

基于双光纤布拉格光栅滤波的量子密钥分发误码率分析

赵顾颢¹ 赵尚弘¹ 么周石² 郝晨露³ 蒙文¹ 王翔¹ 朱子行¹ 刘丰²

¹ 空军工程大学信息与导航学院, 陕西 西安 710077
² 中国空间技术研究院西安分院, 陕西 西安 710000
³ 空军工程大学防空反导学院, 陕西 西安 710077

摘要 给出了偏振编码副载波复用量子密钥分发方案中的信号边带严格的表达式,并分析了调制过程中量子误码率的主要来源。基于此提出了一种基于双光纤布拉格光栅的量子密钥分发滤波方案,该方案采用两个光纤布拉格光栅反射端对向放置的结构设计,利用其极窄的反射谱将所需的信号频率从较强的杂波频率中滤出。仿真结果表明,该滤波结构能够有效地滤除副载波复用量子密钥分发系统中信号频率以外的互调边带,从而降低量子误码率。

关键词 量子光学; 量子密钥分发; 光纤布拉格光栅; 副载波复用; 滤波

中图分类号 O431.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0918001

Quantum Key Distribution Analysis for Filtering Scheme Based on Double Fiber Bragg Grating

Zhao Guhao¹ Zhao Shanghong¹ Yao Zhoushi² Hao Chenlu³ Meng Wen¹
Wang Xiang¹ Zhu Zihang¹ Liu Feng²

¹ School of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710077, China
² Xi'an Branch of China Academy of Space Technology, Xi'an, Shaanxi 710000, China
³ School of Air and Missile Defense, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710077, China

Abstract A strict express of signal sideband in the polarization coding subcarrier multiplexing quantum key distribution scheme is presented. The source of quantum bit error rate in the modulation process is analyzed. A filtering scheme based on double fiber Bragg grating (FBG) for the polarization coding subcarrier multiplexing quantum key distribution is presented. The reflection ends of these two FBG are placed toward each other. The reflection spectra are used to filter out the signal frequency from clutter frequency. The simulation results show that, the reflection structure can filter the intermodulation sideband except signal frequency and decrease the quantum bit error rate.

Key words quantum optics; quantum key distribution; fiber Bragg grating; subcarrier multiplexing; filter

OCIS codes 270.5568; 270.5565; 130.7408

1 引言

量子密钥分发协议自 1984 年提出以来,由于其独特的远距离安全分发密钥的特点受到了世界各国研究者的重视,大量的研究从理论和实验两个方面不断充实量子密钥技术。目前百公里量级的自由空间

信道^[1-2]和光纤信道^[3-4]中的量子密钥实验已经实现。基于此,实现以星地信道为骨干链路,以地面光纤网络为区域辅助的全球量子密钥分发网络已没有原则性的障碍。然而,成码率是远距离量子密钥分发需要解决的一个关键性问题。在百公里量级的自由

收稿日期: 2013-03-28; **收到修改稿日期**: 2013-04-23

基金项目: 中国空间技术研究院科技委员会发展研究项目(2011WK11)

作者简介: 赵顾颢(1986—),男,博士研究生,主要从事空间光通信及量子密钥等方面的研究。E-mail: zghlupin@163.com

导师简介: 赵尚弘(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事光通信与激光技术等方面的研究。

E-mail: zhaoshangh@yahoo.com.cn

空间量子密钥分发实验中,成钥率只有数十比特。因此,成钥率^[5-10]是未来全球量子密钥网络能否投入实用的关键。本课题组^[11]之前提出了一种偏振编码的副载波量子密钥分发方案,该方案通过调整射频副载波信号的相位差,独立地将偏振态信息调制在不同边带中,达到了并行传输的目的。国际上已经有成功的相位调制偏振态^[12]和频率编码的副载波复用^[10]的量子密钥分发实验。实验说明偏振编码的副载波复用有实际应用的可能。而在这个方案中很重要的一点是,由于交调的存在,几乎所有边带中都含有信号边带的偏振态信息。如果不能将信号边带以外的边带频率滤除的话,将会影响系统的安全性,同时也会提高系统的量子误码率(QBER)。

本文在研究偏振编码的副载波复用量子密钥分发方案量子误码率的基础上,提出了一种基于双光纤布拉格光栅的滤波方案。该方案能够利用光纤布拉格光栅 FBG 极窄的滤波带宽,在不改变光子偏振态的前提下,有效地将所需频率滤出。

2 边带信号分析

在副载波复用系统中,非线性失真是主要的误码率来源之一。现有的副载波复用非线性分析手段必须假设小信号输入,即调制系数很小^[13]。最后的结果往往也需要复杂的级数求和,并忽略部分较小

的信号。这使得分析结果非常复杂并存在一定误差。本文给出了严格的各阶边带的功率表达式。假设加载在电光调制器的电信号 $V_i(t)$ 中包含一个直流偏置电压 V_{dc} 和频率为 ω_i 的已调相位副载波。副载波的幅度为 V_i ,随机相位表示为 Φ_{ki} 。

$$V_i(t) = V_{dc} + V_i \cos(\omega_i t + \theta_i), \quad (1)$$

光载波的功率可写为

$$E_{in} = E_0 \exp(i\omega_0 t), \quad (2)$$

以两路副载波调制信号为例,电光晶体输出光信号的包络一般表达式为

$$A(t) = E_0 \exp(i\omega_0 t) \exp(i\theta) \cdot$$

$$\exp[im_1 \cos(\omega_1 t + \theta_1) + im_2 \cos(\omega_2 t + \theta_2)] \quad (3)$$

其中 ω_1, ω_2 为两路射频副载波的频率, m_1, m_2 为相应的调制系数, $m_j = \pi V_j / V_\pi$ ($j = 1, 2$), V_π 为调制器的半波电压。 θ 为偏置电压引起的偏置相移, θ_1, θ_2 为射频副载波信号的相位。将(3)式写为傅里叶级数形式

$$A(t) = E_0 \exp(i\omega_0 t) \exp(i\theta) \sum_{p=-\infty}^{+\infty} a_p \exp[ip(\omega_1 t + \theta_1)] \sum_{q=-\infty}^{+\infty} b_q \exp[iq(\omega_2 t + \theta_2)], \quad (4)$$

其中 $a_p = i^p J_p(m_1)$, $b_q = i^q J_q(m_2)$, $J_k(\cdot)$ 表示 k 阶第一类贝塞尔函数。输出频谱 $A(\omega)$ 是 $A(t)$ 的傅里叶变换:

$$A(\omega) = E_0 \exp(i\theta) \frac{1}{2\pi} \left[2\pi \sum_{p=-\infty}^{+\infty} a_p \exp(ip\theta_1) \delta[\omega - (\omega_0 + p\omega_1)] \times 2\pi \sum_{q=-\infty}^{+\infty} b_q \exp(iq\theta_2) \delta(\omega - q\omega_2) \right] = 2\pi E_0 \sum_{p=-\infty}^{+\infty} \sum_{q=-\infty}^{+\infty} \exp[i(\theta + p\theta_1 + q\theta_2)] i^p J_p(m_1) i^q J_q(m_2) \delta[\omega - (\omega_0 + p\omega_1 + q\omega_2)]. \quad (5)$$

在文献[11]中图1的系统中上路调制器和下路调制器的偏振态正交,理论上两路信号仅在副载波的相位有不同,以狄拉克算符表示合路信号的偏振态得:

$$A_{\text{compound}}(\omega) = A_{\text{up}}(\omega) |x\rangle + A_{\text{down}}(\omega) |y\rangle = 2\pi E_0 \exp(i\theta) \sum_{p=-\infty}^{+\infty} \sum_{q=-\infty}^{+\infty} i^p J_p(m_1) i^q J_q(m_2) \delta[\omega - (\omega_0 + p\omega_1 + q\omega_2)] \times \frac{\sqrt{2}}{2} \exp[i(p\theta_{1x} + q\theta_{2x})] \{ |x\rangle + \exp[i(p\theta_{1y} + q\theta_{2y} - p\theta_{1x} - q\theta_{2x})] |y\rangle \}. \quad (6)$$

合成信号的功率可以写为

$$P_{\text{compound}}(\omega) = A_{\text{compound}}(\omega) \times A_{\text{compound}}^*(\omega) = 4\pi^2 E_0^2 \sum_{p=-\infty}^{+\infty} \sum_{q=-\infty}^{+\infty} J_p(m_1)^2 J_q(m_2)^2 \delta[\omega - (\omega_0 + p\omega_1 + q\omega_2)]. \quad (7)$$

这个简练的表达式可以方便地给出任意阶边带信号的功率,而不需要像其他方法中一样假设调制系数非常小。在此基础上,可以研究两路副载波信

号输入情况下任意阶的互调失真项和高阶谐波项。一般来说,在并行传输的信道数较小时,可以通过分配射频副载波信号的频率来最大程度地减小互调失

真带来的影响。但是,当需要并行传输的边带数很多时,互调产生的高阶边带往往与信号边带的间隔非常小,从而使互调失真很难避免。为此,在研究互调失真时,假设了一种最坏的副载波频率选择,即两

路射频副载波频率分别为 10 GHz 和 20 GHz。此时,不论选用一阶边带还是二阶边带作为信道。互调边带与信号边带都完全重合。此时的信号边带与互调边带之间的关系可以用表 1 表示。

表 1 信号边带与互调边带之间的系数关系

Table 1 Relationship between signal sideband and intermodulation sideband

Frequency	Signal sideband			Intermodulation sideband		
	Sideband order	Order	Power	Sideband order	Order	Power
$(\omega_0 + 10)$ GHz	First	$p=1, q=0$	$4\pi^2 E_0^2 J_1(m)^2$	Second	$p=-1, q=1$	$4\pi^2 E_0^2 J_1(m)^2 J_{-1}(m)^2$
$(\omega_0 + 20)$ GHz	order	$p=0, q=1$	$4\pi^2 E_0^2 J_1(m)^2$	order	$p=2, q=0$	$4\pi^2 E_0^2 J_2(m)^2$
$(\omega_0 + 30)$ GHz	Second	$p=1, q=1$	$4\pi^2 E_0^2 J_1(m)^2 J_1(m)^2$	Third	$p=2, q=-1/p=3, q=0$	$4\pi^2 E_0^2 J_2(m)^2 J_{-1}(m)^24\pi^2 E_0^2 J_3(m)^2$
$(\omega_0 + 40)$ GHz	order	$p=0, q=2$	$4\pi^2 E_0^2 J_2(m)^2$	order	$p=2, q=1$	$4\pi^2 E_0^2 J_2(m)^2 J_1(m)^2$

这里只考虑了比信号边带高一阶的互调边带,这是因为互调边带比信号边带高出两阶以上时,互调边带的功率比信号边带低两个数量级以上,所产生的影响有限。可以看出每一个信号边带最少有一个与之频率相等的互调边带。其中当使用二阶边带($\omega_0 + 30$) GHz 为信号边带时,有两个三阶边带与其频率相等。

3 量子误码率与双光纤布拉格光栅滤波结构

假设信号边带的偏振态可表示为 $1/\sqrt{2}\{|x\rangle + \exp[i(\varphi_0)]|y\rangle\}$, 互调边带的偏振态可表示为 $1/\sqrt{2}\{|x\rangle + \exp[i(\varphi_1)]|y\rangle\}$ 。则互调边带平行于信号边带的偏振分量的系数为

$$H = 1/2\{\langle x| + \exp[-i(\varphi_0)]\langle y|\} \{ |x\rangle + \exp[i(\varphi_1)]|y\rangle\} = 1/2\{1 + \exp[i(\varphi_1 - \varphi_0)]\}, \quad (8)$$

垂直分量的系数为

$$L = \sqrt{1 - H \times H^*}, \quad (9)$$

交调边带引入的误码率可以写为

$$f_{\text{QBER}} = \sum_{\varphi_0=0, \pi/2, \pi, 3\pi/2} \sum_{\varphi_1=0, \pi/2, \pi, 3\pi/2} \frac{1}{16} \frac{L^2 P_{\text{IM}}}{P_{\text{S}} + P_{\text{IM}}}, \quad (10)$$

式中 P_{IM} 为交调边带功率, P_{S} 为信号边带功率。除了互调带来的误码之外,相位噪声是另一个无法避免的误码来源。所以,相位噪声也应当在计算 f_{QBER} 时被充分考虑。相位噪声的功率谱密度表达式可以写为^[14]

$$P_n(\omega) = P_0 \frac{2}{\pi \Delta\omega} \frac{1}{1 + [(\omega - \omega_0)/(\Delta\omega/2)]^2}, \quad (11)$$

式中 $\Delta\omega$ 是半峰全宽(3 dB 带宽), ω_0 是激光脉冲的中心频率。在仿真中假设 $\Delta\omega = 10$ MHz, 激光脉冲的总功率为 $P_0 = 10^{-3}$ W。频率为($\omega_0 + 10$) GHz、($\omega_0 + 20$) GHz、($\omega_0 + 30$) GHz 和($\omega_0 + 40$) GHz 的相位噪声功率为 -46.033 dBm(2.49×10^{-5} mW)、-52.059 dBm(6.224×10^{-6} mW)、-55.583 dBm(2.765×10^{-6} mW)和 -58.083 dBm(1.555×10^{-6} mW)。这些噪声功率与调制系数无关。假设载频的偏振态为 45° 线偏振光,并且不会随着射频副载波的相位改变而改变。则相位噪声将会使 f_{QBER} 升高。修正后的量子误码率公式可以写为

$$f_{\text{QBER}_n} = \sum_{\varphi_0=0, \pi/2, \pi, 3\pi/2} \sum_{\varphi_1=0, \pi/2, \pi, 3\pi/2} \frac{1}{16} \frac{L^2 P_{\text{IM}} + L_n^2 P_n}{P_{\text{S}} + P_{\text{IM}} + P_n}, \quad (12)$$

式中 L_n 是垂直于信号偏振态的噪声偏振分量的系数, P_n 是信号频率处的噪声功率。图 1 给出了不同边带的 f_{QBER} 和调制系数的关系。不论使用一阶边带还是二阶边带作为信号光,其误码率曲线均有一个拐点,当调制系数小于这个拐点时,相位噪声是量子误码的主要来源。当调制系数高于这个拐点时互调边带则会对信号产生较大的影响。

从(6)式中可以看出互调边带中带有副载波信号的相位信息,也就是说互调边带的偏振态与信号边带的偏振态之间有一定的关联。因此,出于量子密钥安全需求的考虑,必须在传输前将除信号边带之外的频率尽可能地全部滤除。根据上文推导的结果,各边带的频率与射频副载波的频率直接相关。当多个射频信号之间的频率间隔较小时,输出脉冲的各边带之间的频率间隔也非常小。此时,要将信号边带与互调边带区分开来是非常困难的。光纤布拉格光栅的反射谱能够满足 5 GHz 的滤波带宽需求。但是经典的基于光纤布拉格光栅的滤波结构需

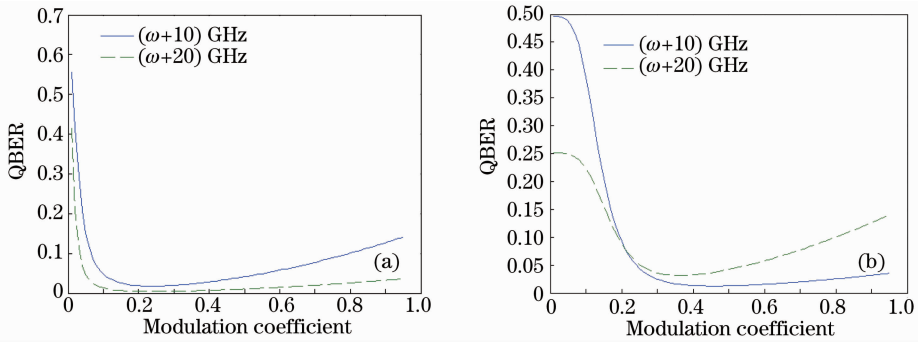


图 1 不同边带处的 QBER 和调制系数的关系。(a) 一阶边带;(b) 二阶边带

Fig. 1 Relationship between QBER and modulation coefficient with different sidebands. (a) First order sideband; (b) second order sideband

要光环形器的配合。而光环形器本身会改变光子的偏振态,因此对于偏振编码的量子密钥分发系统而言,这种滤波结构是无法使用的。对此,设计了一个由光纤合/分路器、衰减器、光纤布拉格光栅组成的滤波系统,其结构如图 2 所示。

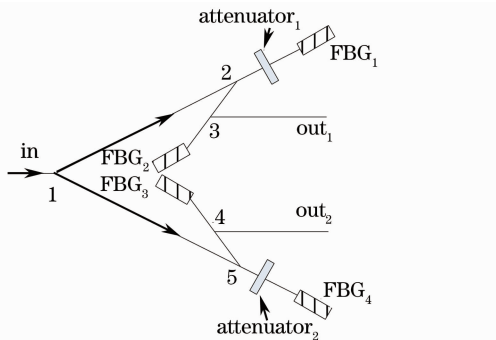


图 2 双光纤布拉格光栅滤波系统

Fig. 2 Filtering system based on double fiber Bragg gating

调制脉冲从 in 口入射,被光纤合/分路器 1 等功率地分为两束。每束光进入一路滤波分支,每一路滤波分支负责滤出一个信号边带。以上路分支的滤波系统为例介绍其工作过程。脉冲由两路光纤合/分路器 2 的一臂进入衰减器,光纤合/分路器 2 的另一臂连接另一个光纤合路器 3。衰减后的脉冲进入光纤布拉格光栅(FBG₁)。经过滤波的反射脉冲再次被衰减器衰减。二次衰减后的光脉冲进入光纤分路器 2 被分为两束,其中一束沿入射路径返回光纤合/分路器 1。另一束进入光纤合/分路器 3,光纤合/分路器 3 的合路出口连接另一个光纤布拉格光栅(FBG₂),FBG₁ 和 FBG₂ 的反射频谱完全相同。FBG₂ 的反射频谱与 FBG₁ 的反射频谱完全相同。FBG₂ 的反射脉冲进入光纤分路器 3 并被等功率地分为两路。一路进入光纤合/分路器 2 的一臂,另一路进入出射端口 out₁。下路滤波分支的滤波方式与上述滤波支路的工作方式完全相同,区别在于光纤

布拉格光栅的反射频谱不同,且衰减器的衰减系数根据所需频谱的功率决定。输出口 out₂ 与 out₁ 再次进行合路形成输出光脉冲。

为了验证滤波器的滤波效果,考虑一种信号边带与互调边带不重合,且最小边带间距离仅有 5 GHz 的情况。假设两路射频副载波信号的频率为 20 GHz 和 25 GHz。调制产生的一阶边带为($\omega_0 \pm 20$) GHz、($\omega_0 \pm 25$) GHz,二阶边带为($\omega_0 \pm 5$) GHz、($\omega_0 \pm 45$) GHz、($\omega_0 \pm 40$) GHz、($\omega_0 \pm 50$) GHz。图 3 为合成脉冲频谱。

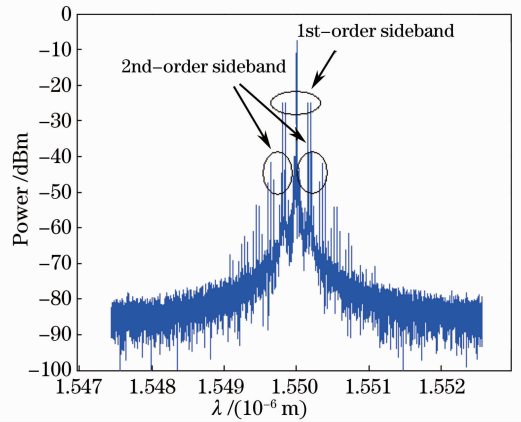


图 3 副载波复用量子密钥分发合成输出脉冲频谱

Fig. 3 Compound pulse spectrum of subcarrier multiplexing quantum key distribution

假设所选择的信号边带为($\omega_0 - 2 \times 20$) GHz 和($\omega_0 + 2 \times 25$) GHz,两个信号边带之间的间隔为 90 GHz,这个频率间隔完全可以用普通的阵列波导光栅进行解复用。在这两个信号边带与附近的互调边带之间的最小间隔为 5 GHz。利用上述滤波系统对图 3 的调制脉冲频谱进行滤波,滤波信号的频谱如图 4 所示。调制脉冲光中心波长为 1550 nm,光源功率为 1 mW。射频副载波频率为 20 GHz 和 25 GHz,功率为 5 mW。衰减器的衰减系数为

-18 dBm, FBG₁ 和 FBG₂ 的反射频率为 $(\omega_0 - 2 \times 20)$ GHz (193.3744 THz), FBG₃ 和 FBG₄ 的反射频率为 $(\omega_0 + 2 \times 25)$ GHz (193.4644 THz)。从图中可以看出,载波和交调边带完全被滤除。两个信号边带的功率基本相等,其差异主要来源于光源的相位噪声的功率。

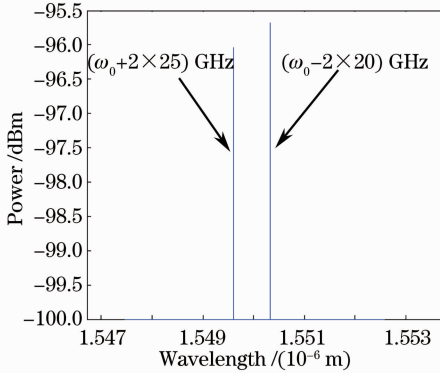


图4 经过滤波后的输出脉冲频谱

Fig. 4 Pulse spectrum after filtering

图5为滤波后两个信号边带的量子误码率与调制系数之间的关系。从图中可以看出,滤波后的误码率随着调制系数的增加而趋近于0。这是由于滤波器将互调边带基本滤除,此时相位噪声是主要的误码来源,而相位噪声不随调制系数的增加而提高。当调制系数大于0.17时,两个信号边带上的量子误码率小于11%。由此可以看出,当调制端滤波系统性能较好时,采用较高的调制系数能够降低量子误码率。

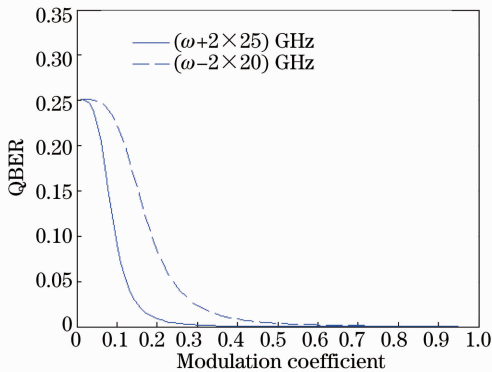


图5 滤波后的量子误码率与调制系数的关系

Fig. 5 Relationship between QBER and modulation coefficient after filtering

需要说明的是,单从结构上来看可能存在两个问题:1)由FBG₁反射的脉冲将会沿in口返回激光器,对激光器的输出光产生影响;2)FBG₁和FBG₂的反射端对向放置之间,且两个FBG的反射谱完全相同,这样光脉冲将在它们之间来回振荡,从而对后续的光脉冲产生影响。

对于这个问题,在FBG₁的反射端之前放置了一个衰减器,这个衰减器有三个作用:1)对入射光脉冲的功率进行衰减,使输出脉冲满足相干量子密钥通信的功率需求。根据计算,在入射光脉冲功率为1 mW,衰减器系数为-53 dB时,输出端功率为-189.18 dBm,恰好略低于单个光子的功率水平;2)将返回激光器的光脉冲进行两次衰减,降低其功率。在以上的参数条件下,反射回激光器的脉冲功率仅为-180.38 dBm,这个功率远不会对激光器产生任何影响;3)阻止激光脉冲在两个光纤布拉格光栅之间振荡。假设两个光纤布拉格光栅之间产生了振荡。经过计算,光脉冲第一次被FBG₂反射后的功率为-186.18 dBm,而这一脉冲再次被FBG₁反射和衰减器衰减,第二次到达FBG₂时功率仅剩-295.7 dBm。这一功率水平即使是对于量子密钥通信系统而言也是不足为道的。因此,可以看成在两个FBG之间无法产生振荡。

由于空间量子密钥分发中采用光子的偏振态作为编码载体,因此滤波结构也应当能够有偏振无关的特性。普通的光纤对于偏振态有较大的影响,而保偏光纤对于两组基上的4个偏振态不能完全保偏。低双折射单模光纤的拍长可以达到800 m以上,即每800 m光子的偏振态完成一次线偏振-椭圆偏振-圆偏振-椭圆偏振-线偏振的变化,并且双光纤布拉格光栅滤波结构所需要的光纤长度较短。据估计,利用低双折射单模光纤制作光纤布拉格光栅^[15]和合/分路器能够较好保持输出偏振态的稳定。当然,这需要通过实验的检验。

实际的调制系统可能由于射频源的频率稳定性问题和调制晶体的非线性,造成一定的边带频率偏移和非线性失真交调。此时信号边带的中含有其他的高阶频率,故会引入一定的偏振噪声。

4 结 论

给出了一个偏振编码的量子密钥分发方案中各边带的严格表达式,这个表达式不需要假设小信号的射频调制输入,也无需进行多项式的近似。在此基础上,分析了调制过程中的量子误码率的主要来源。分析发现,当调制系数较小时,光源的相位噪声是量子误码主要的来源,而随着调制系数的增加,与信号边带频率无法区分的互调边带将大大提高误码。为了滤除与信号频率相隔很小的互调边带,提出了一种基于双光纤布拉格光栅的滤波结构,该结构将两个光纤布拉格光栅输出端对向放置,利用反

射谱相同的两个光纤布拉格光栅实现滤波。由于衰减器的加入,反射回激光器的光脉冲功率将极小,且在两个光纤布拉格光栅之间不会产生振荡。仿真与计算结构显示,该滤波结构能够有效地将频率间隔为 5 GHz 的交调边带和载频滤除,同时量子误码率也大大降低。

参 考 文 献

1 R Ursin, F Tiefenbacher, M T Schmitt, *et al.*. Entanglement-based quantum communication over 144 km[J]. *Nat Phys*, 2007, 3: 481–486.
 2 M T Schmitt, H Weier, M Fuerst, *et al.*. Experimental demonstration of free-space decoy-state quantum key distribution over 144 km[J]. *Phys Rev Lett*, 2007, 98(1): 010504.
 3 C Gobby, Z L Yuan, A J Shields. Quantum key distribution over 122 km of standard telecom fiber[J]. *Appl Phys Lett*, 2004, 84(19): 3762–3764.
 4 P Eraerds, N Walenta, M Legré M, *et al.*. Quantum key distribution and 1 Gbps data encryption over a single fibre[J]. *New J Phys*, 2010, 12(3): 063027.
 5 Fu Mingxing, Zhao Feng, Lu Yiqun, *et al.*. Department of electronic and information engineering [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2007, 44(10): 39–47.
 傅明星, 赵 峰, 路铁群, 等. 量子密钥分发网络应用技术研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2007, 44(10): 39–47.
 6 Jiao Rongzhen, Zhang Chao, Ma Haiqiang. Decoy-state quantum key distribution with practical light source[J]. *Acta Phys Sinica*, 2011, 60(11): 110303.
 焦荣珍, 张 弢, 马海强. 基于实用光源的诱感态量子密钥分配研究[J]. *物理学报*, 2011, 60(11): 110303.
 7 Liu Wenyu, Li Ning, Wang Changqiang, *et al.*. Quantum key distribution based on six-photon quantum error-avoiding code[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(11): 1568–1572.

刘文予, 李 宁, 王长强, 等. 基于六光子量子避错码的量子密钥分发方案[J]. *光学学报*, 2005, 25(11): 1568–1572.
 8 K Yoshino, M Fujiwara, A Tanaka, *et al.*. High-speed wavelength-division multiplexing quantum key distribution system [J] *Opt Lett*, 2012, 37(2): 223–225.
 9 B Ortigosa, A Capmany. Subcarrier multiplexing optical quantum key distribution[J]. *Phys Rev A*, 2006, 73(2): 024305.
 10 J Mora, A Ruiz-Alba, W Amaya. Experimental demonstration of subcarrier multiplexed quantum key distribution system[J]. *Opt Lett*, 2012, 37(11): 2031–2033.
 11 Zhao Guhao, Zhao Shanghong, Yao Zhoushi, *et al.*. Subcarrier multiplexing quantum key distribution based on polarization coding[J] *Acta Phys Sin*, 2012, 61(24): 240306.
 赵顾颢, 赵尚弘, 么周石, 等. 基于偏振编码的副载波复用量子密钥分发研究[J]. *物理学报*, 2012, 61(24): 240306.
 12 Zhizhong Yan, Evan Meyer-Scott, Jean-Philippe Bourgoin, *et al.*. Novel high-speed polarization source for decoy-state BB84 quantum key distribution over free space and satellite links[J]. *Lightwave Technology*, 2013, 31(9): 1399–1408.
 13 J Capmany, J Mora, A A Ruiz. Analysis of subcarrier multiplexed quantum key. distribution systems: signal, intermodulation, and quantum bit error rate [J]. *IEEE J Sel Topics Quantum Electron*, 2009, 15(9): 1607–1621.
 14 Cao Xiangke, He Yao, Zhang Rongzhu. Study of laser phase noise and its suppression[J]. *Optical Technique*, 2008, 34(z1): 188–189.
 曹翔科, 何 耀, 张蓉竹. 激光的相位噪声特性以及抑制方法研究[J]. *光学技术*, 2008, 34(z1): 188–189.
 15 Tian Chunhua, Li Qianghua, Guo Bingxia, *et al.*. Research on stokes parameters of low-birefringence uniform fiber Bragg grating[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(11): 1106001.
 田春华, 励强华, 郭炳霞, 等. 低双折射均匀光纤布拉格光栅斯托克斯参量的研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 48(11): 1106001.

栏目编辑:李文喆