

doi:10.3788/gzxb20134206.0721

量子信令的偏振态差分相位编码方案及仿真

曹亚梅, 聂敏, 刘晓慧

(西安邮电大学 通信与信息工程学院, 西安 710061)

摘 要: 为了研究量子通信信令系统, 实现多用户之间进行通信, 提出了一种量子信令的偏振态差分相位编码方案, 阐述了编码过程. 发送方使用光子的不同偏振态来表示不同的信令, 然后对光子进行相位调制, 通过前后两个光脉冲的相位差进行量子信令编码. 接收方根据两个光脉冲在光合束器处发生干涉, 由于相位差不同可以被不同的检测器检测到而得到 0 或 1 信号完成解码. 根据高斯脉冲分布, 导出了光子传输过程中由于脉冲延迟引起的差分相位编码系统的量子误码率与脉冲宽度以及延迟时间分布参量之间的定量关系, 推出高斯分布的单光子脉冲在确定的时间抖动分布情况下系统的量子误码率. 对量子信令编码效率和误码率进行分析并仿真, 结果表明本文提出的编码方案可以达到 75% 编码效率, 能够满足量子移动通信的需要.

关键词: 量子通信; 信令系统; 差分相位; 相位调制; 信令编码

中图分类号: 文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2013)06-0721-6

Differential Phase Encoding Scheme for the Polarization State of Quantum Signaling and Simulation

CAO Ya-mei, NIE Min, LIU Xiao-hui

(School of Communication and Information Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710061, China)

Abstract: In order to study the quantum communication signaling system and realize quantum communication between multiple users, a kind of differential phase encoding scheme for the polarization state of quantum signaling is proposed, and details of the encoding process are described. The sender uses polarization states of different photons to represent different signalings, and then implements phase modulation for the photons and encodes the quantum signaling based on the phase difference between the impulses before and after encoding. In order to complete the decoding, two optical pulses occur interference at the beam splitter. The signal 0 or 1 can be detected by different detectors according to their phase difference. According to the Gaussian pulse distribution, quantitative relationship among the quantum bit error rate caused by the pulse delay to differential phase of encoding system, pulse width and delay time in photonic transmission process are induced. Besides, quantum bit error rate of single-photon pulses distribution of Gaussian is calculated in determined timing jitter. Finally, quantum signaling encoded efficiency and bit error rate are analyzed and simulated. The results show that the encoded efficiency of proposed coding scheme can reach 75% that can satisfy the needs of quantum mobile communication.

Key words: Quantum communication; Signaling system; Differential phase; Phase modulation; Signaling encoded

基金项目: 国家自然科学基金项目 (Nos. 61172071, 61201194)、陕西省自然科学基金计划 (No. 2010JM8021)、陕西省教育厅自然科学基金研究项目 (No. 2010JK834) 和西安邮电学院青年教师科研基金 (No. ZL2010-05) 资助

第一作者: 曹亚梅 (1988-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为量子通信和移动通信. Email: jessica_1105@126.com

导师: 聂敏 (1964-), 男, 教授, 博士后, 主要研究方向为量子通信、移动通信、现代通信网理论等. Email: niemin@xupt.edu.cn

收稿日期: 2013-01-11; **录用日期:** 2013-03-07

0 引言

近年来,随着量子通信技术的不断发展,点对点的量子通信技术日趋成熟,多用户之间的通信已成为当下研究的热点^[1-3].在多用户之间进行量子通信时,信令是该系统的控制部分,而信令网作为通过程的重要支撑网络之一,在量子移动通信网络中具有不可替代的作用^[4-5].然而,量子移动通信信令系统的各项关键技术尚未展开研究,所以,研究量子移动通信的信令系统及其关键技术已经变得刻不容缓.

在量子信息理论与技术中,信息的表示与传输离不开编码.1993年Shumacher提出了一个初步的量子信源编码,后来得到了Jozsa和Holevo的简化和推广^[6];1995年,Shor提出9比特编码方案;1998年,Chau提出了量子卷积码;1999年,Steane提出了量子Read-Muller码等^[6].目前,量子编码^[6-7]的种类也非常多,主要是利用量子位进行的相位编码、偏振编码以及频率编码,还有利用纠缠对进行的两光子、三光子、四光子超密编码等.信令作为一种控制信号,根据功能的不同,种类比较多,而信令所携带的信息量相对来说比较少.光子有很多的偏振态,所以,可以利用光子偏振方向的不同来表示不同种类的信令.

本文提出了量子信令的偏振态差分相位编码,即利用光子不同的偏振态来表示不同的量子信令,然后对光子的偏振态进行相位调制.根据前后两个光脉冲的相位差实现量子信令编码,完成信令消息的传送.这种编码方案继承了相位编码的快速性,对码生成效率有很大的提高.

1 量子信令的分类和表示

信令系统是通信网的神经系统,信令是终端与交换机之间,或者交换机与交换机之间传递的一种信息,这种信息可以指导终端,交换系统协同运行,在指定的终端间建立和拆除临时通信通道,并维护网络本身正常运行.电话局间通信基本信令流程如图1.

在整个通信过程中,由于每条信令所要实现的功能不同,所以信令的种类非常多.局间电话通信过程中根据工作区域的不同,可以把信令分为用户线信令和局间信令.终端和交换机之间的用户上传的信令叫做用户线信令,交换机与交换机之间传递的信令叫做局间信令.用户线信令主要包括用户终端向交换机发送的监视信令和地址信令,局间信令主要用来控制连接的建立、监视、释放、网络的测

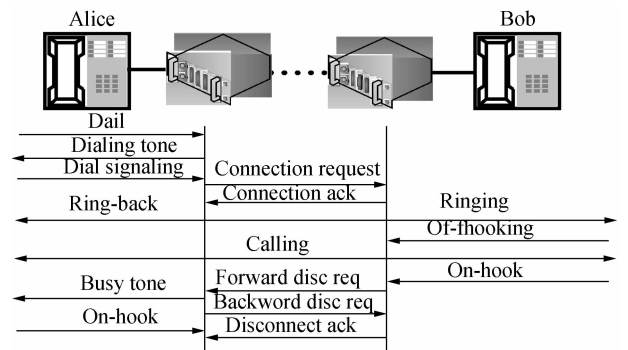


图1 电话局间通信基本信令流程
Fig. 1 Bureau of communications between basic signaling process

试等功能.如图1所示,用户线信令主要有主被叫用户的摘机、挂机信令,还有主叫用户拨打的电话号码,以及交换机向用户发送的拨号音和忙音等.局间信令有通信请求信令、通信证实信令、链路释放请求信令以及证实信令、工作状态监视信令、维护管理信令等.

在整个量子通信信令系统中,为了区分不同的信令,满足通信过程中需要的多种信令,使用量子态 $|\Phi\rangle$ 表征量子信令,信令量子态 $|\Phi\rangle$ 可以表示为

$$|\Phi\rangle = a|0\rangle + b|1\rangle \quad (1)$$

式中 $|0\rangle$ 表示量子态的水平极化状态, $|1\rangle$ 表示量子态的垂直极化状态.式中 a 、 b 表示系数,是量子态 $|\Phi\rangle$ 的一对概率幅,满足关系式 $a^2 + b^2 = 1$,表示量子态 $|\Phi\rangle$ 处在 $|0\rangle$ 和 $|1\rangle$ 的连续态中.不同的 a 和 b 的组合,代表了不同的量子状态,也就表示了不同的量子信令,由于 a 和 b 有很多不同的组合,所以可以得到很多不同的量子态来表示多种信令,来满足量子通信的顺利进行.

2 量子信令偏振态差分相位编码原理和过程

2.1 量子信令偏振态差分相位编码原理

量子信令偏振态差分相位编码方案利用光子干涉原理进行编码^[8-10],使用了延时测量的思想,消除了传输过程中出现的光脉冲延迟误差,减少了误码率.其原理如图2.

图2中,LD是脉冲激光器,AP是自动调偏器,A是衰减器, BS_1 、 BS_2 、 BS_3 、 BS_4 为光分束器; BS 为合束器,PM为相位调制器;SR量子态存储器(或光学延迟装置),主要是为了消除传输过程中发生的脉冲延迟,减小误差. P_0 和 P_1 为2个单光子检偏器; APD_0 和 APD_1 为单光子探测器.发送方首先将光子射入 BS_1 的一个入射端口,然后被分为2列子波.当两列子波经过不同的光程后,分别在 BS_2 和 BS_3 处又被分别分为两列子波1和3(2和4),由于

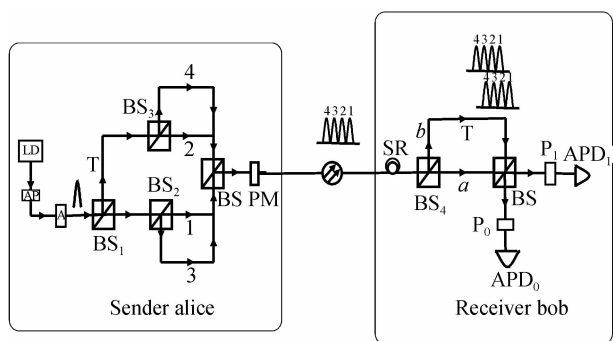


图2 量子信令偏振态差分相位编码

Fig. 2 Differential phase encoding scheme for the polarization state of quantum signaling

光程的不同,子波 1、2、3、4 会依次通过光合束器 BS,经相位调制器 PM 进行相位调制,完成编码.接收方收到子波 1、2、3、4,首先经过量子态存储器 SR,消除传输过程中引起的脉冲延迟,然后按照脉冲宽度的大小发送子波 1、2、3、4,经过光分束器 BS₄把每一列子波再分别分成两列子波依次通过光路 *a* 和 *b*,光路 *a* 和 *b* 的光程差恰好是两脉冲之间的间隔,这样会使得经过 *b* 路的子波 1 和经过 *a* 路的子波 2 同时到达 BS 处,光子 1 和 2 发生干涉,同理,2 和 3,3 和 4 也会发生干涉.干涉的结果由两列子波的相位差决定.两列子波的相位差为 $\Delta\Psi = \Psi_1 - \Psi_2$.当 $\Delta\Psi = \pm 2k\pi$ (k 为整数)时,2 列子波发生相长干涉,光子出射到 APD₁ 处代表信号 1;当 $\Delta\Psi = \pm(2k+1)\pi$ (k 为整数)时,2 列子波发生相消干涉,光子出射到 APD₀ 处代表信号 0.在整个过程中,光子的偏振态不变.

2.2 量子信令偏振态差分相位编解码过程

发送方 Alice 预备发送随机数列 $\{a_k\}$,其中 $k = 0, 1, 2, 3, 4, \dots, n$;编解码的过程为:

1) Alice 首先制备 n 个偏振方向确定的光子,然后通过光分束器 BS₁、BS₂、BS₃,一列光脉冲可以分成 4 列子波 1、2、3、4;

2) 4 列子波先后通过合束器 BS 到达相位调制器 PM.根据序列 $\{a_k\}$ 的值对子波依次进行相位调制, a_k 的值表示 Alice 传送的码值; $a_k = 1$ 表示对 Ψ_1 、 Ψ_2 用相同的 0 或 π 进行相位编码, $a_k = 0$ 则表示对 Ψ_1 、 Ψ_2 用不同的 0 或 π 进行相位编码.同时如果要传输的光子偏振方向发生改变,则可以由经典信道告诉接收方.

3) Bob 收到子波 1、2、3、4 后首先存入量子态存储器(或光学延迟装置)SR,来消除传播过程中引起的延迟,然后依次使得子波 1、2、3、4 通过光分束器 BS₄,每一列子波再次被分成两列子波,经由光路 *a*、*b* 进行传输,由于光路 *a* 和 *b* 光程差不同,会使得通过光路 *b* 的光子 1 和通过光路 *a* 的光子 2 (2 和 3、3

和 4)在合束器 BS 处发生干涉,根据相位差的不同,光子会出射到不同光子探测器.若两列子波的相位差为 $\Delta\Psi = \Psi_1 - \Psi_2$.当 $\Delta\Psi = \pm 2k\pi$ (k 为整数)时,2 列子波发生相长干涉,光子出射到 APD₁ 处代表信号 1;当 $\Delta\Psi = \pm(2k+1)\pi$ (k 为整数)时,2 列子波发生相消干涉,光子出射到 APD₀ 处代表信号 0.从而得到随机数列 $\{a_k\}$,完成解码过程.

4) Bob 得到码值后,通过经典信道告知 Alice 光子的探测时间,根据 Alice 的调制数据,她知道 Bob 端是哪个探测器在响应,则 Alice 和 Bob 可以通过经典信道对数据进行筛选,他们舍去所有不匹配的数据,经过筛选后留下的数据就是筛后数据,如果误码率大于一定的值,则舍去这次传输数据,又重新进行第一步.

当 $\{a_k\} = 1001$ 时,偏振态差分相位编码的量子数据传输过程如表 1.

表 1 量子信令的偏振态差分相位编码数据传输过程
Table 1 The data transmission process of differential phase encoding scheme for the polarization state of quantum signaling

Sender	Ψ_1	Ψ_2	$\Delta\Psi$	$\cos \Delta\Psi$	APD ₀	APD ₁	Receiver
1	0	0	0	1	0	1	1
0	0	π	$-\pi$	-1	1	0	0
0	π	0	π	-1	1	0	0
1	π	π	0	1	0	1	1

3 编码效率分析

量子信令偏振态差分相位编码利用前后两个脉冲的相位差进行编码,表示信令所携带的消息,利用与相位差独立的光子偏振态表示不同的量子信令.编码效率公式^[1]定义为

$$\eta = \frac{Q_B}{Q_A + C_A} \quad (2)$$

式中 Q_B 为 Bob 收到的有量子比特数; Q_A 是为了得到 Q_B Alice 发送的总量子比特数; C_A 为公开信道传输的经典比特数.其中 $Q_B = 3n$, $Q_A = n$, $C_A = 3n + k$,其中 n 表示发送光子的个数, k 表示偏振方向不同的光子的个数, $1 \leq k \leq n$,即当 $k=1$ 时,编码过程中使用的光子偏振方向相同,及是对一条信令进行编码. $k=n$ 时,编码过程中所有的光子偏振方向均不同,就是传输了 n 条信令.即效率为

$$\eta = \frac{Q_B}{Q_A + C_A} = \frac{3n}{n + 3n + k} \geq \frac{3}{5} \quad (3)$$

当 n 趋近于无穷大时 $\eta_{\max} = 75\%$,可见,本文提出的编码方案具有高效性.

4 偏振态差分相位编码方案编码误码率分析

误码率(Bit Error Ratio, BER)是通信系统性能

的一个重要参量,量子比特误码率是指接收方接收到的误比特数与总比特数的比率,用 R_{QBE} 表示. 对于偏振态差分相位编码,量子比特误码率主要取决于干涉引起的误码率,即两干涉脉冲到达干涉器 BS 的时间差,如图 3,脉冲宽度为 T , τ 是两个脉冲到达干涉仪 BS 的时间差,即脉冲 2 的脉冲时延.

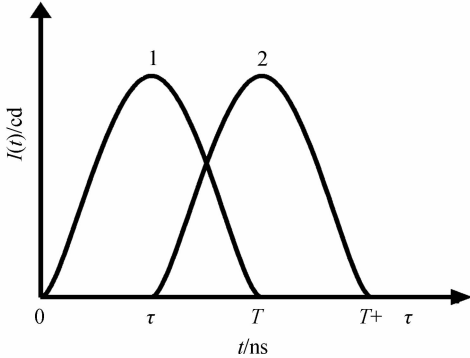


图 3 光脉冲的干涉

Fig. 3 The interference of optical pulse

根据干涉叠加的情况可以把数轴分为 3 个区域:1) $\tau=0$, 脉冲完全干涉叠加,这种情况下误码率为 0; 2) $0 < \tau < T$, 脉冲部分干涉叠加,随着 τ 的增大,误码率增大; 3) $\tau \geq T$, 脉冲没有干涉叠加,误码率达到最大, $R_{\text{QBE}} = 50\%$. 所以,只有控制好到达干涉器 BS 处的两个干涉脉冲的脉冲延时差 τ , 就可以实现低误码率的偏振态差分相位编码.

根据光的干涉叠加原理,干涉光强 $I(t)$ 为

$$I(t) = \int (I_1(t) + I_2(t) + 2\sqrt{I_1(t)I_2(t)} \cdot \cos \Delta\Psi) dt \quad (4)$$

式中 $I_1(t)$ 和 $I_2(t)$ 分别代表这两叠加干涉的光脉冲光强; $\Delta\Psi$ 代表这两个干涉光脉冲之间的相位差.

干涉叠加的量子误码率^[12-13]为

$$R_{\text{QBE}} = \frac{1-V}{2} \quad (5)$$

式中 V 是干涉现象的可见度 (Visibility, 简称 V). 可见度定义为

$$V = \frac{I_{\text{MAX}} - I_{\text{MIN}}}{I_{\text{MAX}} + I_{\text{MIN}}} \quad (6)$$

式中 I_{MAX} 和 I_{MIN} 分别代表干涉叠加后出现的最大和最小输出光强. 当两干涉脉冲之间的相位差是 0 时, 发生相长干涉, 光强达到最大 I_{MAX} , 当相位差为 π 时, 发生相消干涉, 光强最小, 根据(4)式可以得到

$$I_{\text{MAX}} = \int_0^{T+\tau} (I_1(t) + I_2(t) + 2\sqrt{I_1(t)I_2(t)} \cos 0) dt = \int_0^{\tau} I_1(t) dt + \int_{\tau}^{T+\tau} I_2(t) dt + \int_{\tau}^T (I_1(t) + I_2(t) + 2\sqrt{I_1(t)I_2(t)}) dt = \int_0^{\tau} I_1(t) dt + \int_{\tau}^{T+\tau} I_1(t-\tau) dt + \int_{\tau}^T (I_1(t) + I_1(t-\tau) + 2\sqrt{I_1(t)I_1(t-\tau)}) dt \quad (7)$$

$$I_{\text{MIN}} = \int_0^{T+\tau} (I_1(t) + I_2(t) + 2\sqrt{I_1(t)I_2(t)} \cos \pi) dt = \int_0^{\tau} I_1(t) dt + \int_{\tau}^{T+\tau} I_2(t) dt + \int_{\tau}^T (I_1(t) + I_2(t) - 2\sqrt{I_1(t)I_2(t)}) dt = \int_0^{\tau} I_1(t) dt + \int_{\tau}^{T+\tau} I_1(t-\tau) dt + \int_{\tau}^T (I_1(t) + I_1(t-\tau) - 2\sqrt{I_1(t)I_1(t-\tau)}) dt \quad (8)$$

把式(6)、(7)、(8)分别代入(5), 化简可得

$$R_{\text{QBE}} = \frac{1-V}{2} = \frac{1}{2} - \frac{I_{\text{MAX}} - I_{\text{MIN}}}{2(I_{\text{MAX}} + I_{\text{MIN}})} = \frac{1}{2} - \frac{\int_{\tau}^T 4\sqrt{I_1(t)I_1(t-\tau)} dt}{2\int_0^T 2I_1(t) dt + \int_{\tau}^{T+\tau} 2I_1(t-\tau) dt} = \frac{1}{2} - \frac{\int_{\tau}^T \sqrt{I_1(t)I_1(t-\tau)} dt}{\int_0^T I_1(t) dt + \int_{\tau}^{T+\tau} I_1(t-\tau) dt} \quad (9)$$

式(9)是光脉冲光强分布函数为一般形式时部分叠加干涉引起的量子误码率结果, 可见当脉冲时延 $\tau=0$ 时, 量子误码率 $R_{\text{QBE}}=0$; 当脉冲延迟时间大于脉宽, 即 $\tau > T$ 时, 积分的下限大于上限, 式中第二项的积分将为 0, 两脉冲不发生干涉, 这时的量子误码率为 50%, 达到最大.

光脉冲形状一般为高斯分布, 所以在干涉端的两个单光子概率幅度脉冲为高斯脉冲. 其复振幅分布为

$$E(t) = A \exp(i\Psi - \frac{(t-\mu)^2}{2\delta^2}) \quad (10)$$

所以根据图 3 的光脉冲图形, 光强度 $I(t)$ 可以表示为

$$I(t) = |E(t)|^2 = \left| A \exp(i\Psi - \frac{(t-T/2)^2}{2\delta^2}) \right|^2 = A^2 \exp^2(i\Psi) \exp^2\left[-\frac{(t-T/2)^2}{2\delta^2}\right] = A^2 \exp^2\left[-\frac{(t-T/2)^2}{2\delta^2}\right] \quad (11)$$

所以图 3 中的两个干涉光脉冲可以表示为 $I_1(t) = I(t)$, $I_2(t) = I(t-\tau)$, 并且

$$I(t-\tau) = |E(t-\tau)|^2 = A^2 \exp^2\left[-\frac{(t-T/2-\tau)^2}{2\delta^2}\right] \quad (12)$$

所以把式(11)、(12)代入式(9)可以化简为

$$R_{\text{QBE}} = \frac{1}{2} + \frac{\exp(-8\tau^2/T^2) \operatorname{erf}[2\sqrt{2}(-1+\tau/T)]}{2\operatorname{erf}(2\sqrt{2})} \quad (13)$$

式中 erf 是误差函数.

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-\eta^2) d\eta \quad (14)$$

5 仿真结果

量子信令偏振态差分相位编码过程中, 对量子

误码率最大的影响参量是两干涉脉冲之间的脉冲时延差 τ , 当脉冲时延 $\tau=0$ 时, 量子误码率 $R_{\text{QBE}}=0$; 当脉冲延迟时间大于脉宽, 即 $\tau>T$ 时, 式中第二项的积分为 0, 两脉冲不发生干涉, 这时的量子误码率为 50%, 达到最大. 当脉冲时延和脉冲宽度的比值 τ/T 逐渐增大时, 误码率也会增大, 比值为 1 时, 脉冲延迟等于脉冲宽度, 不发生干涉, $R_{\text{QBE}}=50\%$. 在接收端连接量子存储器 SR, 又称光学延迟装置, 是为了减小误差, 消除传输过程中所引起的脉冲延迟, 这样可以控制 τ 的大小, 得到低误码率的编码方案, 当 $\tau=0$ 时, $R_{\text{QBE}}=0$. 经过对误码率仿真结果的分析, 发现图形形状与理论完全相符, 如图 4, 量子误码率 R_{QBE} 与脉冲时延 τ 的关系, 随着脉冲时延 τ 的增大量子误码率 R_{QBE} 也增大. 图 5 为量子误码率 R_{QBE} 与两干涉脉冲 τ/T 的关系, 当 $\tau/T=0$ 时, 误码率为 0, 当 $\tau/T=1$ 时, 误码率为 50%.

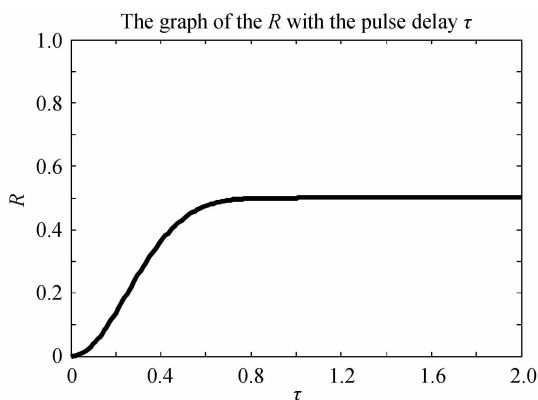


图 4 量子误码率 R_{QBE} 与脉冲时延 τ 的关系

Fig. 4 The relation of quantum bit error rate R_{QBE} and two coherent pulse τ

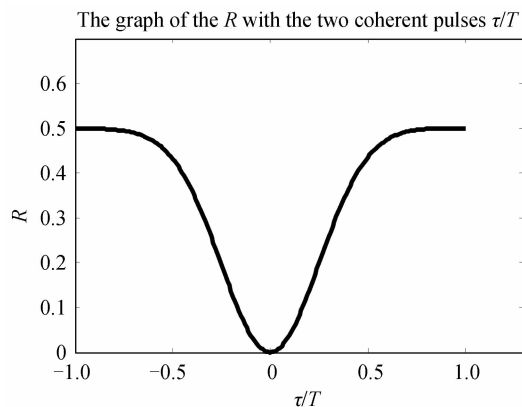


图 5 量子误码率 R_{QBE} 与两干涉脉冲 τ/T 的关系

Fig. 5 The relation of quantum bit error rate R_{QBE} and two coherent pulse τ/T

图 6 是量子信令编码效率的仿真结果, 当 k 一定时, 随着 n 的增大, 编码效率逐渐增大, 当达到一定阶段时, 逐渐趋于不变, 最大可以达到 75%, 对于一个恒定的 n 值, 就是传输的光子数一定时, 随着偏振方向不同的光子数增加编码效率也会减小.

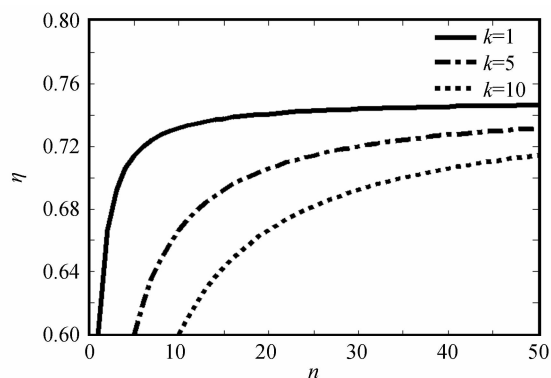


图 6 光子个数 n 与编码效率 η 的关系

Fig. 6 The relationship of photon number n and coding efficiency η

仿真结果与理论分析完全相符, 可见, 本文提出的编码方案具有高效性.

6 结论

本文提出的量子信令偏振态差分相位编码方案, 编码效率可以达到 75%, 在利用量子存储器 SR 控制好量子脉冲延迟 τ 远远小于 T 的时候, 可以使得误码率趋近于 0, 对未来量子通信的实现具有重要意义.

参考文献

- [1] NIE Min, JIANG Jin-ya, LIU Xiao-hui. A novel optimum quantum states entanglement multiplexing and relay scheme for land quantum mobile communication[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(5): 774-779.
聂敏, 姜劲雅, 刘晓慧. 陆地量子移动通信最优纠缠多址中继方案[J]. *光子学报*, 2011, **40**(5): 774-779.
- [2] PEI Chang-xing, YAN Yi, LIU Dan, et al. A quantum repeater communication system based on entanglement[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(12): 2422-2426.
裴昌幸, 阎毅, 刘丹, 等. 一种基于纠缠态的量子中继通信系统[J]. *光子学报*, 2008, **37**(12): 2422-2426.
- [3] YI Yun-hui, NIE Min, PEI Chang-xing. Probability model of quantum signaling transmission damage and repair strategy[J]. *Journal of Xidian University*, 2012, **39**(4): 29-32+73.
易运晖, 聂敏, 裴昌幸. 量子信令传输损伤概率模型及修复策略[J]. *西安电子科技大学学报*, 2012, **39**(4): 29-32+73.
- [4] WANG Zhi, NIE Min, LIU Xiao-hui. The handover strategy of quantum mobile signaling based on entanglement degree computing in adjacent cells and simulation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(4): 497-500.
王志, 聂敏, 刘晓慧. 基于纠缠度计算的量子移动信令相邻小区越区切换策略及仿真[J]. *光子学报*, 2012, **41**(4): 497-500.
- [5] ZHU Chang-hua, PEI Chang-xin, QUAN Dong-xiao, et al. A new quantum key distribution scheme based on frequency and time coding[J]. *Chinese Physics Letters*, 2010, **27**(9): 12-15.
- [6] 尹浩, 马怀新. 军事量子通信概论[M]. 北京: 军事科学出版社, 2006: 138-140.
- [7] 马瑞霖. 量子密码通信[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 48-55.
- [8] XU Juan, CHEN Han-wu, LIU Wen-jie, et al. Efficient phase-coded quantum key distribution scheme[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2009, **39**(2): 216-219.

- 许娟,陈汉武,刘文杰,等. 基于相位编码的高效量子密钥分配方案[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2009, **39**(2): 216-219.
- [9] CHEN Tao, LIAO Jin-kun, WANG Chun-li, *et al.* Quantum key distribution protocol based on differential phase shift encoding method[J]. *Laser Journal*, 2010, **31**(6): 31-32.
- 陈韬,廖进昆,王春利,等. 基于差分相位编码的量子密钥分配协议[J]. 激光杂志, 2010, **31**(6): 31-32.
- [10] ZHAO Feng, LU Yi-Qun, WANG Fa-Qiang, *et al.* Stable differential-phase-shift quantum key distribution based on weak coherent pulses[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(4): 2175-2179.
- 赵峰,路铁群,王发强,等. 基于微弱相干脉冲稳定差分相位量子密钥分发[J]. 物理学报, 2007, **56**(4): 2175-2179.
- [11] LIN Qing-qun, WANG Fa-qiang, MI Jing-long, *et al.* Deterministic quantum key distribution based on random phase coding[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(4): 5796-5801.
- 林青群,王发强,米景隆,等. 基于随机相位编码的确定性量子密钥分配[J]. 物理学报, 2007, **56**(4): 5796-5801.
- [12] 陈晖,朱甫臣. 量子保密通信引论[M]. 北京:北京理工大学出版社, 2011, 1: 147-151.
- [13] CHEN Shuai, WANG Jin-dong, ZHONG Ping-ping, *et al.* Influence of time jitter on quantum bit error rate of phase-coding quantum key distribution system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(7): 253-258.
- 陈帅,王金东,钟平平,等. 时间抖动对相位编码量子密钥分发系统量子误码率的影响[J]. 光学学报, 2011, **31**(7): 253-258.

• 下期预告 •

衬底温度对磁控溅射法制备的 Ag/AZO 绒面背反电极性能的影响

王春雷,王超,毛艳丽

(河南大学 物理与电子学院 河南省光伏材料重点实验室, 河南 开封 475004)

摘要:通过优化薄膜硅基太阳能电池的背反电极,使背反电极表面出现均匀的类金字塔结构,能够增大入射光在结区的有效光程,提高光子的捕获率,进而会提高薄膜硅基太阳能电池的光电转换效率. 本文采用磁控溅射技术在载玻片上制得 Ag/AZO(ZnO:Al)导电薄膜. 在控制其它溅射参量为最优化的情况下,研究了衬底温度对 Ag/AZO 导电薄膜光电性能及其表面形貌的影响. 研究表明:随着衬底温度的增加,薄膜的雾度在可见光范围内先增大后减小;当衬底温度为 500℃ 时,雾度取得最大值,在可见光范围内平均达到了 95% 以上;电阻率随着衬底温度的增加逐渐增大,且衬底温度超过 500℃ 时电阻率急剧增大. 在综合考虑其光电性能的情况下,实验得到当衬底温度为 500℃ 时,所获得的叠层薄膜表面雾度值最好且电阻率很小,这将有助于改善太阳能电池的性能.

关键词: Ag/AZO 导电薄膜;磁控溅射;光电特性;雾度