

T.C.
ADNAN MENDERES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI
2017-YL-016

BAZI SOL-ELLİ VE BİRLEŞİK
NONLİNEER LC İLETİM HATLARINDA
İLERLEYEN DALGALARIN ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Gülşah Cemile TEMİZ

Tez Danışmanı:
Prof. Dr. Halil YARANERİ

AYDIN

T.C.
ADNAN MENDERES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜNE
AYDIN

Fizik Anabilim Dalı Yüksek Lisans Programı öğrencisi Gülşah Cemile TEMİZ tarafından hazırlanan "Bazı Sol-Elli ve Birleşik Nonlineer LC İletim Hatlarında İlerleyen Dalgaların Özelliklerinin İncelenmesi." başlıklı tez, 05.06.2017 tarihinde yapılan savunma sonucunda aşağıda isimleri bulunan jüri üyelerince kabul edilmiştir.

	Ünvanı, Adı Soyadı	Kurumu	İmzası
Başkan	: Prof. Dr. Cesur EKİZ	Adnan Menderes Üniv.	
Üye	: Prof. Dr. Hamza POLAT	Dokuz Eylül Üniv.	
Üye	: Prof. Dr. Halil YARANERİ	Adnan Menderes Üniv.	

Jüri üyeleri tarafından kabul edilen bu Yüksek Lisans tezi, Enstitü Yönetim Kurulunun sayılı kararıyla .../.../2017 tarihinde onaylanmıştır.

Prof. Dr. Aydın ÜNAY
Enstitü Müdürü

T.C.
ADNAN MENDERES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜNE
AYDIN

Bu tezde sunulan tüm bilgi ve sonuçların, bilimsel yöntemlerle yürütülen gerçek deney ve gözlemler çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, çalışmada bana ait olmayan tüm veri, düşünce, sonuç ve bilgilere bilimsel etik kuralların gereği olarak eksiksiz şekilde uygun atıf yaptığımı ve kaynak göstererek belirttiğimi beyan ederim.

05.06.2017

Gülşah Cemile TEMİZ

ÖZET

BAZI SOL-ELLİ VE BİRLEŞİK NONLİNEER LC İLETİM HATLARINDA İLERLEYEN DALGALARIN ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Gülşah Cemile TEMİZ

Yüksek Lisans Tezi, Fizik Anabilim Dalı
Tez Danışmanı: Prof. Dr. Halil YARANERİ
2017, 51 sayfa

Bu çalışmada değişken kapasitans(C) ve indüktans(L) dan oluşan sol-elli nonlinear LC iletim hatlarında elektrik dalgalarının iletimi ve bu sırada dalgaların birbirleri ile etkileşimi incelenmiştir. Nonlinear sol-elli ve birleşik sol-elli LC iletim hatları oluşturularak sol uçlarından 200 μ s zaman ve 200-1000 kHz frekans aralığında, değişik genliklerde sinüzoidal elektrik sinyalleri verilerek, hattın ortasındaki elektrik dalgaları osiloskopta gözlenmiş ve daha sonra analizi yapılmak üzere elektronik ortama kaydedilmiştir. Bu elektrik sinyallerin wavelet analizlerinden elde edilen grafiklerden, düşük genliklerdeki dalgalar için nonlinear hatların lineer hatlar gibi davrandığı ve genlikleri arttıkça nonlinearlik nedeniyle uygulanan dalgadan başka yeni ve farklı frekanslarda dalgaların da oluştuğu gözlenmiştir. Bu etkileşimler sonucu hem sol-elli hem de birleşik sol-elli hatta bir kipin enerjisinin %20'sini kendinin frekansının iki katı (frequency doubling) veya yarısı frekansdaki yeni bir kipe aktardığı ikili dalga etkileşimleri gözlenmiştir. Ayrıca yalnız sol-elli hatta yüksek frekanslarda çizgi genişliği fazla olan ve diğerlerinde ayrılmış bir kipin, daha düşük frekanslardaki kiplere, çok kısa bir zamanda enerjisinin %80'ni aktardığı iki dalga etkileşmesi de gözlenmiştir. Bu kipin kısa zamanda enerjisini diğer kiplere aktarabilmesi, ortamdaki bir kararsızlığın ve kipler arasında parametrik bir rezonansın göstergesi olduğu düşünülmüştür. Analizlerin frekans ölçümlerinden kiplerin, çizgi kalınlığı da değerlendirilerek 1:2 ve 3:2 parametrik rezonanslarının oluştuğu sonucuna varılmıştır. Sisteme sinüzoidal dalgaların yanında üçgen ve kare dalgalar verilerek aynı analizler yapılmıştır.

Anahtar Sözcükler: Nonlinear Dalgalar, Nonlinear İletim Hattı, Sağ ve Sol-Elli LC İletim Hattı, Dalga-Dalga Etkileşmesi, Parametrik Rezonans

ABSTRACT**INVESTIGATION OF TRAVELING WAVES ON SOME LEFT-HANDED
AND COMPOSITE LC NONLINEAR TRANSMISSION LINES**

Gülşah Cemile TEMİZ

M.Sc. Thesis, Department of Mathematics

Supervisor: Prof. Dr. Halil YARANERİ

2017, 51 pages

Wave propagations and interactions of waves in nonlinear left-handed transmission lines with variable capacity(C) and constant inductance(L) has been investigated. Simple left-handed and composite nonlinear transmission lines were built on breadboard and terminated by appropriate resistance, determined by minimizing reflected part of waves, at the end of the line. Sinusoidal waves with different amplitudes of frequency sweep 200-1000 kHz were applied to the lines for 200 μ s time interval. Signals at the middle of the transmission lines were observed and data were stored on digital medium for their further wavelet analysis. Analysis results imply that, for small amplitude applied waves nonlinear transmission lines behave as linear lines. However with further increase in amplitude, due to nonlinearity in lines, wave-wave interactions start and apart from applied wave new waves form. In both simple left handed and composite nonlinear lines some modes seem to transfer %20 of their energies to the modes which have double or half of their frequencies. Apart from these in nonlinear simple line a higher frequency isolated mode with large line width seems to transfer %80 of its energy to modes of lower frequencies in a very short time. This rapid transfer of energy has been taken as an existence of instability of this mode. From the analysis of frequencies involved in this wave-wave interaction, considering line width of modes, it is concluded that 1:2 and 3:2 parametric resonance resonance has taken place. Apart from sinusoidal waves, triangular and square waves are also applied the lines and their analysis has been done.

Key Words: Nonlinear Waves, Nonlinear Transmission Lines, Right and Left-Handed LC Transmission Lines, Wave-Wave Interactions, Parametric Resonans

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında dalgaların lineer ve nonlineer ortamlarda ilerlemesi deneysel olarak incelenmiş, lineer ve nonlineer iletim hatları oluşturularak elde edilen sonuçlar analiz edilmiştir. Tez çalışmamda planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, deneyimlerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren Prof. Dr. Halil Yaraneri'ye ve tez yazımında zamanını ve yardımlarını esirgemeyen Doç. Dr. Haydar Uncu'ya teşekkürü bir borç bilirim. Destek ve sevgilerini esirgemeyen aileme teşekkür ve sevgilerimi sunarım.

Gülşah Cemile TEMİZ

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY SAYFASI	iii
BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI	v
ÖZET	vii
ABSTRACT	ix
ÖNSÖZ	xi
SİMGELER DİZİNİ	xv
ŞEKİLLER DİZİNİ	xvii
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Gerekçesi	1
1.2. Tezin Amacı	2
2. KAYNAK ÖZETLERİ	4
2.1. İletim Hatlarında Dalgalar	4
2.1.1. Lineer Sağ Elli İletim Hattı	4
2.1.2. Lineer Sol Elli İletim Hattı	8
2.1.3. Lineer Birleşik İletim Hattı	11
2.2. Nonlineer İletim Hatlarında Dalgalar	14
2.2.1. Nonlineer Sağ elli İletim Hattı	15
2.2.2. Nonlineer Sol elli İletim Hattı	17
2.2.3. Nonlineer Birleşik İletim Hattı	19
3. MATERYAL VE YÖNTEM	22
3.1. Genel Bakış	22
3.1.1. Devre Elemanları	22
3.1.2. Osiloskop	23
3.1.3. Sinyal Jeneratörü	24
3.1.4. Elektronik Work Bench Professional Edition	25
3.1.5. Wavelet Analizi	25
3.2. Lineer LC İletim Hattı	27
4. BULGULAR	28
4.1. Basit Sol Elli Nonlineer İletim Hattı	28
4.1.1. Sinüs Dalga	28
4.1.2. Sinüs ve Üçgen Dalga Karşılaştırılması	33
4.2. Birleşik Nonlineer İletim Hattı	34
4.2.1. Sinüs Dalga	35
4.2.2. Üçgen Dalga	38

4.2.3. Sinüs ve Üçgen Dalganın Karşılaştırılması	41
4.3. Birleşik Nonlineer Ofsetli İletim Hattı	42
4.3.1. Sinüs Dalga	43
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	45
KAYNAKLAR	49
ÖZGEÇMİŞ	51

SİMGELER DİZİNİ

- A : Dalga genliği
 C : Kapasitans
 $C(V)$: Voltaj ile değişen kondansatör
 C_0 : $C(V) = C_0(1 - bV)$ ifadesindeki $C(0)$ değeri
 g : İndüktansın iç kapasitansı
 I_n : n. birimdeki akım
 k : Dalga sayısı
 L : İndüktans
 R : Sonlandırma direnci
 t : Zaman
 V_f : Faz hızı
 V_g : Grup hızı
 V_n : n. birimdeki elektrik potansiyeli
 Q : Elektrik yükü
 ω : Açısal frekans
 ω_h : Üst banttaki frekans
 ω_l : Alt banttaki frekans

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Sağ elli lineer LC iletim hattı	4
Şekil 2.2. Lineer LC sağ elli devre kesiti	5
Şekil 2.3. Grup hızı ve faz hızı	6
Şekil 2.4. $\omega(k)$ dağılımı grafiği	6
Şekil 2.5. Kiplerin frekansa göre dağılımı	7
Şekil 2.6. Sıralı nodlarda dalganın ilerleyiş yönü	7
Şekil 2.7. Sol elli lineer LC iletim hattı	8
Şekil 2.8. Lineer LC sol elli devre kesiti	8
Şekil 2.9. Grup hızı ile faz hızı zıt doğrultuda	9
Şekil 2.10. $\omega(k)$ dağılımı grafiği	9
Şekil 2.11. Kiplerin frekansa göre dağılımı	10
Şekil 2.12. Art arda alınmış sıralı noktalarda dalganın ilerleyiş yönü	10
Şekil 2.13. Lineer birleşik iletim hattı	11
Şekil 2.14. LC birleşik hatlı devre kesiti	11
Şekil 2.15. LC birleşik devresinin dağılımı grafiği	12
Şekil 2.16. $\omega(k)$ dağılımı grafiği	13
Şekil 2.17. Kiplerin frekans dağılımı	13
Şekil 2.18. (a) Kapasitör ve (b) Varikap diyotun $C(V)$ grafiği	14
Şekil 2.19. Nonlineer sağ elli iletim hattı	15
Şekil 2.20. Nonlineer sağ elli devre kesiti	15
Şekil 2.21. $\omega(k)$ dağılımı grafiği	16
Şekil 2.22. Kiplerin frekans dağılımı	17
Şekil 2.23. Nonlineer sol elli iletim hattı	17
Şekil 2.24. Nonlineer sol elli iletim hattı kesiti	17
Şekil 2.25. $\omega(k)$ dağılımı grafiği	18

Şekil 2.26. Kiplerin frekans dağılımı	19
Şekil 2.27. Nonlineer birleşik iletim hattı	19
Şekil 2.28. Nonlineer birleşik iletim hattı kesiti	20
Şekil 2.29. $\omega(k)$ dağılımı grafiği	20
Şekil 2.30. Kiplerin frekans dağılımı	21
Şekil 3.1. Kapasitans potansiyel ilişkisi	23
Şekil 3.2. Devre elemanları	23
Şekil 3.3. Osiloskop	24
Şekil 3.4. Sinyal Jeneratörü	24
Şekil 3.5. Kullanılan aletler ve iletim hatları	25
Şekil 3.6. Wavelet dönüşüm işlemleri	26
Şekil 4.1. Sinüs dalga, Genlik: 0.1V-Ofset: 0	29
Şekil 4.2. Sinüs dalga, Genlik: 0.2V-Ofset: 0	30
Şekil 4.3. Sinüs dalga, Genlik: 0.3V-Ofset: 0	30
Şekil 4.4. Sinüs dalga, Genlik: 0.4V-Ofset: 0	31
Şekil 4.5. Sinüs dalga, Genlik: 0.5V-Ofset: 0	32
Şekil 4.6. Sinüs dalga, Genlik: 0.5V-Ofset: 0	33
Şekil 4.7. Üçgen dalga, Genlik: 0.5V-Ofset: 0	33
Şekil 4.8. Sinüs dalga, Genlik: 0.05V-Ofset: 0	35
Şekil 4.9. Sinüs dalga, Genlik: 0.2V-Ofset: 0	35
Şekil 4.10. Sinüs dalga, Genlik: 0.3V-Ofset: 0	36
Şekil 4.11. Sinüs dalga, Genlik: 0.4V-Ofset: 0	36
Şekil 4.12. Sinüs dalga, Genlik: 0.6V-Ofset: 0	37
Şekil 4.13. Sinüs dalga, Genlik: 0.9V-Ofset: 0	37
Şekil 4.14. Sinüs dalga, Genlik: 1.2V-Ofset: 0	38
Şekil 4.15. Üçgen dalga, Genlik: 0.3V-Ofset: 0	38
Şekil 4.16. Üçgen dalga, Genlik: 0.4V-Ofset: 0	39

Şekil 4.17. Üçgen dalga, Genlik: 0.9V-Ofset: 0	39
Şekil 4.18. Üçgen dalga, Genlik: 1.2V-Ofset: 0	40
Şekil 4.19. Sinüs dalga, Genlik: 0.6V-Ofset: 0	41
Şekil 4.20. Üçgen dalga, Genlik: 0.6V-Ofset: 0	41
Şekil 4.21. Sinüs dalga, Genlik: 0.5V-Ofset: 0	43
Şekil 4.22. Sinüs dalga, Genlik: 0.5V-Ofset: 0.5	43
Şekil 4.23. Sinüs dalga, Genlik: 0.5V-Ofset: 1	44

1. GİRİŞ

1.1. Tezin Gerekçesi

Dalgalar doğadaki en çok görülen ve önemli hareketlerden biri olması ile birlikte hayatımızın ve kullanılan teknolojimizin temelini oluşturur. Özellikle elektromanyetik dalga (ışık, radyo-TV dalgaları, lazer X-ışınları gibi) dalgaların en önemlisidir. Ses dalgaları, su dalgaları ise en çok bilinenlerdendir.

Diğer yandan dalga kavramı, kuantum fiziğindeki dalga parçacık kavramı nedeniyle bütün fiziğin ana konusudur. Yepyeni bir kavram olarak madde dalgalarının yanında olasılık dalgaları kavramı nedeniyle elektron dalgalarından, kristallerdeki fononlar ve gravitasyon dalgalarını kapsar.

Değişik dalgaların özelliklerinin incelenmesi doğanın daha iyi anlaşılması ve yeni teknolojilerin üretilmesi için önemlidir. Bu nedenle değişik ortamlarda dalgaların oluşturulması, özelliklerinin ölçülmesi, dalga olaylarının temel kavramlarının incelenmesi hem teknolojinin daha iyi anlaşılmasına hem de bunları daha iyi kullanacak ve gelişmesine katkı yapacak elemanların yetiştirilmesine, bunun yanında fizik olaylarını kavrayan ve fiziği teknolojiye uygulayabilen kişilerin sayısının artmasına katkıda bulunacaktır.

Dalgaların değişik ortamlarda ilerlemesi ve yayılması o ortamın özellikleri tarafından belirlenir. Ortamların özelliklerini değiştirerek o ortamda ilerleyen dalgaların hızları, yansımaları, kırılmaları ve diğer özellikleri kontrol edilebilir [1, 2]. Dalgaların oluşturulması ve kontrolü günümüz teknolojisini oluşturur. Özellikle elektromanyetik dalgaların yayılmasının kontrol edilmesi ve bunların teknolojide kullanılması son yıllarda elektrik akımının kontrolüne dayanan elektronik teknolojisinin yanında fotonik denen ışığın yani elektromanyetik dalgaların kontrolüne dayanan yeni teknolojik sistemlerin gelişmesine neden olmuştur.

Dalgaların yeni özelliklerinin çıkartılması yeni ortamlarda yayılmasının ve etkileşmelerinin incelenmesi ile mümkündür. Bunlar doğada olan maddelerin özelliklerinden farklı olarak laboratuvar koşullarında özel olarak oluşturulan ortamlardır. Çalışmada böylesi sol elli nonlinear ortamların oluşturulması ve bu ortamlardaki dalga özelliklerinin incelenmesi yapılmıştır.

Tez dalgaların birbiriyle etkileşmediği lineer ortamlar değil de dalgaların birbirleriyle etkileşmesini sağlayacak nonlinear ortamların oluşturulması, oluşan nonlinear dalgaların ölçülmesi, analiz edilmesi ile dalga etkileşmelerinin mekanizmalarının anlaşılmasını da kapsadığından ayrıca güncel bir konudur. Bu nedenlerle tez bir çalışma olmasına rağmen teorik yönü de vardır.

1.2. Tezin Amacı

Tezin amacı:

- a) Elektrik dalgaların oluşturulacağı ve ilerleyeceği gerekli nonlinear sağ elli, sol elli ve birleşik LC iletim hatlarının oluşturulması (Burada L, C sırasıyla indüktans ve kapasitanstır),
- b) Her bir hattın kiplerinin ve dağılım bağıntılarının, yansımaların önlenmesi için sonlandırma dirençlerinin bulunması, diğer özelliklerinin belirlenmesi,
- c) Sinyal kaynağından gerekli özelliklerde elektrik dalgalarının iletim hatlarının girişine uygulanması,
- d) İletim hattının uygun düğüm noktalarındaki ilerleyen elektrik dalgalarının osiloskop ile izlenmesi ve bunların analizi yapılmak üzere belleklere kaydedilmesi,
- e) Alınan sinyallerin wavelet analizlerini yapılması,
- f) Sonunda ilerleyen dalgaların hatta etkileşmelerinin özelliklerinin ve sonuçların tartışılmasıdır.

Kısacası tez Sağ-elli, Sol-elli ve Birleşik kesikli nonlinear iletim hatları oluşturularak bu ortamlarda elektromanyetik dalgaların ilerlemesinin, birbirleri ile etkileşiminin incelenmesini amaçlamaktadır. Bu iletim hatlarının oluşturulmasını bunlar üzerinde ölçümlerin yapılacağı yöntemleri bilen ve deneydeki araçları kullanabilen, deneylerde alınan sonuçların analizini gerçekleştirebilen elemanların yetiştirilmesi amaç olarak belirlenmiştir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

2.1. İletim Hatlarında Dalgalar

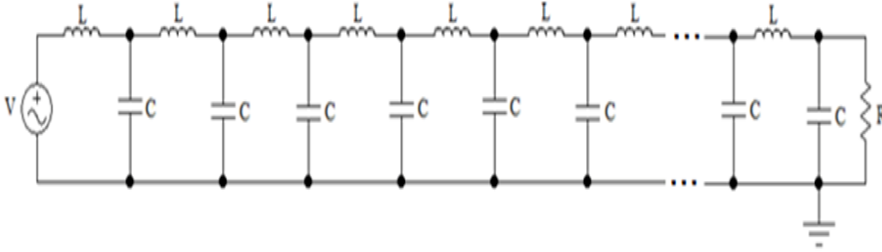
LC çiftleri ile oluşturulan iletim hatları ilerleyen dalgaları incelemek için iyi bir araçtır. Çünkü devre elemanları L indüktans ve C kapasitans değerleri değiştirilebilir ve farklı şekillerde bağlanarak ortamın dalga özellikleri kolaylıkla değiştirilebilir. Böylelikle istenen özellikteki ortamlar çok kolay şekilde oluşturulabilir. Ayrıca bu yöntemle oluşturulan farklı ortamlarda ilerleyen dalgaların incelenmesinde pratik ve ucuzdur.

Ayrıca lineer indüktanslar ve kapasitanslar nonlinear karşılıkları ile değiştirilerek nonlinear iletim hatları oluşturularak dalgaların birbirleri ile etkileşmesi sağlanabilir.

LC çiftlerinin herbiri bir osilatördür. Hattaki LC sayısı kadar osilatör vardır ve aynı sayıda kipi vardır.

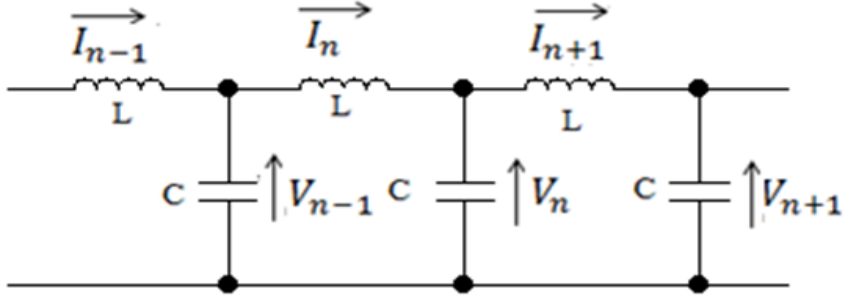
Bundan sonraki bölümde önce basit lineer sağ eli, sol eli ve birleşik LC iletim hatlarının özellikleri incelenecektir.

2.1.1. Lineer Sağ Elli İletim Hattı



Şekil 2.1. Sağ eli lineer LC iletim hattı

Bu hatta $C=168$ pF, $L=520$ μ H ve sonlandırma direnci $R=1.7$ k Ω olarak alınmıştır.



Şekil 2.2. Lineer LC sağ elli devre kesiti

Hattın bir birimi olan devrede Lenz ve Kirchhoff Yasalarını uygulayarak yazılan

$$L \frac{dl_n}{dt} = (V_{n-1} - V_n) \quad (2.1)$$

$$C \frac{dV_n}{dt} = (I_n - I_{n+1}) \quad (2.2)$$

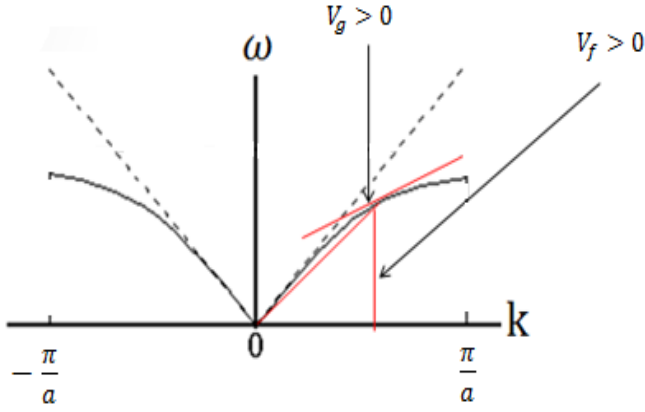
denklemlerinden

$$\frac{d^2 V_n}{dt^2} = \frac{1}{LC} [V_{n+1} - 2V_n + V_{n-1}] \quad (2.3)$$

dalga denklemi elde edilir [3, 4]. Burada V_n n. düğüm noktasındaki elektrik potansiyelini L ve C devredeki indüktans ve kapasitans değerlerini göstermektedir. Bu kesikli dalga denkleminin genel çözümü $V_n = A_n \cos(kx - \omega t)$ şeklinde yazılıp denklemde yerine konursa sistemin dağılım bağıntısı

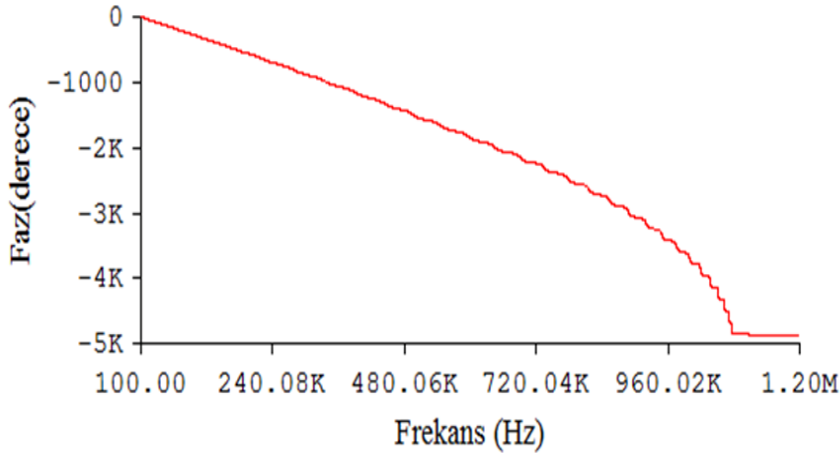
$$\omega(k) = 2\sqrt{\frac{1}{LC}} \sin \frac{ka}{2} \quad (2.4)$$

olarak elde edilir. Burada k ve $\omega(k)$ dalga sayısı ve ona bağlı açısal frekansı göstermektedir. Bu bağıntının grafiği Şekil (2.3)'te verilmiştir. Grafik dalganın $\omega(k)$ açısal frekansının k dalga sayısı ile nasıl değiştiğini göstermektedir. Dağılım bağıntısının üst kesim frekansı $2\sqrt{\frac{1}{LC}}$ iletim hattının kesikliliğinin bir sonucudur. Faz hızı $\frac{\omega}{k}$, grup hızı $\frac{d\omega}{dk}$ k 'ya bağlı olarak değiştiğinden ve farklı olduğundan ortam dağılımlıdır.



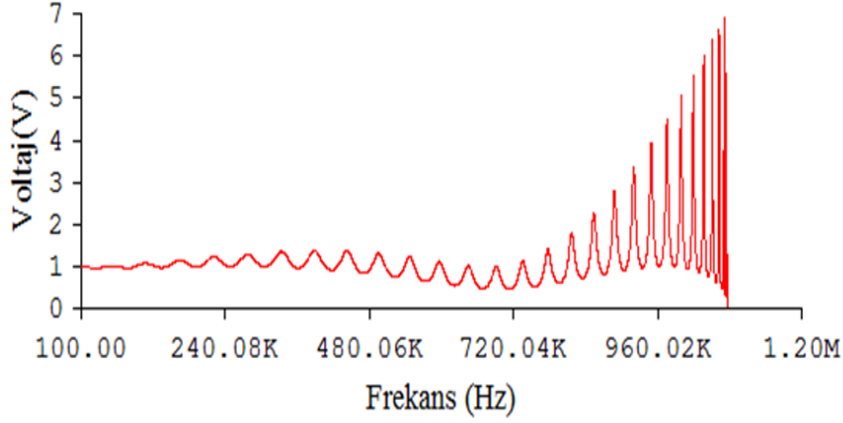
Şekil 2.3. Grup hızı ve faz hızı

Şekil (2.3)'te V_f faz hızı ve V_g grup hızının daima aynı yönde olduğuna dikkat edilmelidir.



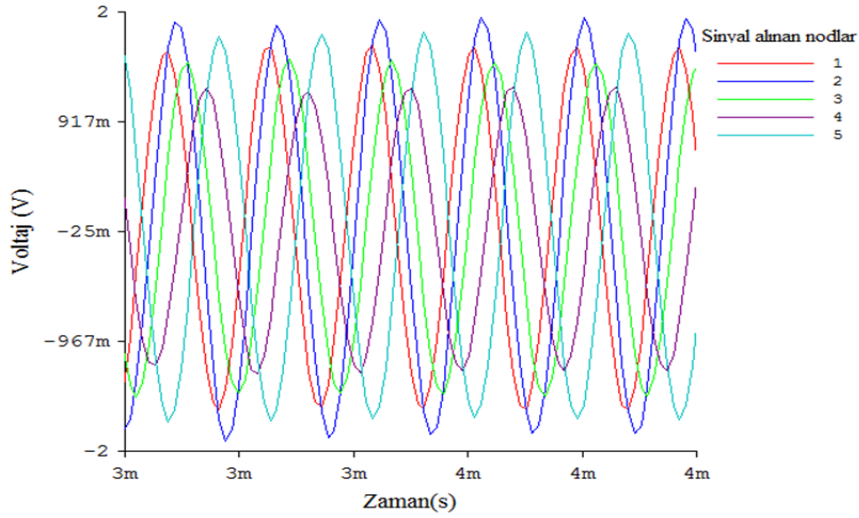
Şekil 2.4. $\omega(k)$ dağılım grafiği

Şekil (2.4)'te hattaki sinyal analizinden alınan sinyallerin dağılım grafiği görülmektedir. Hatta bir üst kesim frekansının olduğu ve bu frekansın üstündeki açılal frekanslarda hatta dalgaların ilerlemediği görülmüyor. Bu üst kesim frekansı 1.07 MHz'dir. Bu hat alt geçirim süzgeci gibi davranır.



Şekil 2.5. Kiplerin frekansa göre dağılımı

Şekil (2.5)'te frekans arttıkça kiplerin sağa doğru birbirine yaklaştığı görülmektedir. Bunun nedeni iletim hattının kesikli olmasıdır.

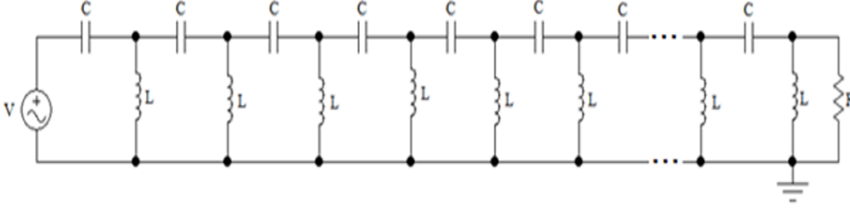


Şekil 2.6. Sıralı nodlarda dalganın ilerleyiş yönü

Şekil (2.6)'da hattın belirtilen noktalarındaki dalgaların şekilleri verilmiştir. Dalgalar sağa doğru ilerledikçe fazları da artmaktadır. Görüldüğü gibi dalgaların ilerleme yönü (grup hızı) ile fazın artma yönü (faz hızı) aynı yödedir [1].

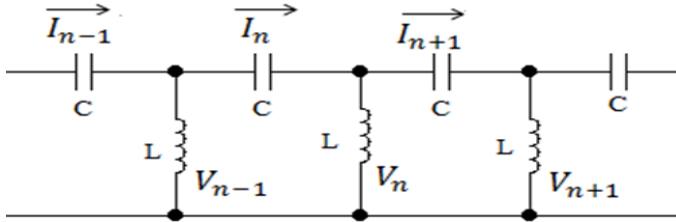
2.1.2. Lineer Sol Elli İletim Hattı

Sağ-elli iletim hattında Şekil (2.2)'de L indüktansı C kapasitansı ile değiştirilirse yeni bir ortam oluşur, ortamın dağılım bağıntısı ve kıp özellikleri değişir.



Şekil 2.7. Sol elli lineer LC iletim hattı

Bu hatta $C=168$ pF, $L=520$ μ H ve sonlandırma direnci $R=1.7$ k Ω olarak alınmıştır.



Şekil 2.8. Lineer LC sol elli devre kesiti

Devrede Lenz ve Kirchhoff Yasalarını uygulayarak yazılan

$$C \frac{d}{dt} (V_n - V_{n-1}) = I_n \quad (2.5)$$

$$L \frac{d}{dt} (I_{n+1} - I_n) = V_n \quad (2.6)$$

denklemlerinden

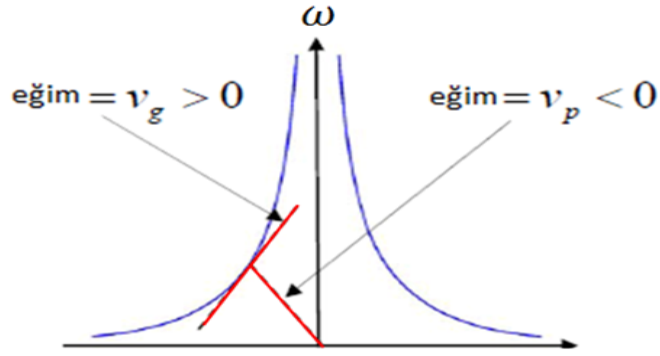
$$\frac{d^2}{dt^2} (V_{n+1} - 2V_n + V_{n-1}) = \frac{1}{LC} V_n \quad (2.7)$$

dalga denklemi elde edilir.

Bu kesikli dalga denkleminin genel çözüümü $V_n = A_n \cos(kx - \omega t)$ şeklinde yazılıp denklemden yerine konursa sistemin dağılım bağıntısı

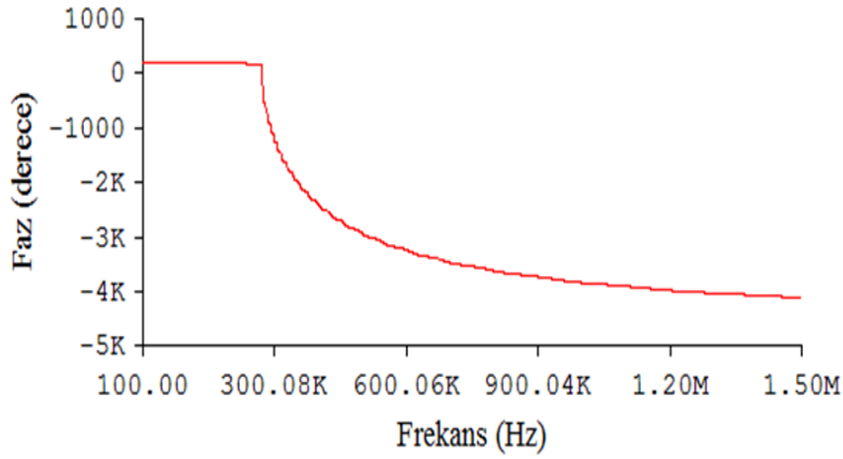
$$\omega = \frac{1}{\sqrt{4LC \sin \frac{ka}{2}}} \quad (2.8)$$

elde edilir.



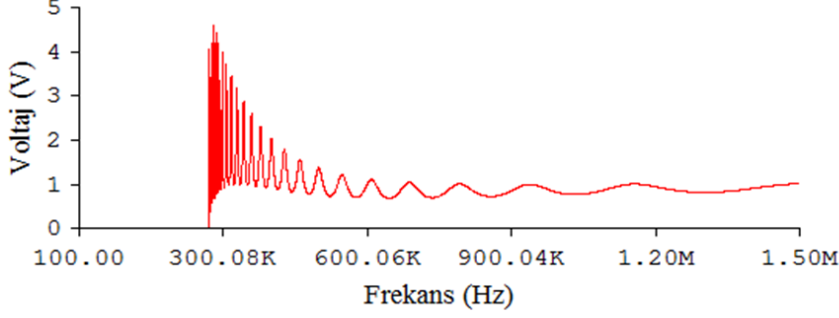
Şekil 2.9. Grup hızı ile faz hızı zıt doğrultuda

Şekil (2.9)'da grup ve faz hızlarının sağ eli iletim hattının tersine zıt yönlerde ilerler. Bu doğada çok karşılaşılan bir durum değildir.



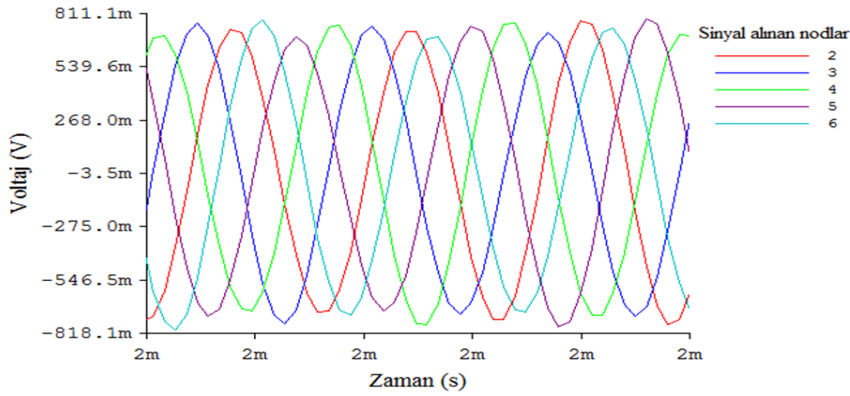
Şekil 2.10. $\omega(k)$ dağılım grafiği

Şekil (2.10)'da lineer sol-elli hattın dağılım bağıntısıdır. (Şekil (2.9)'dakine göre eksenler yer değiştirmiş olduğundan farklı görünür fakat aynı dağılım bağıntısıdır). Ayrıca $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} = 269 \text{ kHz}$ bir alt kesim frekansı vardır ve bu frekansın altındaki frekanslarda hatta dalgaların ilerlemediği görülür. Hat üst geçirme süzgeci gibi davranır.



Şekil 2.11. Kiplerin frekansa göre dağılımı

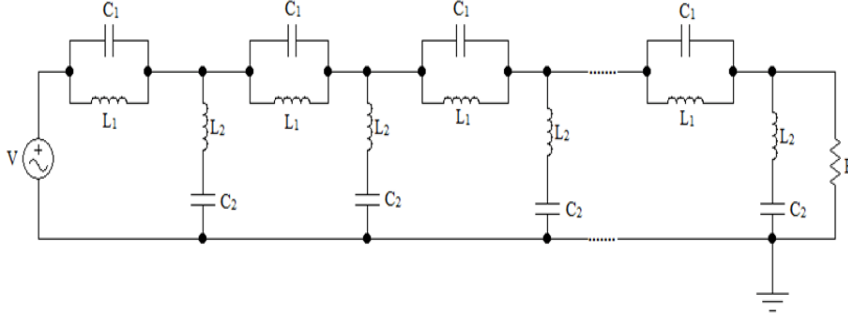
Şekil (2.11)'de hatta art arda gelen düğüm noktalarındaki dalgalar gösterilmiştir. Önce gelen dalgaların fazları daha sonra gelenlere göre daha küçüktür. Bu V_f faz hızının ilerleme yönüne ters yönde olduğunu ifade eder. Yani sol-elli hatta V_f faz hızı ile V_g grup hızı ters yönlüdür. Frekans arttıkça kipler birbirinden daha ayrı hale gelmesinden başka bu kiplerin çizgi kalınlıkları da artar.



Şekil 2.12. Art arda alınmış sıralı noktalarda dalganın ilerleyiş yönü

Şekil (2.12)'de art arda gelen düğüm noktalarından(nodları) alınmış dalga şekillerinde görüldüğü gibi dalgaların ilerleme yönü sola doğrudur. Faz hızı ile grup hızı zıt yöndedir [1].

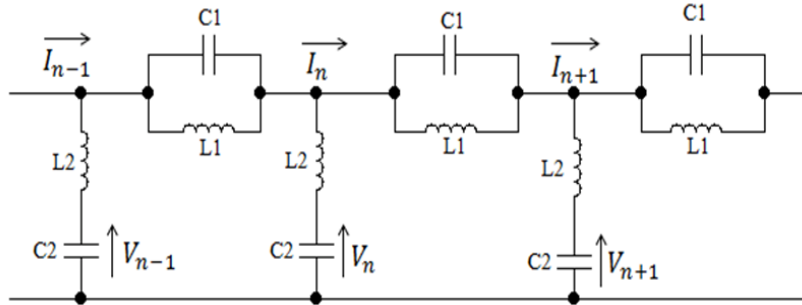
2.1.3. Lineer Birleşik İletim Hattı



Şekil 2.13. Lineer birleşik iletim hattı

Şekil (2.13)'te daha karmaşık bir hat verilmiştir. Hem sağ hem de sol elli özellikler gösterdiğinden Birleşik İletim Hattı olarak adlandırılmıştır.

Bu hatta $C_1=1$ nF, $C_2=168$ pF, $L_1=520$ μ H, $L_2=2.7$ mH ve sonlandırma direnci $R=1.7$ k Ω olarak alınmıştır.



Şekil 2.14. LC birleşik hatlı devre kesiti

Bu hattın birim hücresinde elektrik potansiyeli ve akımın diferansiyel denklemlerinden (Kirchhoff Yasaları) $a = \frac{C_2 L_2}{C_1 L_1}$, $b = \frac{C_2}{C_1}$ olmak üzere

$$\left[\frac{d^4}{dt^4} + (1+a) \frac{d^2}{dt^2} + a \right] (V_{n-1} - 2V_n + V_{n+1}) - b \frac{d^2}{dt^2} V_n = 0 \quad (2.9)$$

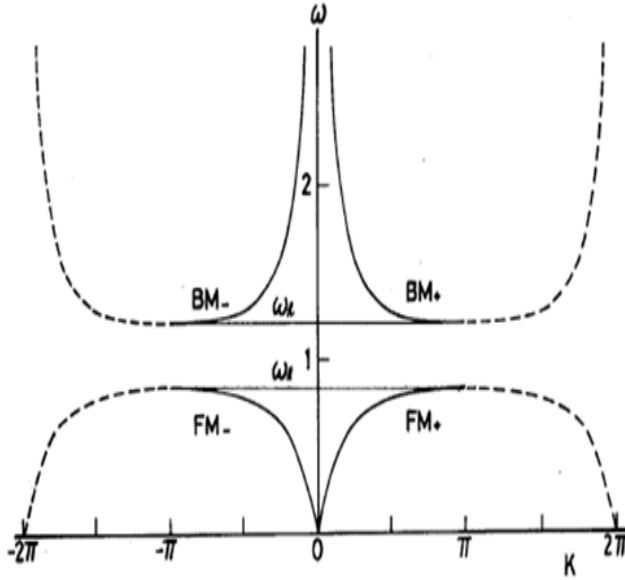
elde edilir.

Dispersiyon ve $\omega(k)$ ifadesi

$$D(k, \omega) \equiv b\omega^2 - 4(\omega^2 - a)(\omega^2 - 1)\sin^2 \frac{k}{2} = 0 \quad (2.10)$$

$$\omega_l^2, \omega_h^2 = \frac{1}{2} \left[\left(1 + a + \frac{b}{4}\right) \mp \sqrt{\left(1 + a + \frac{b}{4}\right)^2 - 4a} \right] \quad (2.11)$$

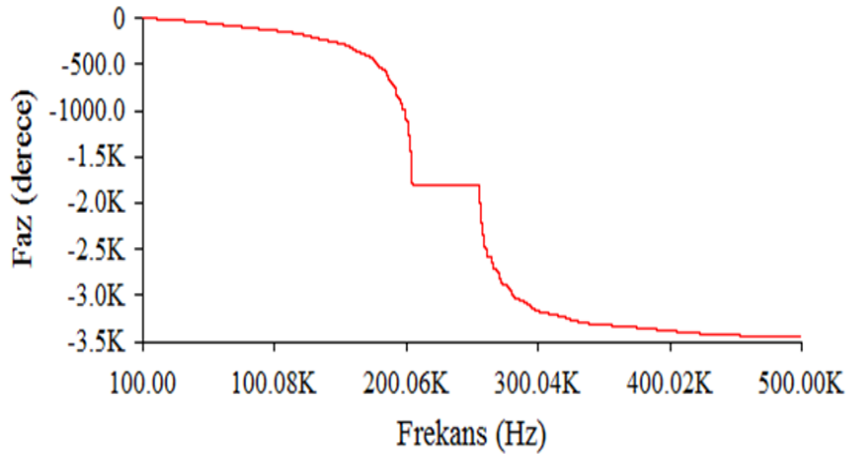
şeklinde olur [5]. Dağılım grafiği aşağıdaki gibidir.



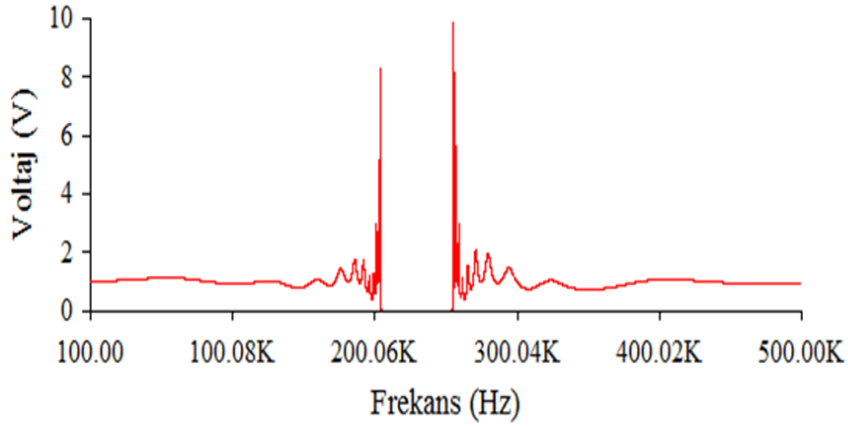
Şekil 2.15. LC birleşik devresinin dağılım grafiği

Yukarıdaki grafikte iletim hattı yüksek frekanslarda sol eli, düşük frekanslarda sağ eli gibi davranmaktadır. Nonlineerlik eklendiğinde dalgalar etkileşip ilerleyen dalgalar geriye doğru gelen dalgalar oluşturabilir. Bunun terside doğrudur.

Grafikte BM geri, FM ileri yönde giden dalgaları ve +,- işaretleri sırasıyla bunların sağa ve sola gittiğini gösterir [5].



Şekil 2.16. $\omega(k)$ dağılım grafiği



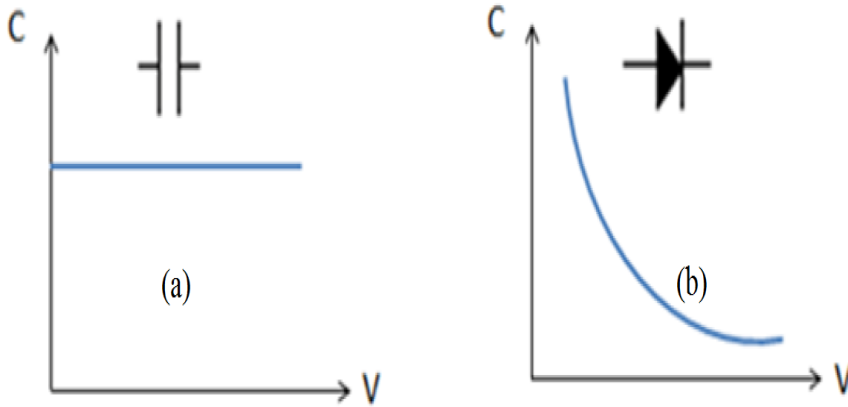
Şekil 2.17. Kiplerin frekans dağılımı

Şekil (2.16) ve Şekil (2.17)'de görüldüğü gibi lineer indüktans ve kapasitör ile oluşturulan birleşik devre hem sol elli hem de sağ elli gibi davranır. Hatta yasak bant aralığı görülmektedir. Bu yasak bant aralığı 204 kHz-255 kHz arasındadır.

2.2. Nonlinear İletim Hatlarında Dalgalar

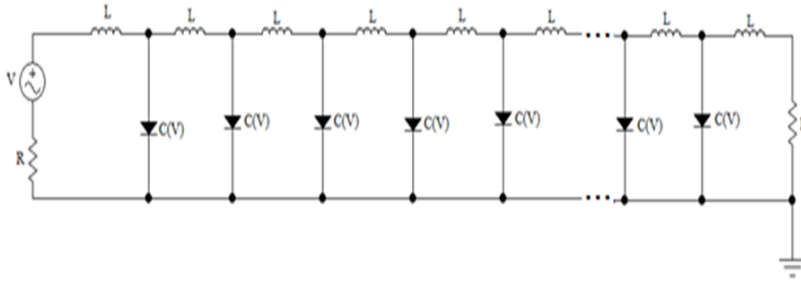
Lineer iletim hattında kullanılan kapasitansın değeri sabittir. Yani uçlarındaki C değeri uygulanan V potansiyeli ile değişmez. Bu nedenle hatta dalgaların grup ve faz hızları dalganın genliği ile değişmez, lineer dalga denklemine ve üst üste gelme (süperpozisyon) ilkesine uyarlar. Değişik frekanstaki dalgalar birbirleriyle etkileşmez.

Devrede kapasitör C kapasitesi, kapasitesi uçları arasındaki potansiyel farkına bağlı olan $C(V)$ varikap diyot ile değiştirilirse (Şekil (2.18)) lineer iletim hattı nonlinear hale gelir ve hattın dalga denklemi nonlinear dalga denklemine dönüşür. Dalgaların $\omega(k)$ frekansları genliğe bağlı hale gelir. Böylece hattaki değişik frekanstaki kiplerden bazıları birbirleriyle etkileşir. Bu etkileşme sonucunda yeni frekansta dalgalar oluşur. Dalga dalga etkileşmesinin şiddeti de ilerleyen dalganın genliği ile orantılı olarak değişir [2].



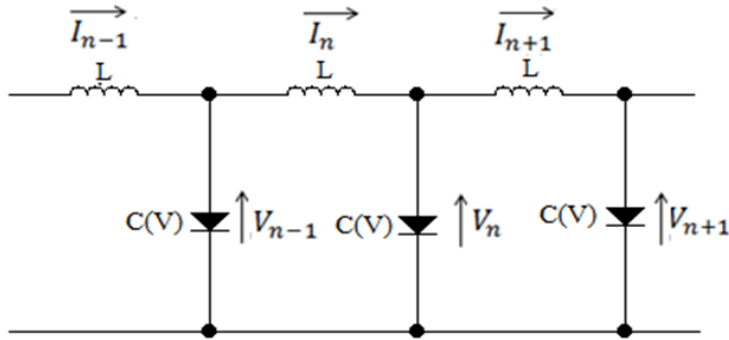
Şekil 2.18. (a) Kapasitör ve (b) Varikap diyotun $C(V)$ grafiği

2.2.1. Nonlinear Sağ elli İletim Hattı



Şekil 2.19. Nonlinear sağ elli iletim hattı

Bu hatta $C(V)=168$ pF(BB204G), $L=520$ μ H ve sonlandırma direnci $R=1.8$ k Ω olarak alınmıştır.



Şekil 2.20. Nonlinear sağ elli devre kesiti

Sağ-elli nonlinear iletim hattı Şekil (2.19)'da nonlinear sağ elli iletim hattı ve Şekil (2.20)'de bu hattın bir kısmı gösterilmiştir. Burada $C(V)$ kapasitörü BB204G Philips varikap diyotudur ve devredeki nonlinearliğin kaynağıdır.

Kapasitenin voltaja göre $C(V_n) = \frac{dQ(V_n)}{dV_n}$ şeklinde değiştiği durumda Kirchhoff Kanunları:

$$V_{n-1} - V_n = L \frac{dI_n}{dt} \quad (2.12)$$

$$I_n - I_{n+1} = C(V_n) \frac{dV_n}{dt} \quad (2.13)$$

kullanılarak hattaki voltajın dalga denklemi

$$\frac{d}{dt}[C(V_n)\frac{dV_n}{dt}] = \frac{1}{L}(V_{n+1} + V_{n-1} - 2V_n) \quad (2.14)$$

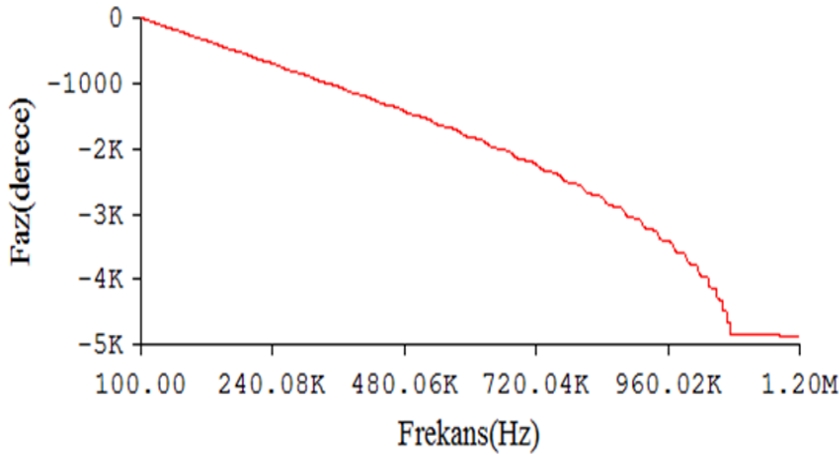
şeklinde yazılabilir. Burada $C(V_n) = C_0(1 - 2bV_n)$ olarak alınırsa denklem

$$\frac{d^2V_n}{dt^2} - b\frac{d^2V_n^2}{dt^2} = \frac{1}{LC}(V_{n+1} + V_{n-1} - 2V_n) \quad (2.15)$$

olur. Yukardaki dalga denkleminde $b\frac{d^2V_n^2}{dt^2}$ terimi nedeniyle dalgalar bir biriyle etkileşir ve dalgaların hızları dalga genliği ile değişir. Bu nonlinear bir dalga denklemdir. Hat üzerinde $V_n = A\cos(kx - \omega t)$ sinüzoidal dalgaların ilerleyebilmesi için ω ve k arasında yaklaşık

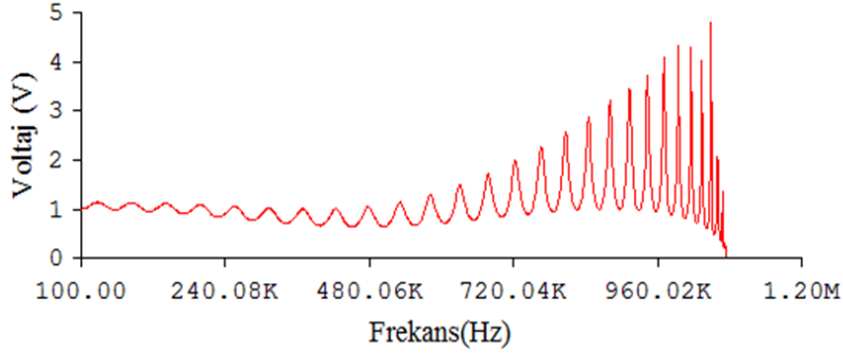
$$\omega = \sqrt{\frac{1}{(1 - 4A)LC_0} \sin \frac{ka}{2}} \quad (2.16)$$

ilişkisi vardır ve bu hattın dağıtım bağıntısıdır. Dikkat edilirse bu bağıntı nonlinearlık nedeniyle frekansın genlikle değiştiğini gösterir .



Şekil 2.21. $\omega(k)$ dağıtım grafiği

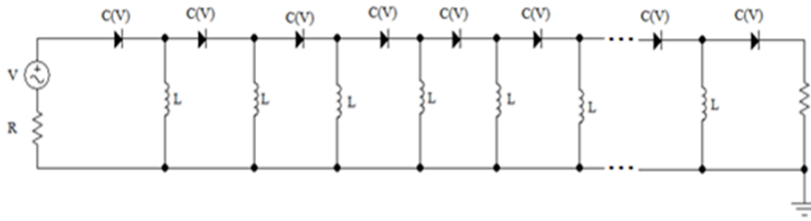
Şekil (2.21)'de hatta bir üst kesim frekansının olduğu ve bu frekansın altındaki frekanslarda hatta dalgaların ilerlemediği görülüyor. Bu üst kesim frekansı 1.07MHz'dir. Ayrıca hat alt geçirim süzgeci gibi davranır.



Şekil 2.22. Kiplerin frekans dağılımı

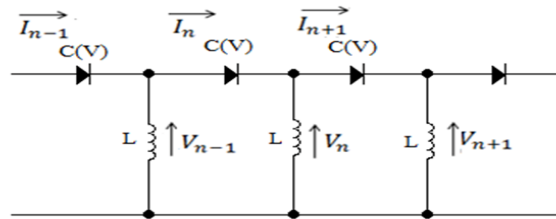
Şekil (2.22)'de frekans arttıkça kiplerin sağa doğru birbirine yaklaştığını görmekteyiz. Bunun sebebi sistemin kesikli olmasıdır.

2.2.2. Nonlinear Sol elli İletim Hattı



Şekil 2.23. Nonlinear sol elli iletim hattı

Bu hatta $C(V)=168$ pF(BB204G), $L=520$ μ H ve sonlandırma direnci $R=1.8$ k Ω olarak alınmıştır.



Şekil 2.24. Nonlinear sol elli iletim hattı kesiti

Bu devrede

$$\frac{dQ}{dt} = C(V_n) \frac{d}{dt} (V_n - V_{n-1}) \quad (2.17)$$

$$C(V_n) \frac{d}{dt} (V_n - V_{n-1}) = I_n \quad (2.18)$$

$$L \frac{d}{dt} (I_{n+1} - I_n) = V_n \quad (2.19)$$

$$C(V_n) = C_0 - aV_n \quad (2.20)$$

denklemleri kullanılarak

$$LC_0 \frac{d^2}{dt^2} (V_{n-1} - 2V_n + V_{n+1}) - L \frac{d^2}{dt^2} \{a[(V_{n-1} - V_n)^2 - (V_n - V_{n+1})^2]\} = 0 \quad (2.21)$$

g =indüktansın iç kapasitesi

$$\frac{d^2}{dt^2} (V_{n-1} - 2V_n + V_{n+1}) - g \frac{d^2 V_n}{dt^2} - V_n - \frac{d^2}{dt^2} \{[(V_{n-1} - V_n)^2 - (V_n - V_{n+1})^2]\} = 0 \quad (2.22)$$

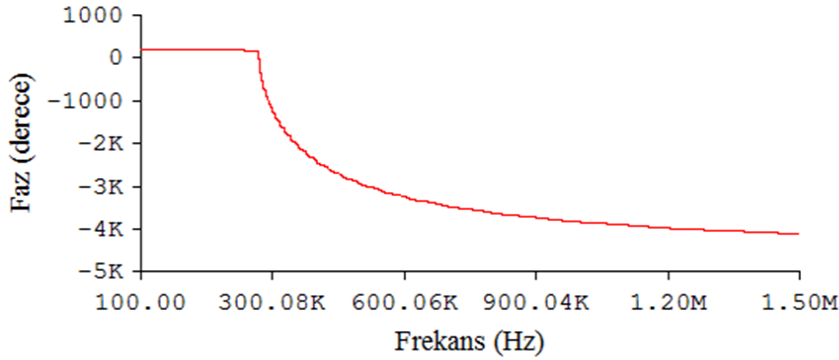
olur. Bu nonlinear bir dalga denklemdir.

Hat üzerinde $V_n = V_0 \exp[i(\omega t - kn)]$ sinüzoidal dalgaların ilerleyebilmesi için ω ve k arasında yaklaşık

$$4\omega^2 \sin^2\left(\frac{k}{2}\right) + g\omega^2 - 1 = 0 \quad (2.23)$$

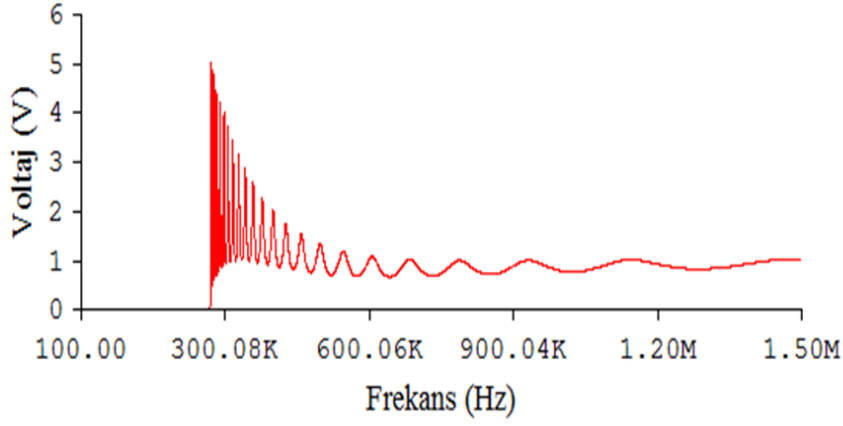
$$\omega = \sqrt{\frac{1}{g + 4\sin^2\left(\frac{k}{2}\right)}} \quad (2.24)$$

ilişkisi vardır ve bu hattın dağılım bağıntısıdır [6, 7].



Şekil 2.25. $\omega(k)$ dağılım grafiği

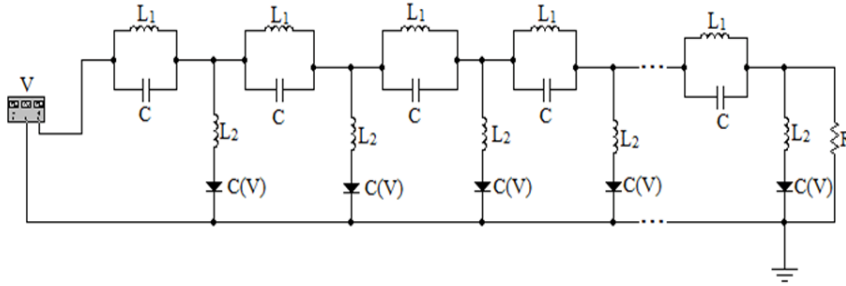
Şekil (2.25)'te hatta bir alt kesim frekansının olduğu ve bu frekansın altındaki frekanslarda hatta dalgaların ilerlemediği görülüyor. Bu alt kesim frekansı 269 kHz'dir . Ayrıca hat üst geçirim süzgeci gibi davranır.



Şekil 2.26. Kiplerin frekans dağılımı

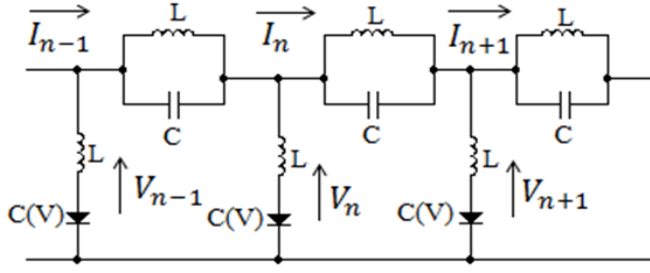
Şekil (2.26)'da görüldüğü gibi kiplerin frekansları frekans arttıkça birbirlerinden gittikçe ayrılmaktadır.

2.2.3. Nonlinear Birleşik İletim Hattı



Şekil 2.27. Nonlinear birleşik iletim hattı

Bu hatta $C_1=1$ nF, $C(V)=168$ pF(BB204G), $L_1=520$ μ H, $L_2=2.7$ mH ve sonlandırma direnci $R=1.7$ k Ω olarak alınmıştır.



Şekil 2.28. Nonlineer birleşik iletim hattı kesiti

$a = \frac{C_2 L_2}{C_1 L_1}$, $b = \frac{C_2}{C_1}$ olmak üzere

$C(V_n) = C_0(1 + 2\mu V_n + 3\nu V_n^2 + \dots)$ denklemde yerine yazılırsa

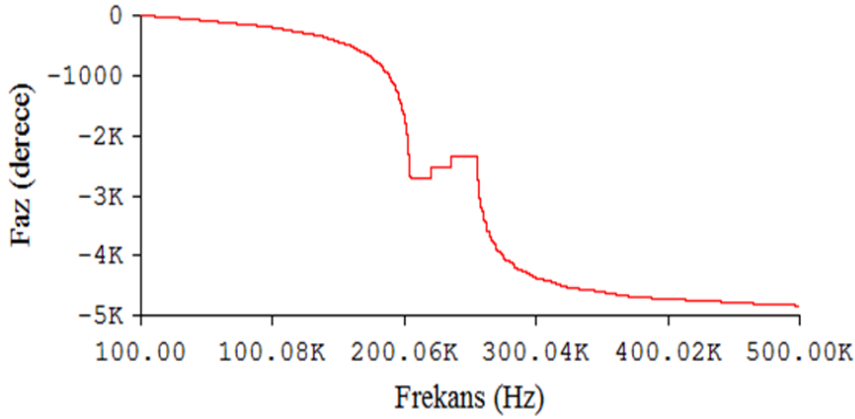
$$\left[\frac{d^4}{dt^4} + (1+a) \frac{d^2}{dt^2} + a \right] (V_{n-1} - 2V_n + V_{n+1}) - b \frac{d^2}{dt^2} V_n = b \frac{d^2}{dt^2} (\mu V_n^2 + \nu V_n^3 + \dots) - \left(\frac{d^4}{dt^4} + a \frac{d^2}{dt^2} \right) [\mu (V_{n-1}^2 - 2V_n^2 + V_{n+1}^2) + \dots] \quad (2.25)$$

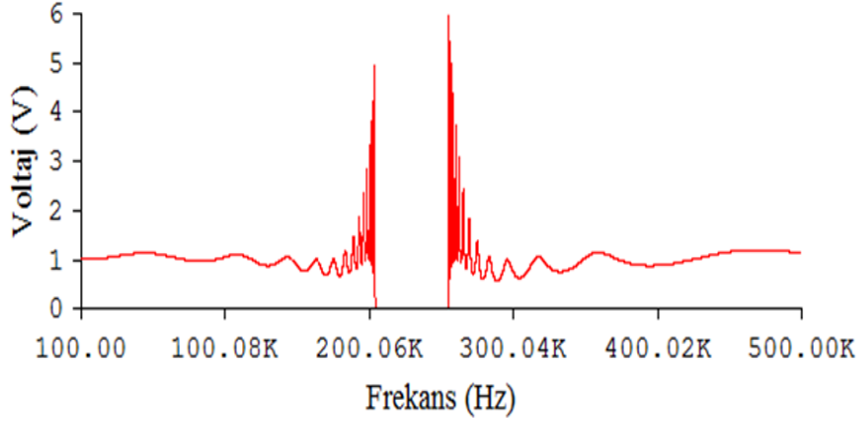
elde edilir. Bu denklemde nonlineer terimler ihmal edildiğinde oluşan dağılım bağıntısı:

$$D(k, \omega) \equiv b\omega^2 - 4(\omega^2 - a)(\omega^2 - 1) \sin^2 \frac{k}{2} = 0 \quad (2.26)$$

$$\omega_l^2, \omega_h^2 = \frac{1}{2} \left[\left(1 + a + \frac{b}{4}\right) \mp \sqrt{\left(1 + a + \frac{b}{4}\right)^2 - 4a} \right] \quad (2.27)$$

şeklinde bulunur [5].

Şekil 2.29. $\omega(k)$ dağılım grafiği



Şekil 2.30. Kiplerin frekans dağılımı

Şekil (2.29) ve Şekil (2.30)'da görüldüğü gibi lineer indüktans, lineer kapasitör ve varicap diyot ile oluşturulan birleşik devre hem sol elli hem de sağ elli gibi davranır. Hatta yasak bant aralığı görülmektedir. Bu yasak bant aralığı 204 kHz-255 kHz arasındadır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

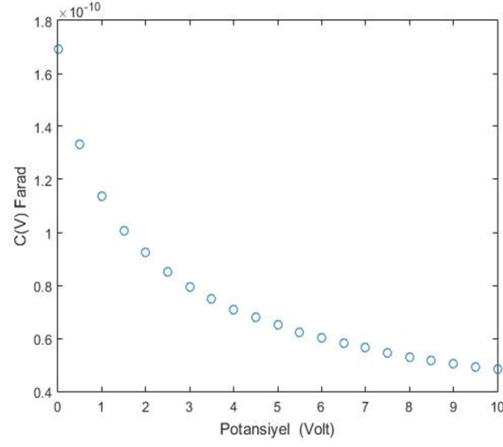
3.1. Genel Bakış

Bu çalışmada değişik değerlerde lineer indüktans, direnç ve nonlineer kapasitör kullanılarak sağ elli, sol elli ve birleşik iletim hatları oluşturulmuştur. Bunların belli karakteristikleri incelenmiş ve amacımıza göre uygun olanlar değerlendirilerek incelenmeye alınmıştır. Bu iletim hatları dalgaların nasıl ilerlediği ve bunların birbirleriyle etkileşip etkileşmedikleri önce Elektronik Workbench deneme devrelerinde ön inceleme yapılmış daha sonra gerçek devre elemanları kullanılarak breadboardlar üzerinde gerekli özelliklerdeki hatlar oluşturulmuştur. Bu iletim hatlarında dalgaların ilerleyişi ve etkileşimleri gözlenmiş ve daha sonraki analizler için kaydedilmiştir.

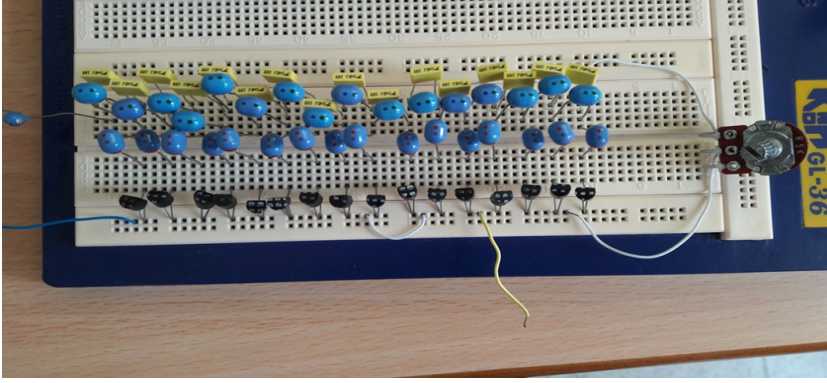
Çalışmada hatlara GwINSTEK GFG-3Q15 sinyal jeneratörü bağlanarak devrelere sağdan sinüs, üçgen ve kare dalgalar gönderilmiştir. Hatların değişik noktalarındaki dalgalar LeCroy WaveSurfer 422 200 MHz osilokobu ile incelenmiş ve datalar usb'lere depo edilmiştir. Bu datalar Matlab yazılımının Student versiyonu kullanılarak geliştirdiğimiz programlarla wavelet dahil sinyal analizleri yapılmıştır.

3.1.1. Devre Elemanları

Lineer devrelerde lineer direnç, indüktans ve kapasitör; nonlineer devrelerde lineer direnç, indüktans ve nonlineer kapasitör kullanılmıştır. Kapasitanstaki nonlineer özellik kapasitesi voltajla değişen varikap diyotlar kullanılarak sağlanmıştır. İletim hatlarında kullandığımız varikap diyodu BB204G'dir. Bu piyasada kolaylıkla bulunabilecek hattımıza uygun özellikte varikap diyottur. Varikapın hem katalog bilgilerinden hem de bir osilatör devresine bağlanarak elde edilen C(V) kapasitans voltaj grafiği şeklindeki gibi olur.



Şekil 3.1. Kapasitans potansiyel ilişkisi



Şekil 3.2. Devre elemanları

3.1.2. Osiloskop

Deneyde LeCroy WaveSurfer 422 200 MHz Oscilloscope kullanılmıştır. Osiloskop çift kanalıdır ve iletim hattı üzerindeki farklı iki noktadaki sinyalleri istenen zaman aralığı arasında gösterilebilir. Bu sinyallerin fourier transformu doğrudan ekranda görüntülenebilir. İlginç sinyaller belli noktalardan belli zaman aralıkları için daha sonra analizi yapılmak üzere dijital hafızalanarak depo edilebilir. Osiloskop aynı zamanda bir bilgisayardır. Analizler gerekli programlar yazılarak doğrudan osiloskop üzerinde yapılabilir.



Şekil 3.3. Osiloskop

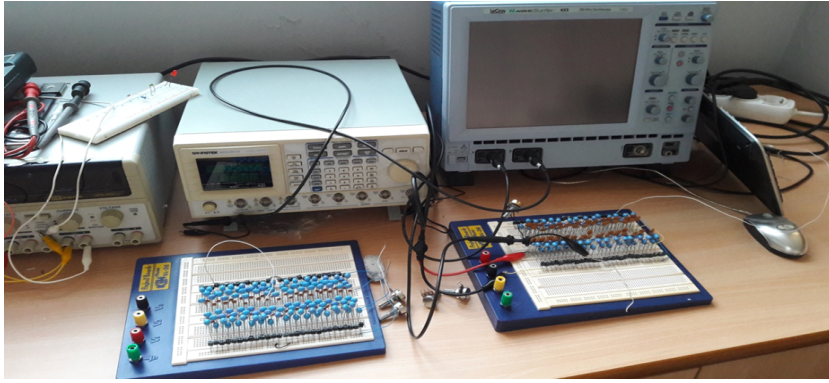
3.1.3. Sinyal Jeneratörü

İletim hattında GWINSTEK GFG-3Q15 Function Generation kullanılmıştır. Maksimum 5V çıkışlı sinüs, üçgen ve kare sinyalleri üretebilmektedir. Üzerinde AM, FM modülasyonlu belli frekans aralıklarında ve dalga boyunda sinyaller üretmek mümkün olmaktadır. Ayrıca bu deneyde kullanılan frekans ve genlik taraması yapabilmektedir. Bu taramaların frekans aralığı ve bu aralığın hangi sürede taranabileceği ayarlanabilmektedir. Bu özelliği deneyimiz için özellikle seçilmiştir. Ayrıca sinyal jeneratörü ile girişte uygulanan dalganın genliği, ofseti ve frekansı ayarlanabilir.



Şekil 3.4. Sinyal Jeneratörü

Aşağıdaki şekilde kullanılan aletler ve iletim hatları gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Kullanılan aletler ve iletim hatları

3.1.4. Elektronik Work Bench Professional Edition

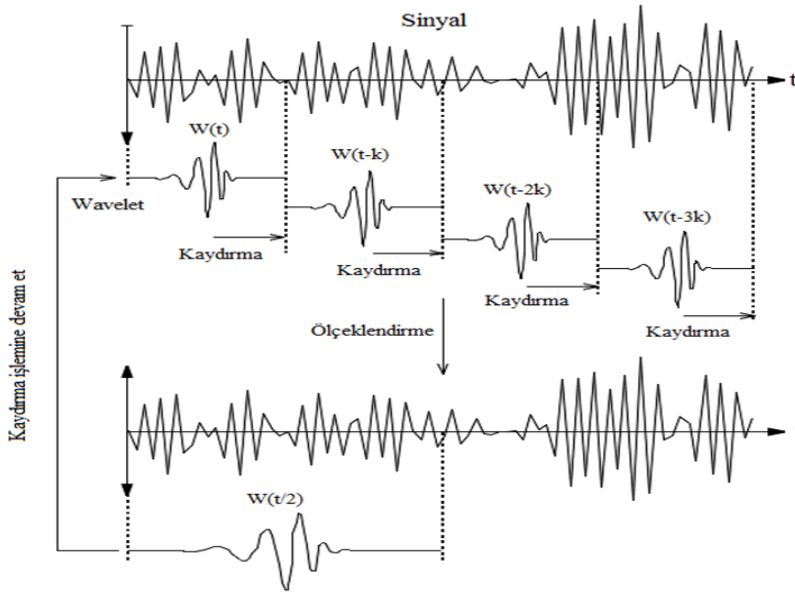
Bu devre simülasyon programıdır. İstenen özelliklerde devreler ve iletim hatları oluşturulurken Electronic Work Bench(EWB) kullanılmıştır. Hatların frekans analizi, dağılım bağıntısı çıkarılmış bunların özellikleri incelenerek sağ, sol ve birleşik iletim hatlarının karakteristikleri incelenmiştir. Nonlineer iletim hatlarının devre elemanları değiştirilerek dalga dalga etkileşimini sağlayacak devre elemanlarının değerleri tespit edilmiş ve olası etkileşmelerin simülasyonu yapılmıştır. EWB'nin analysis, transient fonksiyonları kullanılarak devrenin frekans tepkileri incelenmiştir. Ayrıca sinyallerin transientleri incelenerek yansımaları minimuma indiren sonlandırma direncinin değeri tayin edilmiştir.

3.1.5. Wavelet Analizi

Çalışmada iletim hatlarının uygun düğümlerinden alınan sinyaller wavelet analizi ile incelenmiştir. Kesikli ve sürekli wavelet dönüşümlerinden ikincisi kullanılmıştır. Daha iyi sonuçlar verdiği için özellikle hem sinyalin hem de waveletin fourier transformlarının kullanıldığı Fourier bazlı wavelet dönüşüm tercih edilmiştir.

Bu fourier transformundan farklı bir dönüşümdür. Fourier transformu sinyalin sinüs ve kosinüs fonksiyonları gibi sonsuzdan gelip sonsuza giden periyodik fonksiyonlar kullanılarak sinyaldeki hangi frekansların hangi ağırlıkta olduğunu gösteren bir dönüşümdür. Fakat bu dönüşüm sinyalde hangi frekansların hangi zamanda ortaya çıktığını göstermez, yalnızca sinyalde hangi frekansların bulunduğunu gösterir.

Wavelet dönüşümünde ise belli zaman aralığında(yerleşmiş) küçük dalgacık(wavelet) fonksiyonları kullanılarak sinyal analizi yapılmaktadır. Bu dalgacıklar genişletilip sıkıştırılarak her bir durumda sinyal üzerinde hareket ettirilir ve çarpımları alınarak sinyal frekanslarının zamana ve yere göre nasıl değiştiği görülebilir [8].



Şekil 3.6. Wavelet dönüşüm işlemleri

Sinyallere wavelet dönüşümü Matlap Student Edition kullanılarak ve uygun matlap programları geliştirilerek yapılmıştır.

3.2. Lineer LC İletim Hattı

LC iletim hattı dalgaların belli bir ortamda ilerlemesini incelemek için çok uygun bir ortamdır. L, C değerleri ve bağlanma şekilleri değiştirilerek istenilen özellikte ortamları kolay ve ucuz şekilde oluşturulabilir. Lineer LC devreleri lisans düzeyinde dalgaların değişik özelliklerini göstermek için laboratuvarlarda kullanılmaktadır [3]. İletim hattında dalgaların grup, faz hızları, hattın sonlandırma direnci, dalgaların yansıması ve geçirmesi gibi davranışları kolaylıkla görsel hale getirilebilir ve sayısal değerler alınarak deneyler yapılabilir.

LC devresindeki elemanlardan biri veya ikisi voltaja göre nonlinear özellikte seçilerek nonlinear dalgaların ilerleme davranışları ve birbirleri ile etkileşmeleri incelenebilir. Son yıllarda nonlinear LC iletim hatları nonlinear dalgalardan olan solitonların oluşumu, bunların birbirleri ile etkileşmeleri ve diğer nonlinear dalga davranışlarının incelenmesinde kullanılmaktadır.

Bunun yanında yine son yıllarda nonlinear dalgaların meta materyal ortamlarda ilerlemesinin anlaşılması konusunda da nonlinear LC solitoni ve birleşik hatlar kullanıldığı görülmektedir. Bu çalışmada ana konumuz da solitoni ve birleşik nonlinear LC iletim hatlarında dalga dalga etkileşmesini incelemek için kullanılacaktır.

4. BULGULAR

4.1. Basit Sol Elli Nonlinear İletim Hattı

Bu bölümde iletim hattına sinyal jeneratöründen 100 kHz ile 1 MHz arasına 0.6 kHz ile tarayan sinüzoidal ve üçgen dalgalar uygulanmıştır. Bunun için jeneratörün LIN modülasyon kısmı kullanılmıştır. Bu durumda uygulanan dalganın frekansı 100 kHz ile 1 MHz arasını 1 saniyede 600 defa taramaktadır. Hattın altıncı düğüm noktasından alınan sinyaller osiloskopta gözlenmiş ve 200 μs aralığında olan kısmı kaydedilmiştir. Sinyallere daha sonra wavelet transformu uygulanmış ve hattın bu frekans aralığında sinyale tepkileri elde edilmiştir. Şekillerde hattın değişik genliklerdeki ve değişik frekanslardaki dalgalara verdiği tepkiler gösterilmiştir.

Grafikler dikey ekseninde 100 kHz ile 1 MHz frekans aralığında taranan frekans gösterilmektedir. Yatay ekseninde ise bu değişimin zaman aralığı verilmektedir.

Grafikten dikey doğrultuda bir kesit alındığında görülen frekanslar uygulanan frekansla hatta oluşan yeni dalga frekanslarını göstermektedir. Böylece dalga dalga etkileşimleri kolaylıkla gözlenebilmektedir.

4.1.1. Sinüs Dalga

Verilen sinyalin frekansı belli bir zaman aralığında bir alt frekanstan üst frekansa ulaşmaktadır. Böylece hattın bu frekans aralığındaki dalgalara gösterdiği tepkiler yani verilen dalga ve oluşan dalgalara rahatlıkla görülebilmektedir.

Yeni dalgaların oluşumu enerji(ω) ve momentum(k) korunumuna uyması gerekir.

Bu sınırlamalar:

$$\omega_3 = \omega_1 \pm \omega_2 \quad (4.1)$$

$$k_3 = k_1 \pm k_2 \quad (4.2)$$

şeklindedir. Bunlar enerji ve momentum korunumunu ifade ederler.

Etkileşmeleri bu şekilde yazmamızın nedeni dalga denkleminde V_n^2 terimlerinin bulunmasıdır. Bu terim iki dalga etkileşmesini oluşturmaktadır. 1 ve 2 indisli dalgalar etkilşerek 3 indisli dalgaları oluştururlar. Böyle bir oluşum ancak bu üç dalganın da hattın kipleri arasında olması ile mümkündür.

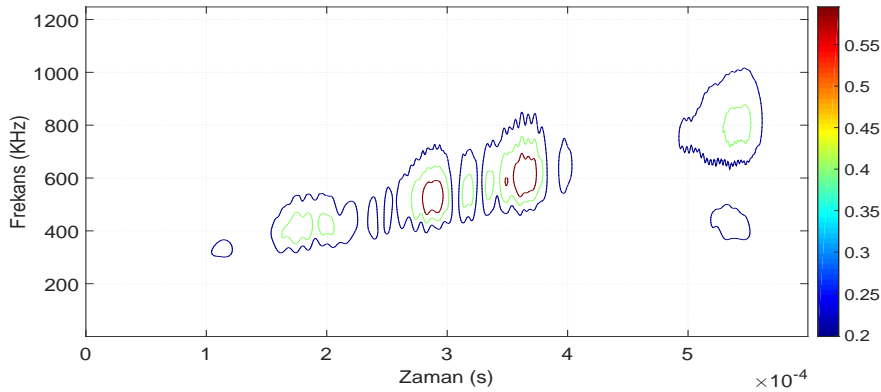
Buradaki ω_1 , ω_2 ve k_1 , k_2 etkileşen dalgaların, ω_3 ve k_3 oluşan dalgaların frekans ve dalga sayılarıdır. Bu koşulları sağlayan çok az sayıda kip vardır ve genellikle dalga dalga etkileşimi az olur. Ancak sistemimizde kipler devredeki elemanların empedansları nedeniyle oluşan $\Delta\omega$ ve Δk çizgi kalınlıkları olduğundan yeni korunum yasaları

$$\omega_3 = \omega_1 \pm \omega_2 \pm \Delta\omega \quad (4.3)$$

$$k_3 = k_1 \pm k_2 \pm \Delta k \quad (4.4)$$

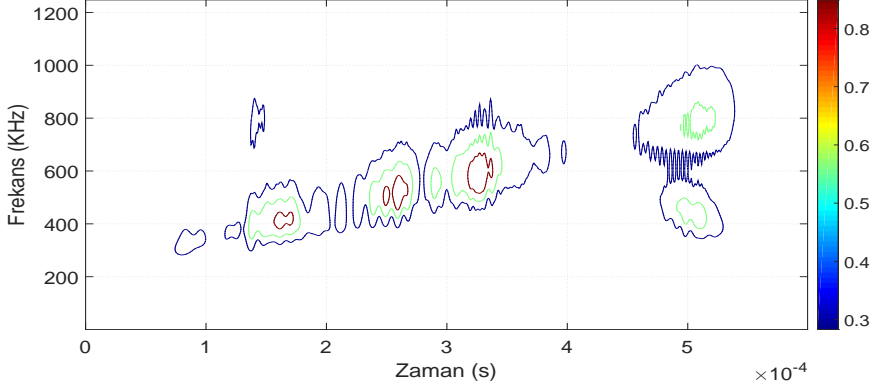
şeklinde yazıldığından dalgaların birbiri ile etkileşmeleri ve yeni frekansların oluşma olasılığı artar. Yapılan deneylerde hem nonlineerlik hem de kiplerin çizgi kalınlığı değişik devre elemanları kullanılarak kontrol edilebilir.

Aşağıda basit sol elli iletim hattına 100 kHz ile 1000 kHz frekans aralığında ve değişik genliklerde sinüs dalgası uygulandığında alınan sinyallerin wavelet analiz grafikleri verilmiştir.



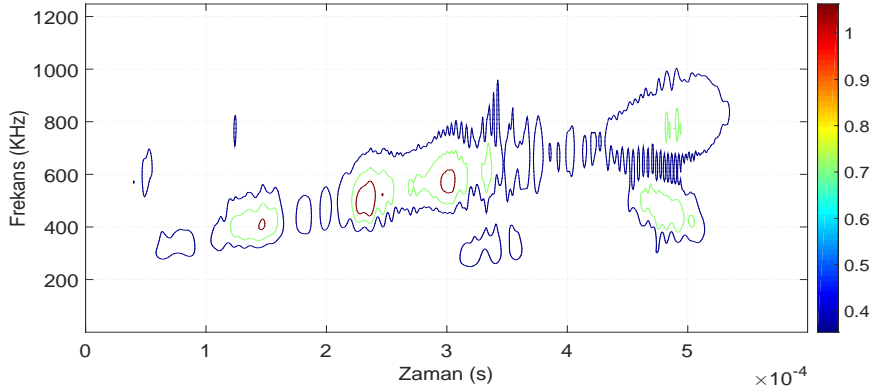
Şekil 4.1. Sinüs dalga, Genlik: 0.1V-Ofset: 0

Şekil (4.1)'de 0.1 V genlikli sinüs dalgası verildiğinde bile dalga dalga etkileşmesi başlıyor. 820 kHz frekansındaki kip, yarı frekasında 410 kHz yeni ve düşük genlikte bir dalga oluşturuyor.



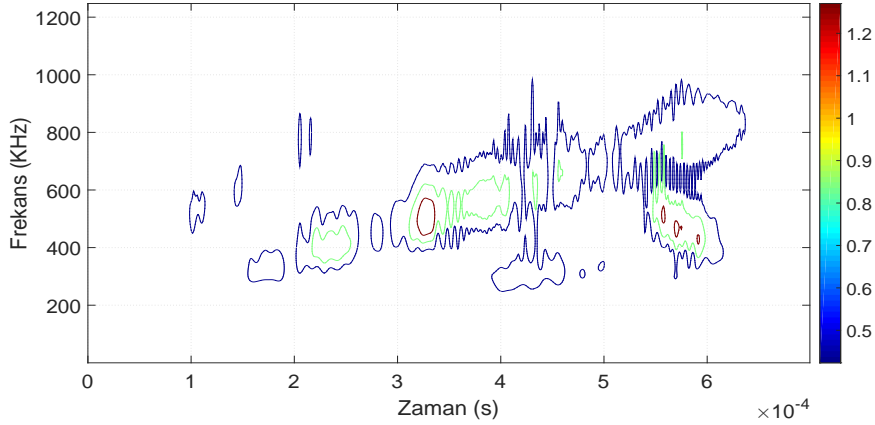
Şekil 4.2. Sinüs dalga, Genlik: 0.2V-Ofset: 0

Şekil (4.2)'de 0.2 V genlikli sinüs dalgası verildiğinde dalga dalga etkileşmesi daha belirgin hale geliyor. 400 kHz frekansındaki kip, kendisiyle etkileşerek iki katı frekansında 800 kHz yeni ve düşük genlikte bir dalga oluşturuyor. Ayrıca çizgi kalınlığı ≈ 150 kHz olan 800 kHz değerine sahip kip, düşük genlikli 430 kHz frekanslı yeni bir dalga oluşturuyor.



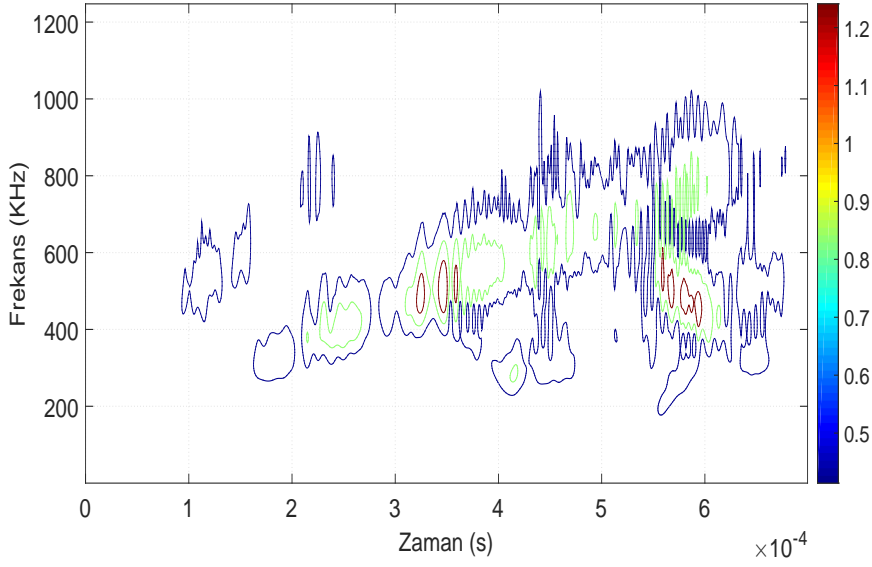
Şekil 4.3. Sinüs dalga, Genlik: 0.3V-Ofset: 0

Şekil (4.3)'te 0.3 V genlikli sinüs dalgası verildiğinde yeni dalga oluşumları gözleniyor. Şekil (4.2)'den farklı olarak 580 kHz frekansına sahip kip, yarı frekansında 290 kHz yeni ve düşük genlikte bir dalga oluşturuyor. Çizgi kalınlığı ≈ 120 kHz olan 800 kHz frekansına sahip kip, 470 kHz ve 420 kHz frekanslarında yeni dalga oluşturuyor.



Şekil 4.4. Sinüs dalga, Genlik: 0.4V-Ofset: 0

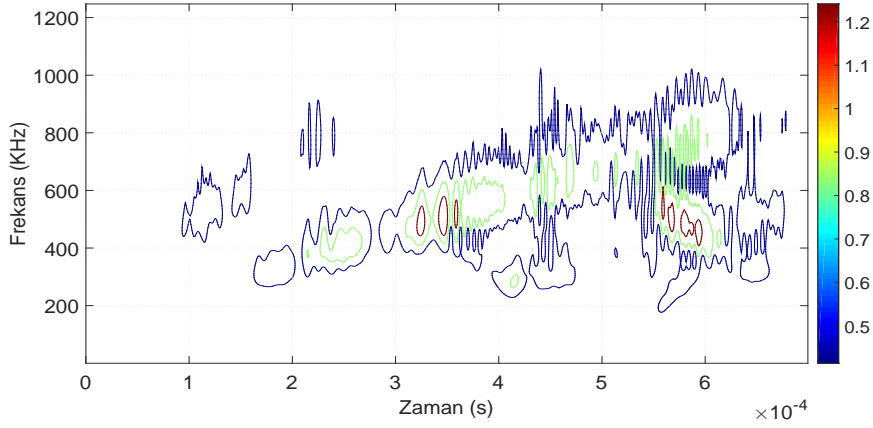
Şekil (4.4)'te 0.4 V genlikli sinüs dalgası verildiğinde yeni dalga dalga etkileşmeleri ortaya çıkıyor. Bunlardan biri yasak bölge aralığında bulunan bir frekansın iki katının ortaya çıkmasıdır. Bu ise 260 kHz ve 300 kHz frekanslarındaki dalgalar sönmeden önce kendisiyle etkileşerek sırasıyla 520 kHz ve 600 kHz frekanslı yeni ve düşük genlikte dalgalar oluşturur. Ayrıca sırasıyla 300 kHz ve 400 kHz frekansına sahip kipler kendileriyle etkileşerek iki katı frekanslarda 600 kHz ve 800 kHz yeni ve düşük genlikte dalgalar oluşturuyorlar. 600 kHz frekanslarına sahip kip, 300 kHz yarı frekansında yeni ve düşük genlikte dalga oluşturuyor. Çizgi kalınlığı ≈ 100 kHz olan 800 kHz frekansına sahip kip 430 kHz, 470 kHz, 510 kHz yeni ve yüksek genlikte dalgaları oluşturuyor.



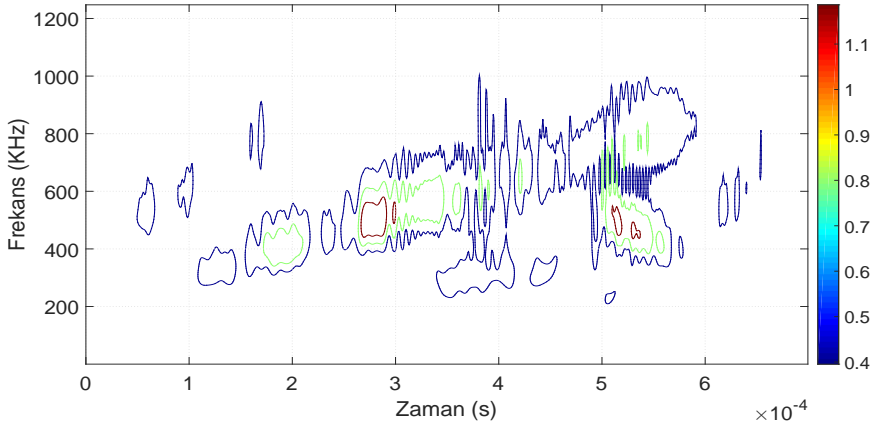
Şekil 4.5. Sinüs dalga, Genlik: 0.5V-Ofset: 0

Şekil (4.5)'te 0.5V genlikli sinüs dalgası verildiğinde 0.4 V genlikli dalgaya benzer sonuç elde ediliyor. Ancak dikkatlice bakıldığında genlik arttıkça kip frekanslarının, kiplerin ağırlıklarının etkileşim sonucu oluşan dalgaların genliklerinin değiştiği gözleniyor. 570 kHz ve 622 kHz frekanslarına sahip kipler sırasıyla 285 kHz ve 311 kHz yarı frekansında yeni ve düşük genlikte dalgalar oluşturdukları görülüyor. Çizgi kalınlığı ≈ 200 kHz olan 800 kHz frekansına sahip kip 460 kHz, 480 kHz, 502 kHz, 560 kHz yeni ve yüksek genlikte dalgaları oluşturuyor.

4.1.2. Sinüs ve Üçgen Dalga Karşılaştırılması



Şekil 4.6. Sinüs dalga, Genlik: 0.5V-Ofset: 0



Şekil 4.7. Üçgen dalga, Genlik: 0.5V-Ofset: 0

Şekil (4.6) ve Şekil (4.7) karşılaştırıldığında, sinüs dalgası yerine üçgen dalga verildiğinde küçük genliklerde dalga etkileşmelerinde önemli bir fark görülüyor. Ancak dalga genlikleri arttıkça sinüs dalgalarında ortaya çıkan frekans çiftlenmesi ve frekans yarılanması olasılıklarının azaldığı ve kiplerin ağırlıklarının değiştiği gözlenmiştir.

4.2. Birleşik Nonlineer İletim Hattı

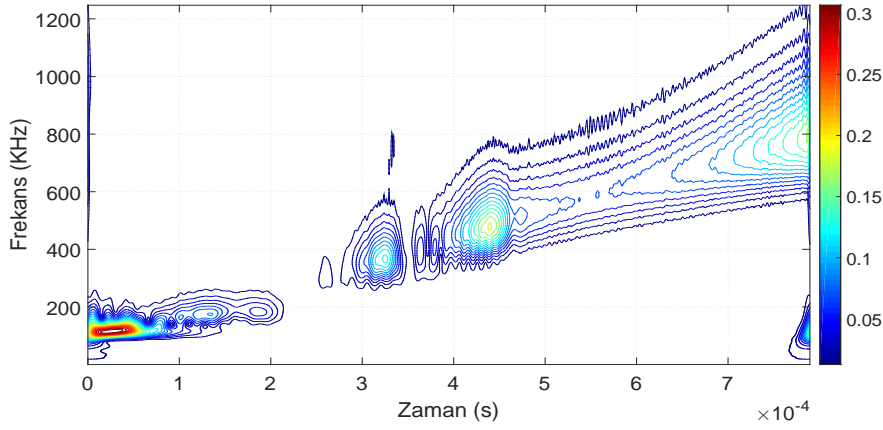
Bu bölümde iletim hattına sinyal jeneratöründen 100 kHz ile 800 kHz arasına 0.6 kHz ile tarayan sinüzoidal ve üçgen dalgalar uygulanmıştır. Bunun için jeneratörün LIN modülasyon kısmı kullanılmıştır. Bu durumda uygulanan dalganın frekansı 100 kHz ile 800 kHz arasını 1 saniyede 600 defa taramaktadır. Hattın altıncı düğüm noktasından alınan sinyaller osiloskopta gözlenmiş ve 200 μs aralığında olan kısmı kaydedilmiştir. Sinyallere daha sonra wavelet transformu uygulanmış ve hattın bu frekans aralığında sinyale tepkileri elde edilmiştir. Şekillerde hattın değişik genliklerdeki ve değişik frekanslardaki dalgaların tepkilerinin wavelet analizleri gösterilmiştir.

Grafikler dikey ekseninde 100 kHz ile 800 kHz frekans aralığında taranan frekans gösterilmektedir. Yatay ekseninde ise bu değişimin zaman aralığı verilmektedir.

Grafikten dikey doğrultuda bir kesit alındığında görülen frekanslar uygulanan frekansla hatta oluşan yeni dalga frekanslarını göstermektedir. Böylece dalga dalga etkileşimleri kolaylıkla gözlenebilmektedir.

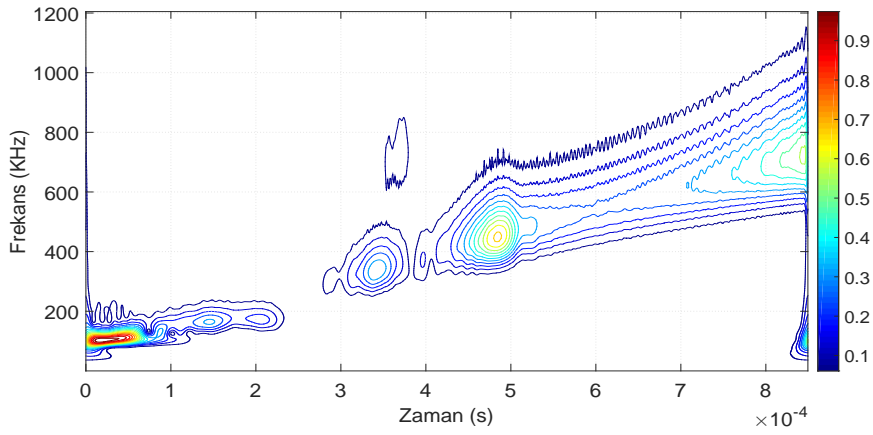
Ayrıca şekillerde 0-250 kHz aralığında iletken bir alt bant , yaklaşık 250-350 kHz aralığında yasak bant ve 350 kHz üzerinde üst iletken bandının olduğuna dikkat edilmelidir. Alt iletim bandı sağ elli, üst iletim bandı da sol elli bir karakteristik göstermektedir.

4.2.1. Sinüs Dalga



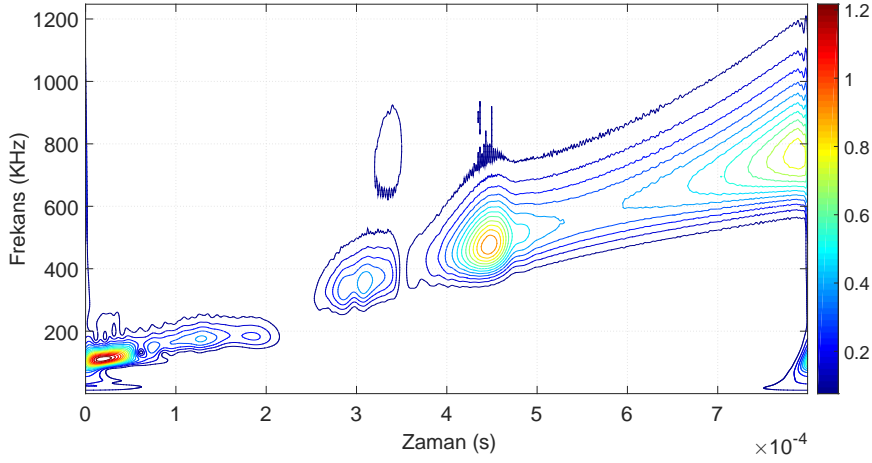
Şekil 4.8. Sinüs dalga, Genlik: 0.05V-Ofset: 0

Şekil (4.8)'de 0.05 V genlikli sinüs dalgası verildiğinde bile dalga dalga etkileşimi başlıyor. 360kHz frekansa sahip kip, iki katı olan 720 kHz frekansına sahip yeni ve düşük genlikte bir dalga oluşturuyor.



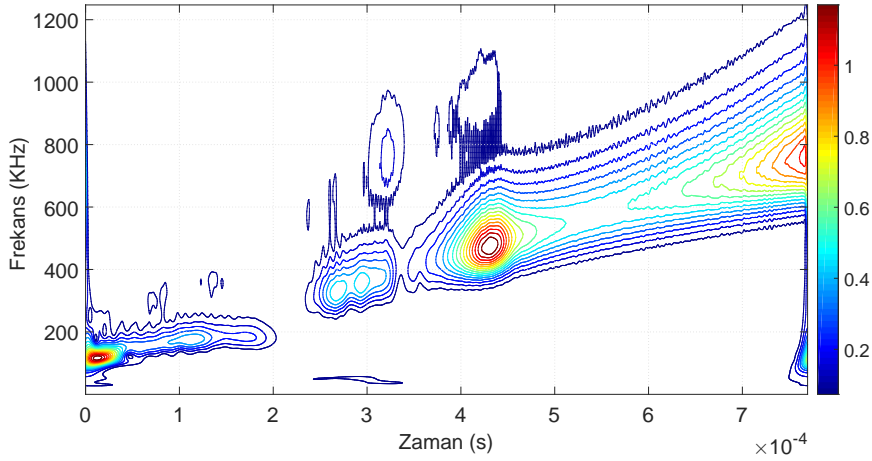
Şekil 4.9. Sinüs dalga, Genlik: 0.2V-Ofset: 0

Şekil (4.9)'da genlik artırıldığında (0.2 V) dalga dalga etkileşimleri daha net görülüyor. 350 kHz frekansa sahip olan kip, iki katı olan 700 kHz frekansında yeni ve düşük genlikte dalga oluşturuyor.



Şekil 4.10. Sinüs dalga, Genlik: 0.3V-Ofset: 0

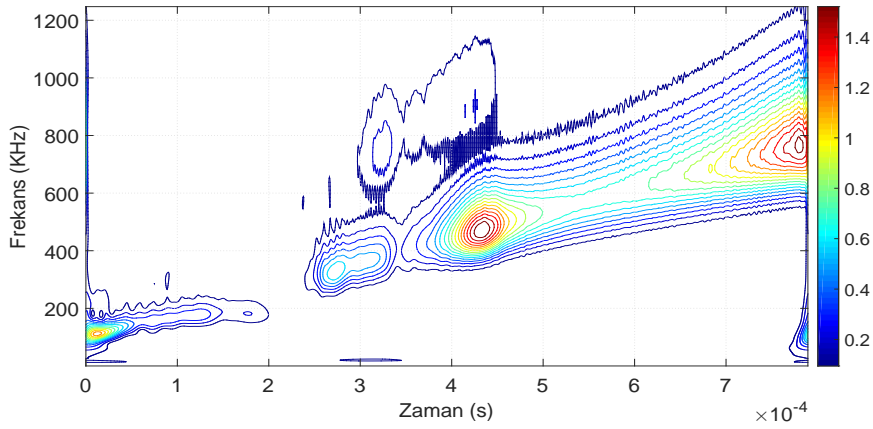
Şekil (4.10)'da genlik 0.3 V olarak artırıldığında 365 kHz frekansına sahip kip, iki katı değerinde olan 730 kHz frekansında yeni ve düşük genlikte bir dalga oluşturuyor. Ayrıca yeni oluşumlar kendini hafif bir şekilde ortaya çıkarmaya başlıyor.



Şekil 4.11. Sinüs dalga, Genlik: 0.4V-Ofset: 0

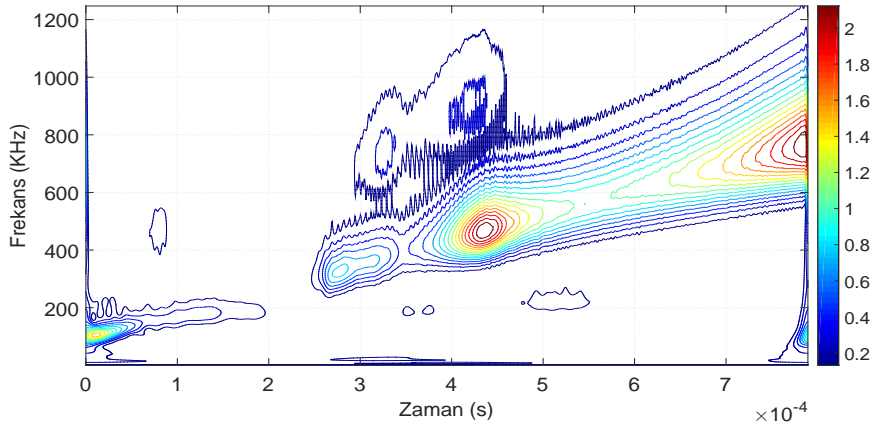
Şekil (4.11)'de genlik 0.4 V artırıldığında yeni dalga oluşumları gözleniyor. 180 kHz frekansa sahip kip, iki katı değerinde olan 360 kHz yeni ve düşük genlikte bir dalga oluşturuyor. 380 kHz, 480 kHz frekanslarına sahip kipler, sırasıyla iki katı

değeri olan 760 kHz, 960 kHz frekanslarına sahip yeni ve düşük genlikte dalgalar oluşuyor.



Şekil 4.12. Sinüs dalga, Genlik: 0.6V-Ofset: 0

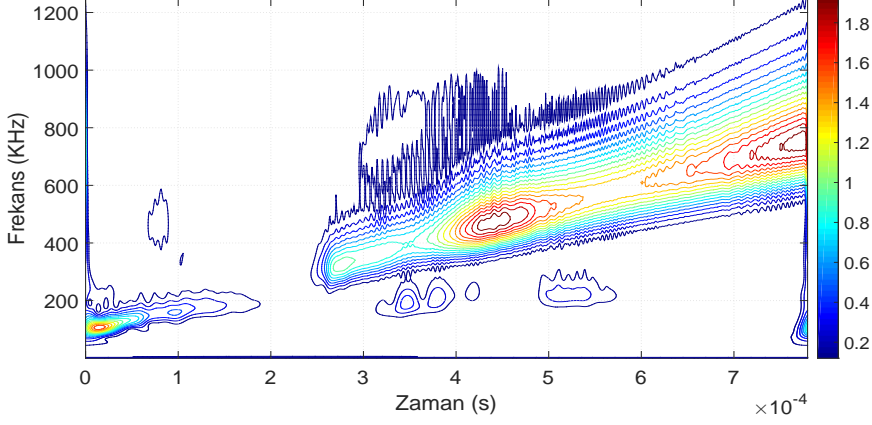
Şekil (4.12)'de genlik arttırıldığında (0.6 V) 380 kHz ve 470 kHz frekanslara sahip kipler, sırasıyla iki katı değerinde olan 760 kHz ve 940 kHz frekansına sahip yeni ve küçük genliklerde dalgalar oluşturuyor.



Şekil 4.13. Sinüs dalga, Genlik: 0.9V-Ofset: 0

Şekil (4.13)'te genlik 0.9 V verildiğinde 160 kHz ve 310 kHz frekanslarına sahip kipler birbirleriyle etkileşek, 470 kHz frekansa sahip yeni ve düşük genlikte bir dalga oluşturuyor. 370 kHz ve 480 kHz frekanslara sahip kipler, iki katı

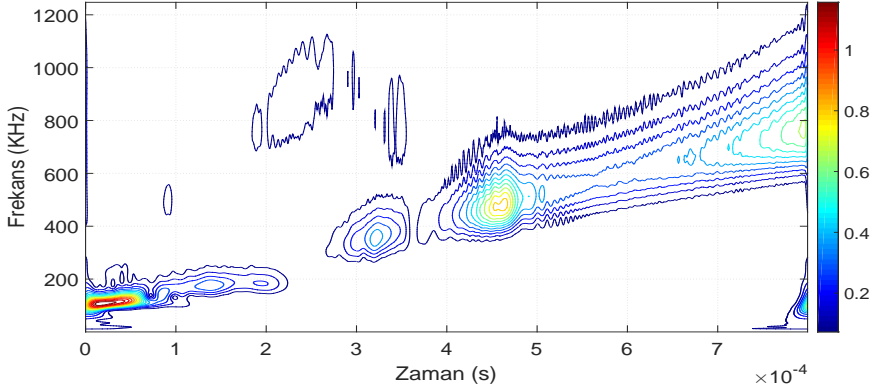
değerinde olan sırasıyla 740 kHz ve 960 kHz yeni ve düşük genlikte dalgalar oluşturmaktadırlar. Ayrıca çizgi kalınlığı ≈ 180 kHz olan 550 kHz frekansına sahip kip, 225 kHz frekansına sahip yeni ve düşük genlikli bir dalga oluşturuyor.



Şekil 4.14. Sinüs dalga, Genlik: 1.2V-Ofset: 0

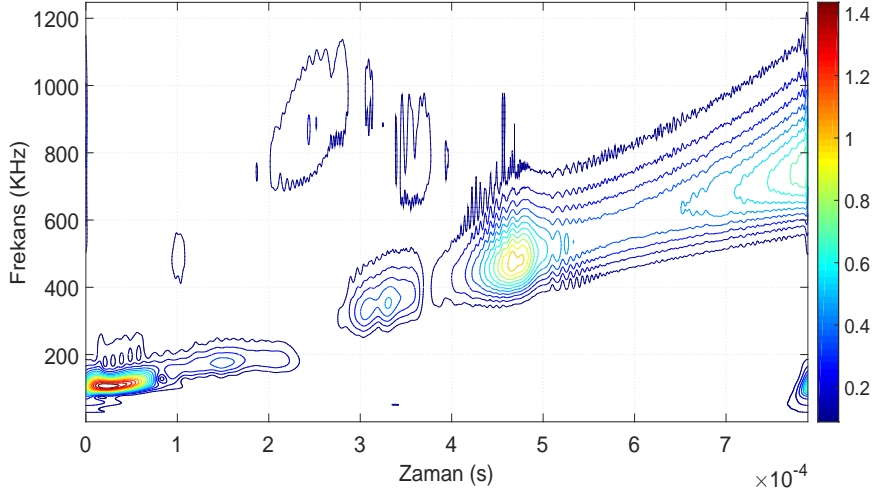
Şekil (4.14)'de göre genlik arttıkça 400 kHz ve 460 kHz frekanlı kiplerin frekans çiftlenmesi ile oluşan dalgaların genliği azalıyor, 430 kHz ve 535 kHz frekanslı kiplerin, frekans yarılanmasıyla oluşan dalgaların genliği artıyor.

4.2.2. Üçgen Dalga



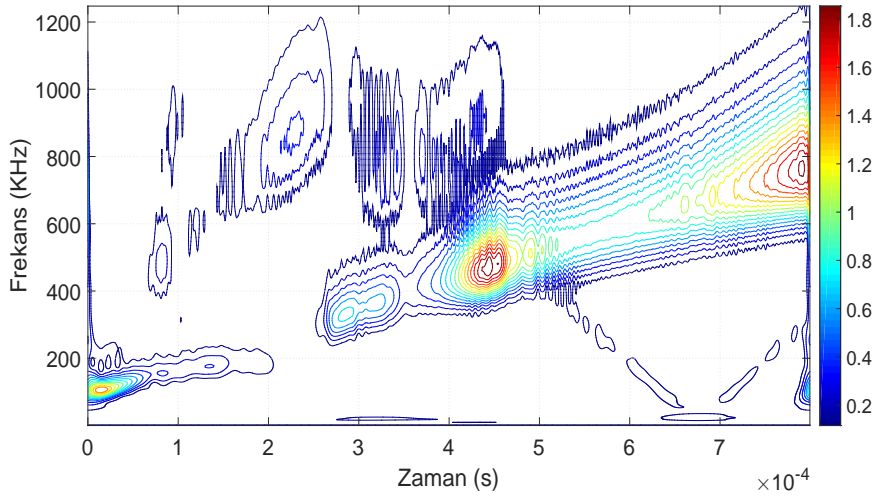
Şekil 4.15. Üçgen dalga, Genlik: 0.3V-Ofset: 0

Şekil (4.15)'te düşük genlikli üçgen dalga uygulandığında dalga dalda etkileşimleri görülüyor. Genlik 0.3 V olduğunda ise 1. Fourier bileşeni ile 2. Fourier bileşenin birbirine yaklaştığında girişim oluşturduğu görülüyor.



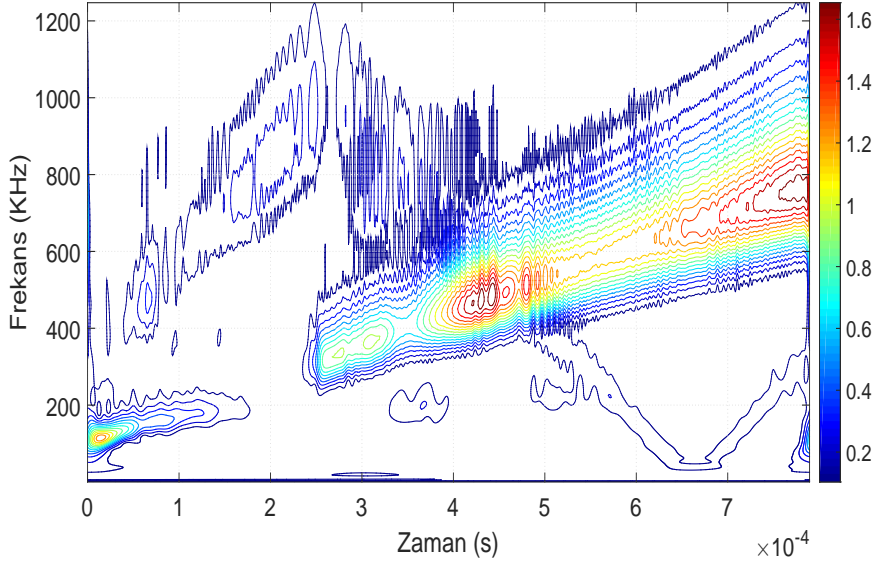
Şekil 4.16. Üçgen dalga, Genlik: 0.4V-Ofset: 0

Şekil (4.16)'da genlik artırıldığında (0.4 V) fourier bileşenlerinin yanında dalga dalga etkileşimlerinde oluşmaya başladığını görmekteyiz.



Şekil 4.17. Üçgen dalga, Genlik: 0.9V-Ofset: 0

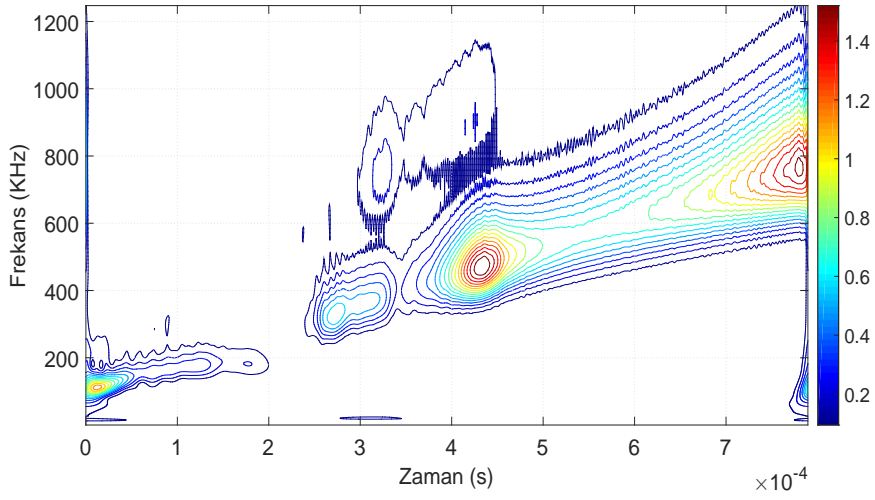
Şekil (4.17)'de genlik 0.9 V olduğunda dalga dalga etkileşimlerini net olarak görmekteyiz. 470 kHz frekansa sahip kip, 940 kHz frekansında yeni ve düşük genlikli bir dalga oluşturuyor. Bu grafikte 1. ve 2. Fourier bileşenlerinin yanında 3. Fourier bileşenide görülmektedir.



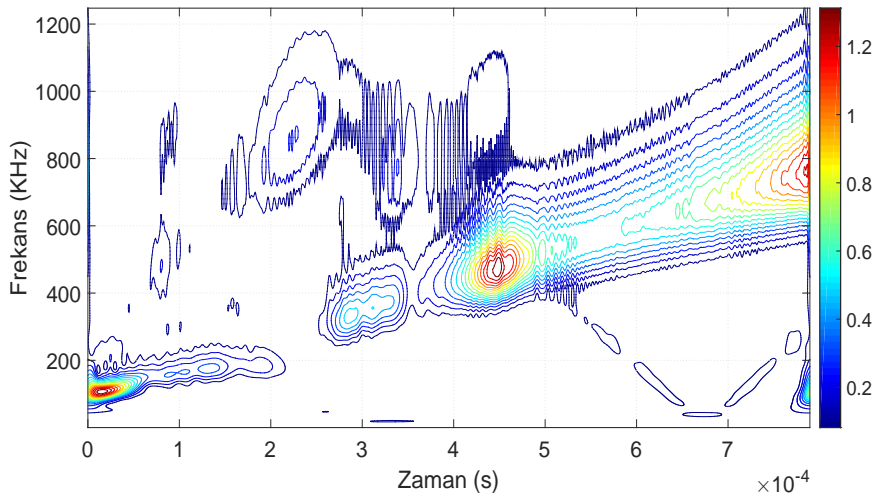
Şekil 4.18. Üçgen dalga, Genlik: 1.2V-Ofset: 0

Şekil (4.18)'de genlik arttırıldığında (1.2 V) yeni dalga oluşumları görülüyor. 400 kHz frekansa sahip kip, yarı frekansa sahip 200 kHz yeni ve düşük genlikte bir dalga oluşturuyor.

4.2.3. Sinüs ve Üçgen Dalganın Karşılaştırılması



Şekil 4.19. Sinüs dalga, Genlik: 0.6V-Ofset: 0



Şekil 4.20. Üçgen dalga, Genlik: 0.6V-Ofset: 0

Şekil (4.19) ve Şekil (4.20)'de sinüs dalgası yerine üçgen dalga verildiğinde küçük genliklerde dalga etkileşmelerinde önemli bir fark görülüyor. Ancak

üçgen dalgada genlikler arttıkça fourier açılımındaki ikinci bileşen açık olarak görülüyor. Sinyal kaynağındaki girişten dolayı bu bileşenin başlangıç frekansı büyük olduğundan grafikte ilk bileşenden daha önce kesim frekansına ulaştığı için küçülmeye başlıyor ve alt kesim frekansına ulaştığında artıyor. Bu durum oluşan dalgalarla ikinci bileşenin ve birinci bileşenin kesişme noktalarında etkileşmelerine ve girişimine neden oluyor. Fourier açılımını üçüncü bileşeni de 180 kHz de görülebiliyor.

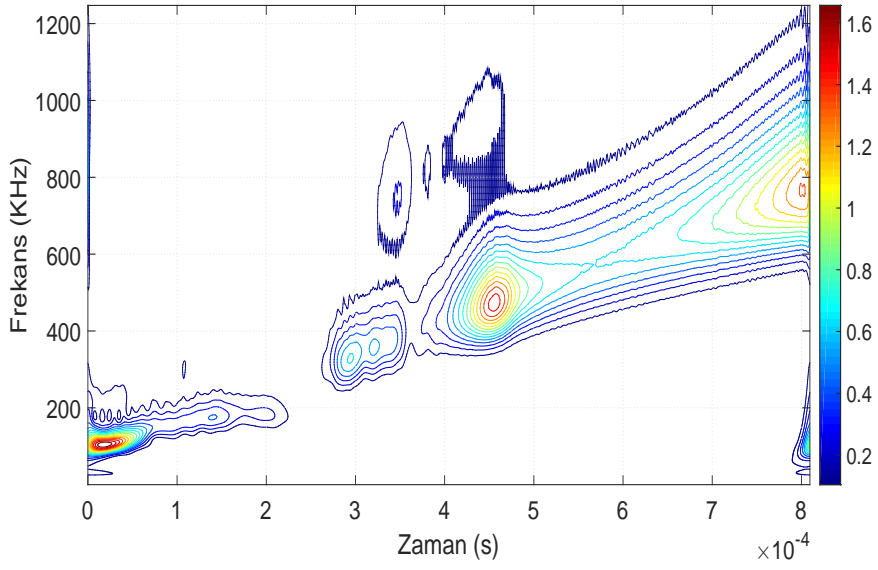
Ayrıca dalga genlikleri arttıkça sinüs dalgalarında ortaya çıkan frekans çiftlenmesi ve frekans yarılanması olasılıklarının azaldığı ve kiplerin ağırlıklarının değiştiği gözlenmiştir.

4.3. Birleşik Nonlineer Ofsetli İletim Hattı

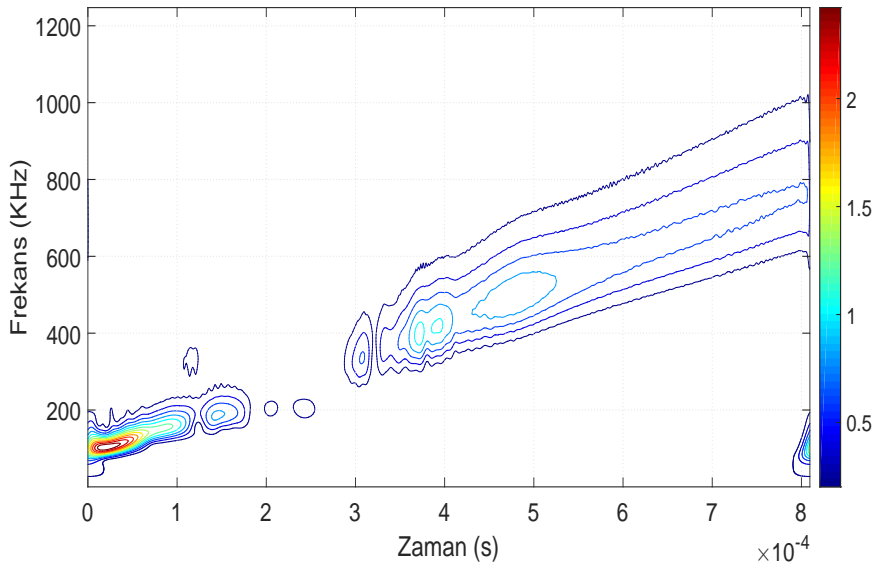
Bu bölümde iletim hattına sinyal jeneratöründen 100 kHz ile 800 kHz arası 0.6 kHz ile tarayan sinüzoidal ve üçgen dalgalar uygulanmıştır. Bunun için jeneratörün LIN modülasyon kısmı kullanılmıştır. Bu durumda uygulanan dalga frekansı 100 kHz ile 800 kHz arası 1 saniyede 600 defa taramaktadır. Hattın altıncı düğüm noktasından alınan sinyaller osiloskopta gözlenmiş ve 200 μs aralığında olan kısmı kaydedilmiştir. Sinyallere daha sonra wavelet transformu uygulanmış ve hattın bu frekans aralığında sinyale tepkileri elde edilmiştir. Şekillerde hattın değişik genliklerdeki, değişik frekanslardaki ve farklı ofset değerlerindeki dalgalara verdiği tepkiler gösterilmiştir.

Şekillerde frekansın dikey ekseninde, zamanın yatay ekseninde olduğu dikkat edilmelidir. Grafikten dikey doğrultuda bir kesit alındığında görülen frekanslar uygulanan frekansla hatta oluşan yeni dalga frekanslarını göstermektedir. Böylece dalga dalga etkileşmeleri kolaylıkla görülmektedir.

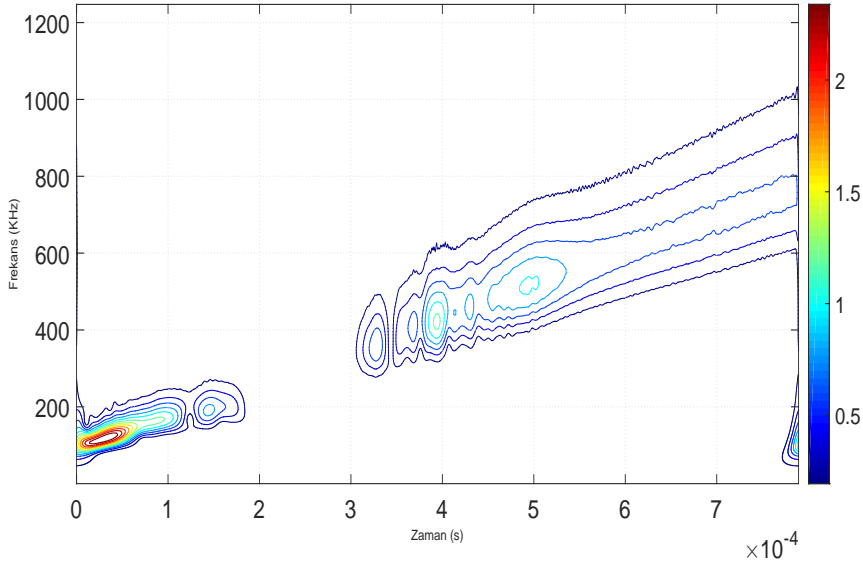
4.3.1. Sinüs Dalga



Şekil 4.21. Sinüs dalga, Genlik: 0.5V-Ofset: 0



Şekil 4.22. Sinüs dalga, Genlik: 0.5V-Ofset: 0.5



Şekil 4.23. Sinüs dalga, Genlik: 0.5V-Ofset: 1

Sisteme sabit genlikli sinüs dalgası verildiğinde, ofset değeri değiştirilince grafiklerde görüldüğü gibi yasak bant aralığı ofset değeri büyüdükçe genişlemektedir. Ofset arttırıldığında dalga dalga etkileşimlerinin azaldığını daha sonrada ortadan kalktığı görülüyor. Benzer sonuçlar üçgen dalga uygulandığında da gözleniyor.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Hat üzerindeki dalganın frekansı lineer olarak arttırılıp bunların hem giden dalgalar hem de oluşan dalgalar wavelet transformu incelendiğinde,

- Düşük genlikli dalgalar uygulandığında sağ-elli, sol-elli ve birleşik devrelerde yeni dalgaların oluşmadığı, yalnızca uygulanan dalgaların oluştuğu gözlenmiştir.

Bu beklenen sonuçtur çünkü $V_n < 1$ ise dalga denklemindeki $V_n^2 \ll 1$ olacaktır. Dalga denklemi lineer hale gelecektir. Bunun sonucunda kipler birbirleri ile etkileşmeyecektir.

- Uygulanan sinyallerde V_n genliği arttıkça wavelet transformunda uygulanan sinyal frekansları yanında yeni frekansların da oluşmaya başladığı görülmektedir. Yeni oluşan frekanslar yaklaşık olarak lineer normal kiplerin frekanslarından oluşmaktadır. Bunun nedeni de nonlineerliğin genliğin artmasıyla birlikte normal kiplerin frekanslarının da değişmesine neden olmasıdır.

- Sonuç olarak (4.3), (4.4) denklemleri ile oluşan dalgalar enerji ve momentum korunumu kuralına uyarlar.

Uygulanan sinyallerin genliği V_n arttıkça hem yeni frekanslar oluşmakta hem de daha küçük genliklerde oluşan dalgaların genliği de artmaktadır.

Oluşan yeni dalgalar genelde uygulanan dalgaların iki katı frekansında ya da yarı frekansında oluşmaktadır. Buna frekans yarılanması veya frekans çiftlenmesi denir. Bunun böyle olmasının nedeni kullanılan varikap diyotda kapasitansın uçlarına uygulanan V potansiyeline $C(V) = C_0(1 - bV)$ şeklinde bağlı olması ve bunun da hatlarda ilerleyen dalga denkleminde V_n^2 terimlerinin ortaya çıkmasına neden olmasıdır [2]. Bu da başka frekanslarda dalgalar oluşturuyor. Bu dalgaların genlikleri epeyce küçük ve kipler arasındaki enerji aktarımının oldukça yavaş olduğunu gösteriyor. Etkileşen dalgalar ancak enerjilerinin %20'sini yeni

oluşan dalgaya aktardığı grafiklerdeki kontur sayılarından ve ölçek renklerinden çıkarılabiliyor.

Uygulanan frekans daha yavaş değiştirilse belki oluşan dalga genliğinin biraz daha fazla olmasını beklenebilir.

Bazı durumlarda yasak enerji bantlarındaki frekansların da frekansın çiftlenmesi nedeniyle zayıf genlikli yeni dalga oluşturduğu görülüyor. Bu frekansda dalgalar hat üzerinde ilerleyemiyor ve belli bir uzaklıkta sönüyor. Bunların sönmeden önce bile birbiriyle etkileşip kendi frekanslarının iki katı frekansda yeni dalgalar oluşturduğu ortaya çıkıyor. Burada yeni oluşan dalgaya etkileşen dalgaların ancak %5 enerji aktardığı anlaşılıyor.

- Sol-elli iletim hattında oluşan fakat birleşik hatta ortaya çıkmayan yeni bir dalga etkileşimi gözleniyor. Bunların genlikleri epeyce büyük ve neredeyse etkileşen dalgaların %80'i yeni dalgaya aktarılıyor.

Sol-elli iletim hattında kiplerin frekansları arasındaki fark frekans arttıkça artar. Düşük frekanslarda frekanslar birbirine yakındır. Yüksek frekanslı dalgalardaki frekanslar birbirinden uzaklaşır.

Sol-elli hattın dağılım bağıntısının, kiplerinin ve frekanslarının incelenmesinden: Bu etkileşmenin düşük frekanslardaki birbirine yakın kiplerle, daha yüksek frekanstaki ayırık ve çizgi kalınlığı fazla olan frekanslarla etkileşmesiyle oluştuğu anlaşılıyor.

- Gerek bütün frekans çiftlenimine gerekse son bahsedilen dalga dalga etkileşimine neden olan olgunun, aralarındaki farklara rağmen nonlinear dalga denklemindeki V_n^2 teriminden ortaya çıktığı anlaşılabilir. Bu etkileşim iki dalga etkileşimine neden oluyor. Bu da hattın iki kipinin etkileşimi olarak ifade edilebilir. Bilindiği gibi kipler o ortamın belli bir frekansda(özdeğer) ve belli bir şekilde(özfonksiyon) salınan bir harmonik salıncıya karşılık gelir [3].

İki kipin genliklerinin karesiyle orantılı olarak etkileşimi x_1, x_2, ω_1 ve ω_2 sırası ile salınıcıların 1. ve 2. kiplerinin genlikleri ve açısal frekansları, γ 'da genliğin karesi ile orantılı etkileşme terimi ise kiplerin birbirine etkisi

$$\ddot{x}_1 + \omega_1^2 x_1 = \gamma x_1 x_2 \quad (5.1)$$

$$\ddot{x}_2 + \omega_2^2 x_2 = \gamma x_1^2 \quad (5.2)$$

denklemleriyle ifade edilebilir [9].

Bu denklemlerde başlangıç koşulu olarak $x_1(0) \neq 0$ ve $x_2(0) = 0$ alınır ve bu sistemde $t=0$ da 1.kip uyarılır 2. kip uyarılmaz. Fakat zaman ilerledikçe etkileşme terimi nedeniyle sistemde 2. kip uyarılır. Bu zorlanımlı bir etkileşmedir ve (5.2) denkleminde $x_1(t) = A \cos(\omega_1 t)$ nin karesindeki $A^2 \cos(\omega_1 t)$ zorlanımı ortaya çıkar. Bu da zorlanımlı salınım nedeniyle frekans çiftlenmesine neden olur. Buradaki rezonans zorlanımlı rezonansdır.

Bu denklemlerde başlangıç koşulu olarak $x_2(0) \neq 0$ ve $x_1(0) = 0$ alınır ve bu sistemde $t=0$ da 2. kip uyarılır 1. kip uyarılmaz ise sistem bu haliyle kalacak gibi görülür çünkü (5.1) denkleminde sağ tarafı $x_1(0) = 0$ terimi nedeniyle 1.kip uyarılmaz. Durum böyle değildir. $t=0$ da uyarılan 2. kip $x_2(t) = A \cos(\omega_2 t)$ şeklinde alınıp (5.1) denkleminde yerine konursa denklem

$$\ddot{x}_1 + (\omega_1^2 - \gamma A \cos(\omega_2 t)) x_1 = 0 \quad (5.3)$$

şeklinde yazılabilir. Bu denklem Mathieu denklemidir [10] ve 1:2 nin 3:2 değeri için kararsızdır. Bu frekans oranları için zaman ilerledikçe $x_2(0) \neq 0$ ve $x_1(0) = 0$ durumu kararsız hale gelir ve 1. kipe hızlı şekilde enerji aktarılır. Bu parametrik rezonans olarak adlandırılır sistem kararsız hale gelerek 2.kip enerjisinin çoğunu hızlı şekilde 1.kipe aktarır.

Sol-elli iletim hattındaki wavelet transformundaki kipler incelendiğinde birbirine yakın alt frekans grubundaki kiplerle yüksek frekanstaki kipin $\Delta\omega$ ve Δk olan

izgi geniřliđi ayrık kiple etkileřimi (4.3), (4.4) denklemleri řeklinde olasılıđını arttırıyor. Burada izgi geniřliđi ile etkileřimin arttırılabildiđi ve kontrol edilebilindiđi dűřünűnűlebilir.

Bunların sonucunda sol-elli nonlinear hatta hem zorlanımlı hem de parametrik rezonansla dalga dalga etkileşiminin olduğunu, birleşik nonlinear hatta ise sadece zorlanımlı rezonans ile dalga dalga etkileşimi olduğu anlaşılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Greco, A.F.G., Barroso, J.J., Rossi, J.O. 2013. Modeling and Analysis of Ladder-Network Transmission Lines with Capacitive and Inductive Lumped Elements. **Journal of Electromagnetic Analysis and Applications**, 5: 213-218.
- [2] Remoissenet, M. 1999. Waves Called Solitons. Springer, New York.
- [3] Crawford Jr, F.S. 1960. Dalgalar (Çeviri: R. Nasuhoğlu), 3.Baskı., Bilim Yayınları, Ankara.
- [4] Abdoukary, S., Beda, T., Doka, S.Y., Ndzana, F., Kavitha, L., Mohamadou, A. 2012. Dissipative Discrete System with Nearest-Neighbor Interaction for the Nonlinear Electrical Lattice. **Journal of Modern Physics**, 3: 438-446.
- [5] Yoshinaga, T., Sugimoto, N., Kakutani, T. 1981. Nonlinear Wave Interactions on a Discrete Transmission Line. **Journal of the Physical Society of Japan**, 50: 2122-2128.
- [6] Fukushima, K., Wadati, M., Narakara, Y. 1980. Envelope Soliton in a New Nonlinear Transmission Line. **Journal of the Physical Society of Japan**, 49: 1593-1597.
- [7] English, L.Q., Wheeler, S., Shen, Y., Veldes, G.P. 2011. Backward Wave Propagation and Discrete Solitons in a Left-Handed Electrical Lattice. **Physics Letters A**, 375: 1242-1248.
- [8] Burrus, C.S., Gopinath, R.A., Guo, H. 1998. Introduction to Wavelets and Wavelet Transforms. Prentice Hall, New Jersey.
- [9] Chechin, G.M., Sakhnenko, V.P., Zekhtser, M.Y., Stokes, H.T., Carter, S., Hatch, D.M. 2000. Non-linear normal modes for systems with discrete symmetry. **Int.J.Non-Linear Mech.**, 35: 497-518.
- [10] Rand, R.H. 2005. Lecture Notes on Nonlinear Vibrations, version 52, [<http://audiophile.tam.cornell.edu/randdocs/nlvibe52.pdf>], Erişim Tarihi: 11.03.2016.

ÖZ GEÇMİŞ**KİŞİSEL BİLGİLER**

Adı Soyadı : Gülşah Cemile TEMİZ
Doğum Yeri ve Tarihi : AYDIN 08/02/1988

EĞİTİM DURUMU

Lisans Öğrenimi : Süleyman Demirel Üniversitesi
Fen Fak., Fizik Böl.
Yüksek Lisans Öğrenimi : Adnan Menderes Üniversitesi
Fen-Edebiyat Fak., Fizik Böl.
Bildiği Yabancı Diller : İngilizce

İŞ DENEYİMİ

Çalıştığı Kurumlar ve Yıl : Akıl Küpü Etüt Merkezi ve Çocuk Kulübü

İLETİŞİM

E-posta Adresi : gulsah-c-temiz-88@hotmail.com
Tarih : 05.06.2017