

두 주파수 위상변조 및 게이트를 이용한 폐회로 광섬유 자이로스코프

° 오 문 수 정 만 호
대 전 기 계 창

Closed-loop fiber optic gyroscope using
gated two-harmonic phase modulation

Moonsu Oh and Manho Chung
Daejeon Machine Depot

Abstract

Closed-loop fiber-optic gyroscope with linear scale factor for a wide dynamic range is demonstrated using a gating process and two-harmonic phase modulation, of which the second harmonic is obtained by a frequency doubler. Also the effects of the second harmonic and duty cycle of gating signal on the linearity of scale factor are estimated theoretically and compared with the measured data. The experimental results show the best linearity of scale factor is about 0.5% within the rotation rate $90^\circ/\text{sec}$. The closed-loop fiber-optic gyroscope with gated two-harmonic phase modulation can be used in the application demanding less sensitive performance and modest scale factor linearity.

1. 서 론

광섬유 자이로스코프(FOG)를 폐회로 방식으로 작동시킴으로써 감도를 높이고, 측정 범위도 넓힐 수 있다.^{1), 2)} 이 폐회로 방식은 개회로 출력신호를 광섬유 고리내의 전기적으로 제어 가능한 소자에 되먹임으로써 Sagnac 위상에 대하여 반대 부호를 갖는 비가역 광학 위상차를 유발시켜서 시스템을 0점 작동하게 만든다. 이때 비가역 위상차를 유발시키는 되먹임 신호에서 회전정보를 얻는다.³⁾ 이 비가역 위상차를 얻기 위해서 자기-광학 효과를 이용하거나, 광섬유 고리의 비대칭 위치에 광학 주파수 변조기 또는 집적 광학 주파수 변조기를 놓고 두 역회전 빛⁴⁾

살 사이에 주파수 차를 유발시켜서 Sagnac 위상을 상쇄시킨다. 그러나 이들 소자는 부피가 크거나 광손실 및 전력 소모가 비교적 큰 단점이 있다.

최근에 동적으로 바이어스된 FOG에서 광섬유 고리내의 비대칭 위치에 놓인 PZT(piezoelectric transducer) 위상변조기에 위상 바이어스 변조 외에 추가 위상변조를 가하고, 검출기 출력을 주기적으로 개폐시키는 게이트(gate)를 이용해서 선형 척도 계수(linear scale factor)⁵⁾를 갖는 폐회로 FOG를 실현하였다. 이때 추가 위상변조는 펄스 발생기에서 나온 신호가 저주파 여파기를 통과한 2개의 조화신호를 이용하고, 검출기 출력에서 비가역 위상차가 Sagnac 위상차를 거의 상쇄시킬 수 있는 기간만 통과시키도록 게이트를 작동시켜서 시스템을 0점에서 작동하도록 하였다. 이때 되먹임 회로 없이 수동으로 폐회로를 구성하였다. 그런데 PZT 위상변조기는 여러 공진 주파수를 가지므로 차수가 큰 조화 성분들 중에서 저주파 여파기를 통과한 미소량은 공진주파수에서 큰 반응을 하므로 원하는 위상차 변조에 오차를 유발시킬 수 있다.

본 연구에서는 두개의 정현파(f_m , $2f_m$)로 합성된 신호를 만들기 위하여 주파수 배가기(frequency doubler)를 사용하고, 되먹임 회로에 자동이득 증폭기(AGC amplifier)를 이용하여 더 개선된 폐회로 방식의 FOG를 실현하였다. 또한 각속도를 감지하는데 넓은 측정 범위에서 선형적인 척도 계수를 보이는 실험결과를 얻었다. 위상변조에서 제 1 조화 신호에 대하여 제 2 조화 신호의 상대진폭 및 상대 위상, 게이팅 신호에서 위상 및 작동 기간(duty cycle)들이 척도 계수의 선형성에 미치는 영향을 논의할 것이다.

2. 이 론

광섬유 자이로스코프의 광섬유 고리 한쪽 끝에 있는

위상변조기를 시간에 따라 변하는 전기 신호 $V_m(t)$ 로 구동했을 때 두 역회전 빛살들의 위상은 각각 $\phi_m(t)$ 과 $\phi_m(t-T_f)$ 로 변조될 것이다. 여기서 T_f 는 두 역회전 빛살들이 위상변조기를 통과하는 시간차이다. 두 간섭 광학신호에서 Sagnac 위상을 상쇄하기 위한 일정한 광학 위상차를 얻기 위해서는 위상변조 $\phi_m(t)$ 는 시간에 대하여 1차 함수인 경사위상(ramp phase) 이거나 Serrodyne 위상변조를 시켜야 한다. 그러나 광섬유로 된 이런 소자는 개발되지 않았다.

그림 1.과 같이 이상적인 톱니파 위상변조 일 때 두 역회전 빛살 사이의 위상차 변조는 변조 주기 T_m 사이에서 어느 기간 $T_m - T_f$ 또는 T_f 동안 일정한 위상차를 얻을 수 있다. 이와 같은 위상차 변조의 주기적 특성을 이용해서 위상차가 일정한 값을 갖는 기간만 광검출기 출력을 통과시킨다. 이 일정한 위상차는 Sagnac 위상차를 상쇄시켜서 개회로 출력은 0이 된다.

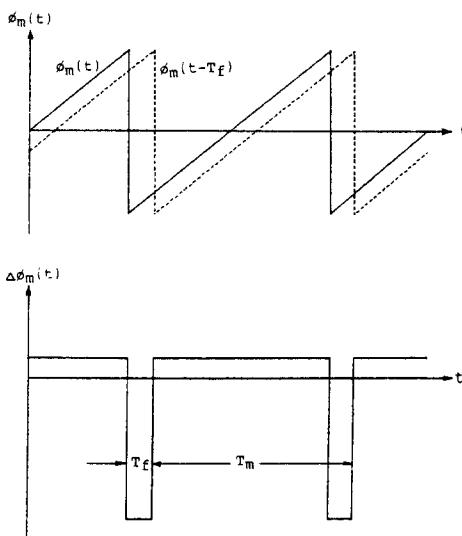


그림 1. 톱니파 신호에 의한 위상차 변조

현재 널리 이용되고 있는 광섬유 위상변조기 중 하나는 원통형 PZT에 광섬유를 여러번 감은 것인데, 이러한 변조기는 모양이나 크기에 따라 여러개의 공진 주파수를 갖는다. 그러므로 톱니파나 삼각파와 같은 여러 주파수 성분을 갖는 전기 구동신호에 대해서는 비선형 응답을 하게 된다. 그러나 두 개의 주파수(f_m , $2f_m$)를 갖는 구동신호로 위상변조를 시키고, 위상변조기의 비선형 응답을 보정해 줌으로써 어느 기간 동안 두 역회전 빛살 사이에 거의 일정한 위상차를 만들어 낼 수 있다. 이때 위상변조기에 가해주는 두 조화신호의 진폭이나 상대 위상은 적절히 조절되어야 한다.

동적으로 바이어스된 FOG에서 Sagnac 위상차를 상쇄

하기 위하여 광섬유 고리의 한쪽 끝에 있는 위상변조기를 $V_m(t)$ 로 구동시키면, 두 역회전 빛살 사이의 위상차 변조 $\Delta\phi_m(t)$ 은 다음과 같다.

$$\phi_m(t) = A(\sin w_m t - B \sin 2w_m t) \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \Delta\phi_m(t) &= \phi_m(t+T_f/2) - \phi_m(t-T_f/2) \\ &= \phi_0(\cos w_m t - 2B \cos 2w_m t) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 ϕ_0 는 위상차 변조의 진폭이고, B는 위상변조에서 제 1 조화 성분에 대한 제 2 조화 성분의 상대진폭이다. 그리고 주파수 f_m 과 $2f_m$ 에서 위상변조기의 비선형 응답은 보정되었고, $T_f f_m \ll 1$ 이라 가정하였다. 식(2)에서 $B \approx 0.15$ 로 하면, 그림 2.와 같이 어느 기간은 거의 일정한 위상차를 얻을 수 있다.

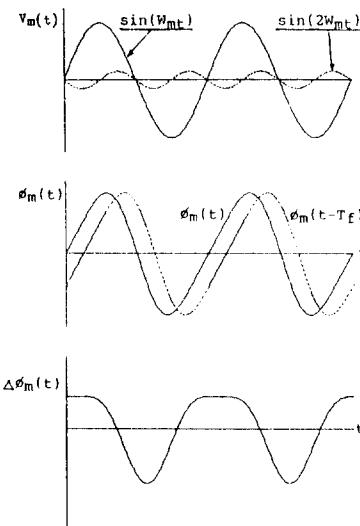


그림 2. 두 주파수(f_m , $2f_m$) 신호에 의한 위상차 변조

위상차 변조 $\Delta\phi_m(t)$ 를 갖는 FOG의 출력에서 바이어스 주파수 f_b 의 성분은 다음 식으로 나타난다.

$$I(f_b) = K J_1(\eta_b) \sin \{\phi_s - \Delta\phi_m(t)\} \quad (3)$$

여기서 K는 비례상수이며, $J_1(\eta_b)$ 는 제 1차 Bessel 함수이다. η_b 는 위상 바이어스의 진폭(ϕ_b) 및 광섬유 통과시간 T_f 와 관계된 상수이다. 그리고 ϕ_s 는 회전에 의하여 유기된 Sagnac 위상차이다. 즉,

$$\phi_s = \frac{4\pi L R}{\lambda_0 c} \Omega \quad (4)$$

이다. 이때 L 은 광섬유 코일의 길이, R 은 코일반경, λ 및 c 는 각각 진공중에서 광원의 파장 및 광속도이고 Ω 는 FOG가 받는 각속도이다. 식(2)와 같은 위상차 변조에서 거의 일정한 값을 갖는 기간 동안만 게이트를 작동시키면 그림 3.과 같이 개회로 출력은 거의 0이 된다. 이때 생긴 오차 신호 $\Delta\phi(t) = \phi_s - \Delta\phi_m(t)$ 는 적분기를 통과한 후, 되먹임 회로에 있는 AGC 증폭기의 이득을 조절하여 위상변조기의 구동신호 진폭을 자동적으로 제어할 수 있는 폐회로 방식으로 FOG를 작동하게 한다. 이때 적분기의 출력은 회전(Ω)에 대한 정보를 주는 폐회로 FOG의 출력이다.

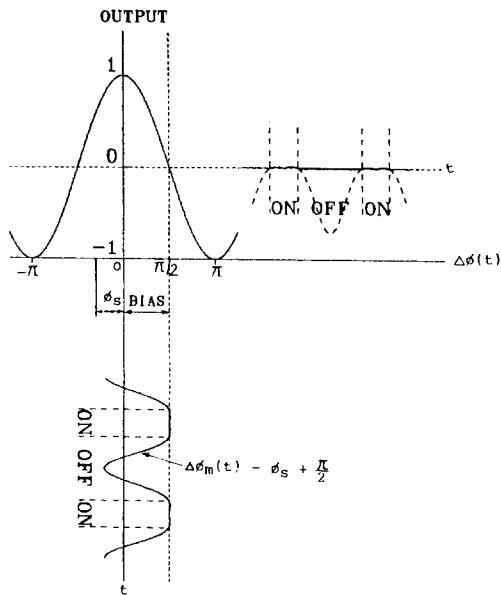


그림 3. 두 조화신호에 의한 위상변조 및 게이팅에 의한 FOG의 개회로 출력

3. 실험 및 결과

위상변조와 게이트 방법을 이용한 폐회로 방식의 광섬유 사이로스코프에 대한 실험장치의 개략도를 그림 4.에 보였다. 1010m의 단일모드 광섬유를 직경 15cm인 알미늄 원통 둘레에 온도 영향을 최소로 줄이도록 대칭으로 감았다. 광섬유 고리의 한쪽 끝 근처에 편극조절기를 부착하고, 다른쪽 끝은 PZT 원통형 세라믹에 감아서 위상변조기로 사용하였다. 광원으로는 다중모드 GaAlAs 레이저ダイオード를 사용하였는데, 중앙파장은 823nm이고, 선폭이 2.3nm이며, 모드 수가 10개인 것이다. 위상변조 신호는 주파수 f_m 인 정현파를 주파수 배가기(frequency doubler)를 사용하여 $2f_m$ 인 정현파를 만들고 이것을 기본 정현파와 합성하였다. 이때 상대 진폭 및 위상

을 조절할 수 있도록 하였다. 동적 바이어스 주파수는 진폭 변조 또는 편극 변조를 고려하여 적정 주파수(proper frequency) 102kHz로 선택하는 것이 바람직하지만 이 실험에서는 그 문제가 크게 영향이 없고, 또 변조 주파수 $f_m=14\text{kHz}$ 를 선택하였으므로 선형도에 동적 바이어스의 영향을 줄이기 위해 10배 이상인 $f_b=140\text{kHz}$ 로 선택하였다. 주파수 f_m 인 정현파를 사각파로 만들어 게이트 구동신호로 사용하였고, 위상이나 작동기간을 조정할 수 있도록 구성하였다.

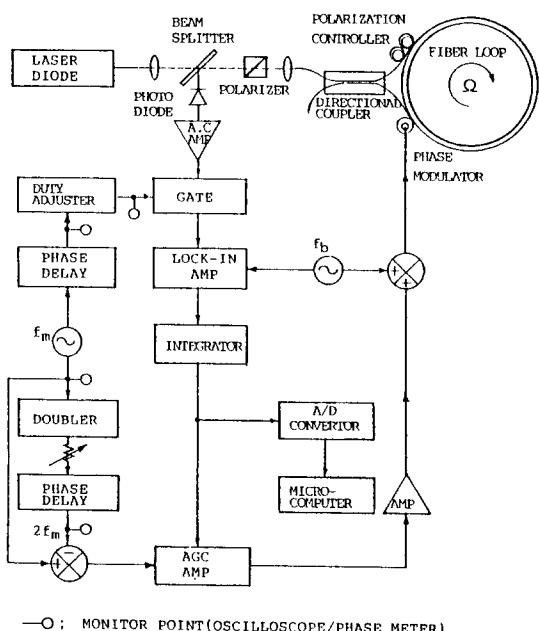


그림 4. 실험장치의 개략도

본 실험에 사용된 PZT 위상 변조기의 주파수 응답특성을 개회로-FOG를 이용하여 측정하고 그림 5.에 그렸다. 주파수가 f 인 정현파로 위상 변조기를 구동하고 일정한 각속도를 받는 FOG의 출력을 관찰한다. 구동전압을 증가시키면서 그 출력이 0일 때, 구동전압을 측정한다. 이 때 $J_1(\eta)=0$ 이다. 즉 $\eta=K_f V(f) \sin(f/2f_p)$ 가 3.83임을 의미한다. 여기서 $V(f)$ 는 $\eta=3.83$ 일 때 구동전압의 rms 값이며 f_p 는 광섬유 고리의 적정주파수 102kHz이다. K_f 는 전압-위상 변환 계수로서 구동신호의 진폭에 대하여 일정하고 주파수에 따라 달라진다. 그림 5.에서 PZT의 주파수 응답을 이 계수로 표시했다. 이 PZT 원통의 직경은 25.4mm이며, 첫번째 공진은 주파수가 38.6kHz 일 때 생겼다. 위상변조에 사용된 구동신호의 주파수인 14kHz와 28kHz에 대한 PZT의 주파수 응답 비율(K_{28}/K_{14})을 측정한 결과 1.3이다. 그래서 가장 근사한 파형을 얻기 위해서 구동신호에서는

제 2 조화신호의 상대진폭을 0.77B로 보정하였다.

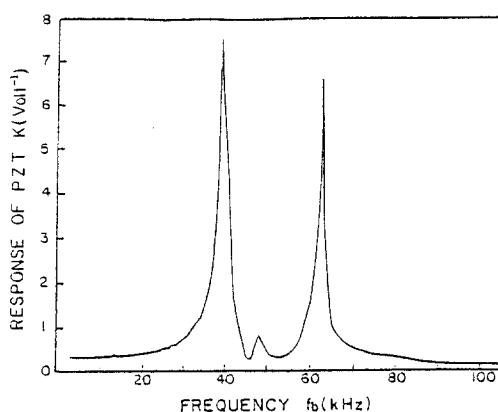


그림 5. PZT의 주파수 응답도

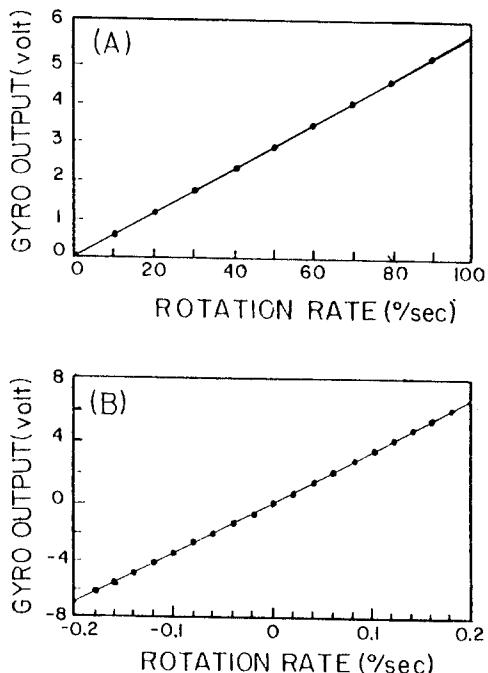


그림 6. 폐회로 방식의 FOG에서 회전에 대한 출력 곡선
— ; 계산치, ●●● ; 실험치

광검출기에서 얻어진 전기적 신호는, 주파수 f_m 으로 작동되는 게이트를 통과한 후 바이어스 주파수 f_b 성분만을 얻기 위해서 PSD(phase sensitue demodulator)로 보내진다. 다시 적분기를 거쳐나온 출력은 자동 이득조절 증폭기에서 구동신호의 진폭을 조절하게 된다. 또한 폐회로 FOG의 출력인 적분기의 출력을 A/D 변환기를 거쳐 전자계산기로 보내서, 필요한 계산을

하도록 하였다.

본 실험에서는 Sagnac 위상 2π 에 대응하는 각속도 $95^\circ/\text{sec}$ 까지 $10^\circ/\text{sec}$ 씩 증가시키면서 적분기 출력전압을 측정하였다. 또한 $-0.20^\circ/\text{sec}$ 에서 $+0.20^\circ/\text{sec}$ 까지 $0.02^\circ/\text{sec}$ 간격으로 데이터를 얻었다. 이들 각속도에 대한 폐회로 FOG의 출력을 그림 6.에 그렸다. $90^\circ/\text{sec}$ 내에서 얻어진 척도 계수의 비선형도 약 0.5% 정도이었다. 그리고 회전이 없을 때, FOG의 단기 잡음 rms 값은 $0.1^\circ/\text{hr}$ 이고 이때 적분시간은 10sec 이었다.

4. 분석 및 논의

폐회로 FOG에서 Sagnac 위상이동을 상쇄할 위상차변조 $\Delta\phi_m(t)$ 가 식(2)로 표시될 때 게이트의 작동기간과 위상을 적당히 설정되면 개회로의 출력인 식(3)은 평균적으로 0으로 만들 수 있다. 즉,

$$\int_{-\gamma/2}^{+\gamma/2} \sin \{\phi_s - \Delta\phi_m(t)\} dt = 0 \quad (5)$$

여기서 γ 는 게이트 작동기간이다. 식(2)를 식(5)에 대입하면 Sagnac 위상은 다음과 같이 표시된다.

$$\phi_s = \tan^{-1} \frac{\int_{-\gamma/2}^{+\gamma/2} \sin \{\phi_0(\cos w_{int} t - 2B \cos 2w_{int} t)\} dt}{\int_{-\gamma/2}^{+\gamma/2} \cos \{\phi_0(\cos w_{int} t - 2B \cos 2w_{int} t)\} dt} \quad (6)$$

척도 계수 $S = \phi_0 / \phi_s$ 는 식(6)으로부터 수치계산에 의해 얻어질 수 있다. 주어진 측정 범위내에서 척도 계수의 선형성은 다음과 같은 비선형도로 표시한다.

$$\text{비선형도} = 2(S_{\max} - S_{\min}) / (S_{\max} + S_{\min}) \quad (7)$$

여기서 S_{\max} 와 S_{\min} 은 척도 계수의 최대, 최소값을 의미한다. 척도 계수의 비선형도는 게이트의 작동기간 (γ)과 위상, 그리고 구동신호에서 제 2 조화 성분의 상대진폭(B)과 상대위상에 의해 변하게 된다.

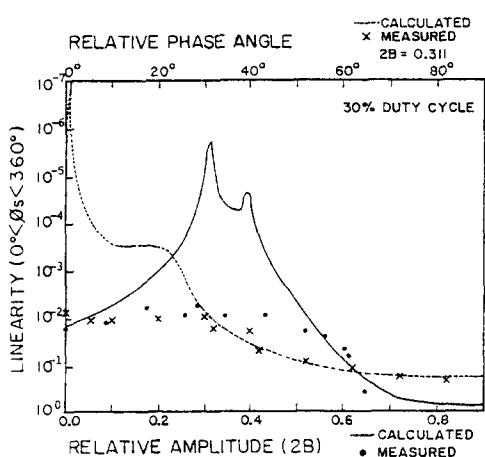


그림 7. 제 2 조화신호에 의한 비선형도

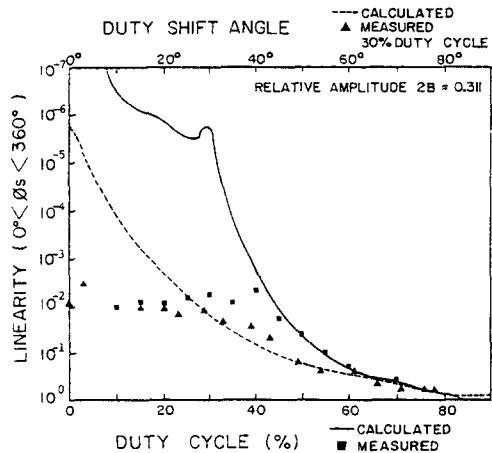


그림 8. 게이트 신호에 의한 비선형도

제 2 조화성분과 게이트 신호들이 척도 계수의 선형성에 미치는 영향을 고찰하기 위해 그림 4.의 관측점 (●)에서 오실로스코프와 위상측정기를 이용하여 파형들을 관측하면서 조정하였다. 제 1 조화신호에 대한 제 2 조화신호의 상태 진폭과 상태위상이 미치는 영향에 대하여 계산한 결과와 실험한 결과를 그림 7.에 그렸다. 그리고 게이트의 작동기간과 위상에 대해서는 그림 8.에 그려있다. 한 변수를 측정할때 다른 변수들은 가장 좋은 선형성을 얻을 수 있는 조건의 수치로 고정하였다. 즉, 게이트의 작동 비율($f_m T$) 및 위상은 각각 0.3과 0°이다. 그리고 제 2 조화신호의 상태진폭(2B)과 상태위상은 각각 0.311 및 0°이다. 그림 7.과 8.에서 보는 바와 같이 실험에 사용된 폐회로 FOG에서 척도 계수의 비선형도는 이론적으로 계산된 값인 10^{-5} 정도이고 실험에서 얻은 결과는 5×10^{-3} 정도이었다. 그리고 1% 정도의 비선형도는 쉽게 얻을 수 있었다. 측정치와 이론

치의 차이는 PZT 위상변조기 및 전자회로의 선형성과 안정성에 기인한 것으로 보인다. 더 좋은 결과를 얻으려면 이들 소자들 뿐 아니라 데이터 처리용 A/D 변환기도 사용된 12-비트(bite) 보다 더 큰 것을 사용하여야 한다.

5. 결 론

폐회로 광섬유 자이로스코프에서 두 조화 신호로 위상변조를 시키고, 그 개회로 출력을 게이팅시킴으로써 넓은 범위의 각속도를 측정하는데 척도 계수가 선형적임을 보이는 실험결과를 얻었다. 이 방식으로 각속도 90°/sec 이내에서 척도 계수의 비선형도는 0.5%임을 보였다. 위상변조의 구동신호는 정현파 신호에서 주파수 배가기를 이용하여 제 2 조화신호를 만들어 합성하였다. 제 2 조화신호의 상태진폭과 상태위상들이 척도 계수의 선형성에 미치는 영향을 이론과 실험으로 고찰하였다. 또한 게이트 신호의 작동기간과 위상에 대해서도 분석하였다. 실험결과는 이론적으로 계산된 비선형도 10^{-5} 에 못 미치고 있지만, PZT 위상변조기와 전자회로들을 개선한다면 이론치에 접근시킬 수 있을것으로 예상된다. 얻어진 실험결과는 응용분야가 다양한 저등급 자이로의 요구성능을 충분히 만족시킬 수 있다.

참 고 문 헌

- (1) R.F.Cahill and E.Udd, "Phase-nulling fibre-optic laser gyroscopes", Opt. Lett., Vol.4, p.93, 1979.
- (2) J.L.Davis and S.Ezekiel, "Closed-loop, low-noise fiber-optic rotation sensor" Opt. Lett., Vol.6, p.505, 1981.
- (3) W.C.Davis, W.L.Dandrom and D.E.Thomson, "Fiber optic gyro using magneto-optic phase nulling feedback", in proceedings of the International Conference on Fiber Optic Rotation Sensors and Related Technologies, Springer-Verlag, Berlin, p.308, 1982.
- (4) A.Ebbing and G.Schiffner, "Closed-loop fiber-optic gyroscope with a sawtooth phase-modulated feedback", Opt. Lett., Vol.10, p.300, 1985.
- (5) B.Y.Kim and H.J.Shaw, "Gated Phase-modulation approach to fiber optic gyroscopes with linearized scale factor" Opt. Lett., Vol.9, p.375, 1984.