

# 噪声引入对 EPR 导引的影响

翟淑琴, 王薇, 杨荣国, 翟泽辉

山西大学物理工程学院, 山西 太原 030006

**摘要** EPR(Einstein-Podolsky-Rosen)导引展现出一种不同于量子纠缠态与 Bell 非局域性的量子非局域性,其中单向 EPR 导引在量子秘密共享中尤为重要。提出了一种通过在 EPR 纠缠态的一方增加噪声来改变 EPR 导引特性的方案,在引入噪声之后,分析了导引参数与可变分束器的反射率之间的关系,并研究了 EPR 导引的方向由双向到单向的改变过程。该研究对非对称的量子非局域性操控以及量子信息传递过程中的量子控制具有重要意义。

**关键词** 量子光学; EPR 导引; 噪声; 非对称性; 量子信息

中图分类号 O437

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0427002

## Influence of Introduced Noise on EPR Steering

Zhai Shuqin, Wang Wei, Yang Rongguo, Zhai Zehui

College of Physics and Electronic Engineering, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China

**Abstract** Einstein-Podolsky-Rosen (EPR) steering shows an intermediate type of quantum nonlocality which is distinct from both quantum entanglement and Bell's nonlocality, especially, one-way EPR steering has a significant influence on the secure quantum secret sharing. A scheme to effectively change the characteristic of EPR steering, which is implemented by adding noise to one part of an EPR state, is presented. With the introduction of the noise, the relationships between the steering parameters and the reflectivity of variable beam splitter are analyzed, and the change process of the EPR steering direction from two way to one way is investigated. This study is of great importance in the asymmetric quantum nonlocality control and the quantum control in the process of quantum information transmission.

**Key words** quantum optics; EPR steering; noise; asymmetry; quantum information

**OCIS codes** 270.2500; 270.5565; 270.5585

## 1 引 言

将处于量子纠缠态的两粒子分别分配到相距遥远的  $A$ 、 $B$  两端,通过测量  $A$  端粒子的某些可测量,可改变  $B$  端粒子的相应物理量,即对  $A$  端粒子的测量可以导引  $B$  端粒子到其某一个本征量子态上,反之亦然,这就是著名的 EPR(Einstein-Podolsky-Rosen)导引<sup>[1]</sup>。它是量子力学中介于 Bell 非局域性<sup>[2]</sup>与量子纠缠<sup>[3-5]</sup>之间的一种量子非局域性<sup>[6-8]</sup>。在量子信息过程中,对 EPR 导引的验证是在其中一方不被信任的前提下;对纠缠态的验证则需要以两者互相信任为前提;而对 Bell 非局域性的验证则需要以双方互相不信任为前提<sup>[7]</sup>。由于其所具有的独

特性, EPR 导引已被看作一种重要的资源,其在量子通信中具有极其重要的潜在应用,例如单端设备不依赖的量子密钥共享<sup>[9-10]</sup>、安全量子通信<sup>[11]</sup>和定向量子隐形传态<sup>[12]</sup>。

量子信息过程中的非对称性研究对量子密钥分配、量子秘密共享具有重要的意义<sup>[13]</sup>。EPR 导引显著区别于量子纠缠的一个量子特征是其非对称性,体现在具有导引特性的量子系统中,子系统  $A$  可以改变子系统  $B$  的量子态,而子系统  $B$  却不能改变子系统  $A$  的量子态或者相反,这种非对称的量子现象被称作单向 EPR 导引<sup>[14]</sup>。2012 年,单向 EPR 导引这一现象在以双模压缩态为基础的两组份系统中得到了验证<sup>[14]</sup>,此实验实现了两个纠缠的高斯模只在—

收稿日期: 2017-10-10; 收到修改稿日期: 2017-11-07

基金项目: 国家自然科学基金(61008006, 11674205, 11604190)、国家自然科学基金重点项目(91536222)、国家重点研发计划(2016YFA0301404)、山西省“1331 工程”重点学科建设计划

作者简介: 翟淑琴(1975—),女,博士,副教授,硕士生导师,主要从事量子光学、量子通信方面的研究。

E-mail: xiaozhai@sxu.edu.cn

个方向上的导引特性,这为 EPR 导引在量子信息中的应用开辟了新的领域。随后,He 等<sup>[15]</sup>于 2013 年将其在理论上扩展到了多组份量子系统中,并于 2015 年在实验上进行了验证<sup>[16]</sup>。以上两个实验都是在高斯态下进行的高斯测量,随后学者们又提出了对单向 EPR 导引现象进行论证的其他理论测量方法,包括一般的投影测量<sup>[17]</sup>、任意有限集合的正值测量<sup>[18]</sup>、无限集合的正值测量<sup>[19]</sup>以及无限数量的投影测量<sup>[20]</sup>。2016 年,Wollmann 等<sup>[21]</sup>在实验上验证了真正的单向 EPR 导引,发现存在任意测量基下都具有单向 EPR 导引特性的量子态,这使得单向 EPR 导引在量子信息中的应用迈向了一个新阶段。

尽管单向 EPR 导引已经得到了非常广泛的关注与研究<sup>[14,16,21]</sup>,但这些工作都侧重于研究量子系统中能否展现出单向 EPR 导引现象,而对于改变 EPR 导引方向的研究鲜有报道。本文通过在 EPR 态的一端增加噪声,理论上研究了噪声对输出的三方光学模的 EPR 导引方向的影响,并通过改变引入噪声的大小,分析了 EPR 导引参数随着噪声的变化关系,进一步分析了 EPR 导引的非对称性。此理论研究结果为单向 EPR 导引的实现提供了一种可行性方案。

## 2 EPR 导引特性的判定

考虑由一定数目的单模光场组成的量子系统,对于每个场模,其正交振幅与正交相位分别定义为  $\hat{X} = \hat{a}_m + \hat{a}_m^\dagger$ ,  $\hat{P} = (\hat{a}_m - \hat{a}_m^\dagger)/i$ ,其中  $\hat{a}_m$ 、 $\hat{a}_m^\dagger$  分别表示量子化后光场的湮灭算符与产生算符,下角标  $m$  用来区分不同的模式。并且这两个非对易的可观测量满足海森堡不确定关系:  $\Delta\hat{X}\Delta\hat{P} \geq 1$ ,其中  $\Delta\hat{X}$ 、 $\Delta\hat{P}$  分别为正交振幅与正交相位的平均方差。

假设有两个位置相距遥远的观测者 A、B,他们共享一个由光学模  $\hat{a}_A$ 、 $\hat{a}_B$  组成的 EPR 纠缠态,把对 A 端粒子的正交振幅进行测量得到的结果记作  $\hat{X}_A$ 。由于 A、B 处于纠缠态,对 A 的测量势必会影响 B 端的测量结果  $\hat{X}_B$ ,故可对 B 端粒子的正交振幅的测量结果作一个与 A 相关的线性推测,将其记作  $g_{\hat{X}_A} \hat{X}_A$ ,推测结果的相应误差可以表示为

$$\Delta_{\text{inf}}(\hat{X}_B) = \Delta(\hat{X}_B + g_{\hat{X}_A} \hat{X}_A), \quad (1)$$

式中  $g_{\hat{X}_A}$  为一个可以改变的参数,当其取得最优值时  $\Delta_{\text{inf}}(\hat{X}_B)$  相应取得最小值,此时  $\hat{X}_B$  的推测值最为精确,误差最小。同理,可对 B 端粒子的正交相位的测量结果作一个与 A 相关的线性推测,将其记

作  $g_{\hat{P}_A} \hat{P}_A$ ,推测结果的相应误差可以表示为

$$\Delta_{\text{inf}}(\hat{P}_B) = \Delta(\hat{P}_B + g_{\hat{P}_A} \hat{P}_A). \quad (2)$$

为了表征两组份系统的 EPR 导引特性,引入判定条件<sup>[16]</sup>,即

$$S_{B|A} = \Delta_{\text{inf}}(\hat{X}_B) \Delta_{\text{inf}}(\hat{P}_B) < 1, \quad (3)$$

式中  $S_{B|A}$  为两组份量子系统的关联参数,当其小于 1 时表明 A 对 B 具有导引能力,且其值越小,相应导引能力越强;否则 A 对 B 不具备导引能力。此判定标准对多组份量子系统仍然成立。考虑 N 组份量子系统,此系统的每一个子系统都处于不同的位置上,记处于位置 A 处的子系统为  $\hat{a}_i$ ,分别对其正交振幅与正交相位进行测量,测量结果记为  $\hat{X}_i$ 、 $\hat{P}_i$ ,二者之间满足海森堡不确定关系式  $\Delta\hat{X}_i \Delta\hat{P}_i \geq 1$ 。剩余的  $N-1$  个处于不同位置的子系统则认为来自非同一个本地量子态,因此这些子系统的测量结果的平均方差不需要满足海森堡不确定关系。分别对剩余的  $N-1$  个子系统的正交振幅与正交相位进行测量,其测量结果可以表示为  $\hat{X}_j$ 、 $\hat{P}_j$  ( $j=1,2,\dots,N, j \neq i$ )。这  $N-1$  个子系统可以根据各自的测量结果联合对 A 端的子系统  $\hat{a}_i$  的测量结果作一个线性推测,其推测结果可表示为  $\sum_{j \neq i} g_{\hat{X}_j} \hat{X}_j$ 、 $\sum_{j \neq i} g_{\hat{P}_j} \hat{P}_j$ ,相应的推测误差可表示为

$$\Delta_{\text{inf}}(\hat{X}_i) = \Delta(\hat{X}_i + \sum_{j \neq i} g_{\hat{X}_j} \hat{X}_j), \quad (4)$$

$$\Delta_{\text{inf}}(\hat{P}_i) = \Delta(\hat{P}_i + \sum_{j \neq i} g_{\hat{P}_j} \hat{P}_j). \quad (5)$$

此时 N 组份量子系统的 EPR 导引特性的判定条件<sup>[16]</sup>为

$$S_{i|k} = \Delta_{\text{inf}}(\hat{X}_i) \Delta_{\text{inf}}(\hat{P}_i) < 1, \quad (6)$$

式中关联参数  $S_{i|k}$  中的下角标  $k$  表示 N 组份量子系统中,除子系统  $i$  外剩余所有子系统的总和。定义  $(S_{i|k})^2$  为导引参数,当  $(S_{i|k})^2$  小于 1 时, N 组份量子系统表现出导引特性,用符号  $k \rightarrow i$  表示  $k$  对  $i$  具有导引能力,对应着  $k$ 、 $i$  之间的导引方向是  $k$  到  $i$ 。其值越小,导引能力越强。当  $(S_{i|k})^2$  小于 1,而  $(S_{k|i})^2$  大于 1 时,称  $k$  对  $i$  具有单向导引能力。而当  $(S_{i|k})^2$  大于 1 时, N 组份量子系统不具有导引特性。

## 3 物理模型

为了研究噪声对 EPR 导引方向的影响,模拟了线性噪声引入模式,相应的物理模型如图 1 所示。输入模  $\hat{a}_{1\text{in}}$  为正交振幅压缩的真空模,其压缩参量

为  $r_1$ ; 输入模  $\hat{a}_{2in}$  为正交相位压缩的真空模, 其压缩参量为  $r_2$ 。二者通过反射率为  $R_1$  的可调分束器  $BS_1$  后, 耦合产生一个 EPR 纠缠态, 接着通过分束器  $BS_3$ , 在 EPR 纠缠态的一端 1 增加方差为  $\delta_A$  的高斯噪声; 而另一端 2 则经过反射率为  $R_2$  的可调分束器  $BS_2$ , 与真空模  $\hat{v}_1$  耦合产生光束 4、5, 其光学模分别记作  $\hat{a}_4, \hat{a}_5$ 。然后光束 4 经过反射率为  $R_4$  的可调分束器  $BS_4$ , 与真空模  $\hat{v}_2$  耦合产生光束 6、7, 其光学模分别记作  $\hat{a}_6, \hat{a}_7$ 。HD<sub>1</sub>, HD<sub>2</sub>, HD<sub>3</sub> 分别为处在位置 A、B、C 三处的零差探测器, 用来探测该端输出模的正交振幅与正交相位。

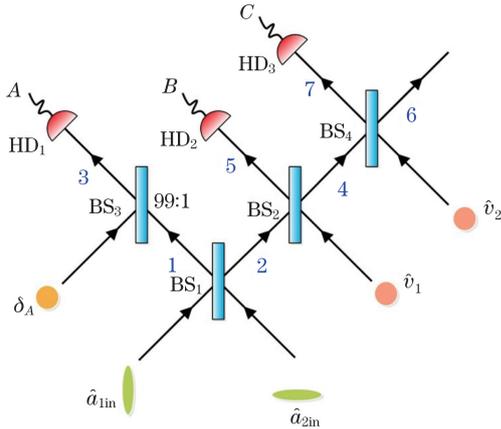


图 1 噪声对 EPR 导引影响的物理模型

Fig. 1 Schematic of physical model for investigating influence of noise on EPR steering

根据分束器模型, A、B、C 三端输出模的正交振幅与正交相位可分别表示为

$$\hat{X}_{Aout} = \sqrt{R_1} \hat{X}_{1in} + \sqrt{1-R_1} \hat{X}_{2in} + \hat{X}_{\delta_A}, \quad (7)$$

$$\hat{X}_{Bout} = \sqrt{R_2(1-R_1)} \hat{X}_{1in} - \sqrt{R_2 R_1} \hat{X}_{2in} + \sqrt{1-R_2} \hat{X}_{v_1}, \quad (8)$$

$$\hat{X}_{Cout} = \sqrt{R_4(1-R_2)(1-R_1)} \hat{X}_{1in} - \sqrt{R_4(1-R_2)R_1} \hat{X}_{2in} - \sqrt{R_4 R_2} \hat{X}_{v_1} + \sqrt{1-R_4} \hat{X}_{v_2}, \quad (9)$$

$$\hat{P}_{Aout} = \sqrt{R_1} \hat{P}_{1in} + \sqrt{1-R_1} \hat{P}_{2in} + \hat{P}_{\delta_A}, \quad (10)$$

$$\hat{P}_{Bout} = \sqrt{R_2(1-R_1)} \hat{P}_{1in} - \sqrt{R_2 R_1} \hat{P}_{2in} + \sqrt{1-R_2} \hat{P}_{v_1}, \quad (11)$$

$$\hat{P}_{Cout} = \sqrt{R_4(1-R_2)(1-R_1)} \hat{P}_{1in} - \sqrt{R_4(1-R_2)R_1} \hat{P}_{2in} - \sqrt{R_4 R_2} \hat{P}_{v_1} + \sqrt{1-R_4} \hat{P}_{v_2}, \quad (12)$$

式中  $\hat{X}_{iout}, \hat{P}_{iout}$  ( $i=A, B, C$ ) 分别为 A、B、C 三端输出模的正交振幅与正交相位;  $\hat{X}_{1in}, \hat{P}_{1in}, \hat{X}_{2in}, \hat{P}_{2in}$  分别为输入压缩真空模  $\hat{a}_{1in}, \hat{a}_{2in}$  的正交振幅与正交相位;  $\hat{X}_{v_1}, \hat{P}_{v_1}, \hat{X}_{v_2}, \hat{P}_{v_2}$  分别为输入真空模  $\hat{v}_1, \hat{v}_2$  的正交振幅与正交相位;  $R_1, R_2, R_4$  分别为可调分束器  $BS_1, BS_2, BS_4$  的反射率, 其值可在  $0 \sim 1$  范围内变化。为了讨论 A、B、C 三端的导引关系, 取  $R_4=1$ 。根据(4)~(5)式可以求出 A、B 以及 A、C 之间的正交振幅与正交相位的推测误差, 分别表示为

$$\begin{cases} \Delta_{inf}(\hat{X}_{Aout}) = \sqrt{(\Delta\hat{X}_{Aout})^2 + g_{\hat{X},B}^2 (\Delta\hat{X}_{Bout})^2} \\ \Delta_{inf}(\hat{P}_{Aout}) = \sqrt{(\Delta\hat{P}_{Aout})^2 + g_{\hat{P},B}^2 (\Delta\hat{P}_{Bout})^2} \end{cases}, \quad (13)$$

$$\begin{cases} \Delta_{inf}(\hat{X}_{Bout}) = \sqrt{(\Delta\hat{X}_{Bout})^2 + g_{\hat{X},A}^2 (\Delta\hat{X}_{Aout})^2} \\ \Delta_{inf}(\hat{P}_{Bout}) = \sqrt{(\Delta\hat{P}_{Bout})^2 + g_{\hat{P},A}^2 (\Delta\hat{P}_{Aout})^2} \end{cases}, \quad (14)$$

$$\begin{cases} \Delta_{inf}(\hat{X}_{Aout}) = \sqrt{(\Delta\hat{X}_{Aout})^2 + g_{\hat{X},C}^2 (\Delta\hat{X}_{Cout})^2} \\ \Delta_{inf}(\hat{P}_{Aout}) = \sqrt{(\Delta\hat{P}_{Aout})^2 + g_{\hat{P},C}^2 (\Delta\hat{P}_{Cout})^2} \end{cases}, \quad (15)$$

$$\begin{cases} \Delta_{inf}(\hat{X}_{Cout}) = \sqrt{(\Delta\hat{X}_{Cout})^2 + g_{\hat{X},A}^2 (\Delta\hat{X}_{Aout})^2} \\ \Delta_{inf}(\hat{P}_{Cout}) = \sqrt{(\Delta\hat{P}_{Cout})^2 + g_{\hat{P},A}^2 (\Delta\hat{P}_{Aout})^2} \end{cases}. \quad (16)$$

根据(6)式可相应求出  $(S_{A|B})^2, (S_{B|A})^2, (S_{A|C})^2, (S_{C|A})^2$ , 如果其值小于 1, 则两个系统之间具有导引特性, 否则不具有导引特性。

## 4 单方噪声对 EPR 导引的影响结果

根据物理模型及导引判据, 对图 1 模型中 A、B 两端以及 A、C 两端输出模的导引特性进行了研究。图 2(a)、(b)所示为方差  $\delta_A$  取不同值时 A、B 之间以及 A、C 之间的导引情况。其中, 输入压缩模  $\hat{a}_{1in}, \hat{a}_{2in}$  的压缩度均取 3 dB, 其对应的压缩参数为  $r_1 = r_2 = 0.345$ , 取可调分束器  $BS_1$  的反射率  $R_1 = 0.5$ ,  $BS_4$  的反射率  $R_4 = 1$ 。图 2(a)所示为 A、B 之间的相互导引参数  $(S_{B|A})^2, (S_{A|B})^2$  随  $R_2$  的变化关系, 其中实线表示 A 对 B 的导引情况, 虚线表示 B 对 A 的导引情况, 绿色线、蓝色线、红色线分别对应于  $\delta_A = 0, 0.15, 0.3$  的情况。从图 2 中可以看出, 在相同的  $R_2$  取值下,  $(S_{B|A})^2$  与  $(S_{A|B})^2$  都随着噪声  $\delta_A$  的增大而增大, 表明导引能力随之减弱。当  $\delta_A = 0.3$  时, 在整个  $R_2$  的取值范围内, B 对 A 不再具有导引能力, 而 A 对 B 具有导引能力, 即 A 对 B 单向导引的范围为  $0 < R_2 < 1$ 。而当  $\delta_A = 0.15$  时, A 对 B 的单向导引范围为  $0 < R_2 < 0.875$ , 相较于  $\delta_A = 0.3$  的

情形,其单向导引能力范围减小了。由此可见,增加噪声  $A$  阻止了  $B$  对其的导引。 $A$ 、 $C$  之间的相互导引情况如图 2(b)所示,其参数取值与图 2(a)中的相同,可以看出,导引参数  $(S_{C|A})^2$ 、 $(S_{A|C})^2$  在相同的  $R_2$  取值下,随着噪声的增大其值也相应增大,同样其导引能力有所减弱。当  $\delta_A=0.3$  时,在整个  $R_2$  取值范围内, $A$  可以导引  $C$ ,但是  $C$  不具备导引  $A$  的能力,即  $A$  对  $C$  的单向导引范围是  $0 < R_2 < 1$ 。而当  $\delta_A=0.15$  时, $A$  对  $C$  的单向导引范围为  $0.125 < R_2 < 1$ 。可以看出,相较于  $\delta_A=0.3$  的情形,其单向导引能力的范围减小了。同理可知,通过增加噪声, $A$  阻止了  $C$  对其的导引。综上所述,通过在 EPR 纠缠态的一端增加噪声,随着噪声的增大,该端的输出模逐渐阻止了未增加噪声端的输出模对其的导引,进而实现了单向量子导引。

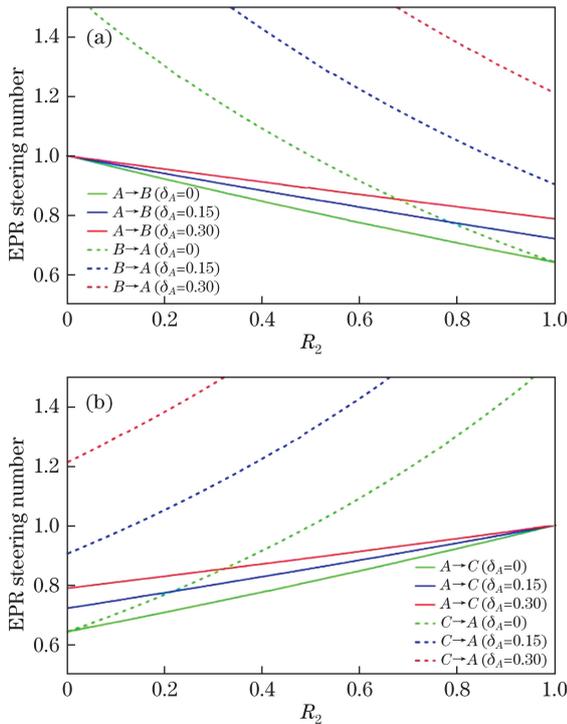


图 2 当  $\delta_A$  取不同值时,EPR 导引参数随反射率  $R_2$  的变化情况 ( $r_1=r_2=0.345, R_1=0.5, R_4=1$ )。

(a)  $(S_{B|A})^2, (S_{A|B})^2$ ; (b)  $(S_{C|A})^2, (S_{A|C})^2$

Fig. 2 EPR steering number versus reflectivity  $R_2$  under different  $\delta_A$  ( $r_1=r_2=0.345, R_1=0.5, R_4=1$ ).

(a)  $(S_{B|A})^2, (S_{A|B})^2$ ; (b)  $(S_{C|A})^2, (S_{A|C})^2$

图 3 所示为输入压缩模  $\hat{a}_{1in}$ 、 $\hat{a}_{2in}$  分别取不同的压缩度时, $A$ 、 $B$  以及  $A$ 、 $C$  之间的导引情况。其中增加的噪声  $\delta_A=0.2$ ,可调分束器  $BS_1$  的反射率  $R_1=0.5$ ,  $BS_4$  的反射率  $R_4=1$ 。图 3(a)所示为  $A$ 、 $B$  之间的相互导引参数  $(S_{B|A})^2$ 、 $(S_{A|B})^2$  随  $R_2$  的变化

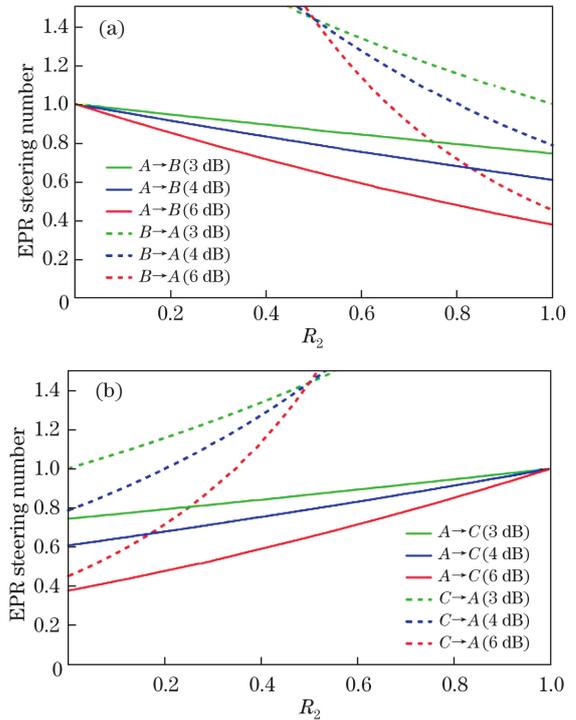


图 3 当  $\hat{a}_{1in}$ 、 $\hat{a}_{2in}$  的压缩度取不同值时,EPR 导引参数随反射率  $R_2$  的变化 ( $\delta_A=0.2, R_1=0.5, R_4=1$ )。

(a)  $(S_{B|A})^2, (S_{A|B})^2$ ; (b)  $(S_{C|A})^2, (S_{A|C})^2$

Fig. 3 EPR steering number versus reflectivity  $R_2$  for  $\hat{a}_{1in}$  and  $\hat{a}_{2in}$  with different squeezing degrees ( $\delta_A=0.2, R_1=0.5, R_4=1$ ).

(a)  $(S_{B|A})^2, (S_{A|B})^2$ ; (b)  $(S_{C|A})^2, (S_{A|C})^2$

关系,实线表示  $A$  对  $B$  的导引情况,虚线表示  $B$  对  $A$  的导引情况,绿色线、蓝色线、红色线分别对应于两个压缩模的压缩度取 3 dB ( $r_1=r_2=0.345$ )、4 dB ( $r_1=r_2=0.461$ )、6 dB ( $r_1=r_2=0.691$ ) 的情况。可以看出,在相同的  $R_2$  取值下,  $(S_{B|A})^2$  与  $(S_{A|B})^2$  的值随着压缩程度的增大而减小,说明其导引能力增强了。当两个输入模的压缩度为 3 dB 时,在整个  $R_2$  的取值范围内, $A$  对  $B$  都具有导引能力,而此时  $B$  对  $A$  不具备导引能力,此时  $A$  对  $B$  单向导引, $A$  对  $B$  的单向导引范围为  $0 < R_2 < 1$ 。当两个压缩模的压缩度取 4 dB 时, $A$  对  $B$  的单向导引范围为  $0 < R_2 < 0.8$ ;当两个压缩模的压缩度取 6 dB 时, $A$  对  $B$  的单向导引范围为  $0 < R_2 < 0.65$ 。通过比较可以看出,随着两个压缩模的压缩程度的增加,其单向导引范围逐渐减小。 $A$  与  $C$  之间的相互导引情况如图 3(b)所示,其相应参数的取值与图 3(a)中的相同,可以看出随着两个输入压缩模的压缩程度的增大,在  $R_2$  取值相同的情况下,其导引参数  $(S_{C|A})^2$ 、 $(S_{A|C})^2$  也逐渐减小,相应的导引能力同样增强。当两个输入压缩模的压缩度为 3 dB 时,在

$R_2$  的整个取值范围内,  $A$  可以导引  $C$ , 而  $C$  却不能导引  $A$ , 因此  $A$  对  $C$  的单向导引范围为  $0 < R_2 < 1$ 。当两个压缩模的压缩度取 4 dB 时,  $A$  对  $C$  的单向导引范围为  $0.2 < R_2 < 1$ ; 当两个压缩模的压缩度取 6 dB 时,  $A$  对  $C$  的单向导引范围为  $0.35 < R_2 < 1$ 。由此可知, 随着两个压缩模的压缩程度的增加,  $A$  对  $C$  的单向导引范围也是减小的。综上所述, 不论是  $A$ 、 $B$  之间还是  $A$ 、 $C$  之间, 其导引能力的增强都是以牺牲其单向导引范围的大小为代价的。在实际应用中, 可以通过选择适当的压缩参量与噪声, 既保证较好的导引能力, 又保证较大的单向导引范围。

## 5 结 论

提出了一种通过在 EPR 态的一端增加噪声来操控 EPR 导引方向的方案, 此方案可以使有噪声端与无噪声端的导引能力呈现不对称的分布。理论研究表明, 在 EPR 态的一端引入噪声后, 通过调节分束器的反射率可以改变两端的导引能力, 增加噪声端的光学模可以导引无噪声端经过不同分束器耦合后得到的光学模; 而无噪声端的光学模对有噪声端的光学模的导引能力则取决于分束器的反射率以及噪声的大小。此方案通过引入单端噪声实现了对 EPR 导引方向的操控, 结构简单, 实验上易于操作。但噪声的引入使导引参数增大, 从而减弱了导引能力, 在具体应用中应根据需求选择可行的参数。此方案在很大范围内可以实现单向量子导引, 为量子安全通信、量子秘密共享等量子信息过程的单向要求提供了可靠的保证, 为单端设备不依赖的量子秘密共享方案提供了更多的可能, 在量子通信中具有潜在的应用。

## 参 考 文 献

- [1] Schrödinger E. Discussion of probability relations between separated systems[J]. Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society, 1935, 31(4): 555.
- [2] Bell J S. On the Einstein Podolsky Rosen paradox[J]. Physics, 1964, 1(3): 195-200.
- [3] Horodecki R, Horodecki P, Horodecki M, *et al.* Quantum entanglement[J]. Review of Modern Physics, 2009, 81(2): 865-942.
- [4] Zhao Y P, Hao S H, Su X L, *et al.* Generation system of continuous-variable six-partite and eight-partite star Cluster entangled states[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(6): 0627002.  
赵亚平, 郝树宏, 苏晓龙, 等. 连续变量六组份和八组份星型 Cluster 纠缠态光场产生系统[J]. 光学学报, 2012, 32(6): 0627002.
- [5] Sun Y, Zhao S H, Dong C. Measurement device independent quantum key distribution network based on quantum memory and entangled photon sources[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(3): 0327001.  
孙颖, 赵尚弘, 东晨. 基于量子存储和纠缠光源的测量设备无关量子密钥分配网络[J]. 光学学报, 2016, 36(3): 0327001.
- [6] Wiseman H M, Jones S J, Doherty A C. Steering, entanglement, nonlocality, and the Einstein-Podolsky-Rosen paradox[J]. Physical Review Letters, 2007, 98(14): 140402.
- [7] Jones S J, Wiseman H M, Doherty A C. Entanglement, Einstein-Podolsky-Rosen correlations, Bell nonlocality, and steering[J]. Physical Review A, 2007, 76(5): 052116.
- [8] Wu Q, Zhu G J, Zhang Y D, *et al.* Nonlocality of entangled states and its evolution in a thermal reservoir[J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(12): 1409-1414.  
吴强, 朱国骏, 张永德, 等. 纠缠薛定谔猫态的非局域性及其在热库中的演化[J]. 光学学报, 2002, 22(12): 1409-1414.
- [9] Branciard C, Cavalcanti E G, Walborn S P, *et al.* One-sided device-independent quantum key distribution: Security, feasibility, and the connection with steering[J]. Physical Review A, 2012, 85(1): 010301.
- [10] Opanchuk B, Arnaud L, Reid M D. Detecting faked continuous-variable entanglement using one-sided device-independent entanglement witnesses[J]. Physical Review A, 2014, 89(6): 062101.
- [11] Reid M D. Signifying quantum benchmarks for qubit teleportation and secure quantum communication using Einstein-Podolsky-Rosen steering inequalities[J]. Physical Review A, 2013, 88(6): 062338.
- [12] He Q Y, Gong Q H, Reid M D. Classifying directional Gaussian entanglement, Einstein-Podolsky-Rosen steering, and discord[J]. Physical Review Letters, 2015, 114(6): 060402.
- [13] Kang D N, He Y F. Quantum key distribution protocols based on asymmetric channels of odd coherent sources[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(6): 0627001.  
康丹娜, 何业锋. 基于奇相干光源非对称信道的量子密钥分配协议[J]. 光学学报, 2017, 37(6): 0627001.
- [14] Händchen V, Eberle T, Steinlechner S, *et al.* Observation of one-way Einstein-Podolsky-Rosen steering[J]. Nature Photonics, 2012, 6(9): 596-599.
- [15] He Q Y, Reid M D. Genuine multipartite Einstein-Podolsky-Rosen steering[J]. Physical Review Letters, 2013, 111(25): 250403.

- [16] Armstrong S, Wang M, Teh R Y, *et al.* Multipartite Einstein-Podolsky-Rosen steering and genuine tripartite entanglement with optical networks[J]. *Nature Physics*, 2015, 11(2): 167-172.
- [17] Bowles J, Vértesi T, Quintino M T, *et al.* One-way Einstein-Podolsky-Rosen steering[J]. *Physical Review Letters*, 2014, 112(20): 200402.
- [18] Skrzypczyk P, Navascués M, Cavalcanti D. Quantifying Einstein-Podolsky-Rosen steering[J]. *Physical Review Letters*, 2014, 112(18): 180404.
- [19] Quintino M T, Vértesi T, Cavalcanti D, *et al.* Inequivalence of entanglement, steering, and Bell nonlocality for general measurements[J]. *Physical Review A*, 2015, 92(3): 032107.
- [20] Evans D A, Wiseman H M. Optimal measurements for tests of Einstein-Podolsky-Rosen steering with no detection loophole using two-qubit Werner states[J]. *Physical Review A*, 2014, 90(1): 012114.
- [21] Wollmann S, Walk N, Bennet A J, *et al.* Observation of genuine one-way Einstein-Podolsky-Rosen steering[J]. *Physical Review Letters*, 2016, 116(16): 160403.