능동소나에서 Range-Doppler Map을 이용한 표적상태추정

허 울 회[1)], 金 載 洙[2)]

Target State Estimation based on R-D Map in Active Sonar

Uhl-Hoe Huh , Jea-Soo Kim

Abstract

Active sonar systems are not only used in the detection of targets but also target state analysis and classification of targets. In this thesis, an algorithm based on R-D Map of single ping is developed to analyze the state of moving targets in 3-D ocean environment, and verified through the simulation. Since the amount of doppler shift is related to the spatial location of highlight position and the speed of the target, a nonlinear inversion problem is formed to determine the state of target such of the aspect angle, velocity. The inversion methods are found to be successful for the target state analysis.

1) 한국해양대학교 해양공학과 석사과정 수중음향전공
2) 한국해양대학교 조선해양공학부 교수

1. 서 론

표적의 고속화, 저표적강도 추세에 따라 수중의 자항체는 능동소나에 대한 반사음과 자체소음(self-noise)을 감소시킬 수 있게 되어 표적탐지 및 표적상태 분석에 있어서 신속성과 정밀성이 더욱 더 요구되고 있다. 또한 정확한 표적상태추정에 있어서 주변소음과 같은 주위환경에 의해서도 영향을 미치는 데 이러한 요인들을 고려해서 본 연구에서는 3차원 수중환경에서 움직이는 표적의 정확한 상태추정 알고리듬의 개발에 목적이 있다. 신속한 표적상태추정을 위해서는 수신신호에 대한 효율적인 신호분석 뿐만 아니라 적은 양의 수신신호를 가지고도 표적상태를 추정할 수 있는 알고리듬이 필요한데 이러한 필요성을 위해 R-D Map(Range-Doppler Map)을 이용한 표적상태 추정기법이 고려될 수 있다.

표적상태추정 알고리듬을 개발하고 검증하기 위한 신호로 표적신호의 진폭, 표적강도의 분포 및 방향성, 도플러에 의한 주파수의 변화, 펄스신장, 채널간 시간지연 및 신호의 간섭현상 등 표적에 대한 물리적인 현상이 잘 묘사된 능동표적 합성신호를 기존의 MOST프로그램을 이용하여 발생시켰다[1-4].

주변소음이 첨가된 표적신호로부터 표적의 속도, 자세각, 방위각 등을 입수하는 일련의 과정을 표적상태추정이라 한다. 수신된 신호를 이용하여 표적에 대한 정보를 얻어내는 표적상태 추정기법 중, 대표적인 방법으로 단일핑(monopulse)에 의한 방법과 연속핑에 의한 방법이 있으나 결국은 단일핑에 의한 방법론에 기반을 두기 때문에 본 논문에서는 단일핑에 의한 방법에 국한하기로 하였다. 단일 핑에 근거한 표적상태 추정방법은 R-B Map(Range-Bearing Map)을 이용하는 방법, R-D Map을 이용하는 방법으로 구분될 수 있다. R-B Map에 의한 방법은 정지한 표적 또는 움직이는 표적 모두에 적용할 수 있는 반면, R-D Map은 소나 또는 표적이 움직이는 경우에만 적용할 수 있다. R-B Map을 이용하는 방법은 위상 모노펄스(phase monopulse)방법과 진폭 모노펄스(amplitude monopulse)방법으로 나눌 수 있다[5-6].

본 연구에서는 비선형 역산법을 사용하여 R-D Map으로부터 표적상태를 추정하였다. R-B Map에서는 표적상태추정을 위해 다중 채널이 필요한 반면에, R-D Map에서는 한 개의 채널로써 표적상태를 추정함으로써 신호 데이터의 양을 줄일 수 있고 신속한 표적상태추정을 가능하게 한다[9-16]. 그러나 R-D Map에 의한 방법에서는 음원의 진행방향이 대해 대칭으로 존재하는 표적에 대하여 유일한 해를 제공하지 못하는 단점이 있기 때문에 위상 모노펄스방법을 이용하여 표적상태 추정값 중 표적의 방위각을 구해야 한다. 따라서 R-D Map을 이용하는 방법은 R-B Map방법과 상호보완적으로 사용해야 완전한 표적상태값을 구할 수 있다. R-D Map에 의한 방법은 표적신호로부터 시간창(Time Window)를 통해 R-D Map을 구하는 부분과 R-D Map으로부터 표적상태값을 역산하는 부분으로 구분할 수 있다.

수신신호로부터 R-D Map을 작성할 때 주파수분석을 수행해야 하는 데, R-D Map으로부터 표적상태값을 역산하기 위해서는 비교적 고해상도 주파수 분석이 필요하나, 실제 표적신호는 표적상태추정을 만족할 만큼 긴 시간을 가지지 못하기 때문에 주파수 분석할 때, 임의로 표적신호를 연장하는 것이 필요하다. 이러한 방법으로 zero padding을 사용하나, zero padding을 하여도 주파수의 해상도가 높아지는 것은 아니고 단지 주파수 간격을 보간하는 효과를 나타낼 뿐이다. 따라서 R-D Map에 의한 방법은 표적신호의 지속시간에 의해 표적상태 분석에 대한 가능성이 좌우되고 표적의 자세각에 의해서도 큰 영향을 받음을 알 수 있다[7-8].

R-D Map으로부터 표적상태값을 역산하기 위한 비선형 역산이론으로 Levenberg-Marquardt 방법을 적용하였다. 비선형 역산이론은 표적의 자세각과 속도에 따라 각기 다른 R-D Map을 가지고, 또한 하나의 표적의 각각의 거리에 따른 단위표적의 도플러 주파수의 변화도 선형이 아니라 비선형으로 변하는 특성을 이용한다. 비선형 역산의 문제점은 임의의 초기값을 대입했을 때 이 주어진 초기값에 따라서 표적상태값인 Global Minimum으로 수렴하는 경우도 있고, 표적상태값으로 오인하게 하는 Local Minimum으로 수렴하기도 한다는 것이다. 따라

서 Global Minimum으로 수렴하기 위해서는 여러 가지의 초기값을 대입하여 구해진 수렴값들을 비교하여 올바른 표적상태값을 선택하여야 한다. 또 다른 방법으로 변수반복에 의한 역산법을 들 수 있다. 이 방법은 각 HL에서의 도플러 주파수함수에 표적의 방위각, 자세각과 속도를 변화시키면서 대입하여 구한 값이 R-D Map의 도플러 주파수와의 차이가 최소로 될 때의 표적상태값을 구하는 것이다. 계산시간은 비선형 역산에 비해 오래 걸리나 Local Minimum에 수렴하는 위험성은 방지할 수 있다.

2. 수신신호의 발생

표적신호의 발생은 기존의 MOST(MOving Spread Target signal simulation)프로그램을 이용하였다. 공간상의 표적은 무한소의 점으로 반사체가 될 수 없지만 인위적으로 표적강도를 두어 반사체로 간주하는 단위표적(HL)을 도입하였다. 이렇게 하여 가정된 하나의 HL에 반사되어 돌아오는 신호는 송신신호와 크기만 다를 뿐 모양은 동일하다. HL모델은, 일반적으로 송신신호 $s(t)$가 주어지면, 수신신호 $r(t)$는 다음과 같이 시스템의 충격응답(impulse response) $h(t)$와의 콘볼루션에 의해 표현되는 것에 기반을 두고 있다.

$$r(t) = \sum_{i=1}^{N} s_{d,i}(t) \otimes h_i(t) \tag{2.1}$$

이를 주파수영역에서 표현하면 곱셈이 된다. 즉,

$$R(\omega) = \sum_{i=1}^{N} S_{d,i}(\omega) \cdot H_i(\omega) \tag{2.2}$$

여기에서 $H(\omega)$는 표적의 산란현상을 표현하는 주파수영역에서의 전달함수가 된다. 이론적으로, 산란체의 충격응답이 주어진다면 산란신호는 윗식에 의하여 완전하게 표현될 수 있다.

3. R-D Map

R-D Map으로부터 표적상태추정을 하기 위해서는 수신신호로부터 각 거리에

대한 도플러 주파수를 작성하여야 하는데, 비교적 고해상도 주파수 분석이 필요하다. 주파수 간격은 주파수분석할 신호의 총시간에 반비례한다. 식3.1은 FFT 분석의 해상도를 결정하는 인자에 대해서 설명하고 있다.

$$\begin{aligned} &\text{표본화 간격} && \Delta t = 1/f_s \\ &\text{기록 시간} && \mathrm{T} = N\Delta t = N/f_s \\ &\text{주파수 해상도} && \Delta f = 1/\mathrm{T} = \mathrm{f_s/N} \end{aligned} \tag{3.1}$$

결과적으로, 해상도 Δf를 감소시키는 방법은 다음의 두 가지 방법이 있다.

(1) 샘플링 주파수 f_s 를 감소시킨다.

(2) 데이터의 개수 N 을 증가시킨다.

결국 위의 두가지 방법은 기록시간을 증가시키는 것이나, 실제 표적신호는 표적상태추정을 만족할 만큼 긴 시간을 가지지 못하기 때문에 주파수 분석할 때 임의로 표적신호를 연장시키는 것이 필요하다. 이러한 방법으로 본 논문에서는 zero padding을 이용하였다. 그러나 zero padding을 하여도 주파수의 해상도가 높아지는 것은 아니고 단지 주파수 간격을 보간하는 효과를 나타낼 뿐이다.

R-D Map을 구하는 알고리듬에서 처음으로 수행되는 것은 수신기에 입력된 표적신호를 시간창(Time window)을 씌워서 도플러주파수를 구하는 것이다. 그러나, 표적신호의 에너지가 큰 부근에서의 도플러주파수는 비교적 정확한 값을 가지나 표적신호의 에너지가 작은 부근의 도플러주파수는 진동을 하면서 왜곡되는 즉, 신뢰할 수 없는 값을 가지기 때문에 올바른 R-D Map을 구하기 위해서는 기준값 γ(threshold)를 정해서 도플러신호가 기준값보다 작다면 무시하고 기준값 이상인 도플러신호를 가지고 R-D Map을 작성하는 것이 더 합리적인 방법이라 판단된다. 본 논문에서는 기준값을 식3.2의 실효값으로 선택하였다.

$$\gamma = f_{d,rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} f_{d,i}^2} \tag{3.2}$$

$$\begin{aligned} &f_{d,i} < \gamma, \quad i = 1, N && : \text{invalid} \\ &f_{d,i} \geq \gamma, \quad i = 1, N && : \text{valid} \end{aligned} \tag{3.3}$$

여기에서 $f_{d,i}$는 i번째 윈도우에서의 도플러주파수를 의미하고 N은 윈도우 개수를 나타낸다. 이와같이 기준값보다 큰 도플러주파수를 가지고 최소자승법을 이

용하여 이 데이터점들을 가장 가깝게 통과하는 2차 곡선을 근사한다.

4. 역산이론

Levenberg-Marquardt Method를 사용하여 측정된 N개의 데이터(x_j, y_j)와 M개의 미지변수 $\boldsymbol{a}$를 가지고 비선형 회귀모델로 표현하면

$$y_j = f(x_j\,;\boldsymbol{a}^*) + \varepsilon_j \qquad (j=1,2,\ldots,N) \tag{4.1}$$

따라서 χ^2 merit 함수는 식4.2와 같다.

$$\chi^2(\boldsymbol{a}) \;=\; \sum_{j=1}^{N}[\,y_j - f(x_j : \boldsymbol{a})]^2 \tag{4.2}$$

현재점 $\boldsymbol{a}_0$ 부근에서 χ^2 merit 함수를 테일러 시리즈에 의해 전개하고 3차항 이상을 무시하면 다음 식을 얻는다.

$$\begin{aligned}\chi^2(\boldsymbol{a}) &= \chi^2(\boldsymbol{a}_0) + (\boldsymbol{a} - \boldsymbol{a}_0)\nabla\chi^2(\boldsymbol{a}_0) + \\ &\quad \frac{1}{2}(\boldsymbol{a} - \boldsymbol{a}_0)\cdot\mathbf{A}\cdot(\boldsymbol{a} - \boldsymbol{a}_0) + \cdots \\ &\approx c - \mathbf{b}\cdot\boldsymbol{a} + \frac{1}{2}\boldsymbol{a}\cdot\mathbf{A}\cdot\boldsymbol{a}\end{aligned} \tag{4.3}$$

여기에서

$$c = \chi^2(\boldsymbol{a}_0), \qquad \mathbf{b} = -\nabla\chi^2\,|_{\,\boldsymbol{a}_0},$$

$$[\,\mathbf{A}]_{ij} \equiv \left.\frac{\partial^2\chi^2}{\partial a_i \partial a_j}\right|_{\boldsymbol{a}_0} \tag{4.4}$$

근사식 (4.3)으로부터, χ^2에 대한 기울기는 다음과 같이 쉽게 계산되어 진다.

$$\nabla\chi^2 = \mathbf{A}\cdot\boldsymbol{a} - \mathbf{b} \tag{4.5}$$

윗식에서, 현재점 $\boldsymbol{a}_0$로부터 다음 반복점을 결정하기 위해 $\nabla\chi^2 = 0$으로 두면,

$$\boldsymbol{a}_{next} = \boldsymbol{a}_{cur} + \mathbf{A}^{-1}\cdot[-\nabla\chi^2(\boldsymbol{a}_{cur})] \tag{4.6}$$

여기에서 $\boldsymbol{a}_{next}$는 다음 단계의 변수추정값이고 $\boldsymbol{a}_{cur}$는 현재의 변수추정값이다. 식4.6을 선형방정식의 형태로 다시 표현하면,

$$\sum_{l=1}^{M} \alpha_{kl}\, \delta a_l = \beta_k, \qquad k = 1, \ldots, M \tag{4.7}$$

여기에서,

$$\delta a = a_{next} - a_{cur} \qquad \alpha_{kl} \equiv \frac{1}{2}\frac{\partial^2 \chi^2}{\partial a_k \partial a_l} \qquad \beta_k \equiv -\frac{1}{2}\frac{\partial \chi^2}{\partial a_k} \tag{4.8}$$

Levenberg-Marqurdt 방법에서는 Hessian 행렬 α_{kl}이 특이해가 되는 것을 막기 위해 무차원 인자 λ를 도입하여 다음과 같이 변형되었다.

$$\sum_{l=1}^{M} \alpha'_{kl}\, \delta a_l = \beta_k \tag{4.9}$$

$$\begin{aligned} \alpha'_{jj} &\equiv \alpha_{jj}(1+\lambda) \\ \alpha'_{jk} &\equiv \alpha_{jk} \qquad (j \neq k) \end{aligned} \tag{4.10}$$

해가 수렴될 때까지 λ를 변화시키면서 다음의 과정을 반복한다.

* Levenberg-Marquardt방법의 알고리듬

1단계 : $\chi^2(\mathbf{a})$ 를 계산한다.

2단계 : λ = 0.001로 선택한다.

3단계 : 선형방정식 $\sum_{l=1}^{M} \alpha'_{kl}\, \delta a_l = \beta_k$ 를 $\delta\mathbf{a}$에 대해서 풀고 $\chi^2(\mathbf{a}+\delta\mathbf{a})$를 전개 한다.

4단계 : $\chi^2(\mathbf{a}+\delta\mathbf{a}) \geq \chi^2(\mathbf{a})$ 이면 λ에 10을 곱하고 3단계로 돌아간다.

5단계 : $\chi^2(\mathbf{a}+\delta\mathbf{a}) \leq \chi^2(\mathbf{a})$ 이면 λ를 10으로 나누고, $a_{next} = a_{cur} + \delta a$로 갱신하고 3단계로 되돌아간다.

5. R-D Map에서의 표적상태추정

비선형 역문제에서 표적상태변수를 구하는 방법으로 4장의 L-M(Levenberg-Marquardt)방법을 사용하여 표적상태변수를 역추정하였다. R-D Map으로부터 추정된 N개의 데이터(r_i, y_i)와 M개의 미지변수 a를 가지고 비선형 회귀모델로 표현하면

# of HL	Case 1		Case2		Case3	
	Range	Normalized Frequency	Range	Normalized Frequency	Range	Normalized Frequency
1	169.0	1.00709	182.0	1.00861	186.0	1.00952
2	171.9	1.00713	184.3	1.00860	187.8	1.00950
3	174.8	1.00717	186.6	1.00858	189.7	1.00948
4	177.8	1.00720	188.9	1.00856	191.6	1.00946
5	180.7	1.00724	191.2	1.00854	193.4	1.00944
6	183.6	1.00727	193.5	1.00852	195.3	1.00943
7	186.6	1.00730	195.8	1.00850	197.2	1.00941
8	189.5	1.00732	198.1	1.00848	199.0	1.00939
9	192.4	1.00735	200.4	1.00845	200.9	1.00937
10	195.4	1.00737	202.7	1.00843	202.8	1.00935
11	198.3	1.00739	205.0	1.00840	204.6	1.00933
12	201.2	1.00741	207.3	1.00837	206.5	1.00931
13	204.2	1.00742	209.6	1.00834	208.4	1.00929
14	207.1	1.00743	211.9	1.00831	210.2	1.00927
15	210.0	1.00744	214.2	1.00828	212.1	1.00925
16	213.0	1.00745	216.5	1.00825	214.0	1.00923
17	215.9	1.00746	218.8	1.00821	215.8	1.00921
18	218.8	1.00746	221.1	1.00818	217.7	1.00919
19	221.8	1.00746	223.4	1.00814	219.6	1.00916
20	224.7	1.00746	225.7	1.00811	221.4	1.00914
21	227.6	1.00745	228.0	1.00807	223.3	1.00912
22	230.6	1.00745	230.3	1.00803	225.2	1.00910
23	233.5	1.00744	232.6	1.00799	227.0	1.00908
24	236.4	1.00743	234.9	1.00795	228.9	1.00906
25	239.4	1.00741	237.2	1.00791	230.8	1.00903
26	242.3	1.00740	239.5	1.00786	232.6	1.00901
27	245.2	1.00738	241.8	1.00782	234.5	1.00899
28	248.2	1.00736	244.1	1.00777	236.4	1.00897
29	251.1	1.00733	246.4	1.00772	238.2	1.00894
30	254.0	1.00731	248.7	1.00767	240.1	1.00892

표 5.2 표적신호로부터 주파수분석에 의해 구한 R-D Map 데이터

$$y_j = f(r_j\,; \boldsymbol{a}^*) + \varepsilon_j \qquad (j=1,2,\ldots,n) \tag{5.1}$$

여기에서 y_j는 j번째 HL의 주파수천이 데이터를 나타내고, r_j는 음원에서 j번째 HL까지의 거리 데이터를, 그리고 $\boldsymbol{a}^*$는 1×M 벡터인 역추정하고자 하는 표적상태 값(표적의 방위각, 속도, 자세각)을 나타낸다. 따라서 식5.2의 $e^2(\boldsymbol{a})$가 최소가 될 때 또는 식5.3의 ERR가 최대가 될 때의 표적상태변수 $\boldsymbol{a}$를 구하면 된다.

$$e^2(\boldsymbol{a}) = \sum_{j=1}^{N}[\,y_j - f(r_j : \boldsymbol{a})]^2 \tag{5.2}$$

$$ERR = -10\log_{10}\left(\sum_{j=1}^{N}[y_j - f(r_j : \boldsymbol{a})]^2\right) \quad dB \tag{5.3}$$

L-M 방법을 사용하여 표5.1의 3개의 R-D Map신호로부터 표적상태를 역추정한 결과는 표5.2에 나타나 있다. 방위각은 위상단일과 방법을 사용하여 추정하였고 표적의 속도, 자세각은 L-M 방법을 사용하여 추정하였다.

방위각 : degree, 속도 : kts, 자세각 : degree

	실제표적상태			표적상태추정값		
	방위각	속도	자세각	방위각	속도	자세각
Case1	15	10	20	14.7	10.7	21.9
Case2	15	10	30	14.6	11.8	36.2
Case3	15	10	40	14.6	8.9	37.0

표 5.2 3가지 Case에 대한 표적상태추정값

6. 요약 및 결론

본 논문은 크게, 기존에 개발된 MOST를 이용하여 표적의 산란현상을 HL의 모델에 의해 합성한 능동표적신호를 발생시키는 부분과 표적신호로부터 R-D Map을 작성하여 비선형 역산이론에 의해 표적상태를 역추정하는 부분으로 나눌 수

있다.

능동표적 신호합성에서는 공간상의 표적을 HL의 집합으로 간주하여 송신신호와 산란체의 충격응답과의 콘볼루션에 의해 표적신호를 발생시켰고, 여기에 백색잡음을 첨가시켰다. MOST신호는 핑지속시간과 HL의 개수에 영향을 받는 데, 핑지속시간과 HL의 개수를 변화시켜서 신호를 발생시켰고 실측신호와 비교해서 이중 가장 유사한 표적신호를 선택하였다.

R-D Map을 이용하여 표적상태를 추정하기 위해서는 먼저 표적신호로부터 FFT를 통해 R-D Map을 작성하여야 한다. 본 논문에서의 문제점은 실측신호에서 구한 R-D Map은 곡선의 형태를 가지나, MOST신호에서 R-D Map을 작성하였을 때에는 각 거리에 대한 도플러 주파수가 진동하는 현상을 관찰할 수 있다. 이러한 이유 때문에, 비교적 정확한 값을 가지는 에너지가 큰 부근에서의 도플러 주파수들을 최소자승법으로 근사하여 R-D Map을 작성하였다.

R-D Map으로부터 표적의 속도, 자세각등을 역추정하는 표적상태추정에 비선형 역산이론이 이용되었다. L-M역산방법을 사용하여 3가지 Case의 R-D Map에서 표적상태를 역추정하였는 데, 비교적 정확한 값을 얻었다. 실제표적상태와 역추정된 표적상태값과의 차이는 역산방법에서 발생한 것이 아니라, 표적신호로부터 R-D Map을 작성할때의 오차에 기인한다. 따라서 R-D Map에 의한 표적상태추정은 표적신호로부터 얼마나 정확한 R-D Map을 작성하는 가에 좌우된다.

일반적으로 표적상태 추정기법을 단독으로 사용하기 보다는 다른 방법과 함께 사용할 때, 훨씬 정확하고 신뢰할 수 있는 표적상태값을 얻을 수 있다. 이와같이 R-D Map의 방법도 단독으로 사용하기 보다는 R-B Map 방법과 상호보완적으로 사용할 때 역추정된 표적상태값의 신뢰성이 높아질 것이다.

참 고 문 헌

[1] 김재수, "능동소나에서 단일 핑에 의한 표적상태분석, "한국음향학회지, 15권 4호, pp.65-69, 1996.

[2] 김재수, 성낙진, 이상영, 김 강, 유명종, 조운현, "표적신호 시뮬레이션 요소로

서 원통형 몰수체의 충격응답의 특성," 한국음향학회지, 13권 2E호, pp.5-13, 1994.

[3] 성낙진, 김재수, 이상영, 김 강, "능동 표적신호 합성," 한국음향학회지, 13권 2호, pp.30-37, 1994.

[4] 이창호, 김재수, 이상영, 김 강, 오원천, 조윤현, "공분산 행렬 분석기법을 이용한 모노펄스 소나 표적상태추정 성능 향상 기법," 한국음향학회지, 15권 제1호, pp.34-39, 1996.

[5] Samuel. M. Sherman, "Monopulse principles and techniques", Artech House Inc., 1985

[6] A. I. Leonov, K. I. Formichev, "Monopulse radar", Artech House Inc., 1986

[7] Richard O. Nielsen, "Sonar signal processing", Artec House Inc., 1991

[8] E. Oran. Brigham, "The fast fourier transform and its application", Prectice-Hall Inc., 1088

[9] P, R. Bevington, "DATA Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences," New York McGraw-Hill, Chap. 11. 1969.

[10] W. H. Press, S.A. Teukolsky, W. T. Vetterling, B. P. Flannery, "Numerical Recipes in C," Cambridge Univ. Press, Chap. 15. 1992.

[11] J. S. Arora, "Introduction to Optimum design," Mcgraw-Hill, pp. 278-346, 1989.

[12] C. S. Beightler, D. T. Phillips, D. J. Wilde, "Foundations of Optimization," Prentice-Hall, pp.170-263, 1979.

[13] M. S. Bazaraa, C. M. Shetty, "Nonlinear Programming Theory and Algorithms," Wiley, pp.254-330, 1979.

[14] M. Avriel, "Nonlinear Programming Analysis and Methods," Prentice-Hall, pp.244-320, 1976.

[15] L. R. Lines, S Treitel, "A reriew of least-squares inversion and its application to geophysical problems", Geophysical Prospecting 32, pp. 159-186, 1984.

[16] A. Benhama, C. Cliet, M Dubesset, " Study and application of spatial directional filtering in three-component recordings", Geophysical Prospecting 36, pp. 591-613, 1988.