

INTERFEROMETER MACH ZEHNDER SEBAGAI SENSOR SERAT OPTIK

HERDIYANTO

Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik – UKSW

Jalan Diponegoro 52-60, Salatiga 50711

INTISARI

Penggunaan serat optik dalam telekomunikasi berkembang dengan pesatnya. Demikian pula dengan sensor yang menggunakan serat optik. Sensor ini memiliki banyak kelebihan, seperti isyarat termodulasi dapat ditransmisikan dari dan ke daerah *sensing* tanpa melalui hubungan secara elektrik. Sensor interferometer Mach Zehnder akan menggunakan teknik modulasi fasa dengan *two-beam* interferometer, dimana cahaya yang masuk akan dipisahkan menjadi dua berkas cahaya yang kemudian akan berinterferensi kembali sebelum dideteksi.

Kata kunci : Sensor optik, interferometer

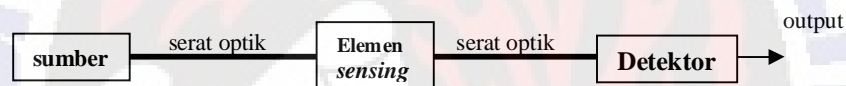
1. PENDAHULUAN

Keuntungan utama sensor serat optik adalah kemampuan dalam ketelitian pengukuran yang tidak dapat dicapai dengan teknologi lain. Salah satu jenis sensor serat optik adalah sensor modulasi fasa atau sering disebut dengan sensor interferometer. Sensor ini menggunakan teknik modulasi fasa, selain itu sensor ini juga dapat digabungkan dengan suatu alat yang disebut interferometer. Berdasarkan strukturnya, serat optik dibedakan dua macam yaitu serat optik *single mode* dan serat optik *multi mode*. Interferometer Mach Zehnder menggunakan serat *single mode*. Sumber cahaya yang digunakan adalah laser. Pada serat multi mode terjadi *intermodal dispersion*, Sedangkan pada serat *single mode* tidak terjadi *intermodal dispersion*.

2. SENSOR SERAT OPTIK

Sensor serat optik merupakan suatu sensor yang menggunakan serat optik sebagai komponen utamanya, dimana skema dasarnya dilihat pada Gambar 1.

Cahaya dari sumber ditransmisikan ke serat optik dan dipandu ke titik dimana pengukuran dilakukan. Pada titik ini parameter yang diukur akan dimodulasi oleh cahaya tersebut. Dan cahaya termodulasi ini dengan melalui serat optik akan dikembalikan ke detektor dimana cahaya yang termodulasi tersebut akan diubah menjadi sinyal elektrik.



Gambar 1. Skema dasar sensor serat optik.

3. KLASIFIKASI SENSOR SERAT OPTIK

Berdasarkan proses modulasi dan demodulasinya, sensor serat optik dapat dibedakan menjadi:

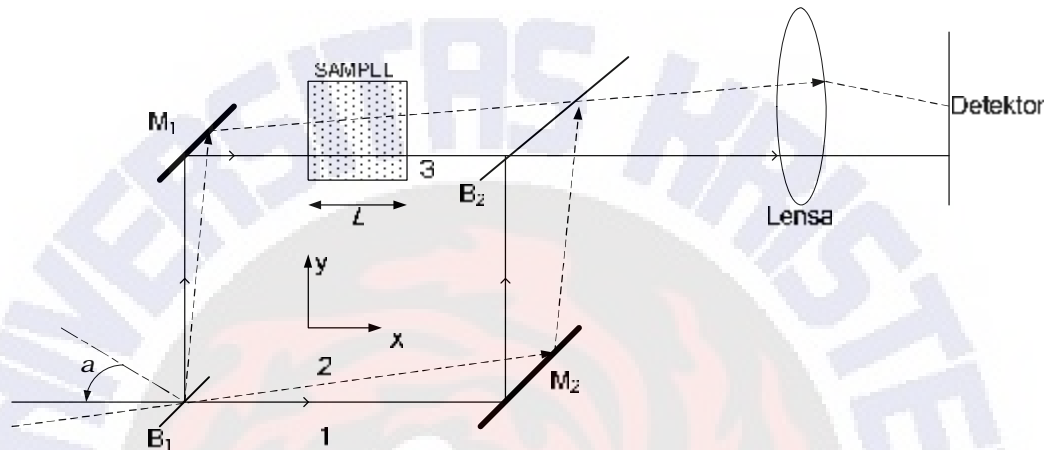
- a. Sensor modulasi amplitudo
- b. Sensor modulasi frekuensi
- c. Sensor modulasi fasa

Sensor dengan modulasi fasa inilah yang akan dipakai dalam interferometer

4. SENSOR INTERFEROMETER MACH ZEHNDER

Sensor interferometer Mach Zehnder merupakan sensor modulasi fasa yang menggunakan *two-beam interferometer*

Pada sensor interferometer Mach Zehnder, cahaya yang masuk dipisahkan menjadi dua bagian, sebagian masuk ke lajur referensi dan yang lainnya masuk ke lajur *sensing*.



Gambar 2. Skema dasar Interferometer Mach Zehnder.

Interferometer Mach Zehnder didasarkan pada dua berkas gelombang yang berinterferensi disebabkan pembagian amplitudo dari gelombang yang masuk. Dua gelombang berjalan pada panjang lintasan yang berbeda. Pemasukan objek yang transparan pada salah satu lengan dari interferometer akan mengubah beda lintasan optik diantara dua berkas gelombang. Perubahan pola interferensi dapat digunakan untuk menentukan indeks bias (n) suatu bahan sampel dengan sangat teliti.

Interferometer Mach Zehnder terdiri dari pembagi berkas (B_1 dan B_2) dan cermin (M_1 dan M_2) yang semuanya dipasang secara sejajar satu dengan yang lain. Beda lintasan optik tanpa *sample* sama dengan nol karena beda lintasan $\Delta_1 = B_1 M_1$ diimbangi oleh $\Delta_2 = B_2 M_2$. Dengan menggunakan *sample* maka beda lintasan optik :

$$\Delta_s = (n-1)L \tag{1}$$

Berkas sinar ke 3 setelah diekspansikan akan diperoleh pola-pola interferensi yang menunjukkan variasi indeks bias dari *sample*. Dengan suatu lensa positif (sebagai pembesar berkas) maka berkas laser dapat diperbesar diameter berkasnya (20 cm hingga 30 cm) sehingga obyek yang besar dapat diuji atau diselidiki.

5. PRINSIP DASAR SENSOR INTERFEROMETER

Sensor modulasi fasa ini bekerja berdasarkan mekanisme modulasi fasa. Sensor ini memiliki beberapa komponen utama, yaitu sumber cahaya, serat optik, interferometer dan detektor.

Pada proses modulasi fasa, cahaya yang masuk ke dalam serat optik, dalam hal ini serat *single mode*, akan mengalami beda fasa pada saat keluar dari serat tersebut. Beda fasa ini tergantung dari karakteristik tundaan serat optik. Beda fasa tersebut sebanding dengan bL_l , dengan b adalah konstanta propagasi atau koefisien perubahan fasa dan L_l adalah panjang serat optik. Mengingat b dan L_l bernilai konstan, maka harga fasa f_l juga akan konstan. Beda fasa Δf_l ini dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\Delta f_l = b\Delta L_l + L_l\Delta b \quad (2)$$

dengan :

ΔL_l : perubahan panjang serat optik

Δb : perubahan konstanta propagasi

dengan konstanta propagasi $b = k_0 n$, maka :

$$\Delta f_l = b\Delta L_l + L_l \left[k_0 \Delta n + \left(\frac{\partial b}{\partial a} \right) \Delta a \right] \quad (3)$$

dengan :

n : indeks bias

a : jari-jari inti serat optik

k_0 : bilangan gelombang di ruang hampa

$\frac{\partial b}{\partial a}$: laju dari perubahan konstanta perambatan terhadap jari-jari inti

Dalam sensor modulasi fasa ini, cahaya yang telah dimodulasi fasa akan diproses lebih lanjut. Proses tersebut memerlukan suatu alat yang disebut interferometer. Terdapat beberapa jenis interferometer yang digunakan dalam proses penginderaan dimana masing-masing interferometer memiliki cara kerja yang berbeda-beda, salah satunya adalah *two-beam interferometer*.

5.1. Lajur Sensing

Cahaya yang melalui lajur ini mengalami proses modulasi fasa disebut cahaya *sensing* dalam sensor interferometer ini. Lajur serat optik yang dilalui oleh cahaya ini juga disebut lajur *sensing*.

5.2. Lajur Referensi

Selain cahaya *sensing*, pada sensor interferometer juga terdapat cahaya referensi, yaitu sebagian cahaya dari sumber cahaya memisahkan diri, masuk ke lajur serat optik yang berbeda dengan panjang d , yang akan sebagai referensi fasa ketika bergabung kembali. Lajur referensi ini terbuat dari serat optik single mode yang sama dengan lajur pertama, dengan beda fasa $\phi_2 = \beta d$, sehingga serat optik ini tidak mengalami efek dari

pengukuran, meskipun ϕ_2 konstan. Walaupun dalam kenyataannya, hal ini tidak akan sepenuhnya terlaksana, lajur referensi ini pasti akan mengalami gangguan lingkungan

5.3. Proses Interferensi

Setelah itu, kedua cahaya tersebut akan bergabung kembali melalui sebuah *coupler*.

Bila fasa pada lajur referensi f_2 dianggap konstan, sumber cahayanya stabil dan intensitas interferometer dianggap nol, maka akan dihasilkan suatu intensitas keluaran I_{out} sebagai berikut

$$I_{out} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(f_1 + \Delta - f_2) \quad (4)$$

dimana :

I_1 : intensitas sensing

I_2 : intensitas referensi

Δ : beda fase yang mengacu pada perbedaan sudut baru osilator

dengan : $\Delta f = \phi_1 - \phi_2$

maka :

$$I_{out} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\Delta + \Delta f) \quad (5)$$

Tetapi pada dasarnya keadaan di atas tidak mungkin terjadi, karena fluktuasi frekuensi. Sehingga intensitas keluaran interferometer adalah :

$$I_{out} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\Delta + \Delta f) \exp(-t/2t_c) \quad (6)$$

dengan :

$$t_c = \frac{1}{2p\Delta n_{1/2}} \quad (7)$$

$$t = \frac{(L_1 - L_2)n}{c} \quad (8)$$

dengan :

t_c : waktu koheren

$Dn_{1/2}$: sumber linewidth

Oleh karena itu diperlukan sumber cahaya yang memiliki waktu koheren lebih besar dari delay τ , yaitu *single frequency laser*

5.4. Proses Deteksi

Setelah melalui proses interferensi, cahaya akan dideteksi oleh suatu *photodetector*.

Jika arus yang keluar dari detektor, i_s adalah:

$$i_s = I_0 \frac{he}{hn} \Delta f = \left[\frac{I_0 he}{hn} \right] \left[\frac{df}{dP} \right] \Delta P \quad (9)$$

arus foton *noise* i_N , yang berhubungan dengan deteksi ini adalah :

$$i_N^2 = 2e \left[\frac{I_0 he}{hn} \right] B \quad (10)$$

Perbandingan *signal to noise* SNR adalah :

$$SNR = \frac{i_s^2}{i_N^2} \quad (11)$$

dan tekanan minimum yang masih dapat terdeteksi bila $SNR = 1$, maka daya minimum yang diperlukan adalah :

$$P_{\min} = \left[\frac{2hvB}{I_0 h} \right]^{1/2} \left[\frac{df}{dP} \right]^{-1} \quad (12)$$

dengan :

e : muatan elektron

h : konstanta Plank

n : frekuensi cahaya

B : *bandwidth* deteksi

h : efisiensi kuantum

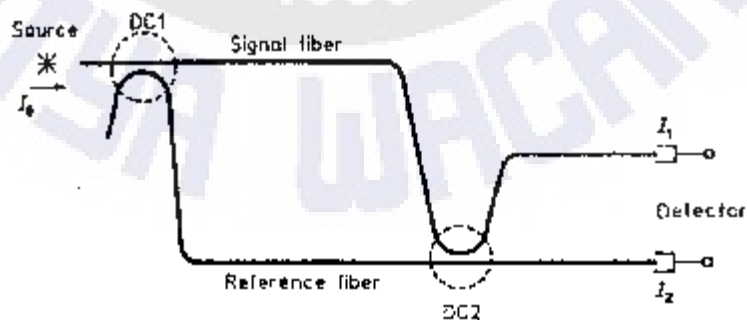
DP : perubahan tekanan *hydrostatic*

I_0 : daya yang mencapai detektor

Sensor ini mampu mendeteksi beda fasa sebesar 10^{-5} rad sampai 10^{-6} rad pada jarak 10^{-11} m.

6. STRUKTUR SENSOR INTERFEROMETER MACH ZEHNDER

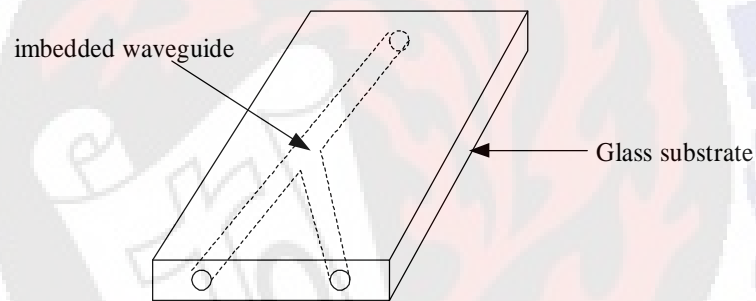
Sensor ini terdiri dari beberapa bagian penting, yaitu sumber cahaya, serat optik, detektor dan *coupler*. Sensor ini memiliki struktur yang sederhana, seperti yang terlihat pada Gambar 3



Gambar 3. Interferometer Mach Zehnder.

Sumber cahaya yang sesuai untuk sensor interferometer ini adalah sumber cahaya yang bersifat koheren. Sumber cahaya yang sering digunakan pada sensor ini adalah *single frequency laser*

Kedua lajur pada interferometer ini merupakan serat optik. Jenis serat optik yang digunakan pada sensor ini adalah serat *single mode*. Serat *multi mode* jarang di gunakan karena sensor interferometer yang menggunakan serat *multi mode* sensitivitasnya lebih rendah bila dibanding dengan yang menggunakan serat *single mode*. Hal ini disebabkan karena pada sensor dengan serat *multi mode*, terdapat beda fasa antar *mode* sehingga sulit dideteksi dan peredupan isyarat mudah terjadi.



Gambar 4 *Branching Coupler* .

Sensor interferometer Mach Zehnder menggunakan *coupler* yang dibentuk dengan menyabangkan pandu gelombang yang tertanam (*embedded waveguide*) dalam sambungan Y, seperti pada Gambar 4. Interferometer Mach Zehnder terdiri dari dua kombinasi sambungan Y. Cahaya dirangkai ke struktur dan dibagi menjadi dua gelombang pandu oleh sambungan Y yang pertama. Dua gelombang pandu berjalan sepanjang dua lengan dari interferometer dan bergabung pada sambungan Y yang kedua. Karena kedua gelombang dibangkitkan oleh sumber yang sama, maka kedua gelombang tersebut

koheren dan berinterferensi jika perbedaan diantara panjang dua lengan kurang dari panjang koherensi dari cahaya yang digunakan.

Pada sambungan Y yang kedua terdapat dua situasi yang berbeda, yaitu :

1. Dua gelombang dengan fasa yang sama, mereka akan berinterferensi konstruktif dan akan dipandu ke port keluaran.
2. Dua gelombang memiliki beda fasa π , mereka akan berinterferensi destruktif dan tidak akan dipandu oleh pandu gelombang. Akibatnya cahaya diradiasikan ke substrat.

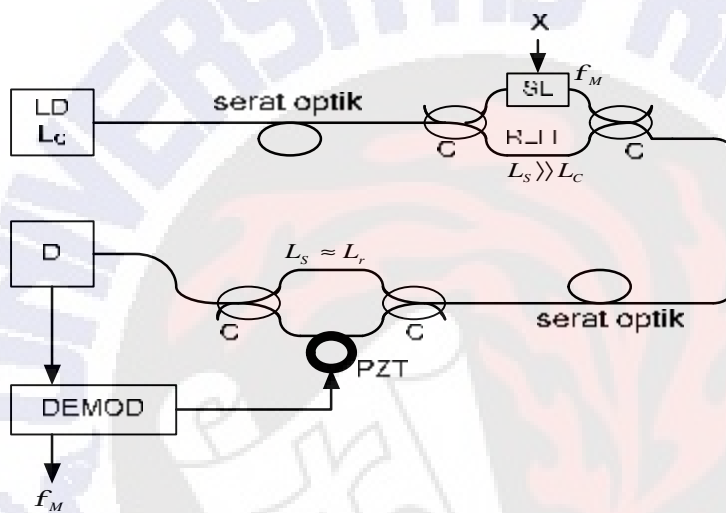
7. SISTEM MULTIPLEXING YANG DIGUNAKAN

Sistem *multiplexing* yang digunakan dalam sensor interferometer Mach Zehnder yaitu teknik *Multiplexing* Koheren.

Multiplexing koheren merupakan metode yang baik untuk pengalamatan jarak jauh. Tetapi jika pemakaian sensor optik interferometer diperbanyak, maka masing-masing akan menyumbang sumber gangguan intensitas. Dan ini perlu dicegah. Masalah ini dapat diatasi dengan menggunakan sumber optik dengan panjang koheren yang kecil seperti LED, tetapi konsekuensinya perlu adanya penggantian lintasan optik untuk menghindari menurunnya *fringe visibility*.

Multiplexing koheren didasarkan pada tehnik *Path-matched differential interferometer* (PMDI). *Path-matched differential interferometer* (PMDI) mengijinkan demodulasi bersama dari susunan sensor serat optik interferometer dengan jumlah yang sama dari interferometer penerima parallel yang masing-masing memiliki detektor.

Path-matched differential interferometer (PMDI) menggunakan teknik demodulasi pasif yang mengandalkan pada kompensasi penginderaan interferometer dengan ketidakseimbangan (L_S), dan yang kedua oleh interferometer penerima yang terhubung seri dengan perbedaan lintasan yang hampir sama (L_r). Metode ini membutuhkan panjang koheren laser dioda (L_c), yang lebih kecil dari L_S dan L_r , seperti pada Gambar 5.



Gambar 5. Prinsip *Path-matched differential interferometer* (PMDI).

Cahaya pada keluaran dari setiap satu interferometer tidak akan memberi perbedaan pola gelap terang interferensi (*fringe interference*) yang berarti. Bagaimanapun juga perbedaan yang baik dihasilkan pada keluaran dari dua interferometer yang terhubung seri, jika L_r disusun berdekatan dengan L_S sedemikian rupa, sehingga $L_c \gg L_r - L_S$. Jadi hanya kombinasi dari dua konfigurasi Mach Zehnder bertindak sebagai alat interferometer *high fringe contrast*.

Digunakan sumber laser dioda, dan juga nilai yang besar dari L_S dan L_r untuk memenuhi keadaan $L_c \gg L_S \approx L_r$. Oleh karena itu, sedikit gangguan fasa dari laser akan

menghasilkan gangguan intensitas yang besar pada detektor. Ini dikarenakan adanya derajat dari *residual fringe visibility*, bahkan untuk $L_s, L_r \gg L_c$, dan mengacu pada lintasan yang panjang. Besarnya intensitas pada detektor dapat ditulis dengan persamaan sebagai berikut:

$$I_D = p \left\{ 1 + \sum_{i=1}^4 (L_i, L_c) \cos \frac{2\pi n}{c} L_i \right\} \quad (13)$$

dengan :

$$L_i = L_s - L_r$$

p : faktor perbandingan

i : 1,2,3,4

Di dalam sistem pengkompensasian aktif, interferometer penerima juga untuk mengkompensasi perubahan fasa (f_M).

8. KESIMPULAN

Sensor interferometer Mach Zehnder menggunakan teknik modulasi fasa dan *two-beam interferometer*, jadi dalam interferometer ini cahaya yang masuk akan dipisahkan menjadi dua berkas cahaya, yang kemudian akan berinterferensi kembali sebelum dideteksi.

Prinsip interferometer Mach Zender digunakan untuk menghasilkan perubahan panjang gelombang dan beda fasa isyarat masukan, kemudian ditransmisikan ke detektor untuk selanjutnya diubah menjadi isyarat listrik.

Sensitivitasnya yang cukup tinggi karena interferometer Mach Zehnder dapat mendeteksi beda fasa yang sangat kecil yaitu 10^{-5} sampai 10^{-6} rad dengan perbedaan *optical path length* 10^{-11} m.



DAFTAR PUSTAKA

1. Hoss, Robert dan Edward A. Lacy, “*Serat Optics*” (Tokyo : Prentice-Hal Inc, 1993) .
2. Dakin, John dan Brian Culshaw (Eds.), “*Optical Serat Sensor : Principles and Component*” (Boston : Artech House, 1988)
3. Demtroder, Wolfgang, “*Laser Spectroscopy Basic Concept and Instrumentation*”. Germany : Springer,1995
4. Palais, Joseph. C., “*Serat Optic Communications*”(Tokyo : Prentice Hall Inc, 1992),220-225.Allard, Frederick C., “*Serat Optics Handbook*”(New York : Mc Graw-Hill,1989)
5. Allard, Frederick C., “*Fibre Optics Handbook*”(New York : Mc Graw-Hill,1989)
6. Guenther, Robert D., “*Modern Optics*”(Canada : John Willey and Sons,1990)