김일성종합대학학보 주체107(2018)년
정보과학 제64권 제2호

임풀스잡음환경에서 리산공간시간－주파수분포행렬의 로바스트추정

박진웅, 엄철남

여러개의 수감부를 리용한 배렬신호처리기술은 레이다, 쏘나에서 다중원천신호의 분리[2], 위치추정[1], 잡음제거 등에 응용된다. 수감부배렬신호처리의 첫 공정은 신호들사이의 호상상관행렬을 구하는것이다. 최근에는 시간이나 주파수상에서의 공분산행렬대신 시간－주파수평면에서의 공간시간－주파수분포행렬을 리용하여 추정정확도를 높이고있다.

M 개의 수감부들로 이루어진 배렬의 출력신호 $\mathbf{x}(t)=[x_1(t),\ \cdots,\ x_M(t)]^{\mathrm{T}}$ 에 대한 공간시간－주파수분포행렬은 다음과 같이 두가지 형식으로 정의된다.

$$\boldsymbol{D_{xx}}(t,\ f)=E\{\boldsymbol{X}(t,\ f)\boldsymbol{X}^H(t,\ f)\},\ \ \boldsymbol{D_{xx}}(t,\ f)=[D_{x_ix_j}(t,\ f)]_{1\le i,\ j\le M} \tag{1}$$

식 (1)의 첫번째 식은 1차(시간－주파수)표시, 두번째 식은 2차(시간－주파수)표시에 의한 공간시간－주파수분포행렬정의공식이다. 여기서 E 는 수학적기대값연산자이며 $\boldsymbol{X}(t,\ f)$ 는 신호벡토르의 1차시간－주파수표시(단시간푸리에변환)이다. 그리고 $D_{x_ix_j}(t, f)$ 는 두 신호 $x_i(t)$ 와 $x_j(t)$ 의 호상2차시간－주파수분포로서 다음과 같이 표시된다.

$$D_{x_ix_j}(t,\ f)=\iiint\phi(\nu,\ \tau)\,z_i\left(u+\frac{\tau}{2}\right)z_j^*\left(u-\frac{\tau}{2}\right)e^{j2\pi(\nu t-\nu u-f\tau)}\,du\,d\nu\,d\tau \tag{2}$$

여기서 $\phi(\nu,\ \tau)$ 는 도플러－지연핵함수이고 $z_i(t)$ 는 $x_i(t)$ 의 해석신호이다.

선행연구[3]에서는 원천들의 순간주파수를 알고있다는 가정하에서 임풀스잡음환경속에서 공간시간－주파수분포행렬을 추정하는 여러가지 방법들을 종합하여 서술하고 $3-\sigma$ 처리법과 무게화평균비반복법이 크라메르－라오한계에 가장 근사한 추정실현을 준다는것을 보여주었다.

론문에서는 순간주파수에 대한 사전정보가 없이 임풀스잡음에 로바스트적인 리산형식의 공간시간－주파수분포를 얻는 한가지 방법을 제안하였다.

1. 1차표시를 리용한 공간시간－주파수분포행렬의 계산

시간정의역신호 $x(t)$ 를 단시간푸리에변환에 의해 다음과 같은 시간－주파수정의역신호로 변환하자.

$$X(t,\ f)=\mathscr{F}_{\tau\to f}\{x(\tau)w(\tau-t)\}=\int_{-\infty}^{+\infty}x(\tau)w(\tau-t)\exp(-j2\pi\,f\tau)d\tau \tag{3}$$

여기서 $w(t)$ 는 창문함수(실짝함수)이고 $\mathscr{F}_{\tau\to f}\{\circ\}$ 는 변수 τ 의 f 에로의 푸리에변환을 표기한다.

식 (3)은 신호 $x(t)$ 의 1차시간－주파수표시로 된다.

이제 리산형식의 표시를 얻기 위해 다음과 같은 량들을 정의한다. 원천신호의 기준주파수를 f_0, f_0 을 중심으로 하는 원천신호의 주파수대역폭을 W_B 라고 할 때 원천신호의

주파수대역은 다음과 같이 된다.

$$B=[f_{\min},\ f_{\max}]=[f_0-W_B/2,\quad f_0+W_B/2] \tag{4}$$

창문함수의 크기를 N_w, 표본화주파수를 f_s 라고 하자. 그러면 $t-f$ 리산점 $(t_D,\ f_D)$ 와 련속점 $(t,\ f)$ 사이에는 다음의 관계가 성립한다.

$$t=t_D/f_s,\quad f=f_D\times f_s/N_w$$

여기서 $t_D=1, 2, \cdots, f_s$, $f_D=0, 1, \cdots, (N_w-1)$ 이다. N_w 는 주파수분해능을 결정한다.

크기가 N_w 인 표본값렬을 토막이라고 하면 단시간푸리에변환의 리산형식은 다음과 같이 된다.

$$X(t_D,\ f_D)=\sum_{\tau_D=1}^{N_w}x(\tau_D)w(\tau_D-t_D)\exp(-j2\pi f_D\tau_D/N_w) \tag{5}$$

창문함수로는 하밍(Hamming)창문을 리용한다.

관측표본값렬의 크기를 N, 창문크기를 N_w 라고 하자.

현실신호들은 보통 비정상신호이다. 그러나 매우 짧은 시간동안에는 정상신호라고 가정할수 있다. 즉 일정한 시간 $T_0=N_0/f_s$ 동안에는 원천신호를 정상신호로 볼수 있다. 여기서 N_0 은 T_0 시간동안에 관측되는 표본개수이다. 앞으로 T_0 을 정상시간, N_0 을 정상크기라고 하겠다.

토막들의 겹침을 $\eta(\%)$ 라고 하면 정상시간구간안에는

$$N_g=\left\lfloor (N_0-N_w)/\left\lfloor\left(1-\frac{\eta}{100}\right)N_w\right\rfloor\right\rfloor+1$$

개의 서로 다른 토막들이 있다.

정의식 (1)로부터 한 정상시간구간에서의 공간시간－주파수분포행렬을 다음과 같이 추정할수 있다.

$$\hat{\boldsymbol{D}}_{\boldsymbol{xx}}(t_p,\ f_q)=\frac{1}{N_g}\sum_{r=1}^{N_g}\boldsymbol{X}(t_{n(p,r)},\ f_q)\boldsymbol{X}^H(t_{n(p,r)},\ f_q) \tag{6}$$

여기서 p 와 r 에 관한 첨수 $n(p,\ r)$ 는 다음과 같다.

$$n(p,\ r)=(p-1)N_0+1+(r-1)(1-\eta/100)N_w \tag{7}$$

$$p=1,\ 2, \cdots, \lfloor N/N_0\rfloor,\ \ r=1,\ 2, \cdots, N_g,\ \ q=f_{D\_\min},\ f_{D\_\min}+1, \cdots,\ f_{D\_\max}$$

$$f_{D\_\min}=\lfloor N_w(f_0-W_B/2)/f_s\rfloor,\quad f_{D\_\max}=\lceil N_w(f_0+W_B/2)/f_s\rceil$$

이로부터 최대로 $N_D=\lfloor N/N_0\rfloor(f_{D\_\max}-f_{D\_\min}+1)$ 개의 서로 다른 리산시간－주파수점들에서의 공간시간－주파수분포행렬들을 구할수 있다. 여기서 $\lceil x\rceil$ 는 x 보다 작지 않은 가장 작은 옹근수, $\lfloor x\rfloor$ 는 x 보다 크지 않은 가장 큰 옹근수를 표시한다. 바로 이 N_D 개의 리산시간－주파수점들에서 공간시간－주파수분포행렬들을 추정한다.

2. 2차표시를 리용한 공간시간－주파수분포행렬의 계산

정의식 (2)를 도플러지연핵함수 $G(t,\ \tau)=\mathscr{F}_{t\to\nu}^{-1}\{\phi(\nu,\ \tau)\}$ 와 순간호상상관함수

$$K_{ij}(t,\ \tau)==z_i\left(u+\frac{\tau}{2}\right)z_j^*\left(u-\frac{\tau}{2}\right)$$

에 의해 다음과 같이 간단히 쓸수 있다.

$$D_{z_i z_j}(t,\ f) = \mathscr{F}_{\tau \to f}\{R_{ij}(t,\ \tau)\} = \mathscr{F}_{\tau \to f}\{G(t,\ \tau) \underset{t}{\otimes} K_{ij}(t,\ \tau)\} \tag{8}$$

이제 리산형식의 분포를 표시하기 위해 변수 $t,\ f,\ \nu,\ \tau$ 를 각각 리산변수 $n,\ k,\ p,\ q$ 에 대응시키자.

표본값렬의 크기를 N, 표본화주파수를 f_s 라고 할 때 리산시간 $t = 0,\ 1,\ \cdots,\ N-1$ 에 대하여 련속변수와 리산변수사이에는 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$t = n/f_s\ ,\quad \tau = q/f_s\ ,\quad f = kf_s/2N\ ,\quad \nu = pf_s/2N \tag{9}$$

이때 리산형식의 호상2차시간－주파수분포는 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} D_{z_i z_j}(n,\ k) &= 2\mathscr{F}_{q \to k}\{R_{ij}(n,\ q)\} = 2\mathscr{F}_{q \to k}\{G(n,\ q) \times [z_i(n+q) z_j^*(n-q)]\} = \\ &= 2\mathrm{FFT}_{q \to k}(\mathrm{IFFT}_{n \to p}(\mathrm{FFT}_{n \to p}(K_{ij}(n,\ q)) \times \phi_{(n,\ \alpha)}(p,\ q))) \end{aligned} \tag{10}$$

여기서 FFT와 IFFT는 고속리산푸리에변환과 그것의 거꿀변환이다.

3. 공간시간－주파수분포행렬추정에서 임풀스잡음억제

임풀스잡음을 다음과 같이 모형화할수 있다.[3]

$$n_{impulse}(t) = (1-\varepsilon) N_c(0,\ \sigma^2) + \varepsilon N_c(0,\ \kappa\sigma^2) \tag{11}$$

여기서 $n_{impulse}(t)$ 는 임풀스잡음, $N_c(\mu,\ \sigma^2)$ 은 수학적기대값이 μ, 표준편차가 σ 인 복소가우스잡음, ε 은 임풀스출현확률, κ 는 임풀스세기를 나타낸다.

여기서 제안하는 방법의 원리는 시간렬신호에 적용하는 $3-\sigma$ 처리법과 표준화방법을 결합한다는것이다.

우연량자료렬 $y(n)$ 에 대하여 그것의 중위수를 $\mathrm{Med}\{y(n)\}$으로 표시할 때 표준화된 중위수절대편차는 다음과 같다.

$$\sigma_y = [\mathrm{Med}\{|\,y(n) - \mathrm{Med}\{y(n)\}\,|\}]/0.674\,5 \tag{12}$$

임풀스잡음을 억제하는 분포행렬추정알고리듬은 다음과 같다.

알고리듬 (임풀스잡음을 억제하는 공간시간－주파수분포행렬추정)

입력: 신호벡토르표본값렬 $\mathbf{x}(n) = [x_1(n),\ \cdots,\ x_M(n)]^{\mathrm{T}}\ (n \in \mathscr{N}_N)$

출력: 공간시간－주파수분포행렬 $\boldsymbol{D}_{\mathbf{zz}}(n,\ k) = (D_{z_i z_j}(n,\ k))_{1 \le i,\ j \le M}$

걸음 1 표본값렬 $\{x_m(n)\}_{n=1}^{N}$ 을 표준화한 표본값렬 $\{\bar{x}_m(n)\}_{n=1}^{N}$ 에 대하여 해석신호 $z_m(n)$ 을 계산한다.(모든 $m \in \mathscr{N}_M$ 에 대하여)

$$\bar{x}_m(n) = x_m(n)/E_m\ ,\quad E_m = \sqrt{\sum_{n=1}^{N} {x_m}^2(n)}$$

1차표시를 리용하는 경우에는 해석신호계산단계가 없다.($z_m(n) = \bar{x}_m(n)$)

걸음 2 매 $m \in \mathscr{N}_M$ 에 대하여 $3-\sigma$ 처리법으로 시간정의역에서 임풀스잡음을 제거한다.

$$\bar{z}_m(n) = \begin{cases} 0, & z_m(n) \in V_m \\ z_m(n), & z_m(n) \notin V_m \end{cases} \tag{13}$$

여기서 V_m은 m번째 표본값렬에 대하여 임풀스잡음으로 판정되는 표본들의 모임이다.

$$V_m = \{z_m(n) \big| |\mathrm{Re}\{z_m(n)\}| > 3\sigma_{\mathrm{Re}\{z_m(n)\}} \vee |\mathrm{Im}\{z_m(n)\}| > 3\sigma_{\mathrm{Im}\{z_m(n)\}}\} \quad (14)$$

여기서 Re와 Im은 각각 복소수의 실수부와 허수부를 나타낸다.

걸음 3 1차 및 2차표시에 의한 분포행렬계산방법에 의해 $\bar{\boldsymbol{z}} = [\bar{z}_1(n), \cdots, \bar{z}_1(n)]^{\mathrm{T}}$에 대한 분포행렬 $\boldsymbol{D}_{\bar{\boldsymbol{z}}\bar{\boldsymbol{z}}}(t, f)$를 추정한다.

이 알고리듬은 선행연구[3]에서 제안한 방법과는 달리 원천들의 순간주파수에 대한 사전정보가 없이도 임풀스잡음을 억제할수 있다.

맺 는 말

1개의 수감부를 리용하여 음원이 수감부방향으로 비행할 때 측정된 순간주파수값들에 기초하여 음원의 신호파라메터를 추정하는 한가지 방법을 제안하였다.

선행한 방법들에 비하여 계산정확도가 높고 파라메터추정연산속도가 빠른것으로 하여 음원의 신호파라메터추정을 필요로 하는 여러 분야에서 효과적으로 리용할수 있다.

참 고 문 헌

[1] Om Cholnam et al.; IET Signal Processing, 10, 9, 1105, 2016.
[2] D. N. Levin; IEEE Trans. on Signal Processing, 58, 4, 2131, 2010.
[3] W. Sharif et al.; Signal Processing, 91, 2630, 2011.

주체107(2018)년 2월 5일 원고접수

Robust Estimation of Discrete Spatial Time-Frequency Distribution Matrix in Present Impulse Noise

Pak Jin Ung, Om Chol Nam

We proposed a method for estimating the discrete spatial time-frequency distribution matrix without estimating instantaneous frequency of sources.

Key words: spatial time-frequency distribution matrix(STFDM), impulse noise, array signal processing