การศึกษาการควบคุมสถานะของโพลาไรเซชัน

ในระบบการสื่อสารด้วยเส้นใยแสงแบบร่วมนัย

นาย วุฒิชัย นภาศัพท์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2531

ISBN 974-568-903-3

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

014299

I17409445

STUDIES ON POLARIZATION-STATE CONTROL
IN COHERENT OPTICAL FIBER COMMUNICATIONS

Mr. Vuthichai Napasab

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Doctor of Engineering
Department of Electrical Engineering
Graduate School
Chulalongkorn University
1988
ISBN 974-568-903-3

Thesis Title : STUDIES ON POLARIZATION-STATE CONTROL IN COHERENT OPTICAL FIBER COMMUNICATIONS

By : Mr. Vuthichai Napasab

Department : Electrical Engineering

Thesis Advisor : Asso. Prof. Prasit Prapinmongkolkarn, D. Eng.

Accepted by the Graduate school, Chulalongkorn University in Partial Fulfillment of the Requirements for the Doctor's Degree.

Thavorn Vajrabhaya .... Dean of Graduate School

(Prof. Thavorn Vajrabhaya, Ph.D.)

Thesis Commitee

T. Okoshi .... Chairman

(Prof. Takanori Okoshi, D. Eng.)

.... Thesis Advisor

(Asso. Prof. Prasit Prapinmongkolkarn, D. Eng.)

Virulh Sayakanit .... Member

(Prof. Virulh Sayakanit, Ph.D.)

.... Member

(Prof. Somsak Payakeow, D. Eng.)

.... Member

(Asso. Prof. Bandhit Rojarayanont, D. Eng.)

Dedicated to

My Parents

For giving their children the best life.

My Wife

For her magnificent devotion to her family.

My Son

For making everything worthwhile.

V. Napasab

April 29, 1988

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วุฒิชัย นภาศัพท์ : การศึกษาการควบคุมสถานะของโพลาไรเซชันในระบบการสื่อสารด้วยเส้นใยแสงแบบร่วมนัย (STUDIES ON POLARIZATION-STATE CONTROL IN COHERENT OPTICAL FIBER COMMUNICATIONS) อ. ที่ปรึกษา : รศ. ดร.ประสิทธิ์ ประพิณมงคลการ, 198 หน้า

การวิจัยครั้งนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาการควบคุมสถานะของโพลาไรเซชันในระบบการศึกษาด้วยเส้นใยแสงแบบร่วมนัย ระบบใหม่ใช้ในการควบคุมสถานะของโพลาไรเซชันอัตโนมัติได้ถูกสร้างขึ้นและทดลองใช้ ระบบที่สร้างขึ้นประกอบด้วย ตัวแยกแสงโพลาไรเซชัน (วอร์ลาสตัน พริซึ่ม (Wallaston prism)) ตัวหมุนโพลาไรเซชันแบบระนาบไป 90̊ ตัวปรับเฟสแบบตลอดเวลา และตัวรวมแสง ระบบนี้มีหลักการที่ง่าย (อาจจะง่ายที่สุด) สามารถควบคุมสถานะของโพลาไรเซชันได้ตลอดเวลา อีกทั้งโพลาไรเซชันของแสงที่ถูกควบคุมเป็นระนาบโดยมีมุมเอียงที่แน่นอนเสมอ ไม่ขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงของโพลาไรเซชันของแสงที่ผ่านเข้ามา คุณลักษณะดังกล่าวมีได้โดยไม่ต้องใช้โพลาริมิเตอร์ช่วยและยังมีประโยชน์ในเครื่องรับเฟสไดเวอร์ซิตี้แบบโฮโมดารย์ (homodyne phase diversity receiver) เพราะว่าในเครื่องรับแบบนี้จำเป็นต้องใช้สัญญาณแสงที่มีโพลาไรเซชันเป็นระนาบเพื่อสร้างสัญญาณแสงสองสัญญาณที่มีเฟสต่างกัน 90̊ เครื่องรับเฟสไดเวอร์ซิตี้มอดูเลทเชิงเฟสต่าง (DPSK) แบบโฮโมดารย์ตัวเองได้ถูกสร้างขึ้นเพื่อสาธิตคุณสมบัติดังกล่าว ผลปรากฏว่าระบบควบคุมสถานะของโพลาไรเซชันที่เสนอในงานวิจัยนี้สามารถใช้งานได้ดีเป็นที่น่าพอใจ การเปลี่ยนแปลงของความไวของเครื่องรับอยู่ในระดับ 0.5 ดีบี (dB.) ที่อัตราส่งสัญญาณ 200 เมกาบิตต่อวินาที

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2530

ลายมือชื่อนิสิต [signature]

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา [signature]

VUTHICHAI NAPASAB: STUDIES ON POLARIZATION-STATE CONTROL IN COHERENT OPTICAL FIBER COMMUNICATIONS. THESIS ADVISOR : Asso. Prof. Prasit Prapinmongkolkarn, D. Eng., 198 pp.

In this dissertation, the polarization-state control in coherent optical fiber communications is studied. A new automatic polarization-state control scheme called "polarization recombing" is proposed and experimentally verified. The system consists of a polarization beam splitter (a Wallaston prism), a 90° linear polarization rotator, an endless phase shifter, and a beam combiner. It features a very simple (probably the simplest) principle for polarization-state control and endlessness (resetting-free) in control is achieved. In addition, in this scheme, the polarization-state of output light is always linear with a fixed inclination angle regardless of changes in the polarization-state of the incoming light. Such a characteristic is achieved without the aid of a polarimeter and is particularly useful in homodyne phase diversity receiver because a stable linearly polarized light is necessary for generating two lights having 90° phase difference. This feature has been demonstrated in a simulated self-homodyne DPSK phase diversity receiver. It is found that the scheme functions satisfactorily and the receiver sensitivity fluctuation is kept within 0.5 dB. at 200 Mbits/sec.

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2530

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

ACKNOWLEDGMENT

The scholarship granted by the Ministry of Education of Japan is gratefully acknowledged.

I wish to express my ultimate gratitude to Professor Takanori Okoshi, who has made possible for me to conduct this research work at the University of Tokyo under his supervision. Without his guidance, discussions and encouragement, this work would have not been accomplished. It has also been a great honour for me to have an opportunity to join his laboratory which is well-known worldwide as one of the pioneers in the field of optical fiber communications.

I am indeed grateful to Dr. Prasit Prapinmonkolkarn for his continuous encouragement, assistance and support during my Ph.D. study at Chulalongkorn University, Department of Electrical Engineering and at the University of Tokyo, Deparment of Electronic Engineering.

Special thanks to Dr. Kazuro Kikuchi for his helpful discussions and expert advices.

Special thanks to the staff and student members of the Okoshi-Kikuchi laboratory for their kind hospitality. I would like to thank Ms. Tamiya for her kniting of my son's sweater, Ms. Kitazawa for assisting on administration matters, Mr. Cheng for his technical discussions and support, Mr. Ishida for lending

me the delay line demodulator and useful discussions, and those not named here for helping me accomblish this work.

I would like to transmit the thanks to the staff members of the administration office of the Department of Electronic Engineering, the University of Tokyo, and of the Department of Electrical Engineering, Chulalongkorn University for their kind assistances.

Finally, I wish to thank my wife for her understanding, patience, encouragement, and for typing this dissertation. I also would like to thank both of our parents for their efforts to back my study.

[library stamp]

CONTENTS

ABSTRACT I

ACKNOWLEDGEMENT II

CHAPTER 1. INTRODUCTION

1.1. General background 1

1.2. Technical problems 6

1.3. Polarization problems 8

1.4. Purpose of the thesis 11

1.5. Synopsis of the thesis 12

CHAPTER 2. CHARACTERISTICS AND FLUCTUATION OF STATE-OF-POLARIZATION IN A SINGLE-MODE OPTICAL FIBER

2.1. Introduction 15

2.2 Mathematical expressions of general state-of-polarization 15

2.2.1. Elliptical, linear and circular polarization of completely polarized light (monochromatic light) 15

2.2.2. Expression of partially polarized light (quasi-monochromatic light) 19

2.2.3. Degree of polarization 23

2.3. Graphical representation of the SOP of a completely polarized light 27

2.3.1. Poincare sphere 27

2.3.2. Planar chart 29

2.4. Review of theoretical analysis of degree of polarization and measurements of state-of-polarization (SOP) fluctuation in single-mode optical fiber 29

2.4.1. Degradation of degree of polarization in single-mode fiber 29

2.4.2. Measurements of polarization fluctuation in single-mode fiber 34

2.5. Summary 35

CHAPTER 3. COUNTERMEAUSURES AGAINST THE FLUCTUATION OF THE STATE-OF-POLARIZATION IN A SINGLE-MODE OPTICAL FIBER

3.1. Introduction 39

3.2. Polarization-maintaining fiber 39

3.3. Polarization insensitive (or polarization diversity) receiver 45

3.3.1. Two-branch polarization diversity receiver . 46
3.3.2. Polarization scrambling receiver 55
3.3.3. Polarization orthogonality receiver (frequency shifted orthogonally polarized LO modes technique) 57

3.4. Polarization-state control schemes 60

3.4.1. Type-I SOP control scheme 62
3.4.2. Type-II SOP control scheme 68
3.4.3. Type-III SOP control scheme 72
3.4.4. Type-IV SOP control scheme 75
3.4.5. Type-V SOP control scheme 79

3.5. Features of various polarization-state control schemes 79

3.5.1. Insertion loss 79
3.5.2. Endlessness in control 80
3.5.3. Temporal response 80
3.5.4. Presence or absence of mechanical fatique .. 80

3.6. Summary 81

CHAPTER 4. POLARIZATION RECOMBINING SCHEME : PRINCIPLE AND POLARIZATION CHARACTERISTICS MEASUREMENTS

4.1. Introduction 82

4.2. Principle 83

4.2.1. Type-I polarization recombining scheme...... 84
4.2.2. Type-II polarization recombining scheme..... 84

4.3. Polarization characteristics measurements 86

4.3.1. Principle of measurements 86
4.3.2. Experimental setup 93
4.3.3. Results and discussions 96

4.4. Summary 112

CHAPTER 5. ENDLESS LINEAR POLARIZATION PHASE SHIFTER

5.1. Introduction 113

5.2. Principle 113

5.2.1. Type-I phase shifter 114
5.2.2. Type-II phase shifter 118

5.3. Experimental verification 123

5.3.1. Results of Type-I phase shifter 126
5.3.2. Results of Type-II phase shifter 128

5.4. Error analysis 128

5.5. Summary 136

CHAPTER 6. AUTOMATIC POLARIZATION CONTROL EXPERIMENTS UTILIZING POLARIZATION RECOMBINING SCHEME

6.1. Introduction 137

6.2. Type-I polarization recombining scheme 138

6.2.1. Principle 138
6.2.2. Experiment and results 139
6.2.3. Discussion 144

6.3. Type-II polarization recombining scheme 146

6.3.1. Principle 146
6.3.2. Experiment and results 146
6.3.3. System experiment 150

6.4. Summary 170

CHAPTER 7. DISCUSSION AND CONCLUSION

7.1. Discussion 172

7.2. Conclusion 178

REFERENCES 179

BIBLIOGRAPHY 198