

## 信号理論

- No.12 音声/音響信号処理への応用 -

渡辺 裕

信号理論 / Signal Theory

1

## Signal Theory

- No.12 Application to Speech/Audio Signal Processing -

Hiroshi Watanabe

信号理論 / Signal Theory

2

## 音声信号方式

- アナログ電話
  - 音声帯域4kHz -> もしデジタル化すれば8kHz sampling
- FMラジオ
  - 周波数帯域15kHz -> もしデジタル化すれば30kHz sampling
- オーディオCD
  - 周波数帯域22.05kHz, 16bit -> 44.1 kHz sampling
- DVD オーディオ
  - 周波数帯域192kHz, 24bit (2チャンネル時のみ), 96kHz, 24bitマルチチャンネルステレオ

信号理論 / Signal Theory

3

## Audio Signal Formats

- Analog telephone
  - Speech bandwidth 4kHz -> If digitized, 8kHz sampling
- FM radio
  - Bandwidth 15kHz -> If digitized, 30kHz sampling
- Audio CD
  - Bandwidth 22.05kHz, 16bit -> 44.1 kHz sampling
- DVD audio
  - Bandwidth 192kHz, 24bit (2 channel), 96kHz, 24bit multi-channel stereo

信号理論 / Signal Theory

4

## 音響符号化

- 低ビットレート(<32kbps)
  - LPC(線形予測符号化)Vocoder
  - マルチパス線形符号化
  - CELP(符号励振線形予測)
- 中ビットレート(32kbps-64kbps)
  - ADPCM(適応差分パルス符号変調)
  - サブバンドADPCM
- 高ビットレート(>64kbps)
  - サブバンド符号化
  - ATC(適応変換符号化)+心理聴覚重みづけビット割り当て

信号理論 / Signal Theory

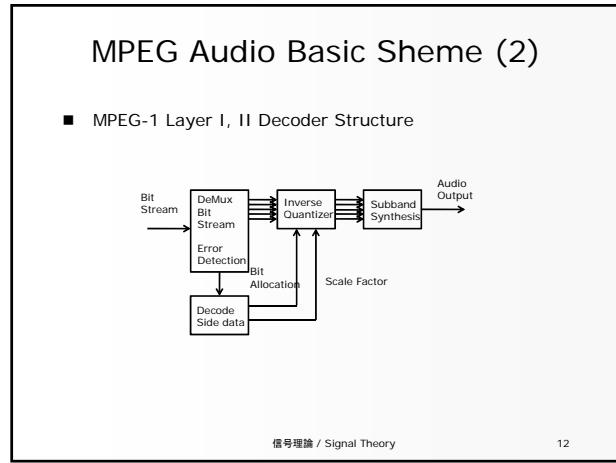
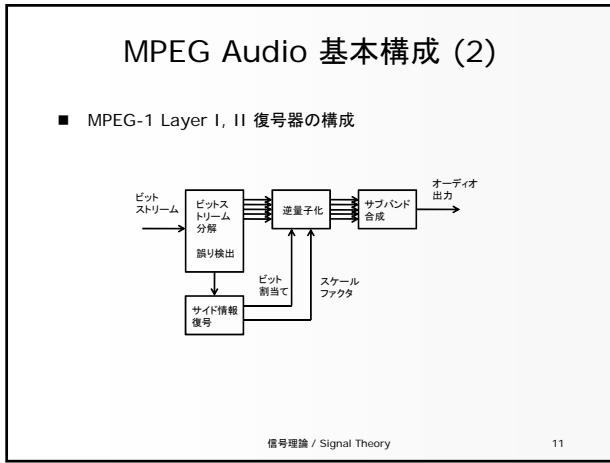
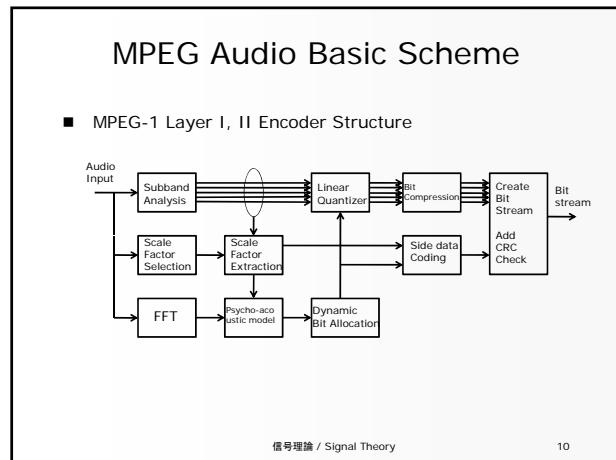
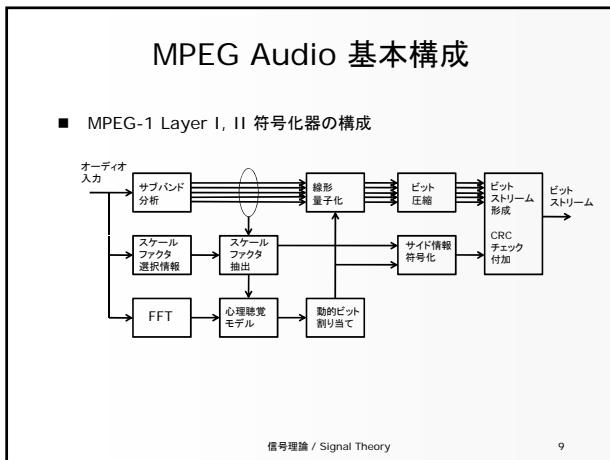
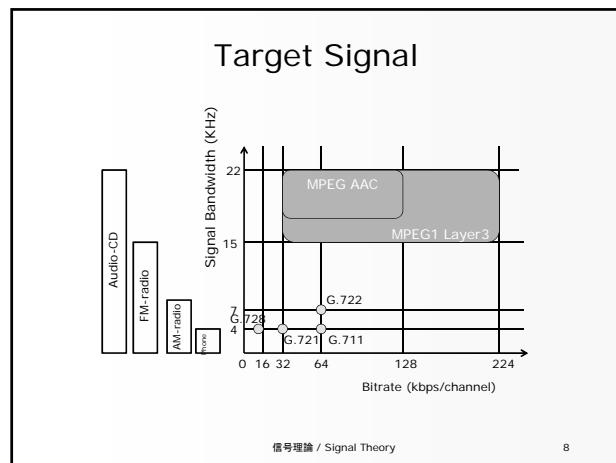
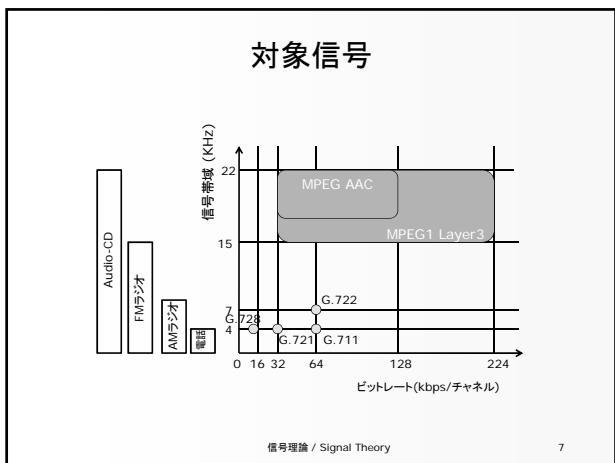
5

## Audio Coding

- Low bitrate (<32kbps)
  - LPC(Linear Predictive Coding) Vocoder
  - Multipass Linear Predictive Coding
  - CELP(Code Excited Linear Prediction)
- Middle bitrate (32kbps-64kbps)
  - ADPCM(Adaptive Differential Pulse Coded Modulation)
  - Subband ADPCM
- High bitrate (>64kbps)
  - Subband Coding
  - MDCT(Modified DCT)+Psycho-acoustic weighted bit allocation

信号理論 / Signal Theory

6



## MPEG Audio 基本構成 (3)

- 符号化器における主要処理
  - 16bit PCM 入力
  - ポリフェーズフィルタバンク(512tap)による32帯域分割
  - 量子化誤差マスキングレベル計算
  - 心理聴覚モデルによるビット割当て
  - アンシラリーデータの組込み

信号理論 / Signal Theory

13

## MPEG Audio Basic Scheme (3)

- Main Processes at an encoder
  - Input: 16bit PCM
  - Subband Analysis (32 bands) by Polyphase Filter Bank (512tap)
  - Calculation of masking level for quantization error
  - Bit allocation based on psycho-acoustic model
  - Embed ancillary data

信号理論 / Signal Theory

14

## サブバンド分析

- 入力信号512点のデータ $x(i)$ にLPFインパルス応答 $c(i)$ をかける

$$y(i) = c(i)x(i) \quad (i = 0, 1, \dots, 511)$$

- 周期加算信号の計算

$$z(i) = \sum_{j=0}^7 y(64j + i)$$

- サブバンド信号の導出

$$s(i) = \sum_{i=0}^{63} z(i) \cos \frac{(2i+1)(k-16)\pi}{64}$$

信号理論 / Signal Theory

15

## Subband Analysis

- Multiply LPF impulse response  $c(i)$  to input 512 point data  $x(i)$

$$y(i) = c(i)x(i) \quad (i = 0, 1, \dots, 511)$$

- Calculation of periodic added signal

$$z(i) = \sum_{j=0}^7 y(64j + i)$$

- Derive subband signal

$$s(i) = \sum_{i=0}^{63} z(i) \cos \frac{(2i+1)(k-16)\pi}{64}$$

信号理論 / Signal Theory

16

## スケールファクタ

- 各サブバンドのダイナミックレンジを揃える

- レイヤIでは各バンド12サンプル毎、原信号では384サンプル( $12 \times 32$ バンド)
- レイヤIIでは1152サンプル毎、レイヤIの3倍のデータ量となるため、トリプレツ(3つ組のパターン)を構成
- 隣接する二つのスケールファクタの差分を計算
- 差分の連続パターンが1bitのスケールファクタ選択情報と1-3bitの伝送パターンで符号化

信号理論 / Signal Theory

17

## Scale Factor

- Align dynamic range of each subband

- レイヤIでは各バンド12サンプル毎、原信号では384サンプル( $12 \times 32$ バンド)
- レイヤIIでは1152サンプル毎、レイヤIの3倍のデータ量となるため、トリプレツ(3つ組のパターン)を構成
- 隣接する二つのスケールファクタの差分を計算
- 差分の連続パターンが1bitのスケールファクタ選択情報と1-3bitの伝送パターンで符号化

信号理論 / Signal Theory

18

## 心理聴覚分析 (1)

- FFT分析
  - ブロック長はレイヤIで512, レイヤIIは1024
  - ポリフェーズフィルタバンクの遅延量に中心を設定
- 音圧計算
  - FFT 出力とFFT分析の1ブロック内で最大となるスケールファクタのうち、大きい方の値を音圧と定義
- 純音成分と非純音成分の選別
  - 両隣のスペクトルラインより大きく、左右jサンプル離れたすべてのスペクトルラインより、7dB大きなスペクトルラインを純音成分とする

信号理論 / Signal Theory

19

## Psycho-acoustic Analysis (1)

- FFT Analysis
  - Block length are 512 for Layer I, 1024 for Layer II
  - Set center to the delay of polyphase filter bank
- Calculation of acoustic pressure
  - Define acoustic pressure as the larger one either FFT output or the maximum scale factor in one block of FFT analysis
- Selection of pure tone and non-pure tone
  - Set pure tone that is 7 dB larger than spectrum lines far from j-sample as well as larger than the neighborhood spectrum lines

信号理論 / Signal Theory

20

## 心理聴覚分析 (2)

- 純音決定処理
  - $X(k) > X(k-1)$  および  $X(k) \geq X(k+1)$  を同時に満足するスペクトルラインを検出
  - $X(k)-X(k+j) > 7$  dBを満足するスペクトルラインを選択
  - 幅jの値はレイヤI, レイヤIIそれぞれに対し、周波数帯域ごとに与えられる
  - 純音成分に隣接するスペクトルラインの音圧を、純音成分の音圧に加算
  - $X(k) < - X(k) + X(k-1) + X(k+1)$

信号理論 / Signal Theory

21

## Psycho-acoustic Analysis (2)

- Decision process for pure tone
  - Detect spectrum line that satisfies  $X(k) > X(k-1)$  and  $X(k) \geq X(k+1)$  simultaneously
  - Select spectrum line that satisfies  $X(k)-X(k+j) > 7$  dB
  - Width value j is given depends on each subband for Layer I and II
  - Add acoustic pressure of neighborhood spectrum to the one of pure tone
    - $X(k) < - X(k) + X(k-1) + X(k+1)$

信号理論 / Signal Theory

22

## 心理聴覚分析 (3)

- 幅jで与えられる範囲内に存在するX(k)以外のスペクトルラインをすべてゼロに再設定
- 以上の処理で得られた純音以外のスペクトルラインを、各帯域内ですべて加算し、非純音成分の音圧として定義
- 非純音成分の音圧を、各帯域の中心に最も近い位置に再配置
- 純音成分と非純音成分の間引き
  - 求められた純音成分と非純音成分のうち、しきい値未満のものは棄却。さらに、0.5バーカー以内の距離に複数の純音成分がある場合には、最大の純音成分以外を棄却

信号理論 / Signal Theory

23

## Psycho-acoustic Analysis (3)

- Set values of all spectrum lines to 0 within the width j except for  $X(k)$
- Add all non-pure tone spectrum lines obtained the above process within each subband, and define it as a non-pure tone pressure
- Replace non-pure tone pressure to the center of each subband
- Sub-sampling of pure tone and non-pure tone
  - For the obtained pure and non-pure tone, reject the one less than a threshold. Further, only the maximum pure tone is kept if there are several pure tones in the distance of 0.5 bark

信号理論 / Signal Theory

24

## バーク

- 臨界帯域を示す単位で、人間の聴覚特性性能に近似した非線形周波数写像のスケール
  - 1 バークは低域周波数では狭い周波数帯域に相当し、高域周波数ではより広い周波数帯域に相当する
  - 尺度の範囲は1から24で、聴覚の24の臨界帯域 (critical band) に対応している。帯域の境界は順に、20, 100, 200, 300, 400, 510, 630, 770, 920, 1080, 1270, 1480, 1720, 2000, 2320, 2700, 3150, 3700, 4400, 5300, 6400, 7700, 9500, 12000, 15500 (Hz)

信号理論 / Signal Theory

25

## Bark

- A unit to specify critical bandwidth. It is a scale of nonlinear frequency mapping that approximates human acoustic characteristics
  - 1 bark corresponds narrow frequency band at low frequency range, and wider frequency band at high frequency range
  - Range of measure is from 1 to 24, corresponding 24 critical bands for psycho-acoustics. Borders are 20, 100, 200, 300, 400, 510, 630, 770, 920, 1080, 1270, 1480, 1720, 2000, 2320, 2700, 3150, 3700, 4400, 5300, 6400, 7700, 9500, 12000, 15500 (Hz)

信号理論 / Signal Theory

26

## 心理聴覚分析 (4)

- 個別マスキングしきい値の計算
  - 高域周波数ほど大きな間引きを実施
  - 新しいサンプル点に、純音と非純音を再配置
  - 純音および非純音マスキングしきい値の導出
    - $F(X(z(j)), av(z(j)), vf(z(j), z(i)))$
    - $X(z(j))$ : j番目のマスカーラ音圧
    - $av(z(j))$ : マスキング指數
    - $vf(z(j), z(i))$ : マスキング関数
- 全体マスキングレベルの決定
  - 低音側3バーク、高音側8バーク以内に含まれる純音成分と非純音成分によるマスキングしきい値を加算

信号理論 / Signal Theory

27

## Psycho-Acoustic Analysis (4)

- Calculation of threshold of individual masking value
  - Large sub-sampling applied to high frequency
  - Replace pure/non-pure tone to new samples
  - Derive thresholds for pure/non-pure tone masking
    - $F(X(z(j)), av(z(j)), vf(z(j), z(i)))$
    - $X(z(j))$ : j-th masker pressure
    - $av(z(j))$ : masking indicator
    - $vf(z(j), z(i))$ : masking function
- Decide overall masking level
  - Add masking threshold of pure/non-pure tone contained in 3 bark for low frequency side and 8 bark for high frequency side

信号理論 / Signal Theory

28

## 心理聴覚分析 (5)

- 最小マスキングレベルの決定
  - 各サブバンドに対応する周波数軸上の範囲内で最小の全体マスキングしきい値を抽出
- 信号対マスク比の計算
  - 信号対マスク比(SMR)を各サブバンドの音圧と最小マスキングレベルの比として与える

信号理論 / Signal Theory

29

## Psycho-Acoustic Analysis (5)

- Decide the minimum masking level
  - Extract overall masking threshold in each subband
- Calculation of signal to mask ratio
  - Signal to mask ratio (SMR) is given by the ratio of acoustic pressure and the minimum masking level

信号理論 / Signal Theory

30

## ビット割当て

- SMRに基づき各サブバンドへのビット割当て決定
  - 総ビット数からヘッダ、CRCチェック、アンシラリデータを差し引く
  - 最小マスク対雑音比(MNR)を有するサブバンドを探索
  - 該当サブバンドの量子化ステップを1段小さくする
  - 新しい量子化ステップに対応する信号対雑音比(SMR)を表から選択し新たなMNRを求める
  - 割当てビット数から量子化ビット数を差し引き、再度ビット割当てを繰り返す

信号理論 / Signal Theory

31

## Bit Allocation

- Decide bit allocation to each subband based on SMR
  - Subtract bits of header, CRC check and ancillary data from total bits
  - Search subband having the minimum mask to noise ratio (MNR)
  - Decrease quantization step of the above subband
  - Obtain new MNR by selecting SMR that corresponds to the new quantization step from the table
  - Subtract quantization bit from allocated bit, and perform the bit allocation again

信号理論 / Signal Theory

32

## 量子化処理

- 各サブバンドをスケールファクタで正規化 $X(n)$ 
  - サブバンドごとに割当てられたビット数に対応した値 $A(n)$ ,  $B(n)$ により $A(n)X(n)+B(n)$ に従って量子化
  - 上位Nビットを取り最上位ビットを反転
- レイヤIIでは効率化のために、連続する3サンプル $x, y, z$ に対して量子化ステップ数が3, 5, 9の場合の符号化サンプル $v_3, v_5, v_9$ を与える
  - $v_3=9z+3y+x$
  - $v_5=25z+5y+x$
  - $v_9=81z+9y+x$

信号理論 / Signal Theory

33

## Quantization Process

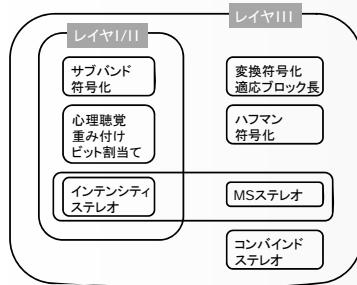
- Normalize each subband by scale factor
  - To each subband,  $A(n)$ ,  $B(n)$  that correspond to allocated bits, quantize using  $A(n)X(n)+B(n)$
  - Take upper N bit, MSB is reversed
- In Layer II, for efficiency, give coding sample  $v_3, v_5, v_9$  that are the case when quantization steps are 3, 5, 9 for consecutive 3 samples  $x, y, z$ 
  - $v_3=9z+3y+x$
  - $v_5=25z+5y+x$
  - $v_9=81z+9y+x$

信号理論 / Signal Theory

34

## 符号化技術 (2)

- レイヤ間の要素技術の関係

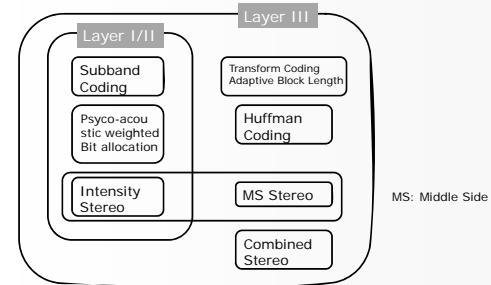


信号理論 / Signal Theory

35

## Compression Technology (2)

- Relation of technology elements between Layers



信号理論 / Signal Theory

36

## ハイブリッドフィルタバンク

- レイヤIIIではハイブリッドフィルタバンクを採用
  - 32PFBに加えてMDCT(LOT)
  - $21 \times 18 = 576$  帯域に分割
  - MDCTはプリエコー対応、窓長可変(18, 36)



信号理論 / Signal Theory

37

## Hybrid Filter Bank

- Hybrid filter bank is adopted in Layer III
  - 32PFB with MDCT(LOT)
  - $21 \times 18 = 576$  subbands
  - MDCT can respond to pre-echo, variable window(18, 36)



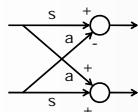
信号理論 / Signal Theory

38

## 折り返し歪除去

- MDCT出力に対して帯域境界に近い8サンプル、8段にわたって処理

$$s = \frac{1}{\sqrt{1+c^2}} \quad a = \frac{c}{\sqrt{1+c^2}}$$



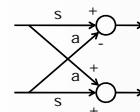
信号理論 / Signal Theory

39

## Aliasing Noise Removal

- Process butterfly operation to MDCT output, boundary 8 sample, 8 steps

$$s = \frac{1}{\sqrt{1+c^2}} \quad a = \frac{c}{\sqrt{1+c^2}}$$



信号理論 / Signal Theory

40

## ステレオ符号化

- ジョイントステレオ符号化
  - インテンシティステレオ
    - 左右両チャネルの和信号と比率を2チャネルとして処理
    - 低域周波数は左右独立に符号化
  - MS(middle side)ステレオ
    - 左右両チャネルの和信号と差信号を2チャネルとして処理
    - 最も簡単な2点直交変換
    - 両チャネルの相関が大きい時には、和信号と差信号の情報差が大きくなり、偏在によるデータ圧縮効果が得られる
  - コンバインドステレオ
    - FFTにより得られた左右のスペクトル差が、しきい値より大きい場合にインテンシティステレオとMSステレオを切り替える

信号理論 / Signal Theory

41

## Stereo Coding

- Joint Stereo Coding
  - Intensity Stereo
    - Sum of two channel and ratio is processed
    - Low frequency is independently coded
  - MS(middle side) Stereo
    - Sum and difference of two channel is processed
    - Simplest two point orthogonal transform
    - Compression efficiency can be obtained when correlation of two channel is large because of bias effect
  - Combined Stereo
    - Switch Intensity and MS stereo when spectrum ratio between two channel obtained by FFT is large

信号理論 / Signal Theory

42

## AAC符号化での新技術

- 時間領域量子化雑音整形
  - 量子化雑音を信号振幅の大きさにより整形
  - 符号化時にMDCT係数の一部を線形予測分析
  - 線形予測係数を用いたトランスポンサルフィルタ処理
  - 復号時に巡回型フィルタ処理
  - 量子化雑音は信号振幅の大きな部分に集中
  - しきい値を超えた場合にのみ適用
- 予測
  - 直前ブロックの量子化データにより、現ブロックの時間領域量子化雑音整形出力を予測、予測誤差のみを符号化
  - 各スペクトルに対して2次のラティス型パックワード適応予測

信号理論 / Signal Theory

43

## New Technology at AAC

- Temporal Noise Shaping
  - Quantization noise shaping based on signal amplitude
  - Linear prediction for MDCT coefficients at encoder
  - Transversal filtering using linear prediction
  - Feedback filtering employed at decoder
  - Quantization noise concentrates to large amplitude
  - Threshold control
- Prediction
  - Current TNS output is predicted by the previous one, and only the difference is coded
  - 2<sup>nd</sup> order lattice backward adaptive prediction

信号理論 / Signal Theory

44

## 他の符号化技術

- MPEG-4で導入された方式
  - Twin VQ (transform domain weighted interleave vector quantization)
    - MDCTで周波数領域信号に変換しLPC分析で正規化
    - バーク尺度領域に変換して求めた包絡により正規化
    - 電力で正規化後重みづけインターリーブベクトル量化
  - CELP符号化
    - LPC分析後量子化係数を得てLPC合成フィルタを音源コードブックの出力で駆動
    - 長期予測係数を求め、LPC合成フィルタと入力信号の差が聴感的に最小化されるよう音源コードブックの出力を探索
    - LPC係数の量子化はベクトル量化、音源はマルチパルス

信号理論 / Signal Theory

45

## Other Technologies

- Coding method introduced in MPEG-4
  - Twin VQ (transform domain weighted interleave vector quantization)
    - Normalize by LPC analysis to frequency domain signal obtained by MDCT
    - Normalize by envelope converted to Bark domain
    - Weighted interleave VQ after normalize by power
  - CELP Coding
    - Excite LPC analysis filter by source codebook output after LPC analysis
    - Long term prediction coefficient is obtained, search codebook to minimize input and LPC analysis output
    - LPC coefficient is vector quantized, source is multi-pulse

信号理論 / Signal Theory

46

## 他の符号化技術 (2)

- ハーモニックベクトル励振符号化
  - LPC分析後量子化された係数をLPC逆フィルタに供給し入力信号の残差を求める
  - 予測残差を周波数領域でピッチ分析および包絡線分析
  - 有声音部では包絡線を重みづけベクトル量化
  - 無声音部では励振ベクトルの閉ループ探索を実行

信号理論 / Signal Theory

47

## Other Technologies (2)

- Harmonic Vector Excited Coding (HEVC)
  - Calculate difference between input and inverse LPC filter after performing LPC analysis and quantization
  - Prediction error is fed into pitch analysis and envelope analysis in frequency domain
  - In voice part, envelope is weighted vector quantized
  - Otherwise, excited vector's closed loop search is performed

信号理論 / Signal Theory

48

## 標準化組織

- 標準化組織
  - 國際電気通信連合電気通信標準化部門 (ITU-T, 前CCITT)
  - 歐洲電気通信標準化機構 (ETSI)
  - 國際標準化機構 (ISO)
  - 米国電気通信工業会 (TIA)
- <http://www.tml.tkk.fi/Opinnot/Tik-111.590/2002/chapter3.pdf>

信号理論 / Signal Theory

49

## Standardization Organization

- Standardization Organization
  - International Telecommunication Union – Telecommunication Standardization Sector (ITU-T, former CCITT)
  - European Telecommunication Standards Institute (ETSI)
  - International Standards Organization (ISO)
  - Telecommunication Industry Association (TIA)
- <http://www.tml.tkk.fi/Opinnot/Tik-111.590/2002/chapter3.pdf>

信号理論 / Signal Theory

50

## ITU G.726, G727

- 適応差分パルス符号変調 (ADPCM)
  - G.726: 個々に最適化された量子化器を使用
  - G.727: パケットネットワークアプリケーションに応じた量子化器を組み込み
  - ビットレート: 16, 24, 32, 40, 60 kbit/s
  - 主観品質 32 kbit/s: 4.1
  - 演算規模: 2 MIPS

信号理論 / Signal Theory

51

## ITU G.726, G727

- ADPCM
  - G.726: individually optimized quantizers
  - G.727: embedded quantizers developed for packet network applications
  - Bitrate: 16, 24, 32, 40, 60 kbit/s
  - MOS for 32 kbit/s: 4.1
  - Complexity: 2 MIPS

信号理論 / Signal Theory

52

## インマルサット-B ボコーダ

- 国際衛星機構 B 標準, 適応予測ボコーダ
  - ADPCM 長時間予測(LTP) と 6次短時間予測(STP)
  - ビットレート: 9.6, 12.8 kbit/s
  - 主観品質 9.6 (12.8) kbit/s: 3.1 (3.4)
  - 演算規模: 10 MIPS

信号理論 / Signal Theory

53

## Inmarsat-B Vocoder

- The International Mobile Satellite B standard using adaptive predictive vocoder
  - ADPCM with Long Time Prediction (LTP) and 6<sup>th</sup> order Short Time Prediction (STP)
  - Bitrate: 9.6, 12.8 kbit/s
  - Mos for 9.6 (12.8) kbit/s: 3.1 (3.4)
  - Complexity: 10 MIPS

信号理論 / Signal Theory

54

## LPC-10(e) FS-1015

- LPC-10(e) 米国連邦標準1015
  - 米国国防省 1976
  - 秘話通信が目的
  - 10次予測器を使用
  - ビットレート: 2.4 kbit/s
  - 主観品質 2.4 kbit/s: 2.3
  - 演算規模: 7MIPS

信号理論 / Signal Theory

55

## LPC-10(e) FS-1015

- LPC-10(e) federal standard 1015
  - USA Department of Defense in 1976
  - Secure communications
  - 10<sup>th</sup> order predictor
  - Bitrate: 2.4 kbit/s
  - MOS for 2.4 kbit/s: 2.3
  - Complexity: 7MIPS

信号理論 / Signal Theory

56

## MELP コーデック

- 混合励起線形予測(MELP)コーデック
  - 米国政府 1996
  - 開発動機はLPC-10における音声エラー
  - 遅延: 122.5 ms
  - ビットレート: 2.4 kbit/s
  - 主観品質 2.4 kbit/s: 3.2
  - 演算規模: 40 MIPS

信号理論 / Signal Theory

57

## MELP codec

- Mixed Excitation Linear Prediction (MELP) codec
  - US government in 1996
  - Motivated by voicing errors in LPC-10
  - Delay: 122.5 ms
  - Bitrate: 2.4 kbit/s
  - MOS for 2.4 kbit/s: 3.2
  - Complexity: 40 MIPS

信号理論 / Signal Theory

58

## GSM 6.10

- 欧州電気通信標準化機構(ETSI) フルレート方式 GSM 6.10
  - 欧州携帯電話での標準音声符号化方式
  - 等間隔パルス励起(RPE)による長時間予測(LTP)
  - 励起は複数の等間隔パルス系列による
  - ビットレート: 13.0 kbit/s
  - 主観品質 13.0 kbit/s: 3.5-3.9
  - 演算規模: 5-6 MIPS

信号理論 / Signal Theory

59

## GSM 6.10

- ETSI full-Rate GSM 6.10
  - EU digital cellular standard
  - Regular-Pulse Excitation (PRE) with Long Term Prediction (LTP)
  - Excitation is a sequence of multiple uniformly spaced pulses
  - Bitrate: 13.0 kbit/s
  - MOS for 13.0 kbit/s: 3.5-3.9
  - Complexity: 5-6 MIPS

信号理論 / Signal Theory

60

## FS-1016

- 米国連邦標準 1016
  - 米国国防省 (DoD)
  - 第3世代秘話通信方式(STU-III)
  - 国防省とベル研による共同開発
  - 符号励起線形予測方式(CELP)
  - 励起は長期予測ベクトルと統計的コードブックの組み合わせによる
  - ビットレート: 4.8 kbit/s
  - 主観品質 4.8 kbit/s: 3.2
  - 演算規模: 16 MIPS

信号理論 / Signal Theory

61

## FS-1016

- Federal Standard 1016
  - USA Department of Defense (DoD)
  - 3<sup>rd</sup> generation secure telephone unit (STU-III)
  - Jointly developed by DoD and Bell Lab.
  - CELP
  - Excitation is formed by combining vectors from long time prediction (LTP) and stochastic codebook
  - Bitrate: 4.8 kbit/s
  - MOS for 4.8 kbit/s: 3.2
  - Complexity: 16 MIPS

信号理論 / Signal Theory

62

## VSELP

- ベクトル和励起線形予測(VSELP)
  - 世界で3地域の携帯電話で音声符号化標準として使用
    - TIA IS-54 (日本と北米)
      - 日本では1990年にPDCフルレート方式(ARIB標準STD-24, 音声 6.7 kbit/s, 検査データ 4.5kbit/s)
    - ETSI 6.20 GSM ハーフレート (欧州)
  - 高度に構造化されたコードブック
    - 演算規模削減
    - チャネルエラー耐性強化
  - ビットレート: 5-6 kbit/s
  - 主観品質 6.3 (8.0) kbit/s: 3.4 (3.5)
  - 演算規模: 14 MIPS

信号理論 / Signal Theory

63

## VSELP

- Vector Sum Excited LP (VSELP) Standards
  - Algorithm embedded to 3 digital cellular standards
    - TIA IS-54 (Japan and North America)
      - Full rate algorithm in PDC in 1990 (ARIB recommendation STD-24, speech 6.7 kbit/s, ECC 4.5kbit/s)
    - ETSI 6.20 GSM half-rate (EU)
  - Highly structured codebooks
    - Reduces computational complexity
    - Increases robustness to channel errors
  - Bitrate: 5-6 kbit/s
  - MOS for 6.3 (8.0) kbit/s: 3.4 (3.5)
  - Complexity: 14 MIPS

信号理論 / Signal Theory

64

## ITU G.728

- ITU G.728 低遅延CELP
  - 短フレーム, 短励起ベクトル, 短時間予測(STP)
  - 符号化音声品質: G.728>G.726
  - ビットレート: 16 kbit/s
  - 主観品質 16 kbit/s: 3.4
  - 演算規模: 30 MIPS

信号理論 / Signal Theory

65

## ITU G.728

- ITU G.728 Low Delay CELP
  - Short frames, short excitation vectors, short term prediction (STP)
  - Speech quality: G.728>G.726
  - Bitrate: 16 kbit/s
  - MOS for 16 kbit/s: 3.4
  - Complexity: 30 MIPS

信号理論 / Signal Theory

66

## IS-96

- 米国電気通信工業会TIA IS-96は、携帯電話方式の一つである符号分割多元接続(CDMA)で使われる
  - CELPと短時間予測(STP)を使用
  - 線形予測パラメータへのビット割り当てを制御することにより可変ビットレートを達成
  - ビットレート: 1.2, 2.4, 4.8, 9.6 kbit/s
  - 主観品質 9.6 kbit/s: 3.3
  - 演算規模: 15 MIPS

信号理論 / Signal Theory

67

## IS-96

- TIA IS-96 used in Code Division Multiple Access (CDMA) for cellular communications
  - CELP with Short Term Prediction (STP)
  - Variable bitrate by controlling bit allocation to LP parameters
  - Bitrate: 1.2, 2.4, 4.8, 9.6 kbit/s
  - MOS for 9.6 kbit/s: 3.3
  - Complexity: 15 MIPS

信号理論 / Signal Theory

68

## ITU G.729, G.729A

- ITU G.729, G729A CS-ACELP
  - マルチメディアネットワークアプリケーション用
  - 共役構造代数CELP
    - 低遅延: 15 ms
    - フレームサイズ: 10 ms
    - コードブック2個
  - G.729 Annex Iにより低遅延で品質が多少低下
  - アルゴリズムに互換性を確保
  - ビットレート: 8 kbit/s
  - 主観品質 8 kbit/s: 4 (G.729), 3.8(G.729A)
  - 演算規模: 20 MIPS (G.729), 11 MIPS (G.729A)

信号理論 / Signal Theory

69

## ITU G.729, G.729A

- ITU G.729, G729A CS-ACELP
  - Designed for wireless and multimedia network applications
  - Conjugate Structure Algebraic CELP
    - Low-delay: 15 ms
    - Frame size: 10 ms
    - 2 codebooks
  - G.729 Annex has lower complexity and quality
  - Algorithm interoperable
  - Bitrate: 8 kbit/s
  - MOS for 8 kbit/s: 4 (G.729), 3.8(G.729A)
  - Complexity: 20 MIPS (G.729), 11 MIPS (G.729A)

信号理論 / Signal Theory

70

## ITU G.723.1

- ITU G.723.1 MP-MLQ/ACELP
  - 公衆交換電話網におけるテレビ会議システムのための音声・音響符号化方式
  - テレビ会議システム標準であるITU H.323, 324の一部
  - VoIPアプリケーションにおけるディフォルト方式
  - 二つの励起構造による方式
    - 多重パルス最尤量化 (6.3 kbit/s)
    - ACELP (5.3 kbit/s)
  - 主観品質 5.3 (6.3) kbit/s: 3.7 (4.0)
  - 演算規模: 16 MIPS

信号理論 / Signal Theory

71

## ITU G.723.1

- ITU G.723.1 MP-MLQ/ACELP
  - Speech coder for audio and videoconferencing over public switched telephone network (PSTN)
  - Part of ITU H.323, 324 standards
  - Default audio codec for VoIP
  - Dual rate with 2 excitation schemes
    - Multipulse maximum likelihood quantization for 6.3 kbit/s
    - ACELP for 5.3 kbit/s
  - MOS for 5.3 (6.3) kbit/s: 3.7 (4.0)
  - Complexity: 16 MIPS

信号理論 / Signal Theory

72

## ITU G.722

- ITU G.722 サブバンド符号化
  - ISDNにおけるテレビ会議用
  - サブバンド分割とビット割り当て
    - 低域周波数: 48 kbit/s を割り当てる
    - 高域周波数: 16 kbit/s を割り当てる
  - ビットレート: 64 kbit/s
  - 主観品質 64 kbit/s: 4.1
  - 演算規模: 5 MIPS

信号理論 / Signal Theory

73

## ITU G.722

- ITU G.722 subband coder
  - Targeted for ISDN video conferencing
  - Subband splitting and bit allocation
    - Low frequency: 48 kbit/s allocated
    - High frequency: 16 kbit/s allocated
  - Bitrate: 64 kbit/s
  - MOS for 64 kbit/s: 4.1
  - Complexity: 5 MIPS

信号理論 / Signal Theory

74

## 方式比較

標準	方式	ビットレート (Kbit/s)	主觀品質 (MOS)	演算規模 (MIPS)	フレームサイズ (ms)
G.711	PCM	64	4.3	0.01	0
G.726	ADPCM	32	4.1	2	0.125
G.722	SBC	48/56/64	4.1	5	0.125
G.728	LD-CELP	16	4.0	30	0.625
G.729 (-A)	CS-ACELP	8	4.0 (3.8)	20 (11)	10
G.723.1	MPC-MLO	6.3/5.3	4.0/3.7	11	10
GSM HR	VSELP	6.3	3.4	14	20
IS-54	VSELP	8	3.5	14	20
IS-96	QCELP	1.2/2.4/4.8/ 9.6	3.3	15	20
Inmarsat-B	APC	9.6/12.8	3.1/3.4	10	20
US MELP	MELP	2.4	3.2	40	22.5
FS 1016	CELP	4.8	3.2	16	30

信号理論 / Signal Theory

75

## Algorithm Comparison

Standard	Algorithm	Bitrate (Kbit/s)	Quality (MOS)	Complexity (MIPS)	Frame size(ms)
G.711	PCM	64	4.3	0.01	0
G.726	ADPCM	32	4.1	2	0.125
G.722	SBC	48/56/64	4.1	5	0.125
G.728	LD-CELP	16	4.0	30	0.625
G.729 (-A)	CS-ACELP	8	4.0 (3.8)	20 (11)	10
G.723.1	MPC-MLO	6.3/5.3	4.0/3.7	11	10
GSM HR	VSELP	6.3	3.4	14	20
IS-54	VSELP	8	3.5	14	20
IS-96	QCELP	1.2/2.4/4.8/ 9.6	3.3	15	20
Inmarsat-B	APC	9.6/12.8	3.1/3.4	10	20
US MELP	MELP	2.4	3.2	40	22.5
FS 1016	CELP	4.8	3.2	16	30

信号理論 / Signal Theory

76