

Correlated Noise와 수신센서 배열 특성에 따른 Multitone Matched Field Processing

박정수(*), 나영남, 정문섭, 최진혁
국방과학연구소

Multitone Matched Field Processing in Correlated Noise Conditions and Receiving Array Characteristics

Joung Soo Park, Young Nam Na, Mun Sub Jung, Jin Hyuk Choi
Agency for Defense Development
joungsoo@sunam.kreonet.re.kr

요약

본 논문에서는 전해 환경에서 multitone MFP를 하기 위한 다양한 시뮬레이션을 수행하고 여러 관점에서 multitone MFP의 성능을 분석하였다.

I. 서론

Matched Field Processing(MFP)은 해양 도파관에서 신호가 전달되는 음장을 적용하여 일반화된 역문제를 풀기 위한 배열 신호처리 알고리즘이다. MFP는 도파관내의 공간적 음장 특징을 이용하여 음원의 방위, 거리, 수심의 3차원 위치를 추정하고, 수층의 특성과 퇴적물 구조 등의 환경 파라메타를 추정하기 위하여 천해에서 Matched Field Tomography (MFT)로의 응용이 활발히 연구되고 있다[1].

기본적으로 MFP는 평면파 빔형성 기법을 일반화시킨 형태로서, 대부분의 고전적 빔형성 기법은 적절한 신호전달 모델이 없어서 균질한 매질내의 평면파와 신호의 위상과 weighting을 이용하여 matching과 조향을 하지만 MFP는 배열에서 측정된 음장과 예상되는 모든 음원의 위치에 대하여 정교한 신호전달모델 결과(replica)를 적용하여 matching함으로써 추정 성능이 크게 향상된다. 층상화된 해양 도파관에서의 replica는 평면파가 아니고 완전한 파동방정식의 해로 표현된다. 그러므로 이러한 상황을 모두 고려하는 MFP는 소음이 음원 신호에 포함되어 있을 때 소음의 전달까지 고려해야 함으로써 더욱 복잡해진다. 따라서 음원 위치 추정 문제는 MFP를 이용하여 상관된 소음으로부터 음원정보를 포함하고 있는 신호를 추출하는 parameter estimation

problem라고 할 수 있다. 기본적으로 예상 도파관내에 수많은 forward 해를 만들고, 어떤 해가 소음을 포함하는 관측신호와 가장 잘 일치하는지를 검색함으로써 역문제를 푼다[1].

본 논문에서는 전해 환경을 가정하고 다양한 MFP 시뮬레이션을 수행하여 다음과 같은 관점에서 MFP 성능을 분석하였다. 1)multitone MFP를 위한 수직 선배열센서의 설계파라메타를 찾기 위하여 각 수신기 배열구조에 따른 S/N변화 및 MFP 성능 분석, 2)MFP의 적용성을 판단하기 위하여 배열의 각 수신기 사이의 상관된 소음이 MFP 성능에 미치는 영향 분석, 3)음원 추정 성능을 향상시키기 위하여 광대역 음원을 적용하기 위한 전 단계로서 multitone 음원을 고려한 MFP 성능 분석 등을 수행하였다.

II. Matched Field Processing

MFP는 해양의 음파전달 모델링 기술과 더불어 발전하였다. 1973년 Hinich[2]가 최초로 mode amplitude와 수직 선배열을 이용하여 maximum likelihood equation에 의한 음원의 위치 추정을 시도한 이후에 많은 연구가 진행되어왔다.

현재 적용되고 있는 형태의 MFP는 1976년에 Bucker[3]가 최초로 제안 하였다. 그는 음원의 불안정성 영향을 줄이기 위하여 quadratic 탐지기를 적용하였고, 완전한 음파전달 모델과 ambiguity surface를 도입하여 음원의 위치를 추정하였다. 1985년 Fizeil과 Wallis[4]는 Capon's Minimum Variance, distortionless Filter(MVDF, Maximum Likelihood Method이라고도 함)을 최초로 제안하였

다. MVDF는 부엽 감소효과가 탁월하고, mismatch에 보다 둔감한 adaptive 기법으로서, 현재 가장 널리 이용되고 있다. 1988년에는 Baggeroer등[5]이 geometric averaging에 의한 incoherent broadband MFP를, 1990년에는 Tolstoy[6]가 coherent broadband MFP를 제안하였다.

II-1. 해양환경에서의 신호전달

해양환경에서 배열에 수신되는 음원의 신호는 주변의 소음과 결합되어 수신된다. 해양에 존재하는 소음을 크게 3가지로 분류할 수 있다. 1) 백색소음-센서 차체소음으로 서로 상관되어 있지 않고, covariance matrix는 K_w 이다. 2) 분포소음-수면에서 생성되며 서로 상관되어 있고 covariance matrix는 K_s 이다. 3) 이산소음-개별 소음원으로 서로 상관되어 있고 covariance matrix는 K_d 이다. 소음의 총 covariance matrix(K_n)는 $K_n = K_w + K_s + K_d$ 이다. 따라서 신호와 소음이 결합된 총 covariance matrix(K)는 $K = K_n + K_s$ 와 같이 표현할 수 있다.

본 논문에서는 소음의 covariance matrix(K_n)를 $K_n \approx K_s$ 로 가정하고, K_s 를 식 (1)과 같이 백색소음과 개별 음원으로 사용하는 이산소음을 무시하고 수신센서간에 서로 상관된 형태가 되도록 식 (1)과 같이 모델링하고 시뮬레이션에 적용하였다.

$$K_c = \sigma^2 \exp(-\beta|i-j|) \quad (1)$$

윗식에서 i 와 j 는 배열의 수신기 번호이다.

II-2. Multitone MFP 알고리즘

본 논문에서 적용한 MFP 기법은 ambiguity surface의 부엽준위를 낮추기 위하여 stationary multitone 음원과 incoherent arithmetic mean을 적용하였다. 단일 주파수의 MFP 출력은 음원의 위치에서 최고 상관값을 갖는다. 그러나 부엽의 위치는 주파수에 따라 변하게 되므로, 여러 개의 주파수를 결합하게 되면 부엽이 낮아지게 된다. 주파수를 결합하는 기법은 다양하지만 incoherent 처리가 비교적 효과적인 것으로 알려져 있다[7].

전형 MFP 기법은 직접 matching 기법을 사용한다. 기본적으로 Bucker에 의하여 제한된 알고리즘을 기초로 하며 Bartlett 알고리즘이라고도 하며 다음과 같은 quadratic 형태로 나타낼 수 있다.

$$B_C(r, z) = W^*(r, z) K W(r, z) \quad (2)$$

여기서 $B_C(r, z)$ 는 Bartlett MFP 출력, $W(r, z)$ 는 replica에 의한 wighting vector, *는 conjugate transpose이다. 식 (2)를 multitone의 형태로 나타내면 다음과 같다. (3)

$$B_C(f, r, z) = \frac{1}{M} \sum_f W(f, r, z) K(f, r, z) W(f, r, z)$$

식 (3)은 각각의 주파수에 대한 ambiguity surface의 incoherent arithmetic mean을 의미한다.

MVDF는 더욱 견실한 적응 배열처리 알고리즘으로서 출력의 분산을 최소화하고 왜곡되지 않는 constraint를 제공하며 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$B_{MV}(r, z) = [W^*(r, z) K^{-1} W(r, z)]^{-1} \quad (4)$$

여기서 $B_{MV}(r, z)$ 는 MVDF MFP 출력이다. 식 (4)를 multitone의 형태로 나타내면 다음과 같다.

$$B_{MV}(f, r, z) = \frac{1}{M} \sum_f [W^*(f, r, z) K(f)^{-1} W(f, r, z)]^{-1} \quad (5)$$

III. Multitone MFP 시뮬레이션

III-1. 수직 선배열의 배열구조 영향

본 논문에서 수직 선배열센서의 설계파라메타를 갖기 위하여 각 수신기 배열구조에 따른 S/N변화 및 MFP 성능 분석을 수행하였다. 먼저 수신 200m가 안되는 천해에서 사용하는데 적합한 45m의 길이로 갖는 수신센서 배열을 1oct. 간격의 multitone 주파수인 150, 300, 600Hz에 대하여 표 1과 같은 3가지 형태로 제안하였다.

표 1. Multitone MFP를 위한 천해용 수직 선배열

주파수(Hz)	배열센서	배열 1	배열 2	배열 3
150	간격	5	5	5
	수	10	10	10
	이득(dB)	10	10	10
300	간격	2.5	5	2.5
	수	19	10	11
	이득(dB)	12.8	10	10.4
600	간격	1.25	5	1.25
	수	37	10	11
	이득(dB)	15.7	10	10.4

배열 1은 모든 주파수에 대하여 반파장을 만족하도록 설계된 nested array이며 총 37개의 수신센서가 필요하다. 배열 2는 주변소음이 높아 S/N비가 다른 주파수인 150Hz에 대해서 반파장 간격을 유지하고 300Hz와 600Hz는 150Hz의 배열을 이용하며 수신센서는 모두 10개이다. 배열 3은 모든 주파수에 대하여 반파장을 만족하여 10~11개씩의 수신센서를 배열하면 모두 20개의 수신센서가 필요하다.

해역수심 100m, S/N을 배열 1기준 각각 0dB, 음원수심 20m, 음원거리를 15000m로 가정하고 식 (3)을 사용하여 시뮬레이션을 수행하였다. $W(r, z)$ 를 계산하기 위하여 Collins의 Ram 모델을 이용하였다. 표 2는 ambiguity surface의 spreading factor(SF)와 S/N을 계산한 것이다.

표 2. 배열 구조에 따른 MFP 성능

주파수(Hz)	MFP 성능	배열 1	배열 2	배열 3
150	S/N (dB)	0	0	0
	SF	2.1e+9	2.1e+9	2.1e+9
300	S/N (dB)	0	≈0	≈0
	SF	3.0e+9	3.4e+9	4.1e+9
600	S/N (dB)	0	-3.4	-11.9
	SF	2.2e+9	3.6e+9	4.8e+9

배열2와 배열 3은 주파수 600Hz일 때 S/N이 낮아진다. 주파수별 SF는 배열 1이 가장 작고 배열 3이 가장 크고, 총 SF도 배열 1이 2.4e+9, 배열 2가 2.7e+9, 그리고 배열 3이 6.9e+9로서 배열 3이 가장 크다. 따라서 배열 1과 배열 2가 multitone MFP를 위한 전례용 배열로서 적절하며, 배열 3은 부적절한 것으로 판단된다. 그러나 신호전송, 신호처리, 신호 녹음등을 고려할 때 어느 정도의 성능을 유지하는 배열 2의 효율성과 운용성이 높다고 할 수 있다.

III-2. 상관된 소음의 영향

수신센서에 서로 상관된 분포소음이 작용할 때 S/N 0, -15, -30dB별로 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 1과 그림 2는 S/N별 MFP출력을 정규화 하여 표시한 것이다. S/N이 0dB와 -15dB일 때 양호한 음원탐지가 가능하며, S/N이 -30dB일 때를 ambiguity surface의 부엽이 크게 증가하여 음원위치 추정이 불가능하다.

III-3. Multitone MFP

배열 구조는 III-1의 결과에 따라 배열 2를 적용하여 주파수 150,300,600Hz의 주파수별 MFP출력과 multitone MFP 결과를 분석하였다. 표 3은 S/N별로 SF계산 결과를 나타냈고, 그림 3과 그림 4는 주파수별 MFP 출력이다. SF는 주파수가 150Hz일 때 가장 작고 600Hz일 때 가장 크다. Multitone일 때는 300Hz와 600Hz일 때보다 작지만 150Hz일 때보다 크다. 이러한 현상은 그림 3과 그림 4에서도 확인할 수 있다. Multitone의 각 주파수는 음원의 위치에서 최고 상관을 갖지만 강한 부엽의 위치는 주파수에 따라 변하게 되므로 여러 개의 주파수를 결합하게 되면 강한 부엽이 낮아진다. Multitone의 평균적인 부엽은 incoherent arithmetic mean의 영

표3. 단일 주파수와 multitone MFP의 S/N별 SF

MFP 주파수 (Hz) \ S/N (dB)	0	-15	-30
150	2.1e+9	5.1e+9	6.7e+9
300	3.4e+9	5.5e+9	6.5e+9
600	3.3e+9	6.3e+9	8.4e+9
multitone	2.6e+9	5.8e+9	7.8e+9

향으로 부엽이 가장 작은 주파수보다는 높게 나타난다. 따라서 multitone MFP를 적용할 경우 강한 부엽이 현저히 감소하여 음원위치 추정 오류가 감소하게 된다.

IV. 결론

본 논문에서는 천해 환경에서 multitone MFP를 하기 위한 다양한 시뮬레이션을 수행하고 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다. 1) Multitone MFP를 위한 수직 선배열에서 배열구조는 운용성과 효율성을 고려할 때 제안한 배열 2와 같은 단순배열이 적합한 것으로 보인다. 2) 수신센서간에 상관된 소음이 존재할 경우에 S/N이 -15dB 이하까지도 음원 위치 추정이 가능하다. 3) Multitone MFP는 S/N이 낮아도 ambiguity surface의 강한 부엽을 감소시켜 정확한 음원위치 추정이 가능하다. 따라서 이러한 결과는 대부분의 실제 음원의 특성인 broadband에 대하여 MFP가 효율적일 수 있다는 가능성을 보여준다.

추후에 실제 관측신호를 대상으로 multitone MFP를 수행할 예정이며, nonstationary multitone 음원에 대한 MFP 기법 연구도 계속될 예정이다.

V. 참고문헌

1. A. Tolstoy, *Matched Field Processing for Underwater Acoustics*, World Scientific, 1993.
2. M.J. Hinich, "Maximum likelihood signal processing for a vertical array," *J. Acous. Soc. AM.*, 54(2), 499-503, 1973.
3. H.P. Bucker, "Use of calculated sound fields and matched field detection to locate sound sources in shallow water," *J. Acous. Soc. AM.*, 59(2), 368-373, 1976.
4. R.G. Fizzell and S.C. Wales, "Source localization in range and depth in an Arctic environment," *J. Acous. Soc. AM.*, 78, s57, 1986.
5. A.B. Baggeroer, W.A. Kuperman, and H. Schmidt, "Matched field processing: Source localization in correlated noise as an optimum parameter estimation problem," *J. Acous. Soc. AM.*, 83(2), 571-584, 1988.
6. A. Tolstoy, "Computational aspects of matched field processing by an overlap correlator," in *Computational Acoustics*, Vol. 3, ed. D. Lee, A. Cakmak, Elsevier, 1990.
7. M.B. Porter, "Source tracking in the Hardson Canyon Experiment," *J. Acous. Soc. AM.*, 95(5), 2981.

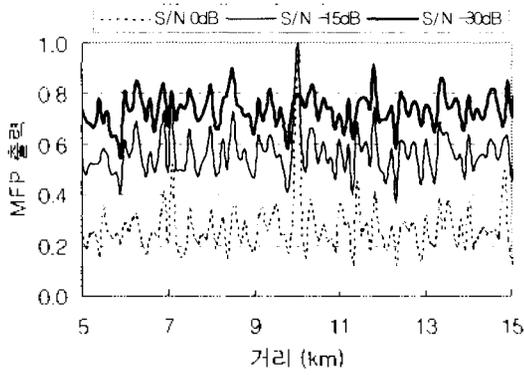


그림 1. 배열 2의 S/N별 MFP출력

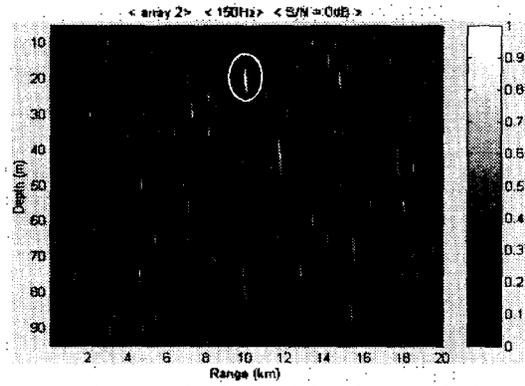


그림 4(a). 150Hz 단일주파수 MFP출력

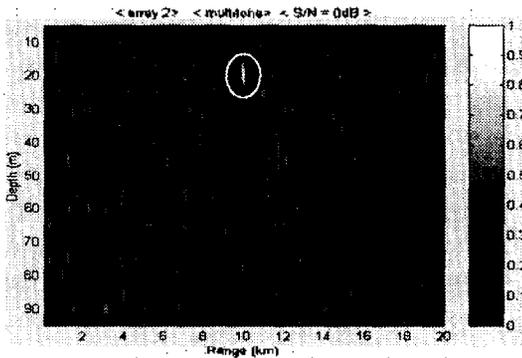


그림 2(a). 배열 2의 S/N 0dB일때 MFP출력

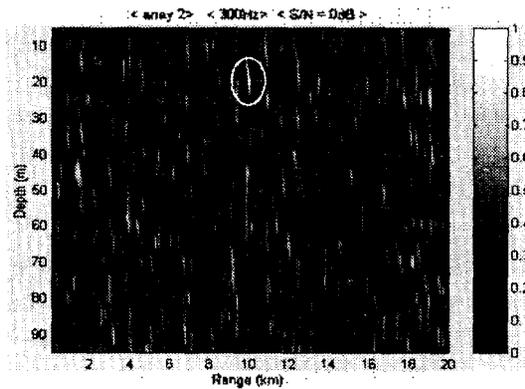


그림 4(b). 300Hz 단일주파수 MFP출력

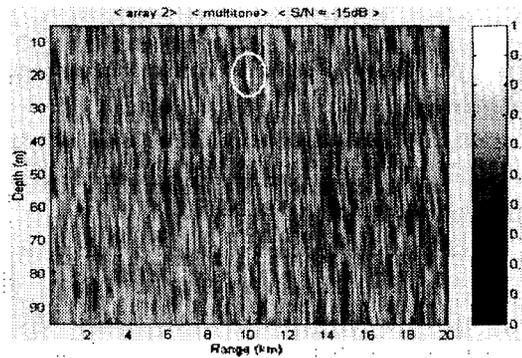


그림 2(b). 배열 2의 S/N -15dB일때 MFP출력

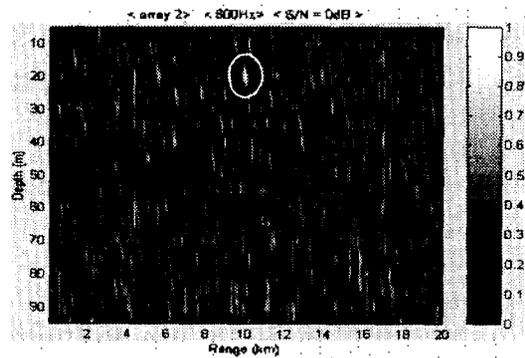


그림 4(c). 600Hz 단일주파수 MFP출력

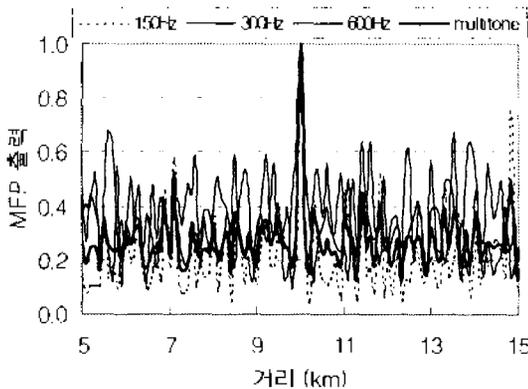


그림 3. 단일 주파수와 multitone MFP출력

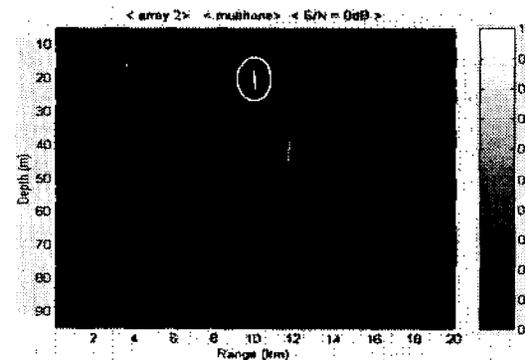


그림 4(d). multitone MFP출력