

วิเคราะห์ผลกระทบของความแม่นยำการชี้ทิศทางของ Tracking Antenna และ
ขยายระยะสื่อสาร ในระบบ UAV

Analyze effect of precision pointing for tracking antenna and extend range in UAV system

ทรงวุฒิ วชิรไพโรจน์ และ อนันต์ สืบสำราญ

สาขาวิชาวิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

E-mail: zcomnet@gmail.com, asr@kmutnb.ac.th

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันมีการใช้ UAV (Unmanned Aerial Vehicle) ในหลายวัตถุประสงค์ แต่ในการใช้งาน UAV นั้น จะต้องมี การสื่อสารระหว่างอากาศยาน และ ระบบภาคพื้นดิน GCS (Ground Control Station) อยู่ตลอดเวลาโดยใช้การสื่อสารไร้สายผ่านคลื่นวิทยุ ในการที่จะทำให้ mini UAV สามารถติดต่อสื่อสารได้ไกลและมีเสถียรภาพ จำเป็นต้องใช้สายอากาศที่มีอัตราขยายสูง มักจะเป็นสายอากาศแบบทิศทาง แต่ UAV นั้นเคลื่อนที่ตลอดเวลา คงไม่สะดวกถ้าจะใช้คนหันสายอากาศทิศทางตามตลอดเวลา จึงมีการพัฒนาใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์รับพิกัดจาก UAV แล้วหันตามทิศทางเคลื่อนที่ แต่การทำงานนี้อาจจะมีมุมคลาดเคลื่อน ไม่ว่าจะมาจากการติดตั้งทำให้รูปแบบการแพร่กระจายคลาดเคลื่อน ความละเอียดของการคำนวณ และ ค่าผิดพลาดอื่นๆ มันส่งผลกระทบต่อระยะทางการสื่อสารมากน้อยอย่างไร และ เราจะขยายระยะสื่อสารระหว่าง UAV กับ Ground Control Station ได้อย่างไร

คำสำคัญ: Link budget, Link margin, Tracking antenna, UAV

Abstract

At present, the use of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) have many purposes. In operating UAV must to communicate between UAV with ground control station (GCS) all-time by used wireless communication via radio waves. We can expand range and stability of communication by used high gain antenna. In normally high gain antenna is directional antenna, but UAV is moving all-time. Directional antenna must point to UAV all-time too, but it difficult to point antenna to UAV by man all-time. On this problem have many team develop microcontroller receive location form UAV and tracking movement of it automatic, but tracking antenna have some error by sensor, other mechanism and radiation pattern. How it effect with range and stability of communication, And how to calculate and design range of communication between the UAV and GCS.

Keywords: Link budget, Link margin, Tracking antenna, UAV

978-1-5090-4420-7/16/\$31.00 ©2016 IEEE

1. คำนำ

ในการติดต่อสื่อสารแบบไร้สาย สายอากาศเป็นหนึ่งในอุปกรณ์ที่มีความจำเป็นอย่างยิ่งในการทำให้การสื่อสารได้ในระยะไกลและมีประสิทธิภาพ การที่จะรับ-ส่ง ข้อมูลไร้สายได้ไกลต้องอาศัยสายอากาศที่มีอัตราขยายสูง แต่สายอากาศที่มีอัตราขยายสูงนั้นมีรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นไปในทิศทางจำกัดเพียงทิศทางเดียว ยิ่งอัตราขยายสูงขึ้น ความกว้างของบีมการแพร่กระจายคลื่นยิ่งแคบลง ความแม่นยำของระบบการติดตามการเคลื่อนที่ของ UAV ที่จะหันสายอากาศแบบทิศทางไปให้ตรงกับตัว UAV สัมพันธ์กับ ความกว้างของบีม แต่การสื่อสารไร้สายก็ยังมีปัจจัยหลายอย่างที่มีผลกระทบต่อระยะสื่อสารได้ ในอดีตผู้ทำการวิจัยเคยอยู่ในที่วิจัย UAV ได้ทำการพัฒนา Tracking Antenna และนำไปทดสอบระบบที่ระยะ ห่างระหว่าง UAV กับ Tracking Antenna 10Km โดยมีสายอากาศแบบทิศทาง 2 ต้น ติดตั้งอยู่ในแกนเดียวกันของ tracking antenna ต้นแรก ใช้สำหรับการส่ง telemetry ที่ความถี่ 915Mhz ด้วยสายอากาศ Patch gain 8 dBi และ ภาพที่ความถี่ 2.4Ghz ด้วยสายอากาศ Patch gain 13 dBi ในระหว่างการทดสอบ telemetry รับ ข้อมูลได้ตลอด แต่สัญญาณภาพ ขาดหายบางช่วง เราจะมาศึกษาที่มาของปัญหา และ ออกแบบการทดสอบในอนาคตกันในบทความนี้

2. ทฤษฎี

2.1 Link budget

เป็นสมการที่ใช้คำนวณหาพลังงานที่ออกจากเครื่องส่งไปถึงยังภาครับของเครื่องรับ นิยมใช้กันระบบติดต่อสื่อสารผ่านคลื่นวิทยุ โดยมีรูปแบบสมการดังนี้

$$Prx = Ptx + Gtx - Ltx - Lfs - Lm + Grx - Lrx \quad (1)$$

เมื่อ Prx = พลังงานที่ภาครับได้รับ (ต้องมากกว่าความไวของภาครับ จึงจะรับสัญญาณได้)

Ptx = พลังงานด้านส่ง (dBm)

Gtx = อัตราขยายของสายอากาศด้านส่ง (dBi)

Ltx = อัตราการสูญเสียไปในทางส่ง (dB)

Lfs = อัตราการสูญเสียไปอากาศ (Free space loss)

- Lm = อัตราการสูญเสียอื่น ๆ เช่น โพลาริซต่างกัน หรือ ความต่างระหว่าง Linear to Circular (dB)
- Grx = อัตราขยายของสายอากาศด้านส่ง (dBi)
- Lrx = อัตราการสูญเสียไปในการรับเช่น ข้อต่อ, ความยาวสาย (dB)

2.2 Free Space loss(Lfs)

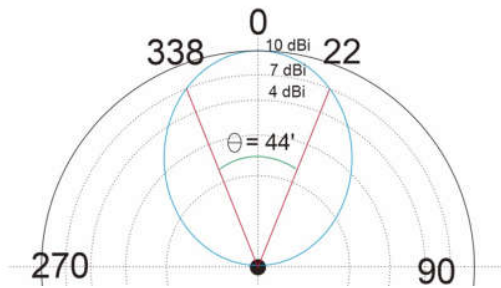
คือ อัตราที่พลังงานคลื่นวิทยุจะสูญเสียไปในอากาศในการเดินทางระหว่างสายอากาศภาครับ - ส่ง โดยขึ้นอยู่กับปัจจัยหลักคือ ความถี่ และระยะทาง

$$FSPL (dB) = 10 \log \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \quad (2)$$

- เมื่อ $\pi = 3.14$
- d = ระยะทาง (m)
- λ = ความยาวคลื่น (m)

2.3 Half Power Beam width (HPBW)

หาได้จากจุดสัญญาณหลัก ตรงทิศ 0 องศา คือจุดที่สัญญาณแรงที่สุดไปเรื่อย จนกระทั่งวัดสัญญาณได้ลดลง -3dB (ครึ่งหนึ่งของค่าที่แรงที่สุด) [1] ทั้งสองด้านจากจุด 0 องศา วัดออกมาหน่วยเป็นองศา เมื่อเรามองภาพตัดด้านข้างและด้านบนของเสาอากาศ ซึ่งเราใช้ค่านี้ในการหาความผิดพลาดที่ยอมรับได้ของความแม่นยำการชี้ทิศทางของสายอากาศแบบทิศทางด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์



รูปที่ 1 ตำแหน่งของ Half Power Beam width Gain ต่ำกว่าค่าสูงสุด -3dB กว้าง 44 องศา

2.4 SWR

เป็นอัตราการสะท้อนกลับของคลื่นวิทยุที่ส่งไปยังสายอากาศ ถ้าอิมพีแดนซ์สายอากาศมีค่า เท่ากับ อิมพีแดนซ์ของเครื่องส่งจะมีค่า SWR เป็น 1:1 ซึ่งการออกแบบสายอากาศจุดมุ่งหมายคือทำให้คลื่นสะท้อนกลับน้อยที่สุด[2]

$$SWR = \frac{1 + \sqrt{Pr/Pf}}{1 - \sqrt{Pr/Pf}} \quad (3)$$

- เมื่อ Pr = พลังงานสะท้อนกลับ
- Pf = พลังงานที่ออกไปยังสายอากาศ
- SWR = อัตราการสะท้อนกลับของคลื่นวิทยุ

Pin	Pf	Pr	SWR	Loss
10	9.9	0.1	1.223	-0.043648054 dB
10	9.7	0.3	1.427	-0.132282657 dB
10	9.5	0.5	1.595	-0.222763947 dB
10	9.3	0.7	1.756	-0.315170514 dB
10	9.2	0.8	1.836	-0.362121727 dB
10	9.05	0.95	1.959	-0.433514208 dB
10	9	1	2.000	-0.457574906 dB
10	8.8	1.2	2.171	-0.555173278 dB
10	8.5	1.5	2.449	-0.705810743 dB

ตารางที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่าง SWR กับ ค่า Loss

จะเห็นได้ว่า SWR มีผลต่อพลังงานที่ส่งไปยังสายอากาศ หากค่าความ Linkbudget กับสายอากาศที่มีค่า SWR สูง ก็จะทำให้เกิดการคลาดเคลื่อนสูงเช่นกัน เช่น จากตารางที่ SWR = 2.0 พลังงานที่ไปถึงสายอากาศคือ 9,000mW เท่ากับ 39.542 dBm แทนที่จะเป็น 10,000 mW เท่ากับ 40 dBm หายไป -0.458 dBm แต่เมื่อเทียบกับค่าที่เผื่อไว้ใน Link Margin แล้ว ค่า SWR ที่ไม่สูงมากนัก (ไม่เกิน 2.0) [3] เป็นค่าที่ยอมรับได้ แต่ค่า SWR ที่สูงมีผลต่อการใช้พลังงาน และ วงจรอาจเกิดความร้อนมาก ทำให้อายุการใช้งานสั้นลง ควรจะพิจารณาในเรื่องดังกล่าวด้วย

2.5 Polarization

การโพลาไรซ์ของคลื่น (Wave Polarization) ในการสื่อสารผ่านระบบไร้สาย หากต้องการให้การรับ-ส่งมีประสิทธิภาพสูงสุด โพลาไรซ์ของสายอากาศ รับ - ส่ง ต้องตรงกัน โดยโพลาไรซ์ของสายอากาศมี 2 แบบดังนี้

2.5.1 Linear Polarization

1. Vertical Polarization หากทำการติดตั้งสายอากาศในแนวตั้ง ก็จะได้โพลาไรซ์เป็นแนวตั้ง
 2. Horizontal Polarization หากทำการติดตั้งสายอากาศในแนวนอน ก็จะได้โพลาไรซ์เป็นแนวนอน
- หากสายอากาศด้านส่ง - รับ โพลาไรซ์ต่างกันสามารถคำนวณ ได้ตามสมการข้างล่าง

$$\text{Polarization Loss Factor (PLF)} = \cos^2(\theta_{pol}) \quad (4)$$

เมื่อ PLF = ค่าความสูญเสียระหว่างความแตกต่างเชิงมุมของ-
 สายอากาศภาคส่ง และ ภาครับ อยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 [3]
 θ_{pol} = ผลลัพธ์ความแตกต่างเชิงมุมของสายอากาศภาคส่ง และ
 ภาครับ (องศา)

มุม	PLF	dB
0	1.000	0.000
5	0.992	-0.033
10	0.970	-0.133
15	0.933	-0.301
20	0.883	-0.540
25	0.821	-0.854
30	0.750	-1.249
35	0.671	-1.733
40	0.587	-2.315
45	0.500	-3.010

ตารางที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความสูญเสียระหว่างความแตกต่าง
 เชิงมุมของสายอากาศภาคส่ง และ ภาครับ

2.5.2 Circular Polarization (โพลาไรซ์แบบวงกลม)

จะมีการแพร่กระจายคลื่นเป็นวงกลม มีสองแบบคือ Right-hand-
 circular Polarization และ Left-hand-circular Polarization ซึ่งแบบนี้
 สายอากาศภาครับแบบ linear Polarization จะรับได้เพียงครึ่งหนึ่งของ
 ภาคส่ง [4] หรือ สูญเสียไป -3dB ในความแตกต่างระหว่างสายอากาศตัวส่ง
 และ ตัวรับ หากสายอากาศอีกฝั่งไม่ได้เป็นชนิด Circular Polarization
 เหมือนกัน

$$(PLF) \text{ Linear to circular} = 0.5 = -3\text{dB} \quad (5)$$

3. การออกแบบและทดสอบ

จากปัญหาที่พบในการทดสอบในอดีตที่ระยะ 10Km สัญญาณ
 ภาพ และ ข้อมูลลดความถี่ และ ระบบประกอบอื่น ๆ ก็แตกต่างกัน ถึง
 สัญญาณข้อมูลจะรับได้ แต่ ภาพหายก็มีหลายเหตุปัจจัย การจะทดสอบ
 เพื่อหาสาเหตุ จึงต้องวางแผนการทดสอบดังนี้

3.1 ใช้สมการ Link budget เพื่อคำนวณหาระยะสื่อสาร

ในการวางแผนออกแบบระบบสื่อสารไร้สาย ควรจะเริ่มที่ link
 budget เป็นอันดับแรก[5] การคำนวณหา Link budget สำหรับ Data
 telemetry และ VDO Transmitter ใช้ค่าดังนี้

Frequency	915 Mhz	2400 Mhz
λ	0.3278689 M	0.125 M
Tx Power	30 dBm	1000 mW
Tx Gain	8 dBi	13 dBi
Polarization		
Loss Factor	-3 dB	-3 dB
RX Gain	2.15 dBi	2.15 dBi
Rx		
Sensitivity	-90 dB	-90 dB
Link Margin	10 dB	10 dB

ใช้สายอากาศภาคส่งที่มี gain ต่างกันดังตารางที่ 3 มาคำนวณ

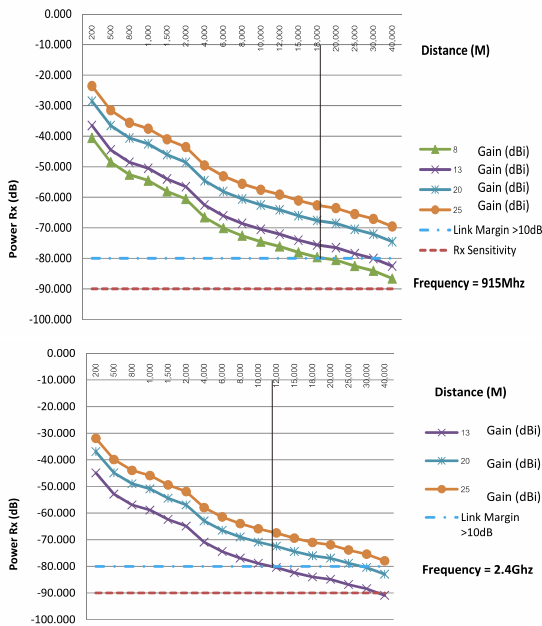
Gain (dBi)	beam width (องศา)	ข้างละ (องศา)
8	65	(32.5+32.5)
13	34	(17+17)
20	18	(9+9)
25	6	(3+3)

ตารางที่ 3 ค่าอัตราขยาย(Gain) และ Half Power Beam width

หลังจากนำค่าต่างๆ ไปคำนวณด้วยสมการ Link budget และ ทดลองใส่
 ค่า gain ของสายอากาศ Plot Graph ออกมา ค่าที่น่าสนใจได้แก่ Link
 Margin เราควรกำหนดค่านี้อย่างไร ในการคำนวณผู้เขียนคิด Link Margin
 จากค่าเหล่านี้

Half Power Beamwidth	-3 dB
Polarization Loss Factor	-3 dB
Connector and Cable loss	-1 dB
SWR Miss match loss	-1 dB
Other loss	-2 dB
Total Link Margin	>10 dB

ผู้เขียนเลือก 10 dB และนำมาคำนวณโดยใช้สมการที่ 1 และ 2 และ plot
 graph ออกมา ตามรูปที่ 2 จากการคำนวณจะพบว่า ที่ความถี่ 915
 Mhz ระยะสื่อสารอยู่ที่ 18Km และ ความถี่ 2.4Ghz ระยะสื่อสารอยู่ที่
 12Km (Link Margin > 10dB) หาก UAV มีรัศมีใช้งาน 10Km (ซึ่ง mini
 UAV แบบ man pack ทั่วไปรัศมีมีการทำงาน เพียง 10Km) ที่ความถี่ต่ำ
 สามารถใช้สายอากาศแบบทิศทางที่มี gain ต่ำกว่า ความถี่สูง และ การชี้
 ทิศทางผิดพลาด 1-5 องศา ของระบบ Tracking Antenna ไม่มีผลกระทบต่อ
 การรับ-ส่ง (Antenna ทั้ง สอง HPBW มากกว่า 30 องศา)



รูปที่ 2 เปรียบเทียบระยะสื่อสารระหว่างความถี่ 915 Mhz กับ 2.4 Ghz

แต่ถ้าต้องการใช้งานที่ระยะ 40Km การชี้ทิศทางต้องมีความแม่นยำมากถ้าใช้กับสายอากาศ gain 25 dBi ระบบ Tracking Antenna จะ tracking ผิดพลาดได้ไม่เกิน 5 องศา

3.2 Antenna characterization.

3.2.1 วัดและปรับแต่ง antenna ให้ได้ค่า SWR ต่ำที่สุดเท่าที่จะทำได้ เพื่อให้การแพร่กระจายคลื่นได้ดีใกล้เคียงกับหลักการที่เรานำมาคำนวณ

3.2.2 หา antenna radiation pattern แบบคร่าว ๆ เนื่องจากข้อจำกัดในด้านเครื่องมือวัด radiation pattern เราจึงต้องทำการวัดแบบคร่าว ๆ โดยการติดตั้งสายอากาศภาคส่งไว้กับที่ แล้วใช้เครื่องรับที่สามารถบอกค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ เปรียบเทียบที่มุมต่าง ๆ เพื่อหารูปแบบการแพร่กระจายคลื่นอย่างคร่าว ๆ ที่มุมต่างๆ กัน เฉพาะด้านหน้าสายอากาศ ในแกน azimuth (vertical) [6]

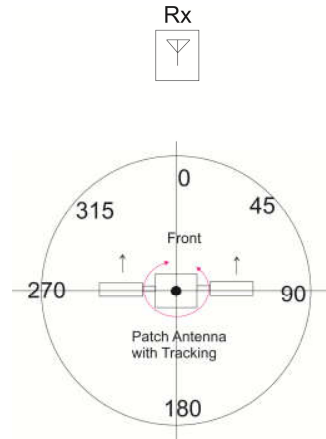
3.3 ทดสอบ Static test

นำข้อมูลที่ได้จากการคำนวณ มหาสถานที่ไม่มียะไรบดบัง line-of-sight (LOS) paths ระยะห่าง 10Km แล้วทำการติดตั้งทดสอบ รับ-ส่ง ถ้าไม่สามารถรับส่งกันได้ อาจมีสาเหตุมาจาก เครื่องสื่อสารเอง ไม่ได้มาจากความแม่นยำในการหันทิศทาง หรือ สายอากาศ

3.4 ทดสอบกับ UAV จริง

ทดสอบโดยใช้ UAV จริง บินทดสอบที่ระยะไม่เกินจากที่คำนวณไว้บันทึกค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้, บันทึก VDO ของภาพที่ได้จาก

UAV ทำทางการหันของเสาจริง และ ข้อมูลพิกัดของ UAV เพื่อนำมาเปรียบเทียบ และ วิเคราะห์



รูปที่ 3 การหันทิศทางเพื่อทดสอบ radiation pattern

4. สรุป

จากการที่นำปัญหาที่พบในการทดลองมาวิเคราะห์โดยอาศัยสมการ Linkbudget พบประเด็นสำคัญ ๆ ดังนี้

4.1 ในระยะสื่อสารระหว่าง UAV กับ Ground Station ไม่เกิน 10Km กับ สายอากาศที่มี gain 8dBi สำหรับความถี่ 915 Mhz และ 13dBi สำหรับความถี่ 2.4 Ghz ความแม่นยำของการชี้ทิศทางที่มีความผิดพลาดไม่เกิน 5 องศา (Antenna ทั้ง สอง HPBW มากกว่า 30 องศา) ไม่มีผลต่อการสื่อสาร

4.2 การใช้สมการ linkbudget และ Half Power Beam width ของ Antenna สามารถเอาไปใช้ออกแบบระบบ Tracking Antenna เพื่อใช้กับสายอากาศแบบทิศทางเพื่อหันติดตาม UAV ได้ในอนาคต ส่วนความแม่นยำในการ track พิจารณาจากระยะทาง และ Half Power Beam width ของ Antenna

4.3 ค่า Link Margin ที่เหมาะสมเกิดจากการหาค่า loss ในระบบมา รวมกัน และ อาศัยประสบการณ์จากการทดลอง

4.4 การเพิ่มระยะสื่อสารในระบบสื่อสารไร้สายให้ไปได้ไกลโดยอาศัยตัวแปรหลักในสมการ linkbudget แบ่งออกเป็น 2 แบบดังนี้

4.4.1 เพิ่มระยะสื่อสารได้โดยใช้พลังงานของ battery เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ไม่มีผลต่อระยะเวลาการทำงานของ UAV

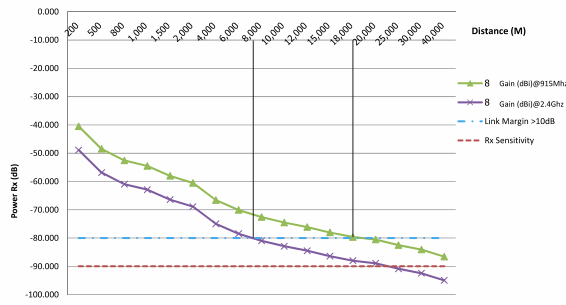
4.4.1.1 เพิ่ม Gain Antenna

4.4.1.2 เพิ่มความไวภาครับ

4.4.2 เพิ่มระยะสื่อสารได้โดยใช้พลังงานของ battery เพิ่มขึ้น มีผลทำให้ระยะเวลาการบินทำงานของ UAV น้อยลง

4.4.2.1 เปลี่ยนไปใช้เครื่องส่งความถี่ที่ต่ำลง

4.4.2.2 เพิ่มกำลังส่ง



รูปที่ 4 เปรียบเทียบระยะสื่อสารระหว่างความถี่ 915 Mhz กับ 2.4 Ghz ความถี่ที่ต่ำกว่าไปได้ไกลกว่าความถี่สูง ภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน

4.5 ถ้า Tracking Antenna สามารถผิดพลาดได้ถึง 30 องศา แล้ว ปัจจัยอะไรทำให้ระยะสื่อสารไม่ได้ตามที่คำนวณ สิ่งหนึ่งที่เป็นไปได้ก็คือ วงจรหรืออุปกรณ์สื่อสารที่ไม่มีคุณภาพอาจมีคุณสมบัติไม่ตรงตามที่ระบุมา เช่น VDO Transmitter 2400Mhz ระบุว่ากำลังส่ง 30 dBm แต่สามารถส่งได้เพียง 29dBm ระยะสื่อสารจะหายไป 1.4Km ในทางการวิจัย ควรทดสอบคุณสมบัติของอุปกรณ์สื่อสารทุกตัวเพื่อให้ทราบค่าที่แน่นอนก่อน หากนำไปคำนวณก็จะได้ออกมาแม่นยำมากขึ้น ใกล้เคียงกับการนำไปใช้งานจริง

เอกสารอ้างอิง

- [1] David M. Pozar, "Microwave Engineering", 4th Ed. John Wiley & Sons, Ltd. 2012
- [2] Zhujun Zhang, "Antenna Design for Mobile Devices", John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd. 2011
- [3] Warren L. Stuzman, Gray A. Thiele, "Antenna Theory and Design" 3rd Ed, John Wiley & Sons, Ltd. 2013
- [4] Daniel M. Dobkin, "The RF in RFID Passive UHF RFID in Practice", Newnes, 2008
- [5] Haesik Kim, "Wireless Communications Systems Design" John Wiley & Sons, Ltd. 2015
- [6] Ronski, Wodek K. "Modeling and control of antennas and telescopes" New York, NY : Springer, c2008