

ANALISIS PENGARUH MATCHED FILTER TERHADAP JARAK MAKSIMAL ANTARA SOURCE KE RECEIVER PADA SISTEM VLC

ANALYSIS OF THE EFFECT OF MATCHED FILTERS ON MAXIMUM DISTANCE BETWEEN SOURCE TO RECEIVER IN VLC SYSTEM

Andre Frendra Zuli¹, Ir. Akhmad Hambali, M.T.², Brian Pamukti, S.T. M.T.³

^{1,2,3} Prodi S1 Teknik Telekomunikasi, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom

Andre.frendra@gmail.com¹, ahambali@telkomuniversity.ac.id², brianp@telkomuniversity.ac.id³

Abstrak

Pada Tugas Akhir ini penulis akan melakukan mensimulasikan dan menganalisis pengaruh *Matched Filter* terhadap jarak antara *Source* dan *Receiver* dalam sistem VLC dalam ruangan tertutup. Bit yang menjadi input akan dimodulasikan dengan arus masuk dengan modulasi OOK-NRZ sebelum masuk kedalam Lampu LED untuk ditransmisikan. Lampu LED akan memancarkan cahaya tampak sebagai penerangan yang di dalamnya sudah ada sinyal informasi berupa bit-bit. Fotodiode akan menangkap cahaya tersebut sebelum diterima UE (User Equipment).

Hasil yang diperoleh dari Tugas Akhir ini menghasilkan parameter saat tanpa *matched filter* dengan bitrate = 100 Mbps, jumlah bit = 1 juta bit, jarak antara *source* dan UE = 1.1 meter, pergeseran *receiver* maksimal sejauh 14.14 cm, artinya sistem memiliki *coverage* sebesar 0.0628 m^2 . Saat sistem ditambahkan *matched filter*, jarak pergeseran receiver dari titik 0 bertambah menjadi 49.49 cm dengan *coverage* sebesar 0.7697 m^2 . Saat posisi *source* dan *receiver* berada pada garis lurus maupun posisi *receiver* terjauh dengan standar BER yang ditetapkan, BER pada sistem dengan *matched filter* lebih baik dibandingkan tanpa *matched filter*.

Kata Kunci : VLC, *Matched Filter*, OOK-NRZ, Fotodiode, LED, BER.

Abstract

In this Final Project the author will simulate and analyze the effect of Matched Filter on the distance between Source and Receiver in a VLC system in a closed room. The input bits will be modulated with an inlet with OOK-NRZ modulation before entering into the LED lights to be transmitted. The LED light will emit visible light as the lighting in which there is an information signal in the form of bits. The photodiode will capture the light before it is received by the EU (User Equipment).

The results obtained from this Final Project produce current parameters without matched filter with bitrate = 100 Mbps, number of bits = 1 million bits, distance between source and UE = 1.1 meter, maximum receiver shift as far as 14.14 cm, meaning the system has a coverage of 0.0628 m^2 . When the matched filter system is added, the receiver's shift distance from point (0,0,3) increases to 49.49 cm with a coverage of 0.7697 m^2 . When the source position and receiver are in a straight line or the position of the receiver furthest to the specified BER standard, BER on the system with matched filter is better than without matched filter.

Keywords : VLC, Matched Filter, OOK-NRZ, Fotodiode, LED, BER.

1. Pendahuluan

Sistem komunikasi yang menggunakan cahaya tampak sebagai media transmisi disebut sebagai *Visible Light Communication* (VLC). Teknologi ini bekerja dengan cara menumpangkan transmisi data pada cahaya tampak tersebut. Cahaya tampak ini sendiri memiliki jangkauan panjang gelombang antara 400 nm – 700 nm. Teknologi VLC menawarkan kelebihan kecepatan tinggi, biaya rendah, efisiensi daya, dan transmisi data yang lebih aman selain menyediakan penerangan [1]. Teknologi ini sangat baik digunakan dalam ruangan karena cahaya tampak akan meredup seiring dengan bertambahnya jarak dan *coverage* yang kecil.

Menurut jurnal [2], sistem VLC memiliki kecepatan yang lebih tinggi dibandingkan dengan Wi-Fi, tidak memerlukan lisensi, biaya perawatan lebih murah, energi yang lebih efisien dan murah dibandingkan Wi-Fi. VLC menggunakan *white LED* sebagai *transmitter* karena memiliki luminasi paling besar dengan panjang gelombang berkisar antara 400 – 450 nm dengan *receiver* sinyalnya menggunakan P-I-N photodiode.

Secara konsep, sistem VLC sangat baik dan efisien karena dapat menyediakan penerangan dan koneksi internet secara langsung. Namun permasalahannya adalah seberapa jauh jarak maksimal agar dapat terkoneksi internet dan berapa besar daya yang dibutuhkan agar seluruh sudut ruangan dapat terkoneksi dengan internet. Tugas Akhir ini membahas analisis performansi BER dengan pengaruh *matched filter* terhadap *coverage* UE (*user Equipment*).

2. Dasar Teori

2.1 Cahaya

Dalam gelombang elektromagnetik terdapat banyak jenis yang dikelompokkan berdasarkan panjang gelombangnya. Dalam Teori **Maxwell** (1831 – 1874) mengungkapkan bahwa cahaya adalah rambatan gelombang yang dihasilkan oleh kombinasi medan listrik dan medan magnet [3], oleh karena itu cahaya tampak termasuk dalam gelombang elektromagnetik. Cahaya tampak sendiri memiliki panjang gelombang berkisar antara 400 – 700 nm.

Cahaya pada hakikatnya tidak dapat dilihat oleh kasat mata, namun saat cahaya mengenai suatu benda maka kesan dari cahaya tampak akan terlihat oleh mata manusia. Hal ini dapat membuktikan bahwa cahaya memiliki sifat-sifat, antara lain: merambat lurus, dapat dipantulkan, dapat menebus benda bening, dapat dibiaskan, dan dapat diuraikan.

2.2 Light-Emitting Diode (LED)

Light-Emitting Diode, atau sering disebut sebagai LED adalah suatu perangkat dioda p-n *junction* yang akan memancarkan cahaya bila aktif. Panjang gelombang dan warna yang dihasilkan oleh LED tergantung dari energi *band-gap* dari p-n *junction* yang tergantung pada material semikonduktor pada LED.

Cahaya yang dihasilkan oleh LED terjadi saat terjadi perubahan tingkat energi yang berada di dioda semikonduktor. Perubahan energi ini menghasilkan energi foton, namun energi foton teradiasi secara acak yang menyebabkan menurunkan daya *output* LED. Oleh karena itu, terdapat hubungan antara daya optik yang terpancar dan arus. Kenaikan dari daya optik berbanding lurus dengan kenaikan dari arus.

2.3 Visible Light Communication (VLC)

Visible Light Communication (VLC) termasuk dalam *Optical Wireless Communication (OWC)*, memiliki definisi sebagai sistem komunikasi optik *unguided* yang menggunakan cahaya tampak sebagai pemancar sinyal. Konsep dari cahaya tampak sebagai medium untuk komunikasi berawal pada tahun 1870-an saat Alexander Graham Bell sukses mendemonstrasikan transmisi dari sinyal suara menggunakan cermin yang dibuat untuk bergetar oleh suara seseorang [5].

Pengembangan sistem VLC lebih difokuskan untuk penerapan dalam ruang dikarenakan rentan terhadap interferensi dari cahaya tampak lain selain pemancar sinyal komunikasi [7]. Keunggulan utama sistem VLC dibandingkan dengan komunikasi *Radio Frequency (RF)* adalah proses modulasi daya optik dengan data harga dan kompleksitas yang lebih ringan dibandingkan dengan komunikasi RF [5].

Sistem VLC dapat diaplikasikan dalam bermacam skenario. Salah satu parameter penting agar tersedianya *high-data rates* adalah dengan melihat ketersediaan untuk *Line of Sight (LOS)* antara *source* dan *receiver*. Skenario LOS sendiri terdapat dua macam, yaitu *direct LOS* dan *indirect LOS*. Secara teori, jika sistem VLC terjadi secara LOS, maka kemungkinan akan terciptanya *high-data rates* lebih tinggi dibandingkan dengan skenario non-LOS. Dikarenakan penerapan sistem VLC kebanyakan berada dalam ruangan, maka skenario *indirect LOS* lebih banyak dipakai dan dikembangkan.

2.4 OOK-NRZ

Modulasi adalah proses penumpangan sinyal informasi yang terkandung dalam rentang frekuensi kedalam sinyal pembawanya. Sedangkan modulasi digital memiliki pengertian sebuah proses mengubah karakteristik dan sifat dari sinyal pembawa atau *carrier* sehingga berbentuk bit-bit (0 atau 1). Modulasi digital pada dasarnya terbagi menjadi tiga jenis, yaitu: ASK (*Amplitude Shift Keying*), FSK (*Frequency Shift Keying*), dan PSK (*Phase Shift Keying*).

Modulasi OOK (*On-Off Keying*) termasuk kedalam bagian dari ASK dan merupakan modulasi paling sederhana dibandingkan dengan yang lainnya. Modulasi OOK sering diterapkan untuk skema *optical digital transmission* karena kesederhanaan dan kemudahannya. Transmitter menghasilkan pulsa rektanguler dengan periode bit sebagai berikut.

$$T_b = 1/R_b \quad (2.2)$$

Dimana R_b = Bit Rate.

dalam modulasi OOK, terdapat dua sub-sistem, yaitu OOK-NRZ dan OOK-RZ. Pada skema NRZ, pulsa dengan waktu sama dengan periode bit akan ditransmisikan mewakili bit 1 sedangkan pulsa pada skema RZ hanya menempati sebagian dari durasi bit yang ada. Oleh karena itu, persamaan pada skema NRZ dapat ditulis sebagai berikut [5].

$$p(t) = \begin{cases} 2P_r, & \text{untuk } t \in [0, T_b] \\ 0, & \text{lainnya} \end{cases} \quad (2.3)$$

2.5 Fotodiode

Fotodiode adalah contoh sebuah diode yang bisa menangkap cahaya. Berbeda dengan diode pada umumnya, diode jenis ini dapat mengubah cahaya menjadi arus listrik. Cahaya yang dapat dideteksi oleh foto diode antara lain cahaya infra merah, cahaya tampak, *ultraviolet*, sampai dengan sinar-X.

Fotodiode umumnya terdapat dua jenis, yaitu P-I-N foto diode dan *Avalanche Fotodiode* (APD). PIN fotodiode pada dasarnya tersusun atas P-N junction dan dipisahkan oleh daerah intrinsik. Pada skema diagram di gambar 2.5 menunjukkan saat kondisi operasional normal, voltase *reverse-bias* yang tinggi diterapkan pada perangkat fotodiode. Saat *reverse-bias* diterapkan pada PIN fotodiode, lebar dari daerah intrinsik akan mengalami penyempitan semakin besar seiring dengan kenaikan tegangan. Untuk mengubah foton menjadi arus listrik, maka energi foton harus lebih besar dari energi *band-gap* yang berasal dari material semikonduktor. Foton melepaskan energi untuk mengeluarkan elektron dari pita valensi menuju pita konduksi, sehingga menghasilkan pasangan elektron-neutron [5].

2.6 Matched Filter

Secara garis besar, *matched filter* adalah sebuah filter linier yang terletak dibagian *receiver* yang bertujuan untuk memaksimalkan SNR sesaat sebelum diterima penerima atau UE [5]. Secara teori *matched filter* dapat menaikkan BER menjadi lebih baik atau BER menjadi lebih kecil jika dibandingkan dengan tanpa menggunakan *matched filter*. Persamaan *matched filter* ini dapat ditulis dengan rumus sebagai berikut:

$$P_e = Q\left(\frac{i_{th}}{\sigma}\right) \quad (2.4)$$

Keterangan:

P_e = Probabilitas Error

Q = Marcum's Q-Factor

i_{th} = Titik Batas Optimal

σ = Standar Deviasi

Besar titik batas yang optimal (i_{th}) adalah setengah dari puncak arus foto (i_p). Persamaan ini dapat ditulis sebagai berikut:

$$i_{th} = \frac{i_p}{2} \quad (2.5)$$

Keterangan:

i_p = Puncak arus Foto

Sedangkan untuk standar deviasi dapat dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$\sigma = \sqrt{\frac{N_o E_p}{2}} \quad (2.6)$$

Keterangan:

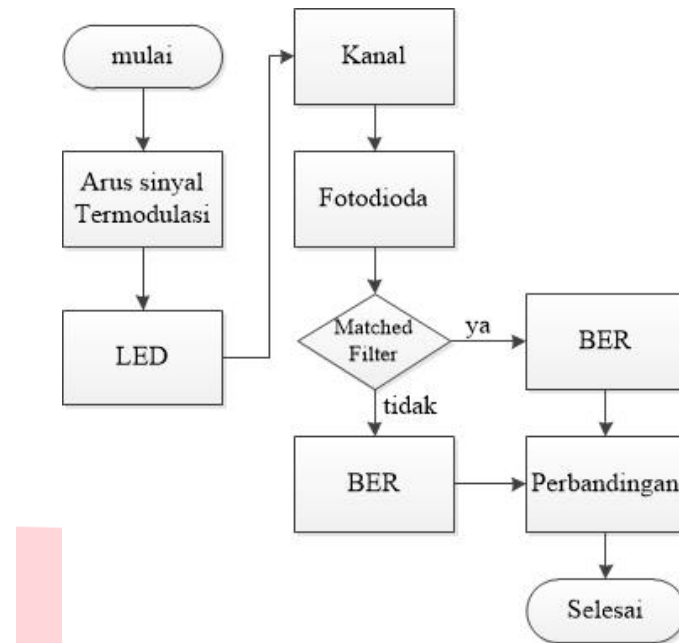
$\frac{N_o}{2}$ = *Double-Sided Power Spectral Density*

E_p = *Energy Photo*

Pada *matched filter*, *noise variance* pada *output* dari *filter* bergantung pada *noise input* dan energi pada respon impuls yang ada pada *matched filter* [5]. Jadi, jika di bagian input adalah sinyal AWGN dengan *noise respon impulse* akan menghasilkan keluaran dari *matched filter* yang meningkatkan puncak dari daya di *receiver* seiring dengan besarnya periode bit.

3. Desain Simulasi Sistem VLC

Berikut adalah desain simulasi Sistem VLC.



3.1 Sistem VLC Tanpa Matched Filter

Dalam skenario pertama, akan diukur BER pada bagian *receiver* dengan parameter yang telah disebutkan sebelumnya. Keluaran yang akan diambil dan dianalisis adalah.

1. Pengaruh Jarak Terhadap Produksi BER

Terdapat dua kondisi yang dianalisis, kondisi pertama adalah melihat pengaruh jarak terhadap produksi BER saat *source* dan UE membentuk sudut 0° . Kondisi kedua adalah melihat pengaruh jarak terhadap produksi BER saat UE posisi mengalami pergeseran maksimal dari titik awal di kondisi pertama.

2. Perbandingan SNR terhadap BER pada sistem.

Terdapat dua kondisi yang dianalisis, kondisi pertama adalah melihat pengaruh kenaikan SNR terhadap produksi BER saat *source* dan UE membentuk sudut 0° . Kondisi kedua adalah melihat pengaruh kenaikan SNR terhadap produksi BER saat UE posisi mengalami pergeseran maksimal dari titik awal di kondisi pertama. Pergeseran tersebut didapat dari resultan yang dihasilkan pada simulasi sebelumnya (pengaruh jarak terhadap BER).

3.2 Sistem VLC Menggunakan Matched Filter

Dalam skenario kedua, akan diukur BER pada bagian *receiver* dengan parameter yang telah disebutkan sebelumnya dan ditambah dengan *matched filter* yang secara teoritis menaikkan kualitas dari BER. Keluaran yang akan diambil dan dianalisis adalah

3. Pengaruh Jarak Terhadap Produksi BER

Terdapat dua kondisi yang dianalisis, kondisi pertama adalah melihat pengaruh jarak terhadap produksi BER saat *source* dan UE membentuk sudut 0° . Kondisi kedua adalah melihat pengaruh jarak terhadap produksi BER saat UE posisi mengalami pergeseran maksimal dari titik awal di kondisi pertama.

4. Perbandingan SNR terhadap BER pada sistem.

Terdapat dua kondisi yang dianalisis, kondisi pertama adalah melihat pengaruh kenaikan SNR terhadap produksi BER saat *source* dan UE membentuk sudut 0° . Kondisi kedua adalah melihat pengaruh kenaikan SNR terhadap produksi BER saat UE posisi mengalami pergeseran maksimal dari titik awal di kondisi pertama. Pergeseran tersebut didapat dari resultan yang dihasilkan pada simulasi sebelumnya (pengaruh jarak terhadap BER).

4. Desain Simulasi Sistem VLC

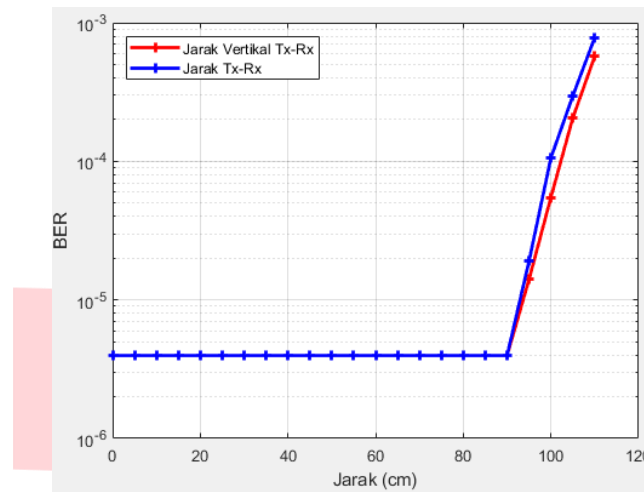
Bab ini bertujuan untuk mengetahui jarak maksimal dari *source* menuju UE beserta dengan *coverage* yang dapat dijangkau pada area sekitar UE, serta pengaruh penambahan *matched filter* terhadap hasil simulasi yang telah didapatkan sebelumnya. Dalam pengujian dilakukan analisis dengan 4 tahapan dengan uraian sebagai berikut.

1. Pengujian dan analisis parameter sistem VLC tanpa *matched filter*.

2. Pengujian dan analisis parameter sistem VLC menggunakan *matched filter*.

4.1 Pengujian dan Analisis Parameter Sistem VLC tanpa *Matched Filter*.

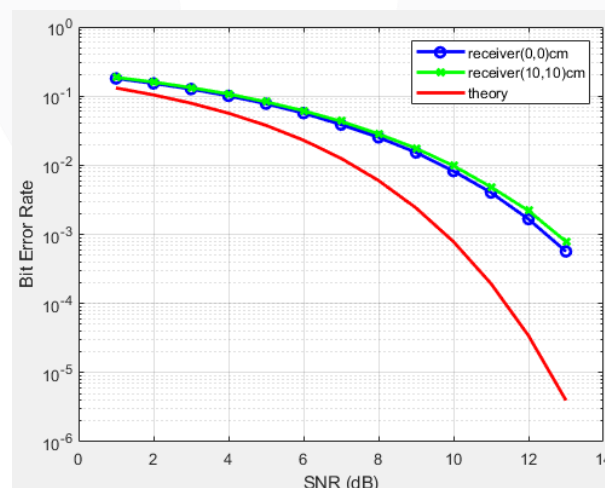
Pengujian ini mendapatkan hasil pada jarak antara source menuju UE adalah 1.1 meter, pergeseran maksimal UE adalah 14.14 cm. Hal ini menyebabkan jarak antara source menuju UE bertambah menjadi 1.109 meter. Coverage yang dapat dijangkau oleh Lampu LED dengan batas minimal BER ideal adalah $0.0628m^2$ dengan dengan sudut 7.326° .



Gambar 4.1.1 Perbandingan BER Terhadap Jarak antara Source dan UE pada Sistem VLC tanpa Matched Filter

Pada gambar 4.1 terlihat bahwa semakin dekat jarak antara *Source* dan UE semakin baik BER yang dihasilkan, data diambil saat SNR = 13 dB. Pada jarak 90 cm antara keduanya dalam posisi *source* dan UE di titik awal, BER yang dihasilkan dalam simulasi sama dengan BER yang dihasilkan dalam perhitungan. Hal ini dikarenakan jika BER dalam simulasi lebih baik daripada BER perhitungan, maka BER simulasi sama dengan BER perhitungan.

Pada posisi *source* dan UE berada di titik terjauh, BER minimal dapat terpenuhi di jarak 110 cm, sama seperti kondisi saat UE dan *source* membentuk sudut 0° . Di titik terjauh ini, walaupun jarak antar yang dimiliki sama dengan titik awal, namun BER yang dihasilkan lebih besar. Hal ini dikarenakan resultan jarak yang diakibatkan oleh pergeseran posisi dari UE. 90 cm adalah jarak yang didapatkan pada kedua kondisi untuk mendapatkan BER yang sama dengan BER hasil perhitungan. Tabel 4.2 berikut merinci hasil dari perbandingan BER terhadap jarak di dua kondisi yang ada ditambah dengan BER perhitungan pada SNR = 13 dB sebagai acuan simulasi.

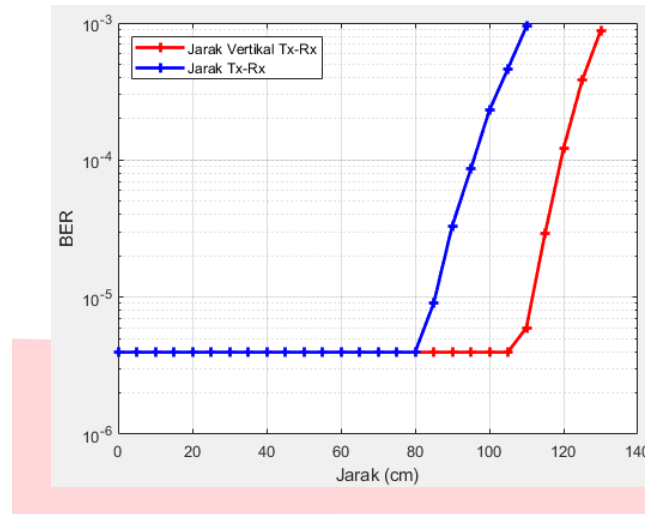


Gambar 4.1.2 Grafik Perbandingan BER terhadap .SNR (dB) Tanpa Matched Filter

Pada gambar 4.2 di atas, perbandingan BER terhadap SNR terlihat bahwa saat garis teori dapat memenuhi BER minimal pada saat SNR = 10 dB, sedangkan saat *source* dan UE berada pada garis lurus dengan jarak 1.1 meter, BER minimal yang diinginkan terpenuhi pada SNR = 13 dB, dan yang terakhir saat UE dipindahkan pada jarak maksimal (14.14 cm dari titik awal), BER minimal dapat terpenuhi saat SNR = 13 dB.

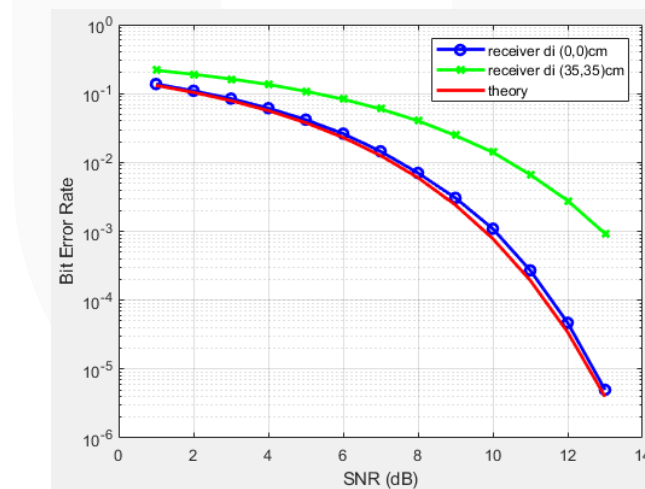
4.2 Pengujian dan Analisis Parameter Sistem VLC Menggunakan Matched Filter.

Pengujian pada skenario ini mendapatkan hasil saat jarak antara *source* menuju UE adalah 1.1 meter, jarak pergeseran maksimal UE terhadap titik awal adalah 49.49 cm. Hal ini menyebabkan jarak antara *source* menuju UE bertambah menjadi 1.206 meter. *Coverage* yang dapat dijangkau oleh Lampu LED dengan batas minimal BER ideal adalah $0.7697 m^2$ dengan dengan sudut 23.2877° .



Gambar 4.3 Perbandingan BER terhadap Jarak Source dan UE pada Sistem VLC dengan Matched Filter

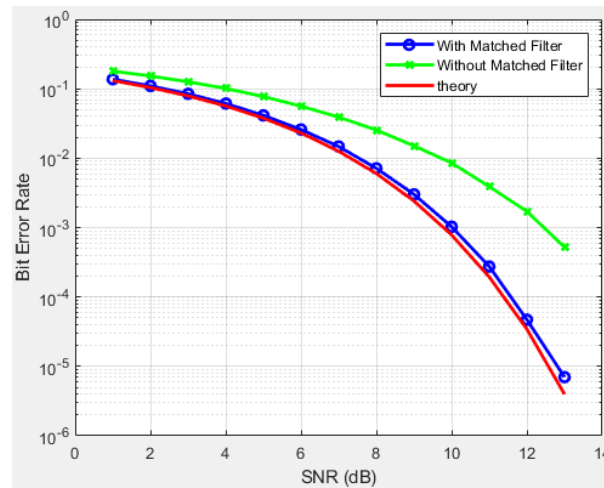
Gambar 4.3 menerangkan hubungan antara BER dengan Jarak source menuju UE. Saat posisi source dan UE berada di garis lurus, jarak maksimal yang dapat dijangkau untuk mendapatkan sinyal informasi adalah 130 cm atau 1.3 meter. Jarak yang dibutuhkan untuk mencapai BER yang sama dengan BER perhitungan saat berada di jarak 105 cm. Sedangkan saat UE digeser secara maksimal (49.49 cm), jarak maksimal antara UE dan source agar memenuhi BER minimal adalah 110 cm atau 1.1 meter. Lalu BER simulasi mencapai nilai yang sama dengan BER perhitungan saat jarak antar keduanya sebesar 80 cm. Tabel 4.5 berikut merinci hasil dari perbandingan BER terhadap jarak di dua kondisi yang ada ditambah dengan BER perhitungan saat SNR = 13 dB sebagai acuan.



Gambar 4.4 Perbandingan BER terhadap .SNR menggunakan Matched Filter

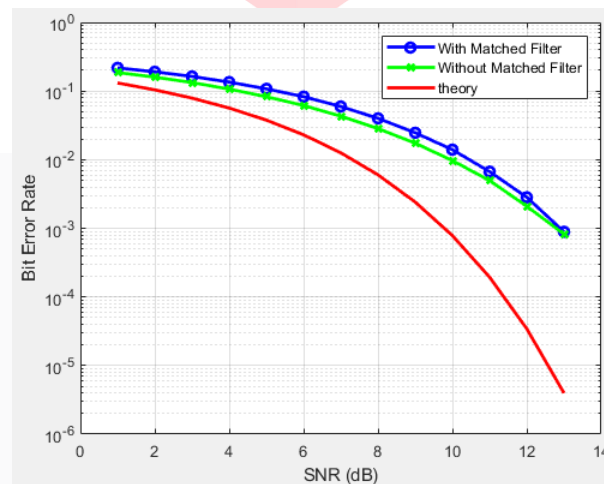
Gambar 4.4 menjelaskan bahwa saat source dan UE berada pada garis lurus dengan jarak 1.1 meter, BER minimal yang diinginkan terpenuhi pada $SNR = 11 dB$, dan yang terakhir saat UE dipindahkan pada jarak maksimal (49.49 cm dari titik awal), BER minimal dapat terpenuhi saat $SNR = 13 dB$.

Setelah kedua skenario berhasil dilakukan, lalu hasil dari sistem VLC tanpa matched filter dan dengan matched filter dibandingkan agar pengaruh dari matched filter dapat terlihat secara signifikan. Terdapat dua perbandingan, yakni saat posisi UE berada dalam garis lurus dengan source dan saat posisi UE digeser secara maksimal.



Gambar 4.5 Perbandingan BER pada Sistem VLC menggunakan Matched Filter dan Tanpa Matched Filter pada titik (0,0,185) cm

Dilihat pada gambar 4.5, sistem VLC yang menggunakan *matched filter* memiliki kurva BER terhadap .SNR yang lebih baik dibandingkan dengan sistem VLC tanpa menggunakan *matched filter* dengan jarak antara *source* dan UE 1.1 meter. Pada sistem dengan menggunakan *Matched Filter*, BER mencapai syarat minimal, yaitu 10^{-3} pada .SNR = 11 dB. Sedangkan sistem VLC tanpa *Matched Filter* mencapai BER minimal pada saat .SNR = 13 dB.



Gambar 4.6 Perbandingan BER di posisi UE terjauh pada sistem VLC menggunakan matched filter dan tanpa matched filter

Pada gambar 4.6, terdapat grafik yang menunjukkan bahwa di posisi terjauh baik sistem VLC yang tanpa matched filter maupun menggunakan matched filter telah bernilai kurang dari 10^{-3} . Namun yang menjadi pembeda diantara keduanya adalah jarak terjauh yang ditempuh masing masing sistem. Pada sistem VLC tanpa menggunakan matched filter, jarak terjauh yang dapat dijangkau adalah 14.14 cm dengan coverage 0.0628 m^2 . Sedangkan pada sistem VLC menggunakan matched filter, jarak terjauh yang dapat dijangkau UE dari titik awal adalah 49.49 cm dengan coverage sebesar 0.7697 m^2 . Artinya, dengan penambahan matched filter dapat meningkatkan jarak pergeseran dari UE sebesar lebih dari tiga kali lipat.

Hasil yang didapatkan pada perbandingan ini adalah pada sistem tanpa *matched filter*, pergeseran terjauh agar BER minimal dapat dipenuhi bernilai 14.14 cm. Sehingga menyebabkan jarak antara *source* menuju UE bertambah menjadi 1.109 meter. Coverage pada sistem VLC tanpa *matched filter* sebesar 0.0628 m^2 dengan dengan sudut 7.326° . Sementara itu, pergeseran terjauh pada sistem VLC menggunakan *matched filter* bernilai 49.49 cm. Hal ini menyebabkan jarak antara *source* dan UE bertambah menjadi 1.206. Coverage yang didapat pada sistem ini sebesar 0.7697 m^2 dengan sudut 23.2877° .

5. Kesimpulan

Berdasarkan pengujian dan analisis yang telah dilakukan, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Sistem VLC dalam ruangan tanpa penambahan matched filter dengan jarak antara source dan UE sebesar 1.1 meter saat keduanya berada pada garis lurus dengan toleransi pergeseran UE sebesar 14.14 cm. Pada Pergeseran, jarak antara source dan UE bertambah menjadi 1.109 meter dengan coverage yang dimiliki sistem sebesar 0.0628 m^2 . BER yang dihasilkan sistem ini $\leq 10^{-3}$
2. Sistem VLC dalam Sistem VLC dalam ruangan dengan penambahan matched filter, dengan jarak antara source dan UE sebesar 1.1 meter saat keduanya berada pada garis lurus dengan toleransi pergeseran UE sejauh 49.49 cm. Pada pergeseran maksimal yang dapat dijangkau, yaitu 49.49 cm, jarak antara source dan UE bertambah menjadi 1.206 meter dengan coverage sebesar 0.7697 m^2 . BER yang dihasilkan sistem ini $\leq 10^{-3}$ pada saat SNR = 10 dB dengan kondisi source dan UE berada pada garis lurus dan SNR = 13 dB dengan kondisi UE mengalami pergeseran maksimal yaitu 49.49 cm dari titik awal.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Sharma, S. Bajaj, dan S. Ahlawat. "Visible Light Communication". International Journal of Science and Research Vol 4 Issue 7, July 2015.
- [2] Shubham Rastogi. "Li-Fi: A 5G Visible Data Communication". International Journal of Science and Research. Vol 5 Issue 9, September 2016.
- [3] Benjamin Crowell. "Light and Matter". California: rev. 15 Desember 2006
- [4] R.R. Sharma, A. Sanganal, dan S. Pati. "Implementation of A Simple Li-Fi Based System". International Journal of Computing and Technology. Volume 1, Issue 9, October 2014.
- [5] Z. Ghassemloy, W. Popoola, S. Rajbhandari. "Optical Wireless Communication" International Standard book Number-13: 978-1-4398-5235 (E-Book – pdf), 2013.
- [6] M.G. Craford. "LEDs Challenge the Incandescents". September 1992.
- [7] Lee, Chung Ghiu; Muthamed Khatib, Advanced Trends in Wireless Communications, South Korea: InTech, 2011.
- [8] W. Ahmad, M.U. Ali, V. Laxmi, A.S. Syed. "Simulation and Characterization of PIN Photodiode for Photonic Applications" Asian Journal of Nanoscience and Materials, May 2018