

文章编号: 0253-2239(2004)08-1079-6

采用多量子阱器件的无线光通信差拍接收方案研究*

刘 璐¹ 汤俊雄¹ 石 珏¹ 张治国² 黄 绮² 付盘铭²

(¹ 北京大学信息科学技术学院, “量子信息与测量”教育部重点实验室, 北京 100871)
(² 中国科学院物理研究所, 北京 100080)

摘要: 研究一种采用光折变多量子阱器件的无线光通信自差拍接收方案。与寻常相干接收方案相比,省去了中频跟踪电子系统;与量子阱器件零拍方案相比,采用中频窄带滤波器,提高了接收端机的输出信噪比。理论上研究了自差拍相干接收方案,从其物理机制出发,结合信噪比分析,探讨了影响相干接收方案的主要因素。建立了该方案的实验系统,并开展了有意义的实验研究。理论分析及实验结果表明,该方案对激光大气传输所引起的诸多不利影响皆有一定的抑制作用,因而有可能应用于卫星地面激光通信和地面无线光通信系统。

关键词: 光纤通信技术;光折变多量子阱器件;差拍相干接收;地面无线光通信;星地激光通信

中图分类号: TN929.12 文献标识码: A

Research of Heterodyne Reception Optical Wireless Communication Utilizing Photorefractive Multiple Quantum Well Device

Liu Lu¹ Tang Junxiong¹ Shi Jue¹ Zhang Zhiguo² Huang Yi² Fu Panming²

(¹ *Quantum Information and Measurement Key Laboratory of Ministry of Education, School of Electronics Engineering and Computer Science, Peking University, Beijing 100080*
² *Institute of Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100871*)

(Received 19 May 2003; revised 7 November 2003)

Abstract: A novel heterodyne reception of optical wireless communication adopting photorefractive multiple quantum well device is discussed. Compared with the conventional heterodyne scheme, it avoids the complicated intermediate-frequency tracking system. Compared with homodyne reception using multiple quantum well device, the noise is suppressed dramatically with the help of electronic intermediate-frequency filter. Consequently, the signal-to-noise ratio is improved. The theoretical expression of self-coherence signal is deduced. And the expression of signal-to-noise ratio is given. The impact on the novel heterodyne reception scheme is also analyzed in detail. An experiment of the scheme is conducted. The result of theoretical calculations and experiment show that the scheme can repress to a certain extent many problems due to laser transmission in the atmosphere. This new scheme can be applied to satellite-ground laser communication and terrestrial optical wireless communication.

Key words: optical fiber communication technology; photorefractive multiple quantum well device; heterodyne coherent reception; terrestrial optical wireless communication; satellite-ground laser communication

1 引 言

近年来,无线光通信逐渐成为通信领域的一个

热点。一方面,地面无线光通信作为小区宽带接入问题的众多解决方案之一,正在逐步得到人们的认可。另一方面,随着卫星通信对带宽需求的不断增加,星间激光通信和星地激光通信的研究也提到日程上来了。由于地面无线光通信和星地激光通信的传输媒介均是大气,而大气信道特性对激光光束有

* 国家自然科学基金(60077019-60240420237)资助课题。

E-mail: liulupku@163.com

收稿日期:2003-05-19;收到修改稿日期:2003-11-07

着严重的影响,例如引起光束能量锐减、波阵面畸变以及偏振面无规则变化等问题,因此在目前已经商用的地面无线光通信系统和正在研究的星地激光通信系统中,直接检测比较常见,而相干检测则较罕见。然而相干检测具有直接检测所达不到的高灵敏度,这无疑是一个很诱人的优点。然而,常规的相干检测需要繁琐的中频跟踪系统,并对激光器的线宽和频漂提出了很高的要求;而且大气的湍流也容易使混频效率大大降低。我们在文献[1]中探索了采用光折变多量子阱器件(MQW)的光通信零拍相干接收方案,给出了定性分析和初步实验结果,但没有对方案进行理论分析和探讨。本文对文献[1]零拍方案进一步完善,探讨了采用多量子阱的差拍相干接收方案。该方案引入“本地自差拍”的设想,不仅

省掉了繁琐的中频跟踪电子系统;同时,由于采用电子中频滤波器,对噪声有较大的抑制作用,减轻了接收系统光学前端的负担。本文对该方案及其性能进行了理论分析,并给出了差拍接收方案的实验结果。另外,对影响相干接收方案的重要问题(波长转换效率及自差拍增益)进行了理论分析及实验研究,理论与实验结果吻合较好。

2 采用多量子阱器件的差拍相干接收方案原理及理论分析

差拍新方案实验布局见图1。本方案主要由三部分组成,下面分别对本方案各部分的原理进行描述和理论分析。

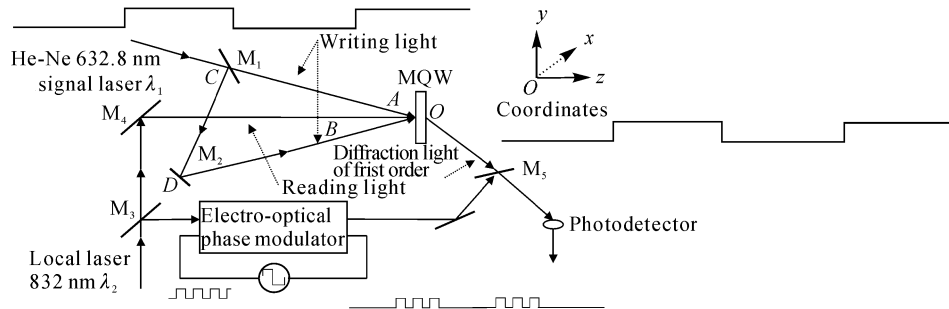


Fig. 1 Layout of new heterodyne reception adopting photorefractive quantum device

2.1 信号光干涉产生量子阱光栅

He-Ne 激光波长为 λ_1 , 通过斩波器对其进行外调制模拟调幅信号光, 斩波频率为 500 Hz。斩波信号光由 M_1 和 M_2 镜分成两束光(写光), 会聚到多量子阱上, 在其表面相干叠加产生明暗相间的条纹, 形成光强的非均匀空间分布。由于多量子阱光折变效应, 载流子浓度形成相对应的空间分布, 经过扩散及漂移过程以及材料的电光效应和电吸收效应, 形成量子阱光栅(吸收栅和折射率栅)。数字信号的“1”码可在多量子阱上形成光栅, 而“0”码则不能。由于多量子阱的响应速度很快, 这样数字信号就以干涉的方式写入光栅。为了分析方便, 坐标系选择如图1所示, 写光 A 和 B 相交于多量子阱器件上的原点 O, 在其表面发生干涉。

设斩波信号光入射到 M_1 镜时, C 点的相位为 δ_C , 则原点 O 处的相位为:

对于 A 光束:

$$\delta_{OA} = \delta_C + \delta_{M_1} + (2\pi/\lambda_1)n\Delta L_{CO} \quad (1)$$

对于 B 光束:

$$\delta_{OB} = \delta_C + \delta_{M_2} + (2\pi/\lambda_1)n\Delta L_{CDO}, \quad (2)$$

其中 λ_1 是入射光波长, n 是折射率, $n\Delta L_{CO}$ 是 A 光束从 C 点到 O 点的光程, $n\Delta L_{CDO}$ 是 B 光束从 C 点, 经 D 点, 传播到 O 点的光程, δ_{M_1} 是 M_1 透射可能引起的相位跃变, δ_{M_2} 是 M_2 反射可能引起的相位跃变。

又设 A 光和 B 光传播的方向角分别为 (α_A, β_A) 和 (α_B, β_B) , 于是波前 $Z=0$ 上的相位分布为

$$\phi_A(x, y) = k(x\cos\alpha_A + y\cos\beta_A) + \delta_{OA},$$

$$\phi_B(x, y) = k(x\cos\alpha_B + y\cos\beta_B) + \delta_{OB},$$

故 A 光和 B 光的相位差为

$$\begin{aligned} \delta(x, y, 0) = \phi_A(x, y) - \phi_B(x, y) = \\ k(\cos\alpha_A - \cos\alpha_B)x + \\ k(\cos\beta_A - \cos\beta_B)y + \delta_{OA} - \delta_{OB}, \end{aligned} \quad (3)$$

联合(1)式、(2)式和(3)式可知, $\delta(x, y, 0)$ 与分波前的相位 δ_C 无关, 而只与镜子的配置有关。

由于 M_1 镜为半透半反镜, 故 A 光和 B 光的振幅相等, 设为 A_m , 则 A 光、B 光的复振幅分别为

$$U_A(x, y) = A_m \exp[i\phi_A(x, y)],$$

$$U_B(x, y) = A_m \exp[i\phi_B(x, y)],$$

故当 A 光和 B 光在多量子阱材料上发生干涉时, 其干涉场强度分布为

$$I(x, y) = [U_A(x, y) + U_B(x, y)] \times [U_A(x, y) + U_B(x, y)]^* = 2A_m^2 [1 + \cos \delta(x, y, 0)], \quad (4)$$

从(4)式可以看出,由于相位相减的原理, $\delta(x, y, 0)$ 与分束前的相位 δ_c 无关,所以干涉强度也与入射光波的相位 δ_c 无关。这就意味着若光束在大气中传播导致相位 δ_c 发生畸变,从理论上讲,不会影响干涉强度分布,亦不会影响量子阱光栅的建立。此外,理论分析表明,接收机的光路布局将影响系统性能。

而在常规光外差方案中,若信号光波前的相位随机变化,会影响干涉条纹的对比度,大大降低了外差效率。

2.2 量子阱光栅的衍射

如图1所示,接收机的本地激光,经 M_3 镜分成两束。一束经 M_4 镜入射到多量子阱作为读光。若多量子阱上由于信号光干涉已经形成了光栅,则会产生一级衍射光。数字信号的“1”码可在多量子阱上形成光栅,产生一级衍射光,而“0”码则不能。于是,一级衍射光的强度将随着信号光强而变化。这表明,远地信号光所携带的信息已经转载到一级衍射光上了,同时,实现了激光载波的转换,即由远地信号光波长 λ_1 变换成本地光波长 λ_2 。

从上述原理可知,远地信号光(写光 I_w)与读光 I_r 的一级衍射光 I_d 的波长转换效率 γ 是整个系统的关键指标。

$$\gamma = \frac{I_d}{I_w} = \frac{I_d}{I_r} \frac{I_r}{I_w} = \eta' \frac{I_r}{I_w}, \quad (5)$$

式中衍射效率 η' 为一级衍射光 I_d 与读光强度 I_r 之比,可达到3%;但读光 I_r 能做到比 I_w 高2个数量级以上,因此 γ 可以大于1,这表明起变频作用的衍射光强度可大于写光强度。

2.3 自差拍相干接收

见图1,本地激光经 M_3 镜反射后的光束进入电光调相器(调相频率为 ω_m)。之后,本振调相光与读光的一级衍射光合束射到光电检测器上。由于差拍的两束光均来自本地激光器,从而实现了“本地自差拍”。

2.3.1 差拍信号的数学分析

读光的一级衍射光(新信号光)携带了从远地传来的数字信息。当发射端发送“1”码时,接收端产生新信号光;当发送“0”码时,接收端则不产生新信号光。

由于光电流与光强只相差一个比例常量,为简便计,直接用光强代替光电流信号。

当有新信号光时,设其强度为 I_s ,则该新信号光与强度为 I_L 的本振光发生差拍,输出信号为

$$S = I_s + I_L + 2\sqrt{I_s I_L} \cos \varphi, \quad (6)$$

其中 $\varphi = \varphi_s - \varphi_L$,是新信号光相位 φ_s 与本振光相位 φ_L 之差。

当无新信号光时,则输出信号为

$$S = I_L, \quad (7).$$

为了用一个统一的数学表达式描述上述结果,定义幅度为1,频率为 ω_s 的方波信号为

$$S(t) = \{\text{sgn}[\sin(\omega_s t)] + 1\}/2, \quad (8)$$

其中,

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1, & x > 0 \\ -1, & x \leq 0 \end{cases}$$

当有新信号光时, $S(t) = 1$;当无新信号光时, $S(t) = 0$ 。因此,新信号光的光强表达式为 $I_s(t) = I_s S(t)$ 。综合(6)式、(7)式、(8)式,可得,差拍输出信号的表达式为

$$I(t) = I_L + (I_s + 2\sqrt{I_s I_L} \cos \varphi) S(t), \quad (9)$$

(9)式中第一项为直流分量 I_L ,第二项是差拍后的幅度为 $I_s + 2\sqrt{I_s I_L} \cos \varphi$ 的方波信号。

差拍增益为

$$\nu = \frac{I(t) - I_L}{I_s} = 1 + 2\sqrt{I_L/I_s} \cos \varphi, \quad (10)$$

(10)式表明,差拍增益与本振光强度 I_L 和两光相位差 φ 有关。

本方案采用电光晶体调相方式,新信号光与本振光的相位差 φ 是时间的函数,用 $\varphi(t)$ 来表示

$$\varphi(t) = \beta_m \{\text{sgn}[\sin(\omega_m t) + b] + 1\}/2 + \varphi_0, \quad (11)$$

式中 β_m 是调相指数, ω_m 是调相频率, b 是占空比因子, φ_0 是新信号光与本振光的初始相位差。结合(9)式和(11)式,差拍信号的表达式为

$$I(t) = I_L + \{I_s + 2\sqrt{I_s I_L} \cos \{\beta_m \{\text{sgn}[\sin(\omega_m t) + b] + 1\}/2 + \varphi_0\}\} S(t), \quad (12)$$

差拍信号将作周期性变化,当调相频率 ω_m (5000 Hz)远大于信号光斩波频率 ω_s (500 Hz)时,斩波信号将调制到频率为 ω_m 的载波上,产生调幅

调相信号。经过中频滤波、放大、解调后,可恢复所携带的信号。

2.3.2 信噪比(R_{SN})分析

通信系统的关键问题是信噪比。在 2.3.1 中已经给出差拍信号的表达式。下面分析本方案的系统信噪比(R_{SN})。

每秒入射的信号光子数 n_s 与信号功率成正比, 则 $n_s \sim I_s$; 同理, 对于本地振荡, 则有 $n_L \sim I_L$ 。设光电探测器的量子效率为 η , 结合(9)式, 总光电流 $i(t)$ 为

$$i(t) = \eta e [n_s + n_L + 2\sqrt{n_s n_L} \cos \varphi(t)], \quad (13)$$

散弹噪声是本系统噪声的重要来源, 主要由三部分构成:

设中频滤波器的带宽为 B , 则

1) 检波电流中的本振激光直流分量 $\eta e n_L$ 对应的散弹噪声为

$$i_L^2 = 2\eta n_L e^2 B;$$

2) 信号光电流 $\eta e n_s$ 对应的散弹噪声为

$$i_S^2 = 2\eta n_s e^2 B;$$

3) 背景光电流 $\eta e n_B$ 对应的散弹噪声为

$$i_B^2 = 2\eta n_B e^2 B.$$

总的噪声 i_N^2 为上述三种噪声之和, 即

$$i_N^2 = 2\eta(n_L + n_s + n_B)e^2 B, \quad (14)$$

由式(13)可得, 中频滤波后的信号电流 i_s (均方根值) 为

$$i_s = (2\eta e \sqrt{n_s n_L}) / \sqrt{2} = \eta e \sqrt{2n_s n_L}, \quad (15)$$

因此, 综合(14)式和(15)式, 经过中频滤波后的输出信噪比 R_{SN} 为

$$R_{SN} = \frac{i_s^2}{i_N^2} = \frac{(\eta e \sqrt{2n_s n_L})^2}{2\eta(n_L + n_s + n_B)e^2 B} = \frac{\eta n_s n_L}{(n_L + n_s + n_B)B}, \quad (16)$$

由(10)式和(16)式可知, 提高本地激光器的输出功率 I_L , 可以得到一定的差拍增益。同时, 也可以提高写光与读光的一级衍射光的波长转换效率[参见(5)式]。但是, 本地激光器的输出功率不能无限地提高, 后文第 4 节指出, 本地激光的纹波效应会限制其输出功率的提高。

当本地振荡激光 n_L 远大于信号光 n_s ; 同时, 为了减轻背景光对外差系统的影响, 要求本地振荡 n_L 远大于背景光 n_B , 而由于本方案的相干性滤波机制, 使得背景光不能写入量子阱光栅, 于是, 输出信噪比 R_{SN} 可简化为

$$R_{SN} = \frac{\eta n_s n_L}{n_L B} = \frac{\eta n_s}{B}, \quad (17)$$

由于噪声主要集中在低频段, 从理论分析可知,

差拍接收使信号处理移至中频段, 在窄带中频滤波器的配合下, 提高了输出信噪比。

3 差拍接收方案实验结果

新方案的原理性实验结果如图 2、图 3、图 4 所示。图 2 是本振调相光与读光的一级衍射光合束射到光电检测器上, 经过混频产生的本地自差拍信号。从图中可以看出, 斩波光信号 ω_s (500 Hz) 已经调制在调相频率 ω_m (5 kHz) 上, 形成调幅调相信号; 图 3 是本地自差拍信号经过中频滤波器后, 得到的中频调幅信号。从图中可以看出, 噪声得到了较大的抑制; 图 4 是经过中频放大、解调后恢复的斩波光信号 (500 Hz)。

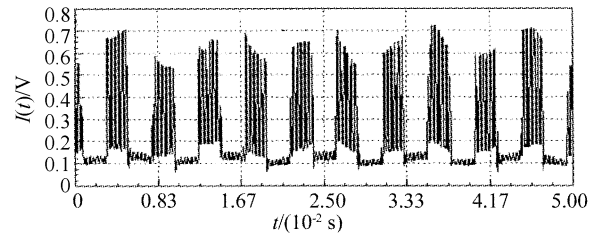


Fig. 2 Signal of amplitude and phase modulation, the chopping signal is modulated at phase-modulation frequency (ω_m)

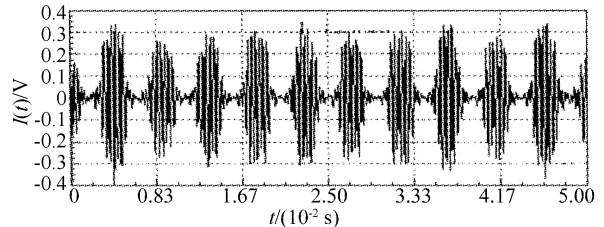


Fig. 3 The intermediate-frequency signal of amplitude modulation. The noise is suppressed strongly

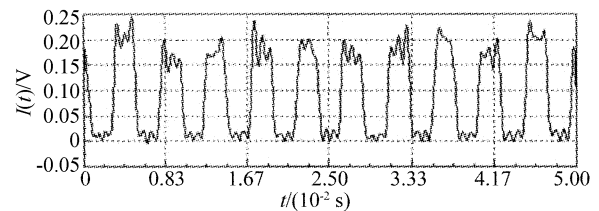


Fig. 4 The demodulated chopping signal

4 本地激光纹波对自差拍信号影响的理论分析及实验研究

自差拍增益是本系统的重要参量。自差拍信号的品质直接影响后续电路的处理, 进而影响整个通

信系统的质量。而本地激光器的纹波效应是影响自差拍输出信号的关键因素。

定义激光纹波的表达式为 $f(t)$ 。由于激光纹波主要来自于电源,在一阶近似的条件下,可用正弦波来描述,即 $f(t) = \sin(\omega_f t)$, ω_f 为纹波圆频率,在本实验中,纹波频率为 100 Hz。

这样,含有激光纹波的强度为 I_s 的信号光强表达式为 $I_s(t) = [1 + mf(t)]I_s S(t)$,其中 m 为纹波因子,在本实验中,取 $m = 0.3$ 。

同理,本振光表达式为 $I_L = [1 + mf(t)]P$,其中 P 为本振光强度因子。

本实验采用电光晶体调制激光的相位,(12)式中 $\beta_m = \pi, b = 0, \varphi = \pi/2$,故新信号光与本振光的相位差的表达式为

$$\varphi(t) = \frac{\pi}{2} \{ \text{sgn}[\sin(\omega_m t)] + 1 \} + \frac{\pi}{2}.$$

在本实验中,调相频率 ω_m 为 5 kHz,纹波频率为 100 Hz,信号光斩波频率为 500 Hz,接收信号光

功率为 $12.5 \mu\text{W}$ 。为了方便起见,理论计算中的各项频率值比对应的实际值缩小 100 倍。即调相频率为 50 Hz,纹波频率为 1 Hz,信号光斩波频率为 5 Hz。

图 5 是在信号光斩波的条件下,本振激光 $P=2$ (a)和 $P=0.5$ (b)时的自差拍实验波形(左图)和相应的理论计算波形(右图)。可以看出,理论计算与实验波形相当吻合。

上述实验表明,本地激光的纹波调制到了中频载波上。这是由于纹波和斩波信号都是对信号光强的调制,所以都被转载到中频信号上了。因此,在实际差拍系统中,应尽量抑制本地激光的纹波噪声。式(5)表明,提高本地激光(读光)强度 I_r 可以提高波长转换效率 γ ,但纹波效应限制了本地激光强度的上限,从而也限制了差拍增益的上限。因为当本地激光大到一定程度后,带来的噪声可能超过差拍的中频信号。

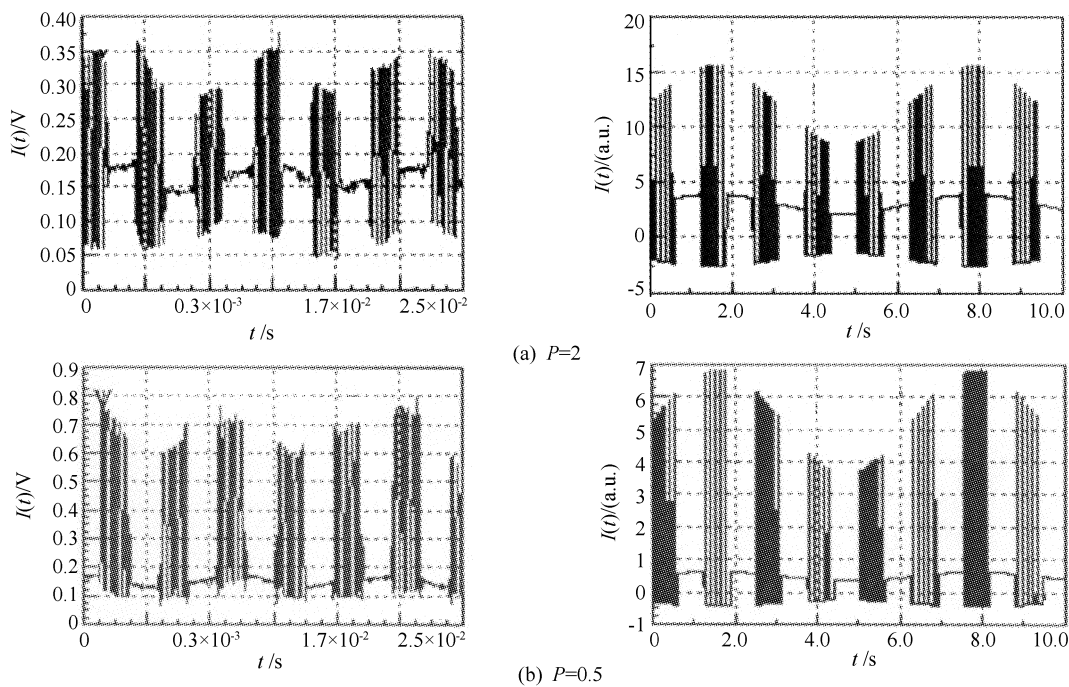


Fig. 5 Comparison of the experimental result to the theoretical calculation of the influence of local laser power fluctuation on self-heterodyne signal when the signal laser is chopped

结束语 1) 本文提出并实现了一种采用多量子阱器件的差拍相干检测方案。该方案具有下列优点:

(i) 省掉了繁琐的中频电子跟踪系统

在常规差拍方案中,由于信号光和本振光是独立的,频率的相对漂移对差拍有极大的影响,故需要复杂的中频跟踪系统。本方案采用本地自差拍,频

率不稳的影响由于相位相减而抵消掉了,因此对激光的线宽和频漂要求很低,只需通过控温使激光波长对准材料的激子峰(线宽 5 nm)即可。从这个意义上讲,去掉了繁琐的中频电子跟踪系统。并且光路与电路系统比常规外差方案简单、稳定、可靠。另外,一级衍射光除了带上信号光的调制信号外,其他

特性(如偏振、频率等)并无改变,与本地激光一致,所以本地差拍有较好的差拍效果。

(ii) 通过相干叠加消除相位畸变

当激光在大气中传输时,大气的湍流会使激光的相位发生畸变。若采用常规的相干检测,将会大大降低混频效率,使相干检测的性能劣化。在本方案中,远地信号光通过分束自相干写入光栅,由(3)式和(4)式可以看出,相位畸变不会影响干涉强度分布,也不会影响后续信号处理,亦即本方案能达到抑制相位畸变的目的。为了证实这一设想,我们让入射信号光通过一个水槽。水槽中盛有温度为 25 °C 的水。逐渐滴入 60 °C 热水,在水槽中产生折射率梯度,从而使在其中传输的光束波面发生畸变。本方案的实验研究表明,光束波面畸变效应得到了相当程度的抑制。限于篇幅,该项研究将另文发表,此处不再赘述。

(iii) 具有相干滤波作用

抑制太阳背景光是无线光通信的重要问题。量子阱光栅写入过程要求两光严格相干。信号光是相干光,其相干长度决定了入射到多量子阱的光路设计。因此,可以通过合理地配置两光光程差(图 1),使背景光不能写入光栅。此即本方案的相干滤波作用。但是,在零拍方案中,仍需要采用优质窄带滤光

器(例如原子滤光器^[2])的配合,才可达到较佳的信噪比。而本文提出的差拍方案,由于采用了相干滤波和中频滤波机制,有很强的滤波能力,不但提高了整机性能,同时也减轻了光学前端的设计,只需普通的干涉滤光片即可达到较高的信噪比。

2) 本文还就接收方案的关键问题(波长转换效率及自差拍增益)进行了研究。理论与实验表明,提高本地激光功率是重要措施,但该参量受限于本地激光纹波。可以通过对本地激光器电源系统加以改进来减轻纹波的影响。

3) 由于本项研究可以抑制激光在大气中传输所遇到的波面畸变、偏振面无规则变化以及太阳杂散光等问题,因此在地面及星地光通信中,有潜在的应用前景。

参 考 文 献

- 1 Shi Jue, Xiao Haiqiao, Tang Junxiong. New coherent reception optical communication utilizing photorefractive multiple quantum well device. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1999, **19**(2): 265~269 (in Chinese)
- 2 Tang junxiong, Wang Qingji, Li Yimin. Experimental study of a model of digital space optical communication system with new quantum devices. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(15): 2619~2622