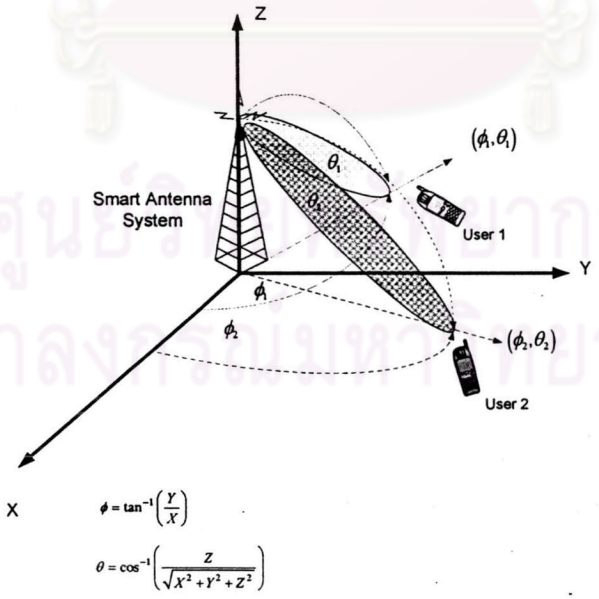
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ทฤษฎีการประมาณ (Estimation Theory) เป็นหัวข้อทางคณิตศาสตร์ที่ได้รับความสนใจในการวิจัยกันอย่างอย่างแพร่หลายด้านเทคโนโลยีการสื่อสาร โดยเฉพาะอย่างยิ่งงานวิจัยทางด้านเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สาย [1] ยกตัวอย่างเช่น ระบบสายอากาศเก่ง (Smart Antenna System) ที่มีความสามารถในการจัดการช่องสัญญาณแบบพลวัต (Dynamic) ส่งผลให้เกิดการใช้ประโยชน์จากทรัพยากรของระบบอย่างคุ้มค่าที่สุด หมายความว่าช่องสัญญาณไม่ได้เป็นของผู้ใช้รายใดรายหนึ่งและไม่ได้ถูกแบ่งไว้ก่อนล่วงหน้า หากแต่จะจ่ายไปให้เฉพาะกับผู้ใช้ที่ร้องขอมาเท่านั้น ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 1.1 สมมุติให้มีผู้ใช้ (User) 2 คน เข้าใช้ระบบที่พิกัด (ϕ_1,θ_1) และ (ϕ_2,θ_2) ตามลำดับ เมื่อ ϕ คือมุมในระนาบกวาด (Azimuth plane) และ θ คือมุมในระนาบยก (Elevation plane) ระบบสายอากาศเก่งจะทำการจ่ายช่องสัญญาณไปให้เฉพาะพิกัด (ϕ_1,θ_1) และ (ϕ_2,θ_2) เท่านั้น การจัดการช่องสัญญาณในลักษณะนี้เป็นผลให้ประหยัดพลังงานให้กับระบบอีกทั้งยังลดผลของสัญญาณแทรกสอด (Interference Signal) จากการรบกวนระหว่างช่องสัญญาณได้



รูปที่ 1.1 แสดงการทำงานของระบบสายอากาศเก่ง

กระบวนการจัดการช่องสัญญาณของระบบสายอากาศเก่ง จะใช้การประมาณตำแหน่งของผู้ใช้โดยอาศัยอัลกอริทึมสำหรับการประมาณทิศทางสัญญาณที่เข้ามา (Direction Of Arrival Estimation Algorithm; DOA) อัลกอริทึมดังกล่าวจะมีพื้นฐานมาจากกระบวนการประมาณสเปคตรัม (Spectral Estimation) ซึ่งเป็นหนึ่งการประยุกต์จากทฤษฎีการประมาณ สำหรับอัลกอริทึมสำหรับการประมาณทิศทางสัญญาณนี้ จะเปลี่ยนโดเมนในการพิจารณาจากโดเมนเชิงความถี่ (Frequency Domain) มาเป็น โดเมนเชิงปริภูมิ (Spatial Domain) หลักการแปลงโดเมนจากเชิงความถี่ไปเป็นเชิงปริภูมิ จะได้กล่าวต่อไปในบทที่ 2

อัลกอริทึมสำหรับการประมาณทิศทางสัญญาณที่เข้ามาจะแบ่งได้เป็น 4 แบบ คือ

1.Conventional method

2. Subspace Base method

3. Maximum Likelihood method

4. Integral method

ในแต่ละแบบของอัลกอริทึมจะมีข้อเด่นข้อด้อยต่างกันไป ซึ่งจะอธิบายโดยสังเขปดังนี้

สำหรับในกรณี Conventional method [1],[3] เป็นวิธีที่มีหลักการอยู่บนกระบวนการสร้างลำคลื่น (Beam forming) ซึ่งจะพิจารณาว่าตำแหน่งที่ให้ค่ากำลังงานสูงสุดของสเปกตรัมทางปริภูมิ (Spatial spectrum) คือตำแหน่งพิกัดของผู้ใช้ที่เรียกมา เพราะอาศัยแนวคิดจากแบบรูปการแพร่รังสี (Radiation pattern) ที่ว่าบริเวณที่มีกำลังงานสูงสุดจะเป็นจุดพิกัดตำแหน่งของการสร้างลำคลื่น (Particular direction) และกลายเป็นตำแหน่งพิกัดของผู้ใช้ที่เรียก-มาโดยปริยาย ข้อเด่นของ Conventional method คือความซับซ้อนของอัลกอริทึมจะน้อยที่สุด แต่ข้อด้อยคือความสามารถในการแยกชัด (Resolution) จะต่ำที่สุด อัลกอริทึมที่จัดอยู่ในแบบ Conventional method เช่น Delay and Sum และ CAPON เป็นต้น

สำหรับในกรณี Subspace Base method [1],[2],[4] จะอาศัยหลักการของปริภูมิเวกเตอร์ (Vector space) ภายใต้ข้อกำหนดที่ว่าสัญญาณที่ตกกระทบจะประกอบไปด้วย 2 ปริภูมิย่อยคือ ปริภูมิย่อยของสัญญาณที่ต้องการ (Desired signal subspace) และปริภูมิย่อยของสัญญาณรบกวน (Noise subspace) โดยทั้ง 2 ปริภูมิย่อยนี้จะตั้งฉากซึ่งกันและกัน (Orthogonal) กระบวนการประมาณหาทิศทางของอัลกอริทึมนี้จะอาศัยการตรวจความตั้งฉากของสัญญาณ ซึ่งผลลัพธ์ของอัลกอริทึมจะได้ค่าเป็นศูนย์ ณ ตำแหน่งที่มีสัญญาณตกกระทบ หากกล่าวโดยสรุปคือกระบวนการของสเปกตรัมแบบศูนย์ (Null spectrum) นั้นเอง (รายละเอียดจะได้

กล่าวต่อไปในส่วนของทฤษฎี) และยังจะทำให้เราทราบอีกว่า Subspace Base method จะมีลักษณะเป็นการประมาณสเปกตรัมแบบเทียม (Pseudo spectrum estimation) เพราะใช้การวัดความเหมือนของปริภูมิสัญญาณแทนการวัดกำลังสัญญาณ เมื่อเปรียบเทียบ Subspace Base method กับ Conventional method จะมีข้อเด่น คือความสามารถในการแยกชัดที่เหนือกว่า แต่ข้อด้อยคือความซับซ้อนที่มากกว่า (Complexity and Processing time) อัลกอริทึมที่จัดอยู่ในแบบ Subspace Base method เช่น MUSIC,ESPRIT,MIN-NORM และ CLOSET เป็นต้น

สำหรับในกรณี Maximum Likelihood method [1],[3],[4] จะอาศัยวิธีการหาค่าสูงสุดของ log likelihood function เพื่อหาค่ามุมของสัญญาณที่ตกกระทบ โดย ฟังก์ชันดังกล่าวจะมีลักษณะเป็น Joint probability density function ของข้อมูลด้านอินพุท (sampled data input) และเนื่องจากการหาค่าสูงสุดของ log likelihood function เป็นปัญหาทางด้าน Non linear optimization ดังนั้นผลเฉลยของอัลกอริทึมจึงไม่มีรูปแบบตายตัว วิธีการหาผลเฉลยดังกล่าวจึงต้องคิดแบบวนซ้ำ (Iterative Schemes) ซึ่งมีหลายวิธี เช่น Newton-Raphson method, alternating projection method และ expectation maximization method เป็นต้น ผลเฉลย ที่ได้จากอัลกอริทึมนี้จะมีค่าความถูกต้อง แม่นยำ (Accuracy) สูงมาก ซึ่งถ้าเปรียบเทียบกับ 2 อัลกอริทึม ในขั้นต้นที่กล่าวมาแล้ว จะพบว่า Maximum Likelihood method จะมีความสามารถในการแยกแยะที่เหนือกว่า เนื่องจากมีลักษณะเป็น Optimal Estimation และจะยิ่งเห็นความแตกต่างได้ชัดเจนมากขึ้นเมื่อให้ระดับ *SNR* มีค่าน้อย แต่ข้อด้อยคือความซับซ้อนจะสูงมากและนี้ถือเป็นจุดอ่อนของ Maximum Likelihood method เพราะในงานสื่อสารไร้สายนั้นความไวในการประมวลผลก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ต้องพิจารณา

สำหรับในกรณี Integral method จะอาศัยการเพิ่มเทคนิคบางประการเข้าไปภายใต้กระบวนการประมาณแบบเดิม เช่นในกรณี Subspace Base method [1], [4] ที่จะใช้ได้ดีเมื่อสัญญาณมีความอิสระเชิงสถิติ (Incoherent signal) สูง และเมื่อใดก็ตามที่สัญญาณมีความอิสระเชิงสถิติลดลงหรือไม่อิสระทางสถิติ (Coherent signal) จะส่งผลให้ความสามารถในการแยกชัด และ ความถูกต้องจากการประมาณของอัลกอริทึมลดลง ดังนั้นจึงได้มีวิธีการที่ใช้ลดผลของความไม่อิสระทางสถิติจากสัญญาณลง โดยอาศัยเทคนิคที่เรียกว่า "spatial smoothing technique" นอกเหนือจาก spatial smoothing technique แล้ว Integral method ยังมีอีกหลายเทคนิค ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการประมวลผลสัญญาณ [3],[4] เช่น Multi-dimensional technique, Multi-resolution technique, root technique, Beam Space technique [6] และ Beam Space root technique เป็นต้น ซึ่งเมื่อนำไปรวมกับอัลกอริทึมในการประมาณทิศทางขั้นต้น ก็จะกลายเป็นอัลกอริทึมที่เป็นที่รู้จักกันดีในทางปฏิบัติ เช่นเมื่อรวมกับ MUSIC ใน

Subspace Base method ก็จะกลายเป็น Multi-dimensional MUSIC, Multi-resolution MUSIC, root MUSIC, Beam Space MUSIC และ Beam Space root MUSIC เป็นต้น เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการแยกชัด กับ ทั้ง 3 อัลกอริทึมที่ได้กล่าวไปแล้วจะพบว่า Integral method จะเหนือกว่าแบบ Conventional method และแบบ Subspace Base method แต่ก็ยังด้อยกว่า Maximum Likelihood method เนื่องจากลักษณะของ Integral method ยังเป็น Sub Optimal Estimation อยู่ แต่อย่างไรก็ดี ข้อดีของ Integral method เมื่อเทียบกับ Maximum Likelihood method คือความซับซ้อนที่น้อยกว่า

จากอัลกอริทึมทั้ง 4 ที่ได้กล่าวไปแล้ว ในงานการสื่อสารไร้สายทางปฏิบัติวิธีที่นิยมใช้กันมากที่สุดจะเป็นอัลกอริทึม Subspace Base method และอัลกอริทึม Integral method เนื่องจากอัลกอริทึมดังกล่าวมีสมรรถนะซึ่งได้แก่ ความสามารถในการแยกแยะ ความถูกต้องจากการประมาณ และ ความซับซ้อนอยู่ในระดับที่ยอมรับได้

สมรรถนะของอัลกอริทึมดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับ การเลือกใช้วิธีประมาณทิศทางให้เหมาะสมกับ วัตถุประสงค์การใช้งาน ทรัพยากรที่มีอย่างจำกัด ลักษณะของสัญญาณ สภาพแวดล้อมที่จะติดตั้ง และคุณลักษณะตัวตรวจรู้ของระบบ โดยแนวทางในการศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับอัลกอริทึมดังกล่าว ส่วนใหญ่จะพิจารณาให้ตัวตรวจรู้ (Sensor) ของระบบมีคุณสมบัติเป็นอุดมคติ (Ideal Characteristic) หากแต่ในความเป็นจริง เราทราบดีว่าคุณสมบัติความเป็นอุดมคติดังกล่าวมักไม่เกิดขึ้นจริง เนื่องด้วยสาเหตุของความผิดพลาดจาก กระบวนการในการผลิต อายุการใช้งาน และกระบวนการในการเทียบมาตรฐานก่อนใช้งาน (Calibration) ดังนั้นประเด็นด้านความคงทน (Robustness) ของอัลกอริทึมต่อสภาวะความไม่เป็นอุดมคติของตัวตรวจรู้จึงเป็นสิ่งที่ต้องพิจารณาไว้ด้วย สำหรับการทำงานของอัลกอริทึมประมาณทิศทาง ตัวตรวจรู้ที่จะใช้คือสายอากาศแถวลำดับ ในที่นี้ความสำคัญของสายอากาศแถวลำดับจะเป็นเพียงตัวตรวจรู้ตัวหนึ่งเท่านั้น

สำหรับตัวตรวจรู้อย่างสายอากาศแถวลำดับ สภาพความไม่เป็นอุดมคติ จะเกิดขึ้นในลักษณะค่าเฟสผิดพลาดแบบสุ่ม ซึ่งจาก [8] และ [4] สาเหตุการเกิดค่าเฟสผิดพลาดดังกล่าว มี 2 ประการคือ

-เกิดจากระบบสายอากาศแถวลำดับอันได้แก่ ค่าความผิดพลาดทางเฟสแบบสุ่มที่เกิดจากการจัดวางตำแหน่งของสายอากาศ (Array Element Placement Error) ค่าความผิดพลาดทางเฟสแบบสุ่มที่เกิดจากการหมุนวน (Steering Error) และค่าความผิดพลาดทางเฟสแบบสุ่มที่เกิดจากสภาพแวดล้อมของระบบ (Phase Perturbed Environment Error)

-เกิดจากผลของช่องสัญญาณอันได้แก่ค่าความผิดพลาดทางเฟสที่เป็นผลมาจากช่องสัญญาณ (Channel Phase Error) และ ค่าความผิดพลาดทางเฟสแบบสุ่มที่เกิดจากความถี่ (Frequency Error)

โดยที่แบบจำลองของค่าความผิดพลาดทางเฟสแบบสุ่มจะจำลองให้ค่าดังกล่าวเกิดในแต่ละต้นอย่างอิสระจากกัน (Independent phase error) ของสายอากาศ ดังจะได้กล่าวต่อไปในบทที่ 2

ประเด็นที่วิทยานิพนธ์นี้สนใจคือประเด็นของการเกิดค่าเฟสผิดพลาดแบบสุ่มจากสาเหตุของระบบสายอากาศแถวลำดับที่เกิดจากสภาพแวดล้อมของระบบ เพราะถือเป็นปฐมเหตุของความผิดพลาดสำหรับการประมวลผลสายอากาศแถวลำดับ อีกทั้งเป็นประเด็นที่ควบคุมง่ายกว่า เมื่อเทียบกับผลความผิดพลาดทางเฟสจากช่องสัญญาณ ซึ่งผลกระทบของค่าความผิดพลาดทางเฟสดังกล่าว เป็นสาเหตุให้ความถูกต้องของอัลกอริทึมลดลง ทั้งนี้ผลของความผิดพลาดของอัลกอริทึมจากค่าผิดพลาดทางเฟสแบบสุ่มจะลดลงได้ หากมีการเพิ่มเงื่อนไขความทนทานท่ามกลางค่าเฟสผิดพลาดแบบสุ่ม (Robust Constraint) การเพิ่มเงื่อนไขความทนทานดังกล่าวจำต้องอาศัยเงื่อนไขบังคับที่เหมาะสม (Robust Constraints Optimization) และเนื่องจากต้องการให้สอดคล้องกับงานในทางปฏิบัติ ดังนั้นอัลกอริทึมการประมาณทิศทางสัญญาณที่เลือกมาใช้จะเป็นอัลกอริทึมใน Integral method คือ Beam Space MUSIC โดย Beam Space MUSIC จะมีข้อกำหนดเหมือนกับ MUSIC แต่ต่างกันเพียงมีการเพิ่มภาคประมวลผลล่วงหน้า (Pre-Processing) ซึ่งจะได้กล่าวต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

1.เสนอผลกระทบจากค่าผิดพลาดทางเฟสแบบสุ่มที่มีต่อการทำงานของการประมวลผลสายอากาศแถวลำดับ

2.เสนอวิธีการเพิ่มความทนทานต่อค่าผิดพลาดทางเฟสแบบสุ่มเพื่อปรับปรุงให้อัลกอริทึมมิวสิกแบบแบ่งคลื่นที่ใช้ในการประมาณทิศทางสัญญาณยังคงมีความเชื่อถือได้

1.3 ขอบเขตวิทยานิพนธ์

ปรับปรุงเทคนิคสำหรับการประมาณทิศทางโดยใช้อัลกอริทึมมิวสิกแบบแบ่งคลื่นเพื่อให้ ความคงทนด้านความผิดพลาดทางเฟสแบบสุ่มดีขึ้น ด้วยเทคนิคปริภูมิย่อยคงทนบริบูรณ์ (Entire Robust Subspace) ภายใต้ระบบการสุ่มแบบคงที่ (Stationary Process) ลักษณะ

ช่องสัญญาณเฟดดิงแบบราบ (Flat Fading Channel) และลักษณะสัญญาณแบบแถบแคบ (Narrow Band)

1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการ

1.ศึกษาและทดลองลักษณะการทำงานของอัลกอริทึมมิวสิกตลอดถึงปัญหาที่เกิดขึ้น

2.ศึกษาและทดลองลักษณะการทำงานของอัลกอริทึมมิวสิกแบบแบ่งคลื่นตลอดถึงปัญหาที่เกิดขึ้น

3.ศึกษาเทคนิคที่ใช้ในการเพิ่มความคงทนของอัลกอริทึมแบบมิวสิกท่ามกลางค่าความผิดพลาดทางเฟสแบบสุ่ม

4.ศึกษาและทดลองอัลกอริทึมแบบมิวสิกที่มีความคงทนต่อค่าความผิดพลาด-ทางเฟสแบบสุ่ม

5.ประยุกต์อัลกอริทึมแบบมิวสิกที่ได้จากข้อ4ให้อยู่ในรูปของอัลกอริทึมมิวสิก-แบ่งคลื่น

6.ทดลองและวิเคราะห์ผลลัพธ์จากอัลกอริทึมมิวสิกแบบแบ่งคลื่นที่ได้จากข้อ5

7.รวบรวมข้อมูลทั้งหมดของงานวิจัย จัดทำเป็นรูปเล่มวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.ได้ศึกษาเกี่ยวกับอัลกอริทึมในการประมาณทิศทางของสัญญาณ และปัจจัยอื่นที่มีผลต่อการทำงานของอัลกอริทึม

2.ได้ศึกษาเกี่ยวกับขอบข่ายของงานที่มีการใช้อัลกอริทึมในการประมาณทิศทางของสัญญาณและประเด็นที่ต้องคำนึงถึงเมื่อนำไปประยุกต์ใช้ในแต่ละงาน

3.ประยุกต์เทคนิคที่คงทนต่อความผิดพลาดทางเฟสแบบสุ่มเข้ากับอัลกอริทึมมิว-สิกแบ่งคลื่นโดยจะทำให้ได้ความคงทนต่อค่าความผิดพลาดทางเฟสแบบสุ่มดีขึ้น

1.6 นิยามสัญลักษณ์

$\tilde{(\ )}$	ผลการรบกวนของค่าความผิดพลาดทางเฟสแบบสุ่มที่สายอากาศ
$(\ )_i$	ส่วนจินตภาพ (Imaginary part)
$(\ )_r$	ส่วนจริง (Real part)
$(\ )_R$	การแปลงสู่จำนวนจริง (Real transform)
$\mathrm{E}(\ )$	ตัวปฏิบัติการหาค่าคาดหวัง (Expectation operator)
$\Im(\ )$	ตัวปฏิบัติการแปลงฟูริเยร์ (Fourier transform)
$(\ )^H$	ตัวปฏิบัติการเฮอร์มิเชียน (Hermitian operator)
$\mathrm{Im}(\ )$	ตัวปฏิบัติการส่วนจินภาพ (Imaginary operator)
$\Re(\ )$	ตัวปฏิบัติการส่วนจริง (Real operator)
$(\ )^T$	ตัวปฏิบัติการทรานสโพส (Transpose operator)
$(\ )'$	เวกเตอร์ที่ได้จากเอาท์พุตของภาคการประมวลผลล่วงหน้า
$(\ )^\perp$	ปริภูมิที่ตั้งฉาก (Perpendicular space)
$[\ ]$	เมตริกซ์
$Null(\ )$	การหาปริภูมิสู่ศูนย์ (Null space)

$EVD(\ )$	การแยกย่อยเมตริกซ์แบบเจาะจง (Eigen value Decomposition)
$SVD(\ )$	การแยกย่อยเมตริกซ์แบบเอกฐาน (Singular value Decomposition)
$trace(\ )$	การหาผลบวกในแนวทแยงมุมของเมตริกซ์ (Trace of matrix)
$(\ )^{(n)}$	ค่าอนุพันธ์อันดับที่ n (n-th derivative) เมื่อ $n = 1, 2, ...$
$\min\{\ \}$	การหาค่าต่ำสุด (Minimization)
$\|\ \|$	ยูคริเดียนนอร์ม (Euclidean norm)
$\|\ \|_F$	โฟบินิอุสนอร์ม (Frobenious norm)
$\mathbf{A}$	เซตของมุมสัญญาณตกกระทบ
$\mathbf{A}_B$	เซตของมุมสัญญาณตกกระทบ กรณีมีการต่อร่วมของภาคการประมวลผลล่วงหน้า
$\mathbf{A}_{BR}$	เซตของมุมสัญญาณตกกระทบที่แปลงสู่จำนวนจริงแล้ว กรณีมีการต่อร่วมของภาคการประมวลผลล่วงหน้า
$\mathbf{A}_R$	เซตของมุมสัญญาณตกกระทบที่แปลงสู่จำนวนจริงแล้ว
$\mathbf{a}(\phi)$	เวกเตอร์หมุนวน (Steering vector) พิจารณา ณ มุม ϕ ใด ๆ
$\mathbf{a}_B(\phi)$	เวกเตอร์หมุนวน กรณีที่มีการต่อร่วมของภาคการประมวลผลล่วงหน้า พิจารณา ณ มุม ϕ ใด ๆ
$\mathbf{a}_\gamma(\phi)$	ปริภูมิย่อยความทนทานทางเฟสแบบสุ่มเมื่อรวมทุกต้นของสายอากาศ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$\mathbf{a}_{\gamma_m}(\phi)$	ปริภูมิย่อยความทนทานทางเฟสแบบสุ่มของสายอากาศต้นที่ m
$\mathbf{a}_{\gamma_R}(\phi)$	ปริภูมิย่อยความทนทานทางเฟสแบบสุ่มเมื่อรวมทุกต้นของสายอากาศ
$\mathbf{a}_{B\gamma_R}(\phi)$	ปริภูมิย่อยความทนทานทางเฟสแบบเมื่อรวมทุกต้นของสายอากาศ กรณีมีการต่อร่วมของภาคการประมวลผลล่วงหน้า
$\mathbf{a}_{B\gamma,m}(\phi)$	ปริภูมิย่อยความทนทานทางเฟสแบบสุ่มของสายอากาศต้นที่ m กรณีมีการต่อร่วมของภาคการประมวลผลล่วงหน้า
$\mathbf{B}$	เมตริกซ์คุณลักษณะของภาคการประมวลผลล่วงหน้า
$\mathbf{B}_R$	เมตริกซ์คุณลักษณะของภาคการประมวลผลล่วงหน้าซึ่งแปลงสู่จำนวนจริงแล้ว
D	จำนวนเส้นทางของสัญญาณตกกระทบ
d	ระยะห่างในแต่ละต้นของสายอากาศแถวลำดับ
$diag(\ )$	เมตริกซ์แนวทแยงมุม (Diagonal matrix)
$f(Hz)$	ความถี่พาหะ (Carrier frequency)
$g(\phi)$	สมการสเปกตัมแบบศูนย์ของอัลกอริทึมมิวสิก (Null spectrum of MUSIC algorithm)
$\mathbf{I}$	เมตริกซ์เอกลักษณ์ (Identity matrix)
M	จำนวนของสายอากาศ
MSE	ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสอง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

MSE_1 ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสอง กรณี อัลกอริทึมมิวสิกแบ่งคลื่นดั้งเดิม (Conventional MUSIC)

MSE_2 ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสอง กรณี อัลกอริทึมมิวสิกแบ่งคลื่นที่ได้รับการปรับปรุงจากแนวคิดในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ (Modified MUSIC)

$\mathbf{m}_k(t)$ ข้อมูลแถบฐานที่ส่งมา (Base band information) เส้นทางที่ k เวลา t ใด ๆ

$\mathbf{N}$ เซตของสัญญาณรบกวนพื้นหลัง (Background noise) ที่มีคุณสมบัติการะจายเป็นเกาส์ขาวบวก (Additive White Gaussian Noise ; WGS)

Nb จำนวนลำคลื่นตั้งฉาก (Number of Orthogonal beam)

$\mathbf{n}_m(t)$ สัญญาณรบกวนพื้นหลังแบบเกาส์ขาว ที่สายอากาศต้นที่ m ณ เวลา t ใด ๆ

$O(\ )$ ค่าความซับซ้อนในการคำนวณ (Computational complexity)

p_k ค่ากำลัง (Power) ของสัญญาณตกกระทบเส้นทางที่ k เวลา t ใด ๆ

$P(\phi)$ ค่ากำลังงานโดยรวมที่ได้จากสายอากาศ

$P_B(\phi)$ ค่ากำลังงานโดยรวมที่ได้จากสายอากาศ กรณีมีการต่อร่วมของภาคการประมวลผลล่วงหน้า

$P_{MUSIC}(\phi)$ สมการสเปกตรัมของอัลกอริทึมมิวสิก

$\mathbf{P}_{(\ )}$ ตัวปฏิบัติการภาพฉายของเวกเตอร์ (Projection vector operator)

$\mathbf{q}_m$ เวกเตอร์เจาะจง (Eigen vector) หลักที่ m

$\mathbf{R}_{XX}$ เมตริกซ์อัตตะสหสัมพันธ์ของสัญญาณข้อมูลที่ผ่านช่องสัญญาณแล้ว

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$\mathbf{R}_{YY}$ เมตริกซ์อัตตะสหสัมพันธ์ของสัญญาณที่รับได้

$\mathbf{R}_{YY,R}$ เมตริกซ์อัตตะสหสัมพันธ์ของสัญญาณที่รับได้ซึ่งแปลงสู่จำนวนจริงแล้ว

$\mathbf{U}$ เมตริกซ์ยูนิทารี (Unitary matrix) ซึ่งได้มาจากการแยกย่อยเมตริกซ์แบบเอกฐาน

$\mathbf{U}_{BnR}$ เมตริกซ์ยูนิทารีชุดย่อยใน U เฉพาะส่วนที่เป็นปริภูมิสู่ศูนย์ กรณีมีการต่อร่วมของภาคการประมวลผลล่วงหน้า

$\mathbf{U}_{BsR}$ เมตริกซ์ยูนิทารีชุดย่อยใน U เฉพาะส่วนที่เป็นปริภูมิแรงค์ (Rang space) กรณีมีการต่อร่วมของภาคการประมวลผลล่วงหน้า

$\mathbf{U}_{nR}$ เมตริกซ์ยูนิทารีชุดย่อยใน U เฉพาะส่วนที่เป็นปริภูมิสู่ศูนย์

$\mathbf{U}_{sR}$ เมตริกซ์ยูนิทารีชุดย่อยใน U เฉพาะส่วนที่เป็นปริภูมิแรงค์

$\mathbf{V}$ เมตริกซ์เวกเตอร์เจาะจง (Eigen vector)

$\mathbf{V}_N$ เวกเตอร์เจาะจง ชุดย่อยใน V เฉพาะส่วนที่เป็นปริภูมิสู่ศูนย์

$\mathbf{V}_S$ เวกเตอร์เจาะจง ชุดย่อยใน V เฉพาะส่วนที่เป็นปริภูมิแรงค์

$\mathbf{W}$ เวกเตอร์สนามกระตุ้นของสายอากาศ (Excitation vector or Weight vector)

$\mathbf{W}_R$ เวกเตอร์สนามกระตุ้นของสายอากาศซึ่งแปลงสู่จำนวนจริงแล้ว

w_m เวกเตอร์สนามกระตุ้นของสายอากาศต้นที่ m

$x_k(t)$ สัญญาณข้อมูลในเส้นทางที่ k เมื่อผ่านช่องสัญญาณมาแล้ว

$\mathbf{Y}(t,\phi)$ สัญญาณที่รับได้ที่ภาครับทั้งหมด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$\mathbf{Y}'(t,\phi)$ สัญญาณที่รับได้ที่ภาครับทั้งหมด กรณีที่มีการต่อร่วมกับภาคการประมวลผลล่วงหน้า

$\mathbf{y}_k(t,\phi_k)$ สัญญาณในเส้นทางที่ k ซึ่งรับได้ที่ภาครับ

$\alpha_k(t)$ ผลการตอบสนองทางขนาดของช่องสัญญาณในเส้นทางที่ k โดยคุณลักษณะการกระจายเป็นแบบเกาส์ (Gaussian distribution)

γ_m เวกเตอร์ค่าเฟสผิดพลาดแบบสุ่มที่สายอากาศต้นที่ m

$\mathbf{\Lambda}$ เมตริกซ์ของค่าเจาะจง (Eigen value matrix)

$\mathbf{\Lambda}_N$ เมตริกซ์ค่าเจาะจง ชุดย่อยใน $\mathbf{\Lambda}$ ที่สอดคล้องกับ $\mathbf{v}_N$

$\mathbf{\Lambda}_S$ เมตริกซ์งค่าเจาะจงชุดย่อยใน $\mathbf{\Lambda}$ ที่สอดคล้องกับ $\mathbf{v}_S$

λ ความยาวคลื่น (Wave length)

μ ค่าช่วงการแก่วงสูงสุดของเฟสผิดพลาดแบบสุ่มที่สายอากาศแถวลำดับ (Phase variation)

$\mathbf{v}_m$ ค่าเจาะจงตัวที่ m เมื่อ $m = 1, 2, \ldots, M$

$\mathbf{\Xi}$ เมตริกซ์แนวทแยงมุม ซึ่งได้มาจากการแยกย่อยเมตริกซ์แบบเอกฐาน

$\mathbf{\Xi}_{BnR}$ เมตริกซ์ย่อยแนวทแยงมุมใน $\mathbf{\Lambda}$ ที่สอดคล้องกับ $\mathbf{U}_{BnR}$

σ_N^2 กำลังงานของสัญญาณรบกวนพื้นหลัง

ϕ ค่ามุมใด ๆ ในระนาบกวาดวัด (Azimuth plane)

$\hat{\phi}$ ค่ามุมที่ประมาณได้จากอัลกอริทึม (Estimated Direction of arrival)

ϕ_0 ค่ามุมเริ่มต้นที่ใช้กำหนดรูปแบบการแผ่รังสีที่ภาคการประมวลผลล่วงหน้า

$\psi_k(t)$ ผลตอบสนองทางเฟสของช่องสัญญาณในเส้นทางที่ โดย
คุณลักษณะการกระจายเป็นแบบสม่ำเสมอ (Uniform distribution)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย