

66494

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**AKUSTİK YÜZEY DALGA ESASINA DAYANAN FİLTRELERİN
ANALİZİ, TASARIMI VE GSM SİSTEMİNDEKİ UYGULAMALARI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Müh. H. Cemil KARAGÜZEL

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 9 Haziran 1997

Tezin Savunulduğu Tarih : 27 Haziran 1997

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Ergül Akçakaya

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Ali Nur Gönülenen

Prof. Dr. Ercan Topuz

04.09.1997

04.09.1997

03.09.1997

HAZİRAN 1997

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
DOKÜMANTASYON MÜDÜRLÜĞÜ

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının yürütülmesini değerli önerileri ve yardımlarıyla destekleyen Sayın Hocam Prof. Dr. Ergül Akçakaya'ya, ayrıca çalışmalarım esnasındaki yardımlarından dolayı da, Alcatel Teletaş, Araştırma ve Geliştirme Bölümündeki arkadaşlarıma teşekkürü borç bilirim.

İstanbul, 1997

H. Cemil Karagüzel

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	ii
ŞEKİL LİSTESİ	v
TABLO LİSTESİ	vii
ÖZET	viii
SUMMARY	ix
BÖLÜM 1. GİRİŞ	1
BÖLÜM 2. PİEZOELEKTRİK ORTAMLARDA AKUSTİK DALGA PROPAGASYONU	3
2.1 Giriş.....	3
2.2 Bünye Denklemleri.....	3
2.3 Piezoelektrik Ortamlarda Dalga Denklemleri	7
2.3.1 Yüzey Dalgası	14
BÖLÜM 3. TRANSDÜKTÖRLER	21
3.1 Giriş.....	21
3.2 Transdüktörün Eşdeğer Devresi	23
3.3 Periyodik Yapılı Transdüktörün Admitansı	26
3.4 Periyodik Olmayan Transdüktörün Admitansı.....	27
3.5 Transdüktörün Transfer Fonksiyonu ve Elektrik Kapının Admitansı	30
3.6 Akustik Empedans Süreksizliğini İçeren Eşdeğer Devre Modeli	33

BÖLÜM 4. GSM SİSTEMİ.....	36
4.1 Giriş.....	36
4.2 GSM Sisteminin Özellikleri.....	39
4.3 Mobil Şebeke Hizmetleri	43
4.4 Hücresel Yapı.....	45
4.5 GSM Şebeke Mimarisi	47
4.6 İletim Donanımı.....	52
4.7 Çağrı Kotarma.....	53
4.8 Şebeke-Hücre Seçimi ve Ücretlendirme	55
4.9 Akustik Yüzey Dalga (SAW) Filtrenin GSM’ deki Uygulaması.....	56
BÖLÜM 5. BAND GEÇİREN SAW FİLTRE TASARIMI	59
5.1 Giriş.....	59
5.2 Filtre Tasarımı	59
5.3 GSM Sistemi için Band Geçiren SAW Filtre Tasarım Örneği ..	68
5.4 İkincil Etkiler ve Gerçekleştirme Sınırları	76
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	79
KAYNAKLAR	80
EKLER.....	82
ÖZGEÇMİŞ	109

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 Piezoelektrik kristalde seçilen eksen takımı	14
Şekil 3.1 İnterdijital transdüktör..	21
Şekil 3.2 Transdüktör geometrisi, çubuk yapı, tabaka yapı.	24
Şekil 3.3 Mason eşdeğer devresi.....	24
Şekil 3.4 Kaskad bağlı N hücreli transdüktör yapısı.....	26
Şekil 3.5 n. Hücre için düşey alan eşdeğer devresi	28
Şekil 3.6 Transdüktörün 3-kapılı gösterimi	31
Şekil 3.7 Akustik empedans süreksizliğini içeren eşdeğer devre	33
Şekil 4.1 Ulusal telefon şebekesinin sembolik yapısı.....	38
Şekil 4.2 GSM sisteminin sembolik yapısı.....	38
Şekil 4.3 MSC kapsama alanı.....	46
Şekil 4.4 GSM' in alt sistemler organizasyonu.....	48
Şekil 4.5 GSM şebeke mimarisi... ..	49
Şekil 4.6 Kimlik kanıtlama mekanizması.....	52
Şekil 4.7 İletim donanımı.....	53
Şekil 4.8 Mobil istasyon blok yapısı.....	57
Şekil 4.9 SAW filtrenin radyo devresindeki yeri	57
Şekil 4.10 Filtre parametrelerinin tanımları.....	58
Şekil 5.1 Transversal filtre yapısı	60
Şekil 5.2 Akustik yüzey dalga filtresinin gösterimi	61

Şekil 5.3 Band geçiren filtre karakteristiği	66
Şekil 5.4 $f_0 = 71$ MHz olan SAW filtrenin araya girme kaybı.....	70
Şekil 5.5 $f_0 = 902.5$ MHz olan SAW filtrenin araya girme kaybı.....	72
Şekil 5.6 $f_0 = 947.5$ MHz olan SAW filtrenin araya girme kaybı.....	74
Şekil 5.7 Transdüktöre pasif elektrotların eklenmesi.	77



TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1 Matrisel gösterimde indislerin değiştirilmesine ilişkin kural	6
Tablo 2.2 Taban malzemesine göre hesaplanmış elektrotlu ve elektrotsuz bölgelerdeki yüzey dalga hızları	20
Tablo 4.1 Mobil istasyon sınıfları	40
Tablo 4.2 GSM sisteminde kullanılan band geçiren SAW filtrenin teknik özellikleri.....	58

ÖZET

Haberleşme sistemlerinde, akustik dalgalara ilişkin özelliklere dayanan elemanların kullanılması, uzun yıllar önce düşünülmüş ve uygulamaya konulmuştur. Ancak akustik yüzey dalganın verimli bir biçimde uyarılıp kullanılmaya başlamasının otuz yıldan daha az bir geçmişi vardır.

Piezoelektrik bir kristal yüzeyi üzerinde uyarılan akustik dalgalar kullanılarak 10 Mhz'den başlayan ve birkaç Ghz'e uzanan frekans bölgelerinde çalışabilen filtre, geciktirme hatları ve osilatör gibi elektronik elemanlar gerçekleştirilebilmektedir.

Akustik yüzey dalganın (Surface Acoustic Wave - SAW) piezoelektrik bir kristalin bir yüzeyine yerleştirilen, karşılıklı konulmuş ve birbirlerinin dışları arasına yerleştirilmiş iki tarağa benzeyen elektrot sistemi ile (İnterdijital Transdüktör, Interdigital Transducer - IDT) uyarılabilmesi, diğer bir deyişle transdüktörün bir düzlem üzerinde gerçekleştirilmiş olması özelliği, akustik yüzey dalgaya dayanarak geliştirilmiş olan elemanların haberleşme sistemlerinde yaygın bir şekilde kullanılmasına imkan sağlayan önemli bir etken olmuştur. Birçok akustik elemanın gerçekleştirilmesinde temel olan düşük propagasyon kaybı ve küçük boyut düşüncelerine ek olarak, uyarılan dalgaya sürekli bir erişim olması açısından akustik yüzey dalga önemli bir avantaja sahiptir.

Akustik yüzey dalga transdüktörünün uyardığı akustik dalga, transdüktöre uygulanan gerilimin frekansına bağlıdır. İki transdüktör belirli bir biçimde aynı kristal üzerine yerleştirilirse, bu transdüktörlerden birinin uyardığı dalgayı öteki alırsa, oluşturulan iki transdüktörlü bu yapının transfer fonksiyonu da frekansla değişecektir. Bu frekans karakteristiğini belirleyen transdüktöre ilişkin birçok parametre vardır. Frekans karakteristiğini etkileyen birçok parametrenin olması, filtre gerçekleştirilmesinde esneklik sağlamaktadır.

Bu çalışmada, GSM (Küresel Mobil İletişim Sistemi, Global System for Mobile Communications) sisteminde kullanılmak üzere akustik yüzey dalga esasına dayanan filtre tasarımı konusu ele alınmıştır. Bu amaçla interdijital transdüktörlerin analizi ve tasarımı konusu gözden geçirilmiş ve ayrıca günümüzde yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanan GSM sistemi incelenmiştir.

SUMMARY

ANALYSIS AND DESIGN OF SAW FILTER AND SAW FILTER APPLICATIONS IN GSM

Surface Acoustic Waves (SAW), also known as Rayleigh waves have received considerable attention first in the early 1960's and many devices are now being incorporated in electronic systems. There has been a substantial growth of research into methods of generating and manipulating the waves, and in developing practical devices for use in a wide range of electronic applications.

Acoustic waves propagating on the surface of a piezoelectric crystal provide a convenient means of implementing filters and delay lines at frequencies ranging from several megahertz to several gigahertz. In addition to the considerations of low propagation loss and microminiature dimensions which are basic to most acoustic devices, the surface wave mode has the important advantage of providing continuous access to the propagating acoustic wave.

SAW devices make use of the surface acoustic wave which travels along the free surface of the material. The wave amplitude is a maximum at the surface and decays rapidly with depth into the material; almost all the energy is confined to a region extending about one wavelength into the bulk. As the velocity of the surface wave is around 3000 m/s the wavelength is less than the free space electromagnetic wavelength by a factor of about 10^5 .

For most of the SAW devices, the structure is simply a piezoelectric medium with a metal film on the surface, etched to give an appropriate geometry. Many of the advantages of SAW devices are derived from their physical structure. They are inherently very rugged and reliable. Because their operating frequencies and responses are set by photolithographic processes, they do not require complicated tuning operations nor do they become detuned in the field. The performance advantages realized with SAW technology are dependent on the application and frequently include small size, linear phase, low shape factor, excellent rejection and temperature stability. The semiconductor wafer processing techniques used in the manufacturing of SAW components permit large-volume production of economical and reproducible devices. Owing to the simplicity of the structure, and the availability of convenient fabrication methods, nearly all surface wave devices use piezoelectric materials. In applications of the surface acoustic wave phenomenon to electronic devices, piezoelectric materials are required to convert the incoming

electromagnetic signal to an acoustic one, and vice versa. Crystalline materials are usually chosen in order to obtain low attenuation of the waves. The materials most often used for SAW devices are quartz (X direction on ST cut) which has a low temperature coefficient of delay, and lithium niobate (Y-Z) which has a higher coupling coefficient. Lithium niobate is preferred for wide percentage band width structures.

A major factor in the emergence of SAW was the invention of the Interdigital Transducer (IDT) which provides efficient transduction of electrical to acoustic energy and simultaneously enables the inherent versatility to be exploited. This transducer forms the basis for most of the wide variety of SAW devices in current use, including filters and delay lines. The most basic interdigital device is a delay line, consisting of two IDTs on a piezoelectric substrate. Bandpass filters, dispersive pulse-compression filters and tapped delay lines are all based on the same principle, but with more sophisticated transducers.

The interdigital transducer consists of a series of interleaved electrodes made of a metal film deposited on a piezoelectric substrate, as shown in Figure 1. The width of the electrodes is equal to the width of the interelectrode gaps. An applied voltage will cause, through the piezoelectric effect, a strain pattern of periodicity L , the periodicity of the structure. If the frequency is such that L is close to the surface wave wavelength there is strong coupling into surface wave energy and, by symmetry, surface waves are launched in two opposite directions. The stressed pattern excited by the transducer corresponds to the sum of the stress of these two waves, i.e., a standing-wave stress pattern. A second transducer can be used to detect surface waves, thus forming a delay line. The unwanted surface waves are absorbed at the ends of the crystal by means of wax or adhesive tape.

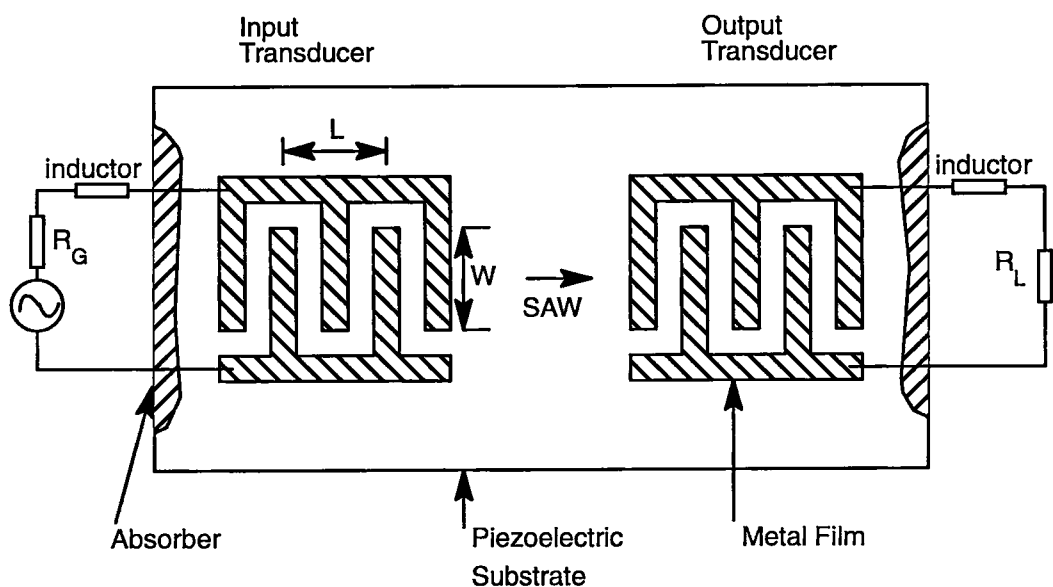


Figure 1: The interdigital transducer structure on a piezoelectric substrate

Practical transducers can be quite efficient, converting most of the available electrical power into surface wave power. However, half of the power is radiated in an unwanted direction giving a loss of 3 dB and in a device with two transducers this factor contributes 6 dB to the total insertion loss. Second-order effects, such as coupling efficiency, resistive losses and impedance mismatch, raise the insertion loss of practical filters to 15-20 dB. Losses due to second-order effects can be reduced. The surface wave propagates with little attenuation, and diffraction spreading can be minimised by using a sufficiently wide aperture (W), so that the output transducer is in the near field of the input transducer. For low loss one or more lumped components are usually added to match the transducer electrically to the source or load. The transducer impedance is largely capacitive and often it is sufficient to tune it using a series inductor, as shown in Figure 1. The aperture W influences the transducer impedance and the diffraction spreading, but can often be chosen such that minimal diffraction spreading and an impedance convenient for matching are both obtained. Typical apertures are 20 to 100 wavelengths, or a few mm, and are convenient for fabrication.

With appropriate design, practical devices can give insertion losses 10 dB or less. However, the devices are usually designed to give larger losses in order to reduce reflections. It is consequence of the bidirectional nature of the transducer that, when it is well matched to an electrical source or load, it reflects incident surface waves quite strongly. This gives rise to an unwanted additional output signal known as the triple-transit signal, due to surface wave traversing the device three times. The triple transit signal is often suppressed by deliberately avoiding a good electrical match to the source load, and in consequence the insertion loss usually exceeds 15 dB. However, some more complex types of transducer are unidirectional, generating surface waves in only one direction, and these enable low losses to be obtained while still suppressing the unwanted reflections.

In SAW devices, the frequency response is determined by the finger spacing and overlap of the interdigital comb structures used as input and output transducers.

Generally the SAW filter is configured with two IDT's, one each for transmission and reception. One is the normal IDT shape, with fixed space and overlenght between fingers, and the other is the weighted type IDT with a different pitch and overlenght between fingers. The desired complicated frequency characteristics are achieved by using the most suitable pitch and space between electrode fingers in the weighted type IDT.

The transducers shown in Figure 1 are uniform, in the sense that the pitch and overlap of the electrodes do not vary in the transducers. Non-uniform IDT's are the basis of a variety of SAW devices. If the electrode overlap varies, the transducer is said to be apodised.

Figure 2 shows a device with one uniform and one apodised transducer. This is the basis of most bandpass filters. Both transducers have constant pitch. If an impulse is applied to the input transducer, a packet of SAW energy propagates along the device. Each inter-electrode gap can be regarded as generating a delta function SAW

waveform, with the form of a line whose length corresponds to the electrode overlap. At the receiving transducer, each line generates a voltage proportional to the length of the line, and hence proportional to the electrode overlap. The output waveform, which is the device impulse response, thus closely resembles the transducer overlap function. The uniform transducer must be wide-band, have few electrodes, for this approach to be valid. The frequency is obtained by Fourier Transformation. This is the basis of a first-order design procedure, the required frequency response is transformed to the time domain, and the result gives the required electrode overlap function directly. The apodisation has a $(\sin x) / x$ form, giving a $(\sin Bt) / Bt$ form for the envelope of the impulse response; the frequency response then has the rectangular shape given by $\text{rect} [(\omega_0 - \omega) / 2B]$. The direct relationship between the transducer geometry and the impulse response also applies to transducers whose electrode pitch varies.

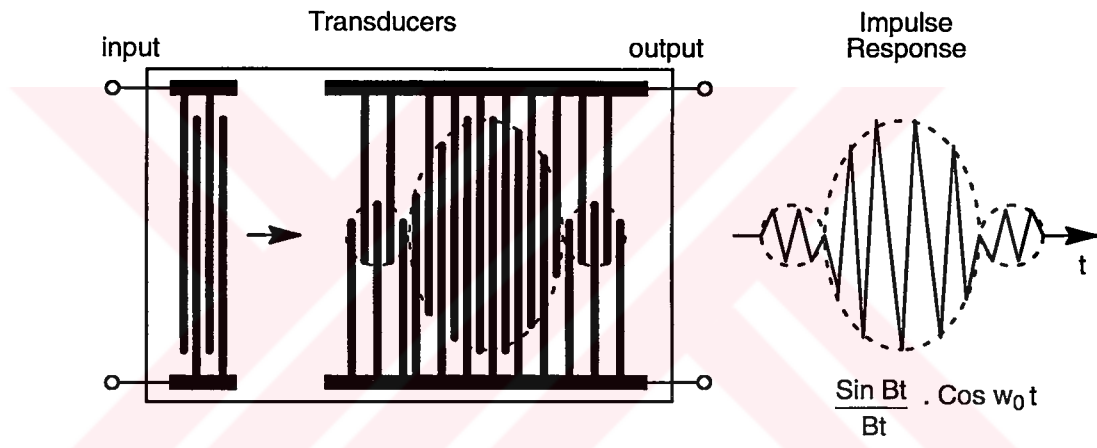


Figure 2: Bandpass filter using apodised transducer

In this thesis a comprehensive circuit model characterization of dispersive interdigital transducers with nonuniform electrode spacing is presented. The model is an extension of a three-port circuit which has been useful for representing periodic transducers. The extended model includes the effects of strong piezoelectric coupling whereby the acoustic waves and electric circuits interact, and it also accounts for reflections of acoustic waves which result from perturbations of the crystal surface by the metal electrodes. The circuit model is used to derive a transducer design procedure which determines the electrode positions and the apodization function required to reproduce a desired waveform. This procedure is applicable to the design of weighted dispersive filters.

By using presented circuit model for interdigital transducers, SAW filters are designed for GSM (Global System for Mobile Communications) IF and RF applications.

In 1982 CEPT (Conference of European Posts and Telegraphs), the main governing body of the European PTT's, created the GSM Committee and tasked it with

specifying a cellular pan-European public mobile communication system to operate in the 900 Mhz band.

A general objective of the GSM system is to provide a wide range of services and facilities, both voice and data, that are compatible with those offered by the existing fixed Public Services Telephone Networks (PSTN), Public Data Networks (PDN) and Integrated Services Digital Networks (ISDN). Another objective is to give compatibility of access to the GSM network for any mobile subscriber in any country which operates the system, and these countries must provide facilities for automatic roaming, locating and updating the mobile subscriber's status.

Features of the GSM system:

- Pan-European system
- Efficient use of frequency spectrum for high subscriber capacity
- SIM (Subscriber Identity Module) card for subscriber access
- Emergency calling
- Call forwarding
- Electronic registration of radio equipment
- VLSI (Very Large Scale Integration) technology for affordable equipment prices
- Low power consumption extends operating times

The SAW filter can be implemented in both Mobile Station (MS) and Base Transceiver Station (BTS) in GSM system. The GSM cellular radio network is shown in Figure 3.

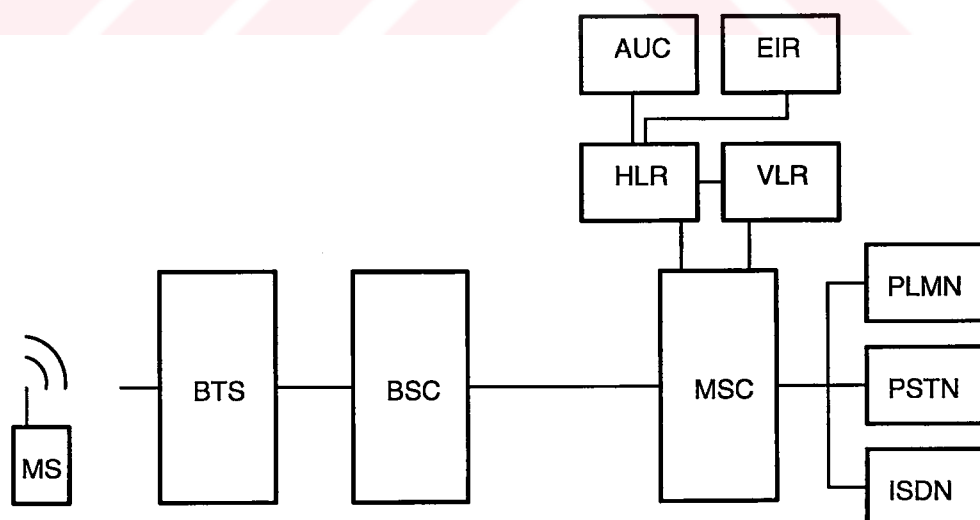


Figure 3: The GSM cellular radio network

The Mobile Station is the equipment used by a subscriber to access the services offered by the system. MS is connected to BTS by Um interface. The Base Station

System (BSS) is divided functionally into a BTS and Base Station Controller (BSC) and they are interconnected by the A-bis interface. The BSS is associated with the radio channel management including channel allocation, link quality supervision, transmission of associated signalling information and broadcast messages, as well as controlling transmitted power levels and frequency hopping. The BTS is the transmission equipment used to give radio coverage for a traffic cell. All control functions in the BSS are performed by the BSC. The radio equipment in a BSS may serve more than one cell, in which case the BSS will consist of several BTS's under the control of one BSC. The Mobile Switching Centre (MSC) is linked to the BSC via the A interface and performs all the switching functions needed for the operation of the mobile stations in the group of cells it services. The functions of an MSC include call routing and call control; procedures needed for interworking with other networks (e.g., PSTN, ISDN); procedures related to mobile station's mobility management such as paging to receive a call, location updating while roaming and authentication to prevent unauthorised access; as well as procedures required to implement handovers.

The Home Location Register (HLR) is a data base unit for the management of mobile subscribers. Part of the mobile location information is stored in the HLR, which allows the incoming calls to be routed to the MSC in command of the area where the MS roams. The HLR contains the International Mobile Subscriber Identity (IMSI) number which is used for the authentication of the subscriber by his Authentication Centre (AUC). The Equipment Identity Register (EIR) allows for stolen, fraudulent or faulty mobile stations to be identified by the network operators. The Visitor Location Register (VLR) is the functional unit that attends to a MS operating outside the area of its HLR. The visiting MS is automatically registered at the nearest MSC and the VLR is informed of the MSs arrival.

Performance, size and cost are important for GSM system like all other communication systems. SAW filters have small size, light weight and low insertion loss. They are also inexpensive and especially suited for use in high-volume mobile and portable telephones. Because of this, SAW filters are used in GSM system.

SAW filters which are used in GSM IF application have 70-71 MHz center frequency (f_0) and 200-400 KHz passband width (BW, bandwidth) at 3 dB attenuation. SAW filters which are used in GSM RF application have 902.5 Mhz and 947.5 MHz center frequencies and 25 MHz passband width at 3 dB attenuation. In chapter 5 of this thesis , three bandpass SAW filters were designed at 71 Mhz, 902.5 MHz and 947.5 MHz center frequencies. In addition, the results of the computer simulation for designed bandpass SAW filters were given in chapter 5.

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Önceleri Yüzey Akustik Dalgası ile ilgili bilgilerin çoğu sismograflar tarafından elde edilmiş ve daha sonraları elektroniğe uygulanmaya başlanmıştır. Bazen Rayleigh Dalgası olarak da bilinen Yüzey Akustik Dalga (SAW, Surface Acoustic Wave), bir sıvının veya katının yüzeyinde ilerleyen ve enerjisinin küçük bir bölümünü yitiren elastik dalgadır.

Akustik kütle dalgasının piezoelektrik kristalin bir yüzeyine konulan elektrotlarla uyarılmasıyla ilgili çalışmalar göstermiştir ki, gerçekte bu yolla uyarılan daha çok, akustik yüzey dalgasıdır. Bunun üzerine, daha önceleri akustik kütle dalgasının özelliklerine dayanarak geliştirilmiş olan elemanların akustik yüzey dalgasının kullanılmasıyla gerçekleştirilmesine çalışılmıştır. Akustik yüzey dalgaının piezoelektrik kristalin bir yüzeyine yerleştirilen, karşılıklı konulmuş ve birbirlerinin dişleri arasına yerleştirilmiş iki tarağa benzeyen elektrot sistemi ile (interdiijital transdüktör) uyarılabilmesi ve transdüktör fabrikasyonu sırasındaki işlemlerin, entegre devre yapımında kullanılan işlemlerle aynı olması, akustik yüzey dalga kullanılmasına dayanan elemanların gerçekleştirilmesinin kısa sürede yaygınlaştırılmasını sağlamıştır. Çeşitli işaret işleme fonksiyonlarını gerçekleştiren elemanlarda akustik yüzey dalga teknolojisinin kullanılma nedenleri olarak, küçük boyutlu ve hafif olması, ayar gerektirmeyen çok yönlü cevap fonksiyonunun elde edilebilmesi, tekrarlanabilir yapısı, sıcaklığa karşı kararlılığı ve radyasyona karşı dayanıklılığı da verilebilir.

Düşük akustik kayıpları olması nedeniyle, kristal yapılu maddeler Akustik Yüzey Dalga uygulamaları için özellikle seçilen malzemelerdir. Ayrıca kristaller, transdüktörün çalışabilmesi için gerekli olan piezoelektrik özelliğe sahiptirler. Piezoelektrik bir kristal yüzeyi üzerinde uyarılan akustik yüzey dalgalarını

kullanarak; filtreler, geciktirme hatları, rezonatörler, korelatörler, konvolverler ve ısı, basınç, sıcaklık, yer değiştirme duyargaçları gibi elemanlar gerçekleştirilebilmektedir. Bu elemanların çalışma frekansları genellikle 10 Mhz ile 3 Ghz arasındadır.

Yüzey akustik dalga teknolojisindeki mevcut bu özellikler, günümüzde yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanan GSM (Küresel Mobil İletişim Sistemi) sisteminde de yüzey akustik dalga esasına dayalı filtrelerin kullanılmasına olanak sağlamıştır.

Bu tez çalışmasında GSM sisteminde kullanılan SAW filtrelerin tasarımı konusu ele alınmıştır.

Bir piezoelektrik malzemede mekanik basınç ve gerilme, elektrik alanlarına bağlanabilir ve genel çözüm, elastik/elektromagnetik dalga eşitliklerine bağlı olarak elde edilen çözümlerden oluşur. Bu amaçla, Bölüm 2.' de piezoelektrik kristalin bünye denklemleri verilmiş; bu ortamdaki dalga denklemleri ve uyarılabilen akustik (elastik) dalgalar incelenmiştir.

Bölüm 3.' te, akustik yüzey dalganın uyarılmasında kullanılan, bir düzlem üzerinde gerçekleştirilen geçmeli tarak yapıya sahip transdüktörün analizi konusu işlenmiştir. Bu amaçla akustik yüzey dalga transdüktörünün geniş kapsamlı bir eşdeğer devre modeli verilmiştir.

Bölüm 4.'te, GSM sistemi tanıtılmış ve uygulamaları hakkında bilgi verilmiştir.

Bölüm 5.'te, akustik yüzey dalga esasına dayalı band geçiren filtre tasarımı konusu ele alınmış ve GSM sisteminin radyo ve ara frekanslarında kullanılmak üzere filtreler tasarlanmıştır.

BÖLÜM 2

PİEZOELEKTRİK ORTAMLARDA AKUSTİK DALGA PROPAGASYONU

2.1 Giriş

Bu çalışmada ele alınan filtreler, piezoelektrik ortamlarda uyarılan akustik (elastik) dalga yayılımı ile ilgili ilkelere dayandığından, bu filtrelerin çalışma esaslarını anlamak ve bunların tasarımlarını yapabilmek için, önce piezoelektrik ortamların özellikleri ve bu ortamlardaki dalga propagasyonu konuları incelenmiş, piezoelektrik ortamlara ilişkin bünne denklemleri, kütle dalgası ve yüzey dalgası konuları ele alınmıştır.

2.2 Bünne denklemleri

Bir piezoelektrik malzemenin tanımlanması için kullanılan fiziksel büyüklükler, aşağıdaki sembollerle gösterilmektedir [1, 2]:

u_i : Yer değıştirme miktarı

$S_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i})$: Uzama tensörü

T_{ij} : Gerilme tensörü

ψ : Elektriksel potansiyel fonksiyonu

E_i : Elektrik alanı

D_i : Elektriksel deplasman vektörü

Burada söz konusu olan tensörel büyüklükleri belirtmek için, kartezyen koordinat sistemi, x_i ($i = 1,2,3$), kullanılmaktadır. Buna göre, u_i büyüklüğü x_i eksenine doğrultusundaki yerdeğiştirme miktarını göstermektedir. Uzama tensöründe görülen virgülden sonraki indis, o indisli eksene göre kısmi türevi belirtmektedir.

Kristal üzerinde dış kuvvetler tarafından yapılan sonsuz küçük bir mekanik iş ve verilen sonsuz küçük bir elektriksel enerji, kristalin iç enerjisini, dU kadar arttıracaktır. Bu nedenle

$$dU = T_{ij} dS_{ij} + E_i dD_i \quad (2.1)$$

bağıntısı yazılabilir [1]. Burada, bünye denklemlerini kurmak üzere bir G fonksiyonu

$$G = U - E_i D_i \quad (2.2)$$

şeklinde tanımlanıp, S_{ij} ve E_i bağımsız değişkenler olarak seçilirlerse,

$$dG = T_{ij} dS_{ij} - D_i dE_i \quad (2.3)$$

elde edilir. Ayrıca,

$$dG = \frac{\partial G}{\partial S_{ij}} dS_{ij} + \frac{\partial G}{\partial E_i} dE_i \quad (2.4)$$

yazılabileceğinden,

$$T_{ij} = \frac{\partial G}{\partial S_{ij}}, \quad D_i = - \frac{\partial G}{\partial E_i} \quad (2.5)$$

olduğu görülür. S_{ij} ve E_i bağımsız değişkenler ve öteki değişkenlerde bunların fonksiyonu olduklarından,

$$dT_{ij} = \frac{\partial T_{ij}}{\partial S_{kl}} dS_{kl} + \frac{\partial T_{ij}}{\partial E_k} dE_k \quad (2.6)$$

$$dD_i = \frac{\partial D_i}{\partial S_{jk}} dS_{jk} + \frac{\partial D_i}{\partial E_j} dE_j$$

yazılabilir. Burada

$$c_{ijkl} = \frac{\partial T_{ij}}{\partial S_{kl}}, \quad e_{kij} = \frac{\partial D_k}{\partial S_{ij}}, \quad \epsilon_{ij} = \frac{\partial D_i}{\partial E_j} \quad (2.7)$$

tensörleri tanımlanabilir. Piezoelektrik malzemelerin lineerleştirilmiş modeli söz konusu olduğundan (2.6) ve (2.7) bağıntılarından

$$T_{ij} = c_{ijkl} S_{kl} - e_{kij} E_k \quad (2.8)$$

$$D_i = e_{ikl} S_{kl} + \epsilon_{ij} E_j$$

yazılabilir. Bu denklemler, piezoelektrik kristalin bünye denklemlerini oluşturmaktadır. (2.6) denklemlerinden,

$$\begin{aligned} c_{ijkl} &= c_{jikl} = c_{jilk} = c_{klij} \\ e_{ijk} &= e_{ikj} \\ \epsilon_{ij} &= \epsilon_{ji} \end{aligned} \quad (2.9)$$

bağıntılarının geçerli olduğu görülebilir. (2.9)' da verilen bağıntıları sağlayan c_{ijkl} , e_{ijk} ve ϵ_{ij} tensörlerine, sırasıyla, elastik, piezoelektrik ve dielektrik tensörleri denilmektedir.

Bünye denklemlerinin tensörel gösterimle yazılması, koordinat dönüşümlerinde ve basit olmayan bağıntıların çıkartılmasında yararlıdır. Nümerik hesapların yapılmasında ise matrisel gösterim daha kullanışlı olmaktadır. Matrisel gösterim,

herbiri 1,2,3 değerini alan (ij) ve (kl) indisleri yerine 1' den 6' ya kadar değer alan p ve q indislerini kullanmayı gerektirir. İndislerin değiştirilmesine ilişkin kural Tablo 2.1' de gösterilmiştir.

Buna göre yeni indisler kullanılarak,

$$\begin{aligned}
 T_p &: T_{ij} \\
 S_p &: S_{ij}, \quad i = j, \quad p = 1,2,3 \\
 S_p &: 2S_{ij}, \quad i \neq j, \quad p = 4,5,6 \\
 c_{pq} &= c_{ijkl}
 \end{aligned} \tag{2.10}$$

alınacaktır.

Tablo 2.1: Matrisel gösterimde indislerin değiştirilmesine ilişkin kural.

ij	11	22	33	23	32	13	31	12	21
p	1	2	3	4	4	5	5	6	6

Matrisel gösterim kullanılması durumunda (2.8) denklemleri,

$$\begin{aligned}
 \tilde{T} &= \tilde{c} \tilde{S} - \tilde{e}^T \tilde{E} \\
 \tilde{D} &= \tilde{e} \tilde{S} + \tilde{\varepsilon} \tilde{E}
 \end{aligned} \tag{2.11}$$

şeklini alırlar. Bu denklemlerde, $\tilde{T}$ ve $\tilde{S}$, sırasıyla, elemanları T_p ve S_p ($p = 1,2,...,6$) olan sütun matrisleridir. $\tilde{D}$ ve $\tilde{E}$ ise, sırasıyla, elemanları D_i ve E_i ($i = 1,2,3$) olan sütun matrislerdir. $\tilde{c} = [c_{pq}]$, 6 x 6 boyutunda, $\tilde{\varepsilon} = [\varepsilon_{ij}]$ ise, 3 x 3 boyutunda simetrik matrislerdir. $\tilde{e} = [e_{kp}]$, 3 x 6 boyutunda bir matristir. Kristal simetrisine bağlı olarak, bu matrislerin bazı elemanları sıfıra eşittir.

2.3 Piezoelektrik Ortamda Dalga Denklemleri

Sürekli bir ortamda Newton'un hareket denklemi,

$$T_{ij,i} = \rho \ddot{u}_j \quad (2.12)$$

ya da daha açık olarak,

$$\frac{\partial T_{1j}}{\partial x_1} + \frac{\partial T_{2j}}{\partial x_2} + \frac{\partial T_{3j}}{\partial x_3} = \rho \frac{\partial^2 u_j}{\partial t^2}, \quad (j = 1,2,3) \quad (2.13)$$

şeklinde verilmektedir. Bu denklemlerde ρ ortamın yoğunluğunu belirtmektedir. Ortamın piezoelektrik özellik göstermesi nedeniyle Maxwell denklemlerinin de dikkate alınması gerekir. Ortamda bir elektrik alanı yokken mekanik olarak ortaya çıkabilecek dalganın hızı 3000-5000 m/s' dir. Ortamda sadece elektromagnetik bir dalganın var olduğu düşünülürse, bu dalganın hızı yaklaşık olarak $3 \cdot 10^8$ m/s' dir [3]. Ortamda hem akustik dalga hem de elektromagnetik dalganın var olduğu düşünülürse, akustik dalganın hızı, elektromagnetik dalganın hızından çok daha küçük olduğundan elektrik alanı kuazi (yarı)-statik kabul edilebilir ve dolayısıyla kuazi-statik denklemler kullanılabilir. Bu durumda ikinci denklem sistemi,

$$D_{i,i} = 0 \quad (2.14)$$

daha açık olarak,

$$\text{div } \vec{D} = \frac{\partial D_1}{\partial x_1} + \frac{\partial D_2}{\partial x_2} + \frac{\partial D_3}{\partial x_3} = 0 \quad (2.15)$$

olacaktır.

(2.12) ve (2.14) denklemlerinde, (2.8) denklemleri ve uzama tensörünün yer değiştirme miktarına bağlı olan ifadesi yerine konulursa,

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{12} & A_{22} & A_{23} \\ A_{13} & A_{23} & A_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} \\ B_{21} \\ B_{31} \end{bmatrix} \cdot \psi = \rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

ve

$$\begin{bmatrix} B_{11} & B_{21} & B_{31} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} - E \cdot \psi = 0 \quad (2.17)$$

denklemleri elde edilir. Burada,

$$A_{11} = c_{11} \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} + c_{66} \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} + c_{55} \frac{\partial^2}{\partial x_3^2} + 2c_{16} \frac{\partial^2}{\partial x_1 \partial x_2} + 2c_{15} \frac{\partial^2}{\partial x_1 \partial x_3} + 2c_{56} \frac{\partial^2}{\partial x_2 \partial x_3}$$

$$A_{12} = c_{16} \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} + c_{26} \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} + c_{45} \frac{\partial^2}{\partial x_3^2} + (c_{12} + c_{66}) \frac{\partial^2}{\partial x_1 \partial x_2} + (c_{14} + c_{56}) \frac{\partial^2}{\partial x_1 \partial x_3} \\ + (c_{25} + c_{46}) \frac{\partial^2}{\partial x_2 \partial x_3}$$

$$A_{13} = c_{15} \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} + c_{46} \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} + c_{35} \frac{\partial^2}{\partial x_3^2} + (c_{14} + c_{56}) \frac{\partial^2}{\partial x_1 \partial x_2} + (c_{13} + c_{55}) \frac{\partial^2}{\partial x_1 \partial x_3} \\ + (c_{45} + c_{36}) \frac{\partial^2}{\partial x_2 \partial x_3}$$

$$A_{22} = c_{66} \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} + c_{22} \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} + c_{44} \frac{\partial^2}{\partial x_3^2} + 2c_{26} \frac{\partial^2}{\partial x_1 \partial x_2} + 2c_{46} \frac{\partial^2}{\partial x_1 \partial x_3} + 2c_{24} \frac{\partial^2}{\partial x_2 \partial x_3}$$

$$A_{23} = c_{56} \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} + c_{24} \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} + c_{34} \frac{\partial^2}{\partial x_3^2} + (c_{25} + c_{46}) \frac{\partial^2}{\partial x_1 \partial x_2} + (c_{36} + c_{45}) \frac{\partial^2}{\partial x_1 \partial x_3} \\ + (c_{44} + c_{23}) \frac{\partial^2}{\partial x_2 \partial x_3}$$

$$A_{33} = c_{55} \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} + c_{44} \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} + c_{33} \frac{\partial^2}{\partial x_3^2} + 2c_{45} \frac{\partial^2}{\partial x_1 \partial x_2} + 2c_{35} \frac{\partial^2}{\partial x_1 \partial x_3} + 2c_{34} \frac{\partial^2}{\partial x_2 \partial x_3} \quad (2.18)$$

ve

$$B_{11} = e_{11} \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} + e_{26} \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} + e_{35} \frac{\partial^2}{\partial x_3^2} + (e_{21} + e_{16}) \frac{\partial^2}{\partial x_1 \partial x_2} + (e_{31} + e_{15}) \frac{\partial^2}{\partial x_1 \partial x_3} \\ + (e_{25} + e_{36}) \frac{\partial^2}{\partial x_2 \partial x_3}$$

$$B_{21} = e_{16} \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} + e_{22} \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} + e_{34} \frac{\partial^2}{\partial x_3^2} + (e_{12} + e_{26}) \frac{\partial^2}{\partial x_1 \partial x_2} + (e_{36} + e_{14}) \frac{\partial^2}{\partial x_1 \partial x_3} \\ + (e_{24} + e_{32}) \frac{\partial^2}{\partial x_2 \partial x_3}$$

$$B_{31} = e_{15} \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} + e_{24} \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} + e_{33} \frac{\partial^2}{\partial x_3^2} + (e_{14} + e_{25}) \frac{\partial^2}{\partial x_1 \partial x_2} + (e_{13} + e_{35}) \frac{\partial^2}{\partial x_1 \partial x_3} \\ + (e_{23} + e_{34}) \frac{\partial^2}{\partial x_2 \partial x_3}$$

$$E = \varepsilon_{11} \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} + \varepsilon_{22} \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} + \varepsilon_{33} \frac{\partial^2}{\partial x_3^2} + 2\varepsilon_{12} \frac{\partial^2}{\partial x_1 \partial x_2} + 2\varepsilon_{13} \frac{\partial^2}{\partial x_1 \partial x_3} + 2\varepsilon_{23} \frac{\partial^2}{\partial x_2 \partial x_3} \quad (2.19)$$

olarak tanımlanmıştır. Bu denklemlerde, 21 tane elastik, 18 tane piezoelektrik ve 6 tane dielektrik katsayısı görülmektedir. Kristal ortamlardaki mevcut simetrilere göre, bu katsayıların bazıları sıfır, bazıları da birbirine eşittir. Bu nedenle yukarıda genel

durum için verilmiş olan denklemlerde bir basitleştirme yapılabilir. (2.16) ve (2.17) denklemlerinde yer değiştirme miktarları ve elektriksel potansiyel fonksiyonu, B_{11} , B_{21} ve B_{31} operatörleri ile birbirine bağlıdır. Ortamın piezoelektrik özellikte olmaması halinde, (2.16) ve (2.17) denklemlerinin birbirleriyle bağlantısı kalmaz.

(2.16) ve (2.17) denklemleri kullanılarak herhangi bir piezoelektrik ortamdaki dalga propagasyonu konusu incelenebilir. Ancak, bu denklemlerin çözümü için, ele alınan probleme özgü sınır koşullarının kullanılması gerekmektedir. Sınır koşulları; gerilme tensörünün bileşenlerinin, yer değiştirme miktarının, elektrik alanının ve deplasman vektörünün sağlayacağı denklemlerdir. (2.16) ve (2.17)' deki diferansiyel denklemler, yer değiştirme miktarları ve elektriksel potansiyel fonksiyonu cinsinden yazılmış olduklarından, gerilme tensörü ve deplasman vektörünü de bunlar cinsinden yazmak gerekir. (2.8) denklemleri kullanılarak,

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} \\ a_{61} & a_{62} & a_{63} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} \\ b_{21} \\ b_{31} \\ b_{41} \\ b_{51} \\ b_{61} \end{bmatrix} \cdot \psi \quad (2.20)$$

ve

$$\begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} n_{11} \\ n_{21} \\ n_{31} \end{bmatrix} \cdot \psi \quad (2.21)$$

denklemleri elde edilir. Burada,

$$a_{11} = c_{11} \frac{\partial}{\partial x_1} + c_{16} \frac{\partial}{\partial x_2} + c_{15} \frac{\partial}{\partial x_3}$$

$$a_{12} = c_{16} \frac{\partial}{\partial x_1} + c_{12} \frac{\partial}{\partial x_2} + c_{14} \frac{\partial}{\partial x_3}$$

$$a_{13} = c_{15} \frac{\partial}{\partial x_1} + c_{14} \frac{\partial}{\partial x_2} + c_{13} \frac{\partial}{\partial x_3}$$

$$a_{21} = c_{12} \frac{\partial}{\partial x_1} + c_{26} \frac{\partial}{\partial x_2} + c_{25} \frac{\partial}{\partial x_3}$$

$$a_{22} = c_{26} \frac{\partial}{\partial x_1} + c_{22} \frac{\partial}{\partial x_2} + c_{24} \frac{\partial}{\partial x_3}$$

$$a_{23} = c_{25} \frac{\partial}{\partial x_1} + c_{24} \frac{\partial}{\partial x_2} + c_{23} \frac{\partial}{\partial x_3}$$

$$a_{31} = c_{13} \frac{\partial}{\partial x_1} + c_{36} \frac{\partial}{\partial x_2} + c_{35} \frac{\partial}{\partial x_3}$$

$$a_{32} = c_{36} \frac{\partial}{\partial x_1} + c_{23} \frac{\partial}{\partial x_2} + c_{34} \frac{\partial}{\partial x_3}$$

$$a_{33} = c_{35} \frac{\partial}{\partial x_1} + c_{34} \frac{\partial}{\partial x_2} + c_{33} \frac{\partial}{\partial x_3}$$

$$a_{41} = c_{14} \frac{\partial}{\partial x_1} + c_{46} \frac{\partial}{\partial x_2} + c_{45} \frac{\partial}{\partial x_3}$$

$$a_{42} = c_{46} \frac{\partial}{\partial x_1} + c_{24} \frac{\partial}{\partial x_2} + c_{44} \frac{\partial}{\partial x_3}$$

$$a_{43} = c_{45} \frac{\partial}{\partial x_1} + c_{44} \frac{\partial}{\partial x_2} + c_{34} \frac{\partial}{\partial x_3}$$

$$a_{51} = c_{15} \frac{\partial}{\partial x_1} + c_{56} \frac{\partial}{\partial x_2} + c_{55} \frac{\partial}{\partial x_3}$$

$$a_{52} = c_{56} \frac{\partial}{\partial x_1} + c_{25} \frac{\partial}{\partial x_2} + c_{45} \frac{\partial}{\partial x_3}$$

$$a_{53} = c_{55} \frac{\partial}{\partial x_1} + c_{45} \frac{\partial}{\partial x_2} + c_{35} \frac{\partial}{\partial x_3}$$

$$a_{61} = c_{16} \frac{\partial}{\partial x_1} + c_{66} \frac{\partial}{\partial x_2} + c_{56} \frac{\partial}{\partial x_3}$$

$$a_{62} = c_{66} \frac{\partial}{\partial x_1} + c_{26} \frac{\partial}{\partial x_2} + c_{46} \frac{\partial}{\partial x_3}$$

$$a_{63} = c_{56} \frac{\partial}{\partial x_1} + c_{46} \frac{\partial}{\partial x_2} + c_{36} \frac{\partial}{\partial x_3} \quad (2.22)$$

ve

$$b_{p1} = e_{1p} \frac{\partial}{\partial x_1} + e_{2p} \frac{\partial}{\partial x_2} + e_{3p} \frac{\partial}{\partial x_3}, \quad (p = 1, 2, \dots, 6) \quad (2.23)$$

olarak tanımlanmışlardır. (2.21) denklemlerinde görülen operatörler ise,

$$m_{11} = e_{11} \frac{\partial}{\partial x_1} + e_{16} \frac{\partial}{\partial x_2} + e_{15} \frac{\partial}{\partial x_3}$$

$$m_{12} = e_{16} \frac{\partial}{\partial x_1} + e_{12} \frac{\partial}{\partial x_2} + e_{14} \frac{\partial}{\partial x_3}$$

$$m_{13} = e_{15} \frac{\partial}{\partial x_1} + e_{14} \frac{\partial}{\partial x_2} + e_{13} \frac{\partial}{\partial x_3}$$

$$m_{21} = e_{21} \frac{\partial}{\partial x_1} + e_{26} \frac{\partial}{\partial x_2} + e_{25} \frac{\partial}{\partial x_3}$$

$$m_{22} = e_{26} \frac{\partial}{\partial x_1} + e_{22} \frac{\partial}{\partial x_2} + e_{24} \frac{\partial}{\partial x_3}$$

$$m_{23} = e_{25} \frac{\partial}{\partial x_1} + e_{24} \frac{\partial}{\partial x_2} + e_{23} \frac{\partial}{\partial x_3}$$

$$m_{31} = e_{31} \frac{\partial}{\partial x_1} + e_{36} \frac{\partial}{\partial x_2} + e_{35} \frac{\partial}{\partial x_3}$$

$$m_{32} = e_{36} \frac{\partial}{\partial x_1} + e_{32} \frac{\partial}{\partial x_2} + e_{34} \frac{\partial}{\partial x_3}$$

$$m_{33} = e_{35} \frac{\partial}{\partial x_1} + e_{34} \frac{\partial}{\partial x_2} + e_{33} \frac{\partial}{\partial x_3}$$

$$n_{11} = \varepsilon_{11} \frac{\partial}{\partial x_1} + \varepsilon_{12} \frac{\partial}{\partial x_2} + \varepsilon_{13} \frac{\partial}{\partial x_3}$$

$$n_{21} = \varepsilon_{12} \frac{\partial}{\partial x_1} + \varepsilon_{22} \frac{\partial}{\partial x_2} + \varepsilon_{23} \frac{\partial}{\partial x_3}$$

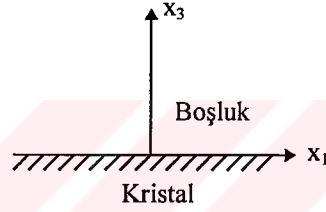
$$n_{31} = \varepsilon_{13} \frac{\partial}{\partial x_1} + \varepsilon_{23} \frac{\partial}{\partial x_2} + \varepsilon_{33} \frac{\partial}{\partial x_3}$$

(2.24)

bağıntılarıyla tanımlanmışlardır.

2.3.1 Yüzey Dalgası

Elastik ortamın sınırsız değil, $x_3 = 0$ düzlemi ile sınırlandırıldığı ve Şekil 2.1' de gösterildiği gibi $x_3 \leq 0$ uzayını kapsadığı düşünülürse, bu ortamda bir yüzey dalga propagasyonu söz konusu olur.



Şekil 2.1: Piezoelektrik kristalde seçilen eksen takımı

Anizotropik ortamda, piezoelektrik etkinin olmadığı durumlarda bile, yüzey dalga propagasyonu probleminin çözümünü, analitik olarak elde etmek mümkün değildir. Anizotropik ortamlarda çözüm nümerik olarak elde edilmektedir. Anizotropik ortamda dalga, derinliğe doğru sönümlü titreşim yaparak zayıflar.

$x_3 = 0$ düzlemiyle sınırlı piezoelektrik kristaldeki yüzey dalga propagasyonunda yer değiştirme miktarları, u_i ($i = 1,2,3$) ve elektriksel potansiyel fonksiyonu ψ , (2.16) ve (2.17) denklemlerini sağlamak zorundadır. Bu denklemleri sağlayacak u_i ve ψ değerleri,

$$u_i = A_i e^{jkx_1} e^{jk\ell_3 x_3} e^{-j\omega t}, \quad i = 1,2,3 \quad (2.25)$$

$$\psi = A_4 e^{jkx_1} e^{jk\ell_3 x_3} e^{-j\omega t}$$

şeklinde olacaktır. Bu ifadeler (2.16) ve (2.17)' de yerine konulursa ,

$$\begin{bmatrix} \tilde{A}_{11} + \rho\omega^2 & \tilde{A}_{12} & \tilde{A}_{13} & \tilde{B}_{11} \\ \tilde{A}_{12} & A_{22} + \rho\omega^2 & \tilde{A}_{23} & \tilde{B}_{21} \\ \tilde{A}_{13} & \tilde{A}_{23} & A_{33} + \rho\omega^2 & \tilde{B}_{31} \\ \tilde{B}_{11} & \tilde{B}_{21} & \tilde{B}_{31} & -\tilde{E} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

homojen cebirsel denklem sistemi elde edilir. Bu denklem sistemindeki katsayılar matrisinde görülen $\tilde{A}_{ij}$, $\tilde{B}_{ij}$ ve $\tilde{E}$ katsayıları, (2.18) ve (2.19)' da verilen bağıntıların yardımıyla,

$$\tilde{A}_{11} = c_{55}\ell_3^2 + 2c_{15}\ell_3 + c_{11}$$

$$\tilde{A}_{12} = c_{45}\ell_3^2 + (c_{14} + c_{56})\ell_3 + c_{16}$$

$$\tilde{A}_{13} = c_{35}\ell_3^2 + (c_{13} + c_{55})\ell_3 + c_{15}$$

$$\tilde{A}_{22} = c_{44}\ell_3^2 + 2c_{46}\ell_3 + c_{66}$$

$$\tilde{A}_{23} = c_{34}\ell_3^2 + (c_{36} + c_{45})\ell_3 + c_{56}$$

$$\tilde{A}_{33} = c_{33}\ell_3^2 + 2c_{35}\ell_3 + c_{55}$$

$$\tilde{B}_{11} = e_{35}\ell_3^2 + (e_{31} + e_{15})\ell_3 + e_{11}$$

$$\tilde{B}_{21} = e_{34}\ell_3^2 + (e_{36} + e_{14})\ell_3 + e_{16}$$

$$\tilde{B}_{31} = e_{33}\ell_3^2 + (e_{35} + e_{13})\ell_3 + e_{15}$$

$$\tilde{E} = \varepsilon_{33}\ell_3^2 + 2\varepsilon_{13}\ell_3 + \varepsilon_{11} \quad (2.27)$$

olarak elde edilir. (2.26) ile verilen homojen cebirsel denklem sisteminin sıfırdan farklı bir çözümünün olabilmesi için katsayılar matrisinin determinantının sıfır olması gerekir. Bu determinant ℓ_3 ve v parametrelerine bağlı olarak aşağıdaki gibi çok terimlidir.

$$\Delta = a_8(v)\ell_3^8 + a_7(v)\ell_3^7 + a_6(v)\ell_3^6 + a_5(v)\ell_3^5 + a_4(v)\ell_3^4 + a_3(v)\ell_3^3 + a_2(v)\ell_3^2 + a_1(v)\ell_3 + a_0(v) \quad (2.28)$$

(2.28) bağıntısındaki katsayılar, malzeme sabitlerine ve v parametresine bağlı olarak, bir bilgisayar programıyla hesaplanabilirler. (2.28)' deki çok terimliyi sıfır yapan köklerin sayısı sekizdir. $x_3 \rightarrow -\infty$ için (2.25) ile verilen yer değiştirme miktarları ve potansiyel fonksiyonu sıfıra gitmelidir.

$$\lim_{x_3 \rightarrow -\infty} e^{jk\ell_3 x_3} = \lim_{x_3 \rightarrow -\infty} e^{jk(a+jb)x_3} = \lim_{x_3 \rightarrow -\infty} e^{-bkx_3} e^{jakx_3} = 0 \quad (2.29)$$

Yukarıdaki eşitliğin sağlanabilmesi için $b < 0$ olmalıdır. Bu durumda bulunacak sekiz kökten, kompleks düzlemin alt yarısında olan dördünün göz önüne alınması gerekir. Bu dört kök, $\ell_{3,i}$ ($i = 1,2,3,4$) ile gösterilirse ve (2.26) denkleminde yerine konulursa, katsayılar matrisi determinantı sıfır olacağı için A_i ($i = 1,2,3,4$) aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$\begin{bmatrix} A_1^{(i)} \\ A_2^{(i)} \\ A_3^{(i)} \\ A_4^{(i)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_1^{(i)} \\ \alpha_2^{(i)} \\ \alpha_3^{(i)} \\ \alpha_4^{(i)} \end{bmatrix} \cdot C_i, \quad (i = 1,2,3,4) \quad (2.30)$$

Bu durumda (2.16) ve (2.17) denklemlerini ve $x_3 \rightarrow -\infty$ 'daki koşulunu sağlayan çözüm,

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ \psi \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^4 C_i \begin{bmatrix} \alpha_1^{(i)} \\ \alpha_2^{(i)} \\ \alpha_3^{(i)} \\ \alpha_4^{(i)} \end{bmatrix} e^{jkx_1} e^{jk\ell_{3,i}x_3} e^{-j\omega t} \quad (2.31)$$

şeklinde olacaktır. Bu denklemdeki $\alpha^{(i)}$ vektörü, $\ell_{3,i}$ köküne karşı düşen özvektör olmaktadır ve (2.25) denklemini sağlamaktadır.

Bu çözümü sağlaması gereken öteki sınır koşulları, $x_3 = 0$ düzlemi için verilecek olan mekanik ve elektriksel sınır koşullarıdır. $x_3 = 0$ düzlemi serbest olduğundan, bu düzlemdeki T_{3j} gerilmeleri sıfır olacaktır. Ayrıca $x_3 = 0$ düzleminde elektriksel deplasman vektörünün x_3 doğrultusundaki normal bileşeni ve elektriksel alan vektörünün x_1 doğrultusundaki teğetsel bileşeni sürekli olmalıdır. Daha açık olarak,

$$T_{31} = 0, \quad T_{32} = 0, \quad T_{33} = 0$$

$$D'_3(0^-) = D'_3(0^+), \quad D'_3 = -\epsilon_0 \frac{\partial \psi'}{\partial x_3} \quad (2.32)$$

$$E'_1(0^-) = E'_1(0^+), \quad E'_1 = -\frac{\partial \psi'}{\partial x_1}$$

yazılabilir. $x_3 > 0$ bölgesinin boşluk olduğu düşünülebilir. Bu durumda, bu ortam için ψ' potansiyel fonksiyonu,

$$\frac{\partial^2 \psi'}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 \psi'}{\partial x_3^2} = 0 \quad (2.33)$$

denklemini sağlayacaktır. Bu denklemin çözümü,

$$\psi' = Ae^{jkx_1} e^{jk\beta x_3} e^{-j\omega t} \quad (2.34)$$

biçimindedir [1]. Buradaki β değeri, (2.34) ifadesinin (2.33)' de yerine konulması ile,

$$\beta = \pm j \quad (2.35)$$

olarak elde edilir. $\lim_{x_3 \rightarrow \infty} \psi' = 0$ olması için $\beta = +j$ alınmalıdır. Bu durumda ψ' potansiyel fonksiyonu,

$$\psi' = A e^{jkx_1} e^{-kx_3} e^{-j\omega t} \quad (2.36)$$

olarak elde edilir. $x_3 = 0$ ' da her iki ortamdaki elektriksel alanların teğetsel bileşenlerinin sürekliliğini sağlamak için (2.31) ve (2.36)' da verilen potansiyel fonksiyonları birbirine eşitlenirse,

$$A = \sum_{i=1}^4 C_i \alpha_4^{(i)} \quad (2.37)$$

olduğu görülür. (2.36)' nın (2.32)' deki elektriksel deplasman vektörünü belirleyen ifadede yerine konulması ile $x_3 > 0$ için deplasman vektörünün x_3 doğrultusundaki bileşeni,

$$D'_3 = \epsilon_0 k \left(\sum_{i=1}^4 C_i \alpha_4^{(i)} \right) e^{jkx_1} e^{-kx_3} e^{-j\omega t} \quad (2.38)$$

olarak elde edilir. $x_3 = 0$ için bu ifade

$$D'_3(0^+) = \epsilon_0 k \left(\sum_{i=1}^4 C_i \alpha_4^{(i)} \right) e^{jkx_1} e^{-j\omega t} \quad (2.39)$$

şeklini alır.

(2.31) denklemleri (2.21)' de yerine konulur ve $x_3 = 0$ alınırsa, kristal ortamdaki deplasman vektörünün x_3 doğrultusundaki bileşeni,

$$D'_3(0^-) = jk \sum_{i=1}^4 \left\{ [(e_{31} + e_{35}\ell_{3,i})\alpha_1^{(i)} + (e_{36} + e_{34}\ell_{3,i})\alpha_2^{(i)} + (e_{35} + e_{33}\ell_{3,i})\alpha_3^{(i)} - (\epsilon_{13} + \epsilon_{33}\ell_{3,i})\alpha_4^{(i)}] c_i \right\} e^{jkx_i} e^{-j\omega t} \quad (2.40)$$

olarak bulunur. $D'_3(0^-) = D'_3(0^+)$ eşitliğinden elektriksel deplasman vektörünün sınır koşulunu sağlayan C_i katsayılarına bağlı bir denklem elde edilir. (2.31) denklemleri (2.20)' de yerine konulup $x_3 = 0$ için $T_{3j} = 0$ ($j = 1, 2, 3$) koşulundan C_i katsayılarına bağlı üç denklem daha elde edilir. Elde edilen denklemler aşağıdaki gibidir.

$$\begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} & M_{14} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} & M_{24} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} & M_{34} \\ M_{41} & M_{42} & M_{43} & M_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ c_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.41)$$

Burada,

$$M_{1i} = (c_{35}\ell_{3,i} + c_{13})\alpha_1^{(i)} + (c_{34}\ell_{3,i} + c_{36})\alpha_2^{(i)} + (c_{33}\ell_{3,i} + c_{35})\alpha_3^{(i)} + (e_{33}\ell_{3,i} + e_{11})\alpha_4^{(i)}$$

$$M_{2i} = (c_{45}\ell_{3,i} + c_{14})\alpha_1^{(i)} + (c_{44}\ell_{3,i} + c_{46})\alpha_2^{(i)} + (c_{34}\ell_{3,i} + c_{45})\alpha_3^{(i)} + (e_{34}\ell_{3,i} + e_{14})\alpha_4^{(i)}$$

$$M_{3i} = (c_{55}\ell_{3,i} + c_{15})\alpha_1^{(i)} + (c_{45}\ell_{3,i} + c_{56})\alpha_2^{(i)} + (c_{35}\ell_{3,i} + c_{55})\alpha_3^{(i)} + (e_{35}\ell_{3,i} + e_{15})\alpha_4^{(i)}$$

$$M_{4i} = (e_{31}\ell_{3,i} + e_{36})\alpha_1^{(i)} + (e_{36}\ell_{3,i} + e_{33})\alpha_2^{(i)} + (e_{35}\ell_{3,i} + e_{34})\alpha_3^{(i)} + (\epsilon_{13} + \epsilon_{33}\ell_{3,i} + j\epsilon_0)\alpha_4^{(i)} \quad (2.42)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Yüzey dalga propagasyonundan söz edebilmek için (2.41)' de verilen denklem sisteminin sıfır çözümünden başka bir çözümünün olması için katsayılar matrisinin determinantının sıfır olması gerekir. Bu determinant $\ell_{3,i}$ ' ye dolayısıyla v ' ye bağlıdır. Bu durumda determinanti sıfır yapan gerçel v değeri, bir bilgisayar programı yardımıyla bulunabilir. Bu v değeri sözü edilen yüzey dalgasının hızı olacaktır.

Bazı uygulamalarda, yüzey dalgaının uyarıldığı kristal ortamın belirli düzlemle sınırlandırılan yüzeyi elektrodlandırılır. Kuvvetli piezoelektrik özelliğe sahip malzemeler için elektrodun elektriksel etkisi büyük olduğundan, elektrodun kütlelesel etkisi ihmal edilebilir. $x_3 = 0$ düzleminin çok ince iletken malzeme ile elektrodlanmış olduğu düşünüldüğünde, bu düzlem üzerinde yazılan mekanik sınır koşulları elektrotsuz hal için elde edilenlerle aynı olur. Ancak elektrodlu halde elektrik alanının teğetsel bileşeni sıfır olur ($E_1(0) = 0$). Bu durumda sınır koşullarından elde edilmiş olan (2.41)'deki dördüncü denklemdeki katsayılar,

$$M_{4i} = \alpha_4^{(i)} \quad (2.43)$$

şeklinde olacaktır. Elektrotlanmış yüzeydeki dalga hızı, elektrotlanmamış yüzeydeki dalga hızından daha küçüktür.

Tablo 2.2' de akustik yüzey dalga uygulamalarında kullanılan kristal malzemeler için hesaplanmış yüzey dalga hızları verilmiştir [4].

Tablo 2.2: Taban malzemesine göre hesaplanmış elektrotlu ve elektrotsuz bölgelerdeki yüzey dalga hızları.

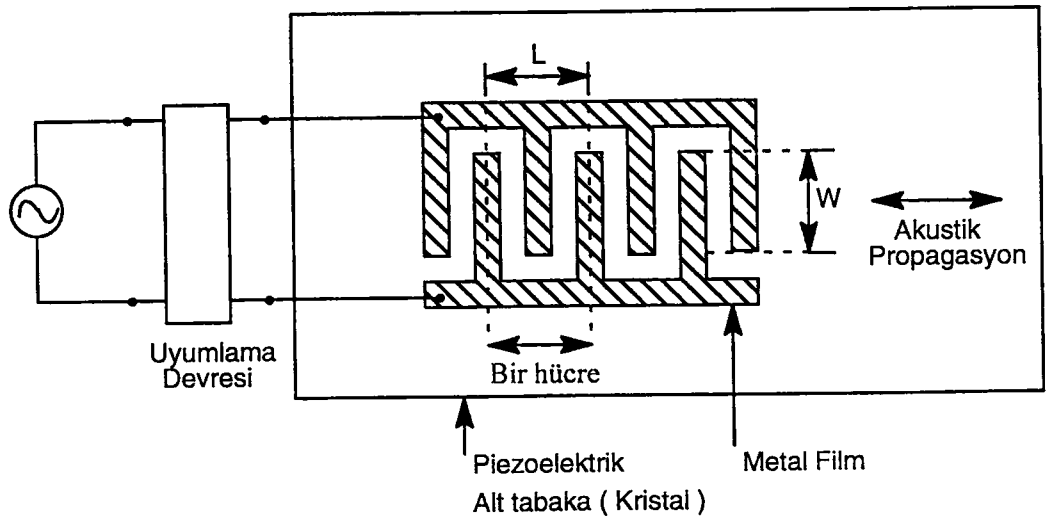
Taban Malzemesi (Kristal)	Kesim Düzleminin Normali	Propagasyon Doğrultusu	Yüzey Dalga Hızı (ms^{-1}) (Elektrotsuz bölge)	Yüzey Dalga Hızı (ms^{-1}) (Elektrotlu bölge)
LiNbO ₃	Y	Z	3485	3399.27
Quartz	Y	X	3159	3156.16
Quartz	ST	X	3158	3156.17
Bi ₁₂ GeO ₂₀	(100)	(011)	1681	1669.57
Bi ₁₂ GeO ₂₀	(111)	(110)	1708	1693.94
LiTaO ₃	Z	Y	3329	3309.36
ZnO	Z		2715	2702.86
AlN / Al ₂ O ₃	X	Z	6170	-

BÖLÜM 3

TRANSDÜKTÖRLER

3.1 Giriş

İnterdijital transdüktör (IDT, Interdigital Transducer), bir piezoelektrik malzeme üzerine fotolitografik yöntemle metal filmten elektrotlar bırakılmasıyla elde edilir. Piezoelektrik kristalin bir yüzüne karşılıklı olarak konulmuş ve birbirlerinin dişleri arasına yerleştirilmiş, tıraşa benzeyen iki elektrot sistemi ile akustik yüzey dalga verimli bir biçimde uyarılmakta, elektriksel ve akustik enerji arasındaki dönüşüm sağlanabilmektedir. Bu şekilde akustik yüzey dalga, interdijital transdüktör sayesinde üretilip, sezimlenebilmektedir. Şekil 3.1' de interdijital transdüktörün yapısı verilmiştir.



Şekil 3.1: İnterdijital Transdüktör

Elektrotlara ω açısal frekansı ile değişen bir gerilim uygulandığında, kristalin içerisinde elektrik alanı meydana gelir ve piezoelektrik bağ nedeniyle, elektrot geometresine göre bir gerilme yayılımı ortaya çıkar. Elektrot geometrisi periyodik ise ve bu periyot (L), yüzey akustik dalga hızına bağlı olarak, uygulanan gerilimin frekansına karşı düşen dalga boyu kadarsa, herbir elektrotlu bölgeden iki yöne doğru yayımlanan dalgalar aynı fazda birbirlerine eklenerek transdüktörün iki yanına doğru ilerler. Dalga boyu elektrot periyodu ile aynı olmayan dalgalar ise farklı fazlarda birbirlerine ekleneceklerinden, birbirlerini zayıflatırlar ve yüzey dalga propagasyonu söz konusu olmaz.

Transdüktöre ilişkin karmaşık yapıdaki elektriksel sınır koşullarından dolayı, piezoelektrik etkinin ihmal edilmesiyle; transdüktörün oluşturduğu elektrik alanı ve bunun neden olduğu gerilme ve uzamaya ilişkin büyüklüklerin hesabı yapılabilir [1]. Bu konuda iki yaklaşım vardır; Birinci yaklaşımda, transdüktörün taban malzemesi için piezoelektrik katsayılar sıfır alınarak (2.16) denklemleri çözülür ve mekanik dalga propagasyonu incelenebilir. Daha sonra bu dalganın elektrik alanının oluşmasındaki etkisi gözönüne alınarak, potansiyel fonksiyonu bulunur. İkinci yaklaşımda ise, piezoelektrik katsayılar sıfır alınarak, (2.17) denklemleri elektriksel sınır koşullarını sağlayacak şekilde çözülür. Bu yaklaşımda kristal sadece dielektrik özellik gösteren bir ortam gibi değerlendirilerek, elektriksel alan problemi çözülür ve sonra bu elektriksel alanın piezoelektrik özelliği nedeniyle kristalde gerilme oluşmasındaki etkisi gözönüne alınarak elastik dalga propagasyonu problemi çözülür. Transdüktöre ilişkin bir eşdeğer devre verebilmek bakımından ikinci yaklaşım daha uygundur.

Yüzey akustik dalga esasına dayanan filtreler, elektrotların boyutları ve yerleştirilmelerine bağlı olarak çeşitli şekillerde elde edilebilmektedir.

Bu bölümde transdüktörün eşdeğer devre yardımıyla analizi konusu incelenmiştir.

3.2 Transdüktörün Eşdeğer Devresi

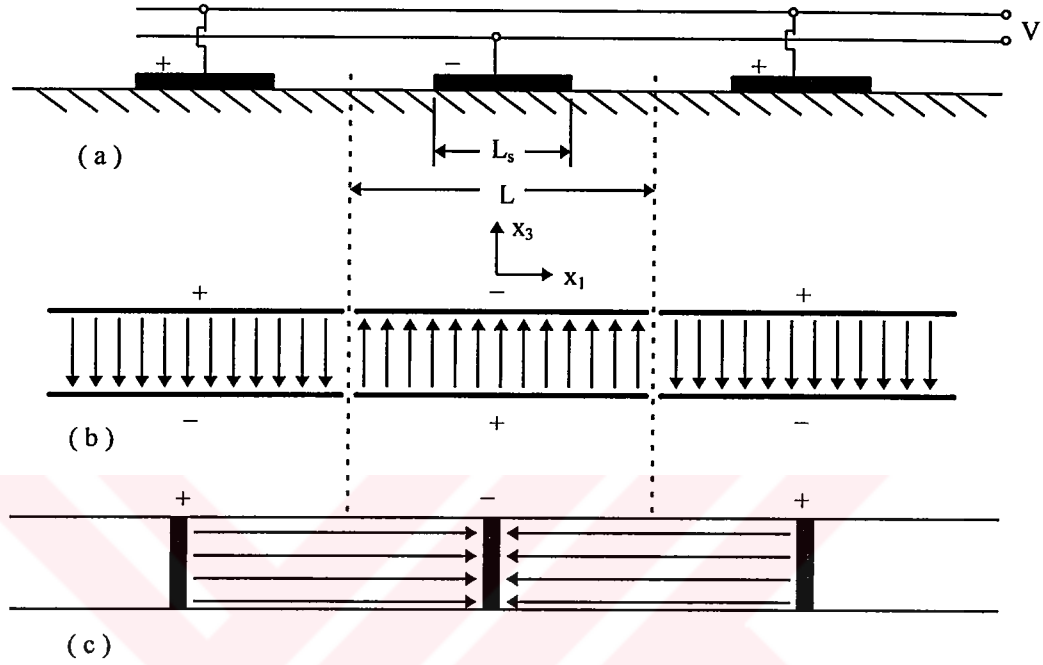
Akustik yüzey dalga kullanılan filtre uygulamalarında, yüzey dalganın etkisini anlamak için, filtre tasarımının ; elektroakustik transdüktör, harici elektrik devresi ve kristal üzerinde ilerleyen akustik dalga arasındaki önemli etkileşimlerin değerlendirilebileceği bir modele göre yapılması gerekir. Bu nedenle, önce transdüktörün eşdeğer devresi tanımlanmalıdır.

Piezoelektrik kristallerin elektronikteki ilk uygulamaları, bunların çubuk veya tabaka biçiminde kullanılmasıyla başlamıştır. Bu tür yapılarda, problemi geçerli yaklaşıklıklarla bir boyutlu olarak incelemek mümkündür. Transdüktörlerin bir koordinata bağlı olarak yazılan denklemlerinden hareket ederek, uç büyüklükleri kuvvet ve hız olan ve aynı doğrultuda fakat zıt yönde yayımlanan akustik enerjilerin herbiri için bir akustik kapı tanımlayarak, bir eşdeğer devre bulunabilir. Mason tarafından kütle dalga yayılımının söz konusu olduğu tabakalar için önerilen bu eşdeğer devre, geçmeli tarak yapıya sahip transdüktörler için de kullanılmış ve transdüktörün analizi için yeterli sonuçlar verdiği görülmüştür.

Geçmeli tarak yapıya sahip transdüktörün geometrisi Şekil 3.2 (a)' da verilmiştir. Bu transdüktördeki herbir hücrenin Şekil 3.2 (b) ve (c)' deki gibi iki yanı elektrotlu bir boyutlu yapının benzeri olarak ele alınabileceği düşünülmüştür. Bu nedenle, akustik yüzey dalga transdüktörünün herbir hücresi için Mason tarafından önerilen eşdeğer devre kullanılabilir.

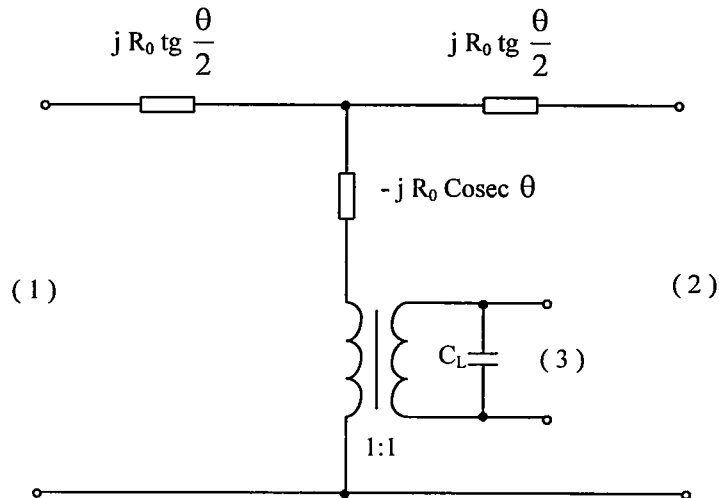
Şekil 3.2 (b)' deki bir boyutlu yapı (çubuk) kullanılırsa, transdüktördeki elektrik alanının düşey bileşeninin etkili olduğu, Şekil 3.2 (c)' deki yapı (tabaka) kullanılırsa da transdüktördeki elektrik alanının yatay bileşeninin etkili olduğu kabul edilmektedir. Şekil 3.2 (b)' deki yapının kullanılmasıyla elde edilen eşdeğer devre modeline düşey alan (crossed field) modeli, Şekil 3.2 (c)' deki yapının kullanılmasıyla elde edilen eşdeğer devre modeline de yatay alan (in-line field) modeli denilmektedir. Taban malzemesi olarak LiNbO_3 kullanıldığında, transdüktörü modellemek için düşey alan modelinin daha uygun yapıda olduğu

görülmüştür. Ayrıca düşey alan modelinin seçilmesi matematiksel işlemleri kolaylaştırmaktadır [5].



Şekil 3.2: (a) Transdüktör geometrisi, (b) çubuk yapı, (c) tabaka yapı

Şekil 3.2 (b)' deki çubuk için Mason eşdeğer devresi Şekil 3.3' de gösterildiği gibidir. Bu devre, yüzey dalga transdüktörünü modellemek için kullanılırken, devre elemanlarını ifade etmekte kullanılan çubuğa ilişkin büyüklükler, yüzey dalga transdüktöründeki benzerleri ile yer değiştireceklerdir.



Şekil 3.3: Mason eşdeğer devresi

Üç empedanstan oluşan bu T-devresi, akustik transmisyon hattının toplu parametrelili eşdeğer devresidir. Devredeki parametreler, hücre boyutlarına ve malzeme sabitlerine bağlı olarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$R_0 = \frac{\pi}{\omega_0 C_L \chi^2}, \quad \theta = \frac{2\pi L}{\lambda} = \frac{\pi \omega}{\omega_0}, \quad \omega_0 = \frac{\pi v}{L} \quad (3.1)$$

Burada, C_L hücre kapasitesini, v transdüktörün yerleştirildiği kristalin yüzey dalga hızını, λ dalga boyunu, ω_0 rezonans frekansını göstermektedir. θ geçiş açısı ve χ piezoelektrik kuplaj katsayısı olarak isimlendirilir. v_0 elektrotlanmamış bölgedeki yüzey dalga hızı ve v_m elektrotlanmış bölgedeki yüzey dalga hızı olmak üzere, elektroakustik kuplaj katsayısı,

$$\chi^2 = \frac{2(v_0 - v_m)}{v_0} \quad (3.2)$$

olarak verilir. W elektrot genişliği (aperture) ve ϵ kristalin dielektrik tensör büyüklüğü olmak üzere, hücre kapasitesi,

$$C_L = \frac{W \sqrt{\epsilon_{11} \epsilon_{33}}}{2} \frac{K(q)}{K(q')} \quad (3.3)$$

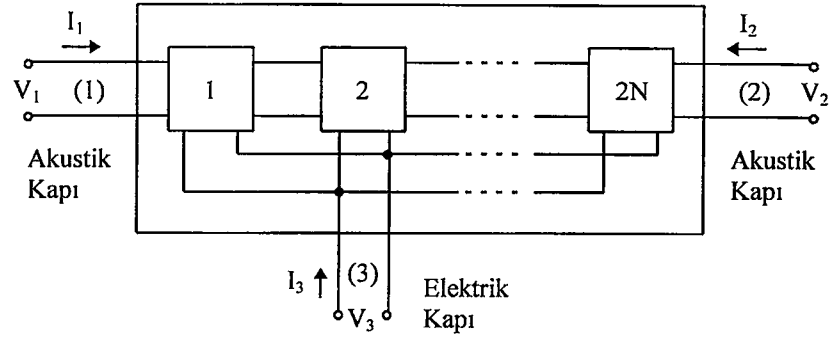
şeklinde ifade edilir [5]. Bu ifadede,

$$q = \text{Sin}\left(\frac{\pi L_s}{2L}\right), \quad q' = \sqrt{1 - q^2} \quad (3.4)$$

olup, $K(\cdot)$, birinci nevi Jacobian eliptik integralidir.

Transdüktör modellenirken her bir hücre, Şekil 3.3' deki eşdeğer devre ile değiştirilirse, akustik kapılarından birbirine kaskad bağlanmış, elektriksel

kapılarından da elektrot polaritelerine dikkat edilmek koşuluyla, birbirlerine paralel bağlı hücrelerden oluşan bir devre elde edilir. Bu yapı Şekil 3.4' de gösterilmiştir.



Şekil 3.4: Kaskad bağlı N hücreli transdüktör yapısı

3.3 Periyodik Yapılı Transdüktörün Admitansı

Şekil 3.3' de verilen düşey alan eşdeğer devresinin admitans matrisi modeli,

$$\begin{bmatrix} I_{1i} \\ I_{2i} \\ I_{3i} \end{bmatrix} = jG_0 \begin{bmatrix} -\cot g\theta & \operatorname{cosec}\theta & -\operatorname{tg}\frac{\theta}{2} \\ \operatorname{cosec}\theta & -\cot g\theta & \operatorname{tg}\frac{\theta}{2} \\ -\operatorname{tg}\frac{\theta}{2} & \operatorname{tg}\frac{\theta}{2} & 2\operatorname{tg}\frac{\theta}{2} + \frac{\omega C_L}{G_0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{1i} \\ V_{2i} \\ V_{3i} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

olarak elde edilir [1]. Burada $G_0 = 1/R_0$ 'dır.

Transdüktörde, birbirinin aynı olmak üzere $2N$ tane elektrot olsun. Hücre numarası i tek ise $V_{3i} = V$, i çift ise $V_{3i} = -V$ alınarak, $I = \sum_{i, \text{tek}} I_{3i} - \sum_{i, \text{çift}} I_{3i}$ olduğu ve akustik kapıların kaskad bağlı olduğu düşünülerek, transdüktörün admitans matrisi modeli ,

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I \end{bmatrix} = jG_0 \begin{bmatrix} -\cot g2N\theta & \operatorname{cosec}2N\theta & -\operatorname{tg}\frac{\theta}{2} \\ \operatorname{cosec}2N\theta & -\cot g2N\theta & \operatorname{tg}\frac{\theta}{2} \\ -\operatorname{tg}\frac{\theta}{2} & \operatorname{tg}\frac{\theta}{2} & 4N\operatorname{tg}\frac{\theta}{2} + 2N\frac{\omega C_L}{G_0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

biçiminde elde edilir. Transdüktörün uyardığı akustik dalga için bir yansıma olmamasını sağlamak üzere, akustik kapıların R_0 karakteristik direnci ile sonlandırıldığı düşünülerek elektriksel uçlardan görülen admitans,

$$Y = \frac{I}{V} = G_T + jB_T + j\omega C_T \quad (3.7)$$

olarak elde edilir. Bu ifadede,

$$\begin{aligned} G_T &= 2G_0 \operatorname{tg}^2 \frac{\theta}{2} \operatorname{Sin}^2 N\theta \\ B_T &= G_0 \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} \left[4N + \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} \operatorname{Sin} 2N\theta \right] \end{aligned} \quad (3.8)$$

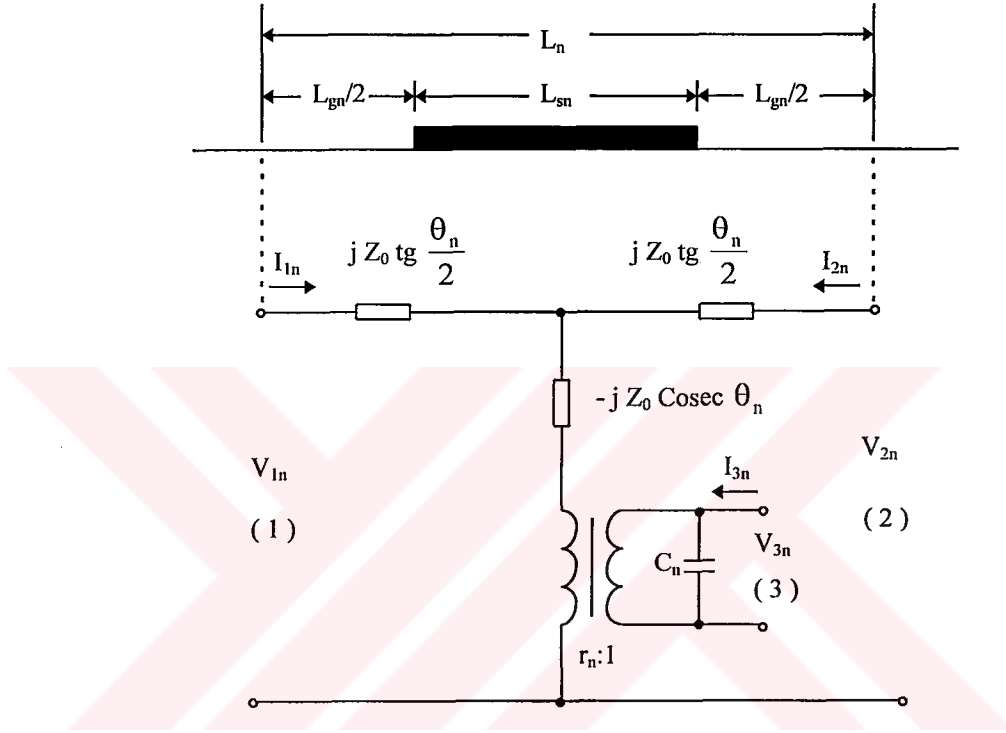
$$C_T = 2NC_L$$

şeklindedir.

3.4 Periyodik Olmayan Transdüktörün Admitansı

Transdüktör tasarımında, kristal üzerine konulan bütün elektrotların birbirinin aynı olması durumunda, frekans karakteristiğinin kontrolü fazla esnek olmamaktadır. Tasarımda, elektrot sayısından başka, herbir hücredeki elektrot uzunluğunu (L) ve elektrot genişliğini (W) değişik değerlerde seçmek mümkündür. Böylece, frekans karakteristiğinin kontrolü daha esnek hale getirilebilmektedir. Bu genel durumu

inceleyebilmek için Şekil 3.3' de verilen düşey alan eşdeğer devresi kullanılabilir. Ancak, her hücredeki eleman değerleri, temsil ettiği bölgenin geometrik boyutları ile verilmelidir. Bu durum gözönüne alınarak eşdeğer devre Şekil 3.5' deki gibi verilebilir.



Şekil 3.5: n. hücre için düşey alan eşdeğer devresi

Bu eşdeğer devredeki C_n kapasitesi, (3.3) ifadesine benzer şekilde ilgili bölgenin geometrik boyutlarının kullanılması ile,

$$C_n = \frac{W_n \sqrt{\epsilon_{11} \epsilon_{33}}}{2} \frac{K(q_n)}{K(q'_n)} \quad (3.9)$$

olarak elde edilir. Burada,

$$q = \text{Sin}\left(\frac{\pi L_{sn}}{2L_n}\right), \quad q' = \sqrt{1 - q^2} \quad (3.10)$$

ile ifade edilmektedir.

W_n , n. hücredeki elektrot genişliğidir. Eşdeğer devrede görülen geçiş açısı $\theta_n = 2\pi L_n / \lambda$, akustik yüzey dalga hızı v , senkron frekansı $f_n = v / 2L_n$ olmak üzere transformatörün çevirme oranı,

$$r_n = (-1)^n \sqrt{2f_n C_n \chi^2 Z_0} \sqrt{\frac{W_n}{W_{\max}}} \left[\frac{K(2^{-1/2})}{K(q_n)} \right] \quad (3.11)$$

olarak verilmektedir [5]. Bu bağıntıdaki $(-1)^n$ terimi, birbirini izleyen elektrotların birinin kaynağın pozitif ucuna, diğerinin kaynağın negatif ucuna bağlanacağını göstermektedir. $W_{\max}$, transdüktördeki en büyük elektrot genişliğidir. n. hücredeki dalga propagasyonu, karakteristik empedansı Z_0 olan bir transmisyon hattıyla karakterize edilmektedir. Karakteristik empedans bütün hücreler için aynıdır. Şekil 3.5’ deki devrede Z_0 yerine Z_0 / r_n^2 konulursa, transformatörü de çevirme oranı $\pm 1:1$ olan başka bir transformatörle değiştirmek mümkün olur [1]. Dolayısıyla (3.11) ifadesinde ve Şekil 3.5’ deki devrede $Z_0 = 1$ almak genelliği bozmaz. Ayrıca herbir hücre için admitans matrisi tanımlanırken $I_i = \sum_{j=1}^3 y_{ij} V_j$ ($i = 1,2,3$) ifadesinden hareketle, devre analizinden $y_{ij} = y_{ji}$ bulunur. Şekil 3.5’ deki eşdeğer devre kullanılarak herbir hücrenin admitans (y_{ij}) parametreleri,

$$\begin{aligned} y_{11}(n) &= y_{22}(n) = -j \cdot \cot \theta_n \\ y_{12}(n) &= j \cdot \operatorname{cosec} \theta_n \\ y_{13}(n) &= y_{23}(n) = -j \cdot r_n \cdot \operatorname{tg} \frac{\theta_n}{2} \\ y_{33}(n) &= j \cdot (\omega C_n + 2 \cdot r_n^2 \cdot \operatorname{tg} \frac{\theta_n}{2}) \end{aligned} \quad (3.12)$$

olarak elde edilir [5]. Transdüktörün tümüne ait admitans parametreleri; N tane hücrenin Şekil 3.4’ deki gibi akustik kapılarından kaskad, elektrik kapılarından da

paralel bağlandıkları gözönüne alınarak, aşağıdaki ardışıl bağıntılar yardımıyla bulunabilir.

$$\begin{aligned}
 \tilde{y}_{ij}(1) &= y_{ij}(1) \\
 \tilde{y}_{11}(n) &= y_{11}(n) - \frac{[y_{12}(n)]^2}{D}, \quad n > 1 \\
 \tilde{y}_{12}(n) &= \frac{-y_{12}(n)\tilde{y}_{12}(n-1)}{D} \\
 \tilde{y}_{22}(n) &= \tilde{y}_{22}(n-1) - \frac{[\tilde{y}_{12}(n-1)]^2}{D} \\
 \tilde{y}_{13}(n) &= y_{13}(n) - \frac{y_{12}(n).y'}{D} \\
 \tilde{y}_{23}(n) &= \tilde{y}_{23}(n-1) - \frac{\tilde{y}_{12}(n-1).y'}{D} \\
 \tilde{y}_{33}(n) &= y_{33}(n) + \tilde{y}_{33}(n-1) - \frac{(y')^2}{D} \\
 \tilde{y}_{ij} &= \tilde{y}_{ji} \\
 D &= y_{11}(n) + \tilde{y}_{11}(n-1) \\
 y' &= y_{13}(n) + \tilde{y}_{13}(n-1)
 \end{aligned} \tag{3.13}$$

Burada $y_{ij}(n)$, n. hücrenin y parametreleri, $\tilde{y}_{ij}(n)$ ise (n+1). hücreye kadar olan n hücrelik transdüktör bölümünün y parametreleridir. Transdüktörde N tane hücre bulunduğunda, tüm transdüktöre ait y parametreleri $y_{ij}^T = \tilde{y}_{ij}(N)$ olacaktır.

3.5 Transdüktörün Transfer Fonksiyonu ve Elektrik Kapının Admitansı

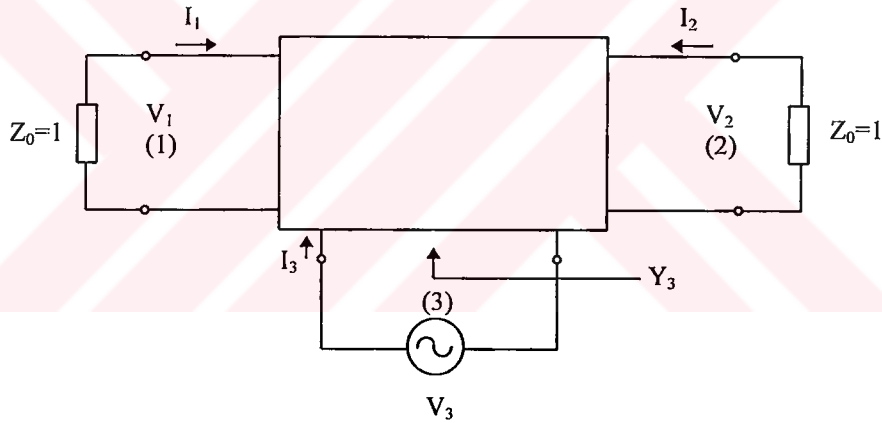
Transdüktörün akustik kapılarının Şekil 3.6' daki gibi Z_0 karakteristik empedansı ile sonlandırılması ve elektriksel uçlarından da ideal bir gerilim kaynağı ile uyarılması halinde akustik kapılar ile elektriksel kapı arasında,

$$T_{13} = \frac{V_1}{V_3}, \quad T_{23} = \frac{V_2}{V_3} \quad (3.14)$$

şeklinde transfer fonksiyonu tanımlanabilir. Transdüktörün akustik kapıları 1 ohm' luk karakteristik empedans ile sonlandırılırsa ve elektriksel uçlarından da V_3 ideal gerilim kaynağı ile uyarılırsa,

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & y_{13} \\ y_{21} & y_{22} & y_{23} \\ y_{31} & y_{32} & y_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

genel ifadesinde $I_1 = -V_1$ ve $I_2 = -V_2$ yazılabilir.



Şekil 3.6: Transdüktörün 3-kapılı gösterimi

(3.15) bağıntısında $I_1 = -V_1$ ve $I_2 = -V_2$ konulup, bu bağıntı yeniden düzenlenirse,

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ I_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1+y_{11} & y_{12} & y_{13} \\ y_{12} & 1+y_{22} & y_{23} \\ y_{13} & y_{23} & y_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

ifadesi elde edilir. Buradan V_1 ve V_2 değerleri, V_3 ' e bağlı olarak aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = -\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} 1+y_{22} & -y_{12} \\ -y_{12} & 1+y_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_{13} \\ y_{23} \end{bmatrix} V_3, \quad \Delta = (1+y_{11})(1+y_{22}) - y_{12}^2$$

$$V_1 = -\frac{1}{\Delta} [(1+y_{22})y_{13} - y_{12}y_{23}] V_3$$

$$V_2 = -\frac{1}{\Delta} [-y_{12}y_{13} - (1+y_{11})y_{23}] V_3 \quad (3.17)$$

(3.17) ifadesinden, transdüktörün T_{13} ve T_{23} transfer fonksiyonları aşağıdaki şekilde elde edilebilir. Transdüktörün akustik kapıları aynı yüklerle sonlandırıldığında, T_{13} ve T_{23} transfer fonksiyonları birbirine eşit olur.

$$T_{13} = \frac{V_1}{V_3} = -\frac{1}{\Delta} [(1+y_{22})y_{13} - y_{12}y_{23}] \quad (3.18)$$

$$T_{23} = \frac{V_2}{V_3} = -\frac{1}{\Delta} [-y_{12}y_{13} + (1+y_{11})y_{23}]$$

Transdüktörün (3) numaralı elektrik kapısından görülen Y_3 admitansı ise,

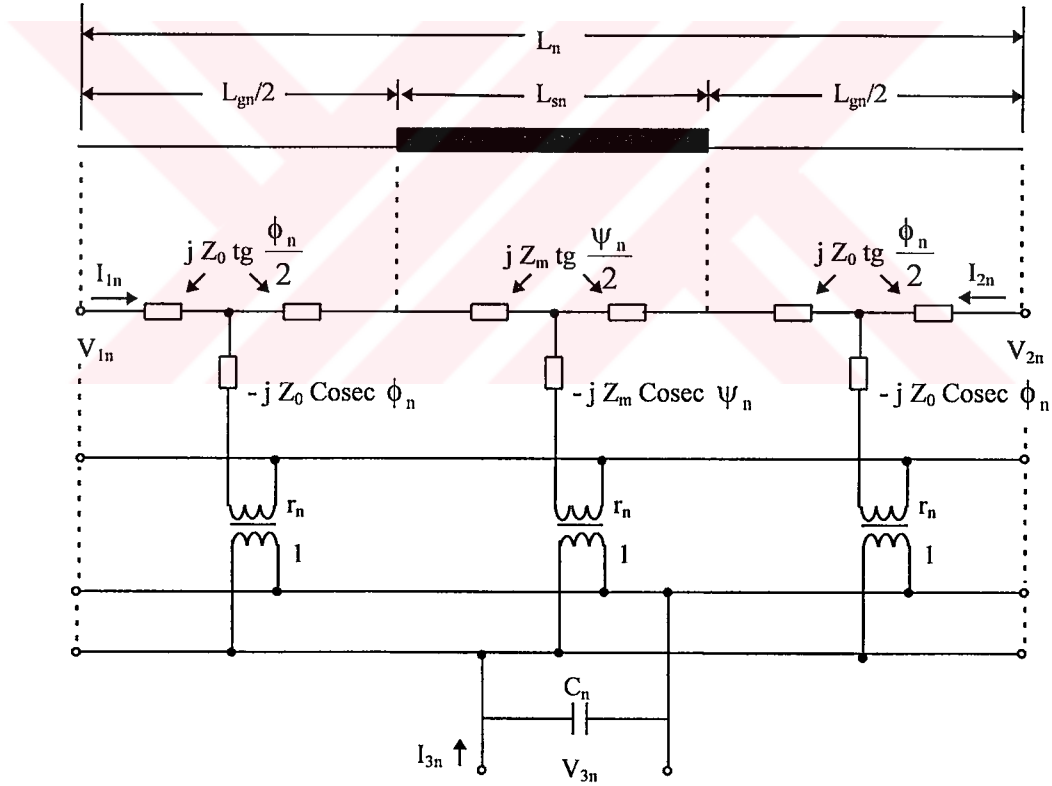
$$I_3 = \left\{ -\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} y_{13} & y_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1+y_{22} & -y_{12} \\ -y_{12} & 1+y_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_{13} \\ y_{23} \end{bmatrix} + y_{33} \right\} V_3 \quad (3.19)$$

$$Y_3 = \frac{I_3}{V_3} = \left\{ -\frac{1}{\Delta} [y_{13}^2(1+y_{22}) + y_{23}^2(1+y_{11}) - 2y_{12}y_{13}y_{23}] + y_{33} \right\}$$

şeklinde elde edilir.

3.6 Akustik Empedans Süreksizliğini İçeren Eşdeğer Devre Modeli

Akustik yüzey dalga, kristal taban üzerinde elektrotlu ve elektrotsuz bölgeler boyunca ilerlerken, elastik ve elektriksel açıdan süreksizliklerle karşılaşır. Süreksizliğin ilk kaynağı; çok ince elektrotlar için, akustik hızı düşüren metal elektrodun teğetsel elektrik alanını kısaltmasıdır. Kalın elektrotlar ise elektrotlu bölgenin elastik özelliklerini de etkiler. Bu nedenle, elektrotlu ve elektrotsuz bölgelerin karakteristik empedansları aynı olmaz. Daha doğru bir analiz için bu süreksizliklerin etkilerini de dikkate almak gerekir. Bu amaçla Şekil 3.5’ de verilen düşey alan eşdeğer devresi Şekil 3.7’ de verildiği gibi değiştirilir.



Şekil 3.7: Akustik empedans süreksizliğini içeren eşdeğer devre

Elektrotlu bölge, karakteristik empedansı Z_m ve geçiş açısı,

$$\psi_n = \frac{2\pi f L_{sn}}{V_m} \quad (3.20)$$

olan bir transmisyon hattı olarak gözönüne alınır. Burada V_m elektrotlu bölgedeki akustik hızdır. Elektrotsuz bölgelerin herbirinin karakteristik empedansı Z_0 ' dır ve geçiş açısı,

$$\phi_n = \frac{\pi f L_{gn}}{V_0} \quad (3.21)$$

bağıntısıyla verilir. Burada V_0 , elektrotsuz bölgenin yüzey dalga hızıdır. Toplam geçiş açısı $\psi_n + 2\phi_n$ şeklinde elde edilir ve Şekil 3.5' de görülen θ_n ' ye karşı düşmektedir. C_n ve r_n için, bölüm 3.4' de verilen bağıntılar geçerlidir. n . hücrenin senkron frekansı,

$$f_n = \frac{1}{2} \left[\frac{L_{sn}}{V_m} + \frac{L_{gn}}{V_0} \right]^{-1} \quad (3.22)$$

ifadesiyle belirlenir. Kütle dalga transdüktörü için verilen eşdeğer devrede karakteristik empedansın dalga hızı ile orantılı olduğu bilinmektedir. Bu nedenle burada da,

$$\tau = \frac{Z_m}{Z_0} = 1 + \frac{1}{2} \chi^2 \quad (3.23)$$

bağıntısı kullanılabilir. Bu bağıntıdan empedans süreksizliğinin, elektroakustik kuplaj katsayısı ile orantılı olduğu görülmektedir.

Z_m ve Z_0 arasındaki fark, elektrotlu ve elektrotsuz bölge sınırlarında, akustik dalga yansımalarına neden olur. Bu yansımalar herbir hücre için küçük olmasına rağmen, elektrot sayısının fazla olduğu uygulamalarda, tüm elektrotlardaki yansımaların aynı fazda birbirine eklenmesiyle kuvvetli bir toplam yansıma oluşur. Bu sebeple transdüktörün frekans karakteristiğinde bozulmalar meydana gelebilir.

Elektrotlu ve elektrotsuz bölgelerin ayrı ayrı gösterildiği Şekil 3.7' deki devrede, $Z_0 = 1$ ve $Z_m = 1/\tau$ alınarak devrenin analizi yapılırsa, admitans matrisinin elemanları aşağıdaki şekilde elde edilir [5].

$$\begin{aligned}
 y_{11}(n) &= y_{22}(n) = j.d.[c + e.\cot g\phi_n] \\
 y_{12}(n) &= j.d.\tau.\operatorname{cosec}^2\phi_n.\operatorname{cosec}\psi_n \\
 y_{13}(n) &= y_{23}(n) = -j.r.\operatorname{tg}\frac{\phi_n}{2} - j.a.b.d.\operatorname{cosec}\phi_n \\
 y_{33}(n) &= j\left\{2\pi.f.C_n + 2.r(a + r.\operatorname{tg}\frac{\phi_n}{2}) + \frac{a^2}{c}(1 + b^2.d)\right\} \quad (3.24)
 \end{aligned}$$

a, b, c, d ve e yardımcı fonksiyonları ϕ ve ψ ' ye bağlı olarak aşağıdaki şekilde verilmektedir.

$$\begin{aligned}
 a &= r.\left(\tau.\operatorname{tg}\frac{\psi_n}{2} + \operatorname{tg}\frac{\phi_n}{2}\right) \\
 b &= \cot g\phi_n + \tau.\cot g\frac{\psi_n}{2} \\
 c &= \tau.\cot g\psi_n + \cot g\phi_n \\
 d &= (c.\cot g\phi_n - e)^{-1} \\
 e &= \tau(\tau - \cot g\phi_n.\cot g\psi_n) \quad (3.25)
 \end{aligned}$$

Tüm transdüktöre ait admitans (y) parametrelerinin hesaplanması için (3.13) ile verilen ardışıl bağıntılar kullanılabilir.

BÖLÜM 4

GSM SİSTEMİ

4.1 Giriş

Tarih boyunca iletişim çeşitli şekillerde kurulmuş ve modern çağda ülkeler kendilerine göre sistemler oluşturmuşlardır. Daha sonra bu sistemler arasında uyumsuzluk sorunları ortaya çıkmış, aralarında koordinasyon sağlamak mümkün olmamıştır. Bu sorunlar üzerine Avrupalı iletişim uzmanları harekete geçmiştir.

GSM'in Türkçe anlamı Küresel Mobil İletişim Sistemidir. GSM kısaltmasına ilk kez 1982 yılında rastlanmaktadır. Avrupa Posta ve Telgraf Konferansı (CEPT, Conference of European Posts and Telegraphs) adı verilen bir konferans sırasında, Mobil Uzmanlık Grubu (Group Special Mobile) adlı bir çalışma grubu oluşturulmuştur. GSM, bu çalışma grubunun adını oluşturan kelimelerin baş harflerinin yanyana getirilmesiyle ortaya çıkmıştır. Sonraları anlam değiştirmiş ve Küresel Mobil İletişim Sistemi (Global System for Mobile Communications) deyiminin kısaltması haline gelmiştir.

Konferans sırasında oluşturulan bu çalışma grubunun amacı, Avrupa çapında, 900 MHz aralığında işleyecek olan, kamuya açık bir hücresel iletişim sistemi oluşturmaktır. O sıralarda, Avrupa'nın çeşitli ülkelerinde, birbirleriyle uyumsuz olan, çok sayıda analog hücresel sistem vardı. Grubun, oluşturmayı hedeflediği bu yeni sistemde olmasını istediği özellikler,

- Yüksek konuşma kalitesi

- Düşük terminal (aygıt) ve servis maliyeti
- Uluslararası bağlantı desteği
- Elde taşınabilecek terminal (aygıt) desteği
- Yeni servislere ve olanaklara destek verebilmek
- ISDN uyumluluğu

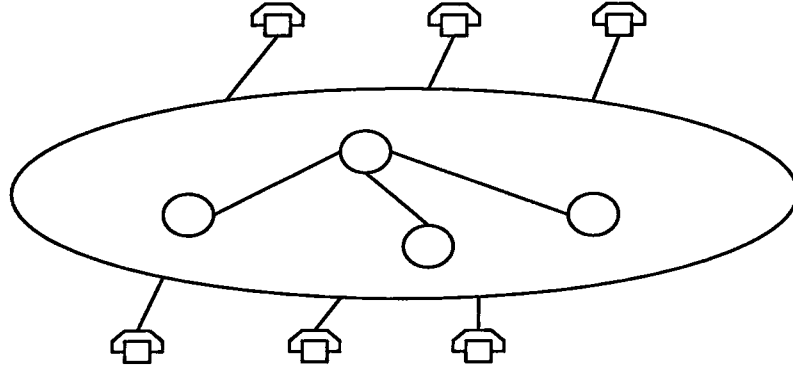
olarak sıralanabilir. GSM'in en önemli özelliği, Avrupa'daki kullanıcılarına, bir mobil istasyon (cep telefonu) ile analog sistemlere göre çok iyi kalitede hizmet vermesidir.

1989 yılında, GSM çalışmalarının sorumluluğu, Avrupa Telekomünikasyon Standartları Enstitüsüne (ETSI, European Telecommunication Standards Institute) devredilmiştir.

Ticari hizmetler 1991'in ortalarında başlamış, 1993 yılı itibariyle, 22 ülkede 36 GSM iletişim ağı kurulmuştur. Başlangıçta yalnızca Avrupa için tasarlanan bu iletişim sistemi, bugün tüm dünyaya yayılmış durumda ve 80'den fazla ülkede kullanılmaktadır. 1994 başında 1.300.000 abone varken, bu sayı 1995'in başında 5 milyona ulaşmış, aynı yılın sonunda ise 10 milyonu aşmıştır. 1996 yılının Ocak ayı itibarıyla Dünya genelinde 120 adet kurulu GSM ağı olduğu belirtilmiştir. Bunlardan ikisi ülkemizde bulunmaktadır; Telsim ve Turkcell.

Sembolik yapısı Şekil 4.1' de gösterilen Kamusal Anahtarlamalı Telefon Şebekesi (PSTN, Public Switched Telephone Network) ve Tümleşik Hizmetler Sayısal Şebekesi (ISDN, Integrated Services Digital Network), kullanıcılarına birçok yararlı hizmet sunmaktadır. Ancak kullanıcılar sisteme sabit noktalardan ulaşmak zorundadır. Bu durum bazı kullanıcılar için sorun yaratmaktadır. PSTN ve ISDN türü şebekelerin temel özellikleri aşağıda verilmiştir:

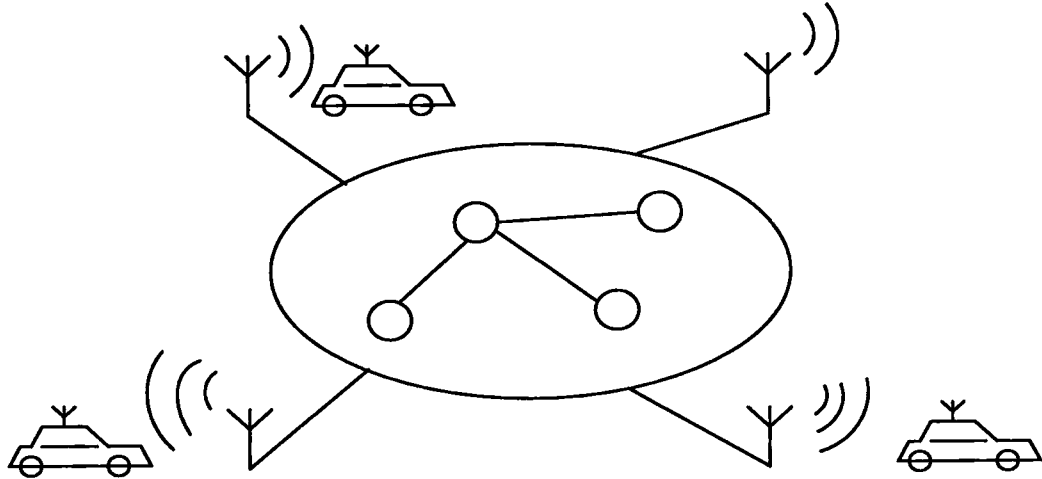
- Kullanıcılar iletişim ağına ikili tel iletken ile bağlanmaktadır
- Bilgi (ses ya da veri) gerilim ve akıma dönüştürülerek hattın gönderilir
- İletişim ağına bağlantı sabittir; kullanım, telefonun fiziksel konumu ile sınırlıdır.



Şekil 4.1: Ulusal Telefon Şebekesinin sembolik yapısı

Sembolik yapısı Şekil 4.2’ de gösterilen GSM sisteminin temel özellikleri de aşağıda sıralanmıştır:

- Kullanıcılar iletişim ağına havadan (radyo ile) bağlanmaktadır
- Bilgi (ses ya da veri) radyo işaretlerine dönüştürülerek havadan gönderilir
- İletişim ağı ile arada sabit bir bağlantı yoktur; kullanıcıların iletişim ağı içindeki konumları, konuşmalarında kesinti olmaksızın değişebilir.



Şekil 4.2: GSM Sisteminin sembolik yapısı

Farklı iletişim ağlarına bağlı kullanıcıların birbirleriyle haberleşmeleri mümkündür. Fakat bunun sağlanabilmesi için iletişim ağları arasında arabağlaşım fonksiyonlarının

tanımlanmış olması gerekir. GSM sisteminde diğer iletişim ağları ile haberleşmeyi sağlayan arabağlaşım fonksiyonları tanımlanmıştır.

Bugün Avrupa’da kullanılmakta olan analog mobil iletişim ağları mobil haberleşme şartlarına uymakla beraber doyum noktasına ulaşmıştır. Ayrıca teknolojik, ekonomik ve sosyal alandaki gelişmeler GSM sisteminin ortaya çıkmasını sağlamıştır.

4.2 GSM Sisteminin Özellikleri

GSM sisteminde, ISDN’ de olduğu gibi devre anahtarlamalı ve paket anahtarlamalı çağrı yapmak mümkündür. GSM, devre anahtarlamalı çağrılar için hem doğrudan bağlantı hem de özel hizmetlere uygun bağlantı olanaklarını sağlar. GSM operatörlerinin sunduğu bazı hizmetler aşağıda verilmiştir:

- Konuşma hizmeti (telefon ve acil çağrılar gibi)
- Kısa mesaj hizmeti (SMS, Short Message Services)
- Mesaj kotarma hizmeti (X.400) (MHS, Message Handling Services)
- Videotekst hizmeti
- Teletekst hizmeti
- Çeşitli faks hizmetleri

GSM’ in dijital yapısı nedeniyle yeni özellikler ve hizmetler sisteme kolayca eklenebilir. GSM sisteminde uçtan uca dijital bağlantı sağlandığı için, hizmet kalitesi analog şebekelere göre daha kalitelidir.

Bir GSM Mobil İstasyonu (MS, Mobile Station), verici, alıcı ve aksesuar gibi donanımlardan oluşur. Değişik tiplerde mobil istasyonlar vardır ve bir mobil istasyon farklı erişim düzenleştirmelerine sahip olabilir. GSM’ de genel anlamda tanımlı üç çeşit mobil istasyon vardır [6]:

- **Araca takılabilen istasyonlar:** Donanım aracın içine, anten ise aracın dışına monte edilir. Otomobil, kamyon, otobüs, tren ve gemi bu sınıfa girer. Uçak bu sınıfın dışındadır.

- **Portatif istasyonlar:** Bu tip istasyonların elle taşınabilir olanları da vardır. Anten fiziksel olarak donanımın bir parçası değildir. Portatif istasyonların, sistemde mevcut tüm güç seviyelerinde çalışan modelleri vardır.
- **Elde taşınabilir istasyonlar:** İnsanların üzerlerinde taşıyabilecekleri türden istasyonlardır. Anten fiziksel olarak donanıma dahil olabilir. (Cep telefonları bu sınıfa girer).

Ayrıca, mobil istasyonlar, mobil istasyon çıkış gücüne göre de sınıflandırılır. Bu sınıflandırma Tablo 4.1' de gösterilmektedir. Mobil istasyonun sınıfı, mobil istasyonun fiziksel boyutlarını etkiler. Daha fazla çıkış gücü için daha büyük pile ihtiyaç vardır. Mobil istasyonun gücü, radyo dalgalarının gürültüsüz ilerleyebildiği uzaklık için bir ölçüdür.

Table 4.1: Mobil İstasyon Sınıfları

Sınıf 1	20 Watt	Araca takılabilen ve Portatif
Sınıf 2	8 Watt	Araca takılabilen ve Portatif
Sınıf 3	5 Watt	Elde taşınabilir
Sınıf 4	2 Watt	Elde taşınabilir
Sınıf 5	0.8 Watt	Elde taşınabilir

GSM'in ilk yıllarında birinci ve ikinci sınıfta yer alan istasyonlar kullanılmıştır. Bu tip istasyonlar yüksek güçlü olduğu için, o yıllarda yarıçapı 10 km den büyük hücreler kurulmuştur. Fakat üçüncü, dördüncü ve beşinci sınıfta yer alan elde taşınabilir istasyonların ortaya çıkmasıyla daha küçük hücrelere ihtiyaç duyulmuştur.

Herbir mobil istasyon Uluslararası Mobil Donanım Kimliği (IMEI, International Mobile Equipment Identity) olarak adlandırılan bir numaraya sahiptir. Mobil istasyon bu numarayı gerektiğinde şebekeye gönderir. IMEI, onay kodu (TAC, Type Approval Code), montaj kodu (The Final Assembly Code) ve seri numara (SNR, Serial Number) bilgilerinden oluşur. IMEI, üretici tarafından, fiziksel güvenlik modülü olarak mobil istasyona uygulanır. GSM sistem operatörü IMEI numarasını,

mobil istasyonun onaylı olup olmadığını kontrol için, mobil istasyonun modeliyle ilgili istatistiksel bilgiler için, çalıntı mobil istasyonların tesbiti için kullanılabilir.

Donanım numaraları; beyaz liste, gri liste ve siyah liste olarak sınıflandırılır. Siyah listedeki donanımlar (çalıntı mobil istasyonlar) şebekeye erişimleri engellenen istasyonlardır. Gri listedeki donanımlar uygun olarak çalışmayan, hatalı istasyonlardır. Beyaz listedeki donanımlar ise onaylı, şebekeyle problemsiz olarak çalışan istasyonlardır.

Mobil istasyonlarda olması gereken zorunlu ve isteğe bağlı özellikler vardır. Mobil istasyonun tipi ve onayı ile ilgili zorunlu özellikler yerine getirilmelidir. Seçime bağlı özelliklerin gerçekleştirilmesi üreticiye bırakılmıştır.

Mobil istasyonda gerçekleştirilmesi zorunlu özelliğe örnek olarak 0' dan 9' a kadar olan karakterlerin ve ' * ', ' # ' sembollerinin fiziksel girişinin mümkün olması verilebilir. Bu bir tuş takımı, veri terminal donanımı veya başka bir donanımla olabilir. Ayrıca aranan numaranın ve ülkesiyle beraber kullanılan GSM şebekesinin isminin ekranda gösterilmesi de bir mobil istasyonda olması gereken zorunlu özelliklerdendir. Titreşimli çağrı ikazı ise seçime bağlı bir özellik olarak verilebilir.

Bir mobil istasyonu kullanabilmek için en az bir GSM operatörüne abone olmak zorunluluğu vardır. Operatör tarafından aboneye izin numarası (örneğin, mobil istasyon ISDN numarası ve abone kimlik modülü SIM, Subscriber Identity Module) verilir. GSM şebekelerine üç şekilde abone olunulabilir:

- Ülke içinde bir, ülke dışında tüm GSM şebekelerine
- Tüm GSM şebekelerine
- Bazı bölgelerde sınırlı olmak üzere tüm GSM şebekelerine

ISDN veya PSTN abonesi, bir GSM abonesini arayabileceği için, Mobil istasyon ISDN numarası ülkenin ISDN numaralandırmasına uymalıdır. Mobil istasyon ISDN numarası; ülke kodu (CC, Country Code), ulusal kod (NDC, National Destination Code) ve abone numarası (SN, Subscriber Number) bilgilerinden oluşur.

Ülke kodu, mobil abonenin kayıtlı olduğu ülkeyi tanımlar ve bir, iki ya da üç rakamdan oluşur. Ulusal Kod değişik uzunlukta olabilir ve abonenin bağlı olduğu şebekeyi seçmekte kullanılır. Bu bilgi aynı zamanda çağrıyı ilgili şebekeye yönlendirmede de kullanılabilir.

Mobil abonenin konumu devamlı olarak değiştiğinden, mobil istasyon abone numarası GSM şebekesi üzerinden çağrı yönlendirmede kullanılamaz. GSM şebekesi üzerinden çağrı yönlendirmede ISDN numarası ile aynı yapıya sahip MSRN (Mobile Station Roaming Number) numarası kullanılır. MSRN, GSM şebekesi tarafından dinamik olarak tahsis edilir. Abonenin bulunduğu bölge değiştikçe MSRN numarası da değişir.

Ulusal kod ve abone numarası, ulusal numarayı meydana getirir.

Acil aramalar dışında, mobil istasyondan GSM şebekesine erişim için SIM gereklidir. SIM, abone hakkındaki bilgileri içeren Uluslararası Mobil Abone Bilgisini (IMSI, International Mobile Subscriber Identity) içerir. SIM yarı-kalıcı olarak mobil donanıma eklenebileceği gibi, tümdevre kart şeklinde de olabilir.

Tümdevre kart SIM' ler kullanışlı olup, donanımdaki kart okuyucu tarafından algılanırlar. Tümdevre kart SIM, mobil istasyona kolayca yerleştirilip çıkarılabilmekte ve mobil istasyon, içinde SIM olduğu sürece aktif kalmaktadır. Abone, aynı tümdevre kart SIM ile değişik zamanlarda farklı mobil istasyonları kullanabilmekte ve fatura tümdevre kart SIM'in sahibine işlenmektedir.

Bazı durumlarda SIM'in kalıcı olarak mobil istasyona yerleştirilmesi zorunlu olabilir ya da mobil istasyonda kart okuyucu bulunmayabilir. Ayrıca mobil istasyonda SIM'in yerleştirileceği yer iç kısımlarda olabilir. Bu gibi durumlarda SIM yarı-kalıcı olarak mobil istasyona yerleştirilir.

Her SIM, kullanıcısı tarafından kullanılmasa da özel kimlik numarasını (PIN, Personal Identification Number) işler. PIN, dört ile sekiz arasında dijitten oluşan kişiye özgü sayısal bir koddur.

PIN ilk olarak operatör tarafından verilir. Daha sonra istenirse abone tarafından değiştirilebilir. PIN özelliğinin kullanılıp kullanılmayacağı abone tarafından kontrol edilebilir. Bununla beraber GSM operatörü isterse PIN kullanmama özelliğini engelleyebilir. Bu durumda abone her GSM şebekesine erişimden önce PIN kodunu girmek zorundadır. Eğer PIN kodu yanlış girilirse kullanıcı ikaz edilir. Ardarda üç kez PIN kodu yanlış girilirse SIM bloke edilir.

Uluslararası Mobil Abone bilgisi (IMSI) SIM’de saklanır ve SIM sahibi olan aboneyi tanımlar.

IMSI, mobil ülke kodu (MCC, Mobile Country Code), mobil şebeke kodu (MNC, Mobile Network Code) ve mobil abone kimlik numarası (MSIN, Mobile Subscriber Identification Number) bilgilerinden oluşur. IMSI sadece sayısal karakterlerden meydana gelir ve onbeş dijiti aşamaz. MCC en fazla üç dijiti olup mobil abonenin ülke kodudur. MNC ise iki dijiti olup mobil abonenin bağlı bulunduğu GSM şebekesini belirtir. MSIN, mobil abonenin GSM şebekesindeki numarasıdır. MNC ve MSIN ulusal mobil abone bilgisini (NMSI, National Mobile Subscriber Identity) oluşturur.

IMSI ve Mobil İstasyon ISDN numarası farklı kavramlar olup, farklı amaçlar için kullanılırlar.

4.3 Mobil Şebeke Hizmetleri

ISDN’de olduğu gibi GSM’de de tanımlanmış üç çeşit hizmet vardır:

- Taşıyıcı Hizmetler
- Telehizmetler
- Tamamlayıcı Hizmetler

Taşıyıcı hizmetler, mesajda değişiklik yapmaksızın gerçek zamanda kullanıcılar arasında bilgi (ses, veri, video) taşıma görevini yaparlar. Bu hizmetler OSI

modelinin ilk üç katmanına karşılık düşer. GSM sisteminde tanımlı taşıyıcı hizmetler aşağıda verilmiştir:

- Asenkron veri transferi (300 bit/s, 1200 bit/s, 2400 bit/s)
- Senkron veri transferi (9600 bit/s)

Telehizmet, taşıma fonksiyonu ile bilgi işleme fonksiyonunun birlikte çalışmasını sağlar. Veri iletimi için taşıma hizmetlerini kullanır ve OSI modelinde 4 den 7 ye kadar olan katmanlara karşılık düşen hizmetleri verir. GSM deki en önemli telehizmet iki GSM abonesi arasındaki ya da bir GSM abonesi ile PSTN veya ISDN abonesi arasındaki haberleşmeyi sağlayan telefon hizmetidir. Acil çağrı da en temel telehizmetlerden biridir. Diğer telehizmetler ise;

- Kısa mesaj hizmeti
- Mesaj kotarma sistemlerine erişim
- Videotekst
- Teletekst
- Faks
- Aynı bağlantı üzerinden hem ses hem de veri hizmeti

olarak sıralanabilir.

Kısa Mesaj Hizmeti (SMS, Short Message Service) : Bu hizmet çeşitli nedenlerden dolayı bağlantı kurulamayan aboneye 140 karaktere kadar olan kısa mesajların gönderilebilmesini sağlar. Mesaj, önce kısa mesaj hizmet merkezine gönderilir, mobil istasyon aktif olduğunda abone isterse bu mesajı alır.

Tamamlayıcı hizmetler tek başına kullanılamaz, taşıyıcı hizmetler veya telehizmetler ile beraber kullanılır. Ödemeli çağrılar tamamlayıcı hizmetlere örnek olarak verilebilir ve devre ya da paket anahtarlama çağrılarında kullanılabileceği gibi mesaj kotarma gibi telehizmetlerde de kullanılabilir. GSM’ de tanımlı tamamlayıcı hizmetler;

- Numara bilgisi

- Çağrı sunma, çağrı yönlendirme, çağrı engelleme, çağrı tutma, çağrı bekletme, çağrı sonlandırma
- Kullanıcıdan kullanıcıya işaretleşme
- Çok aboneli arama
- Kapalı kullanıcı grubu
- Hücre sınırlamaları

olarak verilebilir. Ayrıca bazı tamamlayıcı hizmetlere erişim, kullanıcının isteğine bağlı olarak şifre ile mümkündür.

Hava üzerinden kurulan bağlantılar güvenlik açısından sakıncalı olabilir. Çünkü radyo alıcısı olan herkes gökyüzünden radyo dalgalarını alabilir. Hava arayüzü gökyüzünden yayın yapan radyo istasyonları için uygun olabilir. Fakat gizli ve özel bilgi içeren telefon amaçlı kullanımlarda, bu istenmeyen bir durumdur ve bilginin kodlanması gerekir. Bu nedenle GSM sisteminde güvenilirlik ve gizliliğe önem verilmiştir. GSM sisteminde güvenilirliği artırıcı özellikler aşağıda verilmiştir:

Abone Kimlik İspatı : Abone, GSM şebekesine erişim için yetkisi olduğunu ispatlamalıdır.

Abone Kimlik Güvenilirliği : Abonenin yapacağı her çağrı için abone bilgisi değişeceğinden, mobil aboneyi izlemek imkansızdır.

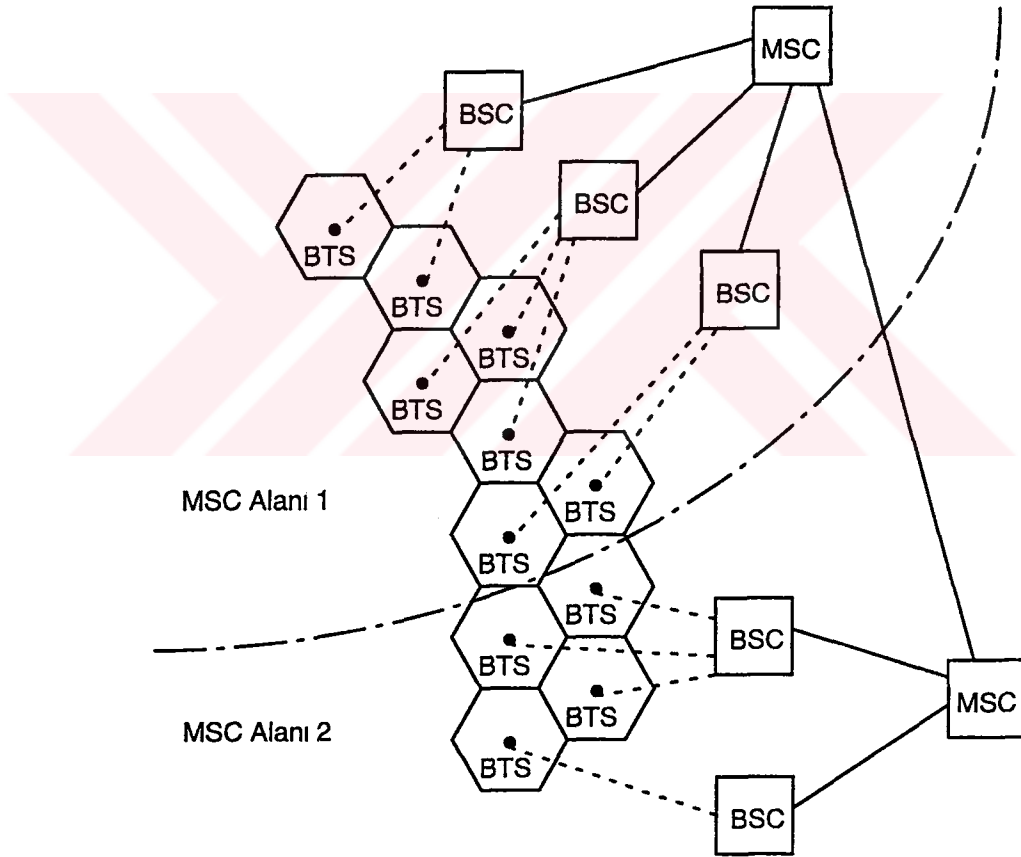
İşaretleşme Bilgisi Güvenilirliği : İşaretleşme bilgisine erişim için şifreleme kullanılır.

4.4 Hücresel Yapı

GSM sisteminde tanımlı şebeke yapısı, tüm Avrupa'yı içeren sayısal, hücresel radyo şebekesi şeklindedir. Hücresel yapı, gerekli ilavelerin kolayca ve düşük maliyetle yapılabileceği gelişime uygun şebeke yapısıdır.

Radyo dalgaları abonenin fiziksel bağlantı olmaksızın şebekeye erişimini sağlar ve abone şebeke kapsama alanı içinde serbestçe hareket edebilir.

GSM sisteminde tanımlı en küçük kapsama alanı ‘hücre’ olarak isimlendirilir. Hücre, bir BTS (Alıcı-Verici İstasyon)’ in hizmet ettiği alan olarak tanımlanır. Bir BSC (Radyo Denetleyici) tarafından kontrol edilen BTS'lere ait hücrelerin meydana getirdiği kapsama alanı ise ‘Ana İstasyon Alanı’ olarak isimlendirilir. Bir veya daha fazla ana istasyon alanı ‘Bölgesel Alan’ ı oluşturur. Bir MSC (Mobil hizmetler Anahtarlama Merkezi)’ nin hizmet ettiği bölge ise ‘MSC Alanı’ olarak tanımlanır. Bir MSC alanı birden fazla bölgesel alandan oluşabilir. Şekil 4.3’ de MSC kapsama alanı gösterilmiştir.



Şekil 4.3: MSC Kapsama Alanı

Bir hücrenin alanı, yerleşimin yapısına (nüfus, yerleşim şekli) göre çapı 350 m ile 35 km olacak şekilde değişebilir. Eğer bir hücrenin ortasına tümyönlü anten yerleştirilirse, hücre yaklaşık daire şeklinde olur. Ancak bir hücrenin ideal şekli

altıgendir. Anten, hizmet etmesi gereken alanı uygun şekilde kapsamaları için hücrenin ortasına yerleştirilir. Herbir hücre en az bir taşıyıcı frekansına sahiptir.

GSM sisteminde radyo spektrumunun belirli bir bölgesi kullanılır. Bu bölge hem frekans hem de zaman domeninde dilimlenir. Frekans, bantlardan oluşan radyo frekans kanallarına (RFCH) bölünür. Zaman ise zaman dilimleri ve TDMA çerçevelerine bölünür.

GSM’ de kullanılan frekans bandları, mobil istasyondan BTS (Base Transceiver Station)’e doğru (uplink) 890-915 MHz, BTS’den mobil istasyona doğru 935-960 MHz (downlink) dir. Mobil istasyon ile BTS arasındaki haberleşme, modüle edilmiş 124 taşıyıcı çiftinden oluşur. İki taşıyıcı frekans aralığı 200 KHz dir. Bir taşıyıcı çifti, TDMA çerçevesi 8 zaman diliminden oluştuğundan, 8 trafik kanalına kadar bilgi içerebilir.

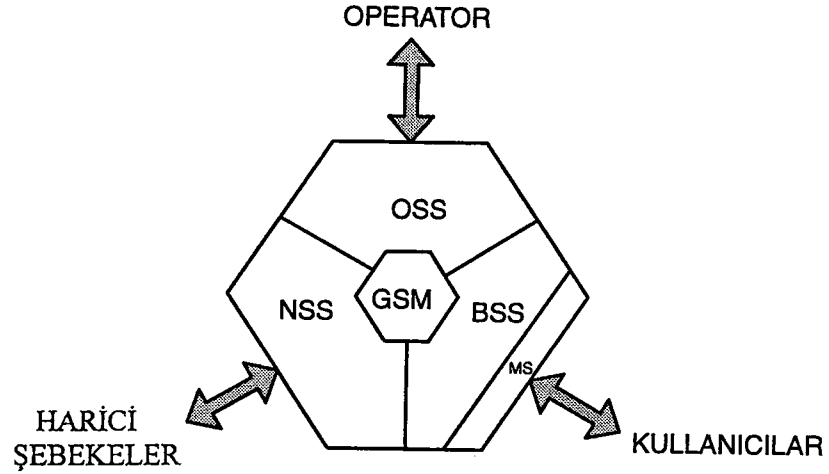
$$\begin{aligned} f_i &= 890,2 + 0.2 \times (i-1) \text{ (MHz) (MS'den BTS'e)} \\ f_i &= 935,2 + 0.2 \times (i-1) \text{ (MHz) (BTS'den MS'e)} \\ i &: 1, \dots, 124 \end{aligned} \quad (4.1)$$

GSM sisteminde, belirli bir hücre için tahsis edilen radyo frekansı kanallarının alt kümesi CA (Cell Allocation) olarak isimlendirilir. Bir hücreye tahsis edilen maksimum taşıyıcı sayısı tanımlanmamıştır.

Bilgi, anten ile hava arayüzünden gönderilmeden önce sayısal hale dönüştürülür, kodlanır ve alıcıda ters işlemle tekrar elde edilir.

4.5 GSM Şebeke Mimarisi

Bu bölümde GSM, alt sistemler şeklinde analiz edilecek ve ana bloklar tanımlanacaktır. GSM Şebeke mimarisi, alt sistemlerin organizasyonu olarak Şekil 4.4’ de, ana bloklar olarak Şekil 4.5’ de gösterilmiştir [7].

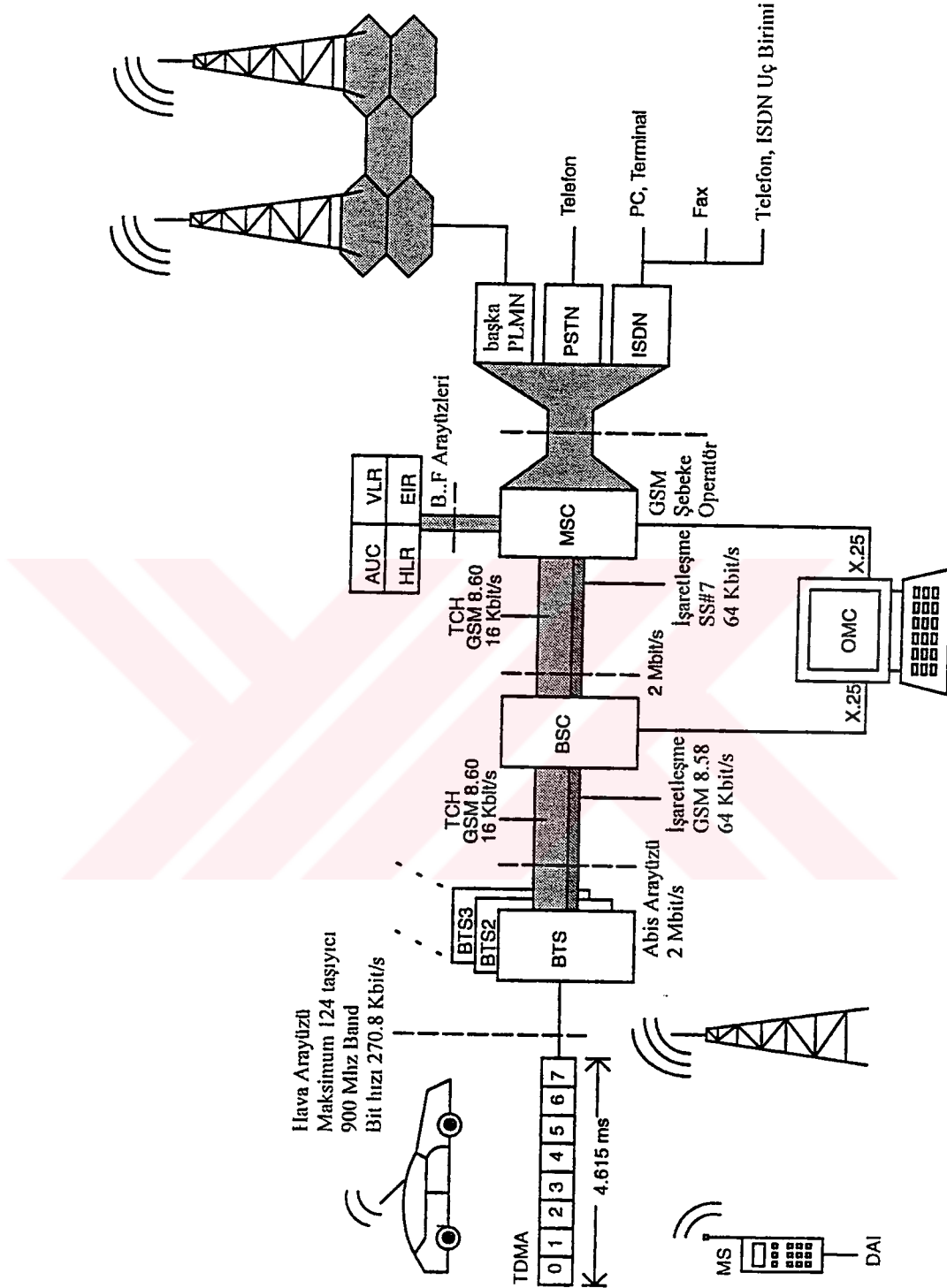


Şekil 4.4: GSM'in alt sistemler organizasyonu

İşletim ve Bakım alt sistemi (OSS, Operation and Maintenance Sub-system), sistemin durumu hakkında bilgi edinilmesini sağlayan iş istasyonları veya terminalleri, sistemin işletimi ve bakımı için gerekli görevleri yerine getiren bilgisayarları içerir.

Radyo alt sistemi (BSS, Base Station Sub-system), mobil istasyon ile Şebeke ve Anahtarlama alt sistemi (NSS, Network and Switching Sub-system) arasındaki, radyo arabağını da içeren haberleşmeden sorumlu alt sistemdir. BSS, Alıcı-Verici istasyon (BTS, Base Transceiver Station) ve Radyo Denetleyici (BSC, Base Station Controller) birimlerinden oluşur.

NSS, mobil istasyonların ilgili şebekelerle ya da diğer mobil istasyonlarla haberleşmesinden sorumlu alt sistemdir. GSM'in anahtarlama ile ilgili görevleri bu alt sistemde Mobil hizmetler Anahtarlama Merkezinde (MSC, Mobile services Switching Center) gerçekleştirilir. NSS; Mobil hizmetler Anahtarlama Merkezleri, Yerel Saklayıcılar (HLR, Home Location Registers), Geçici Saklayıcılar (VLR, Visitor Location Registers), Kimlik kanıtlama Merkezleri (AUC, Authentication Centers) ve Donanım Tanıtma Saklayıcıları (EIR, Equipment Identification Registers) birimlerinden oluşur.



Şekil 4.5: GSM Şebeke Mimarisi

Alıcı-Verici İstasyon (BTS) bir hücreye hizmet eder ve mobil istasyonla olan arayüzü sağlar. Bu nedenle BTS karmaşık bir radyo modemi olarak da düşünülebilir.

BTS hem tüm yönlü hem de yönlendirilmiş olarak çalışabilir. Bir BTS’de bir veya daha fazla alıcı-verici bulunabilir.

Radyo Denetleyici (BSC), trafik kapasitesine göre bir veya daha fazla BTS’i kontrol eder. Radyo kanallarının tahsisi ve değiştirilme işlemi BSC tarafından yapılır.

Mobil hizmetler Anahtarlama Merkezi (MSC), mobil istasyondan yapılan ya da mobil istasyona doğru yapılan çağrıların sonlandırılması, yönlendirilmesi ve kontrolü işlemlerini yapar. Ayrıca MSC, bu çağrıların ücretlendirilmesinden sorumludur. MSC anahtarlama işlemi yapan büyük bir makina olarak düşünülebilir ve birkaç BSC’yi kontrol eder [8].

Yerel Saklayıcı (HLR, Home Location Register), abone verilerinin ve abonenin o andaki konumu ile ilgili bilginin saklandığı yerel saklayıcıdır. GSM’e yeni bir kullanıcı abone olduğunda, bu kullanıcıya ait abone bilgisi yerel saklayıcıya girilir. HLR’deki veri tabanı aşağıdaki bilgileri içerir:

- Uluslararası Mobil Abone Bilgisi (IMSI)
- Mobil İstasyon ISDN numarası (MS-ISDN)
- Yönlendirme amaçlı kullanılan Mobil İstasyon Gezici Numarası (MSRN)
- Temel haberleşme hizmetleri abone bilgisi
- Hizmet sınırlamaları
- Tamamlayıcı hizmetler ile ilgili bilgi

Geçici Saklayıcı (VLR, Visitor Location Register), mobil istasyonun bu saklayıcı tarafından kontrol edilen bölgede bulunduğu sürece, çağrı kotarma ve diğer amaçlar için abone bilgisinin saklandığı saklayıcıdır. VLR, belirli bir bölgede bulunan abonenin mobil istasyon gezici numarası, konumu, tamamlayıcı hizmet parametreleri gibi abone bilgilerini dinamik olarak saklar. VLR’deki veritabanı abone hakkında aşağıdaki bilgileri içerir:

- Uluslararası Mobil Abone Bilgisi (IMSI)
- Mobil İstasyon ISDN numarası (MS-ISDN)
- Mobil İstasyon Gezici Numarası (MSRN)

- Geçici Mobil İstasyon Bilgisi (TMSI, Temporary Mobile Station Identity)
- Mobil istasyonun kayıtlı olduğu bölge
- Tamamlayıcı hizmet parametreleri

Kimlik Kanıtlama Merkezi (AUC, Authentication Center), abonenin güvenlik ile ilgili bilgilerini içeren ve güvenlik ile ilgili parametreleri üreten idari bir merkezdir.

Kimlik kanıtlama mekanizması: Bu mekanizma sabit alt sistem ile mobil istasyon arasında, aşağıdaki şekilde, bazı bilgilerin karşılaştırılması esasına dayanır.

- Sabit alt sistem mobil istasyona bir numara (RAND) gönderir.
- Mobil istasyon bu numarayı kullanarak bir işaret üretir.
- Bu işaret ve abone kimlik kanıtlama anahtarı 'Ki' A3 algoritmasından geçirilerek bir cevap (SRES) üretilir. Abone kimlik kanıtlama anahtarı 'Ki', herbir abone için GSM sistemine abone olma sırasında IMSI ile birlikte tahsis edilir.
- Mobil istasyon bu cevabı sabit alt sisteme gönderir.
- Sabit alt sistem bu cevabın geçerliliğini kontrol eder.

Kimlik Kanıtlama Mekanizması Şekil 4.6' da gösterilmiştir.

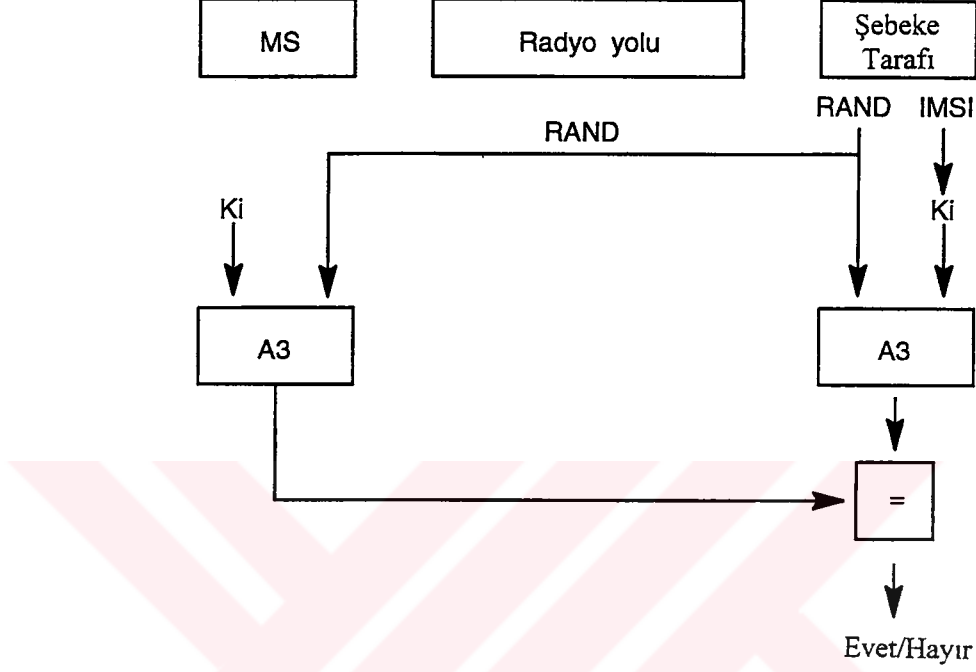
Donanım Tanıtma Saklayıcısı (EIR, Equipment Identification Register), mobil istasyonun Uluslararası Mobil Donanım Bilgisini (IMEI) içerir.

İşletim ve Bakım Merkezi (OMC, Operation and Maintenance Center), şebeke operatörünün, çalışma maliyetlerini düşürmek için tüm şebekeyi kontrol edebilmesini sağlar.

Şebeke yönetim fonksiyonları aşağıda verilmiştir;

- İşletim ve performans yönetimi
- Şebekenin idari ve ticari yönetimi (Aboneler, terminaller, faturalama, hesaplama ve istatistikler)

- Güvenlik yönetimi
- Sistemde yapılan değişikliklerin kontrolü.

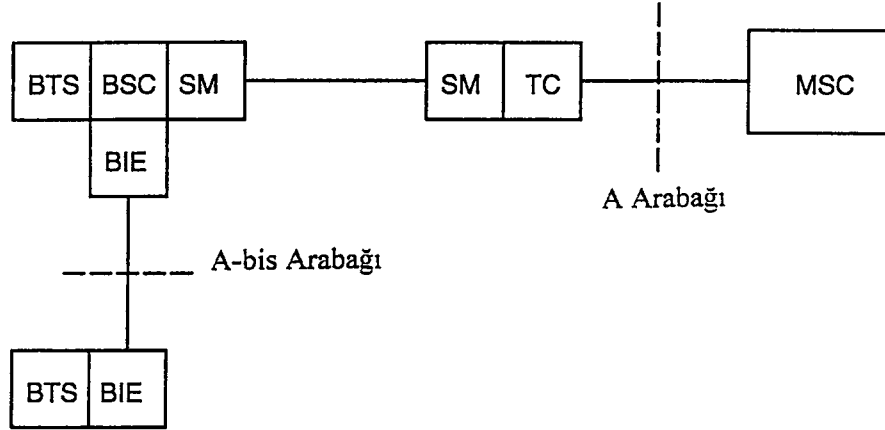


Şekil 4.6: Kimlik Kanıtlama Mekanizması

4.6 İletim Donanımı

Aşağıda anlatılan fonksiyonlar GSM şebekesinde iletim ve hız uyarlamaları için gereklidir. İletim Donanımının şebeke içerisindeki yapısı Şekil 4.7' de gösterilmiştir.

Ana İstasyon Arayüz Donanımı (BIE, Base Station Interface Equipment), BTS ile BSC arasında 4 radyo kanalını bir 64 Kbit/s kanalına çoklamak için kullanılır. Kod çevriminde konuşma, frekansı 13 Kbit/s olacak şekilde kodlanır. Diğer 3 Kbit/s ise BTS tarafından kod çeviricinin band kontrolü için kullanılır. Bir radyo kanalının kapasitesi 16 Kbit/s dir. Böylece sistemin yapısına göre iletim hattı 3 ya da 4 kez daha fazla verimli kullanılmış olur. GSM operatörleri iletim donanımını kiraladıkları için bu özellik önemlidir.



Şekil 4.7: İletim Donanımı

Ana İstasyon Arayüz Donanımı (BIE, Base Station Interface Equipment), BTS ile BSC arasında 4 radyo kanalını bir 64 Kbit/s kanalına çoklamak için kullanılır. Kod çevriminde konuşma, frekansı 13 Kbit/s olacak şekilde kodlanır. Diğer 3 Kbit/s ise BTS tarafından kod çeviricinin band kontrolü için kullanılır. Bir radyo kanalının kapasitesi 16 Kbit/s dir. Böylece sistemin yapısına göre iletim hattı 3 ya da 4 kez daha fazla verimli kullanılmış olur. GSM operatörleri iletim donanımını kiraladıkları için bu özellik önemlidir.

Alt Çoklayıcı (SM, Submultiplexer), BSC ile Kod Çevirici (TC, Transcoder) arasında BIE gibi çoklama görevi yapar.

Kod Çevirici (TC), 13 Kbit/s olarak kodlanmış konuşma katarını, 64 Kbit/s A-kanununa göre kodlanmış konuşma katarına dönüştürür. TC, 9.6 Kbit/s' ye kadar olabilecek değişik bit hızlarında çalışabilir.

4.7 Çağrı Kotarma

Bir mobil abone aynı GSM şebekesine bağlı diğer mobil abonelerle haberleşebileceği gibi aşağıdaki şebekelerden herhangi birine bağlı abone ile de haberleşebilir:

- Kamusal Anahtarlama Telefon Şebekesi (PSTN)

- Tümleşik Hizmetler Sayısal Şebekesi (ISDN)
- Paket Anahtarlama Kamusal Veri Şebekesi (PSPDN)
- Devre Anahtarlama Kamusal Veri Şebekesi (CSPDN)
- Diğer GSM Şebekeleri (PLMN, Public Land Mobile Networks)

VLR de kayıtlı mobil abone çağrısı: Çağrının aranan numaraya yönlendirildiği normal durumdur. Çağrıdan sonra MSC ücretlendirme bilgisini HLR ya da ücretlendirme verilerinin saklandığı merkeze gönderir.

VLR de kayıtlı olmayan mobil abone çağrısı: Bu durumdaki bir mobil abone tarafından yapılan çağrıda, MSC, çağrı düzenleme parametreleri için VLR'den istekte bulunur. Daha sonra VLR, HLR'ye iletilmek üzere konum yenileme işlemini başlatır ve çağrı yapılır. Bu durum VLR veya mobil aboneden kaynaklanan hata durumlarında oluşur.

Mobil aboneye yapılan çağrı: MSC tarafından HLR'den mobil abonenin konum bilgisi elde edilerek çağrı yönlendirilir.

Aktarma (Handover) işlemi, aynı BSS içindeki fiziksel kanallar arasında, aynı MSC içindeki BSS'ler arasında ve aynı şebeke içindeki farklı MSC'ler arasında yapılabilir.

Aynı BSS içindeki fiziksel kanallar arasındaki aktarma işlemi, çağrının taşındığı fiziksel kanalda girişim ya da diğer bozucu etkenler oluşması, bu kanalın bakıma alınması gibi durumlarda meydana gelir. Aynı MSC içindeki BSS'ler arasındaki ve aynı şebeke içindeki farklı MSC'ler arasındaki aktarma işlemi ise mobil istasyonun bir bölgesel alandan diğer bölgesel alana geçişinde bağlantının devamlılığını sağlamak için yapılır.

Aktarma işlemi, mobil istasyon, BSS veya MSC tarafından işaretin seviyesine bakılarak gerçekleştirilir.

4.8 Şebeke-Hücre Seçimi ve Ücretlendirme

Mobil istasyon hangi GSM şebekelerinin hizmet verdiğini ve seçilen GSM şebekesini ekranında gösterir. SIM'den elde edilen bilgiye göre mobil istasyon, kullanılmasına izin verilmeyen GSM şebekelerini de gösterebilir. Şebeke seçimi mobil istasyon tarafından otomatik olarak yapılabileceği gibi kullanıcı tarafından da yapılabilir.

Mobil istasyon etkin olmadığı durumda, hücre seçimi işlemini yapar. Hücre seçimi işleminde, mobil istasyonun bir hücrenin hizmet ettiği alan içinde bulunup bulunmadığı BTS'in gönderdiği işaretlerle kontrol edilir. Mobil istasyon bir hücrenin hizmet ettiği alanın içindeyse, BTS'in gönderdiği radyo ile arama mesajını alır, karşılığında bu BTS'e rastgele erişim teşebbüsünde bulunur. Bu işlemler başarı ile sonuçlanırsa, mobil istasyon bu hücreye tahsis edilen taşıyıcıların listesini okuyabilir.

IMSI bilgisi içeren mobil istasyon önce bağlı bulunduğu GSM şebekesini seçer, sonra hücre seçimi işlemi başlar. Uygun hücre bulunduğunda mobil istasyonun konum bilgisi yenilenir.

GSM sisteminin ana amaçlarından biri de bir ülkedeki GSM şebekesine abone olan kullanıcının, başka bir ülkedeki GSM şebekesine erişim hakkının olabilmesidir. Ziyaret edilen bir ülkede mobil istasyonun kullanımı durumunda, yararlanılan hizmetlere karşılık gelen fatura, abonenin IMSI bilgisi yardımıyla bağlı bulunduğu şebekeye gönderilir. Abone bağlı bulunduğu operatöre, bu operatör de ziyaret edilen ülkede kullanılan operatöre gerekli ödemeyi yapar.

Mobil istasyonun ülke içinde kullanımı durumunda fatura çağrısı yapan aboneye işlenir. Kullanıcı ülke dışında ise, kendisine yapılan çağrılarda; Çağrısı yapan ile kullanıcının ülkesinde bağlı bulunduğu GSM şebekesine kadar olan ücretlendirme çağrısı yapana, kullanıcının bağlı bulunduğu GSM şebekesinden kullanıcının bulunduğu ülkeye kadar olan ücretlendirme bilgisi ise kullanıcıya işlenir. Ülke

dışında mobil istasyonun kullanımında, hizmetlerinden yararlanan operatörün ücretlendirilmesi geçerlidir.

Kısa mesaj hizmetinden yararlanıldığında, ücretlendirme, çağrının konuşma şeklinde olduğu gibi yapılır. Veri şeklinde yapılan çağrılarda ise ücretlendirme, verinin büyüklüğüne ve çağrı için gereken zamana bağlıdır.

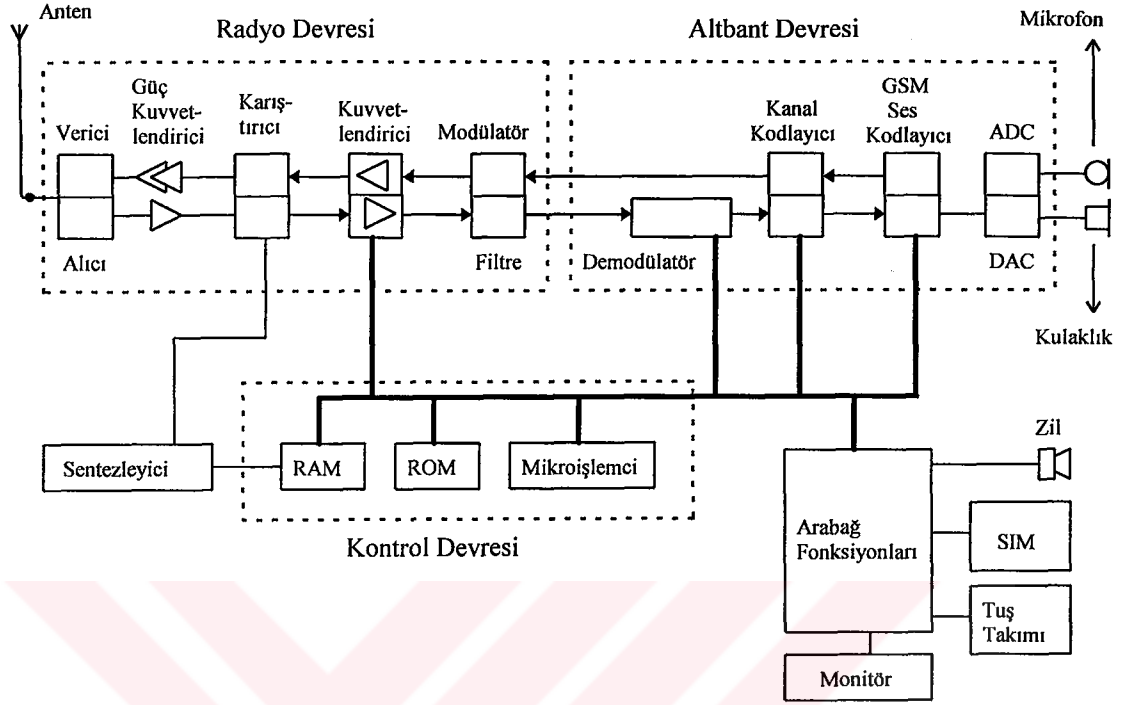
Operatörün izin belgesine ve bulunulan ülkeye göre ücretlendirme, şebeke yenileme ve bakım masrafları gibi maliyetleri de içerebilir.

4.9 Akustik Yüzey Dalga (SAW) Filtrenin GSM’ deki Uygulaması

Mobil haberleşme alanındaki çok önemli gelişmelerden biri de akustik yüzey dalga esasına dayanan devrelerde gerçekleştirilen ilerlemelerdir. Özellikle keskin ve kararlı karakteristiklere sahip olmasının yanında, hafifliği ve küçüklüğü dolayısıyla band geçiren SAW filtreler, mobil haberleşme sistemlerinde ve GSM sisteminde kullanılmaktadır [9,10].

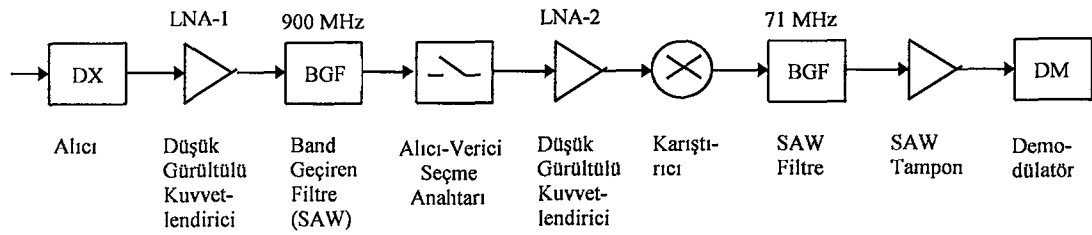
Elektronikğin bütün uygulamalarında olduğu gibi GSM sisteminde de performans, boyutlar ve maliyet çok önemlidir. Akustik yüzey dalga teknolojisindeki mevcut bu özellikler (iyi performans, küçük boyut, düşük maliyet), günümüzde yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanan GSM sisteminde SAW filtrelerin kullanılmasına olanak sağlamıştır.

Band geçiren SAW filtre, GSM sisteminde, mobil istasyonda veya BTS’ de kullanılır. Şekil 4.8’ de mobil istasyonun blok yapısı verilmiştir [11].



Şekil 4.8: Mobil istasyon blok yapısı

Mobil istasyonda, radyo devresi içerisinde yer alan filtre, band geçiren SAW filtredir. Radyo devresindeki alıcı kısmı daha açık olarak Şekil 4.9’ da gösterilmiştir [12].



Şekil 4.9: SAW filtrenin radyo devresindeki yeri

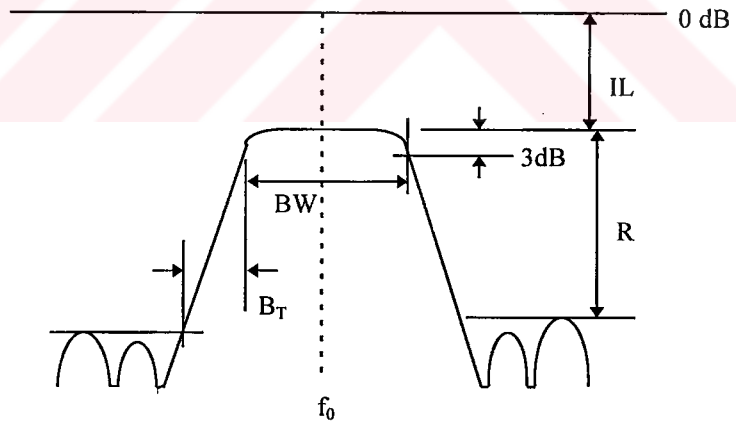
Anten aracılığıyla alınan işaret, radyo devresindeki alıcıya gelir ve kuvvetlendirilir. Daha sonra 900 Mhz frekansındaki işaret band geçiren SAW filtre ile süzülür ve süzülen işaret tekrar kuvvetlendirilir. Karıştırıcı yardımıyla istenen ara frekansa çekilen işaret, bir kez daha band geçiren SAW filtreden geçirilir. Böylece istenmeyen işaretler yok edildikten sonra, istenen işaret demodülatöre gönderilir.

GSM sisteminde kullanılan band geçiren SAW filtrenin sağlaması gereken teknik özellikler Tablo 4.2' de verilmiştir [13,14,15,16].

Tablo 4.2: GSM sisteminde kullanılan band geçiren SAW filtrenin teknik özellikleri.

Parametre		Band Geçiren SAW Filtre		
Merkez Frekansı	f_0 (MHz)	70 - 71	902.5	947.5
Band Genişliği	BW(MHz)	0.2 - 0.4	25	25
Araya Girme Kaybı	IL(dB)	max. 11.5	4	3.5
Bastırma	R(dB)	max. 60	min. 25	min. 25
Geçiş Band Genişliği	B_T (MHz)	min. 0.2	-	-

Tabloda geçen parametrelerin karşılığı Şekil 4.10' da açıklanmıştır.



Şekil 4.10. Filtre parametrelerinin tanımları.

BÖLÜM 5

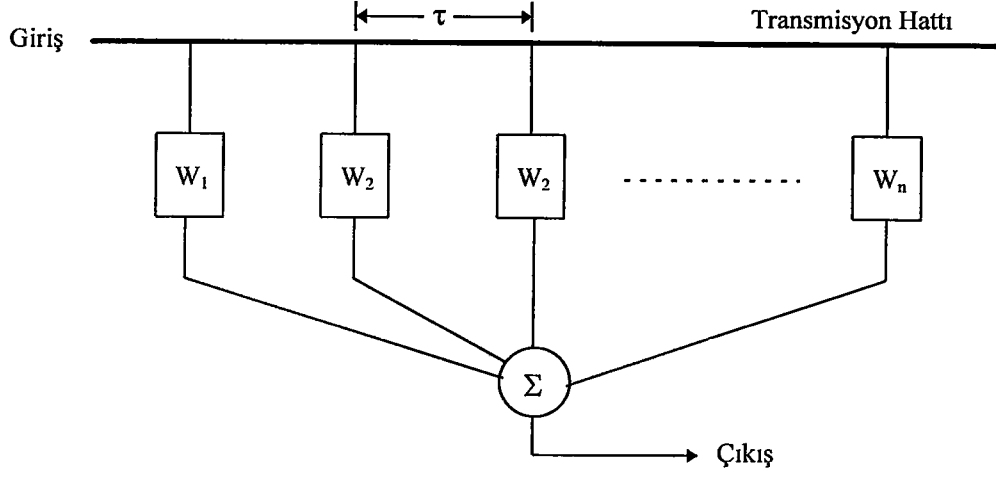
BAND GEÇİREN SAW FİLTRE TASARIMI

5.1 Giriş

Üçüncü bölümde, transdüktör eşdeğer devresinin analizinden, akustik yüzey dalga transdüktörünün uyardığı akustik dalganın ve dolayısıyla transdüktörün transfer fonksiyonunun, transdüktöre uygulanan gerilimin frekansına bağlı olduğu görülmüştü. İki transdüktör belirli bir biçimde, biri verici diğeri alıcı olmak üzere aynı kristal üzerine yerleştirilirse, oluşturulan iki transdüktörlü bu yapının transfer fonksiyonu da transdüktöre uygulanan gerilimin frekansına bağlı olacaktır. Transfer fonksiyonunu belirleyen, transdüktörlerdeki elektrot sayısı (N), elektrotlar arasındaki uzaklık (L_{gn}), elektrot mesafesi (L_{sn}), elektrotların genişliği (W) gibi birçok parametre vardır. Bu parametreler gerçekleştirilmesi istenen transfer fonksiyonunu sağlayacak şekilde kontrol edilirlerse, iki transdüktörlü yapı, bir band geçiren filtre olarak kullanılabilir. Ayrıca transfer fonksiyonunu etkileyen birçok parametrenin olması, filtre gerçekleştirilmesinde esneklik sağlamaktadır.

5.2 Filtre Tasarımı

Akustik yüzey dalga transdüktörünü bir transversal filtre olarak değerlendirmek, tasarım yöntemi elde etmek açısından yararlı olmaktadır. Transversal filtre, Şekil 5.1' de gösterildiği gibi, bir transmisyon hattının belirli noktalarından alınan ve aralarında τ_i kadar gecikme olan işaretlerin, herbiri belirli birer katsayı ile çarpıldıktan sonra bunların toplanmasıyla elde edilmektedir.



Şekil 5.1: Transversal filtre yapısı

Bir kristal taban üzerindeki verici transdüktörün uyardığı akustik yüzey dalgası, aynı taban üzerindeki alıcı transdüktöre ulaştığında, akustik dalganın her bir elektrotta oluşturacağı yük, o elektrodun genişliği ile orantılı olacaktır. Elektrotların taban üzerindeki konumlarının uygun seçilmesiyle τ_i gecikme zamanlarını ayarlamak mümkündür.

Alıcı transdüktördeki elektrotların yayımlanan akustik dalga üzerindeki etkileri ihmal edilirse, başka bir ifadeyle elektrotlu ve elektrotsuz bölge hızları eşit alınırsa, transdüktörün transfer fonksiyonu,

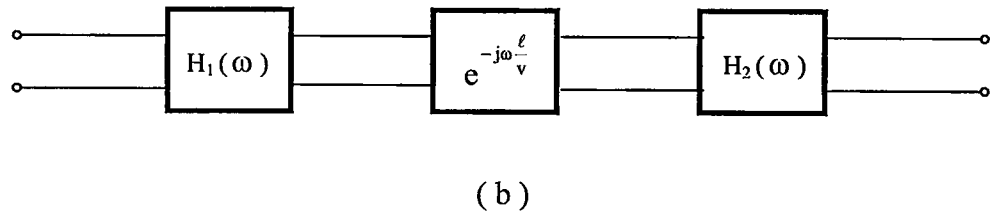
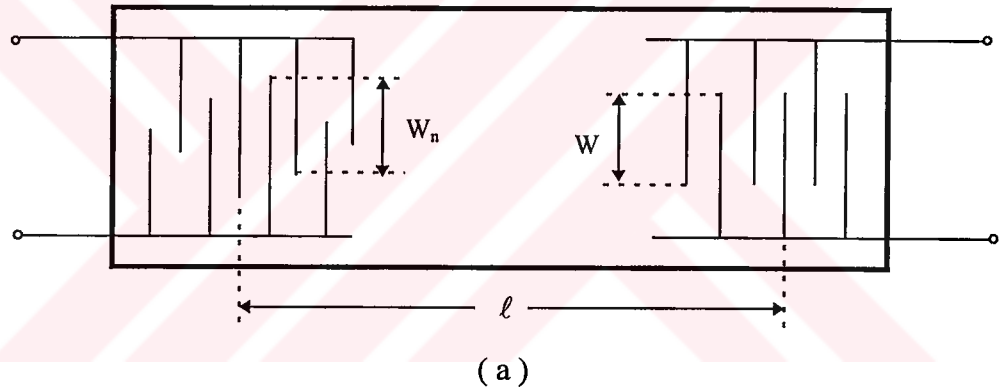
$$H(\omega) = \sum_{n=1}^N (-1)^n W_n e^{j\omega x_n/v} \quad (5.1)$$

ile orantılı olacaktır [1,17]. Burada x_n ve W_n , sırasıyla, n . elektrodun yeri ve elektrot genişliğidir. v akustik dalganın hızı, N ise transdüktördeki elektrot sayısıdır. (5.1) bağıntısı,

$$d(x) = \sum_{n=1}^N (-1)^n W_n \delta(x - x_n) \quad (5.2)$$

biçiminde bir fonksiyonun Fourier dönüşüğüdür. (5.2) ile verilen fonksiyon ise sürekli bir işaretin x_n konumlarında örneklenmesiyle elde edilmiş bir işaret olarak değerlendirilebilir. Görüldüğü gibi örnekleme, ardışıl iki elektrod için değişen işaretle olmaktadır ve bu durum, akustik yüzey dalga filtresinin, ancak band geçiren yapıda olacağını göstermektedir.

Akustik yüzey dalga filtresi, Şekil 5.2 (a)' da gösterildiği gibi, aynı kristal üzerine belirli aralıkla konulmuş iki transdüktörden oluşur ve bu filtreyi Şekil 5.2 (b)' deki gibi, birbirine kaskad bağlanmış üç adet iki kapılı gibi değerlendirmek mümkündür.



Şekil 5.2: (a) Akustik yüzey dalga filtresinin transdüktörlü gösterimi,
(b) iki kapılı devrelerle gösterimi.

$H_1(\omega)$ ve $H_2(\omega)$, transdüktörlerin transfer fonksiyonlarıdır. Birinci transdüktörün uyardığı dalganın ikincisine varmasındaki gecikmeyi Şekil 5.2 (b)' de ortadaki iki kapılı temsil etmektedir. Burada filtrenin transfer fonksiyonu,

$$H(\omega) = H_1(\omega) \cdot e^{-j\omega \frac{\ell}{v}} \cdot H_2(\omega) \quad (5.3)$$

biçiminde yazılabilir. Filtre tasarımında, gerçekleştirilmesi istenen $H(\omega)$ fonksiyonu belirlendikten sonra, transdüktörlerin boyutlandırılmasına geçilir. Transdüktörlerden birinin band genişliği diğerine göre çok büyük tutulursa, bu transdüktörün karakteristiğinin frekansla değişmediği kabul edilebilir. Filtrenin frekans karakteristiği büyük ölçüde diğer transdüktör tarafından belirlenecektir. Böylece filtre tasarım problemi, bir transdüktörün boyutlandırılması problemine indirgenir. Bu amaca uygun olarak, alıcı transdüktörde geniş band elde etmek üzere, eşit genişlikte ve az sayıda elektrot kullanılırsa, ve verici transdüktör alıcı transdüktöre göre daha dar bantlı yapılırsa, alıcı transdüktörün transfer fonksiyonu $H_2(\omega)$, ilgilenilen frekans bölgesi için sabit alınabilir. Bu durumda verici transdüktörün transfer fonksiyonu,

$$H_1(\omega) = K \cdot H(\omega) \cdot e^{j\omega \frac{\ell}{v}} \quad (5.4)$$

şeklinde olacaktır.

Eşit genişlikte ve birbirinin aynı elektrotlarla oluşturulması düşünülen alıcı transdüktörün frekans karakteristiği büyük ölçüde, kullanılacak elektrot sayısına bağlı olacaktır. Elektrot sayısı arttıkça transdüktörün geçirme bandı daralacaktır.

$H_1(\omega)$ ' yı sağlayan transdüktörü gerçekleştirmek için, $H_1(\omega)$ ' nin ters Fourier dönüşüğü olan $h_1(t)$ fonksiyonunu hesaplamak gerekir. $h_1(t)$ fonksiyonu, genel ifadesi $a(t) \cdot e^{j\phi(t)}$ biçiminde olan bir kompleks fonksiyondur [1]. Bu durumda $h_1(t)$ ' nin $\phi(t) = (n \pm \frac{1}{2})\pi$ bağıntısının sağlandığı $t_{n \pm \frac{1}{2}}$ anlarında örneklenmiş olduğu düşünülebilir. Böylece $h_1(t)$ ' nin örneklenmiş ifadesi olarak,

$$h_{10}(t) = \sum_{n=1}^N h_1(t) \left\{ \delta \left(\phi(t) - \left(n + \frac{1}{2}\right) \pi \right) + \delta \left(\phi(t) - \left(n - \frac{1}{2}\right) \pi \right) \right\} \quad (5.5)$$

elde edilir. Bu örneklenmiş ifadenin Fourier dönüşüğü,

$$H_{10}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} h_{10}(t) \cdot e^{-j\omega t} dt = \sum_{n=1}^N \left(\frac{a(t_{n+1/2}) \cdot e^{j \left[\left(n + \frac{1}{2}\right) \pi - \omega t_{n+1/2} \right]}}{\phi'(t_{n+1/2})} + \frac{a(t_{n-1/2}) \cdot e^{j \left[\left(n - \frac{1}{2}\right) \pi - \omega t_{n-1/2} \right]}}{\phi'(t_{n-1/2})} \right) \quad (5.6)$$

şeklindedir. $\phi(t)$ fonksiyonu, $\phi(t) = n\pi$ eşitliğini sağlayan t_n anı civarında Taylor serisine açılıp, ilk iki terimi alınırsa,

$$\phi(t) = \phi(t_n) + \phi'(t_n) \cdot (t - t_n) \quad (5.7)$$

bulunur. Buradan,

$$t = t_n + \frac{\phi(t) - \phi(t_n)}{\phi'(t_n)} \quad (5.8)$$

ve

$$t_{n \pm 1/2} = t_n \pm \frac{\pi}{2\phi'(t_n)} \quad (5.9)$$

olarak elde edilir. $\phi'(t_n) = \omega_n$ tanımı yapılırsa (5.9) ifadesi,

$$t_{n \pm 1/2} = t_n \pm \frac{\pi}{2\omega_n} \quad (5.10)$$

şekline dönüşür. $a(t)$ ve $\phi(t)$ 'nin t_n civarında yavaş değiştiği düşünülürse,

$$\begin{aligned} a(t_{n\pm 1/2}) &\cong a(t) \\ \phi'(t_{n\pm 1/2}) &\cong \phi'(t_n) = \omega_n \end{aligned} \quad (5.11)$$

yazılabilir. (5.10) bağıntısının (5.6)' da kullanılmasıyla,

$$H_{10}(\omega) = \sum_{n=1}^N 2 \frac{a(t_n)(-1)^n}{\omega_n} \text{Sin}\left(\frac{\pi}{2} \frac{\omega}{\omega_n}\right) \cdot e^{-j\omega t_n} \quad (5.12)$$

elde edilir. Bu transfer fonksiyonunda,

$$\phi\left(\frac{x_n}{v}\right) = n\pi \quad (5.13)$$

ve

$$r_n = 2 \frac{(-1)^n a\left(\frac{x_n}{v}\right)}{\omega_n} \quad (5.14)$$

bağıntılarının geçerli olması gerekir [1]. (5.13) bağıntısı, transdüktördeki elektrotların yerlerini, (5.14) bağıntısı ise elektroakustik transformatörün çevirme oranını vermektedir. Daha önce eşdeğer devrenin analizinde kullanılan ve (3.11) bağıntısı ile verilen transformatör çevirme oranı, (5.14) ile verilen bağıntıyla eşitlenirse, elektrot genişlikleri

$$W_n = W_{\max} \left(\frac{f_n}{f_0}\right)^{-3/2} a\left(\frac{x_n}{v}\right) \frac{\sqrt{K(q_n)K(q'_n)}}{K(1/\sqrt{2})} \quad (5.15)$$

olarak elde edilir. (5.15) ifadesindeki $W_{\max}$, transdüktör giriş empedansının istenilen değerde olmasını sağlayacak şekilde hesaplanacak bir sabittir.

Akustik yüzey dalga filtresinin RLC filtresinden farkı, transfer fonksiyonlarından görülebilir. RLC filtresi için transfer fonksiyonu, rasyonel bir fonksiyon olup, bu rasyonel fonksiyonun sıfır ve kutuplarının yeri, filtrenin frekans karakteristiğini belirlemektedir. Transdüktörün transfer fonksiyonu ise (5.1) bağıntısı ile verilmektedir. Transdüktördeki elektrotlar arasındaki uzaklık eşit seçilirse ve bir elektrottan ötekine akustik yüzey dalgaının erişme süresi T ise, $z = e^{j\omega T}$ olmak üzere, (5.1) bağıntısı ile verilen transfer fonksiyonu,

$$H(z) = \sum_{n=1}^N a_n z^n \quad (5.16)$$

şeklinde bir çok terimlidir. Bu transfer fonksiyonunda kutupların olmayışı nedeniyle, keskin karakteristikli bir filtre elde edebilmek için çok sayıda elektrot kullanmak gerekir. Çok sayıda elektrot kullanmak ise, kristalin uzunluğunu arttıracaktır.

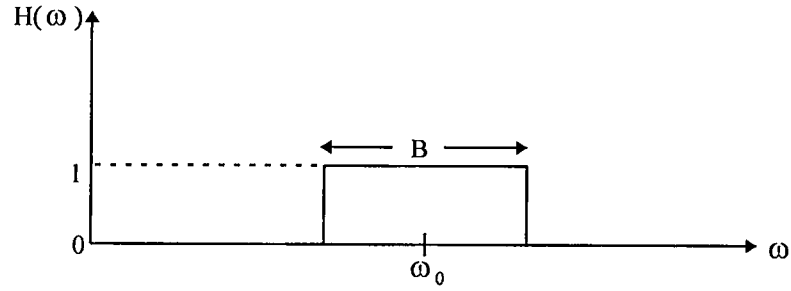
(5.16) ile verilen transfer fonksiyonu, sonlu impuls cevaplı (FIR) sayısal filtreninki ile aynı yapıdadır. Bu nedenle, band geçiren akustik yüzey dalga filtresinin belirtilen özellikleri sağlayan transfer fonksiyonunun bulunmasında sayısal filtreler için geliştirilen yöntemlerden yararlanılabilir.

İdeal band geçiren filtrenin dikdörtgen şeklinde olan frekans karakteristiğinin ters Fourier dönüşüğünün üzerine çeşitli pencere fonksiyonları uygulayarak, keskin karakteristikli ve yan kulakçıkları iyice söndürülmüş filtre karakteristiği elde edilebilmektedir.

Daha önce açıklandığı gibi, transdüktörün impuls cevabı, doğrudan doğruya transdüktörün geometrisiyle ilgilidir. Bu nedenle istenilen filtrenin boyutlandırılması işlemi, filtrenin impuls cevabı yardımıyla yapılabilir. Merkez frekansı f_0 ve band genişliği B olan ideal band geçiren filtrenin impuls cevabı,

$$h(t) = \text{Sinc}(Bt) \cdot \cos(\omega_0 t) = \frac{\text{Sin}(\pi Bt)}{\pi Bt} \cos(\omega_0 t) \quad (5.17)$$

şeklindedir. Şekil 5.3' de band geçiren filtrenin frekans karakteristiği verilmiştir.



Şekil 5.3: Band geçiren filtre frekans karakteristiği

Filtredeki transdüktörlerden biri geniş bandlı ise, öteki transdüktördeki elektrotlar (5.17) bağıntısının örneklenmiş biçimine göre yerleştirilecektir. (5.13) ve (5.15) ile verilen bağıntılarda (5.17)' de verilen impuls cevabı kullanılırsa,

$$x_n = n \frac{v}{2f_0}$$

$$W_n = W_{\max} \frac{\sin(\pi B \frac{x_n}{v})}{\pi B \frac{x_n}{v}} \cdot (-1)^n \quad (5.18)$$

ifadeleri elde edilir.

Transdüktör üzerine sonlu sayıda elektrot konulacağından (5.17)' de verilen impuls cevabı, belirli bir zaman aralığı için geçerli olacak ve bu aralığın dışında sıfır olacaktır. Bu şekildeki bir fonksiyonun Fourier dönüşüğü hesaplanırsa, ideal frekans karakteristiği elde edilemez. Gibbs olayından dolayı band içinde dalgalanmalar ve band dışında yan kulakçıklar meydana gelir. Gibbs olayının etkisini azaltmak için, elektrotlar impuls cevabının örneklenmiş biçimine göre boyutlandırılmayıp, impuls cevabı belirli bir pencere fonksiyonu ile çarpıldıktan sonra elde edilen fonksiyonun örneklenmiş biçimine göre boyutlandırılır.

Pencere fonksiyonu olarak; Fejer fonksiyonu, Lanczos fonksiyonu ve Hamming fonksiyonu kullanılabilir. Fejer fonksiyonu,

$$p(t) = \begin{cases} 1 - \frac{|t|}{\tau} & |t| < \tau \\ 0 & |t| > \tau \end{cases} \quad (5.19)$$

şeklindedir. Bu durumda (5.2.18) bağıntısı ile verilen elektrot genişliklerinin ,

$$p(n) = 1 - \frac{|n|}{N+1} \quad (5.20)$$

ile çarpılması gerekir. Lanczos fonksiyonu ise,

$$p(t) = \begin{cases} \frac{\text{Sin} \pi \frac{t}{\tau}}{\pi \frac{t}{\tau}} & |t| < \tau \\ 0 & |t| > \tau \end{cases} \quad (5.21)$$

bağıntısıyla verilir. Bir diğer pencere fonksiyonu,

$$p(t) = \begin{cases} 0.54 + 0.46 \text{Cos}(\frac{\pi t}{\tau}) & |t| < \tau \\ 0 & |t| > \tau \end{cases} \quad (5.22)$$

olarak bilinen Hamming fonksiyonudur.

Elektrot genişliklerinin pencereleme yoluyla ağırlaştırılması, geçirme bandı dışındaki yan kulakçıkların seviyesini düşürmekle beraber geçiş band genişliğini artırır.

5.3 GSM Sistemi için Band Geçiren SAW Filtre Tasarım Örneği

‘Ek A.’ da (5.18) bağıntıları kullanılarak yazılan ve transdüktördeki elektrotların $W_n/W_{\max}$ şeklinde tanımlanan normalize genişliklerini bir önceki bölümde açıklanan pencere fonksiyonları yardımıyla ağırlaştırarak hesaplayan program verilmiştir.

Ek B.’ de ise, 3. Bölümdeki açıklamalar doğrultusunda yazılan ve band geçiren SAW filtrenin analizini yapan program verilmiştir. Bu programda elektrot genişlikleri olarak Ek A.’ daki program yardımıyla hesaplanan elektrot genişlikleri kullanılabileceği gibi, istenen elektrot genişlikleri de kullanılabilir. Analiz programında band geçiren SAW filtrenin $20 \log |H(\omega)|$ (dB) şeklinde tanımlanan araya girme kaybı, faz cevabı ve transdüktörün elektrik kapısından görülen Y_3 admitansı hesaplanmaktadır.

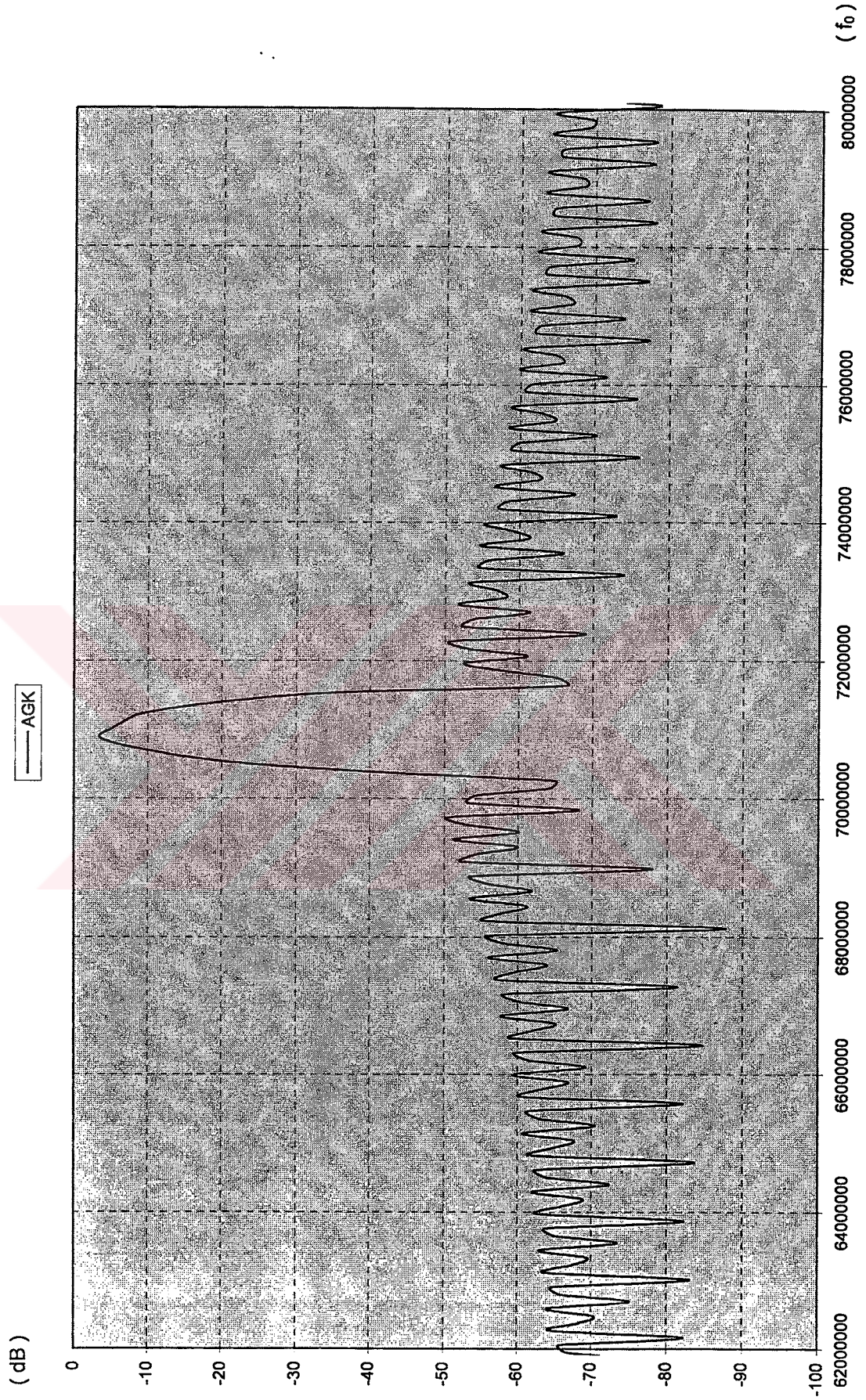
Ek C.’ de, $L_s = L_g = V_0 / 4f_0$ seçilerek oluşturulan band geçiren SAW filtrenin elektrot genişliklerini hesaplayan ve filtrenin analizini yapan program verilmiştir. Bu program Ek A. ve Ek B.’ de verilen programların uygun şekilde birleştirilmesi sonucu oluşmuştur.

Ek D.’ de ise, Ek C.’ de verilen programda kullanılacak verilerin ‘Pencere (Windows)’ ortamında alınmasını sağlayan program verilmiştir. Bu program ile kullanıcının gerekli verileri ekrandan kolaylıkla girmesi sağlanmıştır. Gerçekleştirilecek SAW filtre için taban malzemesi, merkez frekansı, band genişliği ve pencere fonksiyonu ekrandan görülerek seçilmektedir.

GSM sisteminin ara frekans uygulamasında, mobil istasyonda veya BTS’ de kullanılan band geçiren SAW filtre için merkez frekansı (f_0) genellikle 71 MHz ve band genişliği 300 KHz olarak seçilmektedir. Bu nedenle önce merkez frekansı 71 MHz, band genişliği 300 KHz olan band geçiren SAW filtre tasarımı yapılmıştır. Ek C. ve Ek D.’ deki programlar kullanılarak elde edilen 499 adet normalize elektroda sahip transdüktörün, Quartz (Y-X) taban üzerine

yerleştirilmesiyle oluşturulan filtrenin araya girme kaybı (AGK) şekil 5.4’de gösterilmiştir. Programlarda Hamming pencere fonksiyonu seçilmiřtir.

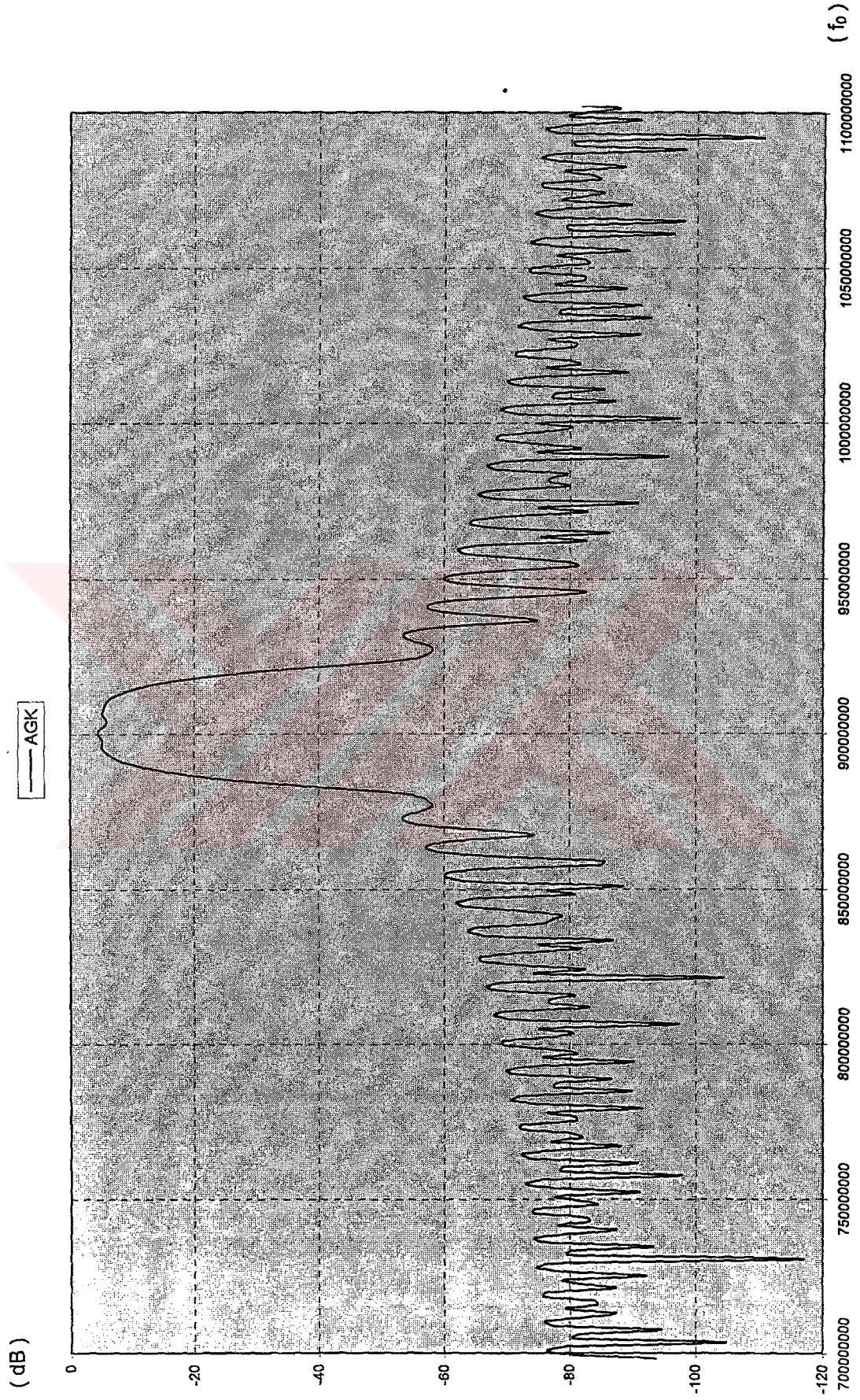




Şekil 5.4: $f_0 = 71$ MHz olan SAW filtrenin araya girme kaybı.

Bu filtrenin tasarlandığı gibi band genişliği $BW = 300 \text{ KHz}$ ' dir. Araya girme kaybı (AGK) $IL = 3.5 \text{ dB}$, bastırması $R = 46.5 \text{ dB}$ ve geçiş band genişliği $B_T = 500 \text{ KHz}$ olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar Tablo 4.2' de verilen değerler ile karşılaştırıldığında, elde edilen sonuçların gerekli teknik özellikleri sağladığı görülmektedir.

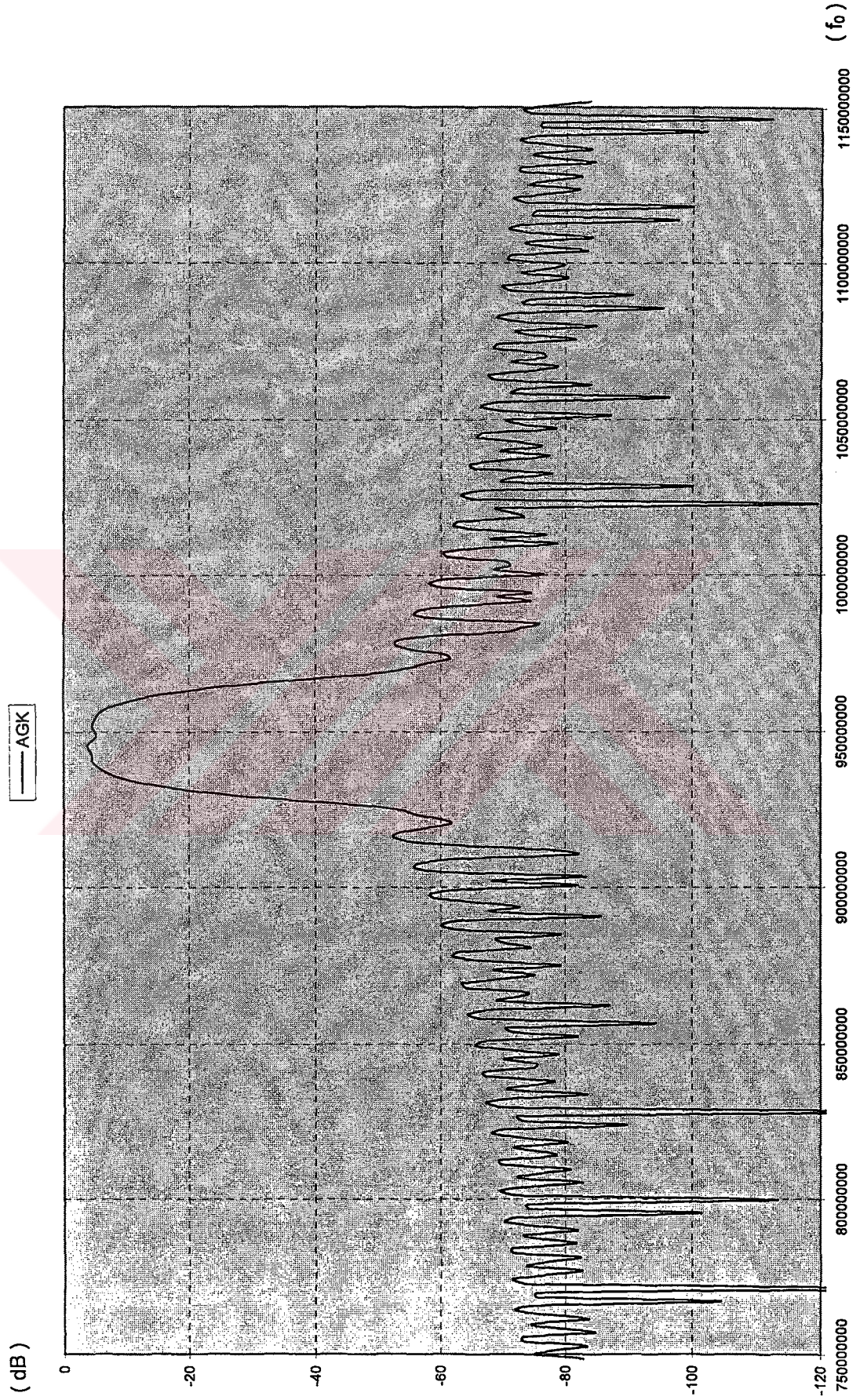
GSM sisteminin radyo frekansı bölgelerinde kullanılan band geçiren SAW filtreler için merkez frekansı 902.5 MHz ve 947.5 MHz olmaktadır. Mobil istasyon için veriş yönündeki merkez frekansı 902.5 MHz ve alış yönündeki merkez frekansı 947.5 Mhz ' dir. Her iki yön için band genişliği ise 25 Mhz ' dir. Bu nedenle önce merkez frekansı 902.5 MHz , band genişliği 25 MHz olan ve Ek C. ile Ek D.' deki programlar kullanılarak elde edilen 399 adet normalize elektroda sahip transdüktörün, Quartz (ST-X) taban üzerine yerleştirilmesiyle oluşturulan filtrenin araya girme kaybı (AGK) Şekil 5.5'de gösterilmiştir. Şekil 5.5 (a)' da daha geniş frekans aralığında Şekil 5.5 (b)' de ise daha dar frekans aralığında araya girme kaybı verilmiştir. Bu filtre için de Hamming pencere fonksiyonu kullanılmıştır. Merkez frekansı 947.5 MHz , band genişliği 25 MHz olan ve Ek C. ile Ek D.' deki programlar kullanılarak elde edilen 399 adet normalize elektroda sahip transdüktörün, Quartz (Y-X) taban üzerine yerleştirilmesiyle oluşturulan filtrenin araya girme kaybı da (AGK) Şekil 5.6' da gösterilmiştir. Şekil 5.6 (a)' da daha geniş frekans aralığında Şekil 5.6 (b)' de ise daha dar frekans aralığında araya girme kaybı verilmiştir. Bu filtre için de Hamming pencere fonksiyonu kullanılmıştır.



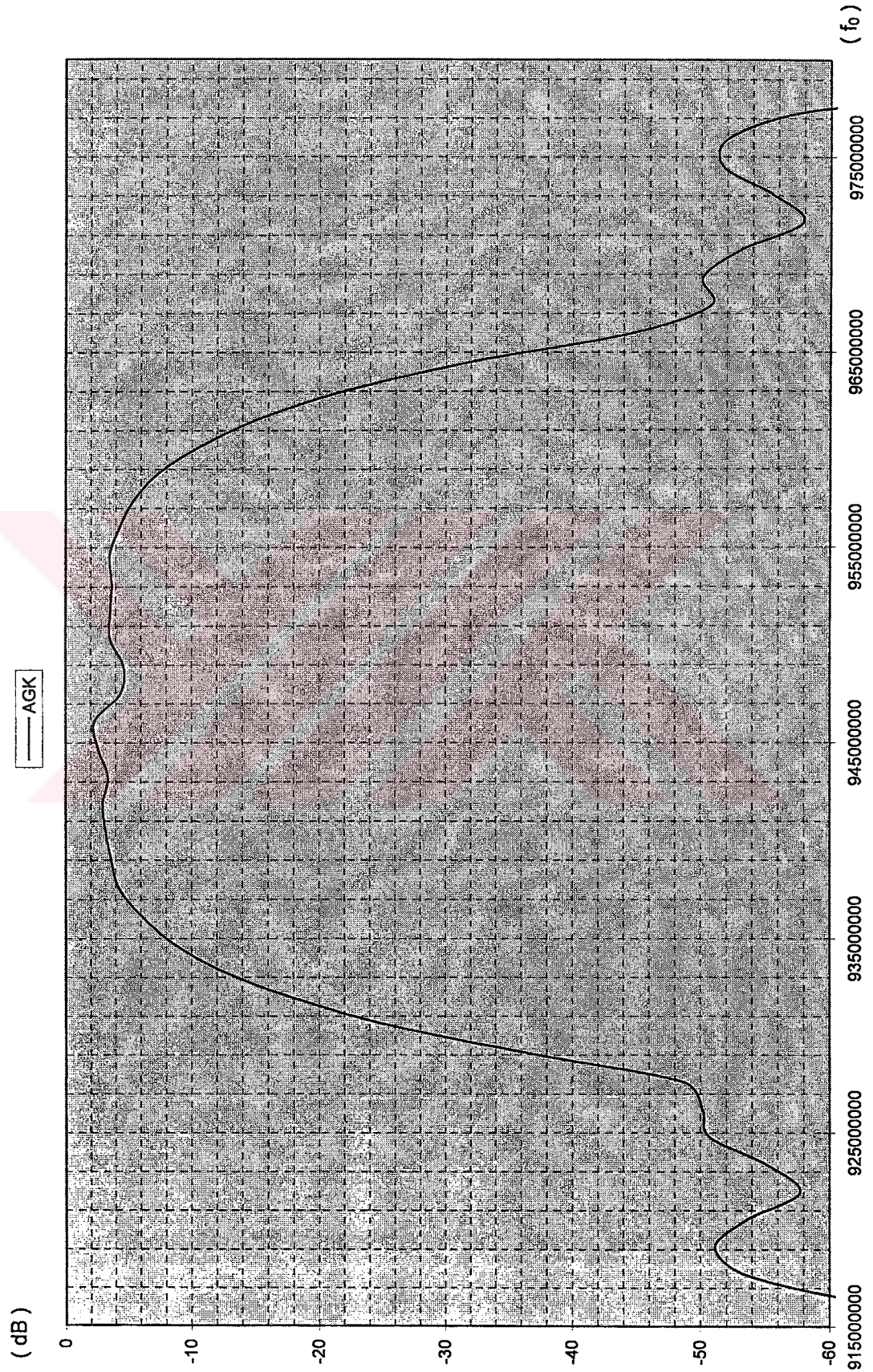
Şekil 5.5 (a): $f_0 = 902.5$ MHz olan SAW filtrenin araya girme kaybı.



Şekil 5.5 (b): $f_0 = 902.5$ MHz olan SAW filtrenin araya girme kaybı.



Şekil 5.6 (a): $f_0 = 947.5$ MHz olan SAW filtrenin araya girme kaybı.



Şekil 5.6 (b): $f_0 = 947.5$ MHz olan SAW filtrenin araya girme kaybı.

Merkez frekansı $f_0 = 902.5$ MHz olan filtrenin tasarlandığı gibi band genişliği $BW = 25$ MHz' dir. Araya girme kaybı (AGK) $IL = 4.5$ dB, bastırması $R = 48$ dB olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar Tablo 4.2' de verilen değerler ile karşılaştırıldığında, elde edilen sonuçların gerekli teknik özellikleri sağladığı görülmektedir.

Merkez frekansı $f_0 = 947.5$ MHz olan filtre için band genişliği $BW = 25$ MHz' dir. Araya girme kaybı (AGK) $IL = 4$ dB, bastırması $R = 48$ dB olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar da Tablo 4.2' de verilen değerler ile karşılaştırıldığında, elde edilen sonuçların gerekli teknik özellikleri sağladığı görülmektedir.

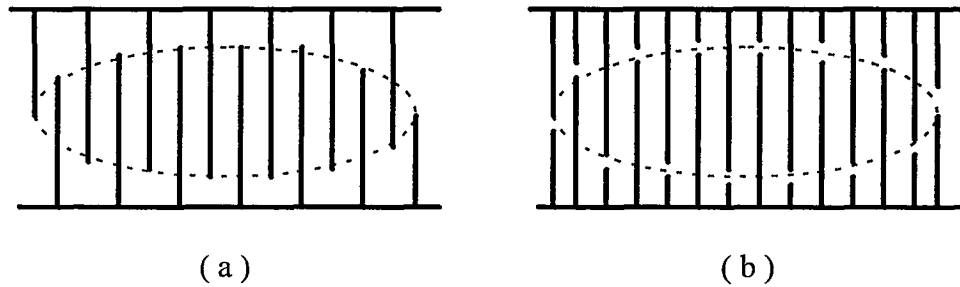
5.4 İkincil Etkiler ve Gerçekleştirme Sınırları

Filtrede alıcı ve verici transdüktörler karşılıklı konulmaktadır. Verici transdüktörün uyardığı akustik dalga, alıcı transdüktöre ulaştığında, empedans uygunluğu sağlanmadığından akustik dalganın bir kısmı yansıyor verici transdüktöre geri gelecektir. Yansıyor gelen bu dalga, verici transdüktörden tekrar alıcı transdüktöre doğru yansımaktadır. Dolayısıyla, alıcı transdüktöre ulaşan ilk dalgadan, iki transdüktör arasındaki yolu almak için geçen zamanın iki katı bir zaman sonra ikinci bir dalga daha alıcı transdüktöre ulaşacaktır. Ayrıca transdüktörler uyumlaştırılmış empedanslarıyla sonlandırılarak rezonans frekansı civarında saçılma parametreleri incelendiğinde, akustik enerjiden elektriksel enerjiye ve elektriksel enerjiden akustik enerjiye geçişteki kaybın minimum 3 dB, yansıma ve transmisyon kayıplarında minimum 6 dB olduğu bilinmektedir. Bu nedenle transdüktörün elektriksel kapılarında empedans uygunluğu olması halinde ilk dalganın yankısı olan dalganın seviyesi ilk dalgaya göre 12 dB daha aşağıda olacaktır. Bu seviyedeki yankı işareti, filtrenin frekans karakteristiğinde 4.4 dB' lik dalgalanmalar meydana getirecektir. Araya girme kaybının 20 dB' den büyük olması durumunda, yankı işaretinin filtrenin frekans karakteristiği üzerindeki bozucu etkisi önemsiz olmaktadır. Küçük araya girme kayıplarında bu etkiden kurtulabilmek için transdüktörlerden birini tek yönlü yapmak gerekir [9,18]. Filtrenin iki yönlü iki transdüktörle gerçekleştirilmesi

halinde, bu etkiyi azaltmak için transdüktörler uyumlaştırılmış empedanslarıyla sonlandırılmamalıdır. Bu ise kaybın artması demektir.

Geçmeli tarak yapıya sahip transdüktörle, akustik yüzey dalganın yanında kütle dalgası da uyarılır. Uyarılan bu kütle dalgaları ya doğrudan ya da kristalin tabanına çarpıp yansiyarak alıcı transdüktöre ulaşır. Kütle dalgasının hızı, yüzey dalga hızından daha büyük olduğundan, alıcı transdüktörde filtrenin geçirme bandından daha yüksek frekanslarda etkili olabilecektir. Kütle dalgasının filtrenin söndürme bandında meydana getireceği bu etkinin frekans karakteristiğini bozmaması istenir. Bu etkiden kurtulmak için kristalin taban yüzeyi pürüzlendirilir ve yutucu bir malzeme ile kaplanarak, kütle dalgalarının yansiyarak alıcı transdüktöre ulaşması engellenir. Ancak bu etkiden tamamen kurtulmak her zaman mümkün olmamaktadır. Kütle dalgasının, filtrenin frekans karakteristiğinin geçirme bandının uzağında meydana getireceği bu etkiyi azaltmak için transdüktör çıkışına, bu etkinin görüldüğü frekans bölgesinde etkili olacak bir endüktans bağlanır.

Bölüm 5.2' de açıklanan yöntem uyarınca boyutlandırılan transdüktörde, elektrot genişliklerinin birbirinden farklı olması ve elektrotlu bölgedeki yüzey dalga hızının elektrotsuz bölgedeki yüzey dalga hızından küçük olması nedeniyle dalga cephesinde bozulmalar meydana gelecektir. Bu bozulma Şekil 5.7 (a)' daki gibi olan transdüktöre Şekil 5.7 (b)' deki gibi pasif elektrotlar ekleyerek önlenabilir.



Şekil 5.7: Transdüktöre pasif elektrotların eklenmesi

Akustik yüzey dalga kullanılarak, merkez frekansı 10 MHz ile 3 GHz arasında olan filtreler gerçekleştirilebilmektedir. Burada alt sınırı kristalin boyutları, üst sınırı ise fotolitografi tekniği belirlemektedir [19,20]. Bu filtrelerde elde edilebilen band

genişliği, merkez frekansının %0.1' i ile %67' si arasında olmaktadır [17,18]. Dar bandlı filtre gerçekleştirebilmek için elektrot sayısının büyük tutulması gerekir. Bu durumda yansımalar etkili olacaktır. Geniş bandlı filtrede ise elektrot sayısı az olacaktır. Bu durumda da frekans karakteristiği yüksek harmonikli işaretlerden dolayı bozulabilecektir.

Akustik yüzey dalga filtresinin araya girme kaybı, iki yönlü transdüktör kullanıldığında, alıcı transdüktörde 3 dB ve verici transdüktörde de 3 dB olmak üzere minimum 6 dB' dir. Bu kayıba ek olarak, kristalin propagasyon kaybı, difraksiyon kaybı ve elektrotların dirençlerinden dolayı oluşan kayıplar araya girme kaybını belirlemektedir.



SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, GSM sisteminin ara frekansında ve radyo frekansında kullanılmak üzere band geçiren SAW filtre tasarımı amaçlanmıştır. Bu nedenle, önce akustik yüzey dalganın uyarılmasında kullanılan, bir düzlem üzerinde gerçekleştirilen geçmeli tarak yapıya sahip transdüktörlerin eşdeğer devre yaklaşımı ile analizi ve tasarımı konusu gözden geçirilmiş ve ayrıca günümüzde yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanan GSM sistemi incelenmiştir.

Transdüktörlerin analizini yapmak üzere, elektrot genişlikleri ve elektrot uzunlukları eşit olmayan, akustik empedans süreksizliğini de içeren eşdeğer devre incelenmiştir. Transdüktörlerin analizi yöntemi kullanılarak, akustik yüzey dalga esasına dayanan filtre tasarımı konusu ele alınmıştır. Geliştirilen bir bilgisayar programı ile GSM sisteminde mobil istasyonda veya BTS' de kullanılan ve merkez frekansları 71 MHz, 902.5 MHz ve 947.5 MHz olan üç ayrı band geçiren SAW filtre tasarlanmıştır. Filtrede kullanılan transdüktördeki elektrot genişlikleri de bilgisayar programıyla hesaplanmaktadır. Tasarlanan filtrelerin, GSM sisteminde kullanılan SAW filtrelerle yaklaşık aynı özelliklere sahip olduğu gözlenmiştir.

Yapılan bilgisayar simülasyonları sonucunda, band genişliğinin ve transdüktördeki elektrot sayısının filtrenin frekans karakteristiğini önemli şekilde etkilediği de gözlenmiştir.

İncelenen analiz yöntemi kullanılarak değişik merkez frekanslarında da band geçiren SAW filtre tasarımı yapılabilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] **AKÇAKAYA**, Ergül, Akustik Yüzey Dalgalar ve Haberleşme Sistemlerindeki Uygulamaları, TÜBİTAK, MAE, Elektronik Araştırma Bölümü.
- [2] **MORGAN**, David P., Surface-Wave Devices for Signal Processing, Elsevier Science Publishers B.V., 1985.
- [3] **CÖMERT**, Şenay, Yüzey Akustik Dalga Esasına Dayanan Filtre ve Rezonatörlerin Analizi ve Tasarımı, Y. Lisans Tezi, İTÜ, 1992.
- [4] **MORGAN**, David P., Editor, Surface Acoustic-Wave Passive Interdigital Devices, IEE Reprint Series 2, Published by Peter Peregrinus Ltd., 1976.
- [5] **SMITH**, W. Richard, **GERARD**, Henry M., **JONES**, William R., Analysis and Design of Dispersive Interdigital Surface Wave Transducers, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. MTT-20, No. 7, July 1972.
- [6] **GSM Overview**, Alcatel Bell Education Centre, Edition A, 1991.
- [7] **MOULY**, Michel, **PAUTET**, Marie B., The GSM System for Mobile Communications, 1992.
- [8] **STEELE**, Raymond, Mobile Radio Communications, IEEE Press, 1995.
- [9] **HIKITA**, M., **OKAZAKI**, K., Low-Loss SAW IF Filters with New Unidirectional IDTs Used in Digital Mobile Radios, Electronics Letters, Vol. 29, Iss. 16, pp. 1484-1485, 1993.
- [10] **HIKITA**, M., **TABUCHI**, T., **ISHIDA**, Y., **KUROSAWA**, K., **HAMADA**, K., Saw Integrated Modules for 800 Mhz Cellular Radio Portable Telephones with New Frequency Allocations, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, Vol. 36, No. 5, September 1989.
- [11] **Electrical Communication**, 2nd Quarter 1993, Alcatel Press.

- [12] **LARSON,** Lawrence E., Editor, RF and Microwave Circuit Design for Wireless Communications, Artech House Publishers, 1996.
- [13] **SAWTEK INCORPORATED,** Product Catalog, 1995.
- [14] **ANDERSON LABORATORIES,** Handbook of Acoustic Signal Processing, SAW Bandpass Filter, Vol.1, Sixth Edition.
- [15] **Motorola,** GSM/NMT SAW Filters, <http://www.mot.com/AECS/CPG/Ceramics/sawgsm.html>, Haziran 1997.
- [16] **Siemens Matsushita Components,** SAW Filters for GSM Systems, <http://www.siemens.de/pr/index.htm>, Haziran 1997.
- [17] **TANCRELL,** R. H., **HOLLAND,** M. G., Acoustic Surface Wave Filters, Proceedings of the IEEE, Vol. 59, No. 3, March 1971.
- [18] **AKÇAKAYA,** Ergül, A New Analysis of Single-Phase Unidirectional Transducers, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, Vol. UFFC-34, No. 1, January 1987.
- [19] **ASAI,** K., **TADA,** T., **HIKITA,** M., Giga-hertz SAW filter developed using new submicron techniques, Electronics Letters, Vol. 31, Iss. 17, pp. 1519-1520, 1995.
- [20] **YATSUDA,** H., **HORISHIMA,** T., **EIMURA,** T., **OOIWA,** T., Minaturized SAW Filters Using a Flip-Chip Technique, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, Vol. 43, No. 1, January 1996.

EK A

TRANSDÜKTÖRDEKİ ELEKTROTLARIN NORMALİZE GENİŞLİKLERİNİ HESAPLAYAN PROGRAM

```
C*****SAW FİLTREDE KULLANILAN*****
C*****ELEKTROTLARIN NORMALİZE GENİŞLİKLERİNİ*****
C***** HESAPLAYAN PROGRAM*****
C*****
      DIMENSION WP(300),WN(300)
      OPEN (UNIT=8, FILE='PARAM.DAT', STATUS='OLD')
      READ(8,*) TABAN, TB, F0, PENC
      IF(TABAN.EQ.1) GOTO 1
      IF(TABAN.EQ.2) GOTO 2
      IF(TABAN.EQ.3) GOTO 3
      IF(TABAN.EQ.4) GOTO 4
      IF(TABAN.EQ.5) GOTO 5
      IF(TABAN.EQ.6) GOTO 6
      IF(TABAN.EQ.7) GOTO 7
C*****1=QUARTZ(Y-X), 2=QUARTZ(ST-X), 3=LINBO3(Y-Z)*****
C*****4=BI12GEO20(100-011), 5=BI12GEO20(111-110)*****
C*****6=LITAO3(Z-Y), 7=ZNO(Z-CUT)*****
      1 VO=3159.
        GOTO 10
      2 VO=3158.
        GOTO 10
      3 VO=3485.
        GOTO 10
      4 VO=1681.
        GOTO 10
      5 VO=1708.
        GOTO 10
      6 VO=3329.
        GOTO 10
      7 VO=2715.
C*****
      10 SL=(VO/4.)/F0
        CL=2.*SL
        YB=TB/2.
        R=-1.
```

```

      PI=4.*ATAN(1.)N=1
      WP(1)=1.
11  N=N+1
      Q=N*PI*YB/F0
      WP(N)=R*SIN(Q)/Q
      R= -R
      IF(N.LT.142) GOTO 11
      NPMAX=N
      NP=NPMAX-1
C*****
      IF(PENC.EQ.1) GOTO 12
      IF(PENC.EQ.2) GOTO 13
      IF(PENC.EQ.3) GOTO 14
C*****HAMMING PENCERE FONKSIYONU*****
12  N=N
      DO 15 N=1,NPMAX
      WP(N)=WP(N)*(0.54+0.46*COS(PI*N/NPMAX))
15  CONTINUE
      GOTO 79
C*****FEJER PENCERE FONKSIYONU*****
13  N=N
      DO 16 N=1,NP
      WP(N)=WP(N)*(1-(N/NPMAX))
16  CONTINUE
      GOTO 79
C*****LANCZOS PENCERE FONKSIYONU*****
14  N=N
      DO 17 N=1,NP
      WP(N)=WP(N)*((SIN(PI*N/NPMAX))/(PI*N/NPMAX))
17  CONTINUE
C*****
79  N=N
      DO 18 I=1,NPMAX
      K=NPMAX-I+1
      WN(I)=WP(K)
      OPEN (UNIT=9, FILE='WNSLCL', STATUS='NEW')
      WRITE(9,19) WN(I), SL, CL
19  FORMAT(3(3X,E15.8))
18  CONTINUE
      DO 20 L=2,NPMAX
      WRITE(9,21) WP(L),SL,CL
21  FORMAT(3(3X,E15.8))
20  CONTINUE
      DO 22 K=1,NP,3
      IF(WN(K+1).EQ.0.OR.WN(K+1).EQ.1.) GOTO 23
      IF(WN(K+2).EQ.0.) GOTO 24
      OPEN (UNIT=25, FILE='WNVAL', STATUS='NEW')
      WRITE(25,26) WN(K),SL,CL

```

```

WRITE(25,26) WN(K+1),SL,CL
WRITE(25,26) WN(K+2),SL,CL
26 FORMAT(F14.11,2(1X,E15.8))
OPEN (UNIT=27, FILE='WNSIRA', STATUS='NEW')
WRITE(27,28) K,WN(K),K+1,WN(K+1),K+2,WN(K+2)
28 FORMAT(3(2X,'W(',I3,')=',F14.11))
GOTO 22
23 WRITE(25,29) WN(K),SL,CL
29 FORMAT(F14.11,2(1X,E15.8))
WRITE(27,30) K,WN(K)
30 FORMAT(2X,'W(',I3,')=',F14.11)
GOTO 22
24 WRITE(25,31) WN(K),SL,CL
WRITE(25,31) WN(K+1),SL,CL
31 FORMAT(F14.11,2(1X,E15.8))
WRITE(27,32) K,WN(K),K+1,WN(K+1)
32 FORMAT(2(2X,'W(',I3,')=',F14.11))
22 CONTINUE
DO 33 I=1,NPMAX,3
K=NP+I
IF(WP(I+1).EQ.0.) GOTO 34
IF(WP(I+2).EQ.0.) GOTO 35
WRITE(25,36) WP(I),SL,CL
WRITE(25,36) WP(I+1),SL,CL
WRITE(25,36) WP(I+2),SL,CL
36 FORMAT(F14.11,2(1X,E15.8))
WRITE(27,37) K,WP(I),K+1,WP(I+1),K+2,WP(I+2)
37 FORMAT(3(2X,'W(',I3,')=',F14.11))
GOTO 33
34 WRITE(25,38) WP(I),SL,CL
38 FORMAT(F14.11,2(1X,E15.8))
WRITE(27,39) K,WP(I)
39 FORMAT(2X,'W(',I3,')=',F14.11)
GOTO 33
35 WRITE(25,40) WP(I),SL,CL
WRITE(25,40) WP(I+1),SL,CL
40 FORMAT(F14.11,2(1X,E15.8))
WRITE(27,41) K,WP(I),K+1,WP(I+1)
41 FORMAT(2(2X,'W(',I3,')=',F14.11))
33 CONTINUE
PB=0.
WRITE(25,42) PB,SL,CL
42 FORMAT(F14.11,2(1X,E15.8))
STOP
END

```

EK B

FİLTRE ANALİZİ YAPAN PROGRAM

```
C*****FİLTRE ANALİZİ (ARAYA GİRME KAYBI, ADMİTANS, FAZ)*****
C*****YAPAN PROGRAM*****
C*****
      DIMENSION C(300), W(300), SL(300), CL(300)
      COMPLEX Y11(450), Y12(450), Y13(450), Y33(450),
&TY11(450), TY12(450), TY22(450), TY13(450), TY23(450),
&TY33(450), DD, YP, PP, QQ, RR, XX, YY, ZZ, GG,HH, DELTA, T13,Y3
      OPEN (UNIT=50, FILE='TFF.DAT', STATUS='OLD')
      READ(50,*) TABAN, FMIN, FMAX
      DO 90 N=1,300
      OPEN (UNIT=60, FILE='WNVAL.DAT', STATUS='OLD')
      READ(60,*) W(N), SL(N), CL(N)
C*****OKUNAN VERİLERİN KONTROLÜ*****
      OPEN (UNIT=70, FILE='OUT.DAT', STATUS='NEW')
      WRITE(70,51) W(N), SL(N), CL(N)
51  FORMAT(F14.11,2(1X,E15.8))
C*****
      IF(W(N).EQ.0.) GOTO 91
90  CONTINUE
91  NE=N-1
      WRITE(70,52) NE
52  FORMAT(I10)
      WRITE(*,53)
53  FORMAT(12(/),30X,'PROGRAM CALISIYOR...')
      WRITE(*,54)
54  FORMAT(/,29X,'LUTFEN BEKLEYİNİZ')
      WRITE(*,55)
55  FORMAT(10(/),' ')
      IF(TABAN.EQ.1) GOTO 61
      IF(TABAN.EQ.2) GOTO 62
      IF(TABAN.EQ.3) GOTO 63
      IF(TABAN.EQ.4) GOTO 64
      IF(TABAN.EQ.5) GOTO 65
      IF(TABAN.EQ.6) GOTO 66
      IF(TABAN.EQ.7) GOTO 67
C*****QUARTZ (Y-X) TABAN ICIN DATA*****
61  VO=3159.
```

```

VM=3156.16
E11=0.392E-10
E33=0.410E-10
AKK=0.0022
GOTO 80
C*****QUARTZ (ST-X) TABAN ICIN DATA*****
62 VO=3158.
VM=3156.17
E11=0.392E-10
E33=0.410E-10
AKK=0.0017
GOTO 80
C*****LINBO3 (Y-Z) TABAN ICIN DATA*****
63 VO=3485.
VM=3399.27
E11=0.389E-9
E33=0.257E-9
AKK=0.043
GOTO 80
C*****BI12GEO20 (100-011) TABAN ICIN DATA*****
64 VO=1681.
VM=1669.57
E11=0.336E-9
E33=0.336E-9
AKK=0.012
GOTO 80
C*****BI12GEO20 (111-110) TABAN ICIN DATA*****
65 VO=1708.
VM=1693.94
E11=0.336E-9
E33=0.336E-9
AKK=0.017
GOTO 80
C*****LITAO3 (Z-Y) TABAN ICIN DATA*****
66 VO=3329.
VM=3309.36
E11=0.363E-9
E33=0.381E-9
AKK=0.0074
GOTO 80
C*****ZNO (Z-CUT) TABAN ICIN DATA*****
67 VO=2715.
VM=2702.86
E11=0.757E-10
E33=0.903E-10
AKK=0.01
C*****
80 TO=VO/VM
PI=4.*ATAN(1.)

```

```

SQR=SQRT(E11*E33)
DELTA F=(FMAX-FMIN)/400
SS=1./SQRT(2.)
CKQ=ELIP(SS)
M=1
75 F=FMIN+(M-1)*DELTA F
N=0
85 N=N+1
Q=SIN((0.5*PI*SL(N))/CL(N))
QP=SQRT(1.-Q*Q)
AKQ=ELIP(Q)
AKQP=ELIP(QP)
C(N)=0.5*W(N)*SQR*AKQ/AKQP
GL=CL(N)-SL(N)
FN=0.5/((SL(N)/VM)+(GL/VO))
PSI=2.*PI*F*SL(N)/VM
FI=PI*F*GL/VO
COTPSI=1./TAN(PSI)
COTFI=1./TAN(FI)
COTP=1./TAN(PSI/2.)
TANP=TAN(PSI/2.)
TANF=TAN(FI/2.)
CSCPSI=1./SIN(PSI)
CSCFI=1./SIN(FI)
B=COTFI+TO*COTP
CC=TO*COTPSI+COTFI
E=TO*(TO-COTFI*COTPSI)
D=1./(CC*COTFI-E)
REY11=D*(CC+E*COTFI)
REY12=D*TO*CSCFI*CSCFI*CSCPSI
Y11(N)=CMPLX(0.,REY11)
Y12(N)=CMPLX(0.,REY12)
POSC=ABS(C(N))
ABSW=ABS(W(N))
R=W(N)/ABSW
RN=R*SQRT(2.*FN*POSC*AKK)*SQRT(ABSW)*CKQ/AKQ
A=RN*(TO*TANP+TANF)
REY13=-RN*TANF-A*B*D*CSCFI
REY33=2.*PI*F*POSC+2.*RN*(A+RN*TANF)+A*A*(1.+B*B*D)/CC
Y13(N)=CMPLX(0.,REY13)
Y33(N)=CMPLX(0.,REY33)
IF(N.NE.1) GO TO 88
TY11(1)=Y11(1)
TY12(1)=Y12(1)
TY22(1)=Y11(1)
TY13(1)=Y13(1)
TY23(1)=Y13(1)
TY33(1)=Y33(1)
GO TO 85

```

```

88 DD=Y11(N)+TY11(N-1)
   YP=Y13(N)+TY13(N-1)
   TY11(N)=Y11(N)-Y12(N)*Y12(N)/DD
   TY12(N)=-Y12(N)*TY12(N-1)/DD
   TY22(N)=TY22(N-1)-TY12(N-1)*TY12(N-1)/DD
   TY13(N)=Y13(N)-Y12(N)*YP/DD
   TY23(N)=TY23(N-1)-TY12(N-1)*YP/DD
   TY33(N)=Y33(N)+TY33(N-1)-YP*YP/DD
   IF(N.LT.NE) GOTO 85
   PP=TY11(NE)
   QQ=TY12(NE)
   RR=TY22(NE)
   XX=TY13(NE)
   YY=TY23(NE)
   ZZ=TY33(NE)
   GG=1.+PP
   HH=1.+RR
   DELTA=GG*HH-QQ*QQ
   T13=(QQ*YY-XX*HH)/DELTA
   S=REAL(T13)
   T=AIMAG(T13)
   AT13=SQRT(S*S+T*T)
   AGK13=20.*ALOG10(AT13)
   PT13=ATAN2(T,S)*180./PI
   Y3=(2.*QQ*XX*YY-XX*XX*HH-YY*YY*GG)/DELTA+ZZ
   AREY=REAL(Y3)
   AIMY3=AIMAG(Y3)
   OPEN (UNIT=58, FILE='LOGNAM', STATUS='NEW')
   WRITE(58,99) F, AGK13, AREY3, AIMY3, PT13
99 FORMAT(2X, F12.0, 2X, F9.4, 2(2X,E15.8), 3X, F7.2)
   M=M+1
   IF(F.LT.FMAX) GO TO 75
   STOP
   END

```

C*****

```

FUNCTION ELIP(EM)
REAL*16 A0, A1, A2, A3, A4, B0, B1, B2, B3, B4
EM1=1.-EM
A0=1.38629
A1=0.09666
A2=0.03590
A3=0.03743
A4=0.01451
B0=0.5
B1=0.12499
B2=0.06880
B3=0.03328
B4=0.00442
ELIP=A0+A1*EM1+A2*EM1*EM1+A3*EM1**3+A4*EM1**4

```

```
&+(B0+B1*EM1+B2*EM1*EM1+B3*EM1**3+B4*EM1**4)  
&*ALOG(1./EM1)  
  RETURN  
  END
```



EK C

SAW FİLTREDE KULLANILAN TRANSDÜKTÖRÜN ELEKTROT GENİŞLİKLERİNİ HESAPLAYAN VE FİLTRENİN ANALİZİNİ YAPAN PROGRAM

```
C*****SAW FİLTRE ANALİZİ*****
C***** (ELEKTROT GEN.,AGK,TRANS. FONK.,ADMİTANS,FAZ)*****
C*****YAPAN PROGRAM*****
C*****BİRİNCİ BOLÜM*****
C*****SAW FİLTREDE KULLANILAN*****
C*****ELEKTROT GENİŞLİKLERİNİ HESAPLAYAN PROGRAM*****
    DIMENSION C(400), WP(400), WN(400), W(400)
    COMPLEX Y11(400), Y12(400), Y13(400), Y33(400), TY11(400),
&TY12(400), TY22(400), TY13(400), TY23(400), TY33(400),
&DD, YP, PP, QQ, RR, XX, YY, ZZ, GG, HH, DELTA, T13, Y3
    OPEN (UNIT=8, FILE='PARAM.DAT', STATUS='OLD')
    READ(8,*) TABAN, F0, TB, PENC
    WRITE(*,53)
53  FORMAT(12(/),28X,'PROGRAM CALISIYOR...')
    WRITE(*,54)
54  FORMAT(/,28X,'LUTFEN BEKLEYİNİZ')
    WRITE(*,55)
55  FORMAT(10(/),'')
    IF(TABAN.EQ.1) GOTO 1
    IF(TABAN.EQ.2) GOTO 2
    IF(TABAN.EQ.3) GOTO 3
    IF(TABAN.EQ.4) GOTO 4
    IF(TABAN.EQ.5) GOTO 5
    IF(TABAN.EQ.6) GOTO 6
    IF(TABAN.EQ.7) GOTO 7
C*****1=QUARTZ(Y-X), 2=QUARTZ(ST-X), 3=LINBO3(Y-Z)*****
C*****4=BI12GEO20(100-011), 5=BI12GEO20(111-110)*****
C*****6=LITAO3(Z-Y), 7=ZNO(Z-CUT)*****
C*****QUARTZ (Y-X) TABAN ICIN DATA*****
    1  VO=3159.
        VM=3156.16
        E11=0.392E-10
        E33=0.410E-10
```

```

      AKK=0.0022
      GOTO 10
C*****QUARTZ (ST-X) TABAN ICIN DATA*****
  2 VO=3158.
    VM=3156.17
    E11=0.392E-10
    E33=0.410E-10
    AKK=0.0017
    GOTO 10
C*****LINBO3 (Y-Z) TABAN ICIN DATA*****
  3 VO=3485.
    VM=3399.27
    E11=0.389E-9
    E33=0.257E-9
    AKK=0.043
    GOTO 10
C*****BI12GEO20 (100-011) TABAN ICIN DATA*****
  4 VO=1681.
    VM=1669.57
    E11=0.336E-9
    E33=0.336E-9
    AKK=0.012
    GOTO 10
C*****BI12GEO20 (111-110) TABAN ICIN DATA*****
  5 VO=1708.
    VM=1693.94
    E11=0.336E-9
    E33=0.336E-9
    AKK=0.017
    GOTO 10
C*****LITAO3 (Z-Y) TABAN ICIN DATA*****
  6 VO=3329.
    VM=3309.36
    E11=0.363E-9
    E33=0.381E-9
    AKK=0.0074
    GOTO 10
C*****ZNO (Z-CUT) TABAN ICIN DATA*****
  7 VO=2715.
    VM=2702.86
    E11=0.757E-10
    E33=0.903E-10
    AKK=0.01
C*****
 10 IF(TABAN.EQ.1) GOTO 71
    IF(TABAN.EQ.2) GOTO 72
    IF(TABAN.EQ.3) GOTO 73
    IF(TABAN.EQ.4) GOTO 74

```

```

C*****BAND GEN.=200 KHZ*****
  71 TB=200000.
      GOTO 77
C*****BAND GEN.=300 KHZ*****
  72 TB=300000.
      GOTO 77
C*****BAND GEN.=400 KHZ*****
  73 TB=400000.
      GOTO 77
C*****BAND GEN.=25 MHZ*****
  74 TB=25000000.
C*****
  77 IF(F0.EQ.1) GOTO 92
      IF(F0.EQ.2) GOTO 93
      IF(F0.EQ.3) GOTO 94
      IF(F0.EQ.4) GOTO 95
C*****MERKEZ F.=71 MHZ*****
  92 F0=71000000.
      GOTO 87
C*****MERKEZ F.=133 MHZ*****
  93 F0=133000000.
      GOTO 87
C*****MERKEZ F.=902.5 MHZ*****
  94 F0=902500000.
      GOTO 87
C*****MERKEZ F.=947.5 MHZ*****
  95 F0=947500000
C*****
  87 YB=TB/2.
      S= -1.
      PI=4.*ATAN(1.)
      N=1
      WP(1)=1.
  11 N=N+1
      P=N*PI*YB/F0
      WP(N)=S*SIN(P)/P
      S= -S
      IF(N.LT.142) GOTO 11
      NPMAX=N
      NP=NPMAX-1
      NE=2*NPMAX-1
C*****
      IF(PENC.EQ.1) GOTO 12
      IF(PENC.EQ.2) GOTO 13
      IF(PENC.EQ.3) GOTO 14
C*****HAMMING PENCERE FONKSIYONU*****
  12 N=N
      DO 15 N=1,NPMAX
          WP(N)=WP(N)*(0.54+0.46*COS(PI*N/NPMAX))

```

```

15 CONTINUE
   GOTO 78
C*****FEJER PENCERE FONKSIYONU*****
13 N=N
   DO 16 N=1,NP
     WP(N)=WP(N)*(1-(N/NPMAX))
16 CONTINUE
   GOTO 78
C*****LANCZOS PENCERE FONKSIYONU*****
14 N=N
   DO 17 N=1,NP
     WP(N)=WP(N)*((SIN(PI*N/NPMAX))/(PI*N/NPMAX))
17 CONTINUE
C*****
78 N=N
   DO 18 I=1,NP
     K=NPMAX-I+1
     WN(I)=WP(K)
18 CONTINUE
   DO 81 N=1,NE
     IF(N.GT.NP) GOTO 82
     W(N)=WN(N)
     GOTO 81
82 W(N)=WP(N-NP)
81 CONTINUE
   FMIN=0.7*F0
   FMAX=1.3*F0
C*****IKINCI BOLUM*****
C*****SAW FİLTRENİN*****
C***ARAYA GİRME KAYBI,TRANSFER FONK.,ADMITANS VE FAZINI***
C*****HESAPLAYAN PROGRAM*****
   SL=(VO/4.)/F0
   CL=2.*SL
   GL=CL-SL
   TO=VO/VM
   PI=4.*ATAN(1.)
   SQR=SQRT(E11*E33)
   DELTAF=(FMAX-FMIN)/400
   SS=1./SQRT(2.)
   CKQ=ELIP(SS)
   M=1
75 F=FMIN+(M-1)*DELTAF
   N=0
85 N=N+1
   Q=SIN((0.5*PI*SL)/CL)
   QP=SQRT(1.-Q*Q)
   AKQ=ELIP(Q)
   AKQP=ELIP(QP)
   C(N)=0.5*W(N)*SQR*AKQ/AKQP

```

```

FN=0.5/((SL/VM)+(GL/VO))
PSI=2.*PI*F*SL/VM
FI=PI*F*GL/VO
COTPSI=1./TAN(PSI)
COTFI=1./TAN(FI)
COTP=1./TAN(PSI/2.)
TANP=TAN(PSI/2.)
TANF=TAN(FI/2.)
CSCPSI=1./SIN(PSI)
CSCFI=1./SIN(FI)
B=COTFI+TO*COTP
CC=TO*COTPSI+COTFI
E=TO*(TO-COTFI*COTPSI)
D=1./(CC*COTFI-E)
REY11=D*(CC+E*COTFI)
REY12=D*TO*CSCFI*CSCFI*CSCPSI
Y11(N)=CMPLX(0.,REY11)
Y12(N)=CMPLX(0.,REY12)
POSC=ABS(C(N))
ABSW=ABS(W(N))
R=W(N)/ABSW
RN=R*SQRT(2.*FN*POSC*AKK)*SQRT(ABSW)*CKQ/AKQ
A=RN*(TO*TANP+TANF)
REY13=-RN*TANF-A*B*D*CSCFI
REY33=2.*PI*F*POSC+2.*RN*(A+RN*TANF)+A*A*(1.+B*B*D)/CC
Y13(N)=CMPLX(0.,REY13)
Y33(N)=CMPLX(0.,REY33)
IF(N.NE.1) GOTO 88
TY11(1)=Y11(1)
TY12(1)=Y12(1)
TY22(1)=Y11(1)
TY13(1)=Y13(1)
TY23(1)=Y13(1)
TY33(1)=Y33(1)
GOTO 85
88 DD=Y11(N)+TY11(N-1)
YP=Y13(N)+TY13(N-1)
TY11(N)=Y11(N)-Y12(N)*Y12(N)/DD
TY12(N)=-Y12(N)*TY12(N-1)/DD
TY22(N)=TY22(N-1)-TY12(N-1)*TY12(N-1)/DD
TY13(N)=Y13(N)-Y12(N)*YP/DD
TY23(N)=TY23(N-1)-TY12(N-1)*YP/DD
TY33(N)=Y33(N)+TY33(N-1)-YP*YP/DD
IF(N.LT.NE) GOTO 85
PP=TY11(NE)
QQ=TY12(NE)
RR=TY22(NE)
XX=TY13(NE)
YY=TY23(NE)

```

```

ZZ=TY33(NE)
GG=1.+PP
HH=1.+RR
DELTA=GG*HH-QQ*QQ
T13=(QQ*YY-XX*HH)/DELTA
S=REAL(T13)
T=AIMAG(T13)
AT13=SQRT(S*S+T*T)
AGK13=20.*ALOG10(AT13)
PT13=ATAN2(T,S)*180./PI
Y3=(2.*QQ*XX*YY-XX*XX*HH-YY*YY*GG)/DELTA+ZZ
AREY=REAL(Y3)
AIMY3=AIMAG(Y3)
OPEN (UNIT=58, FILE='LOGNAM.DAT', STATUS='NEW')
WRITE(58,99) F, AGK13, AREY3, AIMY3, PT13
99 FORMAT(2X, F12.0, 2X, F9.4, 2(2X,E15.8), 3X, F7.2)
M=M+1
IF(F.LT.FMAX) GOTO 75
OPEN (UNIT=96, FILE='LAST.DAT', STATUS='NEW')
WRITE(96,97) NE
97 FORMAT(I10)
STOP
END

```

C*****

```

FUNCTION ELIP(EM)
REAL*8 A0, A1, A2, A3, A4, B0, B1, B2, B3, B4
EM1=1.-EM
A0=1.38629
A1=0.09666
A2=0.03590
A3=0.03743
A4=0.01451
B0=0.5
B1=0.12499
B2=0.06880
B3=0.03328
B4=0.00442
ELIP=A0+A1*EM1+A2*EM1*EM1+A3*EM1**3+A4*EM1**4
&+(B0+B1*EM1+B2*EM1*EM1+B3*EM1**3+B4*EM1**4)
&*ALOG(1./EM1)
RETURN
END

```

EK D

VERİLERİN PENCERE (WINDOWS) ORTAMINDA ALINMASINI SAĞLAYAN PROGRAM

/******

PROGRAM : sawt.c

PURPOSE : SAW filter design program

CODER : Hasan Cemil KARAGUZEL

DATE OF DEVELOPMENT : June 1997

*****/

```
#include "windows.h" /* required for all Windows applications */
#include "sawt.h" /* specific to this program */
#include "stdio.h"
```

```
HANDLE hInst; /* current instance */
HWND hWnd;
```

/******

FUNCTION: WinMain(HANDLE, HANDLE, LPSTR, int)

PURPOSE: calls initialization function, processes message loop

COMMENTS:

Windows recognizes this function by name as the initial entry point for the program. This function calls the application initialization routine, if no other instance of the program is running, and always calls the instance initialization routine. It then executes a message retrieval and dispatch loop that is the top-level control structure for the remainder of execution. The loop is terminated when a WM_QUIT message is received, at which time this function exits the application instance by returning the value passed by PostQuitMessage().

If this function must abort before entering the message loop, it returns the conventional value NULL.

*****/

```
int PASCAL WinMain(hInstance, hPrevInstance, lpCmdLine, nCmdShow)
HANDLE hInstance;          /* current instance */
HANDLE hPrevInstance;      /* previous instance*/
LPSTR lpCmdLine;           /* command line*/
int nCmdShow;              /* show-window type (open/icon) */
{
    MSG msg;                /* message */

    if (!hPrevInstance)      /* Other instances of app running? */
    if (!InitApplication(hInstance)) /* Initialize shared things */
        return (FALSE);    /* Exits if unable to initialize */

    /* Perform initializations that apply to a specific instance */

    if (!InitInstance(hInstance, nCmdShow))
        return (FALSE);

    /* Acquire and dispatch messages until a WM_QUIT message is received. */

    while (GetMessage(&msg,    /* message structure*/
        NULL,                /* handle of window receiving the message */
        NULL,                /* lowest message to examine */
        NULL))               /* highest message to examine*/
    {
        TranslateMessage(&msg); /* Translates virtual key codes*/
        DispatchMessage(&msg); /* Dispatches message to window*/
    }
    return (msg.wParam);      /* Returns the value from PostQuitMessage */
}
```

FUNCTION: InitApplication(HANDLE)

PURPOSE: Initializes window data and registers window class

COMMENTS:

This function is called at initialization time only if no other instances of the application are running. This function performs initialization tasks that can be done once for any number of running instances.

In this case, we initialize a window class by filling out a data structure of type `WNDCLASS` and calling the `Windows RegisterClass()` function. Since all instances of this application use the same window class, we only need to do this when the first instance is initialized.

```

*****/

BOOL InitApplication(hInstance)
HANDLE hInstance;          /* current instance*/
{
    WNDCLASS wc;

    /* Fill in window class structure with parameters that describe the */
    /* main window.                                                    */

    wc.style = NULL;          /* Class style(s).*/
    wc.lpfnWndProc = MainWndProc; /* Function to retrieve messages for*/
                                /* windows of this class.*/
    wc.cbClsExtra = 0;        /* No per-class extra data.*/
    wc.cbWndExtra = 0;        /* No per-window extra data.*/
    wc.hInstance = hInstance; /* Application that owns the class.*/
    wc.hIcon = LoadIcon(NULL, IDI_APPLICATION);
    wc.hCursor = LoadCursor(NULL, IDC_ARROW);
    wc.hbrBackground = GetStockObject(WHITE_BRUSH);
    wc.lpszMenuName = "GenericMenu"; /* Name of menu resource in .RC file. */
    wc.lpszClassName = "GenericWClass"; /* Name used in call to CreateWindow. */

    /* Register the window class and return success/failure code. */

    return (RegisterClass(&wc));
}

/*****

```

FUNCTION: `InitInstance(HANDLE, int)`

PURPOSE: Saves instance handle and creates main window

COMMENTS:

This function is called at initialization time for every instance of this application. This function performs initialization tasks that cannot be shared by multiple instances.

In this case, we save the instance handle in a static variable and create and display the main program window.

```

*****/

```

```

BOOL InitInstance(hInstance, nCmdShow)
HANDLE      hInstance;      /* Current instance identifier.*/
int         nCmdShow;       /* Param for first ShowWindow() call. */
{
    /* Save the instance handle in static variable, which will be used in */
    /* many subsequence calls from this application to Windows.          */

    hInst = hInstance;

    /* Create a main window for this application instance. */

    hWnd = CreateWindow(
        "GenericWClass",      /* See RegisterClass() call.*/
        "SAW Filtre Tasarım Programı", /* Text for window title bar.*/
        WS_OVERLAPPEDWINDOW, /* Window style.*/
        60,                   /* Horizontal position.*/
        60,                   /* Vertical position.*/
        500,                  /* Width.*/
        300,                  /* Height.*/
        NULL,                 /* Overlapped windows have no parent. */
        NULL,                 /* Use the window class menu.*/
        hInstance,           /* This instance owns this window.*/
        NULL                  /* Pointer not needed.*/
    );

    /* If window could not be created, return "failure" */

    if (!hWnd)
        return (FALSE);

    /* Make the window visible; update its client area; and return "success" */

    ShowWindow(hWnd, nCmdShow); /* Show the window */
    UpdateWindow(hWnd);         /* Sends WM_PAINT message */
    return (TRUE);              /* Returns the value from PostQuitMessage */
}

/*****

FUNCTION: MainWndProc(HWND, UINT, WPARAM, LPARAM)

PURPOSE: Processes messages

MESSAGES:

WM_COMMAND - application menu (About dialog box)

```

WM_DESTROY - destroy window

COMMENTS:

To process the IDM_ABOUT message, call MakeProcInstance() to get the current instance address of the About() function. Then call Dialog box which will create the box according to the information in your generic.rc file and turn control over to the About() function. When it returns, free the instance address.

*****/

```
long CALLBACK __export MainWndProc(hWnd, message, wParam, lParam)
HWND hWnd;           /* window handle */
UINT message;        /* type of message */
WPARAM wParam;       /* additional information */
LPARAM lParam;       /* additional information */
{
    switch (message)
    {
        case WM_COMMAND: /* message: command from application menu */
            if (wParam == IDM_ABOUT)
            {
                DialogBox(hInst, /* current instance */
                           "AboutBox", /* resource to use */
                           hWnd, /* parent handle */
                           About); /* About() instance address */

                break;
            }
            else if (wParam == IDM_RUN)
            {
                MakeDlg( hWnd, ParamEnter, "PARAMDLG", NULL );
                break;
            }
            else if (wParam == ID_FILE_EXIT)
            {
                PostQuitMessage(0);
                break;
            }
            else /* Lets Windows process it */
                return (DefWindowProc(hWnd, message, wParam, lParam));

        case WM_DESTROY: /* message: window being destroyed */
            PostQuitMessage(0);
            break;

        case SHOW_WAIT_MESSAGE:
```

```

        MakeDlg(hWnd, ShowWaitMsg, "WAITDLG", NULL);
        break;

        default:          /* Passes it on if unprocessed */
            return (DefWindowProc(hWnd, message, wParam, lParam));
    }
    return (NULL);
}

/*****

FUNCTION: About(HWND, unsigned, WORD, LONG)

PURPOSE: Processes messages for "About" dialog box

MESSAGES:

WM_INITDIALOG - initialize dialog box
WM_COMMAND    - Input received

COMMENTS:

No initialization is needed for this particular dialog box, but TRUE
must be returned to Windows.

Wait for user to click on "Ok" button, then close the dialog box.

*****/

BOOL __export CALLBACK About(hDlg, message, wParam, lParam)
HWND hDlg;          /* window handle of the dialog box */
unsigned message;    /* type of message */
WORD wParam;        /* message-specific information */
LONG lParam;
{
    switch (message)
    {
        case WM_INITDIALOG:          /* message: initialize dialog box */
            return (TRUE);

        case WM_COMMAND:              /* message: received a command */
            if (wParam == IDOK        /* "OK" box selected? */
                || wParam == IDCANCEL) /* System menu close command? */
            {
                EndDialog(hDlg, TRUE); /* Exits the dialog box */
                return (TRUE);
            }
            break;
    }
}

```

```

    return (FALSE);          /* Didn't process a message */
}

```

```

/*****

```

FUNCTION: ParamEnter(HWND, unsigned, WORD, LONG)

PURPOSE: Processes messages for "Parametre Giris Penceresi" dialog box

MESSAGES:

WM_INITDIALOG - initialize dialog box

WM_COMMAND - Input received

COMMENTS:

Wait for user to click on "Ok" button, then close the dialog box.

```

*****/

```

```

BOOL CALLBACK ParamEnter(hDlg, message, wParam, lParam)
HWND hDlg;          /* window handle of the dialog box */
unsigned message;    /* type of message */
WORD wParam;         /* message-specific information */
LONG lParam;
{
    BYTE i;
    char TabanList[7][20]={"Quartz (Y-X)", "Quartz (ST-X)", "LiNbO3",
                           "Bi12GeO20 (100-011)", "Bi12GeO20 (111-110)",
                           "LiTaO3 (Z-Y)", "ZnO (Z-Cut)"};
    char MerkezFrekansi[4][20] = {"71 MHz", "133 MHz", "902,5 MHz", "947,5
                                   MHz"};
    char BandGenisligi[3][20] = {"200 kHz", "400 kHz", "25 MHz"};
    char PencereFonks[3][20] = {"Hamming", "Fejer", "Lanczos"};
    BYTE selection[4];
    FILE *outfile;
    UINT result;
    char szMsg[40];

    switch (message)
    {
        case WM_INITDIALOG:          /* message: initialize dialog box */

            unlink("c:\\saw\\lognam.dat");
            unlink("c:\\saw\\param.dat");

            SendDlgItemMessage( hDlg, IDC_COMBO1,
CB_RESETCONTENT, (WPARAM) 0, 0 );
            SendDlgItemMessage( hDlg, IDC_COMBO2,
CB_RESETCONTENT, (WPARAM) 0, 0 );

```

```

        SendDlgItemMessage( hDlg, IDC_COMBO3,
        CB_RESETCONTENT, (WPARAM) 0, 0 );
        SendDlgItemMessage( hDlg, IDC_COMBO4,
        CB_RESETCONTENT, (WPARAM) 0, 0 );

        for (i = 0; i < 7; i++)
            SendDlgItemMessage( hDlg, IDC_COMBO1,
        CB_ADDSTRING, 0, (LPARAM)(LPCSTR) TabanList[i]);

        for (i = 0; i < 4; i++)
            SendDlgItemMessage( hDlg, IDC_COMBO2,
        CB_ADDSTRING, 0, (LPARAM)(LPCSTR) MerkezFrekansi[i]);

        for (i = 0; i < 3; i++)
            SendDlgItemMessage( hDlg, IDC_COMBO3,
        CB_ADDSTRING, 0, (LPARAM)(LPCSTR) BandGenisligi[i]);

        for (i = 0; i < 3; i++)
            SendDlgItemMessage( hDlg, IDC_COMBO4,
        CB_ADDSTRING, 0, (LPARAM)(LPCSTR) PencereFonks[i]);

        SendDlgItemMessage( hDlg, IDC_COMBO1,
        CB_SELECTSTRING, 0, (LPARAM)(LPCSTR) TabanList[0]);
        SendDlgItemMessage( hDlg, IDC_COMBO2,
        CB_SELECTSTRING, 0, (LPARAM)(LPCSTR) MerkezFrekansi[0]);
        SendDlgItemMessage( hDlg, IDC_COMBO3,
        CB_SELECTSTRING, 0, (LPARAM)(LPCSTR) BandGenisligi[0]);
        SendDlgItemMessage( hDlg, IDC_COMBO4,
        CB_SELECTSTRING, 0, (LPARAM)(LPCSTR) PencereFonks[0]);

    return (TRUE);

    case WM_COMMAND:        /* message: received a command */
        if (wParam == IDOK) /* "OK" box selected? */
        {
            selection[0] = (BYTE) SendDlgItemMessage(hDlg, IDC_COMBO1,
        CB_GETCURSEL, (WORD) 0, 0L);
            selection[1] = (BYTE) SendDlgItemMessage(hDlg, IDC_COMBO2,
        CB_GETCURSEL, (WORD) 0, 0L);
            selection[2] = (BYTE) SendDlgItemMessage(hDlg, IDC_COMBO3,
        CB_GETCURSEL, (WORD) 0, 0L);
            selection[3] = (BYTE) SendDlgItemMessage(hDlg, IDC_COMBO4,
        CB_GETCURSEL, (WORD) 0, 0L);

            outfile = fopen("c:\\saw\\param.dat", "wt");
            for (i = 0; i < 4; i++)
                fprintf(outfile, "%u ", (BYTE) (selection[i]+1));
            fclose(outfile);

```

```

        EndDialog(hDlg, TRUE); /* Exits the dialog box */

        result = WinExec("c:\\saw\\finpr1", NULL);
        if (result < 32)
        {
            sprintf(szMsg, "WinExec calisamadi, hata numarasi = %d", result);
            MessageBox(hWnd, szMsg, "Hata", MB_ICONSTOP);
        }
        else
            PostMessage(hWnd, SHOW_WAIT_MESSAGE, 0, 0);
        return (TRUE);
    }
    else if ( wParam == IDCANCEL) /* System menu close command? */
    {
        EndDialog(hDlg, TRUE); /* Exits the dialog box */
        return (TRUE);
    }
    break;
}
return (FALSE); /* Didn't process a message */
}

int MakeDlg(HWND hWnd, DLGPROC ProcName, LPCSTR DlgName, LPARAM lParam)
{
    FARPROC lpfnDlgProc;
    int result;

    lpfnDlgProc=MakeProcInstance((FARPROC)ProcName,GETHINST( hWnd
));
    result=DialogBoxParam(GETHINST( hWnd ), DlgName, hWnd,
(DLGPROC)lpfnDlgProc,lParam);
    FreeProcInstance(lpfnDlgProc);
    return result;
}

BOOL CALLBACK ShowWaitMsg(hDlg, message, wParam, lParam)
HWND hDlg; /* window handle of the dialog box */
unsigned message; /* type of message */
WORD wParam; /* message-specific information */
LONG lParam;
{
    FILE *outfile;
    char szMsg[80];

    switch (message)
    {
        case WM_INITDIALOG: /* message: initialize dialog box */

```

```
SetTimer(hDlg, 1, 2000, ShowWaitMsg);
return (TRUE);

case WM_TIMER:                /* message: received a command */
    outfile = fopen("c:\\saw\\last.dat", "r");
    if (outfile != NULL)
    {
        KillTimer(hDlg, 1);
        fclose(outfile);
        EndDialog(hDlg, TRUE); /* Exits the dialog box */
        unlink("c:\\saw\\last.dat");
        sprintf(szMsg, "Sonuçlar C:\\SAW\\LOGNAM.DAT dosyasına
        yazıldı!");
        MessageBox(hWnd, szMsg, "Sonuç", MB_ICONINFORMATION);
    }
    return (TRUE);
}
return (FALSE);              /* Didn't process a message */
}
```



```
#include "resource.h"

#define SHOW_WAIT_MESSAGE 200
#define WAIT_TO_END 100

int PASCAL WinMain(HANDLE, HANDLE, LPSTR, int);
BOOL InitApplication(HANDLE);
BOOL InitInstance(HANDLE, int);
long CALLBACK __export MainWndProc(HWND, UINT, WPARAM, LPARAM);
BOOL __export CALLBACK About(HWND, unsigned, WORD, LONG);
int MakeDlg(HWND hWnd, DLGPROC ProcName, LPCSTR DlgName, LPARAM lParam);
BOOL CALLBACK ParamEnter(HWND hDlg, UINT message, WORD wParam, LONG lParam);
BOOL CALLBACK ShowWaitMsg(HWND hDlg, UINT message, WORD wParam, LONG lParam);
```



```
////////////////////////////////////
```

```
//
```

```
// Dialog
```

```
//
```

```
ABOUTBOX DIALOG DISCARDABLE 40, 40, 144, 75
STYLE DS_MODALFRAME | WS_CAPTION | WS_SYSMENU
CAPTION "SAW Filtre Tasarım Programı"
FONT 8, "System"
BEGIN
    CTEXT      "Hasan Cemil Karagüzel",-1,0,5,144,8
    CTEXT      "Elektronik ve Haberleşme Bölümü",-1,0,14,144,8
    CTEXT      "S\374r\374m 1.0",-1,0,34,144,8
    DEFPUSHBUTTON "OK",IDOK,53,59,32,14,WS_GROUP
END
```

```
PARAMDLG DIALOG DISCARDABLE 30, 30, 222, 99
STYLE DS_MODALFRAME | WS_VISIBLE | WS_CAPTION | WS_SYSMENU
CAPTION "Filtre Parametreleri Giriş Penceresi"
FONT 8, "MS Dialog"
BEGIN
    DEFPUSHBUTTON "OK",IDOK,185,30,25,14
    PUSHBUTTON    "Cancel",IDCANCEL,185,50,25,14
    LTEXT         "Taban",IDC_STATIC,5,10,30,8
    CONTROL      "",IDC_STATIC,"Static",SS_WHITEFRAME,96,4,18,20
    LTEXT         "Merkez Frekansı",IDC_STATIC,5,31,70,14
    COMBOBOX      IDC_COMBO1,85,10,80,30,CBS_DROPDOWN |
WS_VSCROLL |
                WS_TABSTOP
    COMBOBOX      IDC_COMBO2,85,30,80,30,CBS_DROPDOWN |
WS_VSCROLL |
                WS_TABSTOP
    LTEXT         "Band Genişliği",IDC_STATIC,5,50,68,15
    COMBOBOX      IDC_COMBO3,85,50,80,30,CBS_DROPDOWN |
WS_VSCROLL |
                WS_TABSTOP
    LTEXT         "Pencere Fonksiyonu",IDC_STATIC,5,71,70,14
    COMBOBOX      IDC_COMBO4,85,70,80,30,CBS_DROPDOWN |
WS_VSCROLL |
                WS_TABSTOP
END
```

```
WAITDLG DIALOG DISCARDABLE 60, 40, 141, 63
STYLE DS_MODALFRAME | WS_POPUP | WS_VISIBLE | WS_CAPTION |
WS_SYSMENU
FONT 8, "MS Sans Serif"
BEGIN
    LTEXT         "Parametreler hesaplanıyor.",IDC_STATIC,30,15,90,13
    LTEXT         "Lütfen bekleyiniz!",IDC_STATIC,40,30,60,11
```


ÖZGEÇMİŞ

H. Cemil Karagüzel, 1969 yılında, Trabzon'da doğmuştur. 1983 yılında girdiği Trabzon Fatih Lisesi'nden, 1986 yılında mezun olmuştur. Aynı yıl İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektronik ve Haberleşme Bölümü'ne girmiş, 1990 yılında mühendis ünvanı almıştır. 1991 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektronik ve Haberleşme Ana Bilim Dalı, Elektronik ve Haberleşme Programı'nda Yüksek Lisans eğitime başladı. 1991-1994 yıllarında Alcatel Teletas, 1994-1997 yıllarında Alcatel Bell, Belçika'da Araştırma ve Geliştirme Mühendisi olarak çalıştı. Halen, Alcatel Teletas, Araştırma ve Geliştirme Bölümü'nde mühendis olarak görev yapmaktadır.