

ANALISIS PERBANDINGAN PERFORMANSI SISTEM RADIO OVER FIBER ANTARA MENGGUNAKAN *RADIO TO OPTIC DIRECT CONVERSION* DAN IM/DD

Helmi Setiawan¹, Erna Sri Sugesti², Suwandi³

¹Program Magister Teknik Telekomunikasi, ²Jurusan Teknik Elektro, ³Program Perkuliahan Dasar Umum, Sekolah Tinggi Teknologi Telkom, Bandung

¹mte03004@stttelkom.ac.id, ²ern@stttelkom.ac.id, ³swi@stttelkom.ac.id

Abstrak

Jurnal ini mengevaluasi sistem *radio over fiber* (ROF) menggunakan *radio-to-optic direct conversion* (ROC) bertingkat, baik ROC/*heterodyne detection* (HD) maupun ROC/*self heterodyne detection* (SHD). Sistem ROF menggunakan *intensity modulation/direct detection* (IM/DD) bertingkat berdasarkan parameter *carrier to noise ratio* (CNR). Optimalisasi nilai *optical modulation index* (OMI) yang dilakukan pada sistem ROF menggunakan ROC bertingkat, karena performansi CNR dari sistem dengan OMI yang identik kurang baik. Dengan menggunakan metoda optimalisasi OMI, CNR sistem ROC/HD dan ROC/SHD lebih besar 18 dB dan 15 dB dari sistem IM/DD untuk *bandwidth* sinyal RF sebesar 150 MHz dan jumlah *Radio Base Station* (RBS) yang terkoneksi (N) = 20. Sedangkan untuk *bandwidth* sebesar 50 MHz dan $N = 20$, CNR sistem ROC/HD dan ROC/SHD lebih besar 20 dB dan 17 dB.

Kata kunci: *radio over fiber, radio-to-optic direct conversion, heterodyne detection, self heterodyne detection*

Abstract

This journal evaluates *radio over fiber* (ROF) system using cascaded ROC system, either ROC/ *heterodyne detection* (HD) or ROC/ *self heterodyne detection* (SHD). This ROF system uses cascaded IM/DD system based on *carrier to noise ratio* (CNR). The Optimization of an *optical modulation index* (OMI) done to ROF used cascaded ROC system as CNR performance of a system with identical OMI was not adequate. Using OMI optimization method, the ROC/HD and ROC/SHD schemes provide 18 dB and 15 dB CNR improvement over IM/DD scheme when RF signal bandwidth is 150 MHz and the number of RBS (N) is 20. Meanwhile, if RF signal bandwidth is 50 MHz and N is 20, the ROC/HD and ROC/SHD schemes provide 20 dB and 17 dB improvement.

Keywords: *radio over fiber, radio-to-optic direct conversion, heterodyne detection, self heterodyne detection.*

1. Pendahuluan

Sistem ROF menghubungkan antara RBS dan *control station* (CS) dengan fiber optik. Sistem ROF dengan menggunakan IM/DD bertingkat mempunyai masalah yaitu dispersi dan distorsi intermodulasi akibat hubungan modulator bertingkat. Sistem ROF dengan ROC bertingkat mampu mengatasi kelemahan pada sistem ROF menggunakan IM/DD bertingkat.

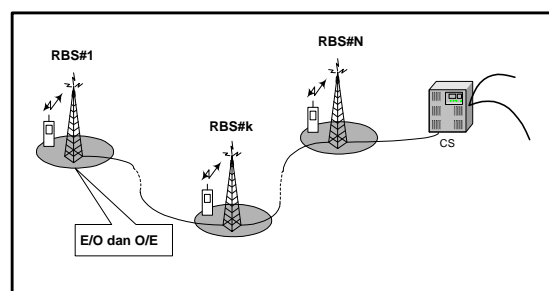
Jurnal ini mengevaluasi sistem ROC bertingkat dan IM/DD bertingkat berdasarkan parameter CNR dengan mengasumsikan *subcarrier* RF tiap RBS yang digunakan hanya satu dan fenomena non-linear diabaikan.

2. Sistem ROF Menggunakan Skema IM/DD dan ROC Bertingkat

2.1 Sistem ROF dengan IM/DD Bertingkat

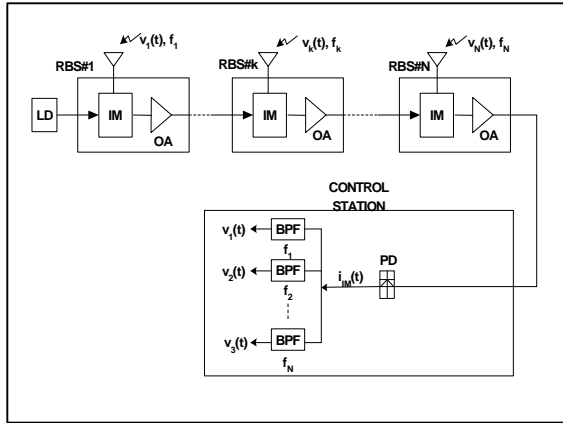
Pada ROF konvensional dengan tipe star dan bus, sistem mengalami penurunan performansi akibat banyaknya *laser diode* (LD) yang dipakai menyebabkan derau dalam sistem.

Untuk menghindari derau tersebut, ini maka digunakan sistem koneksi modulator intensitas bertingkat dengan satu LD. Sistem ROF dengan koneksi bertingkat seperti pada Gambar 1.



Gambar 1. Sistem ROF bertingkat [9][14][15][4]

Konfigurasi ROF dengan IM/DD bertingkat terdapat pada Gambar 2. Modulator intensitas yang diasumsikan linear ditempatkan antara LD dan *photodetector* (PD). Setiap modulator memodulasi sinyal *subcarrier* individu. Keluaran PD merupakan sinyal *subcarrier* FDM N -tingkat modulator. Ketika sinyal optik dimodulasi dengan modulator yang linier N -tingkat, daya optik yang diterima oleh *photodiode* (P_{IM}) sesuai Persamaan (1) – (2), yaitu:



Gambar 2. Sistem ROF dengan IM/DD bertingkat[9]

$$P_{IM} = \frac{P_t}{L_f} \prod_{i=1}^N (1 + OMI \cos w_i t) \quad (1)$$

$$P_{IM} = \frac{P_t}{L_f} \left(1 + OMI \sum_i \cos w_i t + (OMI^2 / 2) \sum_{i_1 \neq i_2} \sum_{i_2} \cos(w_{i_1} \pm w_{i_2}) t + (OMI^3 / 4) \sum_{i_1 \neq i_2 \neq i_3} \sum_{i_2} \sum_{i_3} \cos(w_{i_1} \pm w_{i_2} \pm w_{i_3}) t + \dots \right) \quad (2)$$

dengan P_t , w_i , L_f adalah daya optik transmitter, frekuensi angular modulasi untuk modulator ke- i dan redaman propagasi antara 2 RBS [9]. Empat komponen pada Persamaan (2) terdiri dari: komponen DC, komponen dasar, distorsi intermodulasi orde 2 (IMD2) dan orde 3 (IMD3). Persamaan tersebut menunjukkan bahwa walaupun secara individu modulator linier, IMD tetap ada, karena hubungan bertingkat antara modulator optik.

Redaman antara penguat yang berdekatan diberikan oleh [9], [14], [15]:

$$L_{sub-IM} = L_f L_m \quad (3)$$

Bila gain dari setiap penguat optik diasumsikan identik dengan redaman antara dua penguat optik yang berdekatan, maka:

$$G_{IM} = L_{sub-IM} \quad (\text{untuk semua penguat}) \quad (4)$$

Power spectral density dari (ASE) di penerima adalah:

$$N_{ASE-IM} = \frac{pn_{sp}(G_{IM}-1)h\nu}{L_f} \quad (5)$$

dengan p , G_{IM} , adalah jumlah penguat optik dan besar penguatan dari setiap penguat optik.

Penghitungan CNR dari setiap sinyal RF dilakukan berdasarkan:

$$CNR_{IM} = \frac{C}{S_{noise}^2} \quad (6)$$

di mana C , S_{noise}^2 adalah daya total carrier dan daya total derau. Daya carrier didapatkan dari:

$$C = \frac{1}{2} \Re^2 \left(\frac{P_t}{L_f} \right)^2 OMI^2 \quad (7)$$

sedangkan daya total derau pada sistem ini adalah:

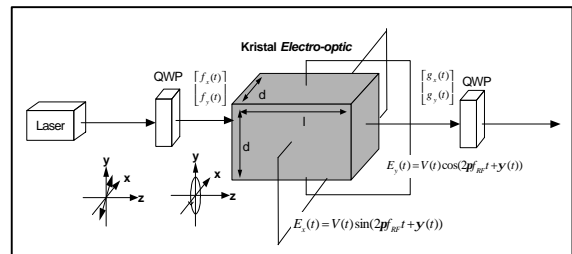
$$S_{noise}^2 = \left\{ RIN \Re^2 \left(\frac{P_t}{L_f} \right)^2 + 2e \Re \left(\frac{P_t}{L_f} \right) + 2e \Re N_{ASE-IM} B_0 + \frac{4k_B T B}{R_L} + 4 \Re^2 \left(\frac{P_t}{L_f} \right) N_{ASE-IM} + 4 \Re^2 \left(\frac{P_t}{L_f} \right) N_{ASE-IM}^2 B \right\} \quad (8)$$

Dalam Persamaan (8) terdapat RIN, derau shot sinyal, derau shot ASE, derau thermal penerima, derau tabrakan antara sinyal dengan ASE, derau tabrakan antara ASE dengan ASE, dan derau intermodulasi. Jumlah IMD3 didapatkan dari [13]:

$$D_3(N,k) = \frac{r}{2} [N-r-1] + \frac{1}{4} [(N-3)^N - 5] - \frac{1}{8} [1 - (-1)^N] (-1)^{N+r} \quad (9)$$

CNR RBS di tengah jaringan memiliki nilai paling kecil karena IMD3 maksimum di kanal tengah.

2.2 Sistem ROF Menggunakan ROC Bertingkat



Gambar 3. Konfigurasi dari modulator ROC[9], [14]

Pada Gambar 3, cahaya yang terpolarisasi melingkar ke kanan berpropagasi sepanjang sumbu z melewati kristal electro-optic ($LiNbO_3$ atau $LiTaO_3$) yang di-drive oleh medan elektrik pada sumbu x dan sumbu y yaitu $E_x(t)$ dan $E_y(t)$. Medan elektrik $E_x(t)$ dan $E_y(t)$ saling orthogonal, yaitu [9], [14], [15]:

$$E_x(t) = V(t) \sin(2p f_{RF} t + \mathbf{y}(t)) \quad (10)$$

$$E_y(t) = V(t) \cos(2p f_{RF} t + \mathbf{y}(t)) \quad (11)$$

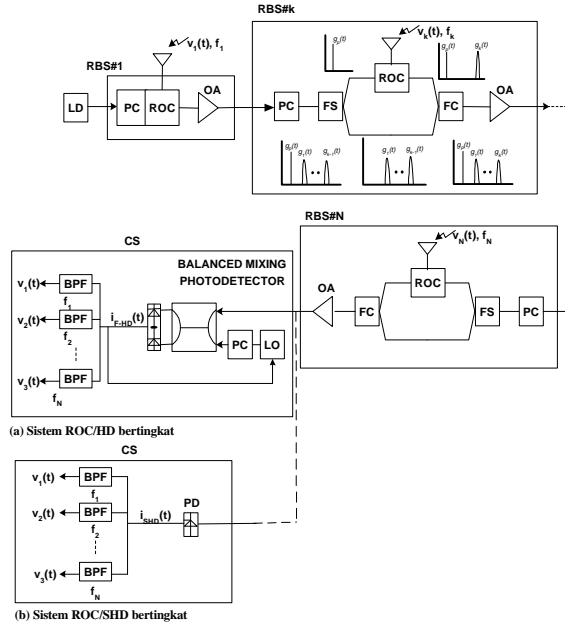
dengan $V(t)$, f_{RF} , dan $\mathbf{y}(t)$ adalah amplituda, frekuensi dan fasa sinyal RF.

Gelombang cahaya keluaran, $g_x(t)$ dan $g_y(t)$, sesuai Persaman (12) berikut:

$$\begin{bmatrix} g_x(t) \\ g_y(t) \end{bmatrix} = \sqrt{P} \cos \left(p \frac{V(t)}{V_p(t)} \right) e^{j[2p f_0 t - f_0 + f_s(t)]} \begin{bmatrix} -j \\ 1 \end{bmatrix} - \sqrt{P} \sin \left(p \frac{V(t)}{V_p(t)} \right) e^{j[2p(f_0 + f_{RF})t + \mathbf{y}(t) - f_0 + f_s(t)]} \begin{bmatrix} +j \\ 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

dengan P adalah intensitas rata-rata, $V_p(t)$ tegangan setengah gelombang, f_0 frekuensi carrier optik, f_0 konstanta fasa, dan f_s derau fasa sumber optik. Dari Persamaan (12) terlihat bahwa cahaya keluaran modulator terdiri oleh 2 komponen yaitu f_0 dan frekuensi yang tergeser $f_0 + f_{RF}$. Jika amplituda $V(t)$ cukup kecil ($pV(t)/V_p \ll 1$), maka $\cos(pV(t)/V_p) \approx 1$ dan $\sin(pV(t)/V_p) \approx pV(t)/V_p$. Komponen terakhir di Persamaan (12) adalah replika sinyal input RF dalam band optik, dengan amplituda $V(t)$ dan fasa $\mathbf{y}(t)$

sebagai sinyal *input* RF. Komponen pertama dapat digunakan sebagai *carrier* pilot karena amplituda dan fasanya tak termodulasi.



Gambar 4. Sistem ROC bertingkat [9], [14], [15]

Gambar 4(a) dan (b) memperlihatkan skema ROC bertingkat yaitu ROC/HD dan ROC/SHD. Spektrum frekuensi sinyal pada setiap tingkat di RBS juga diperlihatkan pada Gambar 4(b). Pada jaringan ROC, sinyal optik antara *carrier* pilot $g_p(t)$ dan sinyal dari stasiun sebelumnya yaitu: $g_1(t), g_2(t), \dots, g_{k-1}(t)$ ditransmisikan ke RBS ke- k . Di RBS ke- k , setelah melewati *polarization controller* (PC), *carrier* pilot dan sinyal dari RBS sebelumnya tersebut dipisahkan oleh *frequency splitter* (FS). *Carrier* pilot digunakan untuk memodulasi sinyal RF di RBS ke- k menjadi sinyal optik. Sinyal optik dari RBS ke- k lalu digabungkan dengan komponen sinyal RBS sebelumnya oleh *frequency combiner* (FC). Mekanisme ini dilakukan untuk menghindari IMD pada jaringan modulator bertingkat. Setelah redaman sisipan modulator dan redaman propagasi antara dua RBS dikompensasi, semua sinyal optik ditransmisikan ke RBS berikutnya.

Di *control station* (CS), pada sistem ROC/HD di Gambar 4(a), cahaya dideteksi oleh *balanced mixing* PD setelah menyesuaikan polarisasi sinyal yang diterima dengan sinyal osilator lokal melalui PC. Sinyal RF dihasilkan setelah melewati *bandpass filter* (BPF). Pada sistem ROC/SHD di Gambar 4(b), cahaya yang diterima dideteksi langsung oleh PD. Pada ROC/SHD tidak adanya LO dan PC membuat struktur penerima menjadi sederhana, tetapi sistem ROC/SHD hanya dapat diterapkan bila terdapat daya yang cukup dari *carrier* pilot yang diterima di CS.

Analisis performansi sistem ROC dilakukan dengan menggunakan satu *subcarrier* per RBS. Redaman antara penguat optik dapat diekspresikan:

$$L_{sub} = L_f L_s L_m L_d \quad (13)$$

dengan L_f, L_s, L_m dan L_d berturut-turut adalah redaman propagasi fiber antara dua RBS berdekatan, redaman sisipan PC, modulator dan FS dengan FC.

Untuk mengkompensasi redaman yang muncul di dalam sistem bertingkat, penguat optik disisipkan di setiap RBS. *Gain* setiap penguat diatur sama untuk semua redaman antara dia sendiri dengan penguat optik sebelumnya, maka dari itu :

$$G_1 = L_s L_m \quad (\text{penguat di RBS pertama}) \quad (14)$$

$$G = L_{sub} \quad (\text{penguat di RBS lainnya}) \quad (15)$$

Dalam sistem bertingkat, derau ASE mengumpul dan dikuatkan oleh penguat optik sebanyak jumlah penguat yang terdapat dalam jaringan. Pada masukan di penerima, derau ASE yang terkumpul dapat dianggap sebagai *white noise* yang ada di seluruh *band* sinyal *subcarrier*, sehingga derau ASE mempunyai *power density* yang sama di setiap *band* sinyal RF. Dengan asumsi FS dan FC bekerja sempurna sehingga dapat memisahkan dan menggabungkan spektrum frekuensi secara sempurna, maka *power spectral density* dari ASE yang diterima di penerima [9], [14], [15]:

$$N_{ASE} = \frac{n_{sp}(G_1 - 1)h\nu + (p-1)(G-1)h\nu}{L_f} \quad (16)$$

dengan n_{sp} , h , ν dan p adalah koefisien ASE, konstanta Planck, frekuensi optik dan jumlah penguat optik.

Pada sistem ROC/HD digunakan osilator lokal (LO) dengan persamaan:

$$g_L(t) = \sqrt{2P_L} e^{j\{2p f_L t + \mathbf{f}_L(t)\}} \quad (17)$$

dengan P_L , f_L dan $\mathbf{f}_L(t)$ adalah daya LO, frekuensi LO, dan derau fasa LO. Arus IF setelah melalui *balanced mixing* PD adalah:

$$i_{IF-HD}(t) = i_{C-HD}(t) + \sum_{k=1}^N i_{k-HD}(t) + n_{HD}(t) \quad (18)$$

dengan $i_{C-HD}(t)$, $i_{k-HD}(t)$, N dan $n_{HD}(t)$ merupakan arus *carrier*, sinyal dari RBS ke- k , jumlah RBS yang terkoneksi ke sistem, dan derau dalam sistem ROC/HD. *Photocurrent* dari *carrier* dan sinyal dari RBS ke- k diekspresikan [9], [14], [15]:

$$i_{C-HD} = 2\Re\sqrt{P_C P_L} \cdot \cos[2p f_{IF} t + \Delta\mathbf{f}(t)] \quad (19)$$

$$i_{k-HD} = 2\Re\sqrt{P_{r,k} P_L} \cos[2p(f_{IF} + f_{RF} + k\Delta f)t + \Delta\mathbf{f}(t) + \mathbf{q}_k(t) + \frac{\mathbf{p}}{2}] \quad (20)$$

di mana e , \mathbf{a} , P_C , P_r , k , f_{IF} , f_{RF} , Δf , $\Delta\mathbf{f}(t)$, dan $\mathbf{q}(t)$ berturut-turut adalah muatan elektron, konstanta *electro-optic*, daya yang diterima dari *carrier* pilot, daya sinyal optik yang diterima dari RBS ke- k , frekuensi sinyal IF ($f_{IF} = f_O - f_L$), frekuensi radio *subcarrier*, interval frekuensi antara dua sinyal RF yang berdekatan, derau fasa dari sinyal optik ($\Delta\mathbf{f}(t) = \mathbf{f}_O(t) - \mathbf{f}_L(t)$) dan fasa sinyal RF ke- k .

Daya terima dari *carrier* pilot (P_C) dan daya optik diterima dari RBS ke- k ($P_{r,k}$) adalah:

$$P_C = \frac{P_t}{L_f} \cdot \left[\prod_{k=1}^N \cos(\rho OMI_k) \right]^2 \quad (21)$$

$$P_{r,k} = \frac{P_t \cdot I_m^{(N-k)}}{L_f} \left[\sin(\rho OMI_k) \cdot \left\{ \prod_{j=1}^{k-1} \cos(\rho OMI_j) \right\} \right]^2 \quad (22)$$

dengan P_t = daya optik dari *transmitter* dan OMI_k adalah OMI dari RBS ke- k yang didefinisikan:

$$OMI_k = \frac{A_k}{V_p} \quad (23)$$

dengan A_k = amplituda dari sinyal RF ke- k . Daya sinyal optik yang diterima dari RBS ke- k adalah:

$$P_{HD,k} = 2\Re^2 P_{r,k} P_L \quad (24)$$

Daya total derau dalam sistem ROC/HD diberikan oleh persamaan (25) di bawah ini, di mana P_r , B_0 , k_B , T , R_L dan B berturut-turut adalah daya optik total yang diterima, *bandwidth* filter optik, konstanta Boltzman, suhu derau, hambatan beban, dan *bandwidth* sinyal RF.

$$\begin{aligned} S_{ND,total}^2 = & \left\{ RIN e^2 a^2 P_T P_L + 2e^2 a P_r + 2e^2 a P_L \right. \\ & + 2e^2 a P_L + 2e^2 a N_{ASE} B_0 + \frac{8k_B T}{R_L} + 4e^2 a^2 P_L N_{ASE} \\ & \left. + 4e^2 a^2 P_r N_{ASE} + 4e^2 a^2 N_{ASE}^2 B_0 \right\} B \quad (25) \end{aligned}$$

Daya optik total yang diterima dapat dinyatakan:

$$P_r = P_c + \sum_{k=1}^N P_{r,k} \quad (26)$$

CNR sinyal RF dari RBS ke- k yaitu:

$$CNR_{HD,k} = \frac{P_{HD,k}}{S_{HD,total}^2} \quad (27)$$

Pada sistem ROC/SHD, arus keluaran PD adalah:

$$i_{SHD}(t) = \sum_{k=1}^N i_{k-SHD}(t) + n_{SHD}(t) \quad (28)$$

dengan $i_{k-SHD}(t)$ dan $n_{SHD}(t)$ adalah arus sinyal RBS ke- k dan derau. Sinyal dari RBS ke- k adalah:

$$i_{k-SHD} = 2\Re \sqrt{P_{r,k} P_L} \cdot \cos[2p(f_{RF} + k\Delta f)t + q_k(t)] \quad (29)$$

Daya sinyal dari RBS ke- k diberikan oleh:

$$P_{HD,k} = 2e^2 a^2 P_{r,k} P_C \quad (30)$$

dengan $P_{r,k}$ diberikan oleh Persamaan (13). Derau total dalam sistem dinyatakan Persamaan (31):

$$\begin{aligned} S_{SHD,total(OA)}^2 = & \left\{ RIN e^2 a^2 P_r^2 + 2e^2 a P_r + \right. \\ & 2e^2 a N_{ASE} B_0 + \frac{4k_B T}{R_L} + 4e^2 a^2 P_r N_{ASE} \\ & \left. + 4e^2 a^2 N_{ASE}^2 B_0 \right\} B_0 \quad (31) \end{aligned}$$

Oleh karena itu, CNR dari RBS ke- k adalah:

$$CNR_{SHD,k} = \frac{P_{SHD,k}}{S_{SHD,total}^2} \quad (32)$$

Ketika jumlah *subcarrier* lebih dari satu, penurunan CNR akibat IMD yang akibat dari ketidaklinearan modulator akan muncul. Namun demikian, tujuan

sistem bertingkat masih dapat dicapai, yaitu berkurangnya penurunan CNR oleh distorsi intermodulasi pada modulator bertingkat.

3. Analisis Performansi CNR Sistem ROC Bertingkat dan Optimalisasi

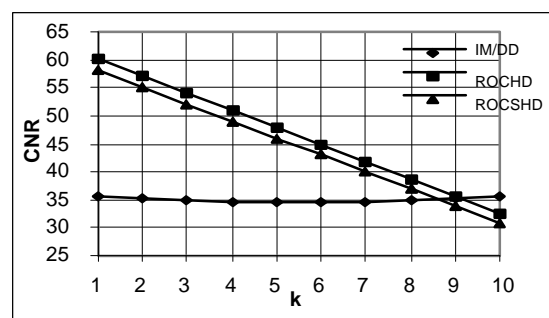
Tabel 1 menunjukkan berbagai parameter yang digunakan dalam analisis performansi CNR sistem.

Tabel 1. Parameter untuk analisis

Daya laser lokal	10 dBm
Relative Intensity Noise : RIN	-152 dB/Hz
Responsivitas : \Re	0.8 A/W
Hambatan Beban : R_L	50 Ω
Suhu derau	300 Ω
Bandwidth ASE	1 THz
Redaman sisipan PC : L_s	3 dB
Redaman sisipan modulator: L_m	3 dB
Redaman sisipan FS+FC : L_d	4 dB
Jarak antar RBS	100 m
Redaman fiber optik	0,2 dB/km

3.1 Penggunaan OMI identik di setiap RBS

Gambar 5 memperlihatkan hubungan antara CNR dan orde RBS (k) dalam kasus penggunaan OMI identik dan penguat optik untuk setiap RBS. Jumlah RBS yang terkoneksi dalam sistem (N) sebanyak 10 buah. Dalam sistem ROC, baik ROC/HD maupun ROC/SHD, saat semua OMI diatur sama untuk semua RBS, CNR sinyal dari RBS yang terdekat CS memiliki nilai terkecil. Hal ini disebabkan daya *carrier* optik yang tersisa untuk RBS ini memiliki daya terendah, karena digunakan untuk modulasi di RBS yang sebelumnya.

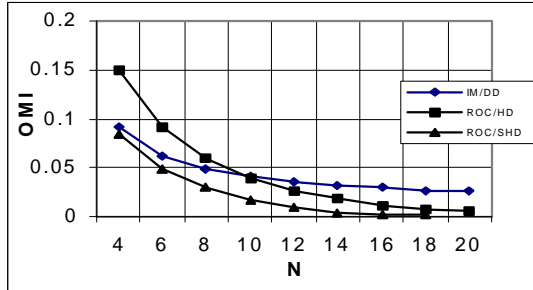


Gambar 5. Perbandingan CNR untuk setiap orde RBS dengan N=10

Sebaliknya dengan sistem IM/DD bertingkat, CNR sinyal dari RBS di tengah saluran memiliki nilai terkecil, karena pada hubungan bertingkat membangkitkan distorsi intermodulasi yang maksimum pada *band* tengah frekuensi *subcarrier*.

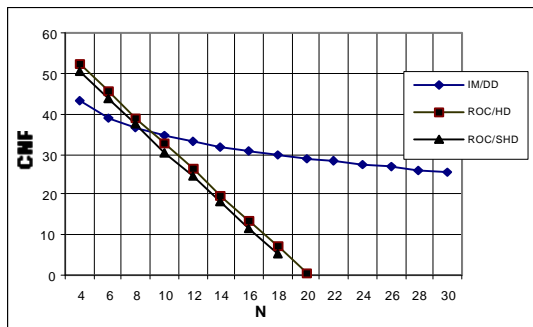
Penentuan nilai OMI identik untuk sistem ROC/HD dan ROC/SHD dilakukan dengan mencari nilai OMI identik yang dapat memaksimalkan CNR

dari RBS yang terdekat dengan CS. Sedangkan untuk sistem IM/DD dilakukan dengan mencari nilai OMI yang dapat memaksimalkan CNR di tengah jaringan. Gambar 6 merupakan grafik hubungan antara OMI identik yang menghasilkan CNR maksimum dan jumlah RBS yang terkoneksi.



Gambar 6. Perbandingan OMI identik yang menghasilkan CNR maksimum

Gambar 7 menunjukkan hubungan CNR terhadap jumlah RBS terkoneksi dengan penggunaan OMI identik di setiap RBS untuk semua sistem.



Gambar 7. Perbandingan CNR untuk semua sistem dengan penggunaan OMI identik.

Terlihat pada sistem ROC/HD maupun ROC/SHD CNR mempunyai nilai yang lebih buruk daripada IM/DD. Hal ini disebabkan penggunaan OMI yang identik membuat *carrier* optik yang tersisa untuk RBS terdekat dengan CS kecil, sehingga CNR pada RBS ini kecil. Dengan semakin bertambahnya N , CNR akan semakin kecil pula bahkan mencapai nol pada $N=20$.

3.2 Optimalisasi OMI

Optimalisasi OMI dapat mengatasi performansi CNR yang buruk pada sistem ROC dengan OMI identik^{[1][4]}. Optimalisasi OMI dilakukan dengan cara mengatur OMI di setiap RBS. Untuk lokasi RBS yang lebih jauh dari CS diberikan nilai OMI lebih kecil dari yang lebih dekat dari CS. Akibatnya nilai CNR turun pada RBS yang lebih jauh dari CS dan CNR naik pada RBS yang lebih dekat CS. CNR dari setiap RBS dalam sistem akan bernilai sama. Kondisi nilai OMI masing-masing RBS dapat diturunkan sebagai berikut [9], [14] :

$$CNR_k = CNR_{k+1} \quad (k = 1, 2, \dots, N-1) \quad (33)$$

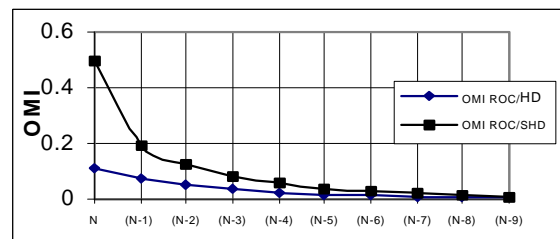
OMI untuk sistem ROC/HD dan ROC/SHD dapat diekspresikan sebagai [9]:

$$(\sin(\rho OMI_k))^2 = L_m (\sin(\rho OMI_{k+1}))^2 (\cos(\rho OMI_k))^2 \quad (34)$$

Dengan mengubah persamaan (24) diperoleh hasil:

$$OMI_k = \frac{1}{\rho} \arctan(\sqrt{L_m} \cdot \sin(\rho OMI_{k+1})) \quad (35)$$

Dengan lebih dulu menentukan OMI pada RBS ke- N sebagai RBS yang terdekat dengan CS, melalui Persamaan (35) ditentukan secara terurut OMI pada RBS ke- $(N-1)$, $(N-2)$, ..., 1. Dalam sistem ROC/HD, pada RBS ke- N ditentukan $OMI_N = 0,5$ untuk menggunakan semua *carrier* pilot optik agar dicapai CNR maksimum. Pada sistem ROC/SHD, agar CNR maksimal, pada RBS ke- N ditentukan nilai khusus $OMI_N = 0,11$ agar tetap tersedia daya yang cukup dalam *carrier* pilot optik untuk deteksi *self-heterodyne*, karena *signal-ASE beat noise* dominan .



Gambar 8. OMI optimum untuk sistem ROC/HD dan ROC/SHD

Gambar 8 menunjukkan hubungan antara OMI optimum dan orde RBS. Semakin jauh RBS ditempatkan dari CS, semakin kecil pula OMI, sehingga daya *carrier* optik tersisa masih cukup untuk RBS yang lebih dekat ke CS. Dari Persamaan (15) dapat diketahui bahwa bila terdapat RBS baru ditambahkan ke RBS yang terjauh dari CS, hanya diperlukan penentuan OMI optimum untuk RBS baru, tanpa ada perubahan pada OMI yang lain.

3.3 Evaluasi Peningkatan Performansi CNR

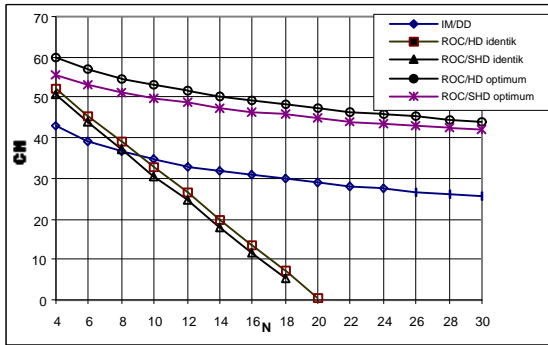
Gambar 9 menunjukkan hubungan antara CNR untuk semua sistem baik itu sistem ROC maupun IM/DD dan jumlah RBS yang terkoneksi dalam kasus penggunaan penguat optik untuk setiap RBS.

Dengan menggunakan OMI optimum, pada RBS yang terdekat CS terjadi peningkatan CNR daripada penggunaan OMI identik pada setiap RBS. Sistem ROC dengan OMI optimum memperoleh peningkatan CNR melebihi sistem IM/DD. Distorsi intermodulasi akibat hubungan bertingkat akan muncul pada sistem IM/DD ketika lebih dari dua RBS terkoneksi, sehingga menurunkan CNR.

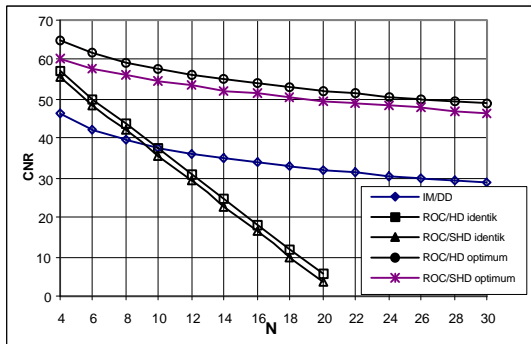
Pada Gambar 9 terlihat bahwa pada *bandwidth* sinyal radio $B = 150$ MHz dan $N = 20$, CNR untuk sistem ROC/HD dan ROC/SHD lebih besar 18 dB dan 15 dB dari sistem IM/DD. CNR pada sistem ROC/SHD lebih kecil 2,5 dB dari sistem ROC/HD dengan OMI optimum. Penggunaan *carrier* optik

yang berfungsi sebagai osilator lokal pada sistem ROC/SHD menyebabkan penurunan CNR.

Untuk $B=50$ MHz dan $N=20$ diperlihatkan di Gambar 10, CNR untuk sistem ROC/HD dan ROC/SHD lebih besar 20 dB dan 17 dB dari sistem IM/DD. Peningkatan CNR dengan $B = 50$ MHz lebih baik daripada sistem dengan $B=150$ MHz. Hal ini terjadi karena berkurangnya daya derau akibat semakin sempitnya bandwidth B . Peningkatan CNR pada sistem ROC lebih besar daripada sistem IM/DD karena adanya distorsi intermodulasi.



Gambar 9. Perbandingan CNR dengan B=150 MHz

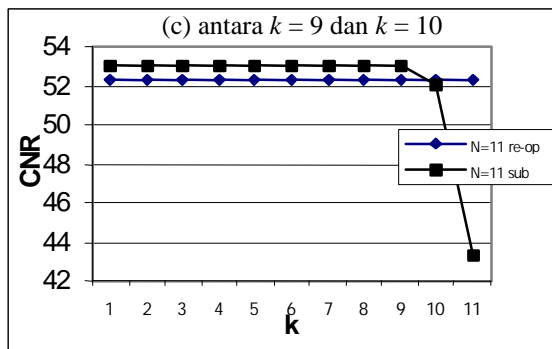
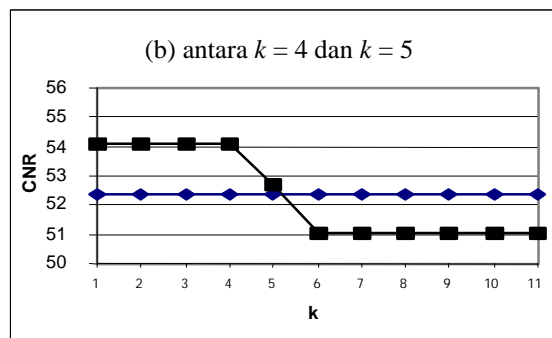
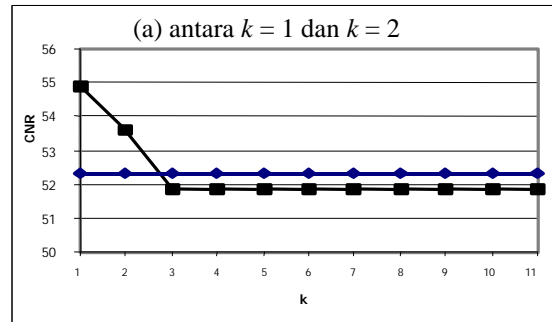


Gambar 10. Perbandingan CNR dengan B=50 MHz

Untuk penambahan RBS baru di lokasi RBS yang terjauh dari CS, nilai OMI optimumnya diperoleh dari metode optimalisasi OMI. Perubahan OMI pada RBS lain tidak diperlukan. Bila terdapat penambahan RBS baru antara 2 RBS dalam sistem, penentuan OMI untuk RBS baru dapat dilakukan dengan dua cara, yaitu menggunakan OMI sub-optimum dan melakukan reoptimalisasi. OMI sub-optimum adalah nilai OMI rata-rata dari OMI yang berdekatan dengan RBS baru tersebut.

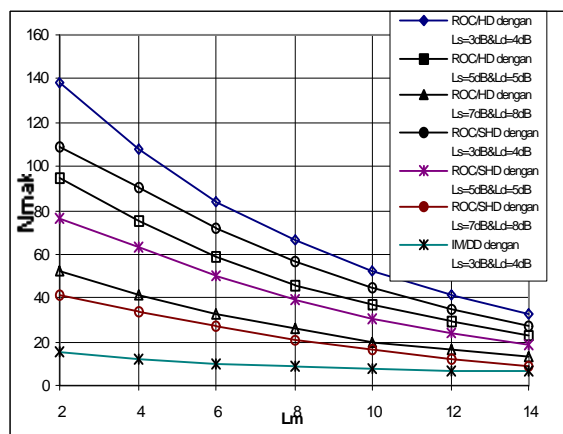
Gambar 11 memperlihatkan penurunan CNR akibat penambahan RBS baru di antara RBS dalam sistem ROC/HD dengan $N=10$. CNR di setiap RBS dibandingkan antara penggunaan OMI sub-optimum dan reoptimalisasi. Pada OMI sub-optimum, CNR pada RBS dengan orde lebih kecil dari RBS baru akan mengalami kenaikan, sedangkan orde lebih tinggi mengalami penurunan CNR bila dibandingkan dengan reoptimalisasi. Semakin dekat letak RBS baru pada CS, penurunan CNR menjadi semakin tajam. Tanpa reoptimalisasi OMI, hanya sedikit RBS yang dapat ditambahkan ke RBS yang berlokasi di

dekat CS. Pada sistem ROC/SHD, penurunan CNR muncul dalam pola yang sama seperti pada sistem ROC/HD. Terdapat dua cara untuk mengkompensasi penurunan ini, yaitu dengan mempersiapkan margin daya untukantisipasi penurunan dan reoptimalisasi.



Gambar 11. Perbandingan CNR pada sistem 10 RBS antara penggunaan OMI sub-optimum terhadap reoptimalisasi dalam kasus penambahan 1 RBS baru

Gambar 12 menunjukkan hubungan antara jumlah maksimum RBS terkoneksi dan redaman sisipan modulator optik. Karena sistem IM/DD hanya mempunyai redaman sisipan modulator, maka perbandingan sistem ROC dengan sistem IM/DD dapat dilakukan dari redaman modulator pada sumbu horisontal. Dalam perhitungan, diasumsikan kebutuhan CNR sebesar 32 dB termasuk dengan margin 20 dB untuk mencapai probabilitas $error 10^{-6}$ pada sinyal QPSK^{[1][4]}. Sistem ROC/HD dan ROC/SHD skema OMI optimum dapat menampung lebih banyak RBS daripada sistem IM/DD meskipun dalam redaman sisipan modulator yang relatif tinggi. Sistem ROC/SHD dapat menampung paling sedikit 2 kali jumlah RBS dari sistem IM/DD dalam hal redaman total dari PC, FS, FC =15 dB.



Gambar 12. Pengaruh besarnya redaman sisipan terhadap jumlah maksimum RBS yang terkoneksi

4. Kesimpulan

Berdasarkan analisis performansi CNR sistem ROF menggunakan ROC bertingkat dan IM/DD bertingkat, disimpulkan bahwa CNR sistem ROC/HD dan ROC/SHD dengan OMI identik lebih rendah dari sistem IM/DD. Nilai CNR sistem ROC/HD dan ROC/SHD dengan OMI optimum lebih besar 18 dB dan 15 dB daripada sistem IM/DD untuk *bandwidth* sinyal RF 150 MHz dan $N=20$, dan lebih besar 20 dB dan 17 dB daripada sistem IM/DD untuk *bandwidth* sinyal RF sebesar 50 MHz dan $N=20$. Dengan OMI optimum, makin sempit *bandwidth* sinyal RF, peningkatan CNR sistem ROC semakin besar daripada dengan sistem IM/DD.

Pada penambahan RBS baru setelah RBS yang terjauh dengan CS, OMI optimum dapat ditentukan langsung dengan metode optimalisasi OMI, tanpa reoptimalisasi pada RBS lain. Pada penambahan beberapa RBS baru di antara 2 RBS dalam sistem ROC yang letaknya di dekat CS, diperlukan proses reoptimalisasi. Dengan OMI optimum, sistem ROC/HD dan ROC/SHD dapat mengakomodasi lebih banyak RBS daripada sistem IM/DD, walaupun terjadi redaman sisipan modulator yang tinggi dengan kebutuhan CNR 32 dB, termasuk margin daya 20 dB, untuk memenuhi probabilitas *error* 10^{-6} .

Perlu perencanaan lebih kompleks pada realisasi sistem ROC daripada sistem IM/DD.

Daftar Pustaka

- [1] Cox, C., Ackerman E., Helkey R., Betts G. E., *Techniques and Performance of Intensity-Modulation Direct-Detection Analog Optical Links*. IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech. Vol 45 No 8. Agustus 1997.
- [2] Domon, W., Shibutani M., Emura K., *SCM Optical Multiple-Access Network with Cascade Optical Modulator*. IEEE Phot. Tech. Letter Vol. 5 No. 9. September 1993.

- [3] Hofstetter, R., Schmuck H., Heidenmann R., *Dispersion Effects in Optical Millimeter-Wave System Using Self-Heterodyne Method for Transport and Generation*. IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech. Vol 43 No 9. September 1995.
- [4] Ishii, Y., Tsukamoto K., Morinaga N., *Coherent Fiber-Optic Microcellular Radio Communication System Using RF-to-Optic Conversion Scheme*. IEEE Trans. Microwave Theory & Tech., vol.43 no.9. pp.2241-2248. September 1995.
- [5] Junedi. 2001. *Analisa Perbandingan Performansi Sensitivitas Fotodetektor Dengan dan Tanpa EDFA*. Tugas Akhir STT Telkom. Bandung.
- [6] Killen, H. B. 1991. *Fiber Optic Communication*. Prentice Hall. New Jersey.
- [7] Komaki, S., Tsukamoto K., Okada M., *Multiband operation of Multimedia Mobile Radio on the Virtual Radio Free Space Networ*. Proc. 2nd Intl Workshop on MoMuS-2. vol. 1 no.1. pp.1-4. April 1995.
- [8] Park, J., Elrefaie A. F., Lau K. Y., *Fiber Chromatic Dispersion Effect on Multichannel Digital Millimeter Wave Transmission*, IEEE Phot. Tech. Lett. Vol. 8 No. 12. Des. 1996.
- [9] Suwonpanich, P., Tsukamoto K., Komaki S., *Proposal of Radio-over-Fiber Using Cascaded Radio-to-Optic Direct Conversion Scheme*, IEICE Trans Comm. vol. E83-B No. 8 Agustus 2000.
- [10] Sabella R., *Performance Analysis of Wireless Broadband System Employing Optical Fiber Link*. IEEE Trans. On Comm. Vol 47 No.5. Mei 1999.
- [11] Saleh, B. E. A., Teich M. C., *Fundamental of Photonic*. 1991. John Wiley & Sons. Inc.
- [12] Senior, J. M. 1992. *Optical Fiber Communication*. Prentice Hall.
- [13] Sugesti, E. S. *Investation of IMD based on 16-QAM SCM for Microcellular Radio Over Fiber Application*. Thesis for the degree of MSc. Manchester Metropolitan University. Oktober 1998.
- [14] Suwonpanich, P., Shoji Y., Tsukamoto K., Komaki S. *Proposal of Cascaded Radio-Optic Direct Conversion Radio Highway*. Proc. 1997 Asia Pasific Microwave Conf (APMC'97), vol.1 pp.385-388. Hong Kong. Des. 1997.
- [15] Suwonpanich, P., Shoji Y., Tsukamoto K., Komaki S. *Study on Cascaded Radio-Optic Direct Conversion Radio Highway Using Optical Amplifier*. (APMC'98). Vol. 1 pp. 317-320. Yokohama. Jepang. Desember 1998.
- [16] Wu, J., Wu J.S, Tsao H. W., *A Fiber distribution System for Microcellular Radio*. IEEE Phot. Tech. Letter. Vol. 6 No. 9. September 1994.