

SİMETRİK VE ASİMETRİK HABERLEŞME SİSTEMLERİ İÇİN FREKANS BİLEŞENLERİ SEÇİMİ

Remzi YILDIRIM

Bilgisayar Bölümü, End. San. Eğt. Fak., Gazi Üni., 06500, Ankara
remzi@gazi.edu.tr

(Geliş/Received: 13.07.2007; Kabul/Accepted: 23.01.2008)

ÖZET

Bu çalışmada doğrusal olmayan optoelektronik geribeslemeli lazer diyot sistemi için Volterra güç seri açılımı kullanılarak üç ton küçük işaret girişli sistemin distorsiyon analizi yapılmıştır. Simetrik ve asimetrik haberleşme sistemlerinde kullanılan intermodülasyon distorsiyon (IMD) üçüncü grup (IMD3) frekans bileşenleri seçilmiştir. Bunlar sırasıyla 1. $(\omega_3 + 2\omega_2)$, 2. $(\omega_3 - 2\omega_2)$, 3. $(-2\omega_2 - \omega_1)$, 4. $(\omega_3 - 2\omega_1)$, 5. $(2\omega_3 + \omega_2)$, $(2\omega_3 - \omega_2)$, 6. $(2\omega_1 + \omega_3)$, 7. $(2\omega_1 + \omega_2)$, $(2\omega_1 - \omega_2)$, 8. $(2\omega_3 + \omega_1)$, $(-2\omega_3 + \omega_1)$, 9. $(2\omega_2 + \omega_1)$ frekans bileşenleridir. Bu frekans bileşenlerinin genliklerinin hesaplanmasında sistem yaklaşımı kullanılarak, lazer diyot oran eşitliklerinin seri açılımı yapılmış ve IMD3 frekans bileşenlerinin genlikleri geri besleme sabiti (K) ve zaman gecikmesi (t_o)'a bağlı olarak elde edilmiştir. Analiz sonucunda IMD3 frekans bileşenleri arasında simetrik ve asimetrik genlik durumunun paralel olmayan şekilde değiştiği görülmüştür. Sonuç olarak, Simetrik ve asimetrik alt-taşıyıcı hatlar (Asymmetric Subcarrier Line, ASL) ve asimetrik haberleşme sistemleri için IMD3 frekans bileşenleri seçimi önerilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Lazer diyot, Volterra serisi, intermodülasyon, harmonik distorsiyon, doğrusal olmayan distorsiyon, optoelektronik geribesleme, elektronik geribesleme, kenarband asimetrisi, doğrusal olmayan geribesleme, asimetrik haberleşme.

SELECTION OF FREQUENCY COMPONENTS FOR SYMMETRIC AND ASYMMETRIC COMMUNICATION SYSTEMS

ABSTRACT

In this study, distortion analysis is performed for a three tone small signal input non-linear optoelectronic feedback laser diode system by using Volterra power series expansion. The third group (IMD3) intermodulation distortion (IMD) frequency components are selected which is used in symmetric and asymmetric communication systems. These are 1. $(\omega_3 + 2\omega_2)$, 2. $(\omega_3 - 2\omega_2)$, 3. $(-2\omega_2 - \omega_1)$, 4. $(\omega_3 - 2\omega_1)$, 5. $(2\omega_3 + \omega_2)$, $(2\omega_3 - \omega_2)$, 6. $(2\omega_1 + \omega_3)$, 7. $(2\omega_1 + \omega_2)$, $(2\omega_1 - \omega_2)$, 8. $(2\omega_3 + \omega_1)$, $(-2\omega_3 + \omega_1)$, 9. $(2\omega_2 + \omega_1)$ respectively. With the use of system approach for the calculation of the amplitudes of the selected frequency components, the series expansion of the laser diode rate equations is performed and the amplitudes are obtained as a function of the feedback constant (K) and the delay time (t_o). The results of the analysis show that symmetric and asymmetric amplitude situation for the frequency components of IMD3 varies in an unparallel situation. Finally, IMD3 frequency components are proposed for symmetric and asymmetric subcarrier lines (ASL) and asymmetric communication systems.

Keywords: Laser diode, Volterra series, intermodulation, harmonic distortion, non-linear distortion, optoelectronics feedback, electronics feedback, sideband asymmetry, nonlinear distortion, nonlinear optoelectronic feedback, feedback, asymmetric communication.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yarıiletken lazer diyot sayısal ve analog fiber optik haberleşme ve optik ölçme sistemlerinin önemli bir parçasıdır. Fiber optik haberleşme sistemleri içerisinde özellikle kablolu TV, yüksek çözünürlükte elektronik baskı dosyaları, ses ve görüntüden oluşan dosyalar farklı bir özelliğe sahiptir. Bu sistemlerin belirgin özelliği geniş bantlı ATÇ (Alt-taşıyıcı çoğullama, Sub-Carrier Multiplexing, SCM) tekniğini yaygın olarak kullanmasıdır. Alt-taşıyıcılı sistemlerde analog veya sayısal modülasyon yapıldığı gibi adlandırılmaları da genellikle kullanılan modülasyon tekniğine göre olur. Bu tekniklerden bazıları; asimetrik sayısal alt-taşıyıcı hattı (Asymmetric Digital Subcarrier Line, ADSL), sayısal alt-taşıyıcı hattı (Digital Subcarrier Line, DSL), çok yüksek hızlı sayısal alt-taşıyıcı hattı (Very-high speed Digital Subcarrier Line, VDSL), ayırık çok tonlu (Discrete Multitone, DMT), ayırık dalgacık çok-tonlu (Discrete Wavelet Multitone, DWMT) ve dalgaboyu bölmeli çoklamalı (Wavelength Division Multiplexing, WDM), optik kod bölmeli giriş (Optical Code Division Multiple Access, OCDMA), optik zaman bölmeli çoklama (Optical Time Division Multiplexing Access, OTDMA) ve yoğun dalgaboyu bölmeli çoklama (Dense Wavelength Division Multiplexing, DWDM) olarak verilebilir. Ayrıca bu tür çok taşıyıcılı sistemlerin modülasyon türüne göre sayısını artırmak mümkündür. Çoklu taşıyıcılı veya alt-taşıyıcılı modülasyon sistemlerini kullanarak fiber optik haberleşme sisteminin bant genişliği artırılır ve ticari olarak işletimi sürdürülebilir ekonomik büyüklüğe getirilir. Lazer diyotun doğrusal olmayan özelliğinden faydalanılarak bu sistemler için intermodülasyon frekans bileşenleri türetilir. Bu çalışmada özellikle kablolu TV ve ATÇ uygulamalarında kaynak olarak kullanılan, doğrusal olmayan optoelektronik geri beslemeli lazer diyotun, üç ton küçük işaret distorsiyon çıkış analizi yapılmıştır. Analizde pratik uygulamalarda kullanılan IMD3 frekans bileşenleri özellikle seçilmiştir.

Daha önce geliştirilmiş modelin sistem teorisi ve Volterra çekirdeklerinin sistematik ayrıntılı çözümleri [1], harmonik distorsiyon, optimizasyon ve iki-ton giriş analiziyle ilgili ayrıntılı çalışmalar [2-4], üç-ton girişlinin matematiksel modeli ve IMD3 (intermodülasyon üç) analizi [5], bağıl şiddet gürültü modeli [6] daha önceki çalışmalarda detaylı olarak verilmiştir. Bu çalışmada ise daha önce geliştirilen lazer diyot sistemi için sadece IMD3 bileşenlerinin analizi yapılmıştır.

Bugüne kadar lazer diyotlar ile ilgili olarak pek çok çalışma yapılmış olmasına rağmen son yıllarda lazer diyota çeşitli türlerde yapılan geribesleme etkisi ağırlık kazanmıştır. Bu çalışmalar elektronik, optik ve optoelektronik geribeslemeye odaklanmıştır. Bunun dışındaki araştırmaların odaklandığı alanların

başlıcaları; Kaos, distorsiyon, kararlılık, ve lazer diyotun dinamik davranışları sayılabilir [7-17].

Optik ağlar genellikle ana taşıyıcı ağların alt yapısında kullanılırlar ve kullanılan fiberin türüne göre (Raman) terabit/s seviyesinde veri taşıma kapasitesine sahiptirler. Sistemin yüksek hızını sınırlayan önemli faktörlerden biride, sistemde kaynak olarak kullanılan lazer diyottur. Yüksek hızdaki ticari veri ağların tasarımında, analog fiber optik iletim sistemleri basit yapı ve maliyetlerinin ucuz olmasından dolayı önerilir. Bu sistemler de genellikle direk ve harici modülasyon olmak üzere iki tür modülasyon tekniği kullanılır. Bu teknikler altyapı maliyetlerinin ucuz olmasından dolayı ağ altyapısında tavsiye edilmektedir.

2. TEMEL TEK-MOD LAZER DİYOT (THE BASIC SINGLE-MODE LASER-DIODE)

Analizde kullanılan lazer diyot oran eşitliklerini Hassine [18], Tucker [19] ve Olshansky [20] kullanmıştır. Model de kullanılan temel tek modlu lazer diyot oran eşitlikleri:

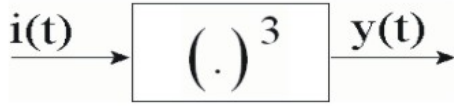
$$\frac{dp(t)}{dt} = \Gamma A [n(t) - N_{tr}] [1 - \hat{\epsilon} p(t)] p(t) - \frac{1}{\tau_p} p(t) + \frac{\beta \Gamma}{\tau_n} n(t) \quad (1)$$

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

şeklinde verilmiştir. Eşitlikte geçen $p(t)$ ve $n(t)$ sırasıyla foton 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} ışımaya noktasındaki taşıyıcı sayısı ($N_{tr} = 10^7$) 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 ışımaya 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. Bu eşitliklerden Volterra çekirdekleri (H_1, H_2, H_3) hesaplanmıştır.

Bu çalışma, daha önceden geliştirilmiş olan [1-2] kazanç ayarlı optoelektronik ve optik harici geribeslemeli lazer diyot sistem çalışmasının bir devamıdır. Bu nedenle Volterra çekirdeklerinin sistem teorisi ile ilgili tek-modlu lazer diyotun ayrıntılı çözümleri [1]'de harmonik distorsiyonu, band genişliği, optimizasyon, bağıl şiddet gürültüsü ve iki ve üç ton girişli sistem analizi ve sonuçları ayrıntılı olarak [2-6] kaynaklarında verilmiştir. Genel üç ton küçük işaret girişi I_g :

$$I(t) = I_1(t) + I_2(t) + I_3(t) \quad (3)$$



Şekil 1. Doğrusal olmayan üçüncü derece sistemin blok yapısı (The Block diagram of the nonlinear third order system)

şekindedir. Burada giriş işaretleri I_1 , I_2 ve I_3 olarak temsil etmektedir. $I_1 = u_1 \cos(\omega_1 t + \delta_1)$ ve $I_2 = u_2 \cos(\omega_2 t + \delta_2)$ ve $I_3 = u_3 \cos(\omega_3 t + \delta_3)$ ifadelerde geçen u_1 , u_2 ve u_3 giriş işaretlerinin genliklerini, ω_1 , ω_2 ve ω_3 frekanslarını, δ_1 , δ_2 ve δ_3 fazlarını temsil etmektedir. Taşıyıcı işareti ise $I_o = u_o \cos(\omega_o t + \delta_o)$ ile temsil edilmektedir. Taşıyıcı işaretinin giriş işaretine eklenmesiyle giriş işaretinin yeni şekli $I_g(t)$ [5], [21] :

$$I_g(t) = u_o \cos(\omega_o t + \delta_o) + u_1 \cos(\omega_1 t + \delta_1) + u_2 \cos(\omega_2 t + \delta_2) + u_3 \cos(\omega_3 t + \delta_3) \quad (4)$$

şeklinde tanımlanır. Burada geçen u_o , ω_o ve δ_o ise işaretin genliğini frekansını ve fazını temsil etmektedir. Lazer diyodun çıkışındaki foton sayısı $P(t)$,

$$\sum P(t) = p_1(t) + p_2(t) + p_3(t) + \dots + p_n(t) \quad (5)$$

$n=1, 2, 3$ şeklinde tanımlanmıştır [1,2].

İfade de geçen $p_1(t)$, $p_2(t)$ ve $p_3(t)$ Volterra 1. 2. ve 3. çekirdeklerinden hesaplanan foton sayısıdır. İfadedeki $p_n(t)$ ise n . derece Volterra çekirdeğinden hesaplanan foton sayısını temsil etmektedir. Çekirdekler ile ilgili ayrıntılı çözüm [1,2] ve kullanılan metodun ayrıntıları kaynak [17] verilmiştir. Şekil 1'de ise üç ton girişli doğrusal olmayan sistemin çıkışında IMD'de kullanılabilir frekans bileşenlerinin genel ifadesi $y(t)$ ile gösterilmiştir:

Şekil 1'deki sistemin girişine uygulanan işarete göre

$y(t)$ çıkışının açık hali eşitlik (6) gibi bulunur [5]. Bu açınımda temel harmonikler ve IMD'de kullanılabilir frekans bileşenleri seçilerek diğer yüksek dereceli üçüncü, dördüncü ve daha yukarı harmonik frekans bileşenleri ihmal edilmiştir. Ayrıca ihmal edilen bu frekans bileşenleri IMD uygulamalarında genel kullanımı kabul görmemektedir. Bu ifadelere ayrıca gerek görülürse faz kaymaları ilave edilebilir ve üssel şekilde düzenlenebilir [21-27].

$$\begin{aligned} y(t) = & \frac{1}{2} H_2 u_1^2 + \frac{1}{2} H_2 u_o^2 + \frac{1}{2} H_2 u_2^2 + \frac{1}{2} H_2 u_3^2 + H_o u_o \cos(\omega_o t) \\ & + H_o u_1 \cos(\omega_1 t) + H_o u_2 \cos(\omega_2 t) + H_o u_3 \cos(\omega_3 t) + H_1 u_o \cos(\omega_o t) \\ & + H_1 u_1 \cos(\omega_1 t) + H_1 u_2 \cos(\omega_2 t) + H_1 u_3 \cos(\omega_3 t) + \frac{1}{2} H_2 u_o^2 \cos(2\omega_o t) \\ & + \frac{1}{2} H_2 u_1^2 \cos(2\omega_1 t) + \frac{3}{2} H_3 u_o^2 u_1 \cos(\omega_1 t) + \frac{1}{4} H_3 u_3^2 \cos(3\omega_2 t) \\ & + \frac{1}{2} H_2 u_2^2 \cos(2\omega_2 t) + \frac{1}{2} H_2 u_3^2 \cos(2\omega_3 t) + \frac{3}{4} H_3 u_o^2 u_2 \cos(\omega_o t) \\ & + \frac{3}{2} H_3 u_o u_1^2 \cos(\omega_o t) + \frac{3}{2} H_3 u_o u_2^2 \cos(\omega_o t) + \frac{3}{2} H_3 u_1^2 u_2 \cos(\omega_2 t) \\ & + \frac{3}{2} H_3 u_3^2 u_1 \cos(\omega_1 t) + \frac{3}{2} H_3 u_2^2 u_3 \cos(\omega_3 t) + \frac{3}{4} H_3 u_1^2 u_3 \cos(\omega_3 t) \\ & + \frac{3}{4} H_3 u_2^2 u_1 \cos(\omega_3 t) + \frac{3}{2} H_3 u_1^2 u_2 \cos(\omega_2 t) + \frac{1}{4} H_3 u_o^2 \cos(3\omega_o t) \\ & + \frac{3}{4} H_3 u_3^3 \cos(\omega_o t) + \frac{1}{4} H_3 u_1^3 \cos(3\omega_1 t) + \frac{3}{4} H_3 u_1^3 u_2 \cos(\omega_1 t) \\ & + \frac{3}{4} H_3 u_2^3 \cos(\omega_2 t) + \frac{1}{4} H_3 u_3^3 \cos(3\omega_3 t) + \frac{3}{4} H_3 u_3^3 \cos(\omega_3 t) \\ & + H_2 u_o u_1 \cos(\omega_o - \omega_1) t + H_2 u_o u_1 \cos(\omega_o + \omega_1) t \\ & + H_2 u_o u_2 \cos(\omega_o - \omega_2) t + H_2 u_o u_2 \cos(\omega_o + \omega_2) t \\ & + H_2 u_o u_3 \cos(\omega_o - \omega_3) t + H_2 u_o u_3 \cos(\omega_o + \omega_3) t \\ & + \frac{3}{4} H_3 u_o^2 u_1 \cos(\omega_1 + 2\omega_o) t + \frac{3}{4} H_3 u_o^2 u_2 \cos(-\omega_2 + 2\omega_o) t \\ & + \frac{3}{4} H_3 u_o^2 u_3 \cos(\omega_3 + 2\omega_o) t + \frac{3}{4} H_3 u_o^2 u_1 \cos(-\omega_3 + 2\omega_o) t \\ & + \frac{3}{4} H_3 u_1^2 u_o \cos(\omega_o - 2\omega_1) t + \frac{3}{4} H_3 u_o u_2^2 \cos(\omega_o + 2\omega_2) t \\ & + \frac{3}{4} H_3 u_3^2 u_o \cos(\omega_o - 2\omega_3) t + \frac{3}{4} H_3 u_o u_3^2 \cos(\omega_o + 2\omega_3) \\ & + \frac{3}{4} H_3 u_1^2 u_2 \cos(-\omega_2 + 2\omega_1) t + \frac{3}{4} H_3 u_2 u_1^2 \cos(\omega_2 + 2\omega_1) t \\ & + \frac{3}{4} H_3 u_1^2 u_3 \cos(-\omega_3 + 2\omega_1) t + \frac{3}{4} H_3 u_3 u_1^2 \cos(\omega_3 + 2\omega_1) t \\ & + \frac{3}{4} H_3 u_2^2 u_1 \cos(\omega_1 - 2\omega_2) t + \frac{3}{4} H_3 u_1 u_2^2 \cos(\omega_1 + 2\omega_2) t \\ & + \frac{3}{4} H_3 u_1 u_3^2 \cos(\omega_1 - 2\omega_3) t + \frac{3}{4} H_3 u_1 u_3^2 \cos(\omega_1 + 2\omega_3) t \\ & + \frac{3}{4} H_3 u_3 u_2^2 \cos(-\omega_1 + 2\omega_2) t + \frac{3}{4} H_3 u_3 u_2^2 \cos(\omega_3 + 2\omega_2) t \\ & + \frac{3}{4} H_3 u_2 u_3^2 \cos(\omega_2 - 2\omega_3) t + \frac{3}{4} H_3 u_2 u_3^2 \cos(\omega_2 + 2\omega_3) t \\ & + \frac{3}{2} H_3 u_1 u_2 u_3 \cos(-\omega_3 + \omega_1 - \omega_2) t + \frac{3}{2} H_3 u_1 u_2 u_3 \cos(\omega_3 + \omega_1 - \omega_2) t \\ & + \frac{3}{2} H_3 u_1 u_2 u_3 \cos(-\omega_1 + \omega_2 + \omega_3) t + \frac{3}{2} H_3 u_1 u_2 u_3 \cos(\omega_1 + \omega_2 + \omega_3) t \\ & + \frac{3}{2} H_3 u_o u_1 u_2 \cos(\omega_2 + \omega_o - \omega_1) t + \frac{3}{2} H_3 u_o u_1 u_2 \cos(\omega_2 + \omega_o - \omega_1) t \\ & + \frac{3}{2} H_3 u_o u_1 u_2 \cos(-\omega_2 + \omega_o + \omega_1) t + \frac{3}{2} H_3 u_o u_1 u_2 \cos(\omega_2 + \omega_o + \omega_1) t \\ & + \frac{3}{2} H_3 u_o u_1 u_3 \cos(-\omega_3 + \omega_o - \omega_1) t + \frac{3}{2} H_3 u_o u_1 u_3 \cos(\omega_3 + \omega_o - \omega_1) t \\ & + \frac{3}{2} H_3 u_o u_1 u_3 \cos(-\omega_3 + \omega_o + \omega_1) t + \frac{3}{2} H_3 u_o u_1 u_3 \cos(\omega_3 + \omega_o + \omega_1) t \\ & + \frac{3}{2} H_3 u_o u_2 u_3 \cos(-\omega_3 + \omega_o - \omega_2) t + \frac{3}{2} H_3 u_o u_2 u_3 \cos(\omega_3 + \omega_o - \omega_2) t \\ & + \frac{3}{2} H_3 u_o u_2 u_3 \cos(-\omega_3 + \omega_o + \omega_2) t + \frac{3}{2} H_3 u_o u_2 u_3 \cos(\omega_3 + \omega_o + \omega_2) \end{aligned} \quad (6)$$

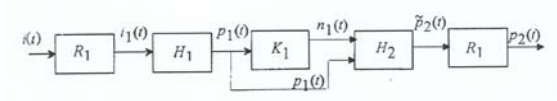
3. BİRİNCİ DERECE VOLTERRA OPERATÖRÜ (THE FIRST-ORDER VOLTERRA OPERATOR)

Birinci derece Volterra operatörünün transfer fonksiyonu kaynak [1]'de verilmiştir. Bu kaynaktan verilen eşitlik;

$$Z_1(j\omega) = \frac{H_1(j\omega)}{1 + H_1(j\omega)G_1(j\omega)} \quad (7)$$

kullanılır. Eşitlikte geçen yerine $s = j\omega$ ile düzlem dönüşümü yapılır ve kaynak [1] deki eşitlik (18) kullanılarak,

$$H_1(s) = \frac{B_o}{q(D_o - \omega^2) + jD_1\omega} \quad (8)$$



Şekil 2. $p_2(t)$ 'nin sistem blok yapısı (The block diagram for the system of $p_2(t)$)

elde edilir. Yine aynı kaynaktaki eşitlik (36b) kullanılarak $s = j\omega$,

$$G_1(j\omega) = g e^{-j\omega t_0} \quad (9)$$

tanımlanmıştır. Sistemin girişine uygulanan akım $i(t)$,

$$i(t) = u_1 \cos(\omega_1 t + \delta_1) + u_2 \cos(\omega_2 t + \delta_2) + u_3 \cos(\omega_3 t + \delta_3) \quad (10)$$

Birinci derece Volterra çekirdeği foton çıkışı ise,

$$p_1 = u_1 |Z_1(j\omega_1) \cos[\omega_1 t + \delta_1 + \angle Z_1(j\omega_1)]| + u_2 |Z_1(j\omega_2) \cos[\omega_2 t + \delta_2 + \angle Z_1(j\omega_2)]| + u_3 |Z_1(j\omega_3) \cos[\omega_3 t + \delta_3 + \angle Z_1(j\omega_3)]| \quad (11)$$

olarak tanımlanmıştır. Giriş akımlarının genlikleri $|Z_1(j\omega_1)|$, $|Z_1(j\omega_2)|$ ve $|Z_1(j\omega_3)|$; açığı $\angle Z_{1,2,3}(j\omega_{1,2,3})$; açılal frekansı ω_1, ω_2 ve ω_3 temsil etmektedir. IMD ile ilgili ayrıntılı bilgiler kaynakta [26] verilmiştir.

4. İKİNCİ DERECE VOLTERRA OPERATÖRÜ (THE SECOND-ORDER VOLTERRA OPERATOR)

İkinci derece Volterra operatörünün blok diyagramı kaynak [1]'deki Şekil 2 ve Şekil 5 birleştirilerek ikinci derece operatör elde edilmiştir ve tüm ayrıntılarıyla Şekil 2'de verilmiştir.

Şekildeki R_1 ve H_1 iki doğrusal sistem olup seri bağlanmıştır ve iki doğrusal sistemin birleşmesinden birleşik transfer fonksiyonu elde edilmiştir. Bunlar;

$$R_1(j\omega) = \frac{1}{1 + H_1(j\omega)G_1(j\omega)} \quad (12)$$

ve

$$R_1(j\omega)H_1(j\omega) = \frac{H_1(j\omega)}{1 + H_1(j\omega)G_1(j\omega)} \quad (13)$$

tanımlanmıştır. Foton çıkışı ise

$$p_1(t) = A_1 \cos(\omega_1 t + \alpha_1) + A_2 \cos(\omega_2 t + \alpha_2) + A_3 \cos(\omega_3 t + \alpha_3) \quad (14)$$

Eşitlikte geçen diğer terimler ise,

$$A_1 = u_1 |Z_1(j\omega_1)| \\ A_2 = u_2 |Z_1(j\omega_2)| \\ A_3 = u_3 |Z_1(j\omega_3)| \quad (15a)$$

$$\alpha_1 = \delta_1 + \angle Z_1(j\omega_1) \\ \alpha_2 = \delta_2 + \angle Z_1(j\omega_2), \\ \alpha_3 = \delta_3 + \angle Z_1(j\omega_3) \quad (15b)$$

Burada geçen $|Z_1(j\omega)|$ genliği ve $\angle Z_1(j\omega)$ ise açısını temsil etmektedir. Taşıyıcı yoğunluğu $n_1(t)$ ise,

$$n_1(t) = B_1 \cos(\omega_1 t + \beta_1) + B_2 \cos(\omega_2 t + \beta_2) + B_3 \cos(\omega_3 t + \beta_3) \quad (16)$$

Eşitlikte geçen doğrusal sistem için [1] $s = j\omega$ dönüşümü yapılarak

$$K_1(j\omega) = \frac{1}{B_0} (B_1 + j\omega) \quad (17)$$

elde edilir. Aşağıdaki terimlerin hesaplanmasında kullanılır. Bunlar:

$$B_1 = A_1 |K_1(j\omega_1)|, \\ B_2 = A_2 |K_1(j\omega_2)|, \\ B_3 = A_3 |K_1(j\omega_3)| \quad (18a)$$

$$\beta_1 = \alpha_1 + \angle K_1(j\omega_1), \\ \beta_2 = \alpha_2 + \angle K_1(j\omega_2), \\ \beta_3 = \alpha_3 + \angle K_1(j\omega_3) \quad (18b)$$

H_2 çekirdeğinin ayrıntılı blok diyagramı Şekil 4.

[1] de verilmiştir. H_2 çıkışının hesaplanmasında ise

is $p_1^2(t)$ ve $n_1(t)p_1(t)$ ihtiyaç vardır. Eşitlik (15)'den,

$$p_1^2(t) = \left[\begin{array}{l} A_1 \cos(\omega_1 t + \alpha_1) \\ + A_2 \cos(\omega_2 t + \alpha_2) \\ + A_3 \cos(\omega_3 t + \alpha_3) \end{array} \right]^2 \quad (18c)$$

$$\begin{aligned}
 p_1^2(t) = & \frac{1}{2}A_2^2 + \frac{1}{2}A_4^2 + \frac{1}{2}A_5^2 + \frac{1}{2}A_6^2 \cos(2\omega_2 t + 2\phi_2) \\
 & + A_2 A_3 \cos((\omega_2 - \omega_3)t + (\phi_2 - \phi_3)) \\
 & + A_2 A_3 \cos((\omega_2 + \omega_3)t + (\phi_2 + \phi_3)) \\
 & + \frac{1}{2}A_3^2 \cos(2\omega_3 t + 2\phi_3) \\
 & + \frac{1}{2}A_4^2 \cos(2\omega_4 t + 2\phi_4) \\
 & + A_4 A_5 \cos((\omega_4 + \omega_5)t + (\phi_4 + \phi_5)) \\
 & + A_4 A_5 \cos((\omega_4 - \omega_5)t + (\phi_4 - \phi_5)) \\
 & + A_4 A_6 \cos((\omega_4 + \omega_6)t + (\phi_4 + \phi_6)) \\
 & + A_4 A_6 \cos((\omega_4 - \omega_6)t + (\phi_4 - \phi_6))
 \end{aligned} \tag{19}$$

ve eşitlik (15, 16) dan ise

$$\begin{aligned}
 n_1(t)p_1(t) = & A_1 \cos(\omega_1 t + \alpha_1) + A_2 \cos(\omega_2 t + \alpha_2) \\
 & + A_3 \cos(\omega_3 t + \alpha_3) B_1 \cos(\omega_1 t + \beta_1) \\
 & + B_2 \cos(\omega_2 t + \beta_2) + B_3 \cos(\omega_3 t + \beta_3)
 \end{aligned} \tag{20}$$

hesaplanır. Bu ifadenin açılımını ise,

$$\begin{aligned}
 n_1(t)p_1(t) = & \frac{1}{2}A_3 B_1 \cos[(\omega_3 + \omega_1)t + (\phi_3 + \beta_1)] \\
 & + \frac{1}{2}A_3 B_1 \cos[-(\omega_3 + \omega_1)t + (-\phi_3 + \beta_1)] \\
 & + \frac{1}{2}A_2 B_1 \cos[-(\omega_2 + \omega_1)t + (-\phi_2 + \beta_1)] \\
 & + \frac{1}{2}A_2 B_1 \cos[(\omega_2 + \omega_1)t + (\phi_2 + \beta_1)] \\
 & + \frac{1}{2}A_2 B_3 \cos[(\omega_2 - \omega_3)t + (\phi_2 - \beta_3)] \\
 & + \frac{1}{2}A_2 B_3 \cos[(\omega_2 + \omega_3)t + (\phi_2 + \beta_3)] \\
 & + \frac{1}{2}A_1 B_1 \cos[(\phi_1 - \beta_1)] \\
 & + \frac{1}{2}A_1 B_1 \cos[(2\omega_1)t + (\phi_1 + \beta_1)] \\
 & + \frac{1}{2}A_2 B_2 \cos[(2\omega_2)t + (\phi_2 + \beta_2)] \\
 & + \frac{1}{2}A_1 B_2 \cos[(\omega_1 + \omega_2)t + (\phi_1 + \beta_2)] \\
 & + \frac{1}{2}A_1 B_2 \cos[(\omega_1 - \omega_2)t + (\phi_1 - \beta_2)] \\
 & + \frac{1}{2}A_2 B_2 \cos[(\phi_2 - \beta_2)] \\
 & + \frac{1}{2}A_1 B_3 \cos[(\omega_1 + \omega_3)t + (\phi_1 + \beta_3)] \\
 & + \frac{1}{2}A_1 B_3 \cos[(\omega_1 - \omega_3)t + (\phi_1 - \beta_3)] \\
 & + \frac{1}{2}A_3 B_2 \cos[-(\omega_3 + \omega_2)t + (-\phi_3 + \beta_2)] \\
 & + \frac{1}{2}A_3 B_2 \cos[(\omega_3 + \omega_2)t + (\phi_3 + \beta_2)] \\
 & + \frac{1}{2}A_3 B_3 \cos[(2\omega_3)t + (\phi_3 + \beta_3)] \\
 & + \frac{1}{2}A_3 B_3 \cos[(\phi_3 - \beta_3)]
 \end{aligned} \tag{21}$$

şeklinde. Şekil 4'den $f_2(t)$ [1],

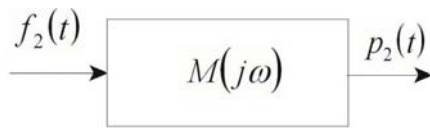
$$\begin{aligned}
 f_2(t) = & \Gamma A [1 - 2\hat{\epsilon}P_o] n_1(t)p_1(t) \\
 & - \Gamma A [N_o - N_{rr}] p_1^2(t)
 \end{aligned} \tag{22}$$

hesaplanır ve $p_1^2(t)$ ve $n_1(t)p_1(t)$ açılımını yerine konularak açılım aşağıdaki gibi elde edilir. Bu açılım,

$$\begin{aligned}
 f_2(t) = & \frac{1}{2} \Gamma A N_{rr} A_3^2 \cos(2\omega_3 t + 2\phi_3) + \Gamma A A_1 B_1 \cos(\phi_1 - \beta_1) \\
 & + \frac{1}{2} \Gamma A N_{rr} A_1^2 \cos(2\omega_1 t + 2\phi_1) \\
 & + \frac{1}{2} \Gamma A A_3 B_1 \cos((\omega_3 + \omega_1)t + (\phi_3 + \beta_1)) \\
 & + \frac{1}{2} \Gamma A A_1 B_2 \cos((\omega_1 - \omega_2)t + (\phi_1 - \beta_2)) \\
 & + \frac{1}{2} \Gamma A A_3 B_2 \cos((\omega_3 + \omega_2)t + (\phi_3 + \beta_2)) \\
 & + \frac{1}{2} \Gamma A A_1 B_1 \cos(2\omega_1 t + \phi_1 + \beta_1) \\
 & + \frac{1}{2} \Gamma A N_{rr} A_2^2 \cos(2\omega_2 t + 2\phi_2) + \\
 & + \frac{1}{2} \Gamma A N_o A_2^2 \cos(2\omega_2 t + 2\phi_2) \\
 & + \frac{1}{2} \Gamma A A_2 B_3 \cos(\omega_2 t + \omega_3 t + \phi_2 + \beta_3) \\
 & + \frac{1}{2} \Gamma A N_{rr} A_1 A_2 \cos(-\omega_1 t - \phi_1 + \omega_2 t + \phi_2) \\
 & + \frac{1}{2} \Gamma A A_3 B_3 \cos(2\omega_3 t + \phi_3 + \beta_3) \\
 & + \frac{1}{2} \Gamma A A_2 B_1 \cos(\omega_2 t + \phi_2 + \omega_1 t + \beta_1) \\
 & - \Gamma A N_o A_1 A_2 \cos(-\omega_1 t - \phi_1 + \omega_2 t + \phi_2) \\
 & + \frac{1}{2} \Gamma A A_1 B_3 \cos(\omega_1 t + \phi_1 + \omega_3 t + \beta_3) \\
 & + \frac{1}{2} \Gamma A A_1 B_2 \cos(\omega_1 t + \phi_1 + \omega_2 t + \beta_2) \\
 & + \frac{1}{2} \Gamma A A_3 B_2 \cos(\omega_3 t + \phi_3 - \omega_2 t - \beta_2) \\
 & + \Gamma A N_{rr} A_1 A_3 \cos(-\omega_1 t - \phi_1 + \omega_3 t + \phi_3) - \\
 & - \frac{1}{2} \Gamma A N_o A_3^2 \cos(2\omega_3 t + 2\phi_3) \\
 & - \frac{1}{2} \Gamma A N_o A_1^2 \cos(2\omega_1 t + 2\phi_1) + \frac{1}{2} \Gamma A N_{rr} A_3^2 \\
 & + \frac{1}{2} \Gamma A N_{rr} A_1^2 + \frac{1}{2} \Gamma A N_{rr} A_2^2 - \frac{1}{2} \Gamma A N_o A_3^2 \\
 & - \frac{1}{2} \Gamma A N_o A_1^2 - \frac{1}{2} \Gamma A N_o A_2^2 \\
 & - \Gamma A N_o A_1 A_3 \cos((\omega_1 + \omega_3)t + (\phi_1 - \phi_3)) \\
 & - \Gamma A N_o A_1 A_2 \cos((\omega_1 + \omega_2)t + (\phi_1 + \phi_2)) \\
 & - \Gamma A N_o A_1 A_3 \cos((\omega_2 + \omega_3)t + (\phi_2 + \phi_3)) \\
 & - \Gamma A N_o A_1 A_3 \cos(-(\omega_2 + \omega_3)t + (-\phi_2 + \phi_3)) \\
 & + \Gamma A N_{rr} A_2 A_3 \cos((\omega_2 + \omega_3)t + (\phi_2 + \phi_3)) \\
 & + \Gamma A N_{rr} A_2 A_3 \cos(-(\omega_2 + \omega_3)t + (-\phi_2 + \phi_3)) \\
 & + \Gamma A N_{rr} A_1 A_2 \cos((\omega_1 + \omega_2)t + (\phi_1 + \phi_2)) \\
 & + \Gamma A N_{rr} A_1 A_3 \cos((\omega_1 + \omega_3)t + (\phi_1 + \phi_3)) \\
 & - \Gamma A \epsilon P_o A_3 B_1 \cos((\omega_3 + \omega_1)t + (\phi_3 + \beta_1)) \\
 & - \Gamma A \epsilon P_o A_2 B_1 \cos((\omega_2 + \omega_1)t + (\phi_2 + \beta_1)) \\
 & - \Gamma A \epsilon P_o A_2 B_3 \cos((\omega_2 t + \omega_3 t) + (\phi_2 + \beta_3)) \\
 & - \Gamma A \epsilon P_o A_1 B_1 \cos(2\omega_1 t + \phi_1 + \beta_1)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -\Gamma A \varepsilon P_o A_2 B_2 \cos((2\omega_2 t) + (\phi_2 + \beta_2)) \\
& -\Gamma A \varepsilon P_o A_1 B_2 \cos((\omega_1 + \omega_2)t + (\phi_1 + \beta_2)) \\
& -\Gamma A \varepsilon P_o A_1 B_3 \cos((\omega_1 + \omega_3)t + (\phi_1 + \beta_3)) \\
& -\Gamma A \varepsilon P_o A_3 B_2 \cos((\omega_3 + \omega_2)t + (\phi_3 + \beta_2)) \\
& -\Gamma A \varepsilon P_o A_3 B_3 \cos((2\omega_3 t) + (\phi_3 + \beta_3)) \\
& + \frac{1}{2} \Gamma A A_2 B_2 \cos((2\omega_2 t) + (\phi_2 + \beta_2)) \\
& -\Gamma A N_o A_1 A_3 \cos((-\omega_1 + \omega_3)t + (-\phi_1 + \phi_3)) \\
& -\Gamma A \varepsilon P_o A_3 B_3 \cos(\phi_3 - \beta_3) \\
& -\Gamma A \varepsilon P_o A_3 B_1 \cos((\omega_3 - \omega_1)t + (\phi_3 - \beta_1)) \\
& -\Gamma A \varepsilon P_o A_2 B_1 \cos((\omega_2 - \omega_1)t + (\phi_2 - \beta_1)) \\
& -\Gamma A \varepsilon P_o A_2 B_3 \cos((\omega_2 - \omega_3)t + (\phi_2 - \beta_3)) \\
& -\Gamma A \varepsilon P_o A_1 B_1 \cos(\phi_1 - \beta_1) \\
& -\Gamma A \varepsilon P_o A_1 B_2 \cos((\omega_1 - \omega_2)t + (\phi_1 - \beta_2)) \\
& -\Gamma A \varepsilon P_o A_2 B_2 \cos(\phi_2 - \beta_2) \\
& -\Gamma A \varepsilon P_o A_1 B_3 \cos((\omega_1 - \omega_3)t + (\phi_1 - \beta_3)) \\
& -\Gamma A \varepsilon P_o A_3 B_2 \cos((\omega_3 - \omega_2)t + (\phi_3 - \beta_2)) \\
& + \frac{1}{2} \Gamma A A_1 B_3 \cos((\omega_1 - \omega_3)t + (\phi_1 - \beta_3)) \\
& + \frac{1}{2} \Gamma A A_3 B_3 \cos(\phi_3 - \beta_3) \\
& + \frac{1}{2} \Gamma A A_3 B_1 \cos((\omega_3 - \omega_1)t + (\phi_3 - \beta_1)) \\
& + \frac{1}{2} \Gamma A A_2 B_1 \cos((\omega_2 - \omega_1)t + (\phi_2 - \beta_1)) \\
& + \frac{1}{2} \Gamma A A_2 B_3 \cos((\omega_2 - \omega_3)t + (\phi_2 - \beta_3)) \\
& + \frac{1}{2} \Gamma A A_2 B_2 \cos(\phi_2 - \beta_2)
\end{aligned} \tag{23}$$

şeklinde bulunmuştur. Sonuç olarak $p_2(t)$ 'nin hesaplanması Şekil 3'de verilen şekilde elde edilir.



Şekil 3. $p_2(t)$ nin hesaplanması için sistem blok yapısı. (The system block diagram for the calculation $p_2(t)$)

Şekil.3. de geçen ifadeler;

$$M(j\omega) = \frac{j\omega - \frac{\beta\Gamma - 1}{\tau_n}}{(D_o - \omega^2) + jD_1\omega} R_1(j\omega) \tag{24}$$

şeklinde ifade edilmiştir [1]. İfade $s = j\omega$ çevirmesi yapılarak

$$M(j\omega) = \left[\frac{j\omega - \frac{\beta\Gamma - 1}{\tau_n}}{(D_o - \omega^2) + jD_1\omega} \right] \left[\frac{D_o - \omega^2 + jD_1\omega}{D_o - \omega^2 + jD_1\omega + \frac{gB_o}{q} e^{j\omega t_o}} \right] \tag{25}$$

sonuç eşitlik elde edilir. Çekirdek çıkışı foton sayısı $p_2(t)$ ise,

$$p_2(t) = f_2(t) M(o) \tag{26}$$

tanımlanmıştır ve eşitlik (25) de $\omega = 0$ konur ve $M(o) = \frac{(1 - \beta\Gamma)}{(D_o q + gB_o)} \frac{q}{\tau_n}$, elde edilir. Bu ifade de

eşitlik (26)'daki yerine konularak $p_2(t)$ elde edilir ve $p_2(t)$ 'nin açık hali aşağıda verilmiştir. Taşıyıcı yoğunluğu ise Şekil 4'deki gibi hesaplanmıştır [1].

$$\begin{aligned}
p_2(t) = M_o & \left(\frac{1}{2} \Gamma A A_2 B_1 \cos((\omega_2 + \omega_1)t + \phi_2 + \beta_1) \right. \\
& - \frac{1}{2} \Gamma A N_o A_1^2 \cos(2\omega_1 t + 2\phi_1) \\
& - \frac{1}{2} \Gamma A N_o A_3^2 \cos(2\omega_3 t + 2\phi_3) \\
& + \frac{1}{2} \Gamma A N_{rr} A_3^2 \cos(2\omega_3 t + 2\phi_3) \\
& - \frac{1}{2} \Gamma A N_o A_2^2 \cos(2\omega_2 t + 2\phi_2) \\
& + \frac{1}{2} \Gamma A A_3 B_3 \cos(2\omega_3 t + \phi_3 + \beta_3) \\
& + \frac{1}{2} \Gamma A A_2 B_3 \cos((\omega_2 - \omega_3)t + \phi_2 - \beta_3) \\
& + \frac{1}{2} \Gamma A A_1 B_2 \cos((\omega_1 + \omega_2)t + \phi_1 + \beta_2) \\
& + \frac{1}{2} \Gamma A N_{rr} A_2^2 \cos(2\omega_2 t + 2\phi_2) \\
& + \frac{1}{2} \Gamma A A_3 B_2 \cos((\omega_3 + \omega_2)t + \phi_3 + \beta_2) \\
& + \frac{1}{2} \Gamma A N_{rr} A_1^2 \cos(2\omega_1 t + \phi_1) + \frac{1}{2} \Gamma A N_{rr} A_1^2 \\
& + \frac{1}{2} \Gamma A N_{rr} A_2^2 - \frac{1}{2} \Gamma A N_o A_3^2 \\
& - \frac{1}{2} \Gamma A N_o A_1^2 - \frac{1}{2} \Gamma A N_o A_2^2 + \frac{1}{2} \Gamma A N_o A_3^2 \\
& - \Gamma A N_o A_1 A_2 \cos((\omega_1 - \omega_2)t + \phi_1 - \phi_2) \\
& - \Gamma A \varepsilon P_o A_2 B_3 \cos((\omega_2 + \omega_3)t + \phi_2 + \beta_2) \\
& - \Gamma A \varepsilon P_o A_2 B_3 \cos((\omega_2 - \omega_3)t + \phi_2 - \beta_3) \\
& - \Gamma A \varepsilon P_o A_2 B_2 \cos(\phi_2 - \beta_2) \\
& \left. - \Gamma A \varepsilon P_o A_1 B_3 \cos((\omega_1 - \omega_3)t + \phi_1 - \beta_3) \right)
\end{aligned}$$

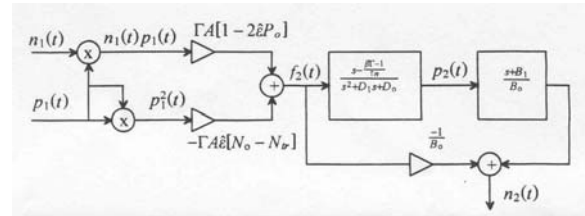
$$\begin{aligned}
 & -\Gamma A \mathcal{P}_o A_1 B_1 \cos(\phi_1 - \beta_1) \\
 & -\Gamma A \mathcal{P}_o A_1 B_2 \cos((\omega_1 - \omega_2)t + \phi_1 - \beta_2) \\
 & -\Gamma A \mathcal{P}_o A_3 B_3 \cos(\phi_3 - \beta_3) \\
 & -\Gamma A \mathcal{N}_o A_2 A_3 \cos((\omega_2 - \omega_3)t + \phi_2 - \phi_3) \\
 & +\Gamma A \mathcal{N}_{ir} A_2 A_3 \cos((\omega_2 - \omega_3)t + \phi_2 - \phi_3) \\
 & -\Gamma A \mathcal{P}_o A_3 B_2 \cos((\omega_3 + \omega_2)t + \phi_3 + \beta_2) \\
 & -\Gamma A \mathcal{P}_o A_3 B_3 \cos((2\omega_3)t + \phi_3 + \beta_2) \\
 & -\Gamma A \mathcal{P}_o A_1 B_2 \cos((\omega_1 + \omega_3)t + \phi_1 + \beta_3) \\
 & -\Gamma A \mathcal{P}_o A_1 B_1 \cos(2\omega_1 t + \phi_1 + \beta_1) \\
 & -\Gamma A \mathcal{P}_o A_2 B_2 \cos((2\omega_2)t + \phi_2 + \beta_2) \\
 & -\Gamma A \mathcal{P}_o A_1 B_2 \cos((\omega_1 + \omega_2)t + \phi_1 + \beta_2) \\
 & -\Gamma A \mathcal{P}_o A_2 B_1 \cos((\omega_2 + \omega_1)t + \phi_2 + \beta_1) \\
 & +\Gamma A \mathcal{N}_{TR} A_1 A_2 \cos((\omega_1 - \omega_2)t + \phi_1 - \phi_2) \\
 & -\Gamma A \mathcal{P}_o A_3 B_1 \cos((\omega_3 + \omega_2)t + \phi_3 + \beta_1) \\
 & -\Gamma A \mathcal{N}_o A_3 A_2 \cos((\omega_1 + \omega_2)t + \phi_1 + \phi_2) \\
 & -\Gamma A \mathcal{N}_o A_2 A_3 \cos((\omega_2 + \omega_3)t + \phi_2 + \phi_3) \\
 & +\Gamma A \mathcal{N}_{ir} A_2 A_3 \cos((\omega_2 + \omega_3)t + \phi_2 + \phi_3) \\
 & +\Gamma A \mathcal{N}_o A_1 A_2 \cos((\omega_1 + \omega_2)t + \phi_1 + \phi_2) \\
 & +\Gamma A \mathcal{N}_{ir} A_1 A_3 \cos((\omega_1 - \omega_3)t + \phi_1 - \phi_3) \\
 & +\Gamma A \mathcal{N}_{ir} A_1 A_3 \cos((\omega_1 + \omega_3)t + \phi_1 + \phi_3) \\
 & -\Gamma A \mathcal{N}_o A_1 A_3 \cos((\omega_1 - \omega_3)t + \phi_1 - \phi_2) \\
 & -\Gamma A \mathcal{N}_o A_1 A_3 \cos((\omega_1 + \omega_3)t + \phi_1 + \phi_3) \\
 & +\frac{1}{2} \Gamma A A_3 B_1 \cos((\omega_3 + \omega_1)t + \phi_3 + \beta_1) \\
 & +\frac{1}{2} \Gamma A A_1 B_1 \cos(\phi_1 - \beta_2) \\
 & +\frac{1}{2} \Gamma A A_3 B_1 \cos(\phi_2 - \beta_2) \\
 & +\frac{1}{2} \Gamma A A_1 B_2 \cos((\omega_1 - \omega_2)t + \phi_1 - \beta_2) \\
 & +\frac{1}{2} \Gamma A A_1 B_3 \cos((\omega_1 - \omega_3)t + \phi_1 - \beta_3) \\
 & +\frac{1}{2} \Gamma A A_3 B_3 \cos(\phi_3 - \beta_3) \\
 & +\frac{1}{2} \Gamma A A_3 B_3 \cos((\omega_2 + \omega_3)t + \phi_2 + \beta_3) \\
 & +\frac{1}{2} \Gamma A A_1 B_1 \cos((2\omega_1)t + \phi_1 + \beta_1) \\
 & +\frac{1}{2} \Gamma A A_1 B_3 \cos((\omega_1 + \omega_3)t + \phi_1 + \beta_3) \\
 & +\frac{1}{2} \Gamma A A_2 B_2 \cos((2\omega_2)t + \phi_2 + \beta_2) \\
 & +\frac{1}{2} \Gamma A A_3 B_1 \cos((\omega_3 - \omega_1)t + \phi_3 - \beta_1) \\
 & +\frac{1}{2} \Gamma A A_2 B_1 \cos((\omega_2 - \omega_1)t + \phi_2 - \beta_1)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & +\frac{1}{2} \Gamma A A_3 B_2 \cos((\omega_3 - \omega_2)t + \phi_3 - \beta_2) \\
 & -\Gamma A \mathcal{P}_o A_3 B_2 \cos((\omega_3 - \omega_2)t + \phi_3 - \beta_2) \\
 & -\Gamma A \mathcal{P}_o A_3 B_1 \cos((\omega_3 - \omega_1)t + \phi_3 - \beta_1) \\
 & -\Gamma A \mathcal{P}_o A_2 B_1 \cos((\omega_2 - \omega_1)t + \phi_2 - \beta_1)
 \end{aligned} \tag{27}$$

açınımı elde edilir [5]. Taşıyıcı yoğunluğu ise;

$$N_2(s) = \frac{1}{B_o} \left[\frac{(s + B_1) \left(s - \frac{(\beta\Gamma - 1)}{\tau_n} \right)}{s^2 + D_1 s + D_o} - 1 \right] F_2(s) \tag{28}$$

şeklinde tanımlanmıştır [1]. İkinci derece çekirdeğin IMD frekans bileşenlerinin bazıları çeşitli teknik nedenlerden dolayı kullanılmamaktadır [23–26].



Şekil 4. $n_2(t)$ nin hesaplanması [1] (Calculation of $n_2(t)$)

5. ÜÇÜNCÜ DERECE VOLTERRA OPERATÖRÜ (THE THIRD-ORDER VOLTERRA OPERATOR)

Üçüncü çekirdeğin taşıyıcı ve foton yoğunluğu ise

$$N_3(s) = \frac{1}{B_o} \left[\frac{(s + B_1) \left(s - \frac{(\beta\Gamma - 1)}{\tau_n} \right)}{s^2 + D_1 s + D_o} - 1 \right] F_3(s) \tag{29}$$

$$P_3(s) = \frac{s - \frac{(\beta\Gamma - 1)}{\tau_n}}{s^2 + D_1 s + D_o} F_3(s) \tag{30}$$

$$Z_3(j\omega) = \left[\frac{j\omega - \frac{\beta\Gamma - 1}{\tau_n}}{(D_o - \omega^2) + jD_1\omega} \right] \left[\frac{D_o - \omega^2 + jD_1\omega}{D_o - \omega^2 + jD_1\omega + \frac{gB_o}{q} e^{j\omega\tau_o}} \right] f_3(j\omega) \tag{31}$$

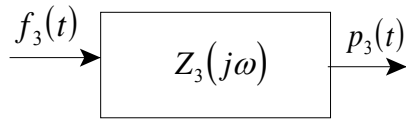
ve eşitlikte geçen $f_3(j\omega)$ 'nin zaman düzlemindeki eşitliği

$$\begin{aligned}
 f_3(t) &= 2\Gamma A \hat{\varepsilon} [N_{tr} - N_o] p_1(t) p_2(t) \\
 &+ \Gamma A [1 - 2\hat{\varepsilon} P_o] n_1(t) p_2(t) \\
 &+ \Gamma A [1 - 2\hat{\varepsilon} P_o] n_2(t) p_1(t) \\
 &- \Gamma A \hat{\varepsilon} n_1(t) p_1^2(t)
 \end{aligned} \tag{32}$$

şeklinde tanımlanmıştır [1]. İfadede geçen $p_1(t)$, $p_2(t)$, $n_1(t)$ ve $n_2(t)$ yukarıda verilmiştir. Üçüncü çekirdek hesaplanması için kaynak [1] deki Şekil 6'daki yöntem kullanılmıştır. Sistemin toplam foton çıkışı ise,

$$\sum p(t) = p_1(t) + p_2(t) + p_3(t) \tag{33}$$

şeklinde tanımlıdır. Şekil 5'de görülen sistemin foton $p_3(t)$ çıkışı;



Şekil 5. Üçüncü çekirdek çıkışı sistem blok yapısı. (Block diagram of the third kernel output)

$$\begin{aligned}
 p_3(t) &= M_1 R_1 \left\{ \left(2\Gamma A \varepsilon (N_{tr} - N_o) \right) \left(\begin{aligned} &A_1 \cos(\omega_1 t + \phi_1) \\ &+ A_2 \cos(\omega_1 t + \phi_1) \end{aligned} \right) \right\} \\
 &\left\{ \begin{aligned} &-M_1 R_1 \Gamma A \varepsilon P_o A_2 B_1 \cos((\omega_2 + \omega_1)t + \phi_2 + \beta_1) \\ &-M_1 R_1 \Gamma A \varepsilon P_o A_2 B_2 \cos(\phi_2 - \beta_2) \\ &+ \frac{1}{2} M_1 R_1 \Gamma A \varepsilon P_o A_2 B_1 \cos((\omega_2 + \omega_1)t + \phi_2 + \beta_1) \\ &+ \frac{1}{2} M_1 R_1 \Gamma A A_2 B_2 \cos(2\omega_2 t + \phi_2 + \beta_2) \\ &-M_1 R_1 \Gamma A \varepsilon P_o A_1 B_2 \cos((\omega_1 + \omega_2)t + \phi_1 + \beta_3) \\ &+ \frac{1}{2} M_1 R_1 \Gamma A N_{tr} A_2^2 \cos(2\omega_2 t + \phi_2 + 2\phi_2) \\ &+ \frac{1}{2} M_1 R_1 \Gamma A N_{tr} A_1^2 \cos(2\omega_1 t + 2\phi_1) \\ &-M_1 R_1 \Gamma A \varepsilon P_o A_2 B_1 \cos((\omega_2 - \omega_1)t + \phi_2 - \beta_1) \\ &+ \frac{1}{2} M_1 R_1 \Gamma A A_2 B_2 \cos(\phi_2 - \beta_2) \\ &+ \frac{1}{2} M_1 R_1 \Gamma A A_1 B_1 \cos(\phi_1 - \beta_1) \\ &+ \frac{1}{2} M_1 R_1 \Gamma A A_2 B_1 \cos((\omega_2 - \omega_1)t + \phi_2 - \beta_1) \\ &-M_1 R_1 \Gamma A \varepsilon P_o A_2 B_2 \cos(2\omega_2 t + \phi_2 + \beta_2) \\ &-M_1 R_1 \Gamma A \varepsilon P_o A_1 B_1 \cos(\phi_1 - \beta_1) \\ &-M_1 R_1 \Gamma A \varepsilon P_o A_1 B_1 \cos(2\omega_1 t + \phi_1 + \beta_1) \\ &-M_1 R_1 \Gamma A \varepsilon P_o A_1 B_2 \cos((\omega_1 - \omega_2)t + \phi_1 - \beta_2) \\ &+ \frac{1}{2} M_1 R_1 \Gamma A A_1 B_2 \cos((\omega_1 - \omega_2)t + \phi_1 - \beta_2) \\ &+ \frac{1}{2} M_1 R_1 \Gamma A A_1 B_1 \cos(2\omega_1 t + \phi_1 + \beta_1) \\ &- \frac{1}{2} M_1 R_1 \Gamma A N_o A_2^2 \cos(2\omega_2 t + 2\phi_2) \\ &+ \frac{1}{2} M_1 R_1 \Gamma A A_1 B_2 \cos(\omega_1 t + \phi_1 + \beta_2) \end{aligned} \right\}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &- \frac{1}{2} M_1 R_1 \Gamma A N_o A_2^2 \cos(2\omega_2 t + 2\phi_1) \\
 &+ M_1 R_1 \Gamma A N_{tr} A_1 A_2 \cos((\omega_1 + \omega_2)t + \phi_1 + \phi_2) \\
 &+ \frac{1}{2} M_1 R_1 \Gamma A N_{tr} A_2^2 + \frac{1}{2} M_1 R_1 \Gamma A N_{tr} A_1^2 \\
 &- \frac{1}{2} M_1 R_1 \Gamma A N_o A_2^2 - \frac{1}{2} M_1 R_1 \Gamma A N_o A_1^2 \\
 &- M_1 R_1 \Gamma A N_o A_1 A_2 \cos((\omega_1 - \omega_2)t + \phi_1 - \phi_2) \\
 &- M_1 R_1 \Gamma A N_o A_1 A_2 \cos((\omega_1 + \omega_2)t + \phi_1 + \phi_2) \\
 &+ M_1 R_1 \Gamma A N_{tr} A_1 A_2 \cos((\omega_1 - \omega_2)t + \phi_1 - \phi_2) \} - \Gamma A (1 - 2\varepsilon P_o) \\
 &(B_1 \cos(\omega_1 t + \beta_1) + B_2 \cos(\omega_2 t + \beta_2)) \\
 &\{ -M_1 R_1 \Gamma A \varepsilon P_o A_2 B_1 \cos((\omega_2 - \omega_1)t + \phi_2 - \beta_1) \\
 &-M_1 R_1 \Gamma A \varepsilon P_o A_2 B_2 \cos(2\omega_2 t - \beta_2) \\
 &- \frac{1}{2} M_1 R_1 \Gamma A A_2 B_1 \cos((\omega_2 + \omega_1)t + \phi_2 + \beta_1) \\
 &+ \frac{1}{2} M_1 R_1 \Gamma A A_2 B_2 \cos(2\omega_2 t + \phi_2 + \beta_2) \\
 &- M_1 R_1 \Gamma A \varepsilon P_o A_1 B_2 \cos((\omega_1 + \omega_2)t + \phi_1 + \beta_2) \\
 &+ \frac{1}{2} M_1 R_1 \Gamma A N_{tr} A_2^2 \cos(2\omega_2 t + 2\phi_2) \\
 &+ \frac{1}{2} M_1 R_1 \Gamma A N_{tr} A_1^2 \cos(2\omega_1 t + 2\phi_1) \\
 &- M_1 R_1 \Gamma A \varepsilon P_o A_2 B_1 \cos((\omega_2 - \omega_1)t + \phi_2 - \beta_1) \\
 &- \frac{1}{2} M_1 R_1 \Gamma A A_2 B_2 \cos(\phi_2 - \beta_2) \\
 &+ \frac{1}{2} M_1 R_1 \Gamma A A_1 B_1 \cos(\phi_1 - \beta_1) \\
 &+ \frac{1}{2} M_1 R_1 \Gamma A A_2 B_1 \cos((\omega_2 - \omega_1)t + \phi_2 - \beta_1) \\
 &- M_1 R_1 \Gamma A \varepsilon P_o A_2 B_2 \cos(2\omega_2 t + \phi_2 + \beta_2) \\
 &- M_1 R_1 \Gamma A \varepsilon P_o A_1 B_1 \cos(\phi_1 - \beta_1) \\
 &- M_1 R_1 \Gamma A \varepsilon P_o A_1 B_1 \cos(2\omega_1 t + \phi_1 + \beta_1) \\
 &- M_1 R_1 \Gamma A \varepsilon P_o A_1 B_2 \cos((\omega_1 - \omega_2)t + \phi_1 - \beta_2) \\
 &+ \frac{1}{2} M_1 R_1 \Gamma A A_1 B_2 \cos((\omega_1 - \omega_2)t + \phi_1 - \beta_2) \\
 &+ \frac{1}{2} M_1 R_1 \Gamma A A_1 B_1 \cos(2\omega_1 t + \phi_1 + \beta_1) \\
 &- \frac{1}{2} M_1 R_1 \Gamma A N_o A_1^2 \cos(2\omega_2 t + 2\phi_2) \\
 &+ \frac{1}{2} M_1 R_1 \Gamma A A_1 B_2 \cos((\omega_1 + \omega_2)t + \phi_1 + \beta_2) \\
 &- \frac{1}{2} M_1 R_1 \Gamma A N_o A_1^2 \cos(2\omega_1 t + 2\phi_1) \\
 &+ \frac{1}{2} M_1 R_1 \Gamma A N_{tr} A_1 A_2 \cos((\omega_1 + \omega_2)t + \phi_1 + \phi_2) \\
 &+ \frac{1}{2} M_1 R_1 \Gamma A N_{tr} A_2^2 + \frac{1}{2} M_1 R_1 \Gamma A N_{tr} A_1^2 \\
 &- \frac{1}{2} M_1 R_1 \Gamma A N_o A_2^2 - \frac{1}{2} M_1 R_1 \Gamma A N_o A_1^2 \\
 &- M_1 R_1 \Gamma A N_o A_1 A_2 \cos((\omega_1 - \omega_2)t + \phi_1 - \phi_2) \\
 &- M_1 R_1 \Gamma A N_o A_1 A_2 \cos((\omega_1 + \omega_2)t + \phi_1 + \phi_2) \\
 &+ M_1 R_1 \Gamma A N_{tr} A_1 A_2 \cos((\omega_1 - \omega_2)t + \phi_1 - \phi_2) \} \\
 &- \Gamma^2 A^2 ((1 - 2\varepsilon P_o)) M_2 R_1 \{ 4\varepsilon P_o A_1 B_1 \sin(2\omega_1 t + \phi_1 + \beta_1) \\
 &+ 4\varepsilon P_o A_2 B_1 \cos((\omega_2 + \omega_1)t + \phi_2 + \beta_1) \\
 &- 2A_2 B_1 \cos((\omega_2 + \omega_1)t + \phi_2 + \beta_1) \\
 &+ 4N_o A_1 A_2 \sin((\omega_1 + \omega_2)t + \phi_1 + \phi_2)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & -4N_{tr}A_1A_2\sin((\omega_1+\omega_2)t+\phi_1+\phi_2) \\
 & -2A_2B_2\cos(2\omega_2t+\phi_2+\beta_2) \\
 & +2N_oA_2^2\cos(2\omega_2t+2\phi_2)\phi_1 \\
 & -2N_{tr}A_2^2\cos(2\omega_2t+2\phi_2) \\
 & -2A_2B_2\cos(2\phi_2-\beta_2)\phi_1 \\
 & -2A_2B_1\cos((\omega_2-\omega_1)t+\phi_2-\beta_1) \\
 & +4N_oA_1A_2\sin((\omega_1-\omega_2)t+\phi_1-\phi_2) \\
 & -4N_{tr}A_1A_2\sin((\omega_1-\omega_2)t+\phi_1-\phi_2) \\
 & +4\epsilon P_oA_2B_2\cos(\phi_2-\beta_2) \\
 & +4\epsilon P_oA_2B_1\cos(2\omega_2t+\phi_2+\beta_2) \\
 & +4\epsilon P_oA_1B_2\sin((\omega_1+\omega_2)t+\phi_1+\beta_2) \\
 & +4\epsilon P_oA_2B_1\cos((\omega_2-\omega_1)t+\phi_2-\beta_2) \\
 & +2N_oA_1^2\phi_1+2N_oA_2^2\phi_1-2N_{tr}A_1^2\phi_1 \\
 & -2N_{tr}A_2^2\phi_1-N_{tr}A_1^2\sin(2\omega_1t+2\phi_1) \\
 & -2A_1B_2\sin((\omega_1-\omega_2)t+\phi_1-\beta_2) \\
 & -2A_1B_2\sin((\omega_1+\omega_2)t+\phi_1+\beta_2) \\
 & -2A_1B_1\sin(2\omega_1t+\phi_1+\beta_1) \\
 & -2A_1B_1\sin(\phi_1-\beta_1) \\
 & +N_oA_1^2\sin(2\omega_1t+2\phi_1) \\
 & +4\epsilon P_oA_1B_2\sin((\omega_1-\omega_2)t+\phi_1-\beta_2) \\
 & +4\epsilon P_oA_1B_1\sin(\phi_1-\beta_1) \\
 & \left. \begin{aligned}
 & \frac{1}{4}(A_1\cos(\omega_1t+\phi_1)+A_2\cos(\omega_2t+\phi_2)) \\
 & -\Gamma A\epsilon(B_1\cos(\omega_1t+\beta_1)+B_2\cos(\omega_2t+\beta_2)) \\
 & \left\{ \frac{1}{2}A_1^2\cos(2\omega_1t+2\phi_1)+\frac{1}{2}A_1^2 \right. \\
 & +A_1A_2\cos((\omega_1-\omega_2)t+\phi_1-\phi_2) \\
 & \left. A_1A_2\cos((\omega_1+\omega_2)t+\phi_1+\phi_2) \right\}^2 \\
 & +\frac{1}{2}A_2^2\cos(2\omega_2t+2\phi_2)+\frac{1}{2}A_2^2 \left. \right\}
 \end{aligned} \right\}
 \end{aligned}$$

(34)

Eşitlikte geçen;

$$M_I = \frac{s - \frac{(\beta-1)}{\tau_n}}{s^2 + sD_1 + D_o} \text{ ve}$$

$$R_1 = \frac{(s^2 + sD_o t_o + D_o t_o^2)q}{s^2 q + sD_o t_o^2 q + gB_o t_o^2 e^{-s}}$$

tanımlıdır ve $S = j\omega$ dir. Bu ifadenin açılımında pek çok değişik frekans bileşenleri bulunmaktadır. Ancak yüksek frekans bileşenli olanlar ve bazıları

çeşitli nedenlerden dolayı IMD uygulamaları için tercih edilmemekte veya kullanılmamaktadır [23-24,26].

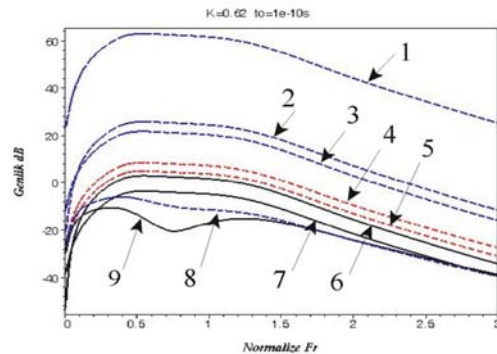
Analiz için intermodülasyon distorsiyon uygulamalarında tercih edilen IMD3 frekans bileşenleri seçilmiştir. Bunlar sırasıyla;

1. $(\omega_3 + 2\omega_2)$, 2. $(\omega_3 - 2\omega_2)$,
3. $(-2\omega_2 - \omega_1)$, 4. $(\omega_3 - 2\omega_1)$,
5. $(2\omega_3 + \omega_2)$, $(2\omega_3 - \omega_2)$, 6. $(2\omega_1 + \omega_3)$,
7. $(2\omega_1 + \omega_2)$, $(2\omega_1 - \omega_2)$,
8. $(2\omega_3 + \omega_1)$, $(-2\omega_3 + \omega_1)$, 9. $(2\omega_2 + \omega_1)$

IMD frekans bileşenleridir. Bu frekans bileşenlerin genliklerinin hesaplanmasında sistem yaklaşımı yapılarak, lazer diyot oran eşitliklerinin üçüncü dereceye kadar seri açılımı yapılmıştır. Ancak yüksek frekans bileşenli olanlar ve bazıları çeşitli nedenlerden dolayı IMD uygulamaları için tercih edilmemekte veya kullanılmamaktadır [21-28]. Mikrodalga uygulamalarında kullanılan ve yapısında InGaAs MESFET ve Si yapılı tranzistörlerin iki ton küçük işaret girişli distorsiyon testlerinde [29-32] ve optoelektronik geribeslemeli lazer diyotta kenar bant asimetrisi gözlemlenmiştir [4]. Kenar bant asimetrisi kullanılarak değişik haberleşme ve modülasyon teknikleri kullanılarak güvenli simetrik ve asimetrik haberleşme sistemleri yapılmaktadır [33].

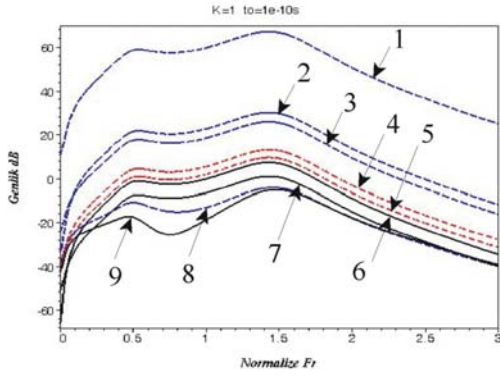
Şekil 6'da görüldüğü gibi genlik değerleri sıfır dB'nin üzerindeki frekans bileşenleri 1,2,3,4,5 ve 6 no.lu eğrilerdir. Diğer bileşenler olan 7,8 ve 9 no.lu eğrilerin genlikleri ise sıfır dB'nin altındadır. Genlik değerlerinin düşük olmasından dolayı tercih edilmeyebilirler. Ancak bu frekans bileşenlerinin kullanılması durumunda genlikleri normalize edilerek kullanılabilirler.

Şekil 7'de ise geribeslemenin $K=1$ değeri için IMD3 genlikleri görülmektedir. IMD3 genlikleri IMD2 genliklerinden [5] belirgin olarak farklılık



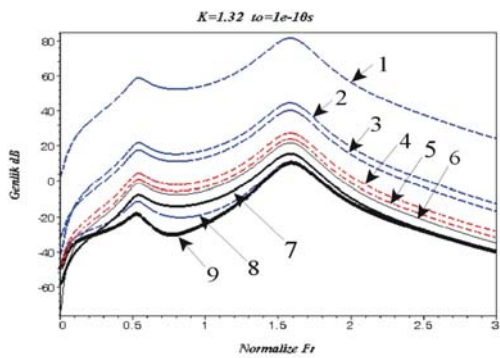
Şekil 6. $K=0.62$ ve $t_0=1e-10$ değerleri için IMD3 frekans bileşenlerinin genliği. (The amplitudes of IMD3 frequency components at $K=0.62$ ve $t_0=1e-10$).

göstermektedir. IMD3 için tercih edilecek frekans bileşen eğrileri 1,2,3,4,5 ve 6 dır. Diğer eğrilerin genlikleri de normalize edilerek kullanılabilir. Bunu gerçekleştirmek için ilave yükselteç kullanılmalı ve sistem içinde normalize elemanlar ilave edilmelidir. Ancak sistemin altyapı maliyeti de dikkate alınmalıdır.



Şekil 7. $K=1$ ve $t_0=1e-10$ değerleri için IMD3 frekans bileşenlerinin genliği. (The amplitudes of IMD3 frequency components at $K=1$ ve $t_0=1e-10$).

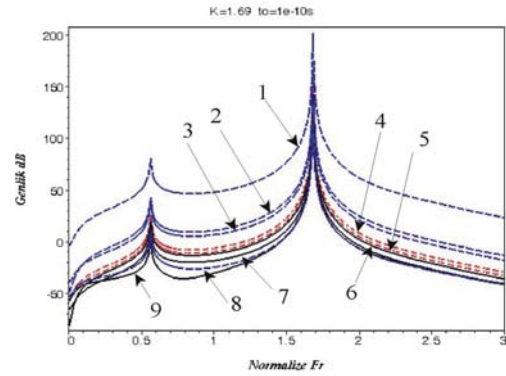
Şekil 8’de ise geribeslemenin $K=1.32$ kararlılık sınır değeri için IMD3 genlikleri görülmektedir. Eğrilerden de görüldüğü gibi 1,2,3,4,5 ve 6 no.lu eğrilere karşılık gelen IMD3 bileşenlerinin genlikleri belirgin olarak artmaktadır ve bütün IMD3 bileşenlerinin genlikleri 0dB’nin üzerindedir. Ancak 1,2 ve 3 no.lu eğriye karşılık gelen IMD3 bileşenlerinin genlikleri diğerlerinden belirgin şekilde yüksektir. Bu nedenle haberleşme için tercih edilecek olan IMD3 frekans bileşenleridir.



Şekil 8. $K=1.32$ ve $t_0=1e-10$ değerleri için IMD3 frekans bileşenlerinin genliği. (The amplitudes of IMD3 frequency components at $K=1.32$ ve $t_0=1e-10$).

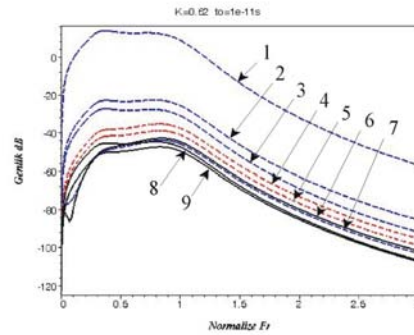
Şekil 9’da ise geribeslemenin $K=1.69$ değeri için IMD3 genlikleri görülmektedir. Dolayısıyla geribesleme değeri sınır değerinden %28 daha büyük olarak seçilmiş ve çok dar-bantlı genliği oldukça yüksek çıkış elde edilmiştir. Öte yandan kararlılık sınır değeri ($K=1.32$) aşıldığı için sistem kararsız

bölgede çalışmaktadır [1]. Bir no.lu eğriye karşılık gelen IMD3 bileşeninin 50dB’lik genlikte oldukça geniş bir banda karşılık geldiği görülmektedir.



Şekil 9. $K=1.69$ ve $t_0=1e-10$ değerleri için IMD3 frekans bileşenlerinin genliği. (The amplitudes of IMD3 frequency components at $K=1.69$ ve $t_0=1e-10$).

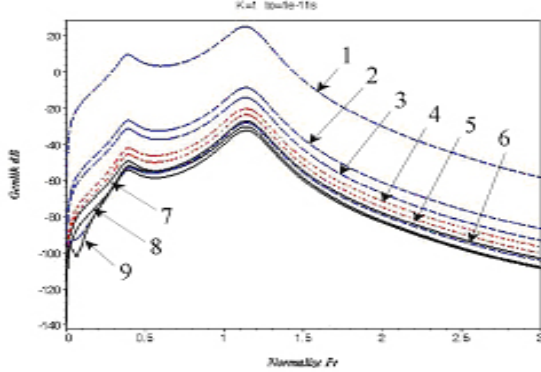
Şekil 10’da ise geribesleme değeri $K=0.62$ için IMD3 genlikleri görülmektedir. Genlik değerleri 1 no.lu eğriye karşılık gelen IMD3 frekans bileşeninin dışında diğer eğrilerin genlikleri -20dB’den küçüktür. Düşük genlikli frekans bileşenleri normalize edildiğinde bant genişlikleri oldukça büyüktür. Bu durumda ise sistem geniş bantlı tasarlanabilir ve bütün frekans bileşenlerini teorik olarak kullanmak mümkün olacaktır. Bu durumda sistemden maksimum bant genişliği elde edilerek daha ekonomik işletim sağlanabilir. Ancak normalize edilecek genlikler için ilave maliyete de ihtiyaç duyulabilir.



Şekil 10. $K=0.62$ ve $t_0=1e-11$ değerleri için IMD3 frekans bileşenlerinin genliği. (The amplitudes of IMD3 frequency components at $K=0.62$ ve $t_0=1e-11$).

Şekil 11’de ise geribesleme değeri $K=1$ için IMD3 genlikleri görülmektedir. IMD3 frekans bileşenlerinin genlikleri 1 no.lu eğriye karşılık gelen bileşen dışında 0dB’nin altındadır. Bu bileşenlerin genliklerinin normalize edilmesine ihtiyaç vardır. Ancak eğrilerin tepe değerleri ve çukurluk arasındaki genlik farkı 22dB dir. Sayısal haberleşme sistemi dikkate alındığında -22dB’lik genlik düşürülmesiyle

maksimum bant genişliğine sahip bir sistem tasarımı yapmak mümkündür. Yine alternatif olarak -3dB'lik bant genişliğine sahip haberleşme sisteminin de tasarımı yapılabilir. Bu durumda ise sistemin bant genişliği azalır ve özel durumlar dışında ekonomik işletme özelliği olmayabilir.



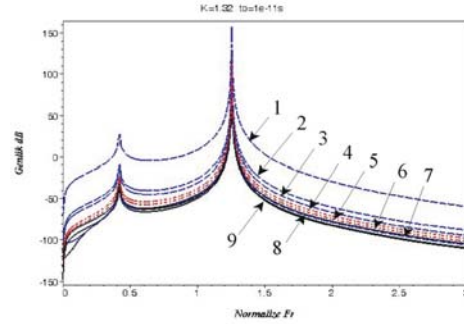
Şekil 11. K=1 ve $t_0=1e-11$ değerleri için IMD3 frekans bileşenlerinin genliği. (The amplitudes of IMD3 frequency components at K=1 ve $t_0=1e-11$).

Normalize frekansın hesaplanması ise $f_n = (\omega_n)/(2\pi f_o)$, $t_o = 1.10^{-11} s$, $\omega_n = 2.03$, $f_n = 3.230^{10} Hz$ 'dir. Zaman gecikmesi $t_o = 1.10^{-11} s$ ve geri besleme değerleri K=0.62 ve K= 1 için IMD3 frekans bileşenleri olan 1 ve 2 no.lu eğriler için genlik farkı 34dB ve 4 ve 6 no.lu eğriler arasındaki genlik farkı ise -8dB'dir. Aynı geri besleme şartlarında zaman gecikmesi $t_o = 1.10^{-10} s$ için ise 1 ve 2 no.lu eğriler arasındaki fark 36dB, 4 ve 6 no.lu eğriler arasındaki fark ise -12dB dir ve normalize frekansın değeri ise $f_n = 3.230^9 Hz$ 'dir.

Şekil 12'de ise geribesleme kararlılık sınır değeri K=1.32 için IMD3'ün genlikleri görülmektedir. IMD3'ün genlikleri maksimum olmakla birlikte bant genişlikleri çok küçüktür. Ancak çok dar bantlı özel amaçlı ve haberleşme sistemleri için kullanılabilir. Uzun fiber optik sistemleri için daha az yükseltec kullanılarak sistem tasarımı yapılabilir.

IMD3 frekans bileşenlerinin genlikleri ve farkları, kazanç sabiti ve zaman gecikmesine bağlı olarak IMD3 frekans bileşenleri arasındaki genlik ilişkisi Tablo 1'de verilmiştir. IMD3 frekans bileşenlerindeki değişimler beş grupta oluşur. Bu ortak özellik gösteren gruplar; (1,2,3), (4,9), (5,6), (7) ve (8) no.lu IMD3 frekans bileşenleridir ve bunlar arasındaki en büyük genlik farkı 5dB dir. Uzun geribesleme yoluna karşılık genlik artarken, bant genişliği daralmaktadır ve diğer yandan ise kısa geribesleme durumunda bant genişliği artarken genlik ise küçülmektedir. Tabloda kazanç sabitinin, zaman gecikmesine karşılık gelen değerlerinin aralarındaki genlik farkı verilmiştir ve yukarıdaki şekillerdeki değişik K ve t_o değerleri arasındaki genlik farklarını göstermektedir. Dar bantlı

sistemin ayrıntıları ise daha önceki yapılmış çalışmalarda [21,24] verilmiştir.



Şekil 12. K=1.32 ve $t_0=1e-11$ değerleri için IMD3 frekans bileşenlerinin genliği. (The amplitudes of IMD3 frequency components at K=1 ve $t_0=1e-11$).

Tablo 1. IMD3 frekans bileşenlerinin genlik değişimleri (The amplitude variation of IMD3 frequency components).

		GENLİK (dB)								
IMD3 Bileşenleri		1	2	3	4	5	6	7	8	9
K=0.62	$t_o = 1.10^{-10} s$	63	26	22	8	6	4	-3	-5	-10
	$t_o = 1.10^{-11} s$	14	-22	-27	-35	-38	-44	-42	-46	-41
K=1	$t_o = 1.10^{-10} s$	68	31	27	14	10	8	2	-3	-4
	$t_o = 1.10^{-11} s$	26	-8	-13	-20	-23	-27	-30	-31	-27
K=0.62	Genlik Farkı	49	48	49	43	44	48	39	41	-31
K=1	Genlik Farkı	42	39	40	34	33	35	32	-28	-23
$t_o = 1.10^{-10} s$	Genlik Farkı	5	5	5	6	4	4	1	2	6
$t_o = 1.10^{-11} s$	Genlik Farkı	12	14	14	15	15	17	12	15	14

6. TARTIŞMA (CONCLUSION)

Lazer diyot çıkışından elde edilen optik işaretin genliğindeki değişimlerin fiziksel nedenleri gözlemlenmiştir. Bu değişimler fiber optik sistem girişine uygulanacak olan optik işaretin doğrudan fiziksel özelliğini temsil eder. Ayrıca fiber optik haberleşme sisteminin verimliliğini ve altyapı maliyetini doğrudan etkiler. Bu nedenle optik giriş işaretinin önemi büyüktür.

Bu yapılan çalışmada optoelektronik geribeslemeli lazer diyot sistemi için, tüm IMD frekans bileşenlerinin kullanılması durumunda, sistemin teorik olarak toplam bant genişliği 354.219GHz olarak bulunmuştur. Bu değer literatür değerleriyle makul kabul edilen bir değerdir. Ancak pratik olarak bazı frekans bileşenleri teknik olarak kullanılmayabilir. Bu durum, uygulamadaki teknik zorluklardan kaynaklanmaktadır. Pratik uygulamalarda simetrik frekans bileşenlerinden genlikleri aynı olandan birisi tercih edilmektedir. Simetrik olmayan fakat aynı genlikteki frekans bileşenlerinin de pratik olarak kullanılması bazı teknik zorluklardan dolayı tercih edilmemektedir. Bunun temel sebebi filtreleme ve güç kaybı

sorunlarından kaynaklanmaktadır. Bu sorunları aşmanın teknik yolu ise sistemde kaynak olarak kullanılan lazer diyotun ve diğer kaynakların doğrusal olmayan özelliğini artırarak farklı frekans bileşenlerine karşı sistemin davranışını değiştirmektir. IMD frekans bileşenlerinin özelliklerinin farklılaşması, IMD frekans seçimini de kolaylaştırmaktadır. Bu çalışmada gözlemlenen sonuçlardan biride gecikme zamanı ve kazanç sabiti arasındaki IMD3 frekans bileşenleri genliklerinin çok farklı çıkmasıdır. Lazer diyot tasarımında kısa-yol geribesleme seçildiğinde genlik düşmekte ve buna karşılık bant genişliği artmaktadır. Diğer yandan uzun geribesleme seçildiğinde ise genlik büyümekte ve bant genişliği daralmaktadır. Teknik olarak ayarlanabilir gecikme zamanlı lazer diyot üretmek güç bir durumdur. Ancak kazancı ayarlanabilir lazer diyot üretmek nispeten daha kolaydır. Ayrıca bir sistem içerisinde her iki tip lazer diyotu kullanmak sıkıntı yaratabilir. Bu nedenle değişik gecikme zamanlı ve kazancı ayarlanabilir lazer diyot üreterek veya daha önceden altyapısı kurulmuş sistem için uygun tek tip lazer diyot seçimi yapılarak bu tür teknik problemler aşılabılır. IMD frekans bileşenlerinin genliklerini sistem çıkışından geniş bantlı ve yüksek genlik elde etmek teknik olarak kolay olmamaktadır. Böyle bir durumla karşılaşmamak için IMD frekans bileşenlerinin bir kısmı kullanılmayarak ve sistemin bant genişliğindeki daralma kabul edilerek sistemin altyapısı kurulur veya sistemde kullanılacak ilave yükselteçlerin maliyeti de dikkate alınarak geniş bant tercih edilebilir. Bu durum tamamen sistemi işletecek olan kuruluşun mali tercihine bağlıdır.

Teorik olarak seçilen IMD2 ve IMD3 frekans bileşenlerinin tamamı alt taşıyıcı hat tekniklerinde kullanılırsa, ağır bant genişliğini 354.219GHz e çıkarmak mümkündür. Aynı sistemden birinci harmonik ile yalnızca 5GHz [1]'lik bir bant genişliği elde edilmiştir. Ağ sisteminin altyapısını değiştirmeden sadece modülasyon türünün alt taşıyıcı tekniğe uygun hale getirilmesiyle bant genişliği artırılmaktadır. Bu durum alt taşıyıcı tekniğin seçiminin önemini göstermektedir. Kablolü TV, ses-görüntü, ve yüksek çözünürlüklü fotoğraf taşıyan sistemlerde özellikle ticari olarak geniş bant tercih edilmektedir. Alt taşıyıcı haberleşme sistemlerin kullanılmasının temel nedeni ise, mevcut olan alt yapıyı değiştirmeden, bant genişliğini artırmaktır.

IMD3 frekans bileşenlerindeki eğrilerinden 1-2, 4-6,5,7,8 ve 9 un doğrusal sistemlerde simetrik olması beklenir. Ancak bu sistemde sadece eğrilerden 5,7 ve 8 IMD3 frekans bileşenleri simetrik bulunmuştur. Bu bileşenler simetrik haberleşme sistemleri için uygundur. Asimetrik frekans bileşen ise 1,2,3,4,6 ve 9 numaralı eğrilerdir. Asimetrik haberleşme sistemleri için, doğrusal olmayan lazer diyot sisteminde üreterek

ve bu frekans bileşenlerinin getirmiş olduğu avantajdan da faydalanılarak uygun modülatör seçimi yapılarak ASL, DSL veya genel olarak asimetrik analog veya sayısal alt-taşıyıcı veya kaotik sistemler için geniş bantlı fiber optik altyapı sistem tasarımı yapılabilir. Analog sistemler için, IMD3 frekans bileşenleri (1,2,3) yüksek genliğe sahip olmaları bakımından önerilebilir. Haberleşme sisteminin altyapı tasarımında yüksek genlik, düşük bant genişliği isteniyorsa uzun geribeslemeli lazer diyot sistemi ve büyük bant genişliği, düşük genlik tercih edilecekse kısa geribeslemeli lazer diyot sistemi tercih edilmelidir. Aynı sistemde her iki geri beslemeli lazer diyot sistemi kullanılması tavsiye edilmemektedir. Buna ilaveten bant genişliğinden ziyade genlik önemli ise kazanç geribesleme değeri artırılarak daralan bant genişliğine karşılık yüksek genlik elde etmek mümkündür. Bu uygulama özellikle deniz altı kablo sistemlerinde daha az yükselteç kullanmak ve fiberde daha az ek yapmak için tercih edilebilir. Sistemin çıkışından büyük genlik elde ederek sayısal haberleşme için -20dB'den daha fazla makul seviyeye kadar genliği indirmek suretiyle de bant genişliğini artırmak mümkündür. Bunun avantajı ise daha az yükselteç kullanılarak sistemin altyapı maliyetinin düşürülmesidir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENTS)

Bu çalışma Gazi Üni. BAP 25-2004-5/3410 projesinin bir parçasıdır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Schetzen, M. and Yıldırım, R. "System theory of the single-mode laser-diode" **Opt. Commun.**, Cilt 219, 341-350, 2003.
2. Yıldırım, R. and Schetzen, M. " Application of the Single-mode Laser Diode System Theory" **Opt. Commun.**, Cilt 219, 351-355, 2003.
3. Aydın, E. and Yıldırım, R. "Optimizing the Performance of Single-mode Laser Diode System Using Genetic Algorithm", **Optics and Laser in Eng.**, Cilt 42, 41-46, 2004.
4. Çelebi, F.V., Yıldırım, R. "Distortion System Theory of the Two-tone Small signal Input laser Diode" **Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Dergisi**, Cilt 20, No:3, 373, 2005.
5. Yıldırım, R. "Doğrusal Olmayan Optoelektronik Geribeslemeli Lazer Diyotun Üç ton Küçük İşaret Girişli İntermodülasyon Distorsiyon Sistem Teorisi" **Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Dergisi**, Cilt 22, No 2, 417-430, 2007.
6. Yıldırım, R. "Doğrusal Olmayan Optoelektronik Geribeslemeli Lazer Diyotun Bağlı Şiddet Gürültü sistem Teorisi" **Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Dergisi**, Cilt 21, No:3, pp 575-580, 2006.
7. Ohtsu, M. and Kotajima, S. "Linewidth Reduction of a Semiconductor Laser by Electrical

- Feedback" **IEEE J.QE.** Cilt 21, 1905- 1912 Dec. 1985.
8. Sharaf K. and Ibrahim,M.M., "The Effect of Electronics Feedback on Semiconductor lasers" **IEEE J.QE.** Cilt 26, pp 1347- 1352 Aug . 1990
 9. Saboureau,P., Foing, J.P. and Schanne, P. " Injection-locked Semiconductor Lasers with Delayed Optoelectronic Feedback" **IEEE J.QE.** Cilt 30, 1582- 1591 Sept . 1997.
 10. Fukushima, T. and Sakamoto, T. " Chaos in Coupled Semiconductor Lasers with an Electronic Delayed Feedback Caused by Injection Locking" **IEEE J.QE.**, Cilt 34, 750-758 May . 1998.
 11. Grigorieva, E.V., Haken H. and Kaschenko, S.A. " Theory of Quasiperiodicity in Model of Lasers with Delayed optoelectronic Feedback" **Optics Comm.** Cilt 165, 279- 292, July 1999.
 12. Giacomeli,G., Calzavara, M. and Arecchi, F.T. " Instabilities in a Semiconductor laser with delayed optoelectronic Feedback, "**Optics Comm.** Cilt 74, 97- 101, Dec. 1989.
 13. Lee, C.H., Shin,S.Y. " Selfpulsing, Spectral Bistability, and Chaos in a Semiconductor Laser Doide with Optoelectronic Feedback" **Appl Phys. Lett.**, Cilt 62, 922- 924, May 1993.
 14. Loiko, N.A. and Samson, A.M. " Possible Regimes of Generation of a Semiconductor Laser with a Delayed Optoelectronic Feedback" **Optics Comm.** Cilt 93, 66- 72, Sept. 1992.
 15. Abarbanel, H. D., Kennel,I. M., Illing,B. I. H., Chen,F. and Liu, J.M. " Synchronization and Communication Using Semiconductor Lasers with Optoelectronic Feedback" **IEEE J.QE.** Cilt 37, 1301- 1311, Oct. 2001.
 16. Tang, S. and Liu, J.M. " Chaotic Pulsing and Quasi-Periodic Route to Chaos in a Semiconductor with Delayed Optoelectronic Feedbabck" **IEEE J.QE.**, Cilt 37, 1301- 1311, March 2001.
 17. Schetzen,M." **The Volterra and Wiener Theories of Nonlinear Systems**", Malabar, Fla., R.E. Krieger Publishing Co., 2006, reprint edition with additional material.
 18. Hassine, L. et al., "Volterra Functional Series Expansions for Semiconductor Lasers Under Modulation," **IEEE J. QE**, Cilt 30, No 4, pp. 918-928, April 1994.
 19. Tucker,R.S. "High-Speed Modulation of Semiconductor Lasers," **J. Lightwave Tech. LT-3**, No 6, 1180-1192, Dec. 1985
 20. Olshansky,R., Lanzisa,V., Powazinik,W.V., " Universal Relationship Between resonant Frequency and Damping Rate of 1.3 μm InGaAsP Semiconductor Laser" **Appl. Phys. Letters.**, Cilt 50, No 11 , 653-655, 1987.
 21. Navid,R., Clark,J.R., Demirci, M. and Nguyen, C.T.C. "Third-order Indermodulation distortion in Capasitively- Driven CC-beam Micromechanical Resonators", **Micro Electro Mechanical Systems, MEMS 2001.The 14 th IEEE International Conference on**, 21-25Jan 2001, 228 – 231, 2001.
 22. Pipes, L.A. and Harvill,L. R., "**Applied Mathematics for Engineers and Physicists, Third edition**", McGraw-Hill International Book Comp., Tokyo, 1983.
 23. Bussgang, J.J. and Ehrman,L." Analysis of Nonlinear Systems with Multiple Inputs" **Proc. IEEE** Cilt 62, 1088-1119, Aug.1974.
 24. Bedrosian, E. and Rice, S.O.," The Output Properties of Volterra Systems (Nonlinear Systems with Memory) Driven by Harmonic and Gaussian Inputs", **Proc. IEEE**, Cilt 59, 1688-1707, Dec. 1971.
 25. Nam, S. and Power,E. J. "On the Selective Counting of Third-Order Products," **IEEE Trans.Commun.**, Cilt 43, 2405-2413, Aug.1995
 26. Weiner, D.D. and Spina,J.E." Sinusodial Analysis and Modeling of Weakly Nonlinear Circuits", **Van Nostrand Reinhold Comp.1980, New York**
 27. Rugh,W.J. " Nonlinear System Theory" The Johns Hopkins University Press.Baltimore, 1981
 28. **EAGLE-WARE "GENESYS-software handbook-Enterprise-2003**
 29. Borges de Carvalho, N. and Pedro,J.Carlos "A Comprehensive Explanation of Distortion Sideband Asymmetries", **IEEE Trans. Microwave Theory Tech.**, Cilt 50, 2090-2101, Sep. 2002.
 30. Sevic,J.F., Burguer, K.L. and Steer,M.B. " A novel envelope-termination load-pull methods for ACPR optimization of RF/ Microwave power amplifies", **IEEE MTT-S Int.Microwave Semp. Dig., Baltimore, MD**, 601-605, 1998.
 31. Borges de Carvalho, N. and Pedro,J.Carlos " Two-tone IMD asymmetry in microwave power amplifiers ", **IEEE MTT-S Int.Microwave Semp. Dig., Boston , MA**, 445-448., 2000.
 32. McIntosh, P.M. and Snowden,C.M." The effect of a variation in tone spacing on the intermodulation performance of A and class AB HBT power amplifiers," ", **IEEE MTT-S Int.Microwave Semp. Dig.**, 371-374, 1997.
 33. Tenny, Roy. "**Symmetric and Asymmetric Scure Communication Schemes in Nonlinear Dynamics**" PhD, University of California, San Diego, 2003.

