

GEOMETRİK YAKLAŞIMLA KAZANÇ VE FOTON ÇOĞALMASININ ARASINDAKİ AÇININ HESAPLANMASI

Remzi YILDIRIM ve Fatih V. ÇELEBİ*

Bilgisayar Bölümü, End. San. Eğitim Fak. Gazi Üniversitesi, 06500 Ankara

*Bilgisayar Müh. Bölümü, Müh. Fak., Ankara Üniversitesi, 06500 Beşevler, Ankara

remzi@gazi.edu.tr, fcelebi@eng.ankara.edu.tr

(Geliş/Received: 19.01.2009 ; Kabul/Accepted: 30.05.2009)

ÖZET

Bu çalışmada daha önce tasarımı yapılmış olup doğrusal olmayan optoelektronik geri beslemeli lazer diyot sistemi için Volterra serisi kullanılarak sistem yaklaşımı uygulanmış ve sıfırıncı derece çözümden foton (P_o) ve kazanç (g) eşitlikleri elde edilmiştir. Bu eşitliklerden elde edilen eğriler geometrik yaklaşım için kullanılmıştır. Geometrik yaklaşımla kazanç ve foton çoğalması arasındaki ilişki eşik akımına (I_{th}) bağlı olarak muhtemel doğrusal bölgeler bulunmuştur. Kazanç ve foton çoğalması arasındaki olabilecek en büyük ve en küçük açı değerleri bulunmuş ve bu değerlere karşılık gelen I_{th} oranı, en iyi doğrusal bölge, doğrusal olarak kullanılacak en büyük I_{th} oranı ve doyum noktasının başladığı I_{th} akım değeri tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Lazer diyot, geometrik yaklaşım, volterra serisi, doğrusallaştırma, doğrusal olmayan optoelektronik geri besleme.

THE COMPUTATION OF THE ANGLE BETWEEN THE GAIN AND PHOTON POPULATION BY GEOMETRICAL APPROACH

ABSTRACT

In this study, system approach is applied by Volterra series for the previously designed non-linear optoelectronic feedback laser diode system. Photon (P_o) and gain (g) equalities are obtained from zero order solution and are used for the geometrical approach. The relation between gain and photon population is determined according to threshold current (I_{th}) for possible linear regions. The maximum and minimum angle and the corresponding I_{th} ratio values are computed. The optimum linear region, maximum I_{th} ratio for linear usage and the corresponding I_{th} value where the saturation point begins are also determined.

Keywords: Laser diode, geometrical approach, volterra series, linearization, non-linear optoelectronic feedback.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yarıiletken lazer diyot (LD) analog ve sayısal ticari fiber optik haberleşme sistemlerinin önemli bir parçasıdır. Fiber optik haberleşme sistemleri, özellikle veri iletiminde kullanılan geniş bantlı ana-taşıyıcı hatlarda veya ana düğümler arasında ve kablolu TV sistemlerinde kullanılır. Bu sistemler genel olarak alt-taşıyıcı çoğullama (sub-carrier multiplexing, SCM) veya diğer çoğullama tekniklerini kullanır. Lazer diyotun doğrusal olmayan özelliğinden faydalanılıp indermodülasyon (IMD) frekans bileşenleri üretilerek fiber optik haberleşme sistemlerinin bant genişliği

artırılır ve ticari olarak daha kazançlı hale gelmesi sağlanır. Sayısal haberleşme sistemleri için ise bant genişliği genel olarak -20 dB'ye kadar düşürülerek kullanılabilir. Bu durumda ise gürültü miktarının bilinmesi önem kazanır. Çünkü düşük gürültülü sistemlerde geniş bant kullanılabilir. Güç miktarı belli bir seviyeye yükseldikçe güç dalgalanması belirgin olarak azalabilir ve gürültünün etkisi de azalır. Ancak güç dalgalanması tamamen ortadan kaldırılamaz. Bu dalgalanmayı azaltmak için optik, elektronik veya opto-elektronik geri besleme kullanmak veya bunların beraber kullanımını gerekebilir [1-8].

LD optik çıkış gücünün doğrusallaştırılmasıyla ilgili pek çok çalışma yapılmıştır [9-18]. Bu çalışmalarda LD'nin optik çıkış gücünün doğrusallaştırılması ve IMD3 frekans bileşenlerinin çıkış gücünde yoğunlaştırılmıştır. Optik kaynaklardaki doğrusallığın iyileştirilmesiyle ilgili olarak elektrik, optik, opto-elektronik, ileri besleme, ileri opto-elektronik besleme, ön-distorsiyon (predistortion), tüm optik(all-optical) ve ışık-akıtma (light-injection) gibi teknikler kullanılmıştır [19-24]. Bu doğrusallaştırılmalarda genlik ve faz uygunlaştırma çalışmaları yapılmıştır. Fakat bu tür yapılar en uygun genlik ve fazı elde etmek için bir hayli çaba gerekmektedir. Tüm optik doğrusallaştırma tekniği Fabry-Perot etalon için [23], akıtma-kilitleme (injection-locking) tekniği de dağıtılmış geri-beslemeli (DFB) LD nin dinamik gevşeme osilasyon frekansını iyileştirmek için kullanılmıştır [24]. Yine DFB LD'lerde geribesleme harmonik-akıtma (harmonic-injection) tekniği doğrusallaştırmak için kullanılan teknikler arasındadır [25-29]. IMD uygulamalarında LD'nin asimetrik optik haberleşme de kullanılması için davranışı da incelenmiştir [30].

2. LAZER-DİYOT TEMEL ORAN

EŞİTLİKLERİ (LASER DIODE BASIC RATE EQUATIONS)

Bu çalışmada Volterra çekirdeklerinin (H_1, H_2, H_3) analizi yapılarak Hassine nin kullandığı tek-modlu lazer diyot oran eşitlikleri modelde kullanılmıştır [31]. Bu eşitlikler:

$$\frac{dp(t)}{dt} = \Gamma A [n(t) - N_{tr}] [1 - \hat{\epsilon} p(t)] p(t) - \frac{1}{\tau_p} p(t) + \frac{\beta \Gamma}{\tau_n} n(t) \quad (1)$$

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{1}{q} I(t) - \frac{1}{\tau_n} n(t) - \Gamma A [n(t) - N_{tr}] [1 - \hat{\epsilon} p(t)] p(t) \quad (2)$$

Eşitlikte geçen $p(t)$ ve $n(t)$ sırasıyla foton sayısı ve taşıyıcı sayısıdır. Diğer değişkenler ise: Γ sıkıştırma faktörü ($\Gamma=0.3$), A kazanç sabiti ($A=1.83 \cdot 10^4 \text{s}^{-1}$), N_{tr} ışına noktasındaki taşıyıcı sayısı ($N_{tr}=10^7$), τ_p foton ömrü ($\tau_p=1.6 \cdot 10^{-12} \text{s}$), τ_n taşıyıcı ömrü ($\tau_n=2.2 \cdot 10^{-9} \text{s}$), β kendiliğinden ışına faktörü ($\beta=10^{-4}$), $I(t)$ toplam akım, q elementer yük ($q=1.6 \cdot 10^{-19} \text{C}$), $\hat{\epsilon}$ boyutsuz kazanç faktörü ($\hat{\epsilon} = \epsilon/V = 10^{-6}$), V ise aktif bölgenin hacmidir.

2.1. Sıfırncı Derece Çözüm (Zero Order Solution)

Foton yoğunluğunu P_o için

$$P_o = \frac{\tau_p}{q} I_o + \frac{\tau_p}{\tau_n} [\beta \Gamma - 1] N_o \quad (3)$$

şeklinde tanımlanır ve aşağıdaki üçüncü derece polinom'dan

$$N_o^3 + C_2 N_o^2 + C_1 N_o + C_o N = 0 \quad (4)$$

taşıyıcı yoğunluğu için N_o elde edilir. Burada geçen diğer sabitler ise ayrıntılı olarak kaynak [1,32] de verilmiştir.

2.2. Birinci Derece Operatörü (First Order Operator)

Birinci derece operatör için giriş akımı $i(t)$ nin, $n_1(t)$ ve $p_1(t)$ birinci derece cevabı:

$$\frac{dp_1(t)}{dt} + B_1 p_1(t) = B_o n_1(t) \quad (5)$$

Eşitlikte geçen B_1 ve B_o sabitleri:

$$B_1 = \Gamma A [1 - 2\hat{\epsilon} P_o] [N_{tr} - N_o] + \frac{1}{\tau_p} \quad (6)$$

ve

$$B_o = \frac{\beta \Gamma}{\tau_n} + \Gamma A P_o [1 - \hat{\epsilon} P_o] \quad (7)$$

şeklinde tanımlanmıştır. $p_1(t)$ için doğrusal diferansiyel denklem:

$$\frac{d^2 p_1(t)}{dt^2} + D_1 \frac{dp_1(t)}{dt} + D_o p_1(t) = \frac{B_o}{q} i(t) \quad (8)$$

şeklinde düzenlenir. Burada geçen D_1 ve D_o sabitleri ise:

$$D_1 = \Gamma A [1 - 2\hat{\epsilon} P_o] [N_{tr} - N_o] + \Gamma A P_o [1 - \hat{\epsilon} P_o] + \frac{1}{\tau_p} + \frac{1}{\tau_n} \\ D_o = \frac{(\beta \Gamma - 1)}{\tau_n} \Gamma A [1 - 2\hat{\epsilon} P_o] [N_{tr} - N_o] + \frac{\Gamma A}{\tau_p} [1 - \hat{\epsilon} P_o] P_o + \frac{1}{\tau_p \tau_n} \quad (9)$$

olarak tanımlanmıştır. Eşitlik (9) un iki tarafının Laplace dönüşümü yapılırsa

$$P_1(s) = H_1(s) I(s) \quad (10)$$

elde edilir. Burada ise $s = \sigma + j\omega$ ve

$$H_1(s) = \frac{B_o}{q} \frac{1}{s^2 + D_1s + D_o} \quad (11)$$

şeklinde elde edilir. Foton değişimi $H_1(s)$, zamanla değişmeyen sistem transfer fonksiyonunun $p_1(t) = H_1[i(t)]$ giriş akımına bağlı olarak $H_1[i(t)]$ operatörüne bağımlı şekilde tanımlanır. Sistem transfer fonksiyonunun $H_1(s)$ genliği giriş akımına bağımlıdır.

3. FREKANS CEVABI (FREQUENCY RESPONSE)

Birinci derece operatörden elde edilen transfer fonksiyonunun sinüzoidal tepkisi

$$Z_1(j\omega) = \frac{H_1(j\omega)}{1 + H_1(j\omega)G_1(j\omega)} = \frac{B_o/q}{(j\omega)^2 + D_1(j\omega) + D_o + \frac{gB_o}{q} e^{-j\omega t_o}} \quad (12)$$

$$g = (qD_1K)/(B_o t_o) \quad (13)$$

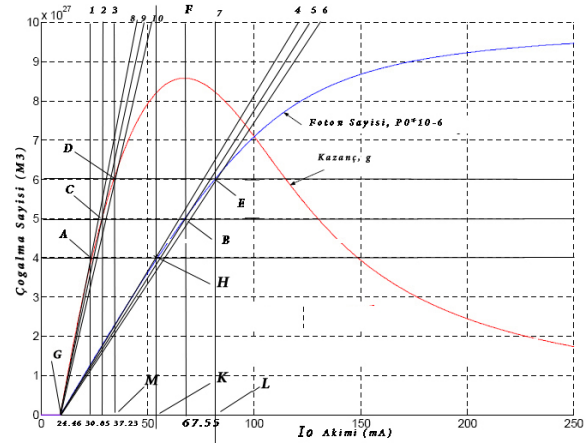
şeklinde geçmektedir. Eşitlikte geçen $G_1(j\omega)$ geri besleme transfer fonksiyonunu temsil eder. Diğer sabit K değeri geri besleme katsayısı olarak şekilde tanımlanmıştır [1]. Eşitliğin normalize edilmiş değeri için,

$$z_1(j\omega_n) = \frac{B_o t_o^2/q}{(j\omega)^2 + D_1 t_o(j\omega) + D_o t_o^2 + \frac{(qD_1K/B_o t_o)B_o t_o^2}{q} e^{-j\omega t_o}} \quad (14)$$

şeklinde düzenlenir. Eşitliklerde geçen N_o ve P_o , sıfır derece çözümden elde edilir. Bu ifade birinci derece çekirdeğin çıkış foton sayısı için frekans düzleminde elde edilen küçük işaret transfer fonksiyonudur [1]. Şekil.1.de kazanç (g) metreküp olarak gösterilmektedir. Çıkış optik foton sayısı veya optik çıkış gücü P_o ise karşılık gelen foton sayısını vermektedir.

Şekilde kazancın (g) ve optik çıkış gücünün (P_o) doğrusal bölgesini bulmak için üç eğri varsayımı yapılmıştır. Bu eğrilerden elde edilen geometrik şekillerden gerekli hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Foton sayısının elde edilmesinde E, B ve H noktaları, foton çoğalması eğrisinin yön değiştirdiği ve kazanç sayısının elde edilmesinde A, C ve D noktaları seçilmiştir. Foton çoğalması noktaları içinde, B noktası optik çıkış gücünün maksimumuna ulaştıktan sonra doyuma başladığı noktaya karşılık gelmektedir. Bir diğer kritik sayılabilecek nokta ise 100 mA karşılık gelen ve g ile p_o eğrisinin kesiştiği noktadır.

\hat{E} GEL üçgenindeki ortalama değerler için $\hat{E} = 32.12$



Şekil.1. Kazanç -foton çoğalması eğrisi. (Gain- Photon population curve)

ve $\hat{G} = 57.99 \approx 58$ derece ve \hat{G}_{DM} üçgeninden $\hat{D} = 16.35$ ve $\hat{G} = 73.65$ derece olarak hesaplanmıştır. Aynı açının en büyük değeri ise $\hat{G} = 79.91$ derece olarak belirlenmiştir. Ayrıca kazanç ve foton sayısı arasındaki açı ise yaklaşık 15.65 derece olarak bulunmuştur. Buna karşılık çizilen 1,2,3,4,5,6,7,8,9 ve 10 numaralı eğrilerden yapılan hesaplamayla $\Delta = \mp 3.13$ derecelik fark görülmüştür. Kazanç ve foton eğrileri arasında olabilecek en büyük açı ise yaklaşık 21.91 derece ve en küçük açı değeri ise yaklaşık 12.52 derece olarak hesaplanmıştır. Kazancın en büyük olduğu değer ise $4.89I_{th}$ akımına karşılık gelmektedir. En iyi doğrusallığın elde edildiği A noktasına karşılık gelen akım değeri 24.46 mA ($1.772I_{th}$), C noktasına karşılık gelen akım değeri 30.65 mA ($2.21I_{th}$) ve D noktasına (en büyük değer) karşılık gelen akım değeri 37.23 mA ($2.717I_{th}$) olarak hesaplanmıştır. Asimetrik haberleşme için kullanılacak akım değeri 54.51 mA (şekildeki 10 numaralı doğru) karşılığı ise $3.84I_{th}$ oranındadır. Kazancın artması için olabilecek en büyük akım değeri ise $4.89I_{th}$ akımıdır. Bu akımdan sonra kazanç azalmakta ve akımın artırılmasıyla doyum noktasına ulaşılabilecektir. Bu durumda ise optik çıkış gücü sıfır olacaktır. Bu nedenle besleme akımı olarak en fazla $4.89 * I_{th}$ verilmelidir. Bu akım değeri optik çıkış gücünü en yüksek seviyeye getirmektedir. Bu akımdan sonra kazanç azalacak ve dolayısıyla foton sayısı da azalacaktır.

Parçalı doğrusal yaklaşımla elde edilen akım ve güç oranlarının değişimleri:

1. $24.46 \text{ mA} - 37.23 \text{ mA}$ arası akım oranı %52.20, güç %86.77 olup, 2.219 dB değişime karşılık gelmektedir.
2. $37.23 \text{ mA} - 54.51 \text{ mA}$ arası akım oranı %46.38, güç %76.99 olup, 2.20193 dB değişime karşılık gelmektedir.

3. 54.51 mA - 67.55 mA arası akım artış oranı %23.92, güç %25.01 olup, 0.170dB değişime karşılık gelmektedir.
4. 24.46 mA - 54.51 mA arası akım oranı %122.85, güç %230.57 olup, 2.71dB değişime karşılık gelmektedir.
5. 24.46 mA - 67.55 mA arası akım oranı %176.16, güç %313.22 olup, 2.2797dB değişime karşılık gelmektedir.
6. 37.23 mA - 67.55 mA arası akım oranı %81.43, güç %121.23 olup, 1.7260 dB değişime karşılık gelmektedir.

4. SONUÇ VE TARTIŞMA (CONCLUSION AND DISCUSSION)

Bu çalışmada kazanç ve foton artışı arasındaki ilişki ve çıkış gücünün doğrusal olarak çıkabileceği maksimum akım durumu belirlenmiştir. Bu şartlar altında elde edilen sonuçlar:

1. En iyi doğrusal bölge AG doğrusuna ($1.772I_{th}$ oranına) denk gelen akım değeridir.
2. Orta derece doğrusal bölge CG doğrusuna ($2.21I_{th}$ oranına) denk gelen akım değeridir.
3. En çok hatalı doğrusal bölge DG doğrusuna ($2.717I_{th}$ oranına) denk gelen akım değeridir.
4. Asimetrik haberleşme için ise K noktasına karşılık gelen $3.84I_{th}$ akım değerinin uygun olduğu bulunmuştur. Bu bölgenin akım değeri ve optik çıkış gücü diğer noktalardan yüksektir. Asimetrik fiber optik haberleşme sistemleri için doğrusal olmayan bölge seçilmelidir. Bu şartlar için ise K noktasına karşılık gelen 54.5 mA akım değeri uygundur. Bu bölgenin optik çıkış gücü ve akım değeri yüksek ve doğrusal olmayan durumu diğer seçilen bölgelerden daha fazladır.
5. Kazancı artırmak için maksimum akım değeri ($67.55mA$) ise $4.89I_{th}$ oranıdır. Bu akım değeri yalnızca lazer diyotun çıkışında niteliği çok önemli olmayan optik çıkış gücü alınacağı zaman kullanılabilir. Bu şartlar dışında özellikle doğrusal fiber optik haberleşme sistemleri için uygun değildir.

Bu çalışmada bulduğumuz I_{th} oran değerleri Petermann [33], Yariv [34] ve Agrawal [35-36] gibi kaynaklar ile uyumlu sonuç göstermektedir. Özellikle optik haberleşmede kullanılan tek modlu lazer diyotlar için $5I_{th}$ oranından büyük değere rastlanmamıştır.

Bu analizde en iyi çalışma durumunun $2.21I_{th}$ oranına karşılık gelen bölge olduğu görülmüştür. Çünkü az doğrusal olmayan durum (% 0.1 dB) önceki bölgeden fazla ama buna karşılık ise optik çıkış gücü yüksektir. Kazanç artışının eğimiyle, foton

çoğalmasının dp_o/dI_o eğimi doğrudan ilişkilidir. Eğer bu değişim hızı belli aralıklarda çok hızlı olursa, veya lazer diyot eşik değerini aştıktan sonra teorik olarak kazancın I_o akımıyla yapmış olduğu açı $\sin \alpha = 1$ olması durumunda optik çıkış gücü tamamıyla doğrusal olur. Ancak pratik olarak $\sin \alpha = 1$ olması hiç bir zaman mümkün değildir. Bunun sonucu olarak da I_o değerinin her durumu için optik çıkış gücünün her zaman oransal ve doğrusal olması da beklenemez.

Doğrusal bölgede lazer diyotumuzu doğrusal optik haberleşme sistemleri için kullanabiliriz. Bu aralık bizim çalışmamızda LD eşik durumunu geçtikten sonra $1.772I_{th}$ 'ye karşılık gelen doğrudur. Yine bulduğumuz bir başka oran ise kazanç ve foton çoğalması arasındaki basit oranlar 4/1.2, 5/1.65, 6/2.2, 8/4 ve 8.6/5 (Şekil 1.) dir. Bu oranlara karşılık gelen "ln" logaritmaları 1.20, 1.10, 1.000, 0.693 ve 0.542'dir. Kazanç eğrisinin genel şekli üstel eğri tipindedir. Bu nedenle kazanç eğrisindeki doğrusallaşmanın var sayıldığı alanlarda logaritmik değerler düzenli aralıklarda azalmaktadır. Ancak en büyük akıma karşılık gelen durumda bu değer 0.542'ye düşmektedir. Buna karşılık kazanç ve foton çoğalması arasında ise A, C ve D dar açılara karşılık gelen foton çoğalması yaklaşık kazanç dar açılarının iki katıdır. Eşik akımı oranı $2.717I_{th}$ Napierian logaritması "1" değerine karşılık gelmektedir. Bu nedenle en hızlı değişim birinci aralıkta olmakta olup en iyi aralıkta burasıdır. Olabilecek en büyük I_o akımına karşılık gelen doğrusal sayılabilecek optik çıkış gücünün "1" değerini aşmayacak durumda seçilmelidir. Bu değeri aştıktan sonra optik çıkış gücündeki doğrusal olmayan durum nedeniyle özellikle IMD3 frekans bileşenleri arasında genlik farkı telafi edilemeyecek kadar büyük olur. Eğer asimetrik haberleşme isteniyorsa o zaman doğrusal olmayan bölgeleri kullanmak uygundur.

Napierian logaritması "0.542" değerine karşılık gelen değer ise doyuma ulaşılan nokta olup en büyük kazanç değerini sağlamaktadır. Bu durumu kazanç eğrisinden de görmek mümkündür. Kazanç $4.89I_{th}$ akım oranından sonra kazançta azalma olmaktadır. Buna karşılık optik çıkış gücünde de azalma beklenmelidir ve I_o akımı artırılmaya devam edildikçe LD doyuma gitmektedir. Dolayısıyla foton çoğalmasında azalma beklenmelidir. Burada yapılan hata ise kullanılan LD oran eşitliklerinde doyum değişkenleri gürültü ve sıcaklığa bağlı ifadeleri içermemektedir. Bunun sonucu olarak da doyum, gürültü ve sıcaklığın değişmesiyle ilgili değişimler doğrudan değil dolaylı olarak çıkarım yapılarak görülmektedir. Dolayısıyla kullanılan oran eşitliklerinin bazı analizler için de yetersiz olduğunu göstermektedir. Buna benzer bir durumu, aynı lazer

diyot oran eşitliklerini kullanarak, I_o akımı 1238 mA. değerini aştıktan sonra denklemlerin çözümsüz hale geldiğinde görmekte mümkündür [1].

Bu makalede kullanılan geometrik yaklaşım lazer diyottan alınabilecek maksimum doğrusal optik çıkış gücünün ve kısmen de doğrusal sayılabilecek en büyük besleme akımının hesaplanmasına yardımcı olacaktır. Özellikle bu yaklaşım çok girişli IMD3 uygulamaları için yapılan doğrusallaştırma çalışmalarına katkı sağlayacaktır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Schetzen, M., Yıldırım, R. "System theory of the single-mode laser-diode" **Opt. Commun.**, 219 pp341-350., 2003.
- Yıldırım, R., Schetzen, M. "Application of the Single-mode Laser Diode System Theory" **Opt. Commun.**, 219 pp351-355., 2003.
- Aydın, E and Yıldırım, R "Optimizing the Performance of Single-mode Laser Diode System Using Genetic Algorithm" **Optics and Laser in Eng.**42 July pp41-46., 2004.
- Çelebi, F.V., Yıldırım, R., "Distortion System Theory of The Two Tone Small Signal Input Laser Diode" **J. Fac. Eng. Arch. Gazi Univ.** Vol 20, No 3, pp373-377., 2005.
- Yıldırım, R., "Intermodulation Distortion System Theory of the Three-Tone Small Signal Input Laser Diode with Non-Linear Optoelectronic Feedback" **J. Fac. Eng. Arch. Gazi Univ.** Vol 22, No 2, pp417-430, 2007.
- Schetzen, M., Yıldırım, R., Çelebi, F.V. "Intermodulation distortion of the single-mode laser-diode" *Appl Phys B, Lasers and Optics*, Vol. 93, Issue: 4 pp837-847., 2008.
- Loiko, N.A. and Samson, A.M., "Possible Regimes of Generation of a Semiconductor Laser with a Delayed Optoelectronic Feedback" **Optics Comm.** Vol. 93 pp 66- 72 Sept. 1992.
- Abarbanel, H.D.I., Kennel, M.B., Illing, I., Chen, H., Fand J.M. Liu., "Synchronization and Communication Using Semiconductor Lasers with Optoelectronic Feedback" **IEEE J.QE.** Vol:37, pp 1301- 1311, Oct. 2001.
- Tabatabai, Farbot., and Al-Raweshidy, Hamed S., "Feedforward Linearization Technique for Reducing Nonlinearity in Semiconductor Optical Amplifier" **J. Lightwave Tech.**, Vol. 25, No. 9, September 2007.
- Lee, Sang-Hoon., Kang, Jeung-Mo., Choi, In-Hyuk., and Han, Sang-Kook., "Linearization of DFB Laser Diode by External Light-Injected Cross-Gain Modulation for Radio-Over-Fiber Link", **IEEE Photon. Technol. Lett.**, Vol.18, No.14, July 15 pp1545, 2006.
- Lim Won-ki Sung, Sang-hoon Lee duk-gyu., Lim, Hae-jin And Han, Sang-kook., "Feedback harmonic injection technique for reduction of Third intermodulation distortion in radio-over-fiber Link" **Microwave and Optical Tech. Letters** Vol. 48, No. 10, October doi 10.1002 mop, 2006.
- Choi, In-hyuk., Lee, Sang-hoon., Kwon, Hyuk-Choon., Choi, Young-wan and Han, Sang-kook "Compensation of Intermodulation distortion of Laser diode by using Optoelectronically Predistorted signals" **Microwave And Optical Technology Letters** Vol. 48, No. 6, June 2006.
- Iiyama, Koichi., Okamoto, Takuya. and Takamiya, Saburo., "Linearizing Optical Frequency Sweep of a Laser Diode by Injection Current Modulation with a Rectangular-Signal-Superimposed Triangular Signal for FMCW Reflectometry" **Electronics and Communications in Japan**, Part 2, Vol. 81, No. 10, 1998 Translated from Denshi Joho Tsushin Gakkai Ronbunshi, Vol. J81-C-I, No. 2, February, pp 74-80, 1998.
- Hong M.K, Han S.K., "All optical linearization technique of DFB-LD based on optical injection locking for RF system " **Microwave And Opt,cal Technology Letters** Vol. 49 Issue: 10 Pages:2403-2406, Oct, 2007.
- Hsu, D. Z., Lee, S., Gong, L. P. M., Lin, Y. M. S. W. Lee, and M. C. Yuang., "High-efficiency wide-band SOA-based wavelength converters by using dual-pumped four-wave mixing and an assist beam" **IEEE Photon. Technol. Lett.**, Vol. 16, No. 8, pp. 1903–1905, Aug. 2004.
- Roselli, L., Borgioni, V., Zepparelli, F., Ambrosi, F., Comez, M., Faccin, P. and Casini, A. "Analog laser predistortion for multiservice radio-over fiber systems" **J. Lightwave Tech.**, Vol. 21, No. 5, pp. 1211–1223, May 2003.
- Kenington, P. B. **High-Linearity RF Amplifier Design**, Norwood, MA, Artech House, 2000.
- Tanaka, S. Taguchi, N., Kimura, T. and Atsumi, Y., "A predistortion type equi-path linearizer designed for radio-on-fiber system" **IEEE Trans. Microw. Theory Tech.**, Vol.54, No.2, pp 938–944, Feb. 2006.
- Çoskun, A. H. and Demir, S., "A mathematical characterization and analysis of a feedforward circuit for CDMA applications" **IEEE Trans. Microw. Theory Tech.**, Vol. 51, No. 3, pp767–777, Mar. 2003.
- Lau, K. Y. and Yariv, A., "Intermodulation distortion in a directly modulated semiconductor injection laser" **Appl. Phys. Lett.**, Vol. 45, No.10, pp1034–1036, Nov. 1984.
- Jung, H. D. and Han, S. K. "Nonlinear distortion suppression in directly modulated DFB-LD by dual-parallel modulation" **IEEE Photon. Technol. Lett.**, Vol. 14, No. 7, pp 980–982, Jul. 2002.
- Jeon, D. H., Jung, H. D. and Han, S. K. "Mitigation of dispersion-induced effects using SOA in analog optical transmission" **IEEE**

- Photon. Technol. Lett.**, Vol. 14, No.8, pp 1166–1168, Aug. 2002.
23. Ismail, T. Liu, C. P., Mitchell, J. E. and Seeds, A. J. “Interchannel distortion suppression for broadband wireless over fibre transmission using feed-forward linearized DFB laser” **IEEE Int. Topical Meeting Microwave Photonics**, Vol. TE-2, pp. 229–232, 2004.
 24. Lidgard, A. and Olsson, N. A., “Generation and cancellation of second order harmonic distortion in analog optical systems by interferometric FM-AM conversion” **IEEE Photon. Technol. Lett.**, Vol. 2, No. 7, pp. 519–521, Jul. 1990.
 25. Meng, X. J., Chau, T. and Wu, M. C., “Improved intrinsic dynamic distortions in directly modulated semiconductor lasers by optical injection locking,” **IEEE Trans. Microw. Theory Tech.**, Vol.47, No. 7, pp 1172–1176, Jul. 1999.
 26. Tang, P.K., Ong, L.C., Luo, B., Alphones, A. and Fujise, M. ”Transmission of multiple wireless standards over a radio-over-fiber network” **IEEE MTT-S Digest 3**, 2051–2054, 2004.
 27. Lee, S.H., Kang, S.H., Won, J.M., Kwon, Y.Y., H.C and Han, S.K., “Linearization of RF optical source by using light-injected gain modulation” **Int Topical Meeting on Microwave Photonics TP-37** 265–268. 2005.
 28. Aitchison, C.S., Mbabele, C.S., Moazzam, Budimir, M., M.R.D. and F, Ali, ”Improvement of third-order intermodulation product of RF and microwave amplifiers by injection” **IEEE Trans Microwave Theory Tech** 49, pp1148–1154. 2001.
 29. Fan, C.W, and Cheng, K-K.M. “Theoretical and experimental study of amplifier linearization based on harmonic and baseband signal injection technique” **IEEE Trans. Microwave Theory Tech.** 50, pp1801–1806, 2002.
 30. Yıldırım, R., “Selection of Frequency Components For Symmetric And Asymmetric Communication Systems ” **J. Fac. Eng. Arch. Gazi Univ.** Vol 23, No 2, pp 329-341, 2008
 31. Hassine, L. et al., “Volterra Functional Series Expansions for Semiconductor Lasers Under Modulation” **IEEE J.QE**, Vol 30, No 4, pp. 918-928, April 1994.
 32. Schetzen, M., **The Volterra and Wiener Theories of Nonlinear Systems**, R.E. Krieger Publishing Co., reprint edition with additional material, Malabar, Fla., 1989.
 33. Petermann, K., **Laser Diode Modulation and Noise**, Kluwer Academic Pub. Boston, 1988
 34. Yariv, A., **Optical Electronics in Modern Communications**, Fifth Ed. Oxford Uni. Press. New York 1997.
 35. Agrawal, G.P. and N.K. Dutta, N.K., **Long-Wavelength Semiconductor Lasers**, Van Nostrand Reinhold, New York, 1986.
 36. Agrawal, G.P. and Dutta, N.K., **Semiconductor Lasers**, Second Ed. Van Nostrand Reinhold, New York, 1993.