

1-4-2019

Progress of Quantum Information System and Its Scale Model Test

Miao Qiang

Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China;

Dewei WU

Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Progress of Quantum Information System and Its Scale Model Test

Abstract

Abstract: In the free-space quantum information technology application fields, such as the quantum communication system, the quantum positioning/navigation system and the quantum radar system, the non-ideal channel environment can cause quantum fading effect to destroy the availability of the whole quantum system. *The development of the channel fading experiment of the quantum information transmission system was summarized and analyzed. The scale model experiment idea of the free-space quantum transmission system was put forward: the whole free-space quantum transmission system including the channel environment was reduced in size with a big scale factor to establish a scale model system; the operational principle, feasibility and performance of the prototype system can be verified by this scale model system. Aiming at this goal, the method for channel fading mechanism model and the similitude theory of the quantum transmission system were discussed. Taking the quantum radar cross section as an example, the established similitude criterion of the quantum transmission system was verified.* The proposed idea can provide a new way for the experiment of free space quantum transmission system.

Keywords

quantum transmission system, free-space transmission, channel fading, quantum decoherence, scale model experiment

Recommended Citation

Miao Qiang, WU Dewei. Progress of Quantum Information System and Its Scale Model Test[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(4): 1294-1301.

量子信息系统实验进展及其缩比模型试验

苗强, 吴德伟

(空军工程大学, 陕西 西安 710077)

摘要: 自由空间量子传输系统信道环境的非理想性, 将对量子传输产生衰落效应, 破坏系统可用性。总结自由空间量子信息传输系统信道衰落实验进展, 提出自由空间量子信息传输系统信道衰落缩比实验思想, 将包含信道环境在内的量子传输系统以较大缩比因子建立缩比模型, 在缩比模型系统中验证原型系统的工作原理及性能等。讨论了量子传输系统信道衰落机制建模、量子传输系统相似理论的研究方法, 以量子雷达散射截面为例理论验证了所建立量子传输相似准则的正确性。提出的研究思路可为目前自由空间量子传输系统实验提供新的研究途径。

关键词: 量子传输系统; 自由空间传输; 信道衰落; 量子退相干; 缩比模型实验

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2018) 04-1294-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201804011

Progress of Quantum Information System and Its Scale Model Test

Miao Qiang, WU Dewei

(Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: In the free-space quantum information technology application fields, such as the quantum communication system, the quantum positioning/navigation system and the quantum radar system, the non-ideal channel environment can cause quantum fading effect to destroy the availability of the whole quantum system. The development of the channel fading experiment of the quantum information transmission system was summarized and analyzed. The scale model experiment idea of the free-space quantum transmission system was put forward: the whole free-space quantum transmission system including the channel environment was reduced in size with a big scale factor to establish a scale model system; the operational principle, feasibility and performance of the prototype system can be verified by this scale model system. Aiming at this goal, the method for channel fading mechanism model and the similitude theory of the quantum transmission system were discussed. Taking the quantum radar cross section as an example, the established similitude criterion of the quantum transmission system was verified. The proposed idea can provide a new way for the experiment of free space quantum transmission system.

Keywords: quantum transmission system; free-space transmission; channel fading; quantum decoherence; scale model experiment

引言

量子信息传输的自由空间并非理想空间, 如星



收稿日期: 2016-04-29 修回日期: 2017-03-09;
基金项目: 国家自然科学基金(61603413), 陕西省自然科学基金基础研究计划(2017JM6017);
作者简介: 苗强(1981-), 男, 山东滕州, 博士后, 副教授, 研究方向为量子导航。

基量子通信系统、星基量子定位/导航系统中的量子信道是一个包含地球大气层的传输通道, 大气中的各种粒子必然会对量子传输质量产生衰落效应; 陆基量子导航、量子雷达的信道衰落除包含大气粒子的影响外, 还包含信道中目标与环境的散射效应。区别于经典卫星通信、定位/导航、雷达系统的信道衰落, 由于量子信息传输系统与经典电磁系

统对电磁波(光子)应用原理的差异, 导致量子信息系统的自由空间信道衰落效应不仅包含与经典无线传输相同的能量耗散, 更重要的是对所传输光子的量子态的影响, 使其出现系统相干性逐步消退的现象, 即量子退相干效应。量子退相干将使建立在量子相干性基础上的量子信息衰减, 使系统所具有的纠缠模式逐渐丧失, 最终演变成一个等概分布的完全随机的混态, 导致量子信息传输和量子信息系统的失效, 破坏系统可用性^[1]。因此必须对自由空间信道量子传输衰落效应及其对量子系统效能的影响进行研究。

国内外学者对于量子信息自由空间传输系统, 特别是对进入实际工程应用研究论证阶段的自由空间量子通信系统已经在地面模拟自由空间环境进行过大量实验研究, 并得出了很多具有重要意义的实验结论^[2-3]。然而, 这种基于地面大气环境的原型系统实验存在以下局限性: 一是由于地面大气环境与实际自由空间传输信道环境的非精确一致性, 一些实验结果并不能完全准确预测真实自由空间环境中系统的实际工作情况; 二是室外实验环境要求比较苛刻, 实验过程复杂, 实验周期也较长。此外, 在量子定位/导航与量子雷达的应用领域, 由于研究起步较晚, 尚未见到对工程应用阶段系统信道环境适应性实验的相关研究报道, 但是对自由空间传输信道中大气粒子、障碍物散射体以及雷达目标本身对量子传输衰落效应的实验研究仍然是量子定位/导航和量子雷达技术后续研究必不可少的重要一环。

对于经典的电磁应用系统传输信道衰落的实验研究, 物理缩比模型实验是一种方便高效的方法。缩比模型实验是以经典电磁系统的相似理论为依据, 将原型系统及其作用空间环境按照相似准则进行几何与物理缩比, 进而模拟、测量原型系统各种参数。目前, 电磁系统缩比模型测量实验广泛应用于目标与环境雷达散射特性测量与缩减、天线测量、无线信道模型参数测量与估计以及系统抗信道衰落性能实验等领域。鉴于当前自由空间量子传输实验方法的局限性, 结合作者及研究团队关于经典电磁

系统缩比模型实验理论方法以及量子导航系统信道衰落效应的研究、理解与认识, 我们考虑能否类比经典电磁系统的缩比模型实验理论体系, 建立一种量子信息传输系统物理缩比实验的理论与方法, 用以指导自由空间量子信息传输系统的大尺度缩比模型实验, 通过在缩比模型系统中模拟和测量系统的相关参量, 验证实际系统的工作原理、技术可行性以及系统性能等, 为目前复杂、耗时、环境要求苛刻的原型系统全尺度实验提供一种新的研究思路。

1 自由空间量子传输系统信道衰落实验进展

目前已经或者正在研究利用的基于自由空间传输的量子信息技术主要包括量子通信、量子定位/导航、量子雷达等应用领域。

1.1 自由空间量子通信实验

量子通信技术是量子信息科学首先从纯粹的理论构想走向小规模实用化的领域, 并在利用空间平台实现全球量子通信网方面显示出巨大的潜力, 在近地大气环境中进行自由空间量子通信相关验证性实验成为国内外科学家的研究热点。美国 Los Alamos 国家实验室的 Hughes 小组、英国 Bristol 大学的 Rarity 小组、奥地利维也纳大学 Zeilinger 小组、加拿大滑铁卢大学 IQC 的 Weihs 小组、德国慕尼黑大学 Weinfurter 小组、新加坡国立大学 CQT 的 Christian Kurtsiefer 小组以及我国中国科学技术大学潘建伟院士研究团队、中科院、清华大学等研究团队都进行了相关实验研究并不断取得突破性进展。2002 年, 德国慕尼黑大学和英国军方下属的研究机构合作, 在德国和奥地利边境相距 23.4 km 的楚格峰和卡尔文德尔峰之间用激光成功传输了光子密钥^[4]; 2007 年, 奥地利维也纳大学 Zeilinger 小组在相距 144 km 的 La Palma 与 Tenerife 两座岛屿之间实现了量子密钥分发^[5]。2005 年, 潘建伟团队在合肥市大蜀山实现了 13 km 自由空间量子纠缠分发和量子密钥分发^[6]; 2010 年, 潘建伟团队与清华大学联合小组在北京八达岭与河北怀

来之间架设长达 16 km 的自由空间量子信道^[7]。这些实验验证了光子突破大气,进而通过近地卫星安全传送密钥的可能性。2012 年,潘建伟团队在青海湖实现了世界上首次浮空平台和卫星运动模拟的百公里级自由空间双向量子纠缠分发,验证了在高损耗星地量子通道中实现自由空间量子通信的可行性^[8]。2012 年,德国慕尼黑大学的 Weinfurter 小组将弱相干光源搭载在一架飞机上,实现了基于飞机运动平台的 20 km 量子密钥分发实验,该实验进一步在技术上肯定了基于空间运动平台实现远距离量子通信的可能性^[9],表 1 列出了国内外自由空间量子传输实验的重要进展^[4-12]。2016-08-16T01:40:00,我国在酒泉卫星发射中心成功将世界首颗量子科学实验卫星“墨子号”发射升空。这将使我国在世界上首次实现卫星和地面之间的量子通信,构建天地一体化的量子保密通信与科学实验体系。

1.2 量子定位系统

对于量子定位(Quantum Positioning System, QPS),国外相关研究主要集中在美国的 MIT 和美国的军队研究实验室(Army Research Laboratory, ARL)这两个机构。美国 MIT 的 Vittorio Giovannetti 博士带领的研究小组 2001 年提出 QPS 思想,并一直致力于量子定位技术的理论研究^[13-14]。美国

ARL 的 Thomas B. Bahder 博士致力于量子定位的军事应用研究,他提出采用量子纠缠双光子对利用二阶量子相干技术实现定位的基本方案^[15-16]。

国内目前涉及该领域的单位主要有:北京大学^[17]、中国科学技术大学、山西大学、中国电子科技集团公司第 20 研究所、上海交通大学、空军工程大学、西安电子科技大学、陕西师范大学。西安电子科技大学研究人员在 2011 年 1 月申请了基于量子特性的卫星定位系统与方法的专利^[18]并做了大量理论研究^[19-20]。陕西师范大学的研究团队设计了量子空间定位的实验方案^[21]。上海交通大学搭建了热光关联测距的实验平台,完成了基于热光二阶关联测距的原理验证实验^[22]。空军工程大学开展量子导航新技术研究,通过计算机仿真的方法研究了自由空间信道衰落对基于量子纠缠的时钟同步精度影响等问题^[23]。

1.3 量子雷达系统

依赖于量子相干特性并具有相比经典雷达更高分辨率、更远探测距离等优势量子雷达,同样激起了国内外研究人员特别是具有军方背景研究机构的强烈兴趣。国外正在开展量子雷达技术研究工作的机构主要有:美国林肯实验室、美国海军研究实验室、海军水面作战中心、洛克希德·马丁公司以及多所大学^[24-26]。

表 1 自由空间量子传输近地实验进展
Tab. 1 Progress of free space quantum transmission experiment

年份/文献	研究团队	团队代表	距离/km	实验内容	意义
1998/[10]	美国 LANL 实验室	R. J. hughes	1.6	单光子	首次
2002/[11]	美国 LANL 实验室	R. J. hughes	10	单光子	白天
2002/[4]	德国 LMU 大学	H. Weinfurter	23.4	单光子	超大气厚度
2003/[11]	奥地利 Vienna 大学	A. Zeilinger	0.6	纠缠分发	首次
2005/[12]	奥地利 Vienna 大学	A. Zeilinger	7.8	纠缠分发	城市地区
2005/[6]	中国科学技术大学	潘建伟	13	纠缠分发	超大气厚度
2006/[5]	奥地利 Vienna 大学	A. Zeilinger	144	密钥分配	远距离量子通信
2010/[7]	中国科学技术大学	潘建伟	16	隐形传态	刷新纪录
2012/[8]	中国科学技术大学	潘建伟	101.8	纠缠分发	刷新纪录
2012/[8]	中国科学技术大学	潘建伟	97	隐形传态	刷新纪录
2012/[9]	德国 LMU 大学	H. Weinfurter	20	密钥分配	移动平台
2016	中国科学院、中科大	潘建伟	500	密钥分配	首个空间平台

本世纪初, 美国麻省理工大学、路易斯安那州立大学、西北大学、德州大学、雷神 BBN 公司、哈里斯公司和 ITT 公司等研究团队提出了多种不同体制的量子雷达方案。美国国防部高级研究计划局在 2007 年启动了量子传感项目和量子激光雷达项目。2012 年, 美国罗切斯特大学光学研究所利用偏振光子的量子特性对目标进行探测和成像, 成功研发出一种抗干扰的量子雷达^[27]。2014-01-06, 美国防务系统网站报道, 美国陆军研究实验室正在开发一种可以穿透烟雾和热浪的量子成像传感器。国内中电十四所、国防科学技术大学、北京航空航天大学、成都电子科技大学等机构对量子雷达也处于理论研究和实验室内相关技术的原理验证阶段^[28-33]。

2 经典电磁系统物理缩比实验理论与关键技术

相似理论是相似工程和仿真科学的基础理论。1941 年 Stratton 以经典洛仑兹-麦克斯韦方程组依据相似理论的相关原理与方法给出了经典的电磁相似律^[34], 如表 2 所示。表 2 中, 上角标“'” (如 l') 表示模型系统中的物理量, c 为几何尺寸缩比系数。由上表可知, 在经典电磁相似系统中, 模型与原型系统的各物理量必须满足一定的相似准则, 才能建立精确相似的电磁缩比模型系统。

表 2 电磁系统的相似准则

Tab. 2 Similitude rule of the electromagnetic system

	长度	时间	频率	波长	波常数
原型	l	t	f	λ	k
模型	$l' = l/c$	$t' = t/c$	$f' = fc$	$\lambda' = \lambda/c$	$k' = kc$
	电导率	磁导率	介电常数	表面阻抗	
原型	σ	μ	ε	η	
模型	$\sigma' = \sigma c$	$\mu' = \mu$	$\varepsilon' = \varepsilon$	$\eta' = \eta$	

3 量子传输信道衰落物理缩比实验方法的探讨

量子信息传输系统虽然也属于电磁系统, 但与经典电磁系统的应用方式的理论基础、实现技术等

方面存在诸多根本性的差异。经典电磁系统应用的是光子集群所体现的波动性, 以电磁能量的强弱 (光子数的多少) 以及由此引入的其它变化机制为关注点; 而量子信息传输系统是以量子态的相干特性及其独特演化方式作为量子信息科学应用的根本基础, 以光子的粒子性为关注点。这些都导致量子信息传输系统与经典电磁系统的缩比模型实验在指导理论、实现方法与技术等方面也必然存在较大差异。

但是, 经典电磁系统相似理论的建立方法与过程可为建立量子传输信息系统缩比模型实验的相似理论以及实验方法提供参考。借鉴经典电磁系统缩比模型实验相关理论与方法, 为建立量子信息传输系统物理缩比实验的指导理论与实施方法, 目前需重点解决以下关键问题: 一是研究量子信息系统自由空间传输信道衰落物理机制, 建立量子信道衰落动力学演化模型; 二是研究量子信息系统物理缩比相似关系, 建立量子信息系统相似理论; 三是研究模拟方法与关键实现技术, 建立量子传输物理缩比实验验证系统。

3.1 量子传输信道衰落动力学演化建模

麦克斯韦方程组是经典电磁系统电磁波在介质中传播的演化模型, 表征了电磁能量随时间衰落、演化的机制, 也是经典电磁相似理论的建立依据。然而经典电磁系统是对光子群的集群发射、散射以及接收响应, 其信道衰落研究关注的是光子集群能量的耗散 (光子数的减少) 以及由此引入的其它影响。量子信息系统信道衰落影响的是单光子或纠缠光子对的量子态及其量子纠缠等属性, 进而影响量子信息系统的可用性。经典电磁系统的信道衰落机理与物理模型已不适用于量子信息传输系统。类比经典电磁系统, 要建立量子传输系统的相似准则或理论, 首先必须研究量子信息系统自由空间传输信道衰落物理机制, 探寻对传输信道产生衰落作用 (耗散和退相干) 的各种宏观、微观物理量及其作用机理, 建立量子传输

系统信道衰落的动力学演化模型,因为它是量子信息系统物理缩比实验的根本理论基础和依据,其地位相当于经典电磁系统相似理论的基础模型——麦克斯韦方程。

基于自由空间的量子传输系统是一个量子系统与自由空间环境相互作用的开放系统。量子系统与周围环境的相互作用将环境的各种参数引入而使问题变的过于复杂,系统演化结果的解析表达式一般不能给出。处理开放系统的动力学问题,通常可采用两种有效的方法:一是在薛定谔图景中热库理论,从系统和热库所构成的总哈密顿量出发,考虑马尔科夫近似,建立该系统的约化密度算符的运动方程——密度矩阵主方程;二是在海森堡(Heisenberg)图景中朗之万理论,在系统算符的海森堡运动方程中引进迟豫系数和噪声算符来描述热库对系统产生的起伏和耗散效应,采用噪声算符来代替热库对系统的作用,并借助耗散——起伏定理由系统力学量的平均方程推导出扩散系数的计算公式(即爱因斯坦关系)。

其中,密度矩阵量子主方程法用微分方程来描述开放系统中的动力学演化行为,是开放系统在环境影响下的关于系统的二阶有效方程。它通过先对么正演化方程的环境项求迹,得到系统约化密度矩阵满足的微分方程,然后再求解主方程,以获得感兴趣的系统性质。由于问题的复杂性,量子主方程方法通常采用 Born-Markov 近似,即系统与环境之间的相互作用很弱,环境的记忆效应非常短。在该近似下,主方程具有时间局域性,这时的主方程具有非厄米 Lindblad 的形式。在波恩和马尔科夫近似下,其一般的 Lindblad 形式为:

$$\frac{d\rho(t)}{dt} = \frac{-i}{\hbar}[H, \rho] + L\rho \quad (1)$$

其中 Lindblad 算子 L 满足:

$$L\rho = \sum_k [2L_k \rho L_k^\dagger - L_k^\dagger L_k \rho - \rho L_k^\dagger L_k] \quad (2)$$

式(1)中的第一项是通常的薛定谔方程项,它生成么正演化,其余项描述了体系和环境相互作用使体系经受可能的跃迁、耗散和退相干。

量子信息自由空间传输信道环境中,光子为量子系统,大气环境、信道中的障碍物以及雷达目标构成了外界环境,量子系统对环境的影响很弱,符合 Born-Markov 近似条件。因此,可以参考耗散量子系统的量子主方程方法,建立对多种类型量子传输信道(对于双态量子系统,典型的信道衰落模式有振幅阻尼信道、相位阻尼信道、退极化信道、玻色高斯信道、纠缠破裂信道等)普适的量子退相干、解纠缠动力学演化模型,并在此基础上定量研究自由空间传输信道衰落对量子系统的退相干熵(或线性熵)、纠缠度、信道保真度的影响。然后,将表征自由空间传输信道衰落的密度矩阵量子主方程与电磁场量子化基本方程联合,建立量子信道衰落演化与传输信道环境之间的关系方程组,作为下一步研究量子信息传输系统相似准则的基础模型。

3.2 量子传输系统缩比仿真的相似理论

经典电磁学相似理论——电磁相似律,是电磁系统缩比测量领域的理论指导。那么,类比经典电磁系统,能否在量子信息传输系统领域也建立相似理论,用于指导量子信息系统的大尺度物理缩比实验?经典电磁系统电磁相似律以麦克斯韦方程组为出发点,关注的是电场/磁场强度、波长、介电性质、散射体几何尺寸等光子集群以及信道宏观物理属性。不同于经典电磁系统,量子信息系统相似准则应当关注的是单光子或纠缠光子对的量子态及其关联属性。无论经典电磁系统还是量子传输系统,建立缩比模型实验的理论基础必须以相似理论为依据。

相似理论是一个比较严密的数学逻辑体系,主要应用于指导模型试验,确定“模型”与“原型”的相似关系、相似程度等,如:尺度的缩小或放大,参数的提高或降低,介质性能的改变等。由相似理论的基本定理可知,模型与原型区别仅在于物理量大小比例不同,而现象的物理本质不变,模型和原型应被同样的数学方程描述。而建立两系统间相似

关系或相似准则的过程, 就是要求解模型与原型系统中各对应物理量的比例系数。

在完成建立自由空间传输信道衰落动力学演化模型的基础上, 联合电磁场量子化理论基本方程、量子传输信道边界条件及其它物理基础条件(如光速不变性等), 依据相似理论的基本定理和推论, 采用方程分析法, 建立量子信息系统缩比模型实验中量子系统(发射、接收)以及环境系统(传输信道)与原型系统之间所需满足的相似准则。该方法能够在不需求解方程的基础上即可导出量子信息系统与传输环境系统二者一体的开放系统各自由度的缩比关系, 建立量子信息传输系统的相似准则, 从而避开了量子耗散主方程求解的难题。另外, 由于描述开放量子系统信道衰落的动力学方程是一个复杂的矩阵微分方程, 可以利用 Liouville 超算符的思想, 将系统微分方程的矩阵表达形式变换到 Liouville 空间的向量表达形式, 采用拓展微分方程维数的方法来解决矩阵微分方程的相似指标导出问题。

特别地, 对于量子主方程这类微分方程中导数的相似转换遵循以下关系:

$$(dy_1/dt_1)/(dy_0/dt_0) = (y_1/t_1)/(y_0/t_0) \quad (3)$$

式中: 0, 1 分别代表原型系统和缩比模型系统中的物理量。

4 量子传输系统相似准则在量子雷达中的理论验证

根据相似理论, 在建立精确相似准则的基础上, 模型系统与原型系统对应的无量纲物理量应该保持相等, 即无量纲物理量的相似常数或缩比因子为“1”。可以这一准则为依据, 验证所建立的量子信息系统相似准则的正确性。

我们以量子雷达为例对初步建立的量子传输系统相似准则进行理论验证。量子雷达系统依赖于光量子态的非经典特性, 系统中一半光子发射到目标, 另一半保留在接收机内部。目标反射回的光子与保留在接收机内部光子的关联特性增强了探测

性能。量子雷达的目标单位面积量子雷达散射截面(Quantum Radar Cross Section, QRCS)是无量纲物理量, 其表达式为:

$$\sigma_Q = 4\pi \lim_{R \rightarrow \infty} \frac{\langle I_s(r_s = r_d) \rangle}{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi \langle I_s(r_s = r_d) \rangle \sin\theta d\theta d\phi} \quad (4)$$

以圆柱目标为对象, 利用建立的量子信息传输系统相似准则对其进行缩比, 验证所建立的相似准则的正确性。仿真条件设为原型系统中波长 $\lambda=0.01 \text{ m}$, 圆柱曲面半径 $r=4 \lambda$, 高 $h=12 \lambda$, 原子间隔 $\delta=4 \times 10^{-2} \lambda$, 距离 $R=10^4 \lambda$, 几何缩比系数 $c=1:10$ 。分析单位面积 QRCS 之间的关系, 计算得到单光子和双光子入射情况下原型系统、缩比模型系统中目标的 QRCS, 二者完全相等, 只列出原型系统理论计算结果如图 1 所示(QRCS1 为单光子情况, QRCS2 为双光子情况)。仿真实验验证了所建立的量子信息传输系统相似准则的正确性。

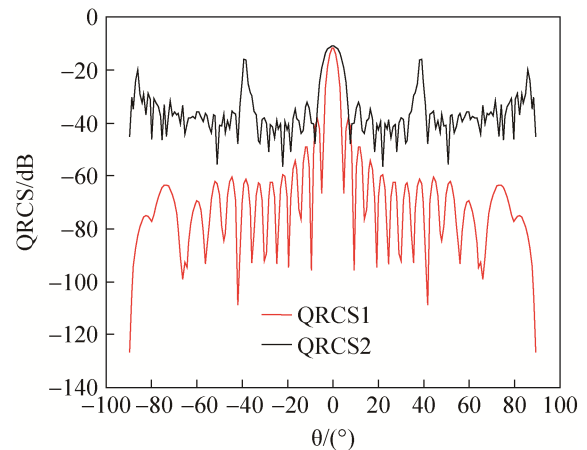


图 1 单光子和双光子入射情况目标的 QRCS
Fig.1 QRCS of target for incident single photon and pair of photons

5 结论

量子信息传输系统缩比模型实验的相关理论, 可望作为理论基础用于指导量子信息传输系统的物理缩比模型实验; 其实验方法和技术可为包括量子通信、量子定位/导航以及量子雷达等自由空间传输量子信息应用系统的新协议、新方法、新技术的验证以及系统性能测量与改进提供方便简捷、高

效可信的实验手段;同时实验方法的改进也将进一步促进量子信息理论的相关研究。以量子信息传输系统相似理论为指导的缩比模型实验方法将对自由空间量子传输系统实验产生较大吸引力和广阔应用前景。

参考文献:

- [1] 周正威, 陈巍, 孙方稳, 等. 量子信息技术纵览[J]. 科学通报, 2012, 57(17): 1498-1525.
Zhou Zhengwei, Chen Wei, Sun Fangwei, et al. A survey on quantum information technology[J]. Chin Sci Bull (Chin Ver), 2012, 57(17): 1498-1525.
- [2] 吴华, 王向斌, 潘建伟. 量子通信现状与展望[J]. 中国科学: 信息科学, 2014, 44(3): 296-311.
WU Hua, WANG XiangBin, PAN JianWei. Quantum communication: status and prospects. Chinese Science: information science, 2014, 44(3): 296-311.
- [3] 郭光灿. 百年光量子[J]. 光学与光电技术, 2016, 14(4): 14-19.
Guo GuangCan. Quantum Photonics Over Past 100 Years[J]. Optics and Optoelectronic Technology, 2016, 14(4): 14-19.
- [4] Kurtsiefer C, Zarda P, Haider M, et al. A step towards global key distribution [J]. Nature (S0028-0836), 2002, 419(6906): 450.
- [5] Schmitt-Manderbach T, Weier H, Fürst M, et al. Experimental demonstration of free-space decoy-state quantum key distribution over 144 km[J]. Physical Review Letters (S0031-9007), 2007, 98(1): 010504.
- [6] Peng Chengzhi, Yang Tao, Bao Xiaohui, et al. Experimental free-space distribution of entangled photon pairs over 13 km: towards satellite-based global quantum communication[J]. Physical Review Letters (S0031-9007), 2005, 94: 150501-150504.
- [7] Peng C Z, Zhang J, Yang D, et al. Experimental long-distance decoy-state quantum key distribution based on polarization encoding[J]. Physical Review Letters (S0031-9007), 2007, 98(1): 0105051-0105054
- [8] Yin J, Ren J G, Lu H, et al. Quantum teleportation and entanglement distribution over 100-kilometre free-space channels[J]. Nature(S0028-0836), 2012, 488(7410): 185-188.
- [9] Harald Weinfurter, Christian Fuchs, Stefan Frick. Air to ground quantum key distribution[C]. Quantum Communications and Quantum Imaging X, SPIE, 2012, 85180D/1-6.
- [10] Buttler W T, Hughes R J, PG Kwiat. Practical free-space quantum key distribution over 1 km[J]. Physical Review Letters (S0031-9007), 1998, 81(15): 3283-3286.
- [11] Hughes R J, Nordholt J E, D Derkacs. Practical free-space quantum key distribution over 10 km in daylight and at night[J]. New Journal of Physics (S1367-2630), 2002, 4(1): 3283-3286.
- [12] Aspelmeyer M, Bohm H R, Gjatso T, et al. Long-distance free-space distribution of quantum entanglement [J]. Science (S0036-8075), 2003, 301(5633): 621-623.
- [13] Giovannetti V, Lloyd S, Maccone L. Quantum enhanced positioning and clock synchronization [J]. Nature (S0028-0836), 2001, 412: 417-419.
- [14] Giovannetti V, Lloyd S, Maccone L. Quantum-enhanced measurements: beating the standard quantum limit [J]. Science (S0036-8075), 2004, 306: 1330-1333.
- [15] Bahder T B, W Golding M. Clock synchronization based on second-order quantum coherence of entangled photons [C]//The 7th International Conference on Quantum Communication, Measurement and Computing, 2004: 25-29.
- [16] Thomas B. Bahde. Quantum positioning systems and methods: USA, 7359064[P]. 2008-04-15.
- [17] Fei Gao, Bin Liu, QiaoYan Wen. Quantum position verification in bounded attack frequency model[J]. Science China (Physics, Mechanics & Astronomy) (S1674-7348), 2016, 59(11): 11433-016-0234.
- [18] 王勇, 许录平, 张华, 等. 基于量子特性的卫星定位系统与方法[P]:中国, 201010242935.2011-01-05.
Wang Yong, Xu Luping, Zhang Hua, et al. Satellite-based position system and method based on the quantum property[P]: China, 201010242935. 2011-01-05.
- [19] Huang Hongmei, Xu Luping. Design and Analysis of the Secure Scheme for Quantum Positioning Based on Entangled Photon Pair[C]// 2015 10th International Conference on P2P, Parallel, Grid, Cloud and Internet Computing (3PGCIC), 2015, 4: 847-854.
- [20] Ge Yuetao, Jiang Qi, Wen Suli, et al. Study on Development of QPS and Its Influence on Missile[J]. Navigation Positioning & Timing (S2095-8110), 2014, 1(2): 7-10.
- [21] 王兆华. 纠缠双光对的量子定位[D]. 西安: 陕西师范大学, 2010.
Wang Zhaohua. Quantum position based on the entangled photon-pair[D]. Xi'an: Shaanxi Normal

- University, 2010.
- [22] 朱俊. 量子关联定位关键技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012.
Zhu Jun. Study on Positioning Key Technologies with Quantum Correlation[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2012.
- [23] 杨春燕, 苑博瑞, 徐有. 干涉式量子定位辅助卫星导航周跳探测与修复方法[J]. 空军工程大学学报, 2014, 15(6): 22-27.
Yang Chunyan, Yuan Borui, Xu You. A Method of Cycle Slips Detection and Recovery Aided by Interferometric Quantum Position System in Satellite Navigation[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2014, 15(6): 22-27.
- [24] Marco Lanzagorta, Salvador Venegas-Andraca. Algorithmic Analysis of Quantum Radar Cross Sections[C]// Proc. of SPIE: Radar Sensor Technoloav XIX; and Active and Passive Signatures VI. 2015, 9461: 946112.
- [25] Marco Lanzagorta. Love-Brightness Quantum Radar[C]// Proc. of SPIE: Radar Sensor Technoloav XIX; and Active and Passive Signatures VI. 2015, 9461: 946113.
- [26] Marco Lanzagorta, Jeffrey Uhlmann, Salvador E. Venegas-Andraca. Quantum Sensing in the Maritime Environment[C]// OCEANS 2015-MTS/ IEEE Washington. 2015, 10: 978-0-933957-43-5.
- [27] Malik M, Omar S M, Robert W B. Quantum-secured imaging [J]. Appl Phys Lett (S0003-6951), 2012, 101(24): 11031-11035.
- [28] 周城宏, 钱卫平. 量子雷达技术发展展望[J]. 雷达科学与技术, 2015, 13(5): 457-463.
ZHOU Cheng-hong, QIAN Wei-ping. An Overview of Radar System Based on Quantum Technology[J]. Radar Science and Technology, 2015, 13(5): 457-463.
- [29] 江涛, 孙俊. 量子雷达探测目标的基本原理与进展[J]. 中国电子科学研究院学报, 2014, 9(1): 10-16.
JIANG Tao, SUN Jun. The Principle and Development of Quantum Radar Detection Target[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2014, 9(1): 10-16.
- [30] Liu Kang, Xiao Huaitie, Fan Hongqing. Analysis and simulation of quantum radar cross section [J]. CHIN. PHYS. LETT (S0256-307X), 2014, 31(3): 62-64.
- [31] Wu Qiong, Bai Yechao. Performance analysis of measurement methods for interference quantum radar[J]. Journal of Nanjing University (S0469-5097), 2016, 52(5): 940-945.
- [32] Tan Hong, Zhao Mingwang, Zhang Guoan. The principle of the quantum radar system based on the probability wave [J]. Journal of Central China Normal University (S1000-1190), 2016, 50(4): 516-521.
- [33] Lin Peng, Yu Ze, Li Chunsheng. Review and forecast of quantum radar[C]// 2013 Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar, 2013, WE4.P.F.2: 432-433.
- [34] Stratton J A. Electromagnetic Theory [M]. McGraw-Hill Book Co. N. Y. 1941: 88-99.