

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DELTA-SİGMA ÖRNEKLEMELİ
ALTDİZİLİM İŞLEMENE DAYALI BİR
DEMETLEME YÖNTEMİ

136759

Hasan Şakir Bilge

Doktora Tezi

Ankara 2003

136759
T.C. YÜKSEK ÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ



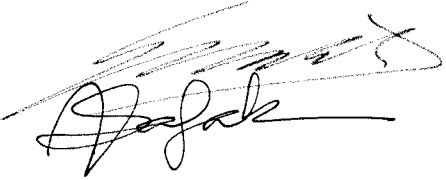


BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DELTA-SİGMA ÖRNEKLEMELİ ALTDİZİLİM İŞLEMEYE
DAYALI BİR DEMETLEME YÖNTEMİ

Hasan Şakir Bilge

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
DOKTORA TEZİ

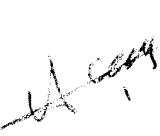
Bu tez, 5 Şubat 2003 tarihinde aşağıda üye adları yazılı jüri tarafından kabul edilmiştir.

Ünvan	Adı Soyadı	İmza
Prof.Dr.	Turhan Çiftçiabaşı (Danışman)	
Prof.Dr.	Mustafa Kuzuoğlu	
Doç.Dr.	Emin Akata	
Yrd.Doç.Dr.	Aysel Şafak	
Yrd.Doç.Dr.	Atif Çay	

Onay

04/05/2003

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü
Prof.Dr. Hüseyin Akçay


T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

TEŐEKKÖR

Doktora tezinde çalıŐırken, maddi ve manevi olarak yardımda bulunan herkese teŐekkÖr ederim. Tez çalışmamın konusuyla ilgili teknik ve bilimsel açıdan Önemli yönlendirmelerde bulunan ve bu çalışmada beni destekleyen Prof.Dr. Mustafa Karaman Hocama teŐekkÖrlerimi saygıyla ve sevgiyle sunarım.



TEŞEKKÜR
ÖZET
ABSTRACT
ÖNSÖZ
İÇİNDEKİLER
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ
TERİMLER DİZİNİ
ŞEKİLLER DİZİNİ
ÇİZELGELER DİZİNİ

1. GİRİŞ
 2. DEMETLEMEDE VERİ TOPLAMA YÖNTEMLERİ
 3. SAYISAL DEMETLEME YÖNTEMLERİ
 4. YÜKSEK HIZDA ÖRNEKLEME YÖNTEMLERİ
 5. ÖNERİLEN YÖNTEM
 6. DENEYSEL SONUÇLAR
 7. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME
 8. KAYNAKLAR
- EK-1 ALTDİZİLİME AİT NOKTASAL DAĞILIM FONKSİYONU
EK-2 DENEY DÜZENEGİ HAKKINDA BİLGİ
ÖZGEÇMİŞ
YAYINLAR

ÖZET

DELTA-SİGMA ÖRNEKLEMELİ ALTDİZİLİM İŞLEMEYE DAYALI BİR DEMETLEME YÖNTEMİ

Hasan Şakir Bilge

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

Tez Yöneticisi: Prof.Dr. Turhan Çiftçibaşı

Şubat 2003

Bu doktora tezinde, evreuyumlu görüntüleme sistemleri için delta-sigma analogtan sayısala çevirici ile örneklenen altdizilim sinyallerinin sayısal olarak işlenmesine dayalı yeni bir demetleme yöntemi sunulmaktadır. Önerilen yöntem, mevcut demetleme sistemlerine değişik açılardan birçok yeni yaklaşımlar getirmektedir. Bu sistemde demetleyici yapısının tamamen sayısal olması önerilmektedir. Sayısallaştırma işleminde yüksek hızda örnekleme yapabilen delta-sigma analogtan sayısala çeviricilerin kullanılması tasarlanmaktadır. Yüksek bir örnekleme hızı ile, yankı sinyallerinin hassas zaman aralıklarında örneklenmesi mümkün olmaktadır. Sık örneklenmiş veriler, odaklama ve yönlendirme için hesaplanan çok hassas gecikmeler ile kaydırılıp toplandığında demetleyicinin evreuyumluluğu artar.

Delta-sigma örnekleme yapısında, önemli iki aşama vardır; bunlardan ilki yüksek

hızda tek bitlik verilerin üretilmesi, diğeri ise örnek seyreltme ile birlikte çok bitli yapıya geçiş işlemidir. Örnek seyreltme işleminde kullanılan alçak geçiren süzgeç, demetlemedeki toplama işlemine göre doğrusaldır. Bu özellik kullanılarak önerilen sistemde, her alıcı kanalı için ayrı süzgeçleme yerine demetleme çıkışında bir defa süzgeçleme yapılır. Böylece süzgeç sayısı ve buna bağlı olarak sistemin donanım karmaşıklığı önemli ölçüde azalır.

Örnek seyreltme işleminin, toplamanın çıkışında uygulanması ile demetlemenin delta-sigma kodlanmış tek bitlik veriler üzerinde yapılması mümkün olmaktadır. Tek bitlik demetleyici yapısı, donanımı çok büyük oranda basitleştirmektedir. Her ne kadar tek bitlik verilerde yüksek frekanslı nicemleme gürültüsü bulunsa bile, toplamadan sonra uygulanan süzgeç ile bu gürültü başarılı bir şekilde bastırılmaktadır.

Delta-sigma kodlanmış tek bitlik veriler ile demetleme işlemi sabit alış odaklaması kullanıldığında başarılı bir şekilde çalışmaktadır. Fakat dinamik alış odaklaması yapıldığında, delta-sigma modülatörü ve demodülatörü arasındaki eşzamanlama bozulmaktadır. Delta-sigma kodlarının arasındaki ilişkinin bozulması, demetleyici çıkışının SNR düzeyini düşürür. Bu sorunu gidermek için, delta-sigma çeviricinin düzenli saat darbeleri ile örnek üretmesi yerine dinamik odaklama için veri gerektiği anlarda örnekleme yapması önerilmektedir. Bu düzgün olmayan örnekleme yaklaşımı ile üretilen delta-sigma kodları arasında herhangi bir bit kaybı veya tekrarı söz konusu olmayacağı için demetleyici çıkışındaki SNR istenen düzeyde tutulmuş olur.

Bu çalışmada, geniş bir dönüştürücü diziliminin, altdizilimler ile sentezlenmesi önerilmektedir. Altdizilim kullanımı sayesinde aktif dönüştürücü eleman sayısı azaltılmış olur. Böylece her bir kanalı süren karmaşık devrelerin sayısı önemli bir miktarda azalır. Bunun sonucunda hem maliyet düşer, hem de sistemin boyutu küçülür.

Bu çalışmada, veri toplama süresini kısaltmak için, Nyquist kriterine uygun olacak

şekilde az sayıda açılı ile ortamın taranması önerilmektedir. Böylece gerçek zamanda görüntüleme yapan sistemlerin tasarımı mümkün olacaktır. Demet uzayında Nyquist kriteri dizilimin uzunluğuna bağlı olduğu için, sentezlenen geniş dizilim için bakılması gereken açılı sayısı, altdizilim ile veri toplarken bakılması gereken açılı sayısından daha fazladır. Önerilen yöntemde, altdizilimlerden elde edilen düşük çözünürlüklü demetlerin sayısı yanal aradeğerleme ile artırılır. Sonra örnek sayısı artırılmış düşük çözünürlüklü demetler toplanarak yüksek çözünürlüklü demetler elde edilir. Örnek yükseltmede kullanılan aradeğerleme süzgeçlerinin bant geçiren özellikte olması ve her altdizilim için uygun bir şekilde tasarlanması gerekir, çünkü noktasal dağılım fonksiyonunda her altdizilim farklı bir evreye sahiptir.

Önerilen sistem teorik olarak incelenmiş ve deneysel veriler kullanılarak test edilmiştir. Elde edilen sonuçlarda sistemin yeterli görüntü kalitesine sahip olduğu görülmektedir. Delta-sigma örnekleme altdizilim işlemeye dayalı bu demetleme yöntemi, evreuyumlu görüntüleme sisteminin maliyetini, boyutunu ve güç tüketimini azaltmakta ve bunun yanında görüntü kalitesini yüksek tutmaktadır. Evreuyumlu görüntüleme sistemleri için geliştirilen bu yöntemin birçok uygulama alanında kullanılması mümkündür. Bunların başında 3 boyutlu ultrasonik görüntüleyiciler, taşınabilir küçük tarayıcılar ve damar içi görüntüleme aygıtları gibi tıbbi uygulamalar gelmektedir. Ayrıca su altı akustik (sonar) sistemleri, haberleşmede kullanılacak akıllı antenler, robotlarda görme gibi çeşitli alanlarda potansiyel uygulama olanakları olduğu görülmektedir.

Anahtar Sözcükler:

Dizilimsel sinyal işleme, evreuyumlu görüntüleme, ultrasonik görüntüleme, demetleme, dinamik odaklama, sentetik açıklık, altdizilim, akustik dönüştürücüler, delta-sigma örnekleme, düzgün olmayan örnekleme.

ABSTRACT

A BEAMFORMING METHOD BASED ON SUBARRAY PROCESSING WITH DELTA-SIGMA OVERSAMPLING

Hasan Şakir Bilge

Ph.D. in ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING

Supervisor: Prof.Dr. Turhan Çiftçi

February 2003

In this Ph.D. thesis, a new beamforming method is presented for coherent imaging system, which is based on digital processing of the subarray signals sampled with delta-sigma analog to digital converter. The proposed method brings many new approaches to existing beamforming systems from different aspects. In this system, the beamformer architecture is completely digitally designed. In digitization, oversampling delta-sigma analog to digital converters are intended to use. With a high oversampling rate, it is possible to sample the echo signals with fine time intervals. When the oversampled data are summed after shifting with very fine delays calculated for focusing and steering, the coherency of the beamformer is increased.

In delta-sigma oversampling, there are two important steps; firstly the generation of single-bit data at a high rate, and secondly the downsampling to multi-bit

representation. Low-pass filtering in the downsampling process is a linear operation according to the summation in the beamformation. Using this linearity in the proposed system, only a filter is applied to the output of the beamformer instead of applying many different filters for each receive channel. Thus, the number of filters and consequently the hardware complexity of the system are reduced significantly.

Performing the downsampling at the output of the summation makes it possible to beamform with one-bit delta-sigma coded data. One-bit beamformer structure simplifies the hardware significantly. Although one-bit data have high frequency quantization noise, this noise is successfully filtered after summation.

The delta-sigma beamforming method performs good results for fixed receive focusing. But when dynamic receive focusing delays are applied, the synchronization between delta-sigma modulator and demodulator is lost. The lost of the relation between the delta-sigma codes decreases the SNR value of the beamformer output. To solve this problem, we propose that the delta-sigma converter samples in time instances when data are needed for dynamic focusing, instead of sampling uniformly every time. Because there is no bits are omitted and repeated between the delta-sigma samples that are generated with this non-uniform sampling approach, the SNR of the beamformer output is kept to a desired level.

In this study, a large transducer array is synthesized by subarray processing. By using subarrays, the number of active transducer elements is decreased. Thus, the front-end hardware is significantly simplified. This enables to reduce the cost and size of the system.

In this study, to reduce the data acquisition time, we propose to scan with a small number of angles consistent with the Nyquist spatial sampling criteria. Thus, it is possible to design real-time imaging systems. As the Nyquist spatial sampling criteria is proportional to the length of the array, the number of angles needed for synthesizing a large array is greater than the number of angles needed for data

acquisition by subarrays. In the proposed method, the limited number of the low-resolution beams acquired by subarrays is increased by lateral interpolation. Then, the upsampled low-resolution beams are summed to high-resolution beams. Interpolation filters used in upsampling should be band-pass and design appropriately for each subarray, because each subarray has a different phase in its point spread function.

The proposed system is theoretically investigated and tested by experimental data. The test results show that the system has a good image quality enough. The subarray delta-sigma beamforming method reduces the cost, the size and the power consumption of the coherent imaging system whereby maintaining high quality images. This method for coherent imaging systems has many potential applications. 3D ultrasonic imagers, small portable scanners, and intravascular imaging devices are some examples of the important medical applications. On the other hand, underwater acoustic imaging systems (sonar's), smart antennas in communications, and robot vision are some other potential applications.

Keywords:

Array signal processing, coherent imaging, ultrasonic imaging, beamforming, dynamic focusing, synthetic aperture, subarray, acoustic transducers, delta-sigma modulation, non-uniform sampling.

ÖNSÖZ

Üniversitemizin Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliği'nde tezlerin Türkçe yazılacağına dair hükme uygun olarak ve konu ile ilgili önemli bir Türkçe kaynak olması dileğiyle, tezimi Türkçe olarak yazdım. Kullandığım kaynakların hemen tümünün İngilizce olması nedeniyle tezimi yazarken karşılaştığım Türkçe terim karşılıkları sorununu azaltmak için mevcut teknik sözlüklerden ve konu ile ilgili yayımlanan Türkçe makalelerden yararlandım. İngilizce terimlerin yerine kullandığım Türkçe karşılıklarını, bir Türkçe-İngilizce terimler dizini oluşturarak listeledim.

Doktora çalışmam sırasında bildiri sunmak için katıldığım ulusal ve uluslararası bilimsel konferanslarda, yapmış olduğum çalışmanın gördüğü ilgiden dolayı büyük bir motivasyon kazandım. Bilimsel Atıf Endeksine giren dergilerde yayımlanmak üzere hazırladığım yayınlar ile bu çalışmamın daha kalıcı olmasını bekliyorum.

Büyük bir zevkle yürüttüğüm demetleme konusundaki çalışmalarına, yazdığım bu tez ile bir virgül yerleştiriyorum. Bundan sonraki çalışmalarda bu konunun değişik alanlara da uygulanarak yaygın bir şekilde kullanılacağını umuyorum. Bu yıllarda, konunun uzmanları tarafından büyük potansiyele sahip yeni araştırma alanı olarak değerlendirilen delta-sigma demetleme yöntemleri üzerinde çalışmış olmaktan dolayı büyük mutluluk duyuyorum. Büyük bir bilim dünyasında yapmış olduğum çalışmayı küçük bir katkı olarak görüyorum. Bilimin, tarihi süreçte küçük birikimlerin üst üste gelmesi ile oluşan büyük bir yapı olduğunu düşünüyorum. Hiçbir bilim adamının nokta işaretini kullanamayacağı bilimsel çalışmaların büyük bir hızla artarak insanlığa faydalı olmasını dilerim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	v
ABSTRACT	viii
ÖNSÖZ	xi
İÇİNDEKİLER	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiv
TERİMLER DİZİNİ	xv
ŞEKİLLER DİZİNİ	xx
ÇİZELGELER DİZİNİ	xxiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Evreuyumlu Görüntüleme	2
1.2. Demetleme	5
2. DEMETLEMEDE VERİ TOPLAMA YÖNTEMLERİ	9
2.1. Evreli Dizilim	9
2.2. Sentetik Açıklık	12
2.3. Evreli Dizilim ve Sentetik Açıklık Yöntemlerinin Karşılaştırması	16
3. SAYISAL DEMETLEME YÖNTEMLERİ	19
3.1. Tabanbant Örnekleme	20
3.2. Aradeğerleme	22
3.3. Düzgün Olmayan Örnekleme	23
4. YÜKSEK HIZDA ÖRNEKLEME YÖNTEMLERİ	24
4.1. Genel bakış	24
4.2. Gelişimi	25
4.3. Nicemleme	27

4.4. Delta-Sigma Modülasyonu.....	28
4.5. Yüksek Dereceden Delta-Sigma Modülatörleri.....	31
4.6. Yüksek Hızda Örneklemeli Demetleyiciler	33
5. ÖNERİLEN YÖNTEM.....	35
5.1. Altdizilim	38
5.2. Delta-Sigma ile Düzgün Olmayan Örnekleme	44
5.3. Demet Uzayında Aradeğerleme	48
6. DENEYSEL SONUÇLAR.....	53
6.1. Zaman Bölgesinde Örnek Yükseltme	53
6.2. Yanal Aradeğerleme.....	56
6.3. Demetleme Sonuçları	63
7. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME	70
8. KAYNAKLAR.....	73
EK-1 ALTDİZİLİME AİT NOKTASAL DAĞILIM FONKSİYONU.....	85
EK-2 DENEY DÜZENEĞİ HAKKINDA BİLGİ.....	100
ÖZGEÇMİŞ.....	103
YAYINLAR	104

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A/D, ADC	<u>A</u> nalog to <u>D</u> igital <u>C</u> onverter	Analogtan Sayısala Çevirici
CMUT	<u>C</u> apacitive <u>M</u> icromachined <u>U</u> ltrasonic <u>T</u> ransducer	Kapasitif Mikromakina Ultrasonik Dönüştürücü
CNR	<u>C</u> ontrast to <u>N</u> oise <u>R</u> atio	Kontrast Gürültü Oranı
CRT	<u>C</u> atode <u>R</u> ay <u>T</u> ube	Işın Taramalı Tüp
D/A, DAC	<u>D</u> igital to <u>A</u> nalog <u>C</u> onverter	Sayısalardan Analoga Çevirici
FIFO	<u>F</u> irst <u>I</u> n <u>F</u> irst <u>O</u> ut	İlk Giren İlk Çıkar
FIR	<u>F</u> inite <u>I</u> mpulse <u>R</u> esponse	Sonlu Dürtü Yanıtı
FPGA	<u>F</u> ield <u>P</u> rogrammable <u>G</u> ate <u>A</u> rray	Alan Programlanabilir Geçit Dizilimi
I	<u>I</u> nphase	Gerçek Bileşen
OSR	<u>O</u> versampling <u>R</u> atio	Aşırı Örnekleme Oranı
PCM	<u>P</u> ulse <u>C</u> ode <u>M</u> odulation	Darbe (Vurum) Kod Kiplenimi
Q	<u>Q</u> uadrature	Sanal Bileşen
RF	<u>R</u> adio <u>F</u> requency	Yüksek Frekans
SNR	<u>S</u> ignal to <u>N</u> oise <u>R</u> atio	Sinyal Gürültü Oranı
TGC	<u>T</u> ime <u>G</u> ain <u>C</u> ontrol	Zaman Kazanç Kontrol Yükseltici
VLSI	<u>V</u> ery <u>L</u> arge <u>S</u> cale <u>I</u> ntegration	Çok Büyük Çapta Tümlleşim
$\Delta\Sigma$	Delta-Sigma	Delta-Sigma

TERİMLER DİZİNİ

Bu tezde kullanılan İngilizce terimlerin Türkçe karşılıkları, konu ile ilgili yapılan Türkçe yayınlardan ve teknik sözlüklerden alınmıştır [1, 2, 3, 4].

TÜRKÇE	İNGİLİZCE
açıklık	aperture
alçak geçiren süzgeç	low-pass filter
alış	receive, reception
altdizilim	subarray
ana lob	main lobe
analog, örneksel	analog
ara frekans	intermediate frequency
aradeğerleme	interpolation
ayrık, parçalı	discrete
bant geçiren süzgeç	band-pass filter
bant genişliği	bandwidth
bileşen	component
bozulma	distortion
bölge, uzay, alan	domain

çerçeve hızı	frame rate
çevirici	converter
çoğullama, çoklama	multiplexing
darbe, vurum	pulse
demet uzayı	beam space
demetleme	beamforming
dinamik aralık, dinamik erim	dynamic range
dizilim, dizi	array
doğruluk, duyarlık	accuracy
dönüştürücü	transducer
düzgün nicemleme	uniform quantization
düzgün olmayan	non-uniform
eksenel, eksensel	axial
eşzamanlama	synchronization
etkin açıklık	effective aperture
evre	phase
evreli dizilim	phased array
evreyumlu	coherent
evrişim, katlama	convolution
f-sayısı	f-number
gecikme	delay
geçirme bandı	passband

geleneksel	conventional
genişbantlı	broadband
genlik	amplitude
gerçek zaman	real-time
girişim	interference
gönderim	transmission
gürültü	noise
gürültü spektrumu biçimlendirme	noise shaping
ilintisizleştirmek	decorrelate
kayan yazmaç	shift register
kıptırtı	dither
kırınım	diffraction
kırtmak	truncate
kod çözücü	decoder
logaritmik sıkıştırma	logarithmic compression
merkez frekans	central frequency
modülasyon, kipleme	modulation
nicel	quantitative
nicemleme	quantization
nicemleme gürültüsü	quantization error
nicemlenmiş sinyal	quantized signal
nicemleyici	quantizer

noktasal dağılım fonksiyonu	point spread function
odaklama	focusing
ortalama kare	mean square
öngörü	prediction
örnek seyreltme	decimation
örnek yükseltme	upsampling
örtüşme-önler	anti-aliasing
örüntü	pattern
seğirme	jitter
sentetik açıklık	synthetic aperture
sinyal gürültü oranı	signal to noise ratio
süzgeç	filter
tabanbant	baseband
tümlev devresi	integrator
uyarlanır	adaptive
uzak alan	far field
yan lob	sidelobe
yanal	lateral
yanıltıcı lob	grating lobe
yankı	echo
yönlendirme	steering
yüksek hızda (aşırı) örnekleyen çevirici	oversampling converter

yüksek hızda örnekleme, aşırı örnekleme	oversampling
zaman bölgesi	time domain
zarf sezim	envelope detection
zayıflama	attenuation



ŞEKİLLER DİZİNİ

ŞEKİL NO VE AÇIKLAMASI

SAYFA NO

Şekil 1.1: Akustik bir dalganın farklı geçirgenliğe sahip bölgelerden oluşan bir ortama gönderilmesi ve bölgeler arasındaki sınırdan geri yansıyan sinyallerin alınması	3
Şekil 1.2: Demetleme ile dalgaların evreyuymulu bir duruma getirilmesi: 64-Kanallı odaklamasız (üstte) ve odaklamalı (altta) dizilim sinyalleri	4
Şekil 1.3: Demetleme işleminin sembolik gösterimi.....	6
Şekil 2.1: Evreli dizilim yönteminde veri toplama adımı ve bir adımda bütün dizilim elemanlarının aktif olması	9
Şekil 2.2: Evreli dizilim yönteminde noktasal dağılım fonksiyonu	11
Şekil 2.3: Evreli dizilim yöntemi kullanılarak elde edilen deneysel görüntü.....	12
Şekil 2.4: $N_y=5$ için sentetik açıklık yönteminde veri toplama adımları ve her adımda aktif olan dizilim elemanları	14
Şekil 2.5: Sentetik açıklık yönteminde noktasal dağılım fonksiyonu.....	15
Şekil 2.6: Sentetik açıklık yöntemi kullanılarak elde edilen deneysel görüntü.....	15
Şekil 3.1: Tabanbanda analog kaydırma ile gecikme uygulanması (ω_0 , tabanbant frekansı; $\Omega(t)$, uygulanan gecikme).....	21
Şekil 3.2: Tabanbanda sayısal kaydırma ile gecikme uygulanması (I=Inphase, Q=Quadrature)	21
Şekil 4.1: Birinci dereceden delta-sigma nicemleyicinin blok diyagramı	29
Şekil 4.2: Birinci dereceden delta-sigma nicemleyicinin örneklenmiş veri için eşdeğer devresi.....	29
Şekil 4.3: Delta-sigma modülasyonundan kaynaklanan gürültünün spektral yoğunluğu $N(f)$ ile yalnız niceme gürültüsünün spektral yoğunluğu $E(f)$ karşılaştırması.....	31

Şekil 4.4: İkinci dereceden delta-sigma nicemleyici	32
Şekil 5.1: Delta-sigma örnekleme ve altdizilimsel sinyal işlemeye dayalı kısmi demetleme ($\Delta\Sigma$: delta-sigma modülasyonu, τ : gecikme, AGS: alçak geçiren süzgeç, ARA: yanal aradeğerleme).....	37
Şekil 5.2: $N_t=N_r=3$ için altdizilim yönteminde veri toplama adımları ve her adımda aktif olan dizilim elemanları	38
Şekil 5.3: Ortamın değişik açılarla taranması ve her açığa bakıldığında farklı derinliklerdeki noktalara odaklama	39
Şekil 5.4: Altdizilim yönteminde noktasal dağılım fonksiyonu ($N_t = N_r = 16, K = 6$).....	40
Şekil 5.5: Altdizilim yöntemi kullanılarak elde edilen görüntü	42
Şekil 5.6: Delta-sigma kodlanmış deneysel bir RF sinyalinin frekans spektrumu.....	45
Şekil 5.7: İkinci dereceden delta-sigma çevirici.....	45
Şekil 5.8: Düzgün olmayan delta-sigma örnekleme demetleme	47
Şekil 5.9: Demet uzayında aradeğerleme	49
Şekil 5.10: Altdizilime ait evre kullanılarak bulunan bir bant geçiren süzgeç ile aradeğerleme	51
Şekil 5.11: Bir altdizilim için tarama ve aradeğerleme işlemleri	51
Şekil 5.12: Düşük çözünürlüklü kısmi demetlerden yüksek çözünürlüklü görüntü oluşturulması	52
Şekil 6.1: Örnek sayısını 16 kat artırmak için mevcut örneklerin arasına 15 sıfır eklenmiş RF sinyalinin spektrumu. Burada orijinal sinyalin frekans bandının 16 kez daraldığı ve 2π 'lik alanda 16 defa tekrarlandığı görünmektedir	54
Şekil 6.2: Aradeğerleme işleminde kullanılan ve zaman bölgesinde sinc fonksiyonu şeklinde olan alçak geçiren süzgecin spektrumu (süzgeç genişliği = 171).....	54
Şekil 6.3: Örnek yükseltme amacıyla yapılan aradeğerleme işleminin sonunda elde edilen RF sinyalinin Fourier dönüşümü.....	55
Şekil 6.4: FIR süzgeç tasarım yöntemi ile hesaplanana alçak geçiren süzgeç katsayıları kullanılarak örnek yükseltme işleminin sonuçları.....	58

Şekil 6.5: Farklı ateşleme adımlarında elde edilen demetler ve spektrumları (ilgili ateşleme adımındaki evreye bağlı olarak frekans bandının yeri değişmektedir)	59
Şekil 6.6: Demet uzayında aradeğerleme işlemi sırasında araya sıfır eklemenin sonucunda elde edilen demetler ve spektrumları	60
Şekil 6.7: Her ateşleme adımında 200 adet demet toplanarak elde edilen sonuçlar	61
Şekil 6.8: a-f) Altdizilim sinyal işleme için demet uzayında örnek sayısı artırılması sırasında aradeğerleme süzgeci uygulanmadan önceki durum $r\text{-sin}(\theta)$ görüntüleri, g) Aradeğerleme süzgeci uygulandıktan ve 6 görüntü toplandıktan sonraki son görüntü.....	62
Şekil 6.9: Tarama dönüşümü	63
Şekil 6.10: RF demetleme sonuçları	65
Şekil 6.11: Delta-sigma örnekleme altdizilim sinyalleri kullanarak dinamik odaklamalı demetleme	66
Şekil 6.12: Bir noktasal yansıtıcıdan dinamik odaklama ile alınan derinlik yönündeki sinyaller; a) evreli dizilim kullanarak rf demetleme için, b) altdizilim kullanarak delta-sigma örnekleme demetleme için.....	67
Şekil 6.13: Bir noktasal yansıtıcıdan dinamik odaklama ile alınan açısal yönündeki sinyaller; a) evreli dizilim kullanarak rf demetleme için, b) altdizilim kullanarak delta-sigma örnekleme demetleme için.....	68
Şekil 6.14: Bir noktasal yansıtıcıdan dinamik odaklama ile alınan sinyaller; a) altdizilim kullanarak RF demetleme için, b) altdizilim kullanarak düzgün olmayan delta-sigma örnekleme demetleme için.....	69
Şekil EK-1.1: Altdizilim yönteminde sinyal gönderme ve alma işlemleri	85
Şekil EK-1.2: Etkin açıklığın sembolik olarak gösterimi	86
Şekil EK-1.3: Farklı altdizilimlere ait etkin açıklıklar	87
Şekil EK-1.4: Ayırık elemanlardan oluşan doğrusal ve tek boyutlu bir dönüştürücü dizilimi	91
Şekil EK-2.1: Bir sıvı tankı içinde 6 adet telden oluşan deney ortamı.....	101
Şekil EK-2.2: Ultrason probunun kesit aldığı düzlemi kesen tellerin yerleşimi ...	101

ÇİZELGELER DİZİNİ

ÇİZELGE NO VE AÇIKLAMASI

SAYFA NO

Çizelge 1.1: Bazı evreuyumlu sistem uygulamaları	5
Çizelge 2.1: Evreli dizilim ve sentetik açıklık için sistem parametreleri	17
Çizelge 2.2: Evreli dizilim ve sentetik açıklık yöntemlerinde SNR ve CNR karşılaştırması	18
Çizelge 6.1: Altdizilim sinyal işleme ile ilgili sistem parametreleri	56
Çizelge EK-2.1: Deney düzeneğinde toplanan ham verilerin dosyada saklanma şekli.....	102

1. GİRİŞ

Günümüzde elektronik alanındaki gelişmeler, görüntüleme tekniklerini değiştirmektedir [5]. 1970'lerde B-tipi ultrasonik görüntüleme tarama işlemi, dönüştürücü elemanlarının mekanik olarak döndürülmesi ile yapıyordu [6]. Pratik uygulamalarda kullanışlı bir görüntü, uygun olarak taranmış bir CRT demetinin şiddeti değiştirilerek üretilmişti. Daha karmaşık sistemlerde, CRT görüntüsünde aradeğerleme yapılmıştı. Zarf sezimi ve görüntü kontrolü gibi işlemler için analog işleme teknikleri kullanılıyordu. Çünkü, sayısal teknikler çok yavaş ve pahalıydı. Bu sistemlerde, alıştırma ve gönderişte sabit odaklama yapılması nedeniyle, görüntü kalitesi düşüktü.

1975'te Macovski, dairesel ve doğrusal olarak dizilmiş dönüştürücü elemanlarını kontrol ederek, dinamik odaklamalı demet üreten bir yöntem geliştirdi [7]. Bu yöntemde, dizilime uygulanan gecikmeler ayarlanarak, uzay taranabiliyordu. Böylece, B-tipi görüntü elde etmek için dönüştürücünün mekanik olarak döndürülmesi zorunluluğu ortadan kalkmıştı. Bu sistem, ilk defa evreli dizilim ile çalışan ultrason sistemlerinden biriydi.

1980'li yıllara doğru, analog gecikme elemanlarındaki gelişmeler ve analog elemanların boyutlarının küçülmesi ile birlikte evreli dizilim sistemleri tasarlanabilmişti. Bazı sistemler sabit odaklı alıştırma işlemleriyle kısıtlıydı, çünkü gecikme hattındaki değişikliklerden kaynaklanan gürültü, görüntü kalitesini olumsuz yönde etkiliyordu. Diğer bazıları ise birçok odak bölgesini, anahtarlandığında düşük gürültü üreten pahalı ve hassas gecikme hatları kullanarak sentezliyordu [8].

1979'da Maslak tarafından gecikme hatlarını değiştirmeden dinamik odaklama yapan bir yöntem önerildi [9]. Her kanaldan alınan RF sinyali, ara bir frekansa heterodin edilerek, bir evre ayarlama devresi ile ince ayar değişiklikler yapabilir. Böylece, pahalı ve düşük gürültülü gecikme hatlarına gerek kalmadan çok sayıda alış odaklı bir görüntüleme sistemi tasarlanabilir.

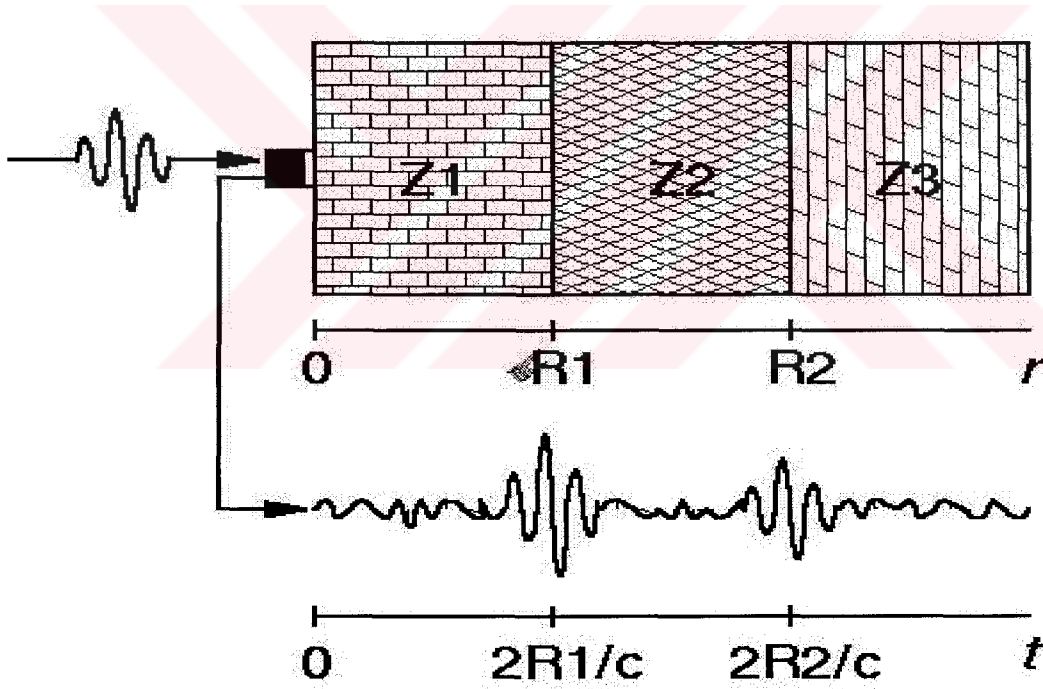
1980'li yılların sonlarında, analogtan sayısala çeviricilerdeki gelişmeler, demetleyicilerin giderek daha fazla sayısal işlemeye dayalı olarak tasarlanmasını sağlamıştır.

1.1. Evreuyumlu Görüntüleme

Evreuyumlu görüntülemenin teorisi, ilk defa Abbe tarafından 19. yüzyılın sonlarında açıklanmıştır. Yarı saydam bir nesnenin içinden geçen düz monokromatik dalgalar düşünöldüğünde, sonradan gelen bozulmuş dalgalar çift mercek düzeni ile nesnenin görüntüsü oluşturulmak için kullanılabilir. İlk mercek Fourier dönüşümü süzgeci gibi davranır ve dalgaları birçok noktaya odaklar. Daha sonra görüntü oluşturmak için ikinci mercek ile geri dönüşüm yapılır.

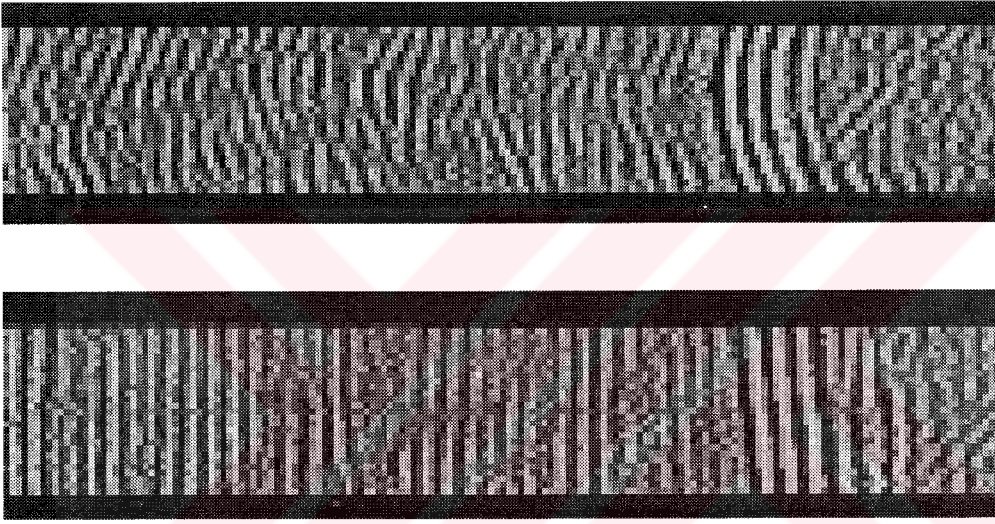
Bir ortama özgü bilgilerin elde edilmesi için ortamın üretip yaydığı enerjinin veya ortamla etkileşime giren uygun bir enerji çeşidinin ortama gönderilip, bu etkileşim sonucunda ortaya yayılan enerjinin bu enerjiye duyarlı algılayıcılar ile toplanıp elektronik ortama aktarılarak işlenmesi gerekmektedir. Bu bağlamda, gerçek yaşam uygulamalarında fiziksel gerekçelerden dolayı genel olarak söz konusu olan enerji yayılması, elektromanyetik ve akustik dalgalar ile oluşan enerji yayılmasıdır (Şekil 1.1). Bilindiği gibi, elektromanyetik ve akustik dalgalara duyarlı algılayıcılar sırasıyla anten ve akustik dönüştürücü olarak adlandırılmaktadır. Algılayıcılar, uygulamaya bağlı olarak pasif (alıcı) veya aktif (gönderici-alıcı) olarak kullanılmaktadır. İncelenen ortama özgü bilgiler ve bilgi doğruluğu, kullanılan algılayıcıların sayısı ile ilişkilidir: Elde edilen bilgi ve doğruluğu algılayıcı sayısı ile artmaktadır. Bu nedendir ki birçok uygulamada (radar, sonar, ultrason, v.b.) bir algılayıcı yerine algılayıcı dizimleri kullanılmaktadır [10, 11].

Algılayıcı dizilim sinyallerinin işlenmesi amacıyla kullanılan yöntemler, bir algılayıcıdan alınan sinyalin işlenmesi için kullanılan yöntemlerden daha kapsamlıdır. Diğer bir deyişle, dizilim sinyallerinin işlenmesi, her dizilim kanalından alınan sinyalde bulunan kısmi bilgilerin çıkarılıp birleştirilmesidir. Bu amaçla iki temel yaklaşım kullanılmaktadır: Evreyumlu ve evreyumsuz sinyal işleme. Farklı dizilim kanallarından gönderilen/alınan sinyallerin aralarında evre ve zaman ilişki varsa, bu sisteme evreyumlu denir. Örneğin ultrasonik görüntüleme evreyumlu bir sistemdir. Görüntüleme ve algılama daha çok enerji yoğunluğuna dayalı ise, bu sisteme evreyumsuz denir. Örneğin X-Işını ile görüntüleme evreyumsuzdur. Evreyumsuz sistemler sadece yoğunluk ölçümlerini kullanırlar [12].



Şekil 1.1: Akustik bir dalganın farklı geçirgenliğe sahip bölgelerden oluşan bir ortama gönderilmesi ve bölgeler arasındaki sınırdan geri yansıyan sinyallerin alınması

Evreuyumlu görüntüleme yöntemleri, genel olarak ikiye ayrılabilir: birincisi, zaman bölgesinde genişbantlı yöntemlerdir ki, bunlar genellikle dizilim tarafından kaydedilen geliş zamanı ve/veya genlik bilgisini kullanırlar; ikincisi ise, sabit frekanslı veya darbantlı yöntemlerdir ki, genellikle dizilim üzerindeki evre farkları bilgisini kullanırlar. Evreuyumlu görüntüleme, sinyaller bir odak noktasında yapıcı bir girişim oluşturacak şekilde zaman gecikmeleri uygulanarak dizilim kanallarından gönderilir/alınır (Şekil 1.2).



Şekil 1.2: Demetleme ile dalgaların evreuyumlu bir duruma getirilmesi: 64-Kanallı odaklamasız (üstte) ve odaklamalı (altta) dizilim sinyalleri

Evreuyumlu sistemlerin birçok uygulama alanı vardır [13, 14]. Bunlardan bazıları Çizelge 1.1’de listelenmiştir [15].

Çizelge 1.1: Bazı evreuyumlu sistem uygulamaları

Uygulama	Açıklama
Görüntüleme	Ultrasonik, optik
Sonar	Kaynak yer tespiti ve sınıflandırması
Radar	Evreli dizilimli radar, hava trafiği kontrolü, sentetik açıklıklı radar
Haberleşme	Yönsel gönderiş ve alışı, uydu haberleşmesi, akıllı antenler
Jeofizikle İlgili Araştırmalar	Dünya kabuğunun haritalanması, petrol araştırmaları
Astrofizikle İlgili Araştırmalar	Evrenin yüksek çözünürlüklü görüntülenmesi
Biyomedikal	Cenin kalbi dinleme, doku incelemesi, işitme cihazı

1.2. Demetleme

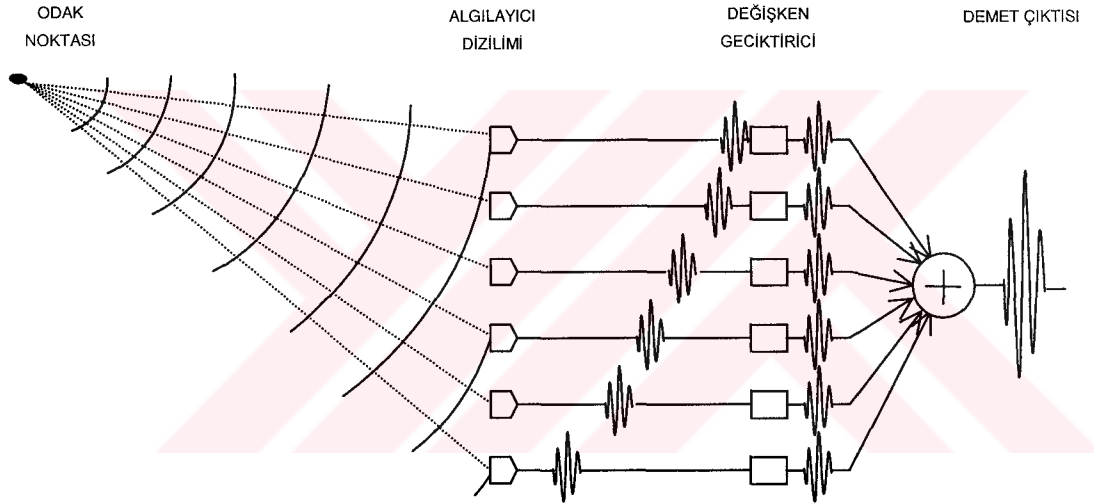
Evreuyumlu dizimsel sinyal işlemede, incelenen ortamdan alınan bilgilerin ortamdaki yerlerinin belirlenmesi amacıyla dizilimin elektronik olarak yönlendirilmesi ve odaklanması gerekmektedir ki, bu iki işlem birlikte demetleme olarak adlandırılmaktadır [15]. Demetleme çalışmaları, dalgacıklar ile demet oluşumuna ait bir önermede bulunan Huygens tarafından 1678’de başlatılmıştır. Bu önerme, 1818’de Fresnel tarafından nicel bir tanımlama ile geliştirilmiştir. Daha sonraları Rayleigh-Sommerfeld kırınım formülü gibi daha doğru formüller optikte geliştirilmiştir [16, 17].

Demetleme işlemi, sinyallerin evreuyumlu bir duruma getirilerek birleştirilmesi olup, temel olarak, zaman geciktirmesi, çarpma ve toplama işlemlerini

kapsamaktadır (Şekil 1.3) [18] ve basitçe:

$$s(t) = \sum_{n=1}^N A_n(t) p(t - \tau_n(t) - r/c) \quad (1.1)$$

olarak ifade edilebilir [19]. Pratik uygulamalarda, gerçekleştirilmesi en kritik işlem yeter doğrulukta zaman geciktirmesidir, çünkü bu, demet çözünürlüğünü belirleyen önemli etkenlerden biridir. Zaman gecikmesindeki nicemleme hataları, anormal lobların oluşmasına neden olmaktadır. Bunun sonucunda yan lobların genliğinin artmasıyla birlikte görüntüleme sisteminin dinamik aralığı sınırlanmaktadır [20].



Şekil 1.3: Demetleme işleminin sembolik gösterimi

Geleneksel olarak kullanılan odaklı demetler, yakın alanda düşük yan loblara sahiptir. Uzağa gittikçe elde edilen görüntü, yanal demet genişliğinin artması nedeniyle hızla bulanıklaşır. Alan derinliğini artırmanın ve bu arada yan lobları düşük tutmanın etkin bir yolu, sinyal alışında dinamik odaklama kullanmaktır [21]. Dinamik odaklamada alınan demetin odak uzunluğu zamanla elektronik olarak artırılır, böylece dokunun içindeki tüm derinliklerden dönen yankılar sürekli odak içinde kalmış olur. Yani her derinliğe ayrı odaklama yapılmış olur. Dinamik odaklama yöntemi, alan derinliğini daha da artırmak için demetlerin gönderiminde de uygulanabilir. Bu amaçla her biri farklı bir noktaya odaklanan birçok darbe

dizisi ortama gönderilir. Açıkça görülebildiği gibi, bu işlem görüntüleme kalitesini artırır, fakat çerçeve hızını önemli bir miktarda azaltır [22].

Demetleme yöntemi, evreyumlu görüntülemedeki en önemli adımlardan biridir. Demetleme adımı, görüntüleme sisteminin kalitesini doğrudan etkilemektedir. Görüntü kalitesi ile ilgili önemli sistem parametreleri şunlardır: yanal ve eksenel çözünürlük, alan derinliği, kontrast, çerçeve hızı, açıklık genişliği, f-sayısı (odaklama derinliğinin açıklık genişliğine olan oranı), merkez frekans ve dolayısıyla dalga boyu, sistem bant genişliği ve yan loblar.

Evreyumlu görüntüleme sistemlerinde görüntü kalitesini teorik olarak incelemek için noktasal dağılım fonksiyonlarına bakılır. Noktasal dağılım fonksiyonu, kullanılan demetleme sisteminin yapısına göre farklılıklar gösterir ve sistemin açısal çözünürlüğünü gösterir. Demetleme işleminde, görüntüsü oluşturulacak ortama dönüştürücü elemanlarından odaklı olarak bir sinyal demeti gönderilir. Bu sinyal demetinin uzaydaki odak noktasında oluşturduğu etki kullanılan açıklığın Fourier dönüşümüne denk gelmektedir [16]:

$$H(\theta) = \sum_{n=1}^N a[n] e^{-j\beta_0 n} \quad (1.2)$$

$$H(\theta) = F(a[n]) \quad (1.3)$$

Noktasal dağılım fonksiyonu, odak noktasında oluşan sinyalin tek boyutlu kesitidir. Doğrusal bir dönüştürücü dizilimi için, ağırlık fonksiyonu "1" alındığında noktasal dağılım fonksiyonunun aşağıdaki gibi bir sinc(.) fonksiyonu şeklinde çıkmaktadır. N -elemanlı bir dizilimin uzak alanında tek yönlü noktasal dağılım fonksiyonu:

$$H(\theta) = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{\lambda} Nd \sin \theta\right)}{\sin\left(\frac{\pi}{\lambda} d \sin \theta\right)} \quad (1.4)$$

olarak yazılır [23]; burada λ dalga boyu, θ dizilimin dikey eksenine olan açı, d dizilim elemanlarının arasındaki uzaklıktır. Görüldüğü gibi, açısal çözünürlük, bu işlemin açısal yayılması ile ters orantılı ve dolayısıyla eleman sayısı ile doğru orantılıdır.

Yukarıda anlatılan bilgiler, noktasal bir kaynaktan yayılan akustik sinyallerin dönüştürücü dizilimi tarafından nasıl algılandığına bakılırken de aynen kullanılabilir; yani bu formüller odaklı gönderme ve odaklı alma işlemleri için eşdeğer durumundadır. Ortamın görüntüsü oluşturulurken gönderme ve alma işlemlerinde aynı sayıda dönüştürücü elemanı kullanılmayabilir, ve/veya aynı dönüştürücü elemanları kullanılmayabilir. Gönderme ve alma işlemlerinde farklı sayıda dönüştürücü elemanı kullanıldığında, çift yönlü noktasal dağılım fonksiyonu, farklı sayılardan oluşan gönderici dizilimine ait tek yönlü noktasal dağılım fonksiyonu ile alıcı dizilimine ait tek yönlü noktasal dağılım fonksiyonunun çarpımına eşittir. Bir ateşleme adımı için gönderme ve alma işlemlerinde farklı dönüştürücü elemanları kullanıldığında, gönderici ve alıcı elemanların uzaydaki koordinatlarındaki farklılıktan kaynaklanan bir evre terimi, çift yönlü noktasal dağılım fonksiyonuna eklenmektedir [24]:

$$H(\theta) = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{\lambda} N_t d \sin \theta\right) \sin\left(\frac{\pi}{\lambda} N_r d \sin \theta\right)}{\sin\left(\frac{\pi}{\lambda} d \sin \theta\right) \sin\left(\frac{\pi}{\lambda} d \sin \theta\right)} e^{j\Phi(\theta)} \quad (1.5)$$

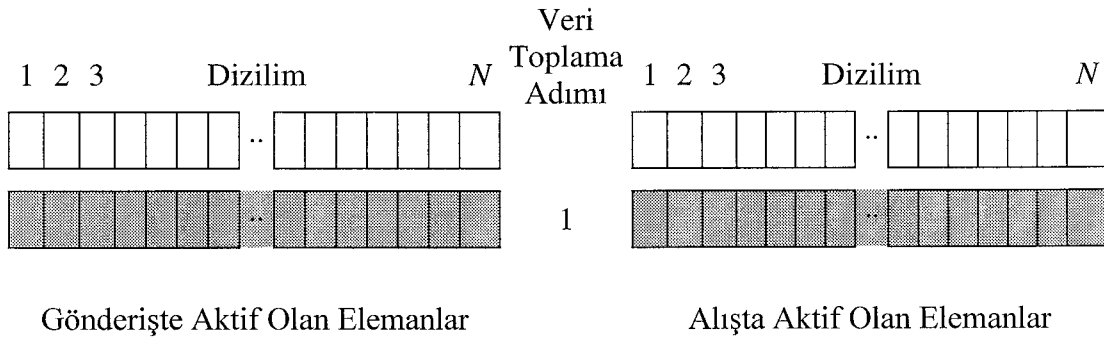
burada, N_t gönderici eleman sayısı, N_r alıcı eleman sayısı, $\Phi(\theta)$ ise gönderici ve alıcı dizilimlerin aralarındaki koordinat farkından oluşan evre terimidir.

2. DEMETLEMEDE VERİ TOPLAMA YÖNTEMLERİ

Demetleme yöntemleri, veri toplamada kullanılan aktif eleman sayısı, elektronik mimari, dizilimsel sinyal işleme yaklaşımı gibi kısıtlara göre farklı sınıflara ayrılmaktadır [25, 26]. En temel sınıflandırma, veri toplama yapısı ve bu amaçla kullanılan aktif eleman sayısına bağlı olarak yapılan sınıflandırmadır: Bunlar evreli dizilim ve sentetik açıklık ile demetleme yaklaşımlarıdır [28, 35].

2.1. Evreli Dizilim

Geleneksel evreli dizilim görüntüleyicilerinde dizilim elemanlarının hepsi uygun gecikmelerle ateşlenerek, ortamdaki bir noktaya odaklı bir demet gönderilir [29, 30]. Benzer şekilde ortamdaki yansıyan sinyaller bütün elemanlar tarafından algılanır (Şekil 2.1).



Şekil 2.1: Evreli dizilim yönteminde veri toplama adımı ve bir adımda bütün dizilim elemanlarının aktif olması

N elemanlı bir doğrusal dönüştürücü dizilimi için, demetleyici çıkışı kısaca aşağıdaki gibi yazılabilir [19, 28]:

$$z(t) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N s(t - \tau_i - \tau_j) \quad (2.1)$$

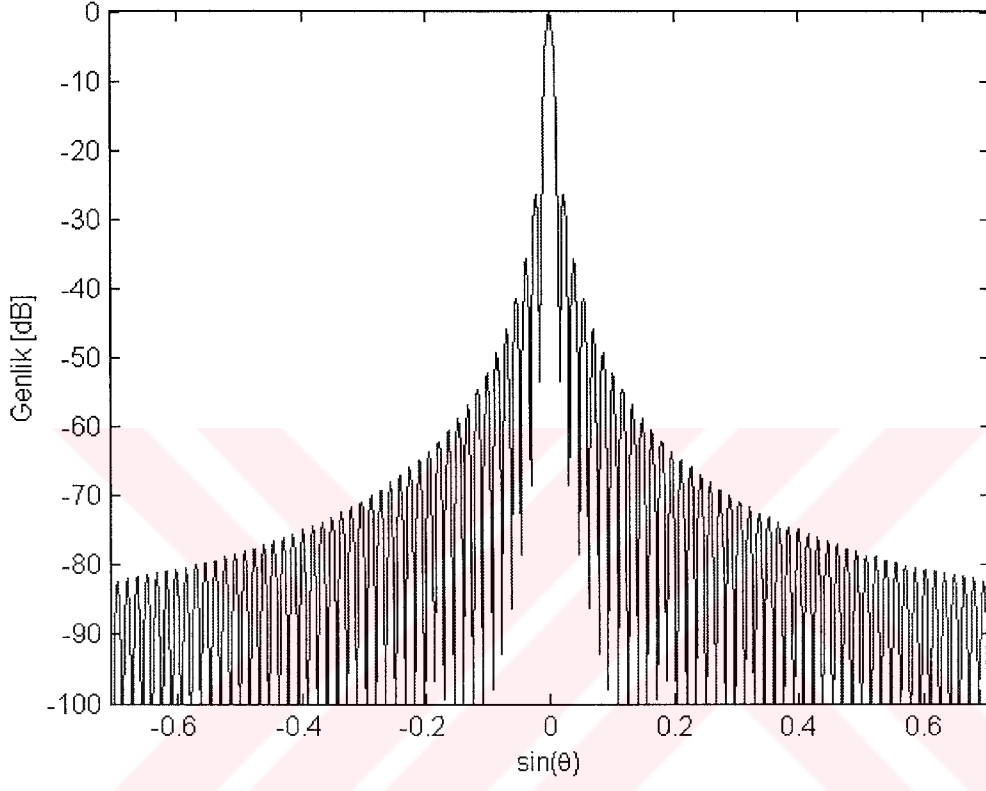
burada $s(t)$ akustik sinyaller, τ_i alıştaki gecikme ve τ_j gönderiştteki gecikmedir. İtteki toplama işlemi demet göndermeye, dıştaki toplama işlemi ise demet almaya karşılık gelir. Bu formülden sistemin çift yönlü noktasal dağılım fonksiyonunu bulmak mümkündür [23]:

$$H(\theta) = \left(\frac{\sin\left(\frac{\pi}{\lambda} Nd \sin \theta\right)}{\sin\left(\frac{\pi}{\lambda} d \sin \theta\right)} \right)^2 = \frac{\sin^2\left(\frac{\pi}{\lambda} Nd \sin \theta\right)}{\sin^2\left(\frac{\pi}{\lambda} d \sin \theta\right)} \quad (2.2)$$

burada λ dalga boyu, θ dizilimin dikey eksenine olan açı, d dizilim elemanlarının arasındaki uzaklıktır. Şekil 2.2'de evreli dizilim yönteminde noktasal dağılım fonksiyonun değışimi, $-\pi/4$ ile $+\pi/4$ aralığında 90 derecelik bir tarama için görölmektedir [31]. Burada, 128 adet dönüştürücü elemanı kullanılmıştır. İki elemanın arasındaki uzaklık dalga boyunun yarısı olarak alınmıştır. -3 dB seviyesindeki yanal çözünürlük 0.01 radyandır.

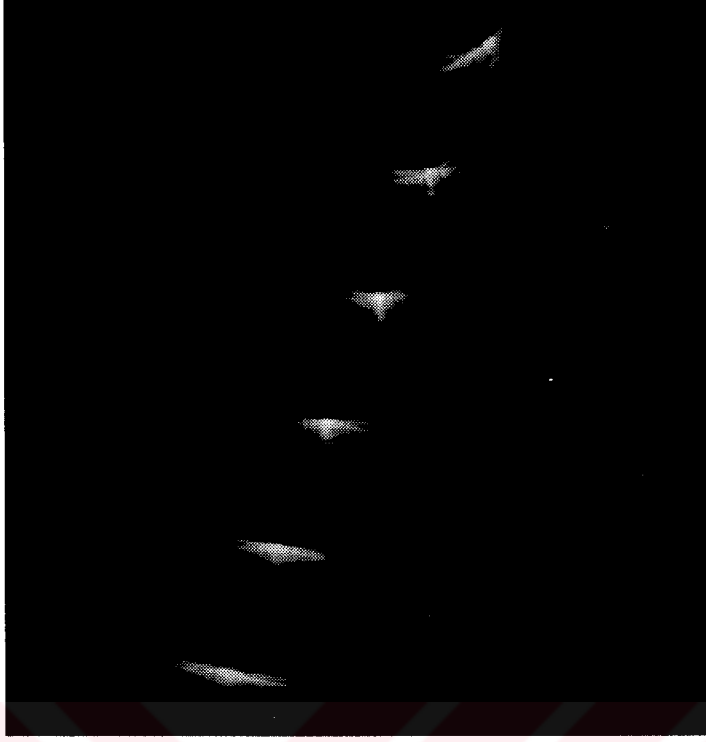
Evreli dizilim yöntemini kullanan görüntüleme sistemlerinde sadece sinyal alma adımında dinamik odaklama yapılmasına rağmen, yüksek SNR değerleri ve çözünürlük elde edilmektedir. Çok iyi görüntü kalitesi elde edilmekle birlikte, bir ateşleme adımında bütün elemanlar aktif olarak kullanıldığı için birçok paralel gönderme ve alma devrelerine gereksinim vardır. Örneğin, 128 kanallı bir ultrasonik görüntüleme sistemi için 128 adet ayrı sürücü devresi kullanılır [27]. Evreli dizilim ile demetlemede artan donanım karmaşıklığına doğrudan bağlı olarak sistem maliyeti yükselmekte ve görüntüleyicinin hacmi genişlemektedir.

Bugünkü modern elektronik teknoloji kullanılsa bile taşınabilir pratik bir sistem için gerekli olan düşük güç ve küçük hacim şartlarını yerine getirmek oldukça zordur [28].



Şekil 2.2: Evreli dizilim yönteminde noktasal dağılım fonksiyonu

Evreli dizilim ile demetleme yöntemi kullanılarak elde edilen deneysel bir görüntü Şekil 2.3'te gösterilmiştir. Burada kullanılan deney düzeneği hakkında detaylı bilgi Ek-2'de verilmiştir. Burada farklı uzaklık ve yönlerde altı noktasal yansıtıcı bulunan ortamın, deneysel ham verilerden oluşturulmuş görüntüleri görülmektedir. 128-elemanlı aktif algılayıcı diziliminin yeri, görüntünün üst-orta sınırına karşılık gelmektedir.



Şekil 2.3: Evreli dizilim yöntemi kullanılarak elde edilen deneysel görüntü

2.2. Sentetik Açıklık

Sentetik açıklık ile demetleme yönteminde ise, az sayıda elemandan oluşan bir altdizilim, her sinyal gönderme-alma adımında dönüştürücü dizilimi üzerinde bir eleman yana kaydırılmaktadır. Kullanılan altdizilim eleman sayısı 1 ise tek elemanlı sentetik açıklık, birden fazla ise çok elemanlı sentetik açıklık olarak adlandırılır. Farklı altdizilimlerden alınan sinyaller evreyumlu olarak toplanarak geniş bir dizilim sentezlenmektedir [32]. Veri toplama işlemi birden fazla ateşleme adımında gerçekleştirilmektedir (Şekil 2.4). Veri toplama adım sayısı şu şekilde hesaplanır [28]:

$$K = N - N_y + 1 \quad (2.3)$$

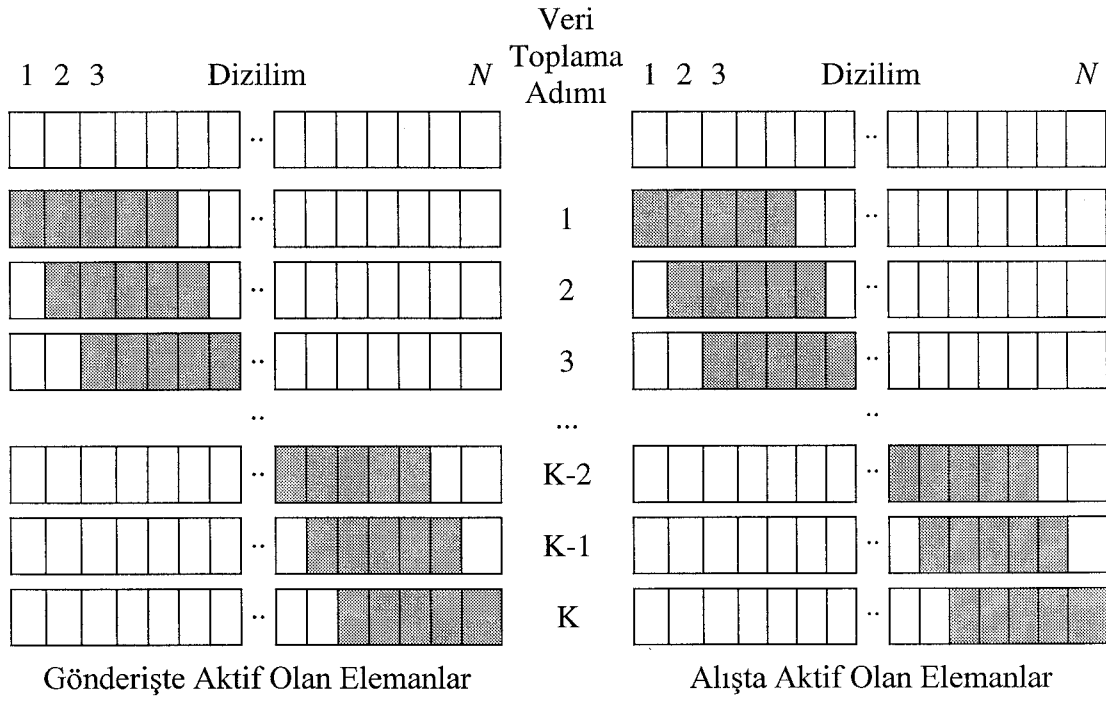
burada N_y her bir ateşleme adımında kullanılan aktif eleman sayısı ve N ise

kullanılan toplam eleman sayısıdır. Örneğin, $N=128$ elemanlı bir dönüştürücü diziliminde $N_y=16$ elemanlık bir altdizilim kullanılarak 113 adımda oluşturulan düşük çözünürlüklü demetler toplanarak yüksek çözünürlüklü görüntü oluşturulmaktadır [33, 34]. Sentetik açıklık ile demetleme yöntemi için N elemanlı bir doğrusal dönüştürücü dizilimi kullanıldığında, noktasal dağılım fonksiyonu,

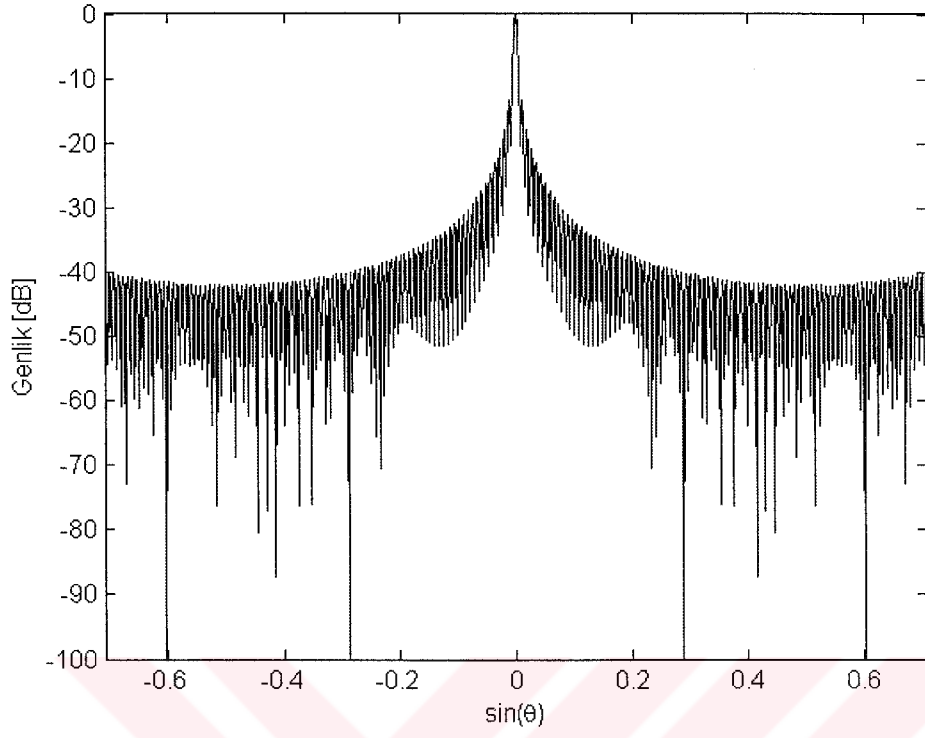
$$H(\theta) = \frac{\sin((2\pi / \lambda)(N - N_y + 1)d \sin \theta)}{\sin((2\pi / \lambda)d \sin \theta)} \cdot \frac{\sin((\pi / \lambda)N_y d \sin \theta)}{\sin((\pi / \lambda)d \sin \theta)} \quad (2.4)$$

olarak yazılır [28]. Şekil 2.5'te sentetik açıklık yönteminde noktasal dağılım fonksiyonun değişimi, $-\pi/4$ ile $+\pi/4$ aralığında 90 derecelik bir tarama için görülmektedir. Burada, toplam 128 adet dönüştürücü elemanı kullanılmıştır. Aktif eleman sayısı 1 olarak alınmıştır. Bu durumda, yanal çözünürlük -3 dB seviyesinde 0.007 radyandır.

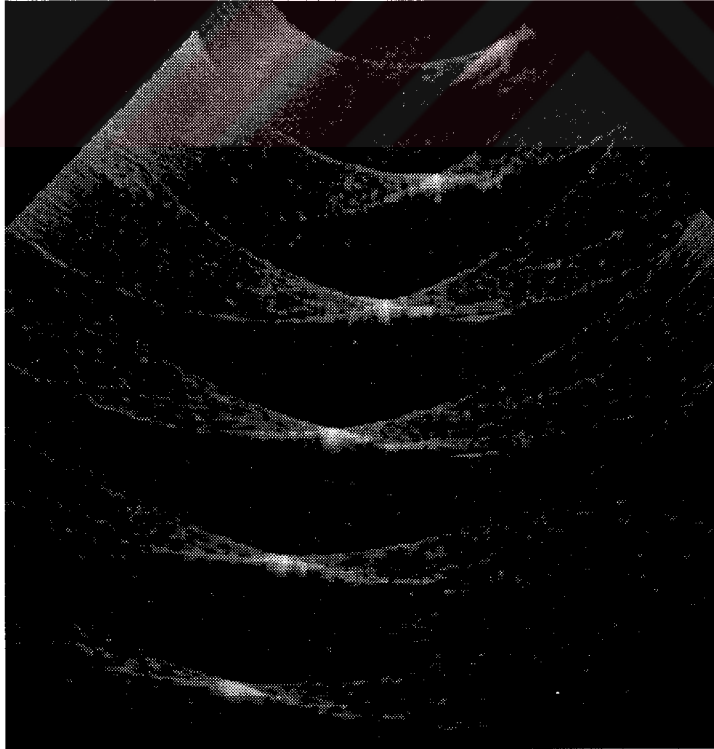
Sentetik açıklık ile demetleme yöntemi kullanılarak elde edilen deneysel görüntü Şekil 2.6'de gösterilmiştir. Burada farklı uzaklık ve yönlerde altı noktasal yansıtıcı bulunan ortamın, deneysel ham verilerden oluşturulmuş görüntüleri görülmektedir. 128-elemanlı aktif algılayıcı diziliminin yeri, görüntünün üst-orta sınırına karşılık gelmektedir.



Şekil 2.4: $N_y=5$ için sentetik açıklık yönteminde veri toplama adımları ve her adımda aktif olan dizilim elemanları



Şekil 2.5: Sentetik açıklık yönteminde noktasal dağılım fonksiyonu
(Aktif eleman sayısı $N_y=1$)



Şekil 2.6: Sentetik açıklık yöntemi kullanılarak elde edilen deneysel görüntü

2.3. Evreli Dizilim ve Sentetik Açıklık Yöntemlerinin Karşılaştırması

Evreli dizilim yönteminde bir çerçeve görüntüsü oluşturmak için, bir ateşleme adımı kullanılır. Bu ateşleme adımında, akustik dönüştürücü dizilimindeki elemanların hepsi birden aktif olarak kullanılır. Bu elemanlardan uygun gecikmelerle yapılan ateşlemeden sonra akustik sinyaller ortama yayılır ve odak noktasında yüksek genlikli bir cevap elde edilir. Veri toplamada ise yine bütün elemanlar aktif olarak kullanılır. Oysa sentetik açıklıkta, birden fazla ateşleme adımı vardır. Bu adımlarda sinyal gönderirken ve alırken daha az sayıda dönüştürücü elemanı aktif olarak kullanılır. Dolayısıyla donanımda kullanılan kanal devre sayısı aşağıdaki oranda azalır:

$$AEO = \frac{N_y}{N_e} \quad (2.5)$$

burada AEO Aktif Eleman Oranı, N_y sentetik açıklık için her bir ateşleme adımında kullanılan aktif eleman sayısı, ve N_e evreli dizilim için bir ateşleme adımında kullanılan aktif eleman sayısıdır. Sistem karmaşıklığı, aktif kanal devre sayısına dorudan bağlıdır [28].

Evreyumlu görüntüleme sistemlerinin donanım karmaşıklığı büyük ölçüde demetleyici kanal devre sayısına bağlıdır. Kanal devre sayısının azaltılması ile güç tüketimi ve boyut da önemli ölçüde azalır.

Demetleyicilerde görüntü kalitesi kullanılan etkin açıklığın genişliğine bağlıdır. Evreli dizilim yönteminde, bütün elemanlar aktif olarak kullanıldığı için görüntü kalitesi yüksektir. Sentetik açıklıkta ise, etkin açıklık kullanılan veri toplama işlemine bağlı olarak dar olduğu için görüntü kalitesi düşüktür [36]. 128 elemanlı bir evreli dizilimde yanal çözünürlük -3 dB seviyesinde 0.01 radyandır. 1 elemanı

aktif olarak kullanarak 128 elemanlı bir dizilimi sentezleyen bir sentetik açıklıkta yanal çözünürlük -3 dB seviyesinde 0.007 radyandır. 128 elemanlı evreli dizilim ile 1 aktif elemanlı sentetik açıklık arasındaki yanal çözünürlük oranı $\sqrt{2}$ kadar olduğu görülmektedir.

Sentetik açıklıkta birden fazla veri toplama adımı olduğu için, veri toplama sırasında olan hareketlere duyarlılık söz konusudur [37, 38, 39, 40]. Sentetik açıklıkta, evreli dizilimden farklı olarak bu harekete duyarlılığın kaldırılması gerekir [41].

Çizelge 2.1’de, evreli dizilim ve sentetik açıklık arasında sistem parametreleri açısından yapılan bir karşılaştırma gösterilmiştir. Bu tabloda, SNR alış sırasında ilintisiz toplanır gürültü olduğu kabul edilerek hesaplanmıştır. SNR_0 ise, tek elemanlı sentetik açıklığa ait SNR değeridir [28].

Çizelge 2.1: Evreli dizilim ve sentetik açıklık için sistem parametreleri

	Evreli Dizilim	Sentetik Açıklık
Gönderici Kanal Karmaşıklığı	N	N_t
Alıcı Kanal Karmaşıklığı	N	N_r
SNR/SNR ₀ [dB]	$10\log(N^3)$	$10\log(N_t N_r (N - N_r + 1))$
Açıklık Boyutu	$\sqrt{2}N$	$N - N_r + 1$
Hareket Tahmini	-	gerekli

Çizelge 2.2’de, belirli bir dizilim boyutu ve aktif eleman sayısı için, teorik SNR ve ölçülen CNR değerleri görülmektedir [28]. CNR sonuçları, 128 elemanlı evreli dizilimin CNR değerine göre normalleştirilmiştir. CNR ve SNR değerlerinden görülebileceği gibi, çok elemanlı sentetik açıklık yöntemi, evreli dizilim yöntemine yakın görüntü kalitesi üretmektedir.

Çizelge 2.2: Evreli dizilim ve sentetik açıklık yöntemlerinde SNR ve CNR karşılaştırması

	Evreli Dizilim	Çok Elemanlı Sentetik Açıklık	Tek Elemanlı Sentetik Açıklık
Etkin Açıklık Büyüklüğü, N_e	128	117	128
Gönderici Aktif Eleman Sayısı, N_t	128	12	1
Alıcı Aktif Eleman Sayısı, N_r	128	12	1
Beklenen Göreceli SNR [dB]	0	-21	-42
Ölçülen Göreceli CNR	1	0.8	0.3

3. SAYISAL DEMETLEME YÖNTEMLERİ

Dizilim sinyallerinin analog ve sayısal olarak işlenmesi ile gerçekleştirilen demetleme işlemleri sırasıyla analog ve sayısal demetleme olarak adlandırılır [42, 43]. Sayısal devrelerin pahalı ve tasarımı zor olduğu dönemlerde, evreuyumlu sistemlerde gerçekleştirim maliyeti daha düşük olan analog demetleme yaygın olarak kullanılmaktaydı. Özellikle 1980'li yılların sonlarında analogtan sayısala çevirmedeki ve tümleşik devre tasarımındaki büyük gelişmeler sonucunda, demetleme işlemlerinin daha fazla kısmı sayısal olarak yapılmaya başlandı. [44, 45, 47, 46, 48].

Ticari uygulamalarda ultrasonik sayısal demetleyiciler, çok bitli (flash) analogtan sayısala çeviriciler kullanılmaktadır. Alıcı kanallarından gelen RF sinyalleri, 8-10 bitlik bir çözünürlükte sayısallaştırılır ve bu sayısal sinyaller daha sonra her kanal için farklı miktarlarda geciktirilerek toplanır. Böylece ilgi duyulan bölgedeki özel bir odak noktasında evreuyumlu bir sinyal oluşturulur [49, 50]. Dinamik odaklamalı sistemler, dizilimin ortasından başlayıp uzayıp giden bir hat boyunca her derinlikteki yeni bir alış odağını sentezlemek için uygulanan gecikmeleri gerçek zamanda değiştirirler [51].

Sayısal demetlemede bir odağın doğru olarak oluşturulabilmesi için, gecikme doğruluğunun $\lambda/32$ mertebesinde olması gerekir [52]. Analogtan sayısala çeviricilerin tipik 40 MHz'lik örnekleme frekansı, bu çözünürlüğü kullanılan ultrason taşıyıcı frekansına bağlı olarak $\lambda/5$ - $\lambda/11$ arasında sınırlamaktadır. Sonuç olarak, dinamik odaklamada kullanılan gecikmeleri doğru olarak elde edebilmek için birçok karmaşık işlemlere gereksinim vardır.

Nispeten yavaş örneklenmiş verilerden yeterli doğrulukta gecikmeleri elde etmek için, değişik sayısal demetleme yöntemleri kullanılabilir. Bunlardan biri, uygun anlardaki yeni RF örneklerini elde etmek için, mevcut sayısal örneklere bir sinc süzgeci veya başka bir aradeğerleme süzgeci uygulamaktır. Diğeri, her alıcı kanalındaki RF sinyali karmaşık bir tabanbant sinyaline çevirmek ve daha sonra gerçek ve sanal bileşenlerine sayısal bir evre dönmesi uygulamaktır. Bir başka yöntem ise, hassas gecikme miktarlarını değiştirebilmek için her alıcı kanalındaki analogtan sayısala çeviriciyi süren örnekleme saatini seçmektir.

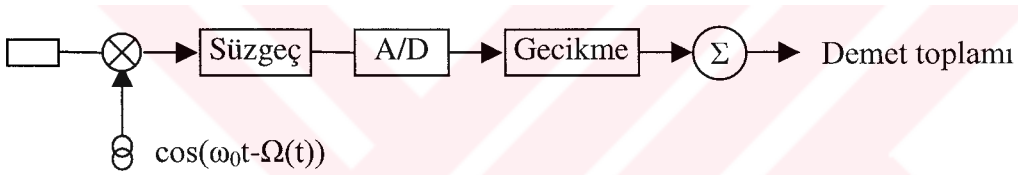
Bu sayısal demetleme yöntemlerinin hepsi de, kaba gecikme fonksiyonunu uygulamak için geleneksel sayısal bellekler (FIFO) kullanmaktadır ve hassas gecikmeler için ise oldukça fazla işlem yapmak zorundadırlar. Bu işlemlerin uygulanması, önemli miktarda fazladan güç harcanmasına ve fazladan entegre alanı kullanılmasına neden olmaktadır.

Bu demetleme yöntemleri çeşitli ticari uygulamalarda ve gelişmiş sayısal sistemlerde kullanılmaktadır. Bu sayısal demetleyicilerin yüksek duyarlığa ve düşük gürültüye sahip olmalarından dolayı, yüksek kalitede görüntüler elde etmek mümkündür [53]. Ayrıca, görüntüleyicilere sayısal sinyal işleme donanımları ile birçok gelişmiş fonksiyon eklenebilmektedir. Bunlardan bazıları, yüksek kaliteli spektral Doppler, renkli akış ve evre bozukluklarını düzeltmedir.

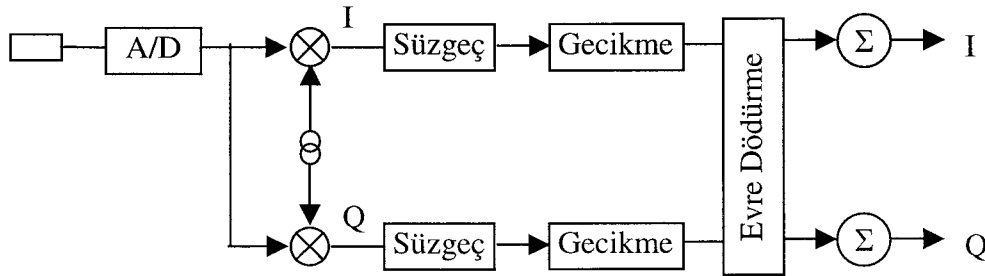
3.1. Tabanbant Örnekleme

Bu yöntemin önerilen ilk şeklinde, analogtan sayısala çevirme işleminden önce alınan sinyaller ara frekansa indirilmektedir [54, 55, 56]. Bu sistemde, ultrason sinyalleri evre ayarlı bir karıştırıcı sinyal ile düşük bir frekansa kaydırılır ve hassas gecikmelerin ayarlanması sağlanır (Şekil 3.1). Bu uygulama, analog sistemlere göre daha avantajlıdır, çünkü sayısal sistemler gürültüye daha az duyarlıdır. Aynı zamanda demet toplamı sayısal olduğu için çok geniş dinamik aralığa sahip çıkışlar elde edilebilir [57]. Analog bir süzgeç, analogtan sayısala çeviriciden önce yüksek frekanslı bileşenleri bastırarak örtüşmeyi önlemek için gereklidir.

Buna benzer başka bir sistemde, analogtan sayısala çevirici doğrudan dönüştürücü elemanına bağlıdır. Sayısallaştırmadan sonra tabanbanda frekans kaydırma işlemi uygulanır (Şekil 3.2). Bu durumda, analogtan sayısala çevirici önceki sisteme göre daha yüksek bir hızda çalışmalıdır, çünkü burada sinyal orijinal taşıyıcı frekansında ve bant genişliğindedir. Gerçek ve sanal bileşenler süzgeçlenip düşük bir veri hızına indirilerek (örnek seyreltme) sayısal belleklerin yer gereksinimleri azaltılabilir. Hassas bir gecikme üretebilmek için, geciktirilmiş karmaşık örnekler döndürülerek tabanbant sinyalinin evresi ayarlanır. Bu yöntem daha avantajlıdır, çünkü sistemde farklı evreleri üretmek ve seçmek için karışık ve hassas analog bileşenlere gerek yoktur. Bunun yerine her örnek sayısal bir değer karşılığı uygun bir açıyla yüksek hassasiyette döndürülür.



Şekil 3.1: Tabanbanda analog kaydırma ile gecikme uygulanması (ω_0 , tabanbant frekansı; $\Omega(t)$, uygulanan gecikme)



Şekil 3.2: Tabanbanda sayısal kaydırma ile gecikme uygulanması (I=Inphase, Q=Quadrature)

3.2. Aradeğerleme

Dinamik sayısal gecikme uygulanmasında kullanılan ikinci yöntem, aradeğerlemeye dayalıdır [58]. Bu yöntemde istenen hassasiyete sahip örnekleri elde etmek için, sayısal verilere bir aradeğerleme süzgeci ile örnek yükseltme işlemi uygulanır [43, 59, 60]. Bu kapsamda şartıyla bazı değişiklikler yapılarak daha etkin sistemler tasarlanmaya çalışılmıştır. Bunlardan birinde, her kanaldan alınan örneklerin arasına sıfırlar eklendikten sonra, alçak geçiren bir süzgeç uygulanır ve yüksek hızda demetleme yapılır. En sonunda ise örnekler seyreltilir [43].

Önerilen bir diğer sistemde, araya sıfırlar eklenmiş yüksek hızdaki örnekler kullanılarak kısmi demetleme yapılır, sonra süzgeç uygulanır ve nihai demet oluşturulmadan önce örnekler seyreltilir [60]. Demetleme ve süzgeçleme işlemlerinin ikisi de sabit bir odak için doğrusal işlemler olduğundan, hangisinin önce yapıldığı önemli değildir. Araya sıfır eklenmiş bu örneklere uygulanan süzgeç, alçak geçiren veya bant geçiren yapıda olabilir, ve genellikle birçok katsayıdan oluşur yani genişliği (boyutu) büyük olur, çünkü sıfır olmayan orijinal örneklerin arasında birçok sıfır vardır.

Aynı işlev farklı süzgeçler uygulanarak sağlanabilir. Nitekim bir başka çalışmada, kullanılan süzgecin katsayıları $(1/2)^m$ şeklinde alınır, burada m bir tamsayıdır [59]. Böylece basit ikili kaydırma işlemleri ile örneklerin süzgeç katsayıları ile çarpılması mümkün olmaktadır ve dolayısıyla sistemin donanım karmaşıklığı azalmaktadır.

Önceki bölümde sunulan evre kaydırmaya dayalı yöntemin tersine, aradeğerlemeye dayalı bu yöntemler genişbantlıdır, çünkü bunlar süzgecin geçirme bandında bulunan bütün frekans bileşenlerini doğru olarak geciktirirler. Elbette, süzgeç katsayılarının kırılmasından ve katsayı doğruluğundaki eksikliklerden dolayı, bu yöntemlerde bazı hatalar eklenmektedir. Son anlatılan yöntem, $(1/2)^m$ şeklindeki katsayılarından dolayı oldukça basittir, fakat farklı taşıyıcı frekansındaki ve farklı

bant genişliğindeki sinyalleri doğru olarak geciktirmede sınırlı esnekliğe sahiptir. Bu yöntemde, alınan sinyalin frekansı, örnekleme hızının $3/8$ oranında ise, 6 basamaklı bir süzgeç yeterli olabilmektedir. Nyquist hızında örneklenmiş sinyaller için daha uzun bir süzgeç kullanılmalıdır.

3.3. Düzgün Olmayan Örnekleme

Üçüncü genel demetleme yöntemi, gerekli gecikme doğruluğunu sağlamak için her kanaldan alınan RF sinyallerinin düzgün olmayan örnekleme ile analogtan sayısala çevrilmesidir [61, 62, 63]. Analogtan sayısala çeviriciyi süren örnekleme saatini geciktirerek, demetleme için gerekli olan her kanala ait gecikmelere ulaşılmış olur.

Bu yöntemde analogtan sayısala çeviricinin örnekleme doğruluğunun eksikliği bir sorun olarak düşünülebilir. Fakat günümüzdeki gelişmiş, düşük seğirmeye sahip ve kararlı analogtan sayısala çeviriciler sayesinde, düzgün olmayan örnekleme yöntemi kısmen daha kolay ve güvenilir olarak uygulanabilmektedir. Bu genişbantlı demetleme yönteminde, örnekleme saatleri her kanal için yüksek frekanslı ortak bir sistem saatinin bölünmesi ile elde edilebilir.

4. YÜKSEK HIZDA ÖRNEKLEME YÖNTEMLERİ

4.1. Genel bakış

Yüksek hızda örnekleme yöntemleri, yakın zamanda daha yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır, çünkü A/D ve D/A çeviriciler için kullanılan geleneksel yöntemlerde karşılaşılan birçok zorlukları gidermektedirler. Geleneksel çeviricilerin sahip oldukları bazı özellikler, devrelerinin VLSI teknolojisi ile gerçekleştirilmelerini zorlaştırmaktadır. Bunların başında, analog süzgeçlerin kullanımı, yüksek duyarlılıkta analog devrelere gereksinim ve gürültü ile girişimden etkilene gelmektedir. Geleneksel yöntemlerin özelliği, göreceli olarak daha düşük örnekleme frekanslarında kullanılmalarıdır (genellikle Nyquist hızında).

Yüksek hızda örnekleme için çeviriciler, basit ve daha yüksek toleranslı analog bileşenler kullanabilir, fakat hızlı ve karmaşık sayısal sinyal işleme aşamalarına gerek duymaktadırlar. Analog giriş, Nyquist hızından çok daha yüksek bir frekansta basit bir sayısal koda (genellikle tek bitlik sözcükler halinde) modüle edilir. Yüksek frekanslı modülasyon ve demodülasyon kullanılması, A/D çeviricinin girişindeki analog örtüşme-önler süzgeçler ve D/A çeviricinin analog çıkışını yumuşatan süzgeçler için dik (frekans) kesim ihtiyacını ortadan kaldırır. Bunun yerine sayısal süzgeçler kullanılır [64]. Sayısal bir süzgeç, sayısal modülatörün çıkışını yumuşatır, gürültü ile girişimi zayıflatır ve kodlar Nyquist hızında yeniden örneklendiğinde sinyal bandında örtüşme olmadan önce sinyalin yüksek frekanslı bileşenlerini yok eder. Başka bir sayısal süzgeç, sinyal analog şekle demodüle edilmeden önce, kodçözücüde yüksek-sözcük-hızına ulaşmak için kodu aradıklar.

Yüksek hızda örnekleme yöntemlerindeki tasarım faktörleri şunlardır: yüksek hızda örnekleme oranı, modülatörde kullanılan süzgeçlerin derecesi, modülatörün tipi, modüle edilmiş sinyalin nicemleme seviye (bit) sayısı, örnek seyrelticideki süzgeçlerin derecesi.

Yüksek hızda örnekleme çözümlerinde, giriş ve çıkış örnekleri arasında geleneksel yöntemlerdeki gibi bir ilişki yoktur, çünkü sayısal alçak geçiren süzgeçler kullanılmaktadır ve bunun sonucunda her bir giriş örneğinin değeri bütün çıkış örneklerini etkilemektedir.

4.2. Gelişimi

Analog sinyallerin yüksek hızlarda örnekleme ve tek bit kodlarla gösterilmesi ile ilgili çalışmalar, ilk defa 1946 yılında delta modülasyonunun önerilmesiyle başlamıştır [65]. Daha sonraları delta modülasyonunun birçok değişik türü önerilmiştir. 1960'lı yılların sonlarında, delta modülatörünün çıkış sinyalinin Nyquist hızında örnekleme yapılmış bir PCM şekline çevrilmesi fikri ortaya atılmıştır [66]. Bu yıllarda yapılan bir denemede, yüksek bitler +1'i ve alçak bitler ise -1'i gösterecek şekilde delta modülatörünün çıkışındaki bitler basit olarak sayılmıştır ve sayım sonuçları Nyquist hızında örnekleme yapılmıştır. Fakat bu yöntemle elde edilen çözünürlük çok kötü çıkmıştır, örneğin ses sinyallerinin iyi bir şekilde tekrar üretilmesi için, delta modülasyonunda 5000 mertebesinde yüksek hızda örnekleme oranlarına gerek duyulmuştur.

Goodman 1969'da sadece çıkış bitlerinin sayılmasının yeterli olmayacağını göstermiş ve yüksek frekanslı modülasyon gürültüsünün sinyal bandına karışmasını önlemek için daha etkili sayısal süzgeçleme gerektiğini belirtmiştir [67]. Hiç şüphesiz bu öneri, analogtan sayısala ve sayısalan analoga çözümlerinde yüksek hızda örnekleme yöntemlerinin kullanılabilirliğini gösteren önemli bir başlangıç olmuştur. Fakat maalesef, o zamanlarda bu amaca yönelik sayısal süzgeçlerin çok pahalı olması pratikte uygulamaların gecikmesine neden olmuştur.

Kısa bir zaman sonra aradeğerlemeye dayalı yakın bir yöntem geliştirilmiştir [68, 69]. Bu yöntemde analog sinyal çok kaba bir şekilde örneğin 16 seviye ile sayısallaştırılmakta ve daha sonra ortalama alınarak örneklenen değere yakın bir gösterim sağlanmaktadır. Sayısal olarak ortalama alma işlemi, kabul edilebilir bir maliyetle ve güvenilir devrelerle gerçekleştirilebiliyordu.

Aradeğerlemeli çeviricilerde kullanılan nicemleyiciler, Cutler tarafından 1954 yılında önerilen gürültü spektrumu biçimlendirme yöntemine dayalıydı [70]. Bu yöntemde bir örnekteki nicemleme gürültüsü ölçülüp bir sonraki giriş örneğinden çıkarılmaktaydı. Bu gürültü spektrumu biçimlendirmeli nicemlemenin en yaygın şekline, Inose ve Yashuda tarafından 1962'de delta-sigma modülasyonu denildi [71]. Buradaki işlem, tümlev devresinin çıkışına değil girişine eklenen giriş sinyali kullanarak bir delta modulatörü tarafından yapılmaktadır; böylece alıcı tarafında tümlev hesaplamaya gerek kalmamaktadır. Bu modülatör, hem delta-sigma, hem de sigma-delta olarak adlandırılmaktadır.

1970'li yılların ortaların da tümleşik devre teknolojisi, sayısal alçak geçiren süzgeçlerin tasarlanmasını kolaylaştıran bir duruma gelmiştir. Birçok tasarımcı, delta modülatörü yerine daha güçlü olduğu için delta-sigma modülatörü kullanmayı tercih etmektedir. 1980'li yılların sonlarında, tümleşik devrelerin boyutları çok küçülmüştür. Böylece daha önceleri analog olarak yapılan bazı fonksiyonların yapılmasında güçlü sayısal işaret işleyicilerin kullanımı, daha yüksek çözünürlüğe sahip analogtan sayısala ve sayısaldan analoga çeviricilere olan gereksinimi artırmıştır. Bu arada, tümleşik devrelerdeki gerilim seviyesi düşmüş ve devre yoğunluğunun artmasıyla ortam daha gürültülü olmaya başlamıştır. Bundan dolayı yüksek çözünürlük elde etmeye yönelik olarak geleneksel yöntemler yerine yüksek hızda örnekleme yöntemleri daha fazla ilgi görmeye başlamıştır.

Yüksek hızda örnekleme yöntemlerine duyulan güvenin artmasıyla birlikte, tasarım motivasyonunda değişiklikler olmuştur. İlk zamanlarda, yüksek örnekleme hızı elde edilmesinde analog ve sayısal devrelerin mümkün olduğu kadar basitleştirilmesi hedefleniyordu. Bugün artık yüksek hızda örnekleme oranını

düşürmek için, daha karmaşık analog ve sayısal devrelerin kullanılması kabul edilmektedir. Yüksek dereceden süzgeçlerin ve ardarda modülatörlerin kullanılması yaygınlaşmaktadır. Bu gelişmeler, yüksek hızda örnekleme yöntemlerinin yüksek frekanslı uygulamalarda kullanılabilmesini mümkün kılmaktadır.

4.3. Nicemleme

Genliğin nicemlemesi ve zaman bölgesinde örnekleme, bütün sayısal modülatörler için çok önemlidir. Sinyal bant genişliğinin 2 katından fazla hızlarda periyodik örnekleme, bozulma getirmeyebilir, fakat nicemleme bozulmaya neden olabilir. Modülatör tasarımında öncelikli hedef bu bozulmayı sınırlamaktır [64]. Düzgün nicemlemede hata, $\pm\Delta/2$ aralığında eşit olasılıkla dağılmaktadır; burada Δ nicemleme sonunda elde edilen seviyeler arasında bırakılan aralıktır. Eğer nicemleme gürültüsünü (e), $\pm\Delta/2$ aralığında eşit olasılıkla dağılan beyaz gürültü olarak değerlendirirsek, bunun ortalama kare değeri aşağıdaki gibi yazılır [72]:

$$e_{rms}^2 = \frac{1}{\Delta} \int_{-\Delta/2}^{+\Delta/2} e^2 de = \frac{\Delta^2}{12} \quad (4.1)$$

Gürültünün spektral yoğunluğunu bulmak için, bütün gücün $0 \leq f < \infty$ aralığında olduğu kabul edilir. Nicemlenmiş sinyal f_s frekansında örneklendiyse, gürültü gücünün hepsi $0 \leq f < f_s/2$ frekans bandında kalmaktadır. Aynı zamanda beyaz gürültü olarak da kabul edilirse, örneklenmiş gürültünün spektral yoğunluğu şu şekilde ifade edilir:

$$E(f) = e_{rms} \sqrt{\frac{2}{f_s}} \quad (4.2)$$

Yüksek hızda örnekleme oranı, örnekleme frekansı f_s 'in, Nyquist hızı $2f_0$ 'a olan oranı olarak tanımlanır [64, 73] ve aşağıdaki gibi bir tamsayı ile gösterilir:

$$OSR = \frac{f_s}{2f_0} \quad (4.3)$$

Kıyırta nicemleme gürültüsünü beyazlatacak ve ilintisizleştirecek kadar yeterince büyük ise, sinyal bandı içinde kalan gürültü gücü aşağıdaki gibi olur:

$$n_0^2 = \int_0^{f_0} e^2(f) df = \frac{2f_0}{f_s} e_{rms}^2 = \frac{e_{rms}^2}{OSR} \quad (4.4)$$

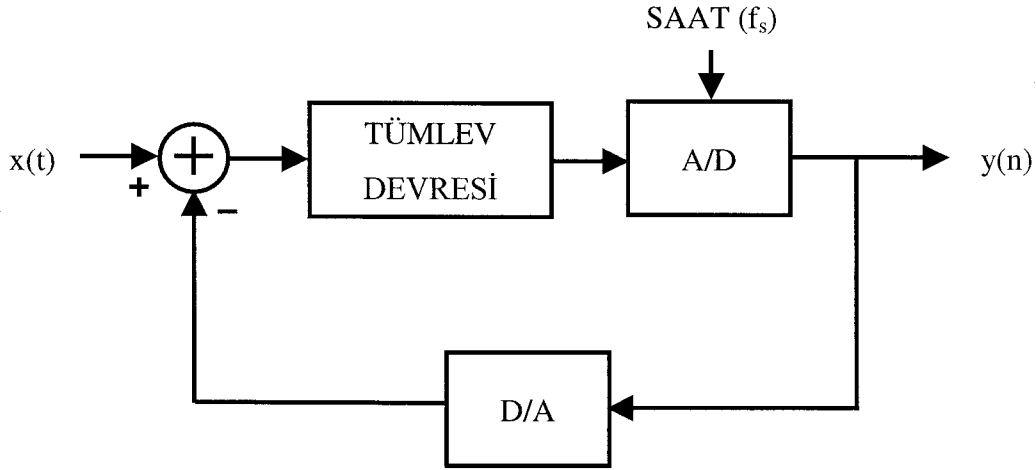
Böylece, çok bilinen bir sonuca ulaşılır: yüksek hızda örnekleme, bantiçi rms nicemleme gürültüsünü (n_0) yüksek hızda örnekleme oranının karekökü kadar azaltır. Bundan dolayı, örnekleme frekansı iki katına çıkarıldığında, bantiçi gürültü 3 dB kadar azalır ve çözünürlük yarım bit kadar artar.

4.4. Delta-Sigma Modülasyonu

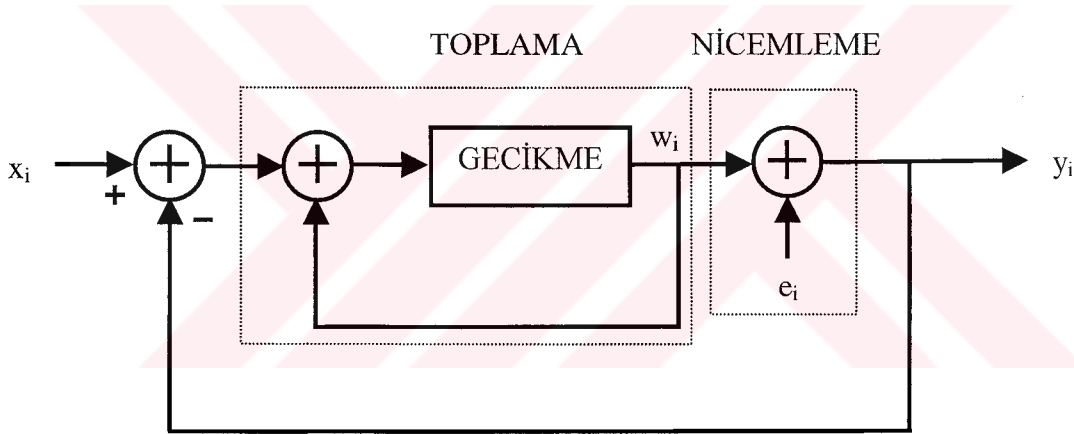
Delta-sigma modülatörü, yüksek hızda örnekleme yapan güçlü bir nicemleyicidir. Delta-sigma modülatörlerinde, genellikle iki seviyeli nicemleme uygulanır. Devrenin girişi, nicemleyiciye bir tümlev devresi aracılığıyla bağlanır ve nicemlenmiş çıkış, girişten çıkarılarak geri beslenir (Şekil 4.1). Nicemlenmiş sinyalin ortalama değeri, bu geribesleme sayesinde girişin ortalamasını izler. Bunların arasındaki herhangi bir fark tümlev devresinde toplanır ve sonunda kendisini düzeltir.

Şekil 4.2'deki delta-sigma modülatörün eşdeğer devresi kullanılarak analiz yapılabilir. Burada, nicemleme eklenmiş bir e hatası olarak gösterilir. Bu şekil, örneklenmiş veri devresi olduğu için, tümlev işlemi toplam olarak gösterilir. Bu durumda toplayıcının çıkışı kolay bir şekilde yazılabilir [64]:

$$w_i = x_{i-1} - e_{i-1} \quad (4.5)$$



Şekil 4.1: Birinci dereceden delta-sigma nicemleyicinin blok diyagramı



Şekil 4.2: Birinci dereceden delta-sigma nicemleyicinin örneklenmiş veri için eşdeğer devresi

Örneklenmiş sinyal ise,

$$y_i = x_{i-1} + (e_i - e_{i-1}) \quad (4.6)$$

olarak yazılır. Devrede nicemleme gürültüsünün farkı alınır, böylece modülasyon gürültüsü nicemleme gürültüsünün birinci farkına karşılık gelir ve bu arada sinyal bir gecikmenin dışında değişmeden kalır.

Delta-sigma modülatorün etkin çözünürlüğünü hesaplamak için, gürültünün beyaz gürültü olduğu kabul edilir. Modülasyon gürültüsünün

$$n_i = e_i - e_{i-1} \quad (4.7)$$

spektral yoğunluğu şu şekilde ifade edilebilir:

$$N(f) = E(f) |1 - e^{-j\omega T_s}| = 2e_{rms} \sqrt{2T_s} \sin\left(\frac{\omega T_s}{2}\right) \quad (4.8)$$

burada T_s örnekleme periyodudur. Şekil 4.3'de nicemleme gürültüsü ile modülasyon gürültüsünün spektral yoğunlukları karşılaştırılmaktadır. Burada, nicemleyicinin etrafındaki geribeslemenin, düşük frekanslarda gürültüyü düşürdüğü ve yüksek frekanslarda gürültüyü yükselttiği açık olarak görülmektedir.

Sinyal bandı içindeki gürültü gücü,

$$n_0^2 = \int_0^{f_0} |N(f)|^2 df \quad (4.9)$$

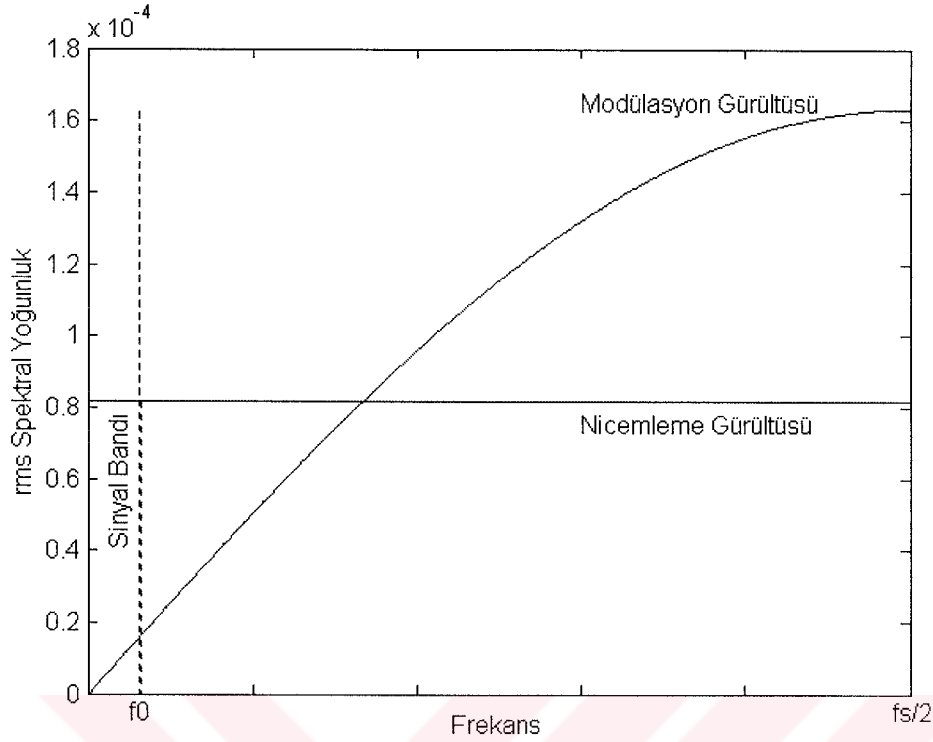
$f_s^2 \gg f_0^2$ için yaklaşık olarak

$$n_0^2 \approx \frac{e_{rms}^2}{(OSR)^3} \frac{\pi^2}{3} \quad (4.10)$$

olarak bulunur ve rms değeri ise,

$$n_0 = \frac{e_{rms}}{(OSR)^{3/2}} \frac{\pi}{\sqrt{3}} \quad (4.11)$$

olarak yazılır [64, 72].



Şekil 4.3: Delta-sigma modülasyonundan kaynaklanan gürültünün spektral yoğunluğu $N(f)$ ile yalnız nicemleme gürültüsünün spektral yoğunluğu $E(f)$ karşılaştırması

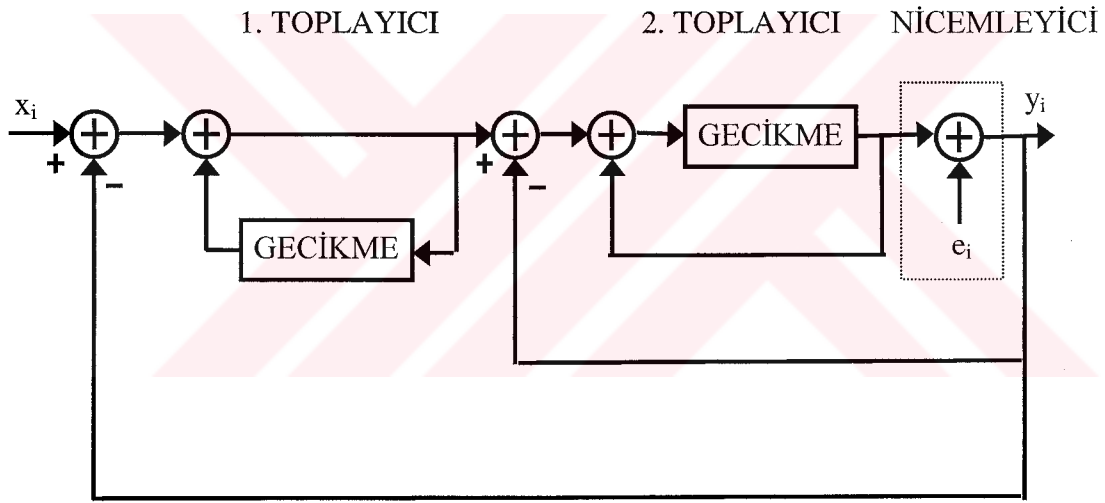
Yüksek hızda örnekleme oranı her ikiye katlandığında, gürültü 9 dB azalır ve bu sayede çözünürlükte 1.5 bitlik bir iyileşme olur. Çözünürlükteki bu gelişmenin korunabilmesi için, modüle edilmiş sinyalin keskin bir seçici sayısal süzgeç ile Nyquist hızına seyreltilmesi gereklidir. Yoksa, gürültünün yüksek frekanslı bileşenleri, Nyquist hızında örneklendiğinde çözünürlüğü bozar.

4.5. Yüksek Dereceden Delta-Sigma Modülatörleri

Delta-sigma modülatöründe tümlev devresi aracılığıyla yapılan geribesleme, enerjinin büyük bir kısmını sinyal bandının dışına atarak modülasyon gürültüsünün spektrumunu biçimlendirir. Genellikle, geribesleme döngüsünde bulunan süzgecin özelliği, gürültü spektrumunun biçimini belirler [74]. Bazı süzgeç ve devre yapıları kullanılarak sıradan delta-sigma devrelerinin geliştirilmesi mümkündür.

Sinyal bandındaki gürültünün azaltılması için gelişmiş süzgeçler kullanılır. Bunun iyi bir şekilde yapılabilmesi için, sinyal bandı içinde kalan hatanın iyi bir öngörüsünün nicemleme gürültüsünden çıkarılması gerekir. Sıradan delta-sigma modülatörleri, nicemleme gürültüsünün bir önceki değerini o andaki değerinden çıkarırlar. Daha yüksek dereceden bir öngörünün, birinci dereceden öngörüye göre daha iyi sonuçlar vermesi beklenir.

Nicemleme gürültüsünün ikinci dereceden öngörüsünü yapan değişik devre düzenekleri vardır. Şekil 4.4'de tasarımı kolay ve devre kusurlarına toleranslı bir delta-sigma modülatörü görülmektedir.



Şekil 4.4: İkinci dereceden delta-sigma nicemleyici

Burada yapılan değişiklik esasında delta-sigma geribesleme döngüsünün tekrarından oluşmaktadır. Modülatörün çıkışı şu şekilde ifade edilebilir:

$$y_i = x_{i-1} + (e_i - 2e_{i-1} + e_{i-2}) \quad (4.12)$$

Böylece modülasyon gürültüsü, nicemleme gürültüsünün ikinci farkı olmaktadır. Gürültünün spektral yoğunluğu aşağıdaki gibidir:

$$N(f) = E(f) \left(1 - e^{-j\omega T_s}\right)^2 \quad (4.13)$$

Kullanımdaki sinyaller için:

$$|N(f)| = 4e_{rms} \sqrt{2T_s} \sin^2\left(\frac{\omega T_s}{2}\right) \quad (4.14)$$

Sinyal bandındaki rms gürültü ise, $f_s^2 \gg f_0^2$ için

$$n_0 = \frac{e_{rms}}{(OSR)^{5/2}} \frac{\pi^2}{\sqrt{5}} \quad (4.15)$$

Örnekleme frekansı her ikiye katlandığında, gürültü 15 dB azalır ve çözünürlükte fazladan 2.5 bitlik bir iyileşme olur [75, 76].

Daha fazla geribesleme döngüleri devreye eklenerek, daha yüksek derecelerde öngörü yapılabilir. Böylece modülasyon tekniği geliştirilebilir, fakat 2. dereceden yüksek delta-sigma modülatörlerinin devre uygulamalarında zorluklar vardır.

4.6. Yüksek Hızda Örneklemeli Demetleyiciler

Zaman bölgesinde yapılacak olan örnekleme, Nyquist örnekleme kriterine uygun olmalıdır. Buna göre dönüştürücüden alınan sinyalin sahip olduğu en yüksek frekansın en az 2 katı hızda örnekleme yapılmalıdır:

$$f_s \geq 2f_m \quad (4.16)$$

burada, f_s örnekleme frekansına, f_m sayısallaştırılan sinyalin sahip olduğu en yüksek frekansa karşılık gelmektedir [77]. Örnekleme frekansı, f_m frekansının 2 katından daha fazla olduğunda, dönüştürücülerden alınan sinyallerin hassasiyeti artmaktadır. Buna bağlı olarak demetlemenin geciktirme ve toplama işlemlerinde

evreuyumluluk da artmaktadır. Böylece SNR düzeyi yükselmekte ve görüntü kalitesi iyileşmektedir.

Yüksek hızda örnekleme özelliğine sahip delta-sigma modülatörlerin sayısal demetleme sistemlerinde kullanılması düşüncesi yakın zamanda ortaya atılmıştır [78]. Bu yaklaşımda, her alıcı kanalında çok bitli bir analogtan sayısala çevirici yerine tek bitli bir delta-sigma modülatörü kullanılarak ortamdaki yansıyan sinyaller sayısallaştırılır. Yansıyan analog bir sinyalin yüksek hızda örnekleme oranına tek bitlik gösterimleri, kayan yazmaçlar ile odaklama bilgisine dayalı olarak kolayca geciktirilebilir ve basit toplayıcılar ile toplanabilir. Buradan elde edilen kaba demet toplamı, sadece bir örnek seyreltme süzgeci ile çok bitli sayısal bir sinyale çevrilebilir; böylece çok bitli sayısal sinyal, demet toplamının dinamik aralığını gösterebilir.

Sayısallaştırma için yine tek bitli delta-sigma modülatörü kullanılması önerilen başka bir çalışmada ise, yukarıdaki sistemden biraz farklı olarak yansıyan sinyallerin, yüksek hızda örnekleme oranına çeviricilerin gürültü başarımını artırmak için ara frekansa taşınabileceği belirtilmiştir [44]. Fakat bu önerilen sistemlerin her ikisi de gerçek uygulamalarda kullanılmalarını engelleyen bazı dezavantajlara sahiptirler. Özellikle renkli akış veya Doppler görüntüleme, sinyal alışı sırasında gecikmelerin dinamik olarak değişmesinden kaynaklanan ilave gürültü sonucunda görüntü kalitesi ciddi bir şekilde etkilenmektedir.

Yüksek hızda örnekleme oranına çeviricilerin sinyal gürültü oranları (SNR), yüksek hızda örnekleme oranına bağlıdır [Denklem 5.3]. Yüksek hızda örnekleme oranına dayalı bir demetleyicide, peş peşe gelen odak noktaları arasındaki uzaklık, istenen yüksek hızda örnekleme oranına ulaşmak için yeterince yakın seçilmelidir [79].

Fakat, dinamik odaklamalı demetlemede bu kadar yakın yerlerde bulunan odak noktalarının gecikme örüntüleri, zaman gecikme nicemlemesi ve akustik geometriye bağlı olarak örnek tekrarlarına neden olmaktadır.

5. ÖNERİLEN YÖNTEM

Düşük maliyetli ve küçük ölçekli evreyumlu görüntüleme sistemleri üzerinde verimli yöntemler geliştirilmeye çalışılmaktadır. Maliyetin düşürülmesi ve taşınabilirlik özelliğinin artırılması, görüntü sistemindeki donanım karmaşıklığının azaltılmasına bağlıdır [80]. Dizilim işlemeye ait donanım yapısının basitliği, birçok uygulama için istenen temel bir özelliktir [81]. Özellikle taşınabilir tarayıcılar, damar içi görüntüleme aygıtları ve üç boyutlu tarayıcılar gibi görüntüleme sistemleri için donanım basitliği kritik bir öneme sahiptir [82, 83, 84]. Donanım yapısının boyutunu, maliyetini ve güç tüketimini, kullanılan aktif dizilim kanal sayısı ve örnekleme yöntemi belirlemektedir [85].

Bu çalışmada, görüntü kalitesini düşürmeden aktif kanal sayısını azaltmak için görüntü uzayında aradeğerlemeye dayalı bir altdizilim sinyal işleme yöntemi ile veri toplanması önerilmektedir. Bu yöntem, evreli dizilim ve sentetik açıklık yöntemlerinin avantajlı yönlerini birleştirerek düşük maliyetli gerçek zamanda sistemlerin tasarlanmasını sağlamaktadır. Altdizilim sinyal işleme yönteminde geniş bir dönüştürücü dizilimi, birden fazla adımda az sayıda aktif dizilim elemanı içeren farklı altdizilimlerden alınan sinyaller birleştirilerek sentezlenmektedir. Dönüştürücü diziliminin ortasındaki bir altdizilimden verici olarak sinyal gönderilmekte ve dönüştürücü diziliminin üzerindeki birbirleriyle çakışmayan diğer bütün altdizilimlerden sinyal alınmaktadır. Böylece daha az sayıda aktif dizilim elemanı kullanarak sinyal gönderme/demet alma işlemleri uygulanmakta ve bu sinyallerin uygun bir şekilde toplanmasıyla yapılan demetleme sonucunda kaliteli bir görüntü oluşturulabilmektedir [86, 87, 88].

Analogtan sayısala çevirici teknolojisindeki gelişmeler, elektronik sistemlerde

analog sinyaller yerine sayısal sinyaller kullanılmasını yaygınlaştırmaktadır. Sayısallaştırmada bit sayısını azaltarak yüksek örnekleme hızına ulaşan teknikler son yıllarda daha fazla kabul görmektedir. Ayrıca yeni yüksek hızlı sayısal devreler, sistemlerin daha etkin olarak çalışmasını sağlamaktadır. Gelişen tüm bu teknolojiler kullanılarak dizilim sinyallerinin sayısal olarak daha verimli bir şekilde işlenmesi mümkündür.

Delta-sigma analogtan sayısala çeviriciler, basitlik ve ucuzluk yönünden geleneksel analogtan sayısala çeviricilerden daha verimli olup, bu nedenle birçok uygulamada kullanılmaktadır [73]. Delta-sigma çeviricilerin dizilim sinyallerinin işlenmesinde kullanılması oldukça yenidir [92]. Bu yaklaşımda, alınan sinyaller her bir kanal için çok-bitli analogtan sayısala çevirici yerine tek-bitli delta-sigma çevirici ile sayısallaştırılmaktadır. Bu çalışmada, demetleme işleminin donanımını basitleştirmek için, altdizilim sinyallerinin geleneksel 10-bitlik analogtan sayısala çeviriciler yerine tek bit çıkış üreten delta-sigma çeviriciler ile sayısallaştırılması önerilmektedir. Dinamik odaklamanın başarılı bir şekilde uygulanabilmesi için de düzgün olmayan örnekleme kullanılması önerilmektedir.

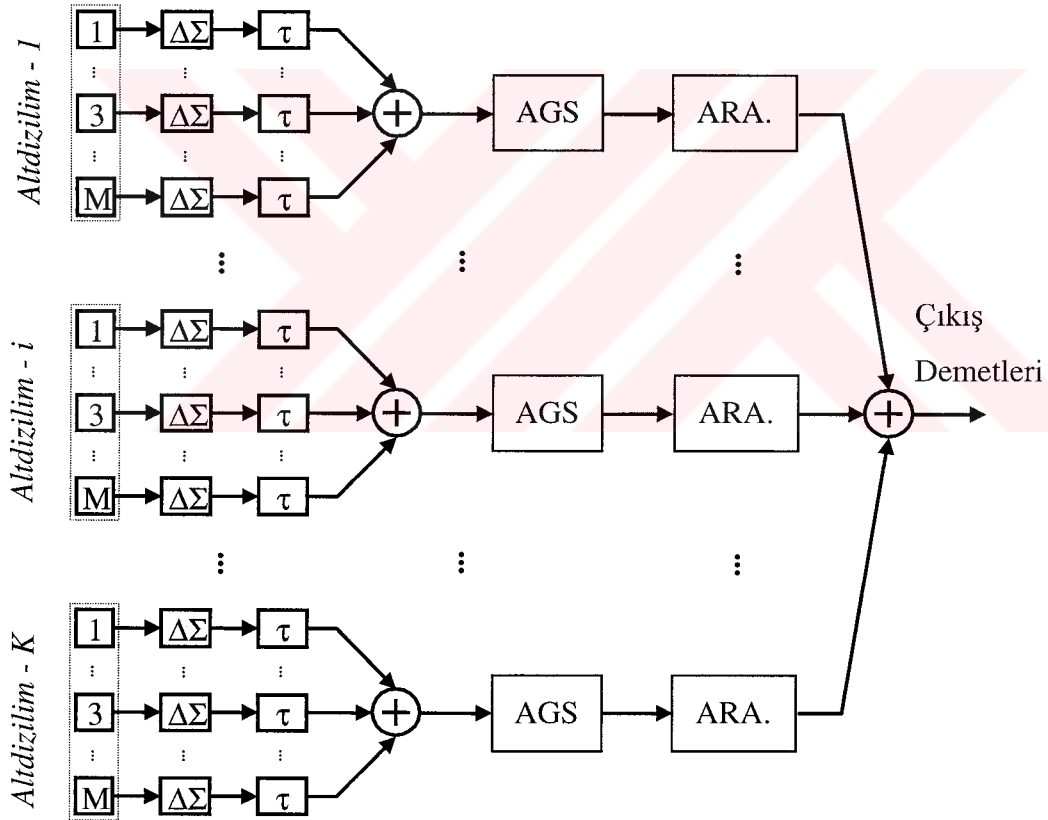
Delta-sigma çeviriciler, örnekleme hızı yüksek olduğu için demetlemede toplama işlemine giren verilerin daha hassas zaman anlarında örneklenmesi sağlar. Demetleme işlemindeki gecikmelerin daha hassas olarak hesaplanması, demetlemedeki toplama işlemine giren sinyallerin evreuyumluluğunu artırmaktadır, böylece demetleme çıkışında daha yüksek SNR değerlerine sahip kalitesi yüksek görüntüler elde edilmektedir.

Bu çalışmada, delta-sigma düzgün olmayan örnekleme ile altdizilim sinyallerinin işlenmesine dayalı bir sayısal demetleme yapısı sunulmaktadır.

Delta-sigma düzgün olmayan örnekleme ile altdizilim sinyallerinin işlenmesi, şu adımlardan oluşmaktadır [86, 87]:

- altdizilim yapısı kullanılarak veri edinme,
- düzgün olmayan zaman anlarında delta-sigma analogtan sayısala çevirici ile yüksek hızda örnekleme,
- dinamik odaklama ile alınan sinyallerin kısmi olarak toplanması (kısmi demetleme),
- zaman bölgesinde örnek seyreltme,
- demet uzayı bölgesinde aradeğerleme,
- son demet toplama.

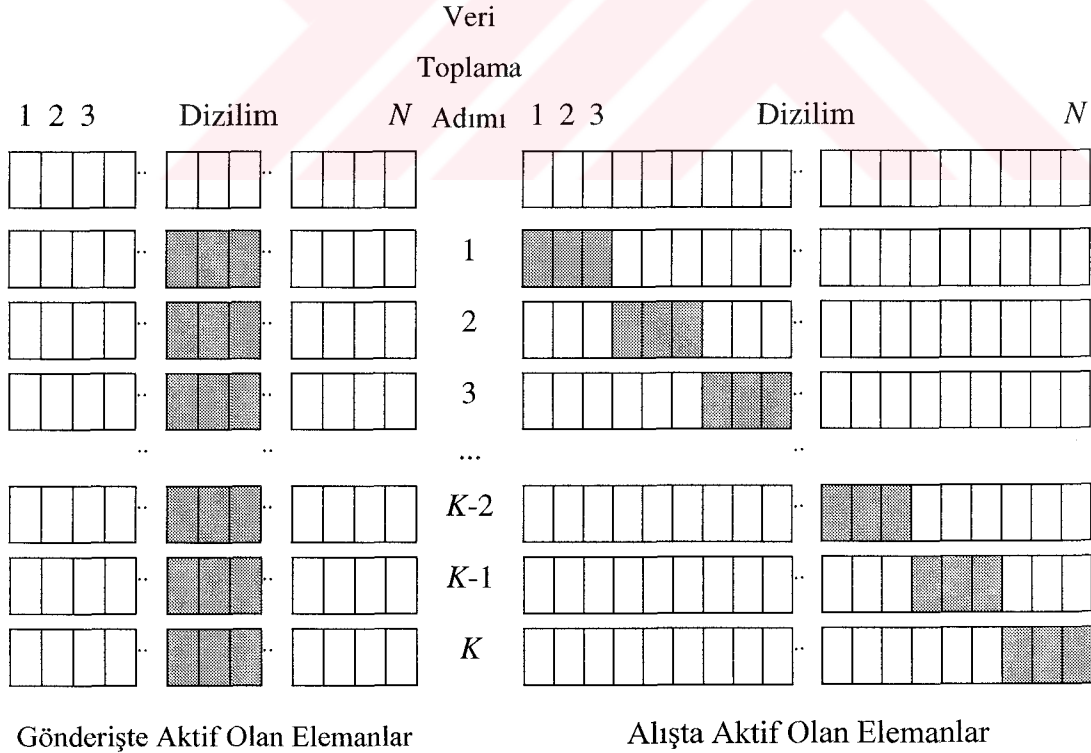
Şekil 5.1’de sistemin genel blok diyagramı görülmektedir.



Şekil 5.1: Delta-sigma örnekleme ve altdizilimsel sinyal işlemeyle dayalı kısmi demetleme ($\Delta\Sigma$: delta-sigma modülasyonu, τ : gecikme, AGS: alçak geçiren süzgeç, ARA: yanal aradeğerleme)

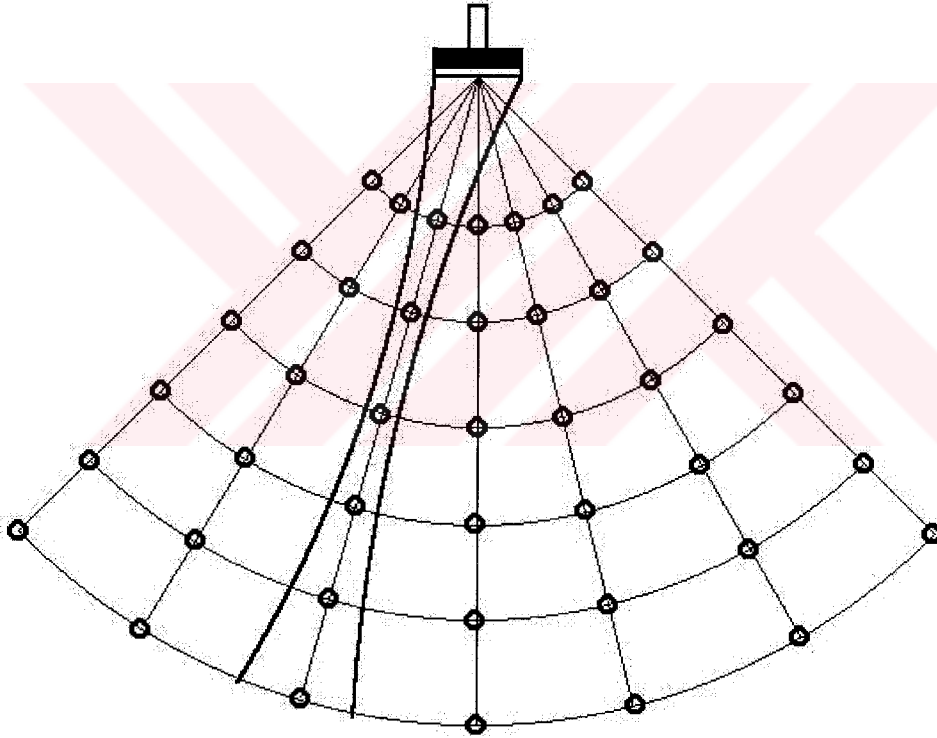
5.1. Altdizilim

Altdizilim ile demetleme yönteminde, dönüştürücü diziliminin ortasındaki N_t adet elemandan oluşan bir verici altdiziliminden görüntü ortamına sinyal gönderilmektedir. Ortamdan yansıyan sinyaller, dönüştürücü diziliminde N_r adet elemandan oluşan bir altdizilim tarafından alınmaktadır. Aktif alıcı altdizilimi olarak N_r adet bitişik elemandan oluşan, farklı yerlerde bulunan ve birbirleriyle çakışmayan altdizilimler kullanılmaktadır. Her bir alıcı altdizilimi, aynı anda sadece biri aktif olacak şekilde sırayla ardışık gönderme-alma adımlarında yansıyan sinyalleri almaktadır. Her gönderme-alma adımında dönüştürücü diziliminin ortasındaki verici altdiziliminden sinyal demeti gönderilmektedir (Şekil 5.2). Farklı adımlarda alınan sinyaller zaman bölgesinde gerekli miktarda ötelenerek kısmi demetleme için kullanılmaktadır. Görüntü bölgesinde değişik yerlerdeki noktalardan çeşitli tarama açıları ile sinyal alınmaktadır. Her bir tarama açısı için farklı derinliklerdeki noktalara odaklama yapılmaktadır (Şekil 5.3).



Şekil 5.2: $N_t=N_r=3$ için altdizilim yönteminde veri toplama adımları ve her adımda aktif olan dizilim elemanları

Gerçek zamanda görüntüleme için ancak sınırlı sayıda tarama açısına bakılabilmektedir. Altdizilim demetleme yönteminde, her altdizilim için Nyquist kriterini sağlayan en az sayıda demet alınmaktadır. Alınan demet sayısının azlığı görüntü kalitesini düşürmektedir. Daha kaliteli görüntü elde etmek için, alınan demetler görüntü uzayında aradeğerleme yapılarak gerekli olan sayıya çıkarılmaktadır. Bu işlemler bütün alıcı altdizilimler için tekrarlanmakta ve her alıcı altdizilimine ait düşük çözünürlüklü demetler uygun bir şekilde toplanarak yüksek çözünürlüklü bir görüntü oluşturulmaktadır. Bu yöntem ile evrelî dizilim yöntemine yakın kalitede görüntü elde edilebilmektedir.

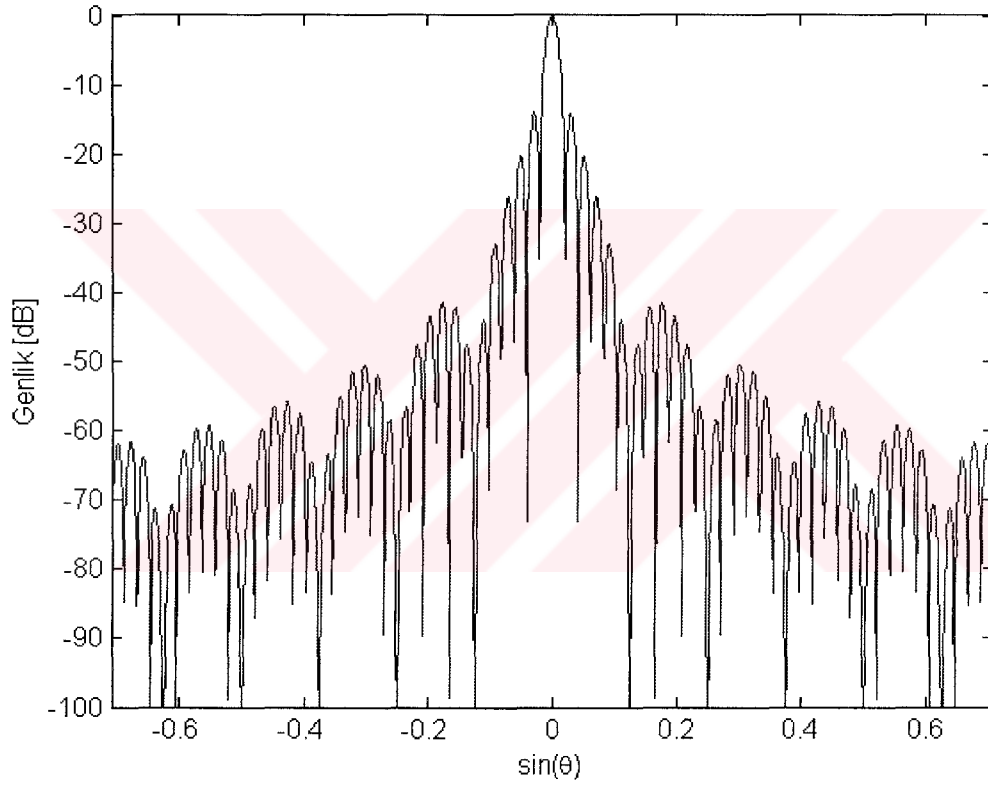


Şekil 5.3: Ortamın değişik açılarla taranması ve her açığa bakıldığında farklı derinliklerdeki noktalara odaklama

Altdizilim ile demetleme yöntemi için N elemanlı bir doğrusal dönüştürücü dizilimi kullanıldığında, noktasal dağılım fonksiyonu,

$$H(\theta) = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{\lambda} N_t d \sin\theta\right) \sin\left(\frac{\pi}{\lambda} K N_r d \sin\theta\right)}{\sin\left(\frac{\pi}{\lambda} d \sin\theta\right) \sin\left(\frac{\pi}{\lambda} d \sin\theta\right)} \quad (5.1)$$

olarak yazılabilir [88]. Burada, K sinyal gönderme-alma adım sayısı olup $K=[N/N_r]$ dir (Şekil 5.4).



Şekil 5.4: Altdizilim yönteminde noktasal dağılım fonksiyonu ($N_t = N_r = 16$, $K = 6$)

Evreyumlu görüntüleme sistemlerinde, dönüştürücü diziliminden bir sinyal demeti görüntü ortamına gönderilip ortamdaki yansıyan sinyaller alınarak demetleme işlemleri yapılmaktadır. Demet gönderme ve alma aşamasında dönüştürücü diziliminin bütün elemanlarının kullanılması karmaşık ve pahalı devreleri gerektirmektedir. Bunun yerine daha az sayıda elemandan oluşan

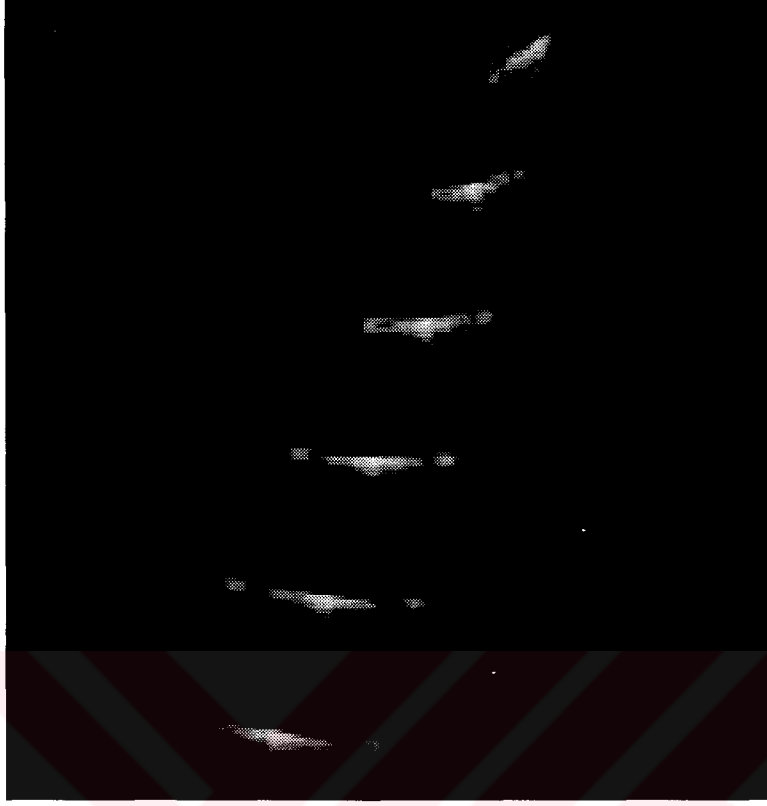
altdizilimlerin aktif olarak kullanılması, kontrol devrelerinin karmaşıklığını azaltmaktadır.

Aktif eleman sayısının azaltılması için önerilen altdizilim ile sinyal işleme yönteminde, dönüştürücü diziliminin ortasındaki N_t adet elemandan oluşan bir verici altdizilimden görüntü ortamına bir sinyal demeti gönderilmektedir [85, 88]. Ortamdan yansıyan sinyaller, dönüştürücü diziliminde N_r adet elemandan oluşan aktif bir altdizilim tarafından alınmaktadır. Alıcı altdizilimi olarak N_r adet bitişik elemandan oluşan, farklı yerlerde bulunan ve birbirleriyle çakışmayan altdizilimler kullanılmaktadır. Her bir alıcı altdizilimi, aynı anda sadece biri aktif olacak şekilde sırayla ardışık gönderme-alma adımlarında yansıyan sinyalleri almaktadır. Her gönderme-alma adımında dönüştürücü diziliminin ortasındaki verici altdiziliminden sinyal demeti gönderilmektedir. Altdizilim ile demetleme yöntemi kullanılarak elde edilen deneysel görüntü Şekil 5.5’da gösterilmiştir.

Altdizilim ile demetleme yöntemi aşağıdaki formülle ifade edilir [88]:

$$Z(t) = \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^{N_r} A_{rc}[l] \sum_{m=1}^{N_t} A_{tr}[m] S\left(t - \frac{\rho_{k,l}}{c} - \frac{\rho_m}{c}\right) \quad (5.2)$$

Burada; N_t ve N_r , gönderme/alma işleminde aktif olarak kullanılan dönüştürücü eleman sayısı; K , toplam ateşleme sayısı; $A_{tr}(m)$ ve $A_{rc}(l)$, ortama sinyal gönderilirken ve yansıyan sinyaller alınırken kullanılan dönüştürücü elemanlarının oluşturduğu açıklığın ağırlık fonksiyonu; ρ_m ve $\rho_{k,l}$, gönderme/alma işleminde dönüştürücü elemanı ile odak noktası arasındaki uzaklık; $S(t - \rho_{k,l}/c - \rho_m/c)$ ise gönderme ve alma işlemlerine ait gecikmeler ile kaydırılmış kaynak sinyalidir. Bu denklemde en içteki toplam, gönderici elemanların bir odak noktasına bir demet göndermesine karşılık gelir. Ortadaki toplam, alıcı altdizilim elemanlarının yansıyan akustik sinyalleri algılamasına ve evreyumlu olarak toplamasına karşılık gelir. En dıştaki toplam ise aktif altdizilim elemanlarının çoğullanmasına ve düşük çözünürlüklü görüntülerin toplanmasına karşılık gelir.



Şekil 5.5: Altdizilim yöntemi kullanılarak elde edilen görüntü

Denklem 6.2, k değişkenine (ateşleme adım indisine) bağlı olarak ($A_{tr}(m)$ ve $A_{rc}(l)$ ağırlık fonksiyonları 1 olarak alındığında) şöyle yazılır:

$$Z_k(t) = \sum_{l=1}^{N_r} \sum_{m=1}^{N_l} S\left(t - \frac{\rho_{k,l}}{c} - \frac{\rho_m}{c}\right) \quad (5.3)$$

$S(t) = e^{j\omega_0 t}$, sistemin girişi olarak alındığında kısmi demetleyici sisteminin transfer fonksiyonu aşağıdaki gibidir:

$$H_k(t) = \frac{Z_k(t)}{S(t)} \quad (5.4)$$

Buradan demetleyici sisteminin belirli bir derinlikteki noktasal dağılım fonksiyonu,

yani yanal cevabi aşağıdaki gibi bulunur:

$$H_k(\theta) = e^{j\Phi_k(\theta)} \frac{\sin(N_r \frac{\pi}{\lambda} d \sin(\theta)) \sin(N_t \frac{\pi}{\lambda} d \sin(\theta))}{\sin(\frac{\pi}{\lambda} d \sin(\theta)) \sin(\frac{\pi}{\lambda} d \sin(\theta))} \quad (5.5)$$

Altdizilim ile sinyal işleme, diğer sentetik açıklık yöntemleri gibi, birden fazla adımda bir çerçevelik görüntü oluşturduğu için, veri toplama adımları arasındaki hareketlere duyarlıdır. Hareketli nesnelerin bulunduğu ortamlardan görüntü alınıyorsa, bu duyarlılığın uygun yöntemlerle giderilmesi gerekmektedir [89, 90].



5.2. Delta-Sigma ile Düzgün Olmayan Örnekleme

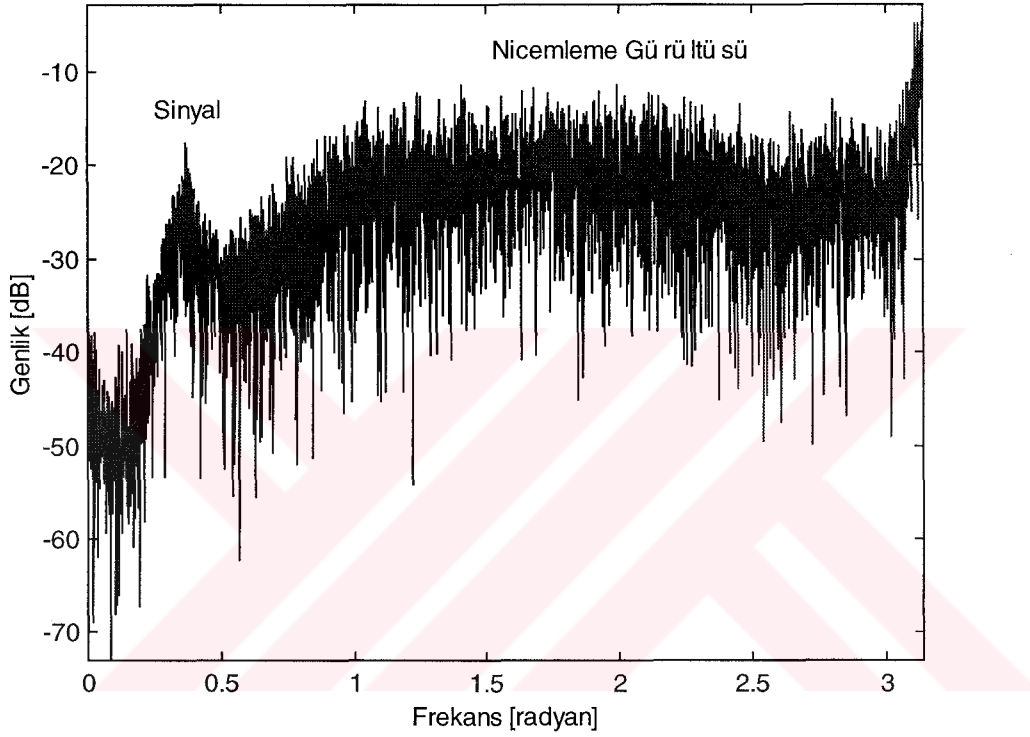
Analogtan sayısala çevirme işleminde kullanılan delta-sigma çeviricilerin ürettikleri tek bitlik sayısal çıkışlar, zaman bilgisine bağlı olarak kayan yazmaçta saklanmaktadır [91]. Bu çıkışlar, yüksek frekanslarda büyük genlikli nicemleme gürültüsü içerirler [73]. Nicemleme gürültüsünü sinyal bandının dışına atmak için Nyquist frekansından daha büyük bir frekansla örnekleme yapılarak bu problem ortadan kaldırılır, zaten çeviricinin yapısı da buna uygundur (Şekil 5.6). Sonra alçak geçiren bir süzgeç ile nicemleme gürültüsü giderilir. Alçak geçiren süzgeç delta-sigma çeviricinin bir parçası olup, bu işlemde sonra demetleme yapılır. Halbuki sistemin doğrusallığından yararlanarak demetleme işleminin tek bitlik veriler üzerinde yapılması ve süzgecin daha sonra uygulanması da mümkündür [93]. Böylece demetleme donanımı tek bitlik bir yapı ile tasarlandığı için daha basit olmaktadır. Bununla birlikte her kanal için ayrı süzgece gerek kalmayıp demetlemenin çıkışında bir defa süzgeçleme ile fazla süzgeç devrelerinden kurtulmak mümkün olmaktadır [94].

Çeviricinin örnekleme hızı yüksek tutulduğu için demetlemede toplama işlemine girecek verilerin daha hassas zaman anlarında örneklenebilmesi sağlanmış olmaktadır. Böylece, demetlemedeki toplama işlemine giren sinyallerin evreyumluluğu artmaktadır ve daha yüksek SNR değerlerine sahip (daha yüksek kaliteli) görüntüler elde edilmektedir.

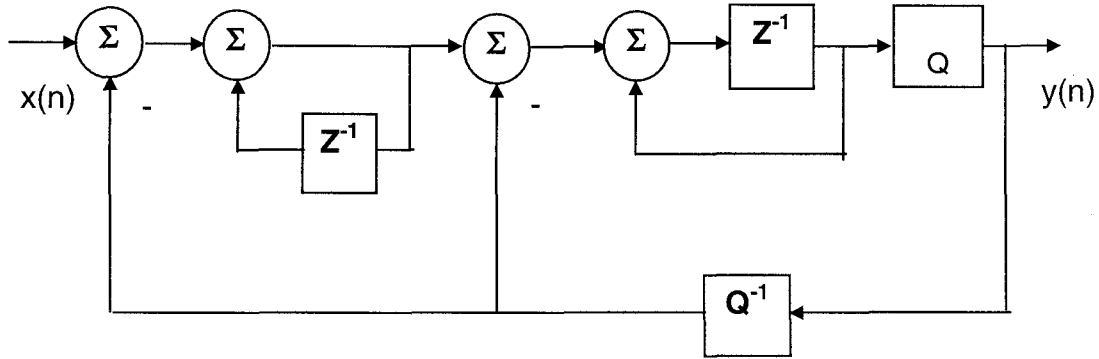
SNR düzeyini daha fazla yükseltmek için ikinci dereceden delta-sigma kodlayıcı kullanılmıştır (Şekil 5.7). İkinci dereceden delta-sigma kodlayıcı, örneklenen sinyalin SNR oranını birinci dereceden delta-sigma kodlayıcıya göre daha aza indirmektedir.

Delta-sigma analogtan sayısala çevirici ile örneklenen dizilim sinyallerinin sayısal işlenmesi ile ilgili ilk deneysel çalışmalar olumlu sonuçlar vermiştir [95, 97]. Sinyal alma sırasında sabit odaklama kullanıldığında demetleme çıkışında kabul edilebilir SNR düzeyi elde edilebilmektedir, fakat dinamik odaklama

uygulandığında görüntü kalitesi ciddi bir şekilde düşmektedir [96, 98]. Dinamik odaklamada uygulanan farklı gecikmeler, delta-sigma kodlarından bazı tek bitlik verilerin göz ardı edilmesine ve bazılarının ise tekrar edilmesine neden olmaktadır. Bu durum ise birbirine bağlı olan delta-sigma örneklerinin yapısını bozmakta ve SNR düzeyini düşürmektedir. Başka bir deyişle delta-sigma çeviricinin giriş ve çıkış senkronizasyonu bozulmaktadır [87, 92].



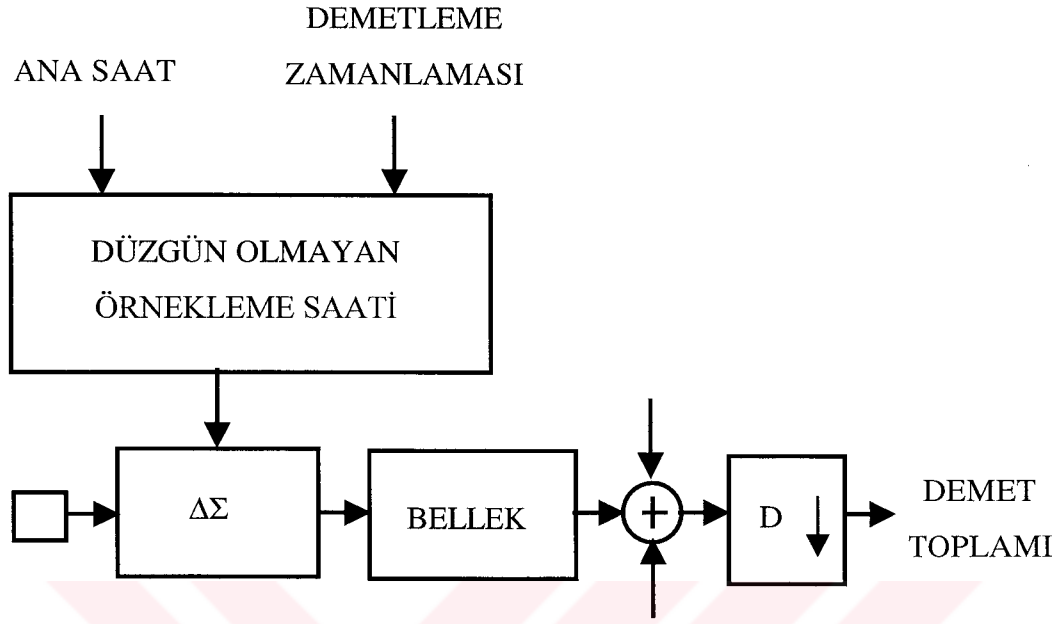
Şekil 5.6: Delta-sigma kodlanmış deneysel bir RF sinyalinin frekans spektrumu



Şekil 5.7: İkinci dereceden delta-sigma çevirici

Bu problemi gidermek için modülatörde değişiklik yapılmasına yönelik bazı çözümler yakın zamanda önerilmiştir [92]. Bu çözümler bit sayısının artmasına veya fazla işlem yapılmasına neden olmaktadır. Farklı bir çözüm ile bu sakıncalar ortadan kaldırılabilir; bu önerilen yöntemde delta-sigma çevirici düzenli saat darbelerinde kod üretmek yerine dinamik odaklama için veri gerektiği anlarda örnekleme yapar (Şekil 5.8). Bu düzgün olmayan örnekleme yöntemi ile hem çeviricinin basit yapısı korunmaktadır, hem de diğer önerilen çözümlerdeki gibi fazla bit kullanımına gerek kalmamaktadır. Üretilen delta-sigma örnekleri arasında herhangi bir bit kaybı veya tekrarı söz konusu olmayacağı için çeviricinin giriş ve çıkış senkronizasyonu bozulmamış olur. Dolayısıyla SNR düzeyi yükseltilerek önceki uygulamaya göre görüntü kalitesi iyileştirilmiş olur [99].

Örnekleme hızının yüksek olmasına karşılık demetleme işleminin çıkışlarında zaman bölgesinde örnek seyreltme işlemi uygulanmaktadır. Örnek seyreltme işlemindeki alçak geçiren süzgeçlemenin yaptığı işi, yukarıda anlatılan nicemleme gürültüsünü temizleyen süzgeç zaten yapmaktadır [100]. Her iki süzgecin de kesim frekansı aynı olduğu için ve ilk süzgeç kısmi demetleme işleminin sonuna bırakıldığı için aynı süzgecin sadece bir defa uygulanması yeterli olabilmektedir [93]. Geriye örnek seyreltme işleminin belirli örnekleri alma kısmı kalmaktadır, bu işlem de kolayca yapılabilir [101].



Şekil 5.8: Düzgün olmayan delta-sigma örneklemeli demetleme

5.3. Demet Uzayında Aradeğerleme

Zaman bölgesinde başka bir deyişle derinlik yönünde Nyquist örnekleme kriterine uyulduğu gibi, demet uzayında da Nyquist örnekleme kriterine uyulmalıdır. Demet uzayı açısal yöne karşılık gelmektedir. Görüntüsü oluşturulacak ortamdan çeşitli açılar ile tarama yapılarak sinyal alınmaktadır. Sinyal alış sırasında her bir tarama açısı için farklı derinliklerdeki noktalara dinamik odaklama yapılmaktadır (Şekil 5.3).

Demet uzayında Nyquist örnekleme kriteri taranacak açı sayısının olması gereken en küçük değerini belirlemektedir. Evreli dizilim yöntemi ile 90° 'lik bir sektörü taramak için alınması gereken en az demet sayısı (başka bir deyişle açı sayısı), dizilim eleman sayısı ile 2'nin karekökü çarpımı kadar olmalıdır [10, 16]:

$$Q \geq N\sqrt{2} \quad (5.6)$$

burada, Q demet sayısına, N dizilim eleman sayısına karşılık gelmektedir. Bu formüle göre, örneğin 128 elemanlı bir dizilimden evreli dizilim yöntemi ile 90° 'lik bir sektörü taramak için en az 182 demet alınmalıdır, yani en az 182 açığa yönlendirme yapılmalıdır. Bu durumda iki demet arasındaki açı yaklaşık olarak $90^\circ/182 \approx 0.49^\circ$ olmalıdır. Genel olarak iki demet arasındaki açı (Δ_θ),

$$\Delta_\theta \leq \frac{90^\circ}{N\sqrt{2}} \quad (5.7)$$

olmalıdır [88].

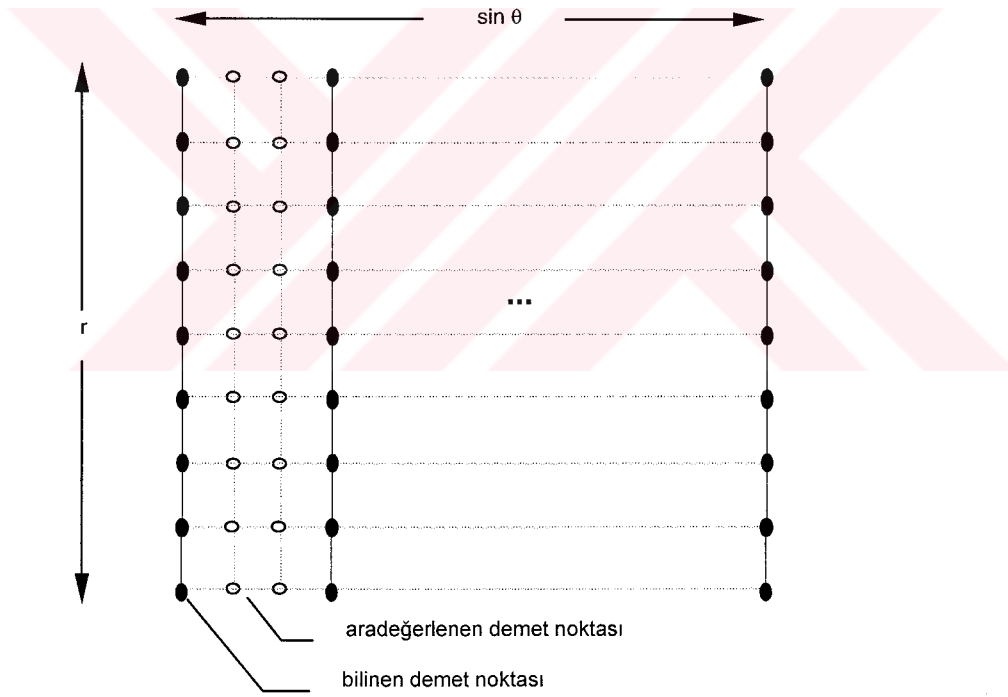
Altdizilimde ise yüksek çözünürlüklü son demet toplamı için en az ,

$$Q \geq \frac{N_t + KN_r}{\sqrt{2}} \quad (5.8)$$

olmalıdır. Oysa düşük çözünürlüklü demet toplamları için bu sayı daha azdır [88]:

$$Q \geq \frac{N_r + N_r}{\sqrt{2}} \quad (5.9)$$

Kısmi demetlemenin bu özelliği kullanılarak daha az sayıda demet toplamanın yeterli olduğu açıkça görülmektedir, fakat son demet toplamada örnekleme kriteri sağlanmamış olmaktadır. Bu sorunu gidermek için kısmi demetleme sonuçlarında tarama açısı sayısı demet uzayında aradeğerleme ile artırılır (Şekil 5.9). Dolayısıyla hem gerçek zamanda işlemi kolaylaştıracak, hem de örnekleme kriterine uyacak bir orta yol bulunmuş olur; böylece sistemin etkinliği artırılmış olmaktadır.



Şekil 5.9: Demet uzayında aradeğerleme

Gerçek zamanda çalışan bir evreyumlu sistem için veri toplama adımında taranacak açı sayısı bir en büyük değer ile sınırlıdır. Altdizilim ile sinyal işlemede ateşleme sayısı evreli dizilime göre daha fazla olduğu için taranacak açı sayısı

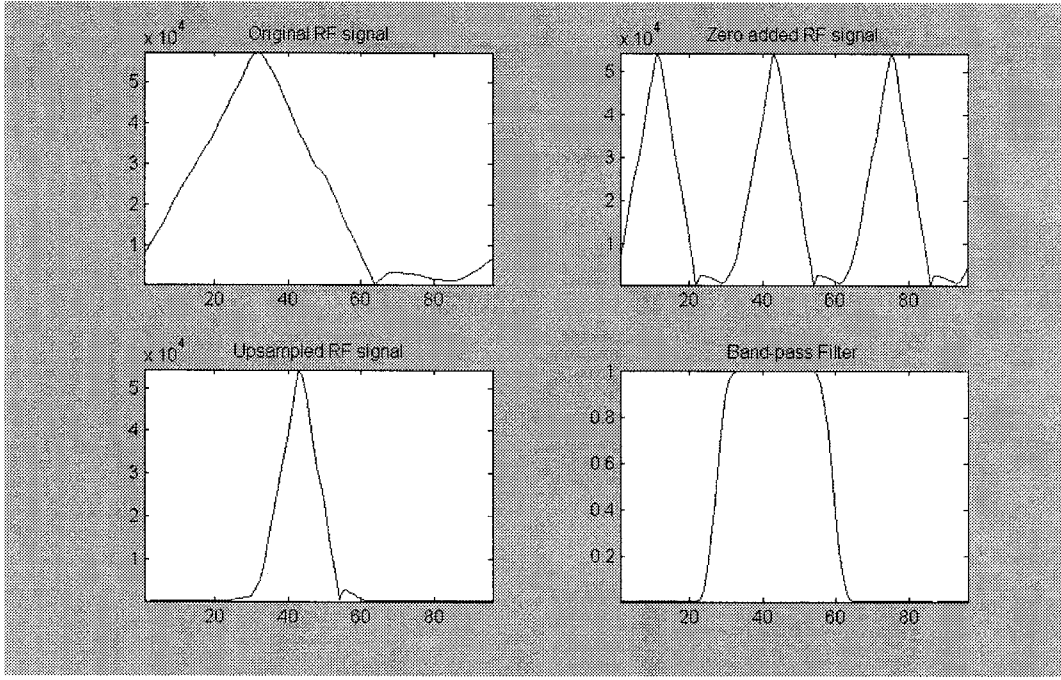
gerçek zamanda çalışmayı sağlamak üzere daha da azalmaktadır.

Aradeğerleme işlemi, açısal yönde örneklerin arasına sıfırlar eklendikten sonra alçak geçiren süzgeçleme uygulanarak yapılabilir. Ancak, bu aşamadaki veriler reel değil karmaşık sayılardır ve her verici-alıcı altdizilimi kombinasyonu için sisteme farklı bir evre katılmaktadır. Bu evre,

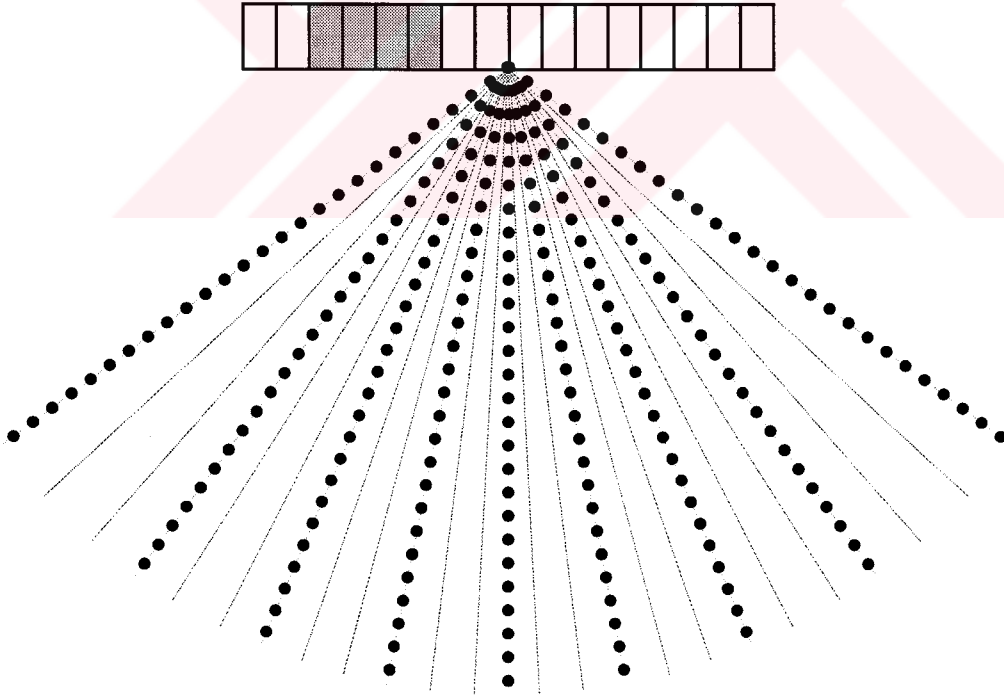
$$\Phi_k(\theta) = \frac{\pi d \sin(\theta)}{\lambda} [2k - K - 1] N_r \quad (5.10)$$

olarak hesaplanmıştır [Ek-1]. Burada; $\Phi_k(\theta)$, k . ateşleme adımında θ açısal yönünde sisteme katılan evredir; d , iki dönüştürücü arasındaki uzaklık; λ , dalga boyu; K , toplam ateşleme sayısı; N_r , alıcı altdizilimindeki dönüştürücü sayısıdır. Bu evre, aradeğerleme işleminde basit bir alçak geçiren süzgeç kullanımını engellemektedir. Bunun yerine her ateşleme adımı için ilgili evreyi kullanarak hesaplanan bir bant geçiren süzgeç uygulanmaktadır (Şekil 5.10).

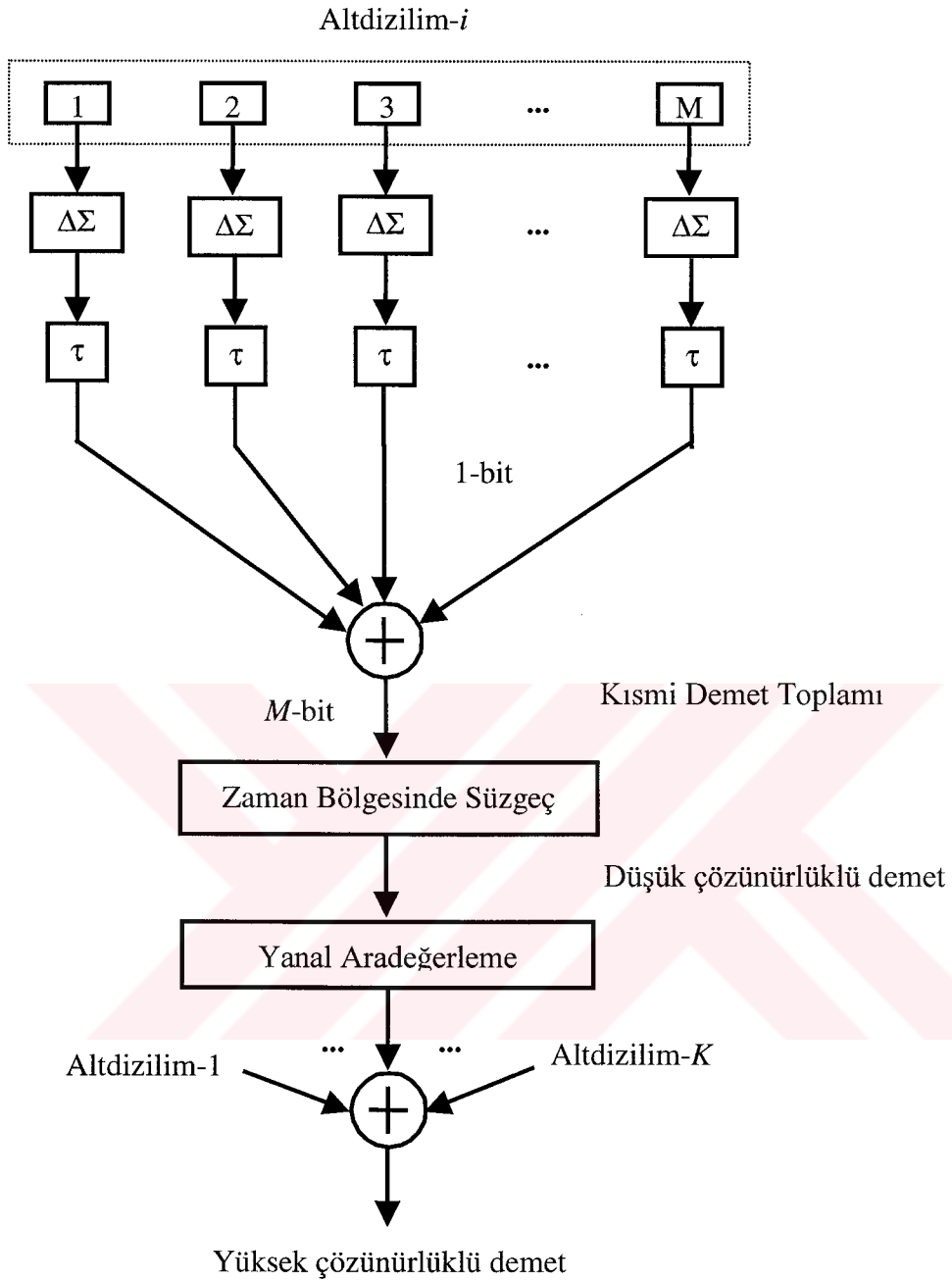
Bütün bu işlemler (Şekil 5.11) her verici-alıcı altdizilimi kombinasyonu için tekrarlanmakta ve her alıcı altdizilimine ait düşük çözünürlüklü demetler toplanarak yüksek çözünürlüklü bir görüntü oluşturulmaktadır (Şekil 5.12). Bu görüntünün gerçek zamanda sadece bir çerçeve bilgisi olması göz önünde bulundurularak sistemdeki parametreler uygun bir şekilde seçilmelidir.



Şekil 5.10: Altdizilime ait evre kullanılarak bulunan bir bant geçiren süzgeç ile aradeğerleme



Şekil 5.11: Bir altdizilim için tarama ve aradeğerleme işlemleri



Şekil 5.12: Düşük çözünürlüklü kısmi demetlerden yüksek çözünürlüklü görüntü oluşturulması

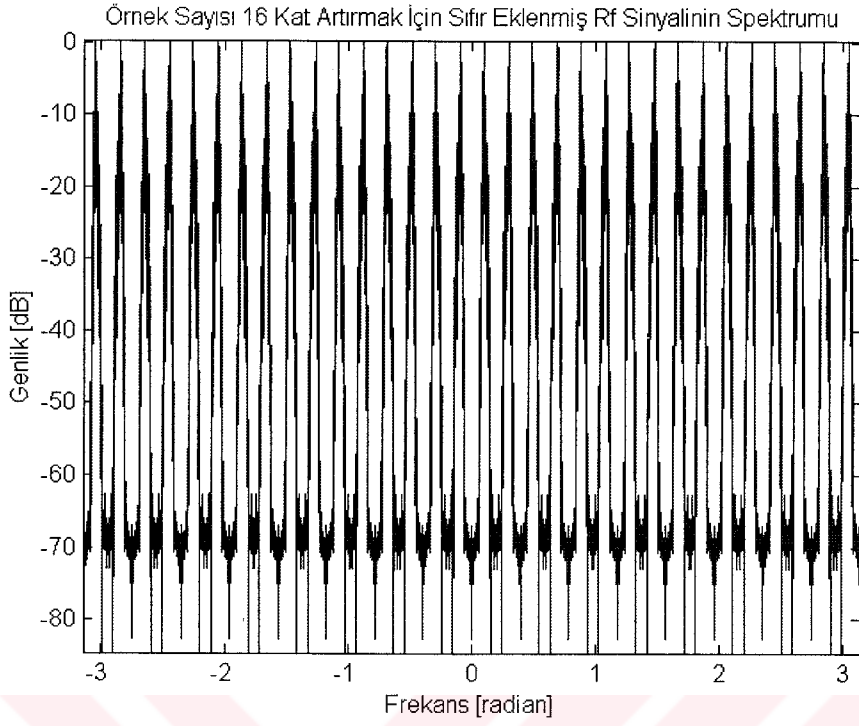
6. DENEYSEL SONUÇLAR

Önerilen yöntemin verimliliği deneysel olarak incelenmiştir. Bu incelemelerde, farklı koordinatlarda bulunan ve noktasal kaynak gibi davranan 6 adet tel ile oluşturulmuş deney ortamından alınan RF verileri kullanılmıştır. Bu veriler kullanılarak yapılan incelemelerde farklı yerlerdeki sistemin noktasal dağılım fonksiyonları hakkında bilgi edinilmektedir. Kullanılan ham veriler her türlü dizilimsel sinyal işleme yönteminin uygulanmasına uygun olarak oluşturulmuştur, dolayısıyla her farklı yöntem için ayrı deney düzenekleri kurulmasına gerek kalmamaktadır. Bu ham veriler 13.89 MHz frekansında 10-bit olarak örneklenmiştir [102]. Yapılan çalışmalarda delta-sigma çevirici ve sayısal demetleme sistemi sayısal ortamda yazılımlar aracılığıyla öykülmüştür.

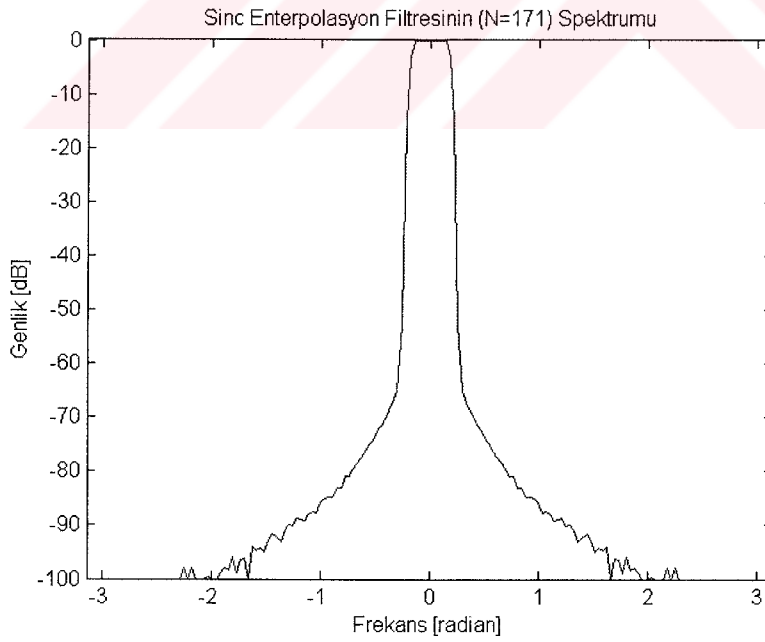
6.1. Zaman Bölgesinde Örnek Yükseltme

Bu çalışmada, ilk önce sayısal aradeğerleme kullanılarak ham verilerin örnek sayısı 16 kat artırılmıştır. Böylece elde edilen 222.2 MHz frekansındaki örnekleme hızı, delta-sigma çeviricilerin örnekleme hızına ulaşmıştır.

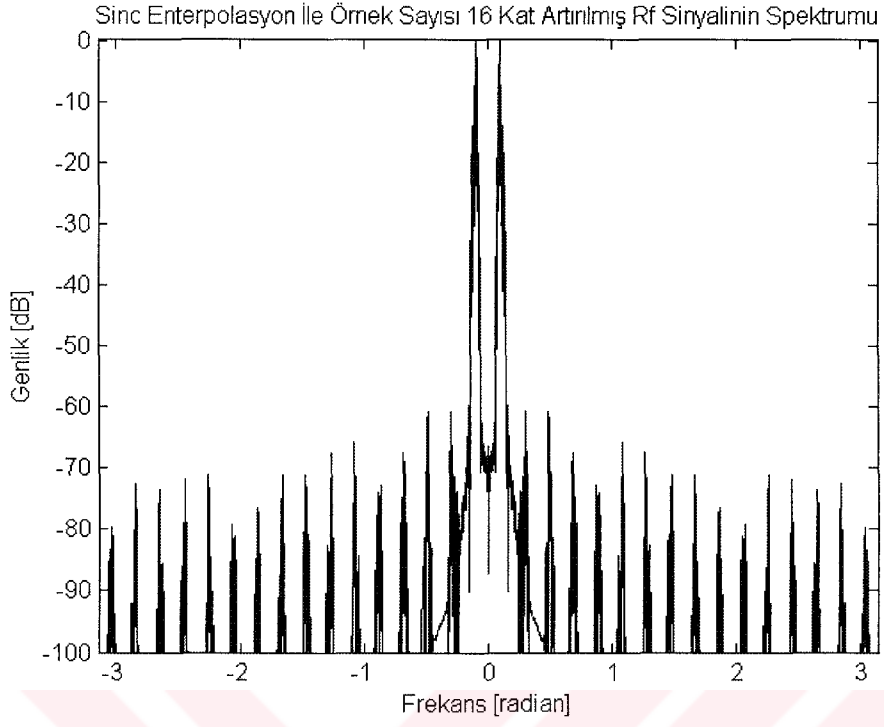
Örnek sayısını 16 kat artırmak için ilk önce mevcut örneklerin arasına 15 adet sıfır eklenmektedir. Sıfır ekleme işleminin sonunda RF sinyalinin spektrumu Şekil 6.1'de görülmektedir. Sıfır ekleme işleminden sonra bir alçak geçiren süzgeç uygulanmaktadır. Zaman bölgesinde sinc fonksiyonu şeklinde olan bu süzgecin spektrumu Şekil 6.2'de görülmektedir. Alçak geçiren süzgecin uygulanmasıyla tamamlanan aradeğerleme işleminin sonunda elde edilen RF sinyali Şekil 6.3'de görülmektedir. Bu şekilde de görüldüğü gibi yan lobların seviyesi -70 dB'lik bir oranda düşmektedir. Böylece demetleme işleminin çıkışında oldukça iyi bir sonuç elde etmek mümkün olmaktadır.



Şekil 6.1: Örnek sayısını 16 kat artırmak için mevcut örneklerin arasına 15 sıfır eklenmiş RF sinyalinin spektrumu. Burada orijinal sinyalin frekans bandının 16 kez daraldığı ve 2π 'lik alanda 16 defa tekrarlandığı görünmektedir



Şekil 6.2: Aradeğerleme işleminde kullanılan ve zaman bölgesinde sinc fonksiyonu şeklinde olan alçak geçiren süzgecin spektrumu (süzgeç genişliği = 171)



b)

Şekil 6.3: Örnek yükseltme amacıyla yapılan aradeğerleme işleminin sonunda elde edilen RF sinyalinin Fourier dönüşümü

6.2. Yanal Aradeğerleme

İncelemelerde kullanılan altdizilim sinyal işleme yöntemiyle ilgili sistem parametreleri Çizelge 6.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 6.1: Altdizilim sinyal işleme ile ilgili sistem parametreleri

Gönderirken aktif olan eleman sayısı	16
Alırken aktif olan eleman sayısı	16
Toplam ateşleme sayısı	6
Kullanılan toplam eleman sayısı	96
Her ateşlemede alınan demet sayısı (bakılan açı sayısı)	32
Demet uzayında aradeğerleme katsayısı	3
Aradeğerlemeden sonraki demet sayısı	96

Demet uzayı bölgesinde örnek sayısını 3 kat artırmak için mevcut 2 örneğin arasına 2 sıfır eklendiğinde demetin frekans bandı daralmakta ve ilgili ateşleme adımına ait bandın yer bilgisi karışmaktadır. Bu etkiyi ortadan kaldırmak için normal aradeğerleme problemlerinde olduğu gibi bir alçak geçiren süzgeç uygulamak mümkün değildir. Süzgeç olarak, ilgili ateşleme adımına ait evre bilgisi kullanılarak elde edilen bant geçiren bir süzgeç uygulanmalıdır.

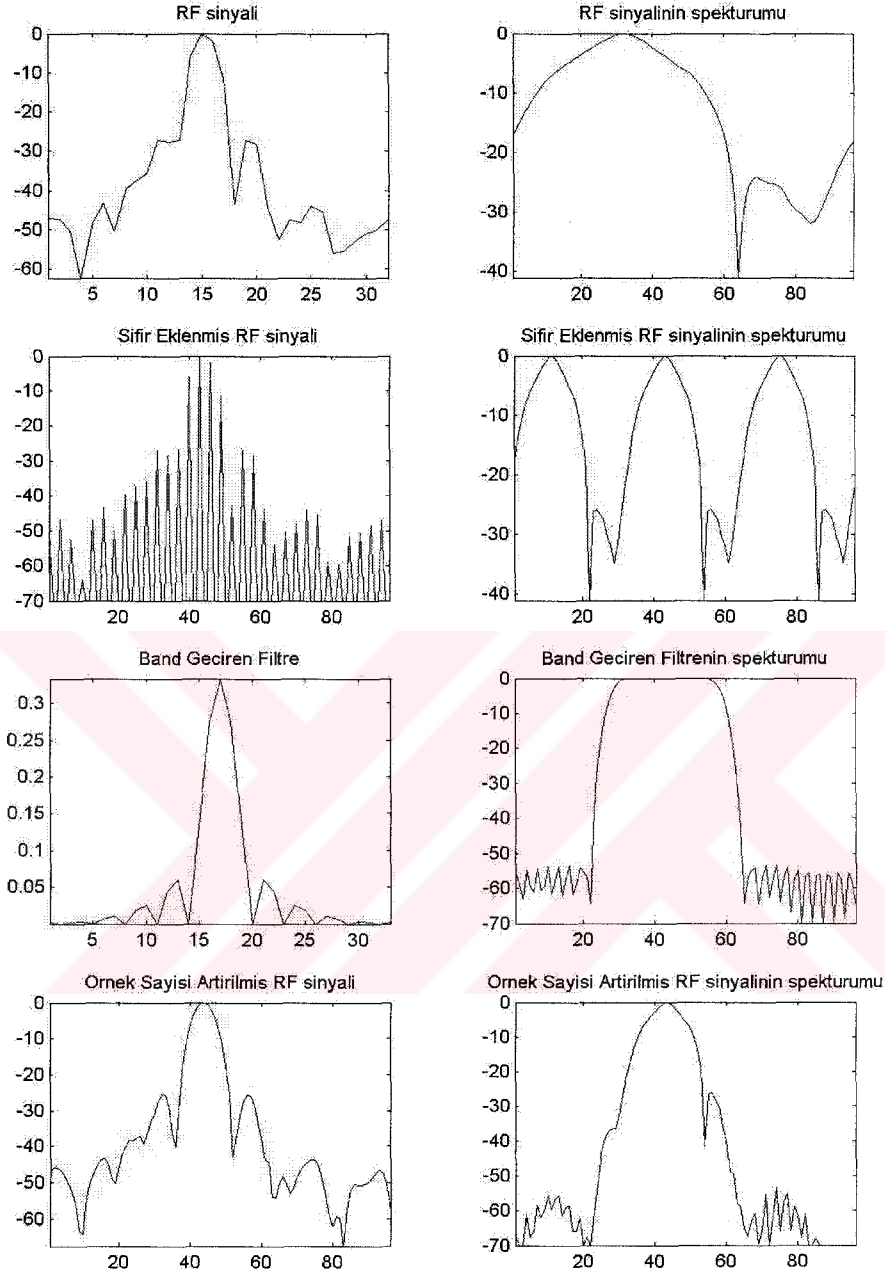
Bana geçiren süzgecin katsayıları FIR süzgeç tasarım yöntemi ile hesaplanmıştır. Kesim frekansı örnekleme frekansının yarısının 3’te biri olarak alınmıştır. Hesaplanan alçak geçiren süzgeç katsayıları Hamming pencereleme işleminden geçirilmiştir, daha sonra gerekli evre uygulanarak bant geçiren süzgece dönüştürülmüştür. Süzgecin genişliği 33 olarak alındığında sonuçlar teorik olan beklentilere çok yakın çıkmaktadır (Şekil 6.4).

Şekil 6.5’da farklı ateşleme adımlarında elde edilen demetlerin spektrumlarının,

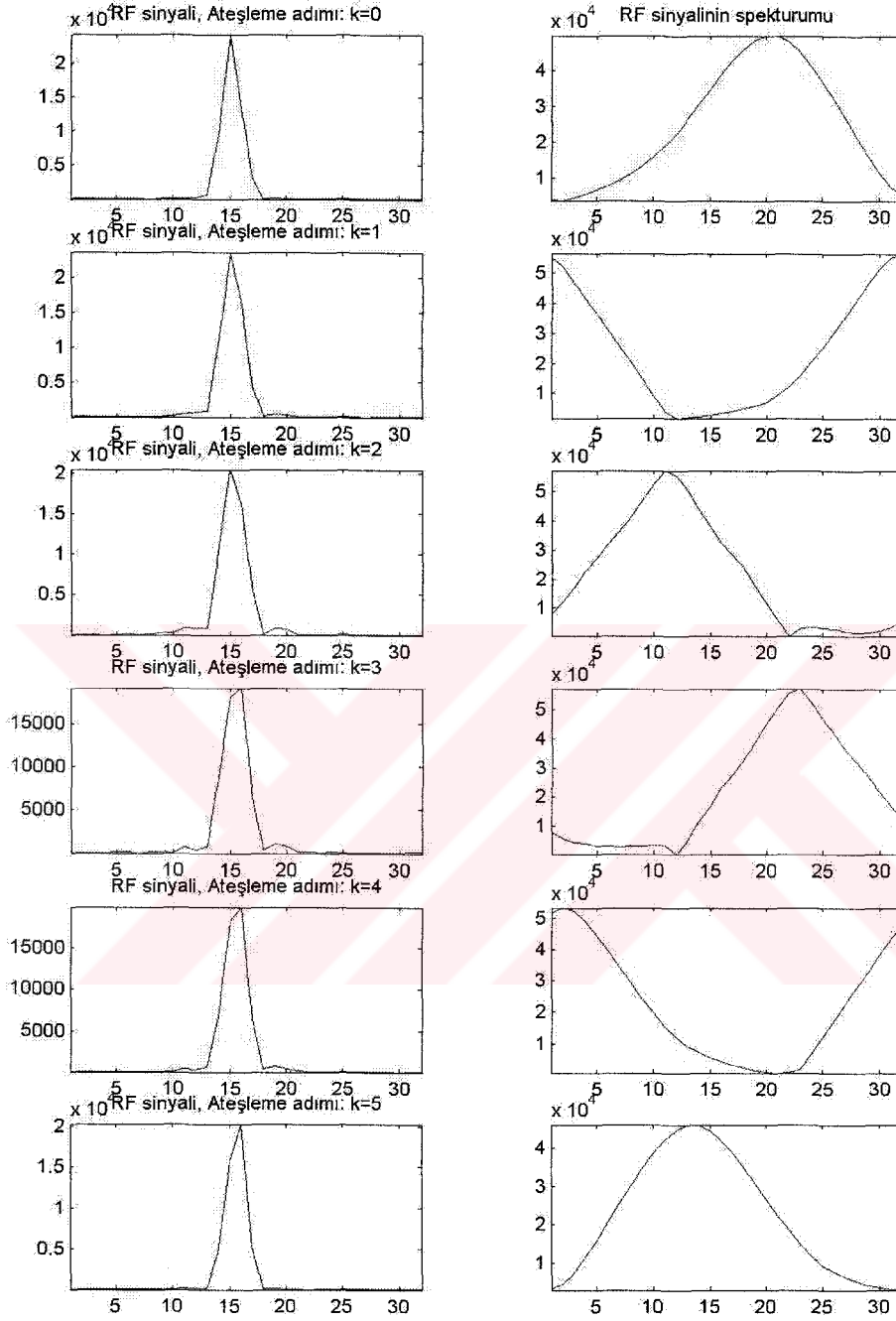
ilgili ateşleme adımıdaki evreye bağlı olarak değişimleri gözlenmektedir. Şekil 6.6'de ise aradeğerleme işlemi sırasında araya sıfır eklemenin sonuçları görünmektedir. Buradaki sonuçlardan da açıkça anlaşılacağı gibi normal olarak uygulanan alçak geçiren bir süzgeç evre bilgisini göz önünde bulundurmayacağı için sonucu olumsuz yönde etkileyecektir. Bundan dolayı yukarıda anlatıldığı gibi, araya sıfır ekleme işleminden sonra bant geçiren bir süzgeç kullanılmalıdır. Bu süzgecin bandı her ateşleme adımı için değişmektedir. Ancak bu yöntem ile örnek sayısı artırılmış doğru demetler elde edilebilir.

Altdizilim sinyal işlemede gerçek zamanda görüntüleme için mümkün olmasa bile, demet sayısını başlangıçta fazla almanın spektrumu nasıl etkilediğini görmek amacıyla yapılan bir denemenin sonuçları Şekil 6.7'de gösterilmektedir. Burada her ateşleme adımında 200 adet demet toplanmaktadır. Bu durumda frekans bandındaki daralma açıkça görülmektedir. Gerçek zamanda alınması gereken demet sayısı bu uygulamada 32'den az alındığında ise tam ters bir etki yaparak frekans bandı daha da genişler ve demet uzayında örtüşme oluşmasına neden olur.

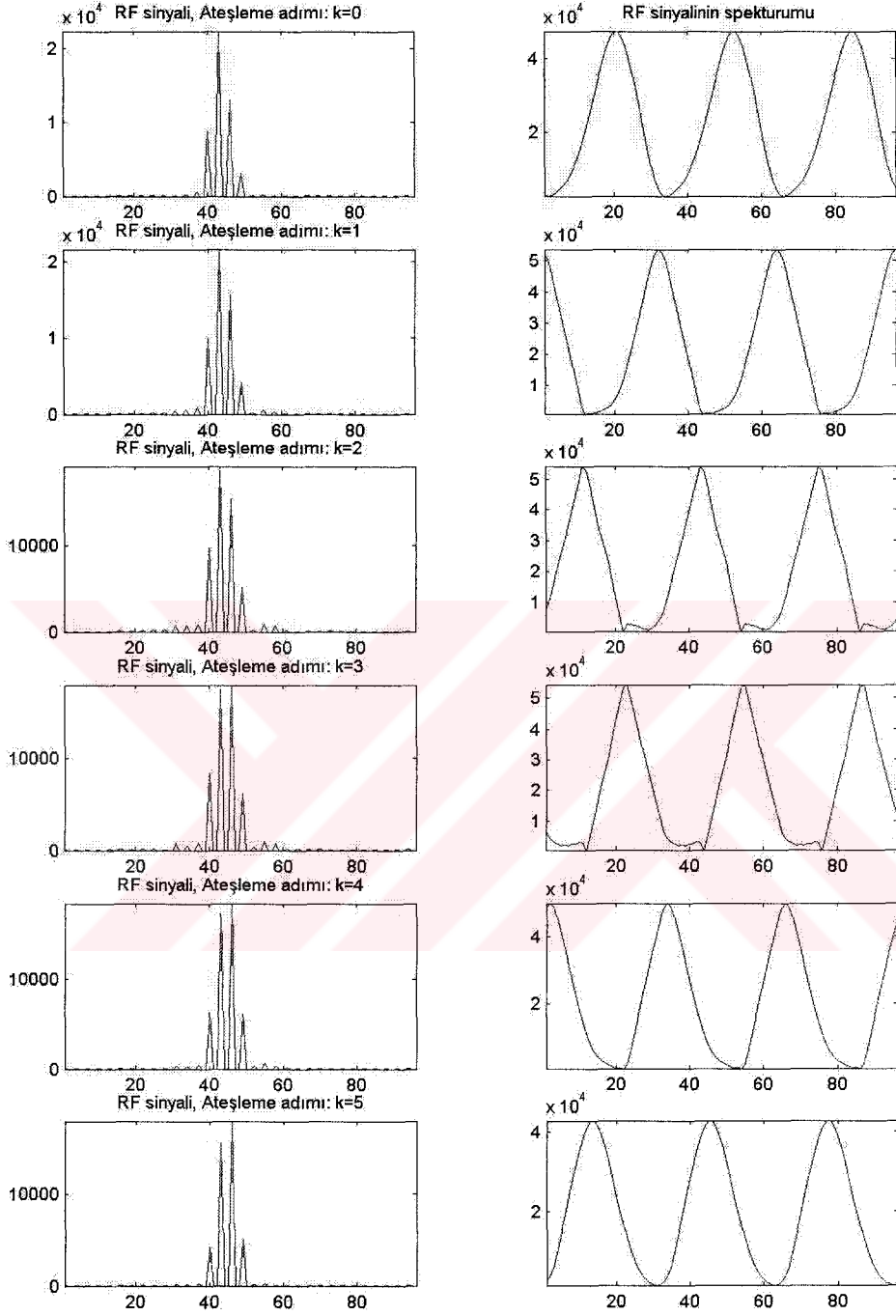
Şekil 6.8'da ise düşük ve yüksek çözünürlüklü görüntüler görülmektedir.



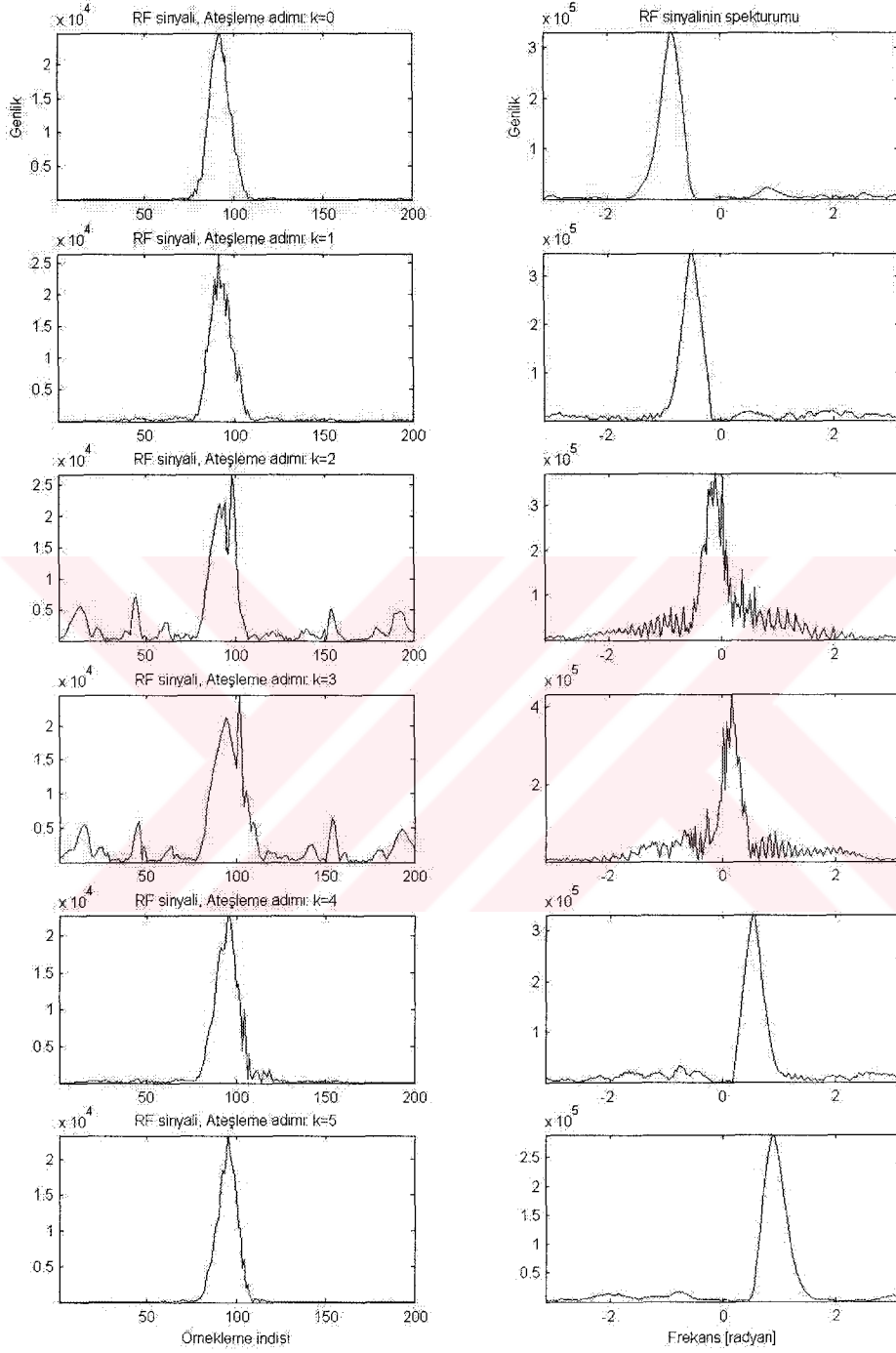
Şekil 6.4: FIR süzgeç tasarım yöntemi ile hesaplanana alçak geçiren süzgeç katsayıları kullanılarak örnek yükseltme işleminin sonuçları



Şekil 6.5: Farklı ateşleme adımlarında elde edilen demetler ve spektrumları (ilgili ateşleme adımındaki evreye bağlı olarak frekans bandının yeri değişmektedir)



Şekil 6.6: Demet uzayında aradeğerleme işlemi sırasında araya sıfır eklemenin sonucunda elde edilen demetler ve spektrumları



Şekil 6.7: Her ateşleme adımında 200 adet demet toplanarak elde edilen sonuçlar



a)



b)



c)



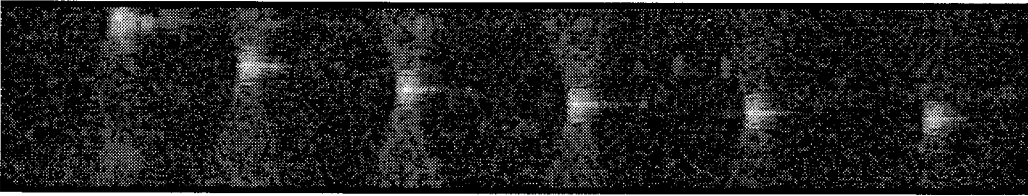
d)



e)



f)

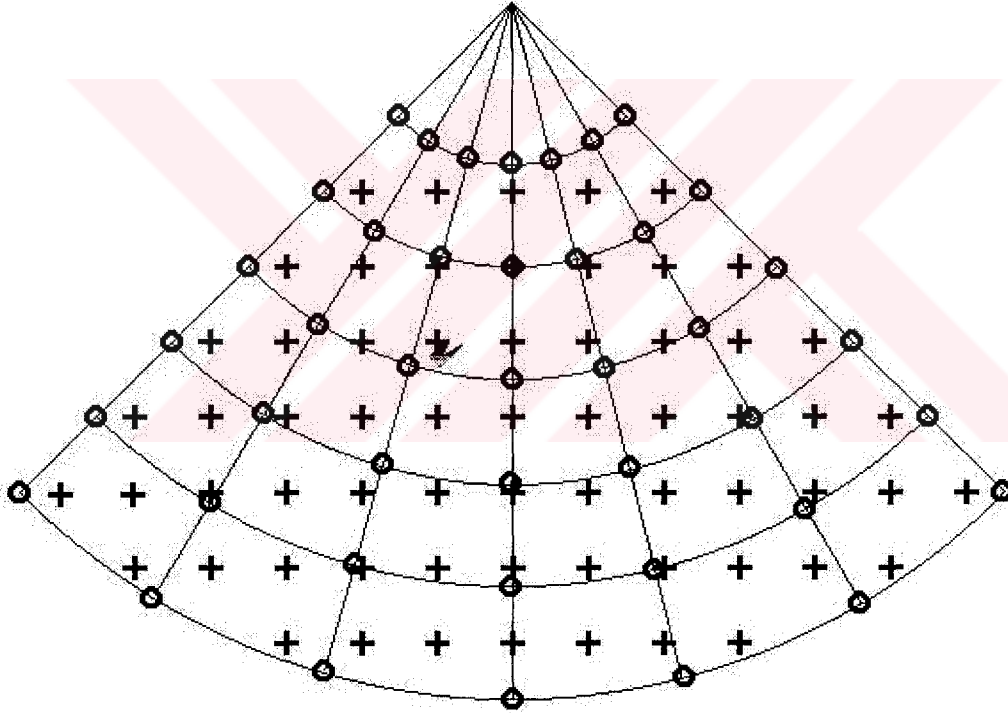


g)

Şekil 6.8: a-f) Altdizilim sinyal işleme için demet uzayında örnek sayısı artırılması sırasında aradeğerleme süzgeci uygulanmadan önceki durum $r\text{-sin}(\theta)$ görüntüleri, g) Aradeğerleme süzgeci uygulandıktan ve 6 görüntü toplandıktan sonraki son görüntü

6.3. Demetleme Sonuçları

Demetleme işleminin sinyal gönderme adımlarında sabit odaklama, sinyal alma adımlarında ise dinamik odaklama kullanılmıştır. Demetleme çıkışlarına zarf sezim işlemi uygulanmıştır. Sonra Şekil 6.9'da görüldüğü gibi, kutupsal koordinatlarda alınan demetler tarama dönüşümü ile kartezyen koordinatlarına dönüştürülür [103, 104]. En sonunda, geniş dinamik aralığa sahip verilerin ekranda daha iyi görünmesi için logaritmik sıkıştırma işlemi uygulanarak [105], sonuçlar 70 dB'lik bir dinamik aralıkta gösterilmiştir. Böylece B-tipi görüntüler elde edilir.

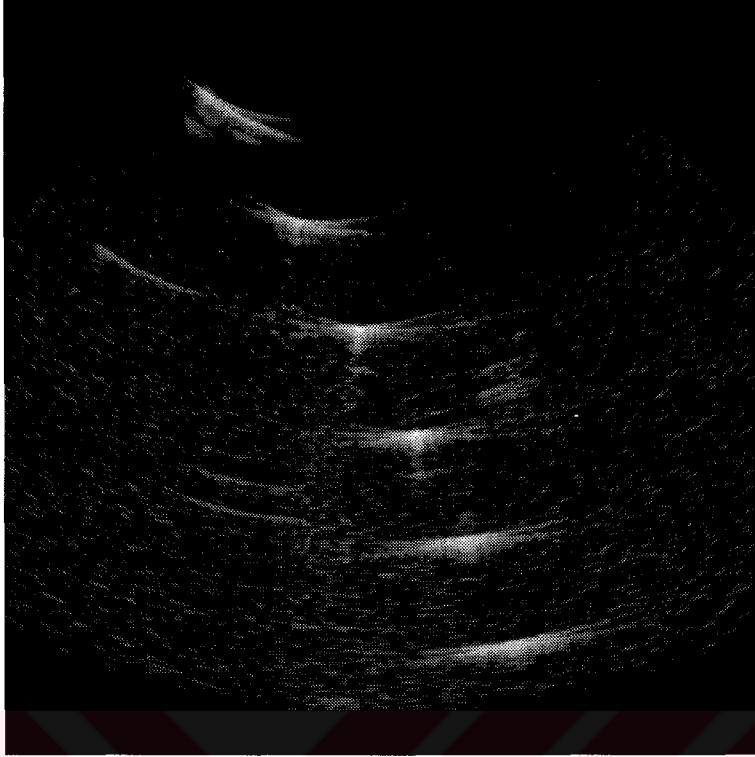


Şekil 6.9: Tarama dönüşümü

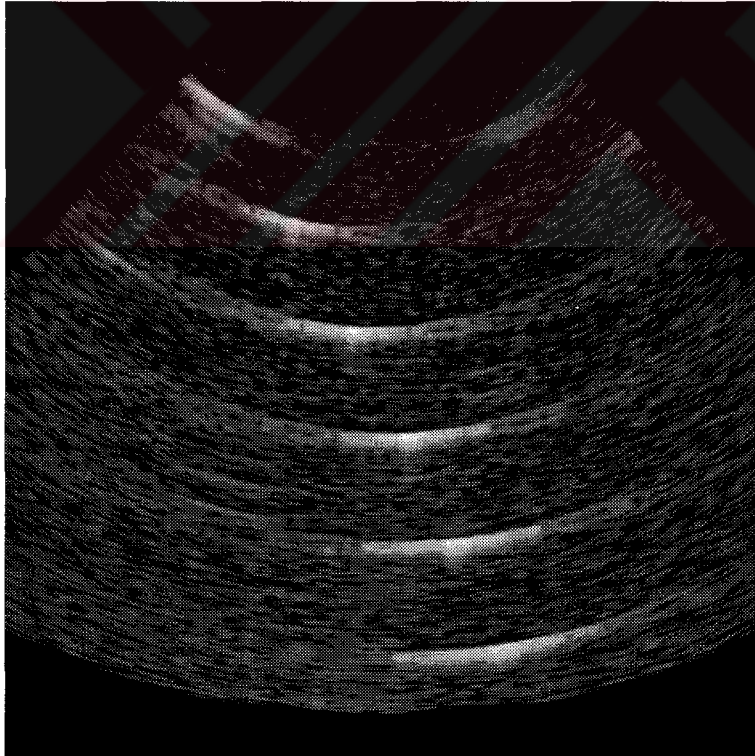
Şekil 6.10'da RF demetleme kullanarak (zaman bölgesinde geciktir ve topla) evreli dizilim ile altdizilim yöntemleri karşılaştırılmaktadır. Altdizilim kullanıldığında evreli dizilime çok yakın bir görüntü kalitesi elde edilmektedir, sadece 7 dB'lik bir SNR farkı gözlenmektedir.

Şekil 6.11’de delta-sigma örnelemeli altdizilim yöntemi ile yapılan demetleme işleminin sonucunda elde edilen ultrasonik görüntüler görülmektedir. Delta-sigma örneklemede dinamik odaklamanın modülatörde neden olduğu senkronizasyon bozukluğu sonucunda SNR düzeyinde yaklaşık 30 dB’lik bir düşüş gözlenmektedir (Şekil 6.12, Şekil 6.13). Dinamik odaklamada SNR düzeyini yükseltmek için düzgün olmayan örnekleme yöntemi kullanılmıştır. Şekil 6.14’de bu yöntem, verimliliği göstermek için altdizilim kullanarak RF demetleme yöntemi ile karşılaştırılmıştır. Burada SNR düzeyinin kabul edilebilir bir seviyeye çıktığı gözlenmektedir.





a) Evreli dizilim ile

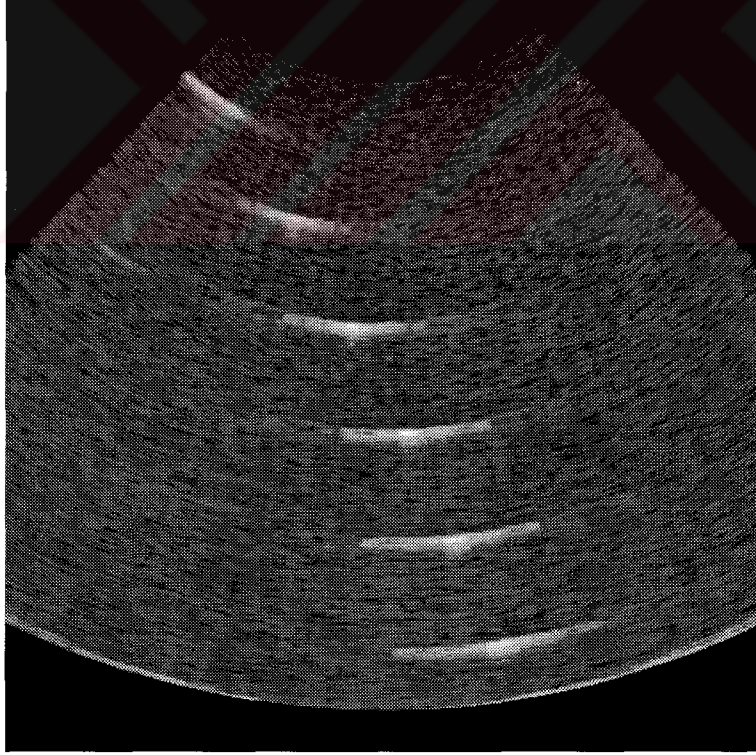


b) Altdizilim ile

Şekil 6.10: RF demetleme sonuçları

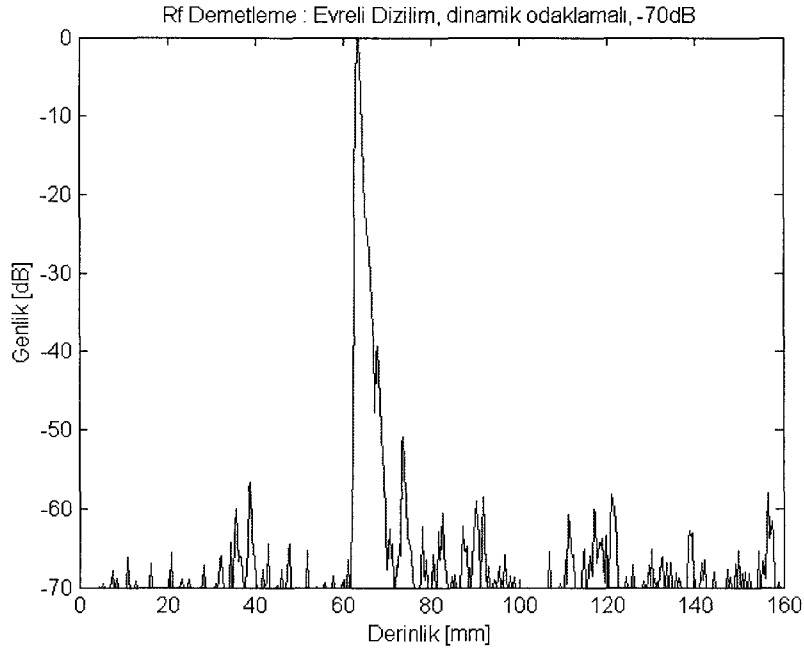


a) Düzenli örnekleme ile

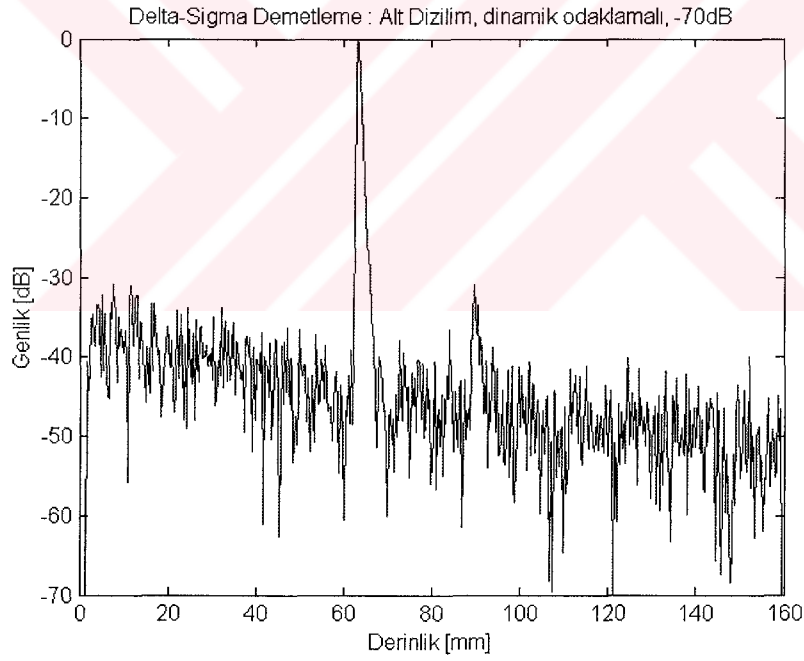


b) Düzgün olmayan örnekleme ile

Şekil 6.11: Delta-sigma örneklemeli altdizilim sinyalleri kullanarak dinamik odaklamalı demetleme

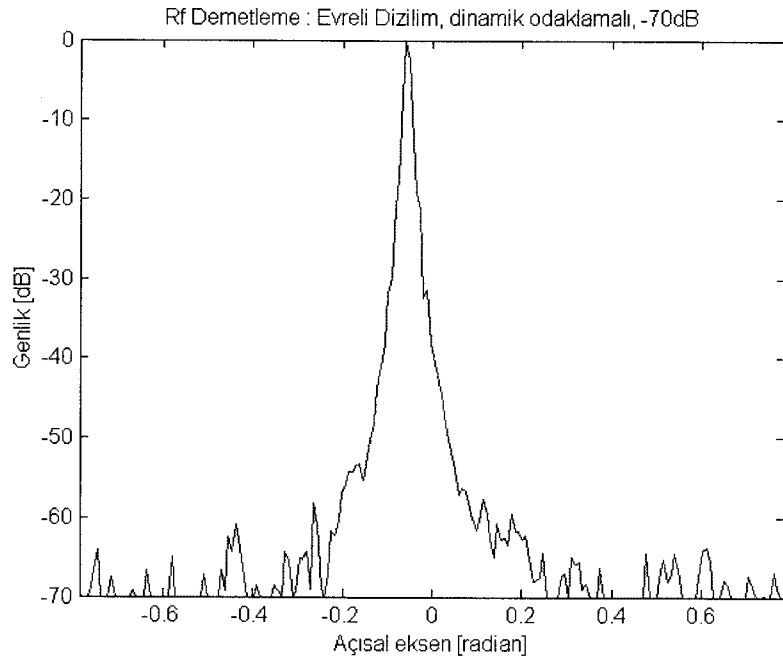


a)

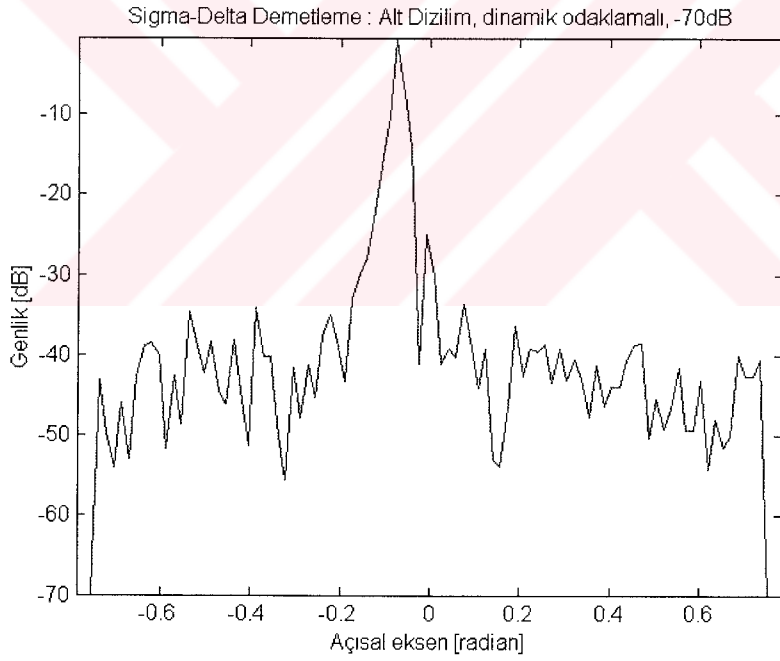


b)

Şekil 6.12: Bir noktasal yansıtıcıdan dinamik odaklama ile alınan derinlik yönündeki sinyaller; a) evreli dizilim kullanarak rf demetleme için, b) altdizilim kullanarak delta-sigma örnekleme demetleme için

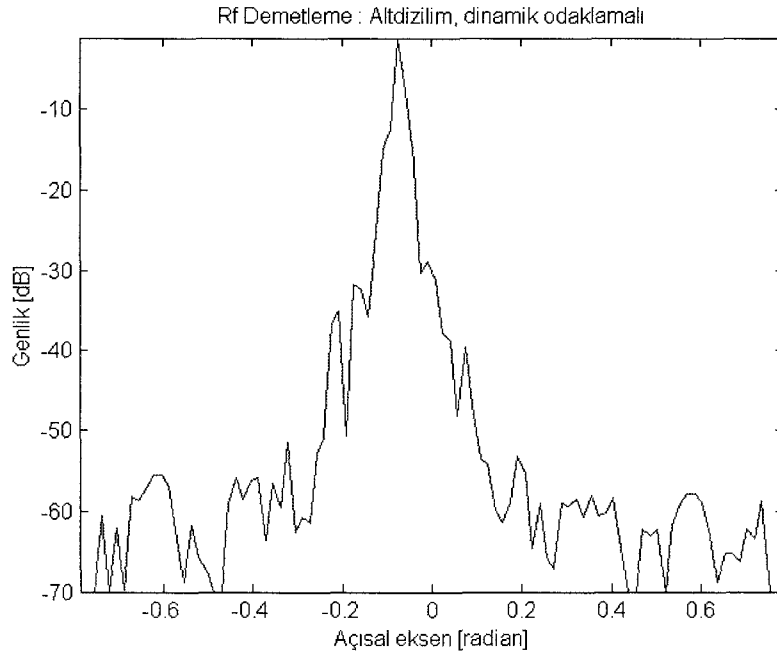


a)



b)

Şekil 6.13: Bir noktasal yansıtıcıdan dinamik odaklama ile alınan açısall yöndeki sinyaller; a) evreli dizilim kullanarak rf demetleme için, b) altdizilim kullanarak delta-sigma örnekleme demetleme için



a)



b)

Şekil 6.14: Bir noktasal yansıtıcıdan dinamik odaklama ile alınan sinyaller; a) altdizilim kullanarak RF demetleme için, b) altdizilim kullanarak düzgün olmayan delta-sigma örnekleme demetleme için

7. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Bu doktora tezinde, dizilim sinyallerinin evreuyumlu işlenmesi konusu ele alınmıştır. Evreuyumlu görüntüleme sistemlerinin en önemli bölümü olan demetleme işleminde yeni yaklaşımlar üzerinde çalışılmıştır. Önerilen yöntem ile, sayısal demetleme konusundaki çalışmalara katkı sağlanmıştır. Bu yöntemde demetleme işlemleri sayısal olarak yapılmaktadır. Analog olarak çalışan kısımlar sadece dönüştürücü diziliminin sürücü devreleri, yükselteçler ve TGC devreleridir. Analog devre bloklarının sayısı, altdizilim yöntemi sayesinde aktif eleman sayısına indirgenmiştir [Bölüm 5.1]. Analog devre bloğu sayısındaki azalma ile birlikte sistemin güç tüketimi, boyutu ve maliyeti de azalacaktır.

Sayısallaştırma işlemi geleneksel çok bitli bir analogtan sayısala çevirici ile değil, yüksek hızda örnekleme yapan delta-sigma çeviriciler kullanılarak yapılmıştır. Yüksek hızda örnekleme sayesinde, demetlemede gecikme hassasiyeti, sistemin evreuyumluluğu ve dolayısıyla görüntü kalitesi de artmıştır. Böylece tabanbant örnekleme veya sayısal aradeğerleme gibi gecikme hassasiyetini artıran yöntemlerin kullanımına gerek kalmamaktadır.

Delta-sigma çeviricinin yapısı ile demetleme yapısı arasında bir bütünleşme sağlanarak sistemin donanım karmaşıklığı azaltılmıştır. Demetleme işlemleri tek bitlik veriler üzerinde başarılı bir şekilde uygulanmıştır. Günümüzdeki gelişmiş sayısal donanım tasarlama araçları ile önerilen demetleme yapısı kolayca tasarlanabilecektir [106].

Alışta dinamik odaklamalı demetleme yapıldığında, tek bitlik delta-sigma kodlarının arasındaki ilişkinin bozulması problemi, düzgün olmayan örnekleme ile

çözümüştür. Deneysel çalışmaların sonucunda elde edilen görüntülerde SNR düzeyinin 20 dB yükseldiği görülmüştür. Düzgün olmayan örnekleme, delta-sigma çeviricinin saat girişini, odaklamaya ait gecikme bilgileri ile kontrol ederek gerçekleştirilebilecektir.

Aldızilim yönteminin noktasal dağılım fonksiyonu ve altdizilimlere ait evreler hesaplanarak, sistem teorik olarak incelenmiştir. Bu incelemeler sonucunda, altdizilim yönteminin, 7 dB'lik bir farkla evreli dizilime oldukça yakın SNR değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Deneysel çalışmaların sonucunda elde edilen görüntülerde, teorik hesaplamalara yakın düzeylerde SNR değerleri ölçülmüştür.

Önerilen yöntemin gerçek zamanda başarılı bir şekilde çalışması için gerekli önlemler alınmıştır. Bu amaçla, hem demet uzayında Nyquist kriterine, hem de gerçek zamanda görüntüleme sınırlamalarına uygun olacak sayıda demet toplanmıştır [Bölüm 5.3]. Bu demetler arasında aradeğerleme ile demet sayısı artırılırken de Nyquist kriterine dikkat edilmiştir.

Delta-sigma düzgün olmayan örnekleme altdizilim işlemeye dayalı bu demetleme yöntemi, evreyumlu görüntüleme sisteminin maliyetini, boyutunu ve güç tüketimini birçok yönden azaltmaktadır. Önerilen yöntemin, bu özelliği ile taşınabilir ultrasonik tarayıcılar, damar içi görüntüleme aygıtları ve üç boyutlu ultrasonik tarayıcılar gibi görüntüleme sistemleri için vazgeçilmez bir yöntem olduğu görülmektedir [109]. Çünkü bu sistemler ya çok miktarda dönüştürücü elemanına ya da çok küçük bir alanda tasarıma gereksinim duymaktadır [110]. Delta-sigma örnekleme altdizilim işlemeye dayalı demetleme yöntemi de, bu tasarım parametrelerine uygun özellikleri içermektedir.

Delta-sigma demetleme konusunda yakın gelecekte birçok çalışma yapılacağı öngörülmektedir. Bu yöntemle ilgili yapılmakta olan çalışmalardan delta-sigma demetlemenin birçok alanda yaygınlaşacağı beklenmektedir. Öte yandan altdizilim gibi az sayıda aktif eleman kullanan veri toplama yöntemleri üzerinde de yoğun çalışmalar yapılagelmektedir [111, 112, 113, 114].

Ultrasonik görüntüleme de başarılı bir şekilde uygulanabileceği gösterilen delta-sigma demetleme yöntemi üzerinde yapılacak bazı çalışmalar ile, yöntemin radar, sonar gibi birçok uygulamada da doğrudan kullanılabilmesi görülmektedir. Öte yandan, delta-sigma demetlemenin haberleşmedeki akıllı antenlere uygulanmasının önemli katkıları sağlayacağı söylenebilir.

Bu çalışmanın devamında, önerilen sistemin FPGA kullanarak donanım tasarımı yapılacaktır. Ultrasonik dönüştürücü tasarımında kullanılan CMUT'lar ile birleştirilerek çok küçük boyutlu sistemlerin tasarlanması planlanmaktadır. Bu şekilde oluşturulacak yapının sualtı akustik uygulamalarında da kullanılması mümkün olabilecektir.



8. KAYNAKLAR

1. <http://www.bidb.odtu.edu.tr/index.php?go=ig&sub=dictio>, “ODTÜ - BİDB : Enformatik Grubu > Elektronik ve Bilgisayar Terimleri Sözlüğü”.
2. <http://www.tbd.org.tr/sozluk.html>, “Türkiye Bilişim Derneği, Bilişim Terimleri Sözlüğü”.
3. <http://www.tdk.gov.tr/bilterim>, “ Türk Dil Kurumu , Bilgisayar Terimleri Karşılıklar Kılavuzu”.
4. <http://sunsite.bilkent.edu.tr/pub/linux/linux-tr/yardim/bts.html>, “Bilkent Üniversitesi, Bilişim Terimleri Sözlüğü”.
5. M. O'Donnell, “Applications of VLSI circuits to medical imaging”, Proceedings of IEEE, 76: 1106-1114, Eylül 1988.
6. C.F. Schueler, H. Lee, G. Wade, “Fundamentals of digital ultrasonic imaging”, IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics, SU-31: 195-217, Temmuz 1984.
7. A. Macovski, “Ultrasonic array for reflection imaging”, U.S. Patent 3,918,024, 4 Kasım 1975.
8. O.T. Von Ramm, S.W. Smith, “Beam steering with linear arrays”, IEEE Transaction on Biomedical Engineering, BME-30(8): 438-452, Ağustos 1983.
9. S.H. Maslak, “Acoustic imaging apparatus”, U.S. Patent 4,140,022, 20 Şubat 1979.

10. B.D. Steinberg, "Principals of aperture and array system design", Wiley, New York, 1976.
11. B.A.J. Angelsen, "Ultrasound imaging", vol.1, Emantec, Trondheim, 2000.
12. L. Borcea, G. Papanicolaou, C. Tsogka, J. Berryman, "Imaging and time reversal in random media", *Inverse Problems*, 18: 1247-1279, 2002.
13. H.Ş. Bilge, T. Çiftçibaşlı, "Robotlarda akustik algılayıcılar ile görme sistemi için bir demetleme yöntemi", Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı, Eylül 2002.
14. H.Ş. Bilge, M. Karaman, "Subarray delta-sigma beamforming for low-cost underwater acoustic imaging", *Proceedings of Oceans 2002 MTS/IEEE Conference*, 2152-2155, Ekim 2002.
15. B.D. Van Veen, K.M. Buckley, "Beamforming: a versatile approach to spatial filtering," *IEEE ASSP Magazine*, 5: 4-24, Nisan 1988.
16. J.W. Goodman, "Introduction to Fourier optics", McGraw-Hill, San Fransisco, 1968.
17. G.S. Kino, "Acoustic waves: devices, imaging, and analog signal processing", Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, Inc., 1987.
18. H.E. Karrer, A.M. Dickey, "Ultrasound imaging: an overview", *Hewlett-Packard Journal*, 34(10): 3-6, Ekim 1983.
19. K.E. Thomenius, "Evolution of ultrasound beamformers," *Proceedings of IEEE Ultrasonics Symposium*, 1615-1622, 1996.
20. P.A. Magnin, O.T. von Ramm, F.L. Thurstone, "Delay quantization error in phased array images", *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics*, SU-28(5): 305-310, Eylül 1981.
21. S.R. Freeman, P.C. Li, M. O'Donnell, "Retrospective dynamic transmit

- focusing”, *Ultrasonic Imaging*, 17: 173-196, 1995.
22. S. Holm, H. Yao, “Improved framerate with synthetic transmit aperture imaging using prefocused subapertures”, *Proceedings of IEEE Ultrasonics Symposium*, 1535-1538, 1997.
 23. D.H. Johnson, D.E. Dudgeon, “Array signal processing: concepts and techniques”, Prentice Hall, New Jersey, 1993.
 24. S.J. Norton, “Synthetic aperture imaging with arrays of arbitrary shape-part I: general case”, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 49(4): 399-403, Nisan 2002.
 25. R.L. Tutwiler, “Ultrasonic beamforming architectures,” *SPIE*, 3341: 43-54, 1998.
 26. M. Karaman, M.A. Abul, S. Onart, H.Ş. Bilge, “Evreyuymulu görüntüleme sistemleri için demetleme yöntemleri”, *IEEE-Sinyal İşleme ve Uygulamaları Kurultayı Bildiriler Kitabı*, 692-697, Haziran 2000.
 27. J.A. Brown, G.R. Lockwood, “A low-cost, high-performance pulse generator for ultrasound imaging”, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 49(6): 848-851, Haziran 2002.
 28. M. Karaman, P.C. Li, M. O’Donnell, “Synthetic aperture imaging for small scale imaging systems”, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 42(3): 429-442, Mayıs 1995.
 29. G.F. Manes, C. Atzeni, C. Susini, “Design of a simplified delay system for ultrasound phased array imaging”, *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics*, SU-30(6): 350-354, Kasım 1983.
 30. J. Lu, H. Zou, J.F. Greenleaf, “Biomedical ultrasound beam forming”, *Ultrasound in Medicine and Biology*, 20(5): 403-428, Temmuz 1994.
 31. G.A. Hampson, A. Paplinski, “Simulation of beamforming techniques for

the linear array of transducers”, Monash University, Department of Robotics and Digital Technology, Technical Report 95-3, Şubat 1995.

32. R.T. Hocter, S.A. Kassam, “Synthetic aperture ultrasonic imaging system using a minimum or reduced redundancy phased array”, U.S. Patent No: 5,278,757 , 11 Ocak 1994.
33. J.A. Johnson, M. Karaman, B.T. Khuri-Yakub, “Image formation and restoration using multi-element synthetic array processing”, Proceedings of SPIE Medical Imaging, Ultrasonic Imaging and Signal Processing, 4687: 37-46, Şubat 2002.
34. J.A. Johnson, M. Karaman, B.T. Khuri-Yakub, “Synthetic phased array image formation and restoration”, IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP'02), Mayıs 2002.
35. A. Morcira, “Real-time synthetic aperture radar (SAR) processing with a new subaperture approach”, IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing, 30: 714-722, Temmuz 1992.
36. R.T. Hocter, S.A. Kassam, "The unifying role of the coarray in aperture synthesis for coherent and incoherent imaging", Proceedings of the IEEE, 78(4): 735-752, Nisan 1990.
37. M. Karaman, H.Ş. Bilge, M. O'Donnell, “Adaptive multi-element synthetic aperture imaging with motion and phase aberration correction”, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 45(4): 1077-1087, Temmuz 1998.
38. H.Ş. Bilge, M. Karaman, “Yapay demetlemeye dayalı ultrasonik görüntülemeye hareket tahmini”, 4. Sinyal İşleme ve Uygulamaları Kurultayı Bildiriler Kitabı, 427-432, Nisan 1996.
39. H.Ş. Bilge, M. Karaman, “Correlation analysis of ultrasonic speckle for motion estimation”, Proceedings of IEEE Digital Signal Processing

Workshop, 211-214, Eylül 1996.

40. H.Ş. Bilge, M. Karaman, M. O'Donnell, "Motion estimation using common spatial frequencies in synthetic aperture imaging", Proceedings of IEEE International Ultrasonics Symposium, 1551-1554, Kasım 1996.
41. K.S. Kim, J.S. Hwang, J.S. Jeong, T.K. Song, "An efficient motion estimation and compensation method for ultrasound synthetic aperture imaging", Ultrasonic Imaging, 24(2): 81-99, Nisan 2002.
42. D.E. Dudgeon, "Fundamentals of digital array processing", Proceedings of IEEE, 6: 898-904, Haziran 1977.
43. R.G. Pridham, R.A. Mucci, "Digital interpolation beamforming for low-pass and band-pass signals", Proceedings of IEEE, 67(6): 904-919, Haziran 1979.
44. M. Dean, "Digital beamforming array", U.S.Patent 5,461,389, 24 Ekim 1995.
45. G.A. Hampson, "Implementing multi-dimensional digital hardware beamformers", Monash University, Department of Robotics and Digital Technology, Doktora Tezi, Ağustos 1997.
46. G.A. Hampson, A. Paplinski, "Hardware implementation of an ultrasonic beamformer", TENCON-97 Speech and Image Technologies for Computing and Telecommunications, Aralık 1997.
47. M. Karaman, "Kişisel bilgisayar tabanlı ultrasonik görüntüleme sistemi", TÜBİTAK Proje No: EEEAG-252, Aralık 1999.
48. G.A. Hampson, A. Paplinski, "Fast implementation of the phase shift beamformer", IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology, 27-30, Ekim 1996.
49. T.A. Shoup, J. Hart, "Ultrasonic imaging systems", Proceedings of IEEE

- Ultrasonics Symposium, 863-871, 1988.
50. B.D. Steinberg, "Digital beamforming in ultrasound", IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 39(6): 716-721, Kasım 1992.
 51. J.S. Hwang, T.K. Song, "A study of the display pixel-based focusing method in ultrasound imaging", Ultrasonic Imaging, 23(1): 1-18, Ocak 2001.
 52. M. O'Donnell, W.E. Engeler, J.T. Pedicone ve diğerleri, "Real-time phased array imaging using digital beam forming and autonomous channel control", Proceedings of IEEE Ultrasonics Symposium, 1499-1502, 1990.
 53. J.A. Brown, G.R. Lockwood, "Gate array beamformer for high frequency annular arrays", Proceedings of IEEE International Ultrasonics Symposium, Ekim 2002.
 54. M. O'Donnell, "Efficient parallel receive beam forming for phased array imaging using phase rotation", Proceedings of IEEE Ultrasonics Symposium, 1495-1498, 1990.
 55. M. O'Donnell, W.E. Engeler, J.J. Bloomer, J.T. Pedicone, "Method and apparatus for digital phased array imaging", U.S. Patent No: 4,983,970 , 8 Ocak 1991.
 56. W.E. Engeler, M. O'Donnell, J.T. Pedicone, J.J. Bloomer, "Dynamic phase focus for coherent imaging beam formation", U.S. Patent, 12 Mayıs 1992.
 57. J.E. Powers, D.J. Phillips, M.A. Brandestini, R.A. Sigelmann, "Ultrasound phased array delay lines based on quadrature sampling techniques", IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics, SU-27(6): 287-294, Kasım 1980.
 58. G.A. Hampson, A. Paplinski, "Beamforming by interpolation", Monash University, Department of Robotics and Digital Technology, Technical Report 93-12, Eylül 1993.

59. D. Lipschutz, "Delay interpolator for digital phased array ultrasound beamformers", U.S. Patent No: 5,345,426 , 6 Eylül 1994.
60. J. Kim, L.X. Yao, Z. Banjanin, H. Fukukita, H. Hagiwara, M. Kawabuchi, "Partial beamforming", U.S. Patent No: 5,388,079 , 7 Şubat 1995.
61. T.K. Song, J.F. Greenleaf, "Ultrasonic dynamic focusing using an analog FIFO and asynchronous sampling", IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 41(3): 326-332, Mayıs 1994.
62. M. O'Donnell, W.E. Engeler, T.L. Vogelsong, S.G. Karr, S.E. Noujaim, "Method and apparatus for high speed digital phased array coherent imaging system", U.S. Patent No: 4,839,652 , 13 Haziran 1989.
63. M. O'Donnell, M.G. Magrane, "Method and apparatus for fully digital beam formation in a phased array coherent imaging system", U.S. Patent No: 4,809,184, 28 Şubat 1989.
64. J.C. Candy, G.C. Temes, "Oversampling delta-sigma data converters: theory, design and simulation", IEEE Press, New York, 1992.
65. R. Steele, "Delta modulation systems", New York: Wiley, 1975.
66. H.S. McDonald, "Pulse code modulation and differential pulse code modulation encoders", 1970 U.S. Patent, No: 3,526,855 ,1968.
67. D.J. Goodman, "The application of delta modulation to analog-to-digital encoding", Bell Systems Technical Journal, 48: 321-343, Şubat 1969.
68. J.C. Candy, "A use of limit cycle oscillations to obtain robust analog-to-digital converters", IEEE Transactions on Communications, COM-22: 298-305, Mart 1974.
69. G.R. Ritchie, J.C. Candy, W.H. Ninke, "Interpolative digital to analog converters", IEEE Transactions on Communications, COM-22: 1797-1806, Kasım 1974.

70. C.C. Cutler, "Transmission systems employing quantization", 1960 U.S. Patent 2,927,962 , başvuru yılı: 1954.
71. H. Inose, Y. Yasuda, J. Murakami, "A telemetering system code modulation- $\Delta\Sigma$ modulation", IRE Trans. Space Elect. Telemetry, SET-8: 204-209, Eylül 1962.
72. S.R. Norsworthy, R. Schreier, G.C. Temes, "Delta-sigma data converters: theory, design, and simulation", IEEE Press, 1996.
73. P.M. Aziz, H.V. Sorensen, J.V. Spiegel, "An overview of sigma-delta converters", IEEE Signal Processing Magazine, 61-84, Ocak 1996.
74. H.A. Spang III, P.M. Schultheiss, "Reduction of quantizing noise by use of feedback", IRE Trans. Commun. Sys., 373-380, Aralık 1962.
75. J.C. Candy, "A use of double integration in sigma-delta modulation", IEEE Transactions on Communications, COM-33, 249-258, Mart 1985.
76. B.E. Brandt, D.E. Wingrad, B.A. Wooley, "Second-order sigma-delta signal acquisition", IEEE Journal of Solid-State Circuits, SC-26, 618-627, Nisan 1991.
77. A.V. Oppenheim, A.S. Willsky, "Signals and Systems", Prentice Hall, 1997.
78. S.E. Noujaim, S.L. Garverick, M. O'Donnell, "Phased array ultrasound beam forming using oversampled A/D conversion", U.S. Patent 5,203,335, 20 Nisan 1993.
79. S.R. Freeman, M.K. Quick, M.A. Morin, R.C. Anderson, C.S. Desilets, T.E. Linnenbrink, M. O'Donnell, "Heterodyning technique to improve performance of delta-sigma-based beamformers", IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 46(4): 771-790, Temmuz 1999.
80. M. Karaman, B. Tavlı, "Efficient ultrasonic synthetic aperture imaging",

Electronics Letters, 35(16): 1319-1320, Ağustos 1999.

81. M. Karaman, B.T. Khuri-Yakub, "Low-cost front-end processing for large array systems", Proceedings of 17th International Congress on Acoustics (ICA'01), Eylül 2001.
82. J.A. Johnson, M. Karaman, B.T. Khuri-Yakub, "Phased subarray processing for underwater 3D acoustic imaging", Proceedings of Oceans 2002 MTS/IEEE Conference, 2145-2151, Ekim 2002.
83. Y. Wang, M. O'Donnell, "Notes on synthetic phased-array with 2-D sparse arrays", IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 50(1): 103-105, Ocak 2003.
84. J.T. Yen, J.P. Steinberg, S.W. Smith, "Sparse 2-D array design for real time rectilinear volumetric imaging", IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 47(1): 93-110, Ocak 2000.
85. H.Ş. Bilge, T. Çiftçiabaşı, "Verimli bir demetleme yöntemi ile ultrasonik görüntüleme", URSI-Türkiye 2002 Birinci Ulusal Kongresi, 431-434, Eylül 2002.
86. H.Ş. Bilge, N. Güven, L. Özparlak, M. Karaman, "Delta-sigma örnekleme altdizilim sinyallerinin sayısal işlenmesine dayalı evreyumlu görüntüleme", IEEE-Sinyal İşleme ve Uygulamaları Kurultayı Bildiriler Kitabı, 687-691, Haziran 2000.
87. H.Ş. Bilge, M. Karaman, "Alt dizilimden dinamik odaklama ile alınan sinyallerin sigma delta çevirici ile örneklenecek etkin bir yöntemle işlenmesi", 10. Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı Bildiriler Kitabı, 344-349, Haziran 2002.
88. M. Karaman, M. O'Donnell, "Subaperture processing for ultrasound imaging", IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 45(1): 126-135, Ocak 1998.

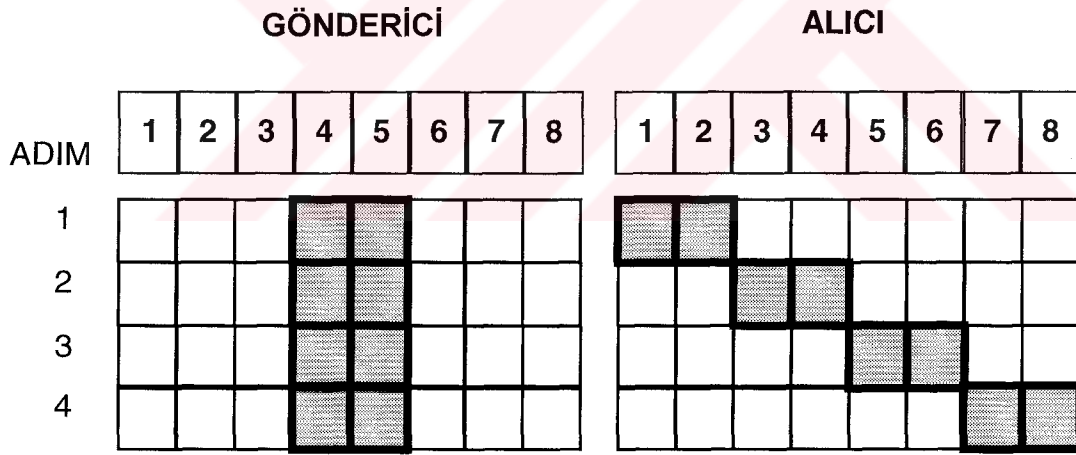
89. B. Tavlı, "Data acquisition techniques for adaptive subaperture processing", Yüksek Lisans Tezi, Başkent Üniversitesi, 1998.
90. B. Tavlı, M. Karaman, "Correlation processing for correction of phase distortions in subaperture imaging", IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 46(6): 1477-1488, Kasım 1999.
91. M. Kozak, "A delta-sigma based beamformer", Yüksek Lisans Tezi, Başkent Üniversitesi, 1998.
92. S.R. Freeman, M.K. Quick, M.A. Morin, R.C. Anderson, C.S. Desilets, T.E. Linnenbrink, M. O'Donnell, "Delta-sigma oversampled ultrasound beamformer with dynamic delays", IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 46(2): 320-332, Mart 1999.
93. A.V. Oppenheim, R.W. Shafer, J.R. Buck, "Discrete-time signal processing", Prentice Hall, 1999.
94. H.Ş. Bilge, M. Karaman, "Subarray delta-sigma beamforming for ultrasonic imaging", Proceedings of IEEE International Ultrasonics Symposium, Ekim 2002.
95. Y. Tamura, N. Kawakami, O. Akasaka, M. Okada, K. Koyama, "Beamforming using multidimensional sigma-delta modulation", Proceedings of IEEE Ultrasonics Symposium, 1077-1080, 1998.
96. S.R. Freeman, "An oversampled ultrasound beamformer for low-power, portable scanners", Doktora Tezi, The University of Michigan, 1998.
97. S.R. Freeman, M.K. Quick, M.A. Morin, R.C. Anderson, C.S. Desilets, T.E. Linnenbrink, M. O'Donnell, "An ultrasound beamformer using oversampling", Proceedings of IEEE Ultrasonics Symposium, 1687-1690, 1997.
98. S.R. Freeman, M.K. Quick, M.A. Morin, R.C. Anderson, C.S. Desilets, T.E. Linnenbrink, M. O'Donnell, "Efficient, high-performance ultrasound

- beamforming using oversampling”, Proceedings of SPIE: Medical Imaging, 3341: 220-227, 1998.
99. M. Kozak, M. Karaman, “Digital phased array beamforming using single-bit delta-sigma conversion with non-uniform oversampling”, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 48(4): 922-931, Temmuz 2001.
 100. M. Karaman, M. Kozak, “An asynchronous oversampling beamformer”, WIPO PCT Patent Başvurusu PCT/TR98/00019, 24 Ağustos 1998.
 101. M. Karaman, M. Kozak, “Digital beamforming using nonuniform oversampling delta-sigma conversion”, Proceedings of IEEE Ultrasonics Symposium, 1279-1282, 1999.
 102. <http://bul.eecs.umich.edu>, “The Biomedical Ultrasonics Laboratory at the University of Michigan”.
 103. H.G. Larsen, S.C. Leavitt, “An image display algorithm for use in real-time sector scanners with digital scan converters”, Proceedings of IEEE Ultrasonics Symposium, 763-765, 1980.
 104. S.C. Leavitt, B.F. Hunt, H.G. Larsen, “A scan conversion algorithm for displaying ultrasound images”, Hewlett-Packard Journal, 34(10): 30-34, Ekim 1983.
 105. H.Ş. Bilge, “Ultrasonik görüntüleme için bir uyarlanırlı histogram denkleştirme yöntemi”, 10. Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı Bildiriler Kitabı, Haziran 2002.
 106. B.G. Tomov, J.A.Jensen, “A new architecture for a single-chip multi-channel beamformer based on a standart FPGA”, Proceedings of IEEE Ultrasonics Symposium, 1529-1533, 2001.
 107. F.N. Uçar, “Maliyet verimli ultrasonik görüntüleme sistemleri için altdizisel sinyal işleme”, Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi, 1997.

108. F.N. Uçar, M. Karaman, "Beam space processing for low-cost scanners", Proceedings of IEEE Ultrasonics Symposium, 1349-1352, 1996.
109. M. Inerfield, G.R. Lockwood, S.L. Garverick, "A sigma-delta-based sparse synthetic aperture beamformer for real-time 3-D ultrasound", IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 49(2): 243-254, şubat 2002.
110. Ö. Oralkan, A.S. Ergun, J.A. Johnson, M. Karaman, U. Demirci, K. Kaviani, T.H. Lee, B.T. Khuri-Yakub, "Capacitive micromachined ultrasonic transducers: next-generation arrays for acoustic imaging?", IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 49(11): 1596-1610, Kasım 2002.
111. M.H. Bae, M.K. Jeong, "A study of synthetic-aperture imaging with virtual source elements in B-mode ultrasound imaging systems", IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 47(6): 1510-1519, Kasım 2000.
112. S. Nikolov, J.A. Jensen, "Application of different spatial sampling patterns for sparse-array transducer design", Ultrasonics, 37(10): 667-671, 2000.
113. S. Nikolov, K. Gammelmark, J.A. Jensen, "Recursive ultrasound imaging", Proceedings of IEEE Ultrasonics Symposium, 1621-1625, 1999.
114. S.J. Norton, "Synthetic aperture imaging with arrays of arbitrary shape-part II: the annular array", IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 49(4): 404-408, Nisan 2002.

EK-1 ALTDİZİLİME AİT NOKTASAL DAĞILIM FONKSİYONU

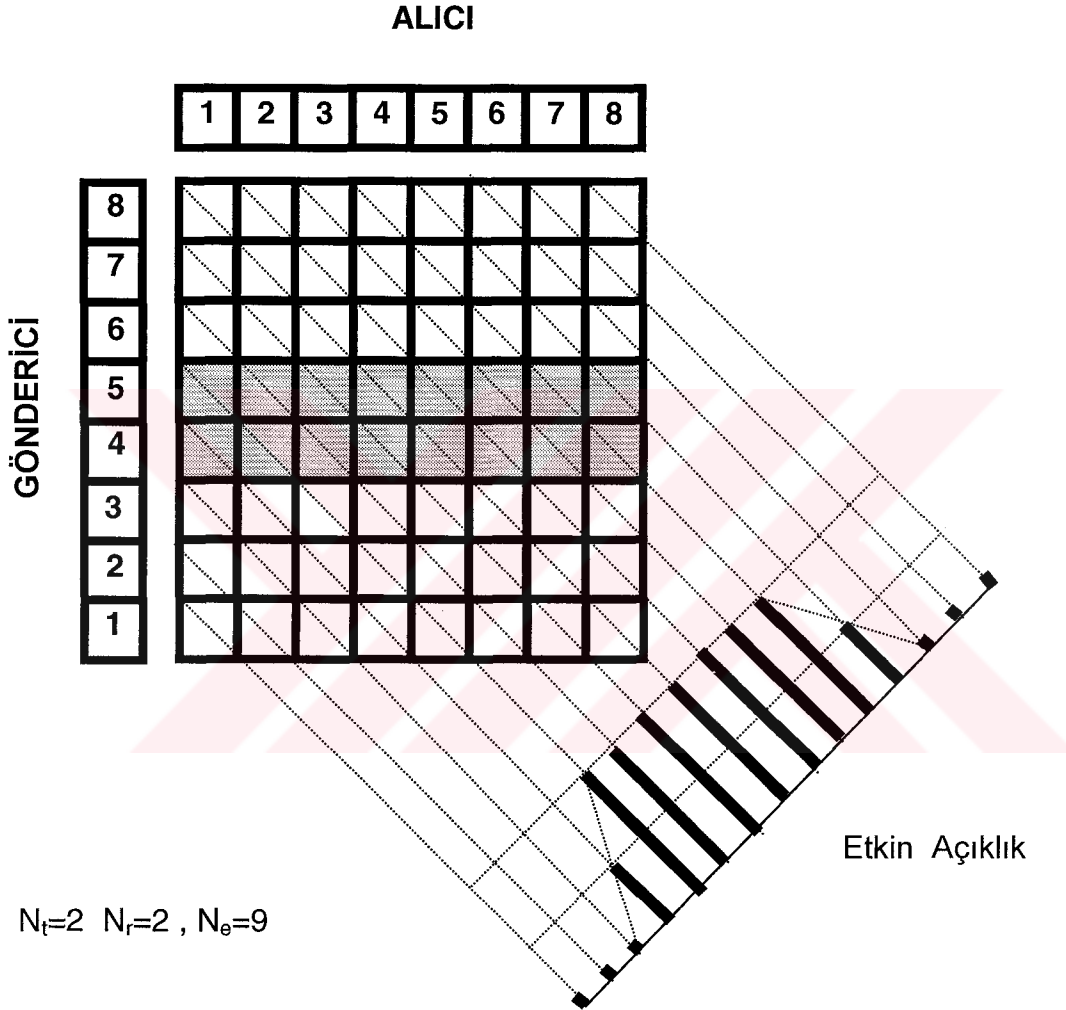
Altdizilim ile demetleme yönteminde, az sayıda dönüştürücü elemanından oluşan dizilimler kullanılır. Büyük bir dönüştürücü dizilimi, altdizilimlerin kaydırılması ile sentetik açıklık yöntemine benzer bir şekilde sentezlenir. Bu sentezlemeyi yapmak için birden fazla sinyal gönderme ve alma adımına gereksinim vardır. Kullanılan yöntemde, her adımda alıcı altdizilimi elektronik çoğullama ile büyük bir dizilim üzerinde kaydırılır. Gönderici altdizilimi ise farklı adımlarda hep aynı yerde kalır (Şekil EK-1.1).



Şekil EK-1.1: Altdizilim yönteminde sinyal gönderme ve alma işlemleri

Etkin açıklık, gönderici altdizilimi ile alıcı altdiziliminin demet uzayında evrişimi alınarak bulunur (Şekil EK-1.2). Farklı adımlardaki etkin açıklığın şekli aynı olmakla birlikte, alıcı altdiziliminin kaydırılmasından dolayı her adım için ayrı bir evre sisteme katılmaktadır (Şekil EK-1.3). Bir adımda elde edilen görüntü evreli dizilime göre düşük çözünürlüğe sahiptir, çünkü az sayıda eleman kullanılmıştır.

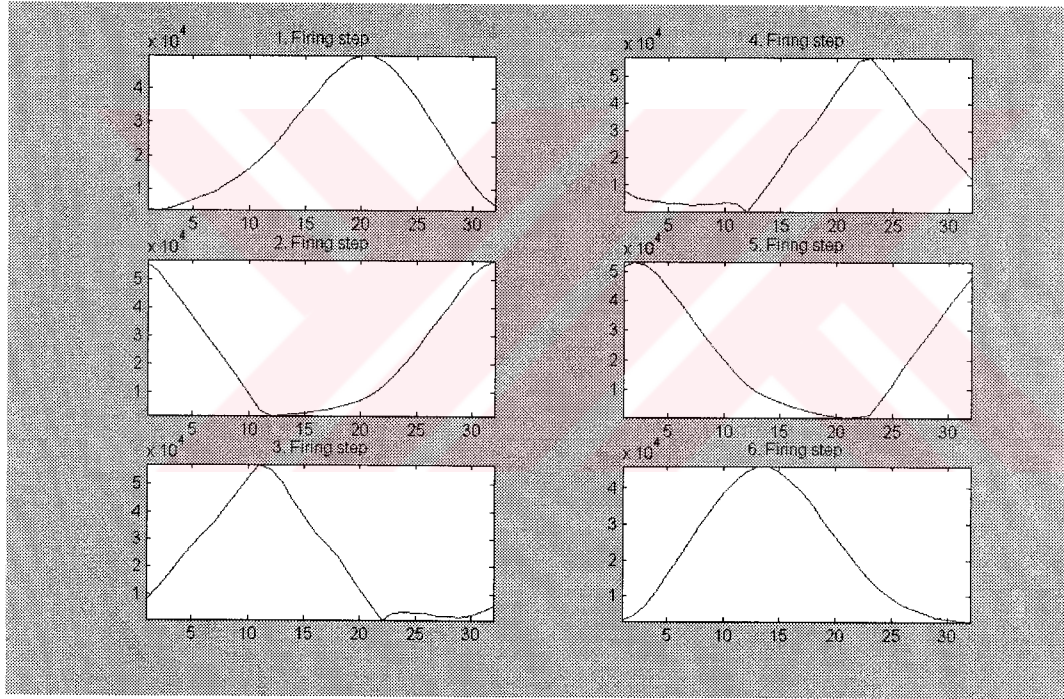
Eleman sayısının, çözünürlüğü doğrudan etkilediği bilinmektedir. Görüntünün çözünürlüğünü artırmak için farklı adımlarda elde edilen düşük çözünürlüklü görüntüler toplanarak yüksek çözünürlüklü bir görüntü oluşturulur. Bu toplama işlemi sırasında adımlara ait evreler birbirini yok eder ve geniş bir dönüştürücü diziliminden sinyal toplanmış gibi görüntü kalitesi artar.



Şekil EK-1.2: Etkin açıklığın sembolik olarak gösterimi

Gerçek zamanda görüntüleme yapabilmek için taranacak açı sayısında bir üst sınır mevcuttur. Altdizilim yöntemiyle her açıya birden fazla (ateşleme sayısı kadar) bakıldığı için en fazla taranacak açı sayısı daha da azalmaktadır. Fakat az sayıdaki açıdan demet toplanmasıyla istenen görüntü çözünürlüğü elde edilememektedir. Bu

sorunu gidermek için ortamdaki toplanan demetlerin sayısı artırılır. Demet sayısını artırma işlemi, yüksek çözünürlüklü görüntü oluşturmak üzere düşük çözünürlüklü görüntüler toplanmadan önce, demet uzayında örnek yükseltme işlemi ile gerçekleştirilir. Örnek yükseltme işleminde, mevcut demetlerin arasına yanıl eksende sıfırlar eklenir ve uygun bir süzgeç uygulanarak düzgünleştirilmiş yeni örnekler elde edilir. Süzgeçleme işleminde, farklı ateşleme adımlarına ait frekans bantlarının değişik uzaysal frekanslarda bulunması nedeniyle alçak geçiren bir süzgeç yerine, ateşleme adımlarına ait frekans aralığında çalışan bant geçiren süzgeçler kullanılır. Bant geçiren süzgeçlerin tasarımında ateşleme adımlarına ait evre bilgileri kullanılır.



Şekil EK-1.3: Farklı altdizilimlere ait etkin açıklıklar

Bu bölümde altdizilim evrelerinin hesaplanması ile ilgili işlemler gösterilmiştir.

Aldizilimlere ait evrenin hesaplanması için çalışmada kullanılan geciktir-ve-topla mantığıyla çalışan demetleme yönteminin aşağıdaki matematiksel modelden yola çıkılabilir:

$$Z_A(t) = \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^{N_r} A_{rc}[l] \sum_{m=1}^{N_t} A_{tr}[m] S\left(t - \frac{\rho_{k,l}}{c} - \frac{\rho_m}{c}\right) \quad (\text{EK-1.1})$$

bu formülde, $Z_A(t)$: demetleme sisteminin çıkış fonksiyonu, N_r : gönderme işleminde aktif olarak kullanılan dönüştürücü eleman sayısı, N_t : alma işleminde aktif olarak kullanılan dönüştürücü eleman sayısı, K : alma işlem sayısı veya ateşleme sayısı, $A_{tr}(m)$: ortama sinyal gönderilirken kullanılan dönüştürücü elemanlarının oluşturduğu açıklığın ağırlık fonksiyonu, $A_{rc}(l)$: ortamdan yansıyan sinyaller alınırken kullanılan dönüştürücü elemanlarının oluşturduğu açıklığın ağırlık fonksiyonu, $\rho_{k,l}$: alma işleminde dönüştürücü elemanı ile odak noktası arasındaki uzaklık, ρ_m : gönderme işleminde dönüştürücü elemanı ile odak noktası arasındaki uzaklık, $S(t - \rho_{k,l}/c - \rho_m/c)$: gönderme ve alma işlemlerine ait gecikmeler ile kaydırılmış sinyaldir.

Bu çalışmada uyarlamalı sistem kullanılmadığı ve apodization (tapering) yapılmadığı için $A_{tr}(m)$ ve $A_{rc}(l)$ ağırlık fonksiyonlarının değerleri 1 olarak alınmıştır. Bu durumda demetleme çıkış fonksiyonu aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$Z_A(t) = \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^{N_r} \sum_{m=1}^{N_t} S\left(t - \frac{\rho_{k,l}}{c} - \frac{\rho_m}{c}\right) \quad (\text{EK-1.2})$$

Bu denklemde en içteki toplam, gönderici elemanların bir odak noktasına sinyal demeti göndermesine karşılık gelir. Ortadaki toplam, alıcı elemanların yansıyan akustik sinyalleri algılamasına ve bu sinyalleri evreuyumlu olarak toplamalarına karşılık gelir. En dıştaki toplam ise düşük çözünürlüklü görüntülerin toplanmasına karşılık gelir. Bu sistemde, K adet düşük çözünürlüklü görüntülerin toplamından yüksek çözünürlüklü bir görüntü elde edilir. Yukarıda anlatılan örnek yükseltme işlemi en dıştaki toplam ile ortadaki toplam arasında yapılır. Burada kullanılacak süzgecin evresini hesaplamak için içteki 2 toplamın sonucunu k değişkenine (ateşleme adım indisine) bağlı olarak hesaplamak gerekmektedir.

Bu amaçla yukarıdaki denklem şöyle yazılabilir:

$$Z_k(t) = \sum_{l=1}^{N_r} \sum_{m=1}^{N_t} S\left(t - \frac{\rho_{k,l}}{c} - \frac{\rho_m}{c}\right) \quad (\text{EK-1.3})$$

Ultrasonik dönüştürücüler ortama sinüzoidal dalgalar yaymaktadır. Dönüştürücülerden alınan sinyaller, gönderilen sinyallerin geciktirilmiş şeklidir. Bu bilgilerden yola çıkarak gönderilen ve alınan sinyaller için ortak olarak $S(t) = e^{j\omega_0 t}$

yazılabilir ve $S\left(t - \frac{\rho_l}{c} - \frac{\rho_m}{c}\right) = e^{j\omega_0\left(t - \frac{\rho_{k,l}}{c} - \frac{\rho_m}{c}\right)}$ yukarıdaki denkleme yerleştirilir:

$$Z_k(t) = \sum_{l=1}^{N_r} \sum_{m=1}^{N_t} e^{j\omega_0\left(t - \frac{\rho_{k,l}}{c} - \frac{\rho_m}{c}\right)} = \sum_{l=1}^{N_r} \sum_{m=1}^{N_t} e^{j\omega_0 t} e^{-j\omega_0 \frac{\rho_{k,l}}{c}} e^{-j\omega_0 \frac{\rho_m}{c}} \quad (\text{EK-1.4})$$

$e^{j\omega_0 t}$, toplam indislerinden bağımsız olduğuna göre toplam işlemlerinin dışına çıkarılabilir:

$$Z_k(t) = e^{j\omega_0 t} \sum_{l=1}^{N_r} \sum_{m=1}^{N_t} e^{-j\omega_0 \frac{\rho_{k,l}}{c}} e^{-j\omega_0 \frac{\rho_m}{c}} \quad (\text{EK-1.5})$$

$S(t) = e^{j\omega_0 t}$, sistemin girişi olarak alındığında kısmi demetleyici sisteminin transfer fonksiyonu şu şekilde yazılabilir:

$$H_k(t) = \frac{Z_k(t)}{S(t)} = \sum_{l=1}^{N_r} \sum_{m=1}^{N_t} e^{-j\omega_0 \frac{\rho_{k,l}}{c}} e^{-j\omega_0 \frac{\rho_m}{c}} \quad (\text{EK-1.6})$$

Burada toplam içindeki gecikmeler birbirinden bağımsızdır ve ayrı toplamlara ait oldukları için, toplamlar aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$H_k(t) = \sum_{l=1}^{N_s} e^{-j\omega_0 \frac{\rho_{k,l}}{c}} \sum_{m=1}^{N_s} e^{-j\omega_0 \frac{\rho_m}{c}} \quad (\text{EK-1.7})$$

Bundan sonraki işlem gecikmelerin belirlenmesinde kullanılacak uzaklık bilgilerinin hesaplanmasıdır. Bu amaçla ayırık bir dizilimin yapısından yararlanılabilir. Şekil EK-1.4'de ayırık elemanlardan oluşan doğrusal bir dönüştürücü dizilimi ve ortamda bulunan bir odak noktası görülmektedir. Sinyal gönderme/alma işleminde bu odak noktasında güçlü bir sinyal oluşacak şekilde ayırık elemanlara gecikme uygulanır. Uygulanacak gecikme, ilgili eleman ile odak noktası arasındaki uzaklık ile doğru orantılıdır. Bu uzaklık basit geometrik bağıntılar kullanılarak bulunabilir. Nitekim Şekil EK-1.4'de kosinüs teoreminden yararlanarak,

$$\cos(\theta + 90) = -\frac{x_n^2 + r^2 - \rho_n^2}{2x_n r} \quad (\text{EK-1.8})$$

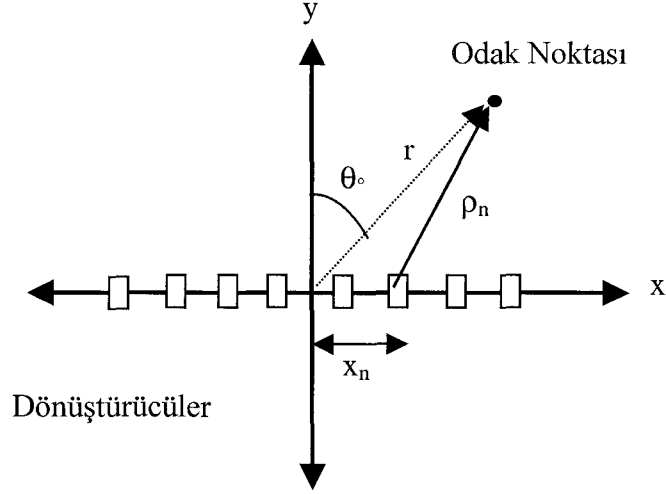
yazılabilir. Burada, x_n : gecikme zamanı hesaplanacak aktif dönüştürücü elemanı ile dönüştürücü merkezi arasındaki uzaklık, ρ_n : odak noktası ile dönüştürücü elemanı arasındaki uzaklık (gecikme zamanını belirler), r : odak noktası ile dönüştürücü merkezi arasındaki uzaklık ve θ : r vektörü ile y eksenini arasındaki açıdır. Yukarıdaki formül ρ_n için çözüldüğünde,

$$\rho_n^2 = x_n^2 + r^2 + 2x_n r \cos(\theta + 90) \quad (\text{EK-1.9})$$

bulunur. Bu denklemde kosinüs fonksiyonu yerine sinüs ($\cos(\theta + 90) = -\sin(\theta)$) kullanarak,

$$\rho_n^2 = x_n^2 + r^2 - 2x_n r \sin(\theta) \quad (\text{EK-1.10})$$

elde edilir.



Şekil EK-1.4: Ayrık elemanlardan oluşan doğrusal ve tek boyutlu bir dönüştürücü dizilimi

Her iki tarafın karekökü alındıktan sonra,

$$\rho_n = \sqrt{x_n^2 + r^2 - 2x_n r \sin(\theta)} = r \sqrt{1 + \frac{x_n^2}{r^2} - \frac{2x_n \sin(\theta)}{r}} \quad (\text{EK-1.11})$$

bulunur. Karekökün içindeki ifade ancak yaklaşım yöntemi uygulanarak çözebilir.

Bu amaçla, $\alpha = \frac{x_n^2}{r^2} - \frac{2x_n \sin(\theta)}{r}$ olarak alalım. $\alpha \ll 1$ için,

$$\rho_n = r\sqrt{1+\alpha} \cong r(1+\alpha/2) \quad (\text{EK-1.12})$$

olarak yazılabilir. α 'nın karşılığı formülde yerine yerleştirildiğinde,

$$\rho_n \cong r \left[1 + \frac{x_n^2}{2r^2} - \frac{x_n \sin(\theta)}{r} \right] \cong r + \frac{x_n^2}{2r} - x_n \sin(\theta) \quad (\text{EK-1.13})$$

bulunur. Burada, $x_n \sin(\theta)$ terimi yönlendirmeye ait gecikmeye karşılık

gelmektedir. $\frac{x_n^2}{2r}$ terimi ise, odaklamaya ait gecikmeye karşılık gelmektedir ve yanal çözünürlüğe bakılacağı için göz ardı edilebilir:

$$\rho_n \cong r - x_n \sin(\theta) \quad (\text{EK-1.14})$$

Gecikme zamanını belirleyen uzaklıklar, yukarıdaki indislere bağlı olarak gönderme ve alma işlemleri için şu şekilde yazılır:

$$\rho_{k,l} \cong r - x_{k,l} \sin(\theta) \quad (\text{EK-1.15})$$

$$\rho_m \cong r - x_m \sin(\theta) \quad (\text{EK-1.16})$$

Bu eşitlikler yukarıdaki formüle yerleştirilerek,

$$H_k(t) = \sum_{l=1}^{N_r} e^{-j\omega_0 \frac{r-x_{k,l} \sin(\theta)}{c}} \sum_{m=1}^{N_t} e^{-j\omega_0 \frac{r-x_m \sin(\theta)}{c}} \quad (\text{EK-1.17})$$

elde edilir. Burada $H_k(t)$ fonksiyonunun bağıl değişkeni t yerine r, θ kullanmak mümkündür. Toplam işlemlerinden bağımsız olan kısımlar dışarı çıkarılır:

$$H_k(r, \theta) = \sum_{l=1}^{N_r} e^{-j\omega_0 \frac{r}{c}} e^{j\omega_0 \frac{x_{k,l} \sin(\theta)}{c}} \sum_{m=1}^{N_t} e^{-j\omega_0 \frac{r}{c}} e^{j\omega_0 \frac{x_m \sin(\theta)}{c}} \quad (\text{EK-1.18})$$

$$H_k(r, \theta) = e^{-j\omega_0 \frac{2r}{c}} \sum_{l=1}^{N_r} e^{j\omega_0 \frac{x_{k,l} \sin(\theta)}{c}} \sum_{m=1}^{N_t} e^{j\omega_0 \frac{x_m \sin(\theta)}{c}} \quad (\text{EK-1.19})$$

Demetleyici sisteminin belirli bir derinlikteki noktasal dağılım fonksiyonu, yani yanal (açısal) cevabı incelenmek istendiği için derinlik bilgisini taşıyan $e^{-j\omega_0 \frac{2r}{c}}$ sabit evre terimi atılarak ve $H_k(t)$ fonksiyonunun değişkeni için sadece θ yazılarak

$$H_k(\theta) = \sum_{l=1}^{N_r} e^{j\omega_0 \frac{x_{k,l} \sin(\theta)}{c}} \sum_{m=1}^{N_t} e^{j\omega_0 \frac{x_m \sin(\theta)}{c}} \quad (\text{EK-1.20})$$

elde edilir.

Yukarıdaki formülde içteki toplam sinyal gönderme işlemiyle, dıştaki toplam ise sinyal alma işlemiyle ilgilidir. Her iki toplam da birbirinden bağımsızdır. Dolayısıyla bu formülü aşağıdaki gibi ikiye ayırmak mümkündür:

$$H_k(\theta) = H_{k,r}(\theta) H_t(\theta) \quad (\text{EK-1.21})$$

$$H_{k,r}(\theta) = \sum_{l=1}^{N_r} e^{j\omega_0 \frac{x_{k,l} \sin(\theta)}{c}} \quad (\text{EK-1.22})$$

$$H_t(\theta) = \sum_{m=1}^{N_t} e^{j\omega_0 \frac{x_m \sin(\theta)}{c}} \quad (\text{EK-1.23})$$

$H_{k,r}(\theta)$: k . adımdaki alma işlemi için tek yönlü transfer fonksiyonu,

$H_t(\theta)$: gönderme işlemi için tek yönlü transfer fonksiyonu,

$H_k(\theta)$: k . adımdaki alma ve gönderme işlemi için çift yönlü genel transfer fonksiyonudur.

İlk önce sinyal gönderme işlemi için tek yönlü transfer fonksiyonunu hesaplayalım:

$$H_t(\theta) = \sum_{m=1}^{N_t} e^{j\omega_0 \frac{x_m \sin(\theta)}{c}} \quad (\text{EK-1.24})$$

Gönderme işlemi sırasında aktif olan bir dönüştürücü elemanı ile dönüştürücü diziliminin merkezi arasındaki uzaklık $x_m = d \cdot \left[m - \frac{N_t + 1}{2} \right]$ olarak yazılabilir.

Burada dönüştürücü diziliminin merkezi sıfır koordinatı olarak kabul edilir. x_m

yukarıdaki formüle yerleştirildiğinde,

$$H_t(\theta) = \sum_{m=1}^{N_t} e^{j\omega_0 \frac{d \sin(\theta)}{c} (m - \frac{N_t+1}{2})} = e^{-j\omega_0 \frac{d \sin(\theta)}{c} (\frac{N_t+1}{2})} \sum_{m=1}^{N_t} e^{j\omega_0 \frac{d \sin(\theta)}{c} m} \quad (\text{EK-1.25})$$

eşitliği bulunur.

Toplamın karşılığını hesaplayabilmek için $\alpha = e^{j\omega_0 \frac{d \sin(\theta)}{c}}$ olarak alınır ve

$$\sum_{n=n_1}^{n_2} \alpha^n = \frac{\alpha^{n_2+1} - \alpha^{n_1}}{\alpha - 1} \quad \text{eşitliği kullanılarak,}$$

$$H_t(\theta) = e^{-j\omega_0 \frac{d \sin(\theta)}{c} (\frac{N_t+1}{2})} \frac{e^{j\omega_0 \frac{d \sin(\theta)}{c} (N_t+1)} - e^{j\omega_0 \frac{d \sin(\theta)}{c}}}{e^{j\omega_0 \frac{d \sin(\theta)}{c}} - 1} \quad (\text{EK-1.26})$$

bulunur. Bu fonksiyon sadeleştirilerek,

$$H_t(\theta) = \frac{e^{j\omega_0 \frac{d \sin(\theta)}{c} (\frac{N_t+1}{2})} - e^{-j\omega_0 \frac{d \sin(\theta)}{c} (\frac{N_t-1}{2})}}{e^{j\omega_0 \frac{d \sin(\theta)}{c}} - 1} \quad (\text{EK-1.27})$$

elde edilir. Bilindiği gibi bir dizilimin odak noktasında oluşturduğu tek yönlü noktasal dağılım fonksiyonu, dizilimin şeklinin Fourier dönüşümüdür. Burada kullanılan dizilim doğrusal olduğu için, noktasal dağılım fonksiyonunun sinc fonksiyonu şeklinde çıkması beklenir. Bu durumu görmek için yukarıdaki fonksiyonu sinüs fonksiyonları cinsinden yazmak gerekir. Bu amaçla gerekli düzenlemeler yapılarak,

$$H_t(\theta) = e^{j\omega_0 \frac{d \sin(\theta)}{2c}} \frac{e^{j\omega_0 \frac{d \sin(\theta)}{c} \frac{N_t}{2}} - e^{-j\omega_0 \frac{d \sin(\theta)}{c} \frac{N_t}{2}}}{e^{j\omega_0 \frac{d \sin(\theta)}{c}} - 1} \quad (\text{EK-1.28})$$

$$H_t(\theta) = \frac{e^{j\omega_0 \frac{d \sin(\theta)}{c} \frac{N_t}{2}} - e^{-j\omega_0 \frac{d \sin(\theta)}{c} \frac{N_t}{2}}}{e^{j\omega_0 \frac{d \sin(\theta)}{2c}} - e^{-j\omega_0 \frac{d \sin(\theta)}{2c}}} \quad (\text{EK-1.29})$$

$$H_r(\theta) = \frac{\sin(\omega_0 \frac{d \sin(\theta)}{2c} N_r)}{\sin(\omega_0 \frac{d \sin(\theta)}{2c})} \quad (\text{EK-1.30})$$

sinc fonksiyonu cinsinden beklenen sonuç bulunur.

Şimdi sinyal alma işlemi için tek yönlü transfer fonksiyonunu hesaplayalım:

$$H_{k,r}(\theta) = \sum_{l=1}^{N_r} e^{j\omega_0 \frac{x_{k,l} \sin(\theta)}{c}} \quad (\text{EK-1.31})$$

Sinyal alma işlemi sırasında aktif olan bir dönüştürücü elemanı ile dönüştürücü diziliminin merkezi arasındaki uzaklık $x_{k,l} = d \left[l + kN_r - \frac{KN_r + 1}{2} - N_r \right]$ olarak yazılabilir. $x_{k,l}$ yukarıdaki formüle yerleştirildiğinde,

$$H_{k,r}(\theta) = \sum_{l=1}^{N_r} e^{j\omega_0 \frac{d \sin(\theta)}{c} \left[l + kN_r - \frac{KN_r + 1}{2} - N_r \right]} = e^{j\omega_0 \frac{d \sin(\theta)}{c} \left[kN_r - \frac{KN_r + 1}{2} - N_r \right]} \sum_{l=1}^{N_r} e^{j\omega_0 \frac{d \sin(\theta)}{c} l} \quad (\text{EK-1.32})$$

eşitliği bulunur.

Toplamın karşılığını hesaplayabilmek için $\alpha = e^{j\omega_0 \frac{d \sin(\theta)}{c}}$ olarak alınır ve

$$\sum_{n=n_1}^{n_2} \alpha^n = \frac{\alpha^{n_2+1} - \alpha^{n_1}}{\alpha - 1} \quad \text{eşitliği kullanılarak,}$$

$$H_{k,r}(\theta) = e^{j\omega_0 \frac{d \sin(\theta)}{c} \left[kN_r - \frac{KN_r + 1}{2} - N_r \right]} \frac{e^{j\omega_0 \frac{d \sin(\theta)}{c} (N_r + 1)} - e^{j\omega_0 \frac{d \sin(\theta)}{c}}}{e^{j\omega_0 \frac{d \sin(\theta)}{c}} - 1} \quad (\text{EK-1.33})$$

elde edilir. Bu fonksiyonu sinüs fonksiyonları cinsinden yazmak için gerekli düzenlemeler yapılarak,

$$H_{k,r}(\theta) = e^{j\omega_0 \frac{d \sin(\theta)}{c} \left[kN_r - \frac{KN_r + 1}{2} - N_r + 1 \right]} \frac{e^{j\omega_0 \frac{d \sin(\theta)}{c} N_r} - 1}{e^{j\omega_0 \frac{d \sin(\theta)}{c}} - 1} \quad (\text{EK-1.34})$$

$$H_{k,r}(\theta) = e^{j\omega_0 \frac{d \sin(\theta)}{c} \left[kN_r - \frac{KN_r}{2} - \frac{N_r}{2} + 1 \right]} \frac{e^{j\omega_0 \frac{d \sin(\theta)}{c} \frac{N_r}{2}} - e^{-j\omega_0 \frac{d \sin(\theta)}{c} \frac{N_r}{2}}}{e^{j\omega_0 \frac{d \sin(\theta)}{c}} - 1} \quad (\text{EK-1.35})$$

$$H_{k,r}(\theta) = e^{j\omega_0 \frac{d \sin(\theta)}{c} \left[kN_r - \frac{KN_r}{2} - \frac{N_r}{2} \right]} \frac{e^{j\omega_0 \frac{d \sin(\theta)}{c} \frac{N_r}{2}} - e^{-j\omega_0 \frac{d \sin(\theta)}{c} \frac{N_r}{2}}}{e^{j\omega_0 \frac{d \sin(\theta)}{2c}} - e^{-j\omega_0 \frac{d \sin(\theta)}{2c}}} \quad (\text{EK-1.36})$$

$$H_{k,r}(\theta) = e^{j\omega_0 \frac{d \sin(\theta)}{c} \left[kN_r - \frac{KN_r}{2} - \frac{N_r}{2} \right]} \frac{\sin(\omega_0 \frac{d \sin(\theta)}{2c} N_r)}{\sin(\omega_0 \frac{d \sin(\theta)}{2c})} \quad (\text{EK-1.37})$$

bulunur. Sinyal alma işlemine ait transfer fonksiyonunda sinc fonksiyonunun yanında bir de evre terimi gelmektedir. Bu terim alma işleminde kullanılan altdizilimlerin geniş bir dizilim üzerinde elektronik çoğullama ile yer değiştirilmesinden kaynaklanmaktadır.

Sinyal gönderme ve alma işlemlerine ait tek yönlü transfer fonksiyonları birbirleriyle çarpılarak çift yönlü transfer fonksiyonu bulunur:

$$H_k(\theta) = H_{k,r}(\theta) H_t(\theta) \quad (\text{EK-1.38})$$

$$H_k(\theta) = e^{j\omega_0 \frac{d \sin(\theta)}{c} \left[kN_r - \frac{KN_r}{2} - \frac{N_r}{2} \right]} \frac{\sin(\omega_0 \frac{d \sin(\theta)}{2c} N_r)}{\sin(\omega_0 \frac{d \sin(\theta)}{2c})} \frac{\sin(\omega_0 \frac{d \sin(\theta)}{2c} N_r)}{\sin(\omega_0 \frac{d \sin(\theta)}{2c})} \quad (\text{EK-1.39})$$

Aldizilim ile demetleme sisteminin k . ateşleme adımına ait çıkış fonksiyonu veya noktasal dağılım fonksiyonu üzerinde aşağıdaki değişken dönüşümleri yapılabilir:

$$c = f_0 \lambda \quad \Rightarrow \quad \frac{\omega_0}{c} = \frac{2\pi f_0}{f_0 \lambda} = \frac{2\pi}{\lambda} \quad \text{kullanılarak}$$

$$H_k(\theta) = e^{j \frac{\pi d \sin(\theta)}{\lambda} [2k - K - 1] N_r} \frac{\sin\left(\frac{\pi}{\lambda} d \sin(\theta) N_r\right) \sin\left(\frac{\pi}{\lambda} d \sin(\theta) N_t\right)}{\sin\left(\frac{\pi}{\lambda} d \sin(\theta)\right) \sin\left(\frac{\pi}{\lambda} d \sin(\theta)\right)} \quad (\text{EK-1.40})$$

elde edilir. Bu formülde 2 sinc fonksiyonunun çarpımı görülmektedir; bunlardan biri gönderme, diğeri ise alma işlemlerine aittir. Baştaki evre terimi ise k. ateşleme adımında altdizilime ait evredir. Bu formülden çıkarılan aşağıdaki evre, yanal ekseninde yapılacak olan örnek yükseltme işleminde aradeğerleme süzgecinin tasarlanması aşamasında kullanılacaktır.

$$\Phi_k(\theta) = \frac{\pi d \sin(\theta)}{\lambda} [2k - K - 1] N_r \quad (\text{EK-1.41})$$

Altdizilim ile demetleme sisteminin genel olarak çıkış fonksiyonunu bulmak için yukarıdaki formül k indisi üzerinden 1'den K 'ya (ateşleme sayısına) kadar toplanmalıdır:

$$H(\theta) = \sum_{k=1}^K H_k(\theta) \quad (\text{EK-1.42})$$

$$H(\theta) = \sum_{k=1}^K e^{j \frac{\pi d \sin(\theta)}{\lambda} [2k - K - 1] N_r} \frac{\sin\left(\frac{\pi}{\lambda} d \sin(\theta) N_r\right) \sin\left(\frac{\pi}{\lambda} d \sin(\theta) N_t\right)}{\sin\left(\frac{\pi}{\lambda} d \sin(\theta)\right) \sin\left(\frac{\pi}{\lambda} d \sin(\theta)\right)} \quad (\text{EK-1.43})$$

Toplamın içindeki bağımsız terimler dışarı çıkarılır:

$$H(\theta) = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{\lambda} d \sin(\theta) N_r\right) \sin\left(\frac{\pi}{\lambda} d \sin(\theta) N_r\right)}{\sin\left(\frac{\pi}{\lambda} d \sin(\theta)\right) \sin\left(\frac{\pi}{\lambda} d \sin(\theta)\right)} \sum_{k=1}^K e^{j \frac{\pi d \sin(\theta)}{\lambda} [2k-K-1] N_r} \quad (\text{EK-1.44})$$

$$H(\theta) = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{\lambda} d \sin(\theta) N_r\right) \sin\left(\frac{\pi}{\lambda} d \sin(\theta) N_r\right)}{\sin\left(\frac{\pi}{\lambda} d \sin(\theta)\right) \sin\left(\frac{\pi}{\lambda} d \sin(\theta)\right)} e^{j \frac{\pi d \sin(\theta)}{\lambda} [-K-1] N_r} \sum_{k=1}^K e^{j \frac{\pi d \sin(\theta)}{\lambda} 2N_r k} \quad (\text{EK-1.45})$$

Toplamın karşılığını hesaplayabilmek için $\alpha = e^{j \frac{\pi d \sin(\theta)}{\lambda} 2N_r}$ olarak alınır ve

$$\sum_{n=n_1}^{n_2} \alpha^n = \frac{\alpha^{n_2+1} - \alpha^{n_1}}{\alpha - 1} \quad \text{eşitliği kullanılarak,}$$

$$e^{j \frac{\pi d \sin(\theta)}{\lambda} [-K-1] N_r} \sum_{k=1}^K e^{j \frac{\pi d \sin(\theta)}{\lambda} 2N_r k} = e^{j \frac{\pi d \sin(\theta)}{\lambda} [-K-1] N_r} \frac{e^{j \frac{\pi d \sin(\theta)}{\lambda} 2N_r (K+1)} - e^{j \frac{\pi d \sin(\theta)}{\lambda} 2N_r}}{e^{j \frac{\pi d \sin(\theta)}{\lambda} 2N_r} - 1} \quad (\text{EK-1.46})$$

$$= e^{j \frac{\pi d \sin(\theta)}{\lambda} [-KN_r - N_r]} \frac{e^{j \frac{\pi d \sin(\theta)}{\lambda} [2KN_r + 2N_r]} - e^{j \frac{\pi d \sin(\theta)}{\lambda} 2N_r}}{e^{j \frac{\pi d \sin(\theta)}{\lambda} 2N_r} - 1} \quad (\text{EK-1.47})$$

$$= \frac{e^{j \frac{\pi d \sin(\theta)}{\lambda} [KN_r + N_r]} - e^{j \frac{\pi d \sin(\theta)}{\lambda} [-KN_r + N_r]} e^{j \frac{\pi d \sin(\theta)}{\lambda} (-N_r)}}{e^{j \frac{\pi d \sin(\theta)}{\lambda} 2N_r} - 1} \quad (\text{EK-1.48})$$

$$= \frac{e^{j \frac{\pi d \sin(\theta)}{\lambda} KN_r} - e^{j \frac{\pi d \sin(\theta)}{\lambda} (-KN_r)}}{e^{j \frac{\pi d \sin(\theta)}{\lambda} N_r} - e^{j \frac{\pi d \sin(\theta)}{\lambda} (-N_r)}} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{\lambda} d \sin(\theta) KN_r\right)}{\sin\left(\frac{\pi}{\lambda} d \sin(\theta) N_r\right)} \quad (\text{EK-1.49})$$

elde edilen eşitlik yukarıdaki formülde yerine yerleştirilince,

$$H(\theta) = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{\lambda} d \sin(\theta) N_r\right) \sin\left(\frac{\pi}{\lambda} d \sin(\theta) N_r\right) \sin\left(\frac{\pi}{\lambda} d \sin(\theta) K N_r\right)}{\sin\left(\frac{\pi}{\lambda} d \sin(\theta)\right) \sin\left(\frac{\pi}{\lambda} d \sin(\theta)\right) \sin\left(\frac{\pi}{\lambda} d \sin(\theta) N_r\right)} \quad (\text{EK-1.50})$$

bulunur. Sadeleştirmeden sonra altdizilim ile demetleme sisteminin genel çıkış fonksiyonu bulunur:

$$H(\theta) = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{\lambda} d \sin(\theta) K N_r\right) \sin\left(\frac{\pi}{\lambda} d \sin(\theta) N_r\right)}{\sin\left(\frac{\pi}{\lambda} d \sin(\theta)\right) \sin\left(\frac{\pi}{\lambda} d \sin(\theta)\right)} \quad (\text{EK-1.51})$$

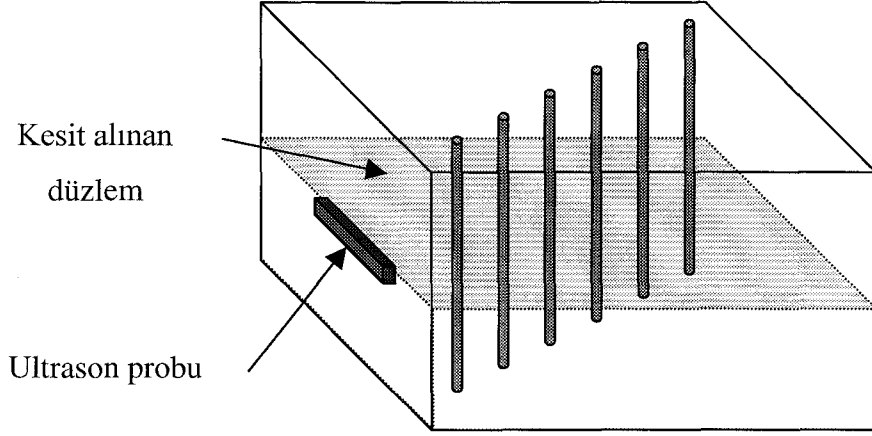
Bu çıkış fonksiyonu incelendiğinde, altdizilim ile demetleme sisteminin sinyal alma işlemi sırasında, K adet ateşleme adımının her birinde N_r adet eleman kullanarak, toplam $K N_r$ adet elemanlı bir büyük dizilimi sentezlediği görülmektedir.

EK-2 DENEY DÜZENEĞİ HAKKINDA BİLGİ

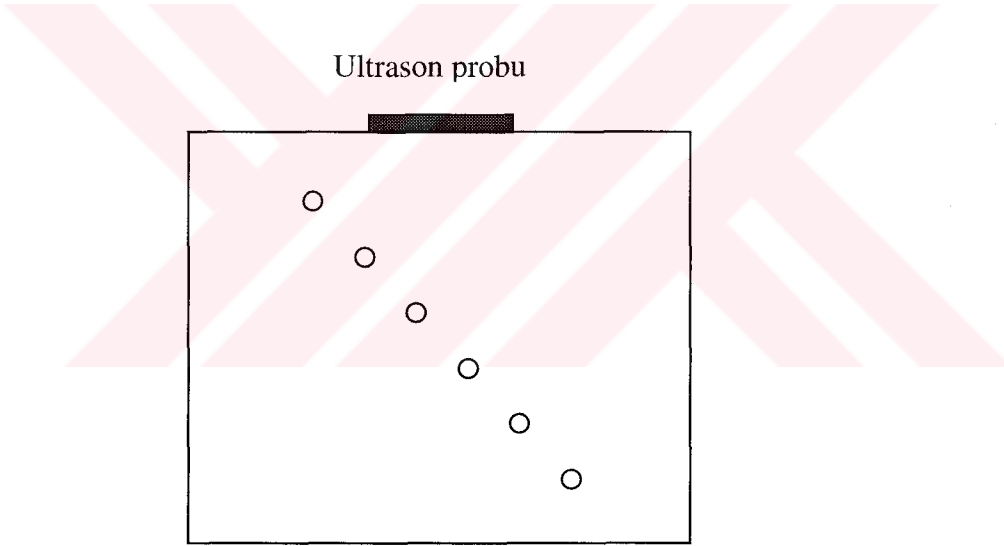
Delta-sigma örnekleme altdizilim işlemeye dayalı demetleme yöntemi, çeşitli evreuyumlu görüntüleme sistemleri için uygulanabilir. Bu çalışmada, yöntemin özellikle ultrasonik görüntüleme sisteminde kullanımı üzerinde deneysel incelemeler yapılmıştır. Bu incelemelerde, daha önceki çalışmalarda [28] hazırlanmış bir deney düzeneğinden elde edilen ham veriler bilgisayar ortamında işlenerek sonuçlar bulunmuştur. Bu veriler özel bir şekilde toplandığı için, her türlü demetleme yönteminin test edilmesinde kolaylıkla kullanılabilir. Konu ile ilgili yapılan diğer çalışmalarda aynı veya benzer veriler kullanılarak deneysel sonuçlar incelenmektedir [88, 92, 96, 97, 98, 99, 107, 108].

Bu çalışmada deneysel incelemelerde kullanılan veriler, kutupsal koordinat sisteminde farklı açılarda ve derinliklerde bulunan 6 adet tel ile oluşturulmuş deney ortamından alınmıştır. Bu teller bir sıvı tankı içinde bulunur ve noktasal kaynak gibi davranırlar (Şekil EK-2.1, Şekil EK-2.2). Bu veriler kullanılarak yapılan incelemelerde farklı koordinatlarda sistemin noktasal dağılım fonksiyonları hakkında bilgi edinilmektedir. Ultrason sinyallerinin deney düzeneğindeki sıvı içinde yayılma hızı yaklaşık 1480 m/s'dir.

Bu deney düzeneğinde kullanılan ultrason probu (Acuson, Model #: V328), 128 elemanlı doğrusal bir dönüştürücü dizilimine sahiptir. Her iki elemanın arasında yaklaşık 0.22 mm boşluk vardır. Ultrasonik dönüştürücülerin çalışma frekansı 3.5 MHz'dir. Dönüştürücüden alınan veriler 13.89 MHz frekansında 10-bit olarak örneklenmiştir. Tellerden oluşan ortamdaki yaklaşık 120 mm derinliğe kadar 2048 adet örnek alınmıştır.



Şekil EK-2.1: Bir sıvı tankı içinde 6 adet telden oluşan deney ortamı



Şekil EK-2.2: Ultrason probunun kesit aldığı düzlemi kesen tellerin yerleşimi

Veri toplama işlemi birçok adımdan oluşmaktadır. Sırayla her bir dönüştürücü elemanı ateşlenip ortama yayılan ve sonra tellerden yansıyan akustik sinyaller diğer bütün dönüştürücü elemanlarından ayrı kaydedilmiştir. 128 defa ateşleme yapılmış, her ateşlemede de 128 ayrı kanaldan sinyal toplanmıştır, dolayısıyla 128x128'lik bir veri kümesi elde edilmiştir. Bu veriler aşağıdaki tabloda gösterilen şekilde bir dosyada saklanmıştır [102].

Çizelge EK-2.1: Deney düzeneğinde toplanan ham verilerin dosyada saklanma şekli

Kayıt	1	2	3	4	...	128	129	130	131	...	16384
Gönderen eleman	1	1	1	1	...	1	2	2	2	...	128
Alan eleman	1	2	3	4	...	128	1	2	3	...	128

ÖZGEÇMİŞ

Hasan Şakir Bilge, 1968 yılında İstanbul'da doğdu. Lisans eğitimini 1992'de Yıldız Teknik Üniversitesi Bilgisayar ve Bilimleri Mühendisliği'nde, yüksek lisansı 1997'de Kırıkkale Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği'nde tamamladı. Şu anda Başkent Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği'nde öğretim görevlisi olarak çalışmaktadır. İlgilendiği konular, sinyal işleme, dizilimsel sinyal işleme, demetleme, görüntü işleme, ultrasonik görüntülemedir. Evli ve 2 çocuk babasıdır. Çok iyi derecede İngilizce ve Almanca bilir.

YAYINLAR

Yüksek Lisans Tezi Kapsamında Yapılan Yayınlar

Yüksek Lisans Tezinin Adı: Yapay açıklığa dayalı ultrasonik görüntüleme için hareket tahmini, 1997.

Yüksek Lisans Tezinin İlgili Olduğu Anabilim Dalı: Elektrik-Elektronik Mühendisliği

Yüksek lisans çalışması kapsamında 1 adet ulusal, 2 adet uluslar arası olmak üzere toplam 3 konferans bildirisi hazırlanmış ve sunulmuştur. Ayrıca yüksek lisans tezinde yapılan çalışma 1 adet uluslar arası hakemli dergide yayınlanmıştır:

A. Uluslar arası Hakemli Dergi

1. M. Karaman, H.Ş. Bilge, M. O'Donnell, "Adaptive multi-element synthetic aperture imaging with motion and phase aberration correction", IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 45(4): 1077-1087, Temmuz 1998.

B. Uluslar arası Konferans Bildirileri

1. H.Ş. Bilge, M. Karaman, "Correlation analysis of ultrasonic speckle for motion estimation", Proceedings of IEEE Digital Signal Processing Workshop, 211-214, Eylül 1996.
2. H.Ş. Bilge, M. Karaman, M. O'Donnell, "Motion estimation using common spatial frequencies in synthetic aperture imaging", Proceedings of IEEE International Ultrasonics Symposium, 1551-1554, Kasım 1996.

C. Ulusal Konferans Bildirileri

1. H.Ş. Bilge, M. Karaman, “Yapay demetlemeye dayalı ultrasonik görüntüleme hareket tahmini”, 4. Sinyal İşleme ve Uygulamaları Kurultayı Bildiriler Kitabı, 427-432, Nisan 1996.

Doktora Tezi Kapsamında Yapılan Yayınlar

Bu doktora çalışması kapsamında 5 adet ulusal ve 2 adet uluslararası olmak üzere toplam 7 konferans bildirisi hazırlanmış ve sunulmuştur:

A. Uluslararası Konferans Bildirileri

1. H.Ş. Bilge, M. Karaman, “Subarray delta-sigma beamforming for ultrasonic imaging”, Proceedings of IEEE International Ultrasonics Symposium, Ekim 2002.
2. H.Ş. Bilge, M. Karaman, “Subarray delta-sigma beamforming for low-cost underwater acoustic imaging”, Proceedings of Oceans 2002 MTS/IEEE Conference, 2152-2155, Ekim 2002.

B. Ulusal Konferans Bildirileri

1. M. Karaman, M.A. Abul, S. Onart, H.Ş. Bilge, “Evreyuymulu görüntüleme sistemleri için demetleme yöntemleri”, IEEE-Sinyal İşleme ve Uygulamaları Kurultayı Bildiriler Kitabı, 692-697, Haziran 2000.
2. H.Ş. Bilge, T. Çiftçiabaşı, “Verimli bir demetleme yöntemi ile ultrasonik görüntüleme”, URSI-Türkiye 2002 Birinci Ulusal Kongresi, 431-434, Eylül 2002.
3. H.Ş. Bilge, T. Çiftçiabaşı, “Robotlarda akustik algılayıcılar ile görme sistemi için bir demetleme yöntemi”, Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı, Eylül 2002.
4. H.Ş. Bilge, N. Güven, L. Özparlak, M. Karaman, “Delta-sigma örnekleme alt dizilim sinyallerinin sayısal işlenmesine dayalı evreyuymulu görüntüleme”, IEEE-Sinyal İşleme ve Uygulamaları Kurultayı Bildiriler Kitabı, 687-691, Haziran 2000.

5. H.Ş. Bilge, M. Karaman, “Alt dizilimden dinamik odaklama ile alınan sinyallerin sigma delta çevirici ile örneklenecek etkin bir yöntemle işlenmesi”, 10. Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı Bildiriler Kitabı, 344-349, Haziran 2002.

Bu yayınlardan URSI (Union Radioscience International) Türk Milli Komitesi tarafından düzenlenen URSI-Türkiye’2002 bilimsel kongresinde sunulan bildiri, lisansüstü öğrenci bildiri yarışmasında en iyi bildiri üçüncülük ödülü almıştır.

Diğer Yayınlar

1. H.Ş. Bilge, “Ultrasonik görüntüleme için bir uyarlanı histogram denkleştirme yöntemi”, 10. Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı Bildiriler Kitabı, Haziran 2002.
2. B. Kepenekçi, H.Ş. Bilge, M. Karaman, “Beneksel gürültülü imgeler için bir bölütleme yöntemi”, IEEE-Sinyal İşleme ve Uygulamaları Kurultayı Bildiriler Kitabı, 422-426, Haziran 2000.
3. F.B. Tek, H.Ş. Bilge, M. Karaman, “Beneksel gürültünün uyarlanı süzgeçlenmesi”, IEEE-Sinyal İşleme ve Uygulamaları Kurultayı Bildiriler Kitabı, 634-639, Haziran 2000.