김일성종합대학학보 JOURNAL OF KIM IL SUNG UNIVERSITY
(자연과학) (NATURAL SCIENCE)
주체104(2015)년 제61권 제9호 Vol. 61 No. 9 JUCHE104(2015).

순간주파수측정값들에 의한 피동거리추정의 한가지 방법

리강진, 엄철남

피동음향수감부로 이동하는 음원의 음향신호를 수감하여 목표의 이동파라메터를 추정하는것은 음향탐지기에서 중요한 문제의 하나이다.

선행연구[1]에서는 1개의 수감부로 측정된 순간주파수값들을 리용하여 음원의 이동파라메터추정문제를 2차원비선형최량화문제로 귀착시켰지만 이 방법은 음원이 수감부우로 지나갈 때에만 적용할수 있다. 여러개의 수감부로 측정된 도달시간차값[2] 또는 에네르기값[4]들을 리용하여 음원의 3차원위치를 추정하는 방법들도 연구되였지만 이 방법들은 수감부의 개수가 많을것을 요구하며 신호대잡음비가 낮은 경우에 불충분한 추정을 낳는다.

우리는 1개의 수감부를 리용하여 음원이 수감부방향으로 비행할 때 측정된 순간주파수값들에 기초하여 음원의 이동파라메터를 추정하는 한가지 방법을 제안하고 모의실험을 진행하였다.

1. 순간주파수와 음원의 이동파라메터사이 관계

도플러효과는 음원과 수감부사이의 호상운동에 의하여 발생하는 주파수변화효과로서 이 주파수변화는 수감부에서 순간주파수로 측정된다.

이러한 운동하는 음원에 대하여 일정한 관측시간구간안에서 다음의 가정을 세울수 있다.

① 음원은 일정한 높이에서 등속으로 직선비행하며 이동속도는 음속보다 작다.

② 음원주파수는 일정하다.

우의 가정에 기초하여 부동수감부에 의하여 얻어지는 순간주파수값은 다음과 같다.

$$f_I = f_0 \frac{C}{C \mp V\cos\theta_D \cos\gamma} \tag{1}$$

여기서 V는 음원의 이동속도, C는 음속, $\mp$부호는 음원이 수감부방향으로 날아올 때에는 부의 부호, 멀어질 때에는 정의 부호를 나타낸다. 그리고 γ는 음원의 이동방향과 음파의 전달경로사이 각이며 θ_D는 수감부에 대한 음원의 비탈각이다.

t_j시각에 대하여 식 (1)은 다음과 같이 전개될수 있다.

$$f(t_j) = A + B\cdot Z(t_j,\ t_c,\ s) \tag{2}$$

$$A = f_0\cdot C^2/(C^2 - V^2),\quad B = -f_0\cdot C\cdot V(C^2 - V^2) \tag{3}$$

$$t_c = -L/C,\quad s = L\cdot\sqrt{C^2 - V^2}\Big/(VC),\quad Z(t_j,\ t_c,\ s) = (t_j - t_c)\Big/\sqrt{s^2 + (t_j - t_c)^2} \tag{4}$$

여기서 t_c는 최소접근점(수감부에서 음원의 비행경로에 내린 수직선의 밑점)에서 수감부까지(거리 L) 소리가 전파되는데 걸리는 시간이다.

선행연구[1]에서는 시각 t_j들을 미리 알고있다는 가정하에서 t_c와 s에 관한 2차원비선형최량화문제의 풀이를 구하는 방법으로 이동파라메터를 추정하였다. 그러나 이 방법은 현실조건에서 t_j들을 결정하기 힘들며 또 목표가 수감부우로 지나갈 때에만 적용할수 있는것으로 하여 실용성이 없다. 이 결함을 극복하기 위해 우리는 측정의 마감시각을 T로 놓고 ΔT 시간간격으로 순간주파수를 측정하였다.

이때 식 (2)는 다음과 같이 변경된다.

$$f(T_j) = A + B \cdot Z(T_j,\ s) \tag{5}$$

$$T_j = T - (j-1)\Delta T\,,\ \ Z_j = Z(T_j,\ s) = T_j \Big/ \sqrt{s^2 + T_j^{\,2}} \tag{6}$$

여기서 A, B는 식 (3)에서와 같고 j=1, ⋯, N이다.

측정시간간격을 등간격(ΔT는 사용자가 설정한다.)으로 놓음으로써 이동파라메터추정문제를 변수 T와 s에 관한 2차원최량화문제로 귀착시킬수 있다.

2. 이동파라메터 추정

비행체의 이동파라메터 V, L, f_0, T들은 매 시각 T_j에서 순간주파수의 측정값 $\hat{f}_j$들과 식 (2)에 의해 계산된 예측값 f_j들의 2제곱오차를 최소화하여 얻을수 있다. 즉

$$\sum_{j=1}^{N} (\hat{f}_j - f_j)^2 = \sum_{j=1}^{N} (\hat{f}_j - A - B \cdot Z_j)^2 \tag{7}$$

한편 T_j와 s의 값들이 고정되여있을 때 식 (4)를 A와 B에 관하여 최소화하면 A와 B는

$$\hat{B} = \sum_{j=1}^{N} (\hat{f}_j - f_j) \cdot Z_j \Big/ \sum_{j=1}^{N} (Z_j - \bar{z})^2\,,\ \ \hat{A} = \bar{f} - B \cdot \bar{z} \tag{8}$$

로 추정된다. 여기서 $\bar{f}$와 $\bar{z}$는 각각 $\hat{f}_j$, Z_j들의 평균이다.

식 (8)을 (7)에 대입하고 정돈하면 식 (7)의 최소화문제는 다음식의 최대화문제와 동등해진다.

$$\left(\sum_{j=1}^{N} (\hat{f}_j - f_j) \cdot Z_j \right)^2 \Bigg/ \sum_{j=1}^{N} (Z_j - \bar{z})^2 \tag{9}$$

이제 $\boldsymbol{x} = [T,\ s]^T$로 놓으면 식 (9)의 최대화문제는 다음과 같은 함수 $F(\boldsymbol{x})$의 최소화문제로 된다.

$$F(\boldsymbol{x}) = F(T,\ \ t_c) = \sum_{j=1}^{N} (g_j(\boldsymbol{x}))^2\,,\ \ g_j(\boldsymbol{x}) = \sum_{j=1}^{N} (Z_j - \bar{z}) \Bigg/ \left(\sum_{j=1}^{N} (\hat{f}_j - \bar{f}) \cdot Z_j \right) \tag{10}$$

이 최소화문제는 Marquardt－Levenberg방법을 적용하여 풀수 있다.

함수 $F(\boldsymbol{x})$의 그라디엔트(2차원렬벡토르)는 다음과 같이 해석적으로 구할수 있다.

$$\nabla F(\boldsymbol{x}) = 2\sum_{j=1}^{N} g_j(\boldsymbol{x}) \cdot \nabla g_j(\boldsymbol{x}) \tag{11}$$

여기서 $\nabla g_j(\boldsymbol{x}) = \sum_{k=1}^{N} [\partial g_i(\boldsymbol{x}) / \partial Z_k] \cdot \nabla Z_k(\boldsymbol{x})$, $\nabla Z_k(\boldsymbol{x}) = [\partial Z_k / \partial T,\ \ \partial Z_k / \partial s]^T$,

$$\partial Z_k / \partial T = s^2 (s^2 + T_k{}^2)^{-1.5}, \quad \partial Z_k / \partial s = -T_k s (s^2 + T_k{}^2)^{-1.5},$$

$$\partial g_j(\boldsymbol{x}) / \partial Z_k = Z_f{}^{-2} \sum_{k=1}^{N} \left[N_{jk} \cdot Z_f - (Z_j - \bar{z}) \cdot (f_k - \bar{f}) \right], \quad Z_f = \sum_{j=1}^{N} (f_j - \bar{f}) \cdot Z_j$$

이며 N_{jk}는 $j=k$일 때에는 $1-1/N$이고 $j \neq k$ 일 때에는 $-1/N$이다.

한편 Marquardt－Levenberg알고리듬의 l번째 순환에서 탐색방향은 다음과 같이 쓸수 있다.[1]

$$d_l = -G_l{}^{-1} \nabla F(\boldsymbol{x}_l), \quad G_l = \nabla^2 F(\boldsymbol{x}_l) + \beta_l Q_l \tag{12}$$

여기서 β_l은 부아닌 상수로서 $\nabla^2 F(\boldsymbol{x}_l)$이 비부값행렬일 때 G_l이 정값행렬이 되도록 취한다. 그리고 Q_l은 정값행렬(실례로 단위행렬)이며 Hesse행렬 $\nabla^2 F(\boldsymbol{x}_l)$은 그라디엔트행렬 $\nabla F(\boldsymbol{x}_l)$에 의해 근사적으로 다음과 같이 계산될수 있다.

$$\nabla^2 F(\boldsymbol{x}_l) \approx \left[\nabla F(\boldsymbol{x}_l) \right]^T \left[\nabla F(\boldsymbol{x}_l) \right] \tag{13}$$

우와 같은 론의에 기초하여 이동파라메터를 계산하는 알고리듬은 다음과 같다.

① 초기값을 다음과 같이 설정한다.

$l=0$, $\boldsymbol{x}_l = [T, \ s]^T$ ($T<0$, $s>0$이면서 0에 가까운 실수)

② 그라디엔트 $\nabla F(\boldsymbol{x}_l)$을 계산하고 탐색방향 $\boldsymbol{d}_l$을 계산한다.(식 (11), (12))

③ $\boldsymbol{x}$를 다음과 같이 갱신한다.

$$\boldsymbol{x}_{l+1} = \boldsymbol{x}_1 + \lambda_l \, \boldsymbol{d}_l \, \boldsymbol{x}_{l+1} = \boldsymbol{x}_l + \boldsymbol{\lambda}_l \, \boldsymbol{d}_l$$

④ $|\Delta \boldsymbol{x}_l| = |\boldsymbol{x}_l - \boldsymbol{x}_{l-1}|$가 허용오차한계에 들어갈 때까지 ②부터 ④까지를 반복한다.

⑤ 최종적으로 얻어진 파라메터 $\hat{\boldsymbol{x}} = [\hat{T}, \ \hat{s}]^T$를 가지고 식 (6)에 의해 T_j, Z_j를 얻은 다음에 식 (8)에 의해 A, B의 값을 계산한다.

⑥ 이동파라메터를 다음의 식에 의하여 계산한다.

$$\hat{V} = -(\hat{B} / \hat{A}) \cdot C, \quad \hat{L} = \hat{s} \cdot \hat{V} \cdot C / (C^2 - V^2)^{1/2}, \quad \hat{f}_0 = \hat{A} \cdot (1 - \hat{V}^2 / C^2), \quad \hat{t}_c = -\hat{L} / \hat{C} \tag{14}$$

⑦ 시각 t에서 비행체와 수감부사이 거리는 다음과 같이 평가한다.

$$r(t) = \sqrt{\hat{L}^2 + [tC^2\hat{V} + \hat{L}C\hat{V} - C\hat{V}^2 ((\hat{L}/\hat{V}C)^2 (C^2 - \hat{V}^2) + (t - \hat{t}_c)^2)^{1/2} / (C^2 - \hat{V}^2)]^2} \tag{15}$$

알고리듬에서 입력은 순간주파수측정값 $\hat{f}_j$과 측정시간간격 ΔT이며 출력은 이동파라메터{ V, L, f_0, T }와 t시각의 거리 $r(t)$이다.

3. 모의실험 및 결과분석

비행체의 이동파라메터를 표 1에서와 같이 설정할 때 평가되는 순간주파수는

25.995 7, 25.982 1, 25.966 7, 25.949 1, 25.929 0, 25.906 0,
25.879 2, 25.848 1, 25.811 5, 25.768 3Hz

이다.

표 1. 모의파라메터설정값

F_0/Hz	$V/(\mathrm{m \cdot s^{-1}})$	L/m	T/s	ΔT/s	N	SNR/%
20	80	100	－5	0.2	10	10

이때 제안된 방법의 알고리듬을 리용하여 계산된 파라메터값은 f_0 =19.785Hz, V= 82.80m/s, L= 102.24m이다.

한편 몇가지 지표를 가지고 제안된 방법과 선행한 방법들을 비교한 결과는 표 2와 같다.

표 2. 제안된 방법과 선행한 방법들과의 비교

지표	측정값	수감부개수	계산시간/ms	특징
제안된 방법	도플러주파수	1	10	2차원비선형문제
선행한 방법[3]	도플러주파수	1	12	주파수측정시각을 예측하고 2차원비선형문제풀기
선행한 방법[2]	도달시간차	3	35	3차원비선형문제풀기
선행한 방법[4]	에네르기	4	47	4차원비선형문제풀기

여기서 계산시간은 Pentium 4 CPU 2.8GHZ, RAM 512M, 하드 80GB의 콤퓨터로 이동파라메터를 한번 계산하는데 걸리는 시간이다.

표들로부터 제안된 방법이 선행한 방법들에 비하여 적은 개수의 수감부를 쓰면서도 계산시간을 훨씬 단축할수 있다는것을 알수 있다.

맺 는 말

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

모의결과로부터 제안된 방법이 선행한 방법들에 비하여 계산정확도가 높고 파라메터추정연산속도가 빠른것으로 하여 음원의 이동파라메터추정에 효과적이라는것을 알수 있다.

참 고 문 헌

[1] 오용범; 최량화방법, **김일성**종합대학출판사, 195～199, 주체98(2009).

[2] Tao Wang et al.; Motive Parameters Estimation Using Narrow-band Passive Acoustical Measurements, University of Electronic Science and Technology of China, 662～666, 2005.

[3] D. Ampeliotis et al.; Signal Processing, 90, 1300, 2010.

[4] 王昭; 一种基于瞬时频率估计的被动声学测距方法, 西北工业大声学工程研究所, 10～17, 2000.

주체104(2015)년 5월 5일 원고접수

A Method of Passive Distance Estimation by using Instantaneous Frequency Measurements

Ri Kang Jin, Om Chol Nam

We proposed a method how to estimate the moving parameters of the acoustic source by using instantaneous frequency measurements when it was flying to one sensor.

Key words: moving parameter, instantaneous frequency