

## METODE KOMPUTASI MURAH UNTUK SINKRONISASI FASA OPTIK PADA *OPTICAL BEAMFORMING NETWORKS*

*Herminarto Nugroho<sup>1</sup>, Wahyu Kunto Wibowo<sup>1</sup>, dan Aulia Rahma Annisa<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Program Studi Teknik Elektro, Universitas Pertamina, Jakarta, Indonesia

*E-mail:* herminarto.nugroho@universitaspertamina.ac.id

### **ABSTRACT**

*Optical Beamforming Networks (OBFNs) is used to optimized the received signal power in airplane-satellite communication by controlling the signal beams towards the desired direction. The control of these OBFNs is a difficult and very complex nonlinear problem. The complexity of OBFN can be reduced by lowering the bandwidth of the modulated optical signals at its inputs. It can be achieved by performing optical single-sideband suppressed-carrier (SSB-SC) modulation. However, there is potential problem due to the fact that the phase relation between the optical carrier and the remaining sideband is lost when the group delay response is only optimized for the sideband frequency range. Optical phase synchronization is used to correct this issue by adding extra phase shifters. However, there is not any simple yet effective method to determine the value of the extra phase shifters needed for a certain OBFN. This paper propose a simple and computationally cheap feedback approximation approach to solve this problem.*

**Keywords:** *Optical Beamforming Networks, optical phase synchronization, airplane-satellite communication..*

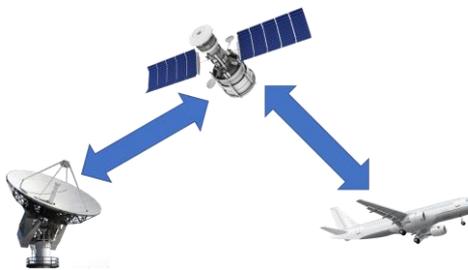
### **ABSTRAK**

*Optical Beamforming Networks (OBFNs) digunakan untuk mengoptimalkan daya sinyal pada komunikasi antara pesawat dan satelit dengan cara mengendalikan pancaran sinyal ke arah yang diinginkan. Pengendalian OBFN ini merupakan permasalahan non-linear yang rumit. Kerumitan OBFN dapat dikurangi dengan mengurangi bandwidth pada sinyal masukan modulasi optik. Cara ini dapat dilakukan dengan menggunakan modulasi single-sideband suppressed-carrier (SSB-SC). Namun, potensi masalah dapat timbul karena fasa antara sinyal pembawa dan sideband sisa akan hilang jika optimasi hanya dilakukan pada rentang frekuensi tertentu saja. Sinkronisasi fasa optik digunakan sebagai solusi permasalahan ini. Namun, saat ini belum ada metode yang sederhana untuk menentukan nilai sinkronisasi fasa optik yang dibutuhkan OBFN. Paper ini mengajukan metode yang sederhana dan dengan komputasi yang murah untuk menentukan nilai sinkronisasi fasa optik.*

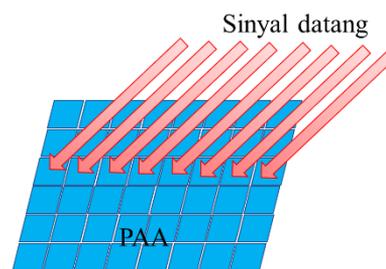
**Kata kunci:** *Optical Beamforming Networks, sinkronisasi fasa optik, komunikasi pesawat-satelit.*

## 1. PENDAHULUAN

Pada beberapa tahun ini, kebutuhan untuk selalu terhubung dengan internet untuk pertukaran data dan informasi meningkat secara eksponensial. Bahkan kebutuhan ini juga meningkat pada penerbangan antar benua, yang selama ini seperti terputus dengan sistem komunikasi luar. Oleh karena itu, ketersediaan akses internet berkecepatan tinggi dalam kabin pesawat merupakan hal yang sangat diinginkan. Hal inilah yang memotivasi pengembangan sistem komunikasi antara pesawat dan satelit yang efektif dan efisien.



**Gambar 8.** Ilustrasi komunikasi antara pesawat dan satelit



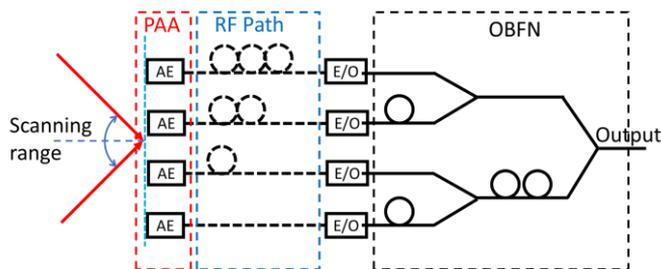
**Gambar 9.** Ilustrasi sistem *Phased Array Antenna* (PAA)

Untuk dapat menerima/memancarkan sinyal dari/ke satelit dengan optimal, pesawat harus memfokuskan pancaran sinyalnya tepat menuju satelit, seperti yang ditunjukkan Gambar 1. Metode komunikasi saat ini yang menggunakan antena parabola yang diputar secara manual menuju satelit tidak efektif karena terdapat beberapa kakurangan, antara lain: biaya perawatan yang tinggi, dimensi yang besar, dan adanya gaya gesekan yang besar dengan udara [1]. Solusi lain adalah menggunakan *Phased Array Antenna* (PAA) yang menawarkan keunggulan-keunggulan antara lain: pengendalian pancaran sinyal yang cepat, biaya perawatan yang relatif lebih murah, tidak adanya gaya gesek udara, dan juga dapat mendukung implementasi beberapa pancaran antena [2].

Sebuah sistem PAA terdiri atas beberapa elemen antena / *antenna elements* (AE) yang tersusun berjejer membentuk geometri tertentu dan sebuah *beamformer*. Pada Gambar 2, sinyal yang datang membentuk suatu sudut sehingga akan terdapat selisih waktu (*delays*) datang sinyal tersebut pada masing-masing elemen antena. Nilai *delays* ini akan berbeda-beda untuk masing-masing AE tergantung dari lokasi AE tersebut relatif terhadap bentuk geometri PAA dan sudut datangnya sinyal. Besarnya *delays* ini akan mempengaruhi daya sinyal yang diterima PAA, karena *delay* ini berhubungan erat dengan fasa sinyal yang

diterima masing-masing AE. Sinyal yang berbeda fasa tentunya tidak akan menghasilkan hasil yang konstruktif.

Untuk menghasilkan sinyal yang optimal, sebuah *Optical Beamforming Networks* (OBFN) [3] digunakan agar *delay* sinyal yang diterima AE menghasilkan perbedaan fasa yang minimal. *Optical Beamforming Networks* (OBFN) menggunakan *optical ring resonators* (ORR) sebagai elemen penambah *delay* yang jika diatur sedemikian rupa dapat menghasilkan sinyal AE yang mempunyai *delay* yang seluruhnya sama, sehingga fasanya pun sama [4] [5]. Ilustrasi untuk *Optical Beamforming Networks* (OBFN) dan *optical ring resonators* (ORR) terdapat pada Gambar 3. Pengaturan OBFN ini merupakan permasalahan non-linear yang sangat kompleks sehingga membutuhkan kemampuan komputasi yang besar. Untuk mengurangi kerumitan pengaturan OBFN ini, pemilihan tipe modulasi sinyal optik yang sesuai sangat penting. Hal ini karena kerumitan OBFN berbanding lurus dengan lebar *bandwidth* pada sinyal masukan optik termodulasi ke OBFN [6] [7].



**Gambar 10.** Sistem *Phased Array Antenna* (PAA), elemen antena (AE) dan *Optical Beamforming Networks* (OBFN)

Pada Bagian selanjutnya, akan dijelaskan dua jenis modulasi optik, yang akan dibandingkan diantara keduanya mana yang akan menghasilkan *bandwidth* yang lebih minimal. Selanjutnya, pada Bagian 3, akan dijelaskan metode sederhana yang digunakan untuk menentukan nilai sinkronisasi fasa optik. Pada Bagian 4, hasil simulasi sinkronisasi fasa optik akan dijabarkan, dan kemudian kesimpulan akan dijabarkan pada Bagian 5.

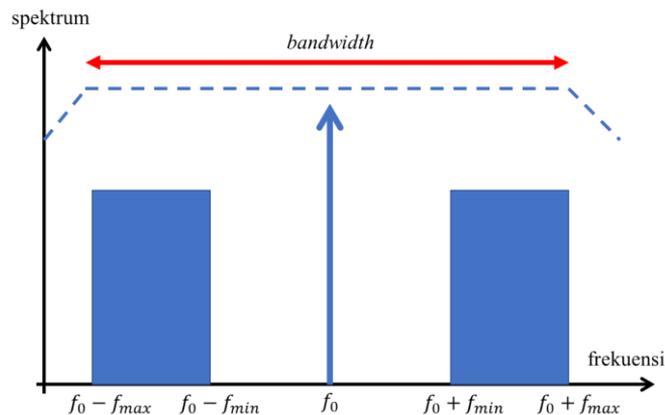
## 2. MODULASI SINYAL OPTIK

Seperti sudah dijelaskan pada Bagian 1, modulasi sinyal optik yang diinginkan adalah yang menghasilkan *bandwidth* yang minimal, agar kerumitan struktur OBFN dapat dikurangi. Ada beberapa metode modulasi optik, namun pada paper ini hanya akan dibahas dua yang paling mendasar, yaitu: *Optical Intensity*

## *Modulation (IM) dan Optical Single-Sideband Suppressed-Carrier (SSB-SC) Modulation.*

### **2.1 Optical Intensity Modulation (IM)**

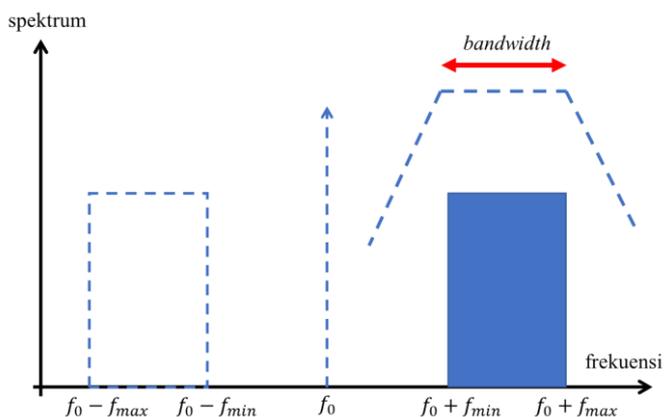
*Intensity Modulation (IM)* adalah pilihan modulasi yang paling sederhana dan lugas. Ilustrasi untuk IM digambarkan pada Gambar 4. Pada modulasi ini OBFN harus didesain agar dapat bekerja pada keseluruhan *bandwidth* yang meliputi frekuensi sinyal pembawa optik *optical carrier* ( $f_0$ ) dan dua buah *sideband* di kedua sisinya. Sehingga, *bandwidth* minimum yang dibutuhkan adalah sebesar dua kali frekuensi maksimal. *Bandwidth* yang sebesar ini membutuhkan *free spectral range (FSR)* yang juga besar pada ORR [8]. Semakin besar FSR pada ORR, maka dimensi ORR harus semakin kecil, yang dapat menimbulkan masalah lainnya, yaitu sangat sulit dan mahal untuk memproduksi ORR dengan ukuran sangat kecil.



**Gambar 11.** *Intensity Modulation (IM) dan bandwidth yang dibutuhkan*

### **2.2 Optical Single-Sideband Suppressed-Carrier (SSB-SC) Modulation**

Jika dilihat dari Gambar 4, terlihat bahwa sebenarnya kedua *sidebands* tersebut membawa informasi yang sama, sedangkan *optical carrier* hanya dibutuhkan untuk konversi sinyal optik ke elektrik [9]. Maka sebenarnya *bandwidth* yang dibutuhkan dapat dikurangi dengan hanya mempedulikan satu *sideband* saja tanpa *optical carrier*. Modulasi semacam ini disebut sebagai *Optical Single-Sideband Suppressed-Carrier (SSB-SC) Modulation*. Ilustrasi untuk SSB-SC dapat dilihat pada Gambar 5.

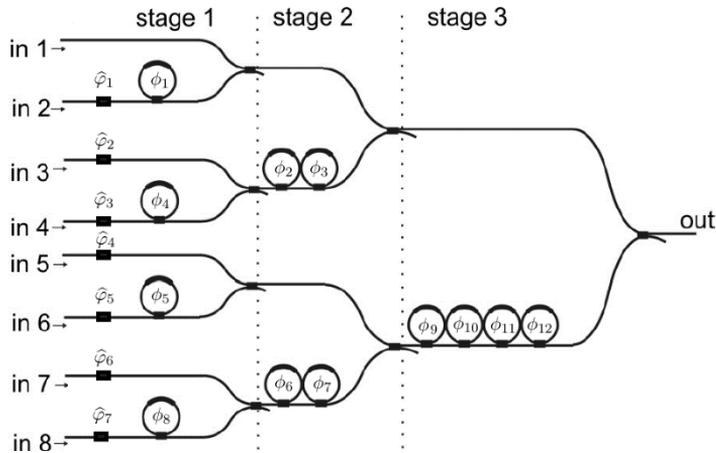


**Gambar 12.** *Optical Single-Sideband Suppressed-Carrier (SSB-SC) Modulation dan bandwidth yang dibutuhkan*

Perlu diperhatikan bahwa menghilangkan *optical carrier* dapat menimbulkan permasalahan lain, karena seperti terlihat pada Gambar 5, *sideband* yang tersisa juga dipengaruhi oleh nilai frekuensi dari *optical carrier* ( $f_0$ ). Permasalahan ini akan muncul ketika beberapa sinyal optik mungkin saja memiliki *optical carrier* yang berbeda-beda. Untuk menyelesaikan permasalahan ini maka sinkronisasi fasa optik (*optical phase synchronization*) digunakan dengan menambahkan *extra phase shifter*.

### 3. MODEL MATEMATIKA DARI SINKRONISASI FASA OPTIK

Sinkronisasi fasa optik digunakan untuk menambahkan *extra phase shifter* pada masing-masing jalur OBFN dengan tujuan untuk menggantikan peran frekuensi *optical carrier* sehingga sinyal dari AE dapat dikombinasikan satu sama lain. Salah satu metode yang digunakan untuk menentukan nilai *extra phase shifter* adalah dengan metode *feedback loop* dari sinyal keluaran pada masing-masing jalur OBFN. Posisi penambahan *extra phase shifter* dapat dilihat pada Gambar 6.



**Gambar 13.** Konfigurasi OBFN  $8 \times 1$  dengan *extra phase shifter* pada masing-masing jalur OBFN

Metode *feedback loop* memberikan sinyal *feedback* dalam bentuk nilai keluaran sinyal pada masing-masing jalur OBFN ke dalam persamaan untuk mencari nilai *extra phase shifter* [10]. Kemudian dengan metode optimasi digunakan untuk mencari nilai *extra phase shifter* yang dapat menghasilkan sinyal keluaran dengan daya maksimal. Untuk mendapatkan total daya keluaran maksimal, persamaan (1) berikut harus minimal untuk frekuensi  $f$  tertentu dengan mengubah nilai *extra phase shifter*  $\hat{\varphi}_n$  dan  $\hat{\varphi}_m$ .

$$\sum_{n \neq m} \frac{1}{2} (\hat{\varphi}_n - \hat{\varphi}_m + \varphi_n(f) - \varphi_m(f) - 2\pi f(\Delta t_n - \Delta t_m))^2 \quad (1)$$

Nilai *extra phase shifter*  $\hat{\varphi}_n$  dan  $\hat{\varphi}_m$  merupakan besarnya pergeseran fasa pada jalur  $n$  dan  $m$  yang tidak bergantung pada besarnya frekuensi  $f$ . Sedangkan  $\varphi_n(f)$  dan  $\varphi_m(f)$  merupakan besarnya pergeseran fasa yang dihasilkan oleh ORR. Pergeseran fasa oleh ORR ini dipengaruhi oleh nilai frekuensi  $f$ .

Jika diasumsikan bahwa nilai *extra phase shifter* sudah diatur dengan benar untuk frekuensi tengah ( $f_c$ ) yang terletak pada tengah *bandwidth*, maka persamaan (1) harus minimal untuk frekuensi  $f_c$  tersebut. Dengan kata lain, *extra phase shifter* harus dipilih sehingga memenuhi persamaan berikut:

$$(\hat{\varphi}_n - \hat{\varphi}_m + \varphi_n(f_c) - \varphi_m(f_c) - 2\pi f_c(\Delta t_n - \Delta t_m)) = 0, \quad \forall n, \quad (2)$$

Misalkan untuk konfigurasi OBFN  $8 \times 1$  pada Gambar 6, dimana *extra phase shifter*  $\hat{\varphi}_n$  berada di depan jalur OBFN nomor  $n$ . Dengan menggunakan persamaan (2) dan memilih jalur pertama (paling atas) sebagai jalur acuan ( $m = 1$ ) sehingga nilai  $\hat{\varphi}_m = 0$  dan  $\varphi_m(f_c) = 0$ , maka akan diperoleh

$$(\hat{\varphi}_n + \varphi_n(f_c) - 2\pi f_c \Delta t_n) = 0. \quad (3)$$

Dari persamaan (3), dapat disimpulkan bahwa nilai *extra phase shifter* untuk jalur  $n$  adalah sebesar

$$\hat{\varphi}_n = -\varphi_n(f_c) + 2\pi f_c \Delta t_n, \quad (4)$$

dengan nilai pergeseran fasa yang timbul karena semua ORR di jalur  $n$ , yaitu  $\varphi_n(f_c)$ , yang dirumuskan sebagai

$$\varphi_n(f_c) = \sum_k \phi_k(f_c), \quad (5)$$

dimana  $k$  merupakan indeks dari ORR pada jalur OBFN nomor  $n$ .

## 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Pengaturan Simulasi

Setelah mendapatkan model matematika dari sinkronisasi fasa optik yang dinyatakan pada persamaan (1)-(5), sekarang model ini akan diujikan dengan menggunakan konfigurasi OBFN baik skala kecil  $4 \times 1$  OBFN, maupun skala besar  $16 \times 1$  OBFN. Simulasi akan menggunakan OBFN berdasarkan *optical ring resonator* (ORR) yang respons frekuensinya telah diuraikan oleh Rabus [11].

Respons frekuensi untuk sebuah ORR dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$H(f) = \frac{\sqrt{1-\kappa}-re^{-j(2\pi fT-\phi)}}{1-r\sqrt{1-\kappa}e^{-j(2\pi fT-\phi)}}, \quad (6)$$

dengan  $\kappa$  adalah koefisien kopling daya,  $\phi$  adalah besaran pergeseran fasa,  $r$  adalah faktor daya, dan  $T$  adalah periode putaran sinyal. Simulasi ini akan dibatasi hanya pada kondisi faktor daya  $r = 1$  karena simulasi ini hanya fokus pada sinkronisasi fasa optik yang tidak bergantung pada nilai  $r$ .

Nilai parameter-parameter yang dibutuhkan untuk simulasi sama dengan nilai yang terdapat pada [12]. Tabel 1 menunjukkan nilai untuk masing-masing parameter yang digunakan pada simulasi. Sinyal masukan ke OBFN merupakan

sinyal acak (*random*) dengan rentang frekuensi dengan *bandwidth* 2 GHz yang terbagi menjadi 100 jumlah frekuensi.

**Tabel 1.** Parameter nominal OBFN pada proses simulasi

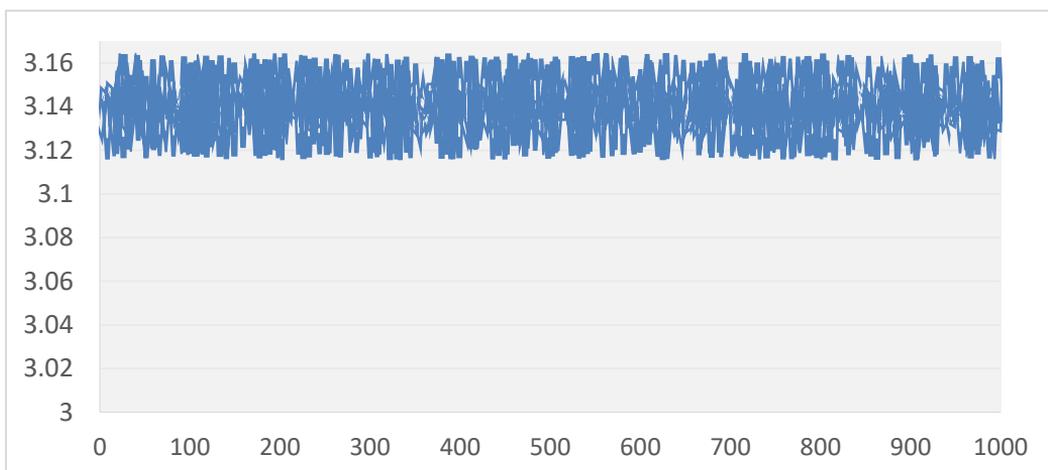
Simbol	Besaran	Nilai	Simbol	Besaran	Nilai
$r$	Faktor daya	1 <sup>a)</sup>	$f_c$	Frekuensi tengah	107.52 Hz
$ H(f) $	Besar frekuensi respons	1 <sup>a)</sup>	$\omega$	<i>Bandwidth</i>	2 GHz
$T$	Perioda	0.08 ns	$N$	Jumlah frekuensi	100 <sup>b)</sup>
$\lambda$	Panjang gelombang	1550 nm			

<sup>a)</sup> Dengan asumsi bahwa faktor daya yang digunakan adalah  $r = 1$ , maka nilai besaran respons frekuensi untuk sebuah ORR adalah  $|H(f)| = 1$ .

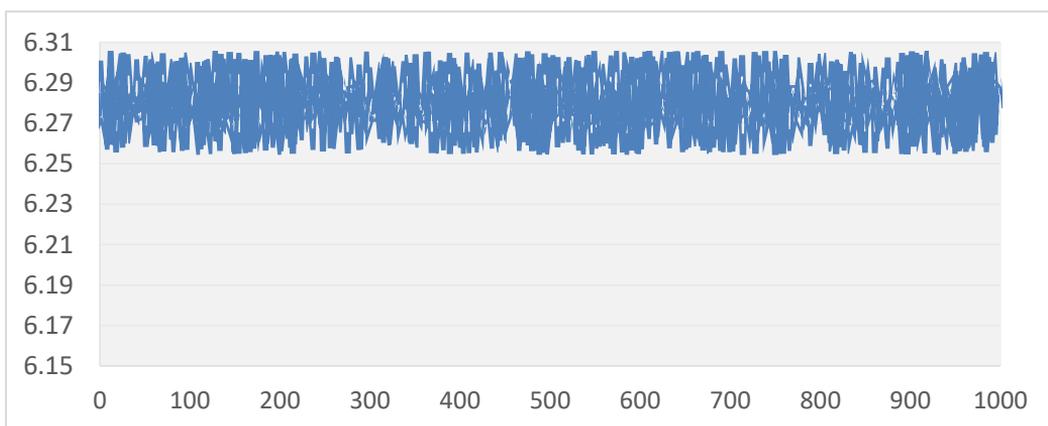
<sup>b)</sup> Jumlah frekuensi harus dipilih cukup besar untuk akurasi hasil simulasi, sehingga nilai yang dipilih adalah  $N = 100$ .

## 4.2 Hasil Simulasi dan Pembahasan

Gambar 7 dan 8 menunjukkan hasil simulasi  $4 \times 1$  OBFN. Simulasi ini bertujuan untuk mencari nilai sinkronisasi fasa optik paling optimal yang dapat digunakan untuk nilai parameter pada Tabel 1. Simulasi tersebut diiterasi sebanyak 1000 kali. Nilai sinkronisasi fasa optik yang ditunjukkan pada Gambar 7 adalah nilai untuk sebuah ORR pada jalur kedua OBFN (lihat Gambar 6, jalur kedua dari atas). Sedangkan Gambar 8 menunjukkan nilai sinkronisasi fasa optik untuk dua buah ORR pada jalur ketiga OBFN (lihat Gambar 6, jalur ketiga dari atas).



**Gambar 14.** Nilai sinkronisasi fasa optik yang didapatkan dari hasil simulasi  $4 \times 1$  OBFN dengan jumlah iterasi 1000 dengan menggunakan metode *feedback loop* pada jalur kedua OBFN.



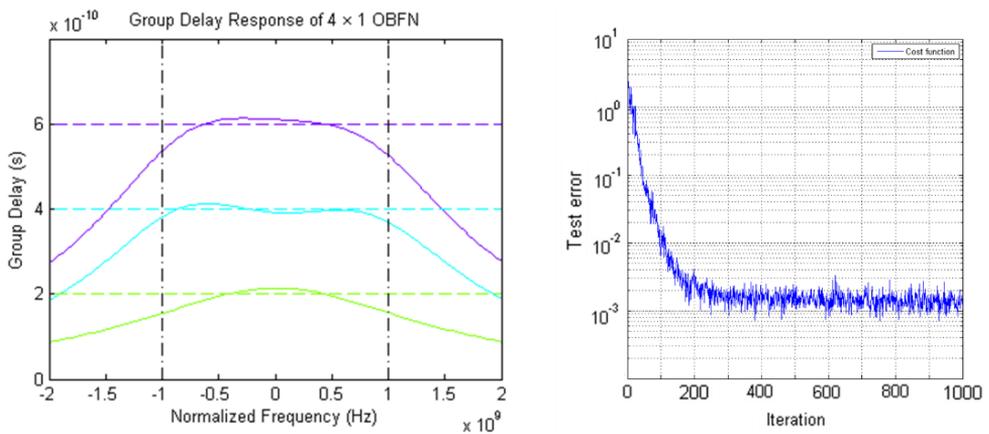
**Gambar 15.** Nilai sinkronisasi fasa optik yang didapatkan dari hasil simulasi  $4 \times 1$  OBFN dengan jumlah iterasi 1000 dengan menggunakan metode *feedback loop* pada jalur ketiga OBFN.

Berdasarkan hasil simulasi yang ditunjukkan oleh Gambar 7 dan 8 dengan menggunakan nilai parameter-parameter yang disebutkan pada Tabel 1, nilai sinkronisasi fasa optik yang dihasilkan oleh sebuah ORR dinyatakan dengan persamaan berikut:

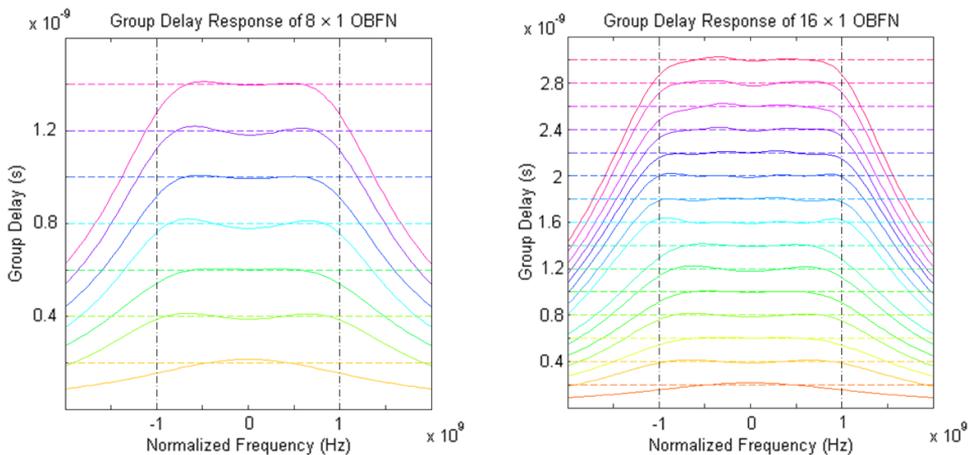
$$\phi_k(f_c) \approx \pi, \quad \forall k. \quad (7)$$

dimana  $k$  menyatakan indeks ORR pada suatu jalur OBFN.

Untuk membuktikan bahwa nilai sinkronisasi pada persamaan (7) sesuai untuk digunakan pada konfigurasi OBFN apapun, maka simulasi untuk mengendalikan OBFN dengan konfigurasi yang berbeda-beda pun dilakukan. Gambar 8 menunjukkan hasil simulasi pada  $4 \times 1$  OBFN dengan  $delay$  yang diharapkan sebesar  $[0 \ 0.1 \ 0.2 \ 0.3]$  ns. Jika dilihat dari Gambar 8, nilai galat yang dihasilkan sangat kecil, terbukti juga dengan nilai respons frekuensi pada  $delay$  yang sangat mendekati nilai yang diharapkan. Hal ini membuktikan bahwa sinkronisasi fasa optik pada persamaan (7) dapat digunakan untuk  $4 \times 1$  OBFN.



**Gambar 16.** Respons  $delay$  dan galat sebagai hasil simulasi pada  $4 \times 1$  OBFN



**Gambar 17.** Hasil simulasi untuk  $8 \times 1$  OBFN (kiri), dan  $16 \times 1$  OBFN (kanan)

Gambar 10 menunjukkan hasil simulasi untuk OBFN dengan skala lebih besar, yaitu:  $8 \times 1$  OBFN dan  $16 \times 1$  OBFN. Dapat kita lihat bahwa nilai respons frekuensi pada *delay* yang sangat mendekati nilai yang diharapkan. Hal ini juga membuktikan bahwa sinkronisasi fasa optik pada persamaan (7) dapat digunakan untuk konfigurasi OBFN dengan skala lebih besar.

## 5. KESIMPULAN DAN SARAN

Dengan tujuan penyederhanaan dan proses komputasi yang lebih cepat, pendekatan nilai sinkronisasi fasa optik yang dihasilkan pada penelitian ini sangat bermanfaat jika diaplikasikan pada OBFN skala besar. Hal ini dikarenakan, dalam proses pengaturan OBFN skala besar, dibutuhkan kemampuan komputasi yang sangat besar. Jika kebutuhan komputasi untuk mengetahui nilai sinkronisasi fasa optik menjadi lebih murah, maka akan sangat mempercepat proses pengaturan OBFN skala besar.

## UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Instansi/perusahaan/lembaga yang telah memberi dukungan yang membantu pelaksanaan penelitian. Penelitian ini dibiayai oleh Direktorat Riset dan Pengabdian Masyarakat Direktorat Jenderal Penguatan Riset dan Pengembangan Kementerian Riset, Teknologi, dan Pendidikan Tinggi, sesuai dengan kontrak penelitian Tahun Anggaran 2018 Nomor: 041/KM/PNT/2018, tanggal 06 Maret 2018.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] L. Zhuang, "Ring resonator-based broadband photonic beamformer for phased array antennas," *Ph.D. dissertation, University of Twente*, 2010.
- [2] R. C. Hansen, *Phased Array Antennas*, John Wiley & Sons, 2009.
- [3] A. Meijerink, C. Roeloffzen, L. Zhuang, D. Marpaung, R. Heideman, A. Borreman and W. v. Etten, "Phased array antenna steering using a ring resonator-based optical beam forming network," in *IEEE Symposium on Communications and Vehicular Technology*, Liege, 2006.
- [4] G. Lenz, B. Eggleton, C. K. Madsen and R. Slusher, "Optical delay lines based on optical filters," *IEEE Journal of Quantum Electronics* vol. 37, no. 4, pp. 525-532, 2001.

- [5] L. Zhuang, C. G. Roeloffzen and W. V. Etten, "Continuously tunable optical delay line," in *IEEE Symposium on Communications and Vehicular Technology*, Twente, 2005.
- [6] A. Meijerink, C. Roeloffzen, R. Meijerink, L. Zhuang and D. Marpaung, "Novel ring resonatorbased integrated photonic beamformer for broadband phased array receive antennas - Part I: Design and performance analysis," *Journal of Lightwave Technology*, p. 318, 2010.
- [7] L. Zhuang, C. Roeloffzen, A. Meijerink, M. Burla, D. Marpaung, A. Leinse, M. Hoekman, R. Heideman and W. v. Etten, "Novel ring resonator-based integrated photonic beamformer for broadband phased array receive antennas - Part II: Experimental prototype," *Lightwave Technology, Journal of*, vol. 28, no. 1, p. 1931, 2010.
- [8] L. Zhuang, "Time-delay properties of optical ring resonators," *Masters thesis, University of Twente*, 2005.
- [9] H. Schippers, J. Verpoorte, P. Jorna, A. Hulzinga, A. Meijerink, C. Roeloffzen, L. Zhuang, D. Marpaung, W. v. Etten and R. Heideman, "Broadband conformal phased array with optical beamforming for airborne satellite communication," in *2008 IEEE Aerospace Conference*, Big Sky, Montana, USA, 2008.
- [10] A. Garca, "Optical phase synchronization in coherent optical beamformers for phased array receive antennas," *Masters thesis, University of Twente*, 2009.
- [11] D. G. Rabus, *Integrated Ring Resonators: The Compendium*, ser. Springer Series in Optical Sciences., Berlin: Springer, 2007.
- [12] R. Blokpoel, "Staggered delay tuning algorithms for ring resonators in optical beamforming networks," *Masters thesis, University of Twente*, 2007.