

# เทคโนโลยีระบบนำวิถีสำหรับจรวด

พลิศวรร รัตนสวัสดิ์

## 1. คำนำ

การใช้งานจรวดด้านความมั่นคงนับเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับประเทศต่างๆ ในโลกเนื่องจากเป็นอาวุธที่มีประสิทธิภาพการทำลายสูง จึงเป็นเครื่องมือสำคัญอย่างหนึ่งในการวางแผนการด้านยุทธศาสตร์ จรวดนั้นสามารถถูกออกแบบเพื่อประยุกต์ใช้งานได้ในสถานการณ์ต่างๆกัน มีตั้งแต่ระยะใกล้เพียงไม่กี่กิโลเมตรไปจนถึงระยะทำการไกลมากข้ามทวีป ยิ่งระยะทำการยาวมากเท่าไรก็โอกาสที่จรวดจะพลาดเป้าก็จะมีมากขึ้น เนื่องจากจรวดแต่ละลูกมีมูลค่าสูง การใช้งานแต่ละครั้งควรจะใช้งานให้ได้ตรงตามเป้าหมายที่ตั้งไว้เพื่อให้คุ้มค่าต่อการลงทุนในการจัดหา เหล่าวิศวกรผู้ออกแบบจรวดจึงต้องหาวิธีการที่จะเพิ่มความแม่นยำของจรวดให้มากขึ้น วิธีการที่เป็นที่นิยมก็คือการใช้งานจรวดนำวิถีซึ่งเห็นได้มากในปัจจุบัน การใช้งานระบบนำวิถีจึงมีบทบาทในการเพิ่มความแม่นยำของจรวดเป็นอย่างมาก ซึ่งเรื่องนี้เป็นเรื่องที่น่าสนใจ ในบทความนี้จึงได้ทำการรวบรวมเทคโนโลยีด้านการนำวิถีของจรวดจากอดีตจนถึงปัจจุบันอย่างกว้างๆเอาไว้สำหรับที่ผู้สนใจจะนำไปเป็นจุดเริ่มต้นในการศึกษาค้นคว้าเพิ่มเติมในรายละเอียดได้ต่อไป

## 2. จรวด

จรวด คือวัตถุหรือยานพาหนะลักษณะหนึ่งซึ่งหลังจากที่ถูกปล่อยออกไปแล้วนั้นจะมีการขับเคลื่อนโดยใช้หลักการตามกฎข้อที่สองของนิวตัน นั่นคือมีแรงขับเคลื่อนกระทำที่ตัวจรวดทำให้เกิดความเร่ง จรวดหลายชนิดจะถูกยิงจากท่อหรือลำกล้องเช่นเดียวกับกระสุนปืน แต่ทั้งสองมีข้อแตกต่างกันตรงที่ กระสุนปืนมีแต่แรงดันเท่านั้น แรงนี้เป็นแรงระเบิดของดินปืนในลำกล้องเป็นตัวผลักให้กระสุนพุ่งออกไป แต่สำหรับจรวดจะยังคงมีแรงกระทำที่จรวดอีกระยะหนึ่งหลังจากที่ถูกปล่อยออกไปแล้ว การทำงานของจรวดโดยทั่วไปจะมีลักษณะเดียวกับเครื่องบิน คือมีแรงที่เกิดจากระบบขับเคลื่อนเป็นตัวทำให้จรวดเคลื่อนที่ไป ต่างกันเพียงที่จรวดไม่มีผู้ขับชื้ออยู่บนตัวยานพานะนั้น

ในขณะที่จรวดพุ่งออกไปนั้น ทิศทางจะถูกบังคับโดยใช้แรงที่กระทำกับตัวจรวดและครีบูที่อยู่จรวด ตัวอย่างของแรงเหล่านี้ได้แก่ แรงขับเคลื่อน (Trust) แรงโน้มถ่วง (Gravity) และ แรงลมปะทะ (Aerodynamics) เป็นต้น จากกฎข้อที่สองของนิวตัน ผลรวมของแรงเหล่านี้จะแปรผันตรงกับความเร่ง นั่นคือ

$$\sum \vec{F} = m\vec{a}$$

โดยที่  $m$  คือ มวลของจรวด

$\vec{F}$  คือ ผลรวมของแรง

$\vec{a}$  คือ ความเร่งของจรวดที่เกิดจากแรง

ถ้าเราสามารถกำหนดแรงที่กระทำกับจรวดตลอดช่วงเวลาที่บินอยู่ได้ ก็สามารถที่จะกำหนดให้จรวด พุ่งไปในทิศทางที่ต้องการได้ ด้วยความเร่งที่เราต้องการได้ ทำให้สามารถกำหนดจุดที่จรวดจะตกลงได้ด้วย การกำหนดแรงกระทำนี้มีหลายวิธีการ วิธีหนึ่งได้แก่การคำนวณล่วงหน้าถึงทิศทาง ความเร็ว ตำแหน่งเริ่มต้นของจรวด วิธีนี้จะเห็นได้ในจรวดแบบพื้นฐาน เช่น บั้งไฟ จรวดขวดน้ำ หรือจรวดที่มีระยะทำการใกล้ การออกแบบจรวดประเภทนี้มีเพียงความยุ่งยากในการออกแบบรูปร่างของจรวด และการออกแบบระบบขับเคลื่อน แต่จะไม่ต้องมีระบบเซนเซอร์และอิเล็กทรอนิกส์ที่ยุ่งยากอย่างอื่น แต่มีข้อเสียคือมีความแม่นยำน้อย และมีระยะทำการสั้นเนื่องจากมีความแปรผันของสภาพแวดล้อมที่จะนำไปใช้งานซึ่งมักจะ ไม่ตรงกับสิ่งแวดล้อมที่จรวดถูกออกแบบมาให้ใช้ อีกวิธีหนึ่งในการกำหนดแรงกระทำต่อจรวด ได้แก่การควบคุมแรงของจรวดในขณะที่บินอยู่ให้ปรับเปลี่ยนไปตามลักษณะการเคลื่อนที่ โดยค่าที่ปรับนั้นอ้างอิงกับค่าที่อ่านได้จากระบบเซนเซอร์ที่ทำหน้าที่อ่านค่าการเคลื่อนที่ของจรวด จรวดเหล่านี้เรียกว่าจรวดนำวิถี ซึ่งมีข้อดีคือมีความแม่นยำมากขึ้น แต่ก็ต้องมีการใช้งานระบบเซนเซอร์และระบบควบคุมต่างๆเพิ่มขึ้นทำให้ต้องมีขนาดใหญ่และมีน้ำหนักมากขึ้น นอกจากนี้ทำให้มีราคาสูงมากขึ้นอีกด้วย อย่างไรก็ตามจรวดที่สร้างขึ้นในปัจจุบันสำหรับใช้ในกิจการความมั่นคง ส่วนใหญ่จะเป็นจรวดนำวิถีกันมาก เนื่องจากมีความแม่นยำ ซึ่งเอื้อในวางแผนด้านยุทธวิธีและยุทธศาสตร์ได้ง่ายกว่า

### 3. จรวดนำวิถี [1]

เมื่อกล่าวถึงลักษณะการทำงานของจรวดนำวิถีนั้น สามารถจัดได้ว่ามีลักษณะเดียวกันกับการทำงานของยานพาหนะประเภทเครื่องบิน เนื่องจากการทำงานของยานพาหนะประเภทนี้ การขับเคลื่อนจะเกิดจากแรงขับ (Trust) ที่มีแหล่งกำเนิดอยู่บนตัวยานพาหนะเอง และมีการควบคุมทิศทางเคลื่อนที่ด้วยปีก หรือ แรงขับขนาดเล็ก (Trust vanes) เราสามารถเปรียบเทียบจรวดว่าเป็นประเภทหนึ่งของยานบินไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicle หรือ UAV) อย่างไรก็ตามจรวดมีข้อแตกต่างจากเครื่องบินอยู่หลายประการ ประการที่หนึ่ง จรวดโดยส่วนใหญ่จะใช้ในการกิจด้านความมั่นคง ซึ่งมักจะมีข้อบังคับไม่ให้มีความผิดพลาดในการเคลื่อนที่เข้าสู่เป้าหมายมากเกินไประดับที่ยอมรับได้เพื่อไม่ต้องการก่อให้เกิดความเสียหายต่อสิ่งอื่นที่ไม่เกี่ยวข้อง กับเป้าหมาย แต่อย่างไรก็ดี จรวดมักจะถูกจำกัดในเรื่องความสามารถในการขับตัวเนื่องจากมีข้อจำกัดด้านปริมาณของแรงขับ

ประการต่อมาจรวดมักจะ ไม่ถูกออกแบบให้ลงจอดหลังจากที่ถูกปล่อยออกไป แต่มักจะถูกทำลายทิ้งเสมอในภารกิจ ด้วยเหตุผลนี้จึงไม่มีผู้ขับขี้อุปกรณ์จรวดเช่นเดียวกับยานพาหนะอื่น นอกจากนี้จรวดเมื่อเคลื่อนที่ออกไปแล้ว การควบคุมที่ตัวจรวดจะกระทำ ได้ยากกว่าเครื่องบิน เนื่องจากระยะเวลาการทำงานของจรวดจะสั้นกว่า แต่มีความเร็วในการเคลื่อนที่มากกว่า ด้วยเหตุผลเหล่านี้ทำให้การเคลื่อนที่ของจรวดเพื่อให้เข้าสู่เป้าหมายจำเป็นต้องมีความแม่นยำ และความแม่นยำนี้ขึ้นอยู่กับ การควบคุมของระบบนำวิถีของจรวดนั้น

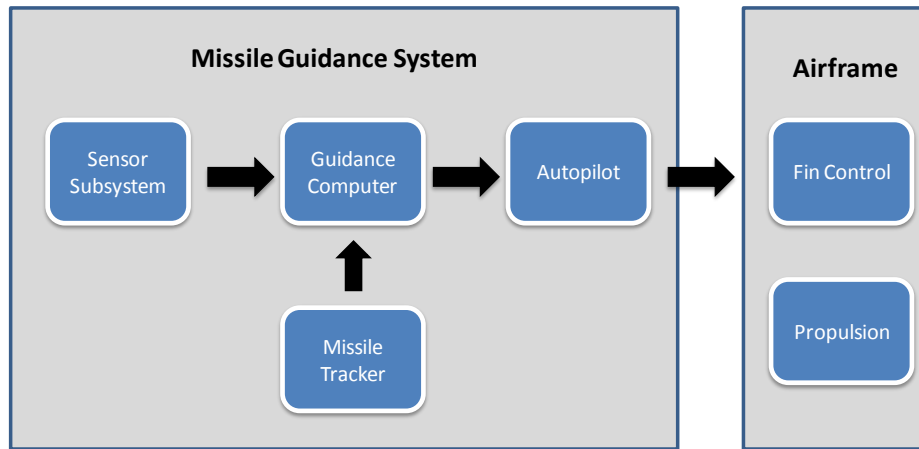
#### 4. ระบบนำวิถีของจรวด [2]

ระบบนำวิถี กล่าวโดยง่ายคือระบบที่ทำหน้าที่พาจรวดมุ่งไปสู่เป้าหมายอย่างแม่นยำ ระบบนำวิถีนี้มีอยู่หลายชนิดซึ่งบางชนิดนั้นระบบจะอยู่ในตัวของจรวดเลย แต่บางชนิดก็อยู่ภายนอกจรวด การออกแบบระบบนำวิถีมีจะคำนึงถึงว่าจุดมุ่งหมายของจรวดนั้นคืออะไร เราสามารถแบ่งชนิดของระบบนำวิถีได้หลายวิธี วิธีที่ง่ายที่สุด คือการแบ่งตามการเคลื่อนที่ของเป้า นั่นคือ ระบบนำวิถีสำหรับเป้าที่อยู่นิ่ง กับระบบนำวิถีติดตามเป้าที่เคลื่อนที่ แต่วิธีการที่ตีกว่านั้นคือการแบ่งชนิดจรวดตามลักษณะของการกำหนดเป้าหมาย อันได้แก่ การกำหนดเป้าหมายเป็นวัตถุ (Go-Onto-target หรือ GOT) และ การกำหนดเป้าหมายเป็นตำแหน่งอ้างอิง (Go-Onto-Location-In-Space หรือ GOLIS) [3] เนื่องจากระบบนำวิถีแต่ละชนิดมีข้อดีและข้อเสียต่างกัน ในจรวดบางลูกจึงมีระบบนำวิถีมากกว่าหนึ่งชนิดทำงานร่วมกัน เพื่อป้องกันการถูกรบกวนการทำงานจากอีกฝ่ายตรงข้าม (Countermeasure) นั่นคือขณะที่ระบบหนึ่งถูกรบกวนหรือไม่สามารถทำงานได้ ระบบอื่นก็ยังสามารถที่จะช่วยพาจรวดให้เคลื่อนที่ไปได้อย่างถูกต้อง

หลักการการทำงานของจรวดนำวิถีโดยทั่วไปสามารถแสดงได้ตามรูปที่ 1 ในระบบนำวิถีจะประกอบไปด้วย :-

- ระบบเซนเซอร์ (Sensor subsystem)
- ระบบตรวจสอบตำแหน่งของตัวจรวด (Missile tracker)
- ส่วนประมวลผลระบบนำวิถี หรือ คอมพิวเตอร์ระบบนำวิถี (Guidance computer)
- ส่วนควบคุมการบิน (Autopilot)

ระบบควบคุมและนำวิถีจะรับข้อมูลจากระบบเซนเซอร์ และตำแหน่งของตัวจรวด เพื่อนำมาประมวลผลว่าควรจะให้จรวดเคลื่อนที่ไปอย่างไร ผลจากการประมวลผลนี้จะถูกส่ง ไปให้ส่วนควบคุมการบินเพื่อให้บิน ไปยังจุดมุ่งหมายที่ต้องการ



รูปที่ 1. หลักการทำงานของจรวดนำวิถีโดยทั่วไป

#### 4.1. ระบบนำวิถีแบบกำหนดเป้าหมายเป็นวัตถุ (GOT)

ระบบนำวิถีแบบ GOT นั้นเป็นการมองที่ตัววัตถุเป็นสำคัญ เช่น กำหนดเป้าหมายเป็นรถถัง หรือ เครื่องบิน ดังนั้นจรวดจะทำการตามหาวัตถุที่เป้าหมาย (Track) ด้วยวิธีใดวิธีหนึ่ง แล้วทำการเกาะติดกับเป้าหมายที่เจอ (Lock on) สำหรับระบบนำวิถีแบบ GOT นั้นส่วนที่เป็นเซนเซอร์นำวิถี จะเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับจับสัญญาณที่ปล่อยออกมาจากเป้าหมาย เรียกว่า ระบบค้นหาและติดตามเป้าหมาย (Target tracker) หรือ Seeker

ระบบนำวิถีแบบ GOT นั้นสามารถแบ่งได้เป็นสองแบบ ได้แก่ :-

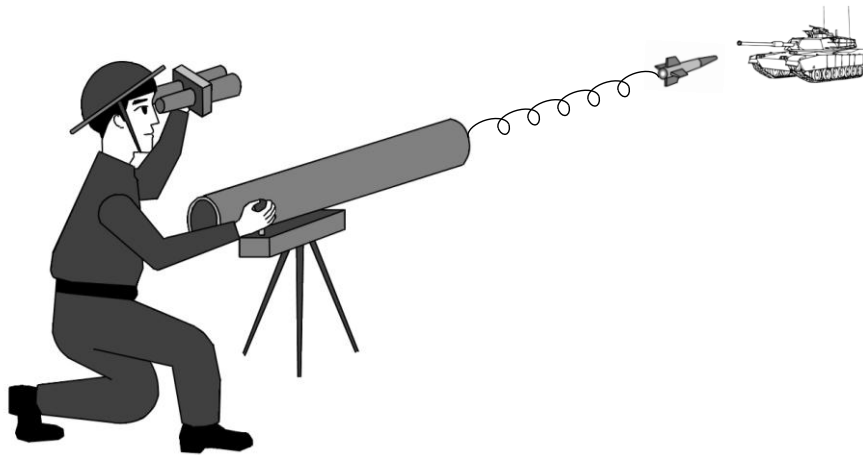
- ระบบนำวิถีระยะไกล (Remote Control Guidance) ในระบบนี้ส่วนคอมพิวเตอร์ควบคุมนำวิถีและระบบตรวจสอบตำแหน่งจรวดจะอยู่ที่ตัวฐานปล่อย
- ระบบนำวิถีแบบ Homing (Homing Guidance) ในระบบนี้ส่วนคอมพิวเตอร์จะติดอยู่กับตัวจรวด

##### 4.1.1. ระบบนำวิถีระยะไกล Remote control guidance

ในระบบนำวิถีแบบนี้ จะมีการส่งผ่านข้อมูลระหว่างจรวดและคอมพิวเตอร์ควบคุมที่อยู่พื้นฐานปล่อย การส่งข้อมูลสามารถทำได้โดยใช้เรดาร์ คลื่นวิทยุ หรือสายส่งสัญญาณ วิธีใดวิธีหนึ่ง ข้อมูลที่รับส่งนี้ ส่วนหนึ่งจะเป็นสัญญาณสำหรับควบคุมปีกหรือ Trust vanes ของจรวดเพื่อทำการขยับเข้าหาเป้าหมาย นอกจากนี้ตัวจรวดอาจจะมีการส่งข้อมูลเซนเซอร์กลับมาให้ที่ตัวคอมพิวเตอร์ด้วย ระบบนำวิถีระยะไกลที่ใช้กันทั่วไปเรียกว่าวิธี Command to Line of Sight ซึ่งแบ่งได้เป็นสองลักษณะ คือ Manual และ Semi-automatic ส่วนระบบที่เป็น Full Automatic นั้น จะไม่มีการควบคุมจากระยะไกล เราเรียกระบบแบบนี้ว่า Homing ซึ่งจะอธิบายต่อไปในหัวข้อ 4.1.2

#### 4.1.1.1. Manual Command to Line of Sight หรือ MCLOS

ระบบ MCLOS เป็นระบบนำวิถีในยุคแรก ในระบบนี้อาศัยการผู้ยิงทำหน้าที่เป็นทั้ง Target tracker และ Missile tracker ในขณะเดียวกัน และยังมีหน้าที่ควบคุมการเคลื่อนไหวกองจรวดด้วย ผู้ยิงจะทำการควบคุมการเคลื่อนไหวกองจรวดผ่านจอยสติค และทำการเล็งเป้าหมายและติดตามตำแหน่งของจรวดผ่านกล้องส่องทางไกล ซึ่งที่ตัวจรวดจะมีอุปกรณ์สำหรับส่งสัญญาณให้ผู้ยิงมองเห็นได้ชัดในระยะไกลเพื่อใช้ในการติดตามตำแหน่ง โดยทั่วไปอุปกรณ์นี้จะเป็นพวก Magnesium flare ซึ่งถูกติดตั้งอยู่ที่ส่วนท้ายของจรวด การควบคุมตำแหน่งของจรวดทำได้โดยการควบคุมผ่านจอยสติค สัญญาณคำสั่งจะถูกส่งผ่านสายตัวนำ เช่น ลวดทองแดง ไปยังตัวจรวดเพื่อควบคุมปีก ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2. ลักษณะของจรวดแบบ MCLOS

ข้อเสียของระบบ MCLOS มีอยู่หลายข้อดังต่อไปนี้

- ผู้ยิงจะต้องได้รับการฝึกหัดเป็นอย่างดี
- ผู้ยิงจะต้องมีสมาธิมาก เพราะต้องคอยควบคุมจรวด พร้อมทั้งติดตามตำแหน่งของเป้าหมายในเวลาเดียวกัน
- การที่ผู้ยิงจะต้องคอยเล็งอยู่ตลอดเวลาจนกว่าจรวดจะเข้าเป้าหมาย ทำให้ตกเป็นเป้าของการโจมตีกลับได้
- ลักษณะของพื้นที่จะต้องเอื้อต่อการทำการ นั่นคือต้องมองเห็นเป้าหมายได้ชัดในแนวสายตา

#### 4.1.1.2. Semi-Automatic Command to Line of Sight หรือ SACLOS

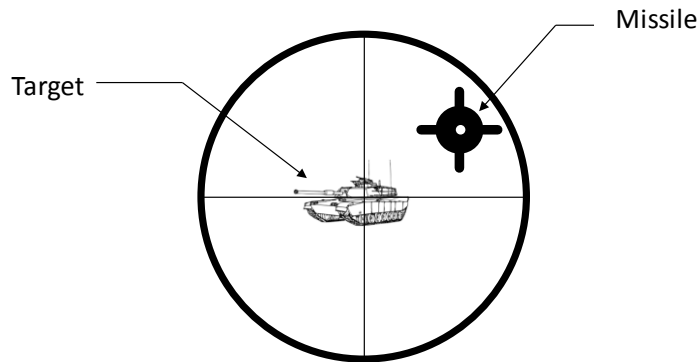
ในระบบ SACLOS ภาระของผู้ยิงจะลดลงจาก MCLOS นั่นคือผู้ยิงมีหน้าที่แค่เล็งศูนย์เล็งไว้ที่เป้าหมายตลอดเวลา ซึ่งคอมพิวเตอร์นำวิถีจะเป็นผู้บังคับจรวดให้ตามไปที่ตำแหน่งที่เล็งเอาไว้เอง อย่างไรก็ตามผู้ยิงยังคงต้องคอยเล็งไปที่เป้าหมายตลอดเวลาจนกว่าจรวดจะเข้าเป้า ระบบ SACLOS มีการใช้งานสองแบบ ได้แก่ :-

#### 4.1.1.2.1. Wire and radio-guided SACLOS

ในวิธีนี้ จรวดจะถูกติดตามตำแหน่งโดยมุมหมุนของเครื่องเล็ง ซึ่งตำแหน่งของจรวดจะถูกนำมาคำนวณโดยคอมพิวเตอร์นำวิถี จากนั้นคอมพิวเตอร์จะออกคำสั่งให้จรวดปรับตำแหน่งตัวเองเพื่อให้อยู่ในศูนย์กลางของเครื่องเล็งอยู่ตลอดเวลา คำสั่งที่ออกโดยคอมพิวเตอร์นำวิถีนั้นถูกส่งผ่านโดยใช้สายสัญญาณ อาจจะเป็นสายทองแดงหรือสาย Fiber optic นอกจากสายสัญญาณแล้ว คำสั่งควบคุมอาจจะถูกส่งโดยใช้สัญญาณวิทยุแทนก็ได้ ซึ่งทั้งสองวิธีนี้มีข้อดีข้อเสียต่างกัน สายสัญญาณมีข้อเสียคือ ตัวบรรจุสายจะถูกบรรจุอยู่ที่ตัวจรวดทำให้มีความทะอะทะเพิ่มน้ำหนักจรวด มีระยะทำการจำกัดอันเนื่องมาจากความยาวสาย นอกจากนี้ตัวสายยังมีความเกะกะและอาจจะถูกตัดขาดได้ ในขณะที่ข้อเสียของสัญญาณวิทยุคือสามารถถูกรบกวน (jam) ได้

นอกจากการติดตามตำแหน่งโดยใช้มุมหมุนของเครื่องเล็งแล้ว อีกวิธีหนึ่งที่ใช้ติดตามตำแหน่งของจรวดคือใช้สัญญาณแสง ส่งออกมาจากส่วนท้ายของจรวดในลักษณะเดียวกับ MCLOS แล้วใช้อุปกรณ์ตรวจจับตำแหน่งของลำแสงนี้ที่กล้องเล็ง เมื่อสามารถตรวจจับตำแหน่งได้ คอมพิวเตอร์นำวิถีก็จะส่งคำสั่งควบคุมเพื่อให้ตำแหน่งของจรวดที่ตรวจจับได้อยู่กึ่งกลางแนวเล็ง อนึ่งสัญญาณแสงนี้อาจจะใช้เป็นรังสี Infrared แทนได้

รูปที่ 3 แสดงตัวอย่างของภาพที่มองเห็นเมื่อมองผ่านเครื่องเล็งของจรวดแบบ SACLOS ชนิดหนึ่ง จากภาพนี้จะเห็นเป้าหมายซึ่งผู้ยิงจะต้องเล็งอยู่ตลอดเวลา ผู้ยิงจะไม่สนใจจรวดถึงแม้จะมองเห็นได้จากกล้องเล็งก็ตาม

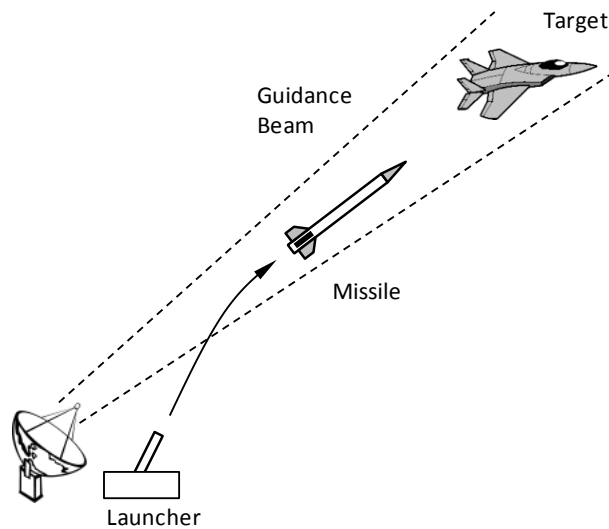


รูปที่ 3. การเล็งเป้าหมายในระบบ SACLOS เมื่อมองผ่านกล้องเล็ง

#### 4.1.1.2.2. Beam-riding SACLOS

Beam-riding SACLOS แปลตรงตัวว่าการขี่ลำแสง ในวิธีนี้นั้น จะมีการฉายลำแสงสัญญาณจากตัวเครื่องเล็งไปยังเป้าหมาย สัญญาณที่นิยมใช้ได้แก่ เรดาร์ลำแคบ และ เลเซอร์ ที่ตัวจรวดจะมีอุปกรณ์สำหรับตรวจจับลำแสงสัญญาณนี้ และ

พยายามจะจัดตัวเองให้อยู่ตรงกลางลำสัญญาณตลอดเวลา วิธีที่ใช้ในการตรวจจับลำแสงนั้น ทำได้โดยใช้อุปกรณ์รับสัญญาณติดตั้งที่ส่วนท้ายของจรวด ตัวรับสัญญาณนี้จะแบ่งออกเป็น 4 quadrants ซึ่งทิศทางของลำแสงจะทำให้ความเข้มของสัญญาณที่จับได้มีค่าต่างกันในแต่ละ quadrant คอมพิวเตอร์นำวิถีจะทำการปรับวิถีของตัวจรวดให้ความเข้มของลำแสงสัญญาณมีค่าเท่ากันทุก quadrant นั่นก็คือจรวดอยู่กลางลำแสงนั่นเอง วิธีนี้มีความแม่นยำที่ระยะทางจำกัดเนื่องจากลำแสงจะแผ่ออกไปเป็นรูปกรวย โดยที่ยอดกรวยอยู่ที่เครื่องยิง ส่วนด้านที่อยู่ทางเป้าหมายจะเป็นปากกรวย มีลักษณะกว้างทำให้ระยะทางไกลๆ จรวดจะไม่สามารถทราบตำแหน่งที่ต้องการที่แท้จริงได้ รูปที่ 4 แสดงลักษณะการทำงานของจรวดแบบ Beam-riding SACLOS



รูปที่ 4. การนำวิถีด้วยวิธี Beam-riding SACLOS

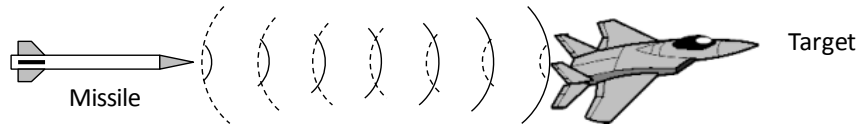
ในปัจจุบันลำแสงที่นิยมใช้จะเป็นเลเซอร์ เนื่องจากจากสัญญาณเรดาร์นั้นสามารถถูกดักจับได้ง่าย

#### 4.1.2. ระบบนำวิถีแบบ Homing [4]

ในระบบนำวิถีแบบ Homing จะมี Target tracker (หรือ Seeker), Missile tracker, และคอมพิวเตอร์นำวิถีติดตั้งอยู่บนตัวจรวดเลย ดังนั้นผู้ยิงจึงไม่จำเป็นต้องเล็งหลังจากที่เล็งไปแล้ว ผู้ยิงเพียงแต่ทำการ “ลือก” เป้าหมายที่ต้องการทำลาย จากนั้นจรวดจะทำการตรวจจับเป้าหมายนั้นต่อด้วยตนเอง แล้วใช้สมการทางคณิตศาสตร์นำร่องเพื่อพุ่งไปสู่เป้าหมาย เช่น Proportional Navigation เป็นต้น จรวดที่ทำงานในลักษณะนี้เรียกว่า Fire-and-forget ข้อดีของระบบนำวิถีแบบนี้คือผู้ยิงจะมีความปลอดภัยมากกว่า เนื่องจากสามารถเคลื่อนย้ายตำแหน่งของตนหลังจากยิงออกไปแล้วได้ แต่ข้อเสียคือ จะจรวดจะสามารถถูกเบี่ยงเบนทิศทางไปยังเป้าหมายหลอกได้ ระบบ Seeker

#### 4.1.2.1. Active Homing

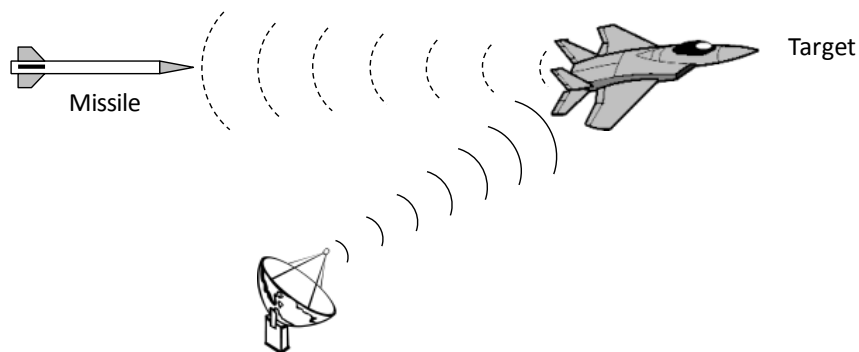
ระบบนำวิถีแบบ Active homing นั้น จะมีเครื่องส่งสัญญาณเรดาร์ หรือ สัญญาณอย่างอื่นติดอยู่ที่ตัวจรวดเอง เพื่อทำหน้าที่ส่งสัญญาณออกไปสะท้อนกับเป้าหมายเพื่อให้ระบบ Target tracker ที่อยู่ที่ตัวจรวดเช่นกันนั้นมองเห็นเป้าหมายได้ ข้อดีคือระบบนำวิถีนี้สามารถทำงานได้โดยไม่ต้องอาศัยข้อมูลจากภายนอก แต่วิธีนี้มีข้อจำกัดในเรื่องระยะเวลาการทำงาน เนื่องจากขนาดของอุปกรณ์ที่ใช้ถูกจำกัดด้วยขนาดของตัวจรวด รูปที่ 5 แสดงการทำงานของจรวดแบบ Active homing



รูปที่ 5. ระบบนำวิถีแบบ Active Homing

#### 4.1.2.2. Semi-active Homing

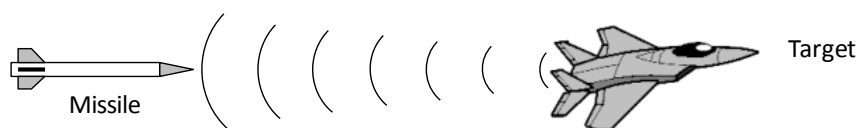
ระบบนำวิถีแบบ Semi-active homing จะมีหลักการทำงานคล้ายกับ Active homing แต่จะแตกต่างกันตรงที่ เครื่องส่งสัญญาณจะไม่ได้อยู่ที่ตัวจรวด แต่จะไปอยู่ที่อื่นแทน เช่น อยู่บนภูเขาใกล้เคียง สัญญาณที่ส่งออกมาจากเครื่องส่งจะสะท้อนกับเป้าหมายมาเข้าที่เครื่องรับที่อยู่ที่ตัวจรวด จรวดก็จะเข้าหาเป้าหมายด้วยวิธีเดียวกับ Active homing สัญญาณที่ใช้ในการค้นหาเป้าหมายมีหลายชนิด เช่น เรดาร์ เลเซอร์ เป็นต้น รูปที่ 6 แสดงการทำงานของจรวดแบบ Semi-active homing



รูปที่ 6. ระบบนำวิถีแบบ Semi-active Homing

### 4.1.2.3. Passive Homing

ระบบนำวิถีแบบ Passive homing นั้นจะไม่มีเครื่องมือสำหรับส่งสัญญาณใดๆ แต่จะอาศัยคลื่นหรือความร้อน ที่แผ่ออกมาจากเป้าหมายนั่นเองเป็นตัวกำหนดทิศทางให้ Target tracker ของจรวดทำการหาตำแหน่งและพุ่งเข้าสู่เป้าหมายนั้นได้ ระบบนำวิถีแบบ Passive homing มักจะมีการใช้มากในการจู่โจมเป้าหมายที่เป็นแหล่งกำเนิดความร้อน เช่น เครื่องบิน หรือ รถถัง โดยใช้เครื่องรับสัญญาณ Infrared เป็นตัวเซนเซอร์ แต่สำหรับเป้าหมายที่ไม่ใช่แหล่งกำเนิดความร้อนแล้ว เช่น เป้าหมายที่อยู่บนพื้น อาจจะมีการใช้กล้องวิดีโอทำการจับภาพเป้าหมายแล้วทำการหา Contrast เพื่อกำหนดจุดที่เป็นเป้าหมายแทนการใช้สัญญาณ Infrared รูปที่ 7 แสดงการทำงานของจรวดแบบ Passive homing



รูปที่ 7. ระบบนำวิถีแบบ Passive Homing

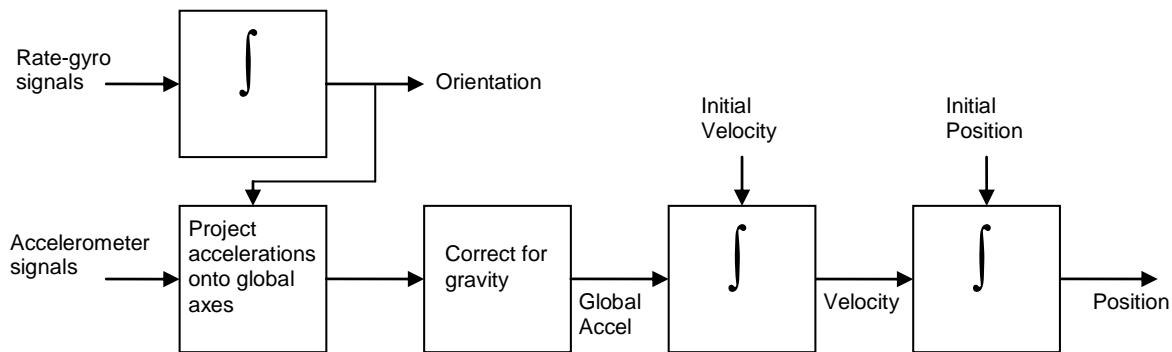
## 4.2. ระบบนำวิถีแบบ GOLIS

ระบบนำวิถีแบบ GOLIS นั้นเป็นการพาจรวดเคลื่อนที่ไปสู่ “จุดหมาย” ซึ่งเป็นตำแหน่งบนโลกที่ใช้สำหรับอ้างอิง ตัวระบบนำวิถีจะไม่รับรู้ถึงชนิดของเป้าหมายที่ต้องการ แต่จะรู้เพียงตำแหน่งที่ต้องการไป ตำแหน่งที่กล่าวมานี้ อาจจะเป็นตำแหน่งบนแผนที่ ซึ่งอาจเป็นการอ้างโดยใช้ระบบละติจูด ลองจิจูด หรือเป็นการอ้างโดยใช้ทิศและระยะทางจากตำแหน่งอ้างอิง หรือแหล่งอ้างอิงอื่นๆก็ได้ ระบบนำวิถีชนิดนี้ไม่จำเป็นจะต้องมี Target tracker แต่จะมีเพียง Missile tracker เพื่อที่จะได้รู้ตำแหน่งของตนเอง และคอมพิวเตอร์นำวิถีก็จะอยู่บนตัวจรวดเอง ระบบนำวิถีแบบ GOLIS มีเทคนิคที่ใช้ได้หลายวิธี เช่น ดังต่อไปนี้

### 4.2.1. Inertial Navigation

Inertial Navigation System (INS) เป็นการอ้างอิงตำแหน่งของจรวดโดยการประมาณค่าจากการเคลื่อนที่ โดยใช้ความเร็ว ระยะเวลา และทิศทางที่เคลื่อนที่ไปนับจากตำแหน่งเริ่มต้นมาคำนวณให้ได้เป็นระยะทาง ในการคำนวณนั้นจะอาศัยข้อมูลที่อ่านได้จากอุปกรณ์หลักสองชนิด ได้แก่ Gyroscope ซึ่งเป็นอุปกรณ์ในการวัดค่ามุม (หรือความเร็วเชิงมุม) และ Accelerometer สำหรับวัดความเร่งเชิงเส้นตามลำดับ สำหรับ INS ที่ใช้กับจรวดนั้น จะมีการใช้ Gyroscope ใน 3 แกน และ Accelerometer ใน 3 แกนเช่นเดียวกัน

Gyroscope นั้นมีสองชนิด ชนิดแรกเป็นอุปกรณ์ทางกล เรียกว่า Gimbaled gyroscope ซึ่งค่าที่อ่านได้จะเป็นค่ามุม (Orientation หรือ Attitude) ที่ทำกับตำแหน่งอ้างอิง (Reference frame) อีกชนิดหนึ่งเรียกว่า Strapdown gyroscope ซึ่งค่าที่อ่านได้จะเป็นค่าความเร็วเชิงมุมในขณะนั้นๆ ซึ่งเมื่อทำการ integrate แล้วมุมที่ได้จะเป็นมุมที่ทำกับตัวจรวด (Body frame) การนำไปใช้จะต้องมีการแปลงให้กลับไปอยู่ใน Reference frame เสียก่อน ในปัจจุบันมีการใช้งาน Gyroscope แบบ Strapdown มากกว่าเนื่องจากมีขนาดเล็กกว่า และราคาถูกกว่า แต่มีข้อเสียคือต้องอาศัยการคำนวณมากกว่า เพื่อให้ได้ตำแหน่งออกมา การคำนวณนี้เรียกว่า Strapdown INS algorithm ซึ่งแสดงได้ตามรูปที่ 8



รูปที่ 8. Strapdown Inertial Navigation Algorithm [5]

ระบบ INS มีข้อดีคือ ระบบไม่จำเป็นต้องพึ่งข้อมูลจากภายนอกจรวด ทำให้สามารถทำงานอยู่ตลอดเวลา และไม่ถูกรบกวนการทำงานได้ แต่ข้อเสียของระบบนี้คือ มีความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากความไม่แม่นยำของอุปกรณ์ โดยเฉพาะใน Gyroscope เกิดขึ้นตลอดเวลา ความคลาดเคลื่อนนี้เรียกว่า drifts นอกจากนี้ขั้นตอนการทำ integration ทางคณิตศาสตร์ก็อาจทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนขึ้นได้ ถ้า time step ไม่ละเอียดพอ

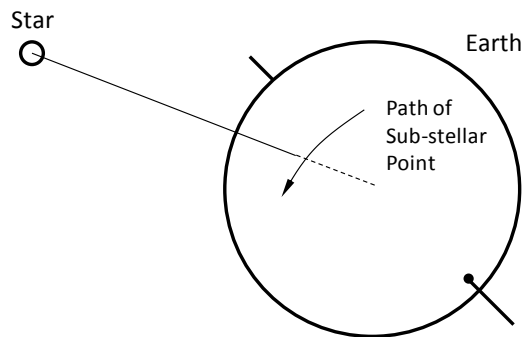
#### 4.2.2. Preset Guidance

วิธีนี้ไม่ใช่เป็นการอ้างอิงตำแหน่งบนแผนที่ แต่เป็นการอ้างอิงตำแหน่งบนเส้นทางที่จะดำเนินไป เช่น ในขณะเวลานี้ควรจะมีความเร็วขนาดนี้ และกำลังหันหน้าไปทางนี้ การรับรู้ข้อมูลสามารถทำได้โดยอ่านจาก Gyroscope และ Accelerometer เช่นเดียวกับ INS เพียงแต่ไม่จำเป็นต้องมีค่าออกมาเป็นตำแหน่งสัมบูรณ์ เส้นทางที่จรวดจะดำเนินไปนี้ จะถูกคำนวณล่วงหน้าก่อนที่จะถูกยิง โดยอาศัยการอ้างอิงจากตารางยิง และจะถูกบรรจุไว้ในคอมพิวเตอร์ในตัวจรวด ระบบนำวิถีมีหน้าที่ควบคุมจรวดให้ดำเนินไปตามเส้นทางที่บันทึกเอาไว้

#### 4.2.3. Celestial Guidance

วิธีนี้เป็นระบบนำวิถีโดยอ้างอิงจากเทหวัตถุ นั่นคือการใช้ตำแหน่งของดวงดาวเป็นจุดอ้างอิง เนื่องจากการที่ตำแหน่งของดาวนั้นไม่มีการเปลี่ยนแปลง การอ้างอิงตำแหน่งทำโดยการให้ระบบจำตำแหน่งบนฟ้าของดาวที่ใช้อ้างอิงเมื่อมองจาก ณ ตำแหน่งหนึ่งๆบนพื้นโลก เมื่อมองเห็นตำแหน่งของดาวอ้างอิง ก็จะสามารถทราบตำแหน่งบนโลกได้ ข้อเสียของการนำวิถีโดยวิธีนี้คือ ต้องเดินทางในเวลากลางคืน และต้องเห็นดาวที่ใช้อ้างอิงได้อย่างชัดเจนเท่านั้น จึงไม่เหมาะกับคืนที่มีเมฆมาก

อีกวิธีหนึ่งคือการติดตามตำแหน่งของ Geographical position (GP) หรือ Sub-stellar point ของดวงดาวหนึ่งแล้วใช้วิธีทางตรีโกณมิติมาคำนวณหาตำแหน่งของจรวด [6] ซึ่ง GP นี้คือตำแหน่งที่พื้นผิวโลกตัดกับเส้นที่ถูกลากจากตำแหน่งของดาวบนฟ้าไปยังจุดศูนย์กลางของโลก ดังแสดงในรูปที่ 9 วิธีนี้มีข้อจำกัดหลายประการ เช่น จรวดจะต้องเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ และหันหน้าเข้าหาเป้าหมายเสมอ ดาวที่เลือกใช้ต้องมีแนวการเคลื่อนที่ของ GP ที่เหมาะสม และข้อจำกัดอื่นตามวิธีการอ้างอิงตำแหน่งดาวข้างต้น



รูปที่ 9. การอ้างอิง Geographical position (GP) ในการนำวิถีแบบอ้างอิงกับเทหวัตถุ

การนำวิถีด้วยการอ้างอิงกับเทหวัตถุ ด้วยตัวมันเองจะไม่ค่อยมีความแม่นยำ แต่เมื่อใช้งานร่วมกับระบบอื่นเช่น INS จะช่วยให้การนำวิถีมีความแม่นยำมากขึ้น

#### 4.2.4. Terrestrial Guidance

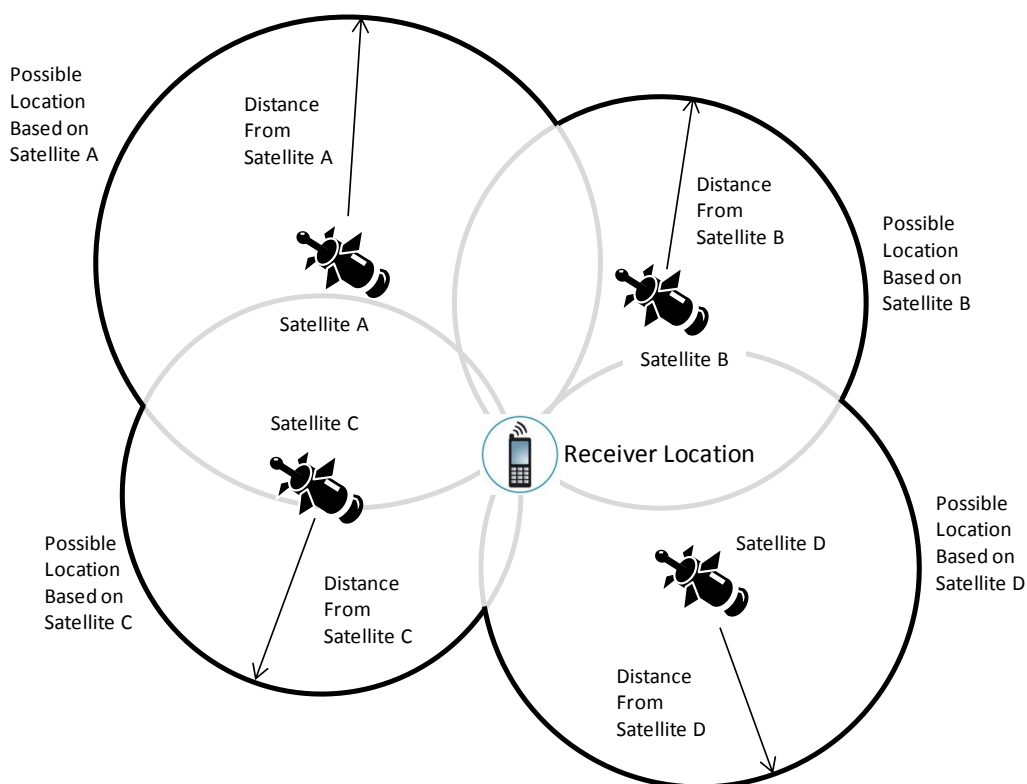
วิธีนี้เป็นกรนำวิถีโดยการอ้างอิงกับลักษณะพื้นผิวของพื้นที่ แบ่งเป็นสองลักษณะคือ 1) Terrain contour matching หรือ TERCOM เป็นการอ้างอิงกับความสูงต่ำพื้นผิวที่อยู่เบื้องล่างของจรวด โคนการอ่านความสูงจาก Radar altimeter แล้วนำมาเปรียบเทียบกับค่าในแผนที่ วิธีนี้เป็นวิธีที่ใช้ในจรวดแบบ Cruise missiles โดยทั่วไป และ 2) Digital Scene-Matching Area Correlator หรือ DSMAC วิธีนี้เป็นการใช้กล้องจับภาพลักษณะของพื้นจริงๆและทำการ

เปรียบเทียบกับภาพที่ถูกเก็บไว้ล่วงหน้า การนำวิถีด้วยการอ้างอิงกับลักษณะพื้นที่มักจะนำมาใช้ในการเพิ่มความแม่นยำของระบบ INS เช่นเดียวกับการอ้างอิงจากเทวดุ

#### 4.2.5. Satellite Navigation

วิธีนี้เป็น การนำวิถีโดยการรับสัญญาณจากระบบดาวเทียมบอกตำแหน่ง ซึ่งถือว่าต่างจากระบบ GOLIS อื่นที่กล่าวมา เนื่องจากต้องอาศัยแหล่งข้อมูลจากภายนอกตัวจรวัดที่เป็นสิ่งที่ถูกสร้างขึ้นมา สัญญาณที่มาจากดาวเทียมมีข้อมูลของตำแหน่งของดาวเทียมและเวลาอ้างอิง เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมนั้นจะทำการคำนวณระยะเวลาที่ได้รับสัญญาณจากดาวเทียมแล้วคำนวณกลับไปเป็นตำแหน่งที่เป็นไปได้ของเครื่องรับ และเมื่อทำการคำนวณอ้างอิงกับดาวเทียม 4 ดวงขึ้นไปก็จะสามารถหาตำแหน่งที่แน่นอนได้ [7]

รูปที่ 10 แสดงถึงหลักการการทำงานของระบบ Satellite Navigation ซึ่ง จากรูปจะเห็นถึงตำแหน่งที่เป็นไปได้ของเครื่องรับเมื่อพิจารณาจากข้อมูลของดาวเทียมแต่ละดวง ตำแหน่งนี้จะอยู่บนเส้นรอบวงของวงกลมในรูป เมื่อทราบตำแหน่งที่เป็นไปได้จากดาวเทียม 4 ดวงเป็นต้นไป ตำแหน่งที่ถูกต้องของเครื่องรับก็คือตำแหน่งที่วงกลมเหล่านี้ตัดกันนั่นเอง



รูปที่ 10. หลักการทำงานของระบบ Satellite Navigation

การใช้ระบบดาวเทียมบอกตำแหน่งนี้สามารถใช้งานง่ายและมีความแม่นยำ แต่มีข้อจำกัด คือ

- สัญญาณดาวเทียมที่ต้องการนั้นต้องรับจากดาวเทียมจำนวนมากกว่า 4 ดวงขึ้นไปซึ่งดาวเทียมเหล่านี้จะต้องอยู่ในแนวสายตาของเครื่องรับ
- สัญญาณมีโอกาสถูกรบกวนได้
- ข้อมูลที่ได้รับนั้น ไม่ได้มาตลอดเวลา ดังนั้นทำให้ไม่รู้ตำแหน่งของตนเองในช่วงที่ไม่ได้รับข้อมูล
- การบอกตำแหน่งอาจไม่มีความแม่นยำพอเนื่องจากเจ้าของระบบต้องการป้องกันการนำไปใช้ในทางทหาร

อย่างไรก็ดี การใช้ระบบดาวเทียมบอกตำแหน่งในการนำวิถี สามารถนำมาใช้ร่วมกับระบบนำวิถีวิธีอื่นเพื่อเพิ่มความแม่นยำขึ้นได้ ในปัจจุบันระบบดาวเทียมบอกตำแหน่งที่รู้จักกันดี คือ Global Positioning System (GPS) ซึ่งเป็นระบบของประเทศสหรัฐอเมริกา และ GLObal NAVigation Satellite System (GLONASS) ซึ่งเป็นระบบของสหภาพโซเวียตเดิม

## 5. การผสมผสานการใช้งานระบบนำวิถีแบบต่างๆ

เนื่องจากระบบนำวิถีแต่ละวิธีนั้นมีจุดดีและจุดเสียต่างกัน ถ้าสามารถนำมาใช้ร่วมกันได้ จะสามารถทำให้ขีดความสามารถพร้อมของการใช้งานเพียงระบบเดียว การผสมผสานการใช้งานระบบนำวิถีสามารถทำได้หลายวิธี ได้แก่

### 5.1. การใช้งานในลักษณะเป็นช่วงเวลา

การใช้งานแบบนี้ ทำได้โดยการแบ่งช่วงเวลาของการเดินทางของจรวดเป็นช่วง แต่ละช่วงจะมีการใช้ระบบนำวิถีต่างชนิดกัน โดยทั่วไปจะสามารถแบ่งการทำงานเป็นช่วงๆ ได้ดังต่อไปนี้

1. ช่วงเริ่มต้น (Initial phase, boost phase, หรือ launch phase) - ช่วงนี้เป็นการเริ่มการทำงานของระบบ ควรจะใช้ระบบยิงจรวดที่ให้ความแม่นยำเพื่อให้ค่าเริ่มต้นมีค่าถูกต้อง
2. ช่วงกลาง (Mid-course phase) – ช่วงนี้สามารถใช้ระบบ Beam-riding หรือใช้ INS สำหรับการเดินทางได้
3. ช่วงเข้าหาเป้า (Terminal phase) – ช่วงนี้เป็นช่วงที่จรวดพุ่งเข้าหาเป้า สามารถใช้ระบบ Homing ได้เนื่องจากสัญญาณที่สะท้อนจากเป้าหมายมีความชัดเจนมากที่สุดในช่วงนี้

### 5.2. การใช้งานโดยผสมความสามารถของเซ็นเซอร์เข้าด้วยกัน

การใช้งานอีกลักษณะหนึ่งคือการผสมข้อมูลที่ได้จากเซ็นเซอร์มากกว่าหนึ่งชนิดขึ้นไปเพื่อให้ทำงานร่วมกัน การผสมสัญญาณในลักษณะนี้เรียกว่า Sensor fusion การทำ Sensor fusion ทำได้โดยการใช้ค่าจากเซ็นเซอร์ของระบบนำวิถีชนิด

หนึ่งทำการมาตรวจสอบและแก้ไขค่าที่อ่านได้จากเซนเซอร์ของอีกระบบหนึ่ง ในการทำ Sensor fusion อาจจะมีการใช้สมการทางคณิตศาสตร์เช่น Kalman Filter มาช่วยในการตรวจสอบและแก้ไขข้อผิดพลาดได้ ตัวอย่างการผสมผสานระบบนำวิถีในลักษณะนี้ได้แก่ การใช้งาน ระบบ INS และ GPS, การใช้งานระบบ INS และ อ้างตำแหน่งจากดาว เป็นต้น

## 6. สรุป

การใช้งานระบบนำวิถีเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการเคลื่อนที่ของจรวด สามารถทำได้หลายวิธี แต่ละวิธีมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน การเลือกใช้งานควรจะต้องเลือกใช้งานให้เหมาะสมกับชนิดของจรวด และชนิดของเป้าหมาย นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงสภาพแวดล้อมที่จะนำจรวดไปใช้งานด้วย และเราสามารถนำวิถีมากกว่าหนึ่งชนิดมาใช้งานร่วมกันเพื่อช่วยเหลือกันในการทำงานเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพของระบบให้ดียิ่งขึ้นได้ เทคโนโลยีระบบนำวิถีในปัจจุบันยังมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องซึ่งอาจจะมีเทคนิคใหม่ๆเกิดขึ้นอีกได้ในอนาคตซึ่งเราคงยังต้องศึกษากันต่อไป

## 7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ พ.อ. ดร. อนุรัตน์ อินกัน ที่ช่วยให้คำปรึกษาและตรวจสอบความเรียบร้อยของบทความ และขอขอบคุณคุณธีรทัศน์ พรยงยืน ที่ช่วยทำภาพประกอบบทความนี้ด้วยครับ

## 8. เอกสารอ้างอิง

- [1] Bureau of Naval Personnel, “Principle of Guided Missiles and Nuclear Weapons” *NAVPERS 10784-B*, 1st Rev. Washington, D.C., 1972.
- [2] “Missile Guidance,” [http://en.wikipedia.org/wiki/Missile\\_guidance/](http://en.wikipedia.org/wiki/Missile_guidance/), Accessed Aug, 2010.
- [3] P. Zarchan, *Tactical and Strategic Missile Guidance*, AIAA, 2007.
- [4] Carlo Kopp, “Active and SemiActive Radar Missile Guidance”, *Australian Aviation*, June 1982.
- [5] Oliver J. Woodman, “An introduction to inertial Navigation,” *Cambridge Technical Report No. 696*, University of Cambridge, August 2007.
- [6] “Celestial Navigation Theory”, <http://www.celestialnavigation.net/theory.html>, Accessed Aug, 2010.
- [7] Mohinder S. Grewal, and , Lawrence R. Weill, *Global positioning systems, inertial navigation, and integration*, Wiley, 2001.