

# PERANCANGAN ANTENA DUAL-POLARISASI SIRKULAR RHCP-LHCP UNTUK CIRCULARLY-POLARIZED SYNTHETIC APERTURE RADAR ONBOARD MICROSATELLITE (MSAT CP-SAR)

Agus Dwi Prasetyo<sup>1</sup>, Heroe Wijanto<sup>2</sup>, Josaphat Tetuko S.s | Arifin Nugroho<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Magister Elektro Komunikasi, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom

## Abstrak

Pada saat ini, sensor SAR dioperasikan dengan polarisasi linier (HH, VV, atau kombinasinya) dengan informasi terima yang terbatas [7, 8, 10, 24]. Karakteristik dari SAR konvensional adalah berdimensi sangat besar, butuh daya besar, sensitif dengan efek rotasi Faraday, dan sebagainya. Sehingga dikembangkan Circularly Polarized Synthetic Aperture Radar (CP-SAR) untuk mendapatkan informasi permukaan bumi. Sensor CP-SAR kemudian diaplikasikan pada satelit mikro dengan istilah Circularly Polarized Synthetic Aperture Radar Onboard Microsatellite ( $\mu$ SAT CP-SAR) yang bekerja pada frekuensi 1,27 GHz (L band). Satelit tersebut akan diluncurkan pada tahun 2014 pada ketinggian sekitar 500 - 700 km di atas permukaan bumi [27].

Tesis ini membahas desain antenna yang memungkinkan untuk diaplikasikan pada sensor  $\mu$ SAT CP-SAR dengan karakteristik rasio aksial yang acceptable yaitu Right-Handed Circular Polarization (RHCP) untuk mode transmit dan Left-Handed Circular Polarization (LHCP) + RHCP untuk mode receive [27]. Antena yang digunakan adalah jenis mikrostrip truncated edges circular patch.

Keluaran yang dicapai adalah cetak biru desain antenna mikrostrip truncated edges circular patches dual-polarisasi sirkular dalam single stack. Hasil simulasi dengan menggunakan komputasi berbasis finite integration technique [33] menunjukkan rasio aksial yang dicapai untuk patch LHCP maupun RHCP adalah 1,26 dB dengan faktor isolasi sebesar -26,78 dB. Pada nilai VSWR  $\leq 1,5$ , lebar pita yang dihasilkan adalah  $\approx 28$  MHz. Gain yang dicapai pada pengukuran antenna terfabrikasi adalah  $\approx 8,59$  dBic.

Kata Kunci : antenna polarisasi sirkular, RHCP, LHCP,  $\mu$ SAT CP-SAR

## Abstract

Today, SAR sensor is operated with linear polarization (HH, VV, or its combination) and has limited retrieved information [7, 8, 10, 24]. The conventional SAR is sensitive to the Faraday rotation effects, has large dimensions, and requires high power, etc. To overcome these problems, a Circularly Polarized Synthetic Aperture Radar (CP-SAR) is developed to obtain information signals transmitted near to the earth surface. This CP-SAR sensor is applied to the microsatellite and called Circularly Polarized Synthetic Aperture Radar Onboard Microsatellite ( $\mu$ SAT CP-SAR). It is operated at a frequency of 1.27 GHz (L band) and the satellite will be launched in 2014 with the altitude of 500-700 km above the Earth's surface [27].

This thesis discusses the design of antenna that may be suitable for  $\mu$ SAT CP-SAR sensor with the acceptable axial ratio of the Right Handed Circular Polarization (RHCP) at the transmit mode and Left Handed Circular Polarization (LHCP) + RHCP at the receive mode [27]. The proposed antenna is a truncated edges circular patch microstrip antenna.

This study resulted in a blue print of truncated edges circular patch microstrip antenna with dual-polarized in a single stack. The results of the simulation using a finite integration technique based computing [33] showed that the axial ratio for LHCP and RHCP patch was 1.26 dB with the isolation factor of -26.78 dB. On the value of VSWR  $\leq 1.5$ , the obtained bandwidth was  $\approx 28$  MHz and the achieved gain for fabricated antenna was  $\approx 8.59$  dBic.

Keywords : circularly polarized antenna, RHCP, LHCP,  $\mu$ SAT CP-SAR

## BAB I

### PENDAHULUAN

#### 1.1 Latar Belakang dan Rumusan Masalah

Teknologi pencitraan profil permukaan bumi sudah puluhan tahun berkembang yaitu semenjak ditemukannya kamera. Selanjutnya oleh seniman fotografi, kamera tidak hanya digunakan untuk mengambil gambar dari samping melainkan mereka mencoba mengambil gambar dari atas obyek. Foto-foto pertama dilaporkan diambil oleh Daguerre dan Niepce pada tahun 1839. Tahun berikutnya, Arago, Direktur Observatorium Paris, menganjurkan penggunaan fotografi untuk tujuan topografi. Pada tahun 1849, Kolonel Aimé Laussedat, petugas di Korps Insinyur Perancis, memulai program lengkap untuk menggunakan fotografi dalam pemetaan topografi. Pada 1858, balon udara digunakan untuk membuat foto area yang luas. Ini diikuti dengan menggunakan layang-layang di tahun 1880-an dan merpati di awal 1900-an untuk membawa kamera ke ratusan meter dari ketinggian. [9]

Pada tahun 1903 pesawat udara ditemukan dan pengujian penerbangan berhasil dilakukan. Pemotretan dengan menggunakan pesawat terbang yang dipiloti Wilbur Wright dimulai pada 1909 di atas Centovelli, Italia. Teknologi ini semakin berkembang saat Perang Dunia I maupun Perang Dunia II.

Era perkembangan penginderaan jauh (inderaja) yang spektakuler mulai terjadi saat ditemukannya roket yang membawa

satelit ke ruang angkasa. Hal ini diawali dengan peluncuran satelit TIROS (*Television and Infrared Observation Satellite*) pada tahun 1960, yang merupakan sebuah satelit tak berawak khusus untuk pengembangan satelit cuaca. [16]

Negara Indonesia terdiri dari sekitar 17.516 pulau, apabila pemetaan dan inventarisasi sumber daya alamnya dilakukan dengan cara pengukuran langsung di lapangan, maka akan membutuhkan waktu lebih dari 20 tahun dengan tenaga kerja paling tidak 1.000 orang. Kalau cara ini dilakukan, maka aspek kekinian data area yang paling awal dipetakan tidak bisa dipertanggungjawabkan.

Pada perkembangannya, pemetaan dengan menggunakan kamera masih memiliki kelemahan, yaitu dalam hal pemetaan daerah yang tertutup awan. Untuk menjawab permasalahan ini, dikembangkanlah teknologi *Synthetic Aperture Radar* (SAR).

SAR adalah sensor multi-tujuan yang dapat dioperasikan dalam segala cuaca dalam kondisi siang ataupun malam. Pada saat ini, sensor SAR dioperasikan dalam polarisasi linear (HH, VV, atau kombinasinya) [7, 8, 10, 24] dengan informasi terima yang terbatas. Beberapa karakteristik dari SAR konvensional di antaranya berdimensi sangat besar, membutuhkan daya tinggi, sensitif terhadap efek rotasi Faraday, dan lain-lain. Saat ini tengah dikembangkan *Circularly Polarized Synthetic Aperture Radar Onboard Microsatellite* ( $\mu$ SAT CP-SAR) [26] untuk mendapatkan informasi fisis pada permukaan Bumi. Sehingga dikembangkan *Circularly Polarized Synthetic Aperture Radar* (CP-SAR) untuk mendapatkan informasi permukaan bumi. Sensor CP-SAR kemudian diaplikasikan

pada satelit mikro dengan istilah *Circularly Polarized Synthetic Aperture Radar Onboard Microsatellite* ( $\mu$ SAT CP-SAR) yang bekerja pada frekuensi 1,27 GHz (*L band*). Satelit tersebut akan diluncurkan pada tahun 2014 pada ketinggian sekitar 500 – 700 km di atas permukaan bumi [27].

Pada sistem  $\mu$ SAT CP-SAR diperlukan antenna dengan karakteristik polarisasi sirkular dalam 2 mode, yaitu mode *transmit* yang membutuhkan antenna dengan polarisasi RHCP serta dan mode *receive* yang membutuhkan antenna dengan polarisasi LHCP. Permasalahan yang diangkat pada tesis ini adalah perancangan model antenna mikrostrip dengan rasio aksial yang *acceptable* untuk membentuk polarisasi RHCP dan LHCP dengan spesifikasi teknis yang sesuai dengan *requirement* sistem  $\mu$ SAT CP-SAR [27]. Selanjutnya hasil cetak biru dari tesis akan dijadikan variasi pemilihan dari beberapa antenna yang sudah [2, 3, 26, 27] dan sedang dikembangkan untuk sistem tersebut.

## 1.2 Tujuan Penelitian

Tujuan yang akan dituangkan dalam tesis ini adalah menghasilkan cetak biru rancangan antenna dengan dual polarisasi sirkular (*right-handed* dan *left-handed*) yang kompatibel pada pengembangan  $\mu$ SAT CP-SAR beserta analisis teknis pendukung. *Output* dari penelitian yang dilakukan selanjutnya dijadikan sebagai alternatif pemilihan jenis antenna pada  $\mu$ SAT CP-SAR.

### 1.3 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan memiliki manfaat, antara lain:

- a. Menghasilkan cetak biru antenna yang kemudian dapat dikembangkan untuk realisasi sebagai elemen pendukung pada sistem  $\mu$ SAT CP-SAR.
- b. Menghasilkan rancangan antenna yang dapat dijadikan sebagai alternatif pilihan dalam pengembangan  $\mu$ SAT CP-SAR.
- c. Secara umum, memajukan penelitian dan pengembangan teknologi SAR baik yang akan diterapkan pada *microsatellite* maupun yang nantinya akan diaplikasikan pada *nanosatellite* sebagai tambahan *payload* pada ITT-SAT.

### 1.4 Batasan Masalah

Bingkai kerja dari penulisan tesis ini dibatasi, antara lain:

- a. Tidak membahas secara rinci kinerja sistem SAR secara menyeluruh.
- b. Perancangan antenna beserta analisis dilakukan berdasarkan data pendukung dari spesifikasi satelit  $\mu$ SAT CP-SAR.
- c. Hanya membahas desain *single stack antenna* dengan *dual-patch* untuk menghasilkan dua buah polarisasi sirkular beserta parameter S terkait *return loss* dan isolasi per *patch*. Metode penyusunan beserta pencatuan untuk menghasilkan *gain requirement* menjadi penelitian lanjutan.
- d. Pengukuran  $S_{1,2}$  dan  $S_{2,1}$  terhadap antenna terfabrikasi tidak dilakukan karena salah satu *port* alat ukur mengalami kerusakan. Sehingga pertimbangan nilai kedua parameter

tersebut diperkirakan dengan bantuan hasil ukur S1,1 dan S2,2 terhadap hasil simulasi.

- e. Pemodelan antenna menggunakan metode *Finite Integration Technique* yang digunakan pada perangkat lunak sebagai alat bantu proses komputasi desain antenna [33].

### 1.5 Metodologi Penelitian

Penelitian pada tesis ini dilakukan dengan pendekatan eksperimental dan simulasi, yaitu proses perancangan dengan menggunakan perangkat lunak bantu berbasis *Finite Integration Technique* [33]. Langkah awal proses dimulai dari pembuatan *single patch* antenna dengan salah satu jenis polarisasi, RHCP atau LHCP. Kemudian dilakukan proses penggandaan *patch* untuk menghasilkan polarisasi jenis lainnya. Antena ini yang kemudian dijadikan bahan desain untuk proses fabrikasi dan selanjutnya dibandingkan.

### 1.6 Hipotesis

Memotong beberapa bagian *patch* inti (sirkular) antenna mikrostrip mengakibatkan perubahan polarisasi dari linier menjadi sirkular dan terjadi pergeseran frekuensi sehingga diperlukan penyesuaian radius *patch*. Proses *flipping* pada jenis *patch* dengan polarisasi RHCP atau LHCP menghasilkan polarisasi dengan arah putaran yang berlawanan. Isolasi antar dua buah *patch* dalam polarisasi akan optimal pada jarak sekitar  $\lambda_{eff}/4$ .

### 1.7 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam tesis ini adalah sebagai berikut:

---

Perancangan Antena Dual Polarisasi Sirkular RHCP-LHCP  
untuk *Circularly Polarized Synthetic Aperture Radar*  
Onboard Microsatellite ( $\mu$ SAT CP-SAR)

5

a. Bab I Pendahuluan

Bagian ini membahas latar belakang penulisan tesis serta berisi kerangka kerja yang dilakukan dalam pelaksanaan penelitian.

b. Bab II Dasar Teori

Bagian kedua berisi berbagai teori pendukung yang digunakan sebagai dasar untuk melakukan tahapan-tahapan penelitian pada bab simulasi dan perancangan tesis. Beberapa teori pendukung berisi tentang konsep *Synthetic Aperture Radar*, pengembangan mikrosatelit yang didukung teknologi *Circularly Polarized – Synthetic Aperture Radar*, serta beberapa hasil penelitian antenna untuk CP-SAR yang sudah dikembangkan.

c. Bab III Simulasi dan Perancangan

Bagian ini berisi uraian tahapan proses simulasi dan perancangan antenna beserta pemunculan hasil-hasil yang diperoleh dari setiap tahapan.

d. Bab IV Verifikasi Hasil Desain dan Analisis

Bagian ini berisi analisis terhadap hasil yang diperoleh dari bab ketiga yang memungkinkan penemuan kelebihan atau kekurangan dari antenna yang telah dirancang.

e. Bab V Kesimpulan dan Pekerjaan Selanjutnya

Berisi kesimpulan akhir dan pengembangan selanjutnya dari rangkaian tahapan penelitian yang dilakukan.

## BAB V

### KESIMPULAN DAN PEKERJAAN SELANJUTNYA

#### 5.1 Kesimpulan

Dari rangkaian penelitian yang telah dijabarkan, maka dapat ditarik beberapa kesimpulan, antara lain:

- Pemotongan bagian tepi *patch* sirkular menghasilkan polarisasi sirkular yang signifikan. Untuk kasus frekuensi operasi dan tipe substrat yang telah digunakan pada tesis ini, pemotongan pada sudut  $45^\circ$  dan  $225^\circ$  dari sumbu pencatutan dan dengan  $\approx 4\%$  jarak  $d_1$  terhadap radius *patch* berhasil mendapatkan polarisasi sirkular.
- Pada nilai  $VSWR \leq 1,5$ , lebar pita yang dihasilkan adalah  $\approx 16$  MHz, sehingga antenna yang dirancang melalui tahap simulasi memiliki lebar pita  $\approx 60\%$  lebih besar daripada spesifikasi yang diinginkan. Sedangkan  $VSWR$  antenna terfabrikasi memiliki nilai 1,13 pada frekuensi 1,27 GHz. Pada sisi yang lain, lebar pita juga mengalami perbaikan yaitu menjadi  $\approx 28$  MHz pada nilai  $VSWR \leq 1,5$ .
- $S_{1,1}$  yang terukur menunjukkan nilai -23,33 dB sedangkan  $S_{2,2}$  menghasilkan nilai -21,83 dB. Perbedaan hasil sebesar 1,5 dB ini diakibatkan proses fabrikasi yang kurang presisi sehingga nilai yang seharusnya identik menjadi bergeser. Isolasi untuk masing-masing *port* yang terhubung dengan setiap *patch* baik  $S_{1,2}$  maupun  $S_{2,1}$  memiliki nilai  $\approx -26,78$  dB (hasil simulasi

- menggunakan perangkat lunak bantu [33]). Sesuai dengan kriteria bahwa isolasi yang diharapkan adalah lebih kecil dari - 25 dB.
- d. *Patch* antenna dengan polarisasi LHCP memiliki rasio aksial sebesar  $\approx 1,43$  dB. Terdapat pergeseran sebesar 0,17 dB jika dibandingkan dengan rasio aksial pada proses simulasi. Sedangkan pada *patch* antenna dengan polarisasi RHCP, antenna terfabrikasi memiliki rasio aksial sebesar 1,58 dB (bergeser sebesar 0,32 dB). Baik *patch* antenna dengan polarisasi RHCP maupun LHCP, pada antenna terfabrikasi, keduanya masih termasuk *acceptable* untuk menghasilkan polarisasi sirkular ( $< 3$  dB).
- e. *Gain* yang dicapai pada pengukuran antenna terfabrikasi adalah  $\approx 8,59$  dBic yang diukur dengan menggunakan teknik pengukuran *gain* dengan menggunakan dua buah antenna identik (pada saat fabrikasi dilakukan pencetakan 2 kali untuk setiap jenis *stack*). Dengan demikian, antara hasil simulasi dan fabrikasi terdapat perbedaan  $\approx 0,41$  dBic.

## 5.2 Pekerjaan Selanjutnya

Pekerjaan selanjutnya dari penelitian ini adalah menentukan konfigurasi susunan beserta cara pencatutan untuk mendapatkan *gain* susunan yang dapat diaplikasikan pada sensor  $\mu$ SAT CP-SAR (lebih besar dari 30 dBic) dengan menambahkan faktor berat maksimum untuk blok antenna yang diijinkan (kurang dari 20 kg). Pemberian slot pada bagian *patch* utama dapat mengurangi dimensi radius resonan

antena, sehingga dapat mengurangi berat dan luas antenna yang digunakan. Sehingga diperlukan studi lanjut tentang penggunaan slot pada *patch* antenna.

### **Conclusions:**

This chapter discusses the conclusions of the study and some suggestions. Those various studies and simulations described lead to several conclusions:

- a. Cutting the edges of the circular patch antenna gives significant circular polarizations. In the case of operating frequency and the type of substrates used in this thesis, cutting the edges at an angle of  $45^\circ$  and  $225^\circ$  to the feeding axis and the distance of  $d_i \approx 4\%$  to the radius of the patch antenna can produce circular polarization.
- b. When the value of VSWR is  $\leq 1.5$ , the bandwidth is  $\approx 16$  MHz, the designed antenna in the simulation stage has a bandwidth of  $\approx 60\%$  larger than the desired specification; while the fabricated antenna VSWR has a value of 1.13 at a frequency of 1.27 GHz. On the other hand, the bandwidth is also improved to  $\approx 28$  MHz at VSWR values  $\leq 1.5$ .
- c. The results of measuring  $S_{1,1}$  shows a value of -23.33 dB, and measuring  $S_{2,2}$  shows a value of -21.83 dB. They should have been identical; this difference value of 1.5 dB may be caused by imprecision process when being manufactured. The isolation of each port connected to each patch, either to  $S_{1,2}$  or  $S_{2,1}$ , has

- a value of  $\approx -26.78$  dB (the results of the simulation using assistive software [33]). In accordance to the  $\mu$ SAT CP-SAR criteria, the expected isolation is less than -25 dB.
- d. The Patch antenna with LHCP polarization has an axial ratio of  $\approx 1.43$  dB. This has a difference of 0.17 dB compared to the axial ratio in the simulation process. While the patch antenna with RHCP polarization, the axial ratio of fabricated antenna is 1.58 dB (a shift of 0.32 dB). Both patch fabricated antennas, RHCP and LHCP polarization, are acceptable to produce circular polarization ( $<3$  dB).
  - e. The achieved gain in the fabricated antenna measurement is  $\approx 8.59$  dBic, when it is measured using gain measurement technique with two identical antennas (at the time of fabrication, each type of stack is printed 2 times). Thus, the results of simulation and fabrication shows the differences of  $\approx 0.41$  dBic.

#### **Future Works:**

It is suggested that the future study is to determine the array configuration and the feeding method to obtain the gain which can be applied to  $\mu$ SAT CP-SAR sensor (greater than 30 dBic), and taking into account the maximum weight factor for allowable antenna blocks (less than 20 kg). Applying a slot on the main patch can reduce the resonant radius dimension of the antenna, so this can reduce the weight and the area of the antenna. Therefore, further study on the use of the slot on the patch antenna is needed.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ali, M., R. Dougal, G. Yang, H-S. Hwang. 2003. *Wideband Circularly Polarized Microstrip Patch Antenna for 5-6 GHz Wireless LAN Applications*. Proceedings of the IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, Vol. 2, pp. 34-37.
- [2] Baharuddin, M., Josaphat Tetuko S.S. 2010. *Subarray of Elliptical Microstrip Antenna for Circularly-Polarized Synthetic Aperture Radar*. 2<sup>nd</sup> Makassar International Conference on Electrical Engineering and Informatics (MICEEI2010).
- [3] Baharuddin, M., V. Wissan, J. T. Sri Sumantyo, H. Kuze. 2010. *Development of An Annular Ring Microstrip Antenna with Sine Wave Periphery*. Progress in Electromagnetics Research C, Vol. 12, 27-36.
- [4] Balanis, Constantine A., 1997. *Antenna Theory Analysis and Design, Second Edition*. John Wiley & Sons, Inc.
- [5] Cascarano, B., Colinas, J., Girard, R., Plourde, P. 2010. *Design of a Light-Weight Digital Beam Forming Antenna for future SAR Applications*. IEEE 14<sup>th</sup> International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics (ANTEM) and The American Electromagnetics Conference (AMEREM).
- [6] Cheney, Margaret. 2002. *Introduction to Synthetic Aperture Radar (SAR) and SAR Interferometry*. Nashville: Vanderbilt University Press.
- [7] Cumming, I. G., H. W. Wong. 2005. *Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data*. Artech House.
- [8] Curlander, J. C., R. N. McDonough, 1991. *Synthetic Aperture Radar: Systems and Signal Processing*. Wiley.
- [9] Elachi, Charles, Jakob van Zyl. 2006. *Introduction to The Physics and Techniques of Remote Sensing – Second Edition*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- [10] Franceschetti, G. and R. Lanari, 1999. *Synthetic Aperture Radar Processing*. CRC Press.
- [11] Iwasaki, H., 1996. *A Circularly Polarized Small-Size Microstrip Antenna with a Cross Slot*. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 44, issue. 10, pp. 1399-1401
- [12] J. -S. Row, C. -Y. Ai, 2004. *Compact Design of Single-Feed Circularly Polarised Microstrip Antenna*. IEEE Electronics Letters, vol.40, issue: 18, pp. 1093-1094.
- [13] James, J. R., P. S. Hall. 1989. *Handbook of Microstrip Antenna, vol.1*. Peter Peregrinus Ltd.
- [14] Jaworski, G., Maleszka, T., Gruszczynski, S., Wincza, K. 2010. *Dual Frequency & Dual-Linear Polarization Integrated Antenna Array for application in Synthetic Aperture Radar*. IEEE Proceedings of The 40<sup>th</sup> European Microwave Conference.

- [15] Jaworski, G., Wincza, K., Gruszczynski, S., 2009. *Dual Polarized Staked C-band Antenna Element with Novel Hairpin-Type Contactless Stripline to Stripline Transition in Multilayer Integrated Structure for SAR Applications*. IEEE Loughborough Antennas & Propagation Conference.
- [16] Kusumowidagdo, Mulyadi, dkk. 2008. *Penginderaan Jauh dan Interpretasi Citra*. Jakarta: Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional dan Universitas Negeri Semarang.
- [17] Mott, Harold. 2007. *Remote Sensing with Polarimetric Radar*. The University of Alabama, IEEE Press, Wiley-Interscience, John Wiley & Sons, Inc.
- [18] Nasimuddin, Y. Yong, Z.N. Chen, A. Alphones. 2009. *Circularly Polarized F-Shaped Slot Microstrip Antenna with Wide Beamwidth*. Proceedings of the European Microwave Conference, EuMC, pp. 1531–1534.
- [19] Nasimuddin, Z. N. Chen, Xianming Qing. 2008. *Single Fed Circularly Polarized Microstrip Antenna with C-Slot*. Proceedings of the Microwave Conference, pp. 1-4.
- [20] Pozar, David M., 1998. *Microwave Engineering, Second Edition*. John Wiley & Sons, Inc.
- [21] Pozar, David M., 2001. *Microwave and RF Design of Wireless Systems*. John Wiley & Sons, Inc.
- [22] Serka, P., D. Bhatnagar, V.K. Saxena, J.S.Saini. 2009. *Single Feed Circularly Polarized Edge Truncated Elliptical Microstrip Antenna*. Proceedings of the International Conference on Emerging Trends in Electronic and Photonic Devices and Systems ELECTRO, pp. 353-356.
- [23] Shakeeb, Marwa. 2010. *Circularly Polarized Microstrip Antenna*. A Thesis, The Department of Electrical and Computer Engineering, Concordia University.
- [24] Soumekh, M.. 1999. *Synthetic Aperture Radar Signal Processing with Matlab Algorithms*. John Wiley & Sons.
- [25] Sri Sumantyo, J. T., 2010. *Josaphat Microwave Remote Sensing Laboratory, Chiba University*. <http://www2.cr.chiba-u.jp/mrsl/>
- [26] Sri Sumantyo, J. T., et al., Januari 2009. *Report on Development of Circularly Polarized Synthetic Aperture Radar Onboard Microsatellite 2008*. Chiba University.
- [27] Sri Sumantyo, J. T., et al., Maret 2009. *Development of Circularly Polarized Synthetic Aperture Radar Onboard Microsatellite (μSAT CP-SAR)*. PIERS Proceedings, Beijing, China.
- [28] Wen-Qin, W. 2009. *Near-Space Wide-Swath Radar Imaging With Multiaperture Antenna*. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Vol. 8.
- [29] Wen-Shyang Chen, Chun-Kun Wu, Kin-Lu Wong, 2001. *Novel Compact Circularly Polarized Square Microstrip Antenna*. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 49, Issue. 3, pp. 340 – 342.
- [30] Wen-Shyang Chen, Kin-Lu Wong, Chun-Kun Wu. 1999. *Inset-Microstripline-Fed Circularly Polarized Microstrip Antennas*. Proceedings of the IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, vol. 48, issue 8, pp. 1253-1254.

- [31] Wolff, Christian. 2011. *Synthetic Aperture Radar*. <http://www.radartutorial.eu/20.airborne/ab07.en.html>
- [32] Yen-Liang Kuo, Kin-Lu Wong. 2001. *A Circularly Polarized Microstrip Antenna with a Photonic Band Gap Ground Plane*. Proceedings of Microwave Conference, AMPC, Asia-Pacific, vol. 2, pp. 647-650.
- [33] CST Microwave Studio 2010, CST Studio Suite.
- [34] Garg, Ramesh, et al., 2000. *Microstrip Antenna Design Handbook*. Artech House.
- [35] Stutzman, W. L., G. A. Thiele, 1981. *Antenna Theory and Design*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- [36] Hall, P. S., J. S. Dahele, 1997. *Dual and Circularly Polarized Microstrip Antennas - in Advances in Microstrip and Printed Antennas*, K. F. Lee and W. Chen (Eds.). New York: John Wiley & Sons, Inc.
- [37] Haneishi, M., Y. Suzuki, 1989. *Circular Polarization and Bandwidth - in Handbook of Microstrip Antennas, Vol. 1*, J. R. James and P. S. Hall (Eds.). London: Peregrinus.
- [38] Suzuki, Y., N. Miyano, T. Chiba, 1988. *Circularly Polarized Radiation from Singly Fed Equilateral-Triangular Microstrip Antenna - in Microstrip Antenna Design*, K. C. Gupta and A. Benalla (Eds.), Norwood: Artech House, pp. 338-342
- [39] Tsang, K. K., R. J. Langley, 1998. *Design of Circular Patch Antennas on Ferrite Substrates*. IEE Proceedings Microwave Antennas Propagation, Vol. 145, No. 1, pp. 49-55.
- [40] Shen, L. C., 1981. *The Elliptical Microstrip Antenna with Circular Polarization*. IEEE Trans. Antennas and Propagation, Vol. AP-29, pp. 90-94.
- [41] Long, S. A., et al., 1981. *An Experimental Study of The Circular-Polarized Elliptical Printed Circuit Antenna*. IEEE Trans. Antennas and Propagation, Vol. AP-29, pp. 95-99
- [42] Haneishi, M., S. Yoshida, 1988. *A Design Method of Circularly Polarized Rectangular Microstrip Antenna by One-Point Feed - in Microstrip Antenna Design*, K. C. Gupta and A. Benalla (Eds.). Norwood: Artech House, pp. 313-321.
- [43] Haneishi, M., T. Nambara, S. Yoshida, 1982. *Study on Ellipticity Properties of Single-Feed-Type Circularly Polarized Microstrip Antennas*. Electron. Lett., Vol. 18, No. 5, pp. 191-193.
- [44] Baharuddin, M., P. R. Akbar, J. T. S. Sumantyo, H. Kuze, 2009. *Development of Circularly Polarized Synthetic Aperture Radar Sensor Mounted on Unmanned Aerial Vehicle*. Journal of Automation, Control, and Instrumentation, Vol. 1, No. 2, pp. 1-6.
- [45] Rizki Akbar, P., J. T. Sri Sumantyo, V. C. Koo, H. Kuze, 2010. *Estimation of Data Memory Capacity for Circularly Polarized Synthetic Aperture Radar Onboard Unmanned Aerial Vehicle Platform (CP-SAR UAV)*. International Journal of Remote Sensing and Earth Sciences, Vol. 7: 24-35.