

doi: 10.3788/gzxb20164503.0327001

基于两节点间信息互传的量子特性

邬云文, 邓艳, 周小清, 曹广涛, 钟宏华

(吉首大学 物理与机电工程学院, 湖南 吉首 416000)

摘 要: 运用全量子理论, 对腔耦合系统构建的两个节点, 考虑节点内腔模与量子位(qubit)的耦合, 结合数值计算, 用熵表示信源的不确定性, 对信源发出的信息进行度量, 研究了两个节点相互进行信息传输过程的熵演化. 通过两能级粒子与腔模的耦合强度、腔-腔之间的跃迁耦合系数和失谐量三个参数对熵变化进行分析, 结论表明在共振条件下, 节点间相互传输信息过程中, 耦合双腔构成的两个节点熵呈现准周期性坍塌与复苏振荡变化特征, 节点 1 与节点 2 熵的峰值交替出现; 两个节点之间用跳跃频率 $\lambda/2\pi$ 的光子作为信息传送的数据总线, 失谐使两个节点内量子位的一个频率高, 一个频率低, 无论先操纵哪一个量子位, 在系统稳定工作状态下, 量子态演化的信息传递方向总是从频率快的量子位向频率慢的量子位传递, 此特性可扩展至多量子位之间量子信息的传递. 用于两个节点间的远程操控.

关键词: 量子光学; 量子信息; 耦合腔; 熵; 量子态操控; 失谐; 量子比特

中图分类号: O413.2; O562 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4213(2016)03-0327001-8

Quantum Properties of Information Each Other Between Two Nods

WU Yun-wen, DENG Yan, ZHOU Xiao-qing, CAO Guang-tao, ZHONG Hong-hua

(College of Physics, Mechanical and Electrical Engineering, Jishou University, Jishou, Hunan 416000, China)

Abstract: Considering a coupled cavity system composed of two sub-systems, which are constituted by the cavity modes and qubits. Combing the quantum theory and numerical calculation, the amount was described to transfer message and the uncertainty of the information source by using entropy. The entropy evolution of the two nodes with respect to different coupling strengths between the two-level particle and cavity mode, transition coupling of cavity-cavity and detuning were studied. For the resonance state, it is found that the two qubits exhibit quasi-periodic collapse and revival, the peak of entropy of qubits 1 and 2 appear alternately. For the non-resonance state, the frequency of qubits is higher inside the node, low frequency of anther by discord. With frequency hopping $\lambda/2\pi$ between the two nodes, the photon is in mishan bus as information transmission. No matter which qubit was adjusted, the information of quantum state evolution always transfers from the qubit with high frequency to the qubit with low frequency. The results can be extended to the transmission of quantum information among multiple qubits.

Key words: Quantum optics; Quantum information; coupled cavity; entropy; control of quantum state; detuning; qubit

OCIS Codes: 270.5585; 270.5580; 020.1335; 020.7010

0 引言

腔量子电动力学(Cavity Quantum Electrodynamics, CQED)是量子信息处理(Quantum Information Processing, QIP)^[1-7]的几个物理系统之一. 基于两个

相互耦合的光学谐振腔, 用电磁场把一个二能级原子约束在高品质腔内所组成的双耦合腔系统, 具有两腔之间的耦合可以有多种方式来控制, 耦合的光脉冲群速度缓慢和波导低损耗的特点, 它有利于实现控制和测量单个格点; 同时耦合腔系统具有较大的自由度, 利

基金项目: 国家自然科学基金(No. 11447240)和湖南省自然科学基金(Nos. 13JJ3092, 15JJ6092)资助

第一作者: 邬云文(1965-), 女, 教授, 博士, 主要研究方向为量子信息及冷原子分子物理. Email: wuyw_jd@163.com

收稿日期: 2015-10-08; **录用日期:** 2015-12-25

<http://www.photon.ac.cn>

于多种方式实现光子量子态的传输,可用于远程纠缠态的制备与量子态操纵、量子隐形传态、量子逻辑门操作等量子信息处理过程.因此,腔耦合系统的理论研究是当前研究的热点问题之一^[8-12].在耦合双腔系统间实现对单个光子跃迁的控制,是完成腔与腔之间耦合的关键,通过操控单个粒子与场相互作用可实现利用单个粒子进行信息的存储,通过操控单个光子与场相互作用,可实现单个量子态的测量和控制,在腔与腔(节点与节点)之间进行信息的传递和读取,构建量子网络实现高速精确的量子计算及精密测量等方面有着重要意义.

当前许多小组致力于耦合腔模型的研究,例如:在微波腔实验上不仅实现了原子之间的纠缠、量子信息的存储,并给出了用嵌入相互强耦合作用腔体的离子或量子点(Quantum Dot, QDs)、或原子、或超导量子比特等系统实现量子逻辑门、量子计算和量子网络的方案^[13-24].以光子为资源的量子通信和光子莫特绝缘体状态已被证明^[25-26].彭俊等讨论了失谐条件下腔中原子的量子跃迁等量子动力学特性^[27].Ogden等研究了腔模强度变化对跃迁型的影响,并给出了一些极限情况下的有效哈密顿量^[28].Zhang and Li运用解本征值问题对共振腔耦合线性系统动力学特性进行了讨论^[29].Alidoosty, M. Sch. of Electr. Eng. 等多腔模的CQED系统弱耦合、强耦合和超强耦合条件下的自旋纠缠实验从理论上进行模拟^[30].量子信息理论中熵表示信源的不确定性,对信源发出的信息进行度量,但未考虑两个耦合腔系统状态与熵的变化,研究熵随时间变化的规律.

本文考虑两个耦合单模微腔,每个微腔植入一个两能级的粒子(原子或离子、量子点等),粒子与腔模耦合,每个腔与腔内的粒子构成一个节点(信源)型耦合双腔系统.分析两个耦合腔之间由于单个光子的跳跃将对节点产生影响,用熵描述节点的不确定性,并对每个节点发出的信息进行度量.通过对两个节点熵变化的分析,反映节点间由于单个光子的跳跃对两个节点不确定性的影响,度量节点发出的信息,分析单光子跳跃对节点之间信息传输的影响,为量子操控提供克服耗散和退相干实验研究提供参考.通过分析腔内量子比特与腔的耦合系数、腔-腔之间的跃迁耦合系数和腔模与两能级原子的跃迁频率的失谐量三个参量对内嵌原子或腔模实现 $|0\rangle_{ai} \xrightarrow{\text{跃迁}} |1\rangle_{ai}$ 变化物理过程中量子比特状态、系统熵等演化的量子特性.

1 耦合双腔系统动力学方程求解及条件

耦合双腔系统有两个耦合的单模腔,腔模频率 ω_c 相同,每个腔中植入一个二能级粒子(原子或离子、量子点等),原子的两能级分别为基态 $|0\rangle_{ai}$ 和激发态 $|1\rangle_{ai}$

(其中 $i=1,2$),基态与激发态之间的跃迁频率 ω_a .两个腔之间通过光子发生相互作用, a_i^+ (a_i)腔场 i 的产生(湮灭)算符, σ_i (σ_i^+)第 i 个腔中量子比特的产生(湮灭)算符,腔内量子比特与腔的耦合系数 g (每个量子位与空腔耦合系数相同),腔-腔之间的光子跃迁耦合系数 λ 表示,取 $\hbar=1$,系统相互作用的哈密顿量为^[24-25]

$$H_1 = g \sum_{i=1}^2 (a_i \sigma_i^+ e^{i\omega t} + a_i^+ \sigma_i e^{-i\omega t}) + \lambda (a_1^+ a_2 + a_2^+ a_1) \quad (1)$$

其中原子两能级的跃迁频率与腔模的失谐 $\Delta = \omega_a - \omega_c$,薛定谔方程为

$$i \frac{\partial}{\partial t} |\Psi\rangle_1 = H_1 |\Psi\rangle_1 \quad (2)$$

对于式(1),时间 t 时,态矢为

$$\begin{aligned} |\Psi(t)\rangle = & a(t) |0\rangle_{a1} |0\rangle_{a2} |1\rangle_{c1} |0\rangle_{c2} + b(t) |0\rangle_{a1} |0\rangle_{a2} \\ & |0\rangle_{c1} |1\rangle_{c2} + c(t) |1\rangle_{a1} |0\rangle_{a2} |0\rangle_{c1} |0\rangle_{c2} + d(t) |0\rangle_{a1} \\ & |1\rangle_{a2} |0\rangle_{c1} |0\rangle_{c2} \end{aligned} \quad (3)$$

设初始时刻 $t=0$,量子位1(粒子1)制备为激发态,量子位2(粒子2)制备为基态,两个腔模为真空态,即初态为 $|0\rangle_{a1} |0\rangle_{a2} |1\rangle_{c1} |0\rangle_{c2}$,即 $c(0)=1, a(0)=b(0)=d(0)=0$.把式(3)代入式(2),解方程得到四个系数的表达式为

$$\left\{ \begin{aligned} a(t) = & -i \frac{g}{2v_1} e^{-i(\Delta-\lambda)t/2} \sin(v_1 t) - \\ & i \frac{g}{2v_2} e^{-i(\Delta+\lambda)t/2} \sin(v_2 t) \\ b(t) = & i \frac{g}{2v_1} e^{-i(\Delta-\lambda)t/2} \sin(v_1 t) - \\ & i \frac{g}{2v_2} e^{-i(\Delta+\lambda)t/2} \sin(v_2 t) \\ c(t) = & e^{i(\Delta+\lambda)t/2} \left[\frac{1}{2} \cos(v_1 t) - i \frac{\Delta+\lambda}{4v_1} \sin(v_1 t) \right] + \\ & e^{i(\Delta-\lambda)t/2} \left[\frac{1}{2} \cos(v_2 t) - i \frac{\Delta-\lambda}{4v_2} \sin(v_2 t) \right] \\ d(t) = & -e^{i(\Delta+\lambda)t/2} \left[\frac{1}{2} \cos(v_1 t) - i \frac{\Delta+\lambda}{4v_1} \sin(v_1 t) \right] + \\ & e^{i(\Delta-\lambda)t/2} \left[\frac{1}{2} \cos(v_2 t) - i \frac{\Delta-\lambda}{4v_2} \sin(v_2 t) \right] \end{aligned} \right. \quad (4)$$

式中

$$v_1 = \sqrt{\frac{(\Delta+\lambda)^2}{2} + g^2} \quad v_2 = \sqrt{\frac{(\Delta-\lambda)^2}{2} + g^2} \quad (5)$$

每个腔(含腔模与二能级粒子)组成一个子系统(即一个节点),该系统由两个节点组成,考虑其中的任一节点而言,由于节点间存在单光子跳跃,必然受到另一节点的影响,该节点是一个开放的系统.令 $t=0$ 时,初态为 $|0\rangle_{a1} |0\rangle_{a2} |1\rangle_{c1} |0\rangle_{c2}$,当对腔膜1作用,使其由 $|1\rangle_{c1}$ 跃迁 $\rightarrow |0\rangle_{c1}$,放出一个光子,系统的量子态符合式(3)的表述规律进行变化,式(4)表示每个状态的系数随着时间 t 的变化,由此可得到每个量子态的几率表达式为 $P_a = |a(t)|^2, P_b = |b(t)|^2, P_c = |c(t)|^2, P_d = |d(t)|^2$.

由于腔模和粒子均考虑两能级,用 S_a 、 S_b 分别表示腔模 1 和腔模 2 的自信息量, S_c 、 S_d 分别表示腔内粒子 1 与粒子 2 的自信息量,其表达式为

$$\begin{cases} S_a = -|a(t)|^2 \log_2 |a(t)|^2 \\ S_c = -|c(t)|^2 \log_2 |c(t)|^2 \\ S_b = -|b(t)|^2 \log_2 |b(t)|^2 \\ S_d = -|d(t)|^2 \log_2 |d(t)|^2 \end{cases} \quad (6)$$

则每个节点的熵表示为

$$\begin{cases} s_1 = -P_a \log_2 P_a - P_c \log_2 P_c \\ s_2 = -P_b \log_2 P_b - P_d \log_2 P_d \end{cases} \quad (7)$$

两个节点

$$s = s_1 + s_2 \quad (8)$$

由式(4)和(5)可知,影响熵演化的主要因素是:腔内量子比特与腔的耦合系数 g ,腔-腔之间的跃迁耦合系数 λ ,腔模与两能级原子的跃迁频率的失谐量 Δ . 下面讨论关于 g 、 λ 和 Δ 三个参量变化对腔耦合系统的影响.

2 讨论

对于双腔耦合系统,内嵌粒子或腔模实现 $|0\rangle_{ai} \leftrightarrow |1\rangle_{ai}$ 的变化,主要依赖于腔内量子比特与腔的耦合系数 g ,腔-腔之间的跃迁耦合系数 λ 和腔模与两能级原子的跃迁频率的失谐量 Δ 三个参量的影响. 一般情况下,这三个系数可取任意值,使物理变化较复杂.

2.1 共振条件下腔模与腔内二能级粒子的相互作用

对于共振跃迁 $\Delta=0$,取 $\lambda=1$, $g=0.4$ 时,两腔之间光子跳跃周期 2π ,据式(5)可得 $v_1 = v_2 = \sqrt{0.66}$,由式(6)、(7)与(8)用 Mathematic 编程绘出腔内原子与腔模相互作用(见图 1).

图 1 中的(a)或(b)小图,用点划线、实线和虚线分别表示第 i 个节点内粒子的熵 S_a (或 S_b),腔模的熵 S_c (或 S_d),表示节点的熵 S_1 (或 S_2);(c)小图用点划线、实线和虚线分别表示节点 1 的熵 S_1 、节点 2 的熵(S_2)和 $S=S_1+S_2$.

由图 1(a)或(b)可知:初态 $|0\rangle_{a1}|0\rangle_{a2}|1\rangle_{c1}|0\rangle_{c2}$,系统是纯态,熵为 0. 对腔膜 1 一个作用,腔膜 1 开始 $|1\rangle_{c1} \leftrightarrow |0\rangle_{c1}$,随着时间 t 的变化,腔膜 1 与量子位 1(或腔膜 2 与量子位 2)的熵值发生演化,表明节点 1 或节点 2(图 1(a)或图 1(b)虚线)不确定度发生变化,信息量的流出或流入的变化,每一个波包表示两个节点之间通过光子跳跃进行了一次信息交换,即两个节点间通过光子跳跃实现了一次信息传输. 信息传输过程为

量子位 1 \leftrightarrow 腔膜 1 \leftrightarrow 腔膜 2 \leftrightarrow 量子位 2.

即对应的量子态的变化为

$$\begin{aligned} & |1\rangle_{a1}|0\rangle_{a2}|0\rangle_{c1}|0\rangle_{c2} \xleftrightarrow{\text{交换光子}} |0\rangle_{a1}|0\rangle_{a2}|1\rangle_{c1}|0\rangle_{c2} \xleftrightarrow{\text{交换光子}} |0\rangle_{a1} \\ & |0\rangle_{a2}|0\rangle_{c1}|1\rangle_{c2} \xleftrightarrow{\text{交换光子}} |0\rangle_{a1}|1\rangle_{a2}|0\rangle_{c1}|0\rangle_{c2} \end{aligned}$$

一次信息从比特 1 \rightarrow 比特 2 的传递,量子态的演化经历了从左至右流程的变化,反之信息从比特 2 \rightarrow 比特 1 传递,量子态的演化将经历从右至左几个过程变换.

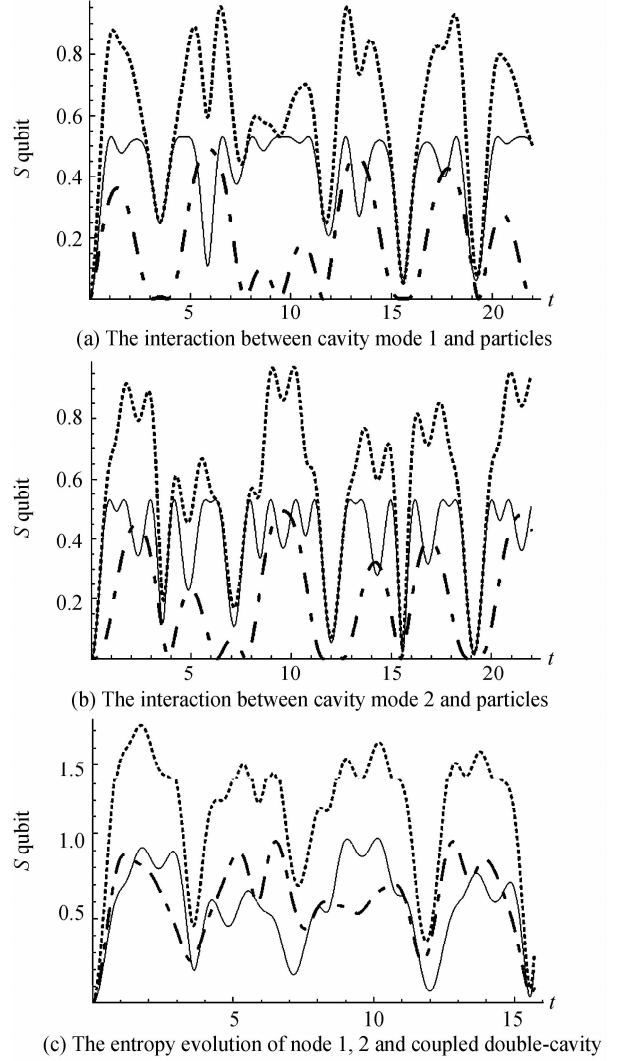


图 1 腔模与粒子相互作用, $\Delta=0$, $g=0.4$, $\lambda=1$

Fig. 1 The interaction of the cavity mode and two-level particle with $\Delta=0$, $g=0.4$, $\lambda=1$

2.2 耦合强度 g 对熵的演化影响分析

2.2.1 共振条件下

共振条件下, $\Delta=0$,由式(8)用 Mathematic 编程绘出图 2. 式(7)和(8)对应着两种相互作用:一是由于腔模之间的耦合作用产生单光子跳跃对熵值的影响;二是量子位(粒子)与腔模的相互作用对熵值的影响.

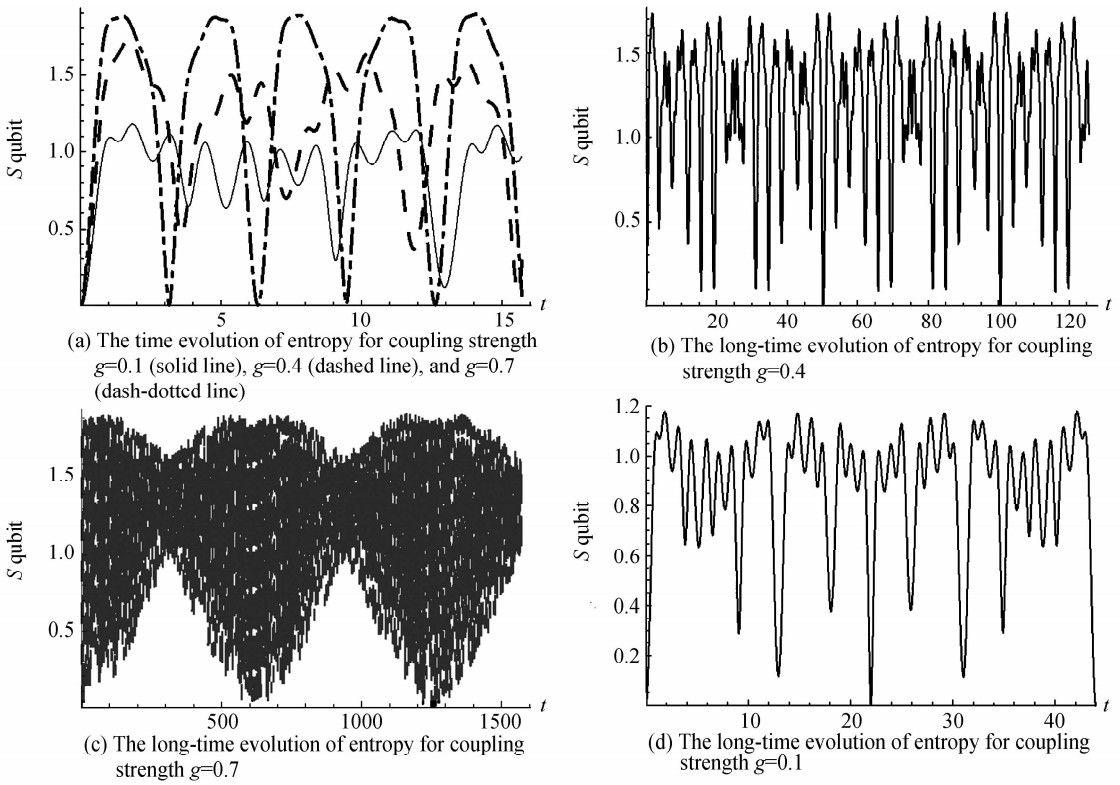


图 2 $\Delta=0, \lambda=1$. 耦合强度 g 对熵值变化的影响

Fig. 2 Fixing $\Delta=0, \lambda=1$, the evolution of entropy for couplin

如图 2(a)所示,当两个腔模之间光子跳跃 $\lambda=1$,随着耦合强度 g 的增加,节点熵 s 的幅值增加,从开始变化到熵第一次出现幅值的时间 t 略有减小,量子比特的变化频率 ν_1 (或 ν_2) 增大,演化的周期 $2\pi/\nu_1$ (或 $2\pi/\nu_2$) 减小,熵的变化规律随着耦合强度 g 的增加,周期性越明显;对于耦合强度 $g>0.4$,两节点熵的值在 0 到 2qbit 之间呈现准周期性坍塌与复苏的振荡变化特征,数据出现类似量子拍频变化规律,说明两节点准周期性出现纠缠最大、纠缠消失;由图 2(b)、(c) 和 (d) 模拟的相关数据见表 1,随着耦合强度 g 的减小,准量子拍频增大,这是一非线性物理变化过程.

时间 $t=2$, 节点 1 的熵 0.25, 节点 2 的熵 0.65, 表明节点 1 无序度小, 信息量大, 节点 2 与节点 1 间并没有完全进行信息量传递; 弱耦合条件 $g=0.2$ (见图 3(b) 与 (c)), 两节点近似于相对独立的运动.

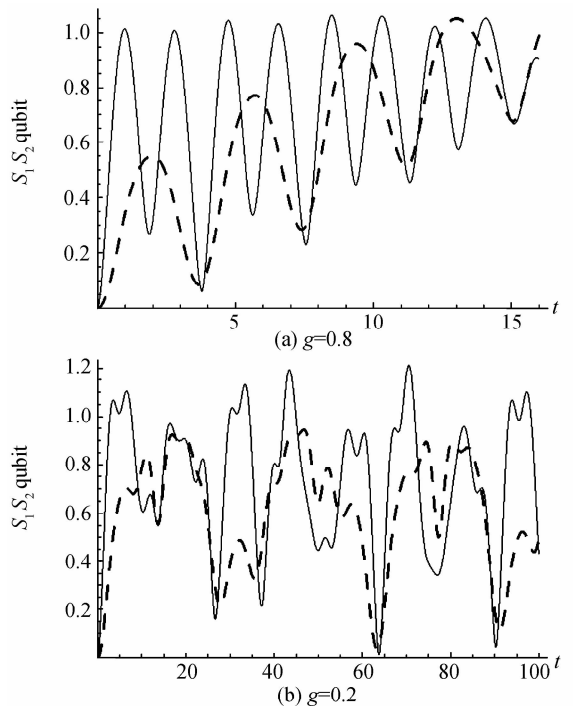
表 1 $\Delta=0, \lambda=1$, 图 2 计算机模拟数据对比

Table 1 $\Delta=0, \lambda=1$, comparison of computer numerical simulation for Fig. 2

g	The amplitude of entropy	$\nu_1 (\nu_2)$	The entropy change of quasi-periodic	Quasi quantum beat
0.1	1.2	$\sqrt{0.51}$	21	$2\pi/21$
0.4	1.7	$\sqrt{0.66}$	51	$2\pi/51$
0.7	2.0	$\sqrt{0.99}$	513	$2\pi/513$

2.2.2 失谐条件下

取 $\Delta=0.3, \lambda=0.1$, 由于失谐, $\nu_1 > \nu_2$, 由式 (7) 和 (8) 作出图 3. 强耦合条件 $g=0.8$ (见图 3(a)), 两节点间光子跳跃一次, 两节点的熵变化量不同. 例如



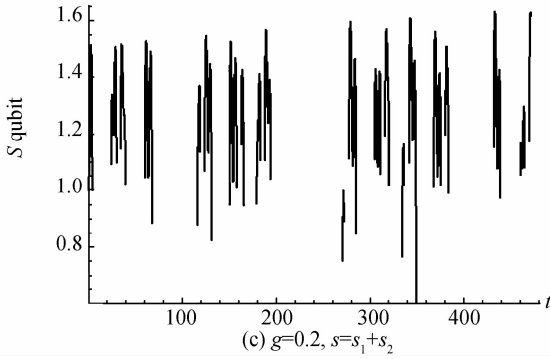


图3 $\Delta=0.3, \lambda=0.1$, 耦合强度 g 对熵值变化的影响: 节点1(实线), 节点2(虚线)

Fig. 3 Fixing $\Delta=0.3, \lambda=0.1$, the time evolution of for coupling strength, node 1 (solid line), entropy node 2 (dashed line)

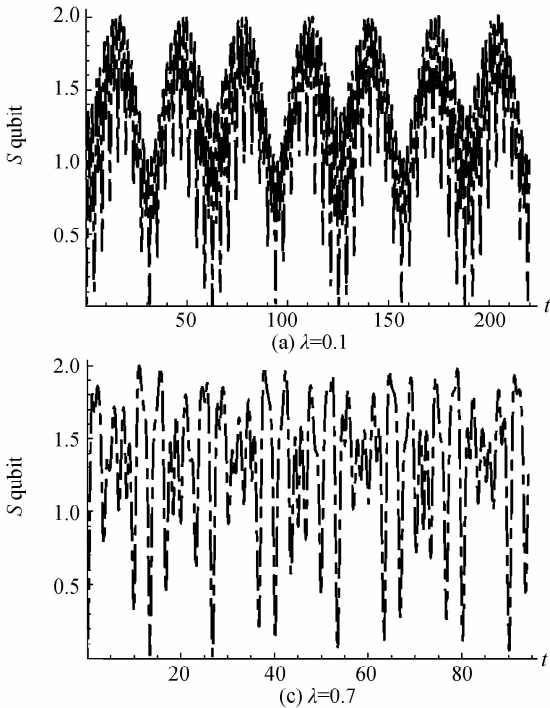


图4 $\Delta=0, g=0.8$, 跃迁耦合系数 λ 对熵值的影响

Fig. 4 Fixing $\Delta=0$ and $g=0.8$, the time evolution of entropy with different transition coupling coefficient

加. 由图4(d)说明 λ 变化对熵的幅值大小影响较小, 主要是对腔中二能级粒子的频率 ν_1 (或 ν_2) 产生影响.

2.4 失谐量 Δ 对熵的演化的影响分析

考虑失谐对系统的影响, 由式(5)得

$$\text{节点1频率: } \nu_1 = \sqrt{\frac{(\Delta+\lambda)^2}{2} + g^2},$$

$$\text{节点2频率: } \nu_2 = \sqrt{\frac{(\Delta-\lambda)^2}{2} + g^2}.$$

由式(7)和(8)用 Mathematic 编程绘出图5和图

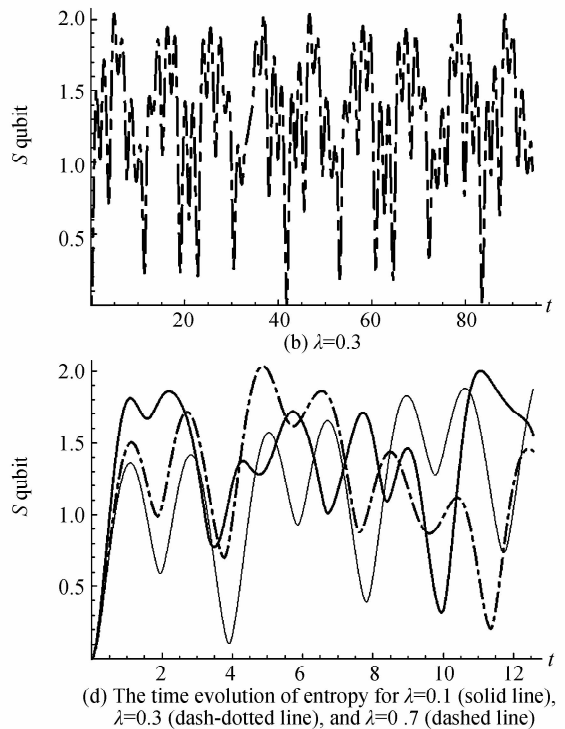
2.3 共振条件下跃迁耦合系数 λ 对熵的演化影响分析

图4为跃迁耦合系数 λ 的变化对熵 S 的影响. 当 $\Delta=0, g=0.8$ 时, 对于腔模之间跃迁耦合系数 λ 取不同的值, 由式(8)用 Mathematic 编程绘出图4.

图4中(a)、(b)、(c)三个图的计算机模拟数据对比结果见表2. 即跃迁耦合系数 λ 增加, 量子拍频增

表2 $\Delta=0, g=0.8$, 图4计算机模拟数据对比
Table 2 $\Delta=0, g=0.8$, comparison of computer numerical simulation for Fig. 4

λ	The amplitude of entropy	$\nu_1 (\nu_2)$	The entropy change of quasi-periodic	Quasi quantum beat
0.1	2.0	$\sqrt{0.645}$	31	$2\pi/31$
0.3	2.0	$\sqrt{0.685}$	21	$2\pi/21$
0.7	2.0	$\sqrt{0.885}$	14	$2\pi/14$



6. 比较图5的(a)、(b)可知, 对于 $\lambda=0.1, g=0.8, \Delta=0.3$, 两个节点之间光子的跳跃频率 $1/20\pi$ 与每个量子位变化频率 ν_i 进行调制, 两个节点熵值的变化周期 92 ; 由图5(c)可知, $t=2$, 节点1是 0.25Bit , 节点2是 0.55Bit , 两节点间相互进行信息传输时, 并不是每次都把信息全部传递, 节点自身保留了一定的信息量; 图5(d)表明失谐量 Δ 的大小将影响到各量子位熵值随时间 t 的变化的频率.

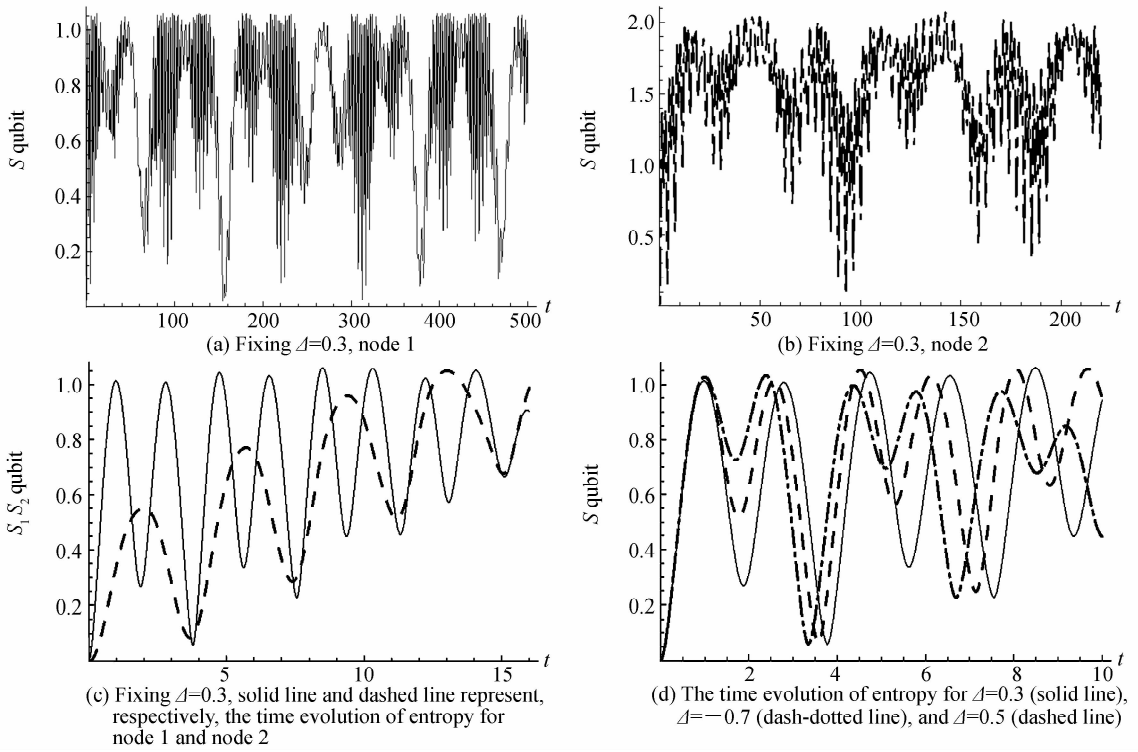
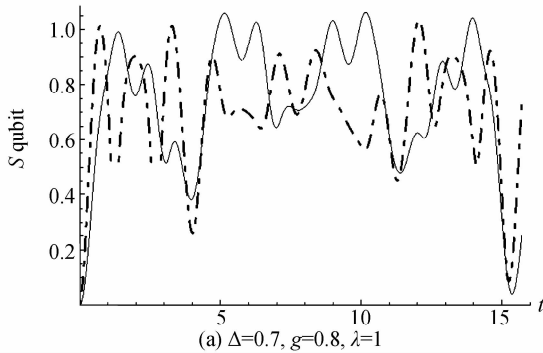


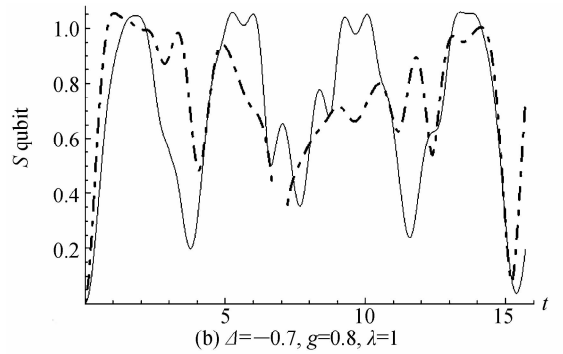
图5 节点熵的演化 $g=0.8, \lambda=0.1$

Fig. 5 Fixing $g=0.8$ and $\lambda=0.1$, the effects of detuning to the entropy of node

如图 6(a) 满足 $v_1 > v_2$, 当 t 在 $0 \sim 4$ 时, 首先比特 1 的熵发生变化, 再带动比特 2 熵发生变化, 光子跃迁把节点 1 量子态演化的信息从节点 1 传递到节点 2, 在 t 取 $3 \sim 4$ 时, 两节点熵有一个同步变化, 但节点 2 熵变化是一个微小起伏, 节点 1 熵的幅值变化较大. 图 6(b) 满足 $v_1 < v_2$, 时间 t 在 0 至 3.7 这一阶段, 首先比特 1 的熵发生变化, 再带动比特 2 的熵发生变化, 当 t 在 3.7 至 7.5 时发生转换, $t > 7.5$ 后, 演变成首先比特 2 的熵先发生变化, 再带动比特 1 的熵发生变化. 即系统稳定工作状态, 它们都是即首先是快频率的量子位被激发, 该量子位通过腔模光子的跳跃, 即用耦合腔之间光子的跳跃周期 $2\pi/\lambda$ 为数据总线, 再激发频率慢的量子位, 实现了量子态演化的信息从频率快的量子位传递至频率慢的量子位, 此特性对多量子位之间量子信息的传递也适用.



(a) $\Delta=0.7, g=0.8, \lambda=1$



(b) $\Delta=-0.7, g=0.8, \lambda=1$

图6 失谐对熵 S 的影响. 点划线表示节点 1 的熵 s_1 随时间 t 变化, 实线表示节点 2 的熵 s_2 随时间 t 变化

Fig. 6 The effects of detuning to the entropy. Dash-dotted line, solid line and dashed line represent, respectively, the time evolution of entropy for cavity 1 (quantum bit 1 and cavity mode 1), the entropy of cavity 2 (quantum bit 2 and cavity mode 2)

3 结论

本文主要研究两个相互耦合的单模腔, 每个腔内植入一个二能级粒子(原子、或离子、或量子点等)组成结点. 当两个结点相互传输信息时, 用熵描述信源的无序. 主要考虑二能级量子位与腔模的耦合强度 g 、腔-腔之间的跃迁耦合系数 λ 和腔模与两能级原子的跃迁频率的失谐量 Δ 共三个因素对各子系统熵的幅值及每个节点熵的演化量子特性进行了分析, 结果表明三个参

量对熵值变化有明显的延时影响,其中 λ 和 Δ 对熵的幅值的影响较小,耦合强度 g 的大小还影响到熵的幅值,当 $g>0.4$,熵的幅值 2qbit ,当 $g\leq 0.4$,熵的幅值 $< 2\text{qbit}$;当共振跃迁时,耦合的两个节点交替呈现准周期性坍塌与复苏振荡变化特征.非共振时,失谐使两个节点内的量子比特的频率不同,一个频率高,另外一个频率低,无论先操纵哪一个节点内的量子比特,经历一个短暂的初始阶段变化后,在系统稳定工作状态下,它们总是频率高的量子比特先发生演化,该量子比特通过腔模和节点间光子的跳跃,促使频率低的量子比特演化.该现象说明通过控制失谐 Δ ,即用耦合腔之间光子的跳跃周期 $2\pi/\lambda$ 作为信息传送的数据总线,可控制两个量子位间量子态演化的信息传递方向,对多量子位之间量子信息的传递也适用.

本文的结论对耦合双腔系统中精确控制量子态变换、实现量子逻辑门和构建量子网络的实验等具有一定的参考价值.研究中,仅仅考虑到两个腔之间的耦合以及两能级比特,这是构建量子网络的最基本结构,所得结论反映了三个参数对节点熵演化规律的影响以及系统熵变过程物理本质的就是量子位演化与节点间信息的相互传递.其结果将有可能对研究多个腔和多能级比特之间的耦合相互作用的研究有一定有参考.

参考文献

- [1] LADD T D, JELEZKO F, LAFLAMME R, *et al.* Quantum computers[J]. *Nature*, 2010, **464**:45-53.
- [2] PAN Chang-ning, FANG Jian-shu, PENG Xiao-fang, *et al.* Fidelity of quantum teleportation of atomic-state in dissipative environment[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, **60**(9): 090303. 潘长宁,方见树,彭小芳,等.耗散系统中实现原子态量子隐形传态的保真度[J].物理学报,2011,**60**(9):090303.
- [3] HOME J P, DAVID H, JOST J D, *et al.* Complete methods set for scalable ion trap quantum information processing[J]. *Science*, 2009, **325**: 5945; 1227-1230.
- [4] ZHANG Li-hui, LI Gao-xiang. Entanglement properties of two -atoms interacting with field in dissipative cavity[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(4): 607-612. 张立辉,李高翔.耗散腔中双原子与光场的纠缠演化特性[J].光子学报,2011,**40**(4):607-612.
- [5] LIU S P, YU R, LI J H, *et al.* Generation of a multi-qubit W entangled state through spatially separated. semiconductor quantum-dot-molecules in cavity-quantum electro- dynamics arrays[J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, **115**(13): 134312.
- [6] CHEN C Y, GAO K L. Approximate unconventional geometric phase gate by highly squeezed operators with a cavity QED system[J]. *Journal of Physics A: Mathematical and General*, 2006, **39**(10), 2435-2442.
- [7] PENG Jun, WU Yun-wen, LI Xiao-juan. Realization of tof foli gate based on superconducting quantum-interference devices in cavity quantum electrodynamics[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(3): 466-470. 彭俊,郭云文,李小娟.腔 QED 中利用超导量子干涉仪实现 Toffoli 门[J].光子学报,2011,**40**(3): 466-470.
- [8] CHEN T, DU L J, SONG H F, *et al.* Determining the structural phase transition point from the temperature of $^{40}\text{Ca}^+$ Coulomb crystal[J]. *Chinese Physics B*, 2014, **23**(12): 123702.
- [9] JIANG Min, WU Yun-wen, PENG Jun, *et al.* Center-of-mass quantum states motion of two ions driven by feeble field[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(3): 453-457. 江敏,郭云文,彭俊,等.弱场条件下两囚禁离子质心量子态运动[J].光子学报,2011,**40**(3):453-457.
- [10] BELLOMO B, COMPAGNO G, LO FRANCO R *et al.* Dynamics and extraction of quantum discord in a multipartite open system [J]. *Internation Journal of Quantum Information*, 2011, **9**(07n08):1665-1676.
- [11] CHEN C Y, FENG M, GAO K L. Toffoli gate originated from a single resonant interaction with cavity QED [J]. *Physical Review A*, 2006, **73**(6): 390-396.
- [12] ZHONG H H, XIE Q T, XU J, *et al.* Nonlinear dissipative dynamics of a two-component atomic condensate coupling with a continuum[J]. *Chinese Physics B*, 2014, **23**(2): 144-150.
- [13] BENYOUCHEF M, KIRAVITTAYA S, MEI Y F, *et al.* Strongly coupled semiconductor microcavities; a route to couple artificial atoms over micrometric distances [J]. *Physical Review B*, 2008, **77**: 035108.
- [14] ZHON Z R, LIN X, ZHANG B, *et al.* Controllable operation for distant qubits in a two-dimensional quantum network[J]. *The European Physical Journal D*, 2012, **66**(12): 316.
- [15] ZHANG Pei, ZHOU Xiao-qing, LI Zhi-wei. Identification scheme based on quantum teleportation for wireless communication networks[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, **63**(13): 130301. 张沛,周小清,李智伟.基于量子隐形传态的无线通信网络身份认证方案[J].物理学报,2014,**63**(13):130301.
- [16] LIAO Qing-hong, XU Juan, YAN Qiu-rong, *et al.* The study of dynamics properties of entanglement of two interacting atoms coupled to markovion and non- markovion environment[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(9): 0927001. 廖庆洪,许娟,鄢秋荣,等.耦合到马尔科夫和非马尔科夫环境下两相互作用原子系统纠缠动力学特性的研究[J].光子学报,2015,**44**(9):0927001.
- [17] MAJER J, CHOW J M, GAMBETTA J M, *et al.* Coupling superconducting qubits via a cavity bus [J]. *Nature (London)*, 2007, **449**(7161): 443-447.
- [18] ABOURADDY A F, DI GIUSEPPE G, YARNALL T M, *et al.* Implementing one-photon three-qubit quantum gates using spatial light modulators [J]. *Physical Review A*, 2012, **86**(86):050303.
- [19] ZHOU Xiao-Qing, WU Yun-Wen, ZHAO Han. Quantum teleportation internetworking and routing strategy[J]. *Acta Physica. Sinica*, 2011, **60**(4): 040304. 周小清,郭云文,赵晗.量子隐形传态网络的互联与路由策略[J].物理学报,2011,**60**(4):040304.
- [20] XIAO Y F, GAO J, ZOU X B, *et al.* Coupled quantum electrodynamics in photonic crystal cavities towards controlled phase gate operations[J]. *New Journal of Physics*, 2008, **10**: 123013.
- [21] GAO J, SUN F W, WONG C W. Implementation scheme for quantum controlled phase-flip gate gthrough quantum dot in slow-light photonic crystal waveguide[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, **93**(15): 151108.
- [22] CHEN Ting. Achievement of sympathetic cooling of lithium ions with calcium ions[D]. Wuhan: University of Chinese

- Academy of Sciences, 2015.
陈婷. 钙离子协同冷却锂离子的实验研究[D]. 武汉: 中国科学院研究生院, 2015.
- [23] LIN X M, ZHOU Z W, YE M Y, *et al.* One-step implementation of a multiqubit controlled-phase-flip gate[J]. *Physical Review A*, 2006, **73**(1): 2518-2521.
- [24] WU Yun-wen, HAI Wen-hua. Exact quantum motions of two ions in a two-dimensional paul trap[J]. *Acta Physica Sinica*. 2006, **55**(11):5721-5727.
邬云文, 海文华. 共面两囚禁离子体系精确的量子运动[J]. 物理学报, 2006, **55**(11):5721-5727.
- [25] HARTMANN M J, PLENIO M B. Strong photon nonlinearities and photonic mott insulators [J]. *Physical Review Letters*, 2007, **99**(99): 103601.
- [26] BOSE S, ANGELAKIS D G, BURGARTH D. Transfer of a polaritonic qubit through a coupled cavity array[J]. *Journal of Modern Optics*, 2007, **54**, 2307-2314.
- [27] PENG J, WU Y W, LI X J. Quantum dynamic behaviour in a coupled cavities system [J]. *Chinese Physics B*, 2012, **21**(6): 060302.
- [28] OGDEN C D, IRISH E K, KIM M S. Dynamics in a coupled-cavity array[J]. *Physical Review A*, 2008, **78**(6), 063805.
- [29] ZHENG K, LI Z Y. Transfer behavior of quantum states between atoms in photonic crystal coupled cavities [J]. *Physical Review A*, 2010, **81**: 033843.
- [30] ALIDOOSTY M, KHORASANI S A. Simulation of multipartite cavity quantum electrodynamics [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2013, **49**(12):1066-1079.