

# บทที่ ๕

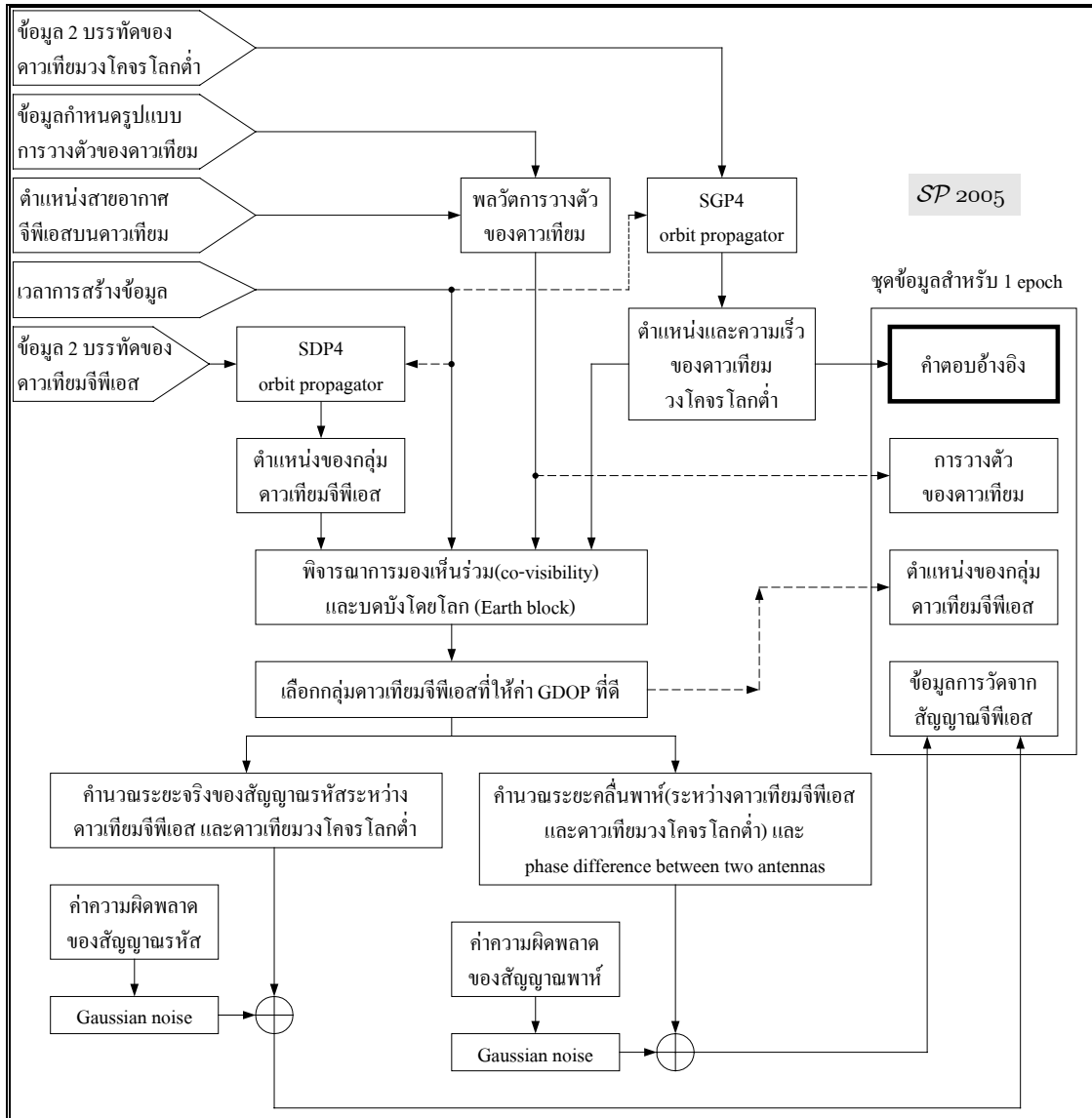
## การจำลองสร้างข้อมูลการวัดสัญญาณจีพีเอส

เนื้อหาในบทนี้เป็นการอธิบายและแสดงถึงโครงสร้างของการจำลองข้อมูลการวัดสัญญาณจีพีเอส รวมถึงข้อมูลการวัดจริงที่ได้มีการบันทึกไว้ดาวเทียมวงโคจรโลกต่ำ ซึ่งโครงสร้างดังกล่าวเป็นส่วนหนึ่งของการพัฒนาในงานวิจัยนี้

เพื่อให้เห็นภาพรวมของการจำลองสร้างข้อมูลการวัดสัญญาณจีพีเอส แผนภาพที่แสดงในรูป ๕.๑ จะแสดงองค์ประกอบย่อยของชุดสร้างข้อมูลการวัดสัญญาณจีพีเอส โดยรายละเอียดของแต่ละองค์ประกอบจะถูกอธิบายในหัวข้อย่อย

จากรูปที่ ๕.๑ ส่วนอินพุตจะเป็นข้อมูลวงโคจรของดาวเทียมจีพีเอสและดาวเทียมวงโคจรโลกต่ำ ที่จะถูกป้อนให้กับส่วนการคำนวณหาตำแหน่งวงโคจร ณ เวลาที่เราสามารถต้องการทราบได้โดยการกำหนดค่าเวลาเริ่มต้นและช่วงเวลาสำหรับสร้างข้อมูลแต่ละชุด นอกจากนี้พื้ข้อมูลดังกล่าว ในกรณีที่

เราต้องการสร้างข้อมูลเฟสความแตกต่างระหว่างสัญญาณพาท์ที่รับได้จากสายอากาศ 2 ชุด จำเป็นที่จะต้องกำหนดตำแหน่งของสายอากาศบนตัวดาวเทียมด้วย อีกทั้งจะต้องกำหนดสมการแบบจำลองพลวัตการวางตัวให้กับระบบตามแผนภาพในรูปที่ ๕.๑



รูปที่ ๕.๑ แผนภาพแสดงการจำลองสร้างข้อมูลการวัดสัญญาณจีพีเอส

เอาท์พุทที่ได้จากชุดการจำลองสร้างข้อมูลการวัดสัญญาณจีพีเอส ณ เวลาหนึ่ง จะประกอบด้วย ตำแหน่งความเร็ว และการวางตัวของดาวเทียมวงโคจรโลกต่ำ ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นคำตอบอ้างอิง สำหรับการคำนวณเรื่องวงโคจรและการวางตัว สำหรับเอาท์พุทของชุดการจำลองสร้างข้อมูลการวัดสัญญาณจีพีเอสที่จะนำไปใช้เป็นข้อมูลดิบสำหรับการประมวลผลในส่วนของตัวกรองประมาณค่านั้น ประกอบด้วย เวลา ตำแหน่งดาวเทียมจีพีเอส ระยะจริงระหว่างดาวเทียมจีพีเอสและดาวเทียมวงโคจรโลกต่ำ และการวางตัวของดาวเทียมวงโคจรโลกต่ำ

## ๕.๑ ข้อมูลอินพุท

### ๕.๑.๑ ข้อมูลสองบรรทัด (two line elements)

ข้อมูลวงโคจรของดาวเทียมจีพีเอสและดาวเทียมวงโคจรโลกต่ำที่นำมาจำลองสร้างวงโคจรขึ้น จะอยู่ในรูปแบบที่เรียกว่า “ข้อมูลสองบรรทัด” [Vallado, 1997] โดยข้อมูลวงโคจรของดาวเทียมดังกล่าวจะถูกป้อนให้กับอัลกอริทึม SDP4 และ SGP4 ที่ใช้สำหรับคำนวณหาตำแหน่งและความเร็วของดาวเทียมทั้งสองตามลำดับ [Hoots and Roehrich, 1980]

ตัวอย่างข้อมูลสองบรรทัดของดาวเทียม UoSat12 และ GPS BIIR-07 (PRN 18) แสดงในตาราง ๕.๑ โดยคำอธิบายรูปแบบของข้อมูลสองบรรทัดแสดงใน [Kelso, 2000]

ตาราง ๕.๑ ข้อมูลสองบรรทัดของดาวเทียม TMSat และ GPS BIIR-07 (PRN 18)

UoSat12	
บรรทัดที่ ๑	1 25693U 99021A 99333.16531384 .00001025 00000-0 17760-3 0 1314
บรรทัดที่ ๒	2 25693 64.5592 2.5188 0027325 325.3773 34.5506 14.73395229 32688
GPS BIIR-07 (PRN 18)	
บรรทัดที่ ๑	1 26690U 01004A 04292.27597423 -.00000075 00000-0 00000+0 0 4429
บรรทัดที่ ๒	2 26690 55.1883 349.1352 0055270 197.8350 162.0288 2.00561836 27270

### ๕.๑.๒ ข้อมูลกำหนดรูปแบบการวางตัวของดาวเทียม

นอกจากการจำลองวงโคจรของดาวเทียมแล้ว ชุดสร้างข้อมูลดังกล่าวยังได้ทำการจำลองการวางตัวของดาวเทียมด้วย โดยมีเป้าหมายเพื่อสร้างข้อมูลเฟสความแตกต่างของสัญญาณพาร์ที่รับโดยสายอากาศ 2 ชุดที่วางห่างกันออกไป ซึ่งข้อมูลเฟสความแตกต่างของสัญญาณพาร์จะเชื่อมโยงกับการวางตัวของเบสไลน์ของสายอากาศ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่า มีความเกี่ยวข้องกับการวางตัวของดาวเทียม

ลักษณะเสถียรภาพการวางตัวของดาวเทียมวงโคจรโลกต่ำที่กำหนดขึ้นในการจำลองจะเป็นแบบ 3 แกน (3-axis stabilised LEO satellite) และมีการวางตัวให้แกน +Z ชี้มาที่โลกตลอดเวลา

(nadir pointing) พร้อมกันนี้ เรายังสามารถระบุค่าโมเมนต์ความเฉื่อย (moment of inertia) ของดาวเทียมให้ชุดจำลองได้ด้วย โดยสมการพลวัตของการวางตัว (attitude dynamics) ใช้ตัวแปรสำหรับการอธิบายการวางตัวที่เรียกว่า “ควอเทอร์เนียน” (quaternion representation) [Wertz, 1978] แทนที่จะใช้มุมออยเลอร์ (Euler angles) เพื่อหลีกเลี่ยงการวางตัวในสภาวะเอกฐาน (singularity) อย่างไรก็ตามเพื่อให้เกิดความเข้าใจเชิงกายภาพต่อการวางตัวของดาวเทียม ค่าอินพุตและเอาต์พุตจะถูกกำหนดในรูปแบบของมุมออยเลอร์ แต่การคำนวณภายในใช้ตัวแปรควอเทอร์เนียน

ตัวอินทิเกรเตอร์ที่ใช้ในการแพร่ของสเทท (state propagation) ทั้งในส่วนของวงโคจร และการวางตัว เป็น รุนเงอ-คัททา (Runge-Kutta integrator) แบบ 5 อันดับ 6 สเตจ [Vallado, 1997]

ตาราง ๕.๒ ข้อมูลที่ใช้กำหนดรูปแบบการวางตัวของดาวเทียม

พารามิเตอร์	ค่าที่กำหนดให้ (เปลี่ยนแปลงได้)
โมเมนต์ความเฉื่อย ( $\text{kgm}^2$ )	
$I_X$	40.0
$I_Y$	40.0
$I_Z$	40.0
ความเร็วเชิงมุมอ้างอิงกับระบบพิกัดดาวเทียม (deg/s)	
$\omega_X$	0.0
$\omega_Y$	-0.059
$\omega_Z$	0.0
มุมการวางตัวเริ่มต้น (deg)	
มุมโรล ( $\phi$ )	0.0
มุมพิชท์ ( $\theta$ )	0.0
มุมยอ ( $\psi$ )	0.0

**๕.๑.๓ ข้อมูลกำหนดตำแหน่งสายอากาศบนดาวเทียม**

ในการรับสัญญาณรหัสเพื่อคำนวณหาระยะเสมือนระหว่างดาวเทียมจีพีเอสและดาวเทียมวงโคจรต่ำ สามารถใช้สายอากาศเพียงชุดเดียว อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอที่จะนำสัญญาณพาห้มาเป็นข้อมูลการวัดโดยเฉพาะการใช้ค่าเฟสแตกต่างของสัญญาณพาห้ที่รับโดยสายอากาศ 2 ชุด อย่างไรก็ตามการที่จะนำข้อมูลเฟสความแตกต่างมานั้น จำเป็นที่จะต้องพิจารณาผลของความยาวเบสไลน์สายอากาศ ถ้ามีความยาวมากกว่าความยาวคลื่นพาห้ จะส่งผลให้จำนวนเต็มของลูกคลื่นของเฟสความแตกต่างไม่สามารถวัดได้ จำเป็นที่จะต้องใช้วิธีทางคณิตศาสตร์เข้าแก้ไขปัญหาดังกล่าว ซึ่งในเชิง

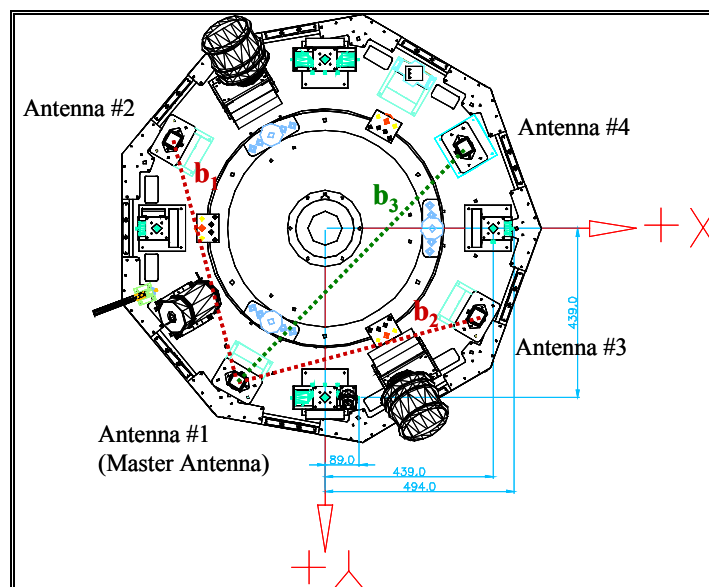
คณิตศาสตร์แล้ว การที่จะคำนวณหาค่าจำนวนเต็มของลูกคลื่นพร้อมกับการหาการวางตัวของเบสไลน์สายอากาศใน 3 มิติ จำเป็นที่จะต้องใช้สายอากาศจำนวน 3 ชุด หรืออีกนัยหนึ่ง เบสไลน์สายอากาศจำนวน 2 ชุดขึ้นไป

จากเหตุผลที่ได้กล่าวอ้างในข้างต้น จึงกำหนดให้มีสายอากาศจีพีเอสจำนวน 3 ชุดวางอยู่บนด้าน  $-Z$  (ชี้ไปยังอวกาศ) โดยวางอยู่ที่พิกัดดังแสดงในตาราง ๕.๓

ตาราง ๕.๓ พิกัดของสายอากาศจีพีเอส

สายอากาศ	พิกัด (หน่วย เมตร)		
	X	Y	Z
สายอากาศหมายเลข ๑ (หลัก)	-0.229	+0.3967	-0.187
สายอากาศหมายเลข ๒	-0.3967	-0.229	-0.187
สายอากาศหมายเลข ๓	+0.3967	+0.229	-0.187

จากตารางข้างต้น พิกัดของสายอากาศทั้งสามได้จำลองมาจากดาวเทียม UoSat-12 [Unwin *et al.*, 1999] โดยสายอากาศหลัก และ สายอากาศหมายเลข ๒ ถูกกำหนดให้เป็นเบสไลน์สายอากาศ **b1** และสายอากาศหลัก และ สายอากาศหมายเลข ๓ ถูกกำหนดให้เป็นเบสไลน์สายอากาศ **b2** โดยกายภาพของเบสไลน์สายอากาศทั้งสองแสดงในรูปที่ ๕.๑



รูปที่ ๕.๑ กายภาพของเบสไลน์สายอากาศทั้งสอง

**๕.๑.๔ ข้อมูลกำหนดเวลาสำหรับการสร้างข้อมูล**

เนื่องจากภายในข้อมูลสองบรรทัดจะระบุเวลาที่มีการสร้างข้อมูลขึ้นจากข้อมูลเรดาร์ของ NORAD ดังนั้นเพื่อให้การจำลองสร้างวงโคจรมีความแม่นยำ จำเป็นที่จะต้องกำหนดเวลาเริ่มต้นของการจำลองสร้างวงโคจร(รวมไปถึงข้อมูลการวัด) ให้สอดคล้องกับเวลาที่ระบุไว้ในข้อมูลสองบรรทัด

นอกจากเวลาเริ่มต้น ช่วงเวลา (interval) สำหรับข้อมูลการวัดแต่ละชุดสามารถระบุได้โดยมีหน่วยเป็นวินาที อีกทั้งสามารถระบุระยะเวลาของการสร้างข้อมูลการวัดได้ โดยมีหน่วยเป็นชั่วโมง ซึ่งเรานิยมสร้างข้อมูลสำหรับการทดสอบเป็นเวลา 12 หรือ 24 ชั่วโมง หรือ 1 สัปดาห์

**๕.๒ ส่วนการคำนวณ**

**๕.๒.๑ การจำลองวงโคจร**

การจำลองวงโคจรของดาวเทียมจีพีเอสและดาวเทียมวงโคจรต่ำของชุดสร้างข้อมูลการวัดในงานวิจัยนี้ได้ใช้อัลกอริทึมการแพร่วงโคจร SDP4 (Simplified Deep Perturbations 4) สำหรับกลุ่มดาวเทียมจีพีเอส และ SGP4 (Simplified General Perturbations 4) สำหรับดาวเทียมวงโคจรต่ำ โดยรายละเอียดแสดงใน [Hoots and Roehrich, 1980] ซึ่งข้อเปรียบเทียบโดยสังเขประหว่าง SGP4 และ SDP4 ดังแสดงในตาราง ๕.๔

ตาราง ๕.๔ ข้อเปรียบเทียบโดยสังเขประหว่าง SGP4 และ SDP4

คุณลักษณะ	SGP4	SDP4
วงโคจร	สำหรับดาวเทียมโคจรใกล้โลก	สำหรับดาวเทียมโคจรห่างจากโลก
คาบเวลาวงโคจร	เหมาะกับคาบเวลาที่น้อยกว่า 225 นาที	เหมาะกับคาบเวลาที่มากกว่า 225 นาที
แบบจำลองโน้มถ่วงโลก	งานวิจัยนำเสนอโดย [Brouwer, 1959]	พิจารณาผลของเซกทอเรียลและเทสซีรอลฮาร์โมนิกสำหรับวงโคจร 12 ชั่วโมง และ 24 ชั่วโมง อีกทั้งรวมผลแรงโน้มถ่วงจากดวงอาทิตย์และดวงจันทร์ [Hujsak, 1979]
แบบจำลองพ่นอวกาศ	ฟังก์ชันความหนาแน่น นำเสนอโดย [Lane et al., 1962]	-

### ๕.๒.๒ การเลือกกลุ่มดาวเทียมจีพีเอส

เมื่อมีการจำลองวงโคจรของกลุ่มดาวเทียมจีพีเอสและดาวเทียมวงโคจรโลกต่ำขึ้น การเลือกกลุ่มดาวเทียมจีพีเอสเพื่อใช้สร้างข้อมูลการวัดจำเป็นต้องพิจารณาในเชิงกายภาพ 2 ประการ ในประเด็นแรกเป็นการพิจารณาการบดบังการมองเห็นโดยโลก โดยจะพิจารณาผลคูณจุดระหว่างเวกเตอร์ที่ชี้จากด้าน (-Z) ของดาวเทียมวงโคจรโลกต่ำไปยังดาวเทียมจีพีเอสแต่ละดวง และ เวกเตอร์ตำแหน่งของดาวเทียมวงโคจรโลกต่ำ ในระบบพิกัดอ้างอิงเดียวกัน โดยสามารถกำหนดมุมเงยของสายอากาศเมื่อเทียบกับระนาบในแนวราบ (local horizon) อาทิเช่น 5 องศา อย่างไรก็ตามในการพิจารณาจะได้พิจารณา ระยะขจัดของเวกเตอร์ที่ชี้จากด้าน (-Z) ของดาวเทียมวงโคจรโลกต่ำไปยังดาวเทียมจีพีเอสแต่ละดวงที่ถูกโปรเจกต์ลงบนเวกเตอร์ตำแหน่งของดาวเทียมวงโคจรโลกต่ำ ถ้าระยะขจัดดังกล่าวมีค่ามากกว่ารัศมีของโลกแล้วแสดงว่าดาวเทียมจีพีเอสดวงดังกล่าวปรากฏขึ้นอีกด้านหนึ่งของโลก

ประเด็นที่สองจะเป็นการพิจารณากายภาพรูปทรงเชิงเรขาคณิตของกลุ่มดาวเทียม (หลังจากถูกคัดเลือกแล้วว่าไม่ได้อยู่อีกซีกด้านหนึ่งของโลก) โดยเป็นที่ทราบดีว่าความผิดพลาดในการระบุตำแหน่งของผู้รับสัญญาณโดยระบบจีพีเอสมีค่าตามสมการ

$$\text{positioning error} = \text{USER} \times \text{DOP} \quad (5.1)$$

โดยที่ USER (User Equivalent Range Error) เป็นค่าความผิดพลาดของสัญญาณจีพีเอสสำหรับรหัส C/A และ DOP (Dilution of Precision) รูปทรงเชิงเรขาคณิตของกลุ่มดาวเทียมจีพีเอสที่เครื่องรับทำการรับสัญญาณอยู่ ณ เวลาหนึ่งๆ

จากสมการข้างต้นจะพบว่า ค่า DOP จะมีผลต่อความผิดพลาดในการระบุตำแหน่งของผู้รับสัญญาณ ดังนั้นในชุดจำลองสร้างข้อมูลการวัดจะจัดเตรียมกลุ่มดาวเทียมจีพีเอสที่ให้ค่า DOP ที่น้อยที่สุดสำหรับแต่ละช่วงเวลา

### ๕.๒.๓ ข้อมูลการวัดสัญญาณจีพีเอส

ข้อมูลการวัดที่สร้างขึ้นจะมีสองแบบได้แก่ ระยะจริงระหว่างดาวเทียมจีพีเอสดวงที่  $j$  และดาวเทียมวงโคจรโลกต่ำ ( $\rho^{(j)}$ ) และค่าเฟสแตกต่างของสัญญาณพาห้ (ในหน่วยของระยะทาง) ระหว่างสายอากาศสองชุดที่รับสัญญาณจากดาวเทียมจีพีเอสดวงที่  $j$  ( $\bar{r}_{RX}^{(j)}$ ) โดยเป็นไปตามสมการ

$$r^{(j)} = \|\mathbf{r}_{\text{GPS}}^{(j)} - \mathbf{r}_{\text{LEO}}^{(j)}\|_R \quad (5.1)$$

$$\bar{r}_{RX}^{(j)} = \text{modulo}(\mathbf{b}_B^T \mathbf{A} \mathbf{s}_R^{(j)}) \quad (5.2)$$

โดยที่  $\mathbf{r}_{\text{GPS}}^{(j)}$  เป็นเวกเตอร์ตำแหน่งดาวเทียมจีพีเอส ดวงที่  $j$  ในระบบพิกัดอ้างอิง

$\mathbf{r}_{\text{LEO}}^{(j)}$  เป็นเวกเตอร์ตำแหน่งดาวเทียมวงโคจรโลกต่ำ ในระบบพิกัดอ้างอิง

$\mathbf{b}_B$  เป็นเวกเตอร์ของเบลล์ไลน์สายอากาศ ในระบบพิกัดดาวเทียม

$\mathbf{A}$  เป็นเมทริกซ์การวางตัวของระบบพิกัดดาวเทียมวงโคจรโลกต่ำเทียบกับระบบพิกัดอ้างอิง

$\mathbf{s}_R^{(j)}$  เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในระบบพิกัดอ้างอิง ที่ชี้ไปยังดาวเทียมจีพีเอสดวงที่  $j$

#### ๕.๒.๔ ค่าความผิดพลาดข้อมูลการวัดสัญญาณจีพีเอส

ในการสร้างข้อมูลการวัดสัญญาณจีพีเอส เราควรกำหนดให้ข้อมูลดังกล่าวมีส่วนผสมของค่าความผิดพลาดได้ โดยมีวัตถุประสงค์ให้ข้อมูลดังกล่าวมีค่าใกล้เคียงลักษณะการใช้งานจริงมากที่สุด อย่างไรก็ตามไม่มีใครสามารถระบุในเชิงวิเคราะห์ได้ว่าฟังก์ชันของค่าความผิดพลาดดังกล่าวเป็นอะไร

การทดสอบระบบในรอบปีที่ ๑ ได้สมมุติให้ฟังก์ชันของค่าความผิดพลาดเป็นฟังก์ชันที่มีการแจกแจงแบบปกติหรือแบบเกาส์เซียน (normal or Gaussian distribution function) ซึ่งการอิมพีเม้นท์ฟังก์ชันดังกล่าวขึ้นเองไม่ได้สะดวกหรือง่ายตายเหมือนกับที่มีใช้งานในโปรแกรมสำเร็จรูปทั่วไป เนื่องจากการอินทิเกรตฟังก์ชันการแจกแจงดังกล่าวไม่สามารถทำได้โดยตรง [Brown and Hwang, 1997]

ในงานวิจัยนี้ได้พิจารณาฟังก์ชันความหนาแน่นสองมิติแบบปกติ (2 dimensional normal density function) พร้อมกับการแปลงจาโคเบียน (Jacobian transformation) เพื่อแปลงฟังก์ชันดังกล่าวมาอยู่ในระบบพิกัดเชิงขั้ว ทำให้การอินทิเกรตฟังก์ชันสองมิติดังกล่าวสามารถทำได้ จากนั้นเราจะเลือกเอาที่พหุเพียงมิติเดียวมาสร้างเป็นสัญญาณค่าความผิดพลาด [Brown and Hwang, 1997]

ค่ารากกำลังสองเฉลี่ย (RMS: root mean squares) ของค่าความผิดพลาดสำหรับสัญญาณรหัส และ สัญญาณพาห้ แสดงในตารางที่ ๕.๕ และ ๕.๖ ตามลำดับ



ตาราง ๕.๕ งบประมาณความผิดพลาดของสัญญาณจีพีเอส สำหรับรหัส C/A [Kaplan, 1996]

แหล่งกำเนิดความผิดพลาด	ค่าความผิดพลาด (เมตร)
<b>ส่วนของอวกาศ</b>	
เสถียรภาพของฐานเวลาของดาวเทียมจีพีเอส	3.0
วงโคจรของดาวเทียมจีพีเอส	1.0
อื่นๆ อาทิเช่น ผลของการแผ่ความร้อนจากดวงอาทิตย์	0.5
<b>ส่วนของสถานีควบคุม</b>	
ค่าทำนายตำแหน่งดาวเทียม (Ephemeris)	4.2
อื่นๆ อาทิเช่น การควบคุมระบบขับเคลื่อนบนดาวเทียม	0.9
<b>ส่วนของเครื่องรับและผู้ใช้</b>	
สัญญาณรบกวนภายในเครื่องรับ	1.5
มัลติพาท	2.5
อื่นๆ อาทิเช่น ไป้อัศจรรย์ระหว่างช่องรับสัญญาณ	0.5
<b>ผลรวม UERE (User Equivalent Range Error)</b>	<b>6.8</b>

ตาราง ๕.๖ งบประมาณความผิดพลาดของเฟสแตกต่างสัญญาณพาห้ [Purivigraipong, 2000]

แหล่งกำเนิดความผิดพลาด	ค่าความผิดพลาด (มม)
มัลติพาท [SMR] = 13 dB	~ 7.0
สัญญาณรบกวนภายในเครื่องรับ ( $T_{int} = 1 \text{ msec}$ , $B_n = 10 \text{ Hz}$ , [ $C/N_0$ ] = 45 dB-Hz)	~ 0.7
ไลน์ไบอัส (Line bias)	ขึ้นอยู่กับความยาวของสายนำสัญญาณ และ โครงสร้างของวงจรขยายสัญญาณรบกวนต่ำ (LNA : low noise amplifier) รวมไปถึง ภาครับสัญญาณคลื่นวิทยุของเครื่องรับจีพี เอส
<b>ผลรวม</b>	<b>~ 7.0</b>

### ๕.๓ ข้อมูลเอาต์พุต

ข้อมูลเอาต์พุตของชุดจำลองการสร้างข้อมูลการวัดสำหรับช่วงเวลาหนึ่งๆ จะประกอบด้วย

1. เวลา
2. จำนวนดาวเทียมจีพีเอส ( $j$ )
3. ข้อมูลการวัดระยะเสมือน (ระยะจริงรวมด้วยค่าความผิดพลาด) ( $\rho^{(j)}$ )
4. ข้อมูลการวัดเฟสความแตกต่างของสัญญาณพาห้ จากสองเบสไลน์สายอากาศ  
( $\bar{r}_{RX\_b1}^{(j)}, \bar{r}_{RX\_b2}^{(j)}$ )
5. คำตอบ : ตำแหน่งและความเร็วของดาวเทียมวงโคจรโลกต่ำ
6. คำตอบ : มุมการวางตัวของดาวเทียม (โรล พิชท์ และ ยอ)