



## Non-Fourier Sound Analysis

- 전통적인 Fourier spectrum analysis의 문제점을 살펴보고 대체 방법들을 살펴봄
- autoregressive<sup>1)</sup> analysis, source/parameter analysis, 사인파외의 다른 orthogonal function<sup>2)</sup>에 의한 분석

### Critiques of Fourier Spectrum Analysis

- Fourier의 전통적 방법에 기초한 스펙트럼 분석은 유한 신호 분석 시 기본적 제약 존재
  - ① 제한적인 frequency resolution
  - ② 윈도우 과정에서 발생하는 side effect
- Fourier 분석은 소리가 배음으로 연관된 사인파의 결합으로 이루어졌다는 가정에서 시작하기 때문에 기본적으로 noisy 사운드 분석에 비효율적
- FFT의 제한을 완화하기 위한 시도로 여러 대안적 스펙트럼 분석 방법 제안
- 그림 13.30: 세 개의 사인파와 filtered noise의 band로 이루어진 입력신호를 다양한 방법으로 분석한 스펙트럼 결과

PSD = power spectrum density

horizontal scale = frequency(0~half the sampling rate)

vertical scale = amplitude(0~40dB)

- (a) input signal
- (b) Periodogram<sup>3)</sup> with double-zero padding FFT
- (c) Blackman-Turkey PSD
- (d) Autoregressive PSD via Yule-Walker approach
- (e) Autoregressive PSD via Burg approach
- (f) Moving average PSD
- (g) Autoregressive PSD via extended Yule-Walker approach
- (i) Pisarenko spectral line decomposition
- (j) Prony PSD
- (k) Spectral Prony via Hildebrand approach
- (l) Capon or maximum likelihood

1) In statistics and signal processing, an autoregressive (AR) model is a type of random process which is often used to model and predict various types of natural phenomena.

[http://en.wikipedia.org/wiki/AR\\_process](http://en.wikipedia.org/wiki/AR_process)

2) In mathematics, two functions  $f$  and  $g$  are called orthogonal if their inner product is zero.

[http://en.wikipedia.org/wiki/Orthogonal\\_functions](http://en.wikipedia.org/wiki/Orthogonal_functions)

3) The periodogram is an estimate of the spectral density of a signal.

<http://en.wikipedia.org/wiki/Periodogram>

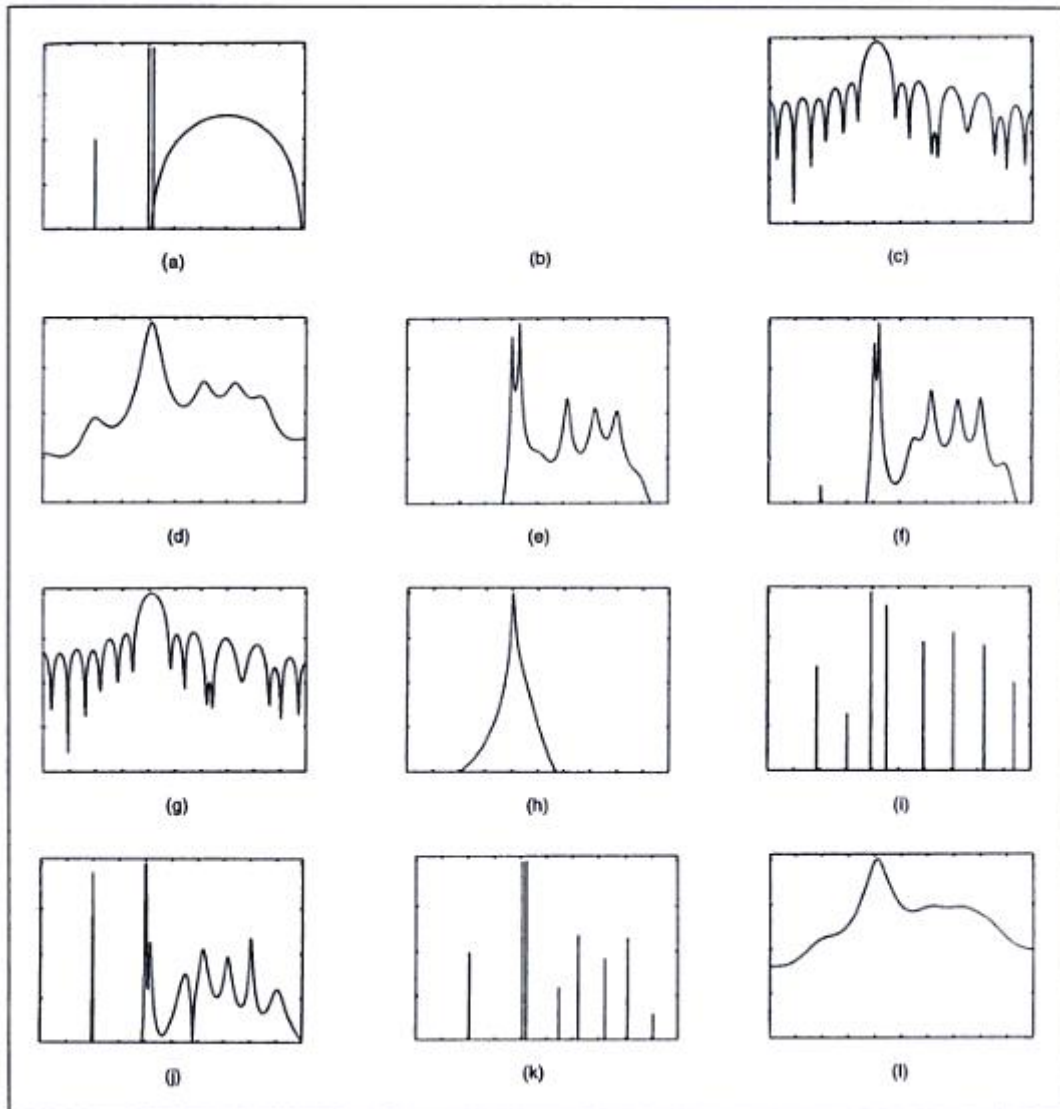


Figure 13.30 Different ways of measuring spectrum for a single input sound

- (b), (c), (g): Fourier에 의한 방법으로 사인파를 제대로 분석하지 못하며 noise와 사인파 구분하지 못함
- (k)의 경우 정확하게 세 개의 사인파 측정하지만 noise band를 다섯 개의 사인으로 분석
- 모든 상황에 적용되는 최상의 스펙트럼 측정법은 존재하지 않음
- 상황에 따라 적합한 방법 사용

### Autoregression Spectrum Analysis

- autoregression(AR), linear predictive coding(LCP), maximum entropy methods(MEM)은 입력 신호의 스펙트럼에 대응하는 필터를 디자인하기 위해 기본적으로 동일한 기법을 사용하는 하나의 군
- 이 세 방법을 rubric AR로 취급
- Fourier 방법에 비해 AR의 장점은 적은 양의 입력 신호에서도 스펙트럼을 측정할 수 있다는 것
- 즉 time/frequency resolution 향상 가능성 지님
- 하지만 Fourier와 AR의 직접 비교하지 않음
- ∴ AR은 스펙트럼에 적용된 자극 신호의 결과이기 때문에 여러 주파수 각각의 에너지 보다는 resonance의 전체적 스펙트럼 형태 측정(그림13-30 (d))



- AR은 합성과 분석에 사용될 수 있으며 하나의 필터로 간주
- AR 방법의 과정
  - 여러 input sample을 받아들이며 가장 최근의 샘플을 reference로 사용
  - 필터 계수(filter coefficient)에서 중요한 이전 sample의 총합에서 이 샘플을 예상
  - 이 예상의 side effect로서 AR 알고리즘은 입력 신호의 스펙트럼에 inverse filter를 적용시킴
  - side effect가 음악적으로 흥미로움
- AR 방법은 다음의 등식에 따라 한 신호의 t번째 값을 예상

$$signal[t] = \sum_{i=1}^p \{coeff[i] \times signal[t - i]\} - noise[t].$$

- p의 선택은 복잡
  - p가 너무 낮은 값인 경우 전체적으로 smooth한 스펙트럼
  - p가 너무 높은 값인 경우 spurious peak
    - 입력 신호의 성격에 따라 p값을 지정하여야 함
- 뚜렷한 꼭대기가 있으나 많이 들어간 부분이 없는 smooth, continuous 스펙트럼에 효과적
- 비모음(nasal vowel-스펙트럼에 깊이 파인 곳이 있는)이나 스네어 드럼이나 심벌 같은 percussive impulse에 좋지 않음. 이 경우 오차가 큼
- linear regression 방법을 적용한 여러 알고리즘은 한 block의 data에서 filter coefficient를 계산
- 이 과정은 matrix operation에 의해 행해짐

### Autoregressive Moving Average Analysis

- 일종의 AR방법
- smooth, continuous 스펙트럼이 아닌 경우에 효과적
- 지난 입력 값과 출력 값의 결합에 의해 출력 샘플을 추출하는 것
- pole과 zero 모두를 가지며 AR보다 정확
- 하지만 AR에 비해 많은 계산 필요

### Source and Parameter Analysis

- AR, cepstrum analysis<sup>4)</sup>, physical model 등의 분석에서 그 목적은 단순히 한 신호의 주파수를 분석하는 것이 아닌 자극의 요소와 그 소리를 재합성하기 위해 필요한 resonance 같은 source의 정보를 찾는 것
- 이러한 접근은 음악적으로 흥미로 사운드에 유용
- 이런 유형의 소리는 size, mass, geometry, material 같은 많은 정보 포함
- multiple sound source의 분리에 적용
- 이런 기법들의 과학적 동기는 하나의 신호를 noise에서 분리하거나 혼합된 신호를 분해하는 것

4) A cepstrum (pronounced /ˈkɛpsrəm/) is the result of taking the Fourier transform (FT) of the decibel spectrum as if it were a signal.

<http://en.wikipedia.org/wiki/Cepstrum>



**Parameter Estimation**

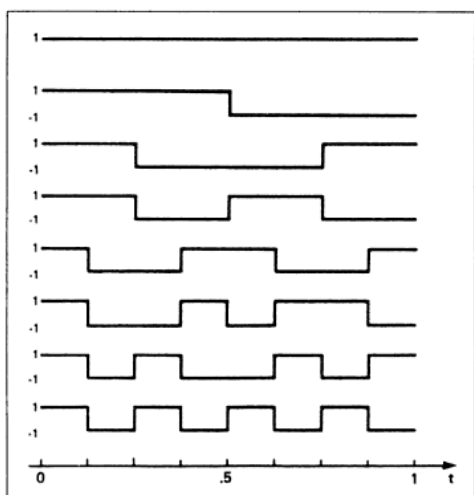
- 모든 소리 분석은 입력 신호를 분석하기 위해 시도된 모든 parameter estimation의 형태
- 예) Fourier 분석은 사인파 재합성을 위한 일종의 parameter estimation 방법
- 이론적으로 parameter estimation은 어떤 합성 기법에든 적용 가능
- 실제 임의의 합성 방법을 이용해 주어진 입력 사운드를 성공적으로 simulation하는 것은 보장되 지 않음
- 예) FM 합성을 위한 parameter estimation 분석을 개발하기 위한 시도로 원 신호와 유사한 결과 만들어짐. 하지만 보편적 analysis/resynthesis기법은 없음
- 특정 형태의 parameter estimation은 adaptive signal-processing 알고리즘 사용
- adaptive signal-processing 알고리즘: simulation model의 parameter 적용을 통해 입력 신호와 simulation 신호 사이의 에러를 최소화하기 위한 것
- real time system에서 측정과 적용은 한 샘플의 time period와 같이 만들어짐

**Analysis by Other Functions**

- 푸리에 방법은 주어진 입력신호를 다시 만들기 위해 사인파를 더하는 방법
- 사인파는 주어진 input function을 분해하고 모방하기 위해 사용할 수 있는 function의 large class 중 한 예
- Walsh function(square waves)과 complex exponential(sinesoid with a decaying amplitude envelope)는 이런 기본 단위
- 이 두 function은 특별한 성질을 가지며 이미 음악에 적용

**Walsh Functions<sup>5)</sup>**

- 장점: 그것의 기본 단위(binary pulse or square wave)가 디지털 시스템에서 사인파보다 실행이 자연스럽다는 것
- 단점: 하나의 신호를 frequency domain에서 직접 연결되지 않은 sequence의 결합으로 분류한다는 것



The first eight Walsh functions, 0(top) to 7(bottom)

5) Walsh functions are a kind of digital domain series. Walsh synthesis builds up waveforms using functions of different sequencies. Sequency is defined as one-half the average number of zero crossing for second. the computer music tutorial, pp 153~154



**Prony's Methods**

- 1795년 Gaspard Riche de Prony에 의한 방법
- 다양한 가스의 팽창을 분석하기 위한 방법
- 균일한 샘플 신호에서 다양한 정보를 추출하는 방법으로 damped complex exponential 혹은 sine을 만듦
- damped sine: sharp attack에서 시작해(exponential decay에 의해) 갑자기 사라지는 sine. Prony 방법의 기본 단위
- frequency, amplitude, phase, damping component 추출
- 이 방법의 현대적 방법은 AR 방식과 유사
- damped sine과 noise의 결합으로 입력신호를 만드는 것과 관련된 기법
- 이전에 입력된 샘플에 기초한 계수의 set을 측정
- 출력 신호에 FFT를 적용하여 스펙트럼 분석 기법으로 변화
- 장점(AR과 비교 시): phase 정보의 추출로 더욱 정확한 재합성 가능
- 컴퓨터 음악에서 chant 합성 시스템과 experimental analysis/resynthesis 분석 단계에 적용
- damped percussive sound(glockenspiel, vibraphone, marimba, low piano tones, and gong) analysis/resynthesis를 위해 LaRoche가 사용. 높은 피아노 음색과 심벌에 적합하지 않음
- Fourier 방법 vs Prony의 방법(by LaRoche)

	Fourier	Prony
조절 요소	window	세심한 parameter 조절
inharmonic	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 임의로 동일한 간격의 배음으로 나누고 스펙트럼에서 전체적으로 formant 같은 peak로 가까이 있는 사인파들을 묶어 버림</li> <li>- 분석 결과는 불확실하고 부정확할 수 있으나 완전히 모순되는 것은 아님</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- parameter가 잘 조절된 경우 inharmonic 계산에 문제 적음</li> </ul>

- Prony 분석의 장·단점
- 단점: 한 번에 약 50개의 배음밖에 분석 못함
- 장점: 특정 신호(사인파가 적은 타악기 음색) 분석에 효과적

**참고문헌**

Curtis Roads. *The Computer Music Tutorial*, pp. 592~598

<http://en.wikipedia.org/wiki/>

<http://www.mit.tut.fi/staff/Hytti/JClinMonitComput.pdf>

**작성자**

조원주 (박사과정, 4기)