

**Multiport-Homodyne 측정 방법에 의한
광신호의 상대적 위상 변화에 대한 연구**

Measurement of the Relative Phase Fluctuation by
Multiport-Homodyne Detection Method

최준홍, 유영훈, 임동건
고려대학교 물리학과

Joon Hong Choi, Young Hun Yu, Dong Kun Lim
Department of physics, Korea university

Abstract

By self-homodyne method we have measured the relative phase fluctuation of a light wave. Balanced detection system can eliminate local oscillator excess noise and multiport detection makes it possible to measure the phase change of the signal beam. Deriving the SB(Signal Beam) and the LO(Local Oscillator) from the same laser source, we find the SB maintain constant phase relative to that of the LO.

We have introduced a phase fluctuation in the SB by modulating the beam path of the SB. The measured phase fluctuation agreed well with the predicted one, thereby we confirmed the reliability of our system.

I. 서론

Coherent Light를 이용한 Homodyne, Heterodyne 광신호 측정에서, 1983년 Yuen과 Chan등에 의해 광신호로부터 잡음을 양자역학적 한계까지 제거할수 있는 Balanced Mixer가 본격적으로 논의 되었다.(1-3) 그리고 이 이론을 확인하기 위해 광섬유(4,5)와 PZT,(6) AOM(7,8)등을 이용한 실험들이 활발히 전개 되었으며 Balanced Mixer를 이용한 광검출 시스템이 하나의 작은 소자로까지 설계되었다.(9) 그 결과 Balanced Mixer를 이용하면 하나의 광검출기를 이용할때보다 신호대 잡음비를 크게 향상시킬수 있으므로 LDV(10) 실험이나 천문학적인 관측(11)등에 이용되었으며, 나아가서는 현재 연구가 활발히 진행되고 있는 Squeezed States도 검출이 가능하다는 안이 제안되었다.(12-14) 한편 Balanced Mixer가 신호의 진폭 잡음만을 제거하여 신호 처리를 하는데 비해 광신호의 진폭 잡음을 제거하면서

위상과 진폭을 동시에 측정할수 있는 Multiport측정 방법이 Walker와 Carroll에 의해 소개되었다.(15,16) 이 방법은 두 개의 Balanced Mixer로 진폭의 잡음을 제거한 다음 이 두 Balanced mixer에서 나오는 신호가 측정상 최적 조건인 직각조건(quadrature condition)(12,17)이 되도록 조정하면 이 두 신호에 의해서 신호와 Local Oscillator(LO)의 상대적인 위상과 진폭의 변화를 측정할 수 있다.

본 연구에서는 Self-homodyne 방법으로 Multiport 실험 장치를 구성하여 광신호의 위상과 진폭을 동시에 측정하는 것이 목적이었다.

II. 이론

광신호는 진폭과 위상이 시간에 따라 계속 변하고 있다. 일반적인 Heterodyne 광실험에서는 Local Oscillator의 세기가 시간에 따라 변하는 것이 정밀 측정에 문제가 되고 있다. 이로 인한 잡음을 "excess noise" 혹은 "Local Oscillator noise" 라 하는데 이론적으로 Balanced Mixer를 이용하면 완전히 제거할 수 있다.

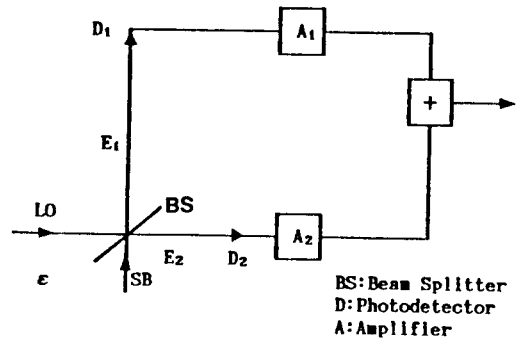


Fig.1 Basic diagram of Balanced Detector

(A) Balanced Detection

Fig.1은 Balanced Mixer의 개략적인 그림이다. LO의 전기장을 $L=L\exp[i(\omega_L t + \phi_L)]$ 이라 하고 SB의 전기장을 $S=S\exp[i(\omega_s t + \phi_s)]$ 이라 할때 광검출기 D_1, D_2 의 quantum efficiency를 η_1, η_2 라 하면 신호의 세기는 다음 식으로 표현된다(7).

$$I_1 = \eta_1 \epsilon \{ (1-\epsilon) |L|^2 + \epsilon |S|^2 + 2\epsilon(1-\epsilon) \}^{1/2} S \times \text{LCOS}[(\omega_L - \omega_s)t + \phi_L - \phi_s - \pi/2] / (h\omega)$$

$$I_2 = \eta_2 \epsilon \{ \epsilon |L|^2 + (1-\epsilon) |S|^2 + 2\epsilon(1-\epsilon) \}^{1/2} S \times \text{LCOS}[(\omega_L - \omega_s)t + \phi_L - \phi_s + \pi/2] / (h\omega)$$

한편 shot noise와 excess noise항만 고려한 검출 전류에서 잡음 성분 밀도(noise spectral power density)는 다음 식으로 표현된다(5,7).

$$N = 2eI_{dc}(t) + 2e\gamma(\omega)I_{dc}^2(t)$$

검출 신호 I_1, I_2 중 AC 성분만의 차이를 계산하면

$$(I_2 - I_1)_{AC} = 2eSL \{ \epsilon(1-\epsilon) \}^{1/2} (\eta_2 + \eta_1) \text{COS}[(\omega_L - \omega_s)t + \phi_L - \phi_s + \pi/2] / (h\omega)$$

가 되고 잡음항은

$$N = 2e(I_{1dc} + I_{2dc}) + 2e\gamma(I_{1dc} - I_{2dc})^2$$

으로 표현된다. 신호대 잡음의 비율은 SNDR(Signal power to Noise power spectral Density Ratio)이라 불리며 다음과 같이 정의되는데(7)

$$\text{SNDR} = \frac{(I_2 - I_1)_{AC}^2}{N} = \frac{(\epsilon/h\omega)^2 S^2 \epsilon (1-\epsilon) (\eta_1 + \eta_2)^2}{\epsilon \eta_1 + (1-\epsilon) \eta_2 + (\gamma\epsilon/h\omega) L^2 [\eta_1 \epsilon - \eta_2 (1-\epsilon)]^2}$$

이때 위 식에서 광검출기의 quantum efficiency가 $\eta_1 = \eta_2$ 이고 광분할기(Beam Splitter)의 투과율, $\epsilon = 1/2$ 이면 excess noise항인

$$(\gamma\epsilon/h\omega) L^2 [\eta_1 \epsilon - \eta_2 (1-\epsilon)]^2$$

은 없어지게 된다. 그래서 측정에서 가장 큰 잡음요소인 excess noise를 제거할 수 있다.

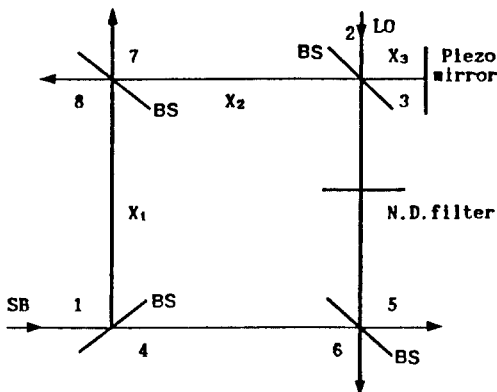


Fig.2 Multiport Detection System

(B) Multiport Detection

Fig.2는 Multiport Detection 실험 장치의 개략도이다. 그림에서 알 수 있듯이 두 개의 Balanced Mixer를 사용하여 두 신호를 측정상의 최적 조건인 직각조건(quadrature condition)이 되도록 한다. 먼저 carrier frequency를 도입하기 위해서 신호빔은 Fig.4에서 PMI를 거쳐 입사하게 되는데 이때 PMI는 진폭 β , 주파수 ω_m 으로 modulation 된다. 그러면 Signal Beam의 전기장은 $E_s = E_s \exp[i(\omega t + \beta \sin \omega t + \phi_s)]$ 가 되고 Local oscillator의 전기장은 $E_L = E_L \exp[i(\omega t + \phi_L)]$ 가 된다. 그러면 Balanced Detection을 거친 광검출기 6과 5의 신호의 세기 차이는

$$I_6 - I_5 = 2^{1/2} \eta_e E_s E_L \text{COS}(\Delta\phi + \Delta\psi - \beta \sin \omega t - \pi/2) / (h\omega) \quad (1)$$

(단, $\Delta\phi = \phi_L - \phi_s, \Delta\psi = \psi_1 - \psi_2 = kX_1 - kX_2$)

로 주어지고 마찬가지로 광검출기 8과 7의 신호 차이는

$$I_8 - I_7 = 2^{1/2} \eta_e E_s E_L \text{COS}(\Delta\phi - \Delta\psi - \beta \sin \omega t + \psi_3 - \pi/2) / (h\omega) \quad (2)$$

가 된다. 여기서 우린 모든 광검출기의 quantum efficiency가 η 로 같고 광분할기의 투과율과 반사율이 같다고 가정하였다. 식(1)과 (2) 사이에 직각조건을 만들어 주기 위해 Fig.2에서 Piezo mirror에 DC 전압을 가해 광거리 X_3 를 변화시켜 $-\Delta\psi + \psi_3$ ($\psi_3 = kX_3$)가 $\pi/2$ 가 되게하면 (2)식은 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$(I_8 - I_7) = 2^{1/2} \eta_e E_s E_L \text{SIN}(\Delta\phi + \Delta\psi - \beta \sin \omega t - \pi/2) / (h\omega) \quad (3)$$

식(1)과 (3)은 Bessel 함수로 전개할 수 있는데 그중 ω_m 주파수 성분만 고려하면

$$X_F = (I_6 - I_5)_F = 8^{1/2} \eta_e E_s E_L \text{SIN}(\alpha) J_1(\beta) \times \text{SIN} \omega_m t / (h\omega) \quad (4)$$

$$Y_F = (I_8 - I_7)_F = -8^{1/2} \eta_e E_s E_L \text{COS}(\alpha) J_1(\beta) \times \text{SIN} \omega_m t / (h\omega) \quad (5)$$

단, ($\alpha = \Delta\phi + \Delta\psi - \pi/2$)

이 된다.

Fig.3에서 $Y_F/\text{SIN} \omega_m t$ 와 $X_F/\text{SIN} \omega_m t$ 를 각각 X축, Y축, 복소 평면에 그리면 원점에서의 거리가 $E_s E_L$ 에 비례하므로 신호의 진폭을 나타내고 이것이 X축과 이루는 각 α 가 광신호의 위상을 나타내게 된다. 진폭에 변화가 생기면 점은 동경 방향으로 이동하고 위상에 변화가 생기면 점은 원주상에서 위치를 바꿀 것이다. 따라서 X_F, Y_F 가 그리는 궤도로서 진폭과 위상에 대한 정보를 얻을 수 있다. 본 연구에서는 신호의 위상 변화를 측정하기 위해 Fig.4에서 PMI를 AC 전압으로 modulation시켜주면서 변화한 위상 α

를 측정하였다.

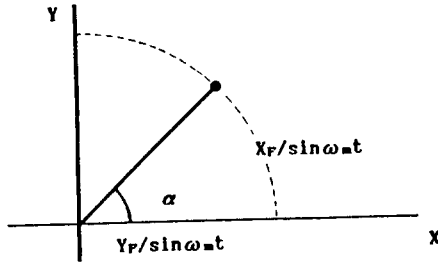


Fig.3 Phase and amplitude of signal output

III. 실험 및 결과

Fig.4는 실험 장치도를 나타낸다. 본 실험에서는 높은 출력의 레이저가 필요없으므로 4mW Melles Griot(05 LHP 141) Laser를 사용했고 LO와 SB의 세기 비율은 20:1 정도가 되게 하였다. SB는 진폭 β , 주파수 ω_m 으로 진동하는 PM1에 의해 위상 변조가 되어 Multiport로 입사하게 되는데 광분할기 BS4와 BS5에서 LO와 결합되어 광신호를 만들게 된다. 광검출기 D5와 D6은 Balanced Mixer를 이루어 신호는 식(1)로 표현되고 D7과 D8에 의한 신호는 식(2)로 표현된다. 한편 식(2)를 식(1)과 quadrature condition을 맞추어 주기 위해서 PM3에 DC 전압을 가해 LO의 광거리를 변화시켜 식(3)으로 표현되도록 한다. Fig.5는 식(1)과 (3)으로 표현된 신호를 측정상의 잡음으로 들어오는 저주파 신호를 제거하기 위해 High-pass filter(cutoff frequency: 1KHz)를 통과한 후 오실로스코프로 본 Lissajous diagram 이다.

한편 Fig.5는 신호 처리를 하기 위한 장비와 전자 회로를 나타낸다. X, Y 두 채널의 신호가 IF를 통과하고 $\omega_m, 2\omega_m, 3\omega_m, \dots$ 등의 주파수 성분을 포함하고 있으므로 Band-pass filter를 사용하여 ω_m 주파수의 신호만 선택한다. 그리고 상대적으로 다른 주파수 값에 비해 큰 값을 가지는 $2\omega_m$ 성분을 충분히 감쇠시키기 위해 중심 주파수가 $2\omega_m$ 인 Notch filter를 사용하였다. 마지막으로 X, Y 채널 간에 전자 회로적 영향에 의한 위상 변화를 보정해 주기 위해서 위상 변화기(Phase shifter)를 한 채널에 선택적으로 연결한다. 앞의 여러 회로를 거친 신호를 Digital Storage Scope(Tetronix 2230)에 입력시켜 A-D 변환을 한 다음 디지털 데이터를 GPIB(General Purpose Interface Bus)로 컴퓨터와 연결시켜 보조 기억장치에 기록한다.

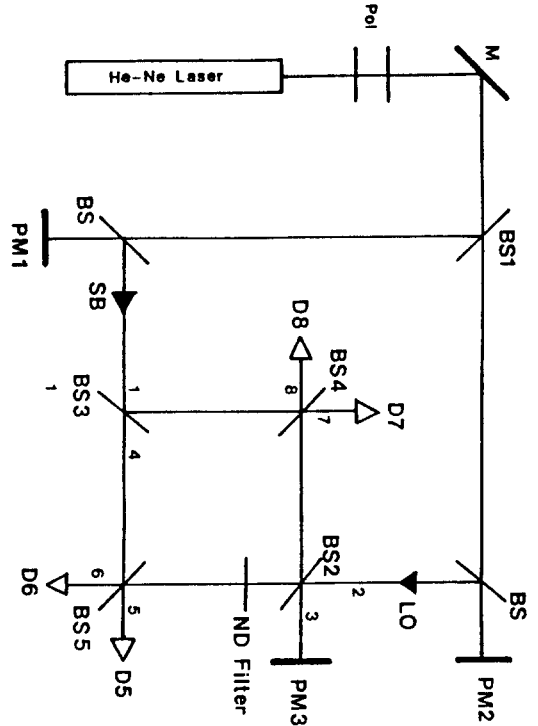


Fig.4 Schematic Diagram of Experiment
PM:Piezo Mirror, D:Photodetector
M:Mirror, BS:Beam Splitter, P:Polarizer

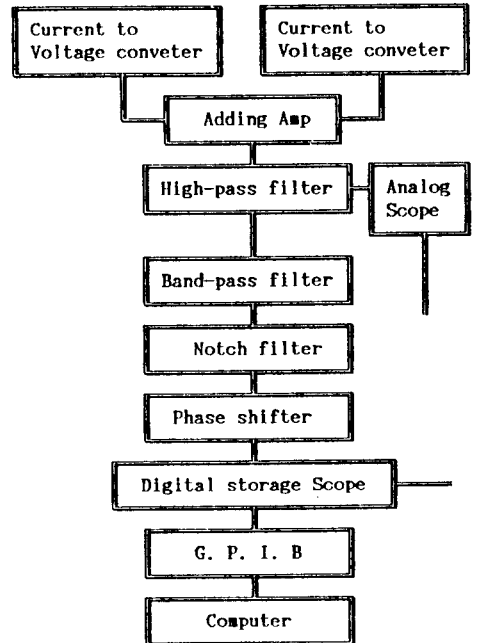


Fig.5 Block Diagram of Electronic circuit and Equipment for signal Processing

식(4)와 (5)로 표현되는 출력은 carrier frequency의 진폭에 해당하는 위상요소 α 가 일정하다면 직선으로 나타날 것으로 예견되고 Fig.6은 그 결과에 해당한다. 이 사실은 $\alpha = \Delta\phi + \Delta\psi - \pi/2$ 이고 광거리차, $\Delta\psi$ 가 일정하므로 $\Delta\phi$, 즉 LO와 SB의 상대적 위상이 일정함을 의미한다. 그러나 위상 α 는 외부의 어떤 환경적 요인에 의해서 신호와 기준 신호와의 상대적인 위상, $\Delta\phi$ 가 변한다면 같이 변화할 것이고 그림6에도 변화가 올 것이다. 본 실험에서는 이를 simulation하기 위해서 PM2(Fig.4)를 진폭 γ , 주파수 ω_p 로 진동시켜 주었고 이때 $\alpha' = \Delta\phi + \Delta\psi - \pi/2 - \gamma \sin\omega_p t$ 로 표현된다. Fig.7은 위상 α 가 변화 할 경우 α 의 변화가 carrier frequency의 포락선으로 나타나는 모습이다. Fig.8은 γ 가 변화 함에 따라 위상 α 가 변하는 모습을 phase diagram으로 보여주고 있다.

Table.1 Phase change with bias voltage

	PZT.Bias Vol	Phase Change($\Delta\alpha$)
(A)	0.3 V	0.36π
(B)	0.6 V	0.55π
(C)	0.9 V	0.75π
(D)	1.14V	π

Table.1에서 우리는 PM2에 인가해 주는 전압이 클 수록, 즉 광거리의 변화가 클 수록 위상 변화가 크게 나타남을 알 수 있다.

IV. 논 의

앞의 결과를 보면 carrier frequency를 제거하지 않으면 Symmetry때문에 π 이상의 Phase fluctuation과 동경성분에 해당하는 진폭을 측정하기가 곤란하다. 그래서 보조 기억장치에 기록된 데이터에서 carrier frequency를 제거하기 위해 $\sin\omega_m t$ 로 나누어 식(4)와 (5)에서 위상 변화를 포함한 진폭의 변화를 구할 수 있을 것이다. Fig.9은 carrier frequency를 제거한 디지털 데이터를 2차원 복소 평면에 도식한 그림이다. (A)는 PM2의 인가 전압이 없을 때이고 (B)는 0.21V, 250Hz의 AC 전압이 주어졌을 경우이다. 그리고 (C)는 0.4V, 250Hz의 AC 전압이 가해졌을 경우이다.그렇지만 그림에서 위상과 진폭이 변하지만 정확한 계산을 할 수는 없었다. 이는 실지로 얻은 데이터 값의 carrier frequency를 제거하는 과정에서 위상이 시간에 따라 변하기 때문에 ω_m 주파수를 완전히 제거할 수 없기 때문이라

생각된다. Fig.9에서 F, G, P, Q는 계산에서 초기 위상과 위상변화를 고려해준 상수값이다.

한편 식(4)와 (5)는 저주파함에 해당하는 위상 변화량과 carrier frequency 항의 곱으로 볼 수 있다.그러므로 저주파 신호와 고주파 신호의 곱으로 Modulation되어 있는 신호를 전자 회로적으로 Demodulation하여 Low-pass filter를 통과하면 이론적으로 저주파 신호를 분리할 수 있다. 그래서 carrier frequency를 제외한 저주파 성분인 위상 변화량을 계산해 낼 수 있으므로 결과 분석에 유용할 것으로 생각되며 실험이 진행중에 있다.

V. 결 론

Balanced Detection 시스템을 이용한 Multiport 광검출 방법으로 신호대 잡음비를 향상 시키고 위상의 시간에 따른 변화를 측정하였다. 본 연구에서는 임의적으로 위상 변화를 주고 그에 따른 신호를 측정 하였는데 이 방법으로 Signal Beam이 주위 환경이나 어떤 조건에 의하여 진폭이나 위상이 Random하게 변한다면 SB와 LO의 상대적인 "Phase fluctuation"이나 진폭의 변화를 결정할 수가 있을 것이다.

참 고 문 헌

1. H.P.Yuen, V.W.S.Chan, Opt.Lett. 8 p177 (1983)
2. B.L.Schumaker, Opt.Lett. 9 p189 (1984)
3. G.L.Abbas, V.W.S.Chan, T.K.Yee, Opt.Lett. 8 p419 (1984)
4. D.W.Stowe, T.Y.Hsu, IEEE J. Lightwave Technol. LT-1 p519 (1983)
5. R.Stierlin, R.Bättig, P.D.Henchoz, H.P.Weber, Optical and Quantum Electron. 18 p445 (1986)
6. G.Martini, Optical and Quantum Electron. 18 p179 (1987)
7. G.L.Abbas, V.W.S.Chan, T.K.Yee, IEEE J. Lightwave Technol. LT-3 p1110 (1985)
8. S.Machida, Y.Yamamoto, IEEE J. Quantum Electron. QE-22 p617 (1986)
9. S.B.Alexandar, IEEE J. Lightwave Technol. LT-5 p523 (1987)
10. R.Bättig, R.Stierlin, P.D.Henchoz, H.P.Weber, IEEE J. Lightwave Technol. LT-6 p8 (1988)
11. H.vande Stadt, Astron and Astrophys. 36 p341 (1974)

12. D.F.Walls, Nature, 306 p141 (1983)
13. R.S.Bondurant, J.H.Shapiro, Phys.Rev. D 30 p981 (1984)
14. B.Yurke, Phys.Rev. A 32 p300 (1985)
15. N.G.Walker, J.E.Carroll, Electron Lett. 20 p981 (1984)

16. N.G.Walker, J.E.Carroll, Optical and Quantum Electron. 18 p355 (1986)
17. A.Yarive, "Quantum Electronics", 3rd ed. Wiley, New York, 1989

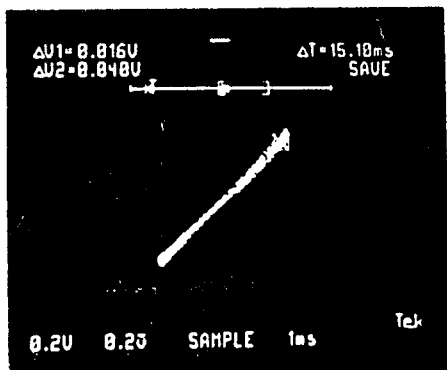


Fig.6. Phase Diagram (α =constant)

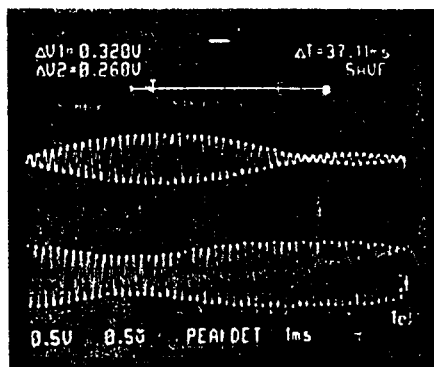
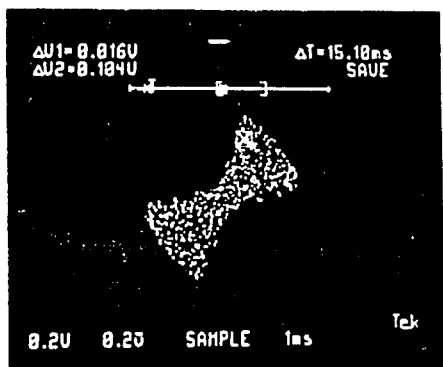
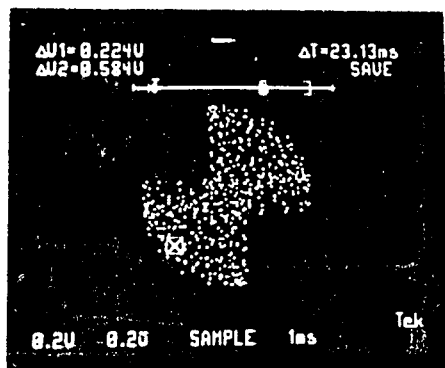


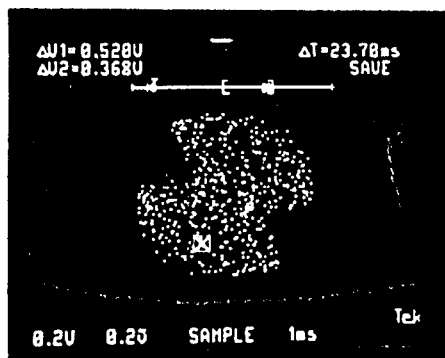
Fig.7. Figure of both signal after phase change



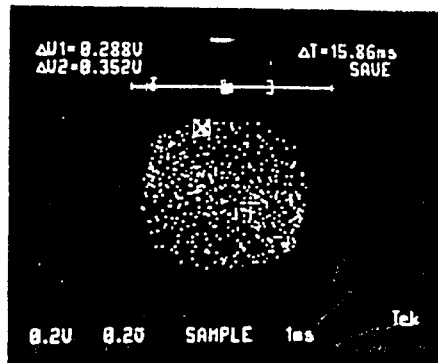
(a) PM2, Vol: 0.3V, 200Hz



(b) PM2, Vol: 0.6V, 200Hz



(c) PM2, Vol: 0.9V, 200Hz



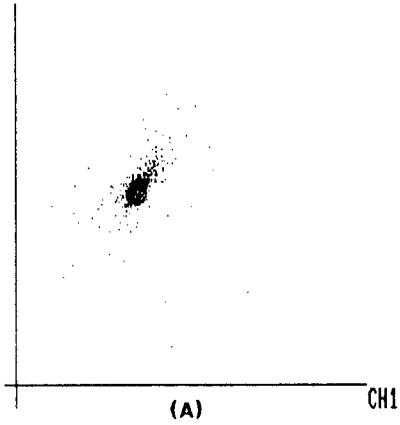
(d) PM2, Vol: 1.14V, 200Hz

Fig.8. Phase Diagram

File:A2C

F=-5.2 G=-5 1/P=255 1/Q=255

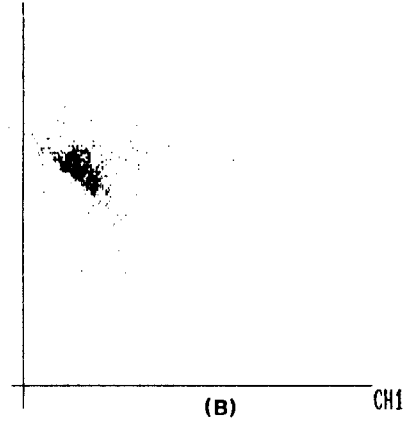
CH2



File:B2C

F=-.6 G=-1.6 1/P=430 1/Q=255

CH2



File:C2C

F=-3 G=-2 1/P=-1000 1/Q=300

CH2

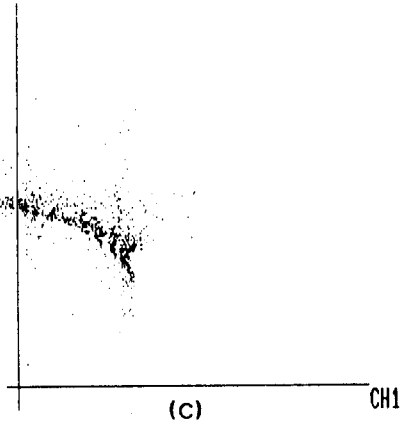


Fig.9. Phase fluctuation without carrier frequency