

DOĞRUSAL OLMAYAN OPTOELEKTRONİK GERİ BESLEMELİ LAZER DİYODUN ÜÇ TON KÜÇÜK İŞARET GİRİŞLİ İNTERMODULASYON DİSTORSİYON SİSTEM TEORİSİ

Remzi YILDIRIM

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

(Geliş/Received: 01.05.2006; Kabul/Accepted: 04.09.2006)

ÖZET

Bu çalışmada doğrusal olmayan optoelektronik geribeslemeli lazer diyot sistemi için Volterra güç seri açılımı kullanılarak üç ton küçük işaret girişi için sistemin distorsiyon analizi yapılmıştır. Analiz için intermodülasyon distorsiyon (IMD) uygulamalarında kullanılan frekans bileşenleri seçilmiştir. Bunlar; $(\omega_1 - \omega_2)$, $(\omega_1 + \omega_2)$, $(\omega_1 + \omega_3)$, $(\omega_1 - \omega_3)$, $(\omega_2 - \omega_3)$, $(\omega_2 + \omega_3)$, $(\omega_1 + \omega_2 + \omega_3)$, $(\omega_1 + \omega_2 - \omega_3)$, $(-\omega_1 + \omega_2 + \omega_3)$ ve $(\omega_1 - \omega_2 + \omega_3)$ IMD frekans bileşenleridir. Bu frekans bileşenlerin genliklerinin hesaplanmasında sistem yaklaşımı yapılarak, lazer diyot oran eşitlikleri üçüncü dereceye kadar seri açılımı yapılmıştır. Volterra operatöründen H_1 , H_2 ve H_3 Volterra çekirdekleri ve bunlardan seçilmiş olan IMD frekans bileşenlerinin transfer fonksiyonları elde edilmiştir. Bu IMD frekans bileşenlerinin genlikleri geribesleme sabiti (K) ve zaman gecikmesine (t_o)'a bağlı olarak elde edilmiştir. Analiz sonucunda bazı IMD frekans bileşenleri arasında asimetrik durum bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: lazer diyot, volterra serisi, intermodülasyon, harmonik distorsiyon, doğrusal olmayan distorsiyon, optoelektronik geribesleme, elektronik geribesleme, kenarband asimetrisi, doğrusal olmayan geribesleme.

INTERMODULATION DISTORTION SYSTEM THEORY OF THE THREE-TONE SMALL SIGNAL INPUT LASER DIODE WITH NON-LINEAR OPTOELECTRONIC FEEDBACK

ABSTRACT

In this study, Volterra power series expansion is performed successfully in order to analyse the distortion for three tone small signal with non-linear optoelectronic feedback laser diode system input. The frequency components which are used in intermodulation distortion (IMD) applications are selected in the analysis. These are $(\omega_1 - \omega_2)$, $(\omega_1 + \omega_2)$, $(\omega_1 + \omega_3)$, $(\omega_1 - \omega_3)$, $(\omega_2 - \omega_3)$, $(\omega_2 + \omega_3)$, $(\omega_1 + \omega_2 + \omega_3)$, $(\omega_1 + \omega_2 - \omega_3)$, $(-\omega_1 + \omega_2 + \omega_3)$ and $(\omega_1 - \omega_2 + \omega_3)$ During the calculation of the amplitudes of these selected frequency components, system approach is performed and series expansion of the laser diode rate equations is obtained up to third order degree. From the Volterra operator, H_1 , H_2 and H_3 Volterra kernels are computed. Then the transfer functions of the IMD frequency components are obtained. The amplitudes of the IMD frequency components is found with respect to feedback constant (K) and time delay (t_o). At the end of the analysis asymmetry is determined in some of the IMD frequency components.

Keywords: Laser diode, volterra series, intermodulation, harmonic distortion, non-linear distortion, optoelectronics feedback, electronics feedback, sideband asymmetry, non-linear optoelectronic feedback

1.GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yarıiletken lazer diyot sayısal veya analog fiber optik haberleşme ve optik ölçme sistemlerinin önemli parçasıdır. Fiber optik haberleşme sistemleri içerisinde özellikle kablo TV ve yüksek çözünürlüklü elektronik baskı dosyaları, ses ve görüntüden oluşan dosyaları taşıyan haberleşme sistemleri farklı bir özelliğe sahiptir. Bu sistemlerin belirgin özelliği geniş bantlı ATÇ (Alt-taşıyıcı çoğullama, Sub-Carrier Multiplexing, SCM) tekniğinin genişçe kullanılmasıdır. Alt-taşıyıcılı sistemlerde analog veya sayısal modülasyon kullanılıp kullanılan modülasyon tekniğine göre adlandırılırlar. Bunlardan 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), ayrık çok tonlu (Discrete Multitone, DMT) ve ayrık dalgacık çok-tonlu (Discrete Wavelet Multitone, DWMT) olarak adlandırılırlar. Ayrıca bu tür çok taşıyıcılı sistemlerin modülasyon türüne göre sayısını artırmak mümkündür. Çok taşıyıcılı veya alt-taşıyıcılı modülasyon sistemlerini kullanarak fiber optik haberleşme sisteminin band genişliği artırılır ve ticari olarak kazançlı ve işletimi sürdürülebilir ekonomik büyüklüğe getirilir. Lazer diyodun doğrusal olmayan özelliğinden faydalanılarak bu sistemler için IMD frekans bileşenleri türetilir. Bu çalışmada özellikle kablo TV ve ATÇ uygulamalarında kaynak olarak kullanılan, doğrusal olmayan optoelektronik geribeslemeli lazer diyodun, üç tonlu küçük işaret distorsiyon çıkış analizi yapılmıştır. Analizde pratik uygulamalarda kullanılan IMD frekans bileşenleri özellikle seçilmiştir.

Volterra çekirdeklerin sistematik ve ayrıntılı çözümleri kaynak [1] de, harmonik distorsiyon ve optimizasyon ile ilgili ayrıntı çalışmalar kaynak [2-4] de verilmiştir. Bu çalışmada ise daha önce geliştirilen lazer diyot sistemi için sadece seçilen IMD bileşenlerinin nümerik analizi yapılmıştır.

Bugüne kadar lazer ile ilgili olarak pek çok çalışma yapılmaktadır. Bunlar arasında son yıllarda lazer diyoda çeşitli türde yapılan geribeslemenin etkisi çalışılmaktadır. Bu çeşitler elektronik, optik ve optoelektronik geribeslemeye odaklanmıştır. Bunun dışındaki araştırmaların odaklandığı alanların başlıcaları; Kaos, distorsiyon, kararlılık, lazer diyodun dinamik davranı sayılabilir [5-15].

Bu çalışmada ise doğrusal olmayan optoelektronik geribeslemeli lazer diyodun üç ton girişli Volterra teorik modelin distorsiyon sistem teorisi geliştirilmiştir. Volterra operatörleri Z_1, Z_2, Z_3 'ün IMD için analizleri yapılmış ve Volterra çekirdekleri

H_1, H_2, H_3 hesaplanmıştır. Bu operatörlerden Z_1 ve Z_2 sonuçları önceki yapılan çalışmalarla uyumludur. IMD3 için, Z_3 operatörünün sonuçlarında asimetrik genlik farkı bulunmuştur. Bu durum makale içinde tartışılmıştır.

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

Analizde kullanılan lazer diyot oran eşitliklerini Hassine [16], Tucker [17] ve Olshansky [18] kullanmıştır. Model de kullanılan temel tek modlu lazer diyot oran eşitlikleri:

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

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

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} 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. Bu eşitliklerden Volterra çekirdekleri (H_1, H_2, H_3) hesaplanmıştır.

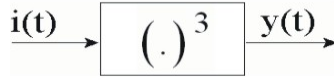
Volterra çekirdeklerinin sistem teorisi ile ilgili tek-modlu lazer diyodun ayrıntılı çözümleri kaynakta verilmiştir [1].

Önceki çalışmalarda sistemin harmonik distorsiyonu, band genişliği, optimizasyon ve iki ton girişli sistemin analizi ve sonuçları ayrıntılı olarak verilmiştir [2-4]. Genel üç ton küçük işaret girişi $I(t)$:

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

şeklinde. 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 işaretin giriş işaretine eklenmesiyle giriş işaretinin yeni şekli $I_g(t)$ [19]:

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



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

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], [15]. 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] verilmiştir. Şekil 1'de ise üç ton girişli doğrusal olmayan sistemin çıkışında IMD'de kullanılacak frekans bileşenlerinin genel ifadesi $y(t)$ ile gösterilmiştir:

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

şeklinde tanımlanmıştır [20-24]. Eşitlik (6) da sadece IMD de kullanılacak frekans bileşenlerinin genel açınımları dikkate alınmıştır. Ayrıntılı açınımlar adı geçen kaynaklarda verilmiştir. Ek de ise $y(t)$ çıkışının genel açınımları verilmiştir.

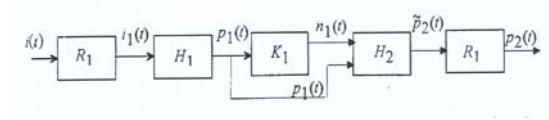
3. BİRİNCİ DERECE VOLTERRA OPERATÖRÜ (THE FIRST-ORDER VOLTERRA OPERATOR)

Birinci derece Volterra operatörünün transfer fonksiyonu kaynak [1] de verilmiştir. Bu kaynakta verilen eşitliğe $s = j\omega$, kullanılarak;

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

ve eşitlikte geçen yerine $s = j\omega$ kaynak [1] deki eşitlik (18) kullanılarak,

$$H_1(s) = \frac{B_o}{q} \frac{1}{(D_o - \omega^2) + jD_1\omega} \quad (8)$$



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[1]. 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 $\angle Z_{1,2,3}(j\omega_{1,2,3})$; açısal frekansı ω_1, ω_2 ve ω_3 temsil etmektedir. IMD eşitlikleriyle ilgili ayrıntılı bilgiler kaynaktaki verilmiştir [24].

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.

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

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

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

tanımlanmıştır [1]. 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. İfadelerde geçen katsayılar ise,

$$B_1 = A_1 |K_1(j\omega_1)|$$

$$B_2 = A_2 |K_1(j\omega_2)|$$

$$B_3 = A_3 |K_1(j\omega_3)| \quad (18a)$$

$$\beta_1 = \alpha_1 + \angle K_1(j\omega_1)$$

$$\beta_2 = \alpha_2 + \angle K_1(j\omega_2)$$

$$\beta_3 = \alpha_3 + \angle K_1(j\omega_3) \quad (18b)$$

şeklinde hesaplanır. H_2 çekirdeğinin ayrıntılı blok diyagramı Şekil 4 [1] de verilmiştir. H_2 çıkışının hesaplanmasında $p_1^2(t)$ ve $n_1(t)p_1(t)$ ihtiyaç vardır. Eşitlik (15)'den,

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

$$\begin{aligned} p_1^2(t) = & \frac{1}{2}A_2^2 + \frac{1}{2}A_1^2 + \frac{1}{2}A_3^2 + \\ & \frac{1}{2}A_2^2 \cos(2\omega_2 t + 2\phi_2) + \\ & A_2 A_3 \cos((\omega_2 - \omega_3)t + (\phi_2 - \phi_3)) + \\ & A_2 A_3 \cos((\omega_2 + \omega_3)t + (\phi_2 + \phi_3)) + \\ & \frac{1}{2}A_3^2 \cos(2\omega_3 t + 2\phi_3) + \\ & \frac{1}{2}A_1^2 \cos(2\omega_1 t + 2\phi_1) + \\ & A_1 A_2 \cos((\omega_1 + \omega_3)t + (\phi_1 + \phi_2)) + \\ & A_1 A_2 \cos((\omega_1 - \omega_2)t + (\phi_1 - \phi_2)) + \\ & A_1 A_3 \cos((\omega_1 + \omega_3)t + (\phi_1 + \phi_3)) + \\ & A_1 A_3 \cos((\omega_1 - \omega_3)t + (\phi_1 - \phi_3)) \quad (19) \end{aligned}$$

ve eşitlik (15, 16) dan ise

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

hesaplanır. Bu ifadenin açılımı ise,

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

şeklindedir. Şekil 4[1] den $f_2(t)$,

$$f_2(t) = \Gamma A [1 - 2\hat{\epsilon}P_o] n_1(t)p_1(t) - \Gamma A [N_o - N_{tr}] p_1^2(t) \quad (22)$$

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

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

$$\begin{aligned}
 & + \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 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_3)) \\
 & - \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 \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 t + \omega_3 t) + (\phi_2 + \beta_3)) \\
 & - \Gamma A \varepsilon P_o A_1 B_1 \cos(2\omega_1 t + \phi_1 + \beta_1) \\
 & - \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))
 \end{aligned}$$

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

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

Şekil 3'de geçen ifadeler;

$$M(j\omega) = \frac{j\omega - \frac{\beta\Gamma - 1}{\tau_n}}{(D_o - \omega^2) + jD_1\omega} R_1(j\omega) \quad (23)$$

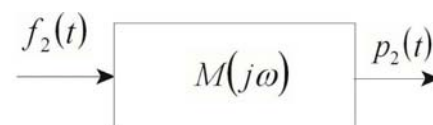
şeklinde ifade edilmiştir [1]. İfade $s = j\omega$ çevirmesi yapılarak

$$M(j\omega) = \left[\frac{j\omega - \frac{\beta\Gamma - 1}{\tau_n}}{(D_o - \omega^2) + jD_1\omega} \right] \left[\frac{D_o - \omega^2 + jD_1\omega}{D_o - \omega^2 + jD_1\omega + \frac{gB_o}{q} e^{j\omega\tau_o}} \right] \quad (24)$$

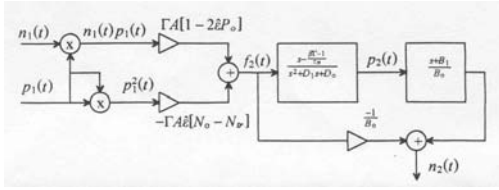
sonuç eşitlik elde edilir. Çekirdek çıkışı foton sayısı $p_2(t)$ ise,

$$p_2(t) = f_2(t) M(o) \quad (25)$$

tanımlanmıştır ve eşitlik (24) de $\omega = 0$ konur ve $M(o) = \frac{(1 - \beta\Gamma) q}{(D_o q + gB_o) \tau_n}$, elde edilir. Bu ifade de eşitlik (25)'daki yerine konularak $p_2(t)$ elde edilir ve $p_2(t)$ 'nin açık hali aşağıda verilmiştir. Taşıyıcı



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



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

yoğunluğu ise Şekil 4'deki gibi hesaplanmıştır [1].

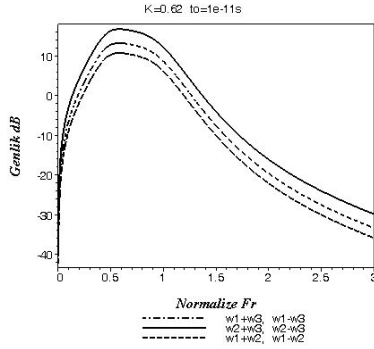
$$\begin{aligned}
 p_2(t) = & M_o \left(\frac{1}{2} \Gamma A A_2 B_1 \cos((\omega_2 + \omega_1)t + \phi_2 + \beta_1) \right. \\
 & - \frac{1}{2} \Gamma A N_o A_1^2 \cos(2\omega_1 t + 2\phi_1) \\
 & - \frac{1}{2} \Gamma A N_o A_3^2 \cos(2\omega_3 t + 2\phi_3) \\
 & + \frac{1}{2} \Gamma A N_{tr} A_3^2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

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

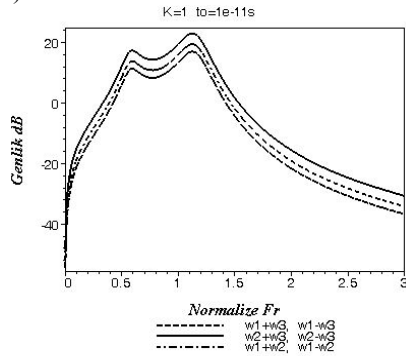
açınımı elde edilir. Taşıyıcı yoğunluğu ise;

$$N_2(s) = \frac{1}{B_o} \left[\frac{(s + B_1) \left(s - \frac{(\beta\Gamma - 1)}{\tau_n} \right)}{s^2 + D_1 s + D_o} - 1 \right] F_2(s) \quad (26)$$

şeklinde tanımlanmıştır. İkinci derece çekirdeğin IMD frekans bileşenlerinin bazıları çeşitli teknik nedenlerden dolayı kullanılmamaktadır [20-22].



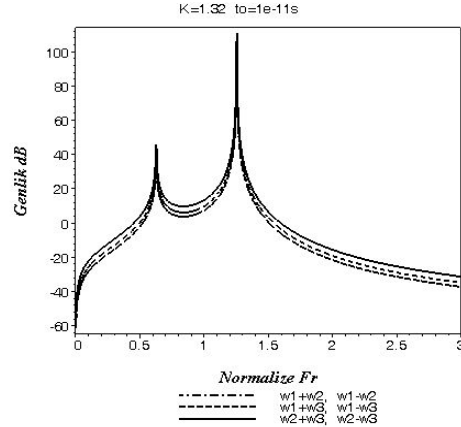
Şekil 5. İkinci çekirdek çıkışı IMD frekans bileşenlerinin genlikleri. (The amplitudes of the IMD frequency components for the output of second kernel)



Şekil 6. İkinci çekirdek çıkışı IMD frekans bileşenlerinin genlikleri. (The amplitudes of the IMD frequency components for the output of second kernel)

Şekil 5, 6, 7 ve 8'de ise ikinci çekirdek çıkışlarından elde edilmiş IMD2 frekans bileşenlerinden seçilmiş olan $(\omega_1 - \omega_2)$, $(\omega_1 + \omega_3)$, $(\omega_1 + \omega_2)$, $(\omega_1 - \omega_3)$, $(\omega_2 - \omega_3)$, $(\omega_2 + \omega_3)$ bileşenlerinin eğrileri verilmiştir. Bu eğrilerin görüleceği gibi K ve t_o değerlerine bağlı olarak frekans bileşenlerinin simetrisi arasında her herhangi bir asimetric durumla karşılaşmamıştır. Ancak bu frekans bileşenleri arasında en az 2.5 dB ve en çok ise 5.5 dB'lik genlik farkı vardır. Bu genlik farkları alt taşıyıcı sistemler için makul değerlerdir. Fiber optik haberleşme sistemleri için geribesleme

değeri K=1 ve $t_o = 1.10^{-11}$ s değeri için daha makul olduğu görülmektedir. Çünkü genlik bakımından daha yüksektir. Sayısal haberleşme için genlik -20dB kadar düşürülmektedir[1]. Ancak -10dB'lik düşmeye karşılık band genişliği 13.448 GHz'ye karşılık gelmektedir. Teorik olarak altı frekans bileşeni kullanıldığında sistemin alt yapısını değiştirmeden 80.692GHz'lik band genişliği elde edilmektedir. Ticari fiber optik haberleşme sistemi için, alt taşıyıcı sistem ne kadar önemli olduğu görülmektedir.



Şekil 7. İkinci çekirdek çıkışı IMD frekans bileşenlerinin genlikleri. (The amplitudes of the IMD frequency components for the output of second kernel)

Şekil 6 ve 7 de ise aynı frekans bileşenlerinin maksimum genlikleri görülmektedir. Şekillerden görüleceği gibi band genişliği çok dardır. Bu nedenle genel ticari fiber optik haberleşme sistemleri için uygun değildir. Ancak özel amaçlı özellikle yüksek genlik gerektiren uzun fiber optik hatlar için veya yükselteç kullanımının fiziksel olarak sınırlı olduğu deniz altı fiber optik haberleşme sistemleri için kullanılabilir.

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

Üçüncü çekirdeğin taşıyıcı ve foton yoğunluğu ise

$$N_3(s) = \frac{1}{B_o} \left[\frac{(s + B_1) \left(s - \frac{(\beta\Gamma - 1)}{\tau_n} \right)}{s^2 + D_1 s + D_o} - 1 \right] F_3(s) \quad (27)$$

$$P_3(s) = \frac{s - \frac{(\beta\Gamma - 1)}{\tau_n}}{s^2 + D_1 s + D_o} F_3(s) \quad (28)$$

$$Z_3(j\omega) = \left[\frac{j\omega - \frac{\beta F - 1}{\tau_n}}{(D_o - \omega^2) + jD_1\omega} \right] \left[\frac{D_o - \omega^2 + jD_1\omega}{D_o - \omega^2 + jD_1\omega + \frac{gB_o}{q} e^{j\omega\tau_o}} \right] f_3(j\omega) \quad (29)$$

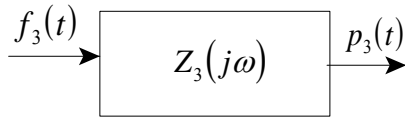
ve eşitlikte geçen $f_3(j\omega)$ 'nin zaman düzlemindeki eşitliği,

$$f_3(t) = 2\Gamma A \hat{\varepsilon} [N_{ir} - N_o] p_1(t) p_2(t) + \Gamma A [1 - 2\hat{\varepsilon} P_o] n_1(t) p_2(t) + \Gamma A [1 - 2\hat{\varepsilon} P_o] n_2(t) p_1(t) - \Gamma A \hat{\varepsilon} n_1(t) p_1^2(t) \quad (30)$$

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,

$$\sum p(t) = p_1(t) + p_2(t) + p_3(t) \quad (31)$$

şeklinde tanımlıdır [1]. Şekil 9'da görülen sistemin foton $p_3(t)$ çıkışı;



Şekil 9. Üçüncü çekirdek çıkışı sistem blok yapısı. (Block diagram of the third kernel output)

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

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

$$\begin{aligned}
& + \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_{rr} A_1 A_2 \cos((\omega_1 + \omega_2)t + \phi_1 + \phi_2) \\
& + \frac{1}{2} M_1 R_1 \Gamma A N_{rr} A_2^2 + \frac{1}{2} M_1 R_1 \Gamma A N_{rr} 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_{rr} 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) \\
& + 4\varepsilon P_o A_2 B_1 \cos(2\omega_2 t + \phi_2 + \beta_2) \\
& + 4\varepsilon P_o A_1 B_2 \sin((\omega_1 + \omega_2)t + \phi_1 + \beta_2) \\
& + 4\varepsilon P_o A_2 B_1 \cos((\omega_2 - \omega_1)t + \phi_2 - \beta_2) \\
& + 2N_o A_1^2 \phi_1 + 2N_o A_2^2 \phi_1 - 2N_{rr} A_1^2 \phi_1 \\
& - 2N_{rr} A_2^2 \phi_1 - N_{rr} A_1^2 \sin(2\omega_1 t + 2\phi_1) \\
& - 2A_1 B_2 \sin((\omega_1 - \omega_2)t + \phi_1 - \beta_2) \\
& - 4N_{rr} A_1 A_2 \sin((\omega_1 + \omega_2)t + \phi_1 + \phi_2) \\
& - 2A_2 B_2 \cos(2\omega_2 t + \phi_2 + \beta_2) \\
& + 2N_o A_2^2 \cos(2\omega_2 t + 2\phi_2) \phi_1 \\
& - 2N_{rr} A_2^2 \cos(2\omega_2 t + 2\phi_2) \\
& - 2A_2 B_2 \cos(2\phi_2 - \beta_2) \phi_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) \\
& - 4N_{rr} A_1 A_2 \sin((\omega_1 - \omega_2)t + \phi_1 - \phi_2) \\
& + 4\varepsilon P_o A_2 B_2 \cos(\phi_2 - \beta_2) \\
& - 4N_{rr} A_1 A_2 \sin((\omega_1 + \omega_2)t + \phi_1 + \phi_2) \\
& - 2A_2 B_2 \cos(2\omega_2 t + \phi_2 + \beta_2) \\
& + 2N_o A_2^2 \cos(2\omega_2 t + 2\phi_2) \phi_1 \\
& - 2N_{rr} A_2^2 \cos(2\omega_2 t + 2\phi_2) \\
& - 2A_2 B_2 \cos(2\phi_2 - \beta_2) \phi_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) \\
& - 4N_{rr} A_1 A_2 \sin((\omega_1 - \omega_2)t + \phi_1 - \phi_2) \\
& + 4\varepsilon P_o A_2 B_2 \cos(\phi_2 - \beta_2) \\
& - 2A_2 B_2 \sin((\omega_1 + \omega_2)t + \phi_1 + \beta_2) \\
& - 2A_1 B_2 \sin(2\omega_1 t + \phi_1 + \beta_1) \\
& - 2A_1 B_1 \sin(\phi_1 - \beta_1) \\
& + N_o A_1^2 \sin(2\omega_1 t + 2\phi_1) \\
& + 4\varepsilon P_o A_1 B_2 \sin((\omega_1 - \omega_2)t + \phi_1 - \beta_2) \\
& + 4\varepsilon P_o A_1 B_1 \sin(\phi_1 - \beta_1) \\
& \left. \begin{aligned}
& \frac{1}{4} (A_1 \cos(\omega_1 t + \phi_1) + A_2 \cos(\omega_2 t + \phi_2)) \\
& - \Gamma A \varepsilon (B_1 \cos(\omega_1 t + \beta_1) + B_2 \cos(\omega_2 t + \beta_2)) \\
& \left\{ \frac{1}{2} A_1^2 \cos(2\omega_1 t + 2\phi_1) + \frac{1}{2} A_2^2 \right. \\
& + A_1 A_2 \cos((\omega_1 - \omega_2)t + \phi_1 - \phi_2) \\
& + A_1 A_2 \cos((\omega_1 + \omega_2)t + \phi_1 + \phi_2) \left. \right\}^2 \\
& + \frac{1}{2} A_2^2 \cos(2\omega_2 t + 2\phi_2) + \frac{1}{2} A_2^2 \left. \right\} \quad (32)
\end{aligned} \right\}
\end{aligned}$$

Eşitlikte geçen;

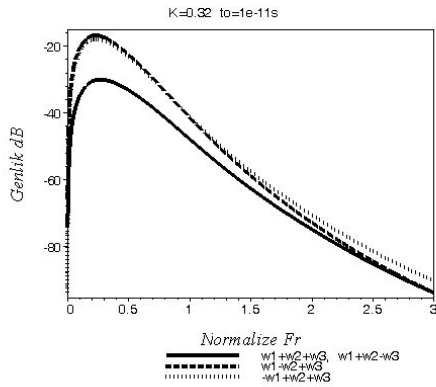
$$M_1 = \frac{s - (\beta - 1)}{s^2 + sD_1 + D_o}$$

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

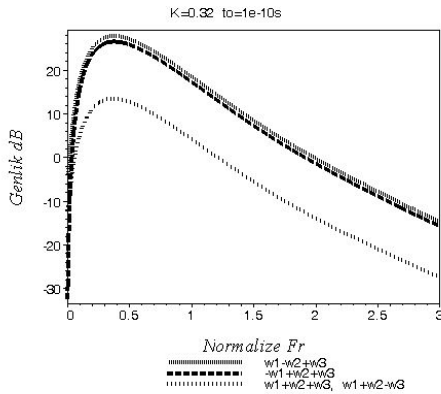
tanımlıdır ve $s = j\omega$ dir. Bu ifadenin açılımında pek çok değişik frekans bileşenleri bulunmaktadır. Ancak yüksek frekans bileşenli olanlar ve bazıları çeşitli nedenlerden dolayı IMD uygulamaları için tercih edilmemekte veya kullanılmamaktadır [21-24]. Şekil 10,11,12,13,14 ve 15 de ise IMD3 birinci grup $(\omega_1 + \omega_2 + \omega_3)$ ve $(\omega_1 + \omega_2 - \omega_3)$ $(-\omega_1 + \omega_2 + \omega_3)$, $(\omega_1 - \omega_2 + \omega_3)$ frekans bileşenlerinin genlikleri görülmektedir [30-31]. Band genişliği $K=1$ ve $t_o = 1.10^{-11} s$ için -10dB de her bir frekans bileşeni için 18.382GHz olarak bulunmuştur. Teorik olarak dört frekans bileşeni için 73.528GHz olarak bulunur.

Şekil 10, ise $K=0.32$ ve t_o 'ın iki değişik değerine karşılık gelen eğrileri görülmektedir. Zaman gecikmesi $t_o = 1.10^{-11} s$ ve $t_o = 1.10^{-10} s$ arasında, $(-\omega_1 + \omega_2 + \omega_3)$, $(\omega_1 - \omega_2 + \omega_3)$ arasında

1dB'lik genlik farkı vardır. Ancak $t_o = 1.10^{-10}$ s değeri için aynı frekans bileşenleri arasındaki genlik farkı 2dB'dir. Genliklerdeki değişim ise her iki frekans bileşeninde de 52dB'lik fark vardır. IMD frekans bileşenleri için, zaman gecikmesi $t_o = 1.10^{-10}$ s için $(\omega_1 - \omega_2 + \omega_3)$ bileşeninde 1dB'lik asimetrik durum gözlemlenmiştir. Bu durum alt taşıyıcı sistemlerin frekans filtreleme işleminde avantaj sağlamaktadır. Mikrodalga uygulamalarında kullanılan ve yapısında In GaAs MESFET ve Si yapı transistörlerin, iki ton küçük işaret girişli distorsiyon testlerinde [25-29] ve optoelektronik geribeslemeli lazer diyotta kenar band asimetrisi gözlemlenmiştir [4].



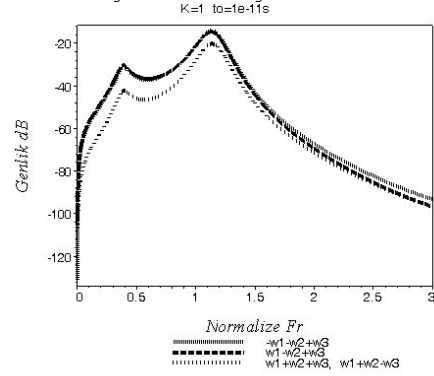
Şekil 10. IMD3 frekans bileşenlerinin genliği görülmektedir. (The amplitudes of IMD3 frequency components are shown)



Şekil 11. IMD3 frekans bileşenlerinin genliği görülmektedir. (The amplitudes of IMD3 frequency components are shown)

Şekil 12,13 den de görüldüğü gibi K=1 değeri için genlik değerleri görülmektedir. Ancak önceki eğrilerde frekans bileşenleri arasında belirgin genlik farkı olmasına rağmen bu değerler için genlik farkı çok küçük değerlere düşmektedir. Bu da frekans seçimini zorlaştırmakta ve band genişliğinin daralmasını etkilemektedir. Band genişliğinin hesaplanmasında teorik olarak dört frekans bileşeni kullanılarak 73.528GHz' lik band genişliği elde

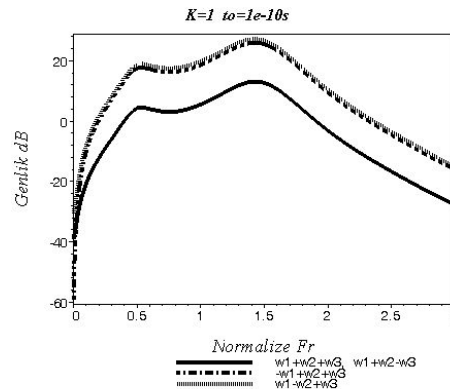
edilmiştir. Ancak frekans bileşenlerinin genliklerinin çok yakın veya aynı olması durumunda bazıları teknik nedenlerden dolayı kullanılmayabilir.



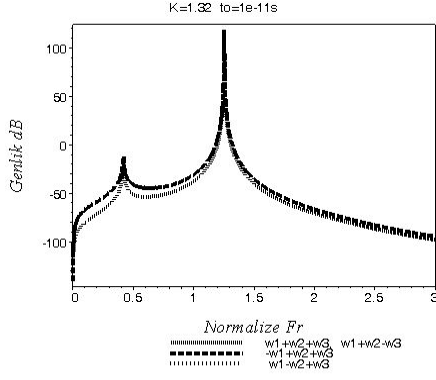
Şekil 12. IMD3 frekans bileşenlerinin genliği görülmektedir. (The amplitudes of IMD3 frequency components are shown)

Şekil 12 ve 13'deki eğrilerin tepe değerleri arasındaki çukurluk dikkate alındığında, maksimum genlik ve band genişliği için -15 dB'lik (sayısal haberleşme için -20dB' kadar genlik düşürülebilir) band genişliği 17.897GHz olarak bulunur.

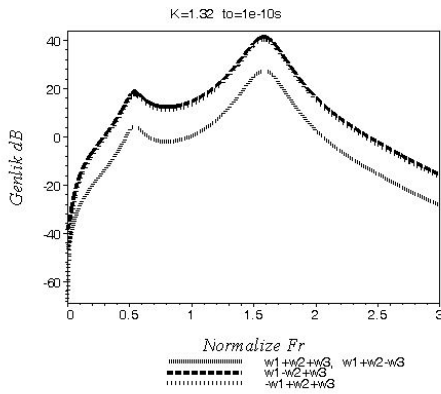
Şekil 13 ise $(\omega_1 + \omega_2 + \omega_3)$ ve $(\omega_1 + \omega_2 - \omega_3)$ arasında genlik farkı yoktur. Ancak $(-\omega_1 + \omega_2 + \omega_3)$ ve $(\omega_1 - \omega_2 + \omega_3)$ frekans bileşenleri arasında 2dB'lik genlik farkı görülmektedir. Eğrilerin iki tepe değerleri arasında kalan çukurluk dikkate alınarak bulunan band genişliği 2.260GHz dir. Bu band genişliği -10dB'lik değere karşılık gelmektedir. Bu noktanın seçilmesinin nedeni ise en büyük genlik ve band genişliğine karşılık gelmesidir. Şekil 14 deki çıkışı ancak dar bantlı sistemlere uygulamak mümkündür. Ticari olarak özel şartlar dışında ekonomik band genişliğine sahip değildir.



Şekil 13. IMD3 frekans bileşenlerinin genliği görülmektedir. (The amplitudes of IMD3 frequency components are shown)



Şekil 14. IMD3 frekans bileşenlerinin genliği görülmektedir. (The amplitudes of IMD3 frequency components are shown)



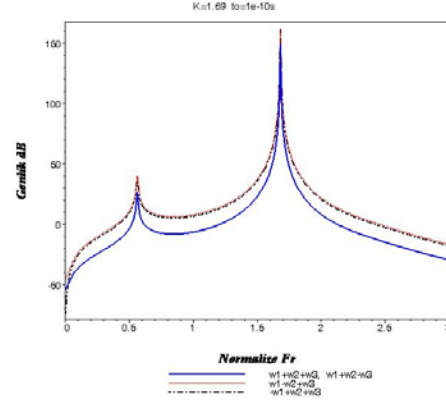
Şekil 15. IMD3 frekans bileşenlerinin genliği görülmektedir. (The amplitudes of IMD3 frequency components are shown)

Şekil 15 ise dört frekans bileşeni ikiyeşerli olmak üzere yaklaşık aynı genliğe sahiptir. Genliklerin iki tepe değeri arasında kalan çukurluk dikkate alınarak -27dB ye karşılık hesaplanan band genişliği 2.689GHz dir. Bu noktanın seçilmesinin nedeni yine en büyük genlik ve band genişliğine karşılık gelmesidir.

Şekil 16 ise görüldüğü gibi band genişliği sıfıra çok yakın (dar band) değerdedir. Pratik olarak kullanımı ticari sistemler için uygun değildir. Tek avantajı ise genliğinin yüksek olmasından dolayı özel amaçlar için kullanılabilir. Ticari haberleşme sistemleri için genliğin yüksek ve band genişliğinin büyük olması istenir. Dar bantlı ve özel amaçlı fiber optik haberleşme sistemleri için bu tip işaret girişleri kullanılabilir. Dar bantlı sistemin ayrıntıları [21,24] verilmiştir.

6. TARTIŞMA (CONCLUSION)

Lazer diyot çıkışından elde edilen optik işaretin genliğindeki değişimler ve bu değişimlerin fiziksel nedenleri gözlemlenmiştir. Bu değişimler fiber optik sisteme giriş yapılacak olan optik işaretin fiziksel



Şekil 16. IMD3 frekans bileşenlerinin genliği görülmektedir. (The amplitudes of IMD3 frequency components are shown)

özelliğini temsil eder. Ayrıca fiber optik haberleşme sisteminin verimliliğini ve alt yapı maliyetini doğrudan etkiler. Bu nedenle optik giriş işaretinin değeri önem kazanmaktadır.

Bu yapılan çalışmada optoelektronik geribeslemeli lazer diyot sistemi için, seçilen IMD frekans bileşenlerinin kullanılması durumunda, sistemin teorik olarak toplam bant genişliği 154.219GHz olarak bulunur. Bu değer literatür değerleriyle makul kabul edilen değerdir. Ancak pratik olarak bazı frekans bileşenleri teknik olarak kullanılamaz. Bunlar, uygulamadaki teknik zorluklardan kaynaklanmaktadır. Pratik uygulamalarda simetrik frekans bileşenlerinden genlikleri aynı olanlardan birisi tercih edilmektedir. Simetrik olmayan fakat aynı genlikteki frekans bileşenlerinin de pratik olarak kullanılması bazı teknik zorluklardan dolayı tercih edilmemektedir. Bunun temel sebebi ise filtreleme ve güç kaybı sorunlarından kaynaklanmaktadır. Bu sorunları aşmanın teknik yolu ise sistemin doğrusal olmayan özelliği artırılarak farklı frekans bileşenlerine karşı sistemin davranışını değiştirmektir. Bu çalışmada gözlemlenen sonuçlardan bir diğeri de gecikme zamanı $t_o = 1.10^{-11} s$ ve $t_o = 1.10^{-10} s$ arasındaki IMD3 frekans bileşenleri genliklerinin çok farklı çıkmasıdır. Gecikme zamanı $t_o = 1.10^{-11} s$ seçildiğinde genlik düşük buna karşılık ise band genişliği büyük olmaktadır. Diğer yandan $t_o = 1.10^{-10} s$ gecikme zamanına karşılık ise genlik büyük ve band genişliği küçük çıkmaktadır. Teknik olarak ayarlanabilir gecikme zamanlı lazer diyot üretmek zordur. Ancak kazancı ayarlanabilir lazer diyot üretmek daha kolaydır. Ayrıca sistem içerisinde de kullanma sıkıntısı yapabilir. Bu nedenle değişik gecikme zamanlı ve kazancı ayarlı ayarlanabilir lazer diyot üretmek veya daha önceden alt yapısı kurulmuş sistem için uygun tip lazer diyot seçimi yapılarak bu tip teknik problemler aşılabılır. Bir sistem içerisinde teknik olarak bu sorunu çözmek çok kolay olmamaktadır. Böyle bir durumla karşılaşmamak için

IMD frekans bileşenlerinin bir kısmı kullanılmayarak, sistemin band genişliğindeki daralma kabullenilip sistemin alt yapısı kurulur veya sistemde kullanılacak ilave yükselteçlerin maliyeti dikkate alınarak geniş band tercih edilebilir. Bu durum tamamen sistemi işletecek olan kuruluşun mali tercihine bağlıdır.

Teorik olarak seçilen IMD frekans bileşenlerinin tamamı alt taşıyıcı teknikle kullanılırsa, ağın band genişliğini 154.219GHz. e çıkarmak mümkündür. Aynı sistemden birinci harmonik ile yalnızca 5GHz [1] lik band genişliği elde edilmiştir. Ağ sisteminin alt yapısını değiştirmeden sadece modülasyon türünün alt taşıyıcılı tekniğe uygun hale getirilmesiyle band genişliği artırılabilir. Buda alt taşıyıcılı sistemin önemini göstermektedir. Kablo TV ve ses-görüntü ve yüksek çözünürlüklü görüntü taşıyan sistemlerde özellikle tercih edilmektedir. Alt taşıyıcılı sistemlerin kullanılmasının temel nedeni ise, mevcut olan alt yapıyı değiştirmeden, band genişliğini artırmaktır.

Bu çalışma IMD frekans bileşenlerinin seçimine dikkati çekmiş ve aralarındaki ilişkiyi sistem şartlarında ortaya çıkarmıştır. Üçüncü derece, ikinci grup IMD frekans bileşenlerinin distorsiyon analiz çalışmaları ise devam etmektedir.

EK (APPENDIX)

Şekil 1'deki sistemin girişine uygulanan işarete göre $y(t)$ çıkışının açık hali;

$$\begin{aligned}
y(t) = & \frac{1}{2}H_2u_1^2 + \frac{1}{2}H_2u_0^2 + \frac{1}{2}H_2u_2^2 \\
& + \frac{1}{2}H_2u_3^2 + H_ou_0 \cos(\omega_0t) + H_ou_1 \cos(\omega_1t) \\
& + H_ou_2 \cos(\omega_2t) + H_ou_3 \cos(\omega_3t) \\
& + H_1u_0 \cos(\omega_0t) + H_1u_1 \cos(\omega_1t) \\
& + H_1u_2 \cos(\omega_2t) + H_1u_3 \cos(\omega_3t) \\
& + \frac{1}{2}H_2u_0^2 \cos(2\omega_0t) + \frac{1}{2}H_2u_1^2 \cos(2\omega_1t) \\
& + \frac{3}{2}H_3u_0^2u_1 \cos(\omega_1t) + \frac{1}{4}H_3u_2^3 \cos(3\omega_2t) \\
& + \frac{1}{2}H_2u_2^2 \cos(2\omega_2t) + \frac{1}{2}H_2u_3^2 \cos(2\omega_3t) \\
& + \frac{3}{4}H_3u_0^2u_3^2 \cos(\omega_0t) + \frac{3}{2}H_3u_0u_1^2 \cos(\omega_0t) \\
& + \frac{3}{2}H_3u_0u_2^2 \cos(\omega_0t) + \frac{3}{2}H_3u_2^2u_2 \cos(\omega_2t) \\
& + \frac{3}{2}H_3u_2^2u_1 \cos(\omega_1t) + \frac{3}{2}H_3u_2^2u_3 \cos(\omega_3t) \\
& + \frac{3}{4}H_3u_1^2u_3 \cos(\omega_3t) + \frac{3}{4}H_3u_2^2u_1 \cos(\omega_3t) \\
& + \frac{3}{2}H_3u_1^2u_2 \cos(\omega_2t) + \frac{1}{4}H_3u_0^2 \cos(3\omega_0t) \\
& + \frac{3}{4}H_3u_0^3 \cos(\omega_0t) + \frac{1}{4}H_3u_1^3 \cos(3\omega_1t) \\
& + \frac{3}{4}H_3u_1^2u_2 \cos(\omega_1t) + \frac{3}{4}H_3u_2^3 \cos(\omega_2t) \\
& + \frac{1}{4}H_3u_3^3 \cos(3\omega_3t) + \frac{3}{4}H_3u_3^3 \cos(\omega_3t) \\
& + H_2u_0u_1 \cos(\omega_0 - \omega_1)t + H_2u_0u_1 \cos(\omega_0 + \omega_1)t \\
& + H_2u_0u_2 \cos(\omega_0 - \omega_2)t + H_2u_0u_2 \cos(\omega_0 + \omega_2)t \\
& + H_2u_0u_3 \cos(\omega_0 - \omega_3)t + H_2u_0u_3 \cos(\omega_0 + \omega_3)t \\
& + \frac{3}{4}H_3u_0^2u_1 \cos(\omega_1 + 2\omega_0)t + \frac{3}{4}H_3u_0^2u_2 \cos(-\omega_2 + 2\omega_0)t \\
& + \frac{3}{4}H_3u_0^2u_3 \cos(\omega_2 + 2\omega_0)t + \frac{3}{4}H_3u_0^2u_3 \cos(-\omega_3 + 2\omega_0)t \\
& + \frac{3}{4}H_3u_2^2u_0 \cos(\omega_0 - 2\omega_2)t + \frac{3}{4}H_3u_0u_2^2 \cos(\omega_0 + 2\omega_2)t \\
& + \frac{3}{4}H_3u_3^2u_0 \cos(\omega_0 - 2\omega_3)t + \frac{3}{4}H_3u_0u_3^2 \cos(\omega_0 + 2\omega_3)t \\
& + \frac{3}{4}H_3u_1^2u_2 \cos(-\omega_2 + 2\omega_1)t + \frac{3}{4}H_3u_2u_1^2 \cos(\omega_2 + 2\omega_1)t \\
& + \frac{3}{4}H_3u_1^2u_3 \cos(-\omega_3 + 2\omega_1)t + \frac{3}{4}H_3u_3u_1^2 \cos(\omega_3 + 2\omega_1)t \\
& + \frac{3}{4}H_3u_2^2u_1 \cos(\omega_1 - 2\omega_2)t + \frac{3}{4}H_3u_1u_2^2 \cos(\omega_1 + 2\omega_2)t \\
& + \frac{3}{4}H_3u_1u_3^2 \cos(\omega_1 - 2\omega_3)t + \frac{3}{4}H_3u_3u_1^2 \cos(\omega_1 + 2\omega_3)t \\
& + \frac{3}{4}H_3u_3u_2^2 \cos(-\omega_1 + 2\omega_2)t + \frac{3}{4}H_3u_3u_2^2 \cos(\omega_3 + 2\omega_2)t \\
& + \frac{3}{4}H_3u_2u_3^2 \cos(\omega_2 - 2\omega_3)t + \frac{3}{4}H_3u_2u_3^2 \cos(\omega_2 + 2\omega_3)t \\
& + \frac{3}{2}H_3u_1u_2u_3 \cos(-\omega_3 + \omega_1 - \omega_2)t + \frac{3}{2}H_3u_1u_2u_3 \cos(\omega_3 + \omega_1 - \omega_2)t \\
& + \frac{3}{2}H_3u_1u_2u_3 \cos(-\omega_1 + \omega_2 + \omega_3)t + \frac{3}{2}H_3u_1u_2u_3 \cos(\omega_1 + \omega_2 + \omega_3)t \\
& + \frac{3}{2}H_3u_0u_1u_2 \cos(\omega_2 + \omega_0 - \omega_1)t + \frac{3}{2}H_3u_0u_1u_2 \cos(\omega_2 + \omega_0 - \omega_1)t \\
& + \frac{3}{2}H_3u_0u_1u_2 \cos(-\omega_2 + \omega_0 + \omega_1)t + \frac{3}{2}H_3u_0u_1u_2 \cos(\omega_2 + \omega_0 + \omega_1)t \\
& + \frac{3}{2}H_3u_0u_1u_3 \cos(-\omega_3 + \omega_0 - \omega_1)t + \frac{3}{2}H_3u_0u_1u_3 \cos(\omega_3 + \omega_0 - \omega_1)t \\
& + \frac{3}{2}H_3u_0u_1u_3 \cos(-\omega_3 + \omega_0 + \omega_1)t + \frac{3}{2}H_3u_0u_1u_3 \cos(\omega_3 + \omega_0 + \omega_1)t \\
& + \frac{3}{2}H_3u_0u_2u_3 \cos(-\omega_3 + \omega_0 - \omega_2)t + \frac{3}{2}H_3u_0u_2u_3 \cos(\omega_3 + \omega_0 - \omega_2)t \\
& + \frac{3}{2}H_3u_0u_2u_3 \cos(-\omega_3 + \omega_0 + \omega_2)t + \frac{3}{2}H_3u_0u_2u_3 \cos(\omega_3 + \omega_0 + \omega_2)t
\end{aligned}$$

olarak bulunur. Bu açınımda temel harmonikler ve IMD'de kullanılacak 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 ifadelerle ayrıca gerek görülürse faz kaymaları ilave edilebilir ve üssel şekilde düzenlenebilir.

*Bu çalışma Gazi Üni. BAP 2004/3410 projesinin bir parçasıdır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Schetzen, M. and Yıldırım, R. "System theory of the single-mode laser-diode" **Opt. Commun.**, 219, 341-350, 2003.
- Yıldırım, R. and Schetzen, M. "Application of the Single-mode Laser Diode System Theory" **Opt. Commun.**, 219, 351-355, 2003.
- Aydin, E. and Yıldırım, R. "Optimizing the Performance of Single-mode Laser Diode System Using Genetic Algorithm", **Optics and Laser in Eng.**, 42, 41-46, July 2004.
- Çelebi, F.V. and Yıldırım, R. "Distortion System Theory of the Two-tone Small signal Input laser Diode" **J. of the Faculty of Engineering and Architecture Gazi University**, Vol 20, No 3, pp373, 2005.
- Ohtsu, M. and S.Kotajima, "Linewidth Reduction of a Semiconductor Laser by Electrical Feedback" **IEEE J.QE.**, Vol 21, pp 1905- 1912, Dec. 1985.
- Sharaf, K. and Ibrahim, M.M "The Effect of Electronics Feedback on Semiconductor lasers" **IEEE J.QE.**, Vol. 26, pp 1347- 1352, Aug. 1990.
- Saboureau, P., Foing J.P. and Schanne, P. " Injection-locked Semiconductor Lasers with Delayed Optoelectronic Feedback" **IEEE J.QE.**, Vol 30, pp 1582- 1591, Sept. 1997.
- Fukushima, T. and Sakamoto, T. " Chaos in Coupled Semiconductor Lasers with an Electronic Delayed Feedback Caused by Injection Locking" **IEEE J.QE.**, Vol 34, pp 750- 758, May 1998.
- Grigorieva, E.V., Haken H. and Kaschenko, S.A. "Theory of Quasiperiodicity in Model of Lasers with Delayed optoelectronic Feedback" **Optics Comm.** Vol 165, pp 279- 292, July 1999.
- Giacomeli, G. M. Calzavara and Arecchi, F.T. " Instabilities in a Semiconductor laser with delayed optoelectronic Feedback, **Optics Comm.**, Vol:74 pp 97- 101, Dec. 1989.
- Lee, C.H., Shin, S.Y. " Selfpulsing, Spectral Bistability, and Chaos in a Semiconductor Laser Diode with Optoelectronic Feedback" **Appl Phys. Lett.** Vol:62, pp 922- 924 May 1993
- 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
- H. D.I.Abarbanel, M. B. Kennel, I. Illing, H.F. Chen, and J.M. Liu, " Synchronization and Communication Using Semiconductor Lasers with Optoelectronic Feedback" **IEEE J.QE.** Vol:37, pp 1301- 1311, Oct. 2001
- Tang, S. and Liu, J.M. " Chaotic Pulsing and Quasi-Periodic Route to Chaos in a Semiconductor with Delayed Optoelectronic Feedback" **IEEE J.QE.**, Vol 37, pp 1301- 1311, March 2001.
- Schetzen, M." **The Volterra and Wiener Theories of Nonlinear Systems**", Malabar, Fla., R.E. Krieger Publishing Co., 2006, reprint edition with additional material.
- Hassine, L. et al., "Volterra Functional Series Expansions for Semiconductor Lasers Under Modulation," **IEEE Journal of Quantum Electronics**, Vol 30, No 4, pp. 918-928, April 1994.
- Tucker, R.S. "High-Speed Modulation of Semiconductor Lasers," **J. Lightwave Tech.** LT-3, No. 6, pp. 1180-1192, Dec. 1985.
- Olshansky, Lanzisa, R. V. W.V. Powazinik, " Universal Relationship Between resonant Frequency and Damping Rate of 1.3 μm InGaAsP Semiconductor Laser" **Apl. Phys. Letters.**, 50 (11), pp.653-655, 1987.
- Navid, R., Clark, J.R., Demirci, M. and Nguyen, C.T.C. "Third-order Intermodulation distortion in Capacitively- Driven CC-beam Micromechanical Resonators", **Micro Electro Mechanical Systems, 2001. MEMS 2001. The 14 th IEEE International Conference on, 21-25 Jan 2001 pp.228 - 231**
- Pipes, L.A. and Harvill, L. R." **Applied Mathematics for Engineers and Physicists, Third edition**", McGraw-Hill International Book Comp., 1983, Tokyo.
- Busgang, J.J. and Ehrman, L., " Analysis of Nonlinear Systems with Multiple Inputs" **Proc. IEEE**, Vol 62, pp.1088-1119, Aug. 1974.
- Bedrosian, E. and Rice, S.O." The Output Properties of Volterra Systems (Nonlinear Systems with Memory) Driven by Harmonic and Gaussian Inputs", **Proc. IEEE**, Vol 59, pp.1688-1707, Dec. 1971.
- Nam, S. and Power, E. J. "On the Selective Counting of Third-Order Products," **IEEE Trans. Commun.**, Vol 43, pp.2405-2413, Aug. 1995.
- Weiner, D.D. and Spina, J.E." **Sinusoidal Analysis and Modeling of Weakly Nonlinear Circuits**", Van Nostrand Reinhold Comp. 1980, New York
- Borges de Carvalho, N. and J.Carlos Pedro, "A Comprehensive Explanation of Distortion Sideband Asymmetries", **IEEE Trans. Microwave Theory Tech.**, vol 50, pp.2090-2101, Sep. 2002.
- Bosh, W. and Gatti, G " Measurement and simulation of memory effects in predistortion linearizers", **IEEE Trans. Microwave Theory Tech.**, vol 37, pp.1885-1890, Dec. 1989.
- Sevic, J.F., Burguer, K.L. and Steer, M.B. " A novel envelope-termination load-pull methods for ACPR optimization of RF/ Microwave power amplifiers", **In IEEE MTT-S Int.Microwave Semp. Dig., Baltimore, MD, 1998, pp. 601-605.**
- Borges de Carvalho, N. and Pedro, J.Carlos " Two-tone IMD asymmetry in microwave power amplifiers ", **In IEEE MTT-S Int.Microwave Semp. Dig., Boston , MA, 2000, pp. 445-448.**
- 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," ", **In IEEE MTT-S Int.Microwave Semp. Dig., 1997, pp. 371-374.**
- Rugh, W.J. " **Nonlinear System Theory**" The Johns Hopkins University Press. Baltimore, 1981.
- "**EAGLE-WARE GENESYS**" -software handbook- Enterprise-2003.