

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**DÖRT TONLU ALT TAŞIYICILI FİBER OPTİK VERİ İLETİM
SİSTEMLERİNDE FREKANS BİLEŞENLERİNİN MODELLENMESİ VE
SİMÜLASYONU**

Beyhan GERGERLİ

BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ANKARA
2010**

Her hakkı saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

DÖRT TONLU ALT TAŞIYICILI FİBER OPTİK VERİ İLETİM SİSTEMLERİNDE FREKANS BİLEŞENLERİNİN MODELLENMESİ VE SİMÜLASYONU

Beyhan GERGERLİ

Ankara Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Fatih V. ÇELEBİ

Bu çalışmada doğrusal olmayan optoelektronik geribeslemeli lazer diyot sisteminin (LDS) Volterra serisi analitik açılımı kullanılarak analizi yapılmıştır. Yapılan analizde, Volterra güç serisi üçüncü dereceye kadar açılarak H1, H2 ve H3 çekirdekleri ve buna bağlı olarak küçük işaret transfer fonksiyonları bulunmuştur. Sistemin girişine uygulanan dört ton küçük işaretin intermodülasyon distorsiyon (IMD) frekans bileşenlerinin analizi yapılmıştır. Çalışmada, fark frekans ve alternatif IMD bileşenlerinin gruplaması yapılarak birlikte analizi yapılmıştır. Analiz için, zaman gecikme sabiti (t_0) ve geri besleme kazanç sabiti (K)'ya bağlı olarak genlik ve band genişliği değerleri tespit edilmiş ve ayrıca alternatif IMD fark frekansları da belirlenmiştir.

Mart 2010, 127 sayfa

Anahtar Kelimeler: Volterra Serisi, Harmonik Distorsiyonu, İntermodülasyon, Asimetrik Haberleşme, Modelleme, Simülasyon, Dört tonlu küçük işaret girişi

ABSTRACT

Master Thesis

MODELLING AND SIMULATION OF THE FREQUENCY COMPONENTS OF FOUR-TONE SUBCARRIER FIBER-OPTIC DATA COMMUNICATION SYSTEM

Beyhan GERGERLİ

Ankara University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Computer Engineering

Supervisor: Assoc Prof. Dr. Fatih V. ÇELEBİ

In this study, laser diode system (LDS) with non-linear optoelectronic feedback is analyzed with Volterra power series analytical expansion. In the analysis, Volterra power series are expanded as H1, H2 and H3 kernels up to third order and depending on this, small signal transfer functions are found. The analysis of intermodulation distortion (IMD) frequency components is performed for four tone small signal input to the LDS. In the analysis both intermodulation distortion difference frequency components and alternative IMD components are put into groups and examined together. Amplitude and bandwidth values are determined with respect to time delay constant (t_0) and feedback gain constant (K) during the analysis. In addition to that alternative IMD difference frequencies are also determined.

March 2010, 127 pages

Key Words: Volterra series, Harmonic distortion, Intermodulation, Asymmetric Communication, Modeling, Simulation, Four tone small signal input.

TEŐEKKÖR

Çalıőmalarımı yönlendiren, araőtırmalarımın her aőamasında bilgi, öneri ve yardımlarını esirgemeyerek engin fikirleriyle bu tezi hazırlamama katkıda bulunan danışman hocam sayın Doç. Dr. Fatih V. ÇELEBİ'ye (Ankara Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği ABD), çalıőmalarım sırasında önemli katkılarda bulunan, desteklerini esirgemeyen ve çalıőmalarımı yönlendiren sayın Yrd. Doç. Dr. Remzi YILDIRIM'a (Gazi Üniversitesi Bilgisayar Eđitimi ABD), çalıőmalarım süresince desteklerini esirgemeyen değerli bölüm başkanımız sayın Prof. Dr. Baki KOYUNCU'ya (Ankara Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği ABD) ve birçok fedakârlıklar göstererek beni destekleyen aileme en derin duygularla teşekkür ederim.

Beyhan GERGERLİ
Ankara, Mart 2010

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	3
2.1 Volterra Fonksiyonu	3
2.2 Yarıiletken Lazer Teorisi	8
2.2.1 Direk ve indirek band geçişleri	8
2.2.2 Işımalı yutma (Absorption) ve ışımaya (Emission)	9
2.2.3 Yutma ve üst seviyeye yükseltme	11
2.2.4 Yarıiletkenlerde ters çoğalma (Population Inversion)	12
2.2.5 Fabry-Perot lazer	12
2.3 Lazer Diyod ve Denklemleri	14
2.3.1 Gevşeme (Relaxation) osilasyonu	19
2.3.2 Küçük işaret analizi (Small signal analysis)	21
2.3.3 Şiddet (Intensity) modülasyonu	22
2.3.4 Frekans kayması (Chirping)	23
2.3.5 Büyük işaret modülasyonu (Large signal modulation)	25
3. MATERYAL VE YÖNTEM	26
4. BULGULAR	38
4.1 IMD Fark Bileşenleri	39
4.1.1 Birinci grup IMD frekans bileşenleri	39
4.1.2 İkinci grup IMD frekans bileşenleri	45
4.1.3 Üçüncü grup IMD frekans bileşenleri	51
4.1.4 Dördüncü grup IMD frekans bileşenleri	56
4.1.5 Beşinci grup IMD frekans bileşenleri	60
4.1.6 Altıncı grup IMD frekans bileşenleri	65
4.1.7 Yedinci grup IMD frekans bileşenleri	69
4.1.8 Sekizinci grup IMD frekans bileşenleri	73
4.2 Alternatif IMD Bileşenleri	78
4.2.1 Birinci grup	78
4.2.2 İkinci grup	83
4.2.3 Üçüncü grup	87
4.2.4 Dördüncü grup	92
4.2.5 Beşinci grup	96
4.2.6 Altıncı grup	101
4.2.7 Yedinci grup	105
4.2.8 Sekizinci grup	110
4.2.9 Dokuzuncu grup	117
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	121
KAYNAKLAR	125
ÖZGEÇMİŞ	127

SİMGELER DİZİNİ

IMD	Intermodülasyon Distorsiyon
SCM	Subcarrier Multiplexing
K	Kazanç sabiti
LD	Lazer Diyod
LDS	Lazer Diyod Sistemi

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Doğrusal olmayan Volterra-Weiner sistem modeli (Schetzen 2006)	7
Şekil 2.2 Yarıiletkenlerde band geçişi (Yıldırım 1996)	8
Şekil 2.3 İki seviyeli sistem (Yıldırım 1996)	10
Şekil 2.4 Optik zayıflama veya yükseltme (Yıldırım 1996)	11
Şekil 2.6 Küçük işaret modülasyon cevabı	23
Şekil 3.1 Doğrusal olmayan üçüncü derece sistemin blok yapısı	27
Şekil 3.2 Taşıyıcı ve foton blok yapısı	30
Şekil 3.3 $n_2(t)$ 'nin(taşıyıcı yoğunluğunun) hesaplanması	30
Şekil 4.1 Birinci grup IMD eğrileri	41
Şekil 4.2 Birinci grup IMD eğrileri	42
Şekil 4.3 Birinci grup IMD eğrileri	43
Şekil 4.4 Birinci grup IMD eğrileri	44
Şekil 4.5 İkinci grup IMD eğrileri	47
Şekil 4.6 İkinci grup IMD eğrileri	48
Şekil 4.7 İkinci grup IMD eğrileri	49
Şekil 4.8 İkinci grup IMD eğrileri	50
Şekil 4.9 Üçüncü grup IMD eğrileri	53
Şekil 4.10 Üçüncü grup IMD eğrileri	54
Şekil 4.11 Üçüncü grup IMD eğrileri	55
Şekil 4.12 Üçüncü grup IMD eğrileri	55
Şekil 4.13 Dördüncü grup IMD eğrileri	57
Şekil 4.14 Dördüncü grup IMD eğrileri	58
Şekil 4.15 Dördüncü grup IMD eğrileri	59
Şekil 4.16 Dördüncü grup IMD eğrileri	59
Şekil 4.17 Beşinci grup IMD eğrileri	62
Şekil 4.18 Beşinci grup IMD eğrileri	62
Şekil 4.19 Beşinci grup IMD eğrileri	63
Şekil 4.20 Beşinci grup IMD eğrileri	64
Şekil 4.21 Altıncı grup IMD eğrileri	66
Şekil 4.22 Altıncı grup IMD eğrileri	67
Şekil 4.23 Altıncı grup IMD eğrileri	68
Şekil 4.24 Altıncı grup IMD eğrileri	68
Şekil 4.25 Yedinci grup IMD eğrileri	71
Şekil 4.26 Yedinci grup IMD eğrileri	71
Şekil 4.27 Yedinci grup IMD eğrileri	72
Şekil 4.28 Yedinci grup IMD eğrileri	73
Şekil 4.29 Sekizinci grup IMD eğrileri	75
Şekil 4.30 Sekizinci grup IMD eğrileri	76
Şekil 4.31 Sekizinci grup IMD eğrileri	77
Şekil 4.32 Sekizinci grup IMD eğrileri	77
Şekil 4.33 Birinci grup IMD eğrileri	80
Şekil 4.34 Birinci grup IMD eğrileri	80
Şekil 4.35 Birinci grup IMD eğrileri	81

Şekil 4.36 Birinci grup IMD eğrileri.....	82
Şekil 4.37 İkinci grup IMD eğrileri	84
Şekil 4.38 İkinci grup IMD eğrileri	85
Şekil 4.39 İkinci grup IMD eğrileri	86
Şekil 4.40 İkinci grup IMD eğrileri	86
Şekil 4.41 Üçüncü grup IMD eğrileri	88
Şekil 4.42 Üçüncü grup IMD eğrileri	89
Şekil 4.43 Üçüncü grup IMD eğrileri	89
Şekil 4.44 Üçüncü grup IMD eğrileri	90
Şekil 4.45 Üçüncü grup IMD eğrileri	91
Şekil 4.46 Üçüncü grup IMD eğrileri	91
Şekil 4.47 Dördüncü grup IMD eğrileri.....	93
Şekil 4.48 Dördüncü grup IMD eğrileri.....	94
Şekil 4.49 Dördüncü grup IMD eğrileri.....	95
Şekil 4.50 Dördüncü grup IMD eğrileri.....	95
Şekil 4.51 Beşinci grup IMD eğrileri.....	98
Şekil 4.52 Beşinci grup IMD eğrileri.....	99
Şekil 4.53 Beşinci grup IMD eğrileri.....	100
Şekil 4.54 Beşinci grup IMD eğrileri.....	100
Şekil 4.55 Altıncı grup IMD eğrileri.....	102
Şekil 4.56 Altıncı grup IMD eğrileri.....	103
Şekil 4.57 Altıncı grup IMD eğrileri.....	104
Şekil 4.58 Altıncı grup IMD eğrileri.....	104
Şekil 4.59 Yedinci grup IMD eğrileri	107
Şekil 4.60 Yedinci grup IMD eğrileri	107
Şekil 4.61 Yedinci grup IMD eğrileri	108
Şekil 4.62 Yedinci grup IMD eğrileri	109
Şekil 4.63 Sekizinci grup IMD eğrileri.....	114
Şekil 4.64 Sekizinci grup IMD eğrileri.....	115
Şekil 4.65 Sekizinci grup IMD eğrileri.....	116
Şekil 4.66 Sekizinci grup IMD eğrileri.....	116
Şekil 4.67 Dokuzuncu grup IMD eğrileri	118
Şekil 4.68 Dokuzuncu grup IMD eğrileri	119
Şekil 4.69 Dokuzuncu grup IMD eğrileri	120
Şekil 4.70 Dokuzuncu grup IMD eğrileri	120

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 4.1 Birinci grup IMD frekans bileşenleri arasındaki ilişki	40
Çizelge 4.2 İkinci grup IMD frekans bileşenleri arasındaki ilişki	46
Çizelge 4.3 Üçüncü grup IMD frekans bileşenleri arasındaki ilişki	52
Çizelge 4.4 Dördüncü grup IMD frekans bileşenleri arasındaki ilişki.....	56
Çizelge 4.5 Beşinci grup IMD frekans bileşenleri arasındaki ilişki.....	61
Çizelge 4.6 Altıncı grup IMD frekans bileşenleri arasındaki ilişki	65
Çizelge 4.7 Yedinci grup IMD frekans bileşenleri arasındaki ilişki.....	70
Çizelge 4.8 Sekizinci grup IMD frekans bileşenleri arasındaki ilişki.....	74
Çizelge 4.9 Birinci grup IMD frekans bileşenleri arasındaki ilişki	79
Çizelge 4.10 İkinci grup IMD frekans bileşenleri arasındaki ilişki	83
Çizelge 4.11 Üçüncü grup IMD frekans bileşenleri arasındaki ilişki	87
Çizelge 4.12 Dördüncü grup IMD frekans bileşenleri arasındaki ilişki.....	92
Çizelge 4.13 Beşinci grup IMD frekans bileşenleri arasındaki ilişki.....	97
Çizelge 4.14 Altıncı grup IMD frekans bileşenleri arasındaki ilişki	101
Çizelge 4.15 Yedinci grup IMD frekans bileşenleri arasındaki ilişki.....	106
Çizelge 4.16 Sekizinci grup IMD frekans bileşenleri arasındaki ilişki.....	113
Çizelge 4.17 Dokuzuncu grup IMD frekans bileşenleri arasındaki ilişki	117
Çizelge 5.1 Toplam band genişliği	122
Çizelge 5.2 $t_0=1.10^{-10}$ için toplam band genişliği ve genlik.....	123
Çizelge 5.3 $t_0=1.10^{-11}$ için toplam band genişliği ve genlik.....	124

1. GİRİŞ

Doğrusal olmayan sistemlerin analizinde pek çok teknik kullanılmaktadır,örneğin: doğrusal olmayan zaman serileri, çok katlı Fourier serileri, çok katlı Laplas dönüşümü, v.b. Doğrusal olmayan sistemlerin analitik analizinde kullanılan tekniklerden biri de çok tonlu girişli doğrusal olmayan sistemlerin Volterra serisiyle analizidir. Bu çalışmada Volterra serisi ile modellenmiş doğrusal olmayan geri beslemeli lazer diyot sistemine dört tonlu giriş uygulanarak modellenmesi ve simülasyonu gerçekleştirilmiştir.

Yarı-iletken lazer diyot, sayısal veya analog fiber optik haberleşme sistemlerinin önemli bir parçası olup bu sistemlerde sıkça kullanılmaktadır. Fiber optik haberleşme sistemlerinin band genişliğini artırmak amacıyla alt-taşıyıcılı modülasyon teknikleri kullanılmakta ve Lazer diyotun doğrusal olmayan özelliği kullanılarak bu sistemler için intermodülasyon frekans bileşenleri türetilmektedir. Özellikle kablo TV sistemlerinde alt-taşıyıcılı çoğullama (subcarrier multiplexing - SCM) tekniği ile lazer diyodun doğrusal olmayan özelliğinden faydalanılmakta ve Intermodülasyon distorsiyon (IMD) analizi ile elde edilen fark frekans bileşenleri kullanılarak fiber optik haberleşme sistemlerinde band genişliği artırılmaktadır (Yıldırım 2008).

Bu çalışmada, Buried Heterostructure (BH) lazer diyot oran denklemleri kullanılarak Volterra güç serisi şeklinde açılmış ve H1, H2 ve H3 çekirdekleri elde edilmiştir. Sistemin girişine uygulanan dört ton küçük işaret girişinden elde edilen IMD frekans bileşenlerinin analizi, kazanç sabiti (K) ve geribesleme zaman gecikmesine (t_0) bağlı olarak yapılmıştır.

Bu çalışmada, dört ton girişli veri iletim hattının alt yapısı değiştirilmeden kullanılan modülasyon tekniği değiştirilerek sistemin band genişliği artırılmıştır. Çalışmada Volterra serisi ile modellenmiş doğrusal olmayan geri beslemeli lazer diyot sistemine dört tonlu giriş uygulanarak sistemin modellenmesi ve simülasyonu gerçekleştirilmiştir.

Tez çalışması; giriş bölümü ile birlikte beş bölümden oluşmaktadır. İkinci bölümde kaynak özetleri, üçüncü bölümde materyal ve yöntem anlatılmış, dördüncü bölümde ise çalışma sonucu elde edilen bulgular ele alınmıştır. Beşinci bölümde, tezin sonucuna yer verilmiştir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Bu bölümde, genel Volterra fonksiyonu, yarı iletken lazer teorisi, lazer diyod ve denklemleri konularının işlendiği kaynakların özetlerine yer verilmektedir.

2.1 Volterra Fonksiyonu

Genel Volterra fonksiyonunun Weiner açılımını ise:

$$G[x] = \sum_{n=0}^{\infty} F_n[x] \quad (2.1)$$

$$F_n[x] = K_0 + \int_a^b \dots \int_a^b h_n(\xi_1, \dots, \xi_n) x(\xi_1) x(\xi_2) \dots x(\xi_n) d\xi_1, \dots, d\xi_n \quad (2.2)$$

K_0 sabitleri, n indisi ise fonksiyonun derecesini göstermektedir (Busgang ve Ehrman 1974, Bedrosian ve Rice 1971).

Volterra fonksiyonel serisi doğrusal olmayan sistemin giriş-çıkışı arasında bir fonksiyonel ilişki olduğunu göstermektedir. Sistemin girişi $x(t)$ ve çıkışı $y(t)$ ile temsil edilmekte, giriş-çıkış arasındaki ilişki ise:

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h_1(\tau) x(t-\tau) d\tau + \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h_2(\tau_1, \tau_2) x(t-\tau_1) x(t-\tau_2) d\tau_1 d\tau_2 + \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h_3(\tau_1, \tau_2, \tau_3) x(t-\tau_1) x(t-\tau_2) x(t-\tau_3) d\tau_1 d\tau_2 d\tau_3 + \dots \quad (2.3)$$

ile verilmektedir (Busgang ve Ehrman 1974).

Eşitlikte gösterilen serinin n. dereceden Volterra çekirdeği, n.dereceden doğrusal olmayan dürtü cevabı (nonlinear impulse response) olarak tanımlanır. Bunun frekans düzlemindeki Fourier dönüşümünden n. dereceden doğrusal olmayan transfer fonksiyonu elde edilir. Bu fonksiyon;

$$H_n(f_1, f_2, \dots, f_n) = \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} h_n(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n) \exp[-j2\pi(f_1\tau_1 + f_2\tau_2 + \dots + f_n\tau_n)] d\tau_1 d\tau_2, \dots, d\tau_n \quad (2.4)$$

şeklinde tanımlanmaktadır.

Ters Fourier dönüşümü uygulanarak elde edilen, n. dereceden doğrusal olmayan dürtü transfer fonksiyonu ise:

$$h_n(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n) = \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} H_n(f_1, f_2, \dots, f_n) \exp[-j2\pi(f_1\tau_1 + f_2\tau_2 + \dots + f_n\tau_n)] df_1 df_2, \dots, df_n \quad (2.5)$$

eşitlik (2.5)'de gösterilmektedir.

Eşitlik (2.3)'deki giriş-çıkış ilişkisi ise:

$$y(t) = \sum_{n=1}^{\infty} y_n(t) \quad (2.6)$$

$$y_n(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} h_n(\tau_1, \dots, \tau_n) x(t - \tau_1) \dots x(t - \tau_n) d\tau_1 \dots d\tau_n \quad (2.7)$$

şeklinde tanımlanır. Eşitlikteki çıkış bileşeni n. derecededir. Eşitlik (2.6) eşitlik (2.7)'de yerine konularak açılırsa:

$$y_n(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} H_n(f_1, f_2, \dots, f_n) \prod_{i=1}^n X(f_i) \exp(j2\pi f_i t) df_i \quad (2.8)$$

eşitlik (2.8) elde edilmektedir.

Yukarıda bahsedilen “derece” terimi, doğrusal olmayan çıkış $y_n(t)$ ile kullanılmaktadır.

Eşitlik (2.8)’in her iki yanına Fourier dönüşümü uygulandığı zaman, n.dereceden çıkış tayfi :

$$y_n(f) = \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} H_n(f_1, \dots, f_n) \delta(f - f_1 - \dots - f_n) \prod_{i=1}^n X(f_i) df_i \quad (2.9)$$

şeklinde elde edilir. Eşitlikte $\delta(\cdot)$ işareti delta fonksiyonunu temsil etmektedir. Giriş–çıkış tayfları arasındaki ilişki eşitlik (2.6) da verilmiştir. Girişe eşit genlikli iki sinüs işareti f_a ve f_b nin toplamı ve $f_b > f_a$ olarak uygulandığında:

$$X(f) = \delta(f + f_a) + \delta(f - f_a) + \delta(f + f_b) + \delta(f - f_b) \quad (2.10)$$

tanımlanır. İkinci dereceden çıkış tayfi $Y_2(f)$, $f_a + f_b, f_b - f_a, 2f_a, 2f_b$ intermodülasyon frekans bileşenine sahiptir.

$Y_2(f)$, $(f_a + f_b)$ IMD frekansı:

$$[H_2(f_b, f - f_a) + H_2(f_a, f - f_b)] \delta(f - f_a - f_b) \quad (2.11)$$

eşitlik (2.11) ile tanımlanmaktadır.

Doğrusal olmayan transfer fonksiyonunun bileşenleri simetrik olarak varsayılmakta ve değişkenlerin yerleri değiştirilebilmektedir. $H_n(f_1, \dots, f_n)$ 'in Impuls cevabı $H_n(\tau_1, \dots, \tau_n)$ bileşenlerinin bir simetrik fonksiyonu olmadığında bu durum geçerli değildir. Burada $H_n(\tau_1, \dots, \tau_n)$ ve $H_n(f_1, \dots, f_n)$ için bu durum geçerli değildir. Ama simetrik olabilirler veya aynı ise eşitlik (2.7) deki gibi olabilir. $y_n(t)$ çıkışı değişkenlerinin her durumu için aynı olabilir.

$$\frac{1}{n!} \sum_{l=1}^{n!} \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} h_n(P_l(\tau)) \exp(-j2\pi P_l(\tau) \cdot f) d\tau_1 \dots d\tau_n = \frac{1}{n!} \sum_{l=1}^{n!} H_n(P_l(f)) \quad (2.12)$$

Eşitlik (2.12)'de yer alan $[f_1, \dots, f_n]$ ve $[\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n]$ ifadelerindeki f ve τ bir vektördür. Her $P_l(\tau)$ ve $P_l(f)$, τ ve f vektörlerinin n bileşenlerinin n! permütasyonu ile ilgili bir vektördür. $P_l(\tau) \cdot f$ ise vektör çarpımıdır. Simetrik fonksiyon S sembolü ile gösterildiğinde:

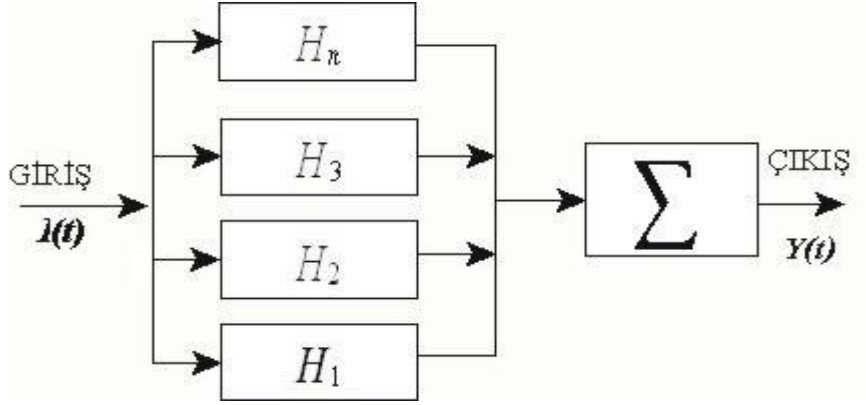
$$S[H_n(f_1, \dots, f_n)] \equiv \frac{1}{n!} \sum_{l=1}^{n!} H_n(P_l(f)). \quad (2.13)$$

eşitlik (2.13) elde edilir. Eşitlik (2.4)'den ise eşitlik (2.14) elde edilir.

$$H_n^*(f_1, \dots, f_n) = H_n(-f_1, \dots, -f_n) \quad (2.14)$$

Eşitlik (2.14)'deki (*) fonksiyonun karmaşık eşleniğini temsil etmektedir.

Bu analiz sonucunda elde edilen doğrusal olmayan sistem modeli şekil 2.1 de gösterilmektedir. Şekildeki çıkış, düşük dereceden paralel kolların toplamıdır.



Şekil 2.1 Doğrusal olmayan Volterra-Weiner sistem modeli (Schetzen 2006)

Eşitlik (2.8) çok boyutlu zaman fonksiyonunun tanımından elde edilmektedir. Çok tayflı yoğunluğu ise eşitlik (2.15)'de verilmektedir.

$$y_n(t_1, \dots, t_n) = \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} H_n(f_1, \dots, f_n) \prod_{i=1}^n X(f_i) \exp(j2\pi f_i t_i) df_i \quad (2.15)$$

Yukarıdaki eşitliğin n-katlı Fourier dönüşümü ya da çok tayflı yoğunluğu ise:

$$Y_n(f_1, \dots, f_n) = \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} y_n(t_1, \dots, t_n) \exp[-j2\pi(f_1 t_1 + \dots + f_n t_n)] dt_1 \dots dt_n \quad (2.16)$$

şeklinde gösterilmektedir. Aynı şekilde,

$$y_n(t_1, \dots, t_n) = \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} Y_n(f_1, \dots, f_n) \exp[j2\pi(f_1 t_1 + \dots + f_n t_n)] df_1 \dots df_n \quad (2.17)$$

eşitlik 2.17 elde edilir.

Eşitlik (2.6) ve eşitlik (2.11) karşılaştırılırsa

$$Y_n(f_1, \dots, f_n) = H_n(f_1, \dots, f_n) X(f_1) \dots X(f_n) \quad (2.18)$$

ve

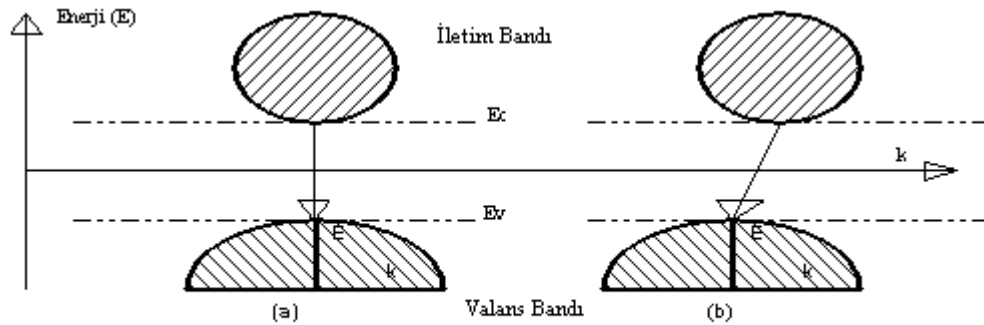
$$Y_n(f) = \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} Y_n(f_1, \dots, f_n) \cdot \delta(f - f_1 - \dots - f_n) df_1, \dots, df_n \quad (2.19)$$

bulunur. Burada $Y_n(f)$, çok tayflı $Y_n(f_1, \dots, f_n)$ yoğunluğun integralidir (Yıldırım 2008).

2.2 Yarıiletken Lazer Teorisi

2.2.1 Direk ve indirek band geçişleri

Yarıiletkenlerde ışımalı birleşme işlemi, direk ve indirek band geçişli maddeler için şekil 2.2' de enerji seviye diyagramları üzerinde gösterilmiştir. Elektron dalga vektörleri $-\pi/a$ ile $+\pi/a$ arasındayken ışıma dalga vektörü $2\pi/\lambda$, ışıma dalgaboyu ise $0.5 \cdot 10^{-6}$ m'dir. Burada, ışıma dalga vektörü elektron dalga vektöründen daha küçüktür.



a)Direk

b)İndirek band geçişli yarıiletken.

Şekil 2.2 Yarıiletkenlerde band geçişi (Yıldırım 1996)

Sadece elektron ve foton parçacıklarının bulunması durumunda elektron aynı dalga vektörüne sahip durumlar arasında bir E-k diyagramında geçiş yapabilmeli veya şekil 2.2.b'deki gibi dikey olmayan geçişlerin olması da mümkündür. Ayrıca dalga vektörünü korumak amacıyla bir foton üretilmeli veya yok edilmelidir (Yariv 1988, Yamamoto 1990, Biswas ve McGee 1991, Salgado ve Reilly 1991, Suematsu ve Adams 1994).

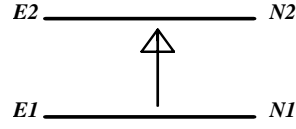
İndirek geçiş işleminde, iki yerine üç parçacık kullanılmakta, bu parçacıklar elektron, delik ve fotondan oluşmaktadır. Işımalı band geçişi olması ihtimali düşüktür. Band içi birleşme hızı $r = Bnp$ olarak tanımlanmıştır. Eşitlikte yer alan B Einstein sabitidir (Hassine 1994, Froidure 1995, Yariv 1991).

2.2.2 Işımalı yutma (Absorption) ve ışımaya (Emission)

Işımalı yutma ve ışımaya işlemi, atomik bir sistemde düşük enerji seviyesi E1 ve yüksek enerji seviyesi E2 olan iki seviyeli basit bir sistem ile açıklanmaktadır. Düşük enerji seviyesindeki bir atom zorlanmış yutma ile yüksek enerji seviyesine çıkarılabilmekte, aynı şekilde üst enerji seviyesindeki atom da zorlanma ile yüksek enerji seviyesine çıkarılabilmekte, ancak bu durumlarda ışımaya oluşmamaktadır. Yüksek enerji seviyesindeki bir atomun düşük enerji seviyesine geçme işlemi iki şekilde oluşmaktadır (Ohtsu 1992).

1. Kendiliğinden Işıma (Spontaneous Emission): Işıma tamamen rastgele oluşmaktadır.
2. Zorlamalı Işıma (Stimulated Emission): Işıma düzgündür.

Her iki ışımada yayılan ışığın enerjisi $h\nu = E_2 - E_1$ dir. Eşitlikteki ν ışımaya frekansı ve h ise Planck sabitidir.



Şekil 2.3 İki seviyeli sistem (Yıldırım 1996)

Şekil 2.3' deki iki seviyeli sistemde E_1 seviyesinden E_2 seviyesine zorlamalı geçiş:

$$W_{12} = B_{12}\rho(\nu) \quad (2.20)$$

yukarıdaki eşitlik ile ifade edilmektedir. Eşitlikteki $\rho(\nu)$ ışımının spektral enerji yoğunluğu, B_{12} ise yutma işleminde Einstein sabitidir.

E_2 seviyesinden E_1 'e geçiş oranı ise aşağıdaki eşitlik ile hesaplanmaktadır.

$$W_{21} = B_{21}\rho(\nu) + A_{21} \quad (2.21)$$

Eşitlik (2.21)'de yer alan A_{21} , E_2 'den E_1 'e geçişte kendiliğinden ışımaya oranıdır. Einstein sabiti ise:

$$A_{21} = 1/\tau_{21} \quad (2.22)$$

eşitlik (2.22)'de tanımlanmaktadır.

Isıl denge şartlarında E_1 ve E_2 enerji seviyeleri için ortalama çoğalma, zaman içinde sabit olup seviye yoğunlukları N_1 ve N_2 olmak üzere aşağıdaki eşitlik ile tanımlanmaktadır.

$$N_2 W_{21} = N_1 W_{12} \quad (2.23)$$

Eşitlikte yer alan N_1 , N_2 sırasıyla E_1 ve E_2 seviyelerindeki çoğalma yoğunluğudur. Eşitlik (2.23) yeniden düzenlendiğinde eşitlik (2.24) elde edilmektedir.

$$N_2/N_1 = [B_{12}\rho(\nu)/B_{21}\rho(\nu) + A_{21}] \quad (2.24)$$

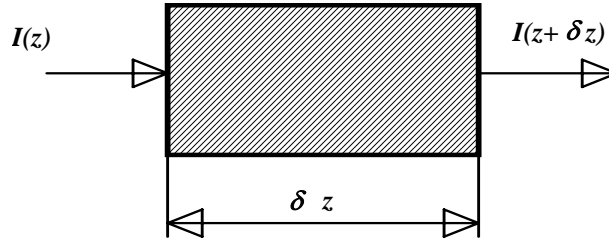
Eşitlikteki B_{21} zorlamalı ışımda, B_{12} ise yutma işlemindeki Einstein sabitleridir ve birbirlerine eşittir (Zorabedian 1994).

2.2.3 Yutma ve üst seviyeye yükseltme

E_2 seviyesinden E_1 seviyesine zorlamalı geçişler N_2W_{21} , E_1 seviyesinden E_2 seviyesine geçişler ise N_1W_{12} şeklinde ifade edilmektedir. Bu durumda birim hacim içerisinde üretilen net ışıma gücü:

$$(P/Hacim) = (N_2W_{21} - N_1W_{12})h\nu \quad (2.25)$$

şeklinde ifade edilmektedir.



Şekil 2.4 Optik zayıflama veya yükseltme (Yıldırım 1996)

Zorlamalı ışıma, normal ışıma ile ilave edildiğinden şekil 2.4'de görüldüğü gibi birim uzunluk başına düşen ışıma yoğunluğundaki artış, aşağıdaki

$$\frac{dI}{dz} = (N_2 - N_1)W_i(\nu)h\nu \quad (2.26)$$

eşitlik ile ifade edilmektedir.

İfadede gelen dalganın şiddeti $W_{21}=W_{12}=W_i(\nu)$ dir.

Denklem çözüldüğünde eşitlik (2.27) elde edilmekte olup, bu eşitlikte yer alan $\gamma(\nu)$ ortamın kazanç sabiti olarak tanımlanmakta ve eşitlik (2.28) ile ifade edilmektedir.

$$I(z) = I(0)e^{\gamma(\nu)z} \quad (2.27)$$

$$\gamma(\nu) = (N_2 - N_1)W_i(\nu)h\nu \quad (2.28)$$

Eşitlik (2.27)'de yer alan üssel ifade de $N_2 > N_1$ ise ters çoğalma, $N_2 < N_1$ ise zayıflama hakimdir. Birinci durum lazerde yükseltmeye karşılık gelirken, ikinci durum atomik sistem içerisinde zayıflamaya karşılık gelmektedir (Zorabedian 1994).

2.2.4 Yarıiletkenlerde ters çoğalma (Population Inversion)

Işıma şiddetinin kuvvetlendirilmesi ya da pozitif kazanç sabiti elde edilebilmesi için aktif ortamda ters çoğalma elde edilmesi gerekmektedir. Bir yarıiletken lazerde ters çoğalma için P-N eklemine yeteri kadar ileri yönde polarlama uygulandığında elektronlar N tarafından, oyuklar ise P tarafından eklem bölgesinden çekilir. Bunun sonucu olarak büyük miktarda elektron ve delik eklem bölgesine enjekte edilir. Sonuçta iletim bandı büyük yoğunlukta elektron, valans bandı ise büyük yoğunlukta delik ihtiva eder. Bu işlem ters çoğalma olarak adlandırılmaktadır (Yariv 1991).

2.2.5 Fabry-Perot lazer

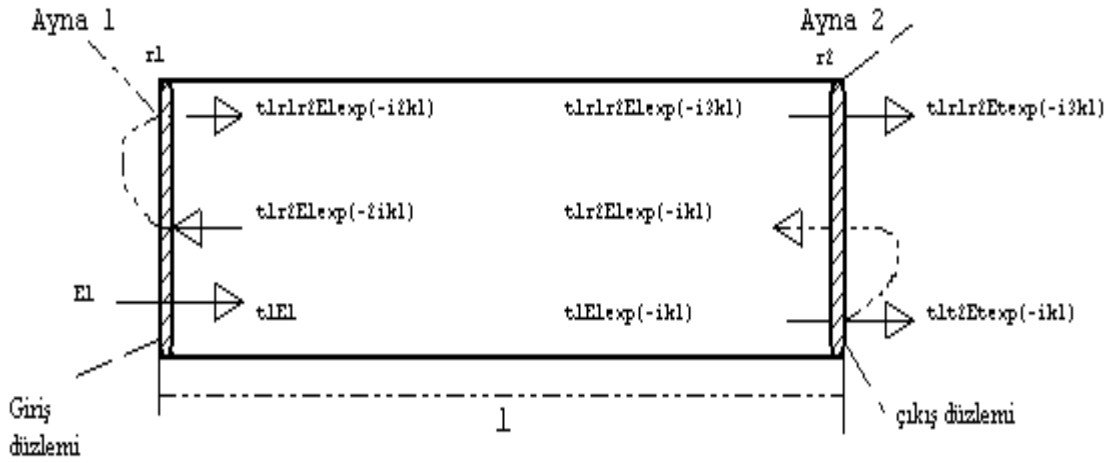
Bir kazanç ortamı içerisinde, uygun frekanslı bir ışık geçtiğinde tek bir geçiş için optik işaret kazancı çok küçüktür. Şekil 2.5'deki gibi ortalama bir yükseltme elde etmek için, lazer ortamı içinde optik işaretin geribeslemesi yapılmalıdır. Optik boşluk yansıtıcı yüzeyleri tarafından ışın geribeslemesi yapıldığından, bir yükselteçten çok bir osilatöre benzemektedir. Yükseltme sırasında optik işaretin çoğu kez geribeslemesi yapılmaktadır. Geçiş başına elde edilen net kazanç bir birimdir ve bunun sonucu sürekli osilasyon elde edilmektedir (Yariv 1991). Fabry-Perot boşluğunun oluşturduğu yansıtıcı yüzey çifti arasında bir dalga yansıtma düzlemi düşünülerek elde edilir. z yönünde yayılan dalganın elektrik alanı aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

$$E_x(z, t) = E_1 e^{-jkz} e^{-j\omega t} \quad (2.29)$$

Eşitlik (2.29) daki x indisi, düzlem dalgaının x yönündeki polarizasyonunu ve k ise ortamdaki dalga yayılım sabitini göstermektedir. Eşitlik (2.29) $E_x(z) = E_1 e^{(-jkz)}$ şeklinde zamandan bağımsız olarak sadeleşmektedir. Yansımalar sonucu oluşan toplam alan:

$$E_t = t_1 t_2 E_1 e^{(-jkL)} \left[1 + r_1 r_2 e^{(-j2kL)} + r_1^2 r_2^2 e^{(-j4kL)} + \dots \right] \quad (2.30)$$

eşitlik (2.30) ile ifade edilmektedir.



Şekil 2.5 Fabry-Perot boşluğunda (cavity) optik geri besleme (Yıldırım 1996)

Burada E_1 giren, E_t çıkan alanın genliği olup r_1 ve r_2 aynaların yansıtma sabitleri, k ise dalga sayısını temsil etmektedir. Eşitlik (2.30), eşitlik (2.31)'de geometrik ortalama olarak düzenlenmiştir (Yariv 1991).

$$E_t = \left[t_1 t_2 e^{(-jkL)} \right] / \left[1 - r_1 r_2 e^{(-j2kL)} \right] \quad (2.31)$$

Eşitlik (2.30)'da osilasyon şartını yerine getirmek üzere payda sıfıra eşitlenmekte, osilasyon şartı durumunda E_t sonsuza giderken E_1 için sıfır elde edilmektedir. Osilasyon durumu, aşağıdaki eşitlik durumunda elde edilmektedir.

$$r_1 r_2 e^{-2kL} = r_1 r_2 e^{-2j(k+\Delta k(\omega))L} e^{(g(\omega)-\alpha)L} = 1 \quad (2.32)$$

İfade, kazanç ve faz şartı olmak üzere ikiye ayrılır. Kazanç ve faz, eşitlik (2.33) ve (2.34)'de verilmektedir (Yariv 1991).

$$g = \alpha + \frac{1}{L} \ln \left[\frac{1}{r_1 r_2} \right] \quad (2.33)$$

$$2[k + \Delta k(\omega)]L = 2\pi m \quad (2.34)$$

Eşitliklerdeki α , ortam kaybı m ise bir tam sayıdır. Yarıiletken lazerlerdeki eşik kazancı, lazer osilasyonu elde etmek için ileri yönde polarlanmış P-N ekleminden akacak injeksiyon akımını ifade etmektedir.

2.3 Lazer Diyod ve Denklemleri

Lazer diyodlar optik haberleşme ve ölçme sistemlerinde referans ışık kaynağı olarak kullanılmaktadır. Lazer diyodların bütün oran eşitlikleri teorik olarak tek mod (single-mode) ışımaya yaptıkları kabul edilerek düzenlenmiştir. Çok modlu (multi-mode) durum analizi yapıldığında yani bütün modlar dikkate alındığında ifadelerde tam düzenlemeler yapılmalıdır (Peterman 1991).

Genel dalga denklemi :

$$\nabla^2 E - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} (\epsilon E) = 0 \quad (2.35)$$

eşitlik (2.35)'deki gibidir. Optik alanın genel şekli ise:

$$E(x, y, z, t) = \frac{1}{2} \Psi(x) \Phi(y) \sum_j \sin(jkz) E_j e^{-ij\omega t} + \dots \text{sabit} \quad (2.36)$$

eşitlik (2.36)'da verilmektedir. Eşitlikteki $\Psi(x)$ ve $\Phi(y)$ z yönünde ilerleyen dalganın boyuna ve enine alan profilleridir. Boşluk içindeki dalga sayısı k_j , $k_0 = 2\pi\nu/c$ ve $\nu = \nu_m = mc/2\mu c$ olup genel ifade aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır.

$$k_j = \mu \Omega_j / c = m_j \pi / L \quad (2.37)$$

Bu ifadelerde L , boşluk uzunluğu, Ω , boşluk rezonans frekansı ν , ışık frekansı ve c ışık hızıdır. Klavuzlanmış dalga modunun etkin dielektrik sabitinin yaklaşık değeri ise:

$$\langle \epsilon \rangle \cong \hat{\mu}^2 + 2\Gamma\hat{\mu}\Delta\mu_p + \frac{i\hat{\mu}\hat{\alpha}}{k_0} \quad (2.38)$$

gibi tanımlanmaktadır (Peterman 1991). Eşitlikte $k_0 = \omega/c$ ve Γ , sıkıştırma (confinement) faktörü, $\Delta\mu_p$, carrier-induced indis değişimi μ mod indis ve α mod yutma sabitidir. Bu eşitlikler;

$$\hat{\mu}^2 \cong (\mu_0^{\text{out}})^2 + \Gamma_2 \left[(\mu_e^{\text{in}})^2 - (\mu_e^{\text{out}})^2 \right] \quad (2.39)$$

$$\hat{\alpha} = (-\Gamma_L\Gamma_T)g + [\Gamma\alpha_0 + (1-\Gamma)\alpha_c + \alpha_{\text{scat}}] + \frac{1}{2L} \ln[1/R_1R_2] \quad (2.40)$$

ile tanımlanmakta olup alan ifadesi ise:

$$\frac{dE}{dt} = \frac{i\hat{\mu}}{\mu_g} (\omega - \Omega)E + \frac{i\omega}{\mu_g} (\Gamma\Delta\mu_p + i\hat{\alpha}/2k_0)E \quad (2.41)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Eşitlik (2.41)'deki alan ise

$$E = Ae^{(-i\phi)} \quad (2.42)$$

ile verilmekte olup bu ifadenin genlik ve fazı ise:

$$\dot{A} = \frac{1}{2} v_g [\Gamma g - (\alpha_{\text{int}} + \alpha_m)] A = \frac{1}{2} v_g \hat{\alpha} \quad (2.43)$$

$$\phi = -\frac{\hat{\mu}}{\mu_g} (\omega - \Omega) - \frac{\omega}{\mu_g} \Gamma \Delta\mu_p \quad (2.44)$$

eşitlikleri ile verilmektedir (Agrawal ve Dutta 1986, Cheo 1990). Burada μ_g grup indisi ve μ ise mode indisidir. Yukarıdaki eşitliklerde $v_g = c/\mu_g$ grup hızı, ω lazer mod frekansıdır. Foton sayısı P, aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır (Cheo 1990).

$$P = \frac{\epsilon_0 \hat{\mu} \mu_g}{2\hbar\omega} \int |E|^2 dV \quad (2.45)$$

Eşitlik (2.45)'deki $\hbar\omega$ foton enerjisidir. $P \propto A^2$ olduğunda çözümden

$$\dot{P} = (G - \gamma)P + R_{sp} \quad (2.46)$$

elde edilmektedir, buradaki G net olarak zorlamalı ışımaya olarak kabul edilmekte ve aşağıdaki eşitlik ifade edilmektedir.

$$G = \Gamma g v_g \quad (2.47)$$

Foton ömrü ise

$$\gamma = v_g (\alpha_m \alpha_{int}) = \tau_p^{-1} \quad (2.48)$$

$$\gamma = v_g \left[\frac{1}{2L} \ln(1/R_1 R_2) + (\Gamma \alpha_0 + (1 - \Gamma) \alpha_c + \alpha_{scat}) \right] \quad (2.49)$$

eşitlikleri ile hesaplanmaktadır (Kressel, 1980). τ_p , boşluk içindeki foton ömrüdür. Faz eşitliği:

$$\phi = -\frac{\hat{\mu}}{\mu_g} (\omega - \Omega) + \frac{1}{2} \beta (G - \gamma) \quad (2.50)$$

eşitlik (2.50) ile hesaplanmaktadır (Salathi 1979). Yukarıdaki eşitlikten de anlaşılacağı üzere kazanç değişince eşik değeri (threshold) ve fazı değişmektedir. Eşitlik (2.50)'de Ω , boyuna mod frekansı, G ise kazançtır.

Aktif bölgedeki taşıyıcı:

$$N = \int n dV \quad (2.51)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Eşitlikte yer alan n , aktif yüzeydeki taşıyıcı yoğunluğudur (Hijelme, Michelson, Beausoleil, McGarvey ve Hagman 1989).

Toplam ışıma ifadesi $R(n)$:

$$R(n) = A_{nt} n + Bn^2 + Cn^3 + R_{st} N_{ph} \quad (2.52)$$

ve taşıyıcı oran eşitliği N :

$$N = I/q - \gamma_e N - GP \quad (2.53)$$

ile bulunmaktadır.

Aktif yüzeydeki akım ise aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$I = WLqdR(n) \quad (2.54)$$

$$J = qdR(n) \quad (2.55)$$

W boşluk genişliği, d aktif tabaka kalınlığı ve L boşluk uzunluğudur.

Kayıplar:

$$\gamma_e = A_{nt} + Bn + Cn^2 = \tau_e^{-1} \quad (2.56)$$

eşitlik (2.56) ile tanımlanmaktadır (Yariv 1988).

Kendiliğinden ışımadaki foton ifadesi aşağıda gösterilmektedir

$$R_{sp} = \beta_{sp} \eta_{sp} \gamma_e N \quad (2.57)$$

iç kuantum verimi $\eta_{sp} = Bn / \gamma_e$ ve β_{sp} kendiliğinden ışımaya faktörü, $\lambda = 2c\pi/\omega$ değeri için ifade:

$$\beta_{sp} = \left[K\Gamma\lambda^2 / 4\pi^2 \mu\hat{\mu}\mu_0 V\Delta\lambda_{sp} \right] \quad (2.58)$$

ile düzenlenmektedir (Ohtsu 1992).

Buradaki μ , gövde indisi (bulk-material index), $\Delta\lambda_{sp}$, kendiliğinden ışımının spektrum genişliği, K ise iyileştirme sabitidir. İndis klavuzlanmış lazerler için K=1'dir. Fakat kazanç klavuzlanmış lazerler için bu değer çok büyüktür. Çok mod oran eşitlikleri aşağıda verilmektedir.

$$\dot{P} = (G_m - \gamma_m)P_m + R_{sp}(\omega_m) \quad (2.59)$$

$$N = \frac{I}{q} - \gamma_e N - \sum_m G_m P_m \quad (2.60)$$

Eşitlikte yer alan G_m , m. modun kazancı olup Fabry-Perot yarıiletken lazerler için mod kayıpları (γ_m) frekanstan bağımsızdır ve bütün modlar için $\gamma_m = \tau_p^{-1}$ alınmaktadır (Yariv 1988).

Eşitlik (2.61):

$$P = 0.5R^{-1/2}(1-R)wd\left(\frac{c}{n}\right)h\omega S / \Gamma \quad (2.61)$$

lazer diyodun optik çıkış gücünü vermektedir. Eşitlikteki P optik çıkış gücünü, S foton yoğunluğunu, n kırılma indisini, R yüzeylerin yansıtma sabitini, w boşluk genişliğini, d aktif tabaka kalınlığını ve Γ ise sıkıştırma faktörünü temsil etmektedir.

Güç için tanımlanmış bir diğer ifade:

$$P = \frac{(I - I_{th})\eta_i h\nu}{e} \frac{(1/L)\ln(1/R)}{\alpha + (1/L)\ln(1/R)} \quad (2.62)$$

eşitlik (2.62) ile verilmektedir. İfade de α etkin iç kayıplar, η_i iç kuantum verimi ve ν ışımaya frekansı olarak tanımlanmaktadır (Zorabedian 1994).

2.3.1 Gevşeme (Relaxation) osilasyonu

Tek mod küçük işaret analizi oran eşitliklerinden foton ve elektron değişim eşitlikleri:

$$\dot{P} = (G - \gamma)P + R_{sp} \quad (2.63)$$

$$N = \frac{I}{q} - \gamma_e N - GP \quad (2.64)$$

ile tanımlanmaktadır (Peterman 1991). Burada zorlamalı ışımaya kazancı G , N 'nin bir fonksiyonudur. İfade de kullanılan P ve N değerleri küçük işaret analizindeki sukunet değerleridir. P ve N 'deki küçük değişimler ise

$$\delta P = -\Gamma_p \delta P + \left(G_N P + \frac{\partial R_{sp}}{\partial N} \right) \delta N \quad (2.65)$$

$$\delta N = -\Gamma_N \delta N - (G + G_p P) \delta P + \frac{dI}{q} \quad (2.66)$$

olarak elde edilmektedir. Burada

$$\Gamma_p = \frac{R_{sp}}{P} G_p P \quad (2.67)$$

$$\Gamma_N = \gamma_e + N \left(\frac{\partial \gamma_e}{\partial N} \right) + G_N P \quad (2.68)$$

ile tanımlanmaktadır. Kazanç $G(N, P)$ ve bunun Taylor serisi açılımı:

$$G(N, P) \cong G + G_N \delta N + G_P \delta P \quad (2.69)$$

ile gösterilmektedir (Cheo 1990). Kazanç ifadeleri $G_N = \partial G / \partial N$ ve $G_P = \partial G / \partial P$ olup G_P genellikle negatiftir (Kressel 1980). P ve N deki küçük değişmeler (2.65) ve (2.66) ifadelerinin çözümünden kolaylıkla elde edilebilir. Zamandan bağımsız logaritmik ifadeleri:

$$\delta P(t) = \delta P_0 e^{(-ht)} \quad (2.70)$$

$$\delta N(t) = \delta N_0 e^{(-ht)} \quad (2.71)$$

ile gösterilmektedir. δP_0 ve δN_0 değişme başlangıç değeri ve sönüm sabiti h aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır.

$$h = \Gamma_R \pm i\Omega_R \quad (2.72)$$

Yukarıdaki eşitlikte yer alan Γ_R eşitlik (2.73) ile hesaplanmaktadır (Kressel 1980).

$$\Gamma_R = \frac{1}{2} (\Gamma_N - \Gamma_P) \quad (2.73)$$

Gevşeme osilasyonunun açısal frekansı ise aşağıdaki eşitlik ile gösterilmektedir.

$$\Omega_R = \left[(G + G_P P) (G_N P + (\partial R_{sp} / \partial N)) - ((\Gamma_N - \Gamma_P) / 4) \right]^{1/2} \quad (2.74)$$

Basitleştirilmiş pratik işlemler için:

$$\Omega_R = (G G_N P)^{1/2} \quad (2.75)$$

eşitlik (2.75) kullanılmaktadır. P 'nin akıma bağlı sükunet halindeki değeri ise:

$$P = I - I_{th} / qG \quad (2.76)$$

eşitlik (2.76)'da gösterilen formül ile hesaplanmaktadır (Tucker ve Pope 1983).

Gevşeme osilasyonu açısai frekansı için diğer alternatif ifade Ω_R ise :

$$\Omega_R = \left[\frac{1 + \Gamma v_g \alpha n_0 \tau_p}{\tau_e \tau_p} \left(\frac{I}{I_{th}} - 1 \right) \right]^{1/2} \quad (2.77)$$

eşitlik (2.77)'deki gibidir. Eşitlikte yer alan n_0 , taşıyıcı yoğunluğunun eşik değeridir. $\tau_e = \gamma_e^{-1}$, $\tau_p = \gamma^{-1}$ alınmakta ve $\Gamma v_g \alpha n_0 \tau_p$ genellikle ihmal edilmektedir (Yariv 1988).

2.3.2 Küçük işaret analizi (Small signal analysis)

Yarıiletken lazer diyodların doğrudan modüle edilebilmesi optik haberleşme sistemleri için çok kullanışlıdır. Modüle işlemleri yarıiletken diyodun besleme akımının modüle edilmesiyle gerçekleşmektedir (Peterman 1991).

Langevin gürültü kaynağı ihmal edilerek tek mod oran eşitliklerinden modülasyon eşitlikleri türetilmekte ve oluşan modülasyon akımı $I(t)$:

$$I(t) = I_b + I_m(t) \quad (2.78)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Yukarıdaki ifade de geçen I_b modülasyon olmadığı zaman diyodun sürekli polarmada ki DC akımı, I_m ise modülasyon akımıdır. Modülasyon akımının etkisiyle $P(t)$, $N(t)$ ve $\phi(t)$ de küçük değişiklikler oluşmakta ve oluşan bu değişikliğin küçük işaret analizinde çok küçük olduğu kabul edilmektedir. Modülasyon derinliği m :

$$m = (\delta P)_{max} / P = [I_m(t)]_{max} / I_b - I_{th} \quad (2.79)$$

eşitlik (2.79) ile hesaplanmaktadır.

Küçük işaret analizi $m \ll 1$ iken geçerli olup küçük işaret yaklaşımı ile P , N ve ϕ 'deki değişimler ise:

$$\delta P = -\Gamma_p \delta P + G_N P \delta N \quad (2.80)$$

$$\delta\dot{N} = -\Gamma_N\delta N - (G + G_p P)\delta P + \frac{I_m(t)}{q} \quad (2.81)$$

$$\delta\dot{\phi} = \frac{1}{2}\beta_C G_N \delta N \quad (2.82)$$

tanımlıdır. Yukarıda gösterilen eşitliklerin frekans düzlemindeki ifadesi ise :

$$\delta\bar{P}(\omega) = \frac{G_N P(I_m(\omega)/q)}{(\Omega_R + \omega - i\Gamma_R)(\Omega_R - \omega + i\Gamma_R)} \quad (2.83)$$

$$\delta\bar{N}(\omega) = \frac{(\Gamma_P + i\omega)(\dot{I}_m(\omega)/q)}{(\Omega_R + \omega - i\Gamma_R)(\Omega_R - \omega + i\Gamma_R)} \quad (2.84)$$

$$\delta\bar{\phi}(\omega) = \frac{1}{2i\omega} [\beta_C G_N \delta\bar{N}] \quad (2.85)$$

eşitlik(2.83), (2.84) ve (2.85) ile verilmektedir (Cheo 1990).

2.3.3 Şiddet (Intensity) modülasyonu

Sinüsodial modülasyon için, $I_m(t)$:

$$I_m(t) = I_P \sin(\omega_m t) \quad (2.86)$$

eşitlik (2.86)'daki gibi şekilde gösterilerek

$$\dot{I}_m(\omega) = -i\pi I_P [\delta(\omega - \omega_m) - \delta(\omega + \omega_m)] \quad (2.87)$$

eşitlik (2.87)'deki gibi tanımlanabilmektedir (Kressel 1980).

Modülasyon frekansı, $\nu_m = \omega_m / 2\pi$ ve IP modülasyon akımının tepe değeridir.

Modüle edilmiş güç :

$$\delta P(t) = \delta P_0 \sin(\omega t + \theta_P) \quad (2.88)$$

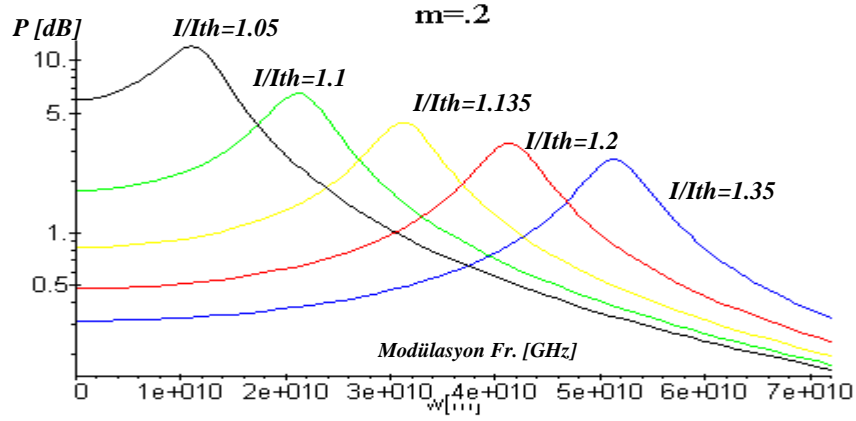
$$\delta P_0 = (G_N P(I_P / q)) / \left[\left(\omega_m^2 - \Omega_R^2 - \Gamma_R^2 \right)^2 + 4\omega_m^2 \Gamma_R^2 \right]^{1/2} \quad (2.89)$$

$$\theta_P = \tan^{-1} \left[(2\Gamma_R \omega_m) / \left(\omega_m^2 - \Omega_R^2 - \Gamma_R^2 \right) \right] \quad (2.90)$$

şeklinde tanımlanmaktadır (Salathi 1979).

Güç foton çoğalması ile doğrusal değişmektedir.

Şekil 2.6'da modülasyon indisi sabit alındığında besleme akımı artırılınca güçte azalma, band genişliğinde ise büyüme olduğu gözlenmektedir.



Şekil 2.6 Küçük işaret modülasyon cevabı

2.3.4 Frekans kayması (Chirping)

Besleme akımı modülasyonu, optik frekansta değişmeye sebep olmaktadır. Sükunet halindeki frekans $\nu_0 = \omega_0 / 2\pi$ olup frekans kayması:

$$\delta\nu(t) = \delta\phi(t) / 2\pi \quad (2.91)$$

şeklinde gösterilmektedir. Lazer frekansındaki bu dinamik frekans kayması (chirping) olarak adlandırılmaktadır.

Dalga boyundaki kayma:

$$\delta\lambda = \left(-\lambda^2/c\right)\lambda v \quad (2.92)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Sinüsoidal modülasyonda frekans kayması :

$$\delta v(t) = \delta v_0 \text{Sin}(\omega_m t + \theta_C) \quad (2.93)$$

$$\delta v_0 = \left[\beta_C I_P G_N / 4\pi q \left[\left(\omega_m^2 + \Gamma_P^2 \right) / \left(\left(\omega_m^2 - \Omega_R^2 - \Gamma_P^2 \right)^2 + \left(2\omega_m \Gamma_R \right)^2 \right) \right]^{1/2} \right] \quad (2.94)$$

şeklinde gösterilmektedir.

Faz ise:

$$\theta_C = \tan^{-1}[\omega_m / \Gamma_P] + \tan^{-1} \left[\left(2\Gamma_R \omega_m \right) / \left(\omega_m^2 - \Omega_R^2 - \Gamma_P^2 \right) \right] \quad (2.95)$$

eşitlik (2.95) ile gösterilmektedir (Agrawal ve Dutta 1986).

Eşitlik (2.74) ve (2.75) sınır değerleri dikkate alındığında ifade daha da basitleştirilip:

$$\delta v_0 = \frac{\beta_C I_P}{4\pi G P q} \left[\omega_m^2 + \Gamma_P^2 \right]^{1/2} \quad (2.96)$$

eşitlik(2.96) elde edilmektedir (Yamamoto 1990). Eşitlikten de anlaşılacağı üzere güç artınca kayma miktarı azalmaktadır.

2.3.5 Büyük işaret modülasyonu (Large signal modulation)

Modülasyon derinliği $m \geq 1$ olduğu zaman yapılan modülasyona büyük işaret modülasyonu denir. Modülasyon derinliği $m = P_0/p$ ile hesaplanmaktadır. Buna göre kayma:

$$\delta v_0 = \frac{1}{2} \beta_C V_m m \quad (2.97)$$

ile bulunmaktadır (Yamamoto 1990).

Hesaplamalarda $\omega_m = 2\pi v_m \gg \Gamma_p$ kabul edilmekte ve $\omega_0 = \Omega$ iken

$$\delta v(t) = \frac{\bar{\phi}(t)}{2\pi} \quad (2.98)$$

ile tanımlanmaktadır (Klinmann ve Kisliuk 1962).

Büyük işaret modülasyonu için δv_0 maksimum frekans kayması:

$$\delta v_0 \cong \frac{\beta_C}{2\pi\Gamma} \quad (2.99)$$

şeklinde tanımlanmaktadır (Koelher ve Goldsborough 1962).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada Volterra serisinin sistem modeli kullanılmıştır. Bunun nedeni, bu sistemin düşük genlikli sistemlerin harmonik analizinde kullanılan tek sistem olmasıdır (Weiner ve Spina 1980).

Volterra çekirdeklerinin sistem teorisi ile ilgili tek-modlu lazer diyodun ayrıntılı çözümleri (Schetzen ve Yıldırım 2003) kaynağında, harmonik distorsiyon, band genişliği, optimizasyon, bağıl şiddet gürültüsü ve iki ve üç ton girişli sistem analizine ve sonuçlarına ayrıntılı olarak (Yıldırım ve Schetzen 2003, Aydın ve Yıldırım 2004, Çelebi ve Yıldırım 2005, Yıldırım 2007, Yıldırım 2006) kaynaklarında yer verilmiştir. Aşağıda ise aynı sistem teorisi kullanılarak 4 ton girişli sistemin analizi yapılmıştır.

Dört ton küçük işaret girişi:

$$I = I_0 + I_1 + I_2 + I_3 + I_4 \quad (3.1)$$

şeklinde gösterilmektedir. İfadelerde, $I_1 = u_1 \cos(\omega_1 t + \delta_1)$, $I_2 = u_2 \cos(\omega_2 t + \delta_2)$, $I_3 = u_3 \cos(\omega_3 t + \delta_3)$, $I_4 = u_4 \cos(\omega_4 t + \delta_4)$, $I_0 = u_0 \cos(\omega_0 t + \delta_0)$ olarak temsil etmektedir. İfadelerde geçen u_1, u_2, u_3 ve u_4 giriş işaretlerinin genliklerini, $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ ve ω_4 frekanslarını, $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ ve δ_4 fazlarını temsil etmektedir. Taşıyıcı işareti ise $I_0 = u_0 \cos(\omega_0 t + \delta_0)$ ile temsil edilmektedir. Burada geçen u_0, ω_0 ve δ_0 ise sırasıyla işaretin genliğini frekansını ve fazını temsil etmektedir.

Lazer diyodun çıkışındaki foton sayısı $P(t)$,

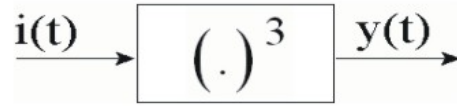
$$\sum P(t) = p_1(t) + p_2(t) + p_3(t) + \dots + p_n(t) \quad (3.2)$$

$n = 1, 2, 3$ şeklinde tanımlanmıştır (Schetzen ve Yıldırım 2003, Yıldırım ve Schetzen 2003).

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.

Lazer diyotun kullanıldığı doğrusal olmayan sistemin girişine uygulanan iki veya daha fazla sayıdaki giriş işaretlerinden elde edilen fark frekans bileşenlerine intermodülasyon distorsiyon (IMD) bileşenleri denir. IMD özellikle haberleşme sistemlerinde band genişliğini artırmak amacıyla kullanılmaktadır.

Şekil 3.1, dört ton girişli doğrusal olmayan üçüncü dereceden sistemi temsil etmektedir. Sistemin çıkışı $y(t)$ ile gösterilmiştir:



Şekil 3.1 Doğrusal olmayan üçüncü derece sistemin blok yapısı

$Y(.) = C + A^0i(.) + A^1i(.) + A^2i(.) + A^3i(.)$ ifadesi Volterra serisi olarak 3. dereceye kadar açılarak Volterra çekirdekleri elde edilir.

Çalışmada, Volterra serisi kullanılmasının nedeni ise düşük genlikli sistemlerin harmonik analizinde kullanılan tek metod olmasındandır.

Yapılan çalışmada tek modlu lazer diyot kullanılmasının sebebi ise gücün tamamını tek bir mod üzerinde taşımaktır. Fiber optik haberleşmede kaynak olarak tek modlu lazer diyot kullanılmaktadır. Çok modlu lazer diyot tercih edilmez, ancak kısa mesafeler için kullanılır.

Yarıiletken lazer diyot, ticari fiber optik haberleşme sistemlerinin önemli bir parçası olup ticari fiber optik sayısal ve analog haberleşme sistemlerinde aynı öneme sahiptir. Bu sistemler arasında özellikle kablolu TV sistemleri için çok önemlidir. Çünkü bu sistemlerde SCM tekniği yaygın olarak kullanılmakta ve lazer diyodun doğrusal

olmayan özelliğinden faydalanılarak intermodülasyon frekans bileşenleri türetilmektedir. Bu şekilde fiber optik haberleşme sisteminin band genişliği artırılmakta ve ticari kazanç elde edilmektedir (Yıldırım 2007).

“Şekil 3.1’deki sistemin açılımı ise aşağıda verilmiştir. Modelde kullanılan tek modlu lazer diyot oran eşitlikleri, eşitlik (3.3) ve (3.4)’de verilmiştir.

$$\frac{dp(t)}{dt} = \Gamma A [n(t) - N_{tr}] [1 - \hat{e}p(t)] p(t) - \frac{1}{\tau_p} p(t) + \frac{\beta \Gamma}{\tau_n} n(t) \quad (3.3)$$

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{1}{q} I(t) - \frac{1}{\tau_n} n(t) - \Gamma A [n(t) - N_{tr}] [1 - \hat{e}p(t)] p(t) \quad (3.4)$$

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

Birinci derece operatörü

Birinci derece operatör için giriş akımı $i(t)$ ’nin, $n_1(t)$ ve $p_1(t)$ birinci derece cevabı:

$$\frac{dp_1(t)}{dt} + B_1 p_1(t) = B_0 n_1(t), \quad (3.5)$$

Eşitlikte geçen B_1 ve B_0 sabitleri eşitlik (3.6) ve (3.7) ile verilmiştir.

$$B_1 = \Gamma A [1 - 2\hat{e}P_0] [N_{tr} - N_0] + \frac{1}{\tau_p} \quad (3.6)$$

$$B_0 = \frac{\beta\Gamma}{\tau_n} + \Gamma AP_0[1 - \hat{\varepsilon}P_0] \quad (3.7)$$

$p_1(t)$ için doğrusal diferansiyel denklem ise eşitlik (3.8) ile verilmiştir.

$$\frac{d^2 p_1(t)}{dt^2} + D_1 \frac{dp_1(t)}{dt} + D_0 p_1(t) = \frac{B_0}{q} i(t), \quad (3.8)$$

Burada geçen D_1 ve D_0 sabitleri eşitlik (3.9) ve (3.10) ile verilmiştir.

$$D_1 = B_0 + B_1 - \frac{(\beta\Gamma - 1)}{\tau_n} \quad (3.9)$$

$$D_0 = \frac{B_0}{\tau_p} - \frac{(\beta\Gamma - 1)}{\tau_n} B_1 \quad (3.10)$$

Eşitlik (3.8)'in iki tarafının Laplace dönüşümü yapılırsa eşitlik (3.11) elde edilir;

$$P_1(s) = H_1(s)I(s) \quad (3.11)$$

Burada eşitlik (3.12) ve (3.13) elde edilir.

$$s = \sigma + j\omega \quad (3.12)$$

$$H_1(s) = \frac{B_0}{q} + \frac{1}{s^2 + D_1 s + D_0} \quad (3.13)$$

Foton değişimi $H_1(s)$, zamanla değişmeyen sistem transfer fonksiyonunun;

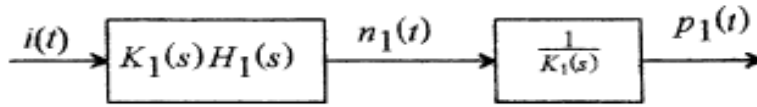
$$p_1(t) = H_1[i(t)] \quad (3.14)$$

giriş akımına bağlı olarak $H1[i(t)]$ operatörüne bağımlı şekilde tanımlanır. Sistem transfer fonksiyonunun $H1(s)$ genliği giriş akımına bağımlıdır.

$$N_1(s) = K_1(s)P_1(s) \quad (3.15)$$

$$N_1(s) = K_1(s)H_1(s)I(s) \quad (3.16)$$

$$K_1(s)H_1(s) = \frac{1}{q} \frac{s + B_1}{s^2 + D_1s + D_0} \quad (3.17)$$

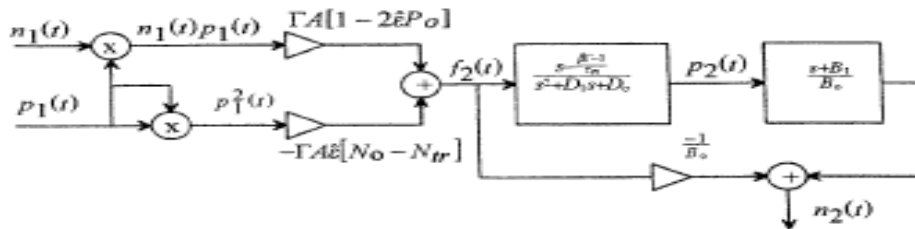


Şekil 3.2 Taşıyıcı ve foton blok yapısı

İkinci derece operatörü

Taşıyıcı $n_2(t)$ ve foton $p_2(t)$ yoğunluğu, giriş akımının $i(t)$ fonksiyonu olarak ikinci çekirdek operatörü içerisindeki ifadesi eşitlik (3.18) ile tanımlanmıştır.

$$\frac{dp_2(t)}{dt} + B_1p_2(t) = B_0n_2(t) + f_2(t), \quad (3.18)$$



Şekil 3.3 $n_2(t)$ 'nin (taşıyıcı yoğunluğunun) hesaplanması

$$f_2(t) = \Gamma A [1 - 2\hat{\epsilon}P_0] n_1(t) p_1(t) - \Gamma A \hat{\epsilon} [N_0 - N_r] p_1^2(t). \quad (3.19)$$

$$\frac{d_2 p_2(t)}{dt^2} + D_1 \frac{dp_2(t)}{dt} + D_0 p_2(t) = \frac{df_2(t)}{dt} - \frac{(\beta\Gamma - 1)}{\tau_n} f_2(t), \quad (3.20)$$

Eşitlik (3.19) ve (3.20)'nin her iki tarafının $p_2(t)$ için iki taraflı Laplace dönüşümünden eşitlik (3.21) elde edilir. Böylece foton çoğalmasının transfer fonksiyonu bulunmuş olur.

$$P_2(s) = \frac{s - \frac{(\beta\Gamma - 1)}{\tau_n}}{s^2 + D_1 s + D_0} F_2(s) \quad (3.21)$$

Eşitlik(3.18) kullanılarak aynı teknikle taşıyıcı yoğunluğu $n_2(t)$ 'in transfer fonksiyonu eşitlik(3.22)'deki gibi elde edilir.

$$N_2(s) = \frac{1}{B_0} \left[\frac{(s + B_1) \left(s - \frac{(\beta\Gamma - 1)}{\tau_n} \right)}{s^2 + D_1(s) + D_0} - 1 \right] F_2(s) \quad (3.22)$$

Üçüncü derece operatörü

Taşıyıcı $n_3(t)$ ve foton $p_3(t)$ yoğunluğunun giriş akımının bir fonksiyonu olarak üçüncü çekirdek operatörü için tanımı aşağıda verilmiştir.

$$\frac{dp_3(t)}{d(t)} + B_1 p_3(t) = B_0 n_3(t) + f_3(t) \quad (3.25)$$

$$f_3(t) = 2\Gamma A \hat{\varepsilon}[N_{ir} - N_0]p_1(t)p_2(t) + \Gamma A[1 - 2\hat{\varepsilon}P_0]n_1(t)p_2(t) + \Gamma A[1 - 2\hat{\varepsilon}P_0]n_2(t)p_1(t) - \Gamma A \hat{\varepsilon}n_1(t)p_1^2(t) \quad (3.26)$$

Bu ifadelerin $n_3(t)$ ve foton $p_3(t)$ için iki yönlü Laplace dönüşümü alınarak foton yoğunluğu aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$P_3(s) = \frac{s - \frac{(\beta\Gamma - 1)}{\tau_n}}{s^2 + D_1s + D_0} F_3(s) \quad (3.27)$$

Taşıyıcı yoğunluğu ise eşitlik (3.28) ile gösterilmiştir.

$$N_3(s) = \frac{1}{B_0} \left[\frac{(s + B_1) \left(s - \frac{(\beta\Gamma - 1)}{\tau_n} \right)}{s^2 + D_1s + D_0} - 1 \right] F_3(s) \quad (3.28)$$

Böylece H1, H2 ve H3 operatörü giriş akımının fonksiyonu olarak elde edilir. Bu ifadelerin çözümünden de her bir çekirdeğin taşıyıcı ve foton yoğunluğunun transfer fonksiyonu bulunur” (Yıldırım 2006).

Şekil 3.1’deki sistemin açılımı yukarıda verilmiştir. Bu sistemin girişine (şekil (3.1)’deki) aşağıdaki 4 tonlu giriş işareti uygulanmıştır. Sistemin girişine uygulanan genel dört ton küçük işaret $i(t)$;

$$i(t) = u_0 \cos(\omega_0 t + \delta_0) + u_1 \cos(\omega_1 t + \delta_1) + u_2 \cos(\omega_2 t + \delta_2) + u_3 \cos(\omega_3 t + \delta_3) + u_4 \cos(\omega_4 t + \delta_4) \quad (3.28)$$

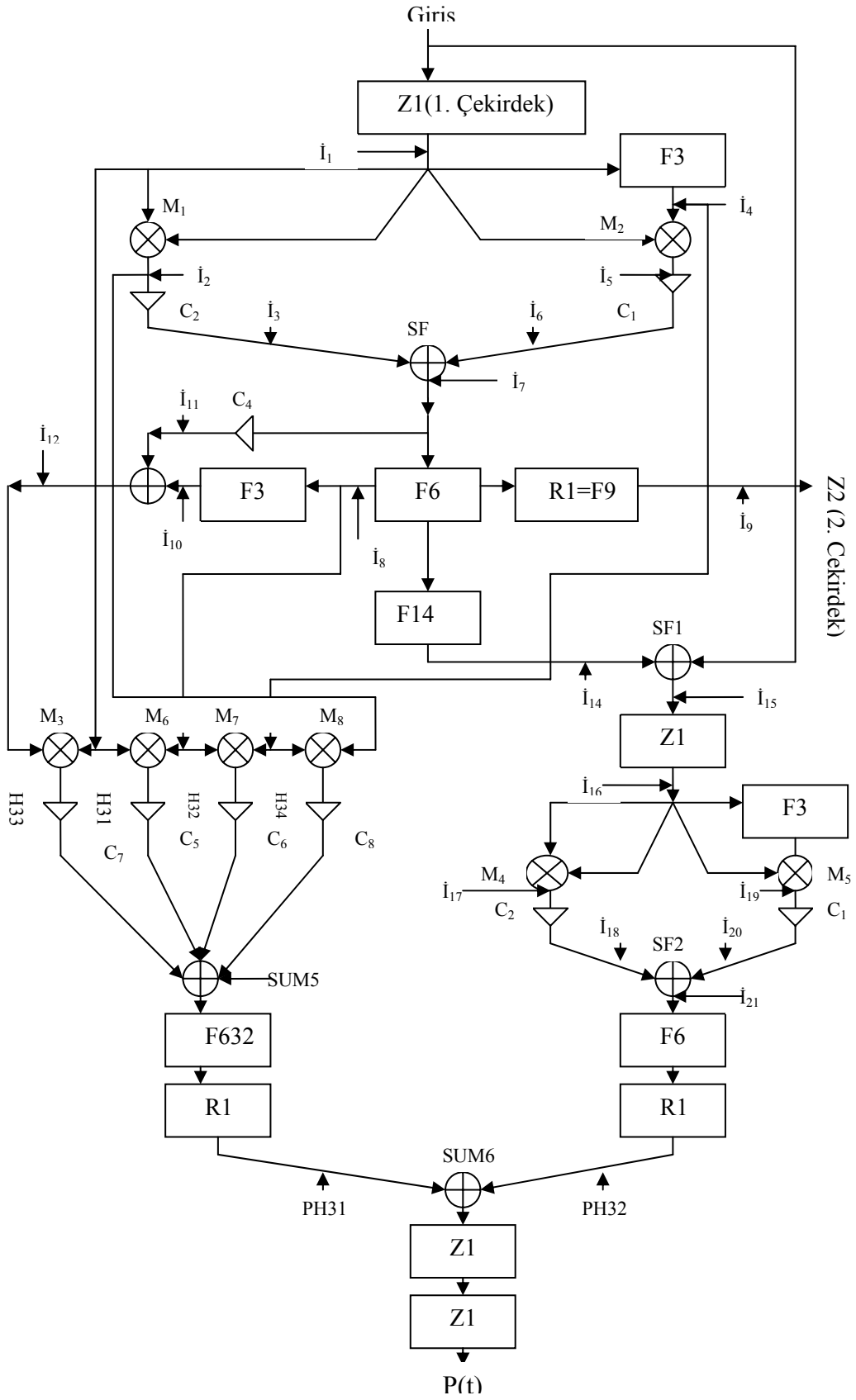
şeklindedir. Dört tonlu giriş işaretinin açılımından aşağıdaki IMD bileşenleri sadeleştirilerek elde edilmiştir.

$$\begin{aligned}
Y(w) = & H_1 U_2 \cos(w_2) + H_1 U_4 \cos(w_4) + H_1 U_0 \cos(w_0) + \frac{3}{4} H_3 U_2^2 U_4 \cos(w_4 + 2w_2) \\
& + \frac{3}{4} H_3 U_0^2 U_2 \cos(w_2 - 2w_0) + \frac{3}{2} H_3 U_2 \cos(w_2) U_3^2 + H_1 U_3 \cos(w_3) \\
& + \frac{3}{4} H_3 U_1 U_4^2 \cos(w_1 + 2w_4) + H_2 U_0 U_4 \cos(w_0 + w_4) + H_2 U_1 U_2 \cos(w_1 + w_2) \\
& + \frac{3}{2} H_3 U_0 U_1 U_3 \cos(w_3 - w_0 + w_1) + \frac{1}{2} H_2 U_2^2 + \frac{3}{2} H_3 U_1^2 U_2 \cos(w_2) \\
& + \frac{3}{4} H_3 U_1^2 U_2 \cos(w_2 - 2w_1) + \frac{3}{4} H_3 U_1^2 U_2 \cos(w_2 + 2w_1) \\
& + \frac{3}{4} H_3 U_0 U_1^2 \cos(w_0 - 2w_1) + \frac{3}{4} H_3 U_0 U_1^2 \cos(w_0 + 2w_1) + H_2 U_0 U_1 \cos(w_0 - w_1) \\
& + H_2 U_0 U_1 \cos(w_0 + w_1) + H_2 U_0 U_2 \cos(-w_0 + w_2) + H_2 U_0 U_2 \cos(w_0 + w_2) \\
& + H_2 U_0 U_3 \cos(-w_0 + w_3) + H_2 U_0 U_3 \cos(w_0 + w_3) + \frac{1}{2} H_2 U_2^2 \cos(2w_2) \\
& + H_2 U_1 U_2 \cos(-w_1 + w_2) + \frac{1}{2} H_2 U_1^2 \cos(2w_1) + \frac{1}{4} H_3 U_4^3 \cos(3w_4) \\
& + \frac{3}{4} H_3 U_1 U_4^2 \cos(w_1 - 2w_4) + \frac{3}{4} H_3 U_4^3 \cos(w_4) \\
& + \frac{3}{2} H_3 U_0 U_2 U_3 \cos(-w_3 - w_0 + w_2) + H_2 U_0 U_4 \cos(w_0 - w_4) + \frac{1}{2} H_2 U_0^2 \cos(2w_0) \\
& + \frac{1}{2} H_2 U_4^2 \cos(2w_4) + \frac{1}{2} H_2 U_4^2 + \frac{1}{4} H_3 U_2^3 \cos(3w_2) + \frac{1}{2} H_2 U_1^2 + \frac{3}{4} H_3 U_2^3 \cos(w_2) \\
& + \frac{3}{2} H_3 U_0 \cos(w_0) U_1^2 + H_2 U_1 U_3 \cos(-w_1 + w_3) + H_2 U_1 U_3 \cos(w_1 + w_3) \\
& + H_2 U_1 U_4 \cos(w_1 - w_4) + H_2 U_1 U_4 \cos(w_1 + w_4) + H_2 U_2 U_3 \cos(w_2 - w_3) \\
& + H_2 U_2 U_3 \cos(w_2 + w_3) + H_2 U_2 U_4 \cos(w_2 - w_4) + H_2 U_2 U_4 \cos(w_2 + w_4) \\
& + H_2 U_3 U_4 \cos(w_3 - w_4) + H_2 U_3 U_4 \cos(w_3 + w_4) + \frac{3}{2} H_3 U_0 \cos(w_0) U_3^2 \\
& + \frac{3}{2} H_3 U_0 \cos(w_0) U_4^2 + \frac{3}{2} H_3 U_0 \cos(w_0) U_2^2 + \frac{3}{2} H_3 U_0 U_2 U_3 \cos(w_3 - w_0 + w_2) \\
& + \frac{3}{2} H_3 U_0 U_2 U_3 \cos(-w_3 + w_0 + w_2) + \frac{3}{2} H_3 U_0 U_2 U_3 \cos(w_3 + w_0 + w_2) \\
& + \frac{3}{2} H_3 U_0 U_1 U_4 \cos(w_4 + w_0 - w_1) + \frac{3}{2} H_3 U_0 U_1 U_4 \cos(-w_4 + w_0 + w_1) \\
& + \frac{3}{2} H_3 U_0 U_1 U_4 \cos(w_4 + w_0 + w_1) + \frac{3}{2} H_3 U_0 U_1 U_4 \cos(-w_4 + w_0 - w_1) \\
& + \frac{3}{2} H_3 U_0 U_1 U_3 \cos(w_3 + w_0 - w_1) + \frac{3}{2} H_3 U_0 U_1 U_3 \cos(w_3 - w_0 - w_1)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{3}{2} H_3 U_0 U_1 U_3 \cos(w_3 + w_0 + w_1) + \frac{3}{2} H_3 U_0 U_2 U_4 \cos(-w_4 - w_0 + w_2) \\
& + \frac{3}{2} H_3 U_0 U_2 U_4 \cos(w_4 - w_0 + w_2) + \frac{3}{2} H_3 U_0 U_2 U_4 \cos(-w_4 + w_0 + w_2) \\
& + \frac{3}{2} H_3 U_0 U_2 U_4 \cos(w_4 + w_0 + w_2) + \frac{3}{4} H_3 U_0 U_3^2 \cos(-w_0 + 2 w_3) \\
& + \frac{3}{4} H_3 U_0 U_3^2 \cos(w_0 + 2 w_3) + \frac{3}{2} H_3 U_3 \cos(w_3) U_4^2 + \frac{3}{4} H_3 U_0 U_4^2 \cos(w_0 - 2 w_4) \\
& + \frac{3}{4} H_3 U_0 U_4^2 \cos(w_0 + 2 w_4) + \frac{3}{2} H_3 U_0^2 U_2 \cos(w_2) + \frac{3}{4} H_3 U_0 U_2^2 \cos(-w_0 + 2 w_2) \\
& + \frac{3}{4} H_3 U_0 U_2^2 \cos(w_0 + 2 w_2) + \frac{3}{4} H_3 U_3 U_4^2 \cos(w_3 - 2 w_4) \\
& + \frac{3}{4} H_3 U_3 U_4^2 \cos(w_3 + 2 w_4) + \frac{3}{2} H_3 U_0^2 U_4 \cos(w_4) + \frac{3}{2} H_3 U_1^2 U_3 \cos(w_3) \\
& + \frac{3}{2} H_3 U_0 U_3 U_4 \cos(-w_4 - w_0 + w_3) + \frac{3}{2} H_3 U_0 U_3 U_4 \cos(w_4 - w_0 + w_3) \\
& + \frac{3}{2} H_3 U_0 U_3 U_4 \cos(-w_4 + w_0 + w_3) + \frac{3}{2} H_3 U_0 U_3 U_4 \cos(w_4 + w_0 + w_3) \\
& + \frac{1}{4} H_3 U_1^3 \cos(3 w_1) + \frac{3}{2} H_3 U_1 U_2 U_3 \cos(-w_3 - w_1 + w_2) \\
& + \frac{3}{2} H_3 U_1 U_2 U_3 \cos(w_3 - w_1 + w_2) + \frac{3}{2} H_3 U_1 U_2 U_3 \cos(-w_3 + w_1 + w_2) \\
& + \frac{3}{2} H_3 U_1 U_2 U_3 \cos(w_3 + w_1 + w_2) + \frac{3}{4} H_3 U_0^2 U_2 \cos(w_2 + 2 w_0) \\
& + \frac{3}{4} H_3 U_0^2 U_4 \cos(-w_4 + 2 w_0) + \frac{3}{4} H_3 U_0^2 U_4 \cos(w_4 + 2 w_0) + \frac{3}{2} H_3 U_1^2 U_4 \cos(w_4) \\
& + \frac{3}{2} H_3 U_1 \cos(w_1) U_2^2 + \frac{3}{4} H_3 U_1^2 U_3 \cos(w_3 - 2 w_1) + \frac{3}{4} H_3 U_1^2 U_3 \cos(w_3 + 2 w_1) \\
& + \frac{3}{2} H_3 U_1 \cos(w_1) U_3^2 + \frac{3}{4} H_3 U_1^2 U_4 \cos(-w_4 + 2 w_1) + \frac{3}{4} H_3 U_1^2 U_4 \cos(w_4 + 2 w_1) \\
& + \frac{3}{2} H_3 U_1 \cos(w_1) U_4^2 + \frac{3}{4} H_3 U_1 U_2^2 \cos(-w_1 + 2 w_2) + \frac{3}{4} H_3 U_1 U_2^2 \cos(w_1 + 2 w_2) \\
& + \frac{3}{2} H_3 U_2^2 U_3 \cos(w_3) + \frac{3}{4} H_3 U_1 U_3^2 \cos(-w_1 + 2 w_3) + \frac{3}{4} H_3 U_1 U_3^2 \cos(w_1 + 2 w_3) \\
& + \frac{3}{2} H_3 U_2^2 U_4 \cos(w_4) + \frac{3}{2} H_3 U_2 U_3 U_4 \cos(w_4 + w_2 - w_3) \\
& + \frac{3}{2} H_3 U_2 U_3 U_4 \cos(-w_4 + w_2 + w_3) + \frac{3}{2} H_3 U_2 U_3 U_4 \cos(w_4 + w_2 + w_3) \\
& + \frac{3}{2} H_3 U_2 U_3 U_4 \cos(-w_4 + w_2 - w_3) + \frac{3}{2} H_3 U_1 U_2 U_4 \cos(w_4 - w_1 + w_2) \\
& + \frac{3}{2} H_3 U_1 U_2 U_4 \cos(-w_4 + w_1 + w_2) + \frac{3}{2} H_3 U_1 U_2 U_4 \cos(w_4 + w_1 + w_2) \\
& + \frac{3}{2} H_3 U_1 U_2 U_4 \cos(-w_4 - w_1 + w_2) + H_1 U_1 \cos(w_1) + \frac{1}{4} H_3 U_0^3 \cos(3 w_0)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{3}{4} H_3 U_0^3 \cos(w_0) + \frac{1}{4} H_3 U_3^3 \cos(3 w_3) + \frac{3}{4} H_3 U_3^3 \cos(w_3) + \frac{1}{2} H_2 U_0^2 \\
& + \frac{3}{4} H_3 U_1^3 \cos(w_1) + \frac{3}{2} H_3 U_1 U_3 U_4 \cos(-w_4 - w_1 + w_3) \\
& + \frac{3}{2} H_3 U_1 U_3 U_4 \cos(w_4 - w_1 + w_3) + \frac{3}{2} H_3 U_1 U_3 U_4 \cos(-w_4 + w_1 + w_3) \\
& + \frac{3}{2} H_3 U_1 U_3 U_4 \cos(w_4 + w_1 + w_3) + \frac{3}{4} H_3 U_2 U_3^2 \cos(w_2 - 2 w_3) \\
& + \frac{3}{4} H_3 U_2 U_3^2 \cos(w_2 + 2 w_3) + \frac{3}{4} H_3 U_2 U_4^2 \cos(w_2 - 2 w_4) \\
& + \frac{3}{4} H_3 U_2 U_4^2 \cos(w_2 + 2 w_4) + \frac{3}{2} H_3 U_0^2 U_1 \cos(w_1) + \frac{3}{4} H_3 U_0^2 U_1 \cos(-w_1 + 2 w_0) \\
& + \frac{3}{4} H_3 U_0^2 U_1 \cos(w_1 + 2 w_0) + \frac{3}{2} H_3 U_0^2 U_3 \cos(w_3) + \frac{3}{2} H_3 U_3^2 U_4 \cos(w_4) \\
& + \frac{3}{4} H_3 U_0^2 U_3 \cos(w_3 - 2 w_0) + \frac{3}{4} H_3 U_0^2 U_3 \cos(w_3 + 2 w_0) \\
& + \frac{3}{4} H_3 U_3^2 U_4 \cos(-w_4 + 2 w_3) + \frac{3}{4} H_3 U_3^2 U_4 \cos(w_4 + 2 w_3) \\
& + \frac{3}{4} H_3 U_2^2 U_3 \cos(-w_3 + 2 w_2) + \frac{3}{4} H_3 U_2^2 U_3 \cos(w_3 + 2 w_2) + \frac{3}{2} H_3 U_2 \cos(w_2) U_4^2 \\
& + \frac{3}{4} H_3 U_2^2 U_4 \cos(-w_4 + 2 w_2) + \frac{3}{2} H_3 U_0 U_1 U_2 \cos(w_2 - w_0 + w_1) \\
& + \frac{3}{2} H_3 U_0 U_1 U_2 \cos(w_2 + w_0 - w_1) + \frac{3}{2} H_3 U_0 U_1 U_2 \cos(w_2 - w_0 - w_1) \\
& + \frac{3}{2} H_3 U_0 U_1 U_2 \cos(w_2 + w_0 + w_1) + \frac{1}{2} H_2 U_3^2 + \frac{1}{2} H_2 U_3^2 \cos(2 w_3)
\end{aligned}$$

Hesaplamalar için aşağıdaki algoritma (Şekil 3.4) kullanılmıştır.



Şekil 3.4 Akış diyagramı

Bu açınımda elde edilen bileşenler gruplanarak detaylı olarak Bulgular bölümünde incelenmiştir.

4. BULGULAR

Bu çalışmada, dört ton girişli küçük işaret teknik kullanılarak IMD frekans bileşenleri elde edilerek analiz yapılmıştır. Bu analizde;

- DC bileşenler kullanılmamakta,
- Taşıyıcının (ω_0) olduğu IMD fark bileşenleri genelde tercih edilmemektedir. Bunun sebebi taşıyıcı olduğundan dolayı oluşan filtreleme problemidir.
- Tam harmonikler IMD'de kullanılmamaktadır.
- İkinci harmonik frekansından büyük olan, IMD frekans bileşenleri tercih edilmemektedir. Çünkü katsayı arttıkça güç zayıflamaktadır.

Bu çalışmada IMD fark frekans bileşenleri ve ω_0 'ın yer aldığı alternatif IMD bileşenlerinin analizi yapılmıştır. Gruplama, harmonikler temel alınarak yapılmıştır.

4.1 IMD Fark Bileşenleri

IMD frekans bileşenleri 8 grup olarak incelenmiştir. Bu gruplar aşağıda verilmiştir.

4.1.1 Birinci grup IMD frekans bileşenleri

Birinci grup IMD frekans bileşenlerinden yedi farklı fark bileşeni elde edilmiştir.

Bunlar;

1. $(-\omega_4 + \omega_3), (\omega_3 + \omega_4),$
2. $(\omega_2 + \omega_4), (\omega_2 - \omega_4),$
3. $(\omega_3 + \omega_2), (-\omega_2 + \omega_3),$
4. $(\omega_4 + \omega_1), (-\omega_4 + \omega_1),$
5. $(\omega_3 + \omega_1),$
6. $(-\omega_1 + \omega_3),$
7. $(-\omega_2 + \omega_1), (\omega_1 + \omega_2)$

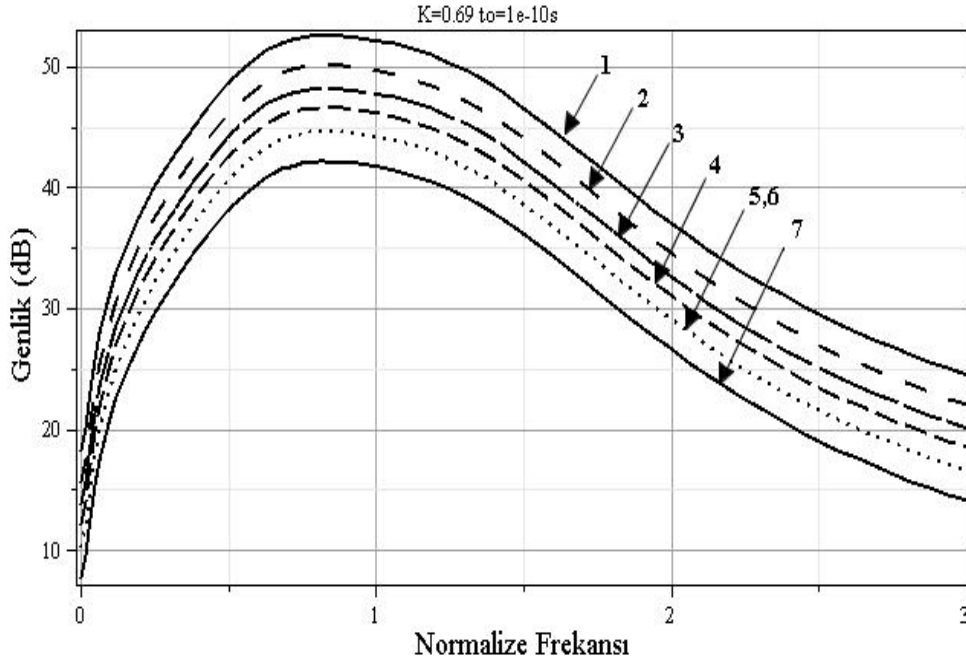
olarak bulunmuştur.

IMD frekans bileşenlerinin genlikleri ve farkları, geri besleme kazanç sabiti (K) ve zaman gecikmesine bağlı olarak IMD frekans bileşenlerinin genlik değerleri aşağıdaki çizelge 4.1'de verilmiştir. Çizelgede verilen değerlere göre genlik farkları incelendiğinde K=0,69 için değerler birbirine çok yakınken, K=1 için 6. ve 7. grup farklılık göstermektedir. Gecikme zamanı $t_o = 1.10^{-10} s$ iken 3. grup, $t_o = 1.10^{-11} s$ olduğu durumda ise 6. ve 7. grup farklılık göstermektedir.

Çizelge 4.1 Birinci grup IMD frekans bileşenleri arasındaki ilişki

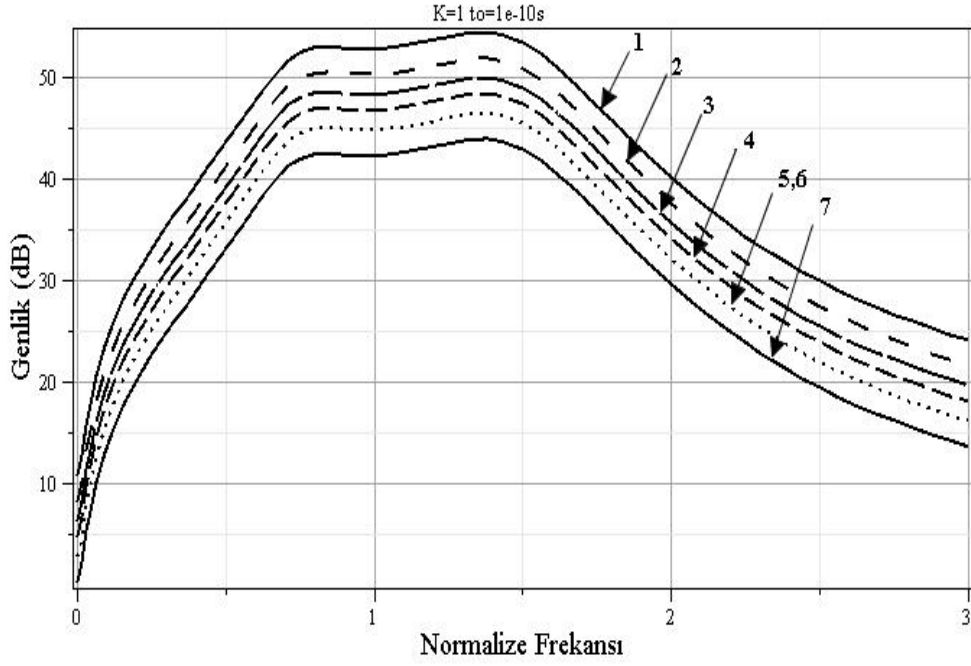
IMD Bileşenleri		GENLİK (dB)						
		1	2	3	4	5	6	7
K=0.69	$t_0=1.10^{-10}$ s	52,75	50,25	48,25	46,75	44,84	44,84	42,24
	$t_0=1.10^{-11}$ s	21,40	18,72	16,80	15,13	13,21	13,21	10,78
K=1	$t_0=1.10^{-10}$ s	54,46	51,99	49,90	48,47	46,57	46,57	44,00
	$t_0=1.10^{-11}$ s	27,62	25,26	23,20	21,58	19,67	17,16	16,28
K=0.69	Genlik Farkı	31,35	31,53	31,45	31,62	31,63	31,63	31,46
K=1	Genlik Farkı	26,84	26,73	26,70	26,89	26,90	29,41	27,72
$t_0=1.10^{-10}$	Genlik Farkı	-1,71	-1,74	-1,65	-1,72	-1,73	-1,73	-1,76
$t_0=1.10^{-11}$	Genlik Farkı	-6,22	-6,54	-6,40	-6,45	-6,46	-3,95	-5,5

Şekil 4.1-4.2 gecikme zamanı $t_0 = 1.10^{-10}$ s, geri besleme sabitine bağlı olarak elde edilen IMD frekanslarının genlik değerleri görülmektedir. Gecikme zamanı $t_0 = 1.10^{-10}$ s iken $K=0,69$ için 7 nolu IMD frekans bileşeni için 42,24dB, 1 nolu IMD fark bileşeni için 52,75dB'dir. Normalize frekans band genişliği değerleri sırasıyla 0,75, 1,07, 0,78, 0,96, 0,80, 0,80 ve 0,84 olarak bulunmuştur. Band genişliği olarak -3dB için en büyük değer 2 nolu ve en küçük değer ise 1 nolu IMD frekans bileşeninden elde edilmiştir. Bu şartlar altında grubun toplam band genişliği teorik olarak 6.10^{10} Hz hesaplanmıştır.



Şekil 4.1 Birinci grup IMD eğrileri

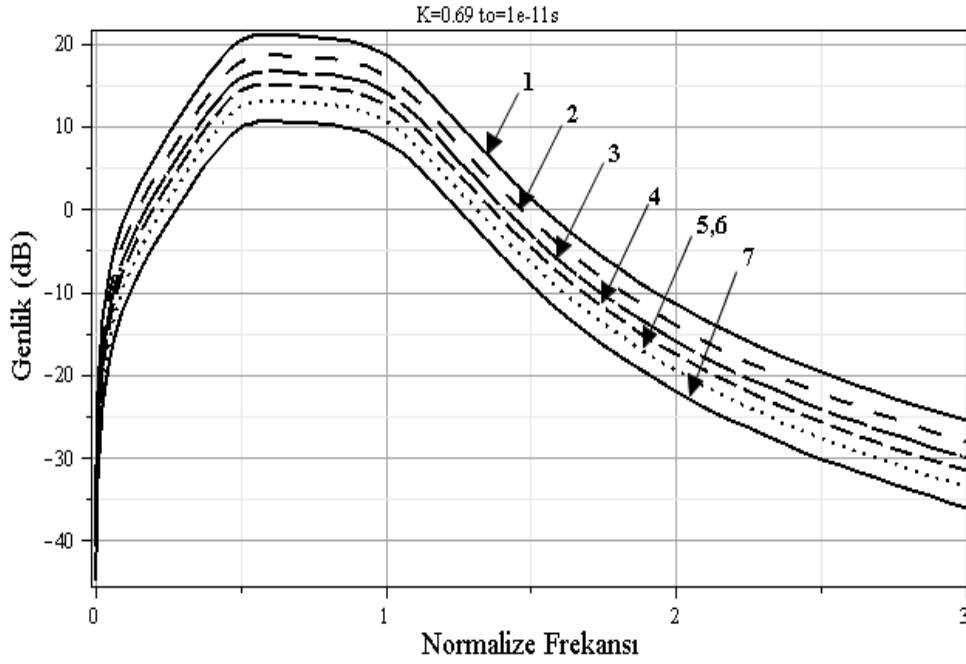
Şekil 4.2’de ise geri besleme sabiti $K=1$ için en küçük genlik değeri 44,00dB, en büyük genlik değeri ise 54,46dB olarak bulunmuştur. Bu şartlar altında ise -3dB için band genişliği 0,96, 0,91, 0,93, 0,91, 0,91, 0,91 ve 0,90 olarak bulunmuştur. Normalizasyon frekans band genişliği toplam $6,43 \cdot 10^{10}$ Hz olarak hesaplanmıştır. En büyük band genişliği 1 nolu IMD frekans bileşeni için 0,96 olarak elde edilmiştir. Geri besleme kazanç sabiti $K=0,69$ ve $K=1$ için farklı IMD frekans bileşeninin de en büyük band genişliğinde değişim olmuştur. Kazanç geri beslemesi $K=0,69$ ve $t_o = 1 \cdot 10^{-10}$ s için 5 ve 6 nolu IMD frekans bileşenleri simetrik genlikte bulunmuştur. $K=1$ ve $t_o = 1 \cdot 10^{-11}$ s olduğu durumda ise 5 ve 6 nolu IMD frekans bileşenleri arasındaki simetrik durum değişmektedir. Bu durumda iki IMD frekans bileşeni için asimetrik yapı ortaya çıkmaktadır.



Şekil 4.2 Birinci grup IMD eğrileri

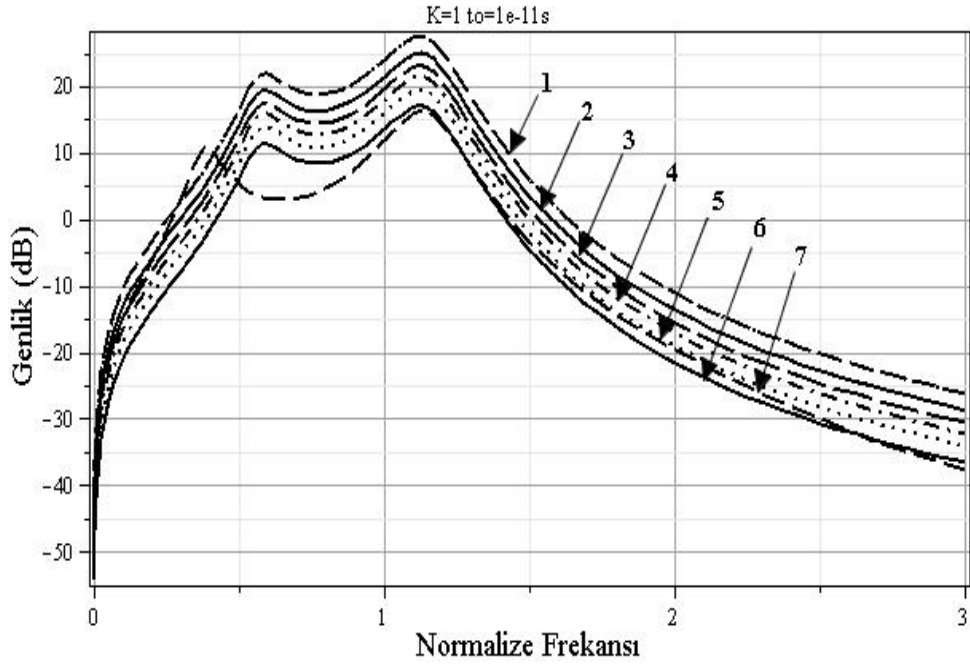
Şekil 4.3-4.4 gecikme zamanı $t_o = 1.10^{-11} s$, geri besleme sabiti (K) bağlı olarak elde edilen IMD frekanslarının genlik değerleri görülmektedir.

Şekil 4.3'te gecikme zamanı $t_o = 1.10^{-11} s$ iken $K=0,69$ için en küçük genlik değeri 7 nolu IMD bileşeni için 10,78dB, en büyük genlik değeri ise 1 nolu IMD bileşeni için 21,40 dB olarak bulunmuştur. Normalize frekans band genişliği değerleri sırasıyla 0,60, 0,56, 0,59, 0,61, 0,61, 0,61 ve 0,59'dur. Bu şartlar altında -3dB için toplam normalize frekans band genişliği $4,17.10^{11}$ Hz olarak hesaplanmıştır. En büyük band genişliği 4,5 ve 6 nolu IMD frekans bileşeni için normalize frekans band genişliği 0,61 olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.3 Birinci grup IMD eğrileri

Şekil 4.4'te ise $t_o = 1.10^{-11} s$ iken $K=1$ için en küçük genlik değeri 16,28dB, en büyük genlik değeri ise 27,62dB olarak gözlenmiştir. Normalize frekans band genişliği değerleri sırasıyla 0,80, 0,21, 0,20, 0,15, 0,18, 0,17 ve 0,20 bulunmuştur. Bu şartlar altında -3dB için toplam normalize frekans band genişliği $1,91.10^{11}$ Hz olarak hesaplanmıştır. En büyük band genişliği 1 nolu IMD frekans bileşeni için normalize frekans band genişliği değeri 0.80 olarak elde edilmiştir. Burada şekil 4.1- 4.2 ve 4.3'te görülen 5 ve 6 nolu IMD frekans bileşenlerinin simetri durumu ortadan kalkmış ve ilk 5 grup IMD fark bileşenleri için genlik farkı değerleri birbirlerine eşit kabul edilecek kadar yakın değerlerden oluşurken 6. grup IMD frekans bileşenleri için -3,95dB, 7.grup için ise -5,5dB olarak farklılık göstermektedir



Şekil 4.4 Birinci grup IMD eğrileri

4.1.2 İkinci grup IMD frekans bileşenleri

İkinci grup IMD frekans bileşenlerinden sekiz farklı fark bileşeni elde edilmiştir.

Bunlar;

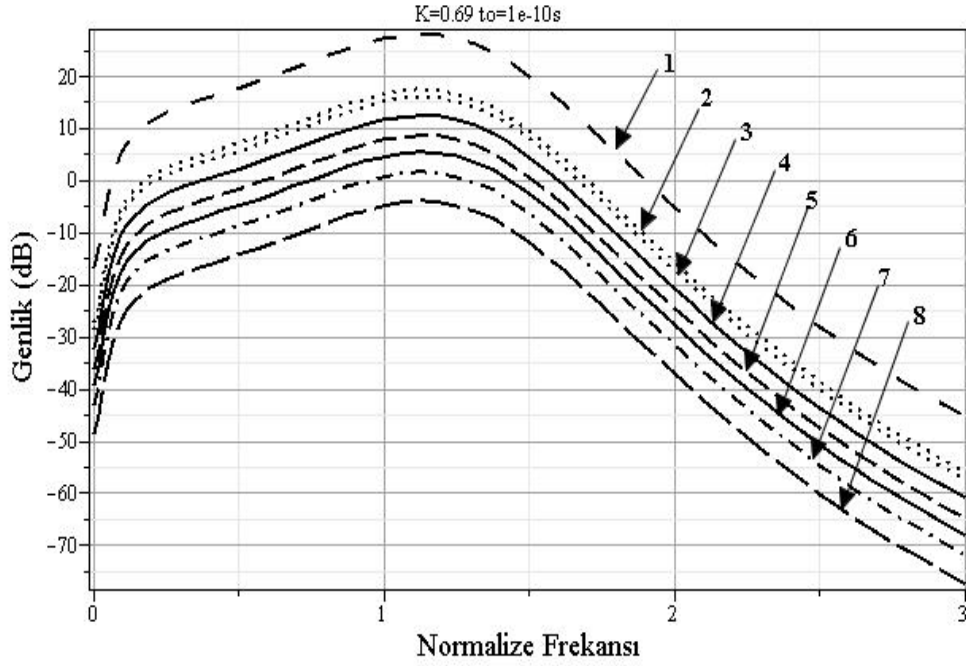
1. $(2\omega_2 + 2\omega_1)$,
2. $(2\omega_3 + 2\omega_4)$,
3. $(-2\omega_4 + 2\omega_3)$,
4. $(2\omega_4 - 2\omega_2, (2\omega_2 + 2\omega_4)$,
5. $(-2\omega_2 + 2\omega_3), (2\omega_3 + 2\omega_2)$,
6. $(2\omega_1 + 2\omega_4), (2\omega_1 - 2\omega_4)$,
7. $(-2\omega_1 + 2\omega_3), (2\omega_3 + 2\omega_1)$,
8. $(-2\omega_2 + 2\omega_1)$

IMD frekans bileşenlerinin genlikleri ve farkları, geri besleme kazanç sabiti (K) ve zaman gecikmesine bağlı olarak IMD frekans bileşenlerinin genlik değerleri aşağıdaki çizelge 4.2’de verilmiştir. Çizelgede verilen değerlere göre $K=0,69$ ve $K=1$ için genlik farkları tüm gruplar için birbirine çok yakın değerlerden oluşmaktadır. $t_o = 1.10^{-10} s$ iken tüm gruplar incelendiğinde genlik farklarının birbirine çok yakın değerlerden oluştuğu ve $t_o = 1.10^{-11} s$ durumunda ise 1, 2, 5 ve 7. gruplar için -40 dB civarında, 3,4,6 ve 8. gruplarda ise -41dB civarında olmak üzere kendi içinde iki farklı grup oluştuğu görülmüştür.

Çizelge 4.2 İkinci grup IMD frekans bileşenleri arasındaki ilişki

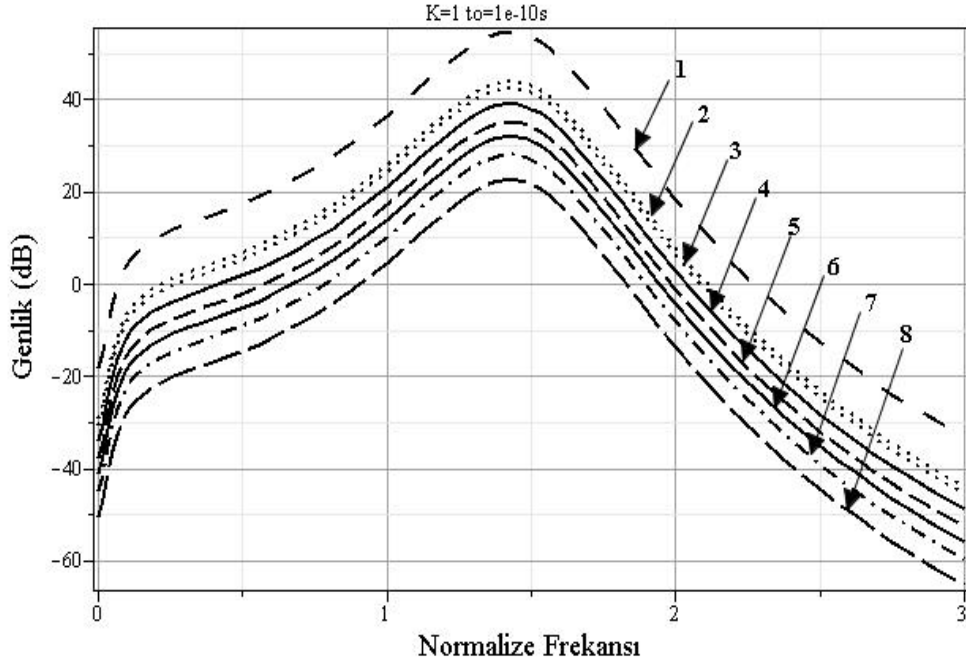
IMD Bileşenleri		GENLİK (dB)							
		1	2	3	4	5	6	7	8
K=0.69	$t_0=1.10^{-10}$ s	28,22	17,82	16,16	5,66	8,70	5,66	1,76	-3,38
	$t_0=1.10^{-11}$ s	-25,25	-35,94	-37,74	-48,28	-44,81	-48,28	-51,85	-57,69
K=1	$t_0=1.10^{-10}$ s	54,57	44,40	42,70	32,36	35,33	32,36	28,29	22,76
	$t_0=1.10^{-11}$ s	15,29	4,77	3,31	-7,19	-4,40	-7,19	-11,44	-16,60
K=0.69	Genlik Farkı	53,47	53,76	53,90	53,94	53,51	53,94	53,61	54,31
K=1	Genlik Farkı	39,28	39,63	39,39	39,55	39,73	39,55	39,73	39,36
$t_0=1.10^{-10}$ s	Genlik Farkı	-26,35	-26,58	-26,54	-26,70	-26,63	-26,70	-26,53	-26,14
$t_0=1.10^{-11}$ s	Genlik Farkı	-40,54	-40,71	-41,05	-41,09	-40,41	-41,09	-40,41	-41,09

Şekil 4.5-4.6'da gecikme zamanı $t_0 = 1.10^{-10}$ s ve geri besleme sabitine (K) bağlı olarak taşıyıcıdan elde edilen fark frekanslarının genlik değerleri görülmektedir. Şekil 4.5'te gecikme zamanı $t_0 = 1.10^{-10}$ s iken K=0,69 için en küçük genlik değeri -3,38dB, en büyük genlik değeri ise 28,22dB'dir. Normalize frekans band genişliği değerleri sırasıyla 0,63, 0,47, 0,46, 0,47, 0,44, 0,37, 0,85 ve 0,47 olarak bulunmuştur. Band genişliği olarak -3dB için en büyük değer 7 nolu ve en küçük değer ise 6 nolu IMD frekans bileşeninden elde edilmiş ve toplam band genişliği $4,16.10^{10}$ Hz olarak hesaplanmıştır.



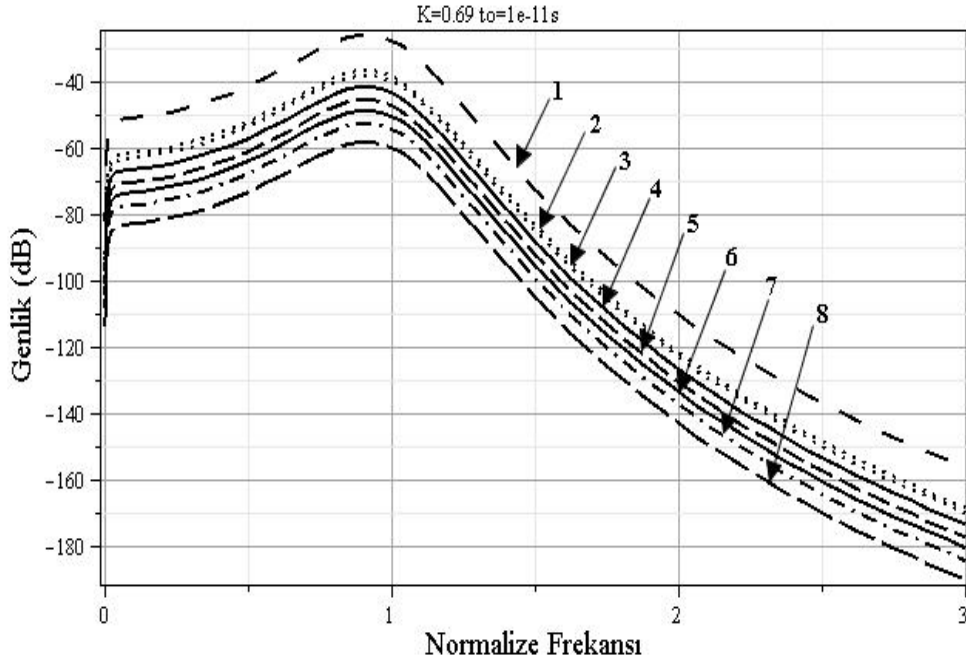
Şekil 4.5 İkinci grup IMD eğrileri

Şekil 4.6’da ise gecikme zamanı $t_o = 1.10^{-10} s$, $K=1$ için ise en küçük genlik değeri 22,76 dB, en büyük genlik değeri ise 54,57dB olarak bulunmuştur. Bu şartlar altında normalize frekans band genişliği değerleri sırasıyla 0,22, 0,22, 0,22, 0,26, 0,24, 0,25, 0,24, 0,24 olarak bulunmuştur. -3dB için en büyük band genişliği 4 nolu IMD frekans bileşeninden elde edilmiş ve grubun toplam band genişliği $1,89.10^{10}$ Hz olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.6 İkinci grup IMD eğrileri

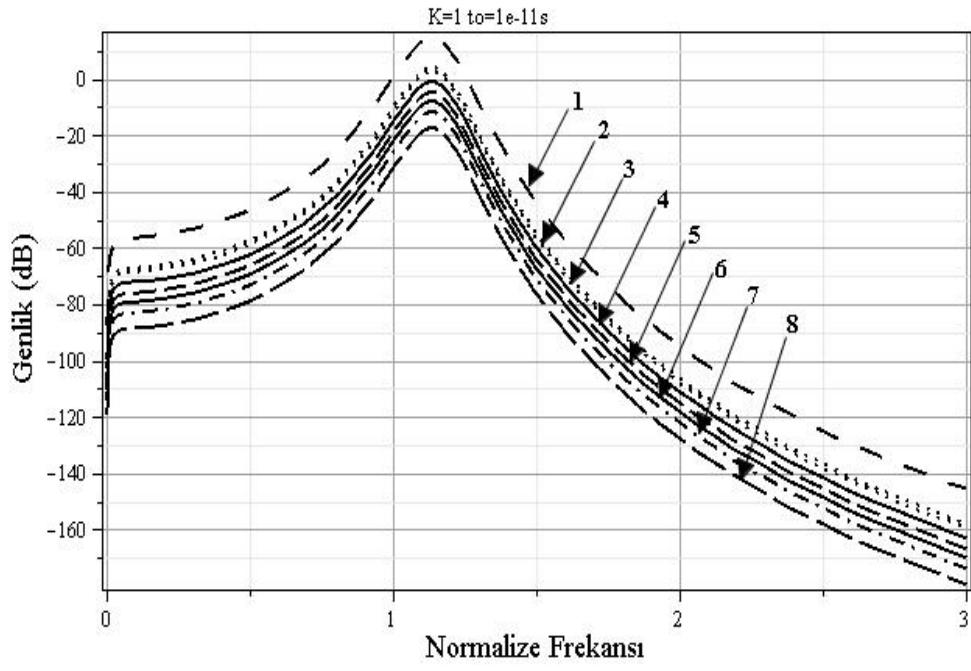
Şekil 4.7-4.8 gecikme zamanı $t_o = 1.10^{-11} s$ ve geri besleme sabitine bağlı olarak elde edilen IMD frekans bileşenlerinin genlikleri elde edilmiştir. Şekil 4.7’de gecikme zamanı $t_o = 1.10^{-11} s$ iken $K=0,69$ için en küçük genlik değeri 1 nolu IMD frekans bileşeni için $-57,69dB$, en büyük genlik değeri ise IMD fark bileşeni için 8 nolu IMD fark bileşeni için $-25,25dB$ olarak bulunmuştur. Normalize frekans band genişliği değerleri sırasıyla 0,26, 0,24, 0,23, 0,23, 0,20, 0,27, 0,24, 0,31’dir. $-3dB$ için band genişliği olarak en büyük değer 8 nolu, en küçük değer ise 5 nolu IMD frekans bileşeninden elde edilmiştir. Grubun toplam band genişliği teorik olarak $1,98.10^{11} Hz$ hesaplanmıştır.



Şekil 4.7 İkinci grup IMD eğrileri

Şekil 4.8’de ise $K=1$ için en küçük genlik değeri $-16,60\text{dB}$, en büyük genlik değeri ise $15,29\text{dB}$ olarak bulunmuştur. Normalize frekans band genişliği değerleri sırasıyla $0,10$, $1,13$, $0,14$, $0,09$, $0,14$, $0,11$, $0,10$, $0,10$ olarak bulunmuştur. Band genişliği olarak -3dB için tüm IMD bileşenleri için birbirine çok yakın değerlerden oluşmakla birlikte en küçük değer 4 nolu IMD frekans bileşeninden elde edilmiştir. Bu şartlar altında grubun toplam band genişliği teorik olarak $1,17 \cdot 10^{11}$ Hz hesaplanmıştır.

İkinci grup IMD frekans bileşenlerinden en büyük band genişliği gecikme zamanı $t_0 = 1 \cdot 10^{-11}$ s iken $K=0,69$ ’un incelendiği bölümden elde edilmiştir.



Şekil 4.8 İkinci grup IMD eğrileri

4.1.3 Üçüncü grup IMD frekans bileşenleri

Üçüncü grup IMD frekans bileşenlerinden yirmi dört farklı IMD frekans fark bileşeni elde edilmiştir. Bunlar sırasıyla aşağıda verilmektedir.

1. ($\omega_2 - 2\omega_1 + \omega_3$),
2. ($-\omega_2 - 2\omega_1 + \omega_3$),
3. ($\omega_3 + 2\omega_1 + \omega_2$), ($\omega_3 + 2\omega_1 - \omega_2$),
4. ($\omega_4 + 2\omega_1 - \omega_2$), ($-\omega_4 + 2\omega_1 - \omega_2$),
5. ($\omega_4 + 2\omega_1 + \omega_2$),
6. ($-\omega_4 + 2\omega_1 + \omega_2$),
7. ($\omega_3 - 2\omega_1 - \omega_4$), ($-\omega_4 + 2\omega_1 + \omega_3$), ($\omega_3 - 2\omega_1 + \omega_4$), ($2\omega_1 + \omega_4 + \omega_3$),
8. ($-2\omega_2 - \omega_1 + \omega_3$), ($\omega_3 - \omega_1 + 2\omega_2$), ($\omega_3 + \omega_1 - 2\omega_2$), ($2\omega_2 + \omega_1 + \omega_3$)
9. ($\omega_1 + \omega_4 - 2\omega_2$), ($\omega_4 + \omega_1 + 2\omega_2$), ($-\omega_4 - 2\omega_2 + \omega_1$),
10. ($-\omega_4 + \omega_1 + 2\omega_2$),
11. ($\omega_4 - 2\omega_2 + \omega_3$), ($2\omega_2 + \omega_4 + \omega_3$), ($-\omega_4 - 2\omega_2 + \omega_3$), ($-\omega_4 + 2\omega_2 + \omega_3$),
12. ($\omega_2 + \omega_1 + 2\omega_3$), ($-\omega_2 + \omega_1 + 2\omega_3$), ($-\omega_2 - \omega_1 + 2\omega_3$),
13. ($2\omega_3 + \omega_2 - \omega_1$),
14. ($2\omega_3 + \omega_4 - \omega_1$), ($2\omega_3 + \omega_1 + \omega_4$), ($-\omega_4 + \omega_1 + 2\omega_3$), ($-\omega_1 + 2\omega_3 - \omega_4$),
15. ($2\omega_3 + \omega_2 + \omega_4$), ($2\omega_3 - \omega_2 + \omega_4$), ($\omega_2 + 2\omega_3 - \omega_4$), ($-\omega_2 + 2\omega_3 - \omega_4$),
16. ($2\omega_4 - \omega_1 + \omega_3$),
17. ($\omega_3 + \omega_1 + 2\omega_4$)
18. ($-\omega_1 + \omega_3 - 2\omega_4$),
19. ($-2\omega_4 + \omega_1 + \omega_3$),
20. ($-\omega_2 + \omega_1 + 2\omega_4$),
21. ($2\omega_4 + \omega_1 + \omega_2$)
22. ($-2\omega_4 + \omega_1 + \omega_2$),
23. ($-\omega_2 + 2\omega_4 + \omega_3$),
24. ($-\omega_2 + 2\omega_4 + \omega_3$), ($\omega_3 + \omega_2 + 2\omega_4$), ($-2\omega_4 + \omega_3 + \omega_2$), ($-\omega_2 + \omega_3 - 2\omega_4$)

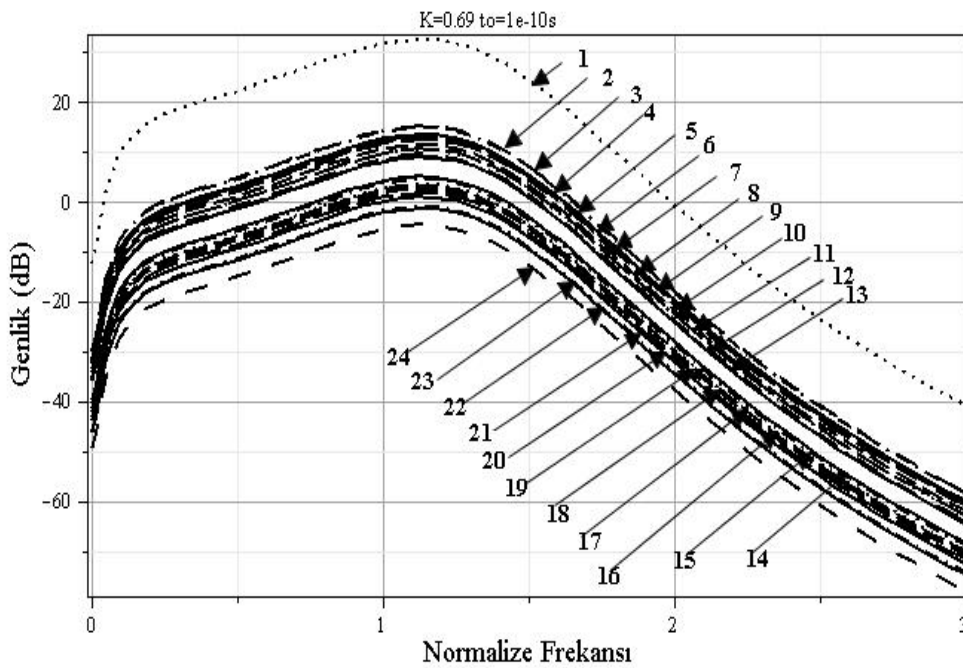
IMD frekans bileşenlerinin genlikleri ve farkları, geri besleme kazanç sabiti ve zaman gecikmesine bağlı olarak IMD frekans bileşenlerinin genlik değerleri aşağıdaki çizelge 4.3'te verilmiştir. Çizelgedeki genlik farkları incelendiğinde $K=0,69$ için tüm gruplardaki değerler birbirine eşit denecek kadar yakın değerlerden oluşurken $K=1$ için 1. grup diğerlerine göre biraz daha düşük bir değere sahiptir. $t_o = 1.10^{-10} s$ iken tüm

gruplar incelendiğinde genlik farklarının birbirine çok yakın değerlerden oluştuğu ve $t_o = 1.10^{-11}$ s durumunda ise 5, 8, 14, 15 ve 22. gruplar farklılık göstermektedir.

Çizelge 4.3 Üçüncü grup IMD frekans bileşenleri arasındaki ilişki

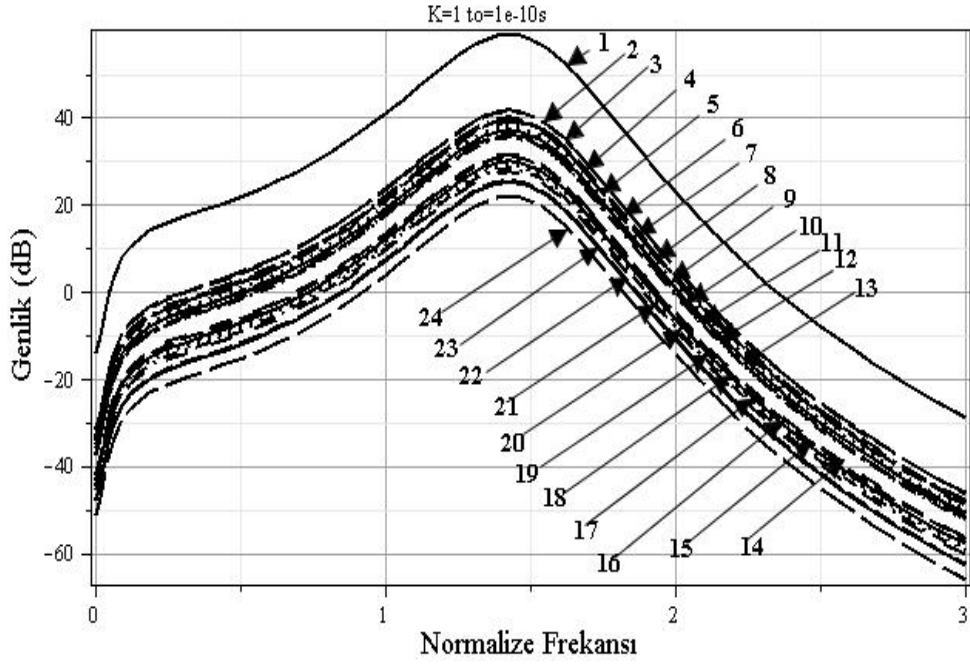
IMD Bileşenleri	K=0,69		K=1		K=0,69	K=1	$t_o=1.10^{-10}$ s	$t_o=1.10^{-11}$ s
	$t_o=1.10^{-10}$ s	$t_o=1.10^{-11}$ s	$t_o=1.10^{-10}$ s	$t_o=1.10^{-11}$ s	Genlik Farkı	Genlik Farkı	Genlik Farkı	Genlik Farkı
1	32,76	-20,25	59,24	20,51	53,01	38,73	-26,48	-40,76
2	15,16	-38,74	41,70	2,05	53,90	39,65	-26,54	-40,79
3	13,69	-39,60	40,24	1,01	53,29	39,23	-26,55	-40,61
4	13,43	-40,14	39,97	0,29	53,57	39,68	-26,54	-40,43
5	13,22	-40,68	39,77	0,42	53,90	39,35	-26,55	-41,10
6	12,92	-40,81	39,52	0,14	53,73	39,38	-26,60	-40,95
7	12,5	-41,13	39,15	-0,39	53,72	39,54	-26,56	-40,74
8	11,64	-42,42	38,18	-1,32	54,06	39,50	-26,54	-41,10
9	10,81	-42,76	37,35	-2,12	53,57	39,47	-26,54	-40,84
10	10,73	-42,87	37,27	-2,13	53,60	39,40	-26,54	-40,74
11	9,70	-43,89	36,24	-3,11	53,59	39,35	-26,54	-40,78
12	9,38	-44,45	35,68	-3,67	53,83	39,35	-26,30	-40,78
13	9,30	-44,33	35,85	-3,94	53,63	39,79	-26,55	-40,39
14	9,05	-44,76	35,68	-3,67	53,81	39,35	-26,63	-41,09
15	5,30	-48,64	31,81	-7,54	53,94	39,35	-26,51	-41,10
16	4,63	-48,89	31,25	-8,10	53,52	39,35	-26,62	-40,79
17	3,63	-49,91	30,22	-9,50	53,54	39,72	-26,59	-40,79
18	3,51	-50,15	30,01	-9,37	53,66	39,38	-26,59	-40,78
19	2,80	-50,83	29,25	-10,04	53,63	39,29	-26,45	-40,79
20	1,88	-51,59	28,51	-11,16	53,47	39,67	-26,63	-40,43
21	1,13	-52,41	27,72	-11,63	53,54	39,35	-26,59	-40,78
22	-0,78	-54,66	25,79	-13,56	53,88	39,35	-26,57	-41,10
23	-1,14	-54,79	25,39	-14,02	53,65	39,41	-26,53	-40,77
24	-4,50	-58,06	22,14	-17,70	53,56	39,84	-26,64	-40,36

Şekil 4.9-4.10'da gecikme zamanı $t_o = 1.10^{-10} s$ ve geri besleme sabitine (K) bağlı olarak elde edilen IMD frekanslarının genlik değerleri görülmektedir. Şekil 4.9'da gecikme zamanı $t_o = 1.10^{-10} s$ iken $K=0,69$ için en küçük genlik değeri 24 nolu IMD frekans bileşeni için -4,50dB, en büyük genlik değeri ise 1 nolu IMD frekans bileşeni için 32,76dB'dir. Normalize frekans band genişliği değerleri birbirlerine eşit denecek kadar yakın değerlerden oluşmakla birlikte 0,50 olarak bulunmuş ve -3dB için grubun toplam band genişliği teorik olarak $12,00.10^{10}$ Hz hesaplanmıştır.



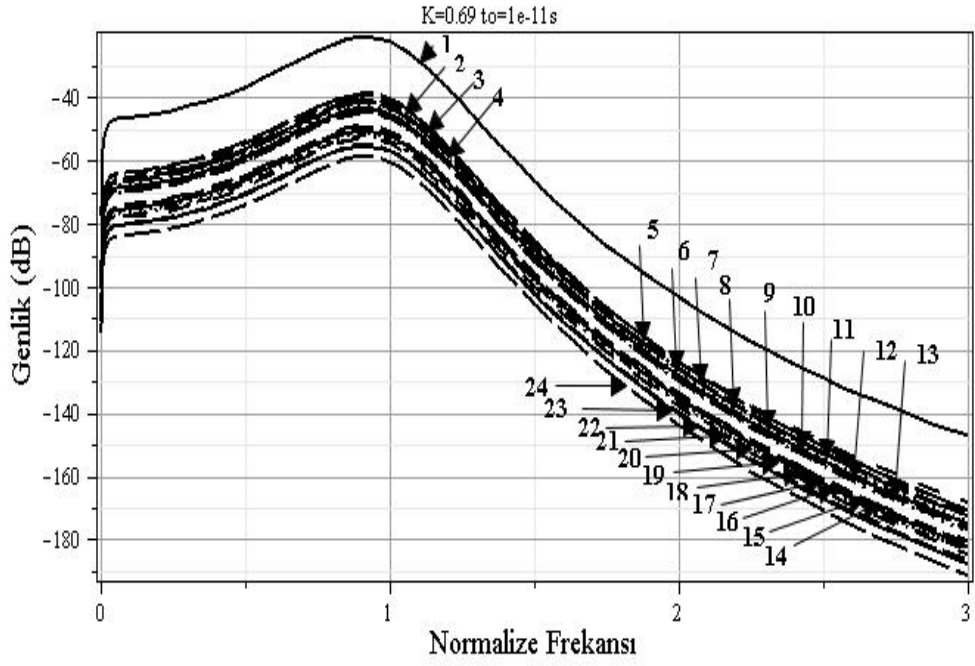
Şekil 4.9 Üçüncü grup IMD eğrileri

Şekil 4.10'da ise $K=1$ için en küçük genlik değeri 22,14dB, en büyük genlik değeri ise 59,24dB olarak bulunmuştur. Ortalama normalize frekans band genişliği değeri 0,23 olarak hesaplanmıştır. Band genişliği olarak -3dB için grubun toplam band genişliği teorik olarak $5,52.10^{10}$ Hz olarak bulunmuştur.

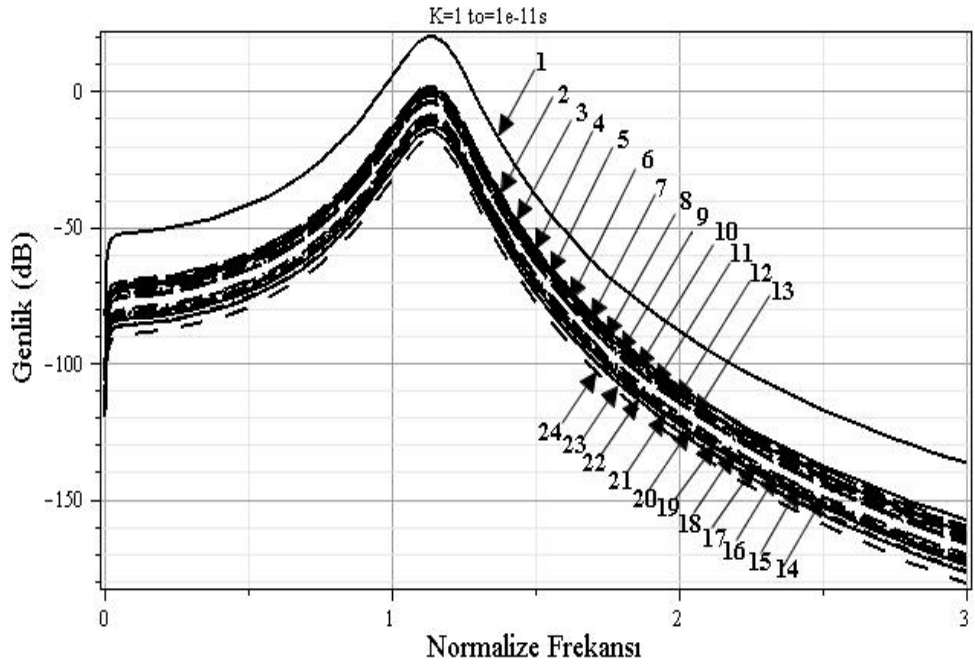


Şekil 4.10 Üçüncü grup IMD eğrileri

Şekil 4.11-4.12 gecikme zamanı $t_o = 1.10^{-11} s$ ve geri besleme sabitine bağlı olarak elde edilen IMD frekanslarının genlik değerlerinden elde edilmiştir. Şekil 4.11’de gecikme zamanı $t_o = 1.10^{-11} s$ iken $K=0,69$ için en küçük genlik değeri $-58,06dB$, en büyük genlik değeri ise $-20,25dB$ ’dir. Normalize frekans band genişliği değerleri gruptaki tüm IMD bileşenleri için yaklaşık $0,26$ bulunmuş ve $-3dB$ için grubun toplam band genişliği teorik olarak $6,24.10^{11} Hz$ hesaplanmıştır.



Şekil 4.11 Üçüncü grup IMD eğrileri



Şekil 4.12 Üçüncü grup IMD eğrileri

4.1.4 Dördüncü grup IMD frekans bileşenleri

Dördüncü grup IMD frekans bileşenlerinden dört farklı bileşen elde edilmiştir. Bunlar;

1. $(-2\omega_2 - 2\omega_1 + 2\omega_3), (2\omega_3 + 2\omega_1 + 2\omega_2), (2\omega_2 - 2\omega_1 + 2\omega_3), (2\omega_1 - 2\omega_2 + 2\omega_3),$
2. $(2\omega_1 - 2\omega_2 + 2\omega_4), (2\omega_1 + 2\omega_2 + 2\omega_4), (-2\omega_4 + 2\omega_1 + 2\omega_2), (2\omega_1 - 2\omega_2 - 2\omega_4),$
3. $(2\omega_4 + 2\omega_1 + 2\omega_3), (-2\omega_1 + 2\omega_4 + 2\omega_3), (2\omega_3 + 2\omega_1 - 2\omega_4), (-2\omega_4 - 2\omega_1 + 2\omega_3),$
4. $(2\omega_3 + 2\omega_4 - 2\omega_2), (2\omega_3 + 2\omega_4 + 2\omega_2), (2\omega_3 - 2\omega_2 - 2\omega_4), (2\omega_3 - 2\omega_4 + 2\omega_2)$

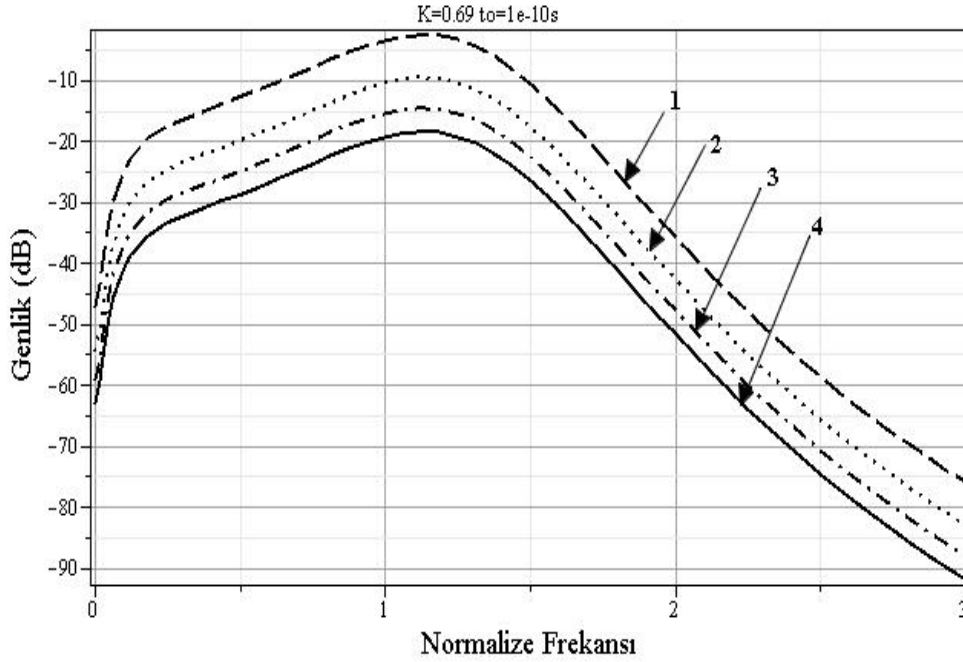
IMD frekans bileşenlerinin genlikleri ve farkları, geri besleme kazanç sabiti ve zaman gecikmesine bağlı olarak IMD frekans bileşenlerinin genlik değerleri aşağıda çizelge 4.4'de verilmiştir. Genlik farkları incelendiğinde $K=0,69$, $K=1$ ve $t_o = 1.10^{-10} s$ iken tüm gruplar incelendiğinde genlik farklarının birbirine çok yakın değerlerden oluştuğu ve $t_o = 1.10^{-11} s$ durumunda ise 3. grubun farklılık gösterdiği görülmüştür.

Çizelge 4.4 Dördüncü grup IMD frekans bileşenleri arasındaki ilişki

IMD Bileşenleri		GENLİK (dB)			
		1	2	3	4
K=0,69	$t_o=1.10^{-10} s$	-2,44	-9,48	-14,48	-18,36
	$t_o=1.10^{-11} s$	-55,94	-62,98	-68,28	-71,85
K=1	$t_o=1.10^{-10} s$	24,20	17,16	12,16	8,37
	$t_o=1.10^{-11} s$	-15,15	-22,20	-27,19	-31,06
K=0.69	Genlik Farkı	53,50	53,50	53,80	53,49
K=1	Genlik Farkı	39,35	39,36	39,35	39,43
$t_o=1.10^{-10} s$	Genlik Farkı	-26,64	-26,64	-26,64	-26,73
$t_o=1.10^{-11} s$	Genlik Farkı	-40,79	-40,78	-41,09	-40,79

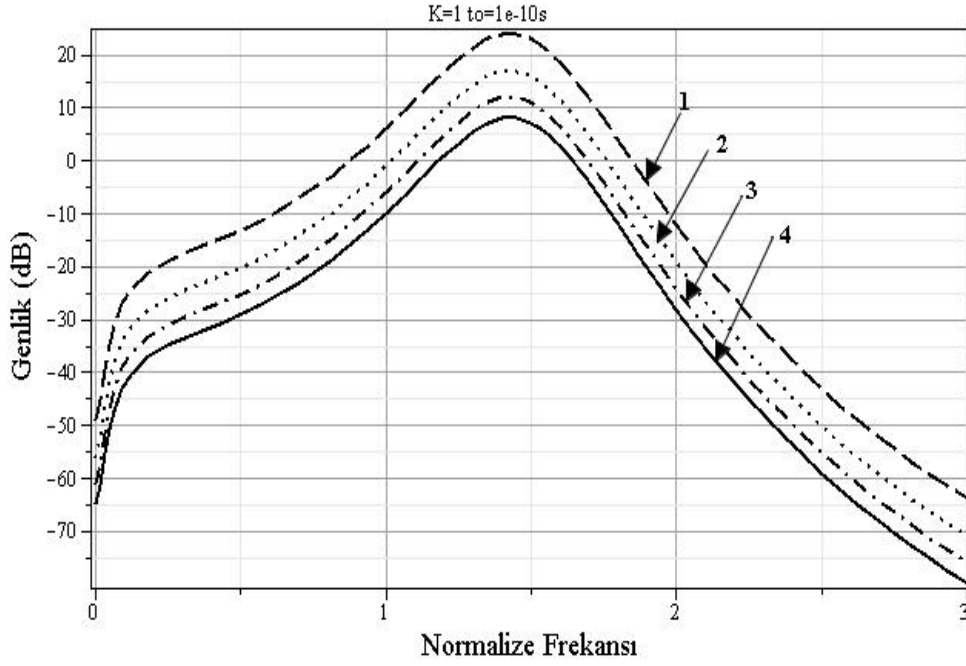
Şekil 4.13-4.14'de gecikme zamanı $t_o = 1.10^{-10} s$ için ve geri besleme sabitine bağlı olarak taşıyıcıdan elde edilen fark frekanslarının genlik değerleri görülmektedir. Şekil 4.13'de gecikme zamanı $t_o = 1.10^{-10} s$ iken $K=0,69$ için en küçük genlik değeri -18,36dB, en büyük genlik değeri ise -2,44dB'dir. Band genişliği ise normalize frekans

band genişliği değerleri sırasıyla 0,52, 0,47, 0,50 ve 0,48 olarak bulunmuştur. Band genişliği olarak -3dB için en büyük değer 1 nolu ve en küçük değer ise 2 nolu IMD frekans bileşeninden elde edilmiştir. Bu şartlar altında -3dB için grubun toplam band genişliği teorik olarak $1,97 \cdot 10^{10}$ Hz hesaplanmıştır.



Şekil 4.13 Dördüncü grup IMD eğrileri

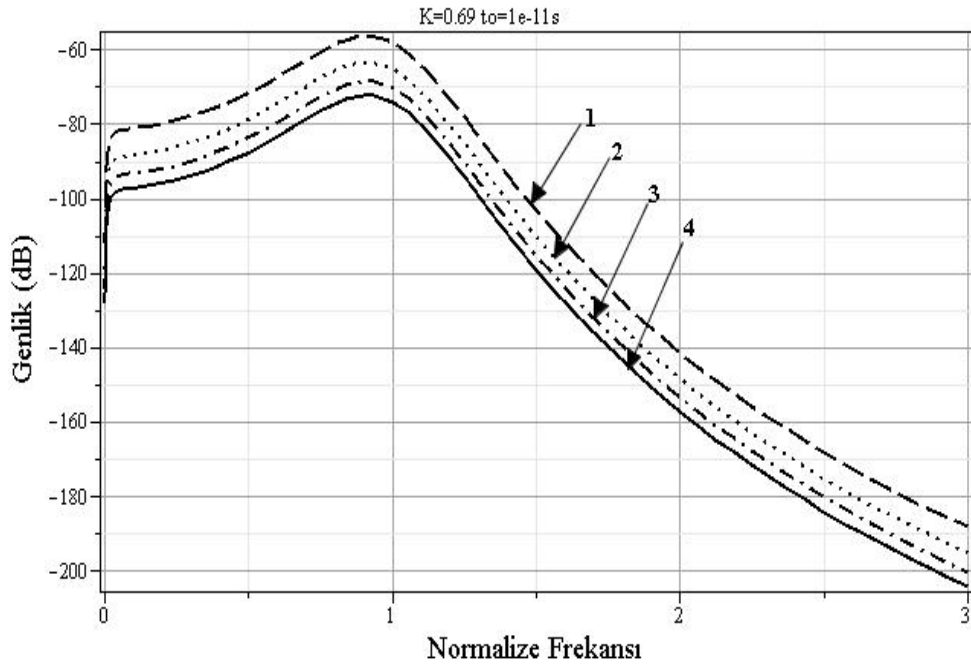
Şekil 4.14'de ise $K=1$ için en küçük genlik değeri 4 nolu IMD frekans bileşeni için 8,37 dB, en büyük genlik değeri ise 1 nolu IMD frekans bileşeni için 24,20dB olarak bulunmuştur. Normalize frekans band genişliği değerleri sırasıyla 0,27, 0,27, 0,24 ve 0,27 olarak bulunmuştur. -3dB için tüm IMD bileşenlerinin band genişlikleri yaklaşık olarak eşit olmakla birlikte grubun toplam band genişliği teorik olarak $1,05 \cdot 10^{10}$ Hz hesaplanmıştır.



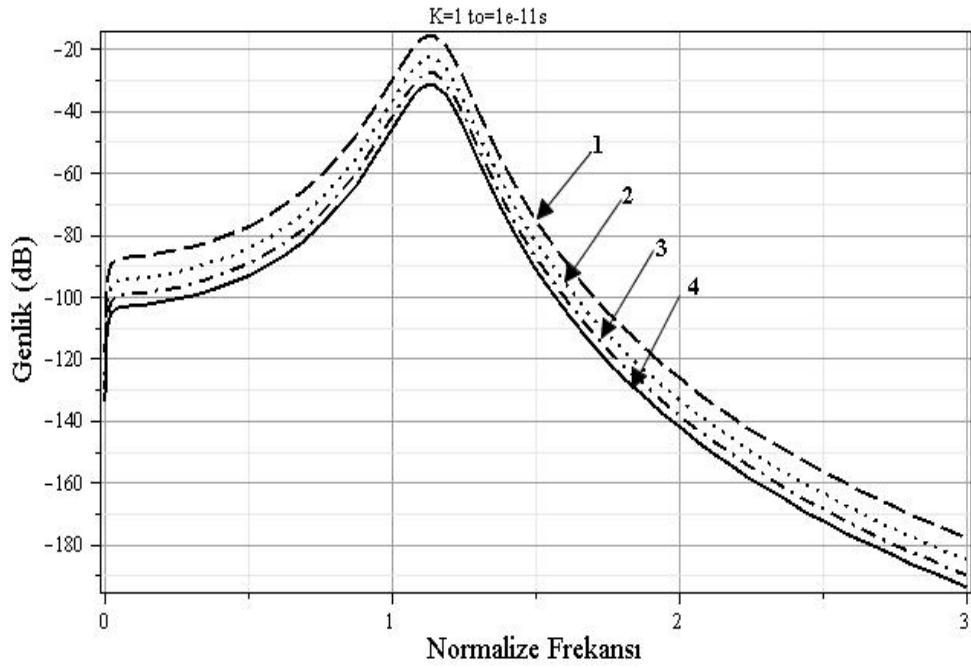
Şekil 4.14 Dördüncü grup IMD eğrileri

Şekil 4.15-4.16 gecikme zamanı $t_o = 1.10^{-11} s$ için elde edilmiştir. Şekil 4.15’de gecikme zamanı $t_o = 1.10^{-11} s$ iken $K=0,69$ için en küçük genlik değeri $-71,85$ dB, en büyük genlik değeri ise $-55,94$ dB olarak bulunmuştur. Normalize frekans band genişliği değerleri sırasıyla $0,27$, $0,27$, $0,26$ ve $0,22$ olarak bulunmuştur. Band genişliği olarak -3 dB için grubun toplam band genişliği teorik olarak $1,02.10^{11}$ Hz hesaplanmıştır.

Şekil 4.16’da ise $K=1$ için ise en küçük genlik değeri $-31,06$ dB, en büyük genlik değeri ise $-15,15$ dB’dir. Normalize frekans band genişliği değerleri sırasıyla $0,11$, $0,09$, $0,11$ ve $0,10$ olarak bulunmuştur. Band genişliği olarak -3 dB için grubun toplam band genişliği teorik olarak $0,41.10^{11}$ Hz hesaplanmıştır.



Şekil 4.15 Dördüncü grup IMD eğrileri



Şekil 4.16 Dördüncü grup IMD eğrileri

4.1.5 Beşinci grup IMD frekans bileşenleri

Beşinci grup IMD frekans bileşenlerinden onbir farklı IMD frekans fark bileşeni elde edilmiştir. Bunlar;

1. $(2\omega_1 - 2\omega_2 + \omega_4 + \omega_3), (\omega_4 - 2\omega_1 - 2\omega_2 + \omega_3), (\omega_4 + 2\omega_1 + 2\omega_2 + \omega_3),$
 $(\omega_4 - 2\omega_1 + 2\omega_2 + \omega_3), (-\omega_4 + 2\omega_1 + 2\omega_2 + \omega_3), (\omega_3 - 2\omega_2 - \omega_4 - 2\omega_1),$
 $(-\omega_4 - 2\omega_1 + \omega_3 + 2\omega_2), (-\omega_4 + 2\omega_1 - 2\omega_2 + \omega_3),$
2. $(2\omega_1 + 2\omega_3 + \omega_4 + \omega_2), (-\omega_2 + 2\omega_1 + 2\omega_3 + \omega_4), (-\omega_2 - 2\omega_1 + 2\omega_3 + \omega_4),$
 $(\omega_2 + 2\omega_3 - \omega_4 - 2\omega_1), (-\omega_4 + 2\omega_1 - \omega_2 + 2\omega_3), (-\omega_4 + 2\omega_1 + \omega_2 + 2\omega_3),$
 $(-\omega_4 - 2\omega_1 + 2\omega_3 - \omega_2), (\omega_4 - 2\omega_1 + 2\omega_3 + \omega_2),$
3. $(\omega_3 + 2\omega_4 - \omega_2 - 2\omega_1), (-\omega_2 + 2\omega_1 + \omega_3 + 2\omega_4), (\omega_2 - 2\omega_1 + \omega_3 + 2\omega_4),$
 $(\omega_2 - 2\omega_1 + \omega_3 - 2\omega_4), (2\omega_4 + 2\omega_1 + \omega_2 + \omega_3), (-\omega_2 + 2\omega_1 + \omega_3 - 2\omega_4),$
 $(\omega_2 + 2\omega_1 + \omega_3 - 2\omega_4),$
4. $(-\omega_2 - 2\omega_1 + \omega_3 - 2\omega_4),$
5. $(-2\omega_2 + 2\omega_4 + \omega_1 + \omega_3), (\omega_3 + 2\omega_4 + \omega_1 + 2\omega_2), (\omega_3 + 2\omega_4 - \omega_1 - 2\omega_2),$
 $(\omega_3 + 2\omega_4 - \omega_1 + 2\omega_2), (2\omega_2 - 2\omega_4 - \omega_1 + \omega_3),$
6. $(\omega_1 - 2\omega_2 + \omega_3 - 2\omega_4),$
7. $(\omega_1 + 2\omega_2 + \omega_3 - 2\omega_4),$
8. $(-\omega_1 - 2\omega_2 + \omega_3 - 2\omega_4),$
9. $(\omega_1 + 2\omega_2 + \omega_3 - 2\omega_4),$
10. $(\omega_1 + 2\omega_3 + \omega_4 + 2\omega_2), (\omega_4 - \omega_1 + 2\omega_3 + 2\omega_2), (-\omega_1 + 2\omega_3 + \omega_4 - 2\omega_2),$
 $(2\omega_3 - 2\omega_2 + \omega_4 + \omega_1), (-2\omega_2 + 2\omega_3 - \omega_4 - \omega_1), (\omega_1 + 2\omega_3 - \omega_4 - 2\omega_2),$
 $(2\omega_3 + 2\omega_2 - \omega_4 - \omega_1), (2\omega_3 + 2\omega_2 - \omega_4 + \omega_1),$
11. $(-\omega_2 - 2\omega_4 + \omega_1 + 2\omega_3), (2\omega_3 + 2\omega_4 + \omega_2 - \omega_1), (-\omega_2 + 2\omega_4 + \omega_1 + 2\omega_3),$
 $(-\omega_2 - \omega_1 + 2\omega_3 + 2\omega_4), (\omega_2 + 2\omega_4 + \omega_1 + 2\omega_3), (-\omega_2 + 2\omega_3 - \omega_1 - 2\omega_4),$
 $(-2\omega_4 + 2\omega_3 - \omega_1 + \omega_2), (\omega_2 - 2\omega_4 + \omega_1 + 2\omega_3)$

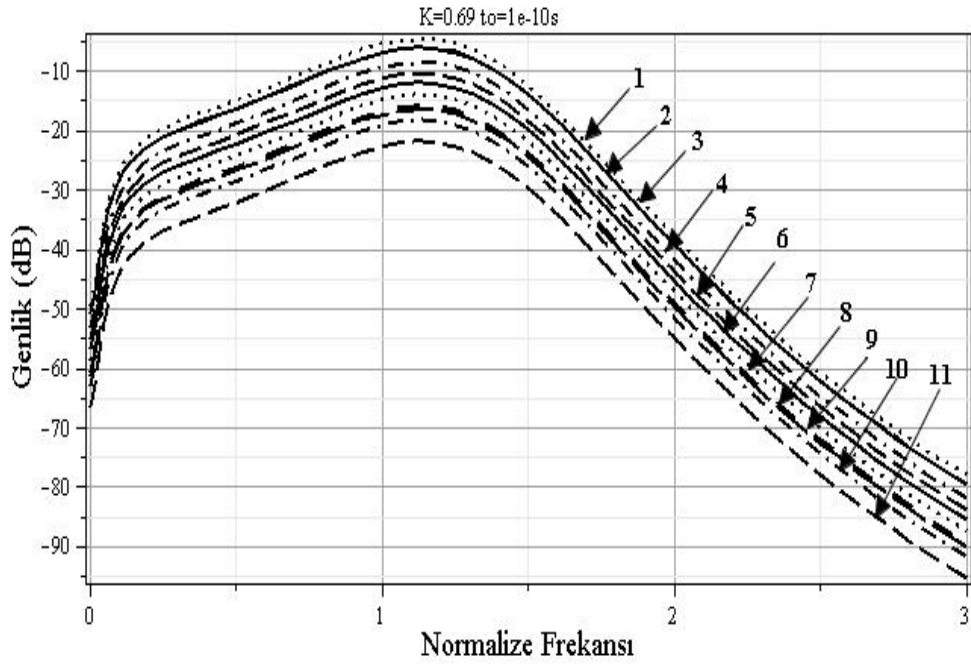
IMD frekans bileşenlerinin genlikleri ve farkları, geri besleme kazanç sabiti ve zaman gecikmesine bağlı olarak IMD frekans bileşenlerinin genlik değerleri aşağıdaki çizelge 4.5'de verilmiştir. Genlik farkları incelendiğinde $K=0,69$ için 10. grup, $K=1$ iken 8, 10 ve 11. grup farklılık göstermektedir. $t_o = 1.10^{-10} s$ iken tüm gruplar incelendiğinde genlik farklarının birbirine çok yakın değerlerden oluştuğu ve $t_o = 1.10^{-11} s$ durumunda ise 8, 10 ve 11. grup farklılık gösterdiği görülmüştür.

Çizelge 4.5 Beşinci grup IMD frekans bileşenleri arasındaki ilişki

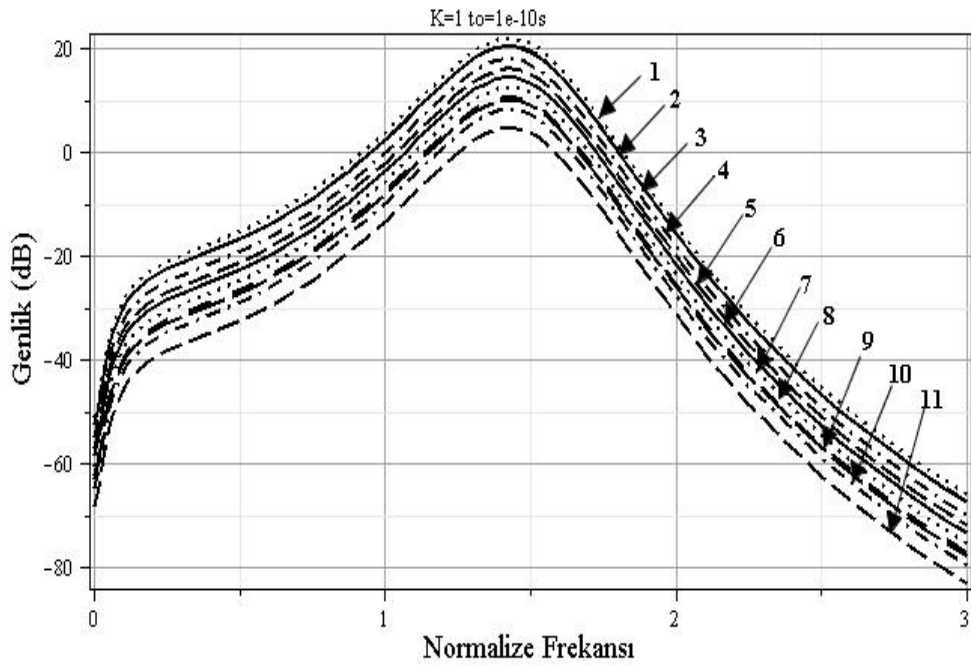
		GENLİK (dB)										
IMD Bileşenleri		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
K=0,69	$t_o=1.10^{-10}$ s	-4,54	-5,96	-6,01	-8,46	-10,40	-11,98	-13,92	-15,79	-16,42	-18,22	-21,74
	$t_o=1.10^{-11}$ s	-57,96	-59,46	-59,38	-62,11	-63,89	-65,48	-67,42	-68,86	-69,91	-71,18	-74,70
K=1	$t_o=1.10^{-10}$ s	22,11	20,68	20,63	18,18	16,24	14,66	12,72	10,85	10,22	8,51	4,80
	$t_o=1.10^{-11}$ s	-17,13	-18,67	-18,51	-21,39	-23,48	-24,69	-26,63	-27,82	-29,13	-30,07	-33,60
K=0,69	Genlik Farkı	53,42	53,50	53,37	53,65	53,49	53,50	53,50	53,07	53,49	52,96	53,24
K=1	Genlik Farkı	39,24	39,35	39,14	39,57	39,72	39,35	39,35	38,67	39,35	38,58	38,40
$t_o=1.10^{-10}$ s	Genlik Farkı	-26,65	-26,64	-26,64	-26,64	-26,64	-26,64	-26,64	-26,64	-26,64	-26,73	-26,54
$t_o=1.10^{-11}$ s	Genlik Farkı	-40,83	-40,79	-40,87	-40,72	-40,41	-40,79	-40,79	-41,04	-40,48	-41,11	-41,10

Şekil 4.17-4.18’de gecikme zamanı $t_o = 1.10^{-10}$ s ve geri besleme sabitine bağlı olarak taşıyıcıdan elde edilen fark frekanslarının genlik değerleri görülmektedir. Şekil 4.17’de gecikme zamanı $t_o = 1.10^{-10}$ s iken K=0,69 için en küçük genlik değeri -21,74dB, en büyük genlik değeri ise -4,54dB’dir. Normalize frekans band genişliği değerleri sırasıyla 0,50, 0,46, 0,48, 0,44, 0,50, 0,53, 0,47, 0,47, 0,47, 0,54 ve 0,50 olarak bulunmuştur. Band genişliği -3dB için en büyük değer 9 nolu ve en küçük değer ise 4 nolu IMD frekans bileşeninden elde edilmiştir. Bu şartlar altında grubun toplam band genişliği teorik olarak $5,36.10^{10}$ Hz hesaplanmıştır.

Şekil 4.18’de ise K=1 için en küçük genlik değeri 4,80dB, en büyük genlik değeri ise 22,11dB olarak bulunmuştur. Normalize frekans band genişliği değerleri yaklaşık 0,25 olup band genişliği olarak -3dB için grubun toplam band genişliği teorik olarak $2,75.10^{10}$ Hz hesaplanmıştır.

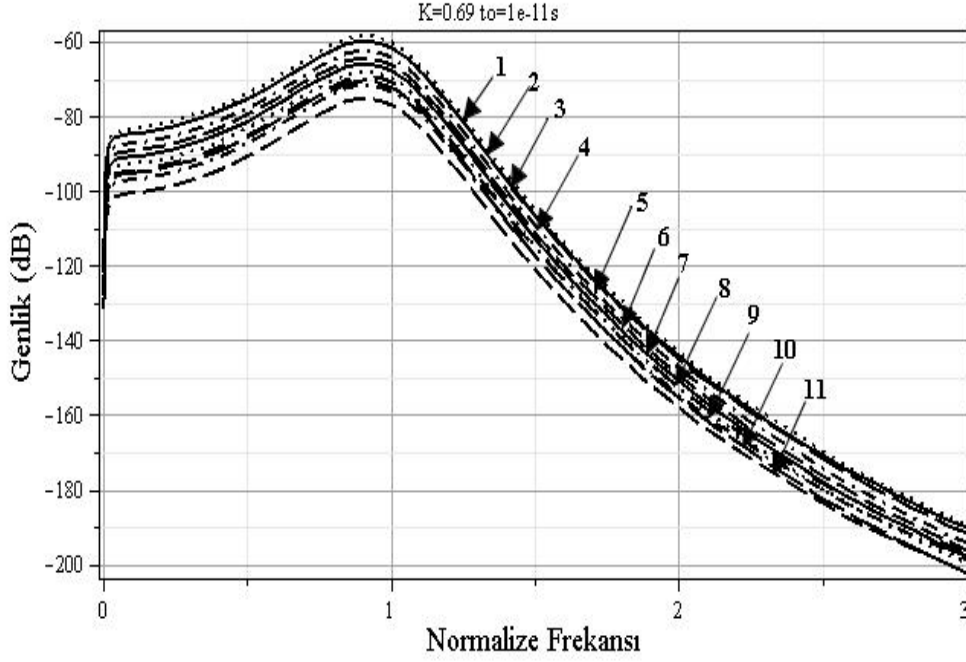


Şekil 4.17 Beşinci grup IMD eğrileri



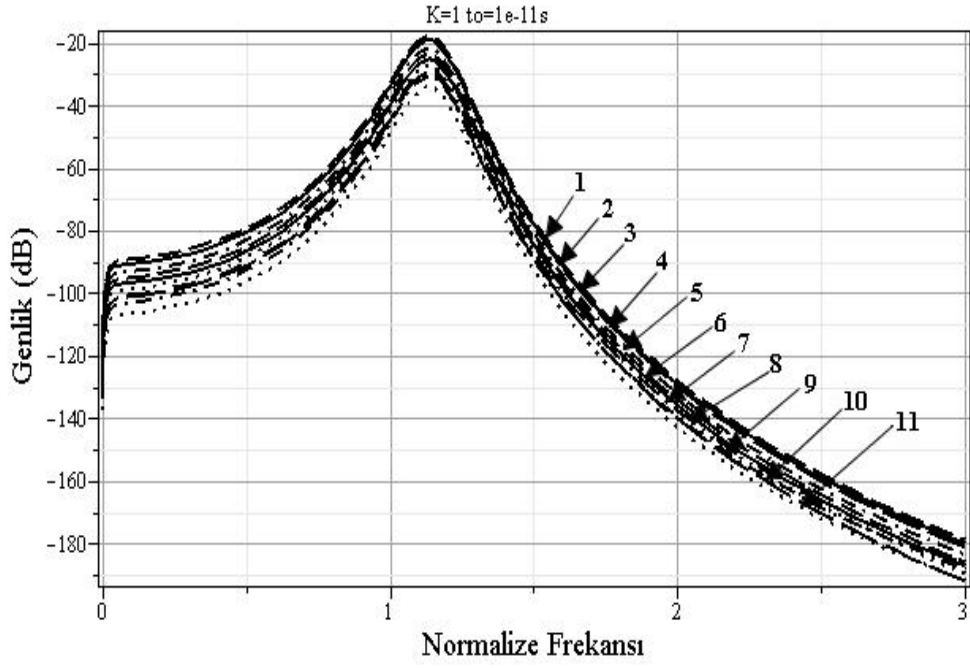
Şekil 4.18 Beşinci grup IMD eğrileri

Şekil 4.19 -4.20 gecikme zamanı $t_o = 1.10^{-11} s$ için elde edilmiştir. Şekil 4.19’da gecikme zamanı $t_o = 1.10^{-11} s$ iken $K=0,69$ için en küçük genlik değeri $-74,70$ dB, en büyük genlik değeri ise $-57,96$ dB’dir. Normalize frekans band genişliği değerleri yaklaşık $0,22$ olup band genişliği olarak -3 dB için grubun toplam band genişliği teorik olarak $2,42.10^{11}$ Hz hesaplanmıştır.



Şekil 4.19 Beşinci grup IMD eğrileri

Şekil 4.20’de ise $K=1$ için en küçük genlik değeri $-33,60$ dB, en büyük genlik değeri ise $-17,13$ dB olarak bulunmuştur. Normalize frekans band genişliği değerleri tüm IMD bileşenleri için yaklaşık $0,11$ olup band genişliği olarak -3 dB için grubun toplam band genişliği teorik olarak $1,21.10^{11}$ Hz hesaplanmıştır.



Şekil 4.20 Beşinci grup IMD eğrileri

4.1.6 Altıncı grup IMD frekans bileşenleri

Altıncı grup IMD frekans bileşenlerinden iki farklı IMD frekans fark bileşeni elde edilmiştir. Bunlar;

1. $(\omega_2 - \omega_1 + \omega_3 - \omega_4)$,
2. $(-\omega_1 + \omega_3 + \omega_2 + \omega_4)$, $(\omega_3 + \omega_1 + \omega_4 - \omega_2)$, $(\omega_3 + \omega_1 - \omega_4 + \omega_2)$,
 $(-\omega_2 - \omega_1 + \omega_3 + \omega_4)$, $(\omega_4 + \omega_1 + \omega_2 + \omega_3)$, $(-\omega_4 - \omega_1 - \omega_2 + \omega_3)$,
 $(-\omega_2 + \omega_3 - \omega_4 + \omega_1)$

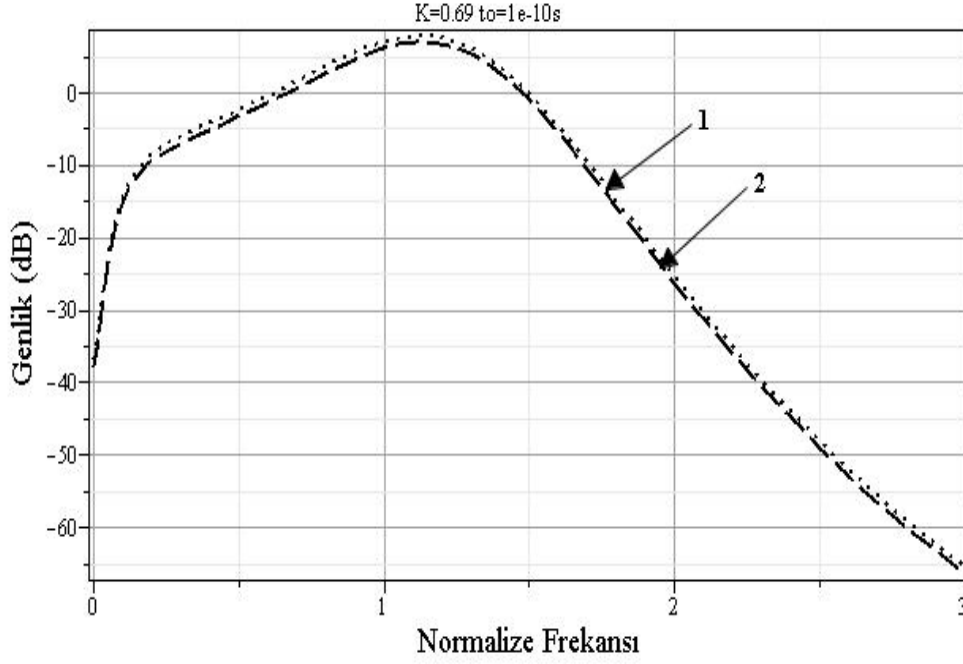
IMD frekans bileşenlerinin genlikleri ve farkları, geri besleme kazanç sabiti ve zaman gecikmesine bağlı olarak IMD frekans bileşenlerinin genlik değerleri aşağıdaki vizele 4.6’da verilmiştir. Genlik farkları incelendiğinde $K=0,69$, $K=1$ ve $t_o = 1.10^{-10} s$ için tüm gruplarda değerlerin birbirine çok yakın değerlerden oluştuğu ve $t_o = 1.10^{-11} s$ durumunda ise 2. grubun farklılık gösterdiği görülmüştür.

Çizelge 4.6 Altıncı grup IMD frekans bileşenleri arasındaki ilişki

IMD Bileşenleri		GENLİK (dB)	
		1	2
K=0.69	$t_o=1.10^{-10} s$	8,14	7,20
	$t_o=1.10^{-11} s$	-45,75	-46,39
K=1	$t_o=1.10^{-10} s$	34,49	33,75
	$t_o=1.10^{-11} s$	-4,66	-5,60
K=0.69	Genlik Farkı	53,89	53,59
K=1	Genlik Farkı	39,15	39,35
$t_o=1.10^{-10} s$	Genlik Farkı	-26,35	-26,55
$t_o=1.10^{-11} s$	Genlik Farkı	-41,09	-40,79

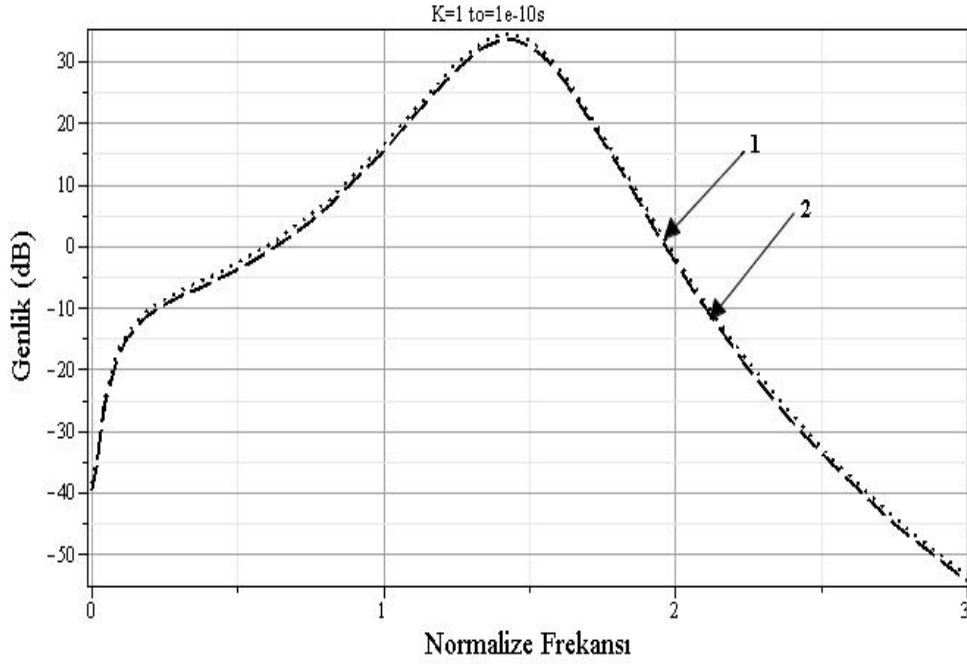
Şekil 4.21-4.22’de gecikme zamanı $t_o = 1.10^{-10} s$ ve geri besleme sabitine bağlı olarak taşıyıcıdan elde edilen fark frekanslarının genlik değerleri görülmektedir. Gecikme

zamanı $t_o = 1.10^{-10}$ s iken $K=0,69$ için en küçük genlik değeri 7.20dB, en büyük genlik değeri ise 8,14dB'dir. Normalize frekans band genişliği değerleri sırasıyla 0,52 ve 0,49'dur. Band genişliği olarak -3dB için en büyük değer 1 nolu ve en küçük değer ise 2 nolu IMD frekans bileşeninden elde edilmiştir. Bu şartlar altında grubun toplam band genişliği teorik olarak $1,1.10^{10}$ Hz hesaplanmıştır.



Şekil 4.21 Altıncı grup IMD eğrileri

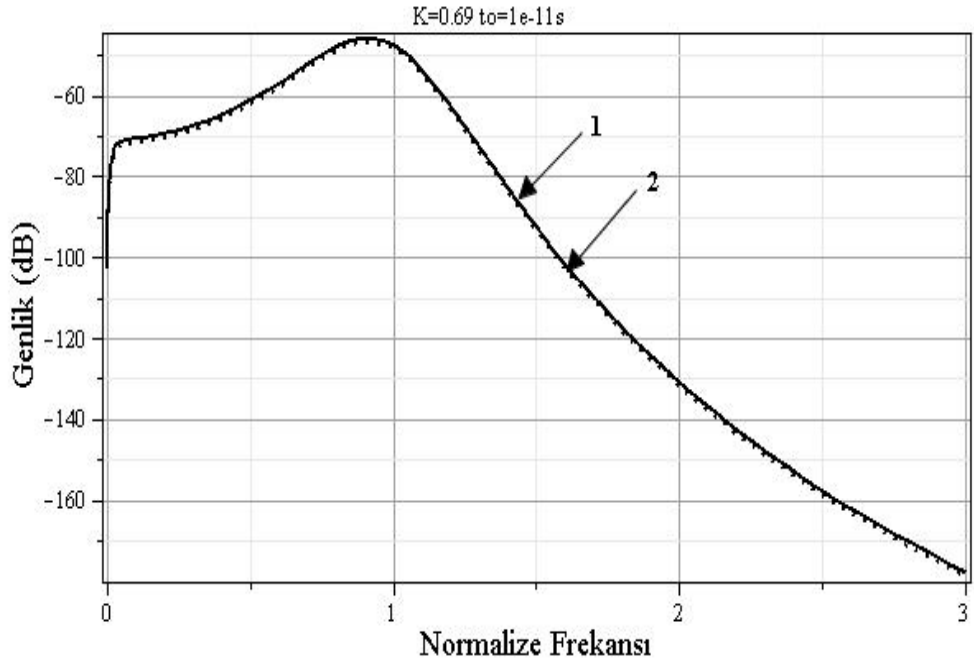
Şekil 4.22'de ise $K=1$ için en küçük genlik değeri 33,75dB, en büyük genlik değeri ise 34,49dB olarak bulunmuştur. Normalize frekans band genişliği değerleri sırasıyla 0,26 ve 0,28 olup -3dB için grubun toplam band genişliği $0,54.10^{10}$ Hz olarak hesaplanmıştır.



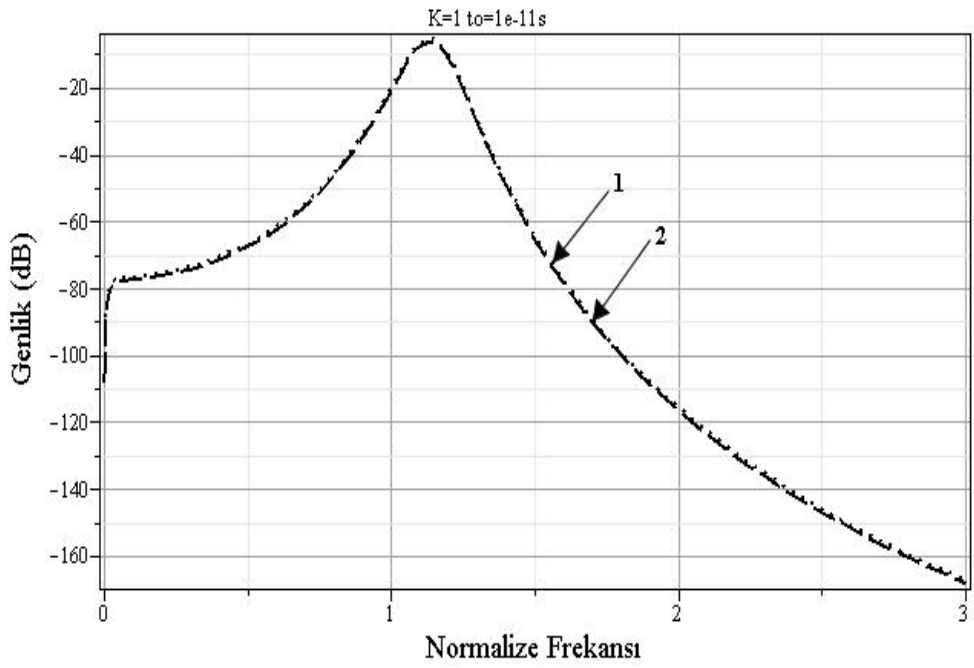
Şekil 4.22 Altıncı grup IMD eğrileri

Şekil 4.23-4.24 gecikme zamanı $t_o = 1.10^{-11} s$ için elde edilmiştir. Şekil 23'de gecikme zamanı $t_o = 1.10^{-11} s$ iken $K=0,69$ için en küçük genlik değeri $-46,39dB$, en büyük genlik değeri ise $-45,75dB$ 'dir. Normalize frekans band genişliği değerleri sırasıyla $0,26$ ve $0,31$ olarak bulunmuş ve $-3dB$ için grubun toplam band genişliği $0,57.10^{11} Hz$ olarak hesaplanmıştır.

Şekil 4.24'de $K=1$ için en küçük genlik değeri $-5,60dB$, en büyük genlik değeri ise $-4,66dB$ olarak bulunmuştur. Normalize frekans band genişliği değerleri sırasıyla $0,11$ ve $0,09$ olarak bulunmuş ve $-3dB$ için grubun toplam band genişliği $0,20.10^{11} Hz$ hesaplanmıştır.



Şekil 4.23 Altıncı grup IMD eğrileri



Şekil 4.24 Altıncı grup IMD eğrileri

4.1.7 Yedinci grup IMD frekans bileşenleri

Yedinci grup IMD frekans bileşenlerinden oniki farklı IMD frekans fark bileşeni elde edilmiştir. Bunlar;

1. $(\omega_3 - 2\omega_4), (\omega_3 + 2\omega_4),$
2. $(-\omega_4 + 2\omega_3), (\omega_4 + 2\omega_3),$
3. $(\omega_2 + 2\omega_4), (-\omega_2 + 2\omega_4),$
4. $(\omega_1 + 2\omega_4), (-\omega_1 + 2\omega_4),$
5. $(\omega_2 + 2\omega_3), (-\omega_2 + 2\omega_3),$
6. $(\omega_4 + 2\omega_2), (\omega_4 - 2\omega_2),$
7. $(\omega_3 - 2\omega_2), (\omega_3 + 2\omega_2),$
8. $(\omega_1 + 2\omega_3), (-\omega_1 + 2\omega_3),$
9. $(\omega_4 - 2\omega_1), (\omega_4 + 2\omega_1),$
10. $(\omega_1 - 2\omega_2), (\omega_1 + 2\omega_2),$
11. $(\omega_3 - 2\omega_1), (\omega_3 + 2\omega_1),$
12. $(\omega_2 + 2\omega_1), (-\omega_2 + 2\omega_1)$

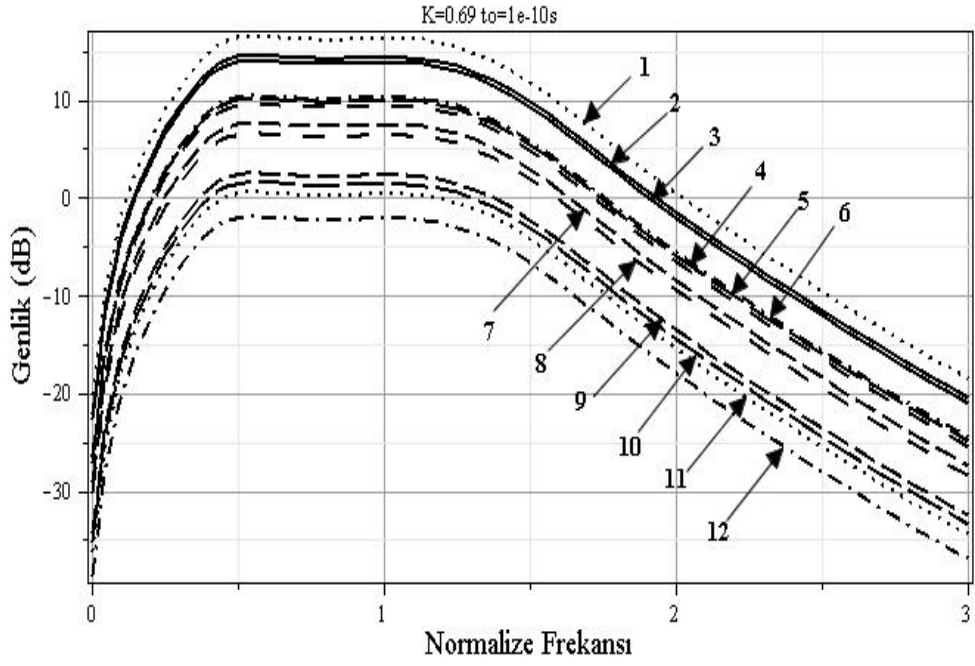
IMD frekans bileşenlerinin genlikleri ve farkları, geri besleme kazanç sabiti ve zaman gecikmesine bağlı olarak IMD frekans bileşenlerinin genlik değerleri aşağıdaki çizelge 4.7’de verilmiştir. Genlik farkları incelendiğinde $K=0,69$ ve $K=1$ incelendiğinde tüm gruplarda değerlerin birbirine çok yakın olduğu, $t_o = 1.10^{-10} s$ için 4. grubun farklılık gösterdiği, $t_o = 1.10^{-11} s$ durumunda ise 1, 4, 7, 10 ve 11. grupların kendi aralarında bir grup, 2, 3, 5, 6, 8, 9, 12. grupların ise kendi aralarında ayrı bir grup oluşturduğu görülmüştür.

Çizelge 4.7 Yedinci grup IMD frekans bileşenleri arasındaki ilişki

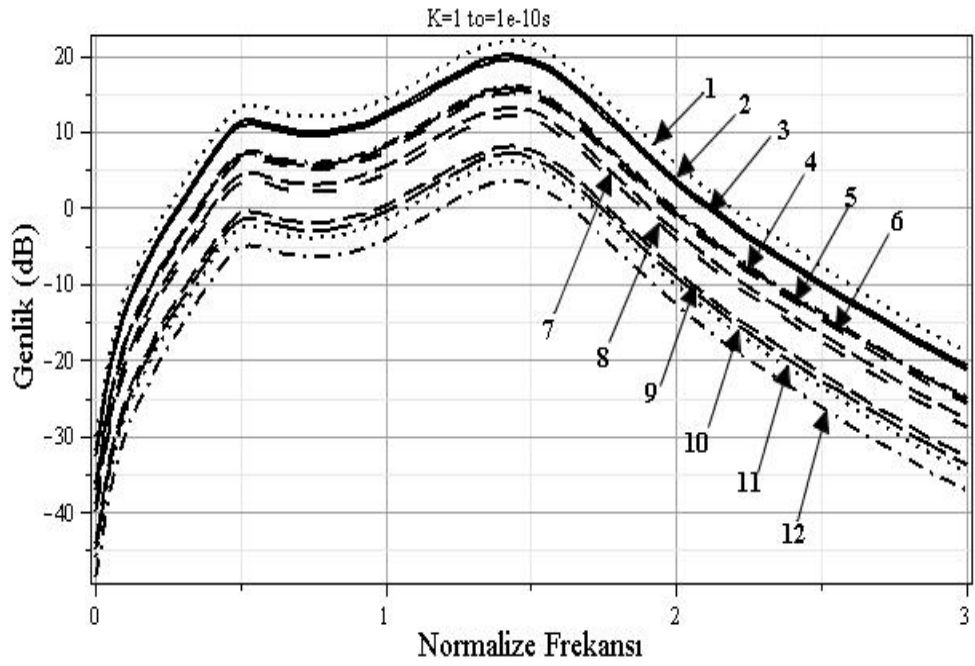
IMD Bileşenleri		GENLİK (dB)											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
K=0,69	$t_0=1.10^{-10}$ s	16,61	14,66	14,11	10,59	10,24	9,66	7,74	6,72	2,65	1,67	0,73	-1,77
	$t_0=1.10^{-11}$ s	-25,02	-26,81	-27,37	-31,04	-31,25	-31,81	-33,75	-34,77	-38,85	-39,97	-40,88	-43,29
K=1	$t_0=1.10^{-10}$ s	22,15	20,21	19,58	16,63	15,77	15,21	13,23	12,25	8,17	7,25	6,23	3,66
	$t_0=1.10^{-11}$ s	-10,92	-12,86	-13,42	-16,94	-17,30	-17,86	-19,80	-21,01	-24,90	-25,82	-26,84	-29,34
K=0,69	Genlik Farkı	41,63	41,47	41,48	41,63	41,49	41,47	41,49	41,49	41,50	41,64	41,61	41,52
K=1	Genlik Farkı	33,07	33,07	33,00	33,57	33,07	33,07	33,03	33,26	33,07	33,07	33,07	33,00
$t_0=1.10^{-10}$ s	Genlik Farkı	-5,54	-5,55	-5,47	-6,04	-5,53	-5,55	-5,49	-5,53	-5,52	-5,58	-5,50	-5,43
$t_0=1.10^{-11}$ s	Genlik Farkı	-14,10	-13,95	-13,95	-14,10	-13,95	-13,95	-14,15	-13,76	-13,95	-14,15	-14,04	-13,95

Şekil 4.25-4.26 gecikme zamanı $t_0 = 1.10^{-10}$ s ve geri besleme sabitine bağlı olarak taşıyıcıdan elde edilen fark frekanslarının genlik değerleri için elde edilmiştir. Şekil 4.25'te gecikme zamanı $t_0 = 1.10^{-10}$ s iken K=0,69 için en küçük genlik değeri 12 nolu IMD fark bileşeni için -1,77dB, en büyük genlik değeri ise 1 nolu IMD fark bileşeni 16,61dB'dir. Normalize frekans band genişliği değerleri sırasıyla 1,04, 1,07, 1,07, 1,05, 1,05, 1,05, 1,08, 1,09, 1,05, 1,09, 1,09, 1,08 olarak hesaplanmıştır. -3dB için grubun toplam band genişliği teorik olarak $12,81.10^{10}$ Hz bulunmuştur.

Şekil 4.26'da ise K=1 için en küçük genlik değeri 3,66dB, en büyük genlik değeri ise 22,15dB olarak bulunmuştur. Normalize frekans band genişliği değerleri tüm IMD bileşenleri için 0,41 olarak bulunmuş ve -3dB için grubun toplam band genişliği $4,92.10^{10}$ Hz olarak hesaplanmıştır.



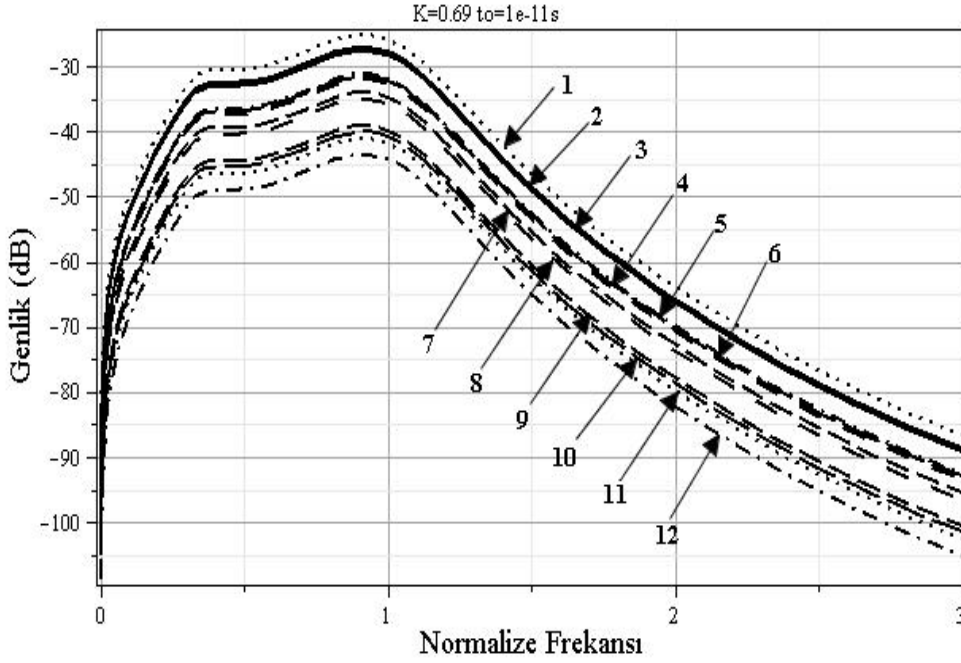
Şekil 4.25 Yedinci grup IMD eğrileri



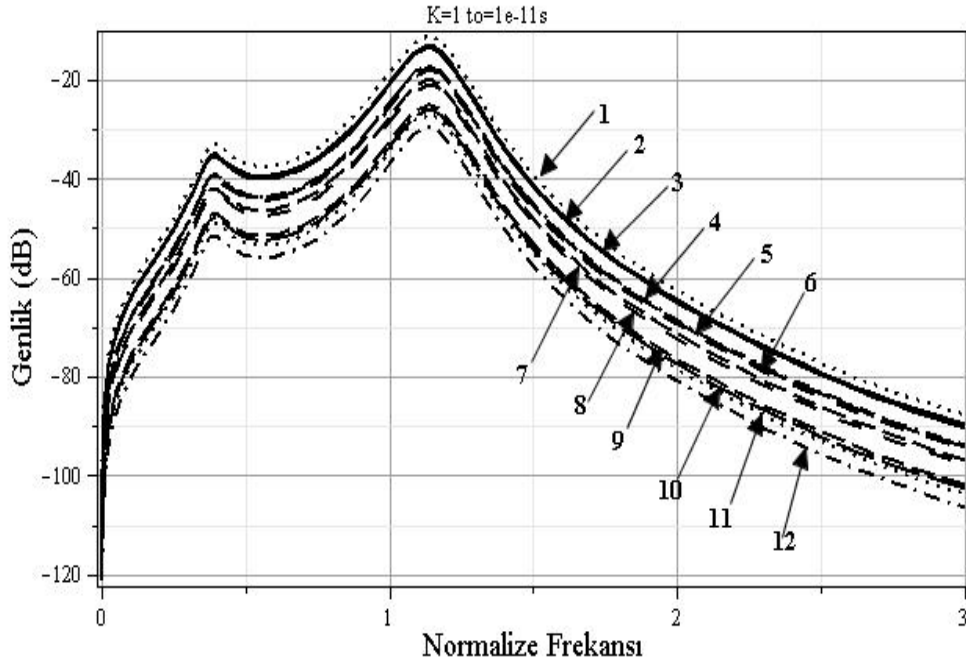
Şekil 4.26 Yedinci grup IMD eğrileri

Şekil 4.27-4.28 gecikme zamanı $t_o = 1.10^{-11} s$ için elde edilmiştir. Şekil 4.27’de gecikme zamanı $t_o = 1.10^{-11} s$ iken $K=0,69$ için en küçük genlik değeri $-43,29dB$, en büyük genlik değeri ise $-25,02dB$ ’dir. Normalize frekans band genişliği değerleri tüm IMD bileşenleri için $0,40$ olarak bulunmuş ve $-3dB$ için grubun toplam band genişliği $4,80.10^{11} Hz$ olarak hesaplanmıştır.

Şekil 4.28’de ise $K=1$ için en küçük genlik değeri $-29,34dB$, en büyük genlik değeri ise $-10,92dB$ olarak gözlenmiştir. Normalize frekans band genişliği değerleri tüm IMD bileşenleri için yaklaşık $0,14$ olarak bulunmuş ve $-3dB$ için grubun toplam band genişliği $1,68.10^{11} Hz$ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.27 Yedinci grup IMD eğrileri



Şekil 4.28 Yedinci grup IMD eğrileri

4.1.8 Sekizinci grup IMD frekans bileşenleri

Sekizinci grup IMD frekans bileşenlerinden beş farklı fark bileşeni elde edilmiştir. Bunlar;

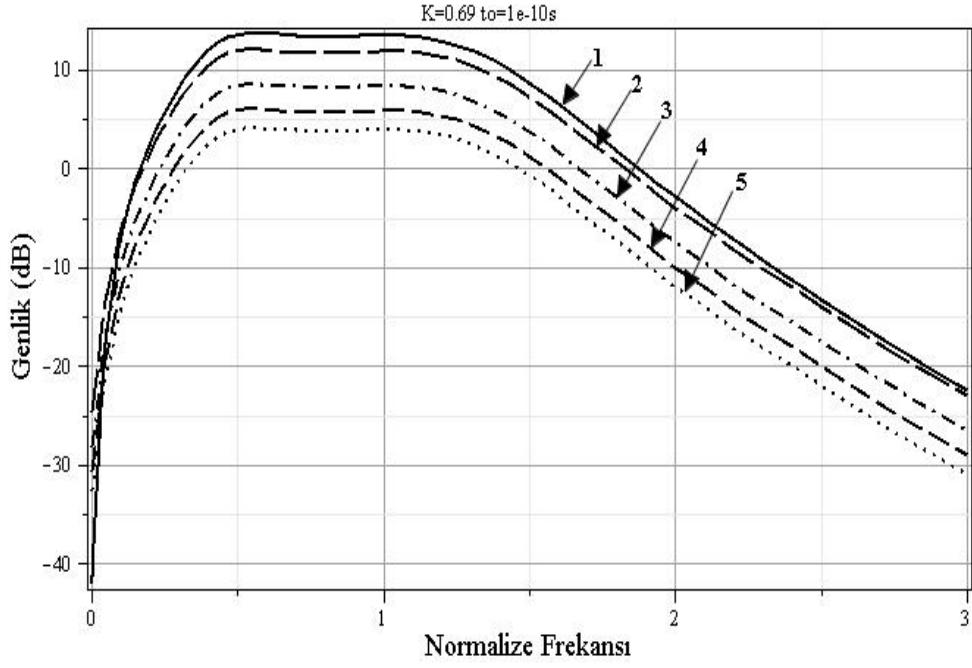
1. $(-\omega_4 + \omega_1 + \omega_3)$,
2. $(\omega_4 - \omega_2 + \omega_3), (-\omega_4 + \omega_2 + \omega_3), (-\omega_4 - \omega_2 + \omega_3), (\omega_4 + \omega_2 + \omega_3)$,
3. $(\omega_4 - \omega_1 + \omega_3), (-\omega_4 - \omega_1 + \omega_3), (\omega_4 + \omega_1 + \omega_3)$,
4. $(\omega_4 - \omega_1 - \omega_2), (\omega_4 - \omega_1 + \omega_2), (\omega_4 + \omega_1 - \omega_2), (\omega_4 + \omega_1 + \omega_2)$,
5. $(\omega_3 - \omega_1 - \omega_2), (\omega_3 - \omega_1 + \omega_2), (\omega_3 + \omega_1 - \omega_2), (\omega_3 + \omega_1 + \omega_2)$

IMD frekans bileşenlerinin genlikleri ve farkları, geri besleme kazanç sabiti ve zaman gecikmesine bağlı olarak IMD frekans bileşenlerinin genlik değerleri aşağıdaki çizelge 4.8'de verilmiştir. Genlik farkları $K=0,69$ ve $K=1$ için incelendiğinde 1. grubun diğer gruplara göre daha büyük değere sahip olduğu görülmüştür. $t_o = 1.10^{-10} s$ için incelendiğinde ise tüm gruplarda genlik farkı değerlerinin birbirine çok yakın olduğu, $t_o = 1.10^{-11} s$ durumunda ise 5. grubun farklılık gösterdiği görülmüştür.

Çizelge 4.8 Sekizinci grup IMD frekans bileşenleri arasındaki ilişki

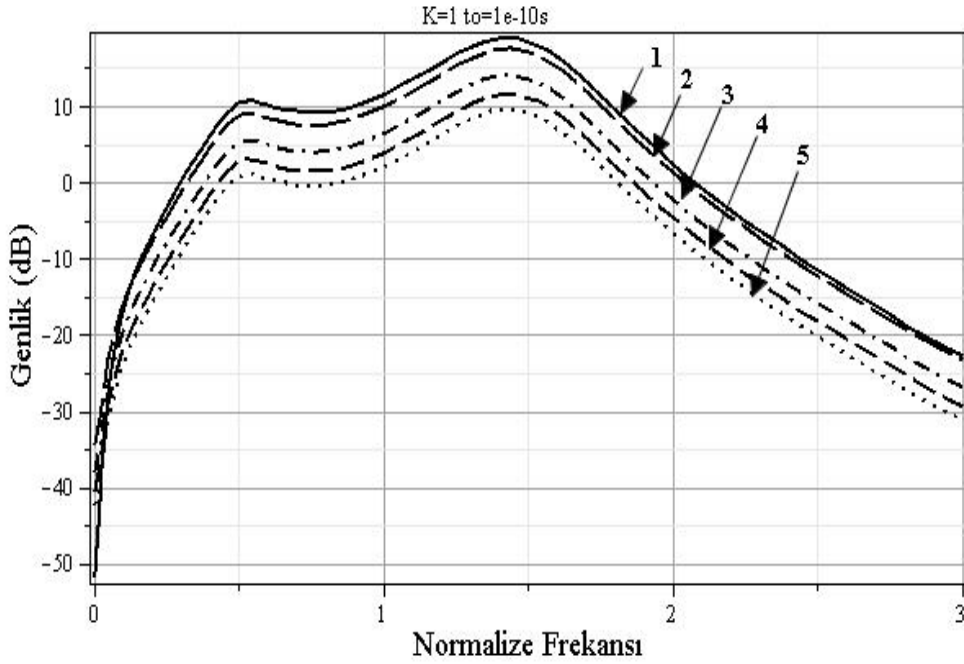
IMD Bileşenleri		GENLİK (dB)				
		1	2	3	4	5
K=0,69	$t_0=1.10^{-10}$ s	13,91	12,18	8,65	6,15	4,22
	$t_0=1.10^{-11}$ s	-32,02	-29,31	-32,83	-35,33	-37,42
K=1	$t_0=1.10^{-10}$ s	19,26	17,71	14,19	11,69	9,75
	$t_0=1.10^{-11}$ s	-18,63	-15,36	-18,88	-21,46	-23,32
K=0.69	Genlik Farkı	45,93	41,49	41,48	41,48	41,64
K=1	Genlik Farkı	37,89	33,07	33,07	33,15	33,07
$t_0=1.10^{-10}$ s	Genlik Farkı	-5,35	-5,53	-5,54	-5,54	-5,53
$t_0=1.10^{-11}$ s	Genlik Farkı	-13,39	-13,95	-13,95	-13,87	-14,10

Şekil 4.29-4.30'da gecikme zamanı $t_0 = 1.10^{-10}$ s ve geri besleme sabitine bağlı olarak taşıyıcıdan elde edilen fark frekanslarının genlik değerleri görülmektedir. Şekil 4.29'da gecikme zamanı $t_0 = 1.10^{-10}$ s iken $K=0,69$ için en küçük genlik değeri 5 nolu IMD frekans bileşeni için 4,22dB, en büyük genlik değeri ise 1 nolu IMD frekans bileşeni için 13,91dB'dir. Normalize frekans band genişliği değerleri sırasıyla 1,06, 1,08, 1,03, 1,04 ve 1,04 olarak bulunmuştur. Band genişliği olarak -3dB için en büyük değer 2 nolu ve en küçük değer ise 3 nolu IMD frekans bileşeninden elde edilmiştir. Bu şartlar altında grubun toplam band genişliği teorik olarak 5,25.1010 Hz hesaplanmıştır.



Şekil 4.29 Sekizinci grup IMD eğrileri

Şekil 4.30'da ise $K=1$ için en küçük genlik değeri 9,75dB, en büyük genlik değeri ise 19,26dB olarak bulunmuştur. Normalizasyon frekans değerleri sırasıyla 0,42, 0,41, 0,40, 0,41 ve 0,40 olarak bulunmuştur. Band genişliği olarak -3dB için grubun toplam band genişliği teorik olarak $2,04 \cdot 10^{10}$ Hz hesaplanmıştır.

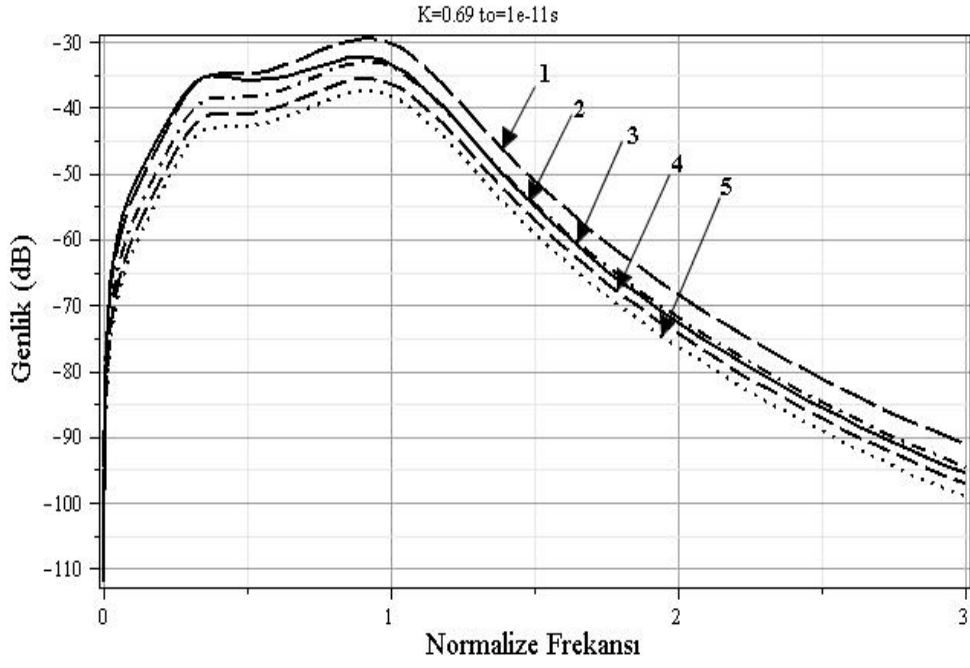


Şekil 4.30 Sekizinci grup IMD eğrileri

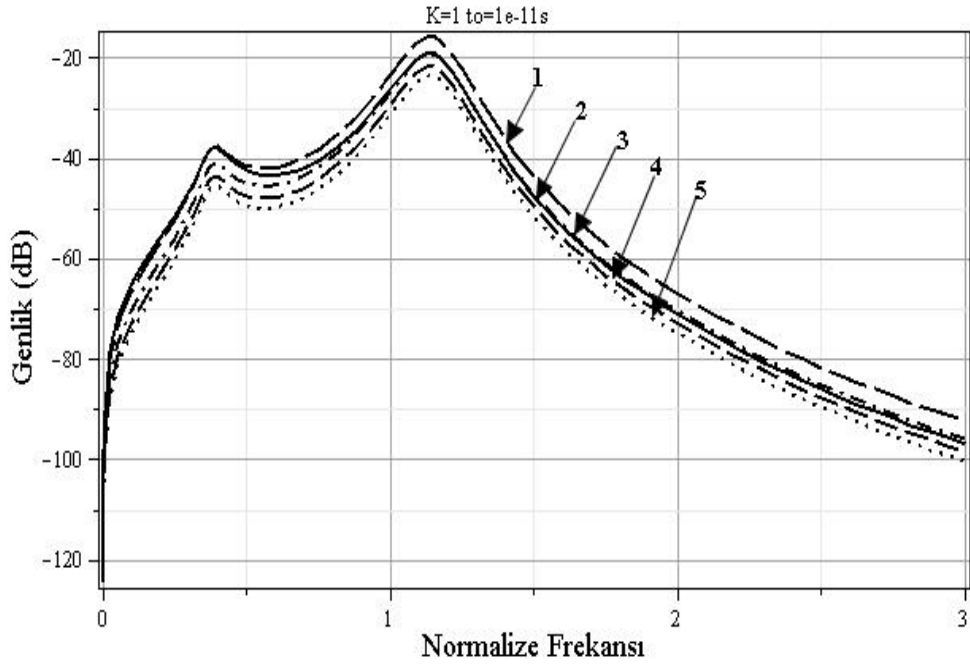
Şekil 4.31-4.32 gecikme zamanı $t_o = 1.10^{-11} s$ için elde edilmiştir. Şekil 4.31’de gecikme zamanı $t_o = 1.10^{-11} s$ iken $K=0,69$ için en küçük genlik değeri $-37,42$ dB, en büyük genlik değeri ise $-32,62$ dB’dir. Normalize frekans band genişliği değerleri sırasıyla $0,39$, $0,43$, $0,39$, $0,40$ ve $0,41$ olarak bulunmuştur. Band genişliği olarak -3 dB için en büyük değer 2 nolu ve en küçük değer ise 1 ve 3 nolu IMD frekans bileşeninden elde edilmiştir. Bu şartlar altında grubun toplam band genişliği teorik olarak $2,02.10^{11}$ Hz hesaplanmıştır.

Şekil 4.32’de ise $K=1$ için en küçük genlik değeri $-23,32$ dB, en büyük genlik değeri ise $-18,63$ dB olarak gözlenmiştir. Normalize frekans band genişliği değerleri sırasıyla $0,16$, $0,16$, $0,16$, $0,17$ ve $0,13$ olarak bulunmuştur. Band genişliği olarak -3 dB için en büyük değer 4 nolu ve en küçük değer ise 5 nolu IMD frekans bileşeninden elde edilmiştir. Bu şartlar altında grubun toplam band genişliği teorik olarak $0,78.10^{11}$ Hz hesaplanmıştır.

Genlik farkları incelendiğinde gecikme zamanı $t_o = 1.10^{-11} s$ iken $K=0,69$ ve $K=1$ için 1. grup diğer gruplara göre farklılık göstermektedir.



Şekil 4.31 Sekizinci grup IMD eğrileri



Şekil 4.32 Sekizinci grup IMD eğrileri

4.2 Alternatif IMD Bileşenleri

Alternatif IMD bileşenlerinin yer aldığı 9 grup sırasıyla aşağıda verilmektedir.

4.2.1 Birinci grup

Birinci grup taşıyıcı IMD frekans bileşenlerinden sekiz farklı IMD bileşen grubu elde edilmiştir. Bunlar;

1. $(\omega_4 + 2\omega_0), (\omega_4 - 2\omega_0),$
2. $(-\omega_0 + 2\omega_4), (\omega_0 + 2\omega_4),$
3. $(\omega_3 + 2\omega_0), (\omega_3 - 2\omega_0),$
4. $(\omega_2 + 2\omega_0), (\omega_2 - 2\omega_0),$
5. $(\omega_0 + 2\omega_3), (-\omega_0 + 2\omega_3),$
6. $(\omega_1 - 2\omega_0), (\omega_1 + 2\omega_0),$
7. $(-\omega_0 + 2\omega_2), (\omega_0 + 2\omega_2),$
8. $(-\omega_0 + 2\omega_1), (\omega_0 + 2\omega_1)$

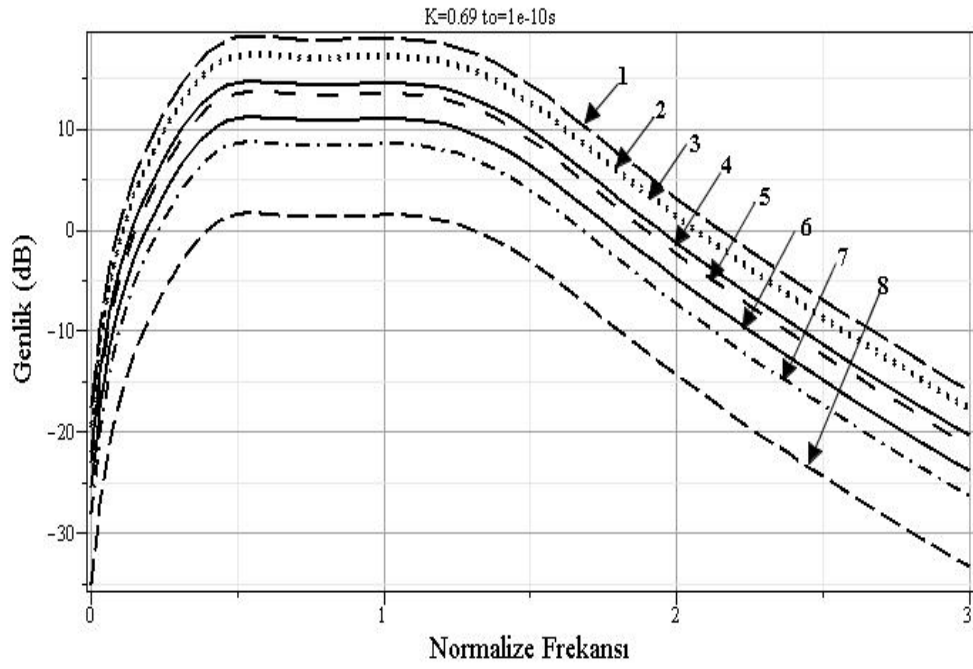
IMD frekans bileşenlerinin genlikleri ve farkları, geri besleme kazanç sabiti ve zaman gecikmesine bağlı olarak IMD frekans bileşenlerinin genlik değerleri aşağıdaki çizelge 4.9'da verilmiştir. Genlik farkları $K=0,69$ ve $K=1$ için incelendiğinde tüm grupların birbirlerine yakın değerlerden oluştuğu görülmüştür. $t_o = 1.10^{-10} s$ için incelendiğinde ise tüm gruplarda genlik farkı değerlerinin birbirine çok yakın olduğu, $t_o = 1.10^{-11} s$ durumunda ise 5. grubun farklılık gösterdiği görülmüştür.

Çizelge 4.9 Birinci grup IMD frekans bileşenleri arasındaki ilişki

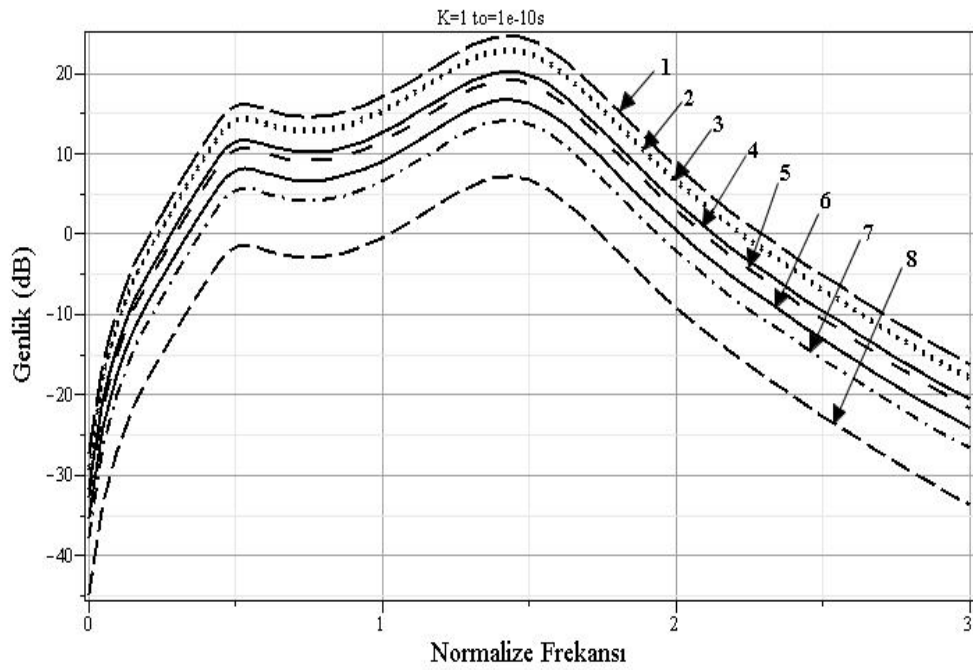
IMD Bileşenleri		GENLİK (dB)							
		1	2	3	4	5	6	7	8
K=0.69	$t_o=1.10^{-10}$ s	19,16	17,58	17,23	14,73	13,70	11,20	8,71	1,67
	$t_o=1.10^{-11}$ s	-22,32	-23,91	-24,26	-26,76	-27,78	-30,28	-32,78	-39,82
K=1	$t_o=1.10^{-10}$ s	24,68	23,16	22,81	20,24	19,29	16,72	14,22	7,18
	$t_o=1.10^{-11}$ s	-8,39	-9,98	-10,33	-12,83	-13,85	-16,35	-18,85	-25,89
K=0.69	Genlik Farkı	41,48	41,49	41,49	41,49	41,48	41,48	41,49	41,49
K=1	Genlik Farkı	33,07	33,14	33,14	33,07	33,14	33,07	33,07	33,07
$t_o=1.10^{-10}$ s	Genlik Farkı	-5,52	-5,58	-5,58	-5,51	-5,59	-5,52	-5,51	-5,51
$t_o=1.10^{-11}$ s	Genlik Farkı	-13,93	-13,93	-13,93	-13,93	-13,93	-13,93	-13,93	-13,93

Şekil 4.33-4.34 gecikme zamanı $t_o = 1.10^{-10}$ s ve geri besleme sabitine (K) bağlı olarak taşıyıcıdan elde edilen frekans bileşenlerinin genlik değerleri görülmektedir. Şekil 4.33'te gecikme zamanı $t_o = 1.10^{-10}$ s iken K=0,69 için en küçük genlik değeri 1,67dB, en büyük genlik değeri ise 19,16dB'dir. Normalize frekans band genişliği değerleri sırasıyla 1,04, 1,04, 1,04, 1,04, 1,04, 1,02, 1,03, 1,03 olarak bulunmuştur. Band genişliği olarak -3dB için grubun toplam band genişliği $8,28.10^{10}$ Hz olarak hesaplanmıştır.

Şekil 4.34'te ise K=1 için en küçük genlik değeri 7,18dB, en büyük genlik değeri ise 24,68dB olarak gözlenmiştir. Normalize frekans band genişliği değerleri sırasıyla 0,38, 0,40, 0,40, 0,40, 0,39, 0,41, 0,40 ve 0,39 olarak bulunmuştur. Band genişliği olarak -3dB için grubun toplam band genişliği $3,17.10^{10}$ Hz olarak hesaplanmıştır.



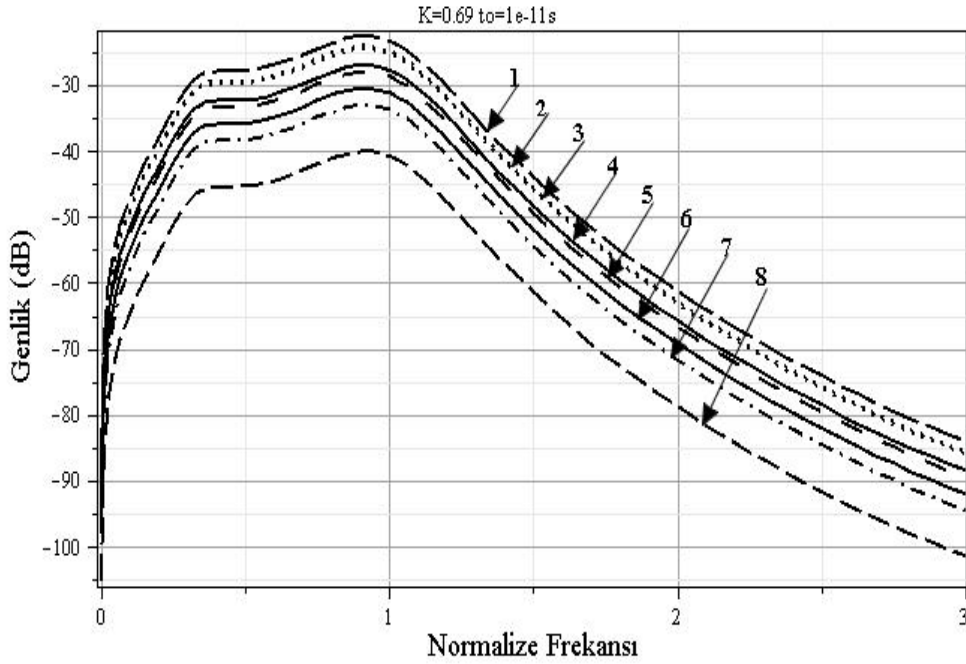
Şekil 4.33 Birinci grup IMD eğrileri



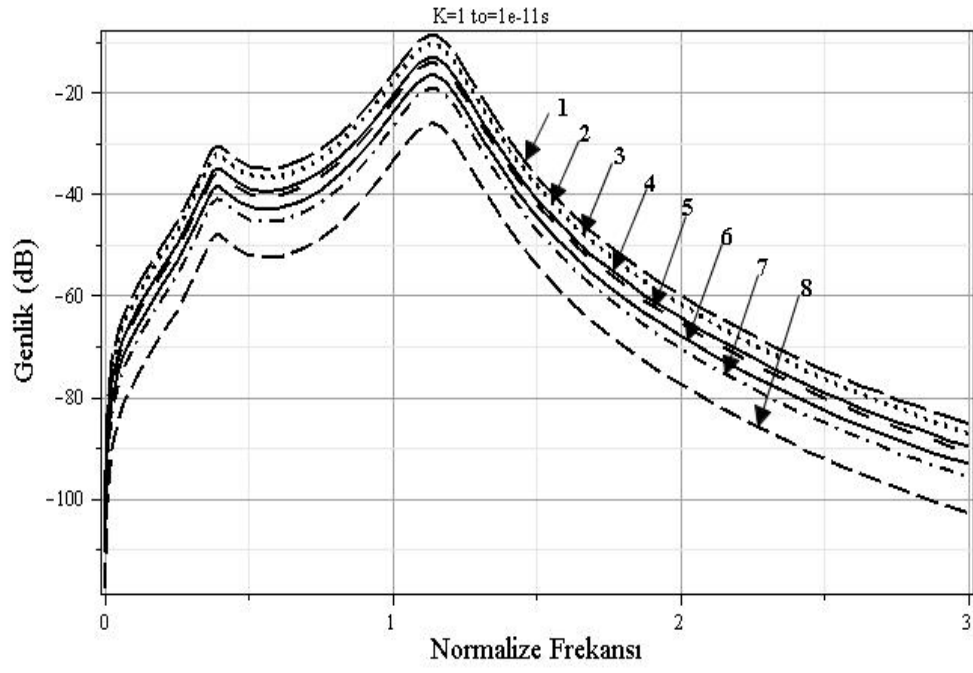
Şekil 4.34 Birinci grup IMD eğrileri

Şekil 4.35-4.36 gecikme zamanı $t_o = 1.10^{-11} s$ için elde edilmiştir. Şekil 4.35'te gecikme zamanı $t_o = 1.10^{-11} s$ iken $K=0,69$ için en küçük genlik değeri $-39,82dB$, en büyük genlik değeri ise $-22,32dB$ 'dir. Normalize frekans band genişliği değerleri sırasıyla $0,41, 0,37, 0,37, 0,40, 0,43, 0,36, 0,36$ ve $0,38$ olarak bulunmuştur. Band genişliği olarak $-3dB$ için grubun toplam band genişliği $3,08.10^{11} Hz$ olarak hesaplanmıştır.

Şekil 4.36'da ise $K=1$ için en küçük genlik değeri $-25,89dB$, en büyük genlik değeri ise $-8,39dB$ olarak gözlenmiştir. Normalize frekans band genişliği değerleri sırasıyla $0,16, 0,16, 0,16, 0,16, 0,16, 0,15, 0,16$ ve $0,17$ olarak bulunmuştur. Band genişliği olarak $-3dB$ için grubun toplam band genişliği $1,28.10^{11} Hz$ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.35 Birinci grup IMD eğrileri



Şekil 4.36 Birinci grup IMD eğrileri

4.2.2 İkinci grup

İkinci grup taşıyıcı IMD frekans bileşenlerinden sekiz farklı IMD bileşen grubu elde edilmiştir. Bunlar;

1. $(-\omega_4 - \omega_0 + \omega_3), (\omega_4 - \omega_0 + \omega_3), (-\omega_4 + \omega_0 + \omega_3), (\omega_4 + \omega_0 + \omega_3),$
2. $(\omega_4 + \omega_0 + \omega_2), (\omega_4 + \omega_0 - \omega_2), (\omega_4 - \omega_0 - \omega_2), (\omega_4 - \omega_0 + \omega_2),$
3. $(\omega_2 + \omega_0 + \omega_1),$
4. $(\omega_3 - \omega_0 - \omega_2), (\omega_3 - \omega_0 + \omega_2), (\omega_3 + \omega_0 - \omega_2), (\omega_3 + \omega_0 + \omega_2),$
5. $(\omega_4 - \omega_0 - \omega_1), (\omega_4 - \omega_0 + \omega_1), (\omega_4 + \omega_0 - \omega_1), (\omega_4 + \omega_0 + \omega_1),$
6. $(\omega_3 - \omega_0 - \omega_1), (\omega_3 - \omega_0 + \omega_1), (\omega_3 + \omega_0 - \omega_1),$
7. $(-\omega_2 - \omega_0 + \omega_1), (\omega_2 - \omega_0 + \omega_1), (-\omega_2 + \omega_0 + \omega_1),$
8. $(\omega_3 + \omega_0 + \omega_1)$

IMD frekans bileşenlerinin genlikleri ve farkları, geri besleme kazanç sabiti ve zaman gecikmesine bağlı olarak IMD frekans bileşenlerinin genlik değerleri çizelge 4.10'da verilmiştir.

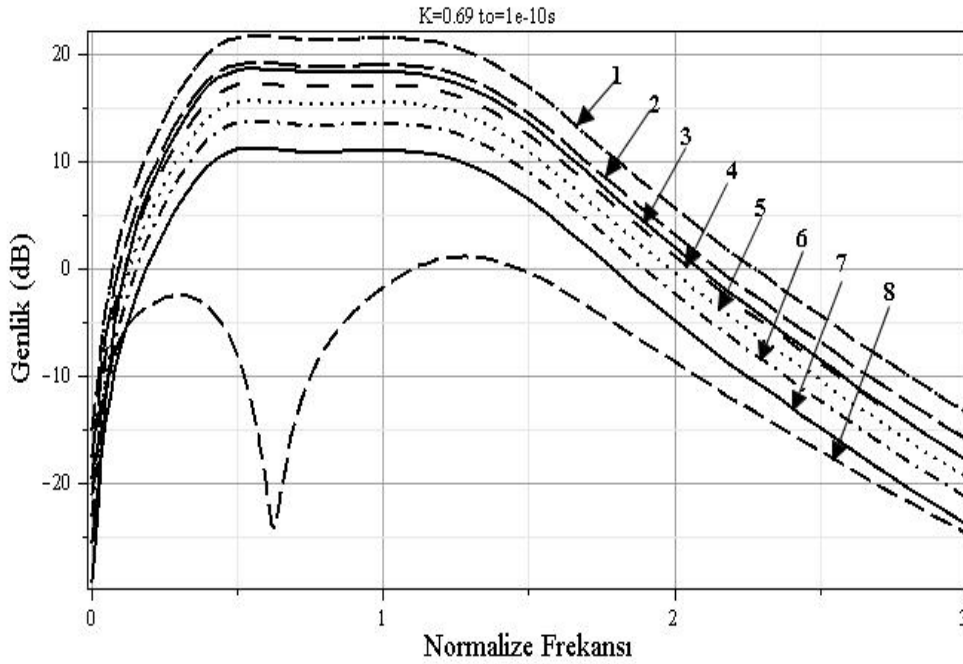
Çizelge 4.10 İkinci grup IMD frekans bileşenleri arasındaki ilişki

IMD Bileşenleri		GENLİK (dB)							
		1	2	3	4	5	6	7	8
K=0.69	$t_0=1.10^{-10}$ s	21,66	19,16	18,73	17,23	15,64	13,70	11,22	1,10
	$t_0=1.10^{-11}$ s	-19,82	-22,32	-28,61	-24,26	-25,84	-27,78	-30,28	-27,06
K=1	$t_0=1.10^{-10}$ s	27,18	24,68	23,96	22,81	21,16	19,29	16,72	9,51
	$t_0=1.10^{-11}$ s	-5,89	-8,39	-15,60	-10,33	-11,92	-13,85	-16,35	-12,87
K=0.69	Genlik Farkı	41,48	41,48	47,34	41,49	41,48	41,48	41,50	28,16
K=1	Genlik Farkı	33,07	33,07	39,56	33,14	33,08	33,14	33,07	22,38
$t_0=1.10^{-10}$ s	Genlik Farkı	-5,52	-5,52	-4,43	-5,58	-5,52	-5,59	-5,50	-8,41
$t_0=1.10^{-11}$ s	Genlik Farkı	-13,93	-13,93	-13,01	-13,93	-13,92	-13,93	-13,93	-14,19

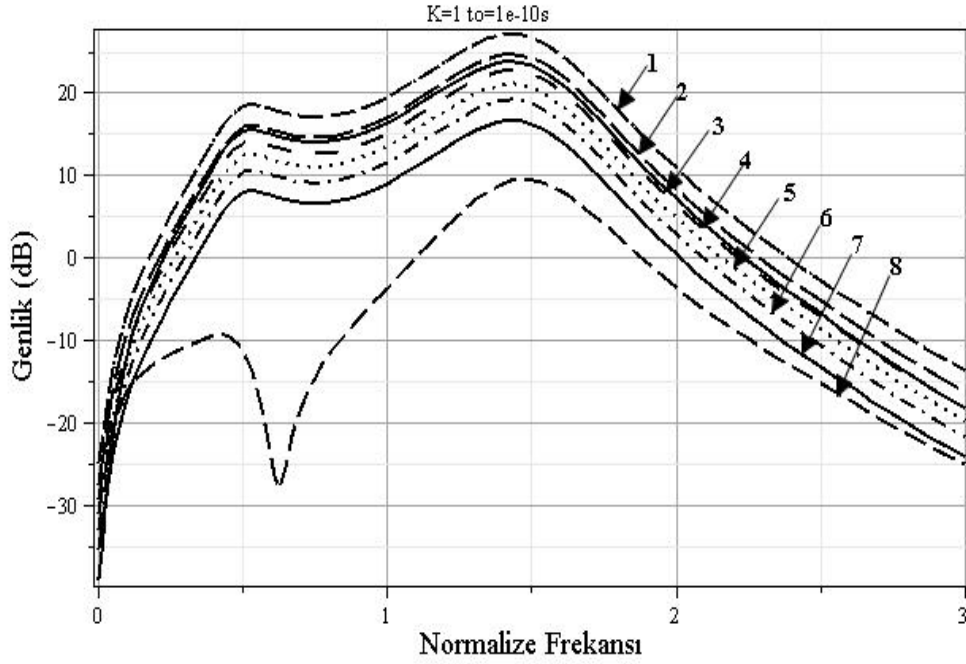
Şekil 4.37-4.38 gecikme zamanı $t_0 = 1.10^{-10}$ s ve geri besleme sabitine bağlı olarak taşıyıcıdan elde edilen frekans bileşenlerinin genlik değerleri görülmektedir. Şekil

4.37’de gecikme zamanı $t_o = 1.10^{-10} s$ iken $K=0,69$ için en küçük genlik değeri 8 nolu IMD frekans bileşeni için 1,10dB, en büyük genlik değeri ise 1 nolu IMD frekans bileşeni için 21,66dB’dir. Normalize frekans band genişliği değerleri sırasıyla 1,05, 1,06, 1,05, 1,05, 1,05, 1,06, 1,03 ve 0,63 olarak bulunmuştur. Band genişliği olarak -3dB için en küçük değer 8 nolu IMD frekans bileşeninden elde edilmiştir. Bu şartlar altında grubun toplam band genişliği teorik olarak $7,98.10^{10}$ Hz hesaplanmıştır.

Şekil 4.38’de ise $K=1$ için en küçük genlik değeri 9,51dB, en büyük genlik değeri ise 27,18dB olarak gözlenmiştir. 8.grup olarak belirtilen eğrinin diğerlerinden farklı bir şekli olduğu görülmektedir. Normalize frekans band genişliği değerleri sırasıyla 0,38, 0,37, 0,37, 0,36, 0,37, 0,37, 0,35 ve 0,35 olarak bulunmuştur. Band genişliği olarak -3dB için grubun toplam band genişliği teorik olarak $2,9.10^{10}$ Hz hesaplanmıştır.



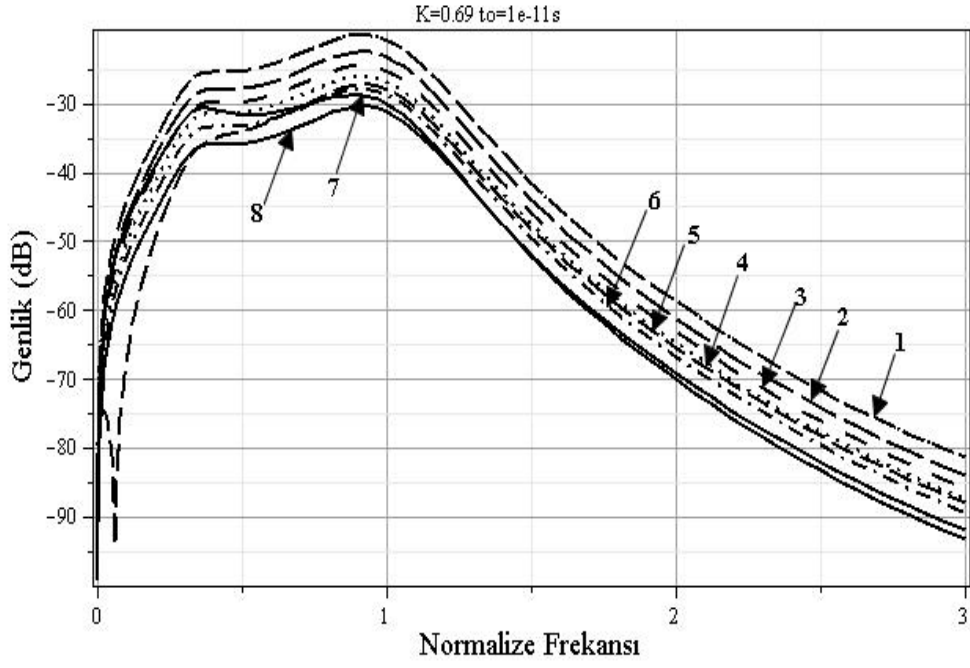
Şekil 4.37 İkinci grup IMD eğrileri



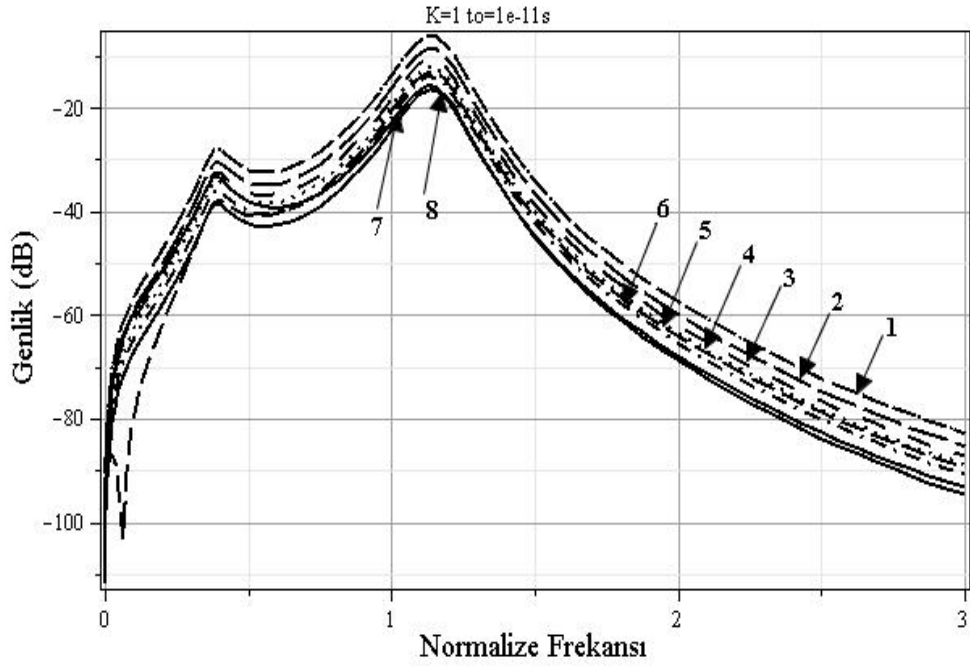
Şekil 4.38 İkinci grup IMD eğrileri

Şekil 4.39-4.40 gecikme zamanı $t_o = 1.10^{-11} s$ için elde edilmiştir. Şekil 4.39'da gecikme zamanı $t_o = 1.10^{-11} s$ iken $K=0,69$ için en küçük genlik değeri $-27,06$ dB, en büyük genlik değeri ise $-19,82$ dB'dir. Normalize frekans band genişliği değerleri sırasıyla $0,37, 0,36, 0,39, 0,40, 0,36, 0,39, 0,41$ ve $0,37$ olarak bulunmuştur. Band genişliği olarak -3 dB için en büyük değer 7 nolu ve en küçük değer ise 2 ve 5 nolu IMD frekans bileşenlerinden elde edilmiştir. Bu şartlar altında grubun toplam band genişliği teorik olarak $3,05.10^{11}$ Hz hesaplanmıştır.

Şekil 4.40'ta ise $K=1$ için en küçük genlik değeri $-12,87$ dB, en büyük genlik değeri ise $-5,89$ dB olarak gözlenmiştir. Normalize frekans band genişliği değerleri sırasıyla $0,14, 0,14, 0,14, 0,14, 0,14, 0,15, 0,15$ ve $0,14$ olarak bulunmuştur. Grubun toplam band genişliği ise teorik olarak $1,14.10^{11}$ Hz hesaplanmıştır.



Şekil 4.39 İkinci grup IMD eğrileri



Şekil 4.40 İkinci grup IMD eğrileri

4.2.3 Üçüncü grup

Üçüncü grup taşıyıcı IMD frekans bileşenlerinden dört farklı IMD bileşen grubu elde edilmiştir. Bunlar;

1. $(\omega_0 + \omega_4), (\omega_0 - \omega_4),$
2. $(\omega_3 + \omega_0), (-\omega_0 + \omega_3),$
3. $(\omega_0 - \omega_2), (\omega_0 + \omega_2),$
4. $(\omega_1 + \omega_0), (-\omega_0 + \omega_1)$

IMD frekans bileşenlerinin genlikleri ve farkları, geri besleme kazanç sabiti ve zaman gecikmesine bağlı olarak IMD frekans bileşenlerinin genlik çizelge 4.11’de verilmiştir.

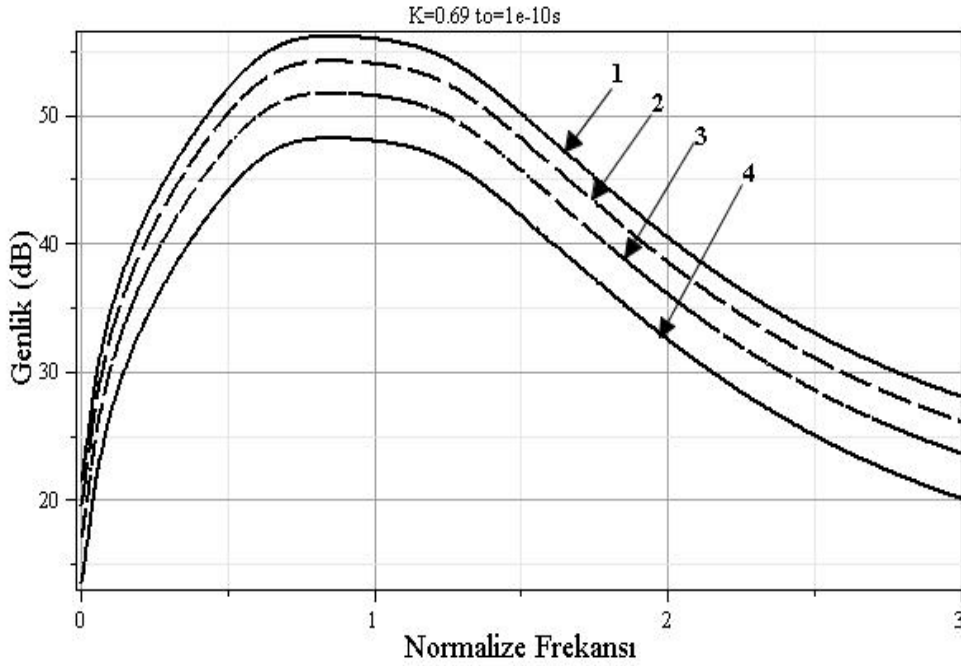
Çizelge 4.11 Üçüncü grup IMD frekans bileşenleri arasındaki ilişki

IMD Bileşenleri		GENLİK(dB)			
		1	2	3	4
K=0.69	$t_o=1.10^{-10}$ s	56.25	54.31	51.81	48.21
	$t_o=1.10^{-11}$ s	24.76	22.71	20.22	16.75
K=1	$t_o=1.10^{-10}$ s	80.33	78.27	75.64	72.31
	$t_o=1.10^{-11}$ s	32.20	30.10	27.57	24.22
K=0.69	Genlik Farkı	31.49	31.60	31.59	31.46
K=1	Genlik Farkı	48.13	48.17	48.07	48.09
$t_o=1.10^{-10}$ s	Genlik Farkı	-24,07	-21,33	-23,83	-24,10
$t_o=1.10^{-11}$ s	Genlik Farkı	-7,44	-7,39	-7,35	-7,47

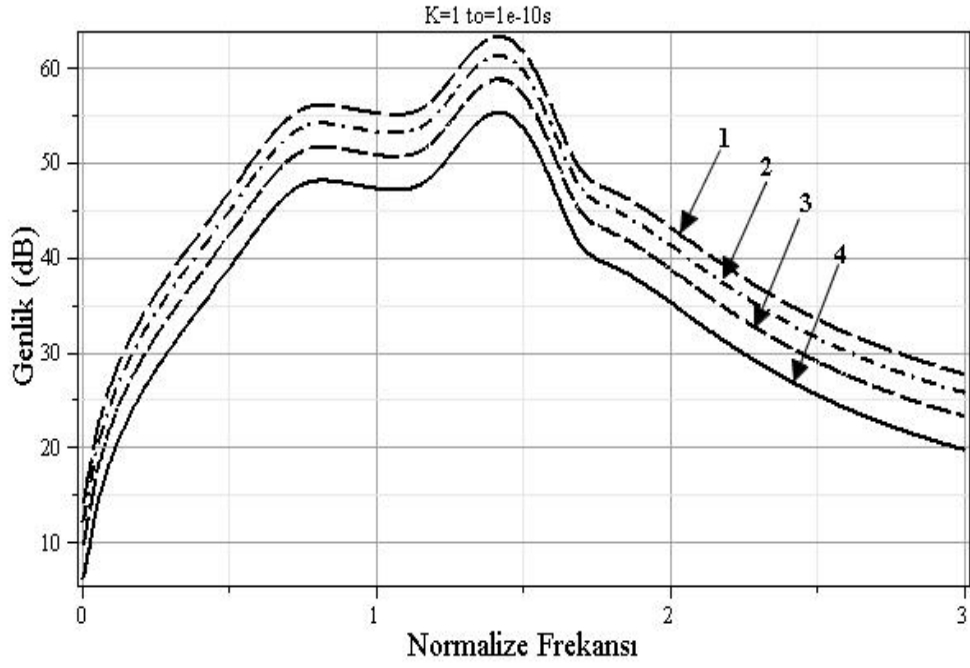
Şekil 4.41-4.42 gecikme zamanı $t_o = 1.10^{-10}$ s ve geri besleme sabitine bağlı olarak taşıyıcıdan elde edilen fark frekanslarının genlik değerleri görülmektedir. Şekil 4.41’de gecikme zamanı $t_o = 1.10^{-10}$ s iken K=0,69 için en küçük genlik değeri 4 nolu IMD frekans bileşeni için 48,21dB, en büyük genlik değeri ise 1 nolu IMD frekans bileşeni için 56,25dB’dir. Normalize frekans band genişliği değerleri tüm IMD bileşenleri için 0,80 olarak bulunmuş ve -3 dB için grubun toplam band genişliği $3,2.10^{10}$ olarak hesaplanmıştır.

Şekil 4.42’de ise $K=1$ için en küçük genlik değeri 72,31dB, en büyük genlik değeri ise 80,33dB olarak gözlenmiştir. Normalize frekans band genişliği değerleri sırasıyla 0,25, 0,24, 0,24 ve 0,23 olarak bulunmuştur. -3dB için grubun toplam band genişliği $0,96.10^{10}$ olarak hesaplanmıştır. $K=1$ durumunda $K=0,69$ ’a göre band genişliğinde azalma görülmektedir.

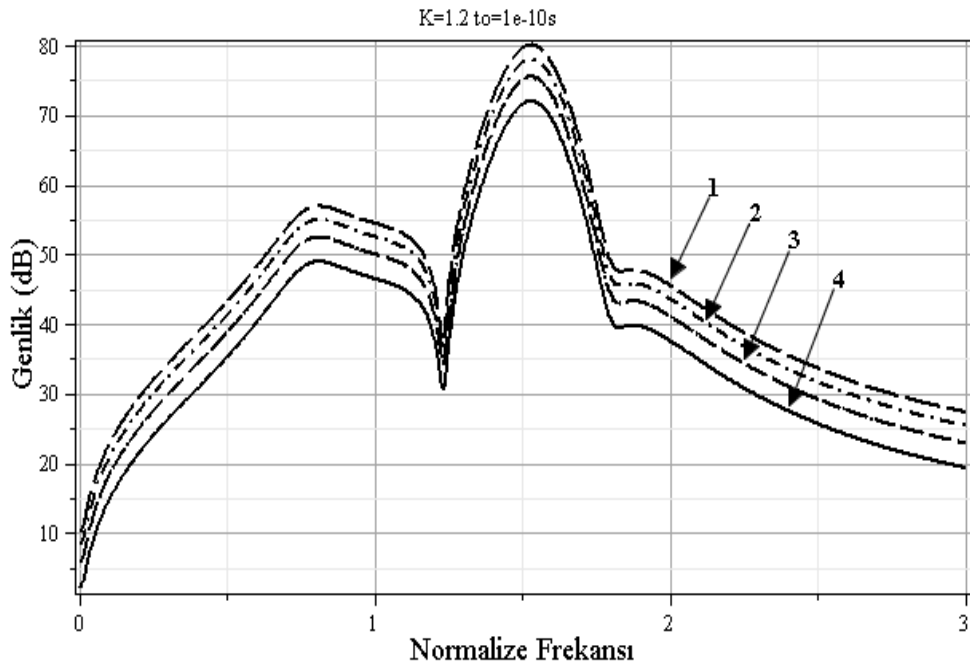
Şekil 4.43 ise gecikme zamanı $t_o = 1.10^{-10} s$ iken $K=1,2$ için elde edilmiştir. Normalize frekans band genişliği değerleri tüm IMD bileşenleri için 0,16 olarak bulunmuş ve -3dB için grubun toplam band genişliği $0,64.10^{10}$ olarak hesaplanmıştır. $K=1,2$ durumunda $K=1$ ’e göre band genişliğinde azalma görülmektedir.



Şekil 4.41 Üçüncü grup IMD eğrileri



Şekil 4.42 Üçüncü grup IMD eğrileri

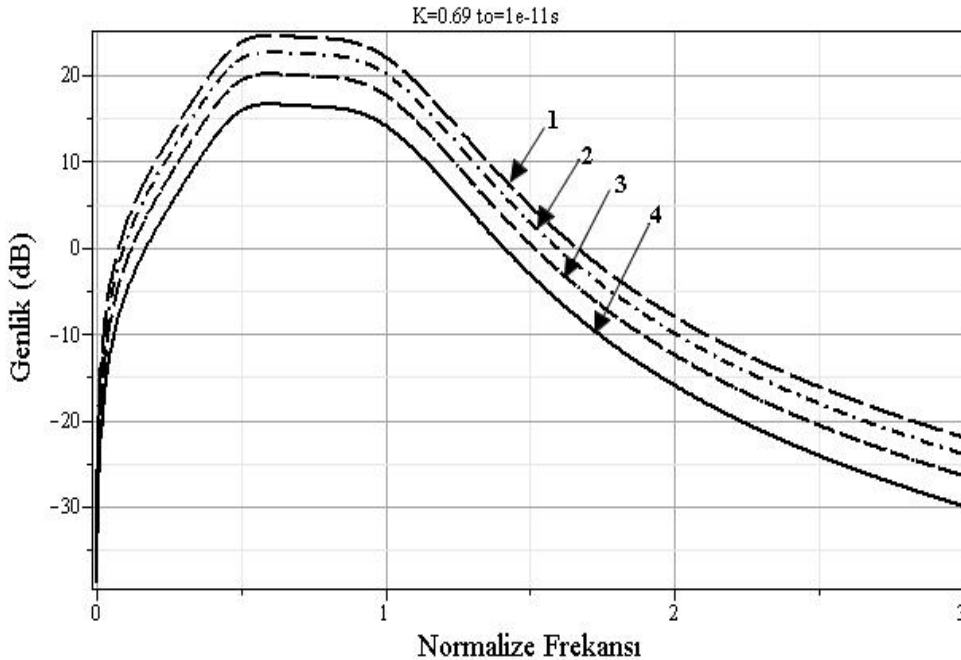


Şekil 4.43 Üçüncü grup IMD eğrileri

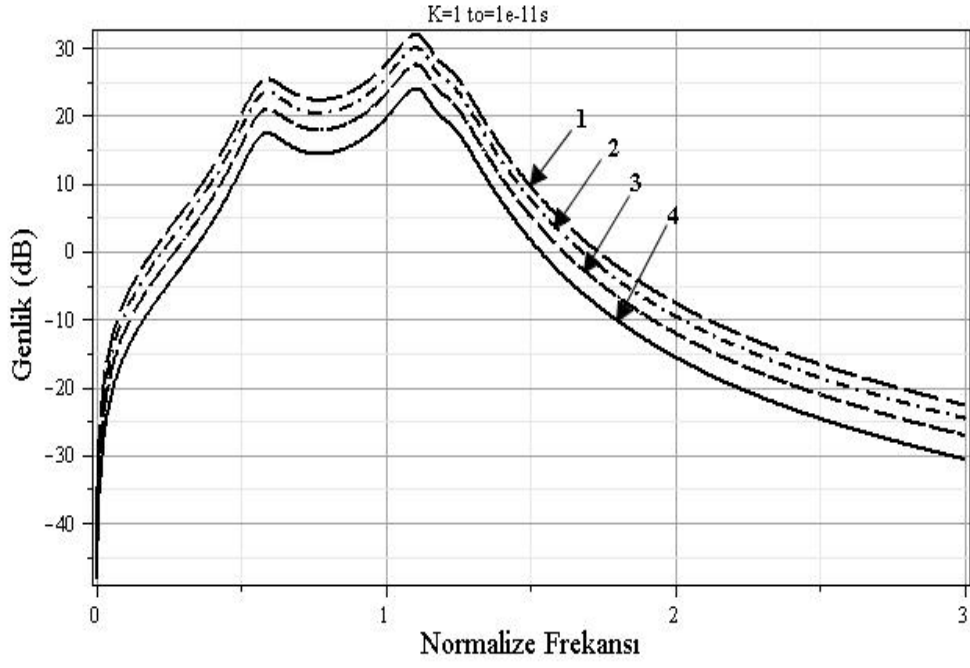
Şekil 4.44 ve Şekil 4.45 gecikme zamanı $t_o = 1.10^{-11} s$ için elde edilmiştir. Şekil 4.44'te gecikme zamanı $t_o = 1.10^{-11} s$ iken $K=0,69$ için en küçük genlik değeri 16,75dB, en büyük genlik değeri ise 24,76dB'dir. Normalize frekans band genişliği değerleri sırasıyla 0,61, 0,60, 0,59 ve 0,59 olarak bulunmuştur. -3dB için grubun toplam band genişliği $2,39.10^{11}$ Hz olarak hesaplanmıştır.

Şekil 4.45'te ise $K=1$ için ise en küçük genlik değeri 24,22dB, en büyük genlik değeri ise 32,20dB olarak gözlenmiştir. Normalize frekans band genişliği değerleri sırasıyla 0,15, 0,14, 0,15 ve 0,14 olarak bulunmuştur. -3dB için grubun toplam band genişliği $0,58.10^{11}$ Hz olarak hesaplanmıştır.

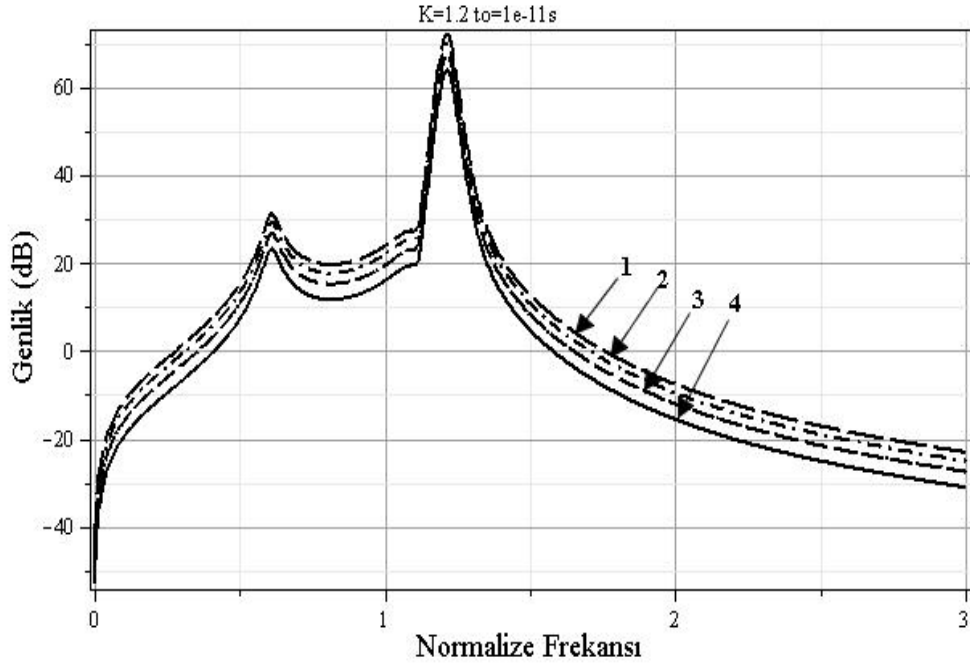
Şekil 4.46 gecikme zamanı $t_o = 1.10^{-11} s$ iken $K=1,2$ için elde edilmiştir. Normalize frekans band genişliği değerleri tüm IMD bileşenleri için 0,04 olarak bulunmuş ve -3dB için grubun toplam band genişliği $0,16.10^{11}$ olarak hesaplanmıştır. $K=1,2$ durumunda $K=0,69$ ve $K=1$ 'e göre band genişliğinde azalma görülmektedir.



Şekil 4.44 Üçüncü grup IMD eğrileri



Şekil 4.45 Üçüncü grup IMD eğrileri



Şekil 4.46 Üçüncü grup IMD eğrileri

4.2.4 Dördüncü grup

Dördüncü grup taşıyıcı IMD frekans bileşenlerinden dört farklı IMD bileşen grubu elde edilmiştir. Bunlar;

1. $(2\omega_1 + 2\omega_0)$,
2. $(2\omega_0 + 2\omega_2), (2\omega_0 - 2\omega_2)$,
3. $(2\omega_0 + 2\omega_3)$,
4. $(-2\omega_4 + 2\omega_0), (2\omega_0 + 2\omega_4)$

IMD frekans bileşenlerinin genlikleri ve farkları, geri besleme kazanç sabiti ve zaman gecikmesine bağlı olarak IMD frekans bileşenlerinin genlik değerleri çizelge 4.12’de verilmiştir.

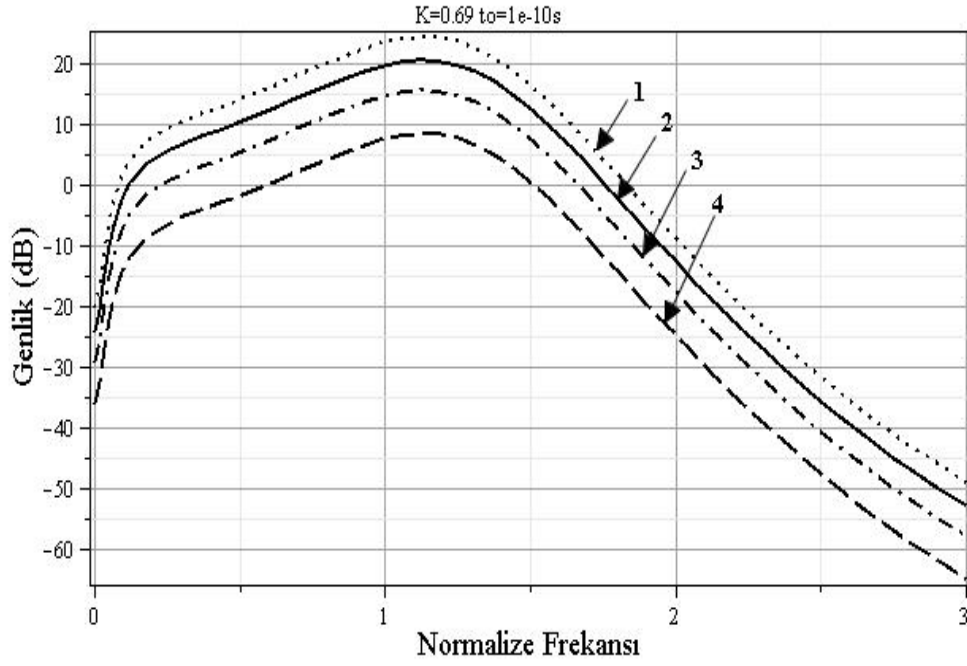
Çizelge 4.12 Dördüncü grup IMD frekans bileşenleri arasındaki ilişki

IMD Bileşenleri		GENLİK (dB)			
		1	2	3	4
K=0.69	$t_o=1.10^{-10}$ s	19,53	16,86	-10,26	-17,15
	$t_o=1.10^{-11}$ s	-33,96	-36,40	-61,52	-65,10
K=1	$t_o=1.10^{-10}$ s	46,05	43,39	16,00	9,35
	$t_o=1.10^{-11}$ s	6,73	4,50	-19,57	-22,76
K=0.69	Genlik Farkı	53,49	53,26	51,26	-47,95
K=1	Genlik Farkı	39,73	38,89	35,57	32,11
$t_o=1.10^{-10}$ s	Genlik Farkı	-26,52	-26,53	-26,26	-26,50
$t_o=1.10^{-11}$ s	Genlik Farkı	-40,69	-40,90	-41,95	-42,34

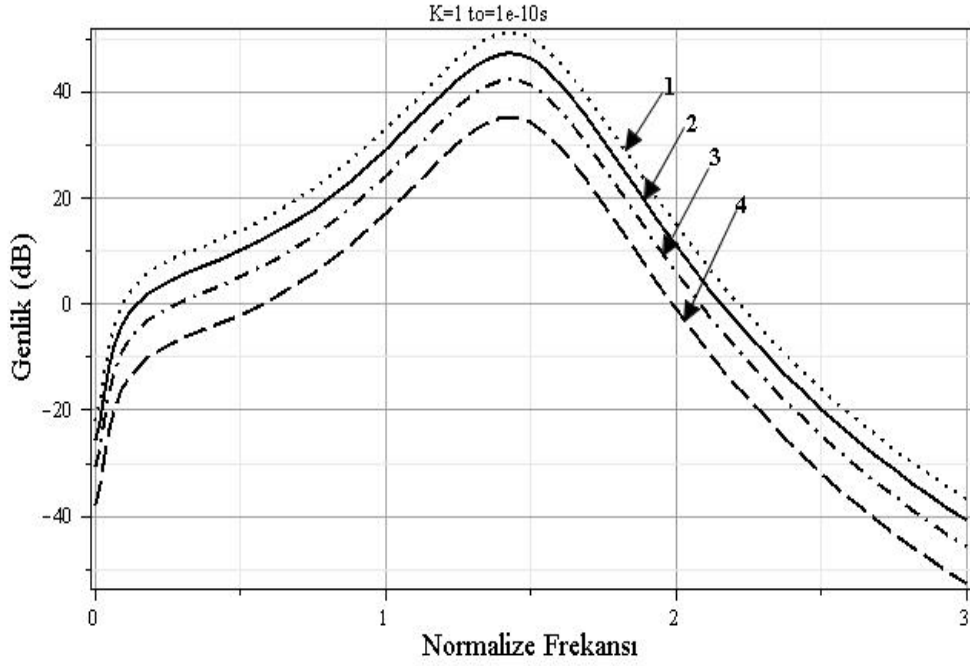
Şekil 4.47-4.48’de gecikme zamanı $t_o = 1.10^{-10}$ s ve geri besleme sabitine bağlı olarak taşıyıcıdan elde edilen fark frekanslarının genlik değerleri görülmektedir. Şekil 4.47’de gecikme zamanı $t_o = 1.10^{-10}$ s iken K=0,69 için en küçük genlik değeri 4 nolu IMD frekans bileşeni için -17,15dB, en büyük genlik değeri ise 1 nolu IMD frekans bileşeni için 19,53dB’dir. Normalize frekans band genişliği değerleri sırasıyla 0,50, 0,43, 0,47 ve 0,46 olarak bulunmuştur. Band genişliği olarak -3dB için en büyük değer 1 nolu ve

en küçük değer ise 2 nolu IMD frekans bileşeninden elde edilmiştir. Bu şartlar altında grubun toplam band genişliği teorik olarak $1,86 \cdot 10^{10}$ Hz hesaplanmıştır.

Şekil 4.48’de ise $K=1$ için en küçük genlik değeri 9,35dB, en büyük genlik değeri ise 46,05dB olarak gözlenmiştir. Normalize frekans band genişliği değerleri tüm IMD bileşenleri için 0,25 olarak bulunmuş ve -3dB için grubun toplam band genişliği $1,00 \cdot 10^{10}$ olarak hesaplanmıştır.



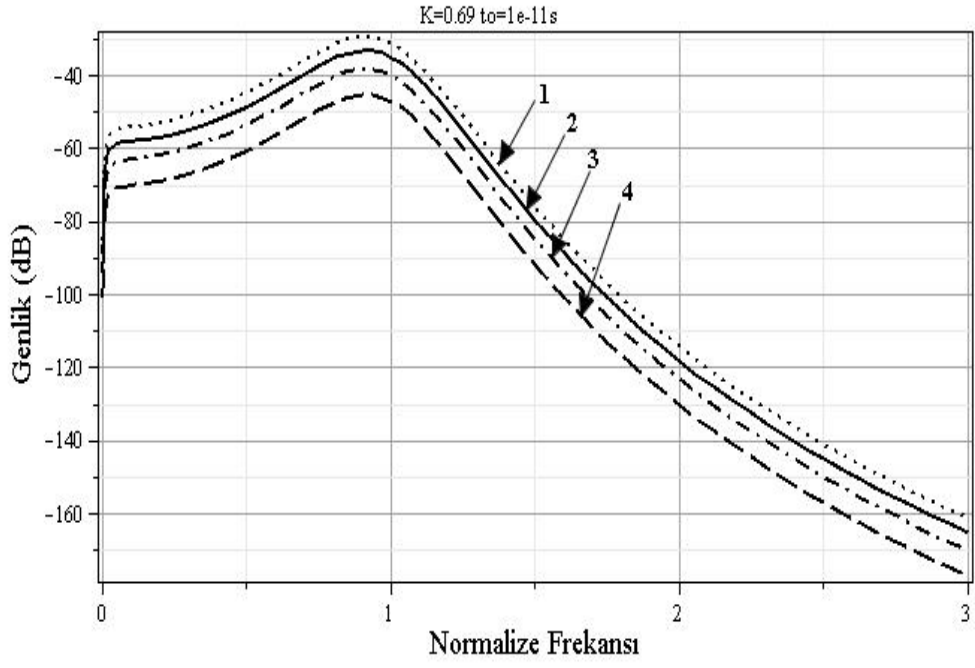
Şekil 4.47 Dördüncü grup IMD eğrileri



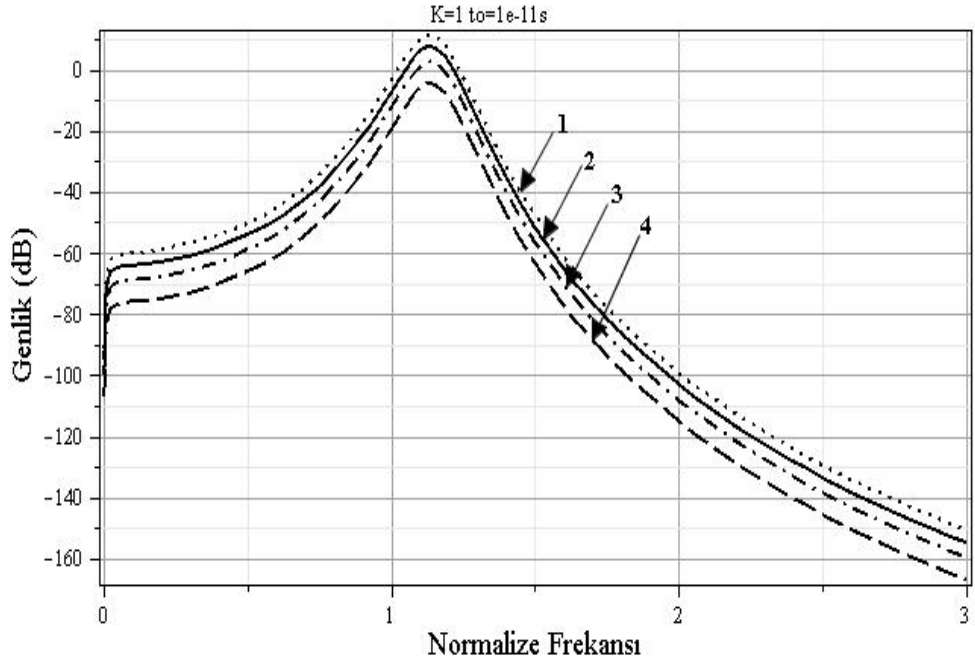
Şekil 4.48 Dördüncü grup IMD eğrileri

Şekil 4.49-4.50 gecikme zamanı $t_o = 1.10^{-11} s$ için elde edilmiştir. Şekil 4.49'da gecikme zamanı $t_o = 1.10^{-11} s$ iken $K=0,69$ için en küçük genlik değeri $-65,10$ dB, en büyük genlik değeri ise $-33,96$ dB'dir. Normalize frekans band genişliği değerleri tüm IMD bileşenleri için $0,27$ olarak bulunmuş ve -3 dB için grubun toplam band genişliği $1,08.10^{11}$ olarak hesaplanmıştır.

Şekil 4.50'de ise $K=1$ için en küçük genlik değeri $-22,76$ dB, en büyük genlik değeri ise $6,73$ dB olarak hesaplanmıştır. Normalize frekans band genişliği değerleri tüm IMD bileşenleri için $0,10$ olarak bulunmuş ve -3 dB için grubun toplam band genişliği $0,40.10^{11}$ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.49 Dördüncü grup IMD eğrileri



Şekil 4.50 Dördüncü grup IMD eğrileri

4.2.5 Beşinci grup

Beşinci grup taşıyıcı IMD frekans bileşenlerinden yirmi iki farklı IMD bileşen grubu elde edilmiştir. Bunlar;

1. $(-\omega_0 + 2\omega_1 + \omega_2)$,
2. $(\omega_3 - 2\omega_4 + \omega_0)$,
3. $(2\omega_0 + \omega_4 + \omega_2)$,
4. $(\omega_3 + 2\omega_0 + \omega_4), (\omega_3 - 2\omega_0 - \omega_4), (\omega_4 - 2\omega_0 + \omega_3)$,
5. $(-\omega_4 + 2\omega_0 + \omega_3)$,
6. $(2\omega_4 + \omega_3 + \omega_0), (\omega_3 + 2\omega_4 - \omega_0), (\omega_3 - 2\omega_4 - \omega_0)$,
7. $(-\omega_2 + 2\omega_0 + \omega_4), (-\omega_2 + 2\omega_0 - \omega_4)$,
8. $(2\omega_3 + \omega_0 - \omega_4), (\omega_0 + \omega_4 + 2\omega_3), (2\omega_3 - \omega_0 + \omega_4), (2\omega_3 - \omega_0 - \omega_4)$,
9. $(-2\omega_4 + \omega_0 + \omega_2), (-2\omega_4 - \omega_2 + \omega_0), (2\omega_4 + \omega_0 + \omega_2), (-\omega_2 + 2\omega_4 + \omega_0)$,
10. $(\omega_3 - 2\omega_0 + \omega_3), (\omega_2 + 2\omega_0 + \omega_3), (-\omega_2 + 2\omega_0 + \omega_3), (\omega_3 - 2\omega_0 - \omega_2)$,
11. $(-\omega_4 + 2\omega_0 + \omega_1), (\omega_4 + 2\omega_0 + \omega_1), (\omega_1 - 2\omega_0 + \omega_4), (\omega_1 - 2\omega_0 - \omega_4)$,
12. $(-2\omega_4 + \omega_0 + \omega_1), (2\omega_4 + \omega_0 + \omega_1), (-\omega_0 + \omega_1 + 2\omega_4)$,
13. $(\omega_2 + 2\omega_3 + \omega_0), (2\omega_3 + \omega_0 - \omega_2), (2\omega_3 - \omega_2 - \omega_0), (2\omega_3 - \omega_0 + \omega_2)$,
 $(\omega_3 + 2\omega_0 - \omega_1), (-2\omega_0 + \omega_1 + \omega_3), (-\omega_1 - 2\omega_0 + \omega_3), (\omega_3 + 2\omega_0 + \omega_1)$,
14. $(-\omega_0 + \omega_1 - 2\omega_4), (-\omega_4 + 2\omega_2 + \omega_0), (-2\omega_2 - \omega_4 + \omega_0)$,
 $(-2\omega_2 + \omega_4 + \omega_0), (2\omega_2 + \omega_0 + \omega_4)$,
15. $(\omega_3 - 2\omega_2 - \omega_0), (\omega_3 - 2\omega_2 + \omega_0), (\omega_3 + \omega_0 + 2\omega_2), (2\omega_2 - \omega_0 + \omega_3)$,
16. $(2\omega_0 + \omega_1 + \omega_2), (-\omega_2 + 2\omega_0 + \omega_1), (-2\omega_0 + \omega_1 - \omega_2), (\omega_2 - 2\omega_0 + \omega_1)$,
17. $(2\omega_3 + \omega_0 - \omega_1), (2\omega_3 - \omega_0 - \omega_1), (2\omega_3 - \omega_0 + \omega_1), (\omega_1 + 2\omega_3 + \omega_0)$,
18. $(-\omega_0 + 2\omega_1 + \omega_4), (-\omega_0 + 2\omega_1 - \omega_4), (\omega_4 + 2\omega_1 + \omega_0), (2\omega_1 + \omega_0 - \omega_4)$,
19. $(2\omega_2 - \omega_0 + \omega_1), (-2\omega_2 + \omega_1 - \omega_0), (-2\omega_2 + \omega_1 + \omega_0), (2\omega_2 + \omega_0 + \omega_1)$,
20. $(\omega_3 + \omega_0 - 2\omega_1), (\omega_0 + 2\omega_1 + \omega_3), (\omega_3 - \omega_0 + 2\omega_1), (-2\omega_1 + \omega_3 - \omega_0)$,
21. $(\omega_2 + 2\omega_1 + \omega_0), (2\omega_1 - \omega_2 + \omega_0)$,
22. $(-\omega_0 + 2\omega_1 - \omega_2)$

IMD frekans bileşenlerinin genlikleri ve farkları, geri besleme kazanç sabiti ve zaman gecikmesine bağlı olarak IMD frekans bileşenlerinin genlik değerleri çizelge 4.13'de verilmiştir.

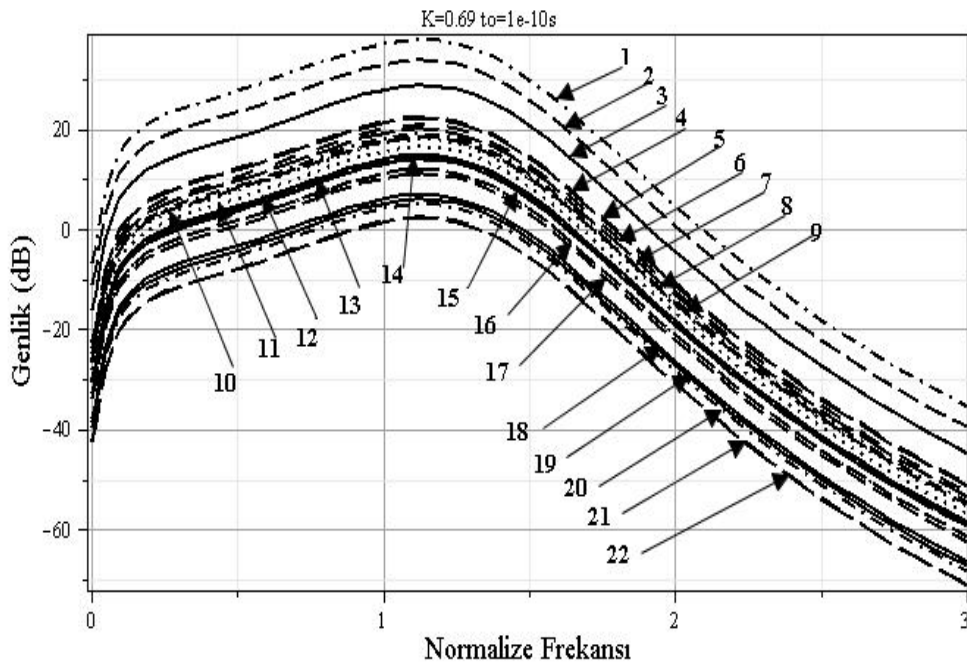
Çizelge 4.13 Beşinci grup IMD frekans bileşenleri arasındaki ilişki

IMD Bileşenleri	K=0,69		K=1		K=0,69	K=1	$t_o=1.10^{-10}s$	$t_o=1.10^{-11}s$
	$t_o=1.10^{-10}s$	$t_o=1.10^{-11}s$	$t_o=1.10^{-10}s$	$t_o=1.10^{-11}s$	Genlik Farkı	Genlik Farkı	Genlik Farkı	Genlik Farkı
1	38,19	-15,18	64,73	25,94	53,37	38,79	-26,54	-41,12
2	34,01	-19,45	60,55	21,62	53,46	38,93	-26,54	-41,07
3	28,99	-24,55	55,40	16,17	53,54	39,23	-26,41	-40,72
4	22,73	-31,05	49,15	9,51	53,78	39,64	-26,42	-40,56
5	22,27	-31,30	48,76	9,44	53,57	39,32	-26,49	-40,74
6	21,15	-32,63	47,68	8,00	53,78	39,68	-26,53	-40,63
7	20,16	-33,44	46,68	7,32	53,60	39,36	-26,52	-40,76
8	19,21	-34,57	45,74	6,30	53,78	39,44	-26,53	-40,87
9	18,65	-35,13	45,18	5,67	53,78	39,51	-26,53	-40,80
10	18,22	-35,38	44,74	5,31	53,60	39,43	-26,52	-40,69
11	16,63	-37,07	43,15	3,49	53,70	39,66	-26,52	-40,56
12	15,12	-38,65	41,66	2,13	53,77	39,53	-26,54	-40,78
13	14,78	-39,01	41,22	1,62	53,79	39,60	-26,44	-40,63
14	14,15	-39,57	40,74	1,31	53,72	39,43	-26,59	-40,88
15	12,27	-41,46	38,74	-0,87	53,73	39,61	-26,47	-40,59
16	12,20	-41,63	38,65	-0,64	53,83	39,29	-26,45	-40,99
17	11,25	-42,53	37,78	-1,95	53,78	39,73	-26,53	-40,58
18	7,17	-46,50	33,75	-5,74	53,67	39,49	-26,58	-40,76
19	6,29	-47,53	32,78	-6,79	53,82	39,57	-26,49	-40,74
20	5,15	-48,55	31,76	-7,68	53,70	39,44	-26,61	-40,87
21	2,68	-50,94	29,32	-10,18	53,62	39,50	-26,64	-40,76
22	2,49	-51,25	29,11	-10,50	53,74	39,61	-26,62	-40,75

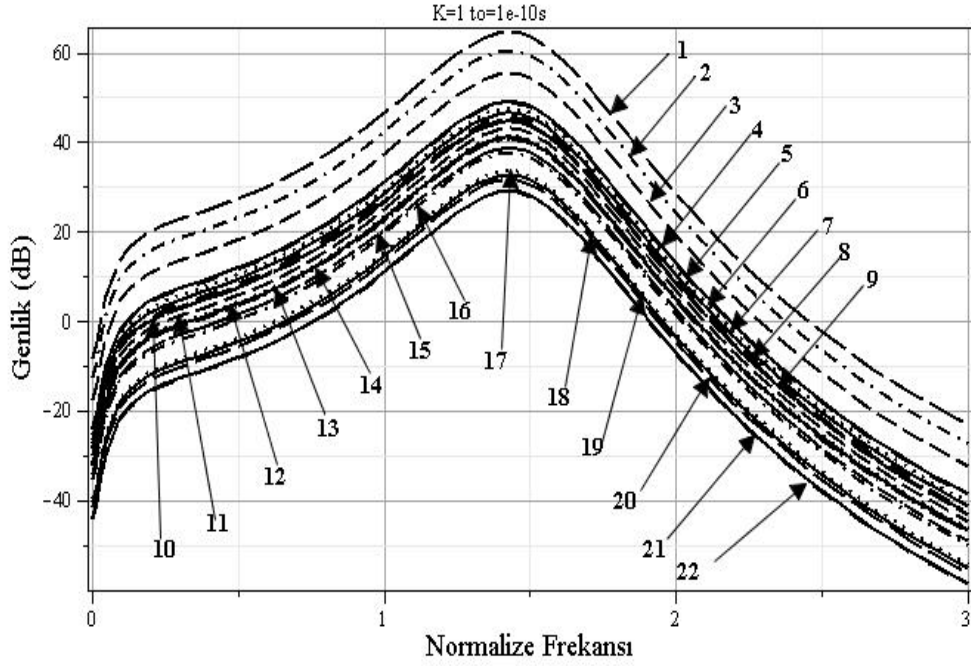
Şekil 4.51-4.52’de gecikme zamanı $t_o = 1.10^{-10} s$ ve geri besleme sabitine bağlı olarak taşıyıcıdan elde edilen fark frekanslarının genlik değerleri görülmektedir. Şekil 4.51’de gecikme zamanı $t_o = 1.10^{-10} s$ iken K=0,69 için en küçük genlik değeri 22 nolu IMD frekans bileşeni için 2,49dB, en büyük genlik değeri ise 1 nolu IMD frekans bileşeni için 38,19dB’dir. Normalize frekans band genişliği değerleri tüm IMD bileşenleri için

0,46 olarak bulunmuş -3dB için grubun toplam band genişliği teorik olarak $10,12 \cdot 10^{10}$ Hz hesaplanmıştır.

Şekil 4.52’de ise $K=1$ için en küçük genlik değeri 29,11dB, en büyük genlik değeri ise 64,73dB olarak bulunmuştur. Normalize frekans band genişliği değerleri tüm IMD bileşenleri için 0,27 olarak bulunmuş -3dB için grubun toplam band genişliği teorik olarak $5,94 \cdot 10^{10}$ Hz hesaplanmıştır.



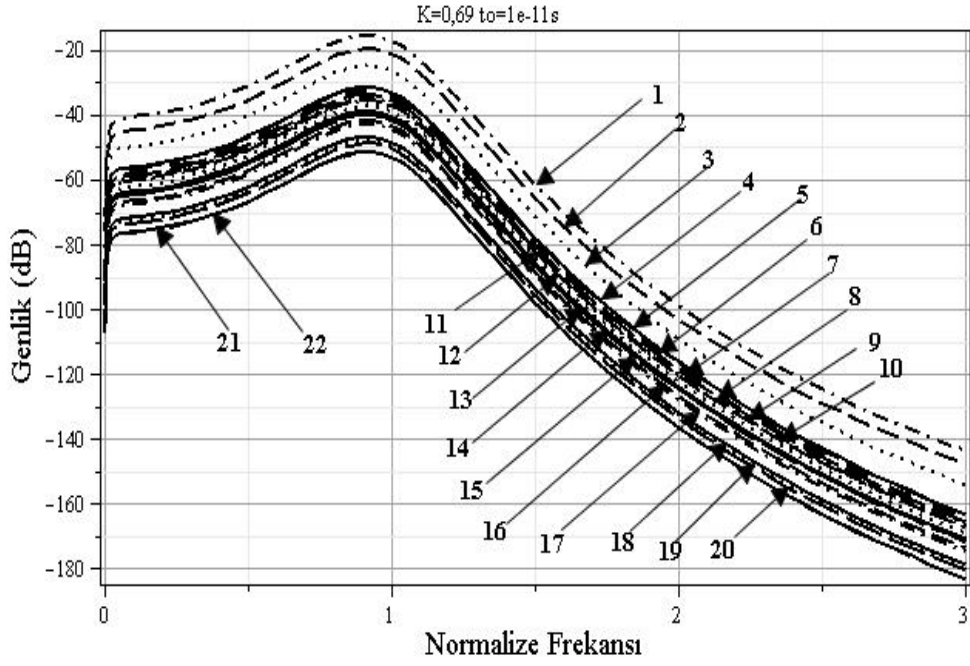
Şekil 4.51 Beşinci grup IMD eğrileri



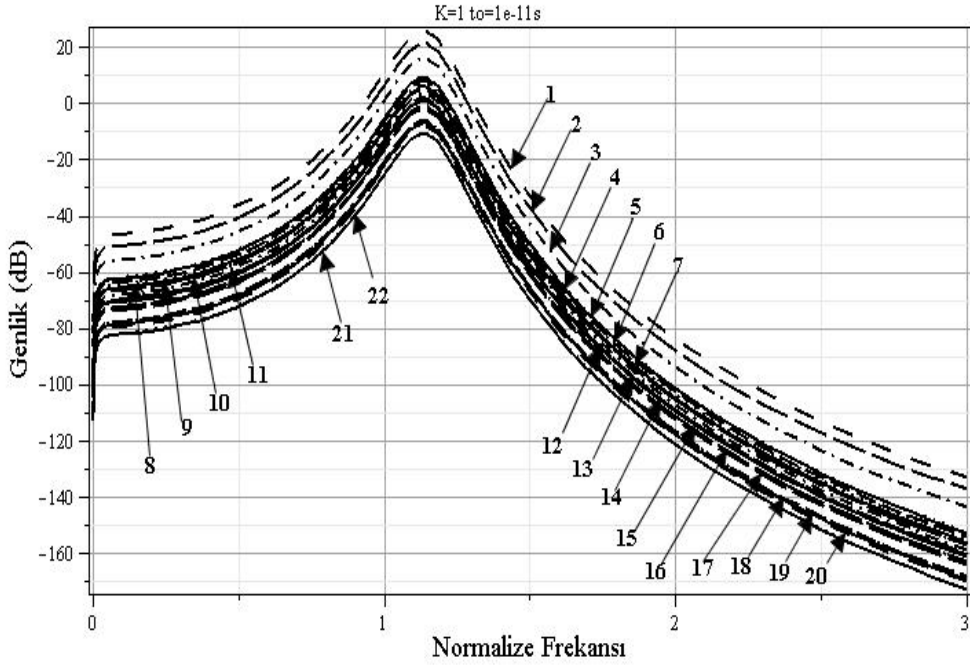
Şekil 4.52 Beşinci grup IMD eğrileri

Şekil 4.53-4.54 gecikme zamanı $t_o = 1.10^{-11} s$ için elde edilmiştir. Şekil 4.53’de gecikme zamanı $t_o = 1.10^{-11} s$ iken $K=0,69$ için en küçük genlik değeri $-51,25$ dB, en büyük genlik değeri ise $-15,18$ dB’dir. Normalize frekans band genişliği değerleri tüm IMD bileşenleri için yaklaşık $0,28$ olarak bulunmuş -3 dB için grubun toplam band genişliği teorik olarak $6,16.10^{11}$ Hz hesaplanmıştır.

Şekil 4.54’de ise $K=1$ için en küçük genlik değeri $-10,50$ dB, en büyük genlik değeri ise $25,94$ dB olarak hesaplanmıştır. Normalize frekans band genişliği değerleri tüm IMD bileşenleri için $0,10$ olarak bulunmuş -3 dB için grubun toplam band genişliği teorik olarak $2,20.10^{11}$ Hz hesaplanmıştır.



Şekil 4.53 Beşinci grup IMD eğrileri



Şekil 4.54 Beşinci grup IMD eğrileri

4.2.6 Altıncı grup

Altıncı grup taşıyıcı IMD frekans bileşenlerinden altı farklı IMD bileşen grubu elde edilmiştir. Bunlar;

1. $(2\omega_3 + 2\omega_0 + 2\omega_4), (2\omega_0 + 2\omega_3 - 2\omega_4), (2\omega_3 - 2\omega_0 - 2\omega_4), (2\omega_3 - 2\omega_0 + 2\omega_4),$
2. $(2\omega_2 - 2\omega_4 + 2\omega_0), (2\omega_4 + 2\omega_0 + 2\omega_2), (2\omega_0 - 2\omega_4 - 2\omega_2), (2\omega_4 + 2\omega_0 - 2\omega_2),$
3. $(2\omega_3 + 2\omega_0 - 2\omega_2), (2\omega_3 + 2\omega_0 + 2\omega_2), (2\omega_3 - 2\omega_0 - 2\omega_2), (-2\omega_0 + 2\omega_3 + 2\omega_2),$
4. $(2\omega_0 + 2\omega_1 - 2\omega_4), (-2\omega_4 - 2\omega_0 + 2\omega_1), (2\omega_0 + 2\omega_1 + 2\omega_4), (2\omega_1 - 2\omega_0 + 2\omega_4),$
5. $(2\omega_3 + 2\omega_0 - 2\omega_1), (2\omega_1 + 2\omega_3 + 2\omega_0), (2\omega_1 - 2\omega_0 + 2\omega_3), (-2\omega_0 + 2\omega_3 - 2\omega_1),$
6. $(-2\omega_2 + 2\omega_0 + 2\omega_1), (2\omega_1 + 2\omega_0 + 2\omega_2), (2\omega_1 - 2\omega_0 - 2\omega_2), (2\omega_1 - 2\omega_0 + 2\omega_2)$

IMD frekans bileşenlerinin genlikleri ve farkları, geri besleme kazanç sabiti ve zaman gecikmesine bağlı olarak IMD frekans bileşenlerinin genlik değerleri çizelge 4.14’de verilmiştir.

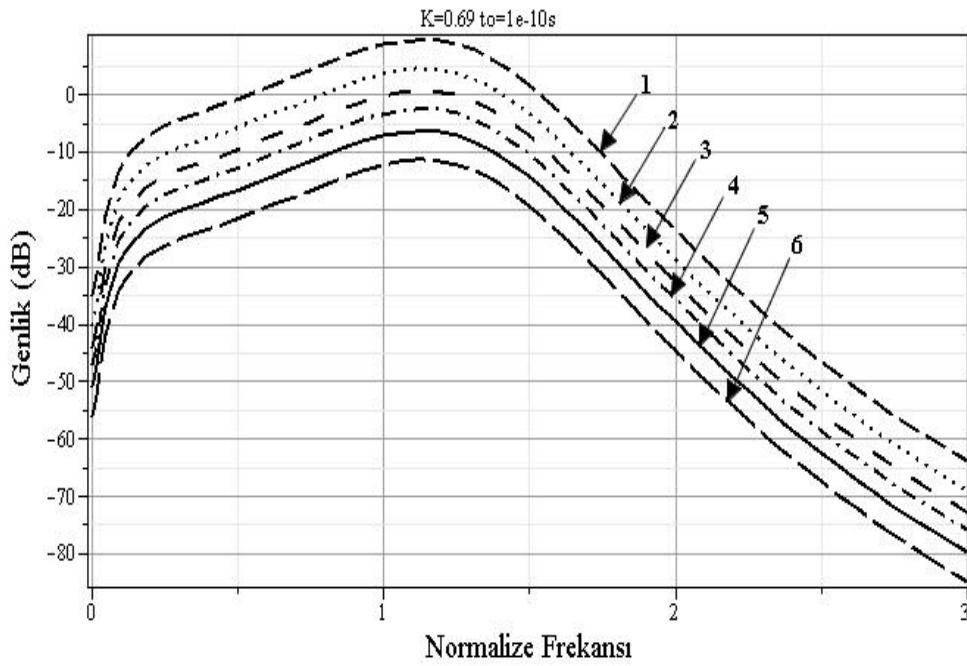
Çizelge 4.14 Altıncı grup IMD frekans bileşenleri arasındaki ilişki

IMD Bileşenleri		GENLİK(dB)					
		1	2	3	4	5	6
K=0.69	$t_o=1.10^{-10}$ s	9,66	4,67	0,75	-2,39	-6,27	-11,30
	$t_o=1.10^{-11}$ s	-44,11	-49,11	-52,99	-56,15	-60,03	-65,03
K=1	$t_o=1.10^{-10}$ s	36,20	31,20	27,32	23,98	20,28	15,46
	$t_o=1.10^{-11}$ s	-3,37	-8,37	-12,59	-15,75	-19,29	-23,95
K=0.69	Genlik Farkı	53,77	53,78	53,74	53,76	53,76	53,73
K=1	Genlik Farkı	39,57	39,57	39,91	39,73	39,57	39,41
$t_o=1.10^{-10}$ s	Genlik Farkı	-26,54	-26,53	-26,57	-26,37	-26,55	-26,76
$t_o=1.10^{-11}$ s	Genlik Farkı	-40,74	-40,74	-40,40	-40,40	-40,74	-41,08

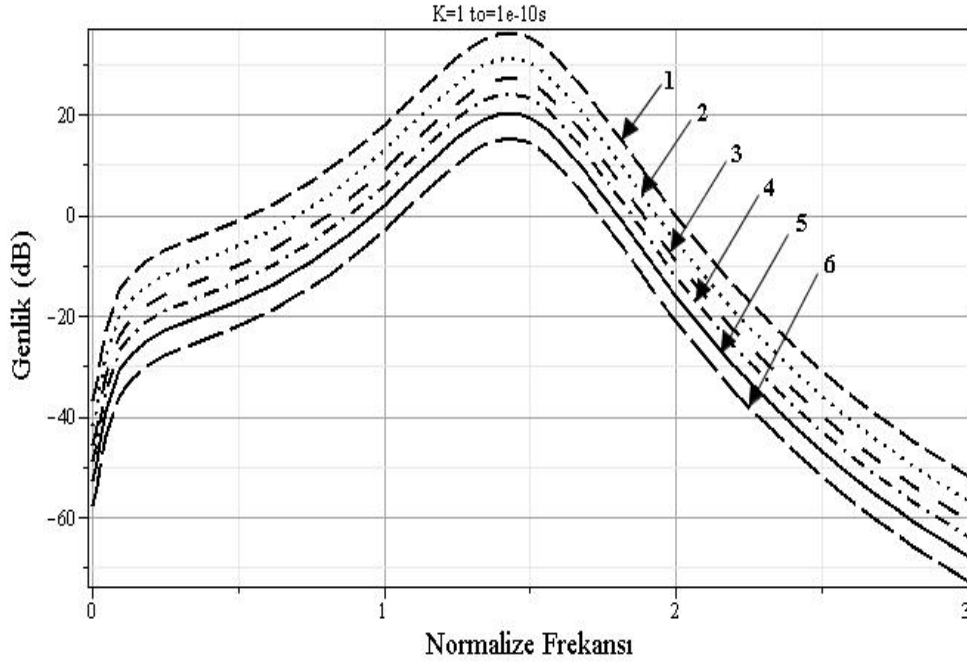
Şekil 4.55-4.56’da gecikme zamanı $t_o = 1.10^{-10}$ s ve geri besleme sabitine bağlı olarak taşıyıcıdan elde edilen fark frekanslarının genlik değerleri görülmektedir. Şekil 4.55’de gecikme zamanı $t_o = 1.10^{-10}$ s iken K=0,69 için en küçük genlik değeri 6 nolu IMD frekans bileşeni için -11,30dB, en büyük genlik değeri ise 1 nolu IMD frekans bileşeni

için 9,66dB'dir. Normalize frekans band genişliği değerleri tüm IMD bileşenleri için 0,49 olarak bulunmuş -3dB için grubun toplam band genişliği teorik olarak $2,94 \cdot 10^{10}$ Hz hesaplanmıştır.

Şekil 4.56'da ise $K=1$ için en küçük genlik değeri 15,46dB, en büyük genlik değeri ise 36,20dB olarak gözlenmiştir. Normalize frekans band genişliği değerleri tüm IMD bileşenleri için 0,28 olarak bulunmuş -3dB için grubun toplam band genişliği teorik olarak $1,68 \cdot 10^{10}$ Hz hesaplanmıştır.



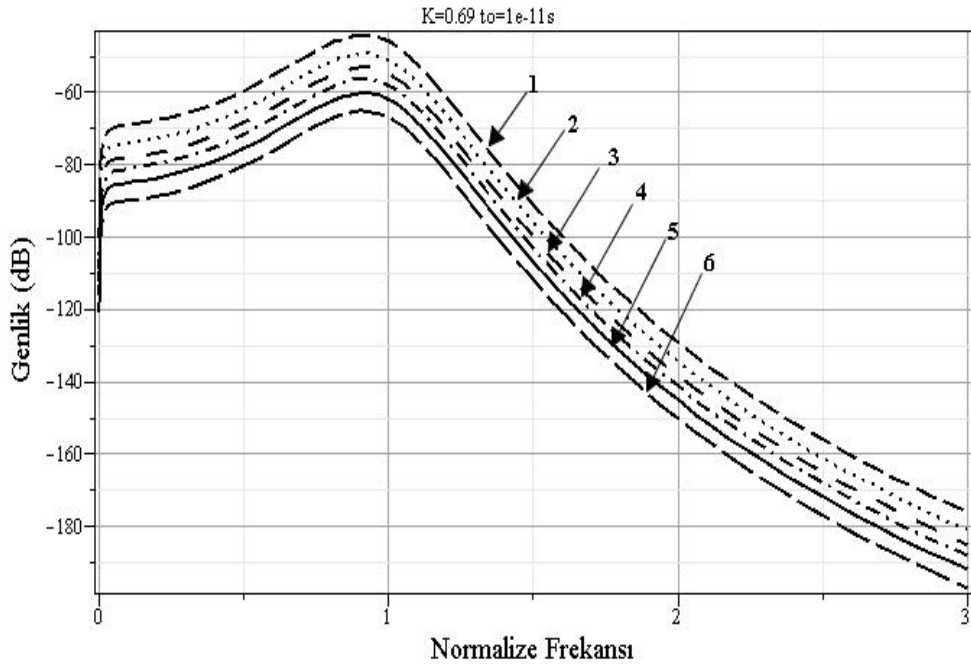
Şekil 4.55 Altıncı grup IMD eğrileri



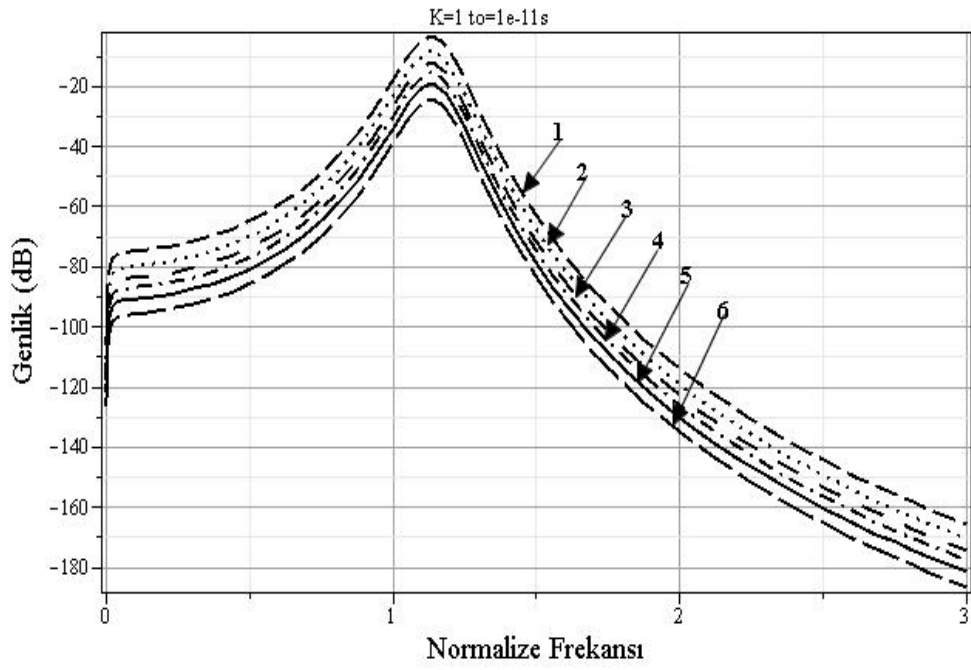
Şekil 4.56 Altıncı grup IMD eğrileri

Şekil 4.57-4.58 gecikme zamanı $t_o = 1.10^{-11} s$ için elde edilmiştir. Şekil 4.57’de gecikme zamanı $t_o = 1.10^{-11} s$ iken $K=0,69$ için en küçük genlik değeri $-65,03dB$, en büyük genlik değeri ise $-44,11dB$ olarak bulunmuştur. Normalize frekans band genişliği değerleri tüm IMD bileşenleri için $0,25$ olarak bulunmuş $-3dB$ için grubun toplam band genişliği teorik olarak $1,50.10^{11} Hz$ hesaplanmıştır.

Şekil 4.58’de ise $K=1$ için en küçük genlik değeri $-23,95dB$, en büyük genlik değeri ise $-3,37dB$ olarak gözlenmiştir. Normalize frekans band genişliği değerleri tüm IMD bileşenleri için $0,10$ olarak bulunmuş $-3dB$ için grubun toplam band genişliği teorik olarak $0,60.10^{11} Hz$ hesaplanmıştır.



Şekil 4.57 Altıncı grup IMD eğrileri



Şekil 4.58 Altıncı grup IMD eğrileri

4.2.7 Yedinci grup

Yedinci grup taşıyıcı IMD frekans bileşenlerinden yirmi farklı IMD bileşen grubu elde edilmiştir. Bunlar;

1. $(\omega_3 + \omega_4 - \omega_0 + \omega_2)$,
2. $(\omega_3 + \omega_4 + \omega_0 + \omega_2)$, $(\omega_3 - \omega_4 - \omega_0 - \omega_2)$, $(\omega_3 - \omega_4 + \omega_0 + \omega_2)$, $(\omega_3 + \omega_4 + \omega_0 - \omega_2)$,
 $(-\omega_4 - \omega_0 + \omega_2 + \omega_3)$,
3. $(\omega_3 + \omega_0 - \omega_4 - \omega_2)$,
4. $(\omega_3 + \omega_4 - \omega_0 - \omega_2)$,
5. $(-\omega_4 + \omega_0 - \omega_1 + \omega_3)$, $(-\omega_1 + \omega_3 + \omega_0 + \omega_4)$, $(\omega_3 - \omega_4 + \omega_0 + \omega_1)$, $(\omega_3 + \omega_4 + \omega_0 + \omega_1)$,
 $(\omega_3 - \omega_0 - \omega_1 - \omega_4)$, $(-\omega_1 - \omega_0 + \omega_3 + \omega_4)$, $(\omega_3 - \omega_0 + \omega_1 - \omega_4)$, $(\omega_1 - \omega_0 + \omega_3 + \omega_4)$
6. $(\omega_1 + \omega_0 - \omega_4 + \omega_2)$,
7. $(\omega_4 + \omega_0 + \omega_2 + \omega_1)$, $(-\omega_0 + \omega_4 + \omega_1 + \omega_2)$, $(-\omega_4 - \omega_0 + \omega_2 + \omega_1)$,
 $(-\omega_4 - \omega_0 - \omega_2 + \omega_1)$, $(\omega_4 + \omega_0 - \omega_2 + \omega_1)$, $(\omega_4 - \omega_0 - \omega_2 + \omega_1)$,
8. $(-\omega_2 + \omega_0 + \omega_1 - \omega_4)$,
9. $(\omega_2 + \omega_0 - \omega_1 + \omega_3)$, $(\omega_3 + \omega_1 + \omega_2 - \omega_0)$, $(-\omega_2 + \omega_3 + \omega_0 - \omega_1)$,
10. $(-\omega_2 + \omega_3 + \omega_0 - \omega_1)$,
11. $(\omega_3 + \omega_2 - \omega_0 - \omega_1)$,
12. $(-\omega_2 - \omega_0 + \omega_1 + \omega_3)$,
13. $(\omega_3 - \omega_0 - \omega_1 - \omega_2)$,
14. $(\omega_3 + \omega_0 + \omega_2 + \omega_1)$,
15. $(\omega_3 - \omega_2 + \omega_0 + \omega_1)$,
16. $(\omega_3 - \omega_2 + \omega_0 + \omega_1)$,
17. $(\omega_3 + \omega_0 + \omega_2 + \omega_1)$,
18. $(\omega_1 + \omega_0 - \omega_4 + \omega_2)$,
19. $(\omega_3 - \omega_0 - \omega_1 - \omega_2)$,
20. $(-\omega_2 - \omega_0 + \omega_1 + \omega_3)$
21. $(\omega_3 + \omega_1 + \omega_2 - \omega_0)$, $(\omega_3 + \omega_2 - \omega_0 - \omega_1)$,

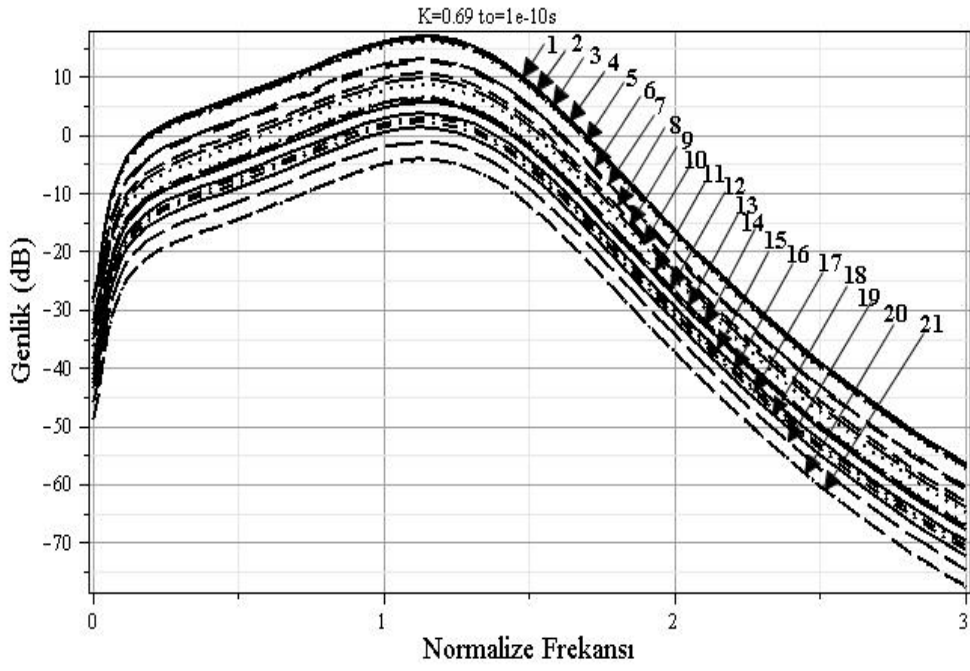
IMD frekans bileşenlerinin genlikleri ve farkları, geri besleme kazanç sabiti ve zaman gecikmesine bağlı olarak IMD frekans bileşenlerinin genlik çizelge 4.15’de verilmiştir.

Çizelge 4.15 Yedinci grup IMD frekans bileşenleri arasındaki ilişki

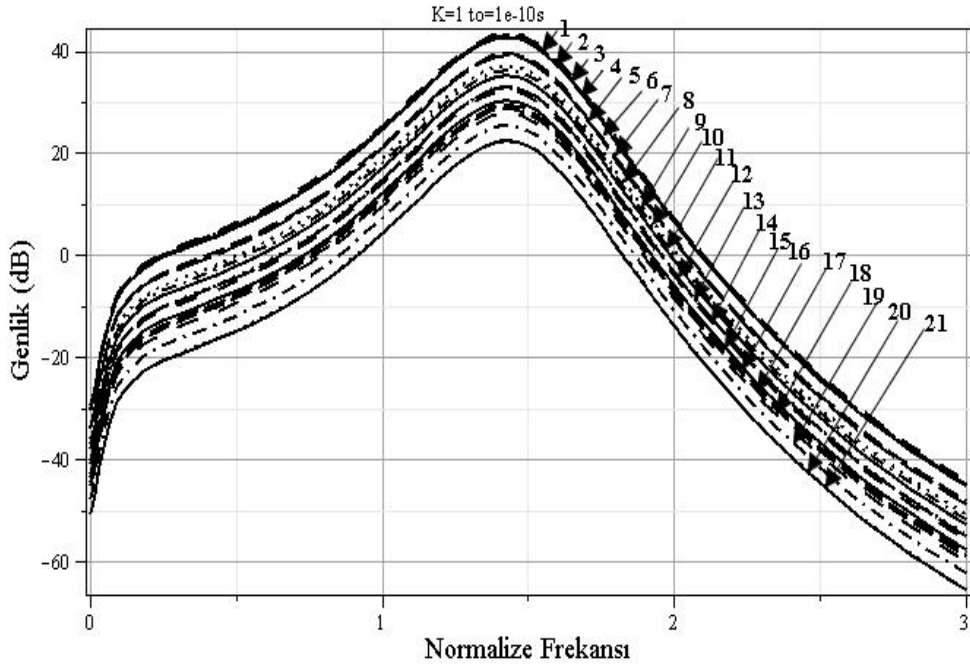
IMD Bileşenleri	K=0,69		K=1		K=0,69	K=1	$t_0=1.10^{-10}s$	$t_0=1.10^{-11}s$
	$t_0=1.10^{-10}s$	$t_0=1.10^{-11}s$	$t_0=1.10^{-10}s$	$t_0=1.10^{-11}s$	Genlik Farkı	Genlik Farkı	Genlik Farkı	Genlik Farkı
1	17,12	-36,47	43,64	4,23	53,59	39,41	-26,52	-40,70
2	16,63	-36,96	43,15	3,81	53,59	39,34	-26,52	-40,77
3	16,57	-37,02	43,09	3,46	53,59	39,63	-26,52	-40,48
4	16,19	-37,36	42,71	3,28	53,55	39,43	-26,52	-40,64
5	13,11	-40,48	39,63	0,30	53,59	39,33	-26,52	-40,78
6	12,62	-41,05	39,23	-0,23	53,67	39,46	-26,61	-40,82
7	10,61	-42,98	37,13	-2,40	53,59	39,53	-26,52	-40,58
8	9,72	-43,81	36,24	-3,01	53,53	39,25	-26,52	-40,80
9	8,74	-44,92	35,20	-4,16	53,66	39,36	-26,46	-40,76
10	6,57	-46,88	33,09	-6,03	53,45	39,12	-26,52	-40,85
11	6,45	-47,13	32,93	-6,32	53,58	39,25	-26,48	-40,81
12	6,44	-47,19	32,91	-6,42	53,63	39,33	-26,47	-40,77
13	5,79	-47,84	32,25	-7,06	53,63	39,31	-26,46	-40,78
14	3,88	-49,54	30,32	-8,63	53,42	38,95	-26,44	-40,91
15	3,01	-50,54	29,68	-9,74	53,55	39,42	-26,67	-40,80
16	2,34	-51,05	28,95	-10,14	53,39	39,09	-26,61	-40,91
17	1,39	-52,29	27,86	-11,55	53,68	39,41	-26,47	-40,74
18	-1,08	-54,18	25,43	-13,13	53,10	38,56	-26,51	-41,05
19	-2,02	-55,80	24,38	-15,07	53,78	39,45	-26,40	-40,73
20	-3,91	-57,66	22,49	-16,92	53,75	39,41	-26,40	-40,74
21	-3,97	-57,90	22,43	-17,27	53,93	39,70	-26,40	-40,63

Şekil 4.59-4.60 gecikme zamanı $t_0 = 1.10^{-10} s$, geri besleme sabitine bağlı olarak taşıyıcıdan elde edilen IMD frekanslarının genlik değerleri görülmektedir. Şekil 4.59'da gecikme zamanı $t_0 = 1.10^{-10} s$ iken K=0,69 için en küçük genlik değeri -3,97dB, en büyük genlik değeri ise 17,12dB'dir. Normalize frekans band genişliği değerleri tüm IMD bileşenleri için 0,48 olarak bulunmuş ve -3dB için grubun toplam band genişliği $10,08.10^{10}$ Hz hesaplanmıştır.

Şekil 4.60'da ise K=1 için en küçük genlik değeri 22,43dB, en büyük genlik değeri ise 43,64dB olarak ölçülmüştür. Normalize frekans band genişliği değerleri tüm IMD bileşenleri için 0,26 olarak bulunmuş ve -3dB için grubun toplam band genişliği $5,46.10^{10}$ Hz hesaplanmıştır.



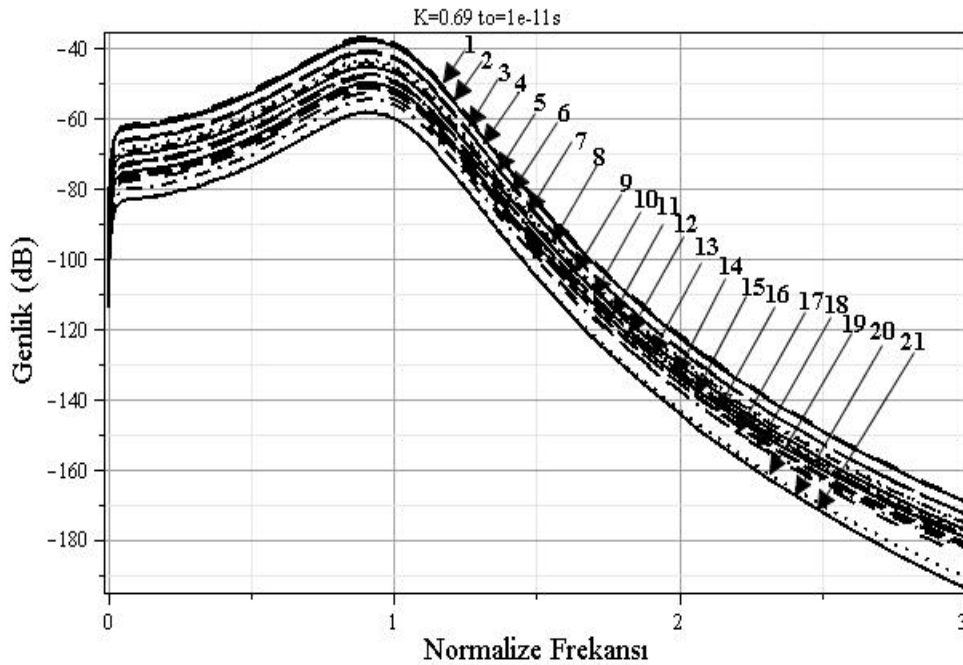
Şekil 4.59 Yedinci grup IMD eğrileri



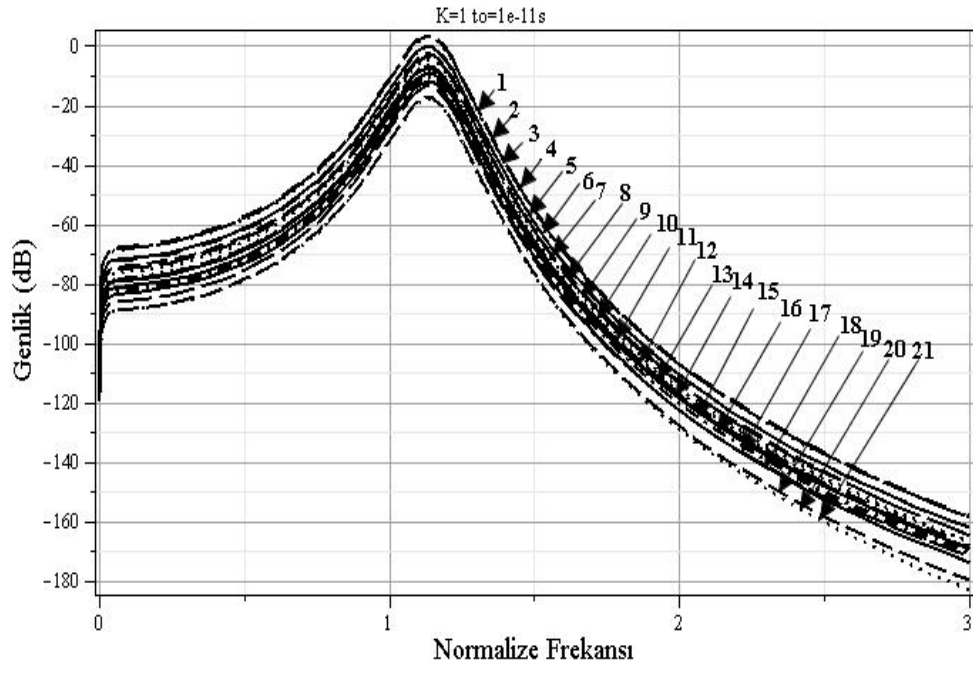
Şekil 4.60 Yedinci grup IMD eğrileri

Şekil 4.61-4.62 gecikme zamanı $t_o = 1.10^{-11} s$ için elde edilmiştir. Şekil 4.61’de $K=0,69$ için en küçük genlik değeri $-57,90dB$, en büyük genlik değeri ise $-36,47dB$ ’dir. Normalize frekans band genişliği değerleri tüm IMD bileşenleri için $0,27$ olarak bulunmuş ve $-3dB$ için grubun toplam band genişliği $5,67.10^{11} Hz$ hesaplanmıştır.

Şekil 4.62’de ise $K=1$ için en küçük genlik değeri $-17,27dB$, en büyük genlik değeri ise $4,23dB$ olarak gözlenmiştir. Normalize frekans band genişliği değerleri tüm IMD bileşenleri için $0,11$ olarak bulunmuş ve $-3dB$ için grubun toplam band genişliği $2,31.10^{11} Hz$ hesaplanmıştır.



Şekil 4.61 Yedinci grup IMD eğrileri



Şekil 4.62 Yedinci grup IMD eğrileri

4.2.8 Sekizinci grup

Sekizinci grup taşıyıcı IMD frekans bileşenlerinden kırk sekiz farklı IMD bileşen grubu elde edilmiştir. Bunlar;

1. $(2\omega_4 - 2\omega_0 + \omega_2 + \omega_3)$
2. $(-2\omega_4 - 2\omega_0 - \omega_2 + \omega_3), (2\omega_0 - 2\omega_4 - \omega_2 + \omega_3), (2\omega_4 + 2\omega_0 - \omega_2 + \omega_3),$
 $(2\omega_4 + 2\omega_0 + \omega_2 + \omega_3), (\omega_3 + 2\omega_4 - \omega_2 - 2\omega_0), (\omega_2 - 2\omega_0 + \omega_3 - 2\omega_4),$
3. $(-\omega_4 + 2\omega_0 - \omega_2 + 2\omega_3), (2\omega_3 + 2\omega_0 + \omega_2 - \omega_4), (\omega_2 + 2\omega_0 + 2\omega_3 + \omega_4),$
 $(2\omega_3 - \omega_2 + \omega_4 + 2\omega_0), (-2\omega_0 + 2\omega_3 - \omega_4 + \omega_2), (-\omega_2 - 2\omega_0 + 2\omega_3 + \omega_4),$
 $(-\omega_4 + 2\omega_3 - \omega_2 - 2\omega_0), (-2\omega_0 + 2\omega_3 + \omega_4 + \omega_2),$
4. $(2\omega_0 - 2\omega_4 + \omega_2 + \omega_3),$
5. $(\omega_3 + 2\omega_0 - \omega_1 + 2\omega_4), (-\omega_1 + 2\omega_0 + \omega_3 - 2\omega_4), (\omega_1 + 2\omega_0 + \omega_3 + 2\omega_4),$
 $(\omega_1 + 2\omega_0 + \omega_3 - 2\omega_4), (\omega_1 - 2\omega_0 + \omega_3 - 2\omega_4), (-\omega_1 - 2\omega_0 + \omega_3 + 2\omega_4),$
 $(\omega_3 - 2\omega_0 - \omega_1 - 2\omega_4), (\omega_3 - 2\omega_0 + \omega_1 + 2\omega_4), (\omega_2 + 2\omega_3 + \omega_0 + 2\omega_4),$
 $(\omega_2 + 2\omega_3 - \omega_0 + 2\omega_4), (2\omega_3 - \omega_2 + 2\omega_4 + \omega_0), (2\omega_3 - \omega_2 + 2\omega_4 - \omega_0),$
 $(2\omega_3 + \omega_2 - 2\omega_4 - \omega_0), (-\omega_2 + \omega_0 + 2\omega_3 - 2\omega_4), (-\omega_2 - \omega_0 + 2\omega_3 - 2\omega_4),$
6. $(2\omega_3 + 2\omega_2 - \omega_4 + \omega_0), (2\omega_3 - 2\omega_2 - \omega_4 - \omega_0), (-2\omega_2 + 2\omega_3 + \omega_4 + \omega_0),$
7. $(\omega_3 - 2\omega_2 + \omega_4 - 2\omega_0), (\omega_4 - 2\omega_0 + \omega_3 + 2\omega_2), (\omega_3 - 2\omega_2 - \omega_4 - 2\omega_0),$
 $(-\omega_4 - 2\omega_0 + \omega_3 + 2\omega_2), (\omega_4 + 2\omega_0 + \omega_3 + 2\omega_2), (\omega_3 + 2\omega_0 + \omega_4 - 2\omega_2),$
 $(-\omega_4 + 2\omega_0 + \omega_3 + 2\omega_2), (\omega_3 + 2\omega_0 - \omega_4 - 2\omega_2),$
8. $(-\omega_1 + 2\omega_3 - \omega_4 + 2\omega_0), (\omega_4 + 2\omega_0 + \omega_1 + 2\omega_3), (-\omega_4 + 2\omega_0 + \omega_1 + 2\omega_3),$
 $(2\omega_3 + 2\omega_0 + \omega_4 - \omega_1), (\omega_4 - 2\omega_0 + \omega_1 + 2\omega_3), (2\omega_3 - 2\omega_0 - \omega_1 - \omega_4),$
 $(2\omega_3 - 2\omega_0 + \omega_4 - \omega_1), (-\omega_4 - 2\omega_0 + \omega_1 + 2\omega_3),$
9. $(-\omega_4 - \omega_0 + 2\omega_2 + 2\omega_3), (-\omega_0 + 2\omega_3 + \omega_4 - 2\omega_2),$
 $(2\omega_3 - \omega_0 + \omega_4 + 2\omega_2), (2\omega_3 + \omega_0 + \omega_4 + 2\omega_2)$
10. $(\omega_2 + 2\omega_3 + \omega_0 - 2\omega_4),$
11. $(-\omega_2 + 2\omega_0 + \omega_1 - 2\omega_4), (-\omega_2 + 2\omega_0 + \omega_1 + 2\omega_4), (-2\omega_4 + 2\omega_0 + \omega_2 + \omega_1),$
 $(2\omega_4 + 2\omega_0 + \omega_1 + \omega_2), (2\omega_4 + \omega_1 - \omega_2 - 2\omega_0), (-\omega_2 - 2\omega_0 + \omega_1 - 2\omega_4),$
 $(2\omega_4 - 2\omega_0 + \omega_1 + \omega_2), (\omega_2 - 2\omega_0 + \omega_1 - 2\omega_4), (\omega_3 - 2\omega_2 + \omega_0 - 2\omega_4),$
 $(2\omega_4 + 2\omega_2 + \omega_3 + \omega_0), (\omega_3 - 2\omega_2 + \omega_0 + 2\omega_4), (\omega_3 + 2\omega_2 - 2\omega_4 + \omega_0),$
 $(\omega_3 - 2\omega_2 - \omega_0 + 2\omega_4), (-2\omega_4 - \omega_0 + 2\omega_2 + \omega_3), (2\omega_4 + 2\omega_2 + \omega_3 - \omega_0),$
 $(-2\omega_4 - 2\omega_2 + \omega_3 - \omega_0),$

12. $(2\omega_3 - \omega_0 + \omega_1 - 2\omega_4), (2\omega_4 - \omega_0 + 2\omega_4 + \omega_1), (2\omega_3 - \omega_0 + 2\omega_4 - \omega_1),$
 $(\omega_0 + \omega_1 - 2\omega_4 + 2\omega_3), (-\omega_1 + 2\omega_3 + \omega_0 + 2\omega_4), (-\omega_1 + 2\omega_3 - \omega_0 - 2\omega_4),$
 $(2\omega_3 + 2\omega_4 + \omega_0 + \omega_1), (\omega_0 - 2\omega_4 - \omega_1 + 2\omega_3),$
13. $(-2\omega_0 + \omega_1 - \omega_4 + 2\omega_2), (-\omega_4 + \omega_0 - 2\omega_2 + 2\omega_3),$
14. $(2\omega_3 + 2\omega_0 - \omega_2 + \omega_1), (2\omega_3 + 2\omega_0 - \omega_2 - \omega_1), (\omega_1 + 2\omega_3 + \omega_2 + 2\omega_0),$
 $(2\omega_3 + 2\omega_0 + \omega_2 - \omega_1), (2\omega_3 - 2\omega_0 - \omega_1 - \omega_2), (2\omega_3 - 2\omega_0 + \omega_2 - \omega_1),$
 $(2\omega_3 - 2\omega_0 - \omega_2 + \omega_1), (\omega_2 - 2\omega_0 + \omega_1 + 2\omega_3),$
15. $(\omega_4 + 2\omega_0 + 2\omega_2 + \omega_1), (\omega_1 - 2\omega_2 - \omega_4 + 2\omega_0), (-\omega_4 + 2\omega_0 + 2\omega_2 + \omega_1),$
 $(\omega_4 + 2\omega_0 - 2\omega_2 + \omega_1), (-\omega_4 - 2\omega_0 + \omega_1 - 2\omega_2), (2\omega_2 - 2\omega_0 + \omega_1 + \omega_4),$
 $(\omega_1 - 2\omega_2 + \omega_4 - 2\omega_0),$
16. $(2\omega_3 + 2\omega_1 - \omega_0 + \omega_4),$
17. $(2\omega_1 + 2\omega_0 + \omega_4 + \omega_3), (\omega_4 - 2\omega_1 + \omega_3 + 2\omega_0), (-\omega_4 + 2\omega_1 + \omega_3 + 2\omega_0),$
 $(-2\omega_1 + 2\omega_0 - \omega_4 + \omega_3), (\omega_3 - 2\omega_0 - \omega_4 - 2\omega_1), (\omega_3 - 2\omega_0 + 2\omega_1 + \omega_4),$
 $(\omega_3 - 2\omega_0 + \omega_4 - 2\omega_1), (2\omega_1 - 2\omega_0 - \omega_4 + \omega_3),$
18. $(2\omega_1 - 2\omega_0 + \omega_2 + \omega_3),$
19. $(2\omega_4 + \omega_0 + 2\omega_2 + \omega_1), (2\omega_4 - \omega_0 + 2\omega_2 + \omega_1), (2\omega_2 - 2\omega_4 + \omega_0 + \omega_1),$
 $(\omega_1 - 2\omega_2 + \omega_0 + 2\omega_4), (\omega_1 - 2\omega_2 - \omega_0 - 2\omega_4), (-2\omega_4 + \omega_1 - 2\omega_2 + \omega_0),$
 $(-2\omega_4 + \omega_1 + 2\omega_2 - \omega_0), (-\omega_0 + \omega_1 + 2\omega_4 - 2\omega_2),$
20. $(-2\omega_2 + 2\omega_0 - \omega_1 + \omega_3), (-2\omega_2 + 2\omega_2 + \omega_1 + \omega_3), (2\omega_2 + 2\omega_0 + \omega_3 + \omega_1),$
 $(-\omega_1 + 2\omega_0 + \omega_3 + 2\omega_2), (-2\omega_2 - 2\omega_0 + \omega_3 + \omega_1), (\omega_1 - 2\omega_0 + \omega_3 + 2\omega_2),$
 $(2\omega_2 - 2\omega_0 - \omega_1 + \omega_3), (-2\omega_2 - 2\omega_0 + \omega_3 - \omega_1),$
21. $(2\omega_3 + 2\omega_2 - \omega_4 + \omega_0), (-2\omega_2 + 2\omega_3 + \omega_4 + \omega_0), (2\omega_3 - 2\omega_2 - \omega_4 - \omega_0),$
22. $(\omega_3 - 2\omega_4 + \omega_0 + 2\omega_1), (\omega_3 + \omega_0 - 2\omega_1 - 2\omega_4), (\omega_3 + \omega_0 - 2\omega_1 + 2\omega_4),$
 $(\omega_3 + \omega_0 + 2\omega_1 + 2\omega_4), (\omega_3 - \omega_0 + 2\omega_1 + 2\omega_4), (\omega_3 - \omega_0 - 2\omega_1 - 2\omega_4),$
 $(2\omega_4 - 2\omega_1 + \omega_3 - \omega_0), (-2\omega_4 + 2\omega_1 + \omega_3 - \omega_0),$
23. $(-2\omega_2 + 2\omega_3 - \omega_0 - \omega_1), (2\omega_3 - \omega_0 - \omega_1 + 2\omega_2), (2\omega_3 - \omega_0 + \omega_1 + 2\omega_2),$
24. $(-\omega_2 + 2\omega_0 - \omega_4 + 2\omega_1), (2\omega_0 + 2\omega_1 + \omega_4 - \omega_2), (2\omega_1 + 2\omega_0 + \omega_4 + \omega_2),$
 $(2\omega_1 + 2\omega_0 - \omega_4 + \omega_2), (-\omega_4 + 2\omega_1 - \omega_2 - 2\omega_0), (-2\omega_0 + 2\omega_1 - \omega_4 + \omega_2),$
 $(2\omega_1 - 2\omega_0 + \omega_4 - \omega_2), (2\omega_1 - 2\omega_0 + \omega_4 + \omega_2),$
25. $(2\omega_3 - \omega_0 - 2\omega_1 + \omega_4), (-\omega_0 - 2\omega_1 - \omega_4 + 2\omega_3), (2\omega_3 + 2\omega_1 - \omega_0 - \omega_4),$
26. $(2\omega_3 - \omega_0 - 2\omega_1 - \omega_2), (-\omega_2 + \omega_0 + 2\omega_3 - 2\omega_1),$
27. $(\omega_2 + \omega_0 + 2\omega_1 - 2\omega_4), (2\omega_4 + \omega_0 + \omega_2 + 2\omega_1), (-\omega_2 + \omega_0 + 2\omega_1 + 2\omega_4),$
 $(-\omega_2 + \omega_0 + 2\omega_1 - 2\omega_4), (-\omega_2 - \omega_0 + 2\omega_1 + 2\omega_4), (-\omega_2 - \omega_0 + 2\omega_1 - 2\omega_4),$
 $(\omega_2 - \omega_0 + 2\omega_1 + 2\omega_4), (\omega_2 - \omega_0 + 2\omega_1 - 2\omega_4),$
28. $(\omega_2 + 2\omega_3 + \omega_0 - 2\omega_4),$
29. $(\omega_3 + 2\omega_0 + \omega_2 - 2\omega_1), (2\omega_0 - 2\omega_1 - \omega_2 + \omega_3), (\omega_3 + 2\omega_0 - \omega_2 + 2\omega_1)$
 $(\omega_3 - 2\omega_0 - 2\omega_1 - \omega_2), (\omega_3 - 2\omega_0 - 2\omega_1 + \omega_2), (-\omega_0 + 2\omega_3 + \omega_1 - 2\omega_2),$

30. $(-\omega_2 - 2\omega_1 + \omega_3 - 2\omega_4),$
31. $(\omega_0 + 2\omega_1 + \omega_2 + 2\omega_3), (2\omega_1 + 2\omega_3 - \omega_2 + \omega_0),$
32. $(2\omega_3 + \omega_0 - 2\omega_1 + \omega_4), (2\omega_3 + 2\omega_1 + \omega_0 + \omega_4), (2\omega_3 + \omega_0 - \omega_4 - 2\omega_1),$
 $(2\omega_1 + 2\omega_3 + \omega_0 - \omega_4),$
33. $(-\omega_0 + 2\omega_3 + \omega_4 - 2\omega_2), (-\omega_4 - \omega_0 + 2\omega_2 + 2\omega_3), (2\omega_3 - \omega_0 + \omega_4 + 2\omega_2),$
 $(2\omega_3 + \omega_0 + \omega_4 + 2\omega_2),$
34. $(-\omega_1 + 2\omega_2 + \omega_0 + 2\omega_3), (-2\omega_2 + 2\omega_3 + \omega_0 + \omega_1), (\omega_1 + 2\omega_2 + \omega_0 + 2\omega_3),$
 $(2\omega_1 + 2\omega_0 + \omega_2 + \omega_3),$
35. $(2\omega_3 - \omega_0 + 2\omega_1 - \omega_2), (2\omega_3 - \omega_0 - 2\omega_1 + \omega_2), (\omega_2 - \omega_0 + 2\omega_1 + 2\omega_3),$
36. $(2\omega_2 + 2\omega_1 - \omega_4 + \omega_0), (2\omega_1 - 2\omega_2 + \omega_0 + \omega_4), (-\omega_4 + 2\omega_1 - 2\omega_2 + \omega_0),$
 $(\omega_4 + 2\omega_1 + 2\omega_2 + \omega_0), (-2\omega_2 + 2\omega_1 + \omega_4 - \omega_0), (2\omega_2 - \omega_0 + 2\omega_1 + \omega_4),$
 $(-\omega_4 - \omega_0 - 2\omega_2 + 2\omega_1), (-\omega_4 + 2\omega_1 + 2\omega_2 - \omega_0),$
37. $(-2\omega_0 + \omega_1 - \omega_4 + 2\omega_2),$
38. $(2\omega_1 - 2\omega_0 + \omega_2 + \omega_3),$
39. $(2\omega_3 + \omega_0 - 2\omega_1 + \omega_2),$
40. $(-2\omega_1 + 2\omega_2 + \omega_3 + \omega_0), (\omega_3 + \omega_0 + 2\omega_1 - 2\omega_2), (-2\omega_1 - 2\omega_2 + \omega_3 + \omega_0),$
 $(\omega_3 + \omega_0 + 2\omega_1 + 2\omega_2), (-\omega_0 - 2\omega_1 + \omega_3 + 2\omega_2), (\omega_3 - \omega_0 + 2\omega_1 + 2\omega_2),$
 $(-2\omega_2 - 2\omega_1 + \omega_3 - \omega_0), (-2\omega_2 - \omega_0 + 2\omega_1 + \omega_3),$
41. $(-\omega_2 + \omega_0 + 2\omega_3 - 2\omega_1), (2\omega_3 - \omega_0 - 2\omega_1 - \omega_2),$
42. $(2\omega_3 + 2\omega_1 - \omega_0 + \omega_4),$
43. $(2\omega_3 - \omega_0 + \omega_1 + 2\omega_2), (-2\omega_2 + 2\omega_3 - \omega_0 - \omega_1), (2\omega_3 - \omega_0 - \omega_1 + 2\omega_2),$
44. $(2\omega_3 + 2\omega_1 + \omega_0 + \omega_4), (2\omega_1 + 2\omega_3 + \omega_0 - \omega_4), (2\omega_3 + \omega_0 - 2\omega_1 + \omega_4),$
 $(2\omega_3 + \omega_0 - \omega_4 - 2\omega_1), (2\omega_3 - \omega_0 - 2\omega_1 + \omega_4),$
45. $(\omega_1 + 2\omega_2 + \omega_0 + 2\omega_3), (-\omega_1 + 2\omega_2 + \omega_0 + 2\omega_3), (-\omega_1 - 2\omega_2 + \omega_0 + 2\omega_3),$
 $(-\omega_1 - 2\omega_2 + \omega_0 + 2\omega_3), (2\omega_1 + 2\omega_0 + \omega_2 + \omega_3), (-2\omega_2 + 2\omega_3 + \omega_0 + \omega_1),$
46. $(2\omega_1 + 2\omega_3 - \omega_2 + \omega_0), (\omega_0 + 2\omega_1 + \omega_2 + 2\omega_3),$
47. $(2\omega_3 + \omega_0 - 2\omega_1 + \omega_2),$
48. $(2\omega_1 - 2\omega_0 - \omega_2 + \omega_3)$

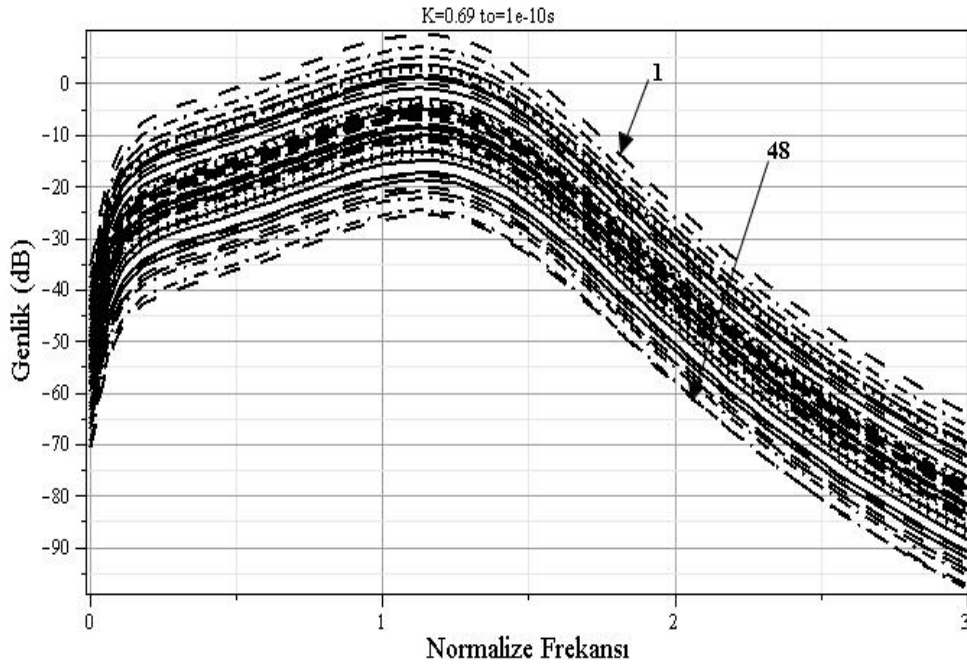
IMD frekans bileşenlerinin genlikleri ve farkları, geri besleme kazanç sabiti ve zaman gecikmesine bağlı olarak IMD frekans bileşenlerinin genlik değerleri çizelge 4.16'da verilmiştir.

Çizelge 4.16 Sekizinci grup IMD frekans bileşenleri arasındaki ilişki

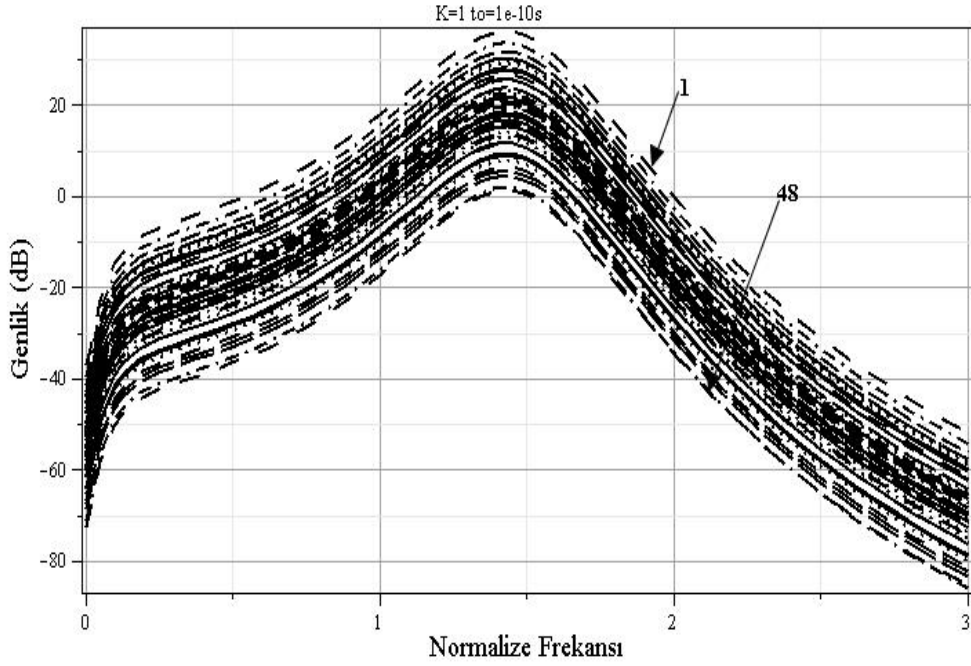
IMD Bileşenleri	K=0,69		K=1		K=0,69	K=1	$t_0=1.10^{-10}$ s	$t_0=1.10^{-11}$ s
	$t_0=1.10^{-10}$ s	$t_0=1.10^{-11}$ s	$t_0=1.10^{-10}$ s	$t_0=1.10^{-11}$ s	Genlik Farkı	Genlik Farkı	Genlik Farkı	Genlik Farkı
1	9,65	-43,82	36,19	-2,97	53,47	39,16	-26,54	-40,85
2	7,20	-46,39	33,75	-5,67	53,59	39,42	-26,55	-40,72
3	5,30	-48,33	31,81	-7,57	53,63	39,38	-26,51	-40,76
4	3,69	-50,05	30,33	-9,44	53,74	39,77	-26,64	-40,61
5	3,63	-50,22	30,22	-9,14	53,85	39,36	-26,59	-41,08
6	3,18	-50,36	29,66	-9,54	53,54	39,20	-26,48	-40,82
7	2,80	-50,83	29,25	-10,06	53,63	39,31	-26,45	-40,77
8	1,76	-51,85	28,29	-11,08	53,61	39,37	-26,53	-40,77
9	1,73	-52,07	28,23	-11,31	53,80	39,54	-26,50	-40,76
10	1,16	-52,09	27,78	-11,53	53,25	39,31	-26,62	-40,56
11	1,13	-52,43	27,72	-11,65	53,56	39,37	-26,59	-40,78
12	0,13	-53,45	26,70	-12,66	53,58	39,36	-26,57	-40,79
13	-0,78	-54,29	25,73	-13,42	53,51	39,15	-26,51	-40,87
14	-2,79	-56,30	23,85	-15,52	53,51	39,37	-26,64	-40,78
15	-3,35	-56,86	23,29	-16,08	53,51	39,37	-26,64	-40,78
16	-3,98	-57,41	22,67	-16,58	53,43	39,25	-26,65	-40,83
17	-4,38	-57,89	22,26	-17,10	53,51	39,36	-26,64	-40,79
18	-4,89	-58,33	21,75	-17,50	53,44	39,25	-26,64	-40,83
19	-4,94	-58,45	21,70	-17,66	53,51	39,36	-26,64	-40,79
20	-5,29	-58,80	21,35	-18,01	53,51	39,36	-26,64	-40,79
21	-5,72	-58,84	20,92	-17,53	53,12	38,45	-26,64	-41,31
22	-5,96	-59,77	20,68	-18,70	53,81	39,38	-26,64	-41,07
23	-6,37	-59,75	20,27	-18,88	53,38	39,15	-26,64	-40,87
24	-6,87	-60,38	19,77	-19,62	53,51	39,39	-26,64	-40,76
25	-7,90	-61,47	18,74	-20,62	53,57	39,36	-26,64	-40,85
26	-8,41	-62,09	18,23	-21,09	53,68	39,32	-26,64	-41,00
27	-8,46	-62,11	18,18	-21,40	53,65	39,58	-26,64	-40,71
28	-8,60	-61,71	18,05	-20,33	53,11	38,38	-26,65	-41,38
29	-8,81	-62,32	17,83	-21,84	53,51	39,67	-26,64	-40,48
30	-9,13	-62,91	17,11	-22,19	53,78	39,30	-26,24	-40,72
31	-9,89	-63,27	16,75	-22,58	53,38	39,33	-26,64	-40,69
32	-10,34	-63,57	16,30	-22,62	53,23	38,92	-26,64	-40,95
33	-10,45	-63,58	16,03	-22,54	53,13	38,57	-26,48	-41,04
34	-11,17	-64,49	15,39	-23,54	53,32	38,93	-26,56	-40,95
35	-12,33	-65,84	14,31	-25,06	53,51	39,37	-26,64	-40,78
36	-12,90	-66,40	13,75	-25,62	53,50	38,95	-26,65	-40,78
37	-13,11	-66,08	13,54	-24,98	52,97	38,52	-26,65	-41,10
38	-13,68	-66,80	12,96	-25,79	53,12	38,75	-26,64	-41,01
39	-14,78	-68,01	11,86	-27,06	53,23	38,92	-26,64	-40,95
40	-14,83	-68,34	11,81	-27,56	53,51	39,37	-26,64	-40,78
41	-17,20	-70,32	9,50	-29,31	53,12	38,81	-26,70	-41,01
42	-17,66	-70,63	9,05	-29,53	52,97	38,58	-26,71	-41,10
43	-18,57	-71,54	8,16	-30,44	52,97	38,60	-26,73	-41,10
44	-20,08	-72,94	6,65	-31,78	52,86	38,43	-26,73	-41,16
45	-20,99	-73,86	5,60	-32,70	52,87	38,30	-26,59	-41,16
46	-22,09	-75,06	4,61	-33,96	52,97	38,57	-26,70	-41,10
47	-24,52	-77,38	2,22	-36,22	52,86	38,44	-26,74	-41,16
48	-25,50	-71,25	1,42	-28,84	45,75	30,26	-26,92	-42,41

Şekil 4.63-4.64 gecikme zamanı $t_o = 1.10^{-10} s$, geri besleme sabitine bağlı olarak taşıyıcıdan elde edilen fark frekanslarının genlik değerleri görülmektedir. Şekil 4.63’de Gecikme zamanı $t_o = 1.10^{-10} s$ iken $K=0,69$ için en küçük genlik değeri $-25,50dB$, en büyük genlik değeri ise $9,65dB$ ’dir. Normalize frekans band genişliği değerleri tüm IMD bileşenleri için $0,50$ olarak bulunmuş ve $-3dB$ için grubun toplam band genişliği $24.10^{10} Hz$ olarak hesaplanmıştır.

Şekil 4.64’de ise $K=1$ için en küçük genlik değeri $1,42dB$, en büyük genlik değeri ise $36,19dB$ olarak gözlenmiştir. Normalize frekans band genişliği değerleri tüm IMD bileşenleri için $0,27$ olarak bulunmuş ve $-3dB$ için grubun toplam band genişliği $12,96.10^{10} Hz$ hesaplanmıştır.



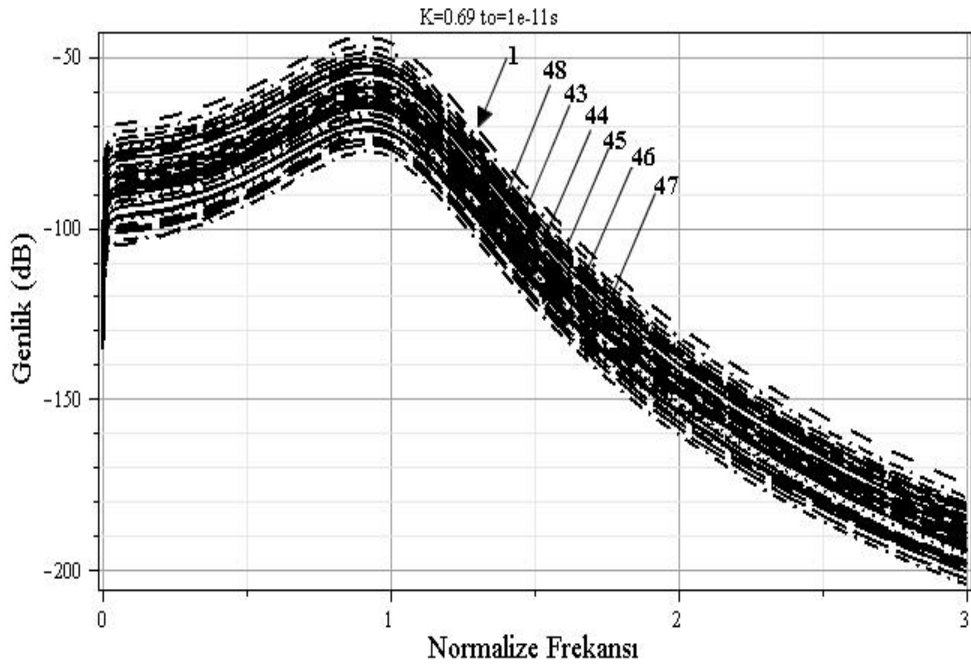
Şekil 4.63 Sekizinci grup IMD eğrileri



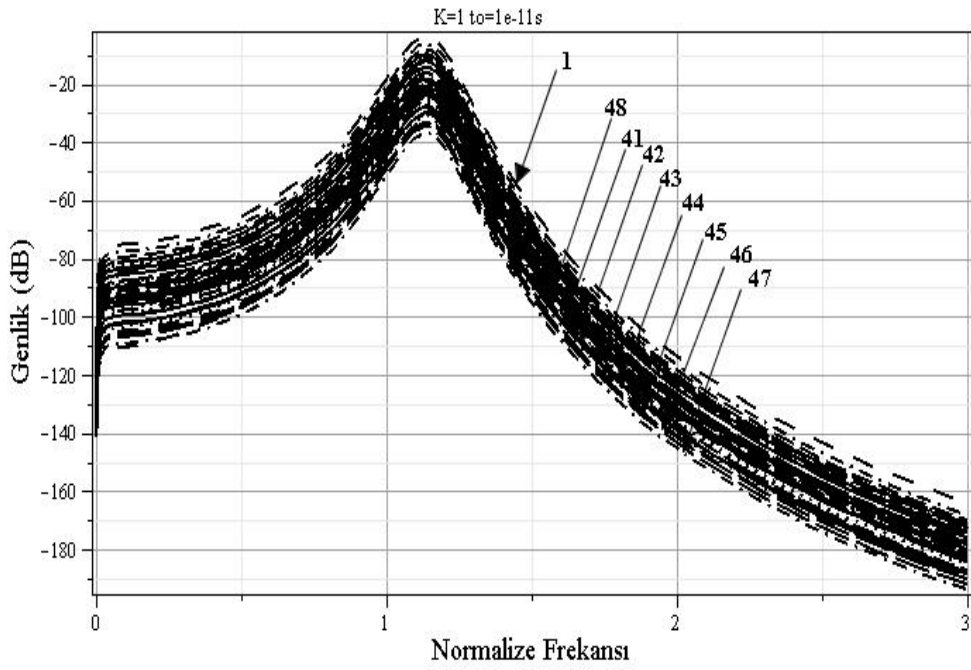
Şekil 4.64 Sekizinci grup IMD eğrileri

Şekil 4.65 ve Şekil 4.66 gecikme zamanı $t_o = 1.10^{-11} s$ için elde edilmiştir. Şekil 4.65’de $K=0,69$ için en küçük genlik değeri $-77,38dB$, en büyük genlik değeri ise $-43,82dB$ ’dir. Normalizasyon frekans band genişliği değerleri tüm IMD bileşenleri için $0,26$ olarak bulunmuş ve $-3dB$ için grubun toplam band genişliği $12,48.10^{11} Hz$ hesaplanmıştır.

Şekil 4.66’da ise $K=1$ için ise en küçük genlik değeri $-36,22dB$, en büyük genlik değeri ise $-2,97dB$ olarak bulunmuştur. Normalizasyon frekans band genişliği değerleri tüm IMD bileşenleri için $0,10$ olarak bulunmuş ve $-3dB$ için grubun toplam band genişliği $4,80.10^{11} Hz$ hesaplanmıştır.



Şekil 4.65 Sekizinci grup IMD eğrileri



Şekil 4.66 Sekizinci grup IMD eğrileri

4.2.9 Dokuzuncu grup

Dokuzuncu grup taşıyıcı IMD frekans bileşenlerinden iki farklı IMD bileşen grubu elde edilmiştir. Bunlar;

$$\begin{aligned}
 &1.(\omega_2 + \omega_0 + \omega_3 + \omega_1 + 2\omega_4), (\omega_2 + \omega_0 + \omega_3 - \omega_1 - 2\omega_4), (-\omega_2 + \omega_0 + \omega_3 + \omega_1 + 2\omega_4), \\
 &(-\omega_2 + \omega_0 + \omega_3 - \omega_1 + 2\omega_4), (-\omega_2 + \omega_0 + \omega_3 + \omega_1 - 2\omega_4), (-\omega_2 + \omega_0 + \omega_3 - \omega_1 - 2\omega_4), \\
 &(\omega_3 + \omega_2 - 2\omega_4 + \omega_0 + \omega_1), (2\omega_4 - \omega_1 + \omega_2 + \omega_3 + \omega_0), \\
 &2.(-2\omega_2 + \omega_0 + \omega_3 - \omega_4 - \omega_1), (\omega_3 - 2\omega_2 + \omega_4 + \omega_0 + \omega_1), (-\omega_4 + \omega_0 + 2\omega_2 - \omega_1 + \omega_3), \\
 &(\omega_4 + \omega_0 + 2\omega_2 + \omega_1 + \omega_3), (\omega_0 + \omega_1 - \omega_4 + \omega_3 + 2\omega_2), (\omega_0 - \omega_1 + \omega_4 + \omega_3 + 2\omega_2), \\
 &(-\omega_4 + \omega_0 - 2\omega_2 + \omega_1 + \omega_3), (\omega_3 + \omega_0 + \omega_4 - \omega_1 - 2\omega_2)
 \end{aligned}$$

IMD frekans bileşenlerinin genlikleri ve farkları, geri besleme kazanç sabiti ve zaman gecikmesine bağlı olarak IMD frekans bileşenlerinin genlik değerleri çizelge 4.17’de verilmiştir.

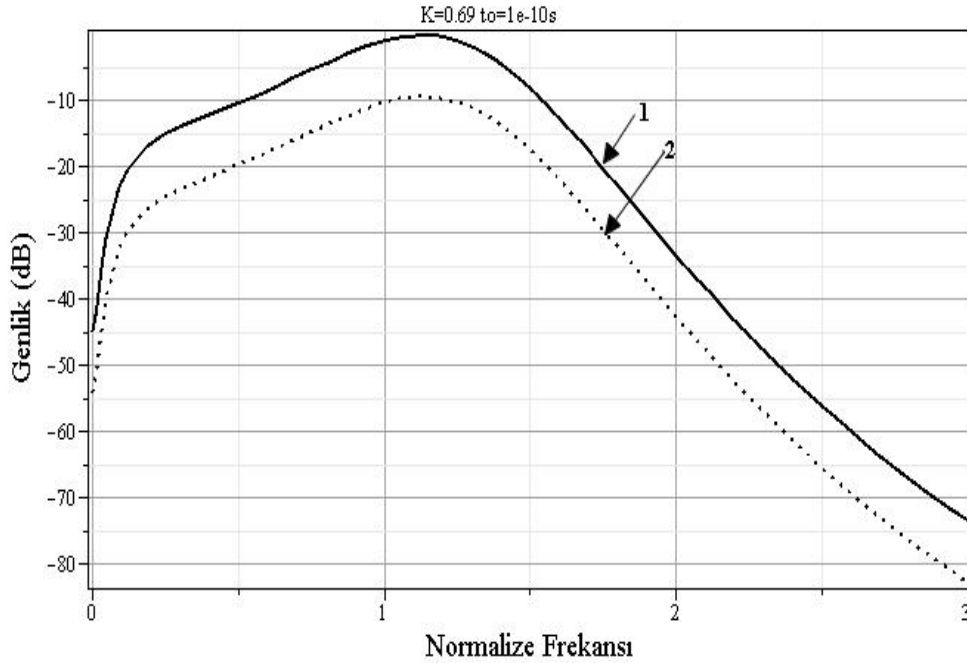
Çizelge 4.17 Dokuzuncu grup IMD frekans bileşenleri arasındaki ilişki

IMD Bileşenleri		GENLİK (dB)	
		1	2
K=0.69	$t_o=1.10^{-10}$ s	-0,10	-9,21
	$t_o=1.10^{-11}$ s	-53,47	-62,54
K=1	$t_o=1.10^{-10}$ s	26,52	17,19
	$t_o=1.10^{-11}$ s	-12,63	-21,76
K=0.69	Genlik Farkı	53,37	53,33
K=1	Genlik Farkı	39,15	38,95
$t_o=1.10^{-10}$ s	Genlik Farkı	-26,62	-26,40
$t_o=1.10^{-11}$ s	Genlik Farkı	-40,84	-40,78

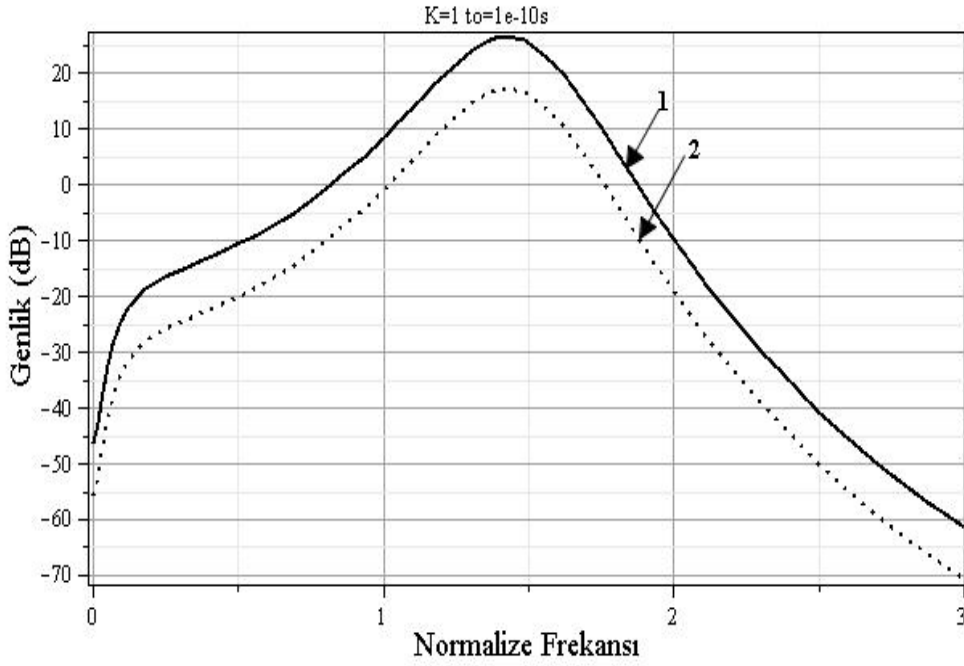
Şekil 4.67 ve Şekil 4.68 gecikme zamanı $t_o = 1.10^{-10}$ s için elde edilmiştir. Şekil 4.67’de K=0,69 için en küçük genlik değeri -9,21dB, en büyük genlik değeri ise -0,10dB’dir.

Normalize frekans band genişliği değerleri sırasıyla 0,51 ve 0,48 olarak bulunmuştur. -3dB için grubun toplam band genişliği teorik olarak $0,99 \cdot 10^{10}$ Hz hesaplanmıştır.

Şekil 4.68'de ise $K=1$ için en küçük genlik değeri 17,19dB, en büyük genlik değeri ise 26,52dB olarak gözlenmiştir. Normalize frekans band genişliği değerleri sırasıyla 0,27 ve 0,28 olarak bulunmuştur. 3dB için grubun toplam band genişliği teorik olarak $0,55 \cdot 10^{10}$ Hz hesaplanmıştır.



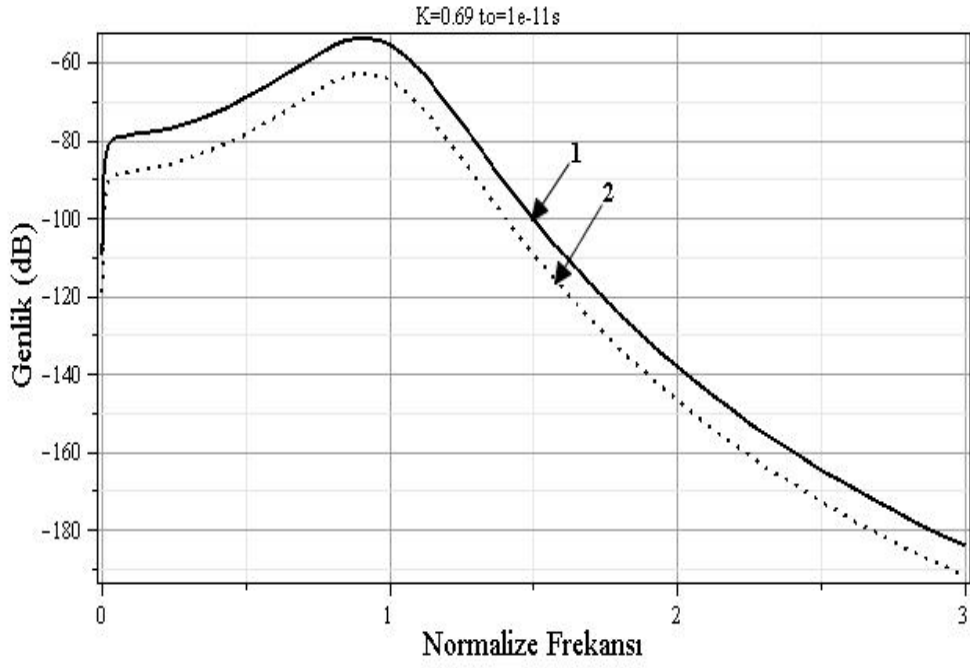
Şekil 4.67 Dokuzuncu grup IMD eğrileri



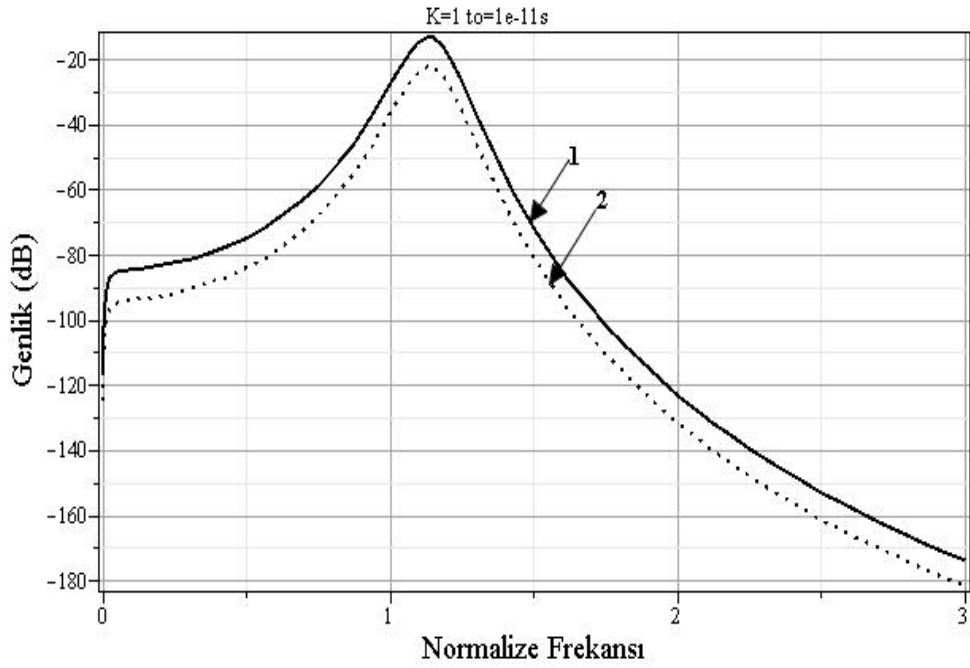
Şekil 4.68 Dokuzuncu grup IMD eğrileri

Şekil 4.69-4.70 gecikme zamanı $t_o = 1.10^{-11} s$ için elde edilmiştir. Şekil 4.69'da $K=0,69$ için en küçük genlik değeri $-62,54dB$, en büyük genlik değeri ise $- 53,47dB$ 'dir. Normalize frekans band genişliği değerleri sırasıyla $0,24$ ve $0,24$ olarak bulunmuştur. $-3dB$ için grubun toplam band genişliği teorik olarak $0,48.10^{11} Hz$ hesaplanmıştır.

Şekil 4.70'de ise $K=1$ için en küçük genlik değeri $-21,76dB$, en büyük genlik değeri ise $-12,63dB$ olarak gözlenmiştir. Normalize frekans band genişliği değerleri sırasıyla $0,10$ ve $0,10$ olarak bulunmuştur. $-3dB$ için grubun toplam band genişliği teorik olarak $0,20.10^{11} Hz$ hesaplanmıştır.



Şekil 4.69 Dokuzuncu grup IMD eğrileri



Şekil 4.70 Dokuzuncu grup IMD eğrileri

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Lazer diyot çıkışından elde edilen optik işaretin genliğindeki değişmeler fiber optik sisteme giriş yapılacak olan optik işaretin fiziksel özelliğini, sistemin verimliliğini ve alt yapı maliyetini doğrudan etkiler. Yapılan çalışmada optoelektronik geribeslemeli LD sistemi için fark frekansından elde edilen IMD frekans bileşenleri 8 gruba ve taşıyıcı frekansından elde edilen alternatif IMD frekans bileşenleri 9 gruba ayrılarak analizleri yapılmıştır.

Birinci grup IMD fark frekans bileşenleri incelendiğinde, gecikme zamanı $t_o = 1.10^{-11} s$ ve $t_o = 1.10^{-10} s$ arasındaki IMD frekans bileşenlerinin genlikleri farklı şekilde artmakta veya azalmaktadır. Genliklerdeki bu farklılık bu grubun asimetrik haberleşme sistemlerinde kullanılmasının uygun olacağını göstermektedir. Teknik olarak gecikme zamanı ayarlanabilir lazer diyot üretmek zorken, kazancı ayarlanabilir lazer diyot üretmek daha kolaydır. Kazancı ayarlanabilir LD üreterek daha önceden alt yapısı kurulmuş sistem için uygun tip LD seçimi yapılarak bu gruptaki bazı IMD bileşenleri alt yapıyı değiştirmeden asimetrik haberleşme sistemlerinde kullanılabilir.

Alternatif IMD bileşenlerinden 2. grup incelendiğinde gecikme zamanı $t_o = 1.10^{-10} s$ için seçilen IMD frekans bileşenlerinin kullanılması uygun değildir. Ancak $t_o = 1.10^{-11} s$ için bunların kullanılması değerlendirilebilir. Eğer genliğin yüksek olması isteniyorsa geri besleme sabiti büyük, bant genişliği büyük olması isteniyorsa geri besleme sabiti küçük seçilmelidir.

Çizelge 5.1 Toplam band genişliği

	TOPLAM BAND GENİŞLİĞİ			
	$t_0=1.10^{-10}$ s, K=0.69	$t_0=1.10^{-10}$ s, K=1	$t_0=1.10^{-11}$ s, K=0.69	$t_0=1.10^{-11}$ s, K=1
IMD Fark Bileşenleri				
1.Grup	6.10^{10} Hz	$6,43.10^{10}$ Hz	$4,17.10^{11}$ Hz	$1,91.10^{11}$ Hz
2.Grup	$4,16.10^{10}$ Hz	$1,89.10^{10}$ Hz	$1,98.10^{11}$ Hz	$1,17.10^{11}$ Hz
3.Grup	12.10^{10} Hz	$5,52.10^{10}$ Hz	$6,24.10^{11}$ Hz	$2,16.10^{11}$ Hz
4.Grup	$1,97.10^{10}$ Hz	$1,05.10^{10}$ Hz	$1,02.10^{11}$ Hz	$0,41.10^{11}$ Hz
5.Grup	$5,36.10^{10}$ Hz	$2,75.10^{10}$ Hz	$2,42.10^{11}$ Hz	$1,21.10^{11}$ Hz
6.Grup	$1,10.10^{10}$ Hz	$0,54.10^{10}$ Hz	$0,57.10^{11}$ Hz	$0,20.10^{11}$ Hz
7.Grup	$12,81.10^{10}$ Hz	$4,92.10^{10}$ Hz	$4,80.10^{11}$ Hz	$1,68.10^{11}$ Hz
8.Grup	$5,25.10^{10}$ Hz	$2,04.10^{10}$ Hz	$2,02.10^{11}$ Hz	$0,78.10^{11}$ Hz
Toplam	$48,65.10^{10}$ Hz	$26,64.10^{10}$ Hz	$23,17.10^{11}$ Hz	$9,52.10^{11}$ Hz
Alternatif IMD Bileşenleri				
1.Grup	$8,28.10^{10}$ Hz	$3,17.10^{10}$ Hz	$3,08.10^{11}$ Hz	$1,28.10^{11}$ Hz
2.Grup	$7,98.10^{10}$ Hz	$2,90.10^{10}$ Hz	$3,05.10^{11}$ Hz	$1,14.10^{11}$ Hz
3.Grup	$3,20.10^{10}$ Hz	$0,96.10^{10}$ Hz	$2,39.10^{11}$ Hz	$0,58.10^{11}$ Hz
4.Grup	$1,86.10^{10}$ Hz	$1,10.10^{10}$ Hz	$1,08.10^{11}$ Hz	$0,40.10^{11}$ Hz
5.Grup	$10,12.10^{10}$ Hz	$5,94.10^{10}$ Hz	$6,16.10^{11}$ Hz	$2,20.10^{11}$ Hz
6.Grup	$2,94.10^{10}$ Hz	$1,68.10^{10}$ Hz	$1,50.10^{11}$ Hz	$0,60.10^{11}$ Hz
7.Grup	$10,08.10^{10}$ Hz	$5,46.10^{10}$ Hz	$5,67.10^{11}$ Hz	$2,31.10^{11}$ Hz
8.Grup	24.10^{10} Hz	$12,96.10^{10}$ Hz	$12,48.10^{11}$ Hz	$4,80.10^{11}$ Hz
9.Grup	$0,99.10^{10}$ Hz	$0,55.10^{10}$ Hz	$0,48.10^{11}$ Hz	$0,20.10^{11}$ Hz
Toplam	$69,45.10^{10}$ Hz	$34,66.10^{10}$ Hz	$33,89.10^{11}$ Hz	$13,51.10^{11}$ Hz

Çizelge 5.2 $t_0=1.10^{-10}$ için toplam band genişliği ve genlik

TOPLAM BAND GENİŞLİĞİ			GENLİK (dB)					
$t_0=1.10^{-10}$ s, K=0.69	$t_0=1.10^{-10}$ s, K=1		$t_0=1.10^{-10}$ s, K=0.69			$t_0=1.10^{-10}$ s, K=1		
			Max (dB)	Min (dB)	Fark (dB)	Max (dB)	Min (dB)	Fark (dB)
IMD Fark Bileşenleri								
1.Grup	6.10^{10} Hz	$6,43.10^{10}$ Hz	52,75	42,24	10,51	54,46	44,00	10,46
2.Grup	$4,16.10^{10}$ Hz	$1,89.10^{10}$ Hz	28,22	-3,38	31,60	54,57	22,76	31,81
3.Grup	12.10^{10} Hz	$5,52.10^{10}$ Hz	32,76	-4,50	37,26	59,24	22,14	37,10
4.Grup	$1,97.10^{10}$ Hz	$1,05.10^{10}$ Hz	-2,44	-18,36	15,92	24,20	8,37	15,83
5.Grup	$5,36.10^{10}$ Hz	$2,75.10^{10}$ Hz	-4,54	-21,74	17,20	22,11	4,80	17,31
6.Grup	$1,10.10^{10}$ Hz	$0,54.10^{10}$ Hz	8,14	7,20	0,94	34,49	33,75	0,74
7.Grup	$12,81.10^{10}$ Hz	$4,92.10^{10}$ Hz	16,61	-1,77	18,38	22,15	3,66	18,49
8.Grup	$5,25.10^{10}$ Hz	$2,04.10^{10}$ Hz	13,91	4,22	9,69	19,26	9,75	9,51
Toplam	$48,65.10^{10}$ Hz	$25,11.10^{10}$ Hz	-	-	-	-	-	-
Alternatif IMD Bileşenleri								
1.Grup	$8,28.10^{10}$ Hz	$3,17.10^{10}$ Hz	19,16	1,67	17,49	24,68	7,18	17,50
2.Grup	$7,98.10^{10}$ Hz	$2,90.10^{10}$ Hz	21,66	1,10	20,56	27,18	9,51	17,67
3.Grup	$3,20.10^{10}$ Hz	$0,96.10^{10}$ Hz	56,25	48,21	8,04	80,33	72,31	8,02
4.Grup	$1,86.10^{10}$ Hz	$1,10.10^{10}$ Hz	19,53	-17,15	36,68	46,05	9,35	36,70
5.Grup	$10,12.10^{10}$ Hz	$5,94.10^{10}$ Hz	38,19	2,49	35,70	64,73	29,11	35,62
6.Grup	$2,94.10^{10}$ Hz	$1,68.10^{10}$ Hz	9,66	-11,30	20,96	36,20	15,46	20,74
7.Grup	$10,08.10^{10}$ Hz	$5,46.10^{10}$ Hz	17,12	-3,97	21,09	43,64	22,43	21,21
8.Grup	24.10^{10} Hz	$12,96.10^{10}$ Hz	9,65	-25,50	35,15	36,19	1,42	34,77
9.Grup	$0,99.10^{10}$ Hz	$0,55.10^{10}$ Hz	-0,10	-9,21	9,11	26,52	17,19	9,33
Toplam	$68,46.10^{10}$ Hz	$34,66.10^{10}$ Hz	-	-	-	-	-	-

Çizelge 5.3 $t_0=1.10^{-11}$ için toplam band genişliği ve genlik

TOPLAM BAND GENİŞLİĞİ		GENLİK (dB)						
$t_0=1.10^{-11}$ s, K=0.69	$t_0=1.10^{-11}$ s, K=1	$t_0=1.10^{-11}$ s, K=0.69			$t_0=1.10^{-11}$ s, K=1			
		Max (dB)	Min (dB)	Fark (dB)	Max (dB)	Min (dB)	Fark (dB)	
IMD Fark Bileşenleri								
1.Grup	$4,17.10^{11}$ Hz	$1,91.10^{11}$ Hz	21,40	10,78	10,62	27,62	16,28	11,34
2.Grup	$1,98.10^{11}$ Hz	$1,17.10^{11}$ Hz	-25,25	-57,69	32,44	15,29	-16,60	31,89
3.Grup	$6,24.10^{11}$ Hz	$2,16.10^{11}$ Hz	-20,25	-58,06	37,81	20,51	-17,70	38,21
4.Grup	$1,02.10^{11}$ Hz	$0,41.10^{11}$ Hz	-55,94	-71,85	15,91	-15,15	-31,06	15,91
5.Grup	$2,42.10^{11}$ Hz	$1,21.10^{11}$ Hz	-57,96	-74,70	16,74	-17,13	-33,60	16,47
6.Grup	$0,57.10^{11}$ Hz	$0,20.10^{11}$ Hz	-45,75	-46,39	0,64	-4,66	-5,60	0,94
7.Grup	$4,80.10^{11}$ Hz	$1,68.10^{11}$ Hz	-25,02	-43,29	18,27	-10,92	-29,34	18,42
8.Grup	$2,02.10^{11}$ Hz	$0,78.10^{11}$ Hz	-32,02	-37,42	5,40	-18,63	-23,32	4,69
Toplam	$23,22.10^{11}$ Hz	$9,52.10^{11}$ Hz	-	-	-	-	-	-
Alternatif IMD Bileşenleri								
1.Grup	$3,08.10^{11}$ Hz	$1,28.10^{11}$ Hz	-22,32	-39,82	17,50	-8,33	-25,89	17,50
2.Grup	$3,05.10^{11}$ Hz	$1,14.10^{11}$ Hz	-19,82	-27,06	7,24	-5,89	-12,87	6,98
3.Grup	$2,39.10^{11}$ Hz	$0,58.10^{11}$ Hz	24,76	16,75	8,01	32,20	24,22	7,98
4.Grup	$1,08.10^{11}$ Hz	$0,40.10^{11}$ Hz	-33,96	-65,10	31,14	6,73	-22,76	29,49
5.Grup	$6,16.10^{11}$ Hz	$2,20.10^{11}$ Hz	-15,18	-51,25	36,07	25,94	-10,50	36,44
6.Grup	$1,50.10^{11}$ Hz	$0,60.10^{11}$ Hz	-44,11	-65,03	20,92	-3,37	-23,95	20,58
7.Grup	$5,67.10^{11}$ Hz	$2,31.10^{11}$ Hz	-36,47	-57,90	21,43	4,23	-17,27	21,50
8.Grup	$12,48.10^{11}$ Hz	$4,80.10^{11}$ Hz	-43,82	-71,25	27,43	-2,97	-28,84	25,87
9.Grup	$0,48.10^{11}$ Hz	$0,20.10^{11}$ Hz	-53,47	-62,54	9,07	-12,63	-21,76	9,13
Toplam	$35,89.10^{11}$ Hz	$13,51.10^{11}$ Hz	-	-	-	-	-	-

Yukarıdaki 5.1, 5.2, 5.3 nolu çizelgelerde grupların özellikleri, ayrıntılı sonuçları görülmektedir. Sistemin en iyi band genişliği $t=1.10^{10}$ s %182,628 ve alternatif IMD bileşenleri için ise % 200,375 ve $t=1.10^{11}$ s için IMD bileşenleri için elde edilmiştir. Bu değerler IMD frekansları için % 243,382 ve alternatif IMD ler için ise % 250,851 bulunmuştur. IMD değişimi %33,26 alternatif IMD değişimleri için ise % 25,238 değişim olmuştur. Asimetrik olarak band genişliğindeki fark ise yaklaşık % 8 olarak bulunmuştur.

Analizde elde edilen diğer bir sonuç ise, alternatif IMD bileşenlerinden bazı grupların ve IMD fark frekans genliklerinin diğer IMD bileşenlerinin genliklerinden daha büyük olmasıdır. Alt taşıyıcılı sistemler için bu durumun dikkate alınması önem arz etmektedir.

KAYNAKLAR

- Agrawal, G.P. and Dutta N.K. 1986. Long- Wavelength Semiconductor Laser. Van Nostrand, Reinhold, New York.
- Aydın, E. and Yıldırım, R. 2004. Optimizing the Performance of Single-mode Laser Diode System Using Genetic Algorithm. Optics and Laser in Eng., Cilt 42 ,41-46.
- Bedrosian, E. and Rice,S.O., 1971. The Output Properties of Volterra Systems (Nonlinear Systems with Memory) Driven by Harmonic and Gaussian Inputs. Proc. IEEE. Vol.59, pp.1688-1707
- Biswas, T.K. and McGee,W.F. 1991. Volterra Series of Semiconductor Laser Diode. IEEE Pho.Tec.Lett., Vol.3, No. 8.
- Bussgang, J.J. and Ehrman L. 1974. Analysis of Nonlinear Systems with Multiple Inputs. Proc. IEEE Vol.62, pp.1088-1119
- Cheo, P. K. 1990. Fiber Optics and Optoelectronics. Prentice Hall, New Jersey.
- Çelebi, F.V.and Yıldırım, R. 2005. Distortion System Theory of the Two-tone Small signal Input laser Diode. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Dergisi, Cilt 20, No.3, 373.
- Froidure, J.C. C.L, P.M, E.J, P.G, T.T. M. L, M.B. 1995. Theoretical and Experimental Study of Second-order Distortion in CATV DFB Lasers Diodes. IEEE Pho.Tec.Lett. Vol.7, No.5.
- Hassine, L. and Toffano, Z. and Lamnabhi-Lagarrigue, F and Destrez, A. and Birocheau, C. 1994. Volterra functional Series Expansion for Semiconductor Laser Under Modulation. J. QE. Vol.30, No.4, pp. 918-928.
- Hijelme,D. R and Michelson, A. R. and Beausoleil, R. G. and McGarvey J. A. and Hagman, R. L. 1989. Semiconductor Laser Stabilization by External Optical Feedback. Tech. Dig. CLEO' 89, DC. Opt. Soc. Amer., Vol.11 pp. 300, Washington.
- Klinmann, D. A. and Kisliuk, P. P. 1962. Discrimination against unwanted orders in the Fabry -Perot Resonator, Bell. Syst. Tech. J., Vol.41 , pp. 453.
- Koelher, T. R. and Goldsborough, J. P. 1962. Tree-reflector Optical Cavity for Mode Discrimination. Bull. Amer, Phys. Soc., Vol.7, pp. 446.
- Kressel, H. 1980. Semiconductor Devices for Optical Communication. Springer Verlag, Berlin.
- Ohtsu, M.. 1992. Highly Coherent Semiconductor Lasers. Artech House Boston.
- Peterman, K. 1991. Laser Diode Modulation and Noise. Kluwer A. Publishers, Tokyo.
- Salathi, R.P. 1979. Diode Lasers Coupled to External Resonators, Apply Phys. Springer- Verlag 20, 1- 18, pp.1.
- Salgado, H.M. and Reilly J.J. G. 1991. Volterra Series of Analysis of Distortion in Semiconductor Laser Diodes. IEE Proc- J..Vol. 138, No.12.
- Schetzen, M. and Yıldırım, R. 2003. System theory of the single-mode laser-diode. Opt. Commun, Cilt 219, 341-350.
- Schetzen, M., 2006. The Volterra and Wiener Theories of Nonlinear Systems. Malabar, Fla., R.E. Krieger Publishing Co., reprint edition with additional material
- Suematsu, Y. and Adams, A.R. 1994. Handbook of Semicondusdor Lasers and Photonic Integrated Circuits. Chapman and Hall, New York.

- Tucker, R.S. and Pope, D.J. 1983. Circuit Modeling of the Effect of Diffision on Damping in a Narrow-Stripe Semiconductor for Laser. IEEE J.QE., Vol.19, No.7, pp.1179.
- Weiner, D.D. and Spina J.F. 1980. Sinusodial Analysis and Modeling of Weakly Nonlinear Circuits. Van Nostrand Reinhold Electrical/Computer Science and Engineering Series, New York, pp.290
- Yamamoto, Y. 1990. Coherence, Amplification, and Quantum Effects in Semiconductor Lasers. John Wiley and Sons.Inc., New York.
- Yariv, A. 1988. Quantum Electronics. Wiley and Sons, Third Edition, New York.
- Yariv, A. 1991. Optical Electronics, New York Holt Rinehart and Winston, Inc.
- Yıldırım, R. 1996. Optik Geribeslemeli Lazer Diyodun Volterra Serisi ile Modellenmesi. Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri.
- Yıldırım, R. And Schetzen, M. 2003. Application of the Single mode Laser Diode System Theory. Opt. Commun, Cilt 219, 351-355.
- Yıldırım, R. 2006. Doğrusal Olmayan Optoelektronik Geribeslemeli Lazer Diyotun Bağlı Şiddet Gürültü Sistem Teorisi. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Dergisi, Cilt 21, No.3, pp.575-580.
- Yıldırım, R. 2007. 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.
- Zorabedian, P. 1994. Axial Mode Instability Tunable External Cavity Semiconductor Lasers. IEEE. QE., Vol. 30, No.7.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Beyhan GERGERLİ

Doğum Yeri : Şanlıurfa

Doğum Tarihi : 1978

Medeni Hali : Bekar

Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Şanlıurfa Anadolu Kız Meslek Lisesi Bilgisayar Bölümü

Lisans : Çankaya Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans : Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Bilgisayar
Mühendisliği ABD

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl

Başbakanlık aile ve Sosyal araştırmalar Genel Müdürlüğü (2003-2005)
Tarım ve Köyişleri Bakanlığı (2005-

Yayımları (SCI ve diğer):

F.V. Çelebi, R. Yıldırım, **B. Gergerli**, L. Gokrem. Alternatif Intermodülasyon
Frekans Bileşenleri. 2009 IEEE International Conference on Application of
Information and Communication Technologies. AICT 2009.