

# OPTIMASI KOMPENSASI DISPERSI UNTUK SALURAN TRANSMISI SOLITON 40 GB/S JARAK JAUH DENGAN METODE Q-MAP

K. SHIMOURA, I. YAMASHITA DAN S. SEIKAI

*Technical Research Center of the Kansai Electric Power Co., Inc.*

*3-11-20 Nakoji, Amagasaki, Hyogo 661-0974, Japan*

## *Abstrak*

*Melalui tulisan ini dilakukan investigasi kompensasi dispersi periodik saluran transmisi soliton 40 Gb/s melalui sebuah simulasi numerik dan eksperimen transmisi. Dikembangkan metode simulasi untuk optimasi dari saluran ini menggunakan Q-Map. Kompensasi dispersi optimum menjadi bernilai konstan  $\pm 20$  ps/nm di dalam periode kompensasi yang berbeda, karena kekuatan optimum dari manajemen dispersi. Pada eksperimen, dievaluasi kinerja transmisi di dalam parameter panjang-gelombang sinyal, daya sinyal dan lokasi dari lokasi elemen kompensasi dispersi. Lokasi sangat penting pada desain saluran seperti itu. Pada 640 Km menggunakan 2 fiber kompensasi dispersi, diamati transmisi bebas eror pada panjang gelombang dengan rentang 1,2 nm pada saluran yang didesain optimal. Desain saluran ini praktis untuk sistem komunikasi 40 Gb/s generasi berikutnya.*

## **1. Pendahuluan**

Sistem transmisi 10 Gb/s menggunakan *dispersion-shifted fibers* umum digunakan di Jepang. *RZ-based 40 Gb/s systems* diharapkan menjadi sistem komunikasi kapasitas tinggi jarak menengah generasi berikutnya. Pada area ini, efek dispersi fiber dan efek non-linier fiber menjadi kritis. *Dispersion managed (DM) soliton* adalah solusi yang atraktif untuk area ini. Skema ini juga dapat diterapkan untuk komunikasi *ultra-long distance*. [1]-[3].

Saluran kompensasi dispersi periodik dimodelkan dengan *uniform dispersion fibers* dan elemen kompensasi dispersi linier. Saluran transmisi *anomalous dispersion fiber based* diajukan untuk mengurangi *Gordon-House jitter* dan interaksi soliton tanpa mengurangi daya sinyal [4]. Juga dilaporkan bahwa *initial frequency chirping* meningkatkan margin daya dan toleransi dispersi [5]. Pada sisi lain, saluran transmisi

*normal dispersion fiber-based* juga memiliki kinerja yang baik untuk transmisi soliton [6].

Ditunjukkan secara numerik bahwa ada 2 kondisi transmisi ekstrim stabil pada skema ini [7]. Dan pada kondisi ini, kekuatan dari manajemen dispersi menjadi optimum untuk meminimalkan interaksi soliton [8]. Dari hasil ini, kerapatan (*short-scale*, kontinyu) skema manajemen dispersi diajukan untuk sistem transmisi *ultra high bit rate*. [9]-[11]. Pada tulisan ini ditunjukkan metode optimasi secara numerik untuk desain kompensasi sistem transmisi 40 Gb/s.

## 2. Metode Q-Map

Pada sistem 40 Gb/s, daya sinyal menjadi besar dan harus diperhatikan efek non-linier dan efek dispersi dari fiber. Harus dioptimasi banyak parameter secara simultan untuk desain *dispersion-managed lines*. Faktor *Q contour mapping* (Q-Map) adalah metode praktis untuk tujuan ini [12]. Faktor-Q menyatakan *signal-to-noise ratio* pada rangkaian keputusan di penerima di dalam satuan tegangan atau arus, dan memerlukan  $Q > 6$  untuk BER  $10^{-9}$  [13]. Gambar 1 menunjukkan defenisi dari faktor Q untuk pulsa-pulsa RZ (Return-To-Zerro).

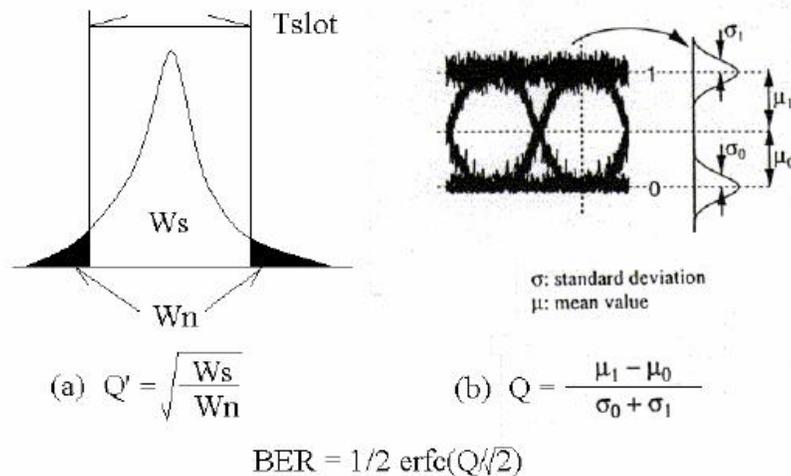


Figure 1. Q-factor definitions for RZ-pulses. (a) for one pulse stability analysis, and (b) for interaction and jitter analysis.

Pada defenisi gambar 1(a), hanya satu pulsa yang diperhatikan dan dapat dengan mudah diperkirakan stabilitas dari pulsa tersebut di dalam sebuah waktu perhitungan yang



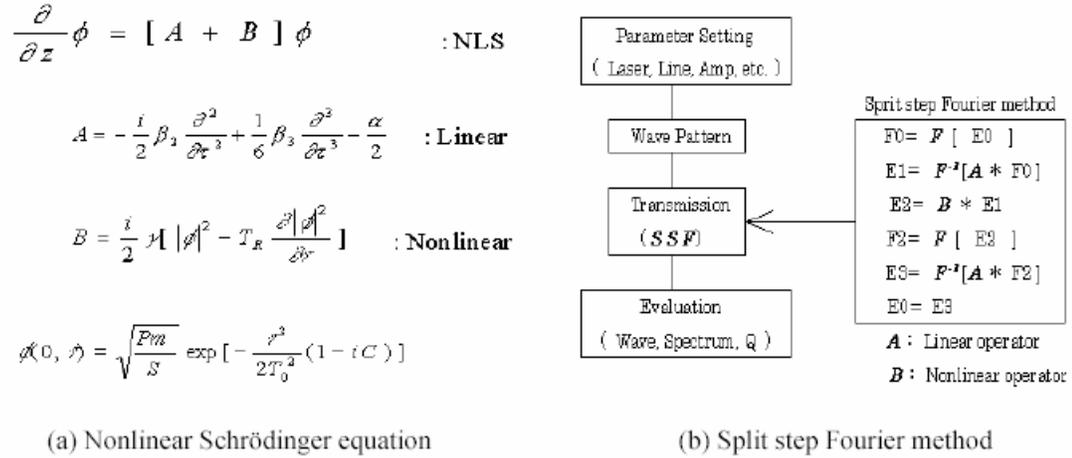


Figure 3. (a) Nonlinear Schrödinger equation, and (b) Split step Fourier method. The chirped Gaussian pulse of chirp parameter  $C$  is assumed for the initial pulse.

### 3 Optimasi Kompensasi Dispersi

*Chirped Gaussian pulse* dengan *Full-Width at Half Maximum (FWHM)* 7,5 ps sebagai pulsa input dan diasumsikan pola 12-bit “001011101100”. Gambar 4 menunjukkan contoh dari Q-Maps pada bidang  $D_{av}$ - $D_c$  untuk periode kompensasi  $N_c$  yang berbeda. Jarak pisah penguat  $L_a = 50$  km, daya puncak awal  $P_m = +13$  dBm dan jarak transmisi  $L_t = 3$  Mm.

Dua zona parameter jelas dipisahkan untuk transmisi yang stabil. Satu mode memiliki nilai  $D_c$  positif sekitar 20 ps/nm dan mode yang lain memiliki nilai  $D_c$  negatif sekitar -20 ps/nm dan nilai-nilai ini tidak bergantung ketat pada  $N_c$ . Nilai  $D_c$  yang positif memerlukan *normal dispersion fibers* sebagai saluran transmisi, dan nilai  $D_c$  yang negatif memerlukan *anomalous dispersion fibers*. Nilai optimal  $D_{av}$  sedikit berada pada daerah *anomalous* sekitar +0,03 ps/nm/km di dalam kedua kasus. Pada  $N_c = 2$  kasus (a), dispersi lokal dari saluran fiber D adalah -0,17 ps/nm/km dan +0,23 ps/nm/km. Pada  $N_c = 5$  kasus (b), D adalah -0,05 ps/nm/km dan +0,11 ps/nm/km. Untuk kasus  $N_c$  yang lebih panjang dispersi lokal menjadi kecil dan efek distorsi non-liniers sinyal menjadi kritis. Zona *non-transmissible* antara zona *transmissible* diperluas dan dipengaruhi oleh fluktuasi dispersi dari transmisi fiber. Efek ini menentukan batas atas dari periode kompensasi dispersi pada sistem dengan *bit-rate* lebih tinggi.

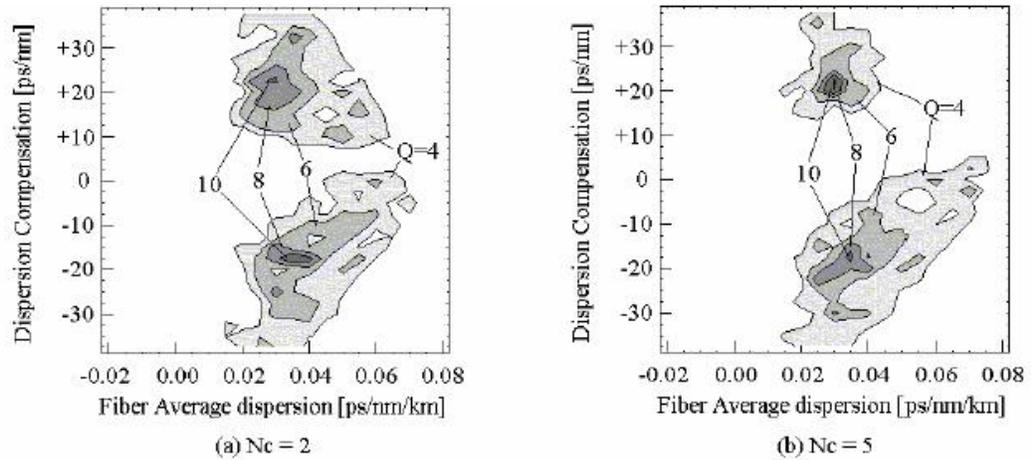


Figure 4. Q-maps on the  $D_{av} - D_c$  planes for different  $N_c$  cases.  $P_m = +13$  dBm,  $L_a = 50$  km and  $L_t = 3$  Mm.

Gambar (5) juga menunjukkan bahwa Q-Maps pada bidang  $D_{av} - D_c$ , tapi untuk jarak pisah penguat yang berbeda.  $L_a = 30$  km untuk kasus (a) dan  $L_a = 80$  km untuk kasus (b). Periode kompensasi  $N_c = 2$  di dalam kedua kasus. Pada kasus ini, nilai optimal  $D_c$  sekitar  $\pm 20$  ps/nm tetapi optimal  $D_{av}$  sedikit bergeser. Untuk kasus  $L_a$  yang lebih panjang, optimal  $D_{av}$  memiliki nilai yang lebih rendah.

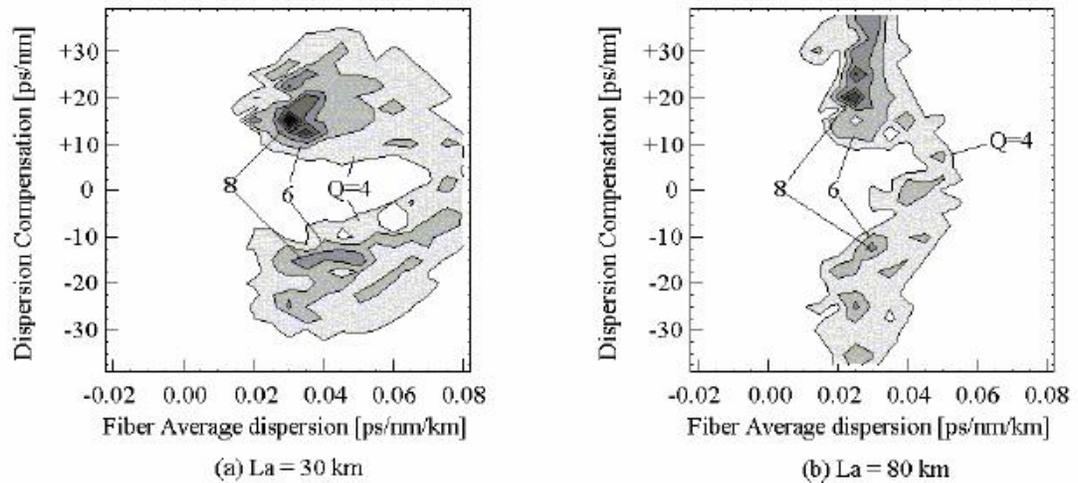


Figure 5. Q-maps on the  $D_{av} - D_c$  planes for different  $L_a$  cases.  $P_m = +13$  dBm and  $N_c = 2$ .

Gambar (6) menunjukkan Q-Maps pada bidang  $D_{av}$ - $P_{av}$  untuk kasus *normal dispersion* ( $D_c = +20$  ps/nm), dan kasus *anomalous dispersion* ( $D_c = -20$  ps/nm). Jarak pisah penguat  $L_a = 50$  km dan jarak transmisi  $L_t = 3$  Mm. Daya input masukkan fiber  $P_{av}$  dihitung dari  $P_m$  dibagi  $P_{av} = P_m - 8$  dBm, dianggap *duty ratio* pulsa 0,3 dan *mark ratio* 0,5.  $D_{av}$  optimum sekitar +0,04 ps/nm/km dan  $P_{av}$  optimum sekitar +6dBm di dalam kedua kasus, tapi transmisi yang lebih baik diperoleh pada kasus normal dispersion (a). Dapat dengan mudah diperkirakan toleransi dispersi dan marjin daya dari area *transmissible* ( $Q > 6$ ) dan didapatkan :

$$D_{av} = +0.04 \pm 0.02 \text{ [ps/nm/km]} \quad (2a)$$

$$P_{av} = +6 \pm 2 \text{ [dBm]} \quad (2b)$$

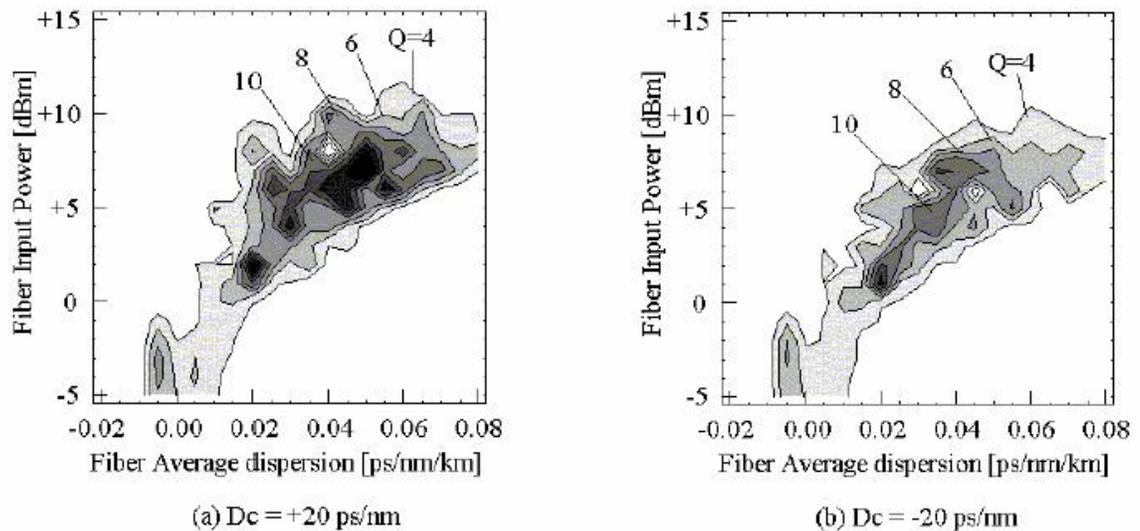


Figure 6. Q-maps on the  $D_{av} - P_{av}$  planes for normal dispersion case ( $D_c = +20$  ps/nm) and anomalous dispersion case ( $D_c = -20$  ps/nm).

#### 4. Kekuatan dari *dispersion management*

Menarik bahwa pada kasus  $N_c$  atau  $L_a$  yang berbeda, kompensasi dispersi optimal  $D_c$  hampir memiliki nilai yang sama. Ini berarti bahwa parameter penting pada desain saluran bukan dispersi lokal  $D$ , tapi kompensasi dispersi  $D_c$ . Hasil ini dijelaskan oleh mekanisme interaksi soliton pada saluran *dispersion-managed*. Pada saluran dispersi terkompensasi, dispersi positif dan negatif hampir saling menghilangkan, sehingga kekuatan dari *dispersion management*  $S$  didekatkan oleh persamaan :

$$S = \frac{|k_1 z_1 - k_2 z_2|}{t_s^2} = 2.55 \frac{|D_c|}{T_s^2} \quad (3)$$

dimana  $k = -(\lambda^2/2\pi c) d = 1,27 D$  (ps/nm/km) untuk rentang  $1,55 \mu\text{m}$ .  $T_s$  (ps) adalah *full-width at half maximum* dari *dispersion-managed soliton* pada *chirp-free point* dan  $D_c$  (ps/nm) adalah nilai kompensasi dispersi. Gambar 7 mengindikasikan bahwa lebar pulsa bervariasi untuk kasus *normal dispersion* ( $D_c = +20$  ps/nm), dan kasus *anomalous dispersion* ( $D_c = -20$  ps/nm) oleh perhitungan transmisi satu pulsa. Pada gambar 7(a), lebar pulsa menuju ke nilai keadaan *steady* oleh mekanisme *guiding filter* [15]. Pada gambar 7(b), lebar pulsa menjadi minimal sekitar titik pusat dari *spans* kompensasi dispersi, dan  $T_s$  dapat diperkirakan dari titik ini [16]. Jika diberikan  $D_c = \pm 20$  ps/nm dan  $T_s = 5,5$  ps pada persamaan (3), maka didapatkan  $S = 1,69$ . Nilai ini hampir sama dengan perkiraan sebelumnya  $S = 1,65$  [8].

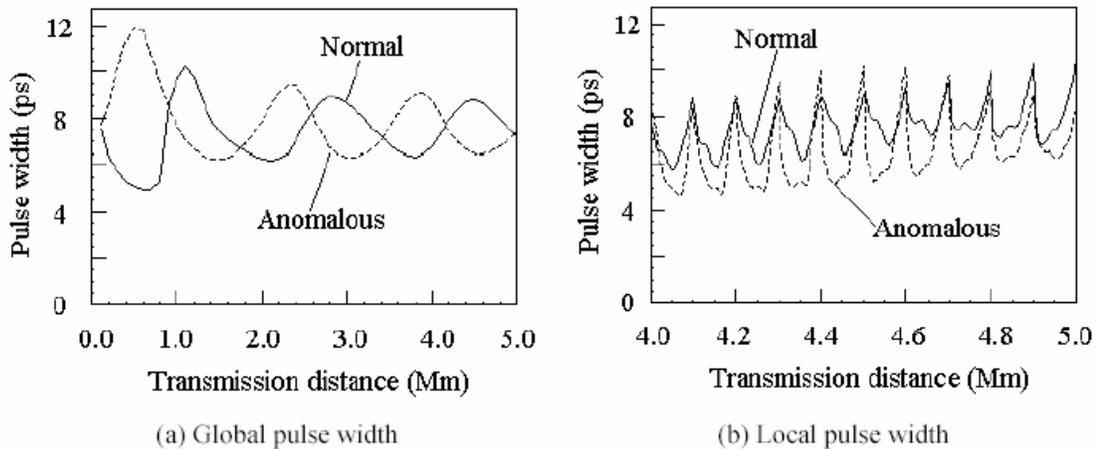


Figure 7. Pulse widths in (a) global scale (every output point of compensation elements), and (b) fine scale. Normal case ( $D_c = +20$  ps/nm) and Anomalous case ( $D_c = -20$  ps/nm).  $T = 7.5$  ps,  $P_m = +13$  dBm,  $D_{av} = +0.03$  ps/nm/km,  $L_a = 50$  km and  $L_c = 100$  km.

## 5. Eksprimen Transmisi soliton 40 Gb/s

*40 Gb/s based systems* dianggap menjadi sistem komunikasi kapasitas tinggi jarak menengah generasi berikutnya [17,18]. Secara eksperimen dievaluasi kinerja transmisi dari *640 km single-channel straight-line systems* di dalam parameter dari panjang

gelombang sinyal, daya sinyal, dan lokasi elemen kompensasi dispersi. *Experimental set-up* ditunjukkan pada gambar (8). Pulsa optik dibangkitkan oleh *Mode Locked Laser Diode (MLLD)*, dan lebar pulsa 5,7 ps. MLLD dapat dituning antara rentang panjang gelombang 1530 nm dan 1560 nm. MLLD ditrigger oleh *clock 10 GHz*. Pulsa output dimodulasi oleh *Lithium Niobate Modulator (LN-Mod)*. 10 Gb/s, pola data  $2^{15} - 1$  PRBS secara optik dimultipleks menjadi sinyal 40 Gb/s oleh sebuah PLC-multiplexer.

*Dispersion-Shifted Fiber (DSF)* digunakan sebagai saluran transmisi. Jarak pisah penguat 80 km terdiri dari 4 buah DSF dengan panjang 20 km. *Zero Dispersion Wavelength (ZDW)* pada masing-masing fiber terdistribusi antara 1535 sampai 1560 dan simpangan bakunya 6,1 nm. 2 buah *Dispersion Compensation Fiber (DCF)* dengan dispersi -30 ps/nm dan -40 ps/nm diinstal pada saluran transmisi. Rata-rata ZDW adalah 1547,9 nm (tanpa DCF) dan 1549,5 nm (dengan DCF).

*Noise-figure* penguat sebesar 5 dB dan tanpa filter pada masing-masing penguat. Pelemahan fiber 0,21 dB/km dan *dispersion slope* 0,07 ps/nm<sup>2</sup>/km. Rata-rata dispersi dari saluran transmisi dapat dirubah mengikuti panjang-gelombang sinar laser. Pada penerima, *10 GHz clock signal* di-recover oleh *40 GHz Phase Locked Loop Circuit (PLL)*, dan aliran data 40 Gb/s didemultipleks menjadi sinyal 10 Gb/s menggunakan sebuah *Electroabsorbtion Modulator (EA-Mod)*.

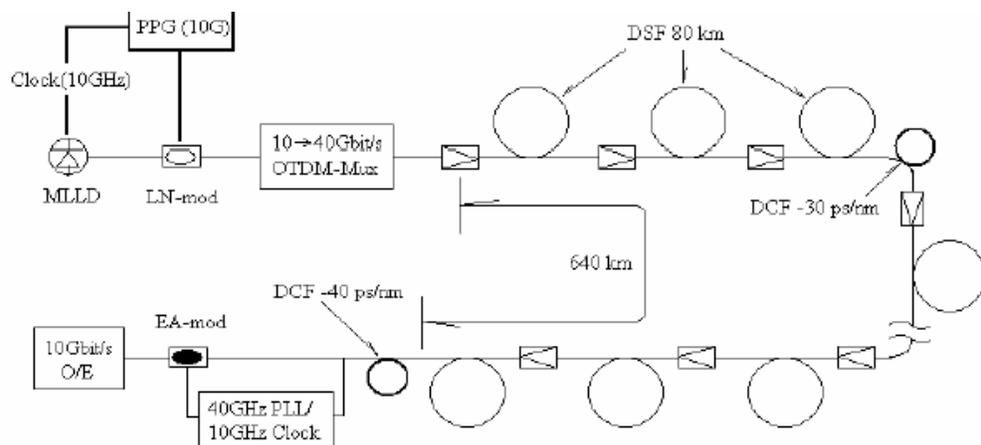


Figure 8. Experimental setup of the 40 Gbit/s, 640 km dispersion compensated transmission system using 2-pieces of DCF.

## 6. Optimasi Daya Sinyal

Pada sistem soliton dispersi terkompensasi, dispersi rata-rata optimal digeser mendekati nol dan margin daya diperbesar dibandingkan dengan sistem soliton biasa [2,4]. Gambar 9(a) menunjukkan daya sinyal kebergantungan kinerja transmisi terhadap panjang gelombang. Daya input fiber berubah dari +1 dBm menjadi +9 dBm. DCF diinstall pada titik 320 km dan 640 km. Daya output penguat optimal +7 dBm dan transmisi yang baik  $BER < 10^{-9}$  didapatkan antara +3 dBm dan +9 dBm. Pada +7dBm, *error-free transmission* diamati pada rentang panjang gelombang 0,4 nm: 1549,8 nm – 1550,2 nm, dimana dispersi +0,024 ps/nm/km sampai +0,052 ps/nm/km.

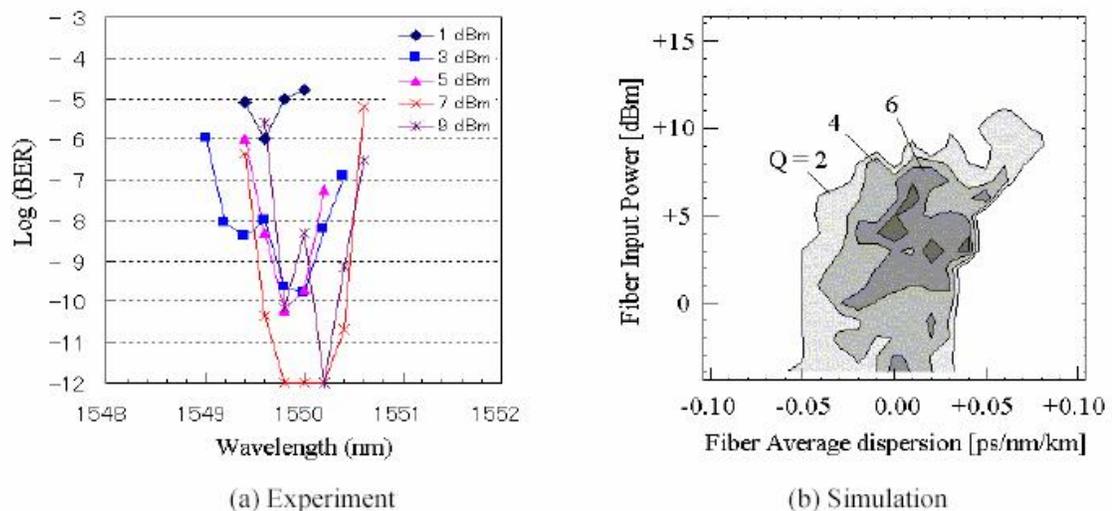


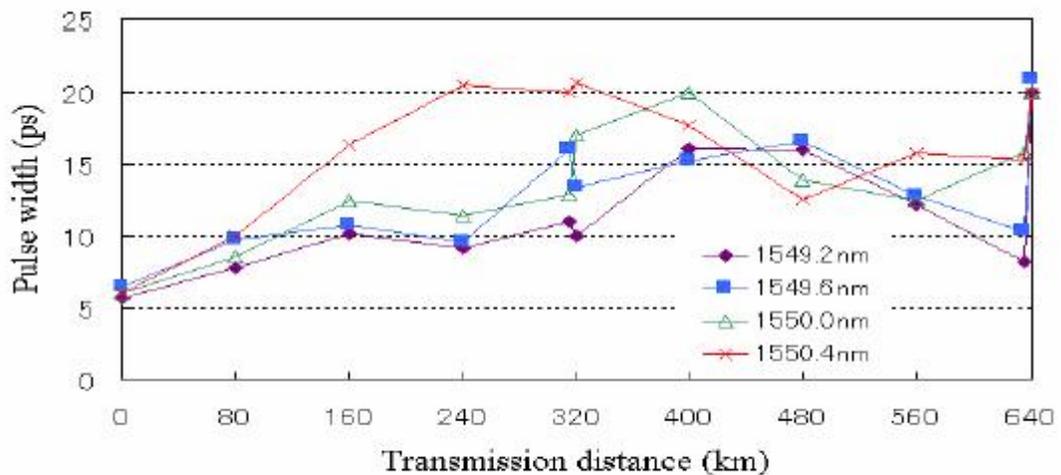
Figure 9. Transmission dependence on the signal power (fiber input power) and the signal wavelength (average dispersion). (a) Experimental result and (b) Numerical simulation result.

Gambar 9(b) menunjukkan perkiraan area *transmissible* oleh simulasi numerik. Ini adalah sebuah Q-map pada bidang  $D_{av} - P_{av}$ , dan membutuhkan  $Q > 6$  untuk BER kurang dari  $10^{-9}$  [12,13]. Dari gambar tersebut, transmisi yang baik  $Q > 6$  diperoleh pada  $P_{av}$  dari +1dBm sampai +8dBm, dan  $D_{av}$  dari -0,01 ps/nm/km sampai +0,04 ps/nm/km. Pada simulasi ini, fluktuasi dispersi pada transmisi fiber tidak diperhitungkan dan daya input fiber diperkirakan dari daya puncak pulsa dengan

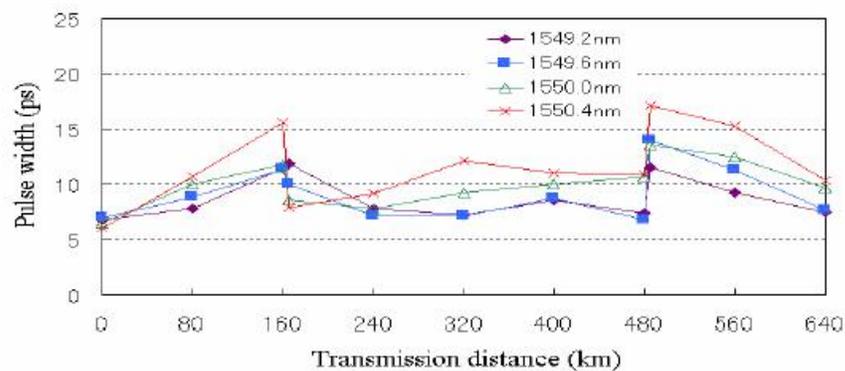
mengabaikan daya *Amplifier Spontaneous Emission (ASE)*. Dua alasan ini akan menjelaskan perbedaan antara hasil eksperimen dan hasil simulasi.

## 7. Efek Lokasi Dari Elemen Kompensasi Dispersi

Pada sistem soliton dispersi terkompensasi, lebar pulsa menjadi minimal di sekitar titik pusat dari *spans* kompensasi dispersi, dimana *frequency chirp* menjadi nol. Maka, jika sumber pulsa dan penerima diletakkan pada titik *chirp-free*, setiap *pre-chirping* atau kompensasi *chirp* pada penerima tidak dibutuhkan untuk mendapatkan transmisi DM-soliton optimum.



(a) Ordinary DCF allocation



(b) Chirp-free DCF allocation

Figure 10. Pulse widths measured by a streak camera. DCFs are installed at the distance of (a) 320/640 km case and (b) 160/480 km case.

Gambar 10 menunjukkan lebar pulsa diamati pada dua tipe saluran kompensasi oleh *streak camera*. Pada kasus (a) DCF diinstal pada titik akhir kompensasi *spans*, 320 km dan 640 km. Pada kasus (b) DCF diinstal pada titik pusat dari *spans*, 160 km dan 480 km. Rata-rata lebar pulsa pada penerima untuk sinyal 1549,2 nm sampai 1550,4 nm adalah 20,2 ps pada kasus (a) dan 8,8 ps pada kasus (b). Pelebaran pulsa ditekan dan Intersymbol Interference (ISI) dikurangi pada kasus (b). Gambar 11 menunjukkan pengukuran *bit error rate* untuk dua tipe saluran. Pada kasus (b), transmisi *error free* diamati pada rentang panjang gelombang 1,2 nm : 1549,4 nm -1550,6 nm, diperbesar 3 kali dibandingkan kasus (a).

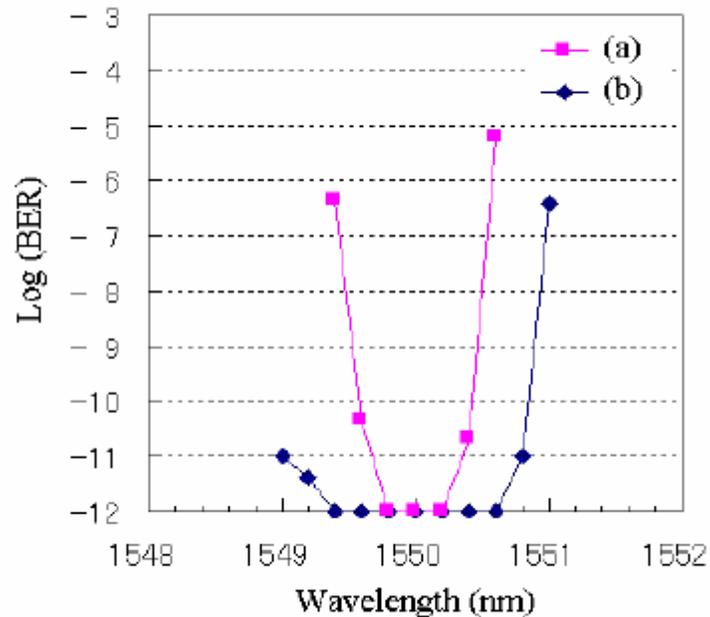


Figure 11. Transmission performance improvement by the location of DCFs.

Gambar 12 menunjukkan Q-Maps pada bidang parameter frequency chirp mula-mula  $C$  dan  $D_c$ .  $D_{av}$  tetap pada +0,03 ps/nm/km dan  $P_m$  +13 dBm. Pada alokasi DCF biasa kasus (a),  $C > 0$  (*down-chirping*) dibutuhkan untuk saluran  $D_c$  positif dan  $C < 0$  (*up-chirping*) dibutuhkan untuk  $D_c$  negatif untuk transmisi optimal [5]. *Frequency chirp* mula-mula meng-kompres pulsa secara linier pada *transmission fiber* pada kedua kasus [16]. Pada kasus alokasi *chirp-free DCF* (b), *pre-chirping* tidak dibutuhkan

untuk transmisi optimum, dan kinerja transmisi ditingkatkan khususnya pada saluran  $D_c$  positif.

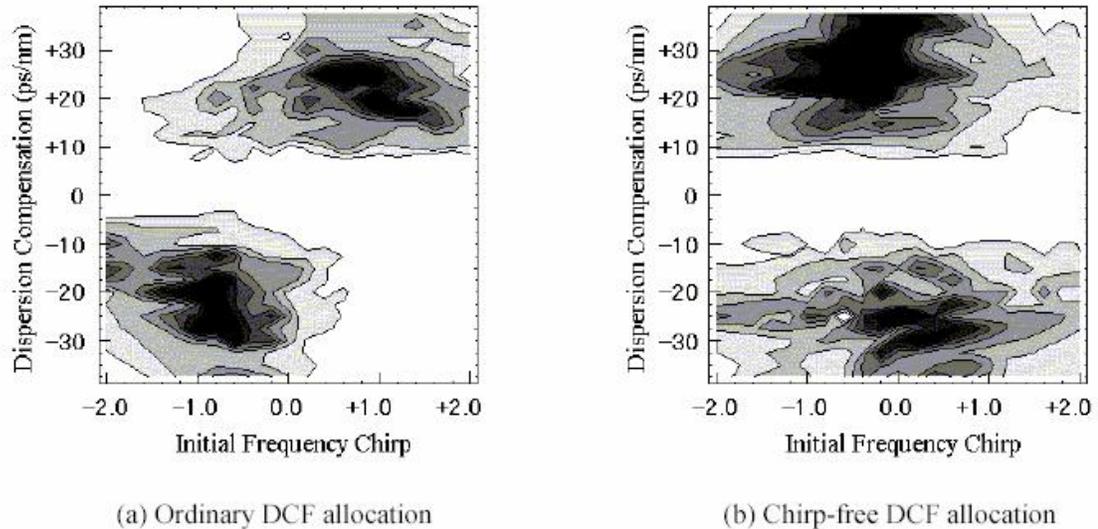


Figure 12. Q-maps on the  $C - D_c$  planes for (a) Ordinary DCF allocation and (b) Chirp-free DCF allocation.  $P_m = +13$  dBm,  $D_{av} = +0.03$  ps/nm/km,  $N_c = 2$ ,  $L_a = 50$  km and  $L_t = 3$  Mm.

## 8. Kesimpulan

Dilakukan secara numerik dan eksperimen analisa metode optimasi untuk saluran soliton dispersi terkompensasi. Dari hasil simulasi, kompensasi dispersi optimal untuk sistem 40 Gb/s sekitar  $\pm 20$  ps/nm dan tidak ketat bergantung pada periode kompensasi. Hasil ini diterangkan oleh mekanisme interaksi dari *dispersion-managed soliton*, dan menyederhanakan desain dispersi dari saluran transmisi. Dapat dengan mudah menspesifikan elemen kompensasi dispersi menurut persamaan (3).

Secara eksperimen dievaluasi 40 Gb/s, saluran transmisi 640 km *dispersion managed-soliton* menggunakan 2 buah fiber kompensasi dispersi. Kinerja transmisi ditingkatkan oleh efek lokasi dari elemen kompensasi dispersi. Diamati transmisi *error-free* pada rentang panjang gelombang 1,2 nm pada alokasi DCF *chirp-free*; didapatkan 3 kali peningkatan dibandingkan alokasi biasa.

Metode simulasi numerik menggunakan Q-Maps diterapkan untuk memperkirakan kondisi *DM-soliton transmissible*. Kondisi transmisi optimal menunjukkan kecocokan dengan hasil eksperimen, tapi margin panjang gelombang atau margin daya sedikit berbeda. Dengan memperhatikan fluktuasi dispersi dari *transmission fiber*, dan perkiraan input daya fiber mencakup *ASE noise power* akan meningkatkan akurasi simulasi numerik.

## Daftar Pustaka

1. Mollenauer, L. F., Evangelides Jr., S. G., and Haus, H. A.: Long-distance soliton propagation using lumped amplifiers and dispersion shifted fiber, *J. Lightwave Technol.* **9**, (1991), pp.194-197.
2. Nakazawa, M., Kubota, H., Suzuki, K., Yamada, E., and Sahara, A.: *Superb characteristics of dispersion-allocated soliton transmission in TDM and WDM systems*, in A. Hasegawa (Ed.), *New trends in optical soliton transmission systems*, Kluwer Academic Publishers, (1998), pp.197-224.
3. Morita, I., Tanaka, K., Edagawa, N., and Suzuki, M.: 40 Gbit/s single-channel soliton transmission over 10200 km without active inline transmission control, *ECOC'98 (Madrid)*, **PD**, (1998), pp.49-51.
4. Suzuki, M., Morita, I., Edagawa, N., Yamamoto, S., Taga, H., and Akiba, S.: Reduction of Gordon-Haus timing jitter by periodic dispersion compensation in soliton transmission, *Electron. Lett.* **31**, (1995), pp.2027-2029.
5. Morita, I., Suzuki, M., Edagawa, N., Tanaka, K., Yamamoto, S., and Akiba, S.: Performance improvement by initial phase modulation in 20 Gbit/s soliton-based RZ transmission with periodic dispersion compensation, *Electron. Lett.*, **33**, (1997), pp.1021-1022.
6. Jacob, J. M., Golovchenko, E. A., Pilipetskii, A. N., Carter, G. M., and Menyuk, C. R.: Experimental demonstration of soliton transmission over 28 Mm using mostly normal dispersion fiber, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **9**, (1997), pp.130-132.
7. Shimoura, K., and Seikai, S.: Two extremely stable conditions of optical soliton transmission in periodic dispersion compensation lines, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **11**, (1999), pp.200-202.
8. Yu, T., Golovchenko, E. A., Pilipetskii, A. N., and Menyuk, C. R.: Dispersion-managed soliton interactions in optical fibers, *Optics Lett.*, **22**, (1997), pp.793-795.
9. Liang, A., Toda, H., and Hasegawa, A.: High speed optical transmission with dense dispersion managed soliton, *ECOC'99 (Nice)*, **1**, (1999), pp.386-387.

10. Turitsyn, S. K., Fedoruk, M. P., Doran, N. J., and Forysiak, W.: Optical soliton transmission in fiber lines with short-scale dispersion management, *ECOC '99 (Nice)*, **1**, (1999), pp.382-383.
11. Anis, H., Berkey, G., Bordogna, G., Cavallari, M., Charbonnier, B., Evans, A., Hardcastle, I., Jones, M., Pettitt, G., Shaw, B., Srikant, V., and Wakefield, J.: Continuous dispersion managed fiber for very high speed soliton systems, *ECOC '99 (Nice)*, **1**, (1999), pp.230-231.
12. Sahara, A., Kubota, H., and Nakazawa, M.: Q-factor contour mapping for evaluation of optical transmission systems: soliton against NRZ against RZ pulse at zero group velocity dispersion, *Electron. Lett.* **32**, (1996), pp.915-916.
13. Bergano, N. S., Kerfoot, F. W., and Davidson, C. R.: Margin measurements in optical amplifier systems, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **5**, (1993), pp.304-306.
14. Hasegawa, A. and Kodama, Y.: Signal transmission by optical solitons in monomode fiber, *Proceeding of the IEEE*, **69**, (1981), pp.1145-1150.
15. Hasegawa, A. and Kodama, Y.: *Solitons in Optical Communications*, Oxford University Press, (1995), Chap.8.
16. Agrawal, G. P.: *Nonlinear Fiber Optics*, Academic Press, (1995), Chap.3.
17. Sahara, A., Suzuki, K., Kubota, H., Komukai, T., Yamada, E., Imai, T., Tamura, K., and M. Nakazawa, M.: Single channel 40 Gbit/s soliton transmission field experiment over 1000 km in Tokyo metropolitan optical loop network using dispersion compensation, *Electron. Lett.*, **34**, (1998), pp.2154-2155.
18. Nielsen, T. N., Stentz, A. J., Hansen, P. B., Chen, Z. J., Vengsarkar, D. S., Strasser, T. A., Rottwitt, K., Park, J. H., Stulz, S., Cabot, S., Feder, K. S., Westbrook, P. S., and Kosinski, S. G.: 1.6 Tb/s (40 x 40 Gb/s) transmission over 4x100 km nonzero-dispersion fiber using hybrid Raman/Erbium-doped inline amplifiers, *ECOC '99 (Nice)*, **PD2-2**, (1999), pp.26-27.