

# 基于高损耗信道的纠缠分发实验模拟\*

印娟 雍海林 吴裕平 彭承志†

(中国科学技术大学近代物理系,合肥微尺度物质科学国家实验室,合肥 230026)

(2011年3月15日收到;2011年4月27日收到修改稿)

实验模拟了总信道损耗 70 dB 的纠缠分发和 Bell 不等式的破坏,相当于纠缠光子对从轨道高度 350 km 的卫星上发射(口径 13.5 cm),到仰角大于  $10^\circ$  的地面站被接收(口径 100 cm)的信道损耗<sup>[11]</sup>,模拟纠缠分发距离超过千公里;并且通过理论和实验研究,明确了高信道衰减下量子纠缠分发的关键技术突破点,首先必须降低系统暗计数和提高系统时间分辨,在此基础上提高纠缠源的亮度,系统将能容忍更高的信道衰减,实现更远的通信距离.

**关键词:** 纠缠分发, 信道损耗, 时间分辨, Bell 不等式

**PACS:** 03.67.HK, 03.65.Ud, 03.67.Dd

## 1. 引言

量子纠缠<sup>[1]</sup>作为量子信息处理的核心资源,是目前量子信息物理学最活跃的研究领域之一<sup>[2,3]</sup>. 量子纠缠在量子系统之间是否有距离限制,人们从来没有间断过对它的研究;另一方面其最突出的应用量子密钥分配<sup>[4,5]</sup>(量子密码),可在相距遥远的两地建立无条件安全的密钥,远距离量子通信成为了国际激烈竞争的焦点.

近年来国际上的研究小组不停在刷新量子纠缠分发距离的记录,从最初室内几米的平台实验到多瑙河畔 600 m 自由空间纠缠分发<sup>[6]</sup>,到合肥 13 km 自由空间纠缠分发<sup>[7]</sup>,再到 144 km 基于纠缠光子的量子通信系列实验<sup>[8,9]</sup>,可谓进展迅速. 然而由于近地面大气损耗和湍流以及地球曲率等因素,百公里传输距离已经是当今科技的极限,如何突破这一限制在更广域的范围实现量子通信过程,成为了摆在人们面前的难题. 由于光子在外太空的衰减几乎为零,基于空间平台的量子通信被公认为最切实可行的技术途径之一,国际上重要的发达国家均已投入大量人力物力致力于该方向的理论和实验研究. 欧盟小组早在 2008 年便向欧洲空间局的生命和物理科学部

提交了“Space-QUEST”实验方案<sup>[10]</sup>,打算 2014 年在空间环境中引入量子纠缠,在国际空间站(ISS)实现星地量子通信实验,这将开创超出地球上几个量级测试距离的量子通信和基础物理研究的新时代.

目前地面的量子保密通信技术发展已经相对成熟,然而要在空间平台搭载纠缠源,与两个地面站同时建立信道传输纠缠光子,空间载荷和地面站的设计、量子信道的建立等都是具有较大技术难度的. 本文脱离纯粹的技术问题,而从方案本身以及国际上现有的技术水平出发,在实验上模拟了 70 dB 高信道损耗的纠缠分发和 Bell 不等式破坏,这样的衰减相应于在 350 km 轨道高度的卫星上,用口径 13.5 cm 的两个望远镜分别发射纠缠光子,两个地面站用口径 100 cm 的望远镜去接收,每个单边链路超过 1500 km 时的损耗<sup>[11]</sup>,也即模拟实现了超过千公里量级的量子纠缠分发;并对纠缠光源亮度、纠缠对比度、信道损耗、背景和探测器噪声、系统时间分辨等相关制约参数<sup>[12,13]</sup>进行了量化实验测试和数值模拟,理论和实验结果表明,要实现更高损耗下的纠缠分发,首先必须突破系统时间分辨这一瓶颈,在此基础上提高纠缠源的亮度才有效,为今后进一步技术突破指明了方向.

\* 国家自然科学基金(批准号:61078012)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: pcz@ustc.edu.cn

## 2. 理论估算

首先对远距离量子纠缠分发系统简要划分,如图 1 所示,包括:纠缠源和发射系统、Alice 接收系统和 Bob 接收系统. 因为两条信道链路都有发射和接收系统,为便于简化模型和参数设置,以下计算均假定系统为对称的,即 Alice 和 Bob 端的参数相同,其中有光源纠缠光子对  $N_0$ , 纠缠单路收集和探测效率  $\eta_0$  (包含光学收集和单光子探测效率), 纠缠分发

单边链路衰减  $\eta$  (包含发射系统效率、自由空间几何衰减、接收系统效率、不包含接收端探测器效率), 暗计数  $N_b$  (接收系统探测的总暗计数: 由信道引入的噪声和本底暗计数组成), 系统极化对比度  $\beta_0$  (包括纠缠源本身的品质, 光学系统的极化保偏度在内), 系统时间分辨  $\tau$ , 测量时间  $T$  (卫星单次过境可进行量子通信时间). 单边探测光子数  $N = N_0 \cdot \eta_0 \cdot \eta + N_b$ , 实际探测到的纯纠缠光子对  $N_c = N_0 \cdot \eta_0^2 \cdot \eta^2$ , 偶然符合数(对于  $N \gg N_c$ )  $N_a \approx N^2 \cdot \tau = (N_c + 2N_b \cdot \eta_0 \cdot \eta + N_b^2/N_0) \cdot N_0 \cdot \tau$ .

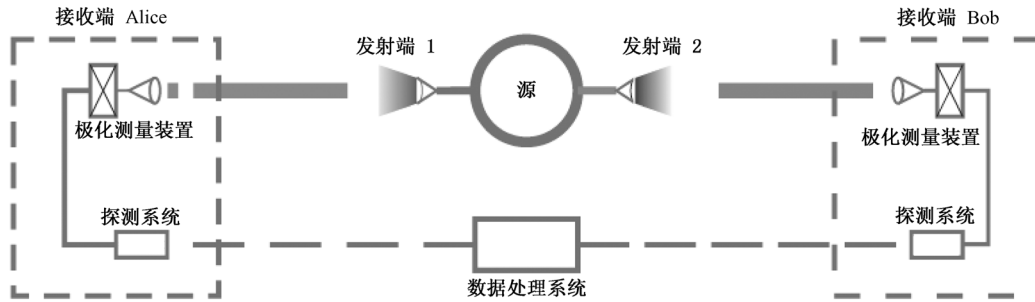


图 1 纠缠分发系统结构框图

全系统对比度可以表述为

$$\beta = \frac{N_c \cdot \frac{\beta_0}{\beta_0 + 1} + \frac{N_a}{2}}{N_c \cdot \frac{1}{\beta_0 + 1} + \frac{N_a}{2}}$$

Bell-CHSH 不等式<sup>[3]</sup>检验的参数有  $S$  值和标准方差  $\delta$  两个,  $S$  值的大小主要取决于纠缠分发后全系统的对比度  $\beta$ , 而  $\delta$  则与积累足够纠缠符合有关, 对于权重均匀的基矢选择, 有

$$S = 2\sqrt{2} \cdot \frac{\beta - 1}{\beta + 1} = 2\sqrt{2} \cdot \frac{\beta_0 - 1}{\beta_0 + 1} \cdot \frac{N_c}{N_c + N_a},$$

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{(N_c + N_a) \cdot T}} \cdot \sqrt{1 + \frac{4\beta}{(\beta + 1)^2}}$$

## 3. 实验装置及结果

### 3.1. 基于周期极化 $\text{KTiOPO}_4$ 晶体 (PPKTP) 的高亮度纠缠源

实验中采用基于 PPKTP 晶体的 II 型参量下转换源<sup>[13,14]</sup>, 制备的纠缠光子对处于  $|\psi^-\rangle = |H\rangle|V\rangle - |V\rangle|H\rangle$  态. 纠缠源的各项参数如表 1 所列, 抽运光功率 17.6 mW, 3 ns 符合门宽下测得纠缠光子对每秒 570 K, 对应纠缠源的产生亮度 21.71 MHz, 45°

对比度 22:1. 通过对 PPKTP 晶体控温 (负温度系数 NTC 电阻值 2 k $\Omega$ , 简并温度 73 °C), 使得下转换纠缠光子处于简并波长, 中心波长 811.54 nm, 半高全宽 (FWHM) 0.6 nm, 这一点对于自由空间量子通信是非常有利的, 可以使用 nm 级窄带滤波片滤除更多的背景噪声<sup>[15]</sup>.

表 1 高亮度纠缠源参数

物理量/单位	参数
激光功率/mW	17.6
量子单路(近端/远端)/cps	4385012/2841712
符合数/cps	574066
符合效率/%	16.3
H/V 对比度	32:1
+/- 对比度	22:1
源亮度(产生光子对)/MHz	21.71

### 3.2. 平台模拟实验及结果

纠缠分发模拟系统光路如图 2 所示, 纠缠光子对经两根 5 m 单模光纤引到实验平台区域: 发射装置中, 光纤通过 11 mm 非球面透镜准直发射到自由空间, 在发射光路中的极化控制装置<sup>[16]</sup> (两个 1/4 波片和一个 1/2 波片) 用于补偿光纤引入的极化扭



图2 纠缠分发模拟光路图

转;接收装置中,电光调制器和极化分束器共同组成对光子的基矢测量,光子经 11 mm 非球面透镜耦合进 105  $\mu\text{m}$  多模光纤,最后进单光子探测器;电子

学装置中,探测器输出的电信号与电光调制器信号逻辑操作获得 4 路量子信号,全球定位系统(GPS)的秒脉冲信号用作两边系统起始同步和粗的时间校准,5 kHz 的信号源分成两路模拟同步光信号,Alice 和 Bob 分别用时间测量器件(time to digital converter, 简记为 TDC)记录接收到的量子信号、GPS 信号、同步光信号.另外在光路中还设有可调中性密度衰减片用于模拟不同的大气衰减,用可调光强台灯模拟不同暗计数情况.

在两组不同的系统极化对比度条件下,我们进行了一系列参数变化下的 Bell-CHSH 不等式破缺实验,数据结果如下:

1)单边极化控制对比度 35:1,符合门宽为 3 ns,数据结果如表 2 所列.

2)单边极化控制对比度 23:1,符合门宽分别为 3 和 1 ns,数据结果如表 3 所列.

表2 单边极化控制 35:1 的数据结果

测试条件	测试时间	符合数	S 值	$\Delta$ 值	标准差破坏
衰减 25 dB,暗计数 2000	30 min@ 21:17	8992@ 3 ns	2.282	0.034	8.267
衰减 25 dB,暗计数 1000	30 min@ 22:31	8626@ 3 ns	2.382	0.035	10.914
衰减 30 dB,暗计数 1000	30 min@ 17:09	1266@ 3 ns	2.308	0.092	3.35
衰减 30 dB,暗计数 500	30 min@ 19:42	1282@ 3 ns	2.314	0.091	3.45
衰减 35 dB,暗计数 500	30 min@ 20:28	99@ 3 ns	2.29	0.327	0.89

表3 单边极化控制 23:1 的数据结果

测试条件	测试时间	符合数	S 值	$\Delta$ 值	标准差破坏
衰减 30 dB,暗计数 1000	30 min@ 23:11	814@ 3ns	1.792	0.120	未破坏
		460@ 1 ns	2.197	0.149	1.32
衰减 30 dB,暗计数 500	30 min@ 0:51	804@ 3 ns	1.951	0.128	未破坏
		430@ 1 ns	2.261	0.151	1.73

实验数据显示,目前的技术水平下,纠缠光子对  $N_0 = 20 \text{ MHz}$ ,  $\eta_0 = 0.15$ ,  $N_b = 500 \text{ cps}$ ,  $\tau = 3 \text{ ns}$ ,  $\beta_0 = 15$ , 实现单边链路损耗 35 dB 的纠缠分发已经是一个极限.我们在保持其他参数不变的情况下,改变信道衰减、极化对比度、系统暗计数和时间分辨中的某单一参数进行比较,由实验结果得出以下结论:信道衰减越小、暗计数越小、极化对比度越高或者时间分辨越小,则 S 值越高;信道衰减越小标准差破坏越大,也即信道衰减增大的情况,累计足够数据所需时间就相应越长,结论与理论分析结果

相符.

#### 4. 数值模拟

在距离超过 1000 km 的纠缠分发实验中,信道衰减总在 20 dB 以上<sup>[10-12]</sup>,此时除了要保证系统一定的极化对比度以外,偶然符合带来的全系统对比度下降不可忽略.图 3 为不同链路衰减  $\eta$  下,S 值随暗计数  $N_b$  的变化,降低系统暗计数是容忍更高信道损耗的最直接可行方法.

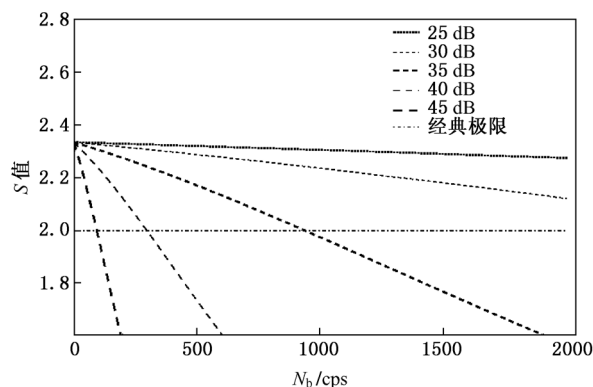


图3 不同衰减下 S 值随暗计数的变化曲线

然而系统暗计数不可能无限制减小,若使用可见光波段最高等级的探测器并进行合理的滤波,系统暗计数也仅可降到 200 cps. 除去系统暗计数外,偶然符合的贡献还来源于纠缠光源本身,图 4 所示为 S 值随时间分辨  $\tau$  和纠缠光子对  $N_0$  的变化关系图,在 35 dB 信道损耗和 3 ns 系统时间分辨下,单纯提高纠缠源亮度反而会降低 S 值;而 Bell 不等式破缺的另一个指标标准方差  $\delta$  要求尽可能的提高光源亮度,因此两方面的要求相互矛盾.

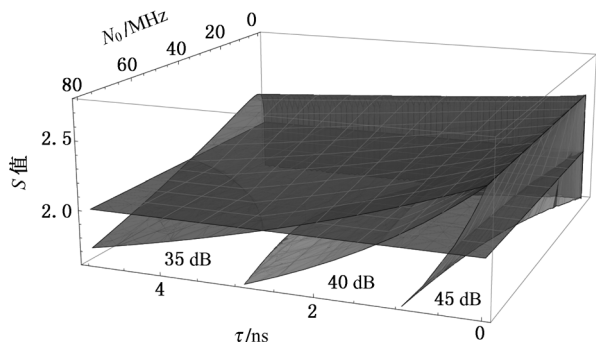


图4 不同衰减下 S 值随光源亮度和时间分辨的变化曲线

图 4 的数值模拟还显示,只有当系统时间分辨提高到 1 ns 以内,提高纠缠源亮度开始对 S 值有正贡献,因此今后的技术突破中提高系统时间分辨就显得尤为重要,而要突破现有 70 dB 的信道损耗极限,将其提高一到两个量级,要求系统时间分辨首

先要提高到百皮秒量级. 纠缠分发的系统时间分辨主要来源于单光子探测器、时间测量器件和远程时间同步系统. 其中单光子探测器一项,在实验中我们选用了 PerkinElmer 公司 SPCM-AQRH-1X 型系列探测器,其自身有 350 ps 的时间晃动,在系统时间分辨中贡献 500 ps;时间测量器件一项,我们采用自行研制的 TDC,其时间测量精度 160 ps;时间同步系统一项,在模拟实验中由于采用了信号发生器,引入的影响可以忽略,在远程系统中将取决于采用的同步方式<sup>[6,7,17]</sup>. 相比之下,单光子探测器的时间晃动成为目前最突出的制约因素.

比较目前商用产品中的单光子探测器,SPCM 系列探测器虽然时间分辨相对较差,但有较高的量子效率(50% @ 800 nm),其最低暗计数小于 25 Hz;另一个较常见的探测器是 id Quantique 公司的 id100,其暗计数同样小于 20 Hz,时间分辨较高只有 40 ps,然而量子效率峰值只有 35% @ 500 nm,同样在 800 nm 波段则不到 10%. 因此要兼顾探测效率、暗噪声和时间分辨三方面,一个值得尝试的方法是寻找合适的抽运激光器,改变纠缠光源的波长,以期同时获得 id100 较高的时间分辨和峰值探测效率.

## 5. 总 结

在纠缠光源亮度 20 MHz,极化对比度 15:1,系统暗计数 500 cps 和时间分辨 1 ns 的技术水平下,实验模拟了总信道损耗 70 dB 的纠缠分发,实现了 Bell 不等式的破坏;并从实验和理论上量化了信道衰减、极化对比度、系统暗计数和时间分辨对结果的制约. 理论和实验结果表明,要实现远距离量子纠缠分发和 Bell 不等式破坏,在远程高信道衰减下,单纯靠提高系统极化对比度、提高纠缠源亮度等手段是不足够的,必须首先降低系统暗计数,然后在提高系统时间分辨的基础上提高纠缠源的亮度,才能容忍更高的信道衰减,实现更远的通信距离.

[1] Einstein A, Podolsky B, Rosen N 1935 *Phys. Rev.* **47** 777  
 [2] Bell J S 1964 *Physics* **1** 195  
 [3] Clauser J F, Horne M A, Shimony A, Holt R A 1969 *Phys. Rev. Lett.* **23** 880

[4] Gisin N, Ribordy G, Tittel W, Zbinden H 2002 *Rev. Mod. Phys.* **74** 145  
 [5] Scarani V, Bechmann-Pasquinucci H, Cerf N J, Dušek M, Lütkenhaus N, Peev M 2009 *Rev. Mod. Phys.* **81** 1301

- [6] Aspelmeyer M, Böhm H R, Gyatso T, Jennewein T, Kaltenbaek R, Lindenthal M, Molina-Terriza G, Poppe A, Resch K, Taraba M, Ursin R, Walther P, Zeilinger A 2003 *Science* **301** 621
- [7] Peng C Z, Yang T, Bao X H, Zhang J, Jin X M, Feng F Y, Yang B, Yang J, Yin J, Zhang Q, Li N, Tian B L, Pan J W 2005 *Phys. Rev. Lett.* **94** 150501
- [8] Ursin R, Tiefenbacher F, Schmitt-Manderbach T, Weier H, Scheidl T, Lindenthal M, Blauensteiner B, Jennewein T, Perdigues J, Trojek P, Ömer B, Füst M, Meyenburg M, Rarity J, Sodnik Z, Barbieri C, Weinfurter H, Zeilinger A 2007 *Nat. Phys.* **3** 481
- [9] Fedrizzi A, Ursin R, Herbst T, Nespola M, Prevedel R, Scheidl T, Tiefenbacher F, Jennewein T, Zeilinger A 2009 *Nat. Phys.* **5** 389
- [10] Ursin R, Jennewein T, Kofler J, Perdigues J, Cacciapuoti L, Matos C J, Aspelmeyer M, Valencia A, Scheidl T, Fedrizzi A, Acin A, Barbieri C, Bianco G, Brukner Č, Capmany J, Cova S, Giggenbach D, Leeb W, Hadfield R H, Laflamme R, Lütkenhaus N, Milburn G, Peev M, Ralph T, Rarity J, Renner R, Samain E, Solomos N, Tittel W, Torres J P, Toyoshima M, Ortigosa-Blanch A, Pruneri V, Villoresi P, Walmsley I, Weihs G, Weinfurter H, Żukowski M, Zeilinger A 2009 *Europhys. News* **40** 26
- [11] Pfennigbauer M, Aspelmeyer M, Leeb W, Baister G, Dreischer T, Jennewein T, Neckamm G, Perdigues J, Weinfurter H, Zeilinger A 2005 *J. Opt. Commun. Netw.* **4** 549
- [12] Bonato C, Tomaello A, Deppo V D, Naletto G, Villoresi P 2009 *New J. Phys.* **11** 045017
- [13] Scheidl T, Ursin R, Fedrizzi A, Ramelow S, Ma X S, Herbst T, Prevedel R, Ratschbacher L, Kofler J, Jennewein T, Zeilinger A 2009 *New J. Phys.* **11** 085002
- [14] Ren J G, Zhang H, Cai X D, Yin J, Zhou F, Peng C Z 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 5169 (in Chinese) [任继刚、张涵、蔡昕东、印娟、周飞、彭承志 2009 物理学报 **58** 5169]
- [15] Fedrizzi A, Herbst T, Poppe A, Jennewein T, Zeilinger A 2007 *Opt. Express* **15** 15377
- [16] Wang S K, Ren J G, Peng C Z, Jiang S, Wang X B 2007 *Chin. Phys. Lett.* **24** 2471
- [17] Jennewein T, Simon C, Weihs G, Weinfurter H, Zeilinger A 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 4729

## Experimental simulation of quantum entanglement distribution over a high-loss channel\*

Yin Juan Yong Hai-Lin Wu Yu-Ping Peng Cheng-Zhi<sup>†</sup>

(Hefei National Laboratory for Physical Sciences at the Microscale, Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

(Received 15 March 2011; revised manuscript received 27 April 2011)

### Abstract

We experimentally simulate entanglement distribution and demonstrate the violation of Bell's inequality over 70 dB channel loss. Imaging a communication system which is composed of a satellite-based entangled photon source at a height of 350 km, two satellite-based transmitting telescopes each with a diameter of 13.5 cm, and two receiving telescopes each with a diameter of 100 cm on the ground station. At a minimum ground elevation angle of 10°, the attenuation for optical links to two ground stations over thousand kilometers is comparable to that we have achieved. Furthermore, theoretical and experimental studies demonstrate the key technology researches in entanglement distribution with high loss. First of all, we should reduce the dark noise and raise the time resolution of the system. On this basis, with the brightness enhancement of the source, the system is tolerant of higher link attenuation and long communication distance.

**Keywords:** entanglement distribution, channel loss, time resolution, Bell's inequality

**PACS:** 03.67.HK, 03.65.Ud, 03.67.Dd

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61078012).

† Corresponding author. E-mail: pcz@ustc.edu.cn