



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ ระบบทดสอบไมโมแบบปรับตัวในเวลาจริง

โดย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พีระพงษ์ อุทารสกุล

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ ระบบทดสอบไม้โมแบบปรับตัวในเวลาจริง

ผู้วิจัย

สังกัด

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พีระพงษ์ อุทารศกุล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกอ. และ สก. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

## บทคัดย่อ

รหัสโครงการ: MRG5180344

ชื่อโครงการ: ระบบทดสอบไม้โมแบบปรับตัวในเวลาจริง

ชื่อหัววิจัย: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิระพงษ์ อุทารสกุล      มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

E-mail Address : uthansakul@sut.ac.th

ระยะเวลาโครงการ: 2 ปี (15 พฤษภาคม 2551 – 15 พฤษภาคม 2553)

### บทคัดย่อ:

จากการสำรวจปริมาณหัวรรณกรรมที่ผ่านมาของชุดระบบทดสอบไม้โมแบบปรับตัวในเวลาจริงนั้นพบว่า ชุดระบบทดสอบที่ผ่านมาให้ผลการวิเคราะห์จากการส่งข้อมูลในทิศทางเดียวเท่านั้น ระบบไม่สามารถส่งข้อมูลไปและกลับระหว่างภาคส่งและรับได้จริง ประเด็นนี้เป็นเรื่องที่สำคัญ เพราะว่าความสำเร็จของระบบไม้โมที่พิสูจน์จากทฤษฎี และการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบว่า ประสิทธิภาพของระบบไม้โมนั้นจะมีค่าสูงสุด เมื่อเครื่องส่งสามารถปรับตัวได้ตามลักษณะของช่องสัญญาณที่เครื่องรับประมวลและส่งกลับมายังเครื่องส่งในเวลาจริง งานวิจัยนี้จึงเสนอแนวคิดที่จะใช้ข้อมูลช่องสัญญาณจากทฤษฎีชีบีโปรดชีตีแทนการใช้วิธีป้อนกลับ โดยวิธีชีบีโปรดชีตีนั้นรับรู้ข้อมูลช่องสัญญาณได้โดยง่ายผ่านช่องสัญญาณย้อนกลับ (Reverse Channel) เมื่อช่องสัญญาณไปหน้า (Forward Channel) และช่องสัญญาณย้อนกลับ ถูกพิจารณาว่าเหมือนกันในเชิงเวลา ความถี่และตำแหน่งของสายอากาศที่คงที่ งานวิจัยนี้จะศึกษาสมรรถนะของความจุช่องสัญญาณในระบบไม้โมแบบปรับตัวเมื่อมีการใช้เทคโนโลยีการเลือกสายอากาศที่ภาคส่งร่วมกับการรับรู้ข้อมูลช่องสัญญาณด้วยวิธีชีบีโปรดชีตีโดยพิจารณาผลจากชุดทดสอบ ผลที่ได้จากชุดทดสอบได้แสดงให้เห็นว่าความจุช่องสัญญาณจากวิธีชีบีโปรดชีตีมีประสิทธิภาพเทียบเท่าระบบที่มีการรับรู้ข้อมูลสถานะช่องสัญญาณโดยถูกต้องสมบูรณ์ และประสิทธิภาพที่ได้เห็นอกว่าระบบที่ไม่มีการเลือกสายอากาศ

คำหลัก: ระบบไม้โม      ข้อมูลสถานะของช่องสัญญาณ      ชุดระบบทดสอบ

## Abstract

---

**Project Code :** **MRG5180344**

**Project Title :** **Real-Time Adaptive MIMO Testbed**

**Investigator :** **Assistant Professor Peerapong Uthansakul, PhD.**  
**Suranaree University of Technology**

**E-mail Address :** **uthansakul@sut.ac.th**

**Project Period :** **2 years (15 May 2008 – 15 May 2010)**

### **Abstract:**

In literatures, the testbed for real-time adaptive MIMO systems usually analysed the performance by using only one direction of channels. The system cannot send the Channel State Information (CSI) back to the other side on time. This issue is very important because the success of MIMO systems which was proven in both theoretical and practical viewpoints depend on the most recently updated CSI. Therefore, this research project introduces the concept of using CSI from reciprocity theorem instead of feedback method. Reciprocity technique can easily archive channel information by utilizing reverse channel where the forward and reverse channels are symmetrically considered in time, frequency and location. In this work, the performance of capacity of MIMO system when using AS at transmitter with Reciprocity channels is investigated by own developing testbed. The results show that Reciprocity technique offers capacity performance equal to system with perfect CSI and it gives better performance than system without antenna selection.

**Keywords :** **MIMO system, Channel State Information, Testbed**

## เนื้อหางานวิจัย

### วัตถุประสงค์

- เพื่อสร้างระบบทดสอบไมโครบอตแบบปรับตัวในเวลาจริง
- เพื่อพัฒนาวิธีการประมาณช่องสัญญาณของระบบไมโคร และวิธีการส่งค่ากลับ ให้เหมาะสมสำหรับใช้ในงานจริงในทางปฏิบัติ
- เพื่อพัฒนาวิธีการปรับตัวของระบบส่งและรับสัญญาณในระบบไมโคร
- เพื่อสร้างฐานองค์ความรู้สำหรับอุตสาหกรรมการผลิตระบบสมองกลฝังตัว
- เพื่อสร้างเทคโนโลยีใหม่ที่มีศักยภาพในการแข่งขันกับต่างประเทศได้

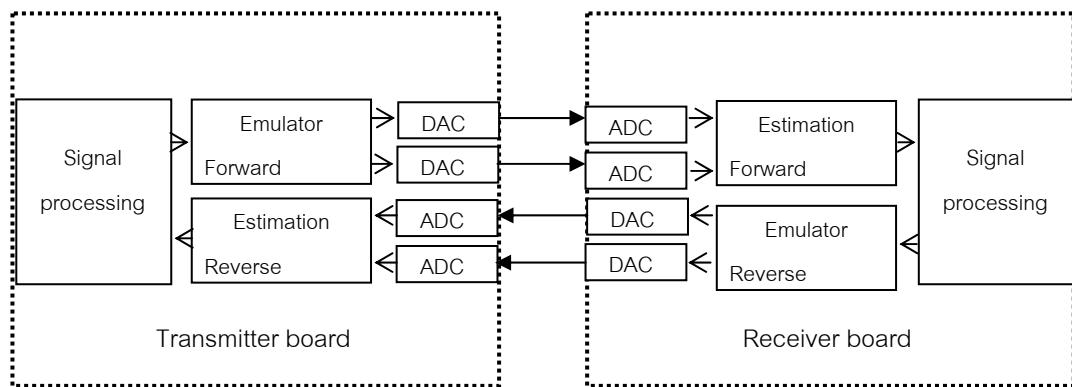
### วิธีการทดลอง

วิธีการทำงานวิจัยของโครงการนี้คือการพัฒนาเทคโนโลยีและชุดระบบทดสอบสำหรับไมโครบอตแบบปรับตัวในเวลาจริง ซึ่งเทคโนโลยีที่ใช้เป็นหลักการพัฒนาของทฤษฎีชิปประชาร์ต ดังนั้นงานจึงหนักไปในด้านการพัฒนาชุดระบบทดสอบ โดยมีรายละเอียดเป็นส่วนต่างๆ ดังนี้

#### 1. การออกแบบชุดทดสอบระบบไมโครบอตแบบปรับตัวในเวลาจริง

ในการออกแบบชุดทดสอบระบบไมโครบอตแบบ  $2 \times 4$  ที่มีการปรับตัวด้วยการใช้เทคโนโลยีการเลือกสายอากาศที่ภาคส่ง เนื่องจากองค์ประกอบภายในภาคส่งมีความต้องการชุดส่งสัญญาณ 2 ชุดเป็นอย่างน้อยและภาครับต้องการชุดรับสัญญาณ 2 ชุด ซึ่งนั้นหมายถึงความต้องการของ ADC (Analog to Digital Conversion) และ DAC (Digital to Analog Conversion) ทั้งที่ภาครับและภาคส่ง สำหรับหลักการทำงานของชุดทดสอบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1 เพื่อให้การออกแบบง่ายขึ้นเราจึงเลือกใช้เราจึงเลือกบอร์ดประมวลผลสัญญาณแบบสำเร็จ ซึ่งนั้นหมายถึงตัวบอร์ดจะต้องประกอบด้วย ADC และ DAC อย่างละ 2 ชุดเป็นอย่างน้อย สำหรับหลักการทำงานของชุดทดสอบที่ได้แสดงในรูปที่ 1 จะเห็นว่าเราได้ตัดในส่วนของชุดวงจรความถี่วิทยุและใช้ช่องสัญญาณที่ได้จากการวัดที่ได้แสดงในเนื้อหาในรายงานรอบหนึ่งปี โดยทำการสร้างช่องสัญญาณจำลองที่ภาคส่งและภาครับสำหรับช่องสัญญาณย้อนกลับและช่องสัญญาณไปหน้าตามลำดับ

ในปัจจุบันบอร์ดประมวลผลมีกันหลายรูปแบบโดยที่แต่ละรูปแบบมีพังชันก์การทำงาน ภาษาที่ใช้ในการออกแบบรวมถึงขอบเขตความสามารถที่แตกต่างกันออกไป ในการสร้างชุดทดสอบเราได้เลือกบอร์ดประมวลผล FPGA (Field Programmable Gate Array) สำหรับข้อดีของตัวประมวลผล FPGA คือ ตัวประมวลผลประเภทนี้ไม่มีโครงสร้างภายในที่ตายตัวเหมือนเช่นไมโครคอนโทรลเลอร์ ด้วยเหตุนี้ FPGA จึงมีความเร็วที่สูงกว่าตัวประมวลผลทั่วไป สำหรับ FPGA และนั่นเป็นอุปกรณ์ตัวใหม่ในตระกูลของ ASIC ซึ่งมีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วและมีบทบาทที่สำคัญในการเข้ามาแทนที่ระบบอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ TTL



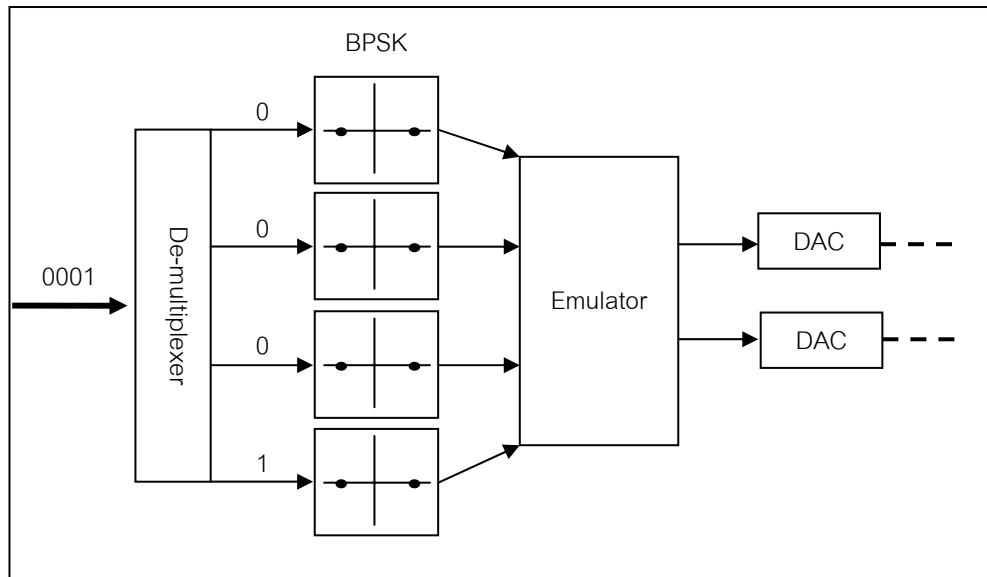
รูปที่ 1 แผนภาพโครงแกรมของชุดทดสอบ

โครงสร้างภายในของ FPGA ประกอบไปด้วยแกว์ล้ำดับของลอกจิกเกทต่างๆ มากมาย ซึ่งในปัจจุบันความจุเกทภายในตัว FPGA ได้เพิ่มขึ้น จากระดับไม่กี่พันตัวจนถึงระดับล้านตัวซึ่งสามารถรองรับวงจรดิจิตอลที่มีความ слับซับซ้อนได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ในการออกแบบแบบพัฒนาและทดสอบก็ทำได้ง่าย ในปัจจุบัน การออกแบบวงจรโดยใช้ FPGA กำลังเป็นที่นิยมและมีแนวโน้มที่จะนำมาใช้งานมากขึ้นเรื่อยๆ สำหรับข้อดีของการใช้ตัวประมวลผล FPGA สามารถแสดงได้ดังนี้

1. ผู้ออกแบบไม่จำเป็นต้องทราบถึงโครงสร้างภายใน เพียงแต่มีความรู้เกี่ยวกับ ขั้นตอนการออกแบบ ลอกจิกก์เพียงพอแล้ว ต่างกับการใช้ไมโครโปรเซสเซอร์ซึ่งจำเป็นต้องศึกษา โครงสร้างภายในรวมถึง ภาษา Assembly ของไมโครโปรเซสเซอร์ตัวนั้นด้วย
2. มีการออกแบบโดยใช้ภาษาในการอธิบายการทำงานของวงจร หรือ HDL (Hardware Description Language) เป็นเครื่องมือในการออกแบบ ซึ่งเป็นวิธีการที่มีความยืดหยุ่นสูง ทำได้รวดเร็ว และไม่จำเป็น ต้อง ทราบถึงลักษณะของวงจรที่ต้องการว่าจะเชื่อมต่อกันอย่างไร เพียงแต่กำหนดลักษณะการทำงานให้มั่น ใจนั้นตัวซอฟต์แวร์จะทำ Synthesis and Optimize ให้ทั้งหมดออกจากนี้ภาษาที่ใช้ยังเป็นมาตรฐาน เดียวกันสามารถใช้ได้กับทุกตัวและทุกบริษัท
3. การโปรแกรมสามารถทำได้เองและใช้เวลาไม่นานเพียงแค่ส่งข้อมูลผ่านสายดาวน์โหลดทางพอร์ตของ คอมพิวเตอร์ก็สามารถโปรแกรมตัวชิปขนาดที่อยู่ในระบบได้ โดยไม่จำเป็นต้องถอดมาโปรแกรมข้างนอก และ ที่สำคัญสามารถโปรแกรมได้หลายครั้ง จึงทำให้ง่ายในการแก้ไขและพัฒนาโดยไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มแต่ อย่างใด



รูปที่ 2 บอร์ดประมวลผล FPGA รุ่น Spartan 3A starter kit

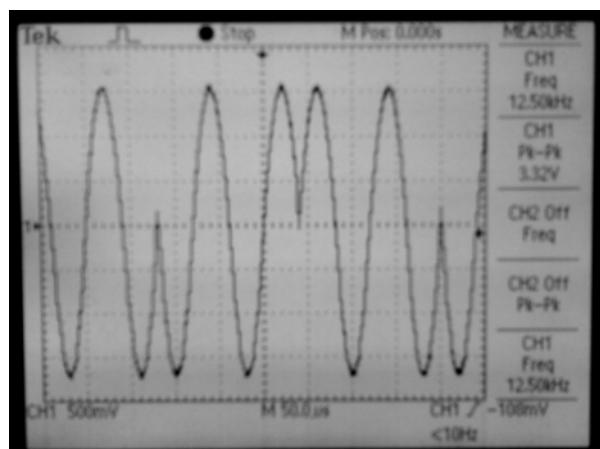


รูปที่ 3 การทำงานของภาคส่ง

## 2. การทำงานของชุดทดสอบระบบไม่โน้มเบบปรับตัวในเวลาจริง

### 2.1 การทำงานของภาคส่ง

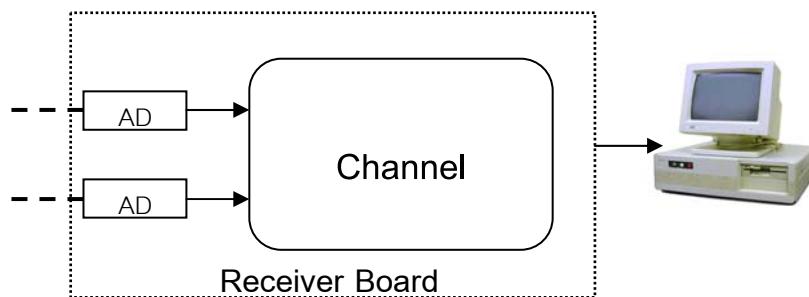
สำหรับการทำงานของภาคส่งสัญญาณนั้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3 โดยที่ข้อมูลบิทถูกสร้างภายในตัวอร์ด ซึ่งอยู่ในรูปแบบอนุกรม จากนั้นข้อมูลจะถูกส่งต่อไปยัง de-multiplexer ซึ่งทำให้ข้อมูลบิทที่ได้อยู่ในรูปแบบขนาดและถูกมอดูลेटแบบBPSK (Binary Phase Shift Keying)ด้วยสัญญาณไซน์ความถี่12.5 kHz โดยแทนบิท0ด้วยเฟส0oและแทนบิท1ด้วยเฟส180o จากรูปที่ 4 แสดงลักษณะของสัญญาณBPSKเมื่อมีการส่งข้อมูลบิท0และบิท1สลับกัน จากนั้นสัญญาณBPSKที่ได้จะถูกส่งต่อไปยังส่วนของการจำลองซึ่งสัญญาณโดยเอาต์พุตที่ได้จากการจำลองซึ่งสัญญาณจะถูกส่งต่อไปยังชุดทดสอบที่ทำหน้าที่เป็นภาครับสัญญาณต่อไป



รูปที่ 4 ลักษณะของสัญญาณ BPSKที่ได้จากชุดทดสอบ

## 2.2 การทำงานของภาครับ

สำหรับการทำงานของภาครับสัญญาณสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5 โดยสัญญาณที่รับได้จากADCทั้งสองชุดจะถูกนำไปทำการประมาณช่องสัญญาณ (Channel Estimation) เพื่อนำข้อมูลสถานะช่องสัญญาณที่ได้ไปใช้ในการตัดสินใจเลือกสายอากาศสำหรับเทคโนโลยีการเลือกสายอากาศ สำหรับข้อมูลสถานะช่องสัญญาณจะถูกแสดงผ่านโปรแกรม Chip scope ของXilinxดังนั้นภาครับจะต้องเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์เพื่อแสดงข้อมูลของช่องสัญญาณ สำหรับข้อมูลสถานะช่องสัญญาณจะถูกนำไปสร้างการจำลองแบบเพื่อพิจารณาสมรรถนะความจุช่องสัญญาณ



รูปที่ 5 การทำงานของภาครับ

## 3. ผลกระทบทดสอบและการจำลองแบบ

สำหรับผลช่องสัญญาณที่ได้จากการประมาณช่องสัญญาณจากชุดทดสอบเป็นผลที่จะถูกนำไปใช้ในเทคโนโลยีการเลือกสายอากาศเพื่อเลือกชุดของสายอากาศที่ให้ผลความจุช่องสัญญาณที่ดีที่สุด การติดตั้งและทำการวัดผลจากชุดทดสอบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6 โดยทำการประมาณช่องสัญญาณทั้งช่องสัญญาณไปหน้าและช่องสัญญาณย้อนกลับเพื่อ拿来ผลที่ได้ทำการสร้างการจำลองแบบและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของช่องสัญญาณทั้งสองเมื่อมีการใช้เทคโนโลยีการเลือกสายอากาศที่ภาคสัมภพ นอกจากนี้ลักษณะของสัญญาณซึ่งเป็นสัญญาณแทรนนิ่ง ที่ถูกส่งผ่านช่องสัญญาณจำลองไปยังภาครับได้ถูกแสดงทั้งช่องสัญญาณไปหน้าและช่องสัญญาณย้อนกลับ อย่างไรก็ตาม ผลของช่องสัญญาณที่ได้จากการประมาณช่องสัญญาณนั้นค่าของขนาดบังอยู่ในรูปของค่าจากเลขฐานสองอันเนื่องจากการแปลงแบบลอกเป็นดิจิตอลซึ่งค่าดังกล่าวจะต้องแปลงกลับคืนเพื่อให้ได้ค่าของขนาดจริง โดยใช้สมการดังนี้

$$D[13:0] = G \times \frac{(V_{IN} - 1.65)}{1.25} \times 8192$$

โดยที่  $G$  คืออัตรายานของตัวขยายสัญญาณภาครับมีค่าเป็น-2  $D$  คือข้อมูลบิทที่ได้จากการแปลงแบบลอกเป็นดิจิตอลมีขนาด 14 บิตและ  $V_{IN}$  คือขนาดของสัญญาณอินพุตที่ภาครับ

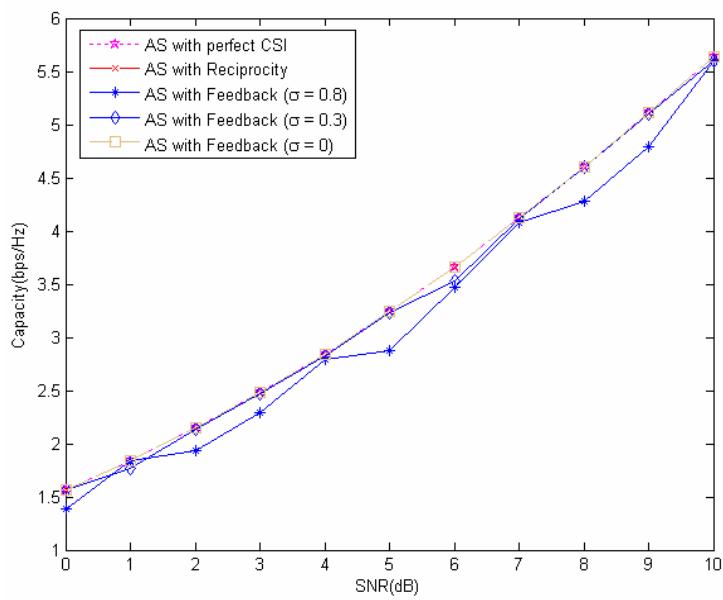


รูปที่ 6 การเชื่อมต่ออุปกรณ์วัดกับบอร์ด

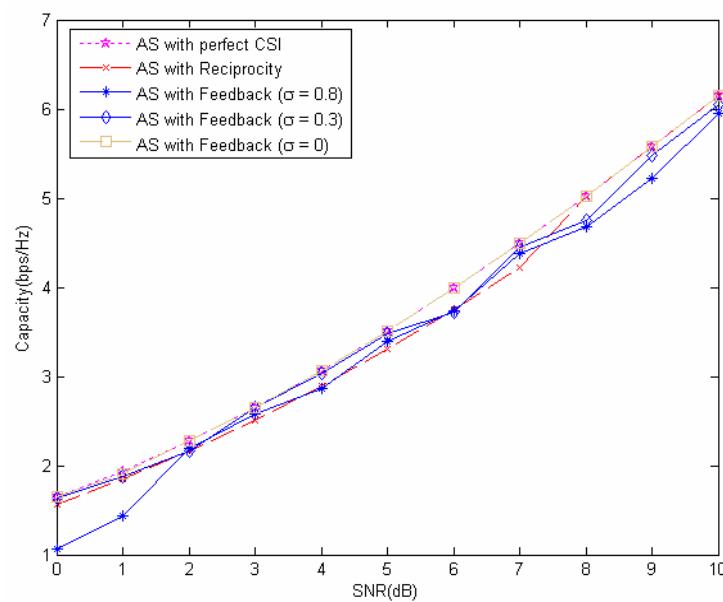
#### ผลการทดลอง

ในการสร้างการจำลองแบบ ประสิทธิภาพความจุช่องสัญญาณด้วยเทคนิคการเลือกสายอากาศหัววิธีป้อนกลับ วิธีรีซิโปรซิตี้และในการณ์ที่มีการรับรู้ข้อมูลสถานะช่องสัญญาณโดยถูกต้องสมบูรณ์ได้ถูกนำมาพิจารณาเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพที่ได้จากการต่างๆ รวมถึงความจุช่องสัญญาณเมื่อไม่มีเทคนิคการเลือกสายอากาศ (สายอากาศภาคส่งทุกต้นสามารถส่งสัญญาณพร้อมกันได้) โดยใช้โปรแกรม MATLAB ในการสร้างการจำลองแบบ จากรูปที่ 7 และ 8 ได้แสดงให้เห็นว่าในกรณีที่ระบบมีค่าความผิดพลาดจากช่องสัญญาณป้อนกลับในวิธีป้อนกลับนั้น ประสิทธิภาพความจุช่องสัญญาณที่ได้มีค่าลดลงเมื่อค่าความแปรปรวนของ เพิ่มขึ้น นอกจากนี้จะเห็นว่าที่จุดทดสอบที่ 1 เมื่อเกิดความผิดพลาดจากช่องสัญญาณป้อนกลับ ความจุช่องสัญญาณจากวิธีป้อนกลับมีค่าน้อยกว่าวิธีรีซิโปรซิตี้ สำหรับจุดทดสอบที่ 5 ถึงแม้วิธีรีซิโปรซิตี้ให้ประสิทธิภาพความจุช่องสัญญาณน้อยกว่าเมื่อเทียบกับกรณีที่มีการรับรู้ข้อมูลสถานะช่องสัญญาณถูกต้องสมบูรณ์ แต่เมื่อเทียบกับวิธีป้อนกลับที่มีความผิดพลาดจากช่องสัญญาณป้อนกลับ ความจุช่องสัญญาณที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน และมีค่าเหลือน้อยกว่าหากความผิดพลาดจากช่องสัญญาณป้อนกลับมีค่ามาก

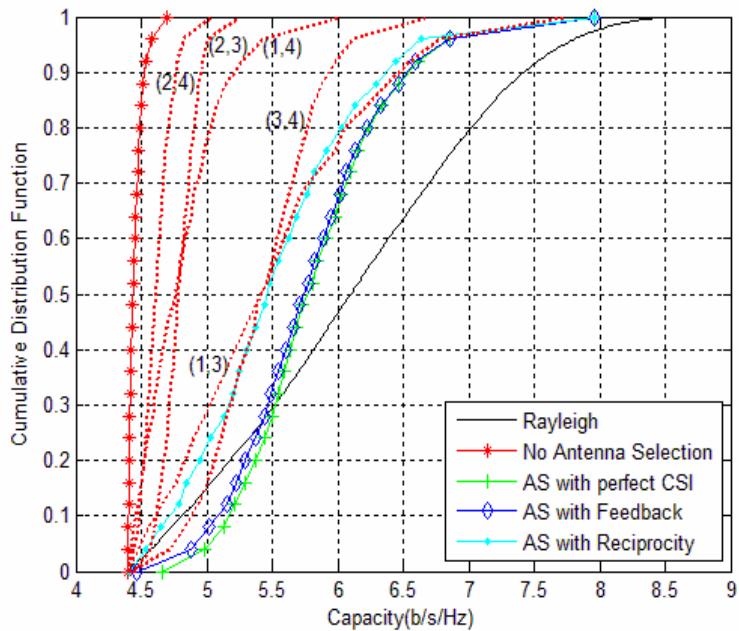
รูปที่ 9 แสดงการกระจายตัวแบบสะสมของช่องสัญญาณ ณ จุดทดสอบที่ 5 พบว่าวิธีการใช้เทคนิครีซิโปรซิตี้สำหรับระบบไม่โมแบบปรับตัวในเวลาจริงให้ผลที่ดีที่สุดเทียบกับระบบไม่โมที่ไม่มีการปรับตัว นอกจากนี้ยังมีสมรรถนะที่ใกล้กับระบบที่รู้ข้อมูลของช่องสัญญาณอย่างสมบูรณ์ด้วย



รูปที่ 7 ความจุช่องสัญญาณสำหรับวิธีป้อนกลับที่จุดทดสอบที่ 1



รูปที่ 8 ความจุช่องสัญญาณสำหรับวิธีป้อนกลับที่จุดทดสอบที่ 5



รูปที่ 9 การกระจายตัวแบบสะสมของความจุของสัญญาณที่จุดทดสอบที่ 5

### สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

โดยสรุปงานวิจัยฉบับนี้มีผลผลิตในสองรูปแบบคือ 1. ได้พัฒนาชุดระบบทดสอบไม่โมบีลแบบปรับตัวในเวลาจริง ซึ่งสามารถนำไปทดสอบสมรรถนะของระบบไม่โมบีลในสถานการณ์ต่างๆ ได้ ทำให้สามารถพัฒนางานวิจัยด้านระบบไม่โมบีลไปในอนาคตได้ และ 2. ได้เสนอเทคโนโลยีการปรับตัวของระบบไม่โมบีลด้วยช่องสัญญาณรีซิปโรซิตี้ ผลจากการจำลองแบบในทฤษฎีและการวัดค่าช่องสัญญาณจริงจากชุดระบบทดสอบที่พัฒนาขึ้น สามารถสรุปได้ว่างานวิจัยที่ใช้เทคนิครับรู้ช่องสัญญาณด้วยหลักการของรีซิปโรซิตี้ สามารถให้สมรรถนะของระบบใกล้เคียงกับระบบที่รู้ช่องสัญญาณอย่างสมบูรณ์ ซึ่งเทคนิคนี้ยังไม่เคยเสนอในงานวิจัยที่ได้มาก่อน

### ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

การทดสอบไม่สามารถทำได้ก็แล้วแต่จากกำลังส่งสัญญาณไม่สูงมาก จึงควรพัฒนาอุปกรณ์ความถี่วิทยุให้มีประสิทธิภาพมากกว่านี้ นอกจากนี้ระบบที่ทดสอบยังเป็นระบบที่อยู่นิ่ง คือตัวส่งสัญญาณและตัวรับสัญญาณไม่เปลี่ยนแปลงหรือไม่เคลื่อนที่ ดังนั้นปัญหาการเคลื่อนที่จึงเป็นสิ่งที่ท้าทายต่อการวิจัยในอนาคต

## Output จากโครงการวิจัยที่ได้รับทุนจาก สกว.

1. ได้นำเสนอผลงานในที่ประชุมวิชาการนานาชาติ มีรายละเอียดดังนี้ (reprint อยู่ในภาคผนวก ก)  
Title: Feasibility of Adaptive 4x4 MIMO System using Channel Reciprocity in FDD mode  
Conference: The 14th Asia-Pacific Conference on Communications (APCC2008)  
Date: 14-16 October 2008  
Place: Akihabara Japan
2. ได้ส่งผลงานเพื่อตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติ Wireless Communication and Mobile Computing (ISI impact factor 0.909) และได้รับการตอบกลับมาให้แก้ไขบทความประเภท Major Revision ซึ่งทำการแก้ไขและส่งกลับเรียบร้อยแล้ว ขณะนี้อยู่ในช่วงรอผลการตอบกลับ ผลงานดังกล่าวมี manuscript อยู่ในภาคผนวก ข

ภาคผนวก ก

# Performance of Antenna Selection in MIMO System using Channel Reciprocity with Measured Data

Peerapong Uthansakul<sup>1</sup>, Kitti Attakitmongkol<sup>2</sup>, Nataphat Promsuvana<sup>1</sup> and Monthippa Uthansakul<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Telecommunication Engineering, Suranaree University of Technology

Muang, Nakhon Ratchasima, Thailand 30000

<sup>2</sup>School of Electrical Engineering, Suranaree University of Technology

Muang, Nakhon Ratchasima, Thailand 30000

Email: uthansakul@sut.ac.th, kitti@sut.ac.th, jame\_maxwell@hotmail.com and mtp@sut.ac.th

**Abstract-** It is well known that the channel capacity of Multiple-Input-Multiple-Output (MIMO) system increases as the number of antenna pairs between transmitter and receiver increases but it suffers from multiple expensive RF chains. To reduce the cost of RF chains, Antenna Selection (AS) method can offer a good tradeoff between expense and performance. In a transmitting AS system, Channel State Information (CSI) feedback is necessarily required to choose the best subset of antennas in which the effects of delays and errors occurred in feedback channels are the most dominant factors degrading the performance of the AS method. This paper presents the concept of AS method using CSI from channel reciprocity instead of feedback method. Reciprocity technique can easily archive CSI by utilizing a reverse channel where the forward and reverse channels are symmetrically considered in time, frequency and location. In this work, the capacity performance of MIMO system when using AS method at transmitter with reciprocity channels is investigated by own developing Testbed. The obtained results show that reciprocity technique offers capacity close to a system with a perfect CSI and gains a higher capacity than a system without AS method from 0.9 to 2.2 bps/Hz at SNR 10 dB.

**Keywords:** Antenna Selection, Capacity, Channel, Measurement, MIMO, Reciprocity

## I. INTRODUCTION

A Multiple-Input-Multiple-Output (MIMO) system recently becomes one of the most attractive techniques for the future use because it proposes an extensive improvement over conventional smart antenna systems in both Quality of Service (QoS) and the transfer rate [1-4]. However, using multiple antennas require multiple radio frequency (RF) chains which consist of amplifiers, up and down converters, digital to analog converters, etc., that are typically very expensive. A promising approach for reducing cost while retaining a reasonably large fraction of the high potential data rate of a MIMO approach appears to be to employ some form of Antenna Selection (AS) [5-8]. The AS method employs a reduced number of RF chains at the receiver (or transmitter) and attempt to optimally allocate each chain to one of a larger number of receiving (transmitting) antennas which are usually cheaper elements. In this way, only the best set of antennas is used, while the remaining antennas are not employed, thus reducing the number of required RF chains.

In literatures [9-17], the developments of AS method are classified into two main topics. At first, the algorithms to select the best subset of antennas are on focus. These algorithms may apply to either transmitter [9] or receiver [10]. The fast and precise selections are the required demand in practice. However, the success of these algorithms depends on the knowledge of CSI especially for the transmitting AS system that Channel State Information (CSI) feedback is necessarily required to be used for choosing the best subset of antennas [11-14]. Although the work presented in [15] tries to perform AS method without knowing CSI at transmitter for transmitting AS system, but the expense of many iterations degrades its attraction. For second topic, researchers pay attentions to the methods of Channel State Information (CSI) acquisitions. This is because the more exact CSI is realized, the more enhanced performance of AS method is

obtained. Unfortunately, the CSI is usually not available at the transmitter so the method to realize CSI is still of important. In literatures, there are two approaches in order for the transmitter to obtain the CSI. The first approach utilizes CSI from feedback channel and the second approach is based on the reciprocity principle. In the first method, the forward channel is estimated at receiver and then it is sent back to the transmitter through the reverse channel. This method does not function properly if the channel is rapidly changed. In order to realize the correct CSI at transmitter, more frequent estimations and feedbacks are required. As a result, the overheads for the reverse channel become prohibitive. In turn, the second approach based on reciprocity does not have such a problem. Due to the reciprocity principle, it is well known that the radio propagation channel is reciprocal between two antennas. Ideally, the forward and reverse channels are assumed to be the same. Therefore, the transmitter can realize the forward CSI by estimating the reverse CSI instead. In Time-Division-Duplex (TDD) mode, the same carrier frequency is alternately used in forward and reverse channels. The propagation surrounding is not rapidly changed by time so the channel coefficients are able to be considered as similar for both directions. Based on TDD mode, the reciprocity approach is superior to any explicit feedbacks.

Recently there have been many researches concerning on channel reciprocity of a MIMO system which are based on the non-reciprocal effects between forward and reverse channel caused by any mismatches among RF components and interferences between transmitter and receiver [16-17]. However, from all works described in literatures [16-17], the system model is based on the assumption of that the forward and reverse channels are identical. This assumption is not practical because of the fact that fadings due to surroundings of transmitter and receiver

are totally different. They cause the deviation of CSI between forward and reverse channel and it is wondered whether this deviation of non-reciprocal CSI would degrade the AS performance.

In this paper, the performances of adaptive MIMO system with AS method at transmitter based on channel reciprocity are investigated. The measured data are measured and tested by own developing Testbed based on FPGA board. In recent times, most researches move their experiments from simulations into real measurements. MIMO Testbed [18-23] is one the most comfortable platforms to realize the true performance of a proposed system under a real circumstance. For the work presented in [18-20], the performance investigations of MIMO system under indoor and outdoor have been reported through the Testbed. In [23], a transmitting AS system with an eigenbeam for MIMO-OFDM system is employed. This work achieves CSI via feedback technique and uses it to compute eigenvectors for selecting the best subset of transmitting antennas. In summary, all MIMO Testbeds presented in literatures utilize CSI from feedback channels. Moreover, some works [21-22] use a direct link to perform feedback channels which exclude any errors due to wireless operations. As far as the best survey of the authors, the issue of channel reciprocity for MIMO Testbed has never been reported in any publications. Hence, the contributions of this paper mainly fall into two issues. Firstly, the use of channel reciprocity for AS method in a MIMO system is originally demonstrated. The second contribution is on a proposed MIMO Testbed working by FPGA processors which is ready to be launched as commercial products. More importantly, it is interesting to delete the need of feedback channels by replacing reciprocity technique because this can save costs of system complexity and make the system more reliable.

In this work, the effect from the mismatches of RF components can be assumed to be neglected by using the exact same components at both transmitter and receiver. The CSI information

between transmitter and receiver for using in AS method is acquired by channel emulator in which forward and reverse CSIs are measured from real propagation environments. The 2x4 MIMO channels are considered as 2x2 by AS method and then the channel capacity is calculated by computer to find the optimal subset of antennas. In addition, the comparison between feedback approach and reciprocity approach are also undertaken to provide the fair judgment with measured data. The results in this paper are helpful to realize the use of channel reciprocity in practice and its impact on channel capacity due to non-identical CSI between forward and reverse channels. The remainder of this paper is organized as follows. In Section II, the MIMO system model and two approaches estimating CSI are presented. Section III describes the channel measurement and then the testing implementation is detailed in section IV. The MIMO channel capacities are presented in Section V. Finally, the paper conclusion is given in Section VI.

## II. MIMO SYSTEM MODEL

### A. *MIMO system model*

Considering the MIMO system which has  $N_T$  transmitting antennas and  $N_R$  receiving antennas, the formula of MIMO channel capacity is given in (1) [4]. This expression presents the averaging capacity in bps/Hz by assuming the ergodic process for channel matrix  $\mathbf{H}$ .

$$C = E_{\mathbf{H}} \left\{ \log_2 \det \left( \mathbf{I}_{N_R} + \frac{P_T}{P_N N_T} \mathbf{H} \mathbf{H}^* \right) \right\} \quad (1)$$

where  $\mathbf{I}_N$  is the  $N_R \times N_R$  identity matrix,  $P_T$  is the total transmit power,  $P_N$  is the noise power,  $N_T$  is the number of transmitting antennas,  $N_R$  is the number of receiving antennas,  $E_{\mathbf{H}} \{ \}$  is the expectation over  $\mathbf{H}$  and  $*$  denotes the conjugate and transpose operation.

When AS method is employed at the transmitter or the receiver, a subset of transmitting or receiving antenna elements is chosen. The channel seen by the subset is the sub-matrix,  $\mathbf{H}_{sub}$  that is obtained by selecting only the rows and columns of  $\mathbf{H}$  that correspond to the selected receiving and transmitting antenna elements. The optimal subset is one that leads to the largest mutual information between the antenna elements. The capacity of MIMO system with AS is given by

$$C_{sel} = \max_{S(\mathbf{H})} \log_2 \det(\mathbf{I}_{L_R} + \frac{P_T}{P_N L_T} \mathbf{H}_{sub} \mathbf{H}_{sub}^H) \quad (2)$$

where  $\mathbf{I}_{L_R}$  is the  $L_R \times L_R$  identity matrix,  $\mathbf{H}_{sub}$  is an  $L_R \times L_T$  matrix obtained by removing  $N_R - L_R$  rows and  $N_T - L_T$  columns from  $\mathbf{H}$  and  $S(\mathbf{H})$  denotes the set of all possible  $L_R \times L_T$  sub-matrices of  $\mathbf{H}$  that can be chosen.  $L_R$  and  $L_T$  represent the number of receiver RF chains and transmitter RF chains respectively.

### B. CSI at transmitter

As seen in Section A, the system achieves the optimal capacity when the transmitter has knowledge of the forward channel. To obtain the CSI at transmitter, there are two approaches explained as follows.

#### 1. Feedback approach

For this approach, the receiver realizes a current CSI by channel estimation and then feeds it back to the transmitter through reverse channel. The configuration of feedback approach is shown in Figure 1.

In Figure 1, the receiver uses the estimated channel to extract the data and to generate the feedback CSI. The feedback CSI is sent back to the transmitter using the feedback control channel. It is assumed that CSI is perfectly known at the transmitter. The transmitter, in turn, uses this information to customize the transmitted signal for the channel.

In practice, errors from feedback link which influence to channel knowledge cannot be neglected. This effect can degrade the capacity performance and it is more pronounced when feedback link contain errors excessively, under this assumption the available CSI at transmitter can be expressed as

$$\mathbf{H}_T = \mathbf{H} + \boldsymbol{\varepsilon}_E + \boldsymbol{\varepsilon}_F \quad (3)$$

Or

$$\mathbf{H}_T = \mathbf{H}_{ES} + \boldsymbol{\varepsilon}_F \quad (4)$$

where  $\mathbf{H}$  is the forward channel,  $\mathbf{H}_T$  is the available CSI at transmitter,  $\boldsymbol{\varepsilon}_E$  and  $\boldsymbol{\varepsilon}_F$  are  $N_R \times N_T$  errors matrix from estimation and error matrix from feedback link, respectively and  $\mathbf{H}_{ES}$  is the channel matrix which is achieved by channel estimation.

## 2. Reciprocity Approach

According to the principle of reciprocity, the forward and reverse channels are identical when the time, frequency and antenna locations are the same. Based on the principle, the transmitter may use the CSI obtained by the reverse link for the forward link. In practice, the forward and reverse channels are not truly identical because of the effect of channel fading, noises and environments. The CSI known at transmitter can be given by

$$\mathbf{H}_T = \mathbf{H} + \boldsymbol{\varepsilon}_E + \boldsymbol{\varepsilon}_R \quad (5)$$

where  $\boldsymbol{\varepsilon}_R$  is the  $N_R \times N_T$  channel reciprocity error matrix realized by measurements.

### III. CHANNEL MEASUREMENT

The configuration of 2x4 MIMO system is shown in Figure 2, which network analyzer, power amplifier (PA) module, low-noise-amplifier module (LNA) and monopole antennas with 5 dBi gain are used. As seen in Figure 2, the PA module is used at transmitter to provide more transmitted power. As same as transmitter, the LNA module is used to increase the received signal level. The channel coefficients in both magnitude and phase are measured by network analyzer. The data was measured by 5 times per location. In each time, the 100 samples of channel data were recorded continuously within 1.5 seconds. However, we did not continue recording all 5 times in one round. The sequence of recording starts from Location 1 (100 samples) and then moves to Location 2 (100 samples) until Location 5 (100 samples). This sequence is called as one set. In the first day, we did two sets of measurements and the other three sets were done on the second day. In summary, 500 samples per location were collected over two days. In order to mitigate the effect of measurement noises, the function of network analyzer, called as smoothing command, is used to average the measured data over specific time. In this work, the specific time is the default operation at 10 ms. It means that each recorded sample is an averaging result over 10 ms.

For the measured area, we choose the large office room to provide many cases of study. Figure 3 shows the map of office room. The circular markers are referred to the locations where the

measurement is undertaken. There are five measured locations. In each location transmitter and receiver are switched in order to measure the forward and reverse channel. Although, it is easier to measure both forward and reverse channels by switching transmitted port in network analyzer but the effect of non similarity of PA and LNA including feeding cables might differ the measured channel from the real results. Therefore, we choose to switch all parts of transmitter and receiver in order to avoid any false outcomes. The switching time between transmitter and receiver is at least 20-30 seconds. In [24], the coherence time, which is the minimum interval that two signals are uncorrelated, is 21.2 ms. It means that the time interval between Tx frame and Rx frame of TDD mode must be longer than this coherence time. Hence, the measured forward and reverse channels are acceptably considered under the same criteria for TDD mode.

Figure 4 shows an example of each element of  $2 \times 4$  channel matrix at Location 4, where  $H_{ij}$  refers to the channel coefficient of  $i$ th receiving antenna and  $j$ th transmitting antenna. It can be observed that both forward and reverse channels are similar but not the same. The amplitude deviation is about  $\pm 2$  dB and the phase deviation is about  $\pm 15^\circ$ . These deviations were ignored in all works presented in literatures [16-17]. The result is important to realize how these deviations influence to the practical performance. As seen in Figure 4, the variation of measured data is very small because the environments seem to be a static channel. Hence, the results are grouped into two clusters, forward and reverse channels. However, the forward and reverse channels are not identical as expected because the surroundings of transmitter and receiver are different. For other locations, the deviations of amplitude and phase are similar to Location 4.

In addition, the correlation coefficients evaluated from measurements are 0.62, 0.325, 0.9, 0.52 and 0.73 for Location 1, Location 2, Location 3, Location 4 and Location 5, respectively. These values conclude that Location 2 is the most suitable area for MIMO operation because it has the

lowest correlation coefficient in comparison with other locations. Then it is expected that Location 2 should offer more capacity than other locations as well. In turn, the capacity performance of Location 3 is expected to be poor due to its high correlation.

#### IV. TESTBED IMPLEMENTATION

##### A. Antenna Selection (AS) technique

The capacity of MIMO system employing AS technique is described in (2), however this work concerns only the case of AS known at the transmitter. In order to find the optimal subset from knowing of only CSI at transmitter modeled in (3) and (5) for feedback and reciprocity approaches respectively, the conventional technique is applied by searching all possible subsets of antennas and then select the best subset providing the highest capacity. As a result, the formula of MIMO channel capacity with AS technique at transmitter can be given by

$$C_{sel} = \max_{S(\mathbf{H}_T)} \log_2 \left[ \det \left( \mathbf{I}_{L_K} + \frac{p}{L_T} \mathbf{H}_{T,sub} \mathbf{H}_{T,sub}^H \right) \right] \quad (6)$$

Where  $\mathbf{H}_{T,sub}$  is the  $N_{RX} \times L_T$  sub-matrix (AS at transmitter) of CSI ( $\mathbf{H}_T$ ) obtained by feedback or reciprocity approaches.

It must be noticed that by using CSI in (6) to find the optimal subset of antenna, the differences between  $\mathbf{H}_T$  and  $\mathbf{H}$  ( $\mathbf{H}_T \neq \mathbf{H}$ ) cause directly to the capacity performance in (2) due to implementing errors from either feedback or reciprocity channels. In this work, the exhaustive search is applied to find the best antenna subset from all possible cases. Although there are many algorithms proposed in literature to select the antenna subset but the best solution is still the same as exhaustive search. Only fast processing and low complexity are the benefits of other

algorithms. The purpose in this work is to investigate the performance of reciprocity channels in comparison with feedback channels so the same conclusion should be found for any AS methods.

### *B. Design of developing Testbed*

This work chooses Field Programmable Gate Array (FPGA) technology to implement 2x4 MIMO Testbed because FPGAs processing were introduced as promising alternative to custom ICs for implementing entire system on one chip and to provide flexibility of re-program ability to the user. All functions are constructed inside FPGA boards including the AS method at transmitter where 2 transmitting antennas are selected. Hence, the system requires only 2 transmit and 2 receive components such as Analog to Digital Converter (ADC), Digital to Analog Converter (DAC). The block diagram of FPGA boards can be shown in Figure 5. As seen in Figure 5, RF components of transmitter and receiver have been replaced by using channel emulator. The concept of channel emulator has been adopted in many publications [21-22] in order to simulate the various conditions of channel collected by real measurements. Another point of using channel emulator is to save cost of RF components because the boards can be functionally tested before passing through the production line.

In this work, we use Spartan 3An starter kit boards from Xilinx Company to implement transmitter and receiver which is explained as follows. Note that both transmitter and receiver boards shown in Figure 5 have the same components of transmitter and receiver to perform full duplex communication. However, we name the direction from transmitter board to receiver board as forward channel and the other direction as reverse channel.

### *1. Transmitter*

The configuration of transmit system is shown in Figure 6. The series of bit information are generated and then it is fed to the de-multiplexer to convert from series to parallel bit information. After that it is modulated by BPSK modulation with frequency 12.5 kHz, bit 1 and bit 0 are represented by phase 0° and 180° respectively. The BPSK signal is fed to the channel emulator which acts as wireless communication channel. Finally, the signals from channel emulator are converted to analog signals which are sent to receiver board.

### *2. Receiver*

The received analog signals from transmitter are fed to the channel estimation block to estimate the CSI which is used to select the optimum subset of antennas in AS method. The estimated CSI is shown via chip scope pro software on PC which is connected to the receiver board.

### *C. Channel Estimation Method*

To obtain CSI at both transmitter and receiver, we develop the simple technique to estimate CSI and it can reduce the complexity of hardware implementation. Considering MIMO system which has 4 transmitting antennas and 2 receiving antennas, the set of training sequence is specified in Figure 7. To understand the principle of channel estimation, first we have to understand the layout of communication in 2x4 MIMO which can be written as

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{1,2} & h_{1,3} & h_{1,4} \\ h_{2,1} & h_{2,2} & h_{2,3} & h_{2,4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} \quad (7)$$

As seen in Figure 7, then the received signal at each receiving antenna at  $t$  time duration can be shown as

$$y_1(t) = h_{1,1}x_1(t) + h_{1,2}x_2(t) + h_{1,3}x_3(t) + h_{1,4}x_4(t)$$

$$y_2(t) = h_{2,1}x_1(t) + h_{2,2}x_2(t) + h_{2,3}x_3(t) + h_{2,4}x_4(t)$$

Let  $S_0$  and  $S_1$  are defined by BPSK signals representing 0 and 1 bit modulation respectively, then the channel coefficient can be calculated by

$$h_{k,t-1} = \frac{y_k(t=1) + y_k(t)}{2|S_0|} \quad (8)$$

In this work, eq. (8) is used to implement on FPGA and it is help to estimate both forward and reverse CSI. Accordingly, these estimated CSIs are used in AS algorithm mentioned earlier.

#### *D. Test results*

To complete testing system, channel emulators are operated for both forward and reverse channels. These channel information are determined by real measured data and programmed on FPGA boards. The obtained results are collected for the case of AS method, which is employed at only transmitter. Personal computers are connected to the transmitter and receiver to provide programmable interface and capture all concurrence data. Moreover, the oscilloscope is used to capture a real signal coming from any concerned ports in order to compare signal from both forward and reverse channels.

To implement channel emulators for both forward and reverse channels, the measured data described in Section 3 is used. However, channel information matrices from measurements have

to be multiplied and divided with a constant value in order to adjust a suitable level for ADC and DAC specifications. This is to avoid the unwanted effect due to low sensitivity of ADC or DAC, which it causes a signal error at receiver. Also, by multiplying or dividing channel information matrices with a constant value, it does not change the property of channel characteristics.

Figure 8 shows an example of channel information of forward channel at Location 1 which is obtained by channel estimation and it is shown by Chip scope pro software. As seen in Figure,  $a_{Hij}$  and  $p_{Hij}$  refer to estimated amplitude and phase of channel coefficient of  $i$  th row and  $j$  th column respectively (Each amplitude are in ADC's based values and theses values must be convert to the actual value before use). The estimated forward and reverse channels have the similar channel responses and there are some phase and amplitude errors between forward and reverse channel for any locations. These errors are occurred by non-identical property of forward and reverse channels. However the other errors due to hardware such as DAC and ADC have been already considered and included in the results. After capturing by both Chip scope pro software as well as real oscilloscope, the channel emulators implemented on FPGA boards properly provide the correct forward and reverse channels realized by measurements. Figure 9 shows an example of comparison in complex form between forward and estimated forward channel matrix by using one sample of channel data at Location 1. The estimated forward and forward channels are similar in terms of real and imaginary parts. Although the deviations are still valid, these are very little in comparison with the errors between forward and reverse channels depicted in Figure 4. Therefore, the channel estimation implemented in the Testbed works very well and ensures the correct achievement of CSI from available sources, either feedback or reciprocity approaches.

## V. RESULTS AND DISCUSSIONS

### A. *Simulation Results*

All capacity results in this section are off-line produced on computer by using real AS outcomes from Testbed selections mentioned in the previous section. Therefore, these capacities can be compared with various system conditions including Rayleigh propagation channel and perfect CSI system which are hardly measured in real scenarios. The MIMO channel capacities are computed by MATLAB programming when AS methods are employed by using (2) and (6).

Note that  $\mathbf{H}_T$  of forward and reverse channels are obtained by Testbed system. For feedback approach, at first we assume that there is no feedback error in feedback channel and then at the end of this section the effect of this error will be illustrated. The simulations disregard the mismatches of RF circuits in transmit/receive components as well as mutual coupling effects because they are included in one part of channel measurements.

The capacity performances are base on Cumulative Distribution Function (CDF) at SNR=10dB by using 500 samples of the collected channel data and they are illustrated into five cases, Rayleigh channel, AS with feedback channel, AS with perfect CSI, AS with reciprocity channel and no use of AS method. In case of no antenna selection, the first and second transmitting antennas are used to transmit signals for any locations. For sake of comparison, the channels are normalized to provide a comparable discussion by  $\sum|H_{ij}|^2=N_T N_R$  which limits total channel energy to one constant value. This normalization is done in order to compare channel properties between various conditions by neglecting the effect of path loss. All details of five cases are explained as follows.

- *Rayleigh channel* : this case represents the capacity of 2x2 MIMO system when wireless channel acts as Rayleigh fading channel which is random channels over

10,000 times.

- No Antenna Selection : this case represents capacity of 2x2 MIMO system when there is no selection at transmitter where the first and second antenna elements are used to transmit signals.
- AS with Feedback : this case represents the capacity when the CSI from feedback approach is used to select transmitting antennas in AS technique. Two of four transmitting antennas are optimally chosen to offer the best capacity.
- AS with perfect CSI : this case represents the capacity when the CSI is assumed to be perfectly known at transmitter. Hence, the selected transmitting antennas in AS technique are ideally optimal corresponding with the wireless channels. There is no error taken into account so the capacity is computed by using (2).
- AS with Reciprocity : this case represents the capacity when the CSI from reciprocity approach is used to select transmitting antennas in AS technique.

As mentioned in Section III, there are five measured locations in which the channels are collected. The surrounding of each location is so different that the capacity results are considerably separated into each location to make a fair judgment on all approaches.

Location 1 As seen in Figure 10, the cumulative distribution function of capacity for AS methods with reciprocity and feedback approaches are close to a perfect CSI case where a feedback case is slightly better than a reciprocity case. The results of reciprocity case provide a performance gain 1 bps/Hz higher than Rayleigh at 50% probability. For this reason, it can be explained that the measured channels at Location 1 might be captured in the area above 50% probability of Rayleigh distribution. However, at 95% probability, the AS methods based either feedback or reciprocity reach the same performance as Rayleigh. In addition, AS method with

reciprocity give a performance gain 1.15 bps/Hz higher than a system without AS method at 50% probability.

Location 2 In Figure 11, the cumulative distribution function of capacity for no AS method, AS methods with reciprocity and feedback cases are close to a perfect CSI case and they provide a performance gain up to 1.3 bps/Hz higher than a case of Rayleigh at 50% probability. It is interesting to observe that no AS method provides a performance close to a perfect CSI case at this location. The reason is that no AS method always fixes the first and second transmitting antennas to operate a 2x2 MIMO system which is the best subset of antenna selections.

Location 3 Figure 12 shows the cumulative distribution function of capacity at Location 3. In this location, the interesting point is that a Rayleigh case gives the highest capacity at 50% probability while a Rayleigh case is lower than a perfect CSI case for the other locations. It is also noticed that the performance of a reciprocity case seems to fail on selecting the best subset because the difference of reciprocity and feedback approaches is very large. In this response, the authors generate the other cases with the fixed transmitting antennas to closely investigate this outcome. The presented dot line with  $(x,y)$  is defined as a system with no AS method which always use  $x$ th and  $y$ th transmitting antennas to perform 2x2 MIMO operation. The results indicate that a reciprocity case still offers a higher capacity than all cases of no AS method. It is implied that the AS method still works well based on a reciprocity channel. Hence, the poor performance of a reciprocity case in this location is due to only the property of channel which is a direct LOS communication illustrated in Figure 3. The results confirm the well known conclusion that a MIMO capacity in a dominant LOS signal is less than in a Rayleigh channel.

Location 4 The aim of measuring at this location is to investigate the channel property when there are obstructions between transmitter and receiver, in comparison with Location 3. As

shown in Figure 13, the cumulative distribution functions of capacity for AS methods with reciprocity and feedback cases are similar and close to a perfect CSI case after 50% probability. The capacity results of AS methods in this location are higher than the results at Location 3 which confirms the conclusion mentioned in Location 3. For Location 4, the use of AS method with reciprocity can provide 2.2 bps/Hz higher than a case of No AS method at 50% probability.

Location 5 As noticed in Figure 14, the results of AS method with reciprocity seem to fail on selecting the best subset of antennas as same as in Location 3. However, the authors did the other cases of fixed transmitting antennas and achieved the same conclusion that AS method with reciprocity still provide a higher capacity than all cases of no AS methods. However, the difference of reciprocity cases between Location 3 and Location 5 is that the capacity of Location 5 is higher than a Rayleigh channel. This can be described by the surrounding around transmitter and receiver are very different and its cause more scattering than Location 3.

In summary, a system using AS method with reciprocity always gives the performance better than a system without AS method while it is slightly less than feedback and perfect CSI cases. However, for AS method with feedback, the presented results are based on the exclusion of any errors in a feedback channel in which these errors are compulsorily occurred in practice due to channel delays and feedback noises. As a result, it is also necessary to examine the effect of feedback errors on capacity performances.

In order to investigate feedback errors included in feedback channel, this work assumes that the model of feedback error ( $\varepsilon_F$  from (3)) is given by

$$\varepsilon_F = \sigma \mathbf{H}_{i.i.d.} \quad (9)$$

where  $\mathbf{H}_{i.i.d.}$  is i.i.d. (Independent Identically Distributed) channel matrix with zero mean and unit variance,  $\sigma^2$  is the variance of feedback errors  $\varepsilon_F$ .

Figure 15 shows the effect of feedback errors on capacity performance of AS method at Location 5. It is obviously seen that errors degrade the capacity performance as a function of error variance. Also seen in the figure, the capacity performance of AS method with feedback is worse than a reciprocity case when the error variance in a feedback channel is more than 0.4. The results indicate the tradeoffs between using reciprocity and feedback approaches. If the variance of feedback errors is higher than 0.4, the reciprocity approach might be more attractive than feedback with the benefit of low complexity.

## VI. CONCLUSION

This paper presents the performance of adaptive 2x4 MIMO system when AS technique is employed at transmitter using channel reciprocity realized by the measured data. The experimental results reveal that antenna selection using channel reciprocity provides the capacity performance slightly less than perfectly knowing CSI at transmitter. In addition, the system using AS method with reciprocity approach offers higher capacity than system without antenna selection for all locations. Instead of feedback approach, the reciprocity does not require any information sent back to the other side. Therefore, the proposed system can properly be an attractive choice to replace the feedback system with the less complexity.

## ACKNOWLEDGEMENT

This work is financially supported by Grant MRG 5180344. The authors are also thankful to TRIDI as one of authors received NTC scholarship funded by TRIDI.

## REFERENCES

- [1] Murch R.D., Letaief K.B., Antenna systems for broadband wireless access, *IEEE Communications Magazine* 2002; 40(4) : 76-83.
- [2] Wong K.K., Murch R.D., Letaief K.B., Performance enhancement of multiuser MIMO wireless communications systems, *IEEE Transactions on Communications* 2002; 50(12) : 1960-1970.
- [3] Foschini G.J., Gans M.J., On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas, *Wireless Personal Communications* 1998; 6(3) : 311-335.
- [4] Telatar I.E., Capacity of multiantenna Gaussian channels, *AT&T Bell Laboratories, Tech. Memo.* 1995.
- [5] Kong N., Milstein L.B., Combined average SNR of a generalized diversity selection combining scheme, *IEEE International Conference on Communications* 1998; 3 : 1556-1560.
- [6] Win M.Z., Winters J.H., Analysis of hybrid selection/maximalratio combining in Rayleigh fading, *IEEE Transactions on Communications* 1999; 47 : 1773-1776.
- [7] Win M.Z., Winters J.H., Analysis of hybrid selection/maximal-ratio combining of diversity branches with unequal SNR in Rayleigh fading, *IEEE Vehicular Technology Conference Proceedings* 1999; 215-220.
- [8] Win M. Z., Beaulieu N. C., Shepp L. A., Logan B. F., Winters J. H., On the SNR penalty of MPSK with hybrid selection/maximal ratio combining over IID Rayleigh fading channels, *IEEE Transactions on Communications* 2003; 51(6) : 1012-1023.
- [9] Molisch A., Win M.Z., Winters J.H., Capacity of MIMO systems with antenna selection, *IEEE International Conference on Communications* 2001: 570-574.

- [10] Nabar R., Gore D., Paulraj A., Optimal selection and use of transmit antennas in wireless systems, *IEEE International Conference on Telecommunications* 2000.
- [11] Blum R.S., Winters J.H., On optimum MIMO with antenna selection, *Communications Letters* 2002; 6(8) : 322-324.
- [12] Dai L., Sfar S., Letaief K.B., Optimal antenna selection based on capacity maximization for MIMO systems in correlated channels, *IEEE Transactions on Communications* 2006; 54(3) : 563-573.
- [13] Heath R.W., Jr., Paulraj A.J., Antenna selection for spatial multiplexing systems based on minimum error rate, *IEEE International Conference on Communications*; 2276-2280.
- [14] Ghrayeb A., Duman T.M., Performance analysis of MIMO systems with antenna selection over quasi-static fading channels, *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 2003; 52(2) : 281-288.
- [15] Yangyang Zhang, Gan Zheng, Chunlin Ji, Kai-Kit Wong, Edwards D.J., Tiejun Cui, Near-optimal joint antenna selection for amplify-and-forward relay networks, *IEEE Wireless Communications & Signal Processing* 2009: 1-5
- [16] Jiann G., Ching G., Larsson L. D., Modeling and evaluation of MIMO systems exploiting channel reciprocity in TDD mode, *IEEE Vehicular Technology Conference Proceedings* 2004; 6: 4265-4269.
- [17] Tolli A., Codreanu M., Compensation of interference non-reciprocity in adaptive TDD MIMO-OFDM systems , *International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications* 2004; 2: 859-863.
- [18] Kim D., Torlak M., Rapid prototyping of a cost effective and flexible 4×4 mimo testbed, *IEEE Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop* 2008: 5-8.

- [19] Nishimori K., Kudo R., Honma N., Takatori Y., Ohta Atsushi., Okada K., Experimental evaluation using  $16 \times 16$  multiuser MIMO testbed in an actual indoor scenario, *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium 2008*: 1-4.
- [20] Azami F., Ghorssi A., Hemesi H., Mohammadi A., Abdipour A., Design and implementation of a flexible  $4 \times 4$  MIMO testbed, , *International Symposium on Telecommunications 2008*: 268-272.
- [21] Chen S., Jun C., Ohira T., Handbook on Advancements in Smart Antenna Technologies for Wireless Networks, *Information Science Reference 2009*: 474-499.
- [22] Uthansakul P., Bialkowski K., Bialkowski M., Postula A., Assessing an FPGA Implemented MIMO Testbed with the Use of Channel Emulator, *International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications 2006*: 410-413.
- [23] Onizawa T., Ohta A., Asai Y., Experiments on FPGA-Implemented Eigenbeam MIMO-OFDM With Transmit Antenna Selection, *IEEE Transactions on Vehicular Technology 2009*: 1281-1291.
- [24] Heather MacLeod, Chris Loadman, Zhizhang (David) Chen, Experimental Studies of the 2.4-GHz ISM Wireless Indoor Channel, *3rd Annual Communication Networks and Services Research Conference, 2005*, 63-68.

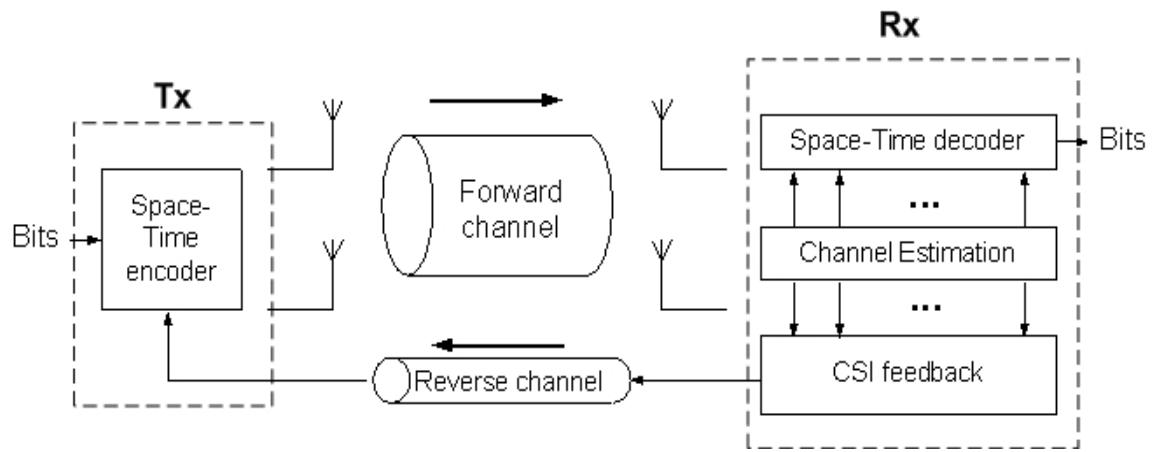


Figure 1 MIMO model with a feedback channel.

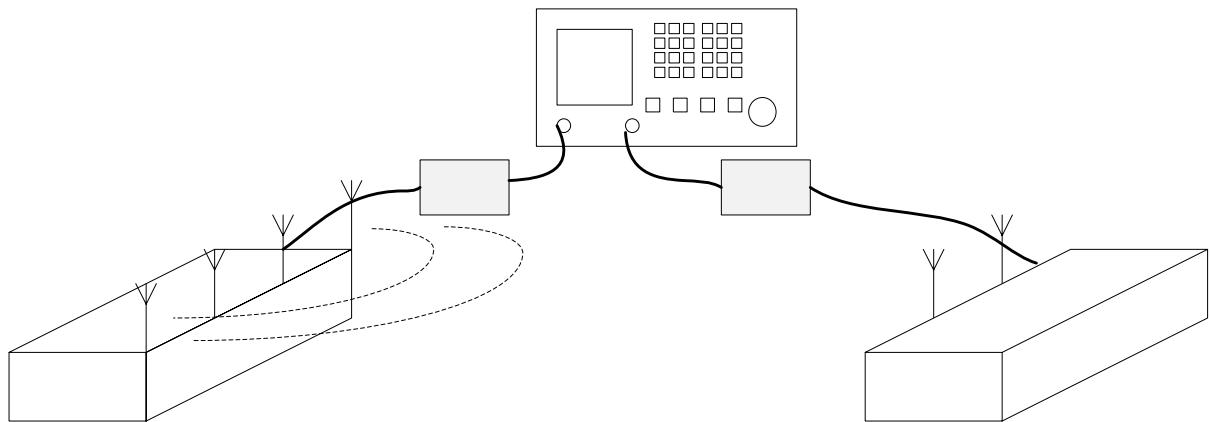


Figure 2 Measurement set up.

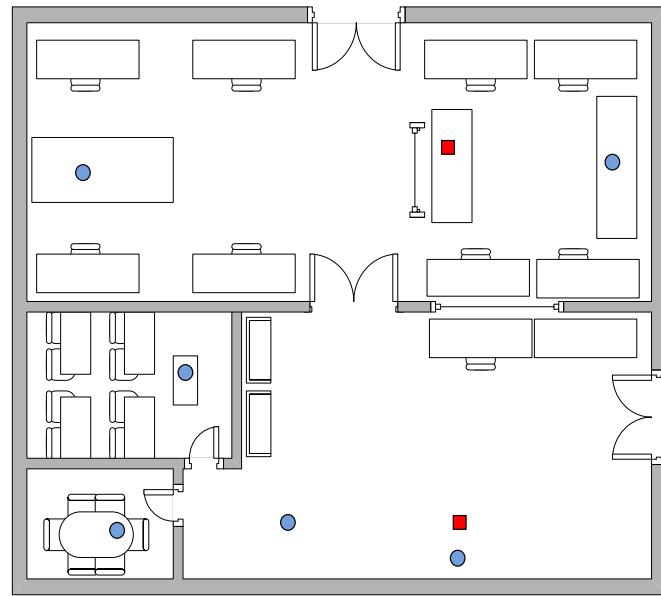


Figure 3 Map of a measured area.

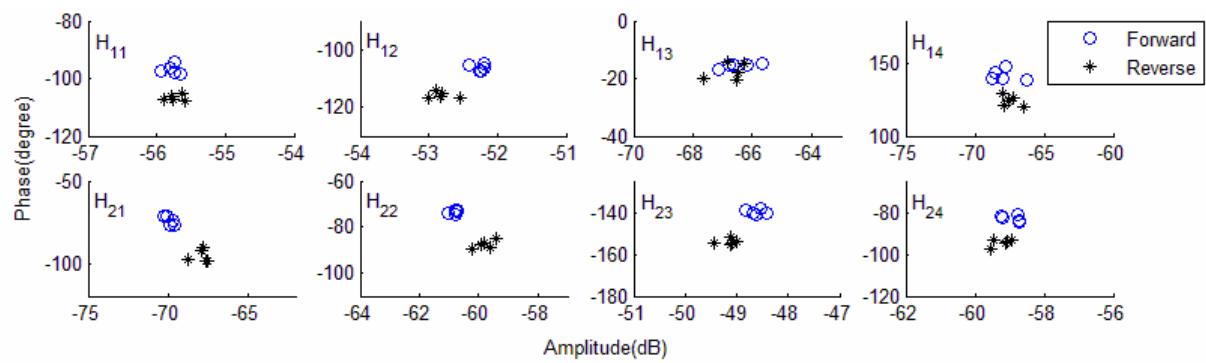


Figure 4 Example of forward and reverse channels, measured at Location 4

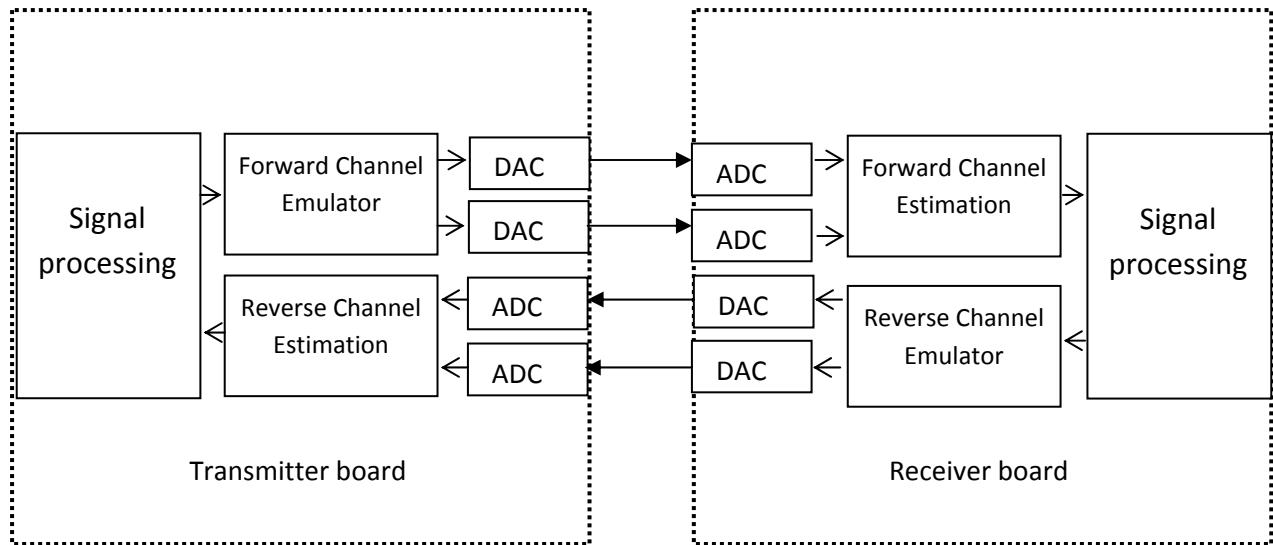


Figure 5 System diagrams of transmitter and receiver.

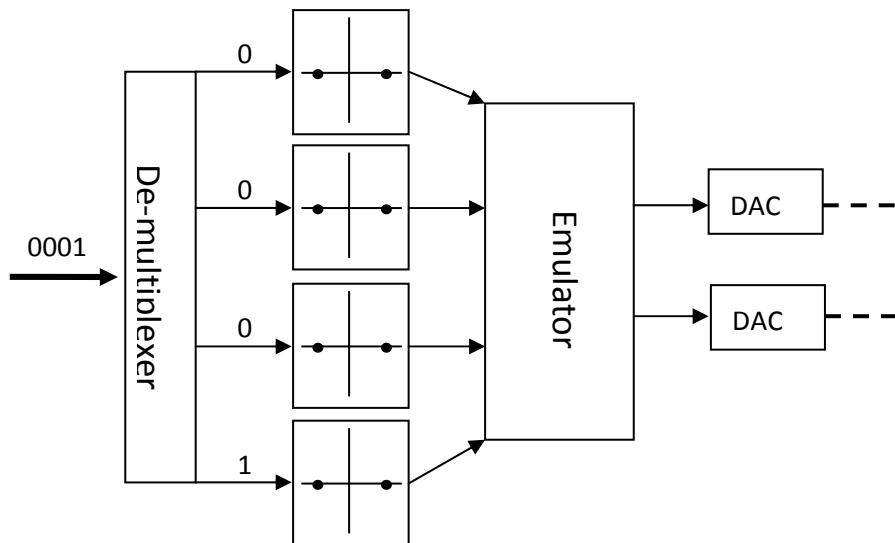


Figure 6 Configuration of a transmitting system.

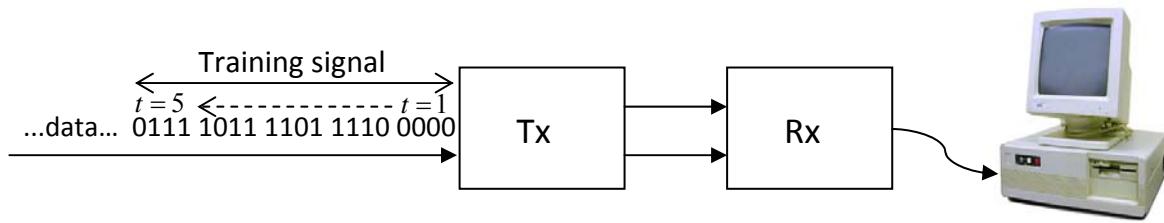


Figure 7 Pattern of a training signal.

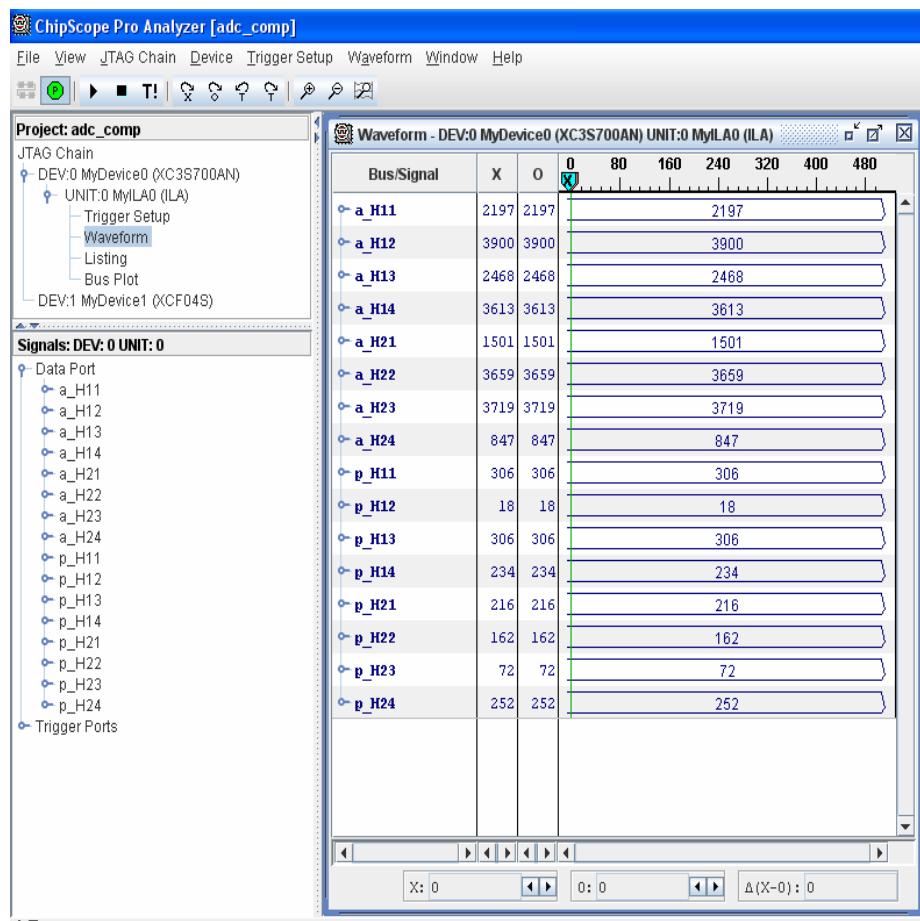


Figure 8 Example of channel information obtained by own developing channel estimation.

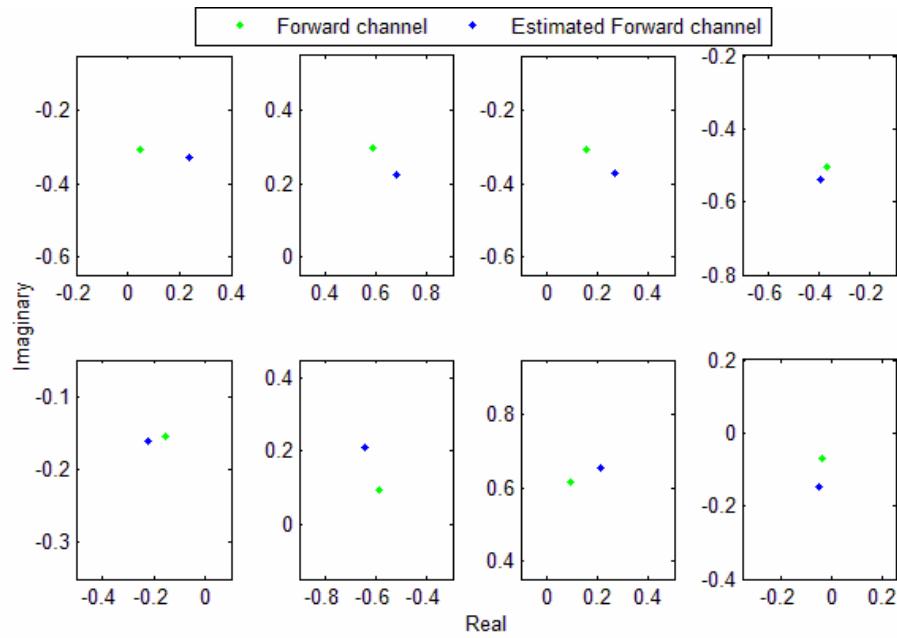


Figure 9 The comparison example between forward and estimated forward channels at Location 1.

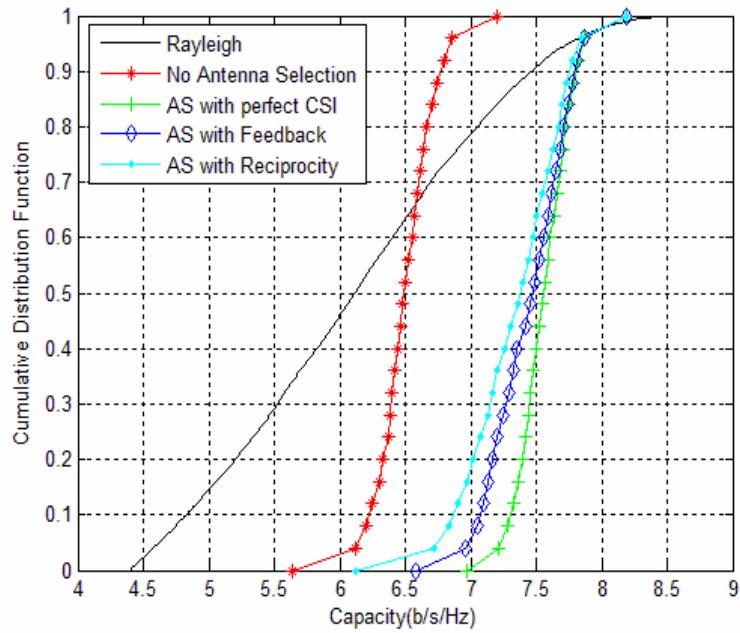


Figure 10 The cumulative distribution function of capacity at Location 1.

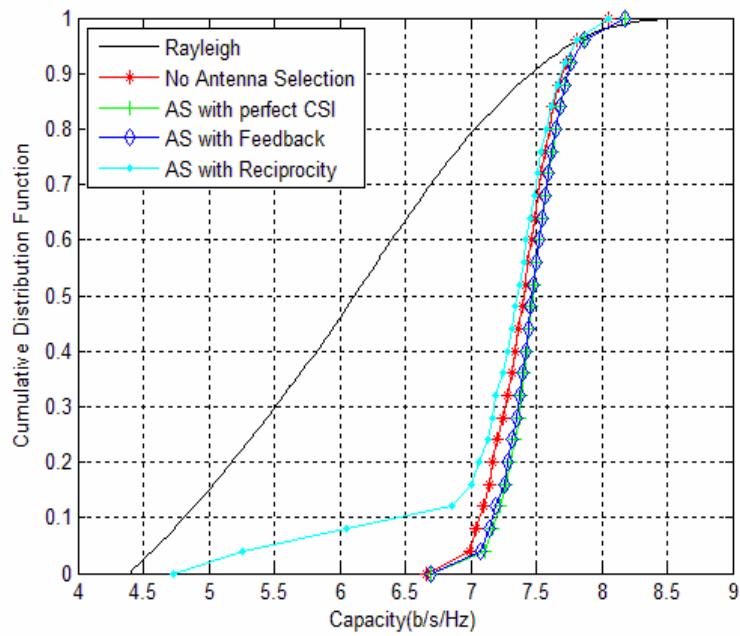


Figure 11 The cumulative distribution function of capacity at Location 2.

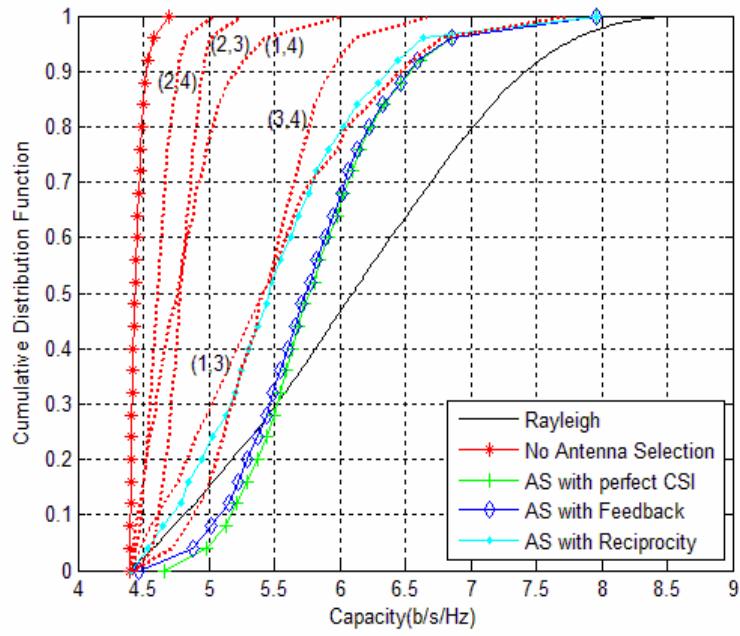


Figure 12 The cumulative distribution function of capacity at Location 3.

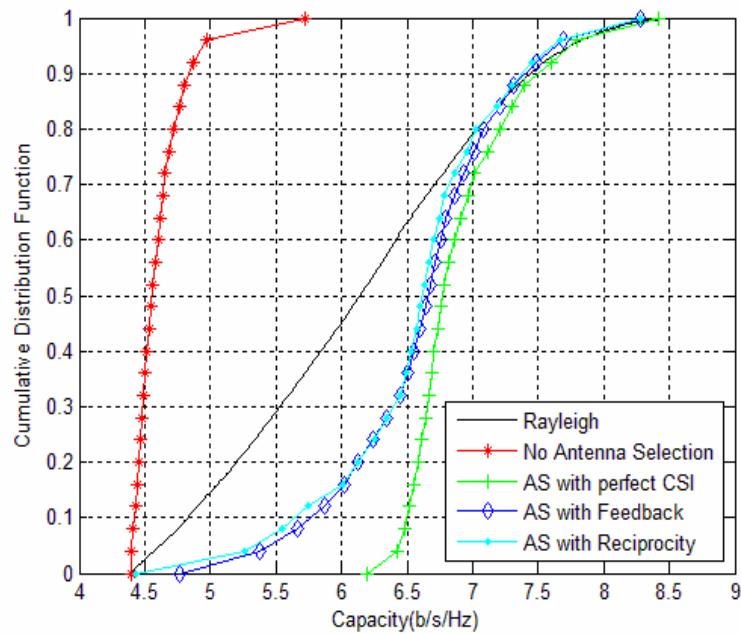


Figure 13 The cumulative distribution function of capacity at Location 4.

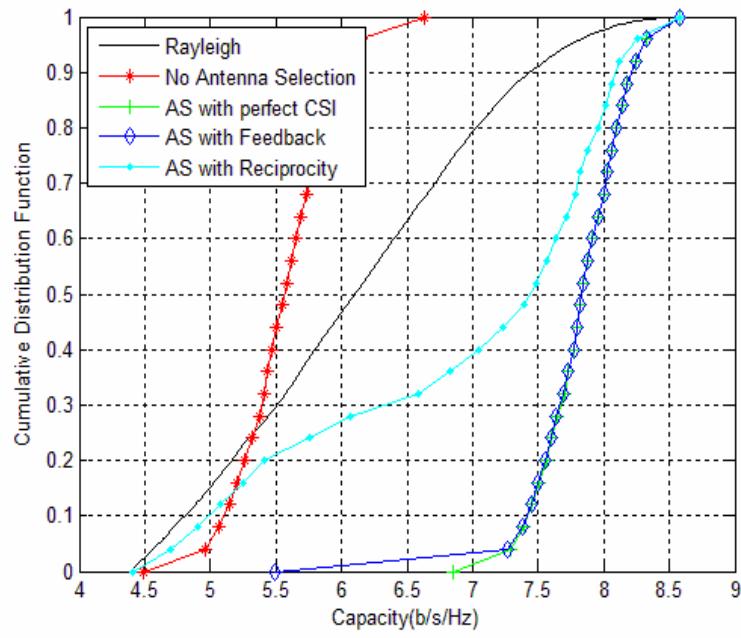


Figure 14 The cumulative distribution function of capacity at Location 5.

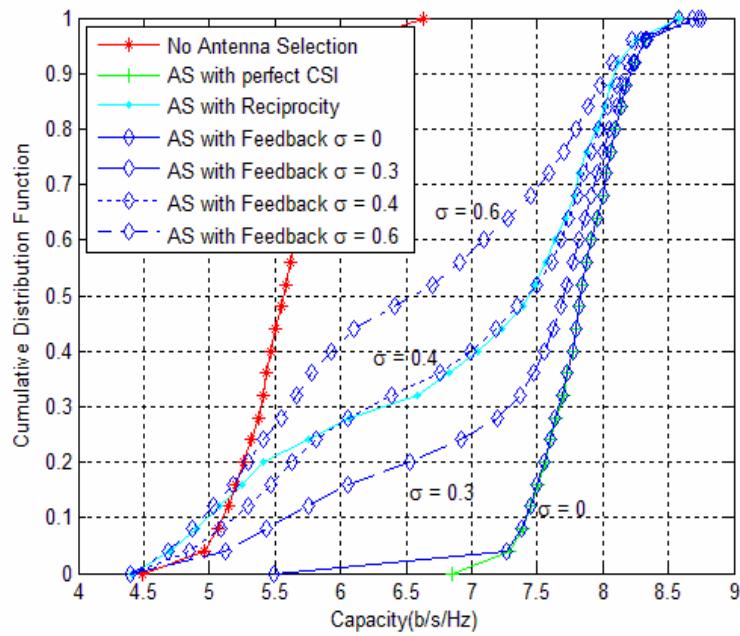


Figure 15 The cumulative distribution function of capacity with the present of feedback error at Location 5.