Guilherme Barreto Xavier

Practical Assets for Fiber Optical Quantum Communications

TESE DE DOUTORADO

Thesis presented to the Postgraduate Program in Electrical Engineering of the Departamento de Engenharia Elétrica, PUC-Rio as partial fulfillment of the requirements for the degree of Doutor em Engenharia Elétrica

Advisor: Prof. Jean Pierre von der Weid

Rio de Janeiro
March 2009

Pontifícia Universidade Católica
do Rio de Janeiro

Guilherme Barreto Xavier

Recursos Práticos para Comunicações Quânticas em Fibras Ópticas

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Dr. Jean Pierre von der Weid
Orientador
Centro de Estudos de Telecomunicações - PUC-Rio

Dr. Hugo Zbinden
Université de Genève

Dr. Paulo Henrique Souto Ribeiro
UFRJ

Dr. Guilherme Penello Temporão
Centro de Estudos de Telecomunicações - PUC-Rio

Dra. Patrícia Lustoza de Souza
Centro de Estudos de Telecomunicações - PUC-Rio

Stephen Patrick Walborn
UFRJ

Djeisson Hoffmann Thomas
Centro de Estudos de Telecomunicações - PUC-Rio

Prof. Jose Eugenio Leal
Coordenador(a) Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 04 de Março de 2009

Guilherme Barreto Xavier

Guilherme B. Xavier graduated in Electrical Engineering at Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro (PUC-Rio) in mid-2003, moving on to obtain the degree of Mestre in Engenharia Elétrica in 2005, in the field of modulation schemes for frequency encoded quantum key distribution. After starting his PhD, he went to KTH in Stockholm staying for one and a half years as an exchange PhD student. After return in the end of 2007, he carried on research in PUC-Rio to complete work for the PhD thesis. His research interests include (but are not limited to) quantum communications, quantum optics, and optical telecommunications metrology.

Bibliographic data

Xavier, Guilherme Barreto

Practical Assets for Fiber Optical Quantum Communications / Guilherme Barreto Xavier; advisor: Jean Pierre von der Weid. – 2009.

129 f. : il. ; 30 cm

Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Elétrica – Teses. 2. Comunicações quânticas. 3. Distribuição Quântica de Chaves. 4. Fibras Ópticas. 5. Geração Quântica de Números Aleatórios. 6. Codificação em Polarização I. Weid, Jean Pierre von der. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

Acknowledgements

To my advisor Jean Pierre von der Weid, for all the help, advice, friendship and discussions we had over these four years.

To Anders Karlsson, for welcoming me with open arms at KTH, and for all the nice talks and patiently explaining lots of cool stuff about entanglement and Sweden.

To my best friend and wife, Bruna, who has had the patience to endure me through the PhD, and who gave me priceless support.

A special thanks to my family specially my parents Alvaro and Luiza and my brother Bernardo, who always supported what I did and understood the sacrifices I had to make to get this work finally completed.

Many thanks to the people from the Optoelectronics group from CETUC/PUC-Rio: Djeisson, Janaína, Andy, Rogério, Tarcísio, Fernando, Marçal, Gustavo, Tito, Daniela and Douglas. Many thanks to Thiago, Giancarlo and Temporão who directly contributed to many of the results. A final thanks to Amalia, for all the help with the bureaucracy.

To the colleagues from KTH who received me very well, for providing a great working environment and who were always there for a friendly chat, Marcin, Qin, Christian, Simeon, Sebastian, Isabel, Maria, Johan, Rahul and Prof. Gunnar Bjork. A special thanks to Sèbastien for being a good friend, for advising me through the day-to-day work and for all the help settling in. A nice tap on the back to my new colleagues from Hefei, Wei and Tao. Last but not least, thanks to Walter from ACREO always ready to lend us equipment when we needed the most, specially the fiber splicer.

To Nino from the University of Geneva for the measurements done for the polarization-encoded QKD experiment. Many thanks to Profs. Hugo Zbinden and Nicolas Gisin for the helpful discussions and for the single-photon counting module lent.

To all my friends who understood my absence during many months towards the end of the thesis. A special thanks to my sister-in-law Paula.

To everyone from LabSem in PUC-Rio, and to all the Professors and staff from CETUC and the Electrical Engineering department.

To CAPES and CNPq for the financial support.

This thesis was not a one-man work. A special thanks again to all those that contributed directly and indirectly to the results presented here!

Resumo

Guilherme Barreto Xavier. **Recursos Práticos para Comunicações Quânticas em Fibras Ópticas.** Rio de Janeiro, 2009. 129p. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

As comunicações quânticas estão rapidamente integrando-se às redes de fibras ópticas, entretanto muitos desafios de engenharia ainda existem para essa aglutinação. Esta tese discute algumas soluções práticas para a melhoria de aplicações reais em comunicações quânticas em fibras ópticas. No primeiro experimento uma fonte de pares de fótons emaranhados não-degenerados, de banda-estreita, empregando conversão espontânea paramétrica descendente (CEPD) é utilizada para demonstrar a viabilidade da distribuição quântica de chaves (DQC) através de 27 km de fibras ópticas, com o canal de sincronismo presente na mesma fibra com uma separação de 0.8 nm em comprimento de onda. A outra demonstração utilizou uma fonte heráldica de fótons únicos também baseada em CEPD para a realização de DQC através de 25 km de fibras ópticas com a utilização do protocolo de decoy states pela primeira vez. Houve também um estudo dos impactos gerados por ruído Raman espontâneo causado por um canal óptico clássico presente na mesma fibra que o canal quântico. Um protocolo para gerar números verdadeiramente aleatórios em um sistema de DQC independente da taxa de transmissão do sistema é proposto, e um experimento prova-de-princípio demonstra a idéia. Finalmente um sistema de controle automático de polarização é utilizado para a realização de uma sessão de DQC através de 16 km de fibras ópticas utilizando codificação em polarização, mesmo sob a presença de um embaralhador rápido do estado de polarização.

Palavras-chave

Comunicações Quânticas, Distribuição Quântica de Chaves, Fibras Ópticas, Geração Quântica de Números Aleatórios, Codificação em Polarização.

Abstract

Guilherme Barreto Xavier. **Practical Assets for Fiber Optical Quantum Communications.** Rio de Janeiro, 2009. 129p. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Quantum communications is quickly becoming integrated within fiber optical networks and still many engineering challenges remain towards this interweaving. This thesis deals with some practical solutions toward improving real-world applications in quantum communications within optical fibers. In the first experiment, a non-degenerate narrowband entangled pair single-photon source based on spontaneous parametric down-conversion (SPDC) is used to show the feasibility of performing quantum key distribution (QKD) through 27 km of optical fiber, with the synchronization channel wavelength multiplexed in the same fiber with a channel spacing of just 0.8 nm. A second experiment uses a heralded single-photon source also based on SPDC to perform QKD over 25 km of optical fiber with the decoy state modification for the first time. Then there is a study of the problems caused by spontaneous Raman induced noise due to the presence of a classical signal in the same fiber as the quantum channel. A protocol to generate truly random numbers in a QKD setup independent of the system's transmission rate is proposed, and a proof-of-principle experiment demonstrates the idea. Finally an automatic polarization control system is used to perform a QKD session over 16 km of optical fiber using polarization encoding, even in the presence of a fast polarization scrambler.

Keywords

Quantum Communications, Quantum Key Distribution, Fiber Optics, Quantum Random Number Generation, Polarization Encoding.

Summary

Figure list

Abbreviation list

ADSL - Asynchronous Digital Subscriber Line

AOM - Acousto-Optical Modulator

APD - Avalanche Photo-Diode

APCS - Automatic Polarization Control System

ASE - Amplified Spontaneous Emission

AWG - Array Waveguide Grating

BSF - Band Stop Filter

CHSH - Clauser Horne Shimony Holt

CW - Continuous Wave

DFB - Distributed Feedback

DG - Delay Generator

DM - Dichroic Mirror

DPSS - Diode Pumped Solid State

DS - Dispersion-Shifted

DWDM - Dense Wavelength Division Multiplexing

EA - Electro-Absorption

EPR - Einstein Podolsky Rosen

FBG - Fiber Bragg Grating

FC - Fiber Coupler

FM - Faraday-Michelson

FPGA - Field Programmable Generator Array

FWM - Four Wave Mixing

FWHM - Full Width at Half-Maximum

GHZ - Greenberger Horne Zeilinger

HSPS - Heralded Single Photon Source

HWP - Half Wave Plate

MZ - Mach-Zehnder

PBS - Polarizing Beam Splitter

PCF - Photonic Crystal Fiber

PD - Photo Diode

PMF - Polarization Maintaining Fiber

PNS - Photon Number Splitting

PPLN - Periodically Poled Lithium Niobate

QBER - Quantum Bit Error Rate

QIT - Quantum Information Theory

QKD - Quantum Key Distribution

QRNG - Quantum Random Number Generator

SOP - State of Polarization

SPAD - Single-Photon Avalanche Diode

SPDC - Spontaneous Parametric Down-Conversion

TC - Time Chopper

TDC - Time-Discriminator Circuit

WCP - Weak Coherent Pulse

WCS - Weak Coherent State

WDM - Wavelength Division Multiplexing

XPM - Cross Phase Modulation