



時分復用諧振式光纖陀螺 背向散射噪聲研究

上海 同濟大學電子與信息工程學院 信息與通信工程系 / 黃廉閔

關鍵字：諧振式光纖陀螺、時分復用、響應時間、背向散射

摘要

時分輸入復用諧振式光纖陀螺 (Time-Division Multiplexing RFOG, TDM RFOG) 通過光開關來實現光時分輸入, 使順時針 (Clockwise, CW) 與逆時針 (Counterclockwise, CCW) 光在時間上分開, 可以抑制背向散射噪聲。光開關有兩重要參數響應時間與消光比。光開關響應時間影響光纖陀螺響應時間; 消光比直接影響背向散射噪聲的大小。本文通過計算仿真得到, 光纖環行腔的精細度 F 和渡越時間 τ 對光時分輸入的影響, 精細度 $F = 88$ 和 $F = 68$ 時, 須連續注入光 296τ 和 168τ 後輸出光強可完全穩定。背向散射噪聲大小取決於消光比, 消光比時背向散射噪聲的 ARW 為 $-55.19 \text{ dB}(\circ/\sqrt{\text{h}})$; 消光比 -70 dB 時背向散射噪聲為 $-100.4 \text{ dB}(\circ/\sqrt{\text{h}})$ 。

一、引言

光纖陀螺 (Fiber Optic Gyro, FOG) 是一種由薩格納克效應 (Sagnac Effect) 產生的諧振頻率差, 來測量旋轉角速度變化的傳感器 [1]。光纖陀螺可分為干涉式光纖陀螺 (Interferometric Fiber Optic Gyroscope, IFOG) 和諧振式光纖陀螺 (Resonator Fiber Optic Gyroscope, RFOG) [2]。目前 IFOG 是相當成熟的傳感器已經應用在各個領域中, 但是 IFOG 需要超過幾千米的光纖長度才能達到 RFOG 幾十米的極限靈敏度, 這樣大大的限制了體積進一步縮小, 且由於光纖環會受溫度分布不均所引起的噪聲, 進一步限制了陀螺性能的提升, 所以 RFOG 具有較短的光纖長度、較小的體積、較大的動態範圍和集成化等等的潛在發展趨勢, 被廣泛地在各國和機構研究。在 RFOG 的光纖環形諧

振腔 (Fiber Ring Resonator, FRR) 中, 會有CW與CCW的兩束光波同時在腔內傳輸, 兩束光在FRR內傳輸時會有背向散射光和背向散反射光干涉主信號光; CW的背向散/反射光會干涉CCW的信號光, 反之, CCW背向散/反射光也會干涉CW主信號光, 所以背向散/反射噪聲是由同一時刻存在CW和CCW兩正反向光在FRR內相互傳輸干涉所致。由於, RFOG的輸出光是CW和CCW在FRR中多次環形傳輸的多光束干涉, 所以RFOG需採用高相干的光源 (窄激光線寬), 但輸出光是由腔內無數的背向散/反射光和信號光相干疊加而成, 造成噪聲和誤差增加。在RFOG中, 背向散/反射是光纖陀螺的主要噪聲之一, 背向散/反射噪聲基本可分為兩種: ①背向散/反射光與信號光之間的干涉項②背向散/反射光的本身光強項[3]。第一種干涉項可以通過相位調製波行的電壓幅值來達到載波抑制。第二種光強項是以不同頻率調製CW和CCW, 再經過同步解調來加以濾除[4]。

光開關實現光時分輸入技術可以在不使用相位調製器的情況下檢測角速度, 所以光時分輸入相較於光頻分輸入在縮小成本、減小體積方面是有潛在優勢的。本文通過仿真來實現光開關的光時分輸入復用輸出RFOG結構, 由光開關切換CW和CCW來抑制背向散/反射噪聲, 並分析此結構的精細度 (Finesse, F)、背向散射和角度隨機遊走 (Angular Random Walk, ARW)。

二、TDM RFOG 原理

在TDM RFOG中, 光開關是切換CW和CCW的時間, 是整個TDM RFOG的重要元件, 切換時間會因光開關的響應時間和FOG的響應時間而受限制。目前市場上的光開關已經可達到微秒量級的時間響應, 所以主要切換CW和CCW的時間限制是受FOG響應時間限制。FOG響應時間是整個陀螺到達穩定所需的時間, 其中FRR為FOG的核心敏感元件, 所以響應時間主要以FRR響應時間為主。FRR響應時間可定義為 $f_F = F \cdot \tau$, 其中 F 為精細度, τ 為FRR的渡越時間。如圖1所示FRR的結構圖, 分析FRR響應時間對光時分輸入的影響。下面簡單分析TDM RFOG的主要參數。

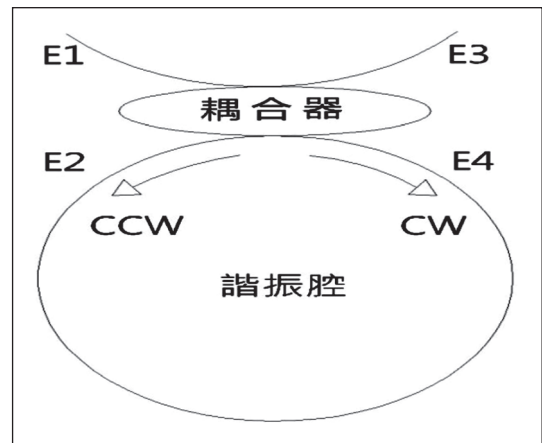


圖 1 光纖環形諧振腔結構圖

(一) 精細度指標

精細度的定義為自由頻譜寬 (FSR) 與



半峰值全寬 (FWHM) 之比, 它反映了諧振曲線的尖銳程度。在光纖陀螺中, 精細度的大小會直接影響陀螺的性能表現, 精細度值越大陀螺的靈敏度就會越高。文獻 [2] 實驗表明, 精細度會因瑞利背向散射噪聲 (Rayleigh Backscattering)、偏振波動噪聲、光源相干性、溫度所引起的誤差、克爾效應 (Kerr Effect) 等等的影響, 使得測量的精細度偏離計算值。由定義可知道精細度為:

$$F = \frac{FSR}{FWHM} \quad (2.1)$$

半峰值全寬 (FWHM) 為 FRR 的頻譜寬度為半峰值寬, 意思是功率頻譜密度的最高點往下降到一半時的頻率範圍, 也就是 3dB 頻寬。自由頻譜寬 (FSR) 為 FRR 相鄰兩個諧振峰之間的頻率範圍。FWHM 和 FSR 所對應的頻率範圍可表示為圖 2。

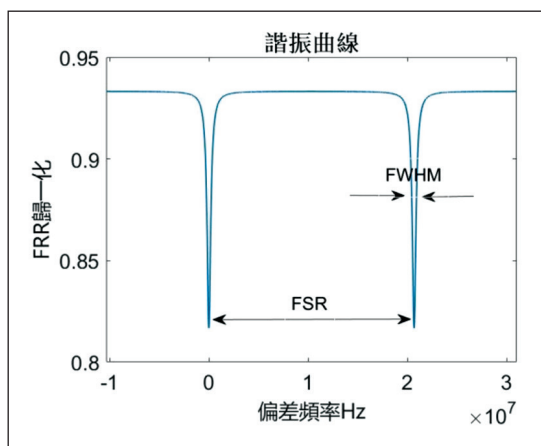


圖 2 諧振曲線示意圖

(二) 諧振腔特性

由圖 1 來分析精細度與耦合器和光纖損耗的關係。輸入光經過耦合器後, 有一部分光為 CW 和一部分為 CCW, 兩部分光會在 FRR 腔內不斷干涉後再經過耦合器輸出。

假設初始光場 E1 端口為 [5]:

$$E_1(t) = E_0 e^{i(\omega_0 t + \phi_0)} \quad (2.2)$$

式中 (2.2), E_0 初始光場、 ω_0 初始角頻率和 ϕ_0 初始相位。

E3 光場會有 E1 光場直接經耦合器輸出和 E1 光場會經耦合器再經過 FRR 後輸出。當光經光開關連續注入時間為 $t = 0$ 時, E3 的輸出光場為:

$$E_3(0) = E_0 e^{i\phi_0} \sqrt{(1 - \gamma_0)(1 - K_c)} \quad (2.3)$$

當 $t = \tau$ 時, E3 輸出光場為:

$$E_3(\tau) = E_0 e^{i\phi_0} \left[\sqrt{(1 - \gamma_0)(1 - K_c)} - (1 - \gamma_0) K_c \sqrt{(1 - \alpha_l)} e^{i\omega_0 \tau} \right] \quad (2.4)$$

式中 (2.4), γ_0 耦合器的插入損耗、 K_c 耦合器的耦合係數和 α_l 光纖的傳輸損耗。

當 $t = n\tau$ 時, E3 輸出光場為:

$$E_3(n\tau) = E_0 e^{i\phi_0} \left\{ \sqrt{(1 - \gamma_0)(1 - K_c)} - (1 - \gamma_0) K_c \sqrt{(1 - \alpha_l)} \sum_{q=0}^n \left[\sqrt{(1 - \gamma_0)(1 - K_c)} \sqrt{(1 - \alpha_l)} \right]^q e^{i\omega_0(q+1)\tau} \right\} \quad (2.5)$$

E4 光場由 E1 光場經耦合器後在 FRR 腔內不斷干涉。當光經光開關連續注入時間為 $t = 0$ 後，E4 腔內剩餘光場為：

$$E_4^r(0) = E_0 e^{i\phi_0} \sqrt{(1-\gamma_0)K_c} \left[\sqrt{(1-\alpha_l)} + \sqrt{(1-\gamma_0)(1-K_c)(1-\alpha_l)^2} e^{i\omega_0\tau} + (1-\gamma_0)(1-K_c)\sqrt{(1-\alpha_l)^3} e^{i\omega_0 2\tau} + \dots \right] \quad (2.6)$$

當光經光開關連續注入時間為 $t = \tau$ 後，E4 腔內剩餘光場為：

$$E_4^r(\tau) = E_0 e^{i\phi_0} \sqrt{(1-\gamma_0)K_c} \left[\sqrt{(1-\gamma_0)} \sqrt{(1-K_c)(1-\alpha_l)^2} e^{i\omega_0\tau} + (1-\gamma_0)(1-K_c)\sqrt{(1-\alpha_l)^3} e^{i\omega_0 2\tau} + \sqrt{((1-\gamma_0)(1-K_c))^3} e^{i\omega_0 3\tau} + \dots \right] \quad (2.7)$$

當光經光開關連續注入時間為 $t = n\tau$ 後，E4 腔內剩餘光場為：

$$E_4^r(n\tau) = E_0 e^{i\phi_0} \sqrt{(1-\gamma_0)K_c(1-\alpha_l)} \times \left[\sqrt{((1-\gamma_0)(1-K_c)(1-\alpha_l))^n} e^{i\omega_0 n\tau} + \sqrt{((1-\gamma_0)(1-K_c)(1-\alpha_l))^{n+1}} e^{i\omega_0(n+1)\tau} + \sqrt{((1-\gamma_0)(1-K_c)(1-\alpha_l))^{n+2}} e^{i\omega_0(n+2)\tau} + \dots \right] \quad (2.8)$$

當光連續注入時，可由 (2.5) 式和 (2.8) 式得到，E3 輸出端口的光強和 E4 端口的諧振腔內循環光強：

$$\left| \frac{E_3}{E_1} \right|^2 = (1-\gamma_0) - \left(\frac{(1-\gamma_0)\gamma_0 K_c}{\sqrt{(1-K_c)(1-\alpha_l)}^2 + 4\sqrt{(1-\gamma_0)} \sqrt{(1-K_c)(1-\alpha_l)} \sin^2(\pi f_0 \tau)} \right) \quad (2.9)$$

$$\left| \frac{E_4}{E_1} \right|^2 = \frac{(1-\gamma_0)K_c}{[1 - \sqrt{(1-\gamma_0)(1-K_c)(1-\alpha_l)}]^2} + 4\sqrt{(1-\gamma_0)(1-K_c)(1-\alpha_l)} \sin^2(\pi f_0 \tau) \quad (2.10)$$

設 FRR 工作在諧振頻率， $K_c = 1 - (1-\gamma_0)(1-\alpha_l)$ 和 $\sin^2(\pi f_0 \tau) = 1$ 此時腔內循環光強 $|E_4/E_1|^2$ 為最大，輸出光強 $|E_3/E_1|^2$ 為零 [6]。

$$\left| \frac{E_4}{E_1} \right|_{MAX}^2 = \frac{(1-\gamma_0)}{K_c} \quad (2.11)$$

由半峰全寬的定義可知道 3dB 頻寬為 $FWHM = \frac{1}{2} |E_4/E_1|_{MAX}^2$ ，可推導出：

$$\Delta f_{FWHM} = \frac{c}{\pi n_{eff} L} \frac{K_c}{\sqrt{(1-\gamma_0)(1-\alpha_l)}} \quad (2.12)$$

式中 (2.12)， c 為光速、 n_{eff} 為光纖反射率、 L 為光纖長度。自由頻譜寬為 FRR 內發生諧振時，兩個相鄰諧振峰之間的頻率差。FSR 所對應的頻率範圍可表示為：

$$FSR = \frac{c}{n_{eff} L} \quad (2.13)$$

(2.1) 式定義可由 (2.12) (2.13) 式得到精細度：

$$F = \frac{FSR}{FWHM} = \frac{\pi \sqrt{(1-\gamma_0)(1-\alpha_l)}}{K_c} \quad (2.14)$$

透過仿真結果如圖3，精細度和耦合係數 K_c 的關係圖。精細度隨著 K_c 係數的遞減後隨之遞增。

由公式(2.5)仿真結果如圖4，在不同精細

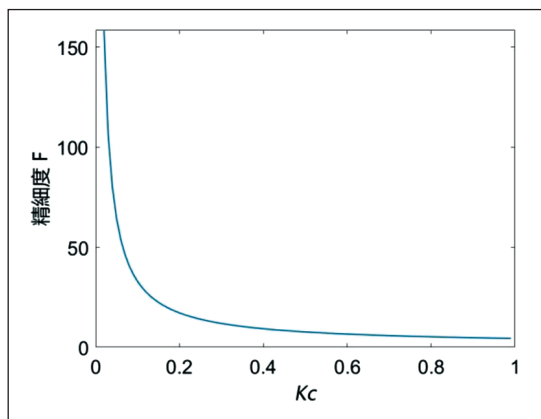


圖 3 精細度與係數的關係示意圖

度的情況下，隨著光向FRR入射時間漸漸增加，FRR的輸出光強會先減少後再增加，最終會趨於穩定。光纖精細度在88和68時，經過計算後可得當光向腔內開始連續注入時間為 $3.4F\tau$ 和 $2.5F\tau$ ，即連續注入光 296τ 和 168τ 後輸出光強與最終穩定輸出光強可完全穩定。

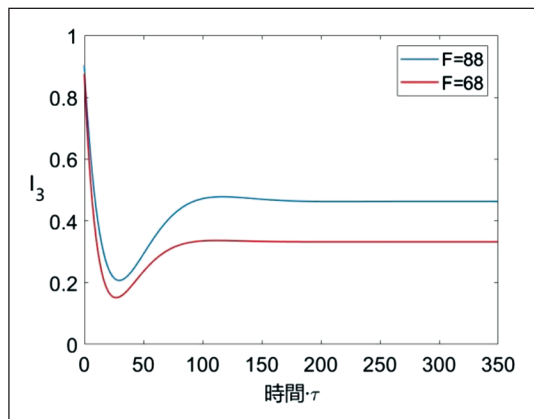


圖 4 時間對輸出光強的影響示意圖

在不同精細度的情況下，隨著光向FRR注入射時間漸漸增加，FRR的輸出也隨著光

強先減少後增加，最終會趨於穩定。上述分析可知道，光開始注入FRR後輸出光強趨於穩定的時間不論是精細度88或68，時間都不超過 $5F\tau$ 即十幾微秒左右，而市面上使用光開關的速率是在幾百微秒量級，所以只要將光開關的週期設為FRR回應時間的整數倍，就不影響陀螺的穩定輸出。

三、瑞利背向散射噪聲分析

光纖的主要材料是石英，而石英是一種無序的結構。在光纖在製造過程中會不可避免的出現材料不均勻的情況，所以瑞利背向散射是在光纖中不可避免的噪聲[7]。光在諧振腔內傳播會因為光纖長度和折射率隨環境變化而變化，因此背向散射光與信號光之間的相位差是近似隨機的。

(一) 光時分輸入的實現方法

TDM RFOG的系統結構如圖5所示，激光器發射出的光波經過隔離器再經過相位調製器後進入光開關，再透過光開關來實現CW和CCW方向上的時分輸入，之後兩束光通過耦合器進入FRR。兩束光離開FRR後，一部分通過環形器再通過探測器1後對輸出光進行同步解調；另一部分通過環形器再通過探測器2再由回饋電路來控制PZT，通過控制PZT上的電壓來調節FRR腔長，來確定CW和CCW的諧振中心頻率。CW和CCW時分輸入頻率是相同的，所以CW和CCW方向的頻率工

作點都位於FRR輸出特性曲線上的最大斜率點。

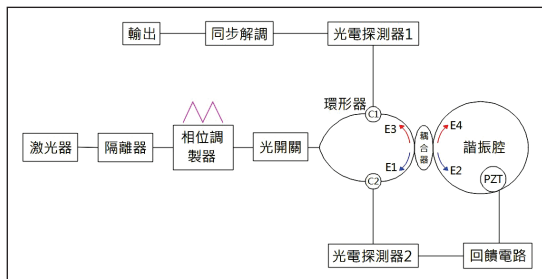


圖 5 TDM RFOG 的系統結構

透過光開關來實現光時分輸入，使CW/CCW信光和CCW/CW背向散射光在時間上分開，理論上可完全消除背向散/反射噪聲[8]，但實際工作時，光開關在切換的時候通道上仍會有信道串擾，使通道內並不只有一個方向的光，所以通道上仍有背向散/反射噪聲，且噪聲的大小直接取決於光開關的消光比[9]。由圖6來分析光開關的消光比。

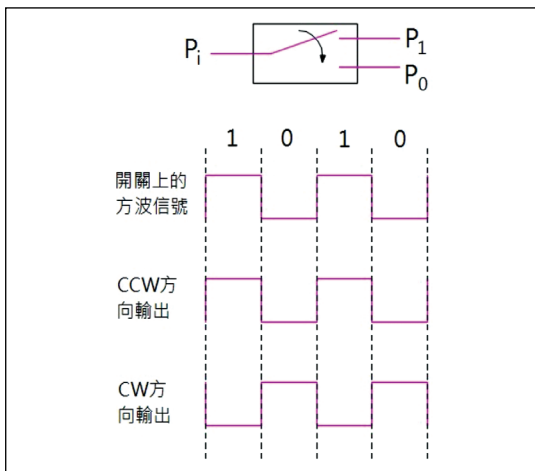


圖 6 光開關的運作原理示意圖

光開關消光比是TDM RFOG的關鍵參數，它直接影響光時分輸入抑制背向散/反射噪聲的效果。消光比為兩個端口處於 P_1 和 P_0 狀態的插入損耗之差。

$$\gamma_{on} = -10 \log \frac{P_{in}}{P_{on}}$$

$$\gamma_{off} = -10 \log \frac{P_{in}}{P_{off}} \quad (3.1)$$

$$EXT = \gamma_{on} - \gamma_{off} = -10 \log \frac{P_{off}}{P_{on}} \text{ (dB)}$$

上圖是光時分複用的工作原理，這與光頻分輸入有著明顯區別，光頻分的CW和CCW是在FRR腔內相互干涉，而光時分的CW和CCW是在FRR腔內相互交替傳輸。CW和CCW光時分複用的RFOG結構，其可直接解決Kerr效應和諧振峰不對稱誤差等問題，具有小體積和低成本優勢，且滿足RFOG慣性應用的需求。

(二) 背向散射噪聲計算與仿真

由圖5 TDM RFOG為例，光電探測器1上總電場包含了，CCW方向的信號光 $E_{ccw}(f_0 + \Delta f)$ 和CW方向的背向散射光 $\sqrt{EXT}E_{cw}^b(f_0 + \Delta f)$ 。

$$I_{PD1} = |E_{ccw}(f_0 + \Delta f) + \sqrt{EXT}E_{cw}^b(f_0 + \Delta f)|^2 \quad (3.2)$$

式中(3.2)， EXT 為光開關的消光比。

在TDM RFOG的諧振腔中，假設諧振腔內有一熔接點 z ，當光進諧振腔內時光在其中



進行多次環行渡越，每渡越一圈，都會在腔內的點處產生反射。在諧振腔內會有無數的反射點，將整個諧振腔長度進行積分處理，可得到背向散射的光場為[10]：

$$E_{cw}^b = E_0 e^{i(2\pi(f_0 + \Delta f)t)} \sqrt{EXT} \sqrt{(1 - \gamma_0)K_c} \sum_{n=0}^{\infty} T^n e^{-i\tau(2\pi n(f_0 + \Delta f))} \int_0^L \rho(z) e^{-z\alpha} e^{i\Delta\theta z} dz \quad (3.3)$$

式(3.3)， $\rho(z)$ 為位置 z 處入射場的複振幅向量， α 為強度的衰減係數， $\Delta\theta$ 為入射光與反射光的相位差， $T = \sqrt{(1 - \gamma_0)(1 - K_c)(1 - \alpha_l)}$ 。

假設背向散射係數的相位是隨機的，所以忽略 $e^{i\Delta\theta z}$ 這項，以及令 $K_c = 1 - (1 - \gamma_0)(1 - \alpha_l)$ ，得到背向散射光的本身光強項為：

$$I_{cw}^b = I_0 \frac{EXT(1 - \gamma_0)K_c^2}{K_c^2} \frac{1}{+4(1 - \gamma_0)(1 - \alpha_l)\sin^2(\pi(f_0 + \Delta f)\tau)} \cdot \int_0^L \int_0^L \rho^*(z_1)\rho(z_2)e^{-\alpha(z_1+z_2)} dz_1 dz_2 \quad (3.4)$$

設光纖陀螺工作在諧振曲線斜率最大處，因 $\pi(f_0 + \Delta f)\tau = \pi f_0\tau \pm \pi\Delta f\tau = N\pi \pm \pi/2F = N\pi \pm K_c/2\sqrt{(1 - \gamma_0)(1 - \alpha_l)} \cdot \sin^2(\pi(f_0 + \Delta f)\tau) \approx K_c/2\sqrt{(1 - \gamma_0)(1 - \alpha_l)}$ 。可改寫式(3.4)為：

$$I_{cw}^b = I_0 \frac{EXT(1 - \gamma_0)K_c}{K_c + 2\sqrt{(1 - \gamma_0)(1 - \alpha_l)}} \quad (3.5)$$

$$\int_0^L \int_0^L \rho^*(z_1)\rho(z_2)e^{-\alpha(z_1+z_2)} dz_1 dz_2$$

當信號光發射到光纖長度為 L 時，將式(3.5)表示為背向散射強度改寫為：

$$\langle I_{cw}^b \rangle = I_0 \frac{EXT(1 - \gamma_0)K_c}{K_c + 2\sqrt{(1 - \gamma_0)(1 - \alpha_l)}} \alpha_b LS \quad (3.6)$$

式(3.6)， α_b 為等效腔長的背向散射係數， S 為恢復因子。

在TDM RFOG最終輸出可表示為：

$$P_{TDM-out} = |E_{ccw}(f_0 + \Delta f)|^2 + EXT|E_{cw}^b(f_0 + \Delta f)|^2 \quad (3.7)$$

從光電探測器1輸出的電信號進入同步解調階段，其階段會濾除兩者乘積的所有拍頻項。

為了找到背向散射光的頻譜特性，所以需要背向散射光的功率譜密度(Power Spectral Density, PSD)。PSD與 $R_{cw}(\tau) = \langle I_{cw}^b(t)I_{cw}^b(t - \tau) \rangle$ 自我相關函數(Autocorrelation)視為一對傅立葉轉換，所以對背向散射的光場強度進行自相關的處理後在傅立葉轉換得到功率譜密度[11]。

$$S_{cw} = I_0 \frac{[EXT(1 - \gamma_0)]}{K_c^2 + 2K_c\sqrt{(1 - \gamma_0)(1 - \alpha_l)}} \frac{K_c\alpha_b LS^2}{+4(1 - \gamma_0)(1 - \alpha_l)} \quad (3.8)$$

ARW是光纖陀螺中白雜訊的一種性能指標，表徵光纖陀螺輸出的白雜訊功率譜密度

大小，功率譜密度與ARW之間的關係可表示式[12]：

$$ARW = \frac{\sqrt{S}}{60\sqrt{2}} (\circ/\sqrt{h}) \quad (3.9)$$

仿真參數如下：激光器工作波長為1550 nm、光纖有效折射率1.45、光速 $c = 3 \times 10^8$ m、耦合器的插入損耗 $\gamma_0 = 0.05$ 、耦合器的耦合係數 $K_c = 0.05$ 、光纖的傳輸損耗 $\alpha_l = 0.01$ 、光開關消光比 $EXT = -25$ dB、恢復因子 $S = 10^{-3}$ 、背向散射引起的光纖損耗 0.2 dB/km。

圖7是無抑制噪聲的仿真圖，在陀螺無轉動時，背向散射噪聲的ARW為 -30.22 dB (\circ/\sqrt{h})，由圖中可知陀螺輸出噪聲功率會先隨著頻率減少後再慢慢遞增，在頻率是1099 KHz時，有最低的ARW為 -61.6 dB (\circ/\sqrt{h})。

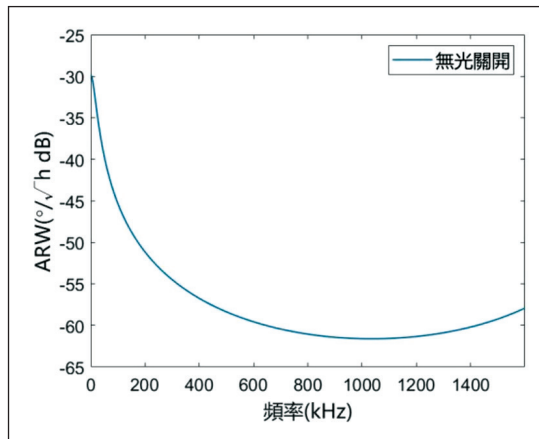


圖7 無光開關配置的 ARW 與頻率示意圖

圖8是配置光開關來抑制噪聲的仿真圖，在陀螺無轉動時，1×2商用光開關的背向散射噪聲的ARW為 -55.19 dB (\circ/\sqrt{h})，圖中光開

關的陀螺輸出噪聲功率也是隨著頻率先減少後再慢慢遞增。在頻率是1055 KHz時，1×2商用光開關地配置有最低的ARW為 -86.83 dB (\circ/\sqrt{h})。

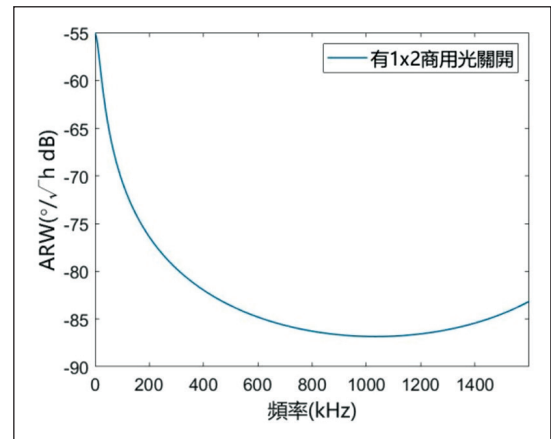


圖8 有商用光開關的 ARW 與頻率示意圖

由上可得再有光開關的配置下陀螺輸出的背向散射噪聲被抑制了不少，但對於慣性級別的陀螺要求噪聲抑制還不夠，在1×2光開關配置TDM RFOG的積分時間下背向散射噪聲為 1.27 nW/ \sqrt{Hz} ， $ARW = 3.02$ μ (\circ/\sqrt{h})。目前商用1×2光開關消光比大約在 -25 dB，若加以選用消光比更佳的光開關可以使噪聲更小。根據文獻[8]可知道2×2 MZI (Mach-Zehnder interferometer) 光開關可達到 -70 dB的消光比，若選用 -70 dB的消光比時，背向散射噪聲的ARW可達到 -100.4 dB (\circ/\sqrt{h})。

四、結論

光纖陀螺中存在多種光學噪聲，在噪聲



中又以背向散射影響最大，這是限制陀螺精度提升的主要原因。TDM RFOG在時間上分開CW和CCW兩路光，可以有效的抑制這部分噪聲，其關鍵元件是光開關，而光開關的消光比決定串擾大小。

光開關的另一個重要參數是響應時間，目前商用光開關已達到微秒量級，所以CW/CCW的切換時間是影響FOG響應時間，其中又以FRR響應時間為主。FRR響應時間是穩定輸出需要的時間，光開關 P_{on} 和 P_{off} 時間小於響應時間，實際設計中應保證光開關的週期為FRR響應時間的整數倍。本文通過計算仿真得到，在 1×2 光開關消光比 -25 dB 時，背向散射噪聲的ARW為 $-55.19 \text{ dB}(\circ/\sqrt{\text{h}})$ ；光開關消光比在 -70 dB 時，背向散射噪聲的ARW可達到 $-100.4 \text{ dB}(\circ/\sqrt{\text{h}})$ ，在抑制背向散噪聲提高 45.21 dB ，為高精度RFOG的研製提供了新的理論參考。

參考文獻

- 張旭琳、徐平，“諧振式光學陀螺環形諧振腔內背向反射研究”，光學學報，第29卷，第8期，2302-2307（98年）。
- 郭麗君、王田瑞、何家杰、潘晨浩，“影響諧振式光纖陀螺精細度的因素分析”，半導體光電，第41卷，第2期，187-190（109年）。
- Yinzhou Zhi, Lishuang Feng, Junjie Wang, and Yichuang Tang, “Reduction of backscattering noise in a resonator integrated optic gyro by double triangular phase modulation,” Appl. Opt. 54, 114-122 (2015).
- Zhiguo Jiang, Zongfu Hu, and Changsong Fu, “Angular random walk limited by Rayleigh backscattering in resonator fiber optic gyros,” Appl. Opt. 56, 9414-9422 (2017).
- Feng Zhang and John W. Y. Lit, “Direct-coupling single-mode fiber ring resonator,” J. Opt. Soc. Am. A 5, 1347-1355 (1988).
- L. F. Stokes, M. Chodorow, and H. J. Shaw, “All-single-mode fiber resonator,” Opt. Lett. 7, 288-290 (1982)
- 梅魁、蔣治國、胡宗福，“諧振式光纖陀螺的誤差及噪聲分析”，半導體光電，第41卷，第1期，29-34（109年）。
- Zongfu Hu, Zhiguo Jiang, Jinfang Wang and Su Mei, “Resonator fiber optic gyros with light time-division input and multiplexing output in clockwise and counterclockwise directions”, Chinese Optics Letters, 18(03), 15-20 (2020).
- 錢偉文、吳傳斌、林伊、馬慧蓮，“基於光開關抑制背向散射噪聲的諧振式微光學陀螺”，中國激光，第47卷，第10期，263-269（109年）。
- 馬慧蓮、鮑慧強、金仲和，“二氧化硅光波導環形諧振腔的背向散射特性”，中國激光，第37卷，第1期，105-109（99年）。
- P. Gysel and R. K. Staubli, “Statistical properties of Rayleigh backscattering in single-mode fibers,” Journal of Lightwave Technology, vol. 8, no. 4, 561-567 (1990).
- Hanzhao Li, Yi Lin, Lu Liu, Huilian Ma, and ZHonghe Jin, “Signal processing improvement of passive resonant fiber optic gyroscope using a reciprocal modulation-demodulation technique,” Opt. Express 28, 18103-18111 (2020).