

การประมาณช่องสัญญาณของระบบ LTE-TDD Massive MIMO ด้วย สัญญาณนำมีฐานเป็นรหัสตั้งฉาก

Pilot Based Orthogonal Code Channel Estimation for LTE-TDD Massive MIMO Systems

สัมพันธ์ พรหมพิชัย

สถาบันนวัตกรรมมหานคร คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

Email: tu@mutacth.com

Manuscript received April 20, 2020

Revised May 31, 2020

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอเทคนิคการลดผลกระทบจากการปนเปื้อนของสัญญาณนำในระบบ LTE-TDD Massive MIMO รหัสตั้งฉากได้ถูกนำมาמודเลกกับสัญลักษณ์ของสัญญาณนำเพื่อทำการระบุสถานะพื้นฐาน หลักเกณฑ์ของลิเนียร์ LS แบบเกือบเหมาะสมที่สุดได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้กับสถานะพื้นฐานเพื่อทำการประมาณสถานะข้อมูลของช่องสัญญาณ (CSI) และลดการปนเปื้อนของสัญญาณนำในสภาพแวดล้อมแบบมัลติเซล ผลการจำลองการทำงานกรณีที่มีการใช้สัญญาณนำซ้ำแบบเต็มแสดงให้เห็นว่า สมรรถนะของ SINR และอัตราความสำเร็จของการถ่ายโอนข้อมูลระบบขาหลังที่ได้รับมาจากเทคนิคที่นำเสนอสูงกว่าอัลกอริธึม LS แบบทั่วไปที่ไม่มีการใช้รหัสระบุสถานะพื้นฐาน ภายใต้ช่องสัญญาณแบบเฟดดิ้งและมีเกนไขว้สูง

คำสำคัญ: การประมาณช่องสัญญาณ, หลักเกณฑ์ LS, LTE, Massive MIMO, OFDM, TDD

ABSTRACT

This paper proposes a technique to reduce the effect of pilot contamination in LTE-TDD Massive MIMO Systems. Orthogonal code is modulated with

pilot symbol to identify base station (BS). The suboptimal linear LS criterion is applied to BS to estimate channel state information (CSI) and mitigates the pilot contamination in multi-cell scenarios. The simulation results in case of full pilot reuse show that SINR and achievable downlink rate performances obtained from the proposed technique is higher than that of the LS conventional algorithm without BS identity code in fading channel and high cross gain.

Keywords: Channel estimation, LS criteria, LTE, Massive MIMO, OFDM, TDD

1. บทนำ

นับตั้งแต่ปี ค.ศ. 1970 ระบบสื่อสารด้วยโทรศัพท์เคลื่อนที่ได้ถูกพัฒนาขึ้นมา จนกระทั่งปี ค.ศ. 1980 โทรศัพท์เคลื่อนที่รุ่นที่ 1 (1G) ระบบแอนาล็อกที่มีอัตราการถ่ายโอนข้อมูล 2.4 kb/s ระบบ Advance Mobile Phone System (AMPS) ระบบ Nordic Mobile Telephone (NMT) และระบบ Total Access Communication System (TACS) ได้เปิดให้ใช้บริการสำหรับสายสนทนา (Voice call) อย่างไรก็ตามโทรศัพท์เคลื่อนที่รุ่นที่ 1 ยังมีความล่าช้า นั่นคือ มีความจุ (Capacity) ของการให้บริการข้อมูลต่ำ การส่งต่อ (Handoff) ที่ยังไม่สมบูรณ์ คุณภาพของเสียงไม่ชัดเจน

และยังไม่มีระบบรักษาความปลอดภัยข้อมูลข่าวสารของผู้ใช้บริการ หรือไม่สามารถที่จะป้องกันการดักฟังจากบุคคลที่สามได้ [1]

ในช่วงปลายปี ค.ศ. 1990 โทรศัพท์เคลื่อนที่รุ่นที่ 2 (2G) ระบบดิจิทัลมีอัตราการถ่ายโอนข้อมูล 64 kb/s ระบบ Global System for Mobile Communication (GSM) ระบบ Code Division Multiple Access (CDMA) และระบบ IS-95 [1], [2] ได้ทยอยเปิดให้ใช้บริการสำหรับสายสนทนา โดยระบบนี้สามารถที่จะป้องกันการดักฟังได้ รวมทั้งยังเปิดให้บริการส่งข้อความสั้น (SMS) และอีเมลได้อีกด้วย อีกทั้งแบตเตอรี่ของโทรศัพท์เคลื่อนที่ยังสามารถที่จะใช้งานได้ยาวนานมากขึ้น เนื่องจากการส่งสัญญาณวิทยุต้องการพลังงานที่ต่ำลง เมื่อเทียบกับโทรศัพท์เคลื่อนที่รุ่นที่ 1 และต่อมาได้มีการพัฒนาระบบให้เป็น 2.5G โดยเปลี่ยนจากการใช้ Circuit Switching มาเป็น Package Switching ทำให้มีอัตราการถ่ายโอนข้อมูลสูงถึง 144 kb/s โดยระบบนี้ยังสามารถที่จะรองรับกับการให้บริการ General Packet Radio Services (GPRS) ได้อีกด้วย

ปี ค.ศ. 2000 โทรศัพท์เคลื่อนที่รุ่นที่ 3 (3G) ระบบ Wideband Code Division Multiple Access (WCDMA) ระบบ Universal Mobile Tele-communication Service (UMTS) และระบบ Code Division Multiple Access (CDMA) 2000 ได้เปิดให้บริการถ่ายโอนข้อมูลผ่านโทรศัพท์เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงผ่านการใช้อินเทอร์เน็ต (IP) มีอัตราการถ่ายโอนข้อมูลสูงถึง 2 Mb/s โดยข้อดีของระบบ 3G คือ มีการปรับปรุงคุณภาพของเสียงให้ดีขึ้น รวมทั้งยังสามารถที่จะรองรับกับการใช้งานข้ามเขต (Roaming) ได้ทั่วโลก อย่างไรก็ตามระบบ 3G ยังมีข้อเสียเปรียบอยู่นั่นคือ โทรศัพท์เคลื่อนที่ที่ต้องการใช้พลังงานที่มากกว่าระบบ 2G และค่าบริการเครือข่ายมีราคาที่สูง ต่อมาได้มีการพัฒนาระบบ 3.5G โดยระบบนี้จะปรับปรุงอัตราการถ่ายโอนข้อมูลให้สูงขึ้นเป็น 5-30 Mb/s [3]

เทคโนโลยีของ Long Term Evolution (LTE) และ Fixed Worldwide Interoperability for Microwave Access (WiMAX) ได้ถูกพัฒนาขึ้นมาและได้ถูกนำมาใช้งานกับระบบ 3.75G รวมทั้งเทคโนโลยีนี้ได้ถูกกำหนดให้เป็นระบบมาตรฐานที่จะนำมาใช้งานร่วมกับการให้บริการถ่ายโอนข้อมูลในอนาคตอีกด้วย โดยเทคโนโลยีนี้จะช่วยเพิ่มความจุข้อมูลของผู้ใช้งานภายในเครือข่ายและให้บริการถ่ายโอนข้อมูลด้วยความเร็วสูงรองรับกับการให้บริการบนเว็บไซต์ การแชร์ไฟล์ข้อมูลและวิดีโอสตรีมมิงเป็นต้น อีกทั้งยังช่วยทำให้

ค่าบริการของการใช้ข้อมูลผ่านระบบเครือข่ายเซลลูลาร์ (Cellular) ถูกลดอีกด้วย [3] -[5]

3rd Generation Partnership Project (3GPP) ได้กำหนดให้ LTE Advance และ WiMAX เป็นระบบมาตรฐานสำหรับนำมาใช้งานกับโทรศัพท์เคลื่อนที่ในรุ่นที่ 4 (4G) โดยการให้บริการทั้งในส่วน of เสียงและข้อมูลจะอาศัย IP ทำให้อัตราการถ่ายโอนข้อมูลมีความเร็วสูง รวมทั้งยังสามารถที่จะรองรับกับการให้บริการ วิดีโอ แชท โมบายทีวี Multimedia Messaging Service (MMS) ฯลฯ และสามารถที่จะรองรับแอปพลิเคชันใหม่ ๆ ที่กำลังจะถูกพัฒนาขึ้นมาใช้งานในอนาคตได้อีกด้วย [3] - [6]

เนื่องจากปริมาณของผู้ใช้งานและจำนวนของอุปกรณ์ที่ใช้งานบนเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่มีจำนวนที่เพิ่มขึ้นอย่างเป็นเอ็กซ์โพเนนเชียล อุปกรณ์ที่ใช้งานต้องการปริมาณข้อมูลและอัตราการถ่ายโอนข้อมูลที่สูงมากขึ้น รวมทั้งจำนวนแอปพลิเคชันใหม่ ๆ ที่ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อเปิดให้ใช้บริการมีจำนวนเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก ดังนั้นเครือข่ายเซลลูลาร์ สำหรับโทรศัพท์เคลื่อนที่รุ่นที่ 5 (5G) จึงได้ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อตอบสนองความต้องการดังกล่าว โดยระบบ 5G มีข้อได้เปรียบที่เหนือกว่าระบบ 4G ดังนี้ [7] - [8]

- ความจุของข้อมูลสูงขึ้น
- อัตราการถ่ายโอนข้อมูลสูงขึ้น
- End to End Latency ต่ำลง
- รองรับกับการเชื่อมต่อของอุปกรณ์เป็นจำนวนมากได้
- ค่าใช้จ่ายสำหรับการใช้บริการข้อมูลของผู้ใช้งานถูกลง
- คุณภาพการให้บริการของระบบเครือข่ายเพิ่มสูงขึ้น

เทคโนโลยี Beam Division Multiple Access (BDMA) และ Filter Bank Multi carrier (FBMC) ได้ถูกนำเสนอขึ้นมาเพื่อใช้งานกับระบบ 5G โดยหลักการของ BDMA นั้นสถานีฐาน (Base Station; BS) จะทำการติดต่อสื่อสารกับโทรศัพท์เคลื่อนที่ (Mobile Station; MS) ที่อยู่ภายในเซลล์ ด้วยคลื่นวิทยุที่มีความถี่ที่ตรงกัน (Orthogonal) กัน และลำ (Beam) ของคลื่นที่ถูกปล่อยออกมาจากสายอากาศของ BS สามารถที่จะบีบลำให้โฟกัสไปยังตำแหน่งของ MS นั้นๆ ได้ ซึ่งจะเป็นการเพิ่มความจุของข้อมูลให้กับระบบเครือข่าย [8]

เทคนิคการเข้าถึงหลายทางแบบ Orthogonal Frequency-Division Multiple Access (OFDMA) ได้ถูกนำเสนอให้เป็นระบบ

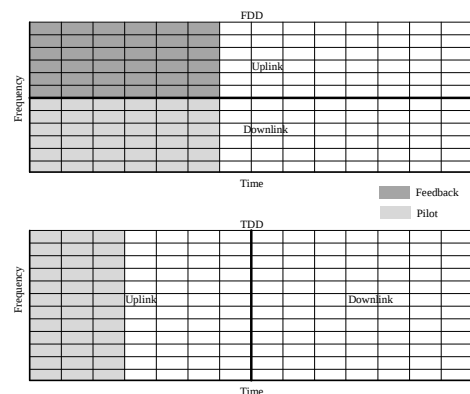
มาตรฐานชนิดหนึ่งที่ถูกนำมาใช้งานกับเครือข่ายเซลลูลาร์ 5G โดยการเข้าถึงหลายทางชนิดนี้มีการใช้งานที่ต่อเนื่องมาจากระบบ 4G ทำให้การพัฒนาเครือข่ายเซลลูลาร์ให้เป็นระบบ 5G นั้น ทำได้ง่ายมากขึ้นและมีต้นทุนที่ไม่สูงมากนัก

สถาปัตยกรรมเครือข่ายเซลลูลาร์ของโทรศัพท์เคลื่อนที่ในปัจจุบัน BS จะติดต่อสื่อสารกับ MS ที่อยู่ในอาคาร ทำให้กำลังงานของคลื่นวิทยุจะสูญเสียไปเนื่องจากเดินทางผ่านผนังของอาคาร ซึ่งจะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพการใช้สเปกตรัม (Spectral Efficiency) และอัตราการใช้ข้อมูลลดลง เพื่อเป็นการแก้ปัญหาดังกล่าว ในการออกแบบสถาปัตยกรรมเครือข่ายเซลลูลาร์ของโทรศัพท์เคลื่อนที่ในรุ่นที่ 5 ได้กำหนดให้ทางฝั่งของ BS จะติดตั้งสายอากาศแถวลำดับ (Array antenna) ที่ประกอบไปด้วยสายอากาศจำนวนมากเรียงกัน ร้อยต้นหรือหลายร้อยต้น [9] เรียกว่า Massive Multiple-Input Multiple-Output (Massive MIMO) เพื่อเพิ่มแบนด์วิดท์ให้กับระบบ [9]-[10] นอกจากนี้การติดตั้งสายอากาศเป็นจำนวนมากยังสามารถที่จะลดการใช้พลังงานของวงจรขยายกำลัง (Power amplifier) ที่มีกำลังสูง (ใช้งานกับ BS ทั่วไปประมาณ 50 วัตต์) ซึ่งมีราคาแพง ในขณะที่วงจรขยายกำลังที่นำมาใช้งานกับสายอากาศแต่ละต้นของ Massive MIMO นั้น จะต้องการวงจรขยายที่มีกำลังอยู่ในระดับมิลลิวัตต์ [11] โดยเทคโนโลยีของ Massive MIMO ได้ถูกกำหนดให้เป็นมาตรฐานในการพัฒนาเครือข่ายของโทรศัพท์เคลื่อนที่ในยุคถัดไปอีกด้วย

อย่างไรก็ตามการที่จะดึงข้อได้เปรียบจากการใช้เทคโนโลยี Massive MIMO นั้น จะต้องอาศัยการประมาณช่องสัญญาณ (Channel estimation) เพื่อให้ทราบสถานะข้อมูลช่องสัญญาณ (Channel State Information; CSI) ของช่องสัญญาณ MIMO ที่ถูกต้อง ทั้งในส่วนของการเชื่อมโยงขาขึ้น (Uplink) และการเชื่อมโยงขาลง (Downlink) พิจารณาในส่วนของการเชื่อมโยงขาขึ้น MS จะส่งสัญญาณนำ (Pilot signal) ไปยัง BS จากนั้น BS จะทำการประมาณเพื่อหา CSI ของช่องสัญญาณ ในกรณีของการเชื่อมโยงขาลงที่ใช้กับระบบ MIMO ทั่วไปนั้น BS จะส่งสัญญาณนำไปยัง MS จากนั้น MS จะทำการประมาณช่องสัญญาณและทำการส่ง CSI ป้อนกลับให้กับ BS โดยวิธีการนี้ไม่สามารถที่จะนำมาใช้กับระบบ Massive MIMO ในกรณีที่ช่องสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วได้ เนื่องจากสัญญาณนำที่ถูกส่งออกไปจากสายอากาศแต่ละต้นของ BS นั้นจะต้องตั้งฉากกัน ซึ่งจะส่งผลทำให้มีความต้องการ

ช่อง (Slot) ทางเวลา (Time) และความถี่ (Frequency) ที่ใช้สำหรับการส่งสัญญาณนำเพิ่มมากขึ้นไปตามจำนวนของสายอากาศที่ใช้ งาน ส่งผลทำให้อัตราการถ่ายโอนข้อมูลไปยัง MS ลดลง และอีกประการหนึ่งก็คือ ถ้า BS ใช้สายอากาศเป็นจำนวนมากจะส่งผลทำให้ MS ต้องทำการประมาณช่องสัญญาณที่มีความซับซ้อนสูงเป็นจำนวนมาก ทำให้ต้องสูญเสียเวลาไปกับการประมวลผลที่ยาวนาน และสูญเสียเวลาไปกับการป้อนกลับ CSI ไปยัง BS มากขึ้น จากเหตุผลดังที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้นนั้น จะพบว่าการประมาณช่องสัญญาณของระบบ Massive MIMO ผ่านช่องทางการเชื่อมโยงขาขึ้นนั้นจะมีความซับซ้อนที่น้อยกว่าและเหมาะสมมากกว่าวิธีการประมาณช่องสัญญาณผ่านช่องทางการเชื่อมโยงขาลง

มาตรฐานของระบบ LTE กำหนดให้มีการใช้งานทั้งในโหมดของ Frequency Division Duplexing (FDD) ที่มีการจัดสรรความถี่สำหรับการเชื่อมโยงขาขึ้นและขาลงไว้อย่างชัดเจน และโหมด Time Division Duplexing (TDD) ที่การเชื่อมโยงขาขึ้นและขาลงจะมีการกำหนดให้ใช้ความถี่เดียวกันแต่จะมีการจัดสรรให้อยู่ในช่องเวลา (Time slot) ที่ต่างกัน ดังรูปที่ 1 โดยการใช้งานในโหมดของ TDD จะมีข้อได้เปรียบที่เหนือกว่าการใช้งานในโหมด FDD สำหรับทำงานกับเทคโนโลยี Massive MIMO เนื่องจากจะมีความยืดหยุ่นในการจัดสรรช่องเวลาให้เหมาะสมสำหรับการส่งสัญญาณนำผ่านช่องทางของระบบขาขึ้น ทำให้สามารถที่จะเพิ่มความจุรวมให้กับระบบได้ [12], [13]

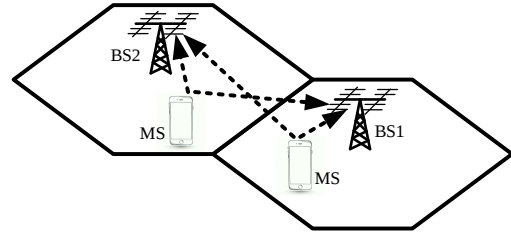


รูปที่ 1 การทำงานในโหมดของ FDD และ TDD ตามมาตรฐานของระบบ LTE

มีหลากหลายวิธีการได้ถูกนำมาใช้ในการประมาณช่องสัญญาณ วิธีการแบบบไลนด์ (Blind method) [14] วิธีการแบบสัญญาณนำ (Pilot method) [15] และวิธีการแบบกึ่งบไลนด์ (Semi-blind method) [16]-[17] โดยวิธีการประมาณช่องสัญญาณแบบสัญญาณนำและแบบกึ่ง บไลนด์ได้รับความนิยมนำมาใช้ เนื่องจากวิธีการดังกล่าวจะอาศัยข้อได้เปรียบที่ได้รับมาจากการที่ระบบจะต้องส่งสัญญาณนำอยู่แล้ว มาช่วยในการประมาณ CSI ทำให้ผลการประมาณที่ได้รับใกล้เคียงกับช่องสัญญาณจริงมากกว่าวิธีการแบบบไลนด์ [18] เนื่องจากการประมาณช่องสัญญาณจะต้องทำการอัปเดตทุกช่วงเวลาพร้อมกัน (Coherent time) ของ Resource Block (RB) และด้วยเหตุที่จำนวนของสัญญาณนำที่กำหนดให้แต่ละโทนความถี่จะต้องมีความถี่ที่ต่างจากกันนั้นมีจำนวนจำกัด เมื่อทำการเปรียบเทียบกับจำนวน MS ที่ใช้งานอยู่ภายในเซลล์ (Cell) ดังนั้นจึงทำให้มีโอกาสที่ BS ที่อยู่รอบ ๆ เซลล์ของเครือข่ายเซลล์ลูลาร์มีการใช้สัญญาณนำในช่องเวลาเดียวกันและความถี่เดียวกันหรือเรียกว่าการใช้ซ้ำ (Reuse) ซึ่งจะส่งผลทำให้เกิดการปนเปื้อนของสัญญาณนำ (Pilot Contamination) ขึ้น ดังรูปที่ 2 ถ้าการปนเปื้อนของสัญญาณนำจากเซลล์อื่นมีกำลังงานสูง จะทำให้การประมาณช่องสัญญาณมีความผิดพลาดไปจากช่องสัญญาณจริง ส่งผลทำให้ความจุและอัตราการถ่ายโอนข้อมูลรวมของเครือข่ายเซลล์ลูลาร์ลดลงเกณฑ์กำหนดแบบ Minimum Mean Square Error (MMSE) และ Least Square (LS) [19] ได้ถูกนำมาใช้สำหรับการประมาณช่องสัญญาณของระบบ Massive MIMO ในกรณีที่ได้รับผลกระทบจากการปนเปื้อนของสัญญาณนำ [20] โดย MMSE จะมีความซับซ้อนของการคำนวณที่มากกว่า LS เนื่องจากต้องการทราบเมตริกซ์ความแปรปรวนช่องสัญญาณ (Channel covariance matrix) ของ BS ทุกเซลล์ที่อยู่รอบข้าง

2. แบบจำลองของระบบ MU-MIMO

หัวข้อนี้จะนำเสนอแบบจำลองของ MU-MIMO ทั้งในกรณีของการเชื่อมโยงขาขึ้นและการเชื่อมโยงขาลงตามมาตรฐานของ LTE และมีการใช้เทคโนโลยี Massive MIMO ร่วมด้วย



รูปที่ 2 การปนเปื้อนของสัญญาณนำระบบเชื่อมโยงขาขึ้น กรณีที่ลำดับของสัญญาณนำมีการใช้ซ้ำกับเซลล์อื่น

2.1 แบบจำลองของระบบเชื่อมโยงขาขึ้น

ตามมาตรฐานของโทรศัพท์เคลื่อนที่รุ่นที่ 5 กำหนดให้ใช้เทคโนโลยี Massive MIMO ทำงานในโหมดของ TDD ดังนั้นการประมาณช่องสัญญาณผ่านระบบเชื่อมโยงขาขึ้นจะมีความซับซ้อนและใช้เวลาน้อยกว่าการประมาณช่องสัญญาณผ่านระบบเชื่อมโยงขาลง ระบบเชื่อมโยงขาขึ้นที่ใช้เทคโนโลยี Massive MIMO มีดังรูปที่ 3

พิจารณาที่หนึ่งช่วงเวลา (Time slot) ของโหมด TDD สัญญาณจากผู้ใช้งานโทรศัพท์เคลื่อนที่ MS ที่อยู่ภายในเซลล์ j (คือเซลล์ที่สนใจ) จำนวน K รายคือ $\mathbf{a}_j$ มีขนาด $K \times 1$ มอดูเลตด้วยความถี่ที่ตั้งฉากกันจำนวน K ความถี่ ถูกส่งผ่านช่องสัญญาณที่มีการจางหาย (Fading) $\mathbf{H}_j = [\mathbf{h}_{j1} \ \mathbf{h}_{j2} \ \dots \ \mathbf{h}_{jK}]$ มีขนาด $M \times K$ และมีการรบกวนจากเซลล์อื่น ($\neq j$) รวมทั้งถูกรบกวนจากสัญญาณรบกวนขาวแบบ Additive White Gaussian Noise (AWGN) $\mathbf{n}_j$ มีขนาด $K \times 1$ และมีความแปรปรวน σ_n^2 ไปปรากฏยังสถานีฐาน BS ที่มีการติดตั้งสายอากาศจำนวน M ต้น สัญญาณปรากฏที่เครื่องรับของ BS เขียนให้อยู่ในรูปของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$\mathbf{r}_j = \sqrt{P_T} \mathbf{H}_j \mathbf{a}_j + \sqrt{\zeta P_T} \sum_{l=1, l \neq j}^L \mathbf{H}_l \mathbf{a}_l + \mathbf{n}_j \quad (1)$$

โดย $\mathbf{r}_j$ คือสัญญาณปรากฏที่เครื่องรับของ BS เซลล์ j มีขนาด $M \times 1$ P_T คือกำลังที่ถูกส่งออกมาจาก MS โดยสมมุติว่ามีกำลังส่งที่เท่ากันและ ζ คือเกนไขว้ (Cross gain)

หลังจากที่ BS ได้รับสัญญาณนำที่ถูกส่งมาจาก MS แล้วหน่วยประมวลผลภายใน BS จะนำกฎเกณฑ์ต่าง ๆ มาใช้สำหรับทำการประมาณหาช่องสัญญาณ $\hat{\mathbf{H}}_j$ เพื่อให้ได้รับช่องสัญญาณที่ใกล้เคียง

กับช่องสัญญาณจริงมากที่สุด ในหัวข้อนี้ได้นำกฎเกณฑ์ของ Zero-Forcing (ZF) มาประยุกต์ใช้ในการประมาณช่องสัญญาณ โดยเน้นไปที่การลดผลกระทบจากสัญญาณแทรกสอด (Interference) เวกเตอร์ถ่วงน้ำหนัก (Weight vector) ของ ZF มีดังนี้

$$\hat{\mathbf{H}}_j = (\hat{\mathbf{H}}_j^H \hat{\mathbf{H}}_j)^{-1} \hat{\mathbf{H}}_j^H \quad (2)$$

โดย -1 หมายถึงตัวดำเนินการเมทริกซ์ผกผัน (Inverse matrix) H หมายถึง ตัวดำเนินการ Hermitian transpose และ $\hat{\mathbf{H}}_j = [\hat{\mathbf{h}}_{j1} \ \hat{\mathbf{h}}_{j2} \ \dots \ \hat{\mathbf{h}}_{jK}]$

2.2 แบบจำลองของระบบเชื่อมโยงขาลง

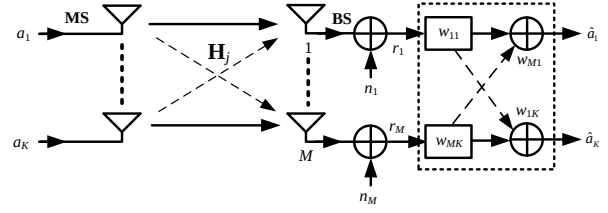
ระบบเชื่อมโยงขาลงที่ใช้เทคโนโลยี Massive MIMO มีดังรูปที่ 4 การเชื่อมโยงขาลงข้อมูล $\mathbf{a}_j$ มีขนาด $K \times 1$ จะถูกมอดูเลตด้วยความถี่ที่ตั้งฉากกันจำนวน K ความถี่ จากนั้นสัญญาณจะถูกส่งออกไปทางสายอากาศจำนวน M ต้น ผ่านช่องสัญญาณที่มีการจางหาย $\mathbf{H}_j$ มีขนาด $M \times K$ และมีการรบกวนจากเซลล์อื่น ($\neq j$) รวมทั้งถูกรบกวนจากสัญญาณรบกวนขาวแบบ AWGN ไปปรากฏยังเครื่องรับของผู้ใช้งาน MS แต่ละราย เนื่องจากผลของช่องสัญญาณเฟดดิ้งและสัญญาณรบกวน จะส่งผลทำให้สัญญาณปรากฏที่ MS ผิดเพี้ยนไป ทำให้มีอัตราผิดพลาด (Bit Error Rate; BER) สูงขึ้นและทำให้ความจุข้อมูลของระบบลดลง ดังนั้นก่อนที่ BS จะทำการส่งข้อมูลออกไปยังสายอากาศ หน่วยประมวลผลจะต้องทำการปรับแต่งเวกเตอร์ถ่วงน้ำหนักสำหรับ MS แต่ละรายก่อน เพื่อทำการชดเชยผลของช่องสัญญาณและลดผลกระทบจากสัญญาณรบกวน เมทริกซ์ถ่วงน้ำหนัก $\hat{\mathbf{W}}_j$ มีขนาด $M \times K$ โดยที่เวกเตอร์ถ่วงน้ำหนักของ MS แต่ละราย $\hat{\mathbf{w}}_{jk}$ มีขนาด $M \times 1$ ที่สามารถปรับตัวได้ มีดังนี้

$$\hat{\mathbf{W}}_j = [\hat{\mathbf{w}}_{j1} \ \hat{\mathbf{w}}_{j2} \ \dots \ \hat{\mathbf{w}}_{jK}] \quad (3)$$

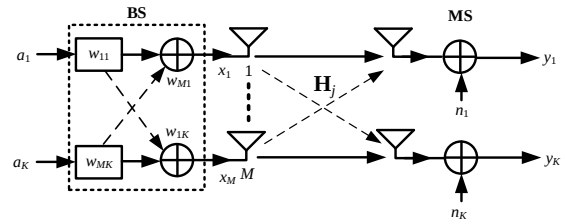
$$\hat{\mathbf{w}}_{jk} = \frac{\hat{\mathbf{h}}_{jk}}{\|\hat{\mathbf{H}}_j\|}$$

โดย $\|\bullet\|$ หมายถึงตัวดำเนินการนอร์ม (Norm)

สัญญาณปรากฏที่เครื่องรับของ MS แต่ละรายเขียนให้อยู่ในรูปของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้



รูปที่ 3 ระบบเชื่อมโยงขาขึ้นที่ใช้เทคโนโลยี Massive MIMO



รูปที่ 4 ระบบเชื่อมโยงขาลงที่ใช้เทคโนโลยี Massive MIMO

$$\mathbf{y}_j = \mathbf{H}_j^T \mathbf{x}_j + \sum_{l=1, l \neq j}^L \mathbf{H}_l^T \mathbf{x}_l + \mathbf{n}_j$$

$$\mathbf{x}_j = \sqrt{\frac{P_{BS}}{MK}} \hat{\mathbf{W}}_j \begin{bmatrix} a_{j1} \\ a_{j2} \\ \vdots \\ a_{jK} \end{bmatrix} \quad (4)$$

โดย T คือตัวดำเนินการ Transpose และ P_{BS} คือกำลังส่งรวมที่ถูกส่งออกมาจากสายอากาศทุกต้นและ L หมายถึงจำนวนเซลล์ทั้งหมดที่มีการส่งสัญญาณอยู่ในระบบเซลล์ลูลาร์

3. หลักการที่นำเสนอ

บทความนี้นำเสนอการนำข้อได้เปรียบของรหัส Hadamard ซึ่งมีคุณสมบัติที่ตั้งฉากซึ่งกันและกัน ไปทำการมอดูเลตกับสัญญาณนำของ BS แต่ละเซลล์ เพื่อลดผลกระทบจากการปนเปื้อนของสัญญาณนำ และได้ประยุกต์ใช้หลักเกณฑ์ของ LS ซึ่งมีความซับซ้อนของการคำนวณที่ต่ำมาทำการประมาณช่องสัญญาณ

ตามมาตรฐานของระบบ 5G ทำงานในโหมด TDD การประมาณช่องสัญญาณจะกระทำกับระบบเชื่อมโยงขาขึ้น สัญญาณนำที่ถูกส่งออกมาจาก MS ภายในเซลล์ j มีจำนวน k ราย จะถูกมอดูเลตด้วยความถี่คลื่นพาห์ (Carrier) ที่มีคุณสมบัติตั้งฉากกันจำนวน K โทน สมมุติว่าทุกโทนเป็นอิสระและไม่สัมพันธ์ต่อกัน

(Uncorrelated) ดังนั้นจึงสามารถที่จะเขียนแบบจำลองสัญญาณนำของผู้ใช้งาน MS รายที่ k มีการใช้สัญลักษณ์นำ (Pilot symbol) จำนวน τ ข้อมูล ได้ดังนี้

$$\mathbf{s}_{jkPilot} = [s_{jk1} \ s_{jk2} \dots s_{jk\tau}]^T \quad (5)$$

หัวข้อนี้นำเสนอการนำรหัส Hadamard $\mathbf{c}_j$ ที่มีขนาด $1 \times \tau$ มีคุณสมบัติที่ตั้งได้ฉากซึ่งกันและกัน ไปมอดูเลตกับสัญญาณนำเพื่อเป็นการระบุ BS ของแต่ละเซลล์ ทำการพิจารณาที่เซลล์ j สัญญาณนำที่ถูกมอดูเลตด้วยรหัส Hadamard แล้วมีดังนี้

$$\begin{aligned} \mathbf{a}_{jkPilot} &= \mathbf{s}_{jkPilot} \cdot \mathbf{c}_j \\ \mathbf{c}_j &= [c_{j1} \ c_{j2} \dots c_{j\tau}]^T, \ \mathbf{s}_{jkPilot} = [s_{j1} \ s_{j2} \dots s_{j\tau}]^T \\ \sum_{i=1}^{\tau} \mathbf{a}_{jkPilot} &= \mathbf{P}_T \end{aligned} \quad (6)$$

โดย $\mathbf{s}_{jkPilot}$ คือสัญญาณนำที่มีขนาด $1 \times \tau$

จากนั้นสัญญาณนำที่ถูกมอดูเลตแล้วของ MS รายที่ k เซลล์ j จะถูกส่งผ่านช่องสัญญาณแบบเฟดดิ้ง $\mathbf{h}_{jk}$ มีการรบกวนจากสัญญาณรบกวนขาวแบบ AWGN รวมถึงถูกปนเปื้อนจากเซลล์ข้างเคียง ($\neq j$) ก่อนที่จะไปปรากฏยังภาครับของ BS ที่มีการติดตั้งสายอากาศแบบ Massive MIMO จำนวน M ต้น สัญญาณปรากฏที่ภาครับของ BS เขียนให้อยู่ในรูปของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$\mathbf{R}_{jkPilot} = \sqrt{P_T} \mathbf{h}_{jk} \mathbf{a}_{jkPilot}^T + \sqrt{\zeta P_T} \sum_{l=1, l \neq j}^L \mathbf{h}_{lk} \mathbf{a}_{lkPilot}^T + \mathbf{N}_j \quad (7)$$

โดย $\mathbf{N}_j$ คือเมทริกซ์ของสัญญาณรบกวนมีขนาดเท่ากับ $M \times \tau$

หลังจากที่ BS เซลล์ j ได้รับสัญญาณนำที่ถูกส่งมาจาก MS รายที่ k มีขนาด $M \times \tau$ ($\mathbf{R}_{jkPilot}$) แล้ว หน่วยประมวลผลจะทำการประมาณช่องสัญญาณ โดยบทความนี้ได้นำหลักเกณฑ์สถิติอันดับสอง (Second order statistic) แบบ เกือบ เหมาะ สม สุด LS มาประยุกต์ใช้สำหรับการประมาณช่องสัญญาณและลดผลกระทบจากการปนเปื้อนของสัญญาณนำจากเซลล์อื่น อีกทั้งอัลกอริธึมของ LS ยังมีข้อได้เปรียบที่เหนือกว่าอัลกอริธึม MMSE คือ มีความซับซ้อนของการคำนวณที่ต่ำกว่าและสามารถที่จะปรับช่องสัญญาณให้ทันกาล (Update) ต่อการเปลี่ยนแปลงของช่องสัญญาณในทาง

ปฏิบัติของโทรศัพท์เคลื่อนที่ เนื่องจากอัลกอริธึมแบบ LS ไม่ต้องการทราบเมตริกซ์ความแปรปรวนช่องสัญญาณ ของ BS ทุกเซลล์ ฟังก์ชันต้นทุน (Cost function) ของอัลกอริธึม LS ที่ขึ้นอยู่กับค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองต่ำสุด สำหรับการประมาณช่องสัญญาณของผู้ใช้งานรายที่ k ทำงานอยู่ภายในเซลล์ j มีได้ดังนี้

$$\hat{\mathbf{h}}_{jk} = \arg \min_{\mathbf{h}_{jk}} \|\mathbf{R}_{jkPilot} - \mathbf{h}_{jk} \mathbf{a}_{jkPilot}^T\|^2 \quad (8)$$

กำหนดให้ค่าความผิดพลาด $e = \|\mathbf{R}_{jkPilot} - \mathbf{h}_{jk} \mathbf{a}_{jkPilot}^T\|^2$ จะได้

$$e = \left(\mathbf{R}_{jkPilot}^H \mathbf{R}_{jkPilot} - \mathbf{a}_{jkPilot}^* \mathbf{h}_{jk}^H \mathbf{R}_{jkPilot} - \mathbf{R}_{jkPilot}^H \mathbf{h}_{jk} \mathbf{a}_{jkPilot}^T + \mathbf{a}_{jkPilot}^* \mathbf{h}_{jk}^H \mathbf{h}_{jk} \mathbf{a}_{jkPilot}^T \right) \quad (9)$$

หา Partial derivative และทำการจัดเกรเดียนท์ (Gradient) ให้เท่ากับศูนย์ $\frac{\partial e}{\partial \mathbf{h}_{jk}} = 0$ จะได้

$$\mathbf{R}_{jkPilot} \mathbf{a}_{jkPilot}^* - \mathbf{h}_{jk} \mathbf{a}_{jkPilot}^T \mathbf{a}_{jkPilot}^* = 0 \quad (10)$$

ดังนั้น สัมประสิทธิ์การประมาณช่องสัญญาณของ MS รายที่ k ทำงานอยู่ภายในเซลล์ j มีได้ดังนี้

$$\hat{\mathbf{h}}_{jk} = \mathbf{R}_{jkPilot} \mathbf{a}_{jkPilot}^* (\mathbf{a}_{jkPilot}^T \mathbf{a}_{jkPilot}^*)^{-1} \quad (11)$$

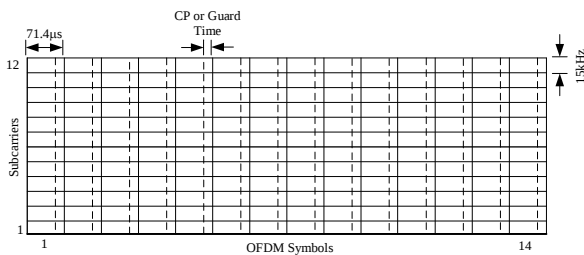
จุดประสงค์ของหลักการที่ได้ทำการนำเสนอในหัวข้อนี้คือ การประมาณช่องสัญญาณให้เข้าใกล้กับช่องสัญญาณจริงให้ได้มากที่สุด และสามารถที่จะลดผลกระทบจากการปนเปื้อนของสัญญาณนำจากเซลล์อื่นที่มีการส่งสัญญาณนำซ้ำที่เวลาและความถี่เดียวกัน โดยการเปรียบเทียบสมรรถนะจะกระทำได้โดยการเปรียบเทียบอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดรวมกับสัญญาณรบกวน (Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio; SINR) $\mathfrak{S}_{jk}$ ดังนี้

$$\mathfrak{S}_{jk} = \frac{|\mathbf{h}_{jk}^T \hat{\mathbf{h}}_{jk}|}{\sum_{l \neq j}^L |\mathbf{h}_{lk}^T \hat{\mathbf{h}}_{jk}| + \sigma_n^2 \|\hat{\mathbf{h}}_{jk}\|} \quad (12)$$

4. ผลการจำลองการทำงาน

หัวข้อนี้จะทำการจำลองการทำงานของระบบ MU-MIMO ทำงานในโหมด TDD ตามมาตรฐานของ LTE โดยทางฝั่งของสถานีฐาน BS ใช้เทคโนโลยี Massive MIMO มีการติดตั้งสายอากาศจำนวน M ต้น ส่วนผู้ใช้งาน MS กำหนดให้ใช้สายอากาศเพียงต้นเดียว โดยการจำลองการทำงานจะทำการเปรียบเทียบสมรรถนะ SINR ของหลักการที่นำเสนอมีการนำรหัส Hadamard ไปทำการมอดูเลตกับสัญญาณนำสำหรับระบบ BS และใช้หลักเกณฑ์ของ LS ที่มีความซับซ้อนของการคำนวณต่ำมาทำการประมาณช่องสัญญาณเปรียบเทียบกับอัลกอริธึม ZF (2) อุดมคติที่สมมุติว่าทราบช่องสัญญาณอย่างสมบูรณ์แบบ (Perfect Channel Knowledge) และอัลกอริธึม LS ทั่วไป ภายใต้สถานการณ์ที่มีการปนเปื้อนของสัญญาณนำจากเซลล์อื่น

พารามิเตอร์ของระบบมีดังนี้ Resource Block grid ของ OFDM กำหนดตามมาตรฐานของ LTE ประกอบไปด้วย 7 OFDM สัญลักษณ์ ดังรูปที่ 5 โดยหนึ่ง OFDM สัญลักษณ์จะมีคลื่นพาห้อย่อยจำนวน $N=12$ ความถี่ แต่ละโทนของความถี่กำหนดให้มีแบนด์วิดท์ (Bandwidth) เท่ากับ 15 kHz และมีความถี่ที่ตั้งฉากกัน นำไปสู่ความต้องการใช้แบนด์วิดท์รวม (Coherent bandwidth) เท่ากับ $B_c=180$ kHz มีระยะห่างของแต่ละ OFDM สัญลักษณ์เท่ากับ $T_s=71.4 \mu s$ มีเวลาคุม (Guard time) หรือ Cyclic Prefix (CP) เท่ากับ $T_{CP}=4.76 \mu s$ ส่งผลทำให้ส่วนของ RB pair (14 OFDM สัญลักษณ์) จะต้องการ Time-frequency element เท่ากับ $12 \times 14 = 168$ องค์ประกอบ



รูปที่ 5 RB ของระบบเชื่อมโยงขาขึ้นตามมาตรฐานของ LTE

พิจารณาช่องสัญญาณเฟดดิ้งแบบ Pedestrian ส่งสัญญาณที่ความถี่คลื่นพาห้ $f_c=2$ GHz ทำการหา Time and frequency resource κ_c ได้จาก

$$\kappa_c = \left(\frac{B_c}{15 \text{ kHz}} \right) \left(\frac{T_c}{71.4 \mu s} \right) \quad (13)$$

$$T_c = \frac{c}{4\pi f_c}$$

โดย c กำหนดให้เป็นความเร็วของแสงและ v กำหนดให้เป็นความเร็วในการเคลื่อนที่ของ MS รายที่ k ทำงานอยู่ในเซลล์ j

จากสมการที่ (13) กรณีที่ช่องสัญญาณเฟดดิ้งแบบ Pedestrian [21] - [22] ความถี่คลื่นพาห้ $f_c=2$ GHz จะมี κ_c ประมาณ 5000

ทำการวัดสมรรถนะอัตราความสำเร็จของการถ่ายโอนข้อมูลระบบขาหลัง (Achievable downlink rate) สำหรับ MS รายที่ k ทำงานอยู่ในเซลล์ j [23] ได้ดังนี้

$$\lambda_{jk} = \left(\frac{N_{coh} - N_{pilot}}{N_{coh}} \right) \left[\frac{T_s - T_{CP}}{T_s} \right] \log_2 (1 + \mathfrak{I}_{jk}) \text{ b/s/Hz} \quad (14)$$

โดย N_{coh} คือ Coherent time and frequency resource และ N_{pilot} คือ Time and frequency resource ที่ใช้สำหรับทำการส่งสัญญาณนำ

การจำลองการทำงานกำหนดให้ MS รายที่ k ทำงานอยู่ในเซลล์ j ส่งสัญญาณนำที่มีการมอดูเลตกับรหัส Hadamard จำนวน 16 สัญลักษณ์ หรือมี $N_{pilot}=16$ ผ่านช่องสัญญาณเฟดดิ้งแบบ Pedestrian ไปยัง BS ที่มีการติดตั้งสายอากาศแบบ Massive MIMO ตั้งแต่ 10 จนถึง 100 ต้น ทำให้มีจำนวน $N_{coh}=416$ โดยสัญญาณปรากฏที่ภาครับของ BS กำหนดให้มีอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal to Noise Ratio; SNR) เท่ากับ 30 dB และสมมุติให้ความถี่ของแต่ละโทนที่ใช้ทำงานอยู่ในเซลล์ตั้งฉากกันและไม่มีสหสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน ทำให้ MS ที่ทำการถ่ายโอนข้อมูลอยู่ในเซลล์ไม่รบกวนซึ่งกันและกันหรือไม่ inter-cell interference เกิดขึ้น และกำหนดให้เซลล์ที่ทำงานอยู่ในระบบเซลล์ลูลาร์มีทั้งหมด $L=5$ เซลล์ โดยเซลล์ที่อยู่รอบข้างทั้ง 4 เซลล์ ($\neq j$) จะกำหนดให้ทำการส่งสัญญาณสัญลักษณ์นำที่มีการปนเปื้อนซ้ำกับเซลล์

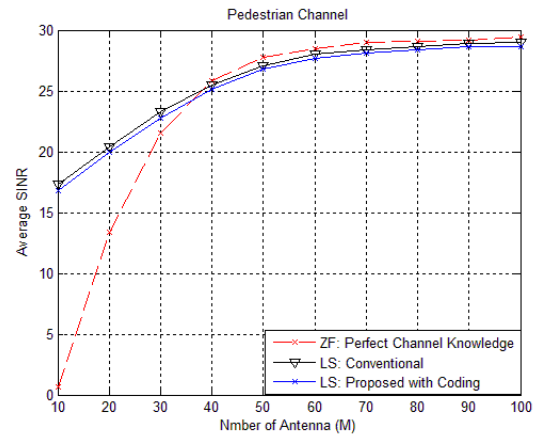
j ทั้งทางเวลาและทางความถี่หรือเรียกว่าอยู่ในเงื่อนไขของการใช้สัญญาณนำซ้ำแบบเต็ม (Full pilot reuse) [10] โดยกำลังสัญญาณนำ ζP_T ของเซลล์ที่อยู่รอบข้าง ($l \neq j$) ที่ส่งไปรบกวนการประมาณช่องสัญญาณของ MS รายที่ k เซลล์ j จะมีการปรับเปลี่ยนขึ้นอยู่กับการของเกนไขว้ โดยเริ่มตั้งแต่ $\zeta = 0$ (ไม่มีการปนเปื้อน) จนถึง $\zeta = 0.5$ สมมุติให้ช่องสัญญาณของทั้งระบบขาขึ้นและระบบขาลงที่ทำงานอยู่ภายในช่วงเวลาสมนัย (Coherent time; T_c) เหมือนกัน และคุณสมบัติทางสถิติยังคงเดิมไม่มีการเปลี่ยนแปลง โดยหลักการที่นำเสนอจะนำรหัส Hadamard-16 ไปทำการมอดูเลตกับสัญญาณนำของ MS ทั้ง 5 เซลล์ (เพื่อระบุความแตกต่างของ BS แต่ละเซลล์) ก่อนที่สัญญาณนำจะถูกส่งออกไปจาก MS

รูปที่ 6 และรูปที่ 7 แสดงผลการจำลองการทำงานด้วยการวัดสมรรถนะของ SINR และอัตราความสำเร็จของการถ่ายโอนข้อมูล ที่ได้รับมาจากอัลกอริทึม ZF อุดมคติที่สมมุติว่าทราบช่องสัญญาณอย่างสมบูรณ์แบบ อัลกอริทึม LS ที่ใช้หลักการที่ได้นำเสนอและอัลกอริทึม LS ทั่วไป (สัญญาณนำไม่ได้ถูกมอดูเลตด้วยรหัส Hadamard) ในกรณีที่สายอากาศ Massive MIMO ที่ถูกติดตั้งไว้ที่ BS มีจำนวนที่เพิ่มขึ้นและการประมาณช่องสัญญาณของ MS รายที่ k ทำงานอยู่ภายในเซลล์ j ไม่ได้รับผลกระทบจากการปนเปื้อนของสัญญาณนำ $\zeta = 0$

ผลการจำลองการทำงานปรากฏว่า สมรรถนะของ SINR (dB) ที่ได้รับมาจากทั้งสามอัลกอริทึมจะมีการปรับปรุง โดย SINR จะเพิ่มขึ้นตามจำนวนของสายอากาศ M ที่มีการติดตั้งเพิ่มขึ้น โดยกรณีที่มีการติดตั้งสายอากาศที่ BS จำนวนน้อยๆ ($M=10-40$ ต้น) อัลกอริทึม ZF อุดมคติจะมีสมรรถนะของ SINR ที่ด้อยกว่าอัลกอริทึม LS ที่นำเสนอและอัลกอริทึม LS ทั่วไป อย่างไรก็ตามสมรรถนะ SINR ของอัลกอริทึม ZF อุดมคติ จะมีการปรับปรุงและมีสมรรถนะที่เหนือกว่าทั้งสองอัลกอริทึม เมื่อมีการติดตั้งสายอากาศที่ BS มีจำนวนที่มากกว่า 50 ต้น โดยสมรรถนะ SINR ที่ได้รับจากทั้งสามอัลกอริทึมจะใกล้เคียงกัน เมื่อมีการติดตั้งสายอากาศที่ BS เป็นจำนวนมาก อย่างไรก็ตามการปรับปรุงของ SINR ไม่ได้เพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับการเพิ่มขึ้นของจำนวนสายอากาศที่ทำการติดตั้งที่ BS โดยที่ $M > 50$ สมรรถนะของ SINR จะมีการปรับปรุงเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

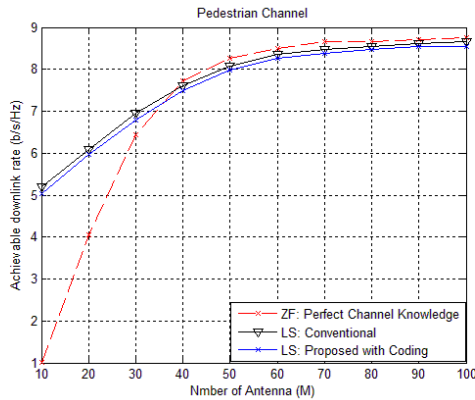
ในส่วนของการเปรียบเทียบสมรรถนะอัตราความสำเร็จการถ่าย

โอนข้อมูล λ_{jk} (b/s/Hz) ของ MS รายที่ k ทำงานอยู่ภายในเซลล์ j ที่ได้รับมาจากทั้งสามอัลกอริทึม อัตราการถ่ายโอนข้อมูลจะมีการปรับปรุงเพิ่มสูงขึ้น หรือมีความจุที่เพิ่มมากขึ้นไปตามจำนวนของสายอากาศ Massive MIMO ติดตั้งไว้ที่ BS โดยสมรรถนะของ SINR และอัตราความสำเร็จของการถ่ายโอนข้อมูลที่ได้รับมาจากอัลกอริทึม LS ที่นำเสนอจะต่ำกว่าอัลกอริทึม LS ทั่วไปและอัลกอริทึม ZF อุดมคติเพียงเล็กน้อยเท่านั้น



รูปที่ 6 ค่าเฉลี่ย SINR ต่อจำนวนของสายอากาศ (M) ที่ได้รับมาจากอัลกอริทึม ZF อุดมคติ อัลกอริทึม LS ทั่วไปและอัลกอริทึม LS ที่นำเสนอ

ต่อมาทำการพิจารณากรณีที่การประมาณช่องสัญญาณที่ BS (กรณีมีการติดตั้งสายอากาศ Massive MIMO ที่ BS จำนวน $M=50$ ต้น) สำหรับ MS รายที่ k ทำงานอยู่ภายในเซลล์ j ได้รับผลกระทบจากการปนเปื้อนของสัญญาณนำแบบเต็ม (Full Pilot reuse) โดยสัญญาณนำจากเซลล์ข้างเคียงจำนวน 4 เซลล์ ($\neq j$) ในระบบเซลล์ลูลาร์ส่งสัญญาณนำซ้ำที่รบกวนและความถี่เดียวกันมารบกวน กำหนดให้กำลังสัญญาณนำของ MS รายที่ k ทำงานอยู่ภายในเซลล์ j เท่ากับ $P_T=1$ ส่วนกำลังที่ถูกส่งมาปนเปื้อนจากจากเซลล์อื่นอีก 4 เซลล์ กำหนดที่มีกำลังที่เท่ากันคือ ζP_T การจำลองการทำงานจะทำการทดสอบผลกระทบที่ได้รับมาจากการปนเปื้อนของสัญญาณนำโดยเริ่มตั้งแต่ 0% ($\zeta = 0$ ไม่มีการนำจากเซลล์อื่นเข้ามารบกวน) จนถึง 50% (มีการนำจากเซลล์ข้างเคียงมารบกวนเซลล์ละ $0.5P_T$)

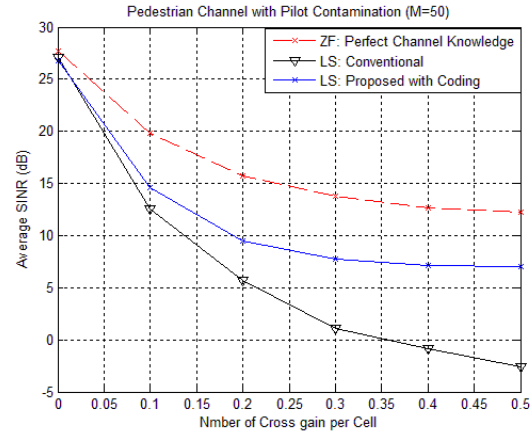


รูปที่ 7 อัตราความสำเร็จของการถ่ายโอนข้อมูล λ_{jk} ต่อจำนวนของสายอากาศ (M) ที่ได้รับมาจากอัลกอริทึม ZF อุดมคติ อัลกอริทึม LS ทั่วไปและอัลกอริทึม LS ที่นำเสนอ

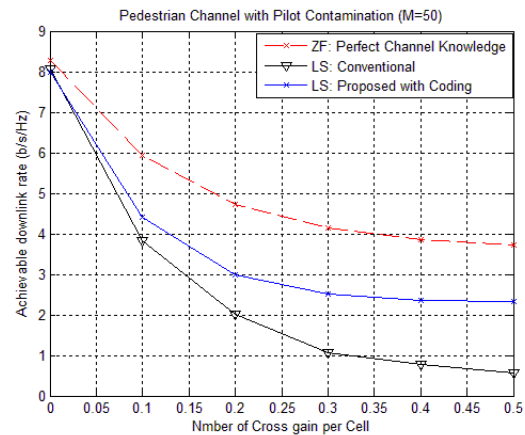
ผลการจำลองการทำงานปรากฏดังรูปที่ 8 และรูปที่ 9 โดยสมรรถนะ SINR ที่ได้รับมาจากทั้งสามอัลกอริทึมจะลดลงไปตามการเพิ่มขึ้นของกำลังจากเซลล์อื่น ζP_T ที่ถูกส่งเข้ามาปนเปื้อน (รูปที่ 8) รวมทั้งยังส่งผลทำให้สมรรถนะอัตราความสำเร็จของการถ่ายโอนข้อมูล λ_{jk} (b/s/Hz) ของ MS รายที่ k ทำงานอยู่ภายในเซลล์ j (รูปที่ 9) ของทั้งสามอัลกอริทึมนั้นลดลงไปตามการเพิ่มขึ้นของกำลังสัญญาณนำที่ถูกส่งเข้ามาปนเปื้อน อย่างไรก็ตามสมรรถนะของ SINR และอัตราความสำเร็จการถ่ายโอนข้อมูลของอัลกอริทึม LS ที่นำเสนอจะมีการปรับปรุงให้เหนือกว่าสมรรถนะที่ได้รับมาจากอัลกอริทึม LS ทั่วไป ทำการพิจารณาที่ $\zeta = 0.5$ สมรรถนะของ SINR ที่ได้รับมาจากอัลกอริทึม LS ที่นำเสนอจะมีการปรับปรุงที่เหนือกว่าสมรรถนะที่ได้รับมาจากอัลกอริทึม LS ทั่วไปถึง 7.8 dB ในขณะที่สมรรถนะอัตราความสำเร็จการถ่ายโอนข้อมูลที่ได้รับมาจากอัลกอริทึม LS ที่นำเสนอจะอยู่ที่ 2.3 b/s/Hz ส่วนอัตราการถ่ายโอนข้อมูลที่ได้รับมาจากอัลกอริทึม LS ทั่วไปนั้นจะต่ำมาก (0.6 b/s/Hz) จนแทบจะไม่สามารถที่จะทำการถ่ายโอนข้อมูลจาก BS ไปยัง MS ได้เลย

จากผลการจำลองการทำงานสรุปได้ว่า หลักการที่นำเสนอสามารถที่จะช่วยลดผลกระทบอันเนื่องมาจากการปนเปื้อนของสัญญาณนำ กรณี Full Pilot reuse ได้ อย่างไรก็ตามสมรรถนะที่ได้รับมาจากอัลกอริทึม LS ที่นำเสนอ นั้น ยังต่ำกว่าสมรรถนะที่ได้รับมาจากอัลกอริทึม ZF อุดมคติ ซึ่งแนวในการปรับปรุงสมรรถนะนั้น

สามารถที่จะกระทำได้ด้วยการเพิ่มจำนวนของสัญลักษณ์นำที่มีการมอดูเลตกับรหัส Hadamard



รูปที่ 8 ค่าเฉลี่ย SINR ต่อเกนไขว้ ζ ที่ได้รับมาจากอัลกอริทึม ZF อุดมคติ อัลกอริทึม LS ทั่วไปและอัลกอริทึม LS ที่นำเสนอ กรณีมีการปนเปื้อนของสัญญาณนำ ($M=50$)



รูปที่ 9 อัตราความสำเร็จการถ่ายโอนข้อมูล λ_{jk} ต่อเกนไขว้ ζ ที่ได้รับมาจากอัลกอริทึม ZF อุดมคติ อัลกอริทึม LS ทั่วไปและอัลกอริทึม LS ที่นำเสนอ กรณีมีการปนเปื้อนของสัญญาณนำ ($M=50$)

5. สรุป

เนื่องจากความต้องการใช้งานของอุปกรณ์ไร้สายภายในเซลล์ของเครือข่ายเซลลูลาร์ มีจำนวนที่เพิ่มมากขึ้นและมีการใช้งานด้วย

ระยะเวลาที่ยาวนานมากขึ้น รวมทั้งจำนวนแบนด์วิดท์ของ RB ที่ได้รับการจัดสรรก็ให้นั้นมีน้อย โดยระบบ LTE-TDD Massive MIMO กำหนดให้การประมาณช่องสัญญาณจะต้องกระทำทางด้าน BS ดังนั้นการใช้สัญญาณนำซ้ำกันของสถานีฐานที่อยู่ต่างเซลล์กันจึงไม่สามารถที่จะหลีกเลี่ยงได้ ซึ่งส่งผลทำให้เกิดการปนเปื้อนของสัญญาณนำขึ้น บทความนี้นำเสนอการนำหลักเกณฑ์ของ LS ที่มีความซับซ้อนในการคำนวณต่ำมาช่วยในการประมาณช่องสัญญาณ รวมทั้งยังได้นำรหัสตั้งฉากมาทำการมอดูเลตกับสัญญาณของสัญญาณนำเพื่อเป็นการระบุ BS ของแต่ละเซลล์ให้มีความแตกต่างกัน โดยฟังก์ชันต้นทุนของอัลกอริทึม LS จะถูกบังคับให้ทำงานโดยอาศัยข้อได้เปรียบจากคุณสมบัติการตั้งฉากกันของรหัส Hadamard ที่ถูกนำไปมอดูเลตกับสัญญาณนำ มาช่วยในการลดการปนเปื้อนของสัญญาณนำที่ถูกส่งมาจาก BS เซลล์ข้างเคียง ผลการจำลองการทำงานยืนยันได้ว่า หลักการที่นำเสนอสามารถที่จะช่วยลดผลกระทบอันเนื่องมาจากการใช้สัญญาณนำซ้ำแบบ Full Pilot reuse โดยสมรรถนะของ SINR และอัตราความสำเร็จของการถ่ายโอนข้อมูลระบบขาหลังที่ได้รับมาจากอัลกอริทึมที่นำเสนอ จะมีการปรับปรุงให้ดีกว่าสมรรถนะที่ได้รับมาจากการใช้อัลกอริทึม LS แบบทั่วไป โดยอัลกอริทึม LS แบบทั่วไปที่ไม่ได้ทำการมอดูเลตด้วยรหัส Hadamard เพื่อระบุ BS นั้น จะได้รับผลกระทบจากการปนเปื้อนของสัญญาณนำจากเซลล์อื่นสูงมาก

เอกสารอ้างอิง

- [1] T. Rappaport, *Wireless Communications: Principles and Practice*. Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice-Hall, 1996.
- [2] T. Halonen, J. Romero, and J. Melero, Eds., *GSM, GPRS and EDGE Performance: Evolution Towards 3G/UMTS*. New York, NY, USA: Wiley, 2003.
- [3] J. G. Andrews, A. Ghosh, and R. Muhamed, *Fundamentals of WiMAX*. Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice-Hall, 2007.
- [4] B. Furht and S. A. Ahson, Eds., *“Long Term Evolution: 3GPP LTE Radio and Cellular Technology,”* Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2009, ch. 12, pp. 441–443.
- [5] S. Sesia, I. Toufik, and M. Baker, Eds., *LTE: The UMTS Long Term Evolution*. New York, NY, USA: Wiley, 2009.
- [6] K. R. Santhi, V. K. Srivastava, G. SenthilKumaran, and A. Butare, “Goals of true broad band’s wireless next wave (4G–5G),” in *Proc. IEEE 58th Vehicular Technology Conference*, vol. 4, October 2003, pp. 2317–2321.
- [7] M. Fallgren et al., *Scenarios, Requirements and KPIs for 5G Mobile and Wireless System*, document ICT-317669-METIS/D1.1, Apr. 2013.
- [8] Industry Proposal for a Public Private Partnership (PPP) in Horizon 2020 (Draft Version 2.1), *Horizon 2020 Advanced 5G Network Infrastructure for the Future Internet PPP*. [Online]. Available: http://www.networks-etp-eu/fileadmin/user_upload/Home/draft-PPP-proposal.pdf
- [9] F. Rusek et al., “Scaling up MIMO: Opportunities and challenges with very large arrays,” *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 30, no. 1, pp. 40–60, January 2013.
- [10] L. Lu, G. Y. Li, A. L. Swindlehurst, A. Ashikhmin and R. Zhang, “An overview of massive MIMO: Benefits and challenges,” *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 8, no.5, pp. 742–758, October 2014.
- [11] E. G. Larsson, F. Tufvesson, O. Edfors, and T. L. Marzetta, “Massive MIMO for next generation wireless systems,” *IEEE Communication Magazine*, vol. 52, no. 2, pp. 186–195, February 2014. [Online]. Available: <http://arxiv.org/pdf/1304.6690v1.pdf>
- [12] J. Nam, J.-Y. Ahn, A. Adhikary, and G. Caire, “Joint spatial division and multiplexing: Realizing massive MIMO gains with limited channel state information,” in *Proc. IEEE 46th Annual Conference Information Science and Systems (CISS)*, March 2012, pp. 1–6.
- [13] F. Kaltenberger, J. Haiyong, M. Guillaud, and R. Knopp, “Relative channel reciprocity calibration in mimo/tdd systems,” in *Proc. Future Network and Mobile Summit*, June 2010, pp. 1–10.
- [14] H. Boleskei, R. W. Heath and A. J. Paulraj, “Blind channel identification and equalization in OFDM-based multiantenna systems,” *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 50, no. 1, pp. 96–109, January. 2002.
- [15] M. Biguesh, and A. B. Gershman, “Training-based MIMO channel estimation: A study of estimator tradeoffs and optimal training signals,” *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 54, no.3, pp. 884–893, March. 2006.
- [16] T. Wo and P. A. Hoher, “Semi-Blind channel estimation for frequency selective MIMO systems,” in *Proc. 14th IST Mobile & Wireless Communications Summit*, Dresden Germany, June 2005.
- [17] S. Phrompichai and P. Yuvapoositanon, “A semiblind receiver based upon multiple constrained subspace MUD for long-code downlink multirate DS-CDMA systems,” in *Proc. International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS 2006)*, 21–24 May 2006.
- [18] T. L. Marzetta, “How much training is required for multiuser MIMO,” in *Proc. Asiloma Conference on Signals, Systems and Computers*, pp. 359–363, October–November 2006.
- [19] S. M. Kay, *Fundamentals of statistical signal processing: estimation theory*. Prentice-Hall, 1993.
- [20] P. Xu, J. Wang, and J. Wang, “Effect of pilot contamination on channel estimation in massive MIMO systems,” in *Proc. International Conference on Wireless Communication Signal Processing (ICWCSP)*, October 2013, pp. 1–6.
- [21] 3GPP/3GPP2 25.996 v6.1.0 (2003-09), “Spatial channel model for multiple input multiple output (MIMO) simulations (Release6),” in 3GPP, Spatial Channel, 2003.
- [22] J. P. Kermoal, L. Schumacher, K. I. Pedersen, P. E. Mogensen and F. Frederiksen, “A Stochastic MIMO radio channel model with experimental validation,” *IEEE Jour. on Selected Areas in Communication*, vol. 20, no. 6, August 2002.
- [23] V Saxena, G Fodor, E Karipidis, “Mitigating pilot contamination by pilot reuse and power control schemes for massive MIMO systems,” in *Proc. Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, May 2015, pp. 1–6.



ดร. สัมพันธ์ พรหมพิชัย ได้รับปริญญาเอกสาขา
วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ จากมหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีมหานคร เมื่อปี พ.ศ. 2549 ปัจจุบัน
ดำรงตำแหน่งรองศาสตราจารย์ ประจำสถาบัน
นวัตกรรมมหานคร (MII) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
มหานคร งานวิจัยที่สนใจเกี่ยวกับการประมวลผล

สัญญาณดิจิทัลสำหรับระบบสื่อสารเคลื่อนที่และการสื่อสารผ่านระบบดาวเทียม