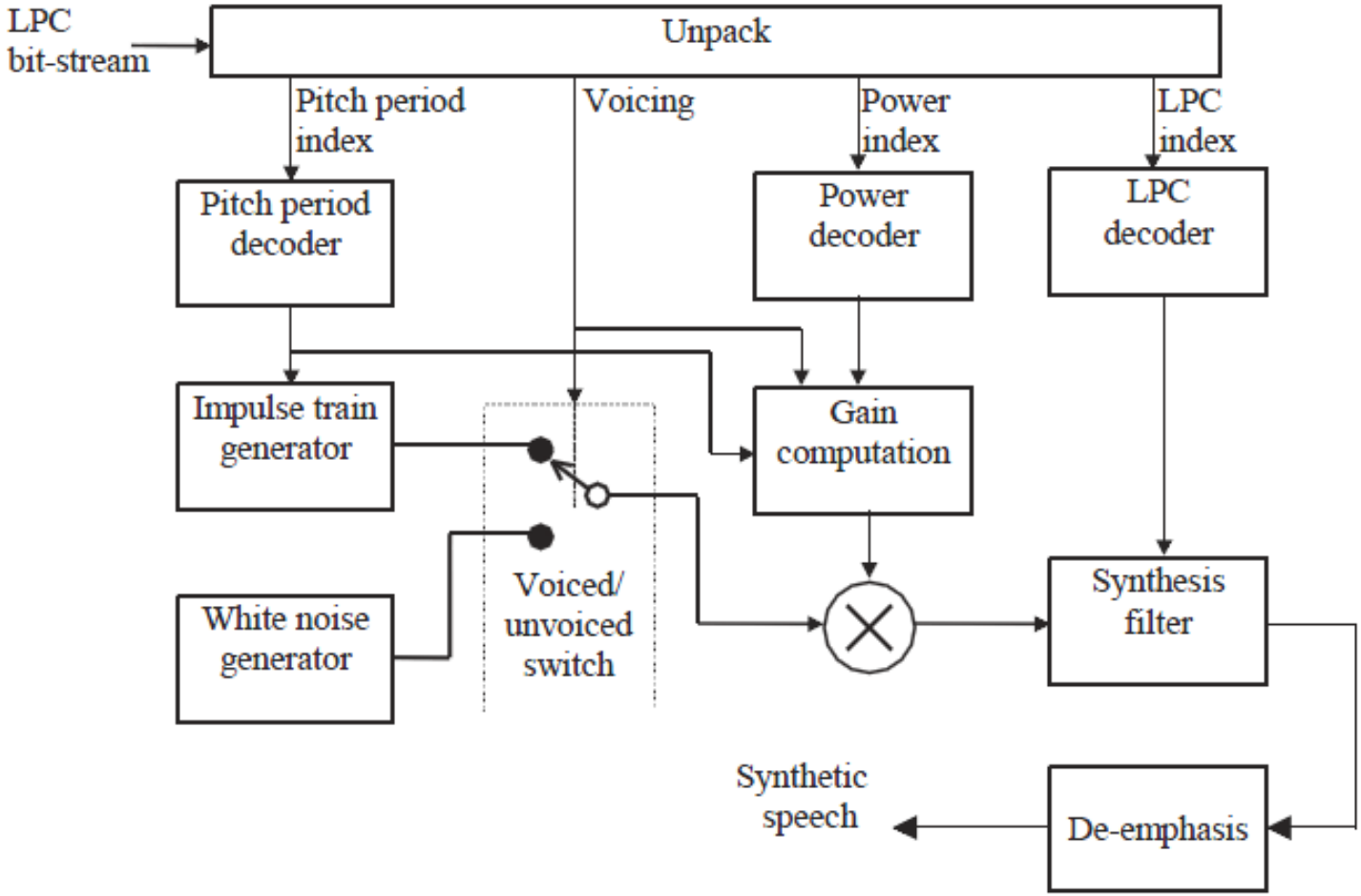
- 7 bitów: rodzaj (dźwięczny/bezdźwięczny) oraz wysokość dźwięku
- 5 bitów: wzmocnienie sygnału
- 41 bitów (dźwięczne) lub 20 bitów (bezdźw.): skwantowane współczynniki LPC
- 1 bit: synchronizacja
- 21 bitów (tylko bezdźwięczne): kodowanie protekcyjne.

Razem: 54 bity na jedną ramkę (180 próbek).

Bez kodowania: 180*12 = 2160 bitów

Przepływność kodeka: 2,4 kbit/s

Dekoder FS-1015



Wady kodeka LPC-10

- Ramki nie są zwykle czysto dźwięczne lub bezdźwięczne
- Ciąg impulsów nie symuluje odpowiednio dokładnie pobudzenia dla ramek dźwięcznych
- Utrata informacji o fazie
- Efekt działania kodeka:
  - słaba zrozumiałość mowy
  - bardzo słaba jakość mowy
  - duży poziom szumu
  - nienaturalna (syntetyczna) mowa

CELP

CELP – *Code-Excited Linear Prediction*

Rozwinięcie idei kodowania LPC

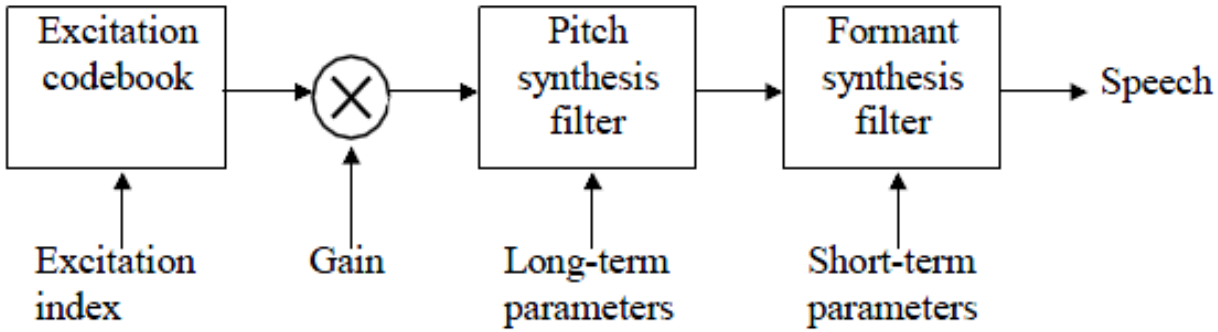
- Zamiast dwóch typów pobudzeń: zbiór („książka kodowa”) reprezentatywnych pobudzeń.
- Wybierane jest pobudzenie dające najmniejszy błąd predykcji.
- Kod wybranego pobudzenia jest przesyłany.
- Dekoder odtwarza sygnał.

CELP jest podstawą praktycznie wszystkich używanych obecnie kodeków parametrycznych.

„Czysty” CELP: kodek FS-1016; 4,8 kbit/s

CELP

Model wytwarzania mowy wg CELP

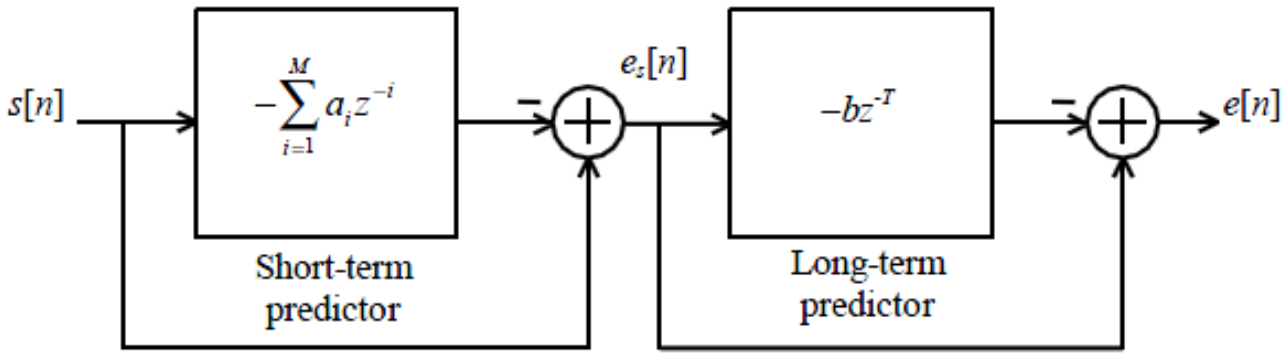


LPC short-term i long-term

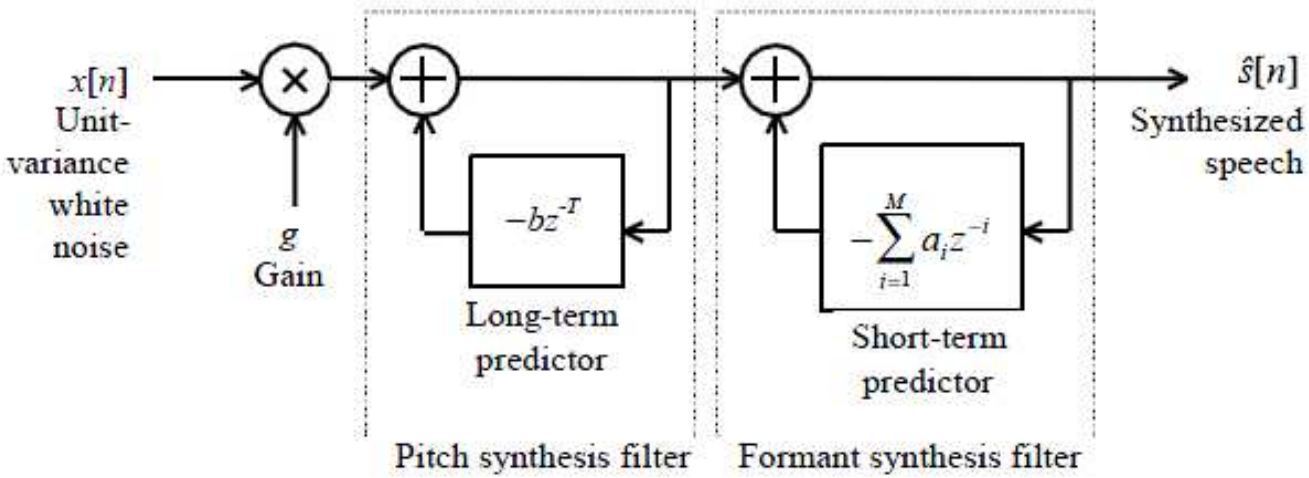
- Predykcja w krótkich ramkach próbek (*short-term LPC*)
  - pozwala na estymację kształtu widma (formantów),
  - ale nie można wyznaczyć wysokości sygnału mowy
- Dodatkowa predykcja długoterminowa (*long-term LPC*)
  - obejmuje co najmniej jeden okres
  - pozwala wyznaczyć wysokość

LPC short-term i long-term

Predykcja

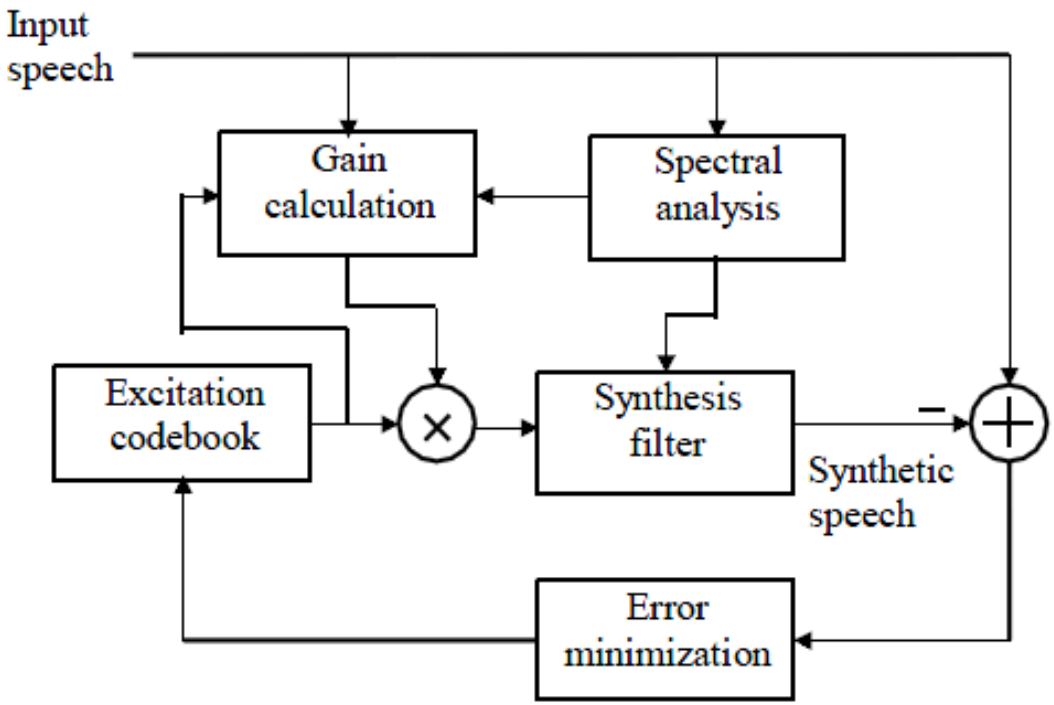


Synteza



Wybór pobudzenia

Wybór pobudzenia z książki kodowej (*codebook*) odbywa się w pętli zamkniętej, na zasadzie „analizy przez syntezę”.



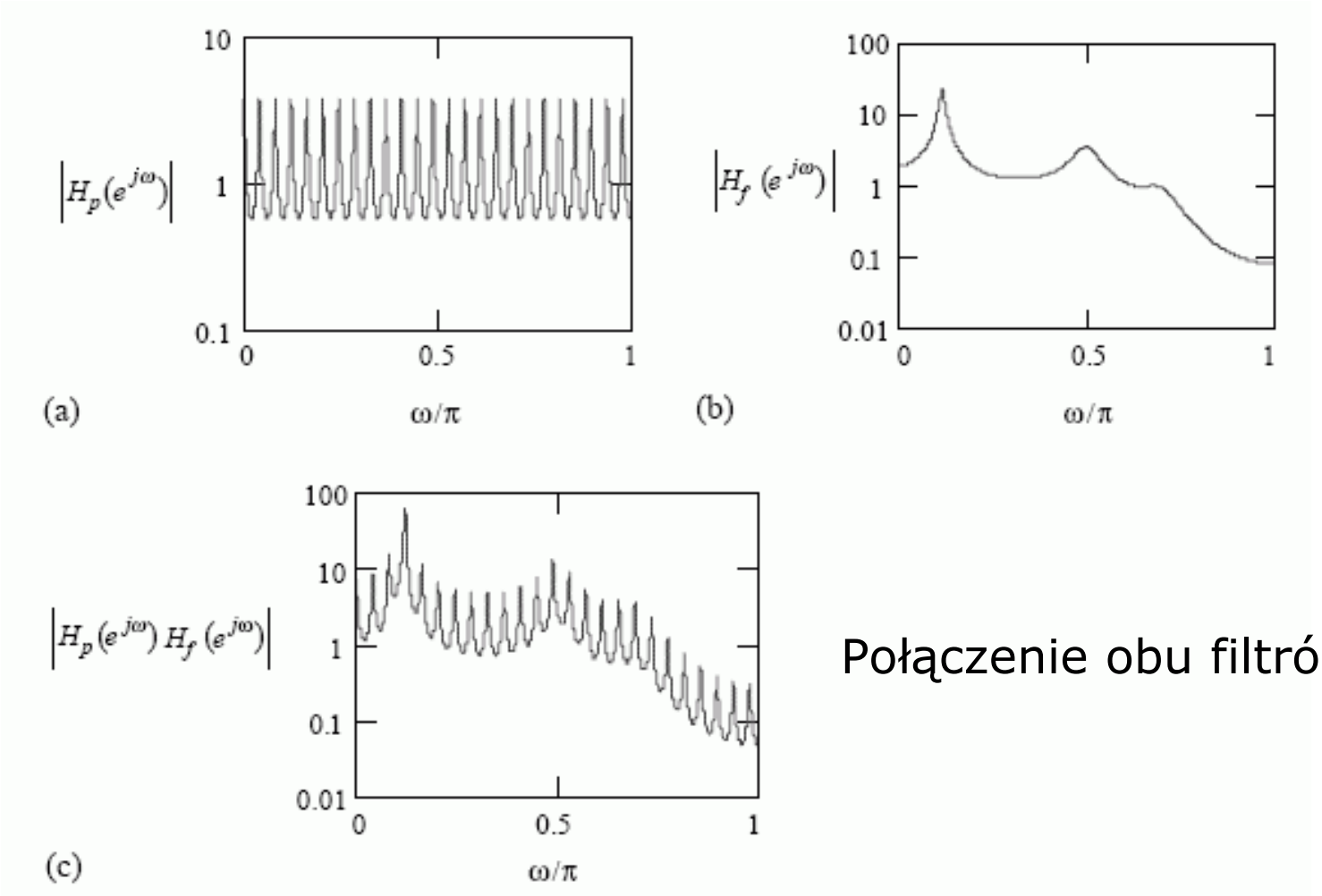
CELP – wybór pobudzenia

- Filtracja ramki próbek filtrem ważącym perceptualnie (zjawiska maskowania)
- Dla każdego słowa kodowego w książce:
  - wyznaczenie optymalnego wzmocnienia
  - synteza sygnału za pomocą filtrów LPC (wysokości dźwięku i formantowego)
  - wyznaczenie błędu predykcji
- Wybór pobudzenia, dla którego błąd predykcji jest najmniejszy.

CELP – wybór pobudzenia

Filtr wysokości
(*pitch filter*)

Filtr formantowy
(*formant filter*)

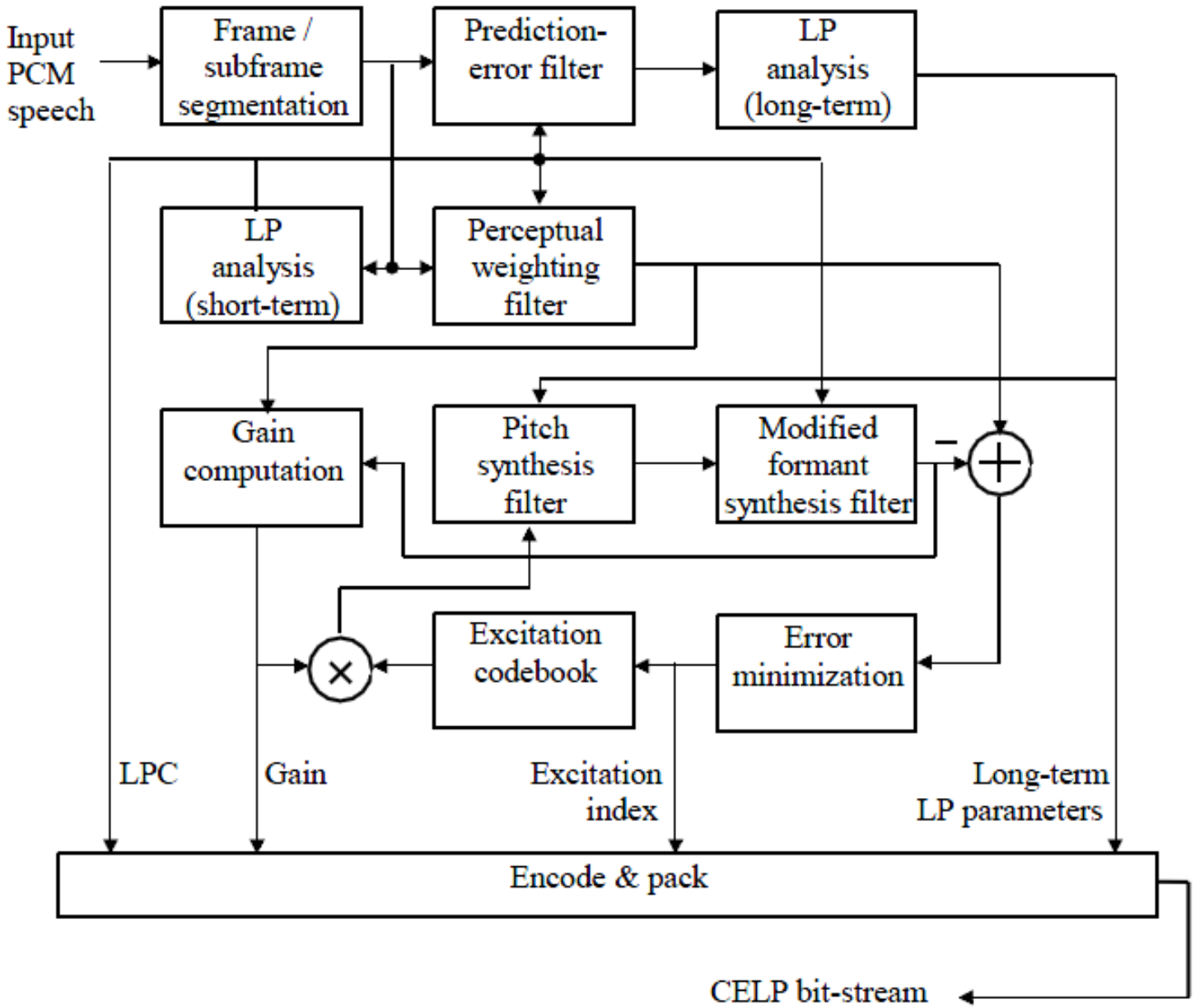


Połączenie obu filtrów

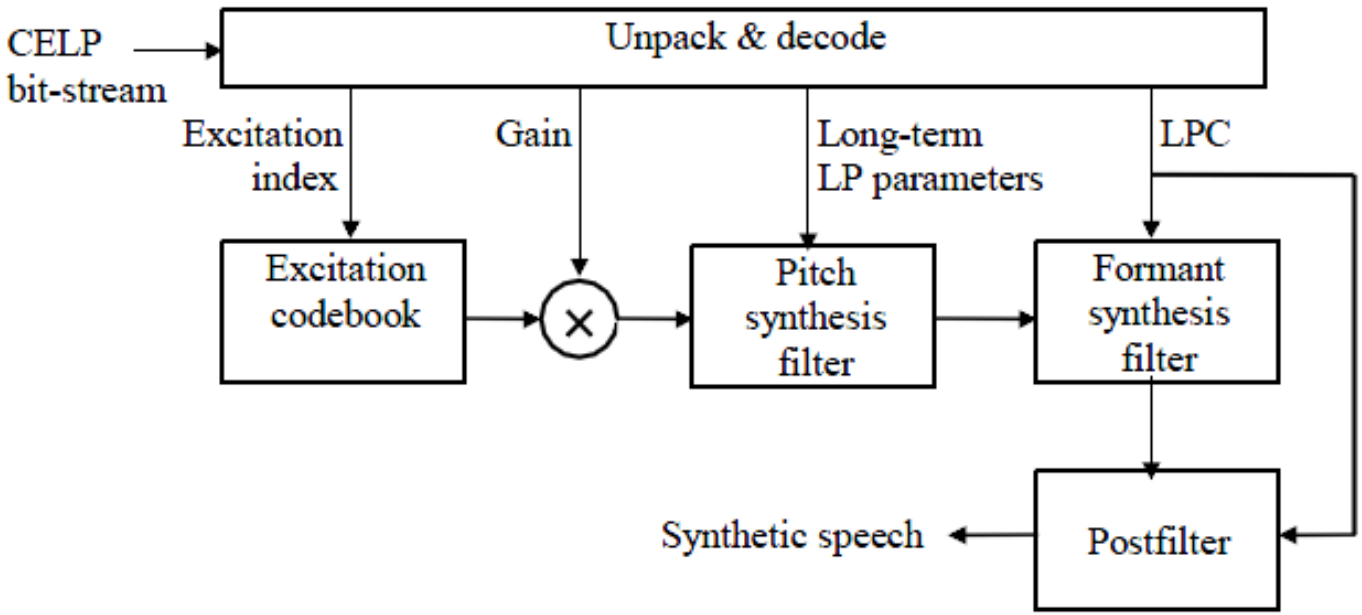
Koder CELP

- Segmentacja (ramki 20-30 ms, każda ramka ma zwykle 4 podramki)
- Analiza LPC *short-term* (w ramkach) oraz *long-term* (w podramkach)
- Wyznaczenie pobudzenia z książki kodowej
- Kodowanie strumienia bitowego
  - indeks pobudzenia
  - wzmocnienie
  - parametry long-term LPC (wysokość)
  - współczynniki LPC (short-term)

Koder CELP


Input
PCM
speech
Frame /
subframe
segmentation
Prediction-
error filter
LP
analysis
(long-term)
LP
analysis
(short-term)
Perceptual
weighting
filter
Gain
computation
Pitch
synthesis
filter
Modified
formant
synthesis filter
Excitation
codebook
Error
minimization
LPC
Gain
Excitation
index
Long-term
LP parameters
Encode & pack
CELP bit-stream

Dekoder CELP



Postfilter – filtracja perceptualna sygnału na podstawie współczynników LPC, uwydatnia formanty, poprawia jakość sygnału

CELP a LPC

- Poprawa jakości i zrozumiałości – lepszy dobór pobudzenia dla filtrów LPC, dostosowany do właściwości sygnału mowy
- Zwiększenie przepływności (dodatkowe informacje)
- Większa złożoność obliczeniowa (głównie dobór pobudzenia), a więc zwiększenie opóźnień.

Stosowane obecnie kodeki parametryczne w różny sposób optymalizują algorytm CELP.

Adaptacyjna książka kodowa

Praktyczne implementacje kodeków CELP wykorzystują dwie książki kodowe:

- adaptacyjna
  - reprezentuje przewidywalną część pobudzenia (na podstawie historii)
  - jest uaktualniana dla każdej ramki
- stała (*fixed*, stochastic)
  - reprezentuje zmienną część pobudzenia

Sygnał pobudzenia: suma wektorów z obu książek kodowych. Uproszczenie obliczeń, szczególnie wyznaczania wysokości dźwięku.

Low-delay CELP (LD-CELP)

Modyfikacja algorytmu CELP:

- zmniejszenie opóźnienia <2 ms (małe bloki próbek)
- zastosowanie wstecznej adaptacji predyktora: wsp. LPC obliczane z sygnału syntetycznego, nie muszą być przesyłane
- wysoki rząd predykcji (50), tylko short-term
- brak predykcji wysokości dźwięku
- znaczne większa złożoność

Kodek G.728, 16 kbit/s

Algebraic CELP (ACELP)

- Zmniejszenie złożoności i opóźnień, poprawa jakości kodowanej mowy
- Algebraiczna książka kodowa: wektory kodowe uzyskiwane przez dodawanie i przesuwanie ciągów impulsów
- Adaptacyjna książka kodowa
- Zespolona kwantyzacja wektorowa obliczonych parametrów

Kodek G.729 (CS-ACELP): 6,4 / 8,0 / 11,8 kbit/s

Odporność na utratę pakietów

- Klasyczne kodeki nie nadają się do zastosowań VoIP. Gdy tracone są pakiety danych, jakość mowy pogarsza się.
- Kodek iLBC - oparty na CELP, dostosowany do transmisji w sieciach IP
- Predykcja w niezależnych blokach próbek – zabezpieczenie przed zniekształceniami przy utracie pakietów
- Adaptacja książki kodowej w przód i wstecz
- Tryby pracy: 13,3 / 15,2 kbit/s

Tryby pracy kodeka

- Pasmo częstotliwości do 4 kHz (cz. próbkowania 8 kHz, tryb *narrowband*) wystarcza do celów zrozumiałości mowy.
- Nie wystarcza do uzyskania zadawalającej jakości mowy, trudno przesyłać muzykę
- Szerokopasmowe tryby pracy kodeków:
  - *wideband*: cz. próbkowania 16 kHz (pasmo do 8 kHz)
  - *ultra wideband*: 32 kHz (pasmo do 16 kHz)
  - *full band*: 48 kHz (do 24 kHz)

Metody zmniejszenia przepływności

- Zmienna przepływność bitowa (*variable bit rate*, VBR)
  - dostosowanie przepływności do parametrów sygnału (wejściowy parametr: *quality*, czyli pożądana jakość sygnału)
- Wykrywanie obecności mowy (*voice activity detection*, VAD)
- Wykrywanie przerw w transmisji (*discontinuous transmission*, DTX)
  - mowa nie jest kodowana i przesyłana gdy nie występuje na wejściu

Kodek Speex

- Speex jest dostosowany do transmisji w sieciach IP (utrata pakietów)
- Wykorzystuje CELP
- Tryby pracy *narrowband*, *wideband*
- Opcjonalne kodowanie VBR z podaną jakością
- Licencja *open source*

Przepływności:

- *narrowband*: 2,15 – 24,6 kbit/s
- *wideband*: 4,0 – 44,2 kbit/s

Kodeki GSM

Kodeki oparte na LPC, wykorzystywane do transmisji w sieciach komórkowych.

- GSM-FR (*Full Rate*, GSM 06.10)
  - najstarszy kodek GSM
  - RPE-LPT (*Regular Pulse Excitation – Long Time Prediction*), LPC 8. rzędu
  - 13 kbit/s (8 kHz), kiepska jakość
- GSM-HR (*Half Rate*, GSM 06.20)
  - mniejsza przepływność: 5,6 kbit/s
  - VSELP (*Vector-Sum Excited LP*)
  - gorsza jakość, mniejsze zużycie energii

Kodeki GSM

- GSM-EFR (*Enhanced Full Rate*, GSM 06.60)
  - wykorzystuje ACELP
  - lepsza jakość niż FR, większe zużycie energii
  - przepływność 12,2 kbit/s
- AMR (*Adaptive Multi-Rate*)
  - wykorzystuje ACELP
  - kodek hybrydowy (+kodowanie sygnałowe)
  - wykorzystanie VAD i DTX
  - poprawa jakości względem FR/EFR
  - 8 przepływności od 4,75 do 12,2 kbit/s

Kodeki GSM

- AMR-WB (AMR *Wideband*, G.722.2)
  - kodek szerokopasmowy do 7 kHz
  - przepływności 6,60 / 8,85 / 12,65 kbit/s
  - do „trudniejszych” zastosowań (hałas, muzyka): do 23,85 kbit/s
  - wymagane szerokopasmowe sieci
- AMR-WB+ (*Extended AMR-WB*)
  - sygnały stereo i wyższe cz. próbkowania
  - zaprojektowane dla „usług telekomunikacyjnych”
  - przepł. od 5,2 do 48,0 kbit/s

Kodek OPUS

OPUS (dawniej SILK) – kodek na licencji open source.

- Kodowanie mowy oraz muzyki
- Odporność na utratę pakietów
- Elementy dźwięczne: predykcja long-term LPC w wybielonym sygnale
- Elementy bezdźwięczne: LPC w sygnale przefiltrowanym górnoprzepustowo
- Skalowalność, niskie opóźnienia
- Cz. próbkowania 8 / 12 / 16 / 24 / 48 kHz
- Przepływności od 8 do 40 kbit/s

OPUS – kodowanie mowy

- Długość ramki: 10 lub 20 ms
- Regulowany stopień złożoności: od 0 do 10.
- Tryby pracy:

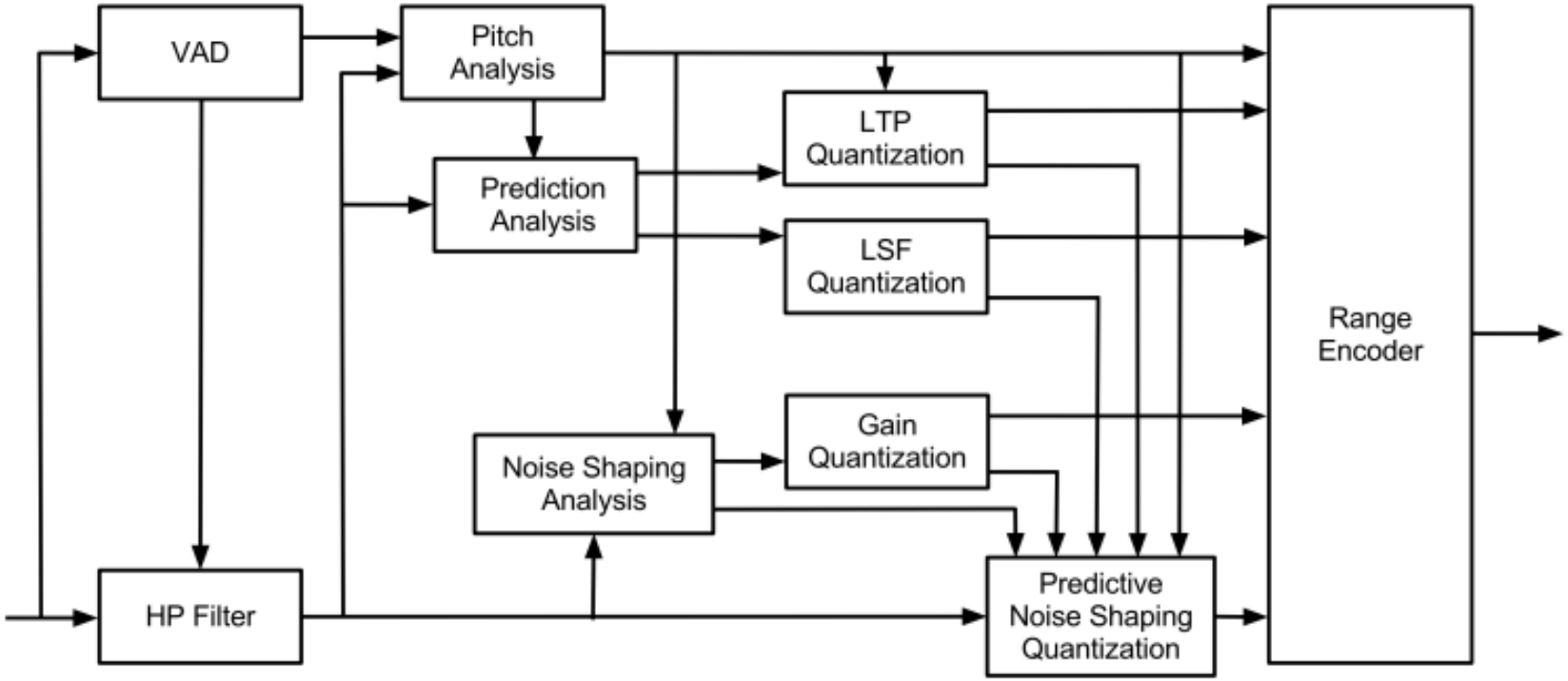
Sample Frequency	Name
48 kHz	Fullband
24 kHz	Super-wideband
16 kHz	Wideband
12 kHz	Mediumband
8 kHz	Narrowband

Input Type	Recommended Bitrate Range	
	Mono	Stereo
FB	28-40 kbps	48-72 kbps
SWB	20-28 kbps	36-48 kbps
WB	16-20 kbps	28-36 kbps
MB	12-16 kbps	20-28 kbps
NB	8-12 kbps	14-20 kbps

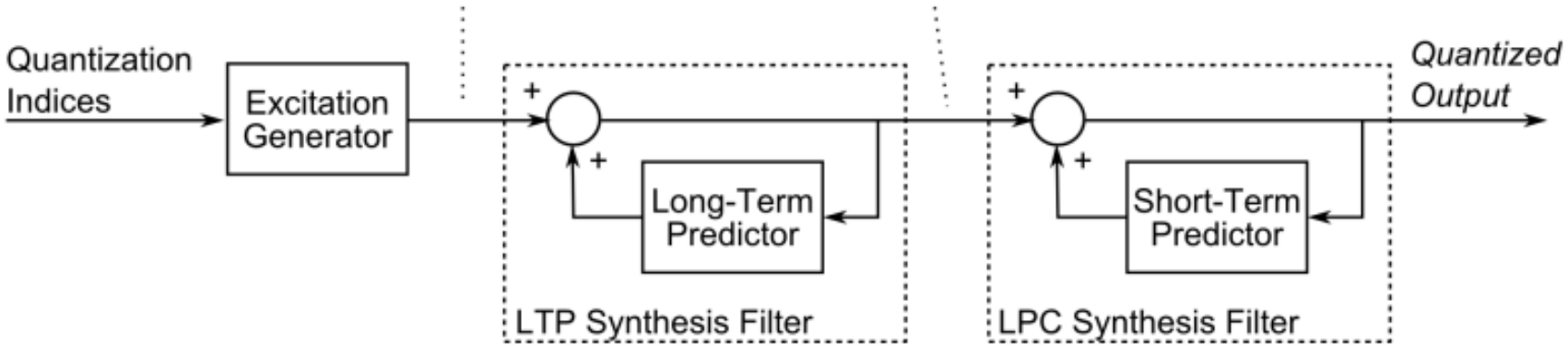
OPUS – kodowanie mowy

- Niskie częstotliwości (do 8 kHz)
  - kodowanie oparte na CELP.
- Wysokie częstotliwości (powyżej 8 kHz)
  - kodowanie w dziedzinie częstotliwości, oparte na współczynnikach MDCT (zmodyfikowana transformacja kosinusowa).
- Wyznaczanie wysokości dźwięku – analiza korelacji w sygnale po filtrze GP oraz po filtrze wybielającym. Wyznaczanie dźwięczności ramki.
- Kształtowanie szumu kwantyzacji (*noise shaping*) – redukcja uciążliwości, stosuje model psychoakustyczny.

OPUS – koder


VAD
Pitch Analysis
LTP Quantization
Prediction Analysis
LSF Quantization
Range Encoder
Gain Quantization
Noise Shaping Analysis
HP Filter
Predictive Noise Shaping Quantization

OPUS - dekoder



Literatura

- Wikipedia – hasła: *Speech coding*, *Speech codecs*
- Chu W.C., *Speech Coding Algorithms. Foundation and Evolution of Standardized Coders*, John Wiley & Sons, Hoboken 2003.
- *SPEEX: A free codec for free speech*. http://www.speex.org/ http://developer.skype.com/silk
- *K. Vos et al.: Voice Coding with OPUS*. https://www.opus-codec.org/presentations/opus_voice_aes135.pdf
- G. Szwoch: *Algorytmy kodowania źródłowego mowy* (raport). Dostępny na stronie Katedry (dział „Materiały pomocnicze”).
- Instrukcja do ćwiczenia laboratoryjnego nr 2: *Badanie algorytmów kodowania mowy*.

Materiały wyłącznie do użytku wewnętrznego dla studentów przedmiotu *Synteza dźwięku i* obrazu, prowadzonego przez Katedrę Systemów Multimedialnych Politechniki Gdańskiej. Wykorzystywanie do innych celów oraz publikowanie i rozpowszechnianie zabronione.

This presentation is intended for internal use only, for students of Multimedia Systems Department, Gdansk University of Technology, attending the „Sound and image synthesis” course. Other uses, including publication and distribution, are strictly prohibited.