

FOR REFERENCE

NOT TO BE TAKEN FROM THIS ROOM

SAYISAL VE ANALOG HOLOGRAFI İLE İLETİŞİM VE BİLGİ İŞLEME İÇİN GELİŞTİRİLEN BAZI YENİ YÖNTEMLER

Dr. Okan Ersoy
Boğaziçi Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi

Bogazici University Library



39001100543613

14

Eylül 1978
Doçentlik Tezi

ÖZET

Sayısal ve analog holografinin iletişim, elektronik deteksiyon ve kaydetme ve bilgi işleme konuları ile olan ilişkisi incelenmiş ve holografinin bu konularla ilgili uygulamalarında karşılaşılan problemleri azaltan yeni yöntemler geliştirilmiştir. Problemlerin çoğunun uzaysal band genişliği ve kullanılan aygıtların hız sınırlılığı ile yakından ilişkisi olduğu görülmüştür. Uzaysal band genişliği sınırını arttırmak için taramalı elektron mikroskop sistemi üstünde durulmuş, bu sistem ile kullanılan pozitif ve negatif resistlerin özelliklerini açıklayan teorik bir model geliştirilmiş ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Hem taramalı elektron mikroskop sistemi hem de diğer sistemler ile kolaylıkla kullanılabilen, yeni sayısal ve analog holografi yöntemlerinin geliştirilmesinde faydalı bulunan bilgisayar ile hesaplamaya uygun bir uzaysal FM modülasyon yöntemi geliştirilmiş ve bu yöntem kullanılarak ilk defa taramalı elektron mikroskop sistemi ile üç boyutlu uzaysal işaret veren sayısal hologramlar gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen modülasyon yöntemi küresel taşıyıcı dalgalar için genelleştirilmiş ve istenen işaretin bütün uzayda harmonik işaretler ile karışım olmadan elde edilmesini sağlayan ve tek işaretli holografi olarak adlandırılan bir yöntem geliştirilmiş ve deneyler ile kanıtlanmıştır. Bir yandan kullanılması istenen bir elektronik veya iletişim



sisteminin özelliklerine, örneğin band genişliğine, göre uyarlanabilen öte yandan herhangi bir uzaysal işaretin ve kullanılan uzaysal dalgaların gerektirdiği band genişliği ve duyarlılık gibi gereksinmelere cevap verebilen ve virtüel holografi olarak adlandırılan bir yöntem geliştirilmiş ve deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Virtüel holografi yönteminde iki ayrı hologram mevcuttur. Gerçek hologram fiziksel olarak gerçekleştirilen ve kullanılması arzu edilen teknolojinin özelliklerine göre uyarlanabilen hologramdır. Dolayısıyla gerçek hologram iletişim teorisindeki kanal kodlamasının eşleniğidir. Virtüel hologram ise gerçek hologramın imgesi olup fiziksel olarak bir ortamda kaydedilmeden mevcuttur ve taşıyıcı dalga ile işaretin gereksinmelerine uygundur. Diğer bir deyimle kaynak kodlaması virtüel hologram ile elde edilmektedir. Arada gerçek hologramı virtüel holograma dönüştüren bir optik sistem mevcuttur. Virtüel holografi yönteminin çeşitli problemlere çözüm getirdiği görülmüştür.

İÇİNDEKİLER

Sahife

BÖLÜM 1 - GİRİŞ VE PROBLEMLERİN TANIMI	1
1.1 Giriş	1
1.2 Problemlerin Tanımı	10
1.3 Çalışma Planı	13
1.4 Bu Çalışmanın Getirdiği Yenilikler	15
BÖLÜM 2 - HOLOGRAFI VE DİĞER KONULARLA OLAN İLİŞKİSİ	21
2.1 Giriş	21
2.2 Uzaysal Dalgalar	23
2.3 Doğrusal Sistemler	28
2.4 Huygens-Fresnel İlkesi	30
2.5 Fresnel ve Fraunhofer Yaklaşımları	32
2.6 Holografi, Modülasyon ve Doğrusal Sistemler	35
2.7 Hologram Band Genişliği, Hızlılık ve Duyarlılık	47
BÖLÜM 3 - YENİ BİR KODLAMA YÖNTEMİ	53
3.1 Giriş	53
3.2 Taramalı Elektron Mikroskop Sistemi	54
3.3 Açıklıkların Etkisi	60
3.4 Yöntem	61
3.5 Deneyler	65
3.6 İşaret Analizi	69
3.7 Sonuçlar	72
BÖLÜM 4 - TEK İŞARETLİ HOLOGRAFI	75
4.1 Giriş	75
4.2 Küresel Taşıyıcı Dalga Kullanan Bir Yöntem	77
4.3 İşaret Analizi	80
4.4 Deneyler	85
4.5 Diğer Yöntemler	98
4.6 Analog Holografi	102
4.7 Sonuçlar	103

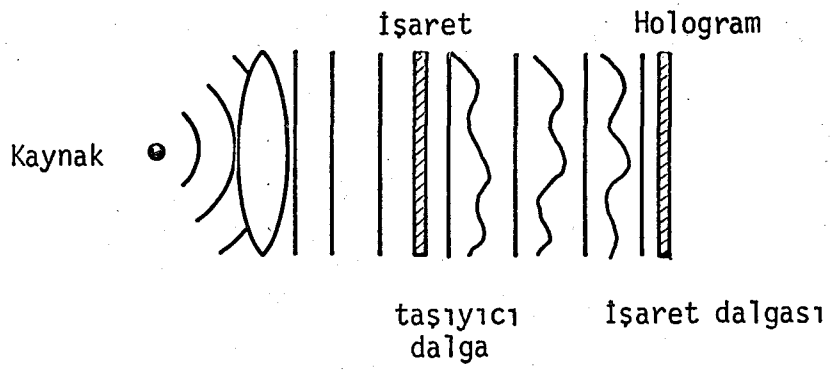
	<u>Sahife</u>
BÖLÜM 5 - VİRTÜEL HOLOGRAFI	105
5.1 Giriş	105
5.2 Virtüel Holografının Tanımı	106
5.3 Fazın Belirlenmesi	111
5.4 Sayısal Virtüel Holografi	115
5.5 Ön Deneyler	116
 BÖLÜM 6 - VİRTÜEL HOLOGRAFININ İNCELENMESİ	 126
6.1 Giriş	126
6.2 Açıklıkların Etkisi	127
6.3 İşaret Analizi	130
6.4 Analog Virtüel Holografi	133
6.5 Hologram Büyüklüğü, Duyarlılık, Band Genişliği ve Gereğinden Fazla Bili	135
6.6 Hacim Etkileri	139
6.7 Distorsiyonların Azaltılması ve Gerçek Zamanda Bilgi İşleme Olanakları	143
6.8 İletişim Açısından Virtüel Holografi	146
 BÖLÜM 7 - VİRTÜEL HOLOGRAFI İLE DENEYLER	 152
7.1 Giriş	152
7.2 Xerox Hologramları	154
7.3 Hacim Etkileri ile İlgili Deneyler	157
7.4 Kitaplar, Yayınlar ve Virtüel Holografi	164
7.5 Ses Dalgaları ile Virtüel Holografi	175
7.6 Analog Virtüel Holografi ile İlgili Deneyler	183
 BÖLÜM 8 - SONUÇLAR ÜZERİNE YORUMLAR VE ÖNERİLER	 193
 EKLER	 203
Ek.1 Referanslar	203
Ek.2 Elektron Işını ile Pozitif ve Negatif Resistlerin Etkinmesi	206
Ek.3 Bilgisayar Programları	223

BÖLÜM 1 - GİRİŞ VE PROBLEMLERİN TANIMI

1.1 G i r i ş

Holografi, optik iletişim ve optik bilgi işleme yöntemleri çeşitli uygulama alanlarında yeni ufuklar açarak günümüzde çok önemli araştırma ve geliştirme çalışmalarına neden olmuşlardır. Holografi ilk defa 1947 yılında Gabor tarafından elektron mikroskopun duyarlılığını arttırmak için düşünülmüştür [1]. Amaç Şekil 1.1'de görüldüğü gibi bir uzaysal taşıyıcı dalganın başka bir uzaysal işaret dalgası ile karıştırılması ve meydana gelen bileşik dalganın film gibi çıkış fonksiyonu dalganın şiddeti ile orantılı iki veya üç boyutlu karesel detektör özelliği gösteren bir aygıt ile kaydedilmesiydi. Bu işlemin hem genlik hem de faz modülasyonuna eşdeğer olduğu ikinci bölümde belirtilecektir.

Holografide kullanılan işaret ve dalgaların en önemli özelliği uzaysal olmalarıdır. Uzaysal bir dalga propagasyon özellikleri uzaysal koordinatların fonksiyonu olan bir dalgadır. Uzaysal bir işaret iki veya üç boyutlu bir ortam içinde varolan ve uzaysal bir dalganın ortamdan geçmesi veya yansması ile dalganın kırınımını sağlayarak işaret dalgasına dönüştüren bir cisim veya aygıt ile elde edilir. Herhangi bir işaret akustik geciktirmeli ışık modülatörü [2] gibi aygıtlar ile



Şekil 1.1 - Gabor'un düşündüğü holografi yöntemi

uzaysal işaret şekline dönüştürülebilir. Bu durumda başlangıç işaretinin tekrar elde edilmesi için elektrooptik aygıtlar gereklidir [3]. Bundan sonra işaret kelimesi uzaysal işaret anlamında kullanılacaktır.

Holografide işaret dalgasının hem genliği hem de fazı kaydedildiğinden üç boyutlu bilginin tamamı korunmuş olmaktadır. Dolayısıyla elde edilen araca tüm resim anlamına gelen hologram adı verilmiştir. Hologramı işaretin kodlanmış şekli olarak düşünmek yerinde olur. Hologramın yeniden taşıyıcı dalga ile aydınlatılması ile kod çözümü sağlanır ve işaret elde edilir.

Holografinin en yakından ilgili olduğu konular iletişim elektronik deteksiyon ve kaydetme, elektromanyetik ve uyumlu dalga teorileri, bilgi işleme ve optiktir. Geliştirilen holografi yöntemlerinin birçoğu iletişim yöntemlerine benzerken, bilginin dalga cephesinde kaydedilmesi propagasyon ve kırınım problemlerini içermektedir. Yeni holografi yöntemlerinin geliştirilmesi çoğu zaman yeni optik düzenleri gerekli kılmaktadır. Hologramın elektronik aygıtlarla kaydedilmesi, deteksiyonu, ve iletilmesi çok yüksek uzaysal frekansların varlığı nedeni ile hızlılık gerektirmektedir.

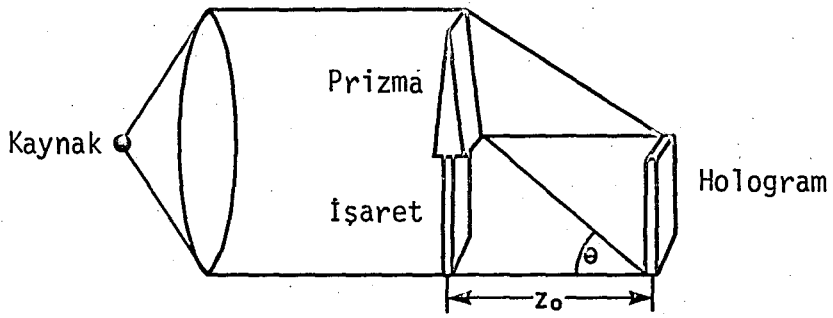
Hem holografi hem de çarpmalı karıştırmaya dayalı optik iletişim sistemleri taşıyıcı ve işaret dalgalarının uyumlu (coherent) olmasını gerektirir. Holografi yöntemi ilk defa düşünüldüğü senelerde ışık frekanslarında yeterli derecede uyumlu dalga üretilemiyordu. Bu güçlüğün yanısıra Gabor'un düşündüğü yöntemde istenen işaretin eşleniğini oluşturan dalga da meydana geliyor ve hem işaret hem de eşlenik

işaret dalgalarının propagasyonu uzayda aynı yönde olduğundan, işaret kolayca seçilemiyordu. Her iki problem Leith ve Upatnieks tarafından 1962 yılında çözüldü [4].

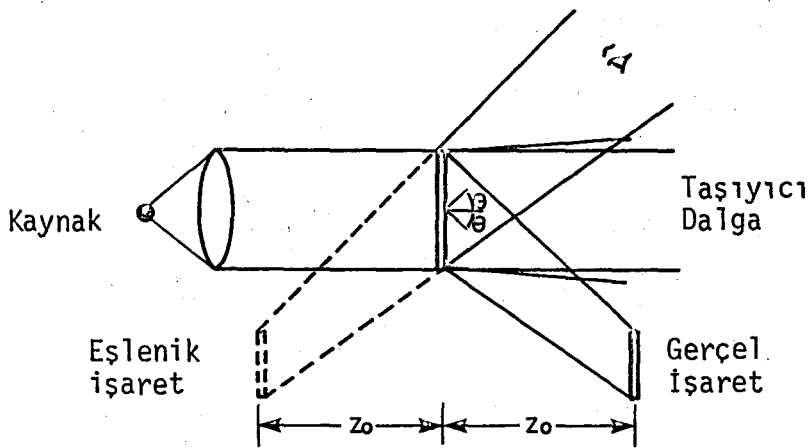
1960 yılında laser bulunmuştu. Bu sıralarda Leith ve Upatnieks yandan bakan radar sistemi ile uğraşmaktaydı. Her iki ilim adamı holografi yönteminin iletişim teorisi ile ilgisi üstünde durdular. Gabor yöntemine getirdikleri yenilik düzlem taşıyıcı dalga ile işaret dalgasının propagasyon yönleri arasında bir açı meydana getirerek işaret ve eşleniğinin spektrumlarını değişik yüksek frekanslara taşımaktı. Böylece işaretin ve eşleniğinin aynı yönde yolalması önlenmiş oluyordu. Leith ve Upatnieks modülasyon kuramlarında önemli yer tutan spektrum taşıma ilkesini bu şekilde laser ışını kullanarak holografide uyguladılar, ve ilk defa uygulama yönünden başarılı olan hologramları yaptılar. Kullandıkları yöntemin blok şeması Şekil 1.2'de görülmektedir. Şekil 1.3'de hologramın taşıyıcı dalga ile aydınlatılması ile kod çözülmesinin sağlanması, uzaysal işaret ve eşleniğinin meydana getirilişi gösterilmiştir.

Leith ve Upatnieks'in bu ilk başarılı holografi çalışmalarından sonra yandan bakan radar ve sonar sistemlerinin holografi ile olan yakın ilişkisi anlaşılmış ve yeni optik bilgi işleme yöntemleri kullanılarak uygulamada büyük başarılar elde edilmiştir [5].

Gabor'un düşündüğü holografi yöntemi sürekli değişkenleri içerdiğinden analog holografi olarak adlandırılacaktır.



Şekil 1.2 - Leith ve Upatnieks'in düşündüğü holografi yöntemi



Şekil 1.3 - Hologramın taşıyıcı dalga ile aydınlatılması ile kod
çözülmesinin sağlanması

1965 yılından sonra gelişmeye başlayan sayısal holografi ise bilgisayar ile holografi veya sentetik holografi olarak da bilinir. Sayısal holografide holografi süreci kırınma teorisi ve bilgisayar kullanarak hesaplanmakta ve uygun bir fiziksel ortamda hologram kaydedilmektedir. Örneğin, işaret dalgasının genlik ve faz bileşenleri iki veya üç boyutlu matris noktalarında örnekleme yapılarak ve çoğunlukla hızlı Fourier dönüşümü (FFT) kullanılarak bulunmaktadır. Daha sonra kullanılan kodlama yöntemleri genellikle sayısal iletişimde kullanılan kodlama yöntemlerine benzemektedir [6].

Akustik, ultrasonik ve mikrodalga holografi yöntemlerinde ise işaret dalgasının genlik ve faz bileşenleri hologramı meydana getiren matris noktalarındaki detektörler düzeni ile ölçülmektedir [7]. Örnekleme noktalarında taşıyıcı dalga işaret dalgasına elektronik olarak veya bilgisayar ile eklendikten sonra elde edilen iki veya üç boyutlu dalga örnekleri hologramı çizmekte kullanılacak teknolojiye uygun olarak sayısal holografide olduğu gibi kodlanmaktadır. Dolayısıyla akustik, ultrasonik ve mikrodalga holografi yöntemleri sayısal holografinin bir bölümü sayılabilir.

Hologramın çizilmesinde en çok kullanılan teknoloji tımlleşik devre yapımında kullanılan teknolojidir. Hologram ilkönce bir bilgisayar ile kontrol edilen bir çizici, örneğin "Calcomp" çizicisi, ile büyük olarak çizilir. Daha sonra çok duyarlı bir kamera ile küçültülerek optik hologram meydana getirilir. Bu çalışmada kullanılan ve ileride incelenecek taramalı elektron mikroskop sistemi

ile her iki işlem aynı anda yapılmaktadır. Optik hologram bilginin gözle görülebilirliğini sağlamaktadır.

Optik bilgi işleme yöntemleri optik ve elektrooptik aygıtlar ile gerçekleştirilen, Fourier spektrum analizi, uzaysal süzgeçleme, şekil tanıma, çok hızlı bilgi işleme gibi konuları içeren yöntemlerdir ve son yıllarda yeni aşamalar sağlamışlardır. Aynı zamanda optik iletişim sistemleri artık laboratuardan çıkmakta ve iletişim teknolojisinin geleceğini oluşturmaktadır.

Optik iletişim sistemlerinin en büyük üstünlüğü iletilebilen bilgi kapasitesindeki büyük artıştır. Her iletişim sisteminde iletilebilen bilgi miktarı taşıyıcı dalganın band genişliği ile doğru orantılıdır. Band genişliği ise taşıyıcı dalga frekansının belirli bir kısmına eşittir. Dolayısıyla taşıyıcı dalga frekansı arttırıldıkça kullanılabilecek band genişliği ve iletilebilen bilgi kapasitesi artmaktadır. Optik dalgaların band genişliği radyo frekanslı dalgaların band genişliğinden 10^5 kadar daha büyüktür. Diğer taraftan, elektromanyetik dalgalar ile iletişimde vericinin güç sınırı taşıyıcı dalga frekansı yükseldikçe artar [8].

Uyumlu dalgaların eksikliği nasıl holografinin gelişmesini 20 yıl kadar geciktirdiyse, yeterli teknolojinin optik dalgaboyunun küçüklüğü dolayısıyla çok yavaş gelişmesi optik iletişim sistemlerinin uygulamasını da geciktirmiştir. Laserlerin bulunuşu bu konuda da aşama sağlamıştır. Zamanımızda holografi aygıtlarının,

optik tümdevre ve optik fiber teknolojilerinin gelişmesi ile optik iletişim sistemlerinin de uygulaması kolaylaşmaktadır.

Bu çalışmada daha çok holografi, iletişim, elektronik deteksiyon ve kaydetme ve bilgi işleme konuları arasındaki bağı kuvvetlendirmek amaç edinilmiştir. Çok fazla veri gerektiren iletişim elektronik ve bilgi işleme sistemlerinde holografi yöntemi etkin bir kaynak ve kanal kodlayıcı ve veri sıkıştırıcı (data compression) bir yöntem olarak geliştirilmeye çalışılmıştır. Çok fazla veri gerektiren sistemlere örnek olarak bilgisayar bellekleri, radar, sonar, sismik çalışmalar, biyomedikal veriler, üç boyutlu resim nakli, faksimile ve üç boyutlu televizyon çalışmaları gösterilebilir.

Şekil 1.4'de genel bir iletişim sisteminin blok şeması gösterilmiştir. Günümüzde etkin kaynak ve kanal kodlayıcıları ile kod çözücülerinin araştırma ve geliştirme çalışmaları çok günceldir. Bu çalışmada kaynak ve kanal kodlamasının yerini geliştirilen bir holografi sistemi, kaynak ve kanal kod çözücülerinin yerini de diğer bir benzer holografi sistemi almıştır. Holografi sisteminin mevcut herhangi bir kanala uydurulabilmesi için özen gösterilmiştir. Hem holografi hem de optik iletişim sistemleri ışık dalgaları kullandığı için holografi ile kaynak ve kanal kodlaması ve kod çözülmesi optik bir iletişim sistemi için çok uyumlu sonuçlar verebilmektedir.

Kullanılabilecek dalgalar arasında ışık, akustik, ultrasonik ve mikrodalgalar olmakla beraber holografinin önemini arttıran özellik yalnız bu dalgalara sınırlı kalmadığıdır. Daha geniş anlamda holografi ile

iletişim ve bilgi işleme her türlü uyumlu dalgalar ile gerçekleştirilebilecektir.

1.2 Problemlerin Tanımı

Bu çalışmada sayısal ve analog holografının iletişim, bilgi işleme ve diğerk teknik uygulamalarında karşılaşılan önemli güçlüklere belirli çözümler aranmış ve yeni uygulama yöntemleri geliştirilmeye çalışılmıştır. nemli güçlüklere çözüm getirmekle holografının etkin bir kaynak ve kanal kodlaması ve kod çözülmesi yöntemi olarak geliştirilmesi amaçlanmıştır.

zm gerektiren belli başlı problemler şu şekilde sıranabilir:

1. Işık dalgaları ile yapılan hologramlarda gerekli band genişliği milimetrede birkaç bin karışım çizgisini, diğerk bir deyimle, fazın sıfır geçişlerini gerektirmektedir. Böyle tek bir hologramın elektronik olarak taranıp iletilmesi için gerekli zaman saat mertebesindeir. Dolayısıyla gerekli band genişliği daraltılmalıdır.

2. Hologramlarda gereğinden fazla bili (redundant information) oranı çok yüksektir. Dolayısıyla band genişliğinin daraltılabilmesi için gereğinden fazla bilinin çıkartılması faydalı olacaktır.

3. Işık dalgaları ile yapılan hologramlarda ışık dalgaboyu yarım mikron kadar olduğundan hologramın yapımı sırasında herşeyin dalgaboyuna göre hareketsiz olmasını sağlamak uygulamada kolay değildir.

4. Hologramın özellikleri uzaysal işaretin özelliklerinden bağımsız olarak elektronik ve iletişim sistemlerinin özelliklerine, örneğin band genişliğine, göre uyarlanabilirse, diğer bir deyimle, kanal kodlaması kaynak kodlamasından bağımsız olarak yapılabilirse, holografi, elektronik, bilgi işleme, ve iletişim sistemlerinin birbirleriyle bütünleşmesi kolaylaşacaktır.

5. Hologramın özellikleri, işaretin özelliklerine, örneğin işaret noktalarında arzu edilen duyarlılığa göre kolayca uyarlanabilmelidir. Diğer bir deyimle, hologram ile kaynak kodlaması etkin, esnek ve uyarlanabilir olarak yapılabilirdir.

6. Çıkış fonksiyonu dalgaının şiddeti ile doğrusal olarak kaydedilen hologramlardan istenen işaretin yanısıra eşleniği, doğrusal olmayan ve sayısal hologramlardan ise genellikle işaret ve çeşitli harmonikler elde edilir. İstenen işaretin dışındaki harmonikler arzu edilmemektedir.

7. Hologramın taşıyıcı dalga ile aydınlatılması ile kod çözülmesi sağlanıp işaretin elde edilmesi sırasında meydana gelen gürültüyü süzgeçlemek ve azaltmak gerekmektedir.

8. Hologramların uzaysal band genişliğini sınırlayan fiziksel olay taşıyıcı dalgaının kırımını sağlayan ve hologramı meydana getiren küçük alanların belirli bir sınırdan öteye küçültülememesidir. Bu sınırın kaldırılması veya azaltılması hologramın uzaysal band genişliğini arttıracaktır.

9. Düşünülen yeni ve karmaşık sayısal ve analog holografi yöntemlerinin geçerliliğini kontrol edebilmek için mümkün olduğu kadar esnek ve uygulaması kolay bir sayısal modülasyon yöntemine ihtiyaç vardır. Bu yöntem bilhassa bilgisayar ile hızlı olarak hesaplamaya yatkın olmalıdır.

10. Hologram akustik dalgalar gibi belirli bir dalgaboyu olan dalgalar ile yapılırsa ve laser ışını gibi başka bir dalgaboyu olan bir taşıyıcı dalga ile aydınlatılırsa, hologramın boyutları her iki dalgaboyunun oranı kadar değiştirilmediği zaman işaret distorsiyona uğramaktadır.

11. Boyutları değiştirilip çoğaltılan veya resmi çıkartılan bir hologramın içerdiği bilgi kod çözülmesi ile distorsiyon olmadan elde edilebilmelidir.

12. Hologramın yapılması ve hologramın aydınlatılıp kod çözülmesi ile işaretin elde edilmesi işlemlerinin hızlı olarak, mümkünse gerçek zamanda yapılabilmesi arzu edilmektedir. Bu durum bilhassa hologramın belirli bir dalgaboyu olan dalgalar ile yapılıp, dalgaboyu değişik olan bir taşıyıcı dalga ile aydınlatılması halinde görülmektedir.

13. Hologramın özelliklerinin gerçek zamanda uyarlanabilmesi arzu edilmektedir.

14. Sayısal holografide gerekli hesapların genellikle hızlı Fourier dönüşümü (FFT) kullanılarak yapılması dolayısıyla işaret noktaları bir düzlem üstünde ve belirli aralıklarla seçilebilmektedir. İşaret noktalarının uzayda gelişigüzel üç boyutlu noktalarda seçilebilmesi istenmektedir.

15. Hızlı Fourier dönüşümü kullanıldığında işaretin uzayda periyodik olduğu varsayılmaktadır. Bu durumda her harmonik uzayda periyodik olacağından harmoniklerin birbiri üstüne binmesi durumu meydana gelmektedir.

16. Analog holografide üç boyutlu hologramlar yapılabilmektedir. Sayısal holografide de bunun yapılabilmesi bilgi kapasitesini arttırmak, yalnız istenen işareti elde etmek gibi nedenler dolayısıyla önemlidir.

1.3 Çalışma Plânı

Yukarıda tanımlanan problemlere çözüm getiren veya getirebileceği sanılan yöntemlerin bulunup geliştirilebilmesi için şu çalışma plânı uygulanmıştır:

- i) ilk olarak konunun literatürdeki yeri incelenmiştir.
- ii) holografi, optik, bilgi işleme, dalga propagasyonu ve iletişim teorileri arasındaki ilişki araştırılmıştır.
- iii) karşılaşılan güçlüklerin ana nedenleri aranmış, bu nedenlerin uzaysal band genişliği ve kullanılan aygıtların hız sınırlılığı ile yakından ilişkisi üstünde çalışılmıştır.
- iv) uzaysal band genişliği sınırını arttırmak için aynı zamanda tümdevre yapımında güncel olan taramalı elektron mikroskop sistemi üstünde durulmuş, burada en önemli problemin elektron

resistlerin özellikleri olduğu görülmüş, bir inceleme çalışması yapılarak elektron resistlerin özelliklerini açıklayan bir model geliştirilmeye çalışılmıştır.

- v) hem taramalı elektron mikroskop sisteminde hem de diğer sistemlerde kolaylıkla kullanılabilecek, yeni ve karmaşık sayısal ve analog holografi yöntemlerinin geçerliliğini kontrol edebilmek için mümkün olduğu kadar esnek, bilgisayar ile hesaplamaya yatkın bir modülasyon yöntemi geliştirilmeye çalışılmıştır.
- vi) İstenen işaretin bütün uzayda harmonik işaretler ile karışım olmadan elde edilmesini sağlayan, böylece hızlı Fourier dönüşümü kullanıldığında harmonik işaretlerin birbiri üstüne binmesini önleyen bir yöntem geliştirilmeye çalışılmıştır.
- vii) bir yandan kullanılan elektronik, iletişim ve bilgi işleme sistemlerinin özelliklerine, örneğin band genişliğine uyarlanabilen, böylece etkin bir kanal kodlaması sağlanarak holografinin sözü edilen diğer sistemler ile bütünleşmesini kolaylaştıran, öte yandan uzaysal işaretin ve kullanılan dalgaların özelliklerine göre etkin bir kaynak kodlamasını mümkün kılan bir yöntem geliştirilmeye çalışılmıştır. Bu yöntemin aynı zamanda bir önceki kısımda belirtilen diğer güçlükleri yenebilecek olanakları sağlayabilmesi için çaba harcanmıştır.
- viii) bulguların değerlendirilmesi yapılmış ve iletişim açısından geliştirilebilecek sistemler üzerinde durulmuştur.

1.4 Bu Çalışmanın Getirdiği Yenilikler

1960 yılında laserin bulunmasıyla gelişen holografi, holografi ile iletişim , bilgi işleme ve diğer holografi uygulama alanlarına bu çalışmanın katkıları şu şekilde sıralanabilir:

- i) Yeni sayısal ve analog holografi yöntemlerinin geliştirilmesinde faydalı olan, bazı uygulamalarda diğer yöntemlerden daha başarılı görülen bilgisayar ile hızlı olarak hesaplamaya uygun bir uzaysal modülasyon yöntemi geliştirilmiştir.
- ii) Hızlı Fourier dönüşümü kullanılmasına ihtiyaç kalmadan işaret noktalarının uzayda gelişigüzel üç boyutlu noktalarda seçilebilmesi mümkün kılınmıştır.
- iii) Geliştirilen modülasyon yöntemi kullanılarak bu alanda ilk defa taramalı elektron mikroskop sistemi ile üç boyutlu sayısal hologramlar gerçekleştirilmiştir.
- iv) Hem holografide hem de tümdevre yapımında güncel olan taramalı elektron mikroskop sistemi ile kullanılan pozitif ve negatif resistlerin özelliklerini açıklayan teorik bir model geliştirilmiş ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.
- v) Geliştirilen modülasyon yöntemi küresel taşıyıcı dalgalar için geliştirilmiş ve istenen işaretin bütün uzayda harmonik işaretler ile karışım olmadan elde edilmesini sağ-

layan ve tek işaretli holografi olarak adlandırılan bir yöntem geliştirilmiş ve deneylerle kanıtlanmıştır. Bu yöntemde harmonik işaretler uzayda holograma çok yakın yerlere taşınmakta, dolayısıyla kodlama yönteminin bu işaretler için doğruluğu azaltılmakta, ve yayılmadan ötürü istenen işaretin bulunduğu bölgede harmonik işaretlerin etkisiz kılınması sağlanmaktadır. Yalnızca istenen işaret elde edildiğinden işaretin uzayda kapsayabileceği boyutlar büyük ölçüde arttırılmaktadır.

- vi) Holografinin uygulanmalarında karşılaşılan güçlükleri azaltan, bir yandan kullanılması arzu edilen herhangi bir elektronik veya iletişim sisteminin özelliklerine, örneğin band genişliğine, göre uyarlanabilen, öte yandan herhangi bir işaretin ve kullanılan dalgaların gerektirdiği band genişliği ve duyarlılık gibi gereksinmelere cevap verebilen ve virtüel holografi olarak adlandırılan bir yöntem geliştirilmiş ve deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Virtüel holografi yönteminde iki ayrı hologram mevcuttur. Gerçel hologram fiziksel olarak gerçekleştirilen ve kullanılması arzu edilen teknolojinin özelliklerine göre uyarlanabilen hologramdır. Dolayısıyla gerçel hologram iletişim teorisindeki kanal kodlamasının (channel encoding) eşleniğidir. Virtüel hologram ise gerçel hologramın imgesi olup fiziksel olarak bir ortamda kaydedilmeden uzayda mevcuttur ve taşıyıcı dalga ile işaretin gereksinmelerine uygundur. Diğer bir deyimle,

kaynak kodlaması (source encoding) virtüel hologram ile elde edilmektedir. Arada gerçel hologramı virtüel holograma dönüştüren bir optik sistem mevcuttur.

Gerçel hologram klasik anlamda bir hologram değildir. Çünkü taşıyıcı bir dalga ile gerçel hologram aydınlatılırsa virtüel işaret olarak adlandırılan ve istenen işaretin dönüştürülmüş şekli olan bir işaret elde edilir. Virtüel hologram normal bir holograma benzetilebilir; fakat o da bir ortamda fiziksel olarak gerçekleştirilmemekte, sadece uzayda gerçel hologramın imgesi olarak varolmaktadır. Virtüel hologram gerçel hologramdan daha küçük seçildiğinde işaretin uzaysal frekans bandı gerçel hologram üstünde alçak frekanslara kaydırılmakta ve virtüel işaret ile de geniş gürültü bandı içinde işaretin sıkıştırılması (data compression) sağlanmaktadır. Virtüel hologram gerçel hologramdan daha büyük seçildiğinde ise bu işlemin tersi yapılmaktadır.

Virtüel holografi yönteminin bulgularından hareket ederek bilginin holografik olarak kodlanmasını ve alıcıda kod çözülmesinin holografik olarak yapılmasını öngören ve özellikle resim, radar, sonar ve üç boyutlu veriler gibi çok büyük bilgi miktarlarını içeren işaretlerin naklinde faydalı görülen bir iletişim sisteminin gerçekleştirilmesi mümkündür.

Virtüel holografinin belli başlı diğer katkıları şu şekilde sıralanabilir:

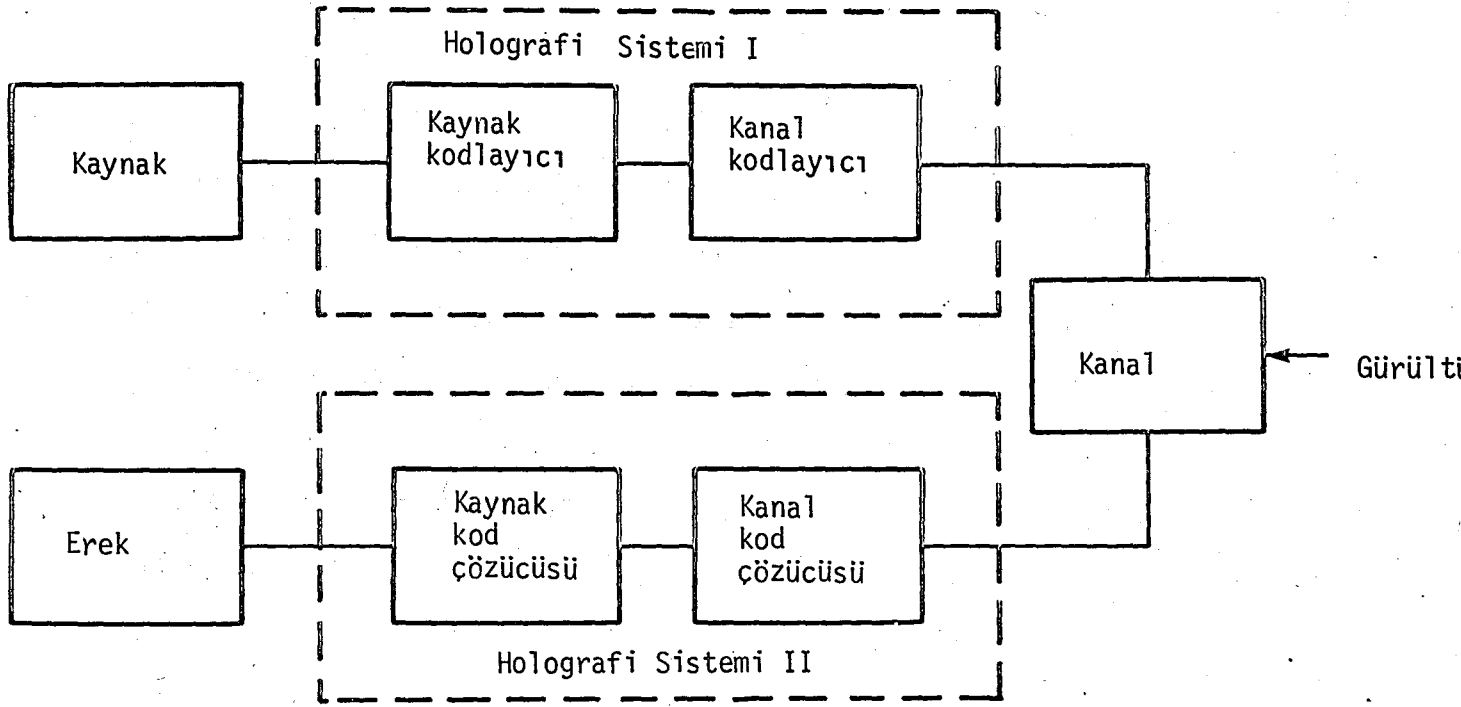
1. Optik sistemden yalnız virtüel işaretin geçmesi sağlanarak gürültü ve taşıyıcı dalga süzgeçlenebilmektedir.
2. Gerçek hologramın uzaysal band genişliği alçak olduğundan hologramın yapımı sırasında hareketsizlik gereksinimi önemini yitirmektedir.
3. Tek işaretli holografi yöntemi virtüel holografi yöntemiyle beraber kullanılabilir.
4. Gerçek hologramın uzaysal band genişliği alçak tutularak çok hızlı elektronik tarama aygıtlarının kullanılması mümkün olmakta, böylece holografi ile elektronik teknolojilerinin bütünleşmesi büyük ölçüde kolaylaşmaktadır.
5. Gerçek ve virtüel hologramın gereğinden fazla bilgi oranı arzu edilen düzeye indirilebilmektedir.
6. Holografi ile iletişim bilgi işleme ve diğer uygulamaların gerçek zamanda yapılabilmesi kolaylaşmaktadır.
7. Hologram belirli bir dalgaboyu olan dalgalar için yapıldıktan sonra dalgaboyu değişik olan bir taşıyıcı dalga ile boyutları yeni dalgaboyuna uydurulmadan aydınlatılıp kod çözümü sağlanabilmekte ve aynı zamanda distorsiyonlar azaltılabilmektedir.

8. Sayısal ve analog üç boyutlu hologramların yapılması oldukça kolaylaşmaktadır.

9. Boyutları değiştirilip çoğaltılan veya resmi gösterilen bir hologramın içerdiği bilgi kod çözülmesi ile distorsiyon olmadan elde edilebilmekte, böylece literatürde boyutları büyütülerek örnek olarak gösterilen hologramlar kullanılabilir hale gelmektedir. Bu sayede çeşitli araştırmacılar arasındaki bilgi alışverişi hızlanmaktadır.

10. Virtüel hologram bir ortamda fiziksel olarak kaydedilmediğinden kendisini meydana getiren küçük alanların birbirleriyle kesişmesi, normal holografide olduğu gibi, band genişliğini etkilememektedir.

11. Yanyana yapılan ve değişik bilgiyi içeren bileşen hologramlardan oluşan bileşik virtüel hologram büyüklüğü 2 milimetre mertebesinde seçilirse bütün hologramlardaki bilginin tamamı aynı anda görülebilmektedir.



Şekil 1.4 - Genel bir iletişim sisteminin blok şeması

BÖLÜM 2 - HOLOGRAFI VE DİĞER KONULARLA OLAN İLİŞKİSİ

2.1 G i r i ş

1930'lardan itibaren optik olarak bilinen bilim dalı ile elektrik mühendisliğinin iletişim ve bilgi işlem dalları arasındaki ilişkiler sürekli olarak arttı. Bunun en önemli nedeni hem optik hem de iletişim sistemlerinde esas gayenin bilginin toplanması ve iletimi olması gösterilebilir. Elektrik mühendisliğinde bilgi genellikle modüle edilmiş bir gerilim veya akım gibi zaman dalgalarıyla iletilirken, optikte ışık genliği veya şiddeti gibi uzaysal dalgalarla iletilenmiştir.

Matematiksel yönden dalgalar arasındaki fark azdır. Birçok optik ve elektronik sistemlerin geliştirilmesinde Fourier analizi ve sistem teorisi kullanılmaktadır. Bunun nedeni hem elektronik devrelerin hem de optik aygıtların doğrusallık ve değişmezlik özellikleri göstermesidir. Dolayısıyla bu özellikleri gösteren elektronik veya optik herhangi bir aygıt Fourier analizi ve sistem teorisi kullanarak incelenebilir.

Fotoğraf filmi gibi doğrusal olmayan bazı optik elemanlar ve transistor gibi doğrusal olmayan bazı elektronik aygıtlar aynı tip özellikler gösterirler.

Matematiksel benzerlikler analiz yönünden faydalı olduğu gibi sentez yönünden de faydalı olmuştur. Örneğin, nasıl zamanın fonksiyonu olan bir işaretin elektronik süzgeç kullanarak frekans özellikleri değiştirilebilirse, uzaysal bir işaretin de uzaysal süzgeç kullanarak frekans özellikleri değiştirilebilir.

Elektrik devrelerinde giriş ve çıkışlar genellikle akım veya gerilim olarak tek boyutlu bir değişken olan zamanın gerçel fonksiyonları olmaktadır. Optik devrelerde ise giriş ve çıkışlar uzay değişkenlerinin şiddet olarak gerçel fonksiyonları, elektromanyetik veya akustik alan olarak ise karmaşık fonksiyonları olurlar. Uzay değişkenleri x, y, z koordinatları olarak belirlenir. Çoğu zaman z koordinatı değişmez tutulduğundan, önemli olan x ve y değişkenleridir.

Holografi optik ile elektrik mühendisliği arasındaki ilişkinin daha da kuvvetlenmesine neden olmuştur. Holografi uzaysal genlik ve faz modülasyon yöntemlerini içerdiğinden iletişim yöntemleri ile yakından ilişkilidir. Aynı zamanda uyumlu dalgaların propagasyonu ile yakından ilgilidir. Diğer taraftan uzaysal dalgaların şekillendirilmesi ve işlenmesi çoğu zaman optik sistemler kullanarak yapılır. Optik sistemlerden ve uzaysal dalgalardan elektronik sistemlere ve zaman dalgalarına geçiş ise elektrooptik aygıtları gerektirir.

2.2 Uzaysal Dalgalar

Bu çalışmada bilginin holografi ile kodlanıp kaydedilmesi için uyumlu uzaysal dalgalardan taşıyıcı dalga ve işaret dalgası olarak faydalanılmaktadır. Bugüne kadar uygulamada en fazla elektromanyetik dalgalar ve akustik dalgalar geçerli olmuştur. Teknoloji geliştikçe x-ışınları, elektron dalgaları, büyük deniz dalgaları gibi yeni tür uyumlu dalgaların kullanılması olasılığı da kuvvetlidir.

Bütün dalgalar belirli dalga denklemleri ile tanımlanır. En genel anlamda, bütün dalgaları kapsayan bir denklem,

$$g(\partial/\partial x, \partial/\partial y, \partial/\partial z, \partial/\partial t)U(x,y,z,t) = 0 \quad (2.1)$$

olarak yazılabilir [9]. Burada $g(\partial/\partial x, \partial/\partial y, \partial/\partial z, \partial/\partial t)$ $\partial/\partial x$, $\partial/\partial y$, $\partial/\partial z$, $\partial/\partial t$ operatörlerinin polinom şeklinde olan bir fonksiyonu, $U(x,y,z,t)$ elektromanyetik dalgalar söz konusu olduğunda elektrik veya manyetik alan değişkeni, akustik dalgalar söz konusu olduğunda bir parçacığın denge noktasına olan uzaklık değişkeni gibi uygulamada kullanılan değişkenin x,y,z,t bağımsız değişkenleri ile değişimini gösteren fonksiyondur. Değişik yönlerde polarizasyon söz konusu olduğunda polarizasyon yönünü göstermek için $U(x, y, z, t)$ fonksiyonu vektör olarak tanımlanmalıdır.

(2.1) denkleminin çözümü sınır koşullarına bağlıdır. Buna karşılık her durumda geçerli olan ve bu çalışmada çok kullanılan bir çözüm düzlem bir dalgadır. Üç boyutlu düzlem bir dalga

$$U(\vec{r}, t) = A \exp(j(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)) \quad (2.2)$$

olarak yazılabilir. U ve A vektörlerinin yönü polarizasyon yönünü gösterir. Dalga vektörü olarak bilinen $\vec{k}$ vektörü dalganın propagasyon yönünü gösterir. Dalga vektörünün büyüklüğü aynı zamanda dalga sayısı olarak bilinir ve

$$k = 2\pi/\lambda \quad (2.3)$$

ifadesiyle belirlenir. ω dalganın açısal zaman frekansı iken, $\vec{r}$ vektörü kaynak noktasından (x, y, z) noktasına olan uzaklığı tanımlar.

(2.2) denkleminde propagasyon yönünde dalganın hızı

$$c = \omega/k \quad (2.4)$$

olarak bulunur. Açısal zaman frekansını dalga sayısının fonksiyonu olarak gösteren ifadeye dispersiyon denklemi denir.

Dalgaları darbe olarak gönderen ve alan sistemlerde dalganın uzay değişimi yanısıra zaman değişimi de önemlidir. Bu çalışmada incelenen durumlarda ise bilginin kaydedilmesinin uzaydaki noktalarda aynı anda yapıldığı varsayıldığından dalganın yalnız uzay değişimi önemli olmaktadır. Dolayısıyla zaman değişimini gösteren $\exp(j\omega t)$ çarpanı kullanılan ifadelerde gösterilmemektedir. Zaman değişimi ihmal edilerek (2.2) denklemi

$$U(x, y, z) = A \exp(j(k_x x + k_y y + k_z z)) \quad (2.5)$$

olarak yazılabilir. k_x , k_y , k_z dalga vektörünün x , y , z eksenleri yönündeki bileşenleri olup

$$k_x = k \cos\theta \quad (2.6)$$

$$k_y = k \cos\beta \quad (2.7)$$

$$k_z = k \cos\alpha \quad (2.8)$$

ifadeleriyle belirlenir. θ , β , α x, y, z eksenleri ile propagasyon yönü arasındaki açılardır.

İncelenen durumlarda daha çok dalgaların bir düzlem üstündeki değişimi dikkate alınmaktadır. Dolayısıyla $z = 0$ düzlemini seçerek z eksen yönündeki değişim de ihmal edilebilir. Bu durumda (2.5) denklemi

$$U(x,y) = A \exp(j2\pi[f_x x + f_y y]) \quad (2.9)$$

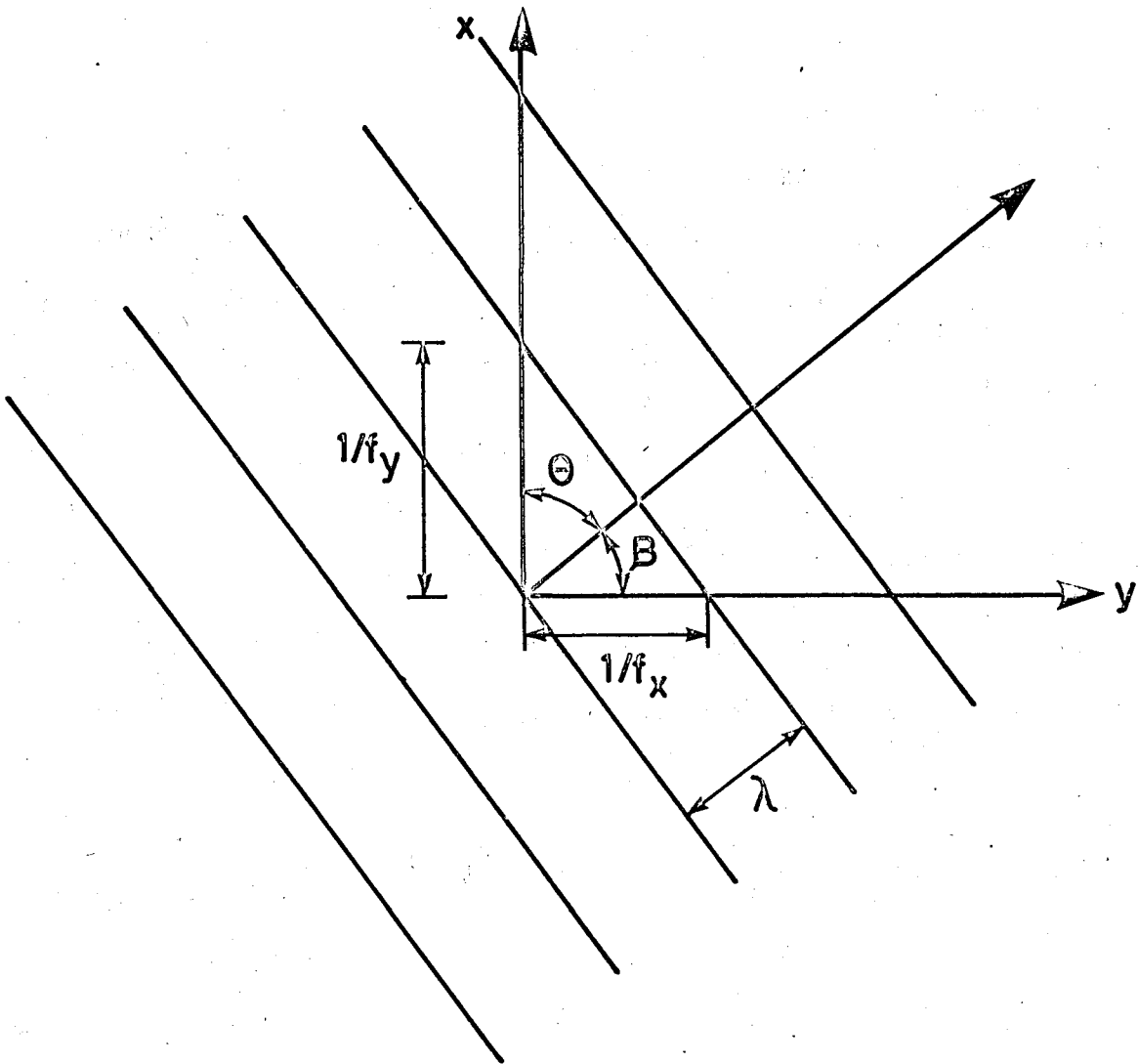
olarak yazılabilir. f_x ve f_y devir sayısı/uzunluk birimi olan parametreler olup x ve y eksenleri yönündeki uzaysal frekanslar olarak tanımlanır. Uzaysal frekanslar

$$f_x = k_x/2\pi = \cos\theta/\lambda \quad (2.10)$$

$$f_y = k_y/2\pi = \cos\beta/\lambda \quad (2.11)$$

olarak yazılabilir. Şekil 2.1'de düzlem dalganın $z = 0$ düzleminde fazının sıfır geçiş çizgileri ve uzaysal frekanslar gösterilmiştir.

(2.9) denkleminde uzaysal dalgalar kullanan sistemlerde zaman değişkeninin yerini x ve y değişkenlerinin, zaman frekansının



Şekil 2.1 - Düzlem dalganın sıfır geçiş çizgileri ve uzaysal frekansları

yerini f_x ve f_y uzaysal frekanslarının aldığı görülmektedir. Uzaysal dalganın değişimi üç boyutlu bir ortam içinde düşünülürse, z değişkeninin ve z eksen yönündeki uzaysal frekansında dikkate alınması gerekmektedir.

(2.1) denkleminde tanımlanan $g(\partial/\partial x, \partial/\partial y, \partial/\partial z, \partial/\partial t)$ fonksiyonu dalganın türüne bağlıdır. Örneğin, iletken olmayan bir ortamda varolan elektromanyetik dalgalar için $g(\partial/\partial x, \partial/\partial y, \partial/\partial z, \partial/\partial t)$ fonksiyonu

$$g(\partial/\partial x, \partial/\partial y, \partial/\partial z, \partial/\partial t) = \nabla^2 - \epsilon\mu(\partial^2/\partial t^2) \quad (2.12)$$

$$\nabla^2 \equiv (\partial^2/\partial x^2) + (\partial^2/\partial y^2) + (\partial^2/\partial z^2) \quad (2.13)$$

olarak yazılabilir [9]. Burada ϵ ve μ parametreleri ortamın permittivite (permittivity) ve permiyabilite (permeability) sayılarıdır.

Dalganın propagasyon yönündeki hızı

$$c_e = w/k = 1/(\epsilon\mu)^{1/2} \quad (2.14)$$

olarak yazılabilir.

Akustik dalgalarda benzer olarak $g(\partial/\partial x, \partial/\partial y, \partial/\partial z, \partial/\partial t)$ fonksiyonu

$$g(\partial/\partial x, \partial/\partial y, \partial/\partial z, \partial/\partial t) = \nabla^2 - (\rho/K)(\partial^2/\partial t^2) \quad (2.15)$$

olarak belirlenir [9]. Burada ρ ve K ortamın yoğunluğu ve sıkıştırılabilirlik (compressibility) sayısıdır. Dalganın propagasyon yönündeki hızı

$$c_a = (K/\rho)^{1/2} \quad (2.16)$$

olarak yazılabilir.

(2.12) ve (2.15) denklemi ile tanımlanan $g(\partial/\partial x, \partial/\partial y, \partial/\partial z, \partial/\partial t)$ fonksiyonu için (2.1) denkleminin diğer bir çözümü küresel dalgadır. Küresel bir dalga

$$U = (U_0/r) \exp[j(kr - \omega t)] \quad (2.17)$$

olarak yazılabilir [9]. r sayısı kaynak noktasından (x,y,z) noktasına olan uzaklıktır. Bir düzlem üstünde küresel bir dalganın fazının sıfır geçişleri daireler şeklindedir.

Bu çalışmada düzlem ve küresel dalgalardan taşıyıcı dalga olarak büyük ölçüde faydalanılmıştır. İşaret dalgası ise genliği ve fazı uzay koordinatlarının fonksiyonu olan bir dalga olarak

$$U(x,y,z) = A(x,y,z) e^{j\phi(x,y,z)} \quad (2.18)$$

şeklinde yazılabilir. $A(x,y,z)$ ve $\phi(x,y,z)$ işaret dalgasının (x,y,z) noktasındaki genliği ve fazıdır.

2.3 Doğrusal Sistemler

Doğrusal sistem analizi birçok konuda olduğu gibi holografi, dalga propagasyonu ve optik sistemlerde de çok yararlı bir yöntemdir. Bir sistem giriş fonksiyonunu çıkış fonksiyonuna çeviren $O[]$ operatörü ile tanımlanabilir. İki boyutlu doğrusal bir sistemde giriş fonksiyonu $U_1(x_1, y_1)$ ve çıkış fonksiyonu $U_2(x_2, y_2)$ arasındaki bağıntı

$$U_2(x_2, y_2) = \iint_{-\infty}^{\infty} U_1(x_1, y_1) h(x_2, y_2, x_1, y_1) dx_1 dy_1 \quad (2.19)$$

olarak yazılabilir [10]. Bu bağıntıda (x_1, y_1) ve (x_2, y_2) uzay giriş ve çıkış koordinatlarıdır. $h(x_2, y_2, x_1, y_1)$ ise doğrusal sistemin "impuls" yanıtıdır. Matematiksel olarak impuls yanıtı

$$h(x_2, y_2, x_1, y_1) = 0[\delta(x_2 - x_1, y_2 - y_1)] \quad (2.20)$$

olarak yazılabilir. $\delta(x, y)$ Dirac-Delta fonksiyonudur.

Doğrusal bir sistemin impuls yanıtı biliniyorsa, çıkış fonksiyonu herhangi bir giriş fonksiyonu için (2.19) bağıntısı kullanılarak hesap edilebilir. Optik bir sistemde impuls yanıtı tek bir kaynak noktadan gelen küresel bir dalganın sistemden geçtikten sonra aldığı şekildir. İlerideki bölümlerde bazı yöntemleri geliştirirken bu özellikten yeterince yararlanma olanağı bulunmaktadır.

İletişim sistemlerinde zaman içinde durağanlık (stationarity) sisteme t_1 anında gönderilen bir impulsun t_2 anında sistemden çıkarken matematiksel olarak iki zamanın farkına bağımlı olması şeklinde tanımlanır. Diğer bir deyimle

$$h(t_1, t_2) = h(t_2 - t_1) \quad (2.21)$$

olarak yazılabilir.

Optik sistemlerde ise zaman içinde durağanlık özelliğinin yerini uzay içinde durağanlık alır. Matematiksel olarak impuls yanıtı

$$h(x_2, y_2, x_1, y_1) = h(x_2 - x_1, y_2 - y_1) \quad (2.22)$$

olarak yazılabilir. Bu durumda (2.19) bağıntısı iki boyutlu konvolüsyon (convolution) şeklini alır:

$$U_2(x_2, y_2) = U_1(x_1, y_1) * h(x_2, y_2, x_1, y_1) \quad (2.23)$$

Konvolüsyon kuralını kullanarak (2.23) bağıntısında her iki tarafın iki boyutlu fourier dönüşümü alınarak,

$$V_2(f_x, f_y) = V_1(f_x, f_y) H(f_x, f_y) \quad (2.24)$$

bağıntısı elde edilir. Burada V_1 ve V_2 , U_1 ve U_2 fonksiyonlarının iki boyutlu fourier dönüşümüdür. H fonksiyonu ise h fonksiyonunun iki boyutlu fourier dönüşümü olup transfer fonksiyonu olarak adlandırılır.

Uzay içinde durağanlık gösteren doğrusal sistemlerde (2.24) bağıntısı çıkış fonksiyonunun hesaplanmasını kolaylaştırır.

2.4 Huygens-Fresnel İlkesi

Dalgalar ile bilginin naklinde çok önemli olan bir konu kırınım olayıdır. Kırınım genel olarak üç boyutlu bir dalganın üç boyutlu bir ortamdan diğer üç boyutlu bir ortama propagasyonu sırasında geçirdiği değişim olayı olarak tanımlanacaktır. Çoğu zaman üç boyutlu ortam düzleme indirgenir. Bir düzlem üstündeki giriş dalgası $U_1(x_1, y_1)$ ise z mesafesindeki paralel diğer bir düzlem üstündeki çıkış dalgası $U_2(x_2, y_2)$ Huygens-Fresnel ilkesi ile belirlenir [10]:

$$U_2(x_2, y_2) = (1/j\lambda) \iint_R \frac{U_1(x_1, y_1) \exp(jkr_{12}) \cos\theta}{r_{12}} dx_1 dy_1 \quad (2.25)$$

(2.25) denklemindeki değişkenlerin tanımı şekil 2.2'de yapılmıştır. $\bar{r}_{12}$ vektörünün uzunluğu

$$r_{12} = [(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + z^2]^{1/2} \quad (2.26)$$

olarak yazılır. R giriş düzlemindeki pencere alanını tanımlar.

(2.25) denklemi

$$U_2(x_2, y_2) = \iint_R U_1(x_1, y_1) h(x_1, y_1, x_2, y_2) dx_1 dy_1 \quad (2.27)$$

şeklinde yazılabilir. Burada

$$h = \frac{1}{j\lambda} \frac{\exp(jkr_{12}) \cos\theta}{r_{12}} \quad (2.28)$$

olduğu görülür. (2.27) denkleminde tümlev sınırlarını sonsuza çıkarmak için bir pencere fonksiyonu eklenebilir:

$$U_2(x_2, y_2) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U_1'(x_1, y_1) h(x_1, y_1, x_2, y_2) dx_1 dy_1 \quad (2.29)$$

$$U_1'(x_1, y_1) = U_1(x_1, y_1) P(x_1, y_1) \quad (2.30)$$

$$P(x, y) = \begin{cases} 1 & x, y \in R \\ 0 & x, y \notin R \end{cases} \quad (2.31)$$

(2.19) ve (2.27) denklemlerinin karşılaştırılması doğrusal bir sistemle uğraşıldığını gösterir. Dolayısıyla (2.28) denklemi impuls yanıtını tanımlar. (2.26) denkleminde değişmez z uzaklığı için impuls yanıtının uzay içinde durağanlık özelliği gösterdiği görülmektedir.

2.5 Fresnel ve Fraunhofer Yaklaşımları

Bazı basit pencere fonksiyonları ve düzlem giriş dalgası haricinde (2.25) denkleminin çözümü çok zordur. Genellikle giriş düzleminde kullanılan pencere büyüklüğü ile çıkış düzleminde kullanılan pencere büyüklüğü farklı olduğundan, (2.23) denklemiyle ifade edilen konvolüsyon teoreminin kullanılması mümkün olmaz. Dolayısıyla (2.28) denklemiyle ifade edilen impuls yanıtının basitleştirilmesi gereklidir.

İlk olarak z uzaklığının giriş ve çıkış düzlemlerindeki boyutlardan çok daha büyük olduğu farzedilecektir. Bu durumda $\cos\theta$ yaklaşık olarak bir'e eşit olacaktır. $\theta < 18^\circ$ koşulunda yapılan hatanın yüzde beşin altında kaldığı kolaylıkla gösterilebilir [11]. Aynı zamanda paydadaki r_{12} uzaklığı z uzaklığına yaklaşık olarak eşit alınabilir. İmpuls yanıtı bu yaklaşımlarla

$$h(x_1, y_1, x_2, y_2) = (1/j\lambda z) \exp(jkr_{12}) \quad (2.32)$$

olarak yazılabilir.

Taylor serisinin ilk iki terimi kullanılırsa (2.26) denklemiyle ifade edilen r_{12} uzaklığı

$$r_{12} = z + \frac{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}{2z} \quad (2.33)$$

olarak yazılabilir. Buna Fresnel yaklaşımı adı verilmiştir. Bu yaklaşımlarla impuls yanıtı

bağıntıları ile bağlıdır. (2.35) denkleminde çıkış dalgasının bir faz çarpanı ile birlikte $U_1''(x_1, y_1)$ fonksiyonunun f_x ve f_y uzaysal frekanslarında fourier dönüşümü olduğu görülmektedir. (2.9) ve (2.38) denklemlerinin karşılaştırılması çıkış dalgasının düzlem dalgalarının bileşeni olduğunu göstermektedir.

İkinci çözüm yolu yapılan yaklaşımlar ile impuls yanıtının uzay içinde durağanlık özelliği göstermesinden ötürü (2.23) bağıntısının kullanılmasıdır. Yalnız bu çözüm yolunun kullanılabilmesi için giriş ve çıkış düzlemlerindeki pencere büyüklüklerinin aynı olması gerekmektedir. Impuls yanıtının fourier dönüşümü alınırsa transfer fonksiyonu

$$H(f_x, f_y) = \exp(jkz) \exp[-j\pi\lambda z(f_x^2 + f_y^2)] \quad (2.39)$$

olarak bulunur [12].

Fraunhofer yaklaşımı Fresnel yaklaşımına bir yaklaşım daha eklemek ile elde edilir. Eğer

$$z \gg \frac{k(x_1^2 + y_1^2)_{\text{maksimum}}}{2} \quad (2.40)$$

ise, $U_1''(x_1, y_1)$ ve $U_1'(x_1, y_1)$ fonksiyonları birbirlerine eşdeğer kabul edilebilir. Bu durumda impuls yanıtı

$$h(x_1, y_1, x_2, y_2) = \frac{\exp(jkz)}{j\lambda z} \exp(j(k/2z)(x_2^2 + y_2^2)) \exp(-j2\pi(f_x x_1 + f_y y_1)) \quad (2.41)$$

$$h(x_1, y_1, x_2, y_2) = \frac{\exp(jkz)}{j\lambda z} \exp[j(k/2z)[(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2]] \quad (2.34)$$

şeklini alır. Fresnel yaklaşımının geçerli olması için Taylor serisinin ihmal edilen bir sonraki teriminin 1 radyandan daha az faz hatasına yol açması aranır. Buna karşılık, durağan faz metodu Fresnel yaklaşımının bahsi geçen terimin daha fazla faz sayısına karşılık verse de geçerli olduğunu gösterir [11]. Bunun nedeni dalga sayısı k çok büyük olduğundan (2.25) denklemindeki tümle ve esas katkının x_2 ile x_1 , y_2 ile y_1 koordinatlarının birbirlerine çok yakınken olmasıdır.

Yapılan yaklaşımlarla (2.25) denklemi iki yoldan çözülebilir. Birinci çözüm yolu (2.25) denklemini

$$U_2(x_2, y_2) = \frac{\exp(jkz)}{j\lambda z} \exp(j(k/2z)(x_2^2 + y_2^2)) \quad (2.35)$$

$$\iint U_1''(x_1, y_1) \exp(-j2\pi(f_x x_1 + f_y y_1)) dx_1 dy_1$$

olarak yazmaktır. Burada $U_1''(x_1, y_1)$

$$U_1''(x_1, y_1) = U_1'(x_1, y_1) \exp(j(k/2z)(x_1^2 + y_1^2)) \quad (2.36)$$

ifadesiyle belirlenir. Uzaysal frekanslar f_x ve f_y gözlem düzlemindeki koordinatlara

$$f_x = x_2/\lambda z \quad (2.37)$$

$$f_y = y_2/\lambda z \quad (2.38)$$

olarak yazılabilir. Fraunhofer yaklaşımıyla uzay içinde durağanlık özelliğinin yokedildiği görülmektedir. Dolayısıyla (2.25) denkleminin çözümü birinci çözüm yolu olarak belirtilen (2.35) denkleminde $U_1''(x_1, y_1)$ fonksiyonunu $U_1'(x_1, y_1)$ fonksiyonuna eşdeğer seçmekle elde edilebilir.

Fraunhofer yaklaşımının diğer bir özelliği bir optik sisteme gelen giriş dalgası ile odak düzlemindeki çıkış dalgası arasındaki bağıntının Fraunhofer yaklaşımıyla elde edilen bağıntı olmasıdır [10].

2.6 Holografi, Modülasyon ve Doğrusal Sistemler

Holografide amaç üç boyutlu genlik ve faz bileşenleri olan belirli bir uzaysal dalganın fiziksel olarak kaydedilmesidir. Bilhassa ışık dalgaları kullanıldığında dalgaboyu çok küçük olduğundan genlik ve faz bileşenlerini uzaydaki noktalarda doğrudan ölçmek ve kaydetmek olanaksızdır. Bu problemin üstesinden gelmek için uzaysal bir taşıyıcı dalga uzaysal işaret dalgası ile karıştırılmakta ve meydana gelen bileşik dalga film gibi iletim fonksiyonu dalganın şiddetine orantılı ve iki veya üç boyutlu karesel detektör özelliği gösteren bir aygıt ile kaydedilmektedir. U_t taşıyıcı dalga ve U_i işaret dalgası ise, bileşik dalganın şiddeti

$$I = |U_t + U_i|^2 = |U_t|^2 + |U_i|^2 + U_i^* U_t + U_t^* U_i \quad (2.42)$$

olarak belirlenen I değişkenine orantılıdır [16].

Hologramın iletim fonksiyonu bileşik dalganın şiddetine orantılı yapılabildiğinden [10], hologramın diğer bir taşıyıcı dalga U_s ile aydınlatılması hologramdan çıkan U dalgasının

$$U \propto (|U_t|^2 + |U_i|^2)U_s + U_t U_s U_i^* + U_t^* U_s U_i \quad (2.43)$$

olmasını sağlamaktadır. Genellikle $|U_t| \gg |U_i|$ seçildiğinden ilk terimin taşıyıcı dalganın çok az değişimine neden olan bir gürültü unsuru olduğu görülmektedir. İkinci ve üçüncü terimler U_i^* ve U_i ile orantılı olduğundan işaret terimleridir. Taşıyıcı dalgaya bağımlı olarak her ikisi de virtüel veya gerçel, veya biri virtüel, diğeri gerçel olabilir [16].

Gabor'un orijinal çalışmasında, U_t ve U_s dalgaları eşdeğer ve şekil 1.1'de görüldüğü gibi işaret dalgasıyla aynı doğrultuda seçilmiştir [16]. Bu durumda propagasyonu aynı bölgede olan bir U_i virtüel işaret dalgası ve bir de U_i^* gerçel işaret dalgası elde edilmektedir. Leith ve Upatnieks aynı bölgede propagasyon sorununu çözmek için düzlem taşıyıcı dalga ile işaret dalgasını Şekil 1.2'de görüldüğü gibi ayrı doğrultularda seçtiler [4]. Bu durumda (2.5) denklemi ile belirlenen düzlem bir taşıyıcı dalga için (2.43) denklemi

$$U \propto (|U_i|^2 + A^2)U_s + Ae^{2j(k_x x + k_y y + k_z z)} U_i^* + A^2 U_i \quad (2.44)$$

olarak yazılabilir. Bu denklemde üçüncü terim işaret dalgasının aynı kaldığını, ikinci terim ise eşlenik işaretin bir düzlem dalgayla çarpılarak yönünün değiştirildiğini göstermektedir. Bu şekilde her iki dalganın propagasyonu değişik yönlerde olmaktadır.

Leith ve Upatnieks'in geliştirdiği bu yöntemi diğer analog holografi yöntemleri takip etmiştir [16]. Örneğin, fourier dönüşüm hologramı işaret dalgasının iki boyutlu fourier dönüşümünün kaydedilmesini içerir [12]. Fourier dönüşüm hologramı Lohmann yöntemi anlatılırken daha yakından incelenecektir.

Analog holografi iki dalğanın birleştirilip şiddetin kaydedilmesi esasına dayandığından bir çarpmalı karıştırma (heterodyning) tekniğidir. Yalnız diğer koşullarda çarpmalı karıştırma tek bir detektörle yapılırken, holografide çok sayıda detektörlerle ve paralel olarak yapılıyor anlamı çıkartılabilir.

Holografi yöntemleri aynı zamanda uzaysal modülasyon yöntemleri olarak da düşünülebilir. Bu düşünce tarzını daha iyi işleyebilmek için hologram düzlemi üstünde taşıyıcı dalga ve işaret dalgası

$$U_t(x,y) = A(x,y)\exp(j\phi_t(x,y)) \quad (2.45)$$

$$U_i(x,y) = a(x,y)\exp(j\phi_i(x,y)) \quad (2.46)$$

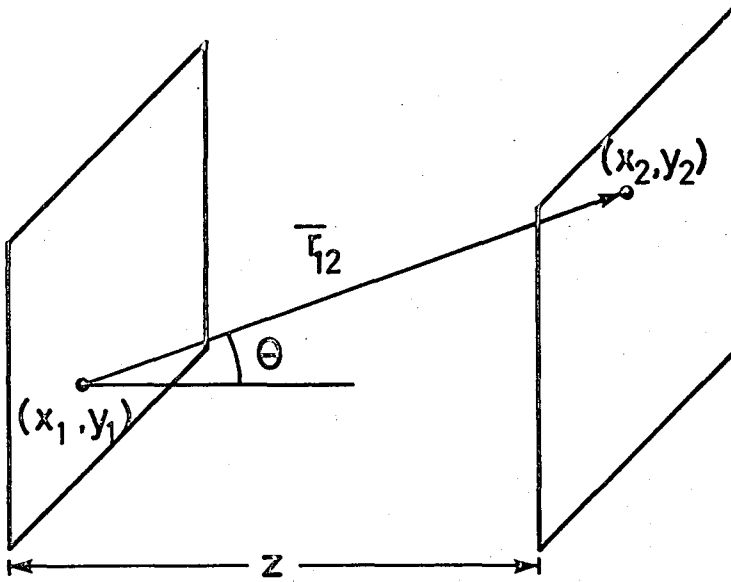
olarak yazılacaktır. (2.42) denkleminde bilgiyi taşıyan son iki terimdir. U_t ve U_s dalgaları birbirine eşdeğer seçilirse bu iki terimin toplamı

$$U_b = 2A(x,y)a(x,y)\cos(\phi_t(x,y) - \phi_i(x,y)) \quad (.247)$$

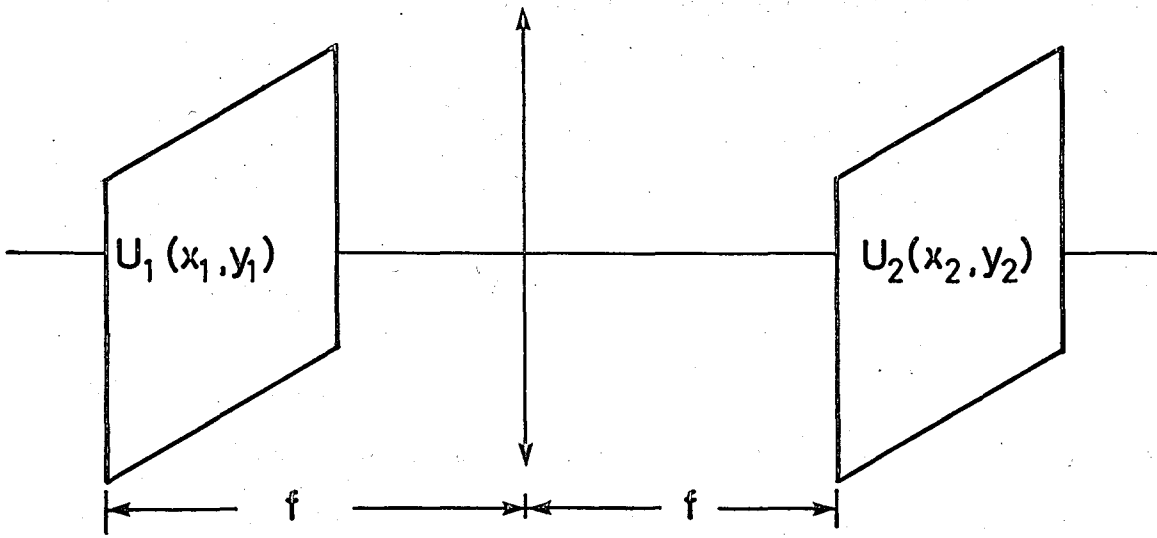
olarak yazılabilir. Bu denklemden taşıyıcı dalğanın hem genliğinin, hem de fazının işaret dalgasının genliği ve fazı ile modüle edildiği görölmektedir. Diğer bir deyimle hem genlik modülasyonu hem de faz modülasyonu mevcuttur.

Sayısal holografide hologramın yapımı fiziksel dalgalar ile sınırlı olmadığından değişik yöntemler geliştirilebilmiştir [6]. Bu yöntemler sayısal modülasyon yöntemlerine benzemektedir. Fiziksel olarak yapılan işlem düzlem ve ince bir madde üstünde dalgaboyu mertebesindeki çok küçük alanları değişime uğratıp taşıyıcı dalganın bu alanlarda kırınımına uğramasını sağlamaktır. Örneğin çok küçük delikler veya kırılma indisi değiştirilen bölgecikler bu vazifeyi görmektedir. Bu küçük alanlara açıklık adı verilecektir. Açıklıkların yerlerinin kodlanması için holograma gelen işaret dalgasının genlik ve fazının uzaysal örnekleme yapılarak belirli aralıklardaki matris noktalarında hesaplanması gerekmektedir. Bunun için Huygens-Fresnel prensibinden istifade edilmektedir. Fresnel ve Fraunhofer yaklaşımları hızlı fourier dönüşümü (FFT) kullanılmasını mümkün kılmaktadır [17]. Örneğin, ikili faz kodlama yönteminde genlik değişmez varsayılmaktadır [18]; örnekleme noktasında faz pozitif ise o noktada bir açıklık yapılmakta, negatif ise açıklık yapılmamaktadır. Genliğin değişmez varsayılması yaklaşımını yeterli kılmak için işaret dalgasının işaretten holograma propagasyonu hesaplanırken fazının her örnekleme noktasında rassal olduğunun varsayılması gereklidir. Bu durumda genlik hologram üstünde yavaş olarak değişmektedir [18].

İlk defa geliştirilen sayısal holografi yöntemi Lohmann yöntemi [19]. Bu yöntemde bir mercek ile sağlanan fourier dönüşüm hologramı örnek noktasının yerinden kaydırılması ile kodlanmaktadır. Şekil 2.2'de gösterildiği gibi bir mercekten geçen uzaysal bir dalganın bir odak düzleminden diğer odak düzlemine propagasyonu sırasında geçirdiği değişim fourier dönüşümü ile bağımlıdır [10]. Bu değişim



Şekil 2.2 - İki düzlem arasındaki dalga propagasyonunun tanımı
için gerekli değişkenler



Şekil 2.3 - Bir mercek ile Fourier dönüşümü için gerekli geometri

$$U_2(x_2, y_2) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U_1(x_1, y_1) \exp[-j2\pi(f_x x_1 + f_y y_1)] dx_1 dy_1 \quad (2.48)$$

şeklinde yazılabilir. f_x ve f_y (2.37) ve (2.38) bağıntılarıyla tanımlanan uzaysal frekanslardır. Yalnız z uzaklığı yerine merceğin f odak uzaklığı kullanılmalıdır. (2.48) denkleminde dalganın mercekten daha ufak bir alanı kapsadığı varsayılmıştır. Aksi takdirde (2.48) denkleminde (2.29) denkleminde olduğu gibi bir pencere fonksiyonu eklenmelidir.

Bundan böyle f_x ve f_y uzaysal frekanslarında hesap edilen iki boyutlu fourier dönüşümü F harfiyle gösterilecektir. Örneğin, (2.48) denklemi

$$U_2(f_x, f_y) = F[U_1(x_1, y_1)] \quad (2.49)$$

şeklinde yazılacaktır.

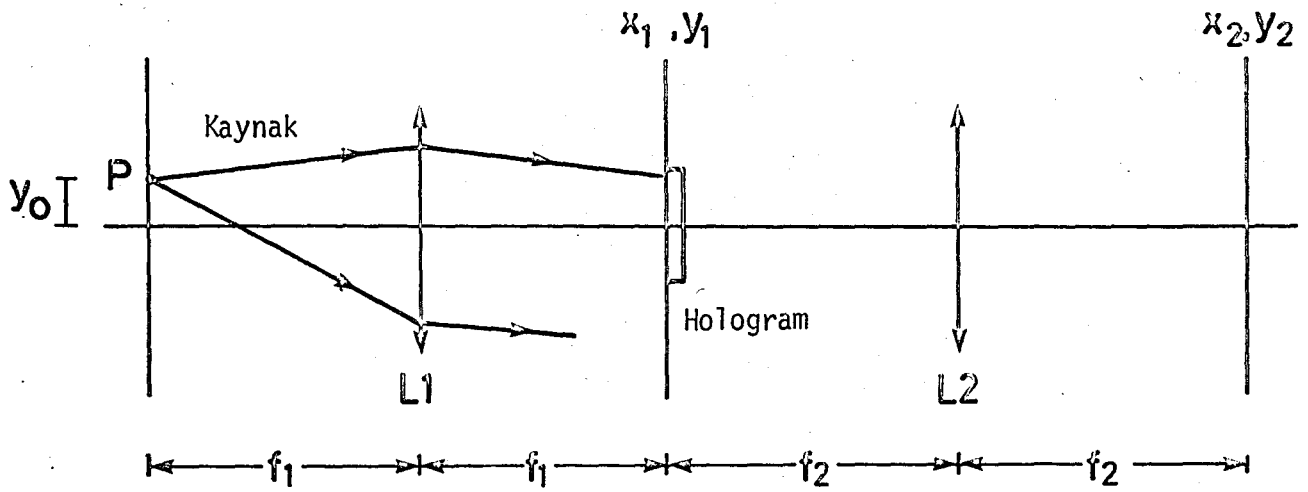
Lohmann hologramı için gerekli sistem şekil 2.4'de gösterilmiştir. P noktasından kaynaklanan küresel bir dalga L_1 merceği ile fourier dönüşümü sağlandıktan sonra düzlem dalga haline getirilmektedir. Dolayısıyla hologramı aydınlatan taşıyıcı dalga

$$\psi_t(x_1, y_1) = A \exp(j2\pi y_0 y_1) \quad (2.50)$$

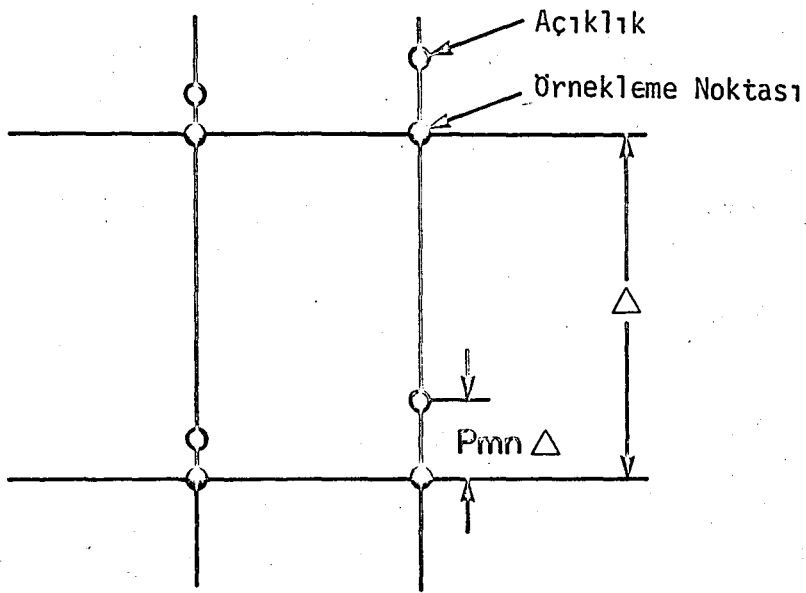
olarak yazılabilir. Fiziksel olarak hologram şekil 2.5'de görüldüğü gibi örnekleme noktalarına belirli yakınlıkta yapılan deliklerden oluşmaktadır. Delikler çok küçük yapılırsa delikten çıkan dalga Dirac delta fonksiyonuyla gösterilebilir. Dolayısıyla hologramın iletim fonksiyonu

$$t(x_1, y_1) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N B_{mn} \delta(y_1 - (m + p_{mn})\Delta) \delta(x_1 - n\Delta) \quad (2.51)$$

olarak yazılabilir. M ve N hologram matrisinin büyüklüğünü gösteren tamsayılar, B_{mn} delik büyüklüğüne orantılı bir sayı, p_{mn} deliğin



Şekil 2.4 - Lohmann hologramı için gerekli düzen



Şekil 2.5 - Lohmann yönteminde örnekleme noktaları ve açıklıklar

örnekleme noktasından ne kadar kaydırıldığını gösteren bir sayı, Δ örnekleme noktaları arasındaki uzaklıktır. Şekil 2.4'de gösterilen işaret düzleminde arzu edilen dalga

$$U_2(x_2, y_2) = F[U_t(x_1, y_1) t(x_1, y_1)] \quad (2.52)$$

olarak yazılabilir. (2.52) denklemi konvolüsyon teoremi kullanarak kolayca çözülebilir. Sonuçta

$$U_2(x_2, y_2) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N B_{mn} \exp(-j2\pi(m + p_{mn})(f_y - y_0)\Delta) \exp(-j2\pi f_x n \Delta) \quad (2.53)$$

bağıntısı elde edilir [19]. $2\pi p_{mn} f_y \Delta$ teriminin tüm faza katkısı az olduğundan ihmal edilirse, ve y_0 bir tamsayı seçilirse (2.53) denklemi

$$U_2(x_2, y_2) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N B_{mn} \exp(j2\pi p_{mn} y_0 \Delta) \exp(-j2\pi m \Delta f_y) \exp(-j2\pi n \Delta f_x) \quad (2.54)$$

olarak yazılabilir. (2.54) bağıntısının bir Fourier dönüşümü olduğu görülmektedir. Uygulamada matris büyüklüğü dolayısıyla hızlı Fourier dönüşümü kullanmak gerekmektedir. Bunu sağlayabilmek için x_2 ve y_2 noktaları Δ_0 aralığıyla kuvantalanır, ve Δ_0

$$\Delta \Delta_0 / \lambda f = 1 \quad (2.55)$$

bağıntısına göre seçilir. Şimdi (2.55) denklemi yeniden yazıldığında

$$U_2(\ell, k) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N B_{mn} \exp(j2\pi p_{mn} y_0 \Delta) \exp(-j2\pi m \ell) \exp(-j2\pi n k) \quad (2.56)$$

şeklini alır. ℓ ve k örnekleme noktasını tayin eden tamsayılardır. İşaret dalgasının Fourier dönüşümü hesap edilirse ve her bir Fourier bileşeninin karmaşık değeri $A_{mn} e^{j\phi_{mn}}$ olarak yazılırsa, $U_2(\ell, k)$ dalgasının işaret dalgasına eş düşmesi için

$$B_{mn} = A_{mn}/MN \quad (2.57)$$

$$P_{mn} = \phi_{mn}/2 y_0 \quad (2.58)$$

denklemleri doğru kılınmalıdır. Artık hologramın yapılması için yeterli bilgi mevcuttur. İlk önce hızlı Fourier dönüşümü kullanarak A_{mn} ve ϕ_{mn} bileşenleri bulunur. Sonra deliğin yeri (2.58) denklemi, büyüklüğü ise (2.57) denklemi kullanarak hesap edilir.

(2.51) denkleminde hologramın iletim fonksiyonu için Dirac delta fonksiyonu kullanılmıştı. Bunun fiziksel nedeni deliklerin hologramdan uzakta nokta kaynak (point source) gibi gözükmesidir. Mercek, kullanılması çok uzakta geçerli olan bu olguyu odak düzleminde geçerli kılmaktadır. (2.53) ve (2.48) denklemlerinin birbirleriyle karşılaştırılması bu yönden ilginçtir.

Kinoform yöntemi çok düzeyli bir faz kodlama yöntemidir [20]. Bu yöntemde ikili faz kodlama yönteminde olduğu gibi genlik değişmez varsayılmaktadır. Fazın belirli sayıda düzeyde kaydedilmesi filmin kalınlığını kontrol etmekle mümkün olmaktadır. Teknik yönden bu kontrolün sağlanması zor ise de tek bir işaret meydana getirmesi ve yüksek kırınma randımanı gibi önemli özellikleri vardır.

Lee yöntemi Lohmann yöntemine benzer [21]. Bu yöntemde her karmaşık Fourier dönüşüm örneği g

$$g = g_1 - g_2 + jg_3 - jg_4 \quad (2.59)$$

olarak yazılır. Bu denklemdeki her terime karşılık olmak üzere hologram üstünde birbirine nazaran $\pi/2$ kadar faz değişimi sağlayan dört ayrı nokta bulunur. Bu noktalarda yapılan deliklerin büyüklüğü g_1, g_2, g_3 ve g_4 sayılarına orantılı seçilir. Burckhardt $\pi/2$ kadar

faz değişimi sağlayan dört ayrı nokta yerine $2\pi/3$ kadar faz değişimini sağlayan c nokta önermiştir [22]. Böylece hologramın hesaplanması daha hızlı olacağı gibi hologram üstündeki delik sayısı da azalmış olmaktadır.

Daha karmaşık bir kodlama tekniği hem genliğin hem de fazın ayrı ayrı ve aynı anda kodlanabilmesidir. Böyle bir teknik çok emülsiyonlu eksenüstü hologram yöntemi adıyla geliştirilmiştir [23]. Burada genlik bir film emülsiyonunun iletim oranını kontrol etmekle, faz ise ikinci bir film emülsiyonunun kalınlığını modüle etmek suretiyle kaydedilmektedir. Yalnız her iki kontrolu aynı anda yapabilmek teknik yönden çok zordur.

Bu örneklerden sayısal holografi yöntemlerinin sayısal modülasyon yöntemlerine benzer olduğu göze çarpmaktadır. Örneğin deliklerin büyüklük kontrolu darbe genişlik modülasyonuna (PWM), yerlerinin örnekleme noktalarının kaydırılması suretiyle kodlanması darbe yer modülasyonuna (PPM), Lee ve Burckhardt yöntemleri ise darbe genlik modülasyonuna (PAM) benzemektedir.

2.3 kısımda Huygens-Fresnel ilkesinin doğrusal sistem özel-liği gösterdiği belirtilmişti. Üç boyutlu bir cisimden kırılan bir işaret dalgası Huygens-Fresnel prensibi kullanarak hologram üstünde

$$U_2(x_2, y_2) = \int_z \left[\iint U_1(x_1, y_1, z) h(x_1, y_1, x_2, y_2) dx_1 dy_1 \right] dz \quad (2.60)$$

olarak yazılabilir. $U_1(x_1, y_1, z)$ cisimden kırılan işaret dalgasıdır. Hologram üstünde işaret dalgası bir taşıyıcı dalga ile çarpıldıktan sonra kodlanmaktadır. Bu işlem h impuls yanıtını başka bir impuls yanıtına dönüştürmektedir. Dolayısıyla holografi doğrusal (lineer) bir sistem olarak düşünülebilir. Bu yüzden $h(x_1, y_1, x_2, y_2)$ impuls

yanıtına göre geliştirilen bir hologram yöntemi herhangi bir üç boyutlu işaret dalgası için de geçerli olmaktadır. $h(x_1, y_1, x_2, y_2)$ impuls yanıtı (2.32) denkleminde görüldüğü gibi z uzaklığında x_1, y_1 noktasından kaynaklanan küresel bir dalgadır.

2.7 Hologram Band Genişliği, Hızlılık ve Duyarlılık

Bütün iletişim sistemlerinde olduğu gibi holografide de band genişliği hologramın yapımı ve uygulama gereksinimlerinde çok önemli bir etkidir.

(2.47) denkleminde hologram iletim fonksiyonunun orantılı olduğu ve genlik ve faz modülasyonuna neden olan dalga gösterilmiştir. Dolayısıyla hologram iletim fonksiyonunun uzaysal açısal frekansları bu dalganın fazının x , y ve z değişkenlerine göre türevini almakla bulunabilir.

Hologram band genişliği hologramın taşıyabileceği en yüksek uzaysal frekans olarak tanımlanacaktır. Uzaysal frekans genellikle bir milimetredeki devir sayısı olarak belirtilmektedir. Film gibi karesel bir detektörde iki uzaysal dalganın çarpmalı karıştırılması görünüş olarak karışım çizgileri meydana getirdiğinden, uzaysal frekans bir milimetredeki çizgi sayısı olarak da ifade edilmektedir.

Uzaysal frekans değişimini daha iyi açıklayabilmek için Şekil 1.5'de görüldüğü gibi uzayda P ve R noktalarından kaynaklanan ve hologram düzleminde karıştırılan iki küresel dalga ele alalım. Başlangıç fazları hologram üstünde bir değişime yol açmayacağından sıfır olarak kabul edilirse, her iki dalganın H noktasındaki faz farkı $\Delta\phi$

$$\Delta\phi = k(r_{12} - r_{1t}) \quad (2.61)$$

olacaktır. Fresnel yaklaşımı kullanılırsa ve hologram düzlemi üstünde değişimi olmayan kz_2 ve kz_t terimleri ihmal edilirse, faz farkı

$$\Delta\phi = k\Delta r = k[(x_2^2 + y_2^2)(\frac{1}{2z_t} - \frac{1}{2z_2}) - x_2(\frac{x_t}{z_t} - \frac{x_1}{z_2}) - y_2(\frac{y_t}{z_t} - \frac{y_1}{z_2})] \quad (2.62)$$

şeklini alır. z_t ve z_2 birbirlerine denk ve z değerine eşit ise, faz farkı

$$\Delta\phi = -k[x_2(\frac{x_t - x_1}{z}) + y_2(\frac{y_t - y_1}{z})] \quad (2.63)$$

olarak yazılabilir. Bu durumda (2.47) denklemi ile tanımlanan dalga düzlem dalga şeklini almaktadır. Hologram üstündeki bir noktada x -ekseni yönündeki f_x uzaysal frekansı $\Delta\phi$ faz farkının 2π kadar değişmesi için x_2 koordinatında yapılacak değişikliğin tersine eşittir. Aynı şekilde y -ekseni yönündeki f_y uzaysal frekansı da bulunabilir.

(2.63) denkleminde f_x ve f_y

$$f_x = \frac{x_t - x_1}{\lambda z} \quad (2.64)$$

$$f_y = \frac{y_t - y_1}{\lambda z} \quad (2.65)$$

olarak bulunur. Bu bağıntılardan taşıyıcı dalganın kaynaklandığı nokta ile işaret noktası arasındaki uzaklık arttıkça uzaysal frekansların büyüdüğü görülmektedir. Dolayısıyla işaret büyüdükçe hologram için gerekli band genişliği de artmaktadır.

z_t ve z_2 birbirlerine denk değilseler, hangi uzaysal frekansların önemli olduğunu göstermek için (2.47) denklemi ile ifade edilen dalganın iki boyutlu Fourier dönüşümünü almak gerekmektedir. Fiziksel olarak fazın hologram üstünde ne hızda değiştiğini anlayabilmek için (2.62) denkleminde sabit bir $\Delta\phi$ değeri için (x_2, y_2) koordinatlarının bir daire üstünde olduğuna dikkat etmek yeterli varsayılabilir. $\Delta\phi$ faz farkını 2π kadar arttırmakla bir daireden diğerine geçilmektedir. Hologram üstündeki bir noktada iki dairenin birbirine yakınlığı fazın o noktada hangi hızla değiştiğini gösterir. Örneğin, birinci daire üstünde bir nokta seçilirse, x-eksenine paralel olarak birinci daireden ikinci daireye geçmek için x_2 koordinatını x_2' koordinatına değiştirmek gerekmektedir. Aradaki fark

$$\Delta x_2 = x_2 - x_2' = \frac{\lambda}{(x_2 + x_2')(1/z_t - 1/z_2)/2 - (x_t/z_t - x_1/z_2)} \quad (2.66)$$

olarak yazılabilir. Δx_2 küçüldükçe hologramın kaydedilmesi için gerekli band genişliği artmaktadır.

Hologramı meydana getiren bütün fiziksel ortamlar sınırlı band genişliğine sahiptir. Örneğin, en iyi kalite holografik film milimetrede bir kaç bin karışım çizgisi ile sınırlıdır. Dolayısıyla gerekli band genişliği hologram band genişliğinden daha küçük olmalıdır.

Holografinin teknik uygulamalarda çok daha başarılı olarak kullanılması bazı problemlerin çözülmesi ile yakından ilgilidir. Problemlerin çoğu band genişliği, elektronik aygıtların hızı ve işaret noktalarında istenen duyarlılık gereksinimlerine kolayca bağlanabilir.

İlk sözü edilecek problem hologramın yapımı sırasında ortamın kullanılan dalgaboyuna kıyasla hareketsiz olması gereksinimidir.

Çok kısa darbeleri laser ışını kullanılırsa bu sorun oldukça azalmaktadır. Mikrodalga, sismik ve ultrasonik dalgalar kullanıldığında dalgaboyu daha büyük olduğundan küçük titreşimler daha az etkilidir. Ne kadar titreşimin zararsız sayılabileceği karışım çizgileri arasındaki uzaklığa, diğer bir deyimle band genişliğine bağlıdır. Gerekli band genişliği azaldıkça titreşimlerin etkisi de azalır.

Hologramı yapılan işaretin büyüklüğü kullanılan dalganın uyumluluğuna ve hologramın band genişliğine bağlı olarak sınırlıdır. Laser bulunmadan önce yeterli derecede uyumlu ışık dalgası bulunmadığından holografinin gelişmesi uzun seneler mümkün olmamıştır. Bugün ise laser bir kaç metre büyüklüğündeki işaretlerin hologramının yapılmasını mümkün kılmaktadır. Mikrodalga, sismik ve ultrasonik dalga kaynakları aynı şekilde yeterli uyumluluk özelliği göstermektedir. Dolayısıyla hologramın band genişliği daha önemli bir sınırlama olmaktadır.

Hologramların kolaylıkla kopya edilebilmesi diğer bir sorundur. En kolay kopyalama yöntemi kopyası yapılacak hologramı yeni hologramla ardarda koyup taşıyıcı dalga ile aydınlatmaktır. Burada da gerekli band genişliği ne kadar az olursa kopyalama işlemi de o kadar kolaylaşmaktadır.

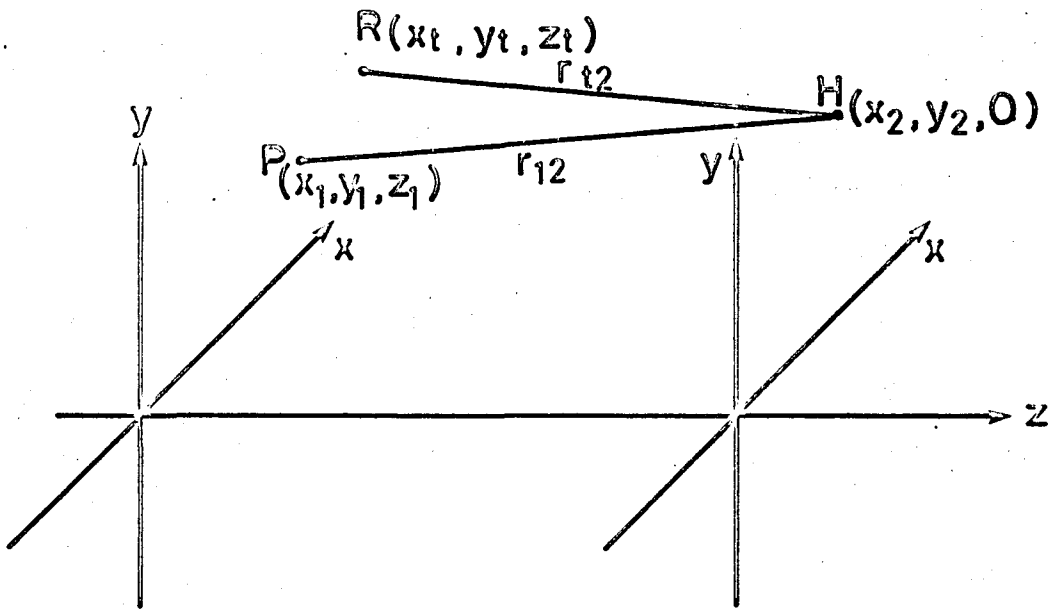
Hologramın ne kadar büyük olması sorununda band genişliğinin yanı sıra hologramın aydınlatılmasıyla elde edilen işaret noktalarının odaklama duyarlılığı etkin olmaktadır. Rayleigh prensibine göre [12], kırınım dolayısıyla dikdörtgen şeklinde bir pencereden gelen λ dalga boylu bir dalganın meydana getirdiği işaret noktaları arasındaki en ufak h_R uzaklığı

$$h_R = z\lambda/L \quad (2.67)$$

olarak saptanır. Burada z pencere ile işaret düzlemi arasındaki uzaklık, L ise pencere büyüklüğüdür. Bu bağıntıdan işarete olan uzaklık arttıkça hologramın daha büyük yapılması gerektiği görülmektedir. Yalnız hologramın aydınlatılmasıyla meydana getirilecek işaret göz ile izlenecek ise gözün etkin mercek büyüklüğü birkaç milimetre mertebesinde olduğu hatırlanmalıdır [11]. Dolayısıyla hologramın da bu mertebede yapılması odaklama duyarlılığı açısından yeterli sayılabilir.

Hologramın elektronik aygıtlar ile hızlı olarak deteksiyonu ve kaydedilmesi, diğer bir merkeze iletişim kanallarından nakli ve işaretin hızlı olarak yeniden elde edilmesi gibi işlemler gerekli band genişliği ile yakından ilgilidir. Band genişliği daraltıldıkça bu işlemlerin daha hızlı olarak yapılabilmesi mümkün olmaktadır.

Çeşitli problemlerin band genişliği ve hologram büyüklüğü ile yakından ilgili olduğu bu açıklamalardan anlaşılmaktadır. Dolayısıyla virtüel holografi adıyla tanımlanan ve geliştirilen yöntemde band genişliğinin ve hologram büyüklüğünün istenen şekilde, hızlı ve kolay olarak ayarlanabilmesi esas tutulmuştur.



Şekil 2.6 - Uzaysal frekans değişimini tanımlamakta kullanılan geometri

BÖLÜM 3 - YENİ BİR KODLAMA YÖNTEMİ

3.1 G i r i ş

Bir önceki bölümde hologram band genişliğinin, uzaysal frekansların ve kullanılan aygıtların hızlılığıının önemi belirtilmişti. Hologram band genişliği problemini çözmek için iki yol geçerlidir. Birincisi teknolojinin geliştirilmesi ile hologram band genişliğini arttırmaktır. İkinci yol yeni holografi yöntemleri geliştirerek işaretin band genişliğini hologramın band genişliği altında tutmaktır.

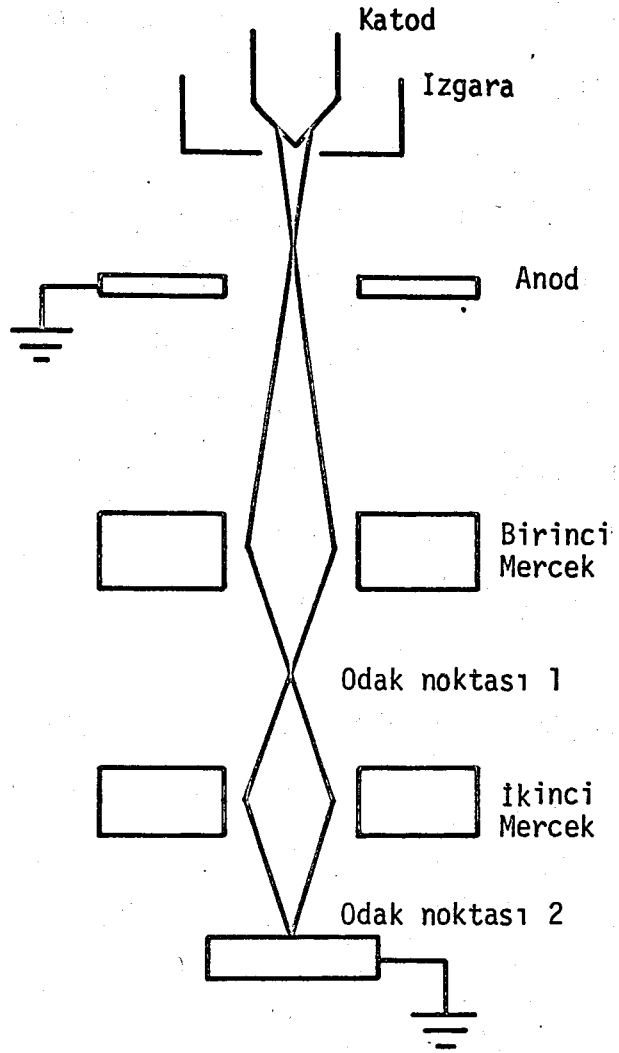
Teknolojinin gelişmesi uzaysal band genişliği çok yüksek olan ve hızlı olarak, tercihen gerçek zamanda çalışan aygıtların meydana getirilmesi ile yakından ilgilidir. Örneğin, sayısal holografide hologramın meydana getirilmesi için tümleşik devre teknolojisinden faydalandığı belirtilmişti. Burada hologram ilk önce büyük olarak çizilip, daha sonra duyarlı bir kamera ile küçültüldüğünden hızlılık ve gerçek zamanda bilgi işleme isteği gerçekleştirilememektedir. Bu sorunu çözebilmek için bu çalışmada taramalı elektron mikroskop sistemi kullanılması uygun görülmüştür. Aynı zamanda böyle bir sistemin uzaysal band genişliğini diğer sistemlerdekinden daha yüksek olarak geliştirmek de mümkündür. Çünkü tümleşik devre teknolojisinde kullanılan sistemlerde, boyutların optiksel olarak küçültülmesinin sınırı ışık dalgaboyuna bağlı kırınım olayı ile belirlenirken,

taramalı elektron mikroskop sisteminde bu sınır çok daha küçük olan elektronların dalgaboyuna bağlı kırınım kolayı ile belirlenmektedir. Tümlleşik devre yapımında da band genişliğini arttırmak için kapasiteleri azaltmak gerektiğinden daha ufak boyutlara gidilmesi gerekmektedir. Bu yüzden taramalı elektron mikroskop sistemlerinin geliştirilmesi tümlleşik devre teknolojisinde de çok güncel bir konudur. Kullanılan taramalı elektron mikroskop sistemi ile ilgili bilgiler bir sonraki kısımda verilmektedir.

Düşünülen yeni holografi yöntemlerinin ve aygıtlarının test edilebilmesi için esnek bir uzaysal kodlama yöntemine ihtiyaç vardır. Bu yöntem bilhassa bilgisayar ile hızlı olarak hesaplamaya uygun olmalıdır. Holografide çok fazla veriye ihtiyaç olduğundan hesaplama zamanını enazlamak için yöntem mümkün olduğu kadar basit olmalıdır. Bu bölümde sözü edilen gereksinmelere uygun olarak geliştirilen bir yöntem ve taramalı elektron mikroskop sistemine uygulanması açıklanacaktır. Yöntemin belirtilecek bazı uygulamalarda diğer yöntemlerden daha başarılı sonuçlar verdiği deneysel olarak görülmüştür.

3.2 Taramalı Elektron Mikroskop Sistemi

Taramalı elektron mikroskop sisteminde iyi odaklanmış bir elektron ışını bir düzlem üstünde belirli bir aralıkla meydana getirilen matris noktalarının herhangi birine yönlendirilebilmektedir.[13]. Elektron ışınının düzlem üstünde odaklanması Şekil 3.1'de görüldüğü gibi manyetik mercekler ile yapılmaktadır. Burada katod bir



Şekil 3.1 - İki manyetik mercek ile bir elektron ışını odaklandırılması

milimetre mertebesinde kalınlığı olan bir tungsten telidir. Izgara elektron ışınının şekillendirilmesi için kullanılır. Katod ile anod arasındaki 20-40 kilovolt mertebesindeki gerilim farkı yüzünden ivme kazanan elektronlar anodun ortasındaki delikten geçerler. Daha sonra elektron ışını birinci ve ikinci manyetik mercekler ile düzlem üstünde odaklanır.

Bir elektron merceği elektrik motorlarında olduğu gibi demir bir çekirdeğe sarıllı solenoidden akım geçirilmesi ile elde edilen manyetik alan ile sağlanır. Optik merceklerin tanımında kullanılan değişkenler manyetik mercekler için de geçerlidir. Örneğin, bir manyetik mercek odak düzlemleri ve ana düzlemlerinin (principal planes) yerleri ve aberasyon katsayılarının değerleri ile belirlenir. Odak noktasında elektron ışınının çapı 100 angstrom mertebesinde olmaktadır [13].

Elektron ışınının x ve y eksenleri yönünde saptırılışı testere ağızlı dalga görünümlü iki ayrı üreteçten saptırma bobinlerine akım beslenmesi ile elde edilir. Hem x hem de y eksenleri yönünde saptırma sağlamak için birbirlerine 90 derece açıda yerleştirilen iki ayrı bobin vardır.

Taramalı elektron mikroskop sisteminde gaye elektron ışını ile elektron resist gibi elektronlara duyarlı olan bir filmi belirli sayıdaki matris noktalarında etkilemektir. Elektron ışınının film üstündeki matris noktalarında odaklanıp filmi etkilemesi ve daha sonra filmin banyo edilmesi ile taşıyıcı dalgaının kırınımını sağlayacak olan açıklıklar meydana getirilir. Negatif resistlerde banyo sırasında

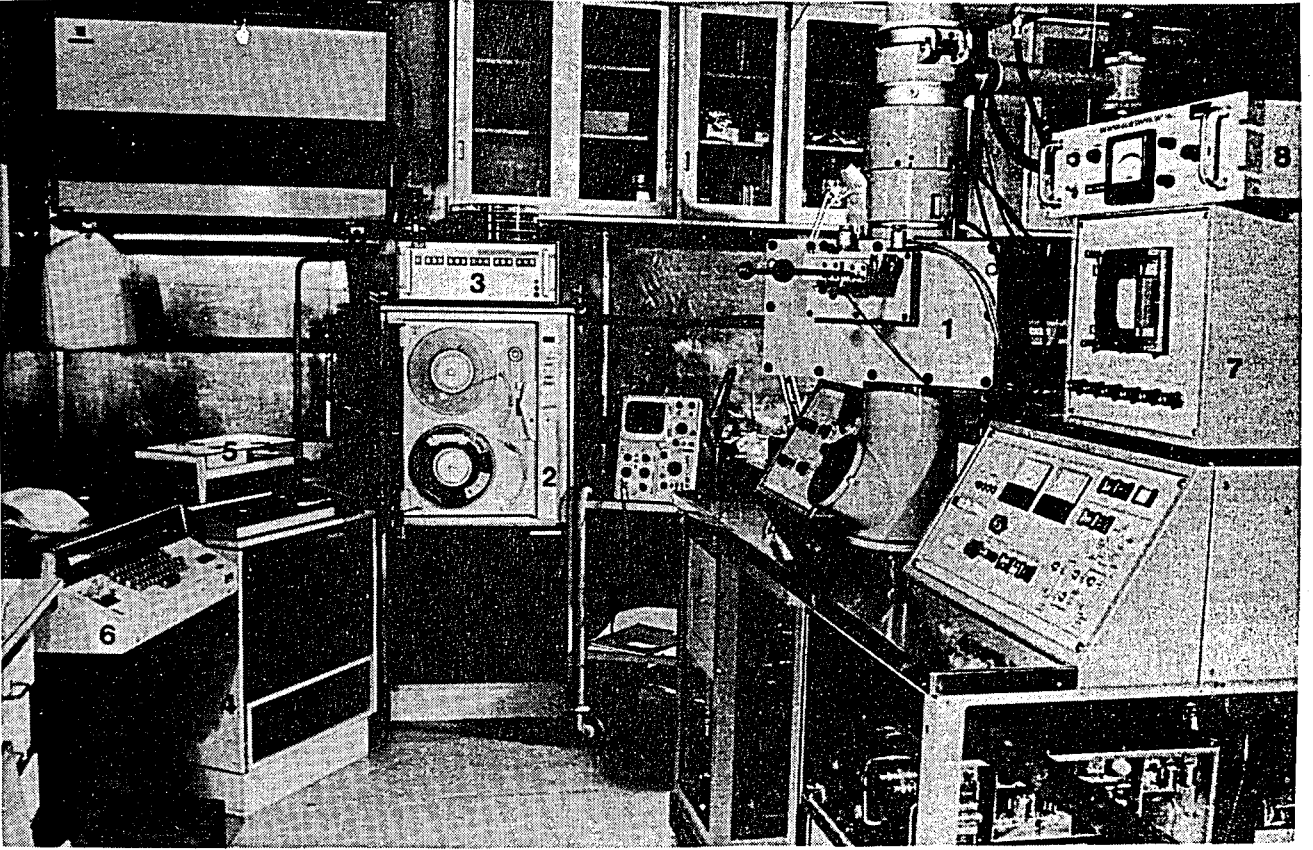
elektron ışını ile etkilenmeyen kısımlar erirken, pozitif resistlerde elektron ışını ile etkilenen kısımlar erimektedir [14].

Elektron resistler binlerce kimyasal bağdan meydana gelen uzun zincirli polimerlerden yapılmaktadır. Bu polimerlere radyasyonun iki etkisi vardır. Birincisi moleküllerin birbirine eklenmesi sonucu molekül ağırlığının artmasıdır. Bu olaya karşılıklı eklenme (cross-linking) denir. Diğeri ise birinci etkinin tersine moleküllerin parçalanmasıdır. Birinci etki hakim olduğunda negatif resist, ikincisi hakim olduğunda pozitif resist meydana gelmektedir.

Kullanılan sistem katod ile anod arasındaki gerilimi 30 kilovolt olan JEOL taramalı elektron mikroskobu, mikroskobu kontrol eden Kongsberg SM 402-S minibilgisayarı ve teyp istasyonundan oluşmuştur. Sistem Şekil 3.2'de görülmektedir.

Bu sistemde elektronlar ile sürekli etkileme için çalışma alanı 2x2 milimetredir. Bu alan içinde elektron ışınının üstünde odaklanabildiği noktaların matris büyüklüğü 4096x4096 olarak belirlenir. Tek bir noktanın elektron ışını ile etkilenmesi ve filmin banyo edilmesi sonucu meydana gelen açıklığın çapı bir mikron mertebesindedir. İki en yakın nokta arasındaki uzaklık yarım mikron kadar olduğundan açıklıkların büyüklüğü komşu noktaları etkilemek suretiyle kontrol edilebilmektedir.

2x2 milimetre büyüklüğündeki sürekli çalışma alanı tekrar-lama motorları sayesinde x ve y eksenleri yönünde kaydırılarak 7.4x7.4 santimetre büyüklüğünde bir alan taranabilmektedir. Her kaydırma ± 5 mikron kadar bir kararsızlık olduğundan kaydırmanın tek bir hologram için değil de birbirinden bağımsız hologramlar için yapılması uygundur. Bununla beraber, aynı işaret noktaları için birbiri yanısıra



Şekil 3.2 - Taramalı elektron mikroskop sistemi

1. JEBX-4S taramalı elektron mikroskobu
2. Pertec manyetik teyp istasyonu
3. Ara ünitesi
4. Kongsberg SM-4 minibilgisayarı
5. Facit kağıt teyp delicisi
6. Data Dynamics 390 teletayp
7. Monitor
8. Pirani vaküm metresi

çeşitli hologramlar yapılırsa bakış penceresi ve işaret noktalarının şiddeti arttırılabilmektedir.

Deneylerde kullanılan ince filmler KPR gibi negatif resist veya polymethylmethacrylate gibi pozitif elektron resist türünde olmuştur [14], [15]. Film bir cam levha üstüne damlatılan resistin dakikada birkaç bin defa dönen bir motor ile döndürülmesiyle meydana getirilmektedir. Aynı yöntem tünleşik devre teknolojisinde maske yapımında da kullanılmaktadır. Benzer şekilde taramalı elektron mikroskop sistemi de mikroelektronikte bu gaye ile geliştirilmekte ve kullanılmaktadır [13].

Odak noktasında elektron ışınının çapı 100 angstrom mertebesinde iken açıklıkların büyüklüğünün 1000 angstrom olduğu belirtilmişti. Bunun ana nedeni elektronların moleküller ile çarpışması sonucu madde içinde yayılmasıdır. Bu olayın nedenleri, açıklıkların filmin banyo edilmesinden sonra aldığı şekil teorik olarak yeterince anlaşılmamıştır. Halbuki açıklıkların şekli ve derinliği kontrol edilebilirse kırılma indisinin değişmesi dolayısıyla taşıyıcı dalganın fazının istenilen şekilde kontrol edilebilmesi mümkün olacak ve karmaşık uzaysal süzgeç ve hologramlar yapılması kolaylaşacaktır. Benzer nedenler ile elektronların resistleri etkilemesi olayı teorik açıdan tünleşik devre teknolojisi için de çok önemlidir. Bu sebeplerden ötürü elektron ışını ile pozitif ve negatif resistlerin etkilenmesi olayı incelenmiş, teorik bir model geliştirilmiş ve deneylerle karşılaştırılmıştır. Alınan sonuçlar ekte sunulmuştur.

3.3 Açıklıkların Etkisi

Sayısal holografide açıklık adı verilen küçük alanların fiziksel değişimi sağlanıp taşıyıcı dalganın bu açıklıklarda kırınımına uğratıldığı belirtilmişti. Örneğin, Lohmann yönteminde açıklıklar hesap edilen noktalarda büyüklüğü işaret dalgasının o noktadaki genliğine orantılı olan delikler ile sağlanmaktadır [16]. Taramalı elektron mikroskop sisteminde ise, elektron resist içindeki bölgecikler bir elektron ışını ile etkilendirilmekte ve daha sonra elektron resist banyo edilerek açıklıklar elde edilmektedir. Analog holografide genellikle kullanılan film içinde geliştirilen gümüş parçacıkları açıklıkların yerini tutmaktadır.

Açıklıkların holografi açısından en önemli etkisi hologramın aydınlatılmasında kullanılan $U(x,y,z)$ taşıyıcı dalgasının açıklık noktalarında genlik ve fazının değişime uğraması ve bu noktalardan kaynaklanan küresel dalga bileşenlerinin elde edilmesidir.

Eğer (x_0, y_0, z_0) bir gözlem noktasının ve (x_i^1, y_i^1, z_i^1) açıklığın içindeki bir noktanın uzay koordinatları ise N sayısı kadar açıklık için Huygens-Fresnel ilkesi

$$U(x_0, y_0, z_0) = \sum_{i=1}^N \left[\iint A_i U(x_i^1, y_i^1, z_i^1) h(x_i^1, y_i^1, z_i^1, x_0, y_0, z_0) dx_i^1 dy_i^1 \right] \quad (3.1)$$

olarak yazılabilir. $h(x_i^1, y_i^1, z_i^1, x_0, y_0, z_0)$ fonksiyonu (2.28) denklemi ile tanımlanmış ve iki nokta arasındaki propagasyon ile ilgili impuls yanıtıdır. A_i işareti tümlevin i açıklık alanı üstünde hesaplanacağını gösterir.

Açıklığın orta noktasının koordinatları (x_i, y_i, z_i) olduğu varsayılacaktır. Açıklıkların boyutları (2.25) denkleminde görülen $\cos \theta$ çarpanının ve taşıyıcı dalganın açıklık üstündeki değişimini önemsiz kılacak kadar küçük ise (3.1) denklemi

$$U(x_0, y_0, z_0) = \frac{1}{j\lambda} \sum_{i=1}^N U'(x_i, y_i, z_i) S_i(x_i, y_i, z_i, x_0, y_0, z_0) \cos \theta_i \quad (3.2)$$

olarak yazılabilir. Burada $U'(x_i, y_i, z_i)$ taşıyıcı dalganın açıklık noktasında geçirdiği değişimle aldığı şekil, θ_i θ açısının i açıklığındaki ortalama değeri ve $S_i(x_i, y_i, z_i, x_0, y_0, z_0)$ fonksiyonu

$$S_i(x_i, y_i, z_i, x_0, y_0, z_0) = \iint_{A_i} \frac{\exp(jkr_{oi})}{r_{oi}} dx'_i dy'_i \quad (3.3)$$

olarak belirlenir. r_{oi} (2.26) denklemi ile tanımlanan gözlem ve açıklık noktaları arasındaki uzaklıktır.

3.4 Yöntem

Her açıklığın x - y düzleminde dx ve dy boyutlu dikdörtgen şeklinde ve gözlem noktası ile açıklığın orta noktası arasındaki uzaklığın r_{ci} olduğu tanımlanacaktır. $U'(x_i, y_i, z_i)$ fonksiyonu

$$U'(x_i, y_i, z_i) = A_i e^{j\phi_i} \quad (3.4)$$

olarak yazılacaktır. Bütün açıklıkların taşıyıcı dalga üstündeki faz etkisi aynı ise ϕ_i taşıyıcı dalganın i açıklık noktasındaki fazı olarak seçilebilir.

(2.41) denklemi ile tanımlanan Fraunhofer yaklaşımı kullanılırsa (3.3) denklemi

$$S_i(x_i, y_i, z_i, x_0, y_0, z_0) = d_x d_y \exp(jkr_{ci}) \text{sinc}\left(\frac{X_i d_x}{r_{ci}}\right) \text{sinc}\left(\frac{Y_i d_y}{r_{ci}}\right) \quad (3.5)$$

olarak yazılabilir. Burada X_i , Y_i ve $\text{sinc}(x)$,

$$X_i \equiv x_0 - x_i \quad (3.6)$$

$$Y_i \equiv y_0 - y_i \quad (3.7)$$

$$\text{sinc}(x) = \frac{\sin \pi x}{\pi x} \quad (3.8)$$

olarak belirlenir. x değişkeninin küçük değerleri için sinc fonksiyonu yaklaşık olarak bir'e eşittir.

Eğer her açıklık orta noktası

$$kr_{ci} + \phi_i = 2\pi n_i + \Phi \quad (3.9)$$

denklemine göre seçilirse ve n_i bir tamsayı, Φ değişmez bir sayı olursa (3.2) denklemi yaklaşık olarak

$$U(x_0, y_0, z_0) = \left(\frac{1}{j\lambda}\right) \sum_{i=1}^N A_i \cos \theta_i d_x d_y \exp(j\Phi) \quad (3.10)$$

şeklinde yazılabilir. Bu durumda $U(x_0, y_0, z_0)$ belirli bir değere sahip olduğundan, gözlem noktasında bir işaret noktası elde edilmektedir. Küçük hologramlarda θ_i değişmez varsayılabilir. Her açıklığın taşıyıcı dalga üzerindeki etkisi aynı ise düzlem ve küresel taşıyıcı dalgalar için $\sum_{i=1}^N A_i$ toplamı N sayısına orantılı sayılabilir. Bu durumda işaret noktasındaki dalga'nın genliği $d_x d_y N$ değerine orantılı, fazı ise Φ değerine eş olmaktadır.

Uzaydaki çeşitli işaret noktaları için (3.9) denklemini doğru kılan açıklık grupları sağlanarak istenen bir işaret meydana getirilebilir. Her işaret noktasında d_x ve/veya d_y ve/veya N , o noktada istenen genliğe orantılı, ϕ o noktada istenen faza eşit seçilir. N büyük bir sayı olduğundan hemen hemen sürekli olarak değiştirilebilir ve dolayısıyla her işaret noktasında istenen genlik duyarlı olarak elde edilir.

Fraunhofer yaklaşımı kullanarak bulunan (3.5) denklemindeki $\exp(jkr_{ci})$ terimi dolayısıyla açıklığın etkisinin orta noktasından kaynaklanan bir küresel dalgaya eşdeğer olduğu görülmektedir. Yalnız burada Fraunhofer rejiminin geçerliliği hologramın büyüklüğü ile değil, açıklıkların büyüklüğü ile sınırlıdır. Açıklıklar genellikle çok küçük olduğundan yöntem holograma yakın uzayda da geçerlidir.

Açıklıklar dikdörtgen yerine daire şeklinde ise sinc fonksiyonu birinci dereceden Bessel fonksiyonuna dönüşmekte, fakat (3.9) ve (3.10) bağıntıları aynı kalmaktadır.

İşaret noktalarında ϕ fazı aynı seçilirse, holograma dik çarpan düzlem bir giriş dalgası için (3.9) denklemi

$$r_{ci} = n_i \lambda \quad (3.11)$$

şeklinde yazılabilir.

Her bir işaret noktasını elde etmek için çok sayıda açıklığa gerek duyulduğundan hesaplamaların bilgisayar ile hızlı olarak yapılabilmesi kaçınılmazdır. Bunun için her açıklığın koordinatları ilk önce rassal olarak seçilmektedir. Bu koordinatlara karşılık olan r_{ci} hesaplanmakta ve (3.11) denklemini kullanarak B sayısı

$$B = r_{ci} - n_i \lambda \quad (3.12)$$

bulunmaktadır. B sayısının sıfır yapılması için açıklığa x ve/veya y eksenî yönünde çok az yer değiştirilir. Örneğin, x_i koordinatı B sayısının sıfır olması için Δ kadar değiştirilirse, Δ

$$\Delta = [(x_i - x_0)^2 + B(B + 2n_i \lambda)]^{1/2} - (x_i - x_0) \quad (3.13)$$

ifadesiyle belirlenir.

Açıklık koordinatlarının rassal olarak seçilmesinde aynı koordinatların birkaç defa çıkması önemsiz varsayılırsa bellek kullanmaya ihtiyaç kalmamaktadır. Bu şekilde matematiksel olarak belirlenen açıklık koordinatları çizilecek olan hologram için gerekli bilgiyi içermektedir.

İletişim (haberleşme) kuramı açısından yöntemin ilginç yanı açıklıkların seçildiği noktaların taşıyıcı dalga ve işaret dalgasının çarpımından meydana gelen dalganın fazının sıfır geçişlerine karşılık olduğudur. Dolayısıyla yöntem bir uzaysal FM modülasyon yöntemidir.

Diğer ilginç bir özellik birden fazla işaret noktası kullanıldığı zaman hologram üstünde uzay-bölüşümlü-çoğaltım (space division multiplexing) yapıldığıdır. Uygulamaya konulmuş bulunan iletişim sistemlerinde frekans ve zaman için yapılan bu işlem bu yöntem ile uzayda hologram ile uygulanmaktadır.

Yöntemin bilgisayar ile uygulaması için geliştirilen program paketi ekte sunulmuştur.

3.5 Deneyler

Geliştirilen yöntem ve taramalı elektron mikroskop sistemini kullanarak hem yöntemin hem de sistemin işlerliğini kontrol edebilmek amacı ile hologramlar yapılmıştır. Deneylerde kullanılan ince filmler KPR, KTFR gibi negatif resistler veya PMMA gibi pozitif resist olmuştur.

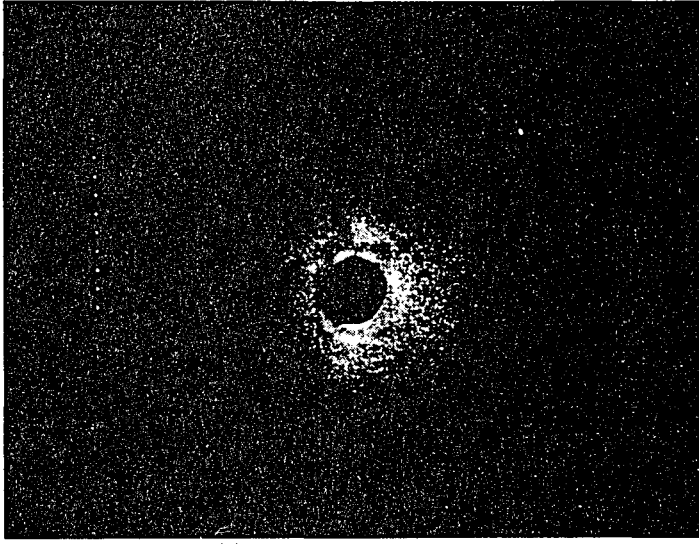
Taşıyıcı dalga holograma dik çarpan düzlem bir dalga olarak seçilmiştir. Dolayısıyla açıklıkların koordinatları (3.11), (3.12) ve (3.13) denklemlerini kullanarak bir önceki kısımda belirtildiği şekilde Univac 1108 bilgisayar ile hesaplanmış ve bir manyetik teyde kaydedilmiştir. Bu teyp minibilgisayar ile kontrol edilen taramalı elektron mikroskoba beslenen bilgiyi içermektedir. Hesaplamalar He-Ne laserinin dalgaboyu olan 0.6328 mikron için yapılmıştır.

Şekil 3.3 ve 3.4'de belirtildiği gibi yapılan iki hologramdan elde edilen neticeler görülmektedir. Bu hologramlar şimdiye kadar taramalı elektron mikroskop sistemi ile yapılan ve 3 boyutlu işaret sağlayan ilk hologramlardır.

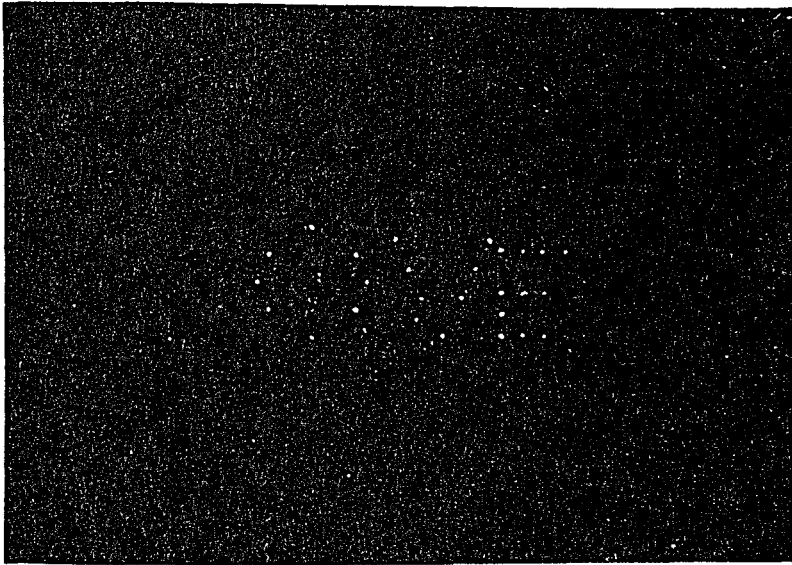
Şekil 3.3'de 11 işaret noktası 3 santimetre boyunda bir çizgi üstünde, koordinatları

$$\begin{aligned} x_0 &= 4 \text{ cm} \\ z_0 &= 60 \text{ cm} \\ 0 &\leq y_0 \leq 3 \text{ cm} \end{aligned} \tag{3.14}$$

olacak şekilde ve hologramın üst sol köşesi koordinat sisteminin başlangıç noktası olarak seçilmiştir. Her bir işaret noktası için kullanılan açıklık sayısı 120000 olarak düşünülmüş ve her açıklık 8x8 sayısında yanyana en küçük açıklıkların bileşeni olarak meydana getirilmiştir. İşaret dalgasının işaret noktalarındaki



Şekil 3.3 - Uzayda 3 santimetre boyunda bir çizgi üstünde
11 noktadan meydana gelen işaret



Şekil 3.4 - 3 boyutlu LOVE kelimesi olarak seçilen işaret;
her harf uzayda değişik bir düzlem üstündedir.

genliği eşit seşilmiştir.

şekil 3.3'de gösterilen resim hologramdan 60 santimetre uzaklıkta işaretin odaklandığı düzlemde çekilmiştir. Ana ışın filmin doyuma uğramaması için süzgeçlenmiştir. İstenen işaretin yanısıra eşlenik işaret de şekil 2.3'de zayıf olarak görülmektedir. Bir sonraki kısımda işaret analizi yapılırken eşlenik işaretin -1 harmoniği olduğu ortaya çıkarılacaktır.

şekil 3.3'de işaretin uzunluğunun 3 santimetreden az oluşu kullanılan Polaroid kameranın şekli kçltmesinden ötürüdür. Bu deneyler sırasında işaret düzleminin belirlenmesi için işaretin uzunluğunun 3 santimetre olarak ölçüldüğü düzlemin bulunmasının uygun bir metod olduğu grlmştir.

şekil 3.4'de ikinci hologramdan elde edilen işaret ile üç boyutluluk özelliği gösterilmektedir. Bu işaret ile LOVE kelimesi uzayda üç boyutlu olarak yazılmıştır. Dört harfin her biri uzayda değişik bir düzlem üstünde seşilmiştir. Dört düzlemin hologram düzleminden olan uzaklıkları 60, 70, 80 ve 90 santimetredir. Bütün harfler tek bir düzlem üstünde olsaydı harflerin arasındaki yatay uzaklık 1 santimetre olacaktı. Resimde görüldüğü gibi bu uzaklık ilk harften son harfe doğru azalmakta ve harfler arasındaki 10 santimetrelilik derinliğin etkisini göstermektedir. İşaret dalgasının işaret noktalarındaki genliği eşit seşilmiştir. Resim hologramdan yaklaşık olarak 90 santimetre uzakta, yani E harfinin odaklanma dzlenimde çekilmiştir. Bu yüzden E harfi en parlak, L harfi en az parlaktır.

Her işaret noktasına karşılık seçilen hologram açıklık sayısı 100000 olup her açıklık 4x4 sayısında yanyana en ufak açıklıklardan meydana getirilmiştir.

Hologram KPR resisti üstüne çizilmiştir. Ayrıca aynı işaret için PMMA resisti üstüne 4x4 matris halinde 16 yanyana hologramlar yapılmış ve 2x2 milimetre boyutları olan bu bileşik hologram bir laser ile aydınlatıldığında hologram içinden bakarak işaret uzaydaki yerinde kolaylıkla görülmüştür.

3.6 İşaret Analizi

Geliştirilen yöntemde her işaret noktası için çeşitli harmoniklerin de elde edildiği görülmüştür. Şekil 3.5'de tek işaret noktası için yapılan hologram aydınlatıldığı zaman meydana gelen harmonikler görülmektedir. Ortadaki beyaz yuvarlak taşıyıcı dalganın şiddetinin fazla olmasından ileri gelmiştir. Bunun sağında gerçel işaret ve gerçel harmonikler, solunda ise eşlenik işaret ve eşlenik harmonikler görülmektedir.

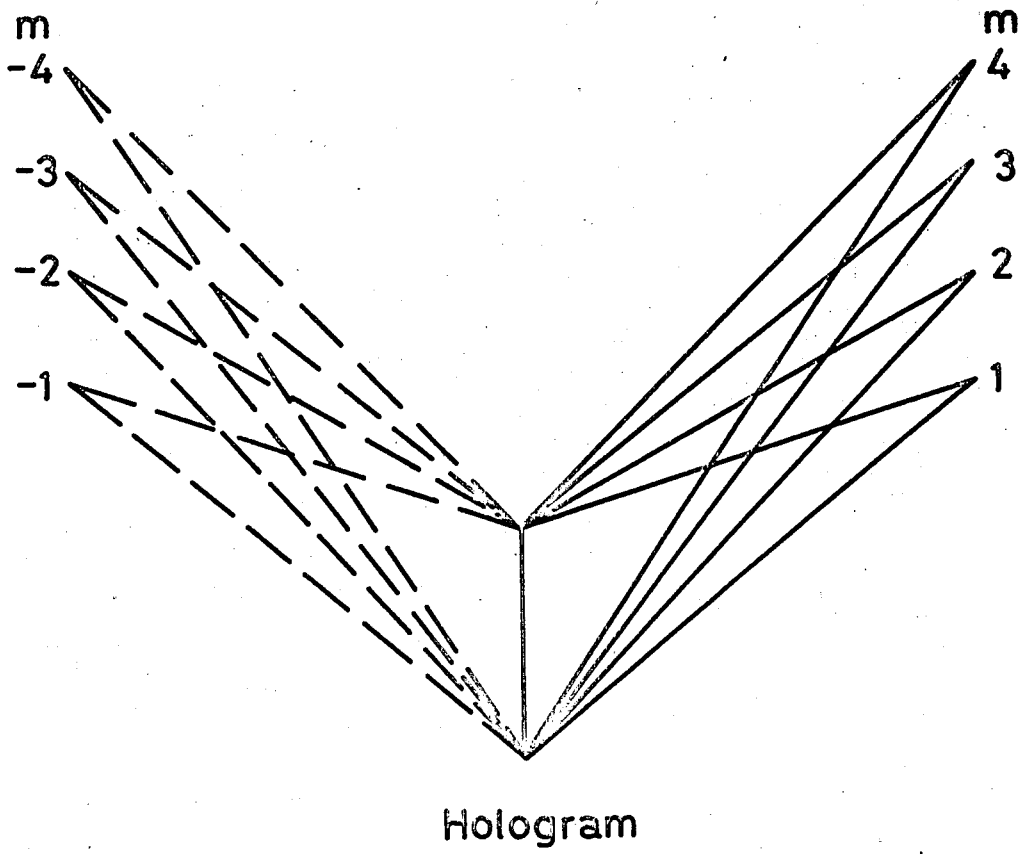
Harmoniklerin ne şekilde meydana geldiğini anlamak için işaret noktası ile açıklığın orta noktası arasındaki r_{ci} uzaklığı Fresnel yaklaşımı kullanarak yazılacaktır:

$$r_{ci} = z_0 + \frac{x_0^2 + y_0^2 + x_i^2 + y_i^2}{2z_0} - \frac{xx_i + yy_i}{z_0} \quad (3.15)$$

(2.5) denkleminde tanımlandığı şekilde düzlem bir taşıyıcı dalga kullanılıyorsa (3.9) denklemi



Şekil 3.5 - Tek bir nokta işaret için yapılan hologramdan elde edilen değişik nokta harmonik işaretler



Şekil 3.6 - Çeşitli nokta harmonik işaretlerin uzayda görünüşü

$$x_i \left(\frac{k_x}{k} - \frac{x_0}{z_0} \right) + y_i \left(\frac{k_y}{k} - \frac{y_0}{z_0} \right) + \frac{x_i^2 + y_i^2}{2z_0} = n_i \lambda + E \quad (3.16)$$

$$E = \frac{\Phi}{k} - z_0 - \frac{x_0^2 + y_0^2}{2z_0} \quad (3.17)$$

şeklinde yazılabilir.

Bir işaret noktasının elde edilmesi için (3.16) denkleminin açıklık koordinatları ile değişmeyen E terimi ihmal edildikten sonra herhangi bir n_i tamsayısı için doğru kılınması gerekmektedir. (3.15) denkleminin (x_0, y_0, z_0) koordinatları olan işaret noktası, (k_x, k_y, k_z) dalga vektörü bileşenleri ile λ dalgaboyu olan taşıyıcı dalga için geçerli ise, aşağıdaki denklemleri doğru kılan (x'_0, y'_0, z'_0) koordinatları olan işaret noktası ve (k'_x, k'_y, k'_z) dalga vektörü bileşenleri ile λ' dalgaboyu olan taşıyıcı dalga için de geçerlidir:

$$z'_0 = \frac{\lambda}{\lambda'} \frac{z_0}{m} \quad (3.18)$$

$$x'_0 = \frac{\lambda}{\lambda'} \left[\frac{k'_x - m k_x}{m} z_0 + x_0 \right] \quad (3.19)$$

$$y'_0 = \frac{\lambda}{\lambda'} \left[\frac{k'_y - m k_y}{m} z_0 + y_0 \right] \quad (3.20)$$

Burada m bir tamsayıdır. Yukarıdaki denklemler doğru kılındığında (3.16) denkleminin her iki tarafı m ile çarpılmakta, $m.n_i$ yeni bir tamsayı olduğundan nokta işaretin elde edilmesi için yukarıda belirtilen gerekli şart sağlanmaktadır.

m tamsayısının 1 ve -1 değerleri gerçel ve eşlenik işaretlere karşılık verirken, diğer değerleri çeşitli harmonikleri belirlemektedir. Şekil 3.6'da nokta işaret ve harmoniklerinin uzayda görünümünü gösterilmiştir.

3.7 Sonuçlar

Geliştirilen yöntem diğer yöntemler ile karşılaştırıldığında bazı üstünlükleri ve sakıncaları olduğu görülmektedir. Fiziksel olarak her nokta işarete karşılık bir hologram ve nokta işaretlerin sayısı kadar hologramlar aynı alana yapılmaktadır. Diğer bir deyimle uzay-bölmeli-çoğaltım esasına göre nokta işaretler meydana getirilmektedir. Hologram pencere büyüklüğü sonlu olması yüzünden hologram belirli bir nokta işaret sayısından sonra doyuma uğramaktadır. Yapılan deneyler 2x2 milimetrelilik bir pencere büyüklüğü için bu sayının birkaç bin kadar olduğunu göstermiştir. Taramalı elektron mikroskop sistemindeki kaydırma motorları ile olduğu gibi yanyana yapılan hologramlar ile bileşik bir hologram yapılırsa bu sayı belirli bir çarpanla, örneğin kullanılan sistemde 1380 çarpanıyla, çarpılacağından oldukça karmaşık bir işaretin ortaya çıkması mümkündür. Bununla beraber, her bileşen hologramdan çıkan işaret dalgasının propagasyon yönü diğerlerinden farklı olduğundan, değişik bileşen hologramlardan gelen işaretlerin işlenmesi için optik bir sistem gerekebilir.

Yöntemin belli başlı üstünlükleri arasında basitliği, hızlı Fourier dönüşümü kullanıldığında işaret noktalarının bir düzlem üstünde ve belirli aralıklarla seçilme zorunluğuna karşılık işaret noktalarının uzayda gelişigüzel yerlerde seçilebilme kolaylığı, işaret dalgasının işaret noktalarındaki genliğinin duyarlı olarak seçilebilmesi, nokta işaretlerin birbirinden bağımsız olması ve hologram açıklık koordinatlarının rassal seçilmesi dolayısıyla yüksek bir işaret-gürültü oranı, r_{ci} uzaklığı yaklaşım yapmadan hesaplandığından yöntemin holograma yakın uzayda da geçerli olması sayılabilir.

Hologram açıklıklarının yerleri taşıyıcı dalga ile işaret dalgasının çarpımından meydana gelen dalganın fazının sıfır geçişlerine karşılık olduğundan, yöntem hologramın çizimi sırasında açıklıkların yerlerinde genellikle rassal olarak yapılan hatalara diğer yöntemlerden çok daha az duyarlıdır. Çünkü yapılan hatanın fazı 180 dereceden fazla değiştirmesi gerekmektedir. Diğer yöntemlerde, örneğin ikili faz yönteminde, faz başlangıçta çoğu zaman sıfır geçişinden farklı olduğundan ve açıklığın büyüklüğü dolayısıyla, açıklığın yerinde yapılan hata işaret gürültü oranını daha çok azaltmakta ve yöntemin işlerliğini yokedebilmektedir. Aynı nedenle geliştirilen yöntemde açıklıklar oldukça büyük tutulabilmektedir.

Yöntemin basitliği yanısıra güvenilirliği ve esnekliği çok önemlidir. Bu özellikler dolayısıyla bundan sonraki bölümlerde anlatılan bazı yeni yöntemlerin geliştirilmesinde kodlama gayesi ile kullanılan bu yöntem çok faydalı olmuştur.

Buraya kadar nokta işaretler karmaşık bir işaretin bileşenleri olarak düşünülmüştür. Her bir nokta işaret için hologram aynı zamanda bir merceğe karşılık olmaktadır. Dolayısıyla yöntemin örneğin tımlaşıkdevre teknolojisinde kullanılan tekrarlama kamerası yerine aynı anda birçok görüntü veren bir kamera veya aynı anda birçok Fourier dönüşümü sağlayan bir aygıt geliştirilmesi gibi uygulamalarda da kullanılması mümkündür.

BÖLÜM 4 - TEK İŞARETLİ HOLOGRAFI

4.1 G i r i ş

Holografide istenen işaretin yanısıra genellikle eşlenik ve harmonik işaretlerin de elde edildiği bundan önceki bölümlerde belirtilmişti. Bu arzu edilmeyen bir durumdur. Tek işaret olduğu zaman işaretin uzay içindeki büyüklüğü diğer işaretler ile sınırlandırılmaktadır. Sayısal holografide hızlı Fourier dönüşümü kullanıldığı zaman işaret periyodik varsayıldığından çeşitli işaretlerin birbiri üstüne binmesi önlenmektedir. Aynı zamanda taşıyıcı dalganın gücü tek işaretin meydana getirilmesi için kullanılmaktadır.

Tek işaret meydana getiren holografi yöntemleri kinoform [20] çok emülsiyonlu eksenüstü sayısal hologram [23] ve üç boyutlu hologram [16] yöntemleridir. İkinci bölümde belirtildiği gibi kinoform yönteminde genlik değişmez varsayılmakta, faz belirli sayıda düzeye kuvantalanarak bilinen filmcilik tekniğiyle kaydedilmektedir. Çok emülsiyonlu eksenüstü sayısal hologram yönteminde genlik ve faz modülasyonunu birbirinden bağımsız olarak sağlayan emülsiyonlar vardır. Her iki yöntem de sayısal holografi için düşünülmüştür ve uygulaması teknik açıdan çok zordur. Üç boyutlu hologram yöntemi kalın film gerektirir, yalnız analog holografi de uygulanabilmiştir ve yapılması düzlem hologramlardan çok daha zordur.

Sayısal holografi de istenen işaretin yanısıra eşlenik ve harmonik işaretlerin bulunması, eğer analog holografi aynen simüle edilmediyse, kullanılan kodlama yöntemi yüzündendir. Hologramı dik olarak aydınlatan düzlem bir taşıyıcı dalga için işaret ve eşleniğinin aynı zamanda varlığının nedeni hologram düzleminin her iki tarafındaki uzayların holograma nazaran birbirine simetrik oluşuna bağlanacaktır. İşaret dalgası her bir işaret noktasından gelen küresel dalgaların bileşeni olarak düşünülürse, hologram düzlemine göre birbirlerine ayna simetriğinde olan iki işaret noktası hologram üstünde aynı genliğe ve birbirinden 180° farklı fazlara sahip iki işaret dalgasına karşılık olmaktadır. Dolayısıyla belirli bir örnek noktasında istenen işaretin A_1 genliği ve ϕ_1 fazına karşılık bir hologram açıklığı seçildiğinde, örnek noktasında aynı genliğe ve $-\phi_1$ fazına sahip olan eşlenik işaret için de gerekli açıklık seçilmiş olmaktadır.

Sonuç olarak, iki işarettten birini yok etmek için hologramın iki yanındaki uzayların holograma göre simetrik oluşunun bozulması gerekmektedir. Bu simetri hologramı düzlem yerine başka bir yüzey seçmekle veya holograma dik gelen düzlem taşıyıcı dalgayı değiştirmekle sağlanabilir. Buna rağmen, holograma değişik bir açıda gelen düzlem bir taşıyıcı dalga gibi basit bir geometri seçilirse, adı geçen simetri sadece değiştirilecek, fakat yok edilmeyecektir. Dolayısıyla iki işaret öncekinden farklı yerlerde var olmaya devam edecektir.

Hologram düzlemini değiştirmek teknik yönden zor gözükmektedir. İlginç bir olasılık taşıyıcı dalgayı bir optik sistem ile kolayca elde edilebilen küresel bir dalga olarak seçmektir. Yalnızca bir işaret meydana getiren hologram yapmak mümkün olursa ve optik sistemin odak noktası hologramdan sonra gelecek şekilde düzenlenirse, taşıyıcı dalgayı odak noktasına konan çok ufak bir engelle süzgeçlemek ve

uzayda yalnızca istenen işareti bulundurmak da mümkün olmaktadır. Şekil 4.1'de düşünülen sistem gösterilmiştir.

4.2 Küresel Taşıyıcı Dalgalı Kodlama Yöntemi

Üçüncü bölümde geliştirilen yöntemde hologram açıklık koordinatları x_i, y_i

$$\phi_i(x_i, y_i) + kr_{ci} = 2\pi n_i + \phi_0 \quad (4.1)$$

denkleminde göre seçilmektedir. Burada ϕ_i açıklık noktasında taşıyıcı dalganın fazı, n_i bir tamsayı, $\phi_0(x_0, y_0, z_0)$ koordinatları olan işaret noktasında istenen faz, ve r_{ci} işaret noktası ile açıklık noktası arasındaki uzaklıktır.

Odak noktası koordinatları (x_t, y_t, z_t) olan küresel bir taşıyıcı dalganın hologram üstündeki fazı

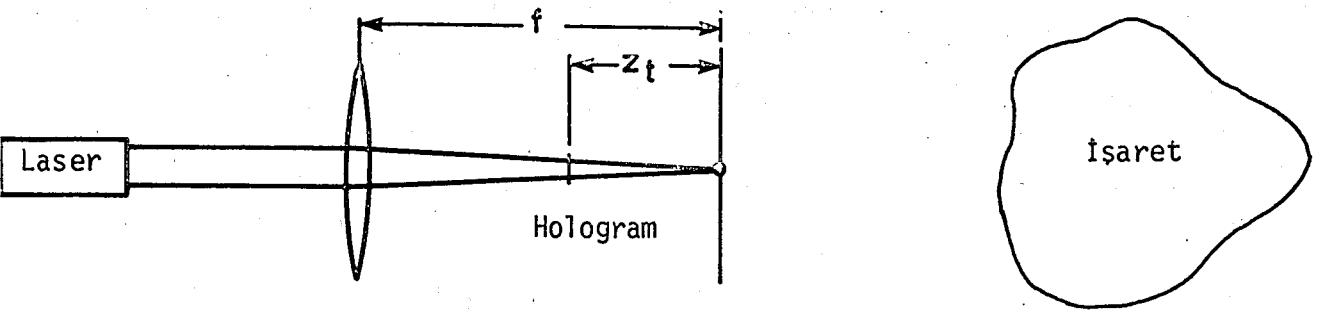
$$\phi_i = kr_{ti} \quad (4.2)$$

olarak saptanır. Burada r_{ti}

$$r_{ti} = \pm [(x_t - x_i)^2 + (y_t - y_i)^2 + z_t^2]^{1/2} \quad (4.3)$$

bağıntısı ile belirlenir. - işareti optik sistemin odak noktası hologram düzleminin önünde, + işareti ise odak noktası hologram düzleminin arkasında olduğu zaman kullanılmalıdır. (4.2) denklemini kullanarak (4.1) denklemi

$$r_{ti} + r_{ci} = n_i \lambda + \phi_0 / 2\pi \quad (4.4)$$



Şekil 4.1 - Tek işaretli holografi yöntemi için gerekli düzen

şeklinde yazılabilir. Bu bağıntıyı doğru kılmak için ilk önce hologram üstünde rassal bir nokta seçilecektir. B meydana gelen hata miktarı ise, (4.4) denklemi

$$r_{ti} + r_{ci} = n_i \lambda + \phi_0 / 2\pi + B \quad (4.5)$$

şeklini alır. B'nin sıfır yapılması için açıklık noktası arzu edilen bir yönde, örneğin x-ekseni yönünde, Δ uzaklığı kadar kaydırılacaktır. Bu durumda r_{ti} ve r_{ci} uzunluklarının yeni değerleri

$$r'_{ci} = (r_{ci} - 2X\Delta + \Delta^2)^{1/2} \quad (4.6)$$

$$r'_{ti} = (r_{ti} - 2X_t\Delta + \Delta^2)^{1/2} \quad (4.7)$$

olarak saptanır. Burada X ve X_t

$$X = x_0 - x_i \quad (4.8)$$

$$X_t = x_t - x_i \quad (4.9)$$

olarak tanımlanmıştır. r'_{ci} ve r'_{ti} değişkenleri

$$r'_{ci} + r'_{ti} = r_{ci} + r_{ti} - B \quad (4.10)$$

denklemini doğrular. (4.10) denklemi Δ için çözülürse

$$\Delta = C_1 [1 - (1 - C_2/C_1)^{1/2}] \quad (4.11)$$

bağıntısı elde edilir. Buradaki C terimleri şu şekilde belirlenir:

$$C_1 = F_1/F_2 \quad (4.12)$$

$$C_2 = F_3/F_1 \quad (4.13)$$

$$F_1 = F_4(X + X_t) + Xr_{ti}^2 + X_t r_{ci}^2 \quad (4.14)$$

$$F_2 = (r_{ci} + r_{ti})^2 - (X - X_c)^2 - 2F_5 \quad (4.15)$$

$$F_3 = 2F_5 r_{ci} r_{ti} - F_5^2 \quad (4.16)$$

$$F_4 = r_{ci} r_{ti} - F_5 \quad (4.17)$$

$$F_5 = -\frac{B^2}{2} + B(r_{ci} + r_{ti}) \quad (4.18)$$

Her işaret noktasında istenen genlik önceden olduğu gibi ilgili hologram açıklıklarının sayısını genliğe orantılı seçmekle temin edilebilir. Her ne kadar küresel taşıyıcı dalganın genliği hologram üstünde yavaş olarak değişiyorsa da açıklıkların yerleri rassal olarak seçildiğinden işaret dalgasının işaret noktasındaki genliğinin ilgili hologram açıklıklarının sayısı ile orantılı olduğu kolayca varsayılabilir.

4.3 İşaret Analizi

İşaret analizi yapabilmek için Fresnel yaklaşımı kullanarak (4.4) denklemi

$$\begin{aligned} & -x_i \left(\frac{x_t}{z_t} + \frac{x_0}{z_0} \right) - y_i \left(\frac{y_t}{z_t} + \frac{y_0}{z_0} \right) + \left(\frac{x_i^2 + y_i^2}{2} \right) \left(\frac{1}{z_0} + \frac{1}{z_t} \right) \\ & = n_i \lambda + \frac{\phi_0}{2\pi} - F_{ot} \end{aligned} \quad (4.19)$$

olarak yazılacaktır. Burada F_{ot}

$$F_{ot} = z_0 + \frac{x_0^2 + y_0^2}{2z_0} + z_t + \frac{x_t^2 + y_t^2}{2z_t} \quad (4.20)$$

olarak belirlenir. z_t koordinatının işareti (4.3) denkleminde olduğu gibi seçilmelidir.

Bir nokta işaretin elde edilmesi için (4.19) denkleminin açıklık koordinatları ile değişmeyen $\phi_0/2\pi$ ve F_{ot} terimleri ihmal edildikten sonra herhangi bir n tamsayısı için doğru kılınması gerekmektedir. (4.19) denklemi (x_0, y_0, z_0) koordinatları olan işaret noktası, (x_t, y_t, z_t) koordinatları olan noktadan kaynaklanan ve λ dalgaboyu olan küresel taşıyıcı dalga için geçerli ise, aşağıdaki denklemleri doğru kılan (x'_0, y'_0, z'_0) koordinatları olan işaret noktası ve (x'_t, y'_t, z'_t) koordinatları olan noktadan kaynaklanan ve λ' dalgaboyu olan taşıyıcı dalga için de geçerlidir:

$$\frac{1}{z'_0} = \frac{\lambda'}{\lambda} m \left(\frac{1}{z_0} + \frac{1}{z_t} \right) - \frac{1}{z'_t} \quad (4.21)$$

$$x'_0 = z'_0 \left[\frac{\lambda}{\lambda'} m \left(\frac{x_0}{z_0} + \frac{x_t}{z_t} \right) - \frac{x'_t}{z'_t} \right] \quad (4.22)$$

$$y'_0 = z'_0 \left[\frac{\lambda}{\lambda'} m \left(\frac{y_0}{z_0} + \frac{y_t}{z_t} \right) - \frac{y'_t}{z'_t} \right] \quad (4.23)$$

Burada m bir tamsayıdır. Yukarıdaki denklemler doğru kılındığında (4.19) denkleminin her iki tarafı m ile çarpılmakta, $m.n_i$ yeni bir tamsayı olduğundan nokta işaretin elde edilmesi için yukarıda belirtilen gerekli şart sağlanmaktadır.

z_0 koordinatı z_t koordinatından çok daha büyük ise ve hologramın yapılması ile hologramın aydınlatılması sırasında kullanılan taşıyıcı dalgalar aynı iseler, m tamsayısının 1 sayısından farklı

değerleri için (4.21), (4.22) ve (4.23) denklemleri yaklaşık olarak

$$z'_0 = z_t / (m - 1) \quad (4.24)$$

$$x'_0 = x_t + mz'_0 x_0 / z_0 \quad (4.25)$$

$$y'_0 = y_t + mz'_0 y_0 / z_0 \quad (4.26)$$

şeklinde yazılabilir. Bu denklemlerden çıkan sonuç şudur: optik sistemin odak noktası holograma yakın seçilirse, çeşitli harmonikler uzayda holograma çok yakın yerlere getirilmekte, dolayısıyla istenen işaretin uzakta bulunduğu yerde yayılmadan ötürü etkisiz kılınmaktadır.

Yukarıdaki analizde önemli bir etken dikkate alınmamıştır.

Harmonik işaret noktaları holograma yeterince yaklaşıncı Fresnel yaklaşımı geçerliliğini yitirmektedir. Dolayısıyla harmonikler nokta işaret özelliğini kaybedip belirsizleşmektedirler.

Bununla beraber, istenilen bir harmonik işareti elde edip diğerlerini etkisiz kılmak mümkündür. m harmoniği (x'_0, y'_0, z'_0) koordinatları olan noktada isteniyorsa, (4.21), (4.22) ve (4.23) denklemlerini m sayısı için doğru kılan (x'_t, y'_t, z'_t) koordinatlarını bulmak kolaydır. Optik sistem odak noktası (x'_t, y'_t, z'_t) olacak şekilde ayarlandığında m harmonik işareti (x'_0, y'_0, z'_0) koordinatları olan noktada elde edilir. Diğer harmonikler ise holograma çok yakın yerlere getirilerek etkisiz kılınmaktadır.

Sonuç olarak, holograma yeterince yakın bir odak noktasından kaynaklanan küresel bir taşıyıcı dalga kullanarak istenmeyen bütün harmonik işaretleri holograma çok yakın yerlere getirmek, Fresnel

yaklaşımı bu bölgelerde geçerliliğini yitirdiğinden harmoniklerin nokta işaret özelliğini kaybettirmek ve aynı zamanda yayılmadan ötürü istenen işaretin bulunduğu bölgede harmonik işaretlerin etkisiz kılınmasını sağlamak mümkündür.

Yukarıda sonuçların daha iyi anlaşılabilmesi için (4.21), (4.22) ve (4.23) denklemlerinin $z'_c \rightarrow \infty$ sınırında ne şekil aldığıının incelenmesi faydalıdır. Bu durumda hologramı aydınlatmada kullanılan taşıyıcı dalga düzlem bir dalga olmaktadır. z_0 koordinatının z_t koordinatından çok daha büyük olduğu ve λ dalgaboyunun λ' dalga-boyuna denk olduğu varsayılırsa, (4.21), (4.22) ve (4.23) denklemleri yaklaşık olarak

$$z'_0 = z_t/m \quad (4.27)$$

$$x'_0 = (z_t/z_0)x_0 + x_t \quad (4.28)$$

$$y'_0 = (z_t/z_0)y_0 + y_t \quad (4.29)$$

şeklinde yazılabilir. Bu denklemlerden işaret noktalarının holograma yakın yerlere taşındıkları görülmektedir. Bu işaret noktalarından gelen enerji istenen işaretin bulunduğu bölgede yayılmadan ötürü görülemeyecek kadar zayıf olursa yukarıda belirtilen sonuçların doğruluğu kanıtlanmış olur.

Dikkate değer diğer bir husus yüksek sayılı harmonikleri elde etmek istendiği zaman ne olduğudur. (4.21) denkleminde, eşit dalgaboyları için,

$$\frac{1}{z_t'} = \frac{m}{z_t} + \frac{m}{z_0} - \frac{1}{z_0'} \quad (4.30)$$

bağıntısı elde edilir. z_0 ve z_0' z_t koordinatından çok daha büyük olduğundan z_t' z_t/m değerine çok yakındır. Dolayısıyla harmonik sayısı m arttıkça bu harmonik işareti elde etmek için hologramı optik sistemin odak noktasına daha fazla yaklaştırmak gerekmektedir. Bu durumda hologramın taşıyıcı dalga ile aydınlatılması güçlenmekte ve aynı zamanda Fresnel yaklaşımı geçerliliğini tamamen yitirmektedir. Dolayısıyla m harmonik sayısı arttıkça harmonik işaretlerin nokta işaret olarak elde edilmesi güçlenmektedir.

(4.30) denkleminin diğer önemli bir sonucu hologram ile işaret arasında değiştirilebilen bir uzaklık sağlanmasıdır. z_0' istenilen şekilde optik sistemin hafif bir ayarlamasıyla değiştirilebilir. Aynı zamanda işaret büyüklüğü de değişir. z -eksenine dik yönde olan büyüme (4.22) ve (4.23) denklemlerinden

$$M_D = \frac{\partial x_0'}{\partial x_0} = \frac{\partial y_0'}{\partial y_0} = \frac{\lambda}{\lambda'} m \frac{z_0'}{z_0} \quad (4.31)$$

olarak bulunur. z-eksenine paralel yönde olan büyüme ise (4.21) denkleminde

$$M_B \approx \frac{\partial z'_0}{\partial z_0} = \frac{\lambda}{\lambda'} m \left(\frac{z'_0}{z_0} \right)^2 \quad (4.32)$$

olarak elde edilir. İki büyüme arasındaki bağıntının

$$M_B \approx \frac{\lambda'}{\lambda} \frac{M_D^2}{m} \quad (4.33)$$

olduğu görülmektedir. Üç boyutlu işaret distorsiyonu olmaması için

$$M_B = M_D = \frac{\lambda}{\lambda'} m \quad (4.34)$$

bağıntısı sağlanmalıdır. Bunun için (4.31) ve (4.32) denklemlerinden z_0 ve z'_0 koordinatlarının denk seçilmesi gerektiği görülmektedir. Bu durumda hologramın optik sistemin odak noktasından olan uzaklığı

$$\frac{1}{z'_t} = \frac{\lambda'}{\lambda} \frac{m}{z_t} + \frac{1}{z_0} \left(\frac{\lambda'}{\lambda} m - 1 \right) \quad (4.35)$$

denklemleriyle belirlenmektedir.

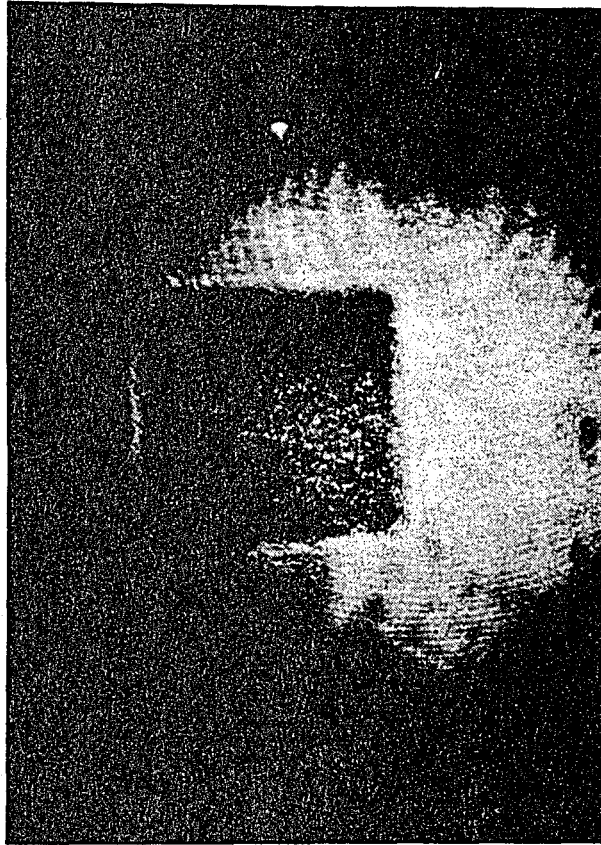
4.4 Deneyler

Yukarıda açıklanan analitik sonuçları deneysel olarak kanıtlayabilmek için taramalı elektron mikroskop sistemi ile hologramlar yapılmıştır. Bütün deneylerde hologram büyüklüğü 2x2 mm ve hologram açıklıklarının büyüklüğü 1 mikron seçilmiştir.

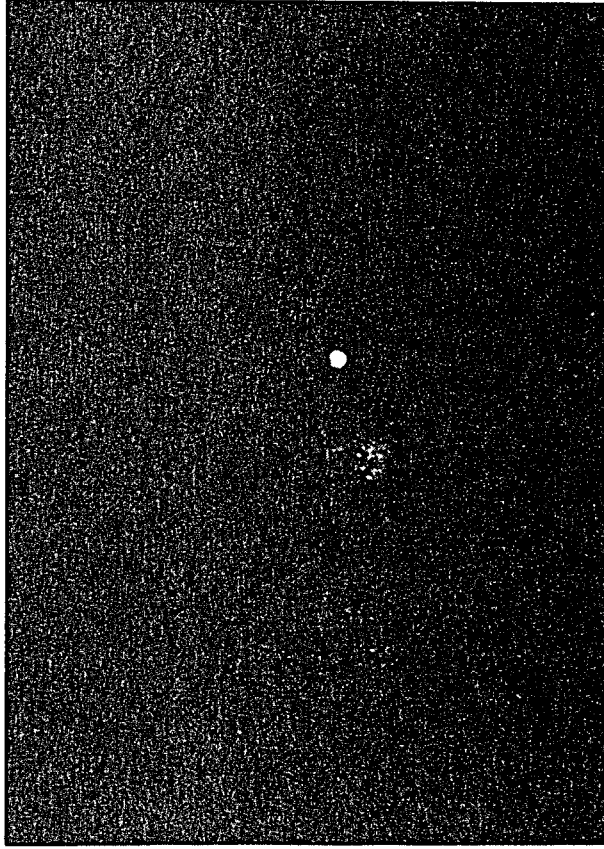
Küresel bir taşıyıcı dalga ile bir işaret noktası için optik sistemin odak noktası hologram düzleminin 1.0, 3.0 ve 5.0 cm önünde ve (x_c, y_c) koordinatları hologramın orta noktasının koordinatları olmak üzere 3 hologram yapılmıştır. Şekil 4.2'de 5.0 cm odak uzaklığı için yapılan hologramdan elde edilen netice gösterilmiştir. Görünür olan tek bir işaret noktası vardır. Karanlık gözüken kare hologramın büyütülmüş resmidir. Taşıyıcı dalga bütün şekli aydınlatmaktadır. Şekil 4.3'de aynı işaret noktası taşıyıcı dalga optik sistemin odak noktasında çok ufak bir engelle süzgeçlendikten sonra görülmektedir.

Şekil 4.4'de işaret noktası holograma yakın olarak meydana getirildiğinde 3.0 cm odak uzaklıklı hologramdan çıkan işaret dalgası ile taşıyıcı dalganın karışımından meydana gelen dairesel çizgiler görülmektedir. Şekil 4.5'de 1.0 cm odak uzaklıklı hologramdan elde edilen aynı tür çizgileri işaret noktası holograma daha yakın olarak meydana getirildiğinde göstermektedir. Çizgilerin gürültülü gözükmesinin nedeni hologramın resminin de aynı anda çizgiler ile birlikte çıkmasıdır.

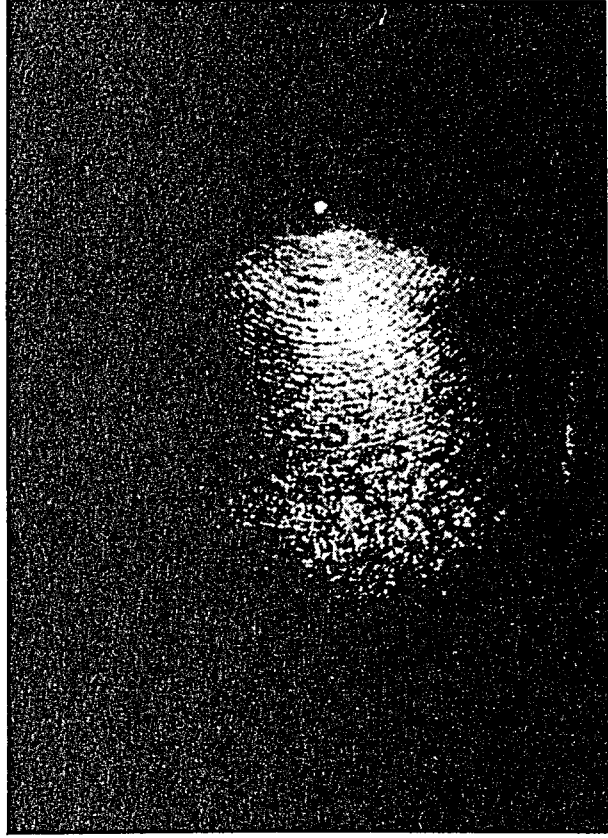
Şekil 4.6, 4.7, 4.8 ve 4.9 (4.27), (4.28) ve (4.29) denklemleri ile ilgili sonuçları kanıtlamak için yapılan deneylerden elde edilen sonuçları göstermektedir. Bu deneylerde optik sistem kullanılmamış ve hologramlar düzlem bir dalga ile aydınlatılmıştır. Şekil 4.6 1.0 cm odak uzaklıklı hologramdan elde edilen görüntüyü göstermektedir. Herhangi bir işaret noktasının belirlenmediği görülmektedir. Şekil 4.7 5.0 cm odak uzaklıklı hologramdan elde edilen görüntüyü göstermektedir. Harmonik işaretlerin çok az da olsa taşıyıcı dalganın sağında ve solunda belirlenmeye başladığı görülmektedir.



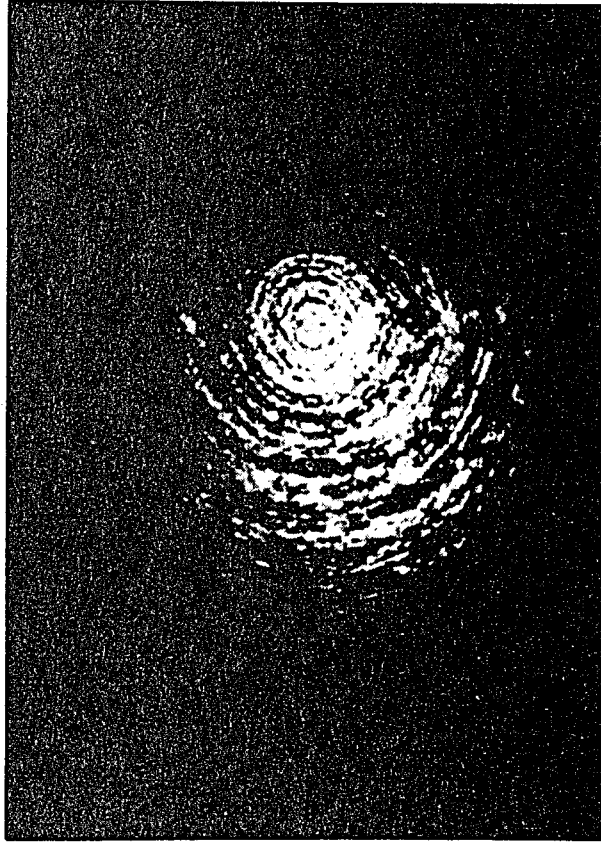
Şekil 4.2 - 5 santimetre odak uzaklıklı hologramın süzgeçlenmeden önce oluşturduğu tek nokta işaret



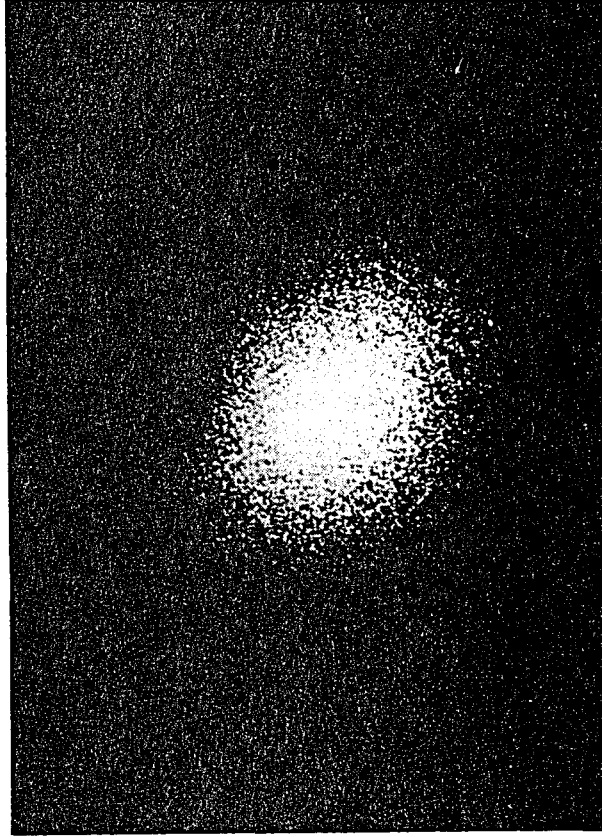
Şekil 4.3 - 5 santimetre odak uzaklıklı hologramın süzgeçlenmeden sonra oluşturduğu tek nokta işaret



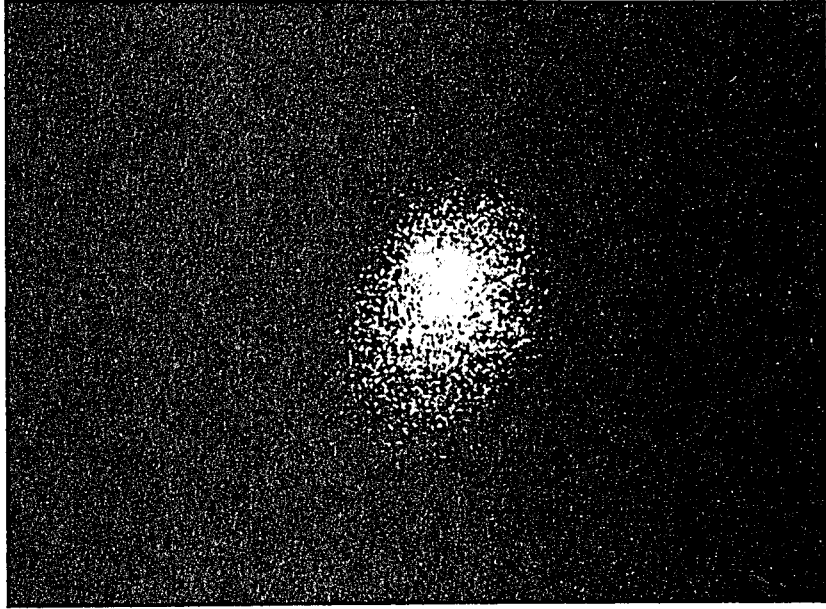
Şekil 4.4 - 3 santimetre odak uzaklıklı hologramdan çıkan işaret dalgası ve taşıyıcı dalganın karışımından meydana gelen dairesel çizgiler



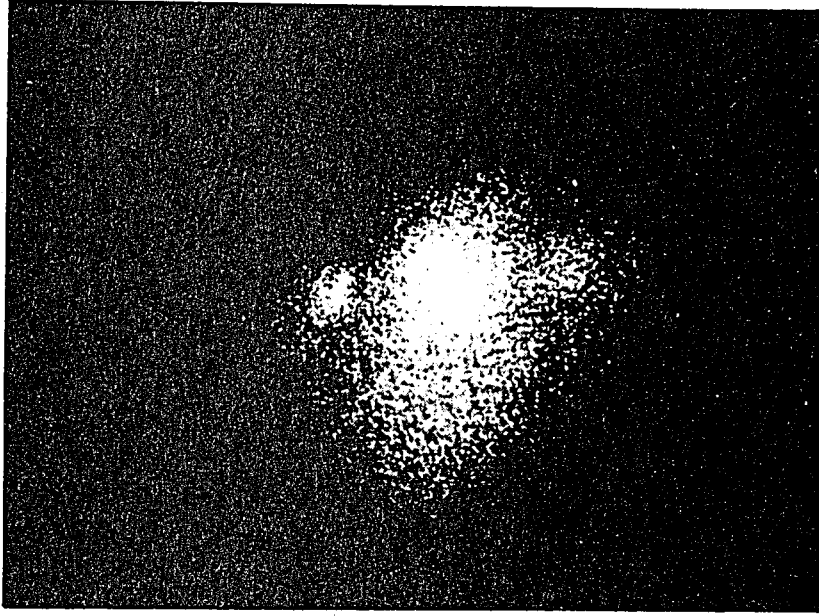
Şekil 4.5 - 1 santimetre odak uzaklıklı hologramdan çıkan işaret dalgası ve taşıyıcı dalgaın karışımından meydana gelen dairesel çizgiler



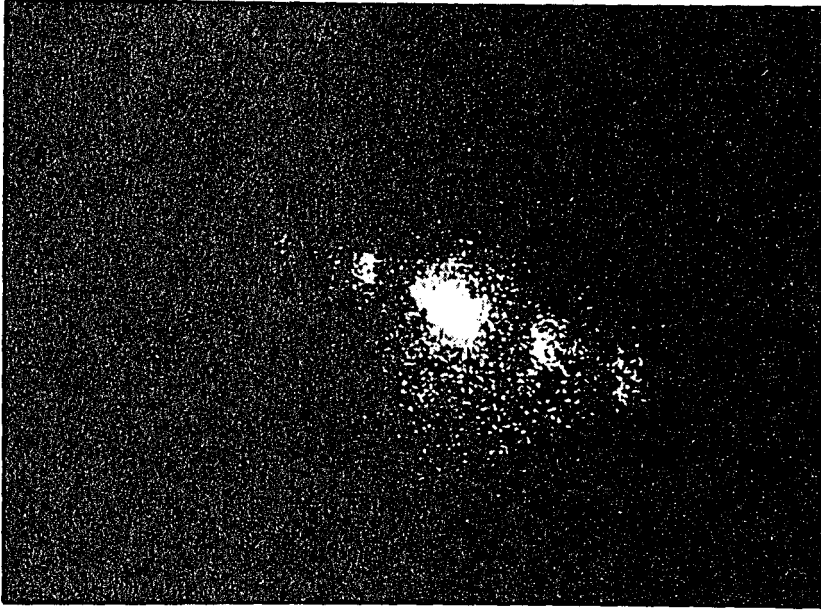
Şekil 4.6 - 1 santimetre odak uzaklıklı hologramın düzlem bir taşıyıcı dalga ile aydınlatılması ile bir işaret oluşmadan elde edilen gürültü görüntüsü



Şekil 4.7 - 5 santimetre odak uzaklıklı hologramın düzlem bir taşıyıcı dalga ile aydınlatılması sonucu elde edilen gürültü ile zayıf olarak oluşan işaret görüntüsü.



Şekil 4.8 - 5 santimetre odak uzaklıklı hologramın bir kısmının düzlem bir taşıyıcı dalga ile aydınlatılması sonucu elde edilen gürültü ile yaygın olarak oluşan işaret görüntüsü



Şekil 4.9 - 5 santimetre odak uzaklıklı hologramın daha ufak bir kısmının düzlem bir taşıyıcı dalga ile aydınlatılması sonucu elde edilen işaret ve gürültü görüntüsü

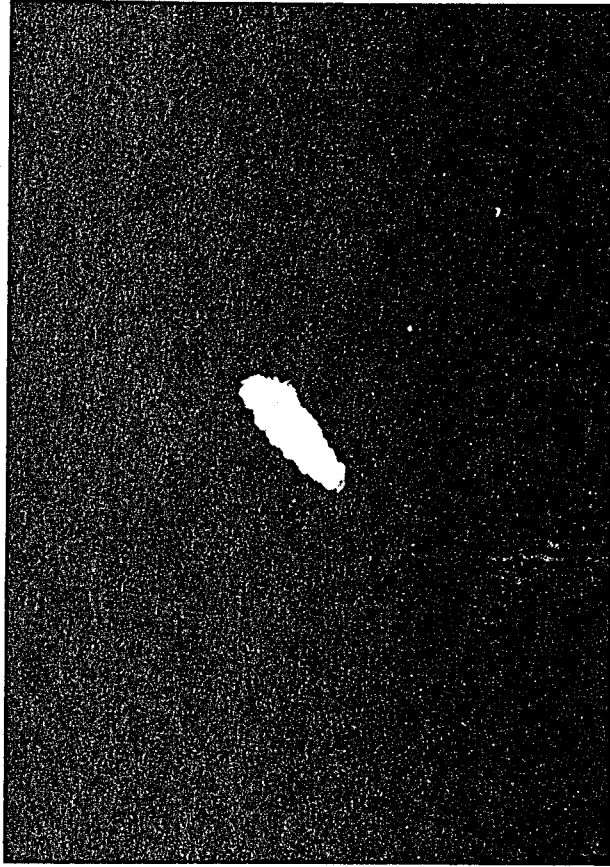
Şekil 4.8'de taşıyıcı dalga hologramın bir kısmını aydınlatır. Şekilde tertiplendiğinden harmonik işaretler çok daha kolay olarak görülmektedir. Bunun nedeni hologramın bir kısmı için küresel taşıyıcı dalganın düzlem bir dalgaya yaklaşık olduğudur. Hologram küçüldükçe bu yaklaşım daha doğru olmaktadır. Bu nedenle de Fresnel yaklaşımı daha geçerli kılınmaktadır. Şekil 4.9'da taşıyıcı dalga hologramın daha küçük bir kısmını aydınlattığından diğer harmonik işaretlerin de ortaya çıkışı görülmektedir. Şekil 4.10'da ise hologram optik sistemin odak noktasına yaklaştırılarak küçük bir kısmının aydınlatılmasından ötürü meydana gelen benzer bir sonuç görülmektedir.

(4.21), (4.22) ve (4.23) denklemlerinde m sayısı ile belirlenen bir harmonik işaret deneysel olarak optik sistemin odak noktasının holograma göre yeri ayarlanarak elde edilmiştir. Bir harmonik işaret elde edildiğinde diğerleri kaybolmaktadır. Hologram x-y eksenleri yönünde yer değiştirdiğinde, işaret noktasının yeri değişmekte ve hesaplanan yerinden uzaklaştıkça önemli aberasyonlar meydana gelmektedir. Şekil 4.11 1.0 cm odak uzaklıklı hologramdan elde edilen böyle bir işaret noktasının büyütülmüş resmini göstermektedir.

Hologram ile optik sistemin odak noktası arasındaki uzaklık azaldıkça bir harmonikten diğerine optik sistemin odak noktasının holograma göre yeri ayarlanarak geçişin zorlaştığı görülmüştür. Örneğin, 1.0 cm odak uzaklıklı hologram ile sadece birkaç harmonik işaret birbiri ardından elde edilebilirken, 3.0 ve 5.0 cm odak uzaklıklı hologramlardan daha çok sayıda harmonikler elde edilebilmiştir. Bu deneysel sonuçlar (4.30) denklemi ile ilgili olarak belirtilen analitik sonuçları kanıtlamaktadır.



Şekil 4.10 - 3 santimetre odak uzaklıklı hologramın taşıyıcı dalganın odak noktasına çok yakın yerleştirilerek bir kısmının aydınlatılması sonucu elde edilen harmonik işaretler



Şekil 4.11 - 1 santimetre odak uzaklıklı hologramdan elde edilen distorsiyonlu bir nokta işaretin büyütülmüş resmi

Şekil 4.12 laser ışını bir kolimator ile büyütülerek hem 3.0 cm ve hem de 5.0 cm odak uzaklıklı hologramların aynı anda aydınlatılması ile elde edilmiştir. Her hologramdan elde edilen işaretin kendi hologramına olan farklı uzaklığı dolayısıyla değişik harmonikleri içerdiği görülmektedir.

Şekil 4.13'de daha karmaşık bir işaret görülmektedir. Burada hologram optik sistemin odak noktasından 3,0 cm uzakta hesaplanmış ve odak noktasının x ve y koordinatları hologramın orta noktasının koordinatlarına eş seçilmiştir. Şekil 4.14'de aynı işaret daha uzaktaki bir düzlemde meydana getirildiğinde görülmektedir. İşaretin holograma olan uzaklığı arttırıldıkça (4.31) deklemine uygun olarak büyüklüğü de artmaktadır.

4.5 Diğer Yöntemler

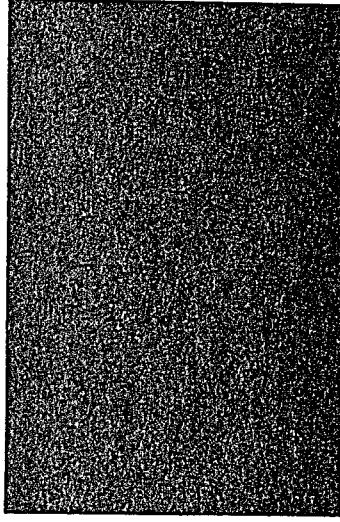
4.3 kısmında anlatılan işaret analizi sayısal holografide kullanılan ve eşlenik işarete yolaçan diğer kodlama yöntemleri için de geçerli olmalıdır. İşaretin N sayısı kadar işaret noktalarından meydana geldiği varsayılırsa, hologram üstünde önemli olan U dalgası küresel taşıyıcı dalganın işaret dalgası ile modüle edilmesiyle elde edilmektedir:

$$U(x_i, y_i) = \sum_{\ell=1}^N A_{ti} A_{\ell} \exp(jk(r_{\ell i} + r_{ti})) \quad (4.36)$$

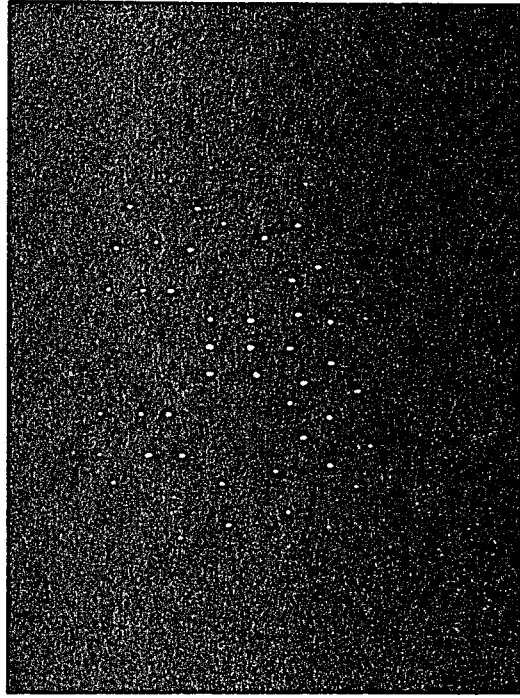
Burada A_{ℓ} işaret dalgasının ℓ işaret noktasındaki genliği, A_{ti} taşıyıcı dalganın i hologram açıklığındaki genliği, $r_{\ell i}$ ℓ işaret noktası ile i hologram açıklığı arasındaki uzaklık, r_{ti} küresel taşıyıcı dalganın odak noktası ile i açıklığı arasındaki uzaklıktır.



- Şekil 4.12 - 3 ve 5 santimetre odak uzaklıklı hologramların aynı anda aydınlatılması ile elde edilen farklı nokta harmonik işaretler



Şekil 4.13 - Harmonikler olmadan elde edilen 3 sayılı şeklindeki
işaret



Şekil 4.14 - Aynı işaretin hologramdan daha uzakta odaklanarak
büyütülüŖü

Kodlama yöntemi $(r_{\ell i} + r_{t i})$ değişkeninin ne olduğunu belirler:

$$r_{\ell i} + r_{t i} = n_i \lambda + s_{oi} \quad (4.37)$$

n_i bir tamsayıdır. Daha önce belirtildiği gibi n_i tamsayısının yerini $n_i.m$ tamsayısı, m diğer bir tamsayı ve s_{oi} bir dalgaboyuna göre aynı büyüklükte kalacak şekilde yeni $(r_{\ell i} + r_{t i})$ değişkeni bulunmaya çalışılırsa, bunun $m = -1$ için mümkün olduğu hemen görülmektedir. Dolayısıyla eşlenik işaret için (4.21), (4.22), (4.23) denklemleri diğer kodlama yöntemlerinde de geçerlidir.

Sayısal holografide işaret dalgasının örnekleme noktalarında hesap edilmesinde karşılaşılan zaman süresi problemi yüzünden hızlı Fourier dönüşümü kullanıldığı belirtilmişti. Bu durumda işaret bir düzlem üstünde ve periyodik varsayılmaktadır. Hem gerçel, hem de eşlenik işaret bu yüzden uzayda tekrar edileceğinden çeşitli işaretlerin birbiri üstüne binmesini önlemek zordur. Fourier dönüşümü kullanıldığında eşlenik işaretin etkisiz kılınması bu bakımdan önem kazanmaktadır.

4.6 Analog Holografi

Analog holografide gerçel ve eşlenik işaretler (2.43) denklemindeki üçüncü ve dördüncü terimlerden kaynaklanmaktadır. U_s ve U_t eş seçilirse, U_i dalgası değişmemekte, U_s ve U_t^* eş seçilirse, U_i^* dalgası aynı kalmaktadır. Değişen işaret dalgası U_D ile gösterilirse, U_t ve U_s taşıyıcı dalgaları küresel dalga olarak seçilirse ve işaretin N işaret noktasından meydana geldiği varsayılırsa, (4.36) bağıntısına

benzer olarak

$$U_0(x_i, y_i) = \sum_{\ell=1}^N A_{ti} A_{\ell} \exp(jk(r_{\ell i} + 2r_{ti})) \quad (4.38)$$

ilintisi yazılabilir. Bu durumda (4.21), (4.22) ve (4.23) denklemlerinin $m = -1$ için doğru kılındığı kolaylıkla gösterilebilir. Dolayısıyla elde edilen sonuçlar sayısal holografi de olduğu kadar analog holografide de geçerlidir.

4.7 Sonuçlar

Bu bölümde tek işaretli hologram yapmak için geliştirilen bir yöntem incelenmiştir. Sonuç olarak, holograma yeterince yakın bir odak noktasından kaynaklanan küresel bir taşıyıcı dalga kullanarak harmonik işaretleri uzayda holograma çok yakın yerlere taşımak, dolayısıyla kodlama yönteminin bu işaretler için doğruluğunu azaltmak, ve yayılmadan ötürü istenen işaretin bulunduğu bölgede harmonik işaretlerin etkisiz kılınmasını sağlamanın mümkün olduğu görülmüştür.

Tek işaretli hologramın önemli bazı üstünlükleri vardır. Hologramı meydana getiren açıklıkların belirli bir büyüklüğü olduğu için uzayda işaretin bulunabileceği bölge dalganın yayılma açısıyla sınırlıdır. Tek bir işaret olduğu zaman, işaretlerin birbiri üstüne binmesi gibi bir zorluk olmadığından, işaret uzayda çok daha büyük bir bölgeyi kapsayabilmektedir.

Fourier dönüşümü kullanıldığında işaretin uzayda periyodik varsayıldığı belirtilmişti. Dolayısıyla işaretlerin birbiri üstüne binmesini önlemek çok güçleşmektedir. Tek işaretli holografi yöntemi ile bu zorluk ortadan kalkmaktadır.

Şekil 4.1'de gösterilen düzen ile taşıyıcı dalgayı odak noktasında çok ufak bir engel ile süzgeçlemek veya hologramın analog holografi yöntemiyle kopyasını çıkartmak çok kolaylaşmaktadır.

BÖLÜM 5 - VİRTÜEL HOLOGRAFI

5.1. Giriş

Önceki bölümlerde holografinin teknik uygulamalarında karşılaşılan problemlerin çoğunun band genişliği ile yakından ilgili olduğu görülmüştü. Hologramın bili (enformasyon) kapasitesi ise büyük ölçüde hologram büyüklüğüne bağlıdır. Dolayısıyla karışım çizgileri arasındaki uzaklık ve hologram büyüklüğü kontrol edilebilirse sorunların çözülmesi kolaylaşacaktır. Örneğin, hologram büyüklüğü hologram üstündeki açıklık sayısını, işaret noktalarındaki odaklama duyarlılığını ve kaydedilen bilginin tümünün göz ile görünebilirliğini etkilemektedir. Hologramın yapılması ve hologramın aydınlatılması sırasında dalgaboyları farklı taşıyıcı dalgalar kullanılırsa, meydana gelen distorsiyonu (bozulma) azaltmak için hologram büyüklüğünün değiştirilmesi gerekmektedir. İnsan gözünün etkin mercek büyüklüğü 2 mm mertebesinde olduğundan, bu büyüklükteki bir hologramda mümkün olduğu kadar çok bili olması arzu edilmektedir.

Vidikon gibi elektronik tarama aygıtları hologramın kaydedilmesinde etkin ve hızlı olarak kullanılabilirse üç boyutlu holografik bilginin işlenmesi ve iletilmesi kolaylaşacak, dolayısıyla holografinin çok daha geniş çapta kullanılması mümkün olabilecektir. Bunun için de band genişliğinin istenilen şekilde ayarlanabilmesi gerekmektedir.

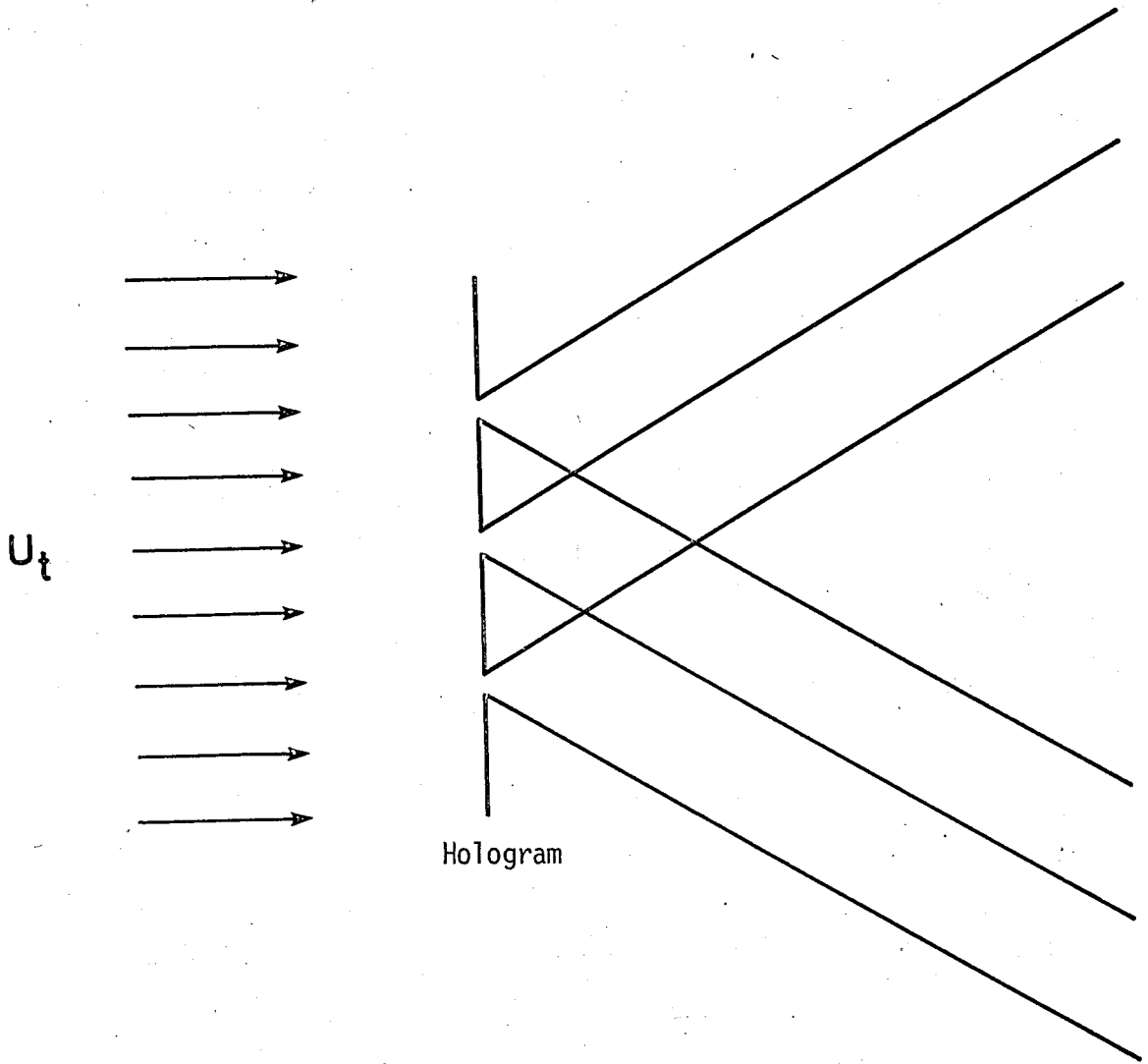
Karşılaşılan birçok sorun hologram büyüklüğü ve band genişliğinin kolaylıkla kontrol edilebilen parametreler olmasını gerekli kılmaktadır. Bu bölümde fiziksel ortam ve dalgaboyu ile yakından ilgili olan bu parametrelerin hızlı ve kolay olarak ayarlanabilmesi için virtüel holografi adı ile yazarın geliştirdiği yöntem incelenecektir. Burada iki ayrı hologram mevcuttur. Gerçek hologram fiziksel olarak gerçekleştirilen ve kullanılması arzu edilen teknolojinin özelliklerine göre ayarlanabilen hologramdır. Dolayısıyla gerçek hologram iletişim teorisindeki kanal kodlamasının eşleniğidir. Virtüel hologram ise gerçek hologramın imgesi olup fiziksel olarak bir ortamda kaydedilmeden uzayda mevcuttur ve taşıyıcı dalga ile işaretin gereksinmelerine uygundur. Diğer bir deyimle, kaynak kodlaması virtüel hologram ile elde edilmektedir. Her iki hologramın birbirine dönüşümü bir optik sistem ile sağlanmaktadır.

5.2 Virtüel Holografinin Tanımı

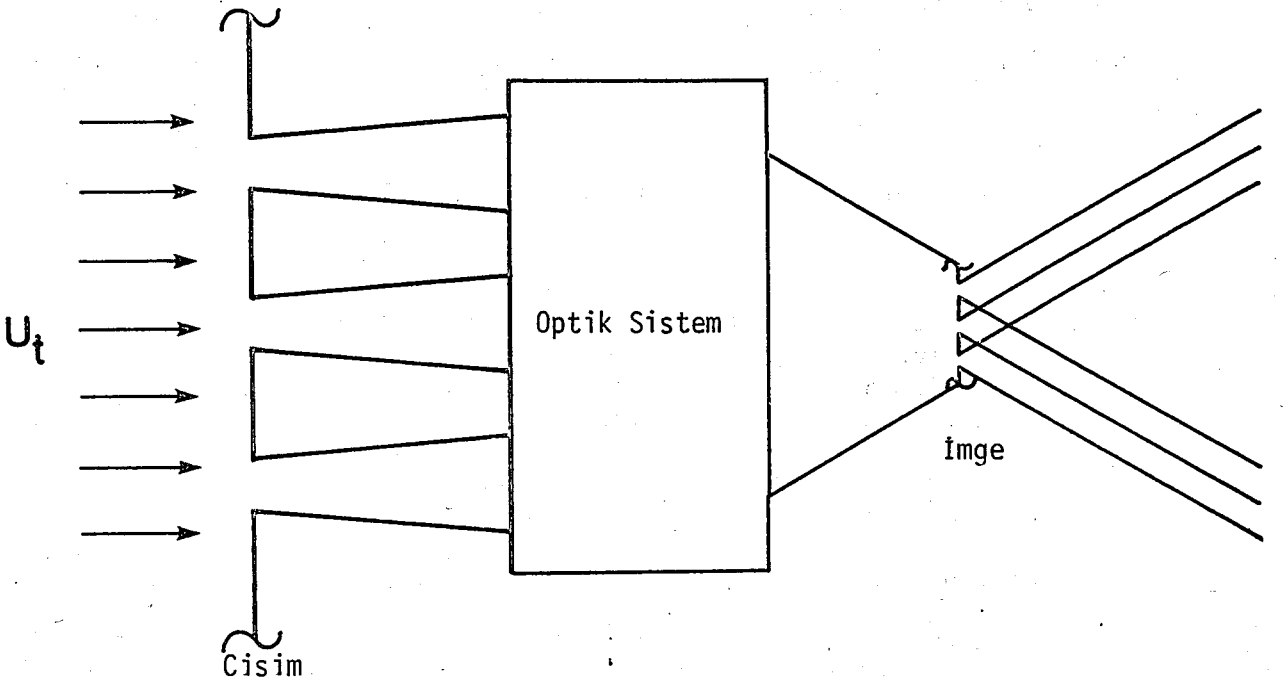
İkinci ve üçüncü bölümlerde taşıyıcı dalga hologramdan geçerken hologram içindeki çok ufak parçacıkların, dalganın faz ve genliğini işaret dalgasının faz ve genliği ile modüle etmesi yanısıra, dalgayı her parçacıktan kaynaklanan küresel dalgalar halinde kırınıma uğrattığı belirtilmişti. Analog holografi de film içindeki gümüş parçacıkları, sayısal holografide ise açıklık adı verilen küçük delikler veya engeller ufak parçacıkları meydana getirmektedir. Dolayısıyla ufak parçacıklar yerine küresel dalgalara kaynak olan başka bir fiziksel olay bulunabilirse aynı sonuçları elde etmek mümkündür.

Şekil 5.1'de hologramda kırınıma uğrayan dalga görülmektedir.

Şekil 5.2'de optik bir sistem ile bir cismin imgesinin elde edilişi



Şekil 5.1 - Hologramda kırıltıma uğrayan dalga



Şekil 5.2 - Bir optik sistem ile bir cismin imgesinin meydana getirilişi

gösterilmiştir. İmge düzleminde bir film bulundurulursa cismin resmi çekilmiş olur. Holografi açısından önemli olan ise imgeden öteye devam eden dalganın özelliğidir. Şekil 5.1'de hologramdan çıkan dalga ile Şekil 5.2'de imgeden öteye devam eden dalganın benzerlikleri görülmektedir. İlk durumda ufak parçacıklardan kırınma dolayısıyla küresel dalgalar meydana gelirken ikinci durumda imge noktalarından kaynaklanan küresel dalgalar elde edilmektedir. Aslında imge noktaları da kırınım-
dan ötürü ufak parçacıklar gibi (2.67) denkleminde tanımlandığı şekilde belirli büyüklüğe sahiptir.

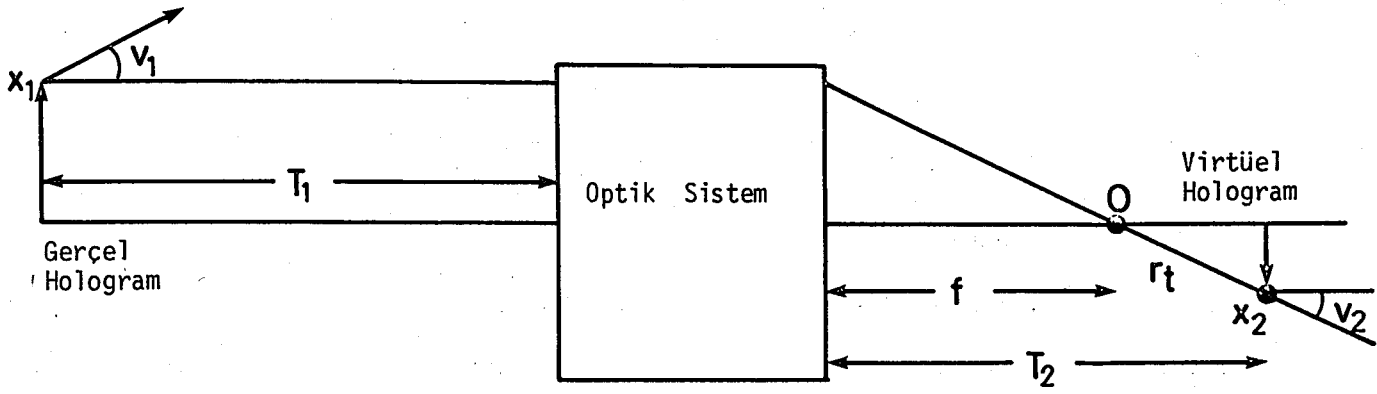
Bu benzeşimlerden faydalananarak virtüel hologramın tanımı şu şekilde yapılacaktır:

Virtüel hologram gerçel bir hologramın optik bir sistem yardımıyla fiziksel bir ortamda kaydedilmeksizin meydana getirilen imgesidir. Virtüel hologramdan çıkan dalga istenen bilgiyi içerirken, gerçel hologramdan çıkan dalga dönüştürülmüş bilgiyi taşır.

Şekil 5.3'de gerçel ve virtüel hologramlar ile arada bir hologramdan diğerine dönüşümü sağlayan optik sistem görülmektedir. Gerçel hologram hologramın yapımında kullanılan teknolojinin gereksinimlerine uygun seçilirken virtüel hologram taşıyıcı dalganın ve işaretin gereksinimlerini yerine getirmektedir.

Optik sistem ise her iki hologram arasındaki bağlantı ünitesidir. Virtüel hologram bir fiziksel ortamda kaydedilmeden uzayda mevcut olduğundan büyüklüğü, band genişliği ve ilgili diğer parametreleri kolaylıkla kontrol edilebilir ve değiştirilebilir.

Dikkate değer diğer bir nokta da fiziksel olarak gerçekleştirilen gerçel hologramın normal bir hologram olmadığıdır. Taşıyıcı bir dalga ile gerçel hologram aydınlatılırsa optik sistem olmaksızın istenen bir



Şekil 5.3 - Virtüel holografi için gerekli sistem

işaret elde edilemez. Virtüel hologram normal bir holograma benzetilebilir, fakat o da bir ortamda fiziksel olarak kaydedilmemekte, sadece uzayda gerçel hologramın imgesi olarak varolmaktadır. İletişim teorisinden yapılan işlemlerin kaynak ve kanal kodlaması ve veri sıkıştırması konularına eşlenik olduğu ilerdeki kısımlarda vurgulanmaktadır.

5.3 Fazın Belirlenmesi

Şekil 5.3'de görüldüğü gibi gerçel hologramdan optik eksene paralel olarak çıkan ışınlar 0 noktasında odaklanmaktadır. Bir gerçel hologram noktası ile karşılığı olan virtüel hologram noktası arasındaki optik uzaklıklar gerçel hologram noktasından kaynaklanan bütün ışınlar için aynıdır. Dolayısıyla bir virtüel hologram noktasında diğer virtüel hologram noktalarına göre varolan faz 0 noktası ile virtüel hologram noktası arasında gösterilen r_t uzaklığı ile belirlenmektedir. Diğer bir deyimle, virtüel hologram üstündeki taşıyıcı dalga 0 noktasından kaynaklanan küresel bir dalga olarak düşünülebilir.

Geometrik optik kullanarak optik sistemin gerçel ve virtüel hologramlar arasındaki giriş ve çıkış özelliklerini bulmak mümkündür [24]. Şekil 5.3'de görüldüğü gibi tek boyutlu olarak giriş optik eksene olan x_0 uzaklığı ve v_1 açısı, çıkış ise optik eksene olan x_2 uzaklığı ve v_2 açısı olarak gösterilirse giriş ve çıkış arasında

$$\begin{vmatrix} x_2 \\ v_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} S \end{vmatrix} \begin{vmatrix} x_1 \\ v_1 \end{vmatrix} \quad (5.1)$$

şeklinde bağıntıyı kuran $[S]$ sistem transfer matrisi

$$[S] = \begin{bmatrix} A' & B' \\ C' & D' \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

olarak yazılabilir. Burada A' , B' , C' , D' parametreleri

$$A' = A + CT_2 \quad (5.3)$$

$$B' = (A + CT_2)T_1 + B + DT_2 \quad (5.4)$$

$$C' = C \quad (5.5)$$

$$D' = CT_1 + D \quad (5.6)$$

olarak belirlenir. A , B , C ve D optik sistem matrisini tanımlayan parametrelerdir; T_1 ve T_2 Şekil 5.3'de gösterilen uzaklıklardır.

Çıkış düzleminde imge elde edilebilmesi için B' sıfır olmalıdır.

Dolayısıyla (5.4) denkleminde

$$T_2 = -(AT_1 + B)M \quad (5.7)$$

sonucu elde edilir. M büyüme oranı olup

$$M \equiv \frac{x_2}{x_1} = A' = \frac{1}{D'} \quad (5.8)$$

ifadeleriyle tanımlanır.

Optik sisteme v_p açısında girişi olan düzlem bir dalga optik sistemden f uzaklığında ve optik eksene x_2 uzaklığında odaklanır.

f ve x_2

$$f = -A/C \quad (5.9)$$

ve

$$x_2 = (B + Df)v_p \quad (5.10)$$

olarak bulunur. Bu denklemlerden r_t uzaklığı kolaylıkla hesaplanabilir.

Virtüel hologram üstündeki taşıyıcı dalganın 0 noktasından kaynaklanan bir dalgaya eşdeğer olduğu belirtilmişti. Diğer taraftan gerçel hologramı da belirli bir taşıyıcı dalga aydınlatmaktadır. Dolayısıyla ikinciye gerçel taşıyıcı dalga, birinciye de virtüel taşıyıcı dalga denilecektir. Bu görüşü daha genelleştirerek birkaç optik sistem, birkaç virtüel hologram ve birkaç virtüel taşıyıcı dalgadan söz etmek mümkündür. Sonuçta her taşıyıcı dalganın katkısı olan faz son virtüel hologram üstünde tüm faza eklenir. Yalnız her taşıyıcı dalgayla ilgili faz o taşıyıcı dalganın hologramı üstündeki ilgili nokta ile ilgili 0 odak noktası arasındaki uzaklık ölçülerek hesaplanmalıdır.

Konuyu pekiştirmek için üç ayrı örnek inceleyelim.

i. Optik sistem tek bir mercektir. Bu durumda A,B,C,D parametreleri

$$\begin{aligned} A &= 1 \\ B &= 0 \\ C &= -1/f \\ D &= 1 \end{aligned} \quad (5.11)$$

olarak elde edilir. Burada T_1 ve T_2 uzaklıkları Gauss bağıntısı ile belirlenir [24]:

$$\frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2} = \frac{1}{f} \quad (4.12)$$

Büyüme oranı ise

$$M = -T_2/T_1 \quad (4.13)$$

şeklını alır.

- ii. Teleskopik sistem: Burada f sonsuz olduğundan virtüel taşıyıcı dalga düzlem bir dalgadır. Odak uzaklıkları f_1 ve f_2 olan iki mercek kullanılırsa, A,B,C, ve D parametreleri

$$A = -F^{-1} = -f_1/f_2 \quad (4.14)$$

$$B = f_1 + f_2 = T \quad (4.15)$$

$$C = 0 \quad (4.16)$$

$$D = -F \quad (4.17)$$

olarak bulunur. Büyüme oranı ve T_2 uzaklığı

$$M = -F^{-1} \quad (4.18)$$

$$T_2 = \frac{T}{F} - \frac{T}{F^2} \quad (4.19)$$

olarak belirlenir. M büyüme oranının gerçel hologram koordinatları ile değişmediği görülmektedir. F büyük ise T_2 uzaklığının T_1 uzaklığına olan duyarlılığı çok azdır.

- iii) 0 noktasını işaret düzleminde bulunduran merceksiz Fourier düzeni [25]: Bu durumda işaret aynı zamanda virtüel hologramın Fourier dönüşümüyle orantılıdır. Virtüel hologramdan işaret düzlemine olan z_0 uzaklığı

$$A/C = -(T_2 + z_0) \quad (5.20)$$

denklemleriyle belirlenir. z_0 uzaklığı arttıkça ikinci ve üçüncü örnekler arasındaki fark azalmaktadır.

5.4 Sayısal Virtüel Holografi

Bu kısımda tanımı yapılan virtüel ve gerçel hologramların sayısal holografi ile ilk defa nasıl gerçekleştirildiği üstünde durulmaktadır.

Sayısal virtüel holografide hologramı kodlamak için yapılan bütün hesaplar virtüel holograma uygulanmaktadır. Taşıyıcı dalga Şekil 5.3'de gösterildiği gibi 0 noktasından kaynaklanan küresel bir dalgadır. Kodlanan virtüel hologram kullanılan optik sistemin transfer matrisine göre fiziksel olarak kaydedilen gerçel holograma dönüştürülmektedir.

Üçüncü bölümde incelenen kodlama tekniği kullanılırsa her virtüel hologram açıklığının yeri

$$\phi_i(x_i, y_i) + kr_{ci} = 2\pi n_i + \phi_0 \quad (5.21)$$

denklemleriyle belirlenir. Burada $\phi_i(x_i, y_i)$ virtüel taşıyıcı dalganın $(x_i, y_i, 0)$ koordinatları olan virtüel hologram açıklık noktasındaki fazı, n_i bir tamsayı, ϕ_0 ise (x_0, y_0, z_0) koordinatları olan işaret

noktasında arzu edilen faz ve r_{ci} işaret noktası ile virtüel hologram açıklık noktası arasındaki uzaklık olarak tanımlanır.

(x_t, y_t, z_t) koordinatları olan bir odak noktasından kaynaklanan küresel bir taşıyıcı dalga için ϕ_i fazı,

$$\phi_i = kr_{ti} \quad (5.22)$$

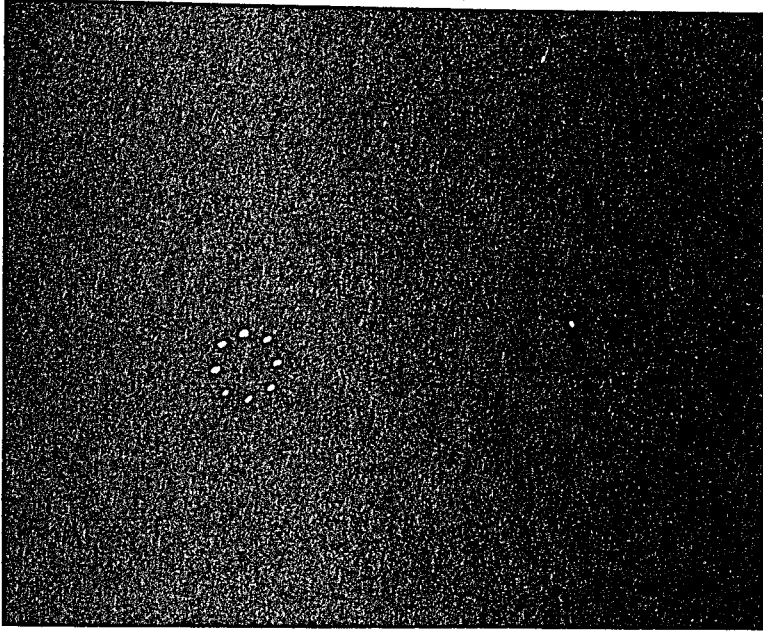
olarak bulunur. r_{ti} taşıyıcı dalganın odak noktası ile virtüel hologram açıklık noktası arasındaki uzaklıktır. Örneğin, tek bir mercek kullanılıyorsa odak noktası koordinatları

$$\begin{aligned} x_t &= 0 \\ y_t &= 0 \\ z_t &= -fM \end{aligned} \quad (5.13)$$

olarak seçilebilir. Burada f merceğin odak uzaklığı, ve M gerçel hologram ile virtüel hologram arasında arzu edilen büyüme oranıdır. Bu durumda gerçel hologram üstündeki açıklık koordinatları $(x_i/M, y_i/M)$ olmaktadır.

5.5 Ön Deneyler

Düşünülen yöntemin doğruluğunu kanıtlayabilmek için taramalı elektron mikroskop sistemini kullanarak önceki kısımda belirtilen şekilde kodlanan sayısal hologramlar yapılmıştır. Yapılan ilk hologramdan elde edilen işaret Şekil 5.4'de görülmektedir. İşaret z eksen yönünde eğik olarak seçilen bir daire üstündeki noktalardır. Dolayısıyla Şekil 5.4'de biraz eliptik olarak gözükmekte ve işaret noktalarının



Şekil 5.4 - İlk vımtüel hologram ıle elde edilen ışaret

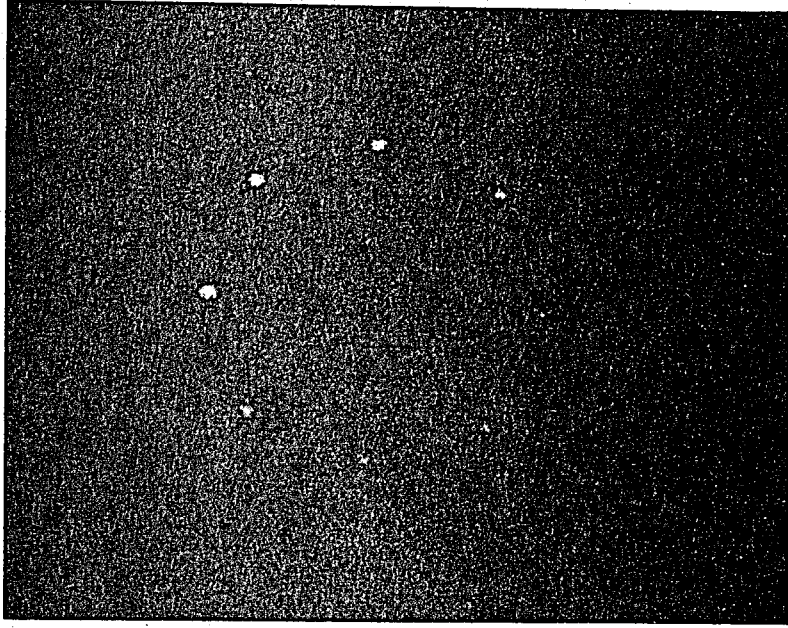
üç boyutlu özellik gösterdiğini kanıtlamaktadır. Gerçek hologram büyüklüğü 2×2 mm'dir. Bu büyüklük 2.0 cm odak uzaklığı olan bir mercek ile 4 defa küçültülerek virtüel hologram elde edilmiştir. Şekil 5.3'deki ($T_2 - f$) uzaklığı 5.0 mm seçilmiştir.

Şekil 5.4'de işaretin bulunduğu ortadaki karanlık kısım mercekten geçip gelen ışıktan ötürüdür. Daha karanlık olan kısım merceği tutan aygıt yüzündendir. Çok aydınlık olan kısımlar merceğin dışından gelen ışıktan ötürüdür. İşaretin bulunduğu kısım ile aydınlık olan kısımların karşılaştırması mercekten geçip gelen kısımdaki gürültünün daha az olduğunu göstermektedir.

Bu deneyler ile işaret dalgasının propagasyon yönü taşıyıcı dalganın propagasyon yönünden farklı ise optik sistemden sadece işaret dalgası geçirilerek taşıyıcı dalganın ve gürültünün büyük bir kısmının süzgeçlenebileceği görülmüştür. Bunun kuramsal nedeni bir sonraki bölümde incelenmiştir. Bu şekilde işaret-gürültü oranı büyük ölçüde arttırılmış olmaktadır.

Hem taşıyıcı hem de işaret dalgası optik sistemden geçerse, sistemin 0 noktasında ufak bir nokta engelle taşıyıcı dalga süzgeçlenebilmektedir. Yalnız bu durumda işaret dalgası çok alçak frekansları içeriyorsa, bu frekanslarda süzgeçlenerek bastırılmaktadır.

Virtüel hologram tek işaretli sayısal hologramlarda olduğu gibi virtüel holograma yakın bir noktadan kaynaklanan küresel bir taşıyıcı dalga ile kodlandığında aynı özellikleri göstermesi beklenir. Büyüme ile ilgili özellik Şekil 5.5'de kanıtlanmaktadır. Merceğin yeri hafif olarak değiştirildiğinde işaretin virtüel hologramdan olan uzaklığı ve işaret büyüklüğü arttırılmıştır.



Şekil 5.5 - Aynı işaretin hologramdan daha uzakta odaklanarak
büyütülüşü

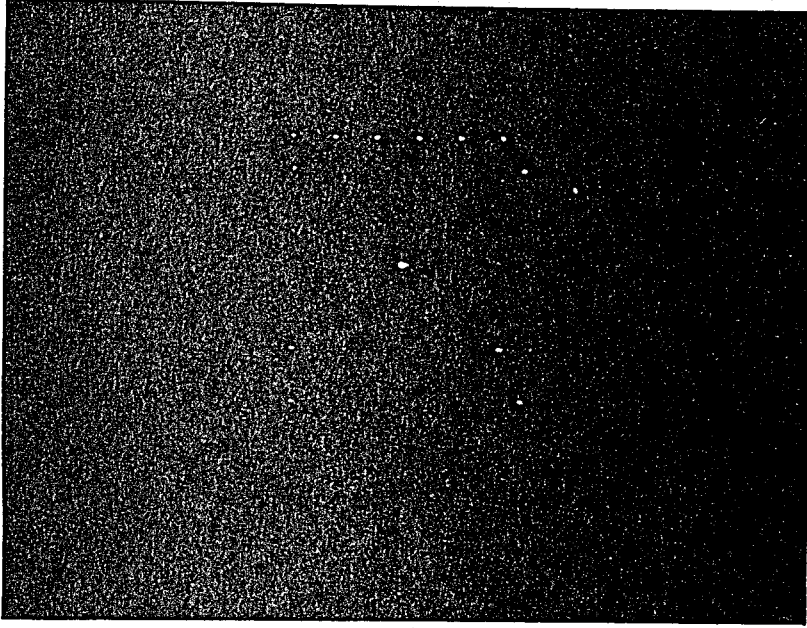
Kullanılan taramalı elektron mikroskop sistemi ile 2x2 mm büyüklüğündeki hologramlar yanyana yapılmak suretiyle 7.4x7.4 cm büyüklüğünde bileşik bir hologram yapılabileceği üçüncü bölümde belirtilmişti. İki bitişik hologramın yanyana yerleştirilişindeki kararsızlık ± 5 mikron mertebesindedir. Bu yüzden her hologramın diğerlerinden bağımsız olarak yapılması gerekmektedir. Bu durumda her hologramdan çıkan dalganın propagasyonu diğerlerinden değişik yönde olmaktadır. Sözü edilen kararsızlık olmasa bile insan gözünün etkin mercek büyüklüğü 2.0 mm mertebesinde olduğundan bu büyüklükteki bir hologramda mümkün olduğu kadar çok bilgi olması arzu edilmektedir.

Virtüel hologram büyüklüğü fiziksel olarak sınırlı olmadığından yanyana yapılan virtüel hologramlardan meydana gelen bileşik virtüel hologram büyüklüğü 2.0 mm mertebesinde seçilebilir. Bu durumda göz bileşik hologramda mevcut tüm bilgiyi aynı anda görebilecektir.

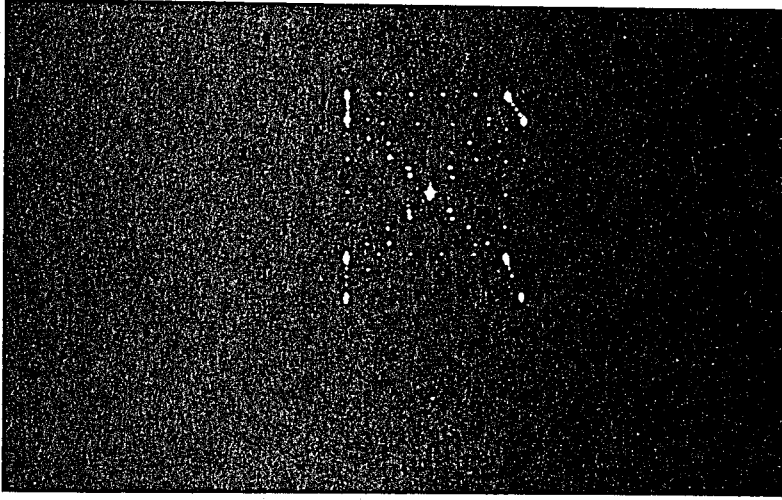
Bu düşüncenin doğruluğunu gösterebilmek için 4x4 büyüklüğündeki bir matris şeklinde düzenlenen yanyana 16 hologram yapılmıştır. 8.0 mm büyüklüğünde bileşik gerçel hologram 50 mm'lik bir objektif ile 4 defa küçültülerek 2.0 mm büyüklüğünde bileşik virtüel hologram elde edilmiştir. Şekil 5.3'deki ($T_2 - f$) uzaklığı 12.5 mm seçilmiştir.

Her bir bileşen hologram üç boyutlu bir kübün orta noktasını, bütün köşe noktalarını, diyagonallarından biri üstündeki noktaları içermektedir. Böyle bir bileşen hologramdan elde edilen işaret Şekil 5.6'da gösterilmiştir. Bileşen hologramlardan meydana gelen bileşik hologramın tümü He-Ne laseriyle aydınlatıldığında elde edilen kübün tamamı Şekil 5.7'de görülmektedir.

Her bileşen hologramın kübün orta noktasına ve köşe noktalarına katkısı olduğu için bu işaret noktaları diğer işaret noktalarından



Şekil 5.6 - İkinci bir virtüel hologram ile elde edilen üç boyutlu bir kübün bir kısmı şeklindeki işaret



Şekil 5.7 - 16 bileşen hologramdan meydana gelen bileşik hologramdan elde edilen üç boyutlu küb şeklindeki işaret

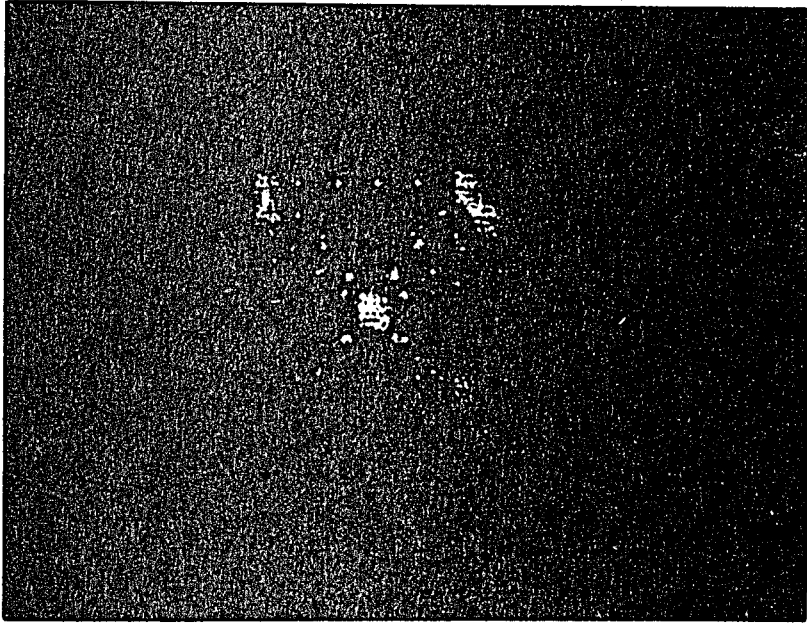
çok daha şiddetli gözükmekte ve CeCl kristal yapısının tek bir temel hücreğine benzemektedir.

2.0 mm büyüklüğündeki bileşik virtüel hologramın bulunduğu yere göz ile bakıldığında kübün tamamı görülmüştür. Böylece, çeşitli bileşen hologramlardan gelen bilginin tamamının bileşik virtüel hologram yardımıyla aynı anda göz ile görünebilirliği kanıtlanmıştır.

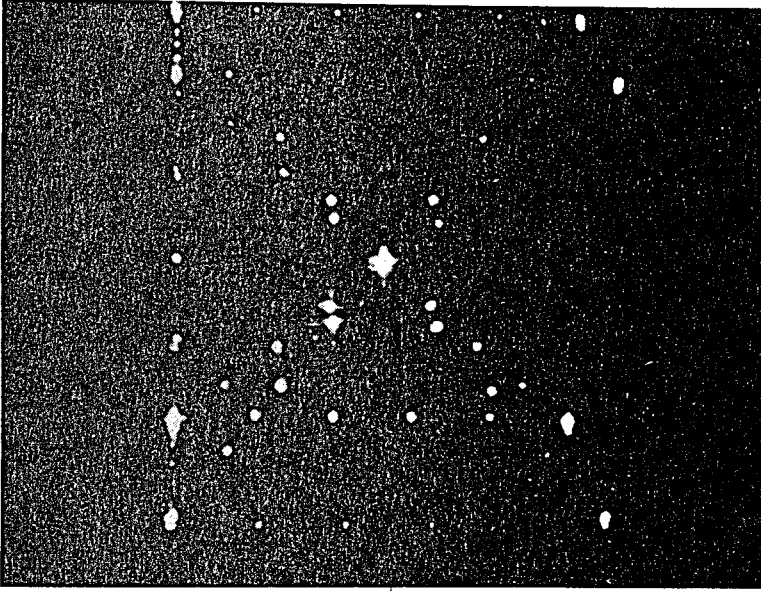
Objektifin yeri biraz değiştirilirse her köşe noktasını ve orta noktasını meydana getiren ve üstüste duran 16 nokta Şekil 5.8'de görüldüğü gibi birbirinden ayrılmaktadır.

Şekil 5.9'da küp objektifin yeri ayarlanarak virtüel hologramdan daha uzakta odaklanmış ve dolayısıyla büyütülmüştür.

Şekil 5.7 ve 5.9'da bazı kenar ve diyagonal noktalarının değişik şiddette görünmesinin nedeni bileşik hologramı aydınlatan laser ışınının TEM_{00} modunda çalışması ve Gaussian profili göstermesi dolayısıyla bütün bileşen gerçek hologramlar üstünde aynı şiddette olmamasıdır [26].



Şekil 5.8 - Optik sistemin ayarı değiştirildiği zaman üç boyutlu
kübün aldığı şekil



Şekil 5.9 - Üç boyutlu küb şeklindeki işaretin hologramdan daha uzakta odaklanarak büyütülüşü

BÖLÜM 6 - VİRTÜEL HOLOGRAFININ İNCELENMESİ

6.1 Giriş

Bir önceki bölümde virtüel holografi olarak adlandırılan yöntem ile hologram band genişliğinin ve hologram büyüklüğünün istenilen şekilde kontrol edilebildiği görülmüştü. Holografinin teknik uygulamalarında karşılaşılan problemlerin çoğunun band genişliği ve hologram büyüklüğü ile yakından ilgili oluşu virtüel holografi yönteminin önemini açıklamaktadır.

Bu bölümde virtüel holografi yöntemi daha yakından incelenmekte, hologram büyüklüğü ve band genişliğinin hangi sınırlar içinde değiştirilebileceği araştırılmakta ve uygulama açısından gerekli detay bilgiler geliştirilmektedir.

İlk önce açıklıkların etkisi üstünde durulmakta ve bu etkinin klâsik holografiden farklı olduğu görülmektedir. Diğer bir deyişle, virtüel hologram açıklıklarının kısmen birbiri üstüne binmesi virtüel hologram fiziksel bir ortamda kaydedilmediği için band genişliğini sınırlandıramamaktadır.

İşaret analizi gerçel hologramdan elde edilen dönüştürülmüş bilginin ne şekil aldığını, analog virtüel holografinin nasıl uygulanabileceğini ve konvolüsyon teoreminin sayısal virtüel holografide nasıl kullanılabileceğini göstermektedir.

Bilgi kapasitesi, odaklama duyarlılığı, band genişliği ve gereğinden fazla bili (reduntant information) arasındaki ilişki araştırılmaktadır. Band genişliği azaltıldıkça gereğinden fazla bili ve odaklama duyarlılığı da azalmaktadır. Dolayısıyla virtüel hologramın ne kadar küçük yapılabileceği istenilen odaklama duyarlılığı ile sınırlıdır.

Üç boyutlu hologram yapılmasına virtüel holografinin katkısı üstünde durulmaktadır. Band genişliği daraltıldığı ve hata olasılığı azaltıldığı için üç boyutlu hologram yapılmasının bilhassa sayısal holografide kolaylaştırıldığı gösterilmektedir.

Dalgaboyu ve hologram büyüklüğü değişiklikleri dolayısıyla meydana gelen distorsiyonların virtüel hologram büyüklüğü ve virtüel taşıyıcı dalganın fazı ayarlanarak azaltılabileceği elde edilen diğer bir sonuçtur. Bu ayarlamaların çok hızlı olarak yapılabilmesi dolayısıyla gerçek zamanda bilgi işleme olanakları sağlanmaktadır.

Son olarak iletişim açısından virtüel holografi üstünde durulmakta ve çok veri gerektiren sistemlerde yöntemin işaretin kodlanması, kod çözülmesi ve gürültünün azaltılması için kullanılmasıyla elde edilen üstünlükler belirtilmektedir.

6.2 Açıklıkların Etkisi

Uzayda üç boyutlu işaret büyüklüğünün sınırları virtüel hologram açıklıklarından çıkan küresel dalgaların yayılma açılarına bağlıdır. Dikkate değer diğer bir husus, bir ortamda fiziksel olarak kaydedilmediğinden virtüel hologram açıklıklarının fiziksel hologram

açıklıklarından farklı bir anlam taşıdığıdır. Fiziksel bir hologramda açıklık küçüldükçe küresel dalganın yayılma açısı ikinci bölümde görüldüğü gibi Sinc veya Bessel fonksiyonlarına bağımlı olarak büyümektedir. Burada ise gerçel hologramdaki bir açıklıktan kaynaklanan küresel bir dalganın yayılma açısı virtüel hologramdaki açıklık noktasında değişime uğramaktadır. Bu değişimin nasıl olduğu kullanılan optik sisteme bağlıdır.

Virtüel hologram açıklıklarının büyüklükleri hem optik sistem ile sağlanan gerçel ve virtüel hologramlar arasındaki büyüme/küçülme oranına hem de optik sistemin ve optik sisteme gelen dalgaların sınırlı bir alanı kapsaması dolayısıyla kırınım olayına bağımlıdır. Diğer bir deyimle, virtüel hologram açıklık büyüklüğü d_v

$$d_v = |M|d_R + D \quad (6.1)$$

olarak yazılabilir. Burada d_R gerçel hologram açıklık büyüklüğü, D kırınımından ötürü virtüel hologram açıklık büyüklüğüne olan katkıdır. Örneğin, teleskopik bir sistemde, teleskopik objektifin d_A çapıyla sınırlı olmasından ötürü meydana gelen D kırınım büyüklüğü

$$D = 2.44 (f\lambda/d_A) \quad (6.2)$$

olarak yazılabilir [24]. Gerçel hologramdan gelen küresel dalganın çapı en küçük teleskop merceğinden küçük ise d_A küresel dalganın çapı olarak düşünülmelidir.

Eğer virtüel hologram gerçel hologramdan çok daha küçük seçilirse kırınım olayı virtüel hologram büyüklüğüne nazaran etkinliğini arttıracığından virtüel hologram açıklıkları birbirlerini keser duruma geleceklerdir. Böyle bir durumda fiziksel olarak kaydedilen

bir hologram geçerliliğini yitirmektedir. Fiziksel bir hologramın band genişliğinin sınırlı olmasının esas nedeni budur. Buna karşılık virtüel hologram fiziksel bir ortamda kaydedilmediğinden, virtüel hologram açıklıklarının birbirlerini keser duruma gelmesi bir sorun olmamaktadır. Virtüel hologramdan uzakta, istenen işaretin bulunduğu yerde, her virtüel hologram açıklığı küresel bir dalgaya kaynak olan nokta olarak gözükmeye devam etmektedir. Böylece bir bakıma fiziksel kanunların getirdiği sınırların ötesine geçilmiş olunmaktadır. Modern fizikte kararsızlık kanunu hologram açıklıklarının en az yarım dalga boyu kadar büyük olacağını gösterir. Dolayısıyla hologramın yapımında kullanılan araçlar ideal olsalar bile, band genişliği sınırlı olacaktır. Virtüel hologramlar için böyle bir sınır yoktur.

Küresel dalgaların yayılma açısını Şekil 5.3'de gösterilen V_1 ve V_2 açılarını kullanarak incelemek mümkündür. (5.2) denkleminde

$$V_2 = C'x_1 + D'V_1 \quad (6.3)$$

bağıntısı elde edilir. Çıkış düzlemi imge düzlemi olduğundan C' ve D'

$$C' = -1/f \quad (6.4)$$

$$D' = 1/M \quad (6.5)$$

olarak bulunur. V_2 açısının gerçel hologram açıklık noktasının hem optik eksenenden olan uzaklığına hem de optik eksene olan açıya bağımlı olduğu görülmektedir. Teleskopik sistemde C' sıfır olduğundan virtüel hologram yayılma açısı gerçel hologram yayılma açısına göre $1/|M|$ kadar arttırılmaktadır.

6.3 İşaret Analizi

3. ve 4. bölümlerde geliştirilen kodlama yöntemi ve tek işaretli holografi yöntemi ile ilgili olarak işaret analizi yapılmıştır. Virtüel holografi ile ilgili olarak tanımlanan çeşitli taşıyıcı dalgaların katkılarının (x_t, y_t, z_t) noktasından kaynaklanan bir taşıyıcı dalgaya eşdeğer olduğu varsayılabılır. Bu varsayım en az Fresnel yaklaşımı çerçevesinde geçerlidir. Bu durumda harmonik işaretlerin nasıl meydana geldiğini belirleyen ilinti (4.19) denklemdir. Bu denklemin her iki tarafı optik sistemin M büyüme oranına bölünürse gerçel hologramın

$$z'_0 = z_0/M \quad (6.6)$$

$$x'_0 = x_0/M \quad (6.7)$$

$$y'_0 = y_0/M \quad (6.8)$$

koordinatları olan işaret noktası,

$$z'_t = z_t/M \quad (6.9)$$

$$x'_t = x_t/M \quad (6.10)$$

$$y'_t = y_t/M \quad (6.11)$$

koordinatları olan noktadan kaynaklanan ve dalgaboyu

$$\lambda' = \lambda/M \quad (6.12)$$

olan taşıyıcı dalga için yapıldığı görülür.

(x_t'', y_t'', z_t'') koordinatları olan noktadan kaynaklanan ve λ dalgaboyu olan bir taşıyıcı dalga ile gerçel hologram aydınlatılırsa, optik sistem olmaksızın m sayılı harmonik işaret

$$\frac{1}{z_0''} = \frac{m}{M^2} \left(\frac{1}{z_0} + \frac{1}{z_t} \right) - \frac{1}{z_t''} \quad (6.13)$$

$$x_0'' = z_0'' \left(mM \left(\frac{x_0}{z_0} + \frac{x_t}{z_t} \right) - \frac{x_t''}{z_t''} \right) \quad (6.14)$$

$$y_0'' = z_0'' \left(mM \left(\frac{y_0}{z_0} + \frac{y_t}{z_t} \right) - \frac{y_t''}{z_t''} \right) \quad (6.15)$$

bağıntıları ile tanımlanan (x_0'', y_0'', z_0'') koordinatları olan işaret noktasında odaklanır. Bu denklemler m harmonik sayısının 1 değeri için gerçel hologramın hangi işaret noktaları için yapıldığını göstermektedir. Bu işaret noktaları istenen işaretin dönüştürülmüş şeklini meydana getirmektedir. Virtüel hologramın tanımına benzer olarak, bu noktaların meydana getirdiği işarete virtüel işaret, istenen işarete de gerçel işaret adları verilecektir.

(6.13), (6.14) ve (6.15) denklemleri gerçel ve virtüel hologramların gerçekleştirilmesi için yeni bir yaklaşımı mümkün kılmaktadır. Gerçel işareten başlayarak virtüel hologramın hesaplanması ve daha sonra gerçel hologramın gerçekleştirilmesi yaklaşımı sayısal virtüel holografide kullanılmıştı. Yeni yaklaşım ise virtüel işareten başlayarak gerçel hologramı gerçekleştirmeyi içermektedir. Her iki yaklaşım birbirine eşleniktir. Gerçel hologram taşıyıcı dalga ile aydınlatıldığında ilk önce virtüel işaret elde edilmekte, virtüel işareten devam eden işaret dalgası optik sistemden geçerek virtüel

hologramı ve daha sonra da gerçel işareti meydana getirmektedir. Yeni yaklaşım ayrıca analog virtüel holografının nasıl uygulanabileceğini göstermektedir.

Gerçel hologramı aydınlatan taşıyıcı dalganın düzlem bir dalga olduğu ve hologramı dik olarak aydınlattığı varsayılırsa, x_t ve y_t koordinatları sıfır değerinde olmakta ve (6.13), (6.14) ve (6.15) denklemleri m harmonik sayısının 1 değeri için

$$z_0'' = (R/M)z_0 \quad (6.16)$$

$$x_0'' = Rx_0 \quad (6.17)$$

$$y_0'' = Ry_0 \quad (6.18)$$

$$R = \frac{1}{M} \frac{z_t}{z_0 + z_t} \quad (6.19)$$

şeklini almaktadır. Bu denklemler sayısal virtüel holografide yeni bir olanak sağlamaktadır. İkinci bölümde kırınım olayı ile doğrusal sistemlerin ilgisi gösterilirken bir düzlemde bilinen bir dalganın diğer bir düzlemde Huygens-Fresnel ilkesi kullanarak hesaplanması için konvolüsyon teoreminden faydalanabileceği belirtilmişti. Bunun için her iki düzlemdeki pencere ve örnekleme matrisi büyüklükleri aynı seçilmelidir. Sayısal holografide hologram büyüklüğü genellikle işaret büyüklüğünden çok daha küçük olduğundan konvolüsyon teoremini kullanmaya olanak yoktur. Buna karşılık yukarıdaki denklemlerden gerçel hologram ve virtüel işaret büyüklüklerinin aynı seçilebileceği görülmektedir. Dolayısıyla konvolüsyon teoremi yardımıyla virtüel

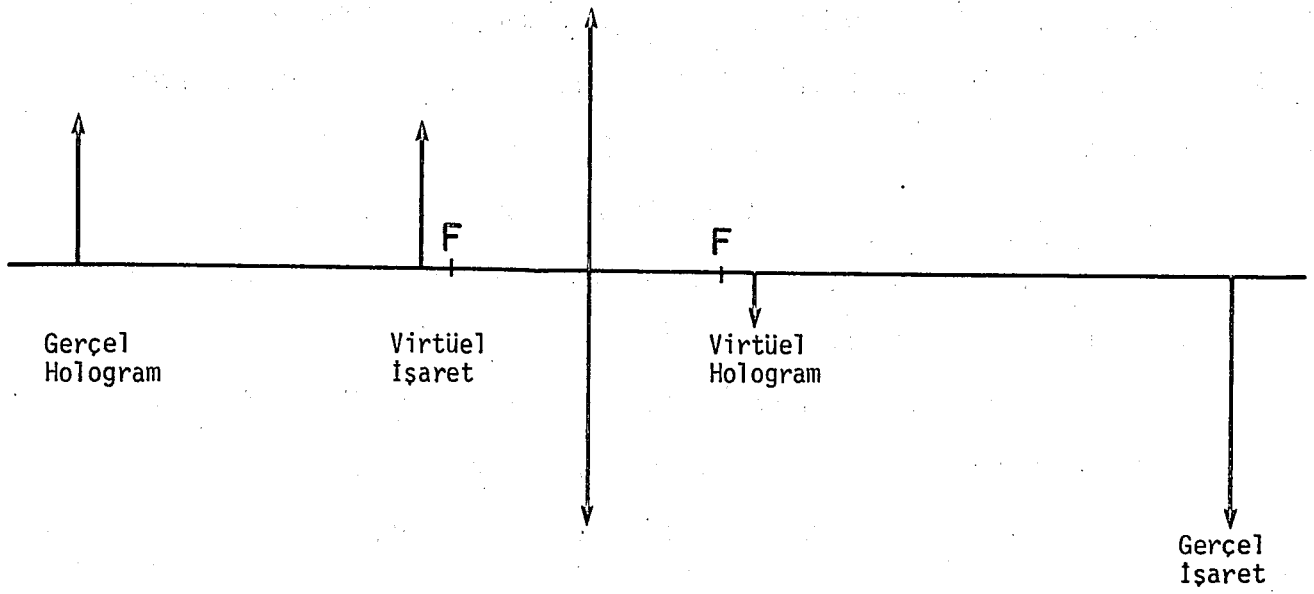
işaretten başlayarak gerçel hologramı hesap etmek mümkündür. Örneğin, optik sistem tek bir mercek ile meydana getiriliyorsa, gerçel hologram ve virtüel işaret büyüklüklerinin aynı olması için R değişkeni

$$R = \frac{f}{r_o + r_t} \quad (6.20)$$

olarak seçilmelidir. Bu durumda çeşitli hologram ve işaretlerin görünüşü Şekil 6.1'de gösterilmektedir.

6.4 Analog Virtüel Holografi

5.2 kısmında virtüel hologram gerçel bir hologramın optik bir sistem yardımıyla fiziksel bir ortamda kaydedilmeden meydana getirilen imgesi olarak tanımlanmıştı. Sayısal holografide bütün hesaplar virtüel hologram için yapılmakta, kodlanan virtüel hologram kullanılan optik sistemin transfer matrisine göre fiziksel olarak kaydedilen gerçel holograma dönüştürülmekteydi. Aynı yaklaşımı analog holografide kullanmak mümkündür. Virtüel hologramı meydana getirmek için taşıyıcı ve işaret dalgaları virtüel hologram bölgesinde karıştırılabilir, ve elde edilen karışımın doğrudan gerçel holograma dönüştürülmesi optik sistem ile sağlanır. Aynı zamanda, bir önceki kısımda işaret analizi sonucu geliştirilen virtüel işaretten başlayarak gerçel hologramı meydana getirme yaklaşımını kullanmakta mümkündür. İlk önce işaret dalgası (6.13), (6.14) ve (6.15) denklemlerine uygun olarak optik sistemden geçirilerek virtüel işaret meydana getirilir. Virtüel işaretten devam eden işaret dalgası ve virtüel işaretin yakınındaki bir noktadan kaynaklanan küresel bir taşıyıcı dalgaının gerçel hologram bölgesinde karıştırılması ve film gibi bir ortamda kaydedilmesi ile gerçel hologram elde edilir.



Şekil 6.1 - Virtüel ve gerçek hologramlar ile işaretler

Şekil 6.2'de düşünülen yöntem için gerekli düzen gösterilmiştir. Burada laserden çıkan ışın ışın bölücüsü I.B. ile iki ayrı ışına bölünür. Birinci ışın kolimatörden geçerek büyütülmüş bir düzlem dalga haline getirilir. Bu ışın bir cisimde veya aygıtta kırınımına uğratarak işaret dalgasına dönüştürülür. İşaret dalgası optik sistemden geçtikten sonra virtüel işareti meydana getirir.

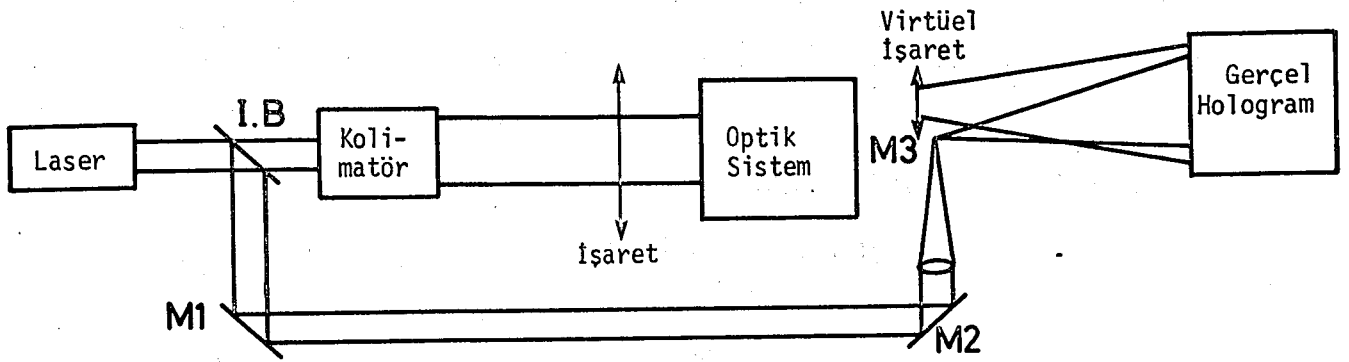
İkinci ışın M1 ve M2 aynalarından yansıtılıp yönlendirildikten sonra bir mikroskop objektifinden geçip M3 aynasından yansyarak virtüel işarete yakın bir noktadan kaynaklanan taşıyıcı dalgayı oluşturur. Her iki dalganın gerçel hologram ortamında karıştırılarak kaydedilmesi ile gerçel hologram elde edilir. Eğer işaret dalgası sözü edilen cisimden veya aygıttan yansıtılıyorsa gösterilen düzen birkaç ayna ilavesiyle değiştirilmelidir.

6.5 Hologram Büyüklüğü, Duyarlılık, Band Genişliği ve Gereğinden Fazla Bili

Virtüel hologram ve gerçel hologram büyüklükleri işaret noktalarındaki odaklama duyarlılığı ve gerçel hologramın band genişliği gereksinimleri ile belirlenmektedir. Dikdörtgen şeklinde bir virtüel hologram için, işaret noktaları arasındaki en küçük uzaklık Rayleigh prensibi ile saptanır [12]:

$$h = z_0 \lambda / L_v \quad (6.12)$$

Burada z_0 işaret noktasının virtüel hologramdan olan uzaklığı, λ dalgaboyu ve L_v virtüel hologramın pencere büyüklüğüdür.



Şekil 6.2 - Virtüel işaret ile gerçek hologramı meydana getirmek için gerekli düzen

h sayısı sinc türevinin x ve y eksenleri yönünde ilk sıfır geçişine karşılık olduğu için aynı zamanda işaret noktasının büyüklüğünü göstermektedir. Yukarıdaki denklemden, h sayısının gerekli en büyük değerinin belirtilmesi ile virtüel hologramın en küçük büyüklüğünün belirlendiği görülmektedir.

Çok önemli bir diğer gereksinme gerçel hologramın uzaysal band genişliğidir. Karışım çizgileri arasındaki uzaklık band genişliğinin üstündeki uzaysal frekanslara karşılık olursa gerçel hologram bu frekansları süzgeçler.

(4.19) denkleminde gerçel hologram üstündeki karışım çizgileri arasında x eksen yönündeki Δ_G uzaklığı

$$\Delta_G = \frac{\lambda}{M} \left[\frac{x_i - x_t}{z_t} + \frac{x_i - x_0}{z_0} \right]^{-1} \quad (6.22)$$

olarak bulunur.

(6.21) ve (6.22) denklemleri gerçel hologram band genişliği ile işaret noktalarındaki odaklama duyarlılığı gereksinmelerinin birbirlerini dengelediğini göstermektedir. Optik sistemin M büyüme/küçülme oranı çok küçük seçilirse, Δ_G sayısı büyük olmakta, dolayısıyla gerçel hologram üstündeki uzaysal frekanslar alçak değerlere sıkıştırılmaktadır. Bu durumda gerçel hologramın çok az duyarlı aygıtlarla dahi kaydedilebilmesi mümkün olmaktadır. İşaret noktalarında istenen odaklama duyarlılığı virtüel hologram büyüklüğünü belirlediği için gerçel hologramın, optik sistemin ve M oranının virtüel hologram büyüklüğüne göre seçilmesi gerekmektedir. Aynı

zamanda (6.3) denklemine uygun olarak M oranı virtüel hologram açıklıklarından çıkan küresel dalgaların yayılma açısının yeterince büyük olmasını sağlamalıdır.

Yukarıdaki düşünce tarzında az duyarlı kaydetme ortamlarının gerçel hologramın kaydedilmesinde kullanılabilmesi için M oranının ufak seçileceği varsayılmıştır. Bunun tersi de düşünülebilir. Virtüel hologram ortamındaki uzaysal frekanslar kaydetme ortamının band genişliğinin altında ise M oranı 1 sayısından büyük seçilerek virtüel hologram gerçel hologramdan daha büyük yapılabilir. Bu şekilde işaret noktalarındaki odaklama duyarlılığı arttırılmaktadır.

Hologramın içerdiği bilginin hızlı olarak kaydedilebilmesi ve işlenebilmesi için gereğinden fazla bilinin çıkartılması (data compression) gerekmektedir. Bili miktarını karışım çizgilerinin sayısının bir fonksiyonu olarak düşünmekte fayda vardır. İstenilen bir işaret odaklama duyarlılığı ve işaret gürültü oranı için N sayısında karışım çizgisine ihtiyaç olduğu varsayılırsa, virtüel hologram N karışım çizgisini kapsayacak büyüklükte seçilebilir. Gerçel hologram da aynı sayıda karışım çizgisini kapsayacaktır. Böylece kaydetme ortamı istenildiği kadar etkin olarak kullanılabilir. Kaydetme ortamının uzay-band genişliği çarpanı UB [27]

$$UB = \frac{\text{hologram alan büyüklüğü}}{\text{açıklık alan büyüklüğü}} \quad (6.23)$$

olarak yazılırsa ve aynı ortamda kaydedilmesi arzu edilen işaretlerin ortalama uzay-band genişliği çarpanı UB_I ise, kaydedilebilecek işaret sayısı UB/UB_I oranının kaydetme ortamının işaretleri

doğrusal olarak toplayabilme kapasitesi ile çarpılması ile belirlenir. Hologram klâsik holografi kullanılarak yapılırsa UB/UB_1 bir mertebesinde olacaktır. Dolayısıyla aynı hologramda kaydedilebilen işaret sayısı virtüel holografide klâsik holografiye göre gereğinden fazla bilinin azaltıldığı oranda fazladır.

Yukarıdaki açıklamalardan virtüel holografide gerekli kriterlerin klâsik holografidekilerden oldukça farklı olduğu anlaşılmaktadır. İki hologramın varlığı yöntemin çok esnek olmasını mümkün kılmaktadır. Özetlemek gerekirse, virtüel hologram gerçel hologramdan daha küçük seçilmiş ise, gerçel hologram az duyarlı olabilir, fakat büyük olmalıdır. Bunun tersine, virtüel hologram gerçel hologramdan daha büyük seçilmiş ise, gerçel hologram çok küçük olabilir, fakat kaydetme aygıtının band genişliği çok yüksek olmalıdır.

6.6 Hacim Etkileri

(5.18) ve (5.19) denklemleri teleskopik sistem ile elde edilen dönüşümü göstermektedir. Optik eksene dik yöndeki büyüme oranı gerçel hologram koordinatlarından bağımsız olarak $1/F$ ile ve T_2/T_1 oranı $1/F^2$ ile belirlenmiştir. F sayısı oldukça büyük ise ve gerçel hologram bir hacim içinde çeşitli aralıklarda düzlemlerden oluştuğu takdirde, bu aralıklar virtüel hologram uzayında $1/F^2$ oranında, optik eksene dik yöndeki uzaklıklar ise $1/F$ oranında küçültülecek demektir. Dolayısıyla çeşitli düzlemlerdeki gerçel

hologram açıklıklarının yerleştirilmesinde yapılacak hatalar da aynı oranlarda azaltılmaktadır. Bunun diğer bir anlamı çeşitli gerçel hologramlardan ve/veya optik elemanlardan çıkan dalgaların birbirleriyle istenilen şekildeki karışımlarının teleskopik veya benzeri bir sistem ve virtüel holografi ile çok kolaylaşmasıdır.

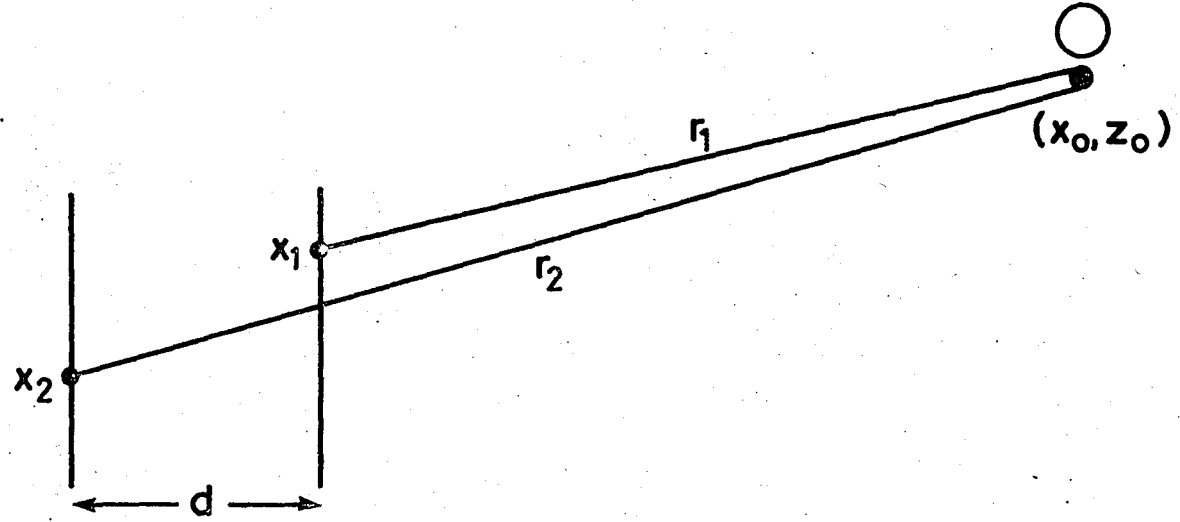
Basit bir örnek olarak, Şekil 6.3'de gösterildiği gibi, aralarında d uzaklığı olan iki düzlemdeki x_1 ve x_2 noktalarından kaynaklanan iki küresel dalganın 0 noktasındaki faz farkı düşünülecektir. d uzaklığı yeterince küçük ise karesel terimler bir mercek ile her zaman için bertaraf edilebildiğinden Fraunhofer yaklaşımı kullanılarak faz farkını belirleyen Δ uzaklığı

$$\Delta = r_2 - r_1 = (x_2 - x_1) \frac{x_0}{z_0} + \frac{(x_0 - x_2)d}{2z_0} \quad (6.24)$$

olarak yazılabilir. İşaret noktası koordinatı x_0 , x_2 koordinatından çok daha büyük ise, bu denklem

$$\Delta = (x_2 - x_1) \frac{x_0}{z_0} + \frac{d}{2} \left(\frac{x_0}{z_0} \right)^2 \quad (6.25)$$

olarak yazılabilir. d sıfır ise, ikinci terim sıfır olacağından, (6.25) denklemi açıklığın yerini tayin etmek için Lohmann yönteminde kullanılan ifadeye eşdeğer olmaktadır [19]. Lohmann yönteminde değişik işaret noktaları için x_0/z_0 oranının yaklaşık olarak değişmez olduğu varsayılmaktadır. Lee yönteminde olduğu gibi x_1 ve x_2 belirli aralıklarda seçiliyorsa, (6.25) denklemi yukarıda bahsedilen varsayımı daha geçerli kılmak için optimizasyonu mümkün kılmaktadır. Δ uzaklığının x_0/z_0 ile en az değiştiği noktayı



Şekil 6.3 - İki küresel dalganın O noktasındaki karışımının hesaplanması
için kullanılan geometri

bulmak için bu denklemin x_0/z_0 değişkenine göre türevi alınıp sıfıra denk kılınırsa, sonuçta

$$x_2 - x_1 = - \frac{x_0}{z_0} d \quad (6.26)$$

$$\Delta = - \frac{d}{2} \left(\frac{x_0}{z_0} \right)^2 \quad (6.27)$$

denklemleri elde edilir. x_0/z_0 değişkeninin ortalama değeri ve Δ uzaklığının belirli bir faz farkına karşılık olması için belirtilmesi sonucu (6.27) denkleminde d uzaklığı, (6.26) denkleminde de örnek noktaları arasındaki aralık hesap edilir. Bu örnek ile üç boyutlu sayısal hologramların ne şekilde yapılabileceği üstünde durulmuştur. Üç boyutlu hologram yapılmasının kolaylaşmasının nedeni d uzaklığının ve $(x_2 - x_1)$ aralığının gerçel hologram uzayında kullanılan dalga boyuna göre oldukça büyük seçilebilmesi dolayısıyla hata olasılığının ve teknik zorlukların azaltılmasıdır. Üç boyutlu hologramların önemi bilgi kapasitesinin artması, eşlenik işaretin yok olması ve hologramın tek bir dalga boyu için geçerli olması nedeni ile normal ışıkta kullanılabilmesi olarak özetlenebilir. Bu nedenler ile kolaylıkla kontrol edilebilen üç boyutlu sayısal hologramların yapılması çok faydalı olacaktır.

Elde edilen sonuçlar optik bilgi işleme konusunda da faydalı olabilir. Uzayı gerçel ve virtüel olarak ikiye bölmekle ve bazı işlemleri gerçel uzayda, diğerlerini virtüel uzayda yapmak suretiyle belirli kolaylıklar sağlamak mümkündür.

Üç boyutlu sayısal hologramlara bir uygulama alanı olarak kristallerdeki Bragg kırınım olayının benzeşiminin yapılması gösterilebilir. Bu durumda her hologram açıklığı kristal içindeki bir atoma karşılık olmaktadır. Holografik model ile elde edilen kırınım şeklinin gerçek kristalin x-ışınları ile aydınlatılması sonucu elde edilen kırınım şekli ile karşılaştırılması düşünülen kristal modelinin doğruluğunu kontrol etmekte kullanılabilir.

6.7 Distorsiyonların Azaltılması ve Gerçek Zamanda Bilgi İşleme Olanakları

Holografik mikroskopi ve akustik holografi gibi çeşitli holografi dallarında etkisini sürdüren bir problem hologramın yapılması ve hologramın aydınlatılması arasında yapılan taşıyıcı dalga ve hologram büyüklüğü değişikliklerinin, dördüncü bölümde görüldüğü şekilde optik eksene dik ve paralel yönde olan büyüme oranlarının çok farklı olması dolayısıyla, önemli distorsiyonlara yol açtığıdır. Taşıyıcı dalganın dalgaboyu ve hologram büyüklüğü aynı oranda değiştirilirse bu distorsiyon olmamaktadır. Fakat birçok uygulamada, örneğin sismik holografide, iki oranı aynı tutmak olanaksızdır. Bu sorunu çözebilmek için faz plâkası [28] gibi bazı yöntemler düşünülmüş olmakla birlikte uygulamada başarılı olmamıştır.

Virtüel holografi bu konuda önemli olanaklar sağlamaktadır. Gerçek hologramın büyüklüğünü istenilen şekilde seçip virtüel hologram büyüklüğünü dalgaboyu oranına göre ayarlayarak distorsiyonları önlemek mümkündür. Fakat sismik holografide olduğu

gibi hologram örnekleme noktalarındaki ölçmeler çok uzun dalgaboyu olan bir dalga ile yapıлып hologram görünebilen ışıık dalgaboyuna göre gerçekleştirilecek ise, virtüel hologramın çok ufak olması gerekmektedir. Bu da odaklama duyarlılığını veya işaret büyüklüğünü yetersiz kılabilir.

Virtüel küresel taşıyıcı dalgayı dikkatli seçerek hologram büyüklüğü ve dalgaboyu aynı oranda seçilmeden distorsiyonları büyük ölçüde azaltmak mümkündür. Yapılan hologram büyüklüğü değışiklik oranının N olduğı, hologramın kaydedilmesi ve hologramın aydınlatılması sırasında kullanılan taşıyıcı dalgaların dalga sayılarının k_1 ve k_2 olduğı varsayılırsa, işaret oluşumunu belirleyen denklem

$$k_1 \left[-\frac{x_{01}}{r_{01}} Nx - \frac{y_{01}}{r_{01}} Ny + \frac{N^2(x^2 + y^2)}{2r_{01}} \right] = \quad (6.28)$$

$$k_2 \left[-x \left(\frac{x_{02}}{r_{02}} - \frac{x_t}{r_t} \right) - y \left(\frac{y_{02}}{r_{02}} - \frac{y_t}{r_t} \right) + \frac{(x^2 + y^2)}{2} \left(\frac{1}{r_{02}} - \frac{1}{r_t} \right) \right]$$

olarak yazılabilir. Burada (x_{01}, y_{01}, z_{01}) işaret noktasının gerçek koordinatları, (x_{02}, y_{02}, z_{02}) yapılan değışikliklerden sonra meydana gelen işaret noktasının koordinatları ve r_{01}, r_{02}, r_t

$$r_{01} = (x_{01}^2 + y_{01}^2 + z_{01}^2)^{1/2} \quad (6.29)$$

$$r_{02} = (x_{02}^2 + y_{02}^2 + z_{02}^2)^{1/2} \quad (6.30)$$

$$r_t = (x_t^2 + y_t^2 + z_t^2)^{1/2} \quad (6.31)$$

olarak belirlenir. Üsleri aynı olan değişkenlerin önsayıları denk kılınırsa

$$\frac{1}{r_{02}} = \left(\frac{k_1 N^2}{r_{01}} + \frac{1}{r_t} \right) \frac{1}{k_2} \quad (6.32)$$

$$x_{02} = r_{02} \left(k_1 \frac{N x_{01}}{r_{01}} + \frac{x_t}{r_t} \right) \frac{1}{k_2} \quad (6.33)$$

$$y_{02} = r_{02} \left(k_1 \frac{N y_{01}}{r_{01}} + \frac{y_t}{r_t} \right) \frac{1}{k_2} \quad (6.34)$$

denklemleri elde edilir. Bu denklemlerden optik eksene dikey ve yatay yöndeki büyüme oranlarının eş olması için

$$r_{02} = r_{01}/N \quad (6.35)$$

$$x_{02} = x_{01}/N \quad (6.36)$$

$$y_{02} = y_{01}/N \quad (6.37)$$

$$z_{02} = z_{01}/N \quad (6.38)$$

olması gerektiği görülmektedir.

Sismik, ultrasonik ve mikrodalga holografi yöntemlerinde hologramın kaydedilmesinin genellikle örnekleme noktalarındaki detektörler ile yapıldığı belirtilmişti. İşaretin görünülebilirliğini sağlamak için hologramın görülebilen ışık dalgaboyuna dönüştürülmesi gerekmektedir. Fakat bu çok zaman alan ve hata olasılığını arttıran bir yaklaşımdır. Üstelik işaret ölçmeler yapıldıktan hemen sonra elde edilebilirse gürültünün azaltılması, bilginin işlenmesi gibi girişimlerin hızlı olarak yapılabilmesi mümkün olmaktadır.

Virtüel holografi bu tür sistemlerin gerçel zamanda çalışmasını sağlayabilir. Bunun için Şekil 6.4'de görüldüğü gibi gerçel hologramın ölçmelerde kullanılan dalgaboyuna uygun olarak yapılması gerekir. Aynı zamanda ışık dalgaboyuna duyarlı olmalıdır. Birinci dalgaboyuyla kaydedilen gerçel hologram derhal ışık dalga-boyu olan taşıyıcı dalga ile aydınlatılır. Optik sistemden geçen dalga ilk önce virtüel hologramı, daha sonra da istenen işareti meydana getirir. Optik sistem kolayca ayarlanabildiğinden bütün işlemler gerçek zamanda uyarlı olarak kontrol edilebilir.

6.8 İletişim Açısından Virtüel Holografi

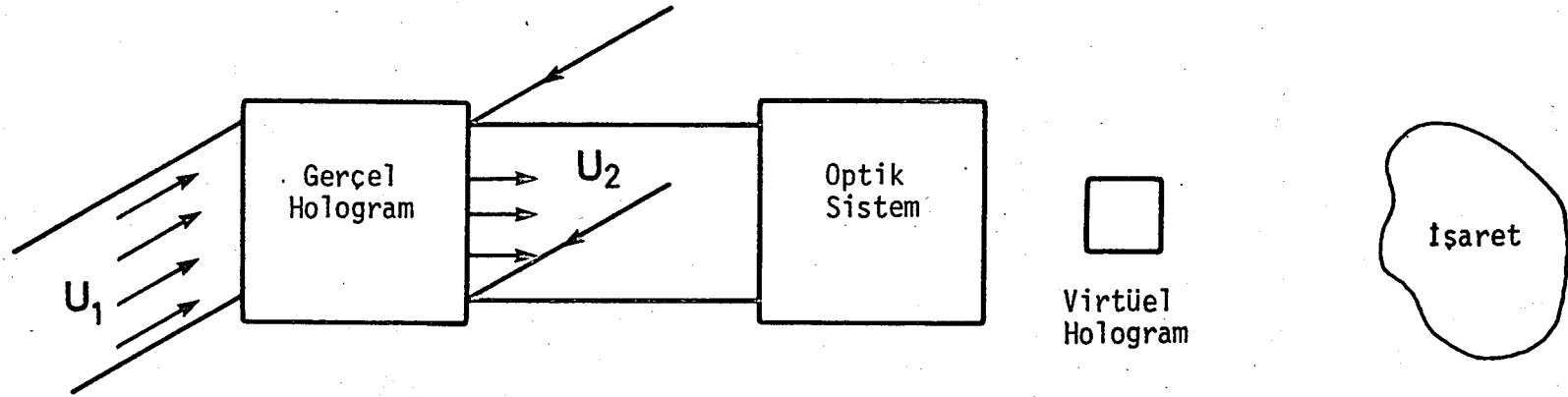
Virtüel holografi yöntemine iletişim kuramı açısından bakıldığında yapılan işlemin esas olarak (2.47) denklemiyle belirtilen hologram üstünde genlik ve faz modülasyonuna neden olan dalganın uzaysal frekans bandının değiştirilmesi olduğu görülmektedir. Virtüel hologram gerçel hologramdan daha küçük seçildiğinde sözü edilen dalganın uzaysal frekans bandı gerçel hologram üstünde alçak frekanslara kaydırılmakta ve virtüel işaret ile de geniş gürültü bandı içinde işaretin sıkıştırılması sağlanmaktadır. Virtüel hologram gerçel hologramdan daha büyük seçildiğinde ise bunun tersi yapılmaktadır. Ayrıca bir önceki kısımda belirtildiği gibi gerçel hologram üstünde bir dalgaboyuna uygun bir işaret virtüel hologram ile diğer bir dalgaboyuna uygun hale getirilmekte ve distorsiyonlar önlenmektedir.

Gerçek hologram kullanılması istenen herhangi bir elektronik veya iletişim sisteminin özelliklerine, örneğin, band genişliğine göre uydurulabilen hologramdır. Aynı zamanda fiziksel bir ortamda kullanılması uygun olan, fakat insan gözünün, belirli elektronik detektörlerin duyarlı olmadığı türde dalgalar ile yapılan hologram olabilir. Bu özellikler gerçek hologram ile kanal kodlaması yapıldığını göstermektedir. Sanal hologram ise işaretin elde edilmesi için kullanılan taşıyıcı dalganın dalga boyuna, ve işaretin gereksinimlerine uygun olan hologramdır. Diğer bir deyişle, kaynak kodlaması sanal hologram ile yapılmaktadır. Optik sistem ise gerçek hologram uzayından sanal hologram uzayına dönüşümü sağlayan arabağ (interface) düzenidir.

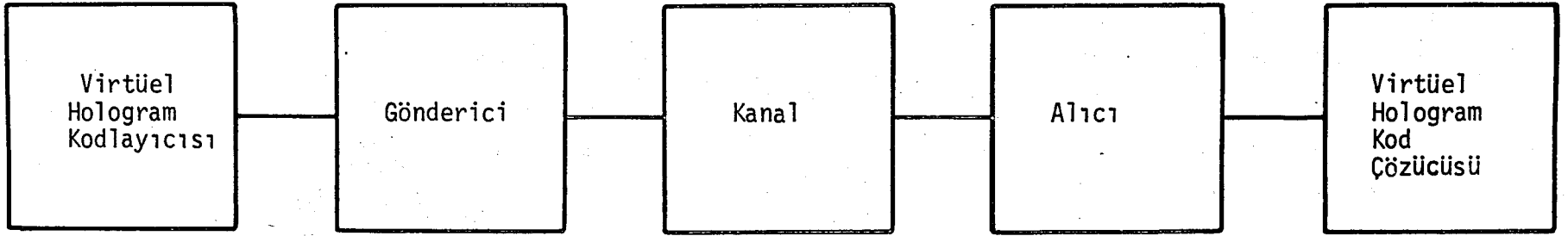
Sanal hologram gerçek hologramdan daha küçük seçildiğinde, işaret sanal işaret olarak geniş gürültü bandı içinde sıkıştırıldığı için optik sistemden yalnızca istenen işareti meydana getiren dalganın geçirilmesi, taşıyıcı dalga ve gürültünün büyük bir kısmının süzgeçlenmesi sağlanmaktadır.

Sanal hologram istenilen büyüklükte ve belirli sayıda karışım çizgisini kapsayacak şekilde yapılabildiğinden, gereğinden fazla bilinin çıkartılması, dolayısıyla bilginin hızlı olarak işlenmesi ve iletimi mümkün olmaktadır.

Günümüzde radar, sonar, bilgisayar bellekleri, sismik çalışmalar, biyomedikal veriler, üç boyutlu resim, faksimile, üç boyutlu televizyon gibi sistemlerde büyük bilgi miktarlarını içeren işaretlerin etkin ve hızlı olarak iletimi güncellik kazanmıştır. Hızın arttırılması için band genişliğinin ve gereğinden fazla bilinin



Şekil 6.4 - Belirli bir dalgaboyu olan dalgalar ile kaydedilen gerçel hologramın başka bir dalgaboyu olan taşıyıcı dalga ile aydınlatılıp virtüel holograma dönüştürülerek kod çözümünün sağlanması



Şekil 6.5 - Virtüel holografi ile iletişim için gerekli düzen

azaltılması gerekmektedir. Her iki işlem de virtüel holografi yönteminde esnek ve uyarlı olarak yapılmaktadır. Dolayısıyla büyük bilgi miktarlarını içeren işaretlerin bu yöntem ile hologram olarak kodlanması ve iletimi, alıcı da aynı yöntem ile kod çözülmesinin sağlanması ve işaretin elde edilmesi uygun bir çözüm yolu olarak görülmektedir.

Şekil 6.5'de düşünülen iletişim sisteminin blok şeması gösterilmektedir. Resim şeklinde olan işaretler laser ışını ile aydınlatılacak olan bir film üstünde kaydedilebilir. Diğer türde işaretler akustik geciktirmeli ışık modülatörü [2] gibi çoğunlukla elektronik tarama ile çalışan elektrooptik aygıtları gerektirmektedir. İşaret sayısal ise bilgisayar ile doğrudan sayısal bir gerçel hologram yapılabilir veya hesaplanabilir. Bu durumda gerçel hologramı meydana getiren veriler bilgisayardan alıcıya doğrudan gönderilebilir.

Işık modülatörünün çıkışı gerçel hologramın yapılması için Şekil 6.2'de gösterildiği gibi optik sistemden geçirilir. Gerçel hologram bir film üstünde kaydedilebilir. Fakat iletişim için daha uygun olanı gerçel hologramın video teyp ve vidikon kamera gibi elektronik aygıtlarla süratle taranıp alıcıya gönderilmesidir. Alıcıya gelen veriler diğer bir uzaysal ışık modülatörü ile çizilerek gerçel hologram meydana getirilir. Vericide mevcut sistemin bir benzeri olan optik bir sistem ve laser ışınıyla virtüel hologram ve işaret yeniden elde edilir.

Bu sistemin başlıca özellikleri şu şekilde belirtilebilir:

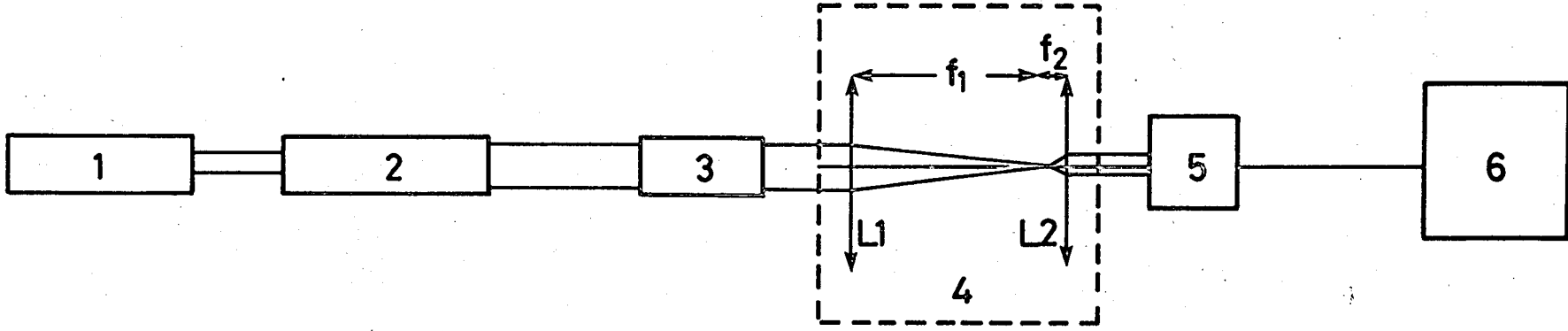
1. Gerçel hologram iletişim kanallarındaki gürültüye az duyarlı olarak gerçekleştirilebilir.
2. Uzaysal band genişliği ve gereğinden fazla bilgi azaltıldığından çok hızlı iletişim ve bilgi işleme mümkündür.
3. Hologram iki boyutlu işaretlere sınırlı olmadığından çok büyük miktarda verileri içeren üç boyutlu işaretler hızlı olarak iletilebilir ve işlenebilir.
4. Hem analog hem de sayısal bilgi iletimi ve işlenmesi mümkündür.
5. Optik sistem aynı zamanda iletilen verilerin Fourier dönüşümü ve optiksel süzgeçleme gibi yöntemler ile işlenmesi için de kullanılabilir. Bilginin hem iletimi hem de işlenmesi gerçek zamanda başarılabilir.
6. Sistemin özelliklerinin değiştirilmesi optik sistemin ayarlanmasıyla çok süratli olarak gerçekleştirilebilir. Dolayısıyla işaretin kodlanması ve kod çözülmesi uyarlı olarak yapılabilir.
7. Eğer veriler akustik ve mikrodalga gibi değişik dalga-boyundaki dalgalarla kaydedilen bir hologramı içeriyorsa, alıcıda işaret, gerçel hologramın virtüel holograma dönüştürülmesiyle, ara işlemleri olmadan, görülebilen uyumlu ışık dalgası kullanarak elde edilebilir.

BÖLÜM 7 - VİRTÜEL HOLOGRAFI İLE DENEYLER

7.1 G i r i ş

Beşinci bölümde ön deneyler olarak taramalı elektron mikroskop sistemiyle ve tek bir mercek kullanarak yapılan bazı virtüel hologramlardan elde edilen bulgular açıklanmıştı. Altıncı bölümde virtüel holografinin daha yakından incelenmesi sonucu çeşitli olanakların söz konusu olduğu görüldü. Bu bölümde ise kuramsal sonuçların deneyler ile kanıtlanmasına çalışılmaktadır.

Taramalı elektron mikroskop sisteminin, açıklıklar arasında 1 mikron mertebesinde bir uzaklık sağladığı için, yüksek uzaysal band genişliğine sahip olduğu söylenebilir. Dolayısıyla alçak uzaysal band genişliği olan aygıtların altıncı bölümde belirtildiği şekilde hologram yapımında kullanılabilirliği fikrinin deneysel olarak kanıtlanması gerekmektedir. Bu ve benzer gayeler için geliştirilen sistemin blok şeması Şekil 7.1'de gösterilmiştir. Optik sistem teleskopik bir düzendir ve L2 merceğinin yeri virtüel taşıyıcı dalganın istenildiği gibi seçilebilmesi için ayarlanabilmektedir. He-Ne laserinin çıkışı 9.0 cm çapı olan bir kolimatör ile düzlem dalga olarak büyütülmektedir. L1 deneylerin çoğunda bir kamera objektifi olup çapı 6.0 cm, odak uzaklığı 18.0 cm olan bir kamera objektifidir. L2 ilk deneylerde odak uzaklığı 1.8 mm olan bir mikroskop objektifi olmuştur. Böylece sistemin büyüme/küçülme oranı 100 mertebesinde-dir. L1 ve L2 için değişik çapı ve odak uzaklığı olan çeşitli mercekler de kullanılmıştır.



Şekil 7.1 - Deneylerde kullanılan sistem

1. Laser
2. Kolimatör
3. Gerçek Hologram
4. Optik Sistem
5. Virtüel Hologram
6. İşaret

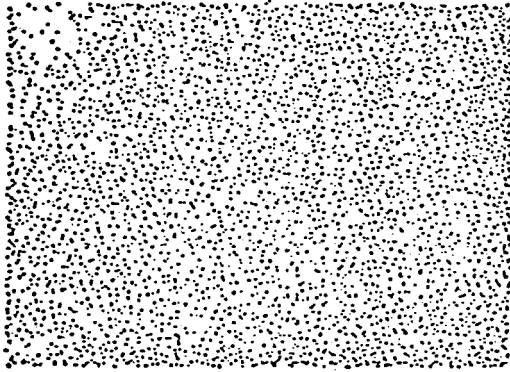
6.2 Xerox Hologramları

Alçak uzaysal band genişliği olan aygıtların virtüel holografi yöntemiyle hologram yapımında kullanılabilişliğini göstermek için Nord-10 minibilgisayarı ve Textronix 4014 grafik aygıtı kullanarak sayısal hologramlar yapılmıştır. Kullanılan kodlama yöntemi Bölüm 3 'de incelenen yöntemdir.

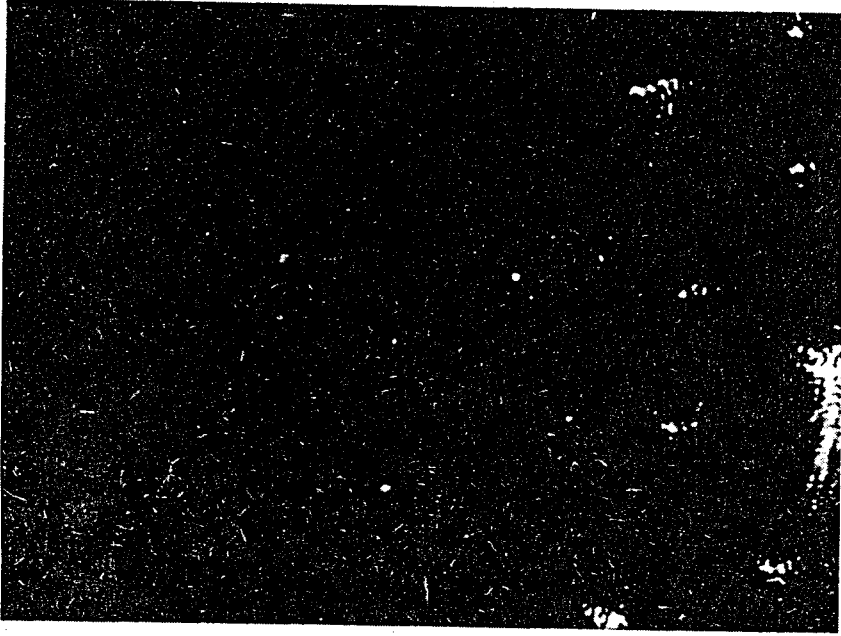
Textronix 4014 aygıtının x-ekseni yönünde 4000 ve y-ekseni yönünde 3000 nokta büyüklüğünde kapasitesi vardır. Ancak nokta büyüklüğü dolayısıyla birbirine değmeyen noktalar yapabilmek için yanyana olan 3 noktadan biri kullanılabilmektedir. Nord-10 minibilgisayarı ile grafik aygıtı çalıştırılmakta ve kodlama yöntemiyle ilgili programlar ile hologram noktalarının yerleri hesaplanmaktadır. Minibilgisayar aynı zamanda Versatec çizicisine bağlıdır.

İlk önce grafik aygıtının katod tübü üstünde meydana getirilen hologram daha sonra Versatec çizicisi ile kağıt üstüne kopya edilmektedir. Bu şekilde elde edilen hologram bir dosya kağıdı büyüklüğü mertebesinde. Fakat kullanılan optik sistemin çapı 6.0 cm olduğu için Versatec çizicisinden elde edilen hologram Xerox kopya makinesiyle 6 cm mertebesinde boyuta küçültülmekte ve bir saydam üstüne kopyalanarak gerçel hologram elde edilmektedir.

Şekil 7.2'de Xerox makinesinden elde edilen bir gerçel hologramın 1:1 ölçeğinde kopyası görülmektedir. Bu hologram 4 işaret noktası için yapılmıştır. Optik sistem merceksiz Fourier düzeninde seçildiğinden virtüel taşıyıcı dalga işaret düzleminde odaklanmaktadır. Elde edilen işaret noktaları Şekil 7.3'de gösterilmiştir. Dört noktanın görünüşü



Şekil 7.2 - 4 noktadan meydana gelen işaret için yapılan
gerçek hologram



Şekil 7.3 - Hologramdan elde edilen 4 nokta şeklindeki işaret

şeklindedir. Görülen diğer noktalar harmoniklerdir.

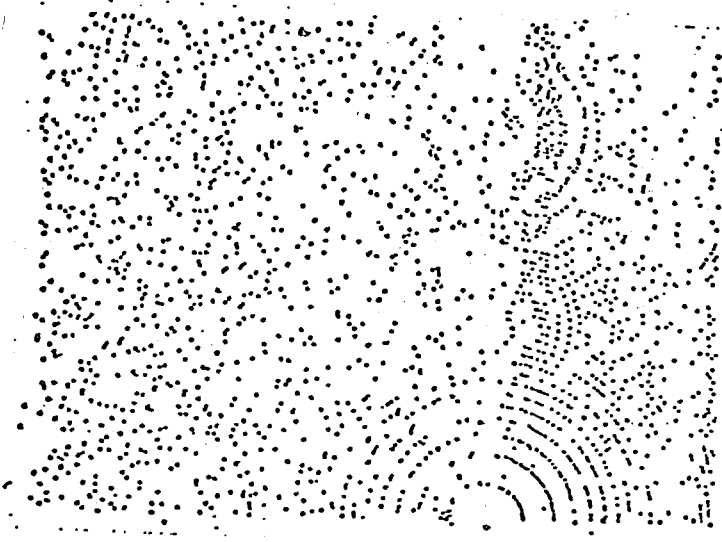
Tek işaretli sayısal holografi yöntemi virtüel holografide , virtüel taşıyıcı dalga odak noktası virtüel holograma yakın bir küresel dalga olarak seçildiğinde, geçerliliğini korumaktadır. Şekil 7.4'de küresel virtüel taşıyıcı dalga ile tek bir işaret noktası için yapılan bir gerçel hologramın 1:1 ölçeğinde kopyası gösterilmiştir. Şekil 7.5'de elde edilen tek işaret noktası görülmektedir. Ortadaki dairesel ve aydınlık görünen alan taşıyıcı dalgayı göstermektedir.

7.3 Hacim Etkileri ile İlgili Deneyler

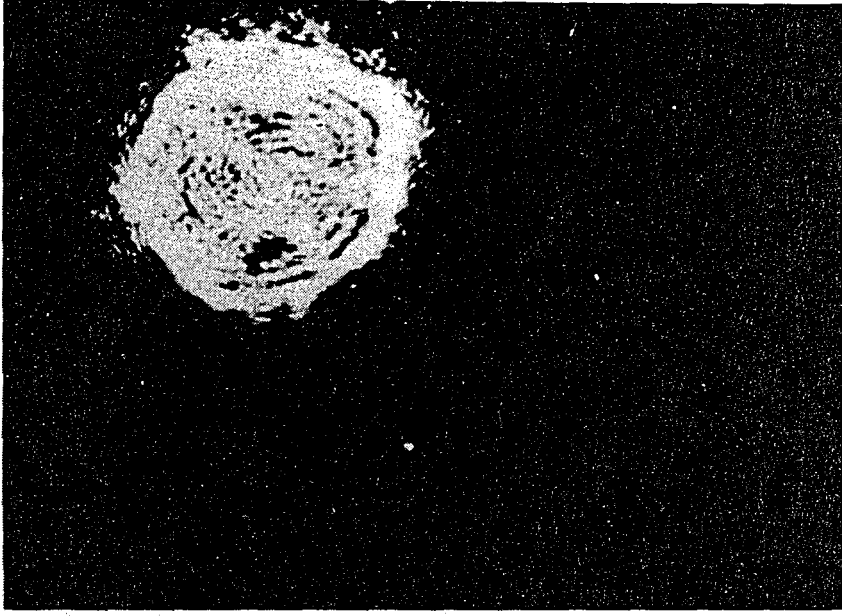
Şekil 7.6'da tek bir işaret noktası ve merceksiz Fourier düzeni için yapılmış bir hologramın 1:1 ölçeğinde kopyası görülmektedir. Hacim etkilerini incelemek için bu hologramın bazı kopyaları yapılmıştır.

İki hologram gerçel hologram uzayında birbirlerinden 90 cm aralıkta yerleştirilmiştir. Hologramlardan birinin yeri diğerine nazaran hologram çizgilerine dik yönde ayarlandığında harmonik işaretlerin şiddetlerinin modüle edilebildiği görülmüştür. Şekil 7.7'de birinci harmoniklerden birinin yokedilişi gösterilmektedir.

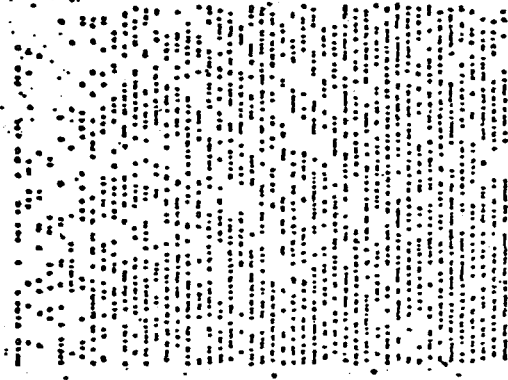
Hologramların sayısı arttırılınca bütün harmoniklerin yok edilip tek işaretin elde edilebildiği görülmüştür. Aynı zamanda çeşitli hologramlar aynı işarete katkıda bulunduğundan işaret gürültü



Şekil 7.4 - Bir nokta işaret için yapılan tek işaretli gerçel
hologram



Şekil 7.5 - Hologramdan elde edilen tek nokta işaret



Şekil 7.6 - Hacim deneylerinde kullanılan ve bir nokta işaret için yapılan merceksiz Fourier gerçel hologramı

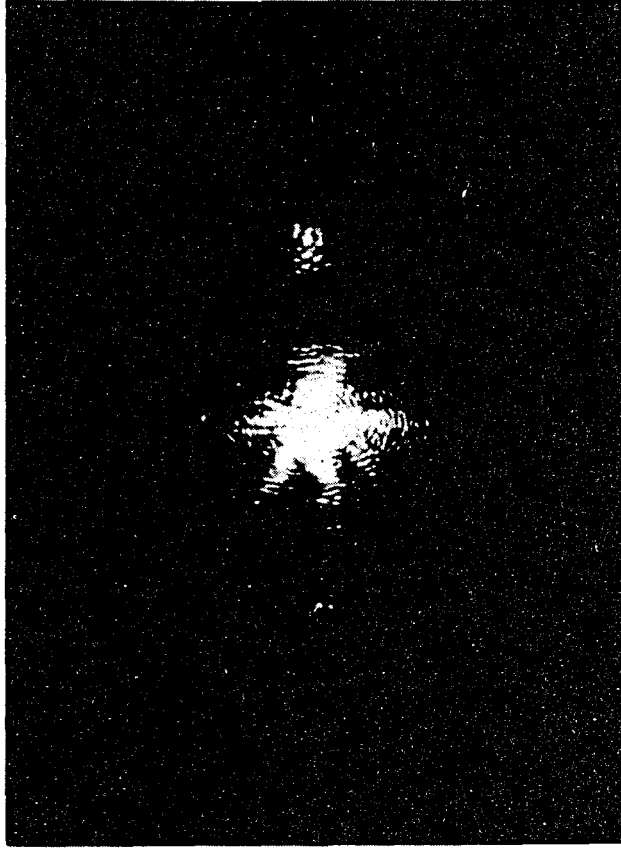


Şekil 7.7 - 90 santimetre aralıkla yerleştirilen iki hologramdan elde edilen görüntü. Birinci harmoniklerden birinin süzgeçlenmesi için bir hologramın yeri diğerine nazaran ayarlanmıştır.

oranı da yükseltilmektedir. Şekil 7.8'de 60 cm aralıklarla yerleştirilen 3 hologramdan elde edilen netice görülmektedir. Diğer harmoniklerin şiddeti çok zayıflatılmış iken istenen nokta işaretin şiddeti kuvvetlendirilmiştir.

Hologramların birbirine nazaran ayarlanmasının çok kolay olduğu görülmüştür. Bu netice bir önceki bölümde elde edilen teorik sonuçları kanıtlamaktadır. Teleskopik sistemde optik eksene dik yöndeki büyüme oranı $1/F$ iken optik eksene paralel yöndeki büyüme oranı $1/F^2$ olarak belirlenir. Dolayısıyla kullanılan sistemde dik yöndeki büyüme oranı $1/100$, paralel yöndeki büyüme oranı $1/10000$ sayıları mertebesinde. Böylece gerçel hologram uzayında optik eksene paralel yönde 60 cm olan bir aralık boyutu virtüel hologram uzayında 60 mikron olmaktadır. Aynı yönde 1.0 mm'lik bir ayarlama virtüel hologram uzayında 0.1 mikron bir ayarlamaya dönüşmektedir. Optik eksene dik yönde 0.1 mm'lik bir ayarlama ise virtüel hologram uzayında 1.0 mikron bir ayarlamaya yol açmaktadır. Bu örnekten açıkça anlaşıldığı gibi, kullanılan laser ışınının 0.6328 mikron olan dalga boyu dolayısıyla, birkaç dalganın karışımını sağlamak için gerekli olan çok duyarlı bir sistem yerine, optik eksene dik yönde $1/F$ kadar ve optik eksene paralel yönde $1/F^2$ kadar daha az duyarlı bir sistem kullanılması virtüel holografi ile mümkün kılınmaktadır.

Deneylerle kanıtlanan hacim etkilerini iki türlü yorumlamak mümkündür. Bunlardan birincisi birarada kullanılan düzlem hologramların tümünü bir hacim hologramı olarak düşünmektedir. Gerçel hologram uzayında büyük boyutları olan bu hacim hologramı virtüel hologram uzayında kullanılan dalga boyuna uygun olarak elde edilmektedir. İkinci yorum ise gerçel hologram uzayında 2 veya daha fazla düzlem hologramın yerlerini birbirlerine nazaran ayarlayarak birini diğerinin veya



Şekil 7.8 - 60 santimetre aralıkla yerleştirilen üç hologramdan
tek bir kuvvetli harmonik işaret elde edildiğini
gösteren görüntü

diğerlerinin süzgeci olarak kullanmayı düşünmektir. Örneğin, Şekil 7.7'de birinci harmoniklerden biri süzgeçlenmiştir. Böylece optik süzgeçleme az duyarlı olarak yapılabildiğinden basitleştirilmiş olmakta ve hızlı olarak çalışan elektrooptik aygıtların kullanılmasına olanak sağlanmaktadır.

7.4 Kitaplar, Yayınlar ve Virtüel Holografi

Buraya kadar yapılan hologramlar üçüncü bölümde incelenen kodlama yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Derhal akla gelen bir sorun diğer kodlama yöntemleri ile virtüel holografinin uygulanıp uygulanamayacağıdır.

Gerçek hologramın optik sistemin boyutlarıyla sınırlı olarak istenilen büyüklükte yapılabileceği bilinmektedir. Holografi ile ilgili kitap ve yayınlarda yapılan çeşitli hologramların büyütülmüş resimleri vardır. Dolayısıyla bu resimleri kopya makinesi ile saydam üstüne kopya ederek gerçek hologram olarak kullanmak mümkün olmalıdır.

Bu düşüncenin doğruluğunu kanıtlayabilmek için çeşitli kitap ve yayınlardan hologramların büyütülmüş resimleri araştırılmıştır. Bulunanlar saydam üstüne kopya edilerek gerçek hologram haline getirilmiştir. Daha sonra Şekil 7.1'de gösterilen sistem ile her gerçek hologram virtüel holograma dönüştürülerek işaretin elde edilmesine çalışılmıştır. Alınan sonuçlar başarılı olmuş ve bütün dünyada holografi ile ilgili olarak çalışan uzmanların birbirlerinin hologramlarını literatürden faydalanarak kullanabilecekleri anlaşılmıştır.

Şekil 7.9'da bir kinoform görülmektedir [16]. Şekil 7.10'da bu kinoformdan elde edilen B harfi şeklindeki işaret gösterilmiştir. Kuvantalanın faz doğru olarak kaydedildiğinde kinoformdan tek bir işaret elde edilir. Kitaptan kopya edilmesi dolayısıyla saydam üstünde kuvantalanın faz ikili düzeye indirildiğinden iki işaret elde edilmiştir. Şekil 7.10'da görülen noktalar eşlenik B harfi işaretinin kullanılan optik sistem dolayısıyla meydana gelen Fourier dönüşümüdür. Virtüel taşıyıcı dalgayı ayarlayarak eşlenik işaret kameranın olduğu düzlemde odaklanabilmektedir. 0 zaman Şekil 7.10'da görülen işaretin Fourier dönüşümü alınmaktadır.

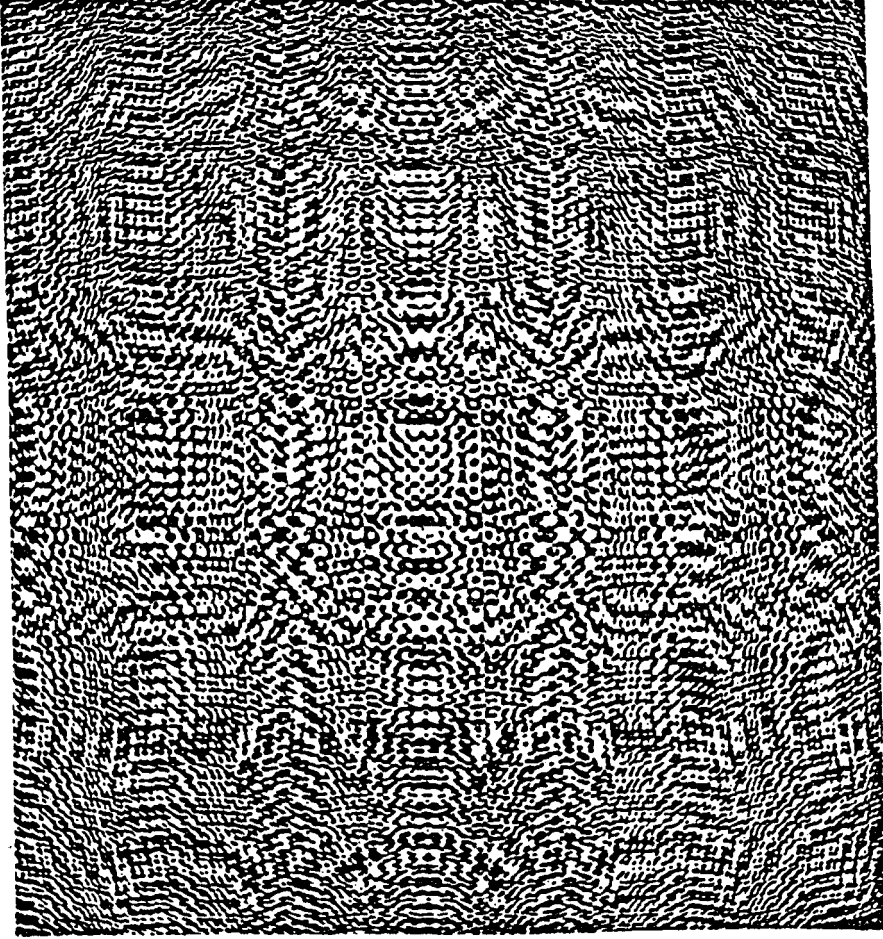
Şekil 7.11 diğer bir kinoformdur [29]. Şekil 7.12'de bu kinoformdan elde edilen işaret görülmektedir.

Şekil 7.13 bilgisayar ile hesaplanıp çizilen bir kinoform merceğinin büyütülmüş resmidir [30]. Şekil 7.14'de bu hologramdan elde edilen tek nokta işaret ve onun eşleniği görülmektedir.

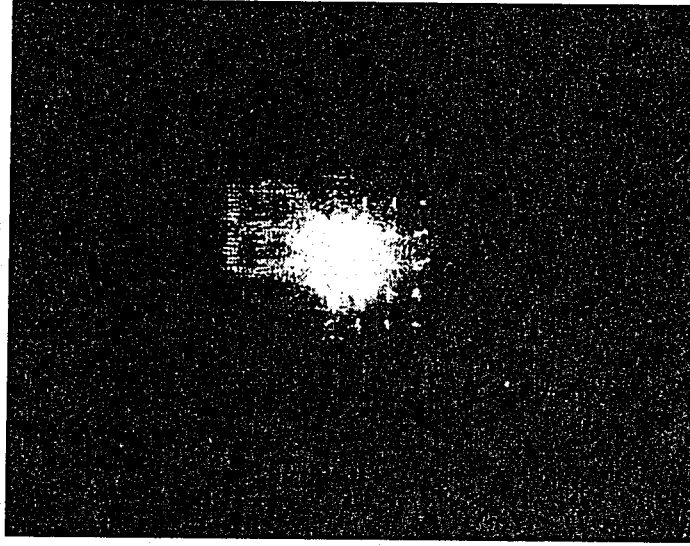
Dairesel çizgili hologramlar konik bir taşıyıcı dalga ile yapılan hologramlardır [31]. Konik bir taşıyıcı dalga $U_t(x,y)$

$$U_t(x,y) = A \exp\{j2\pi(x^2 + y^2)^{1/2}/r_c\} \quad (7.1)$$

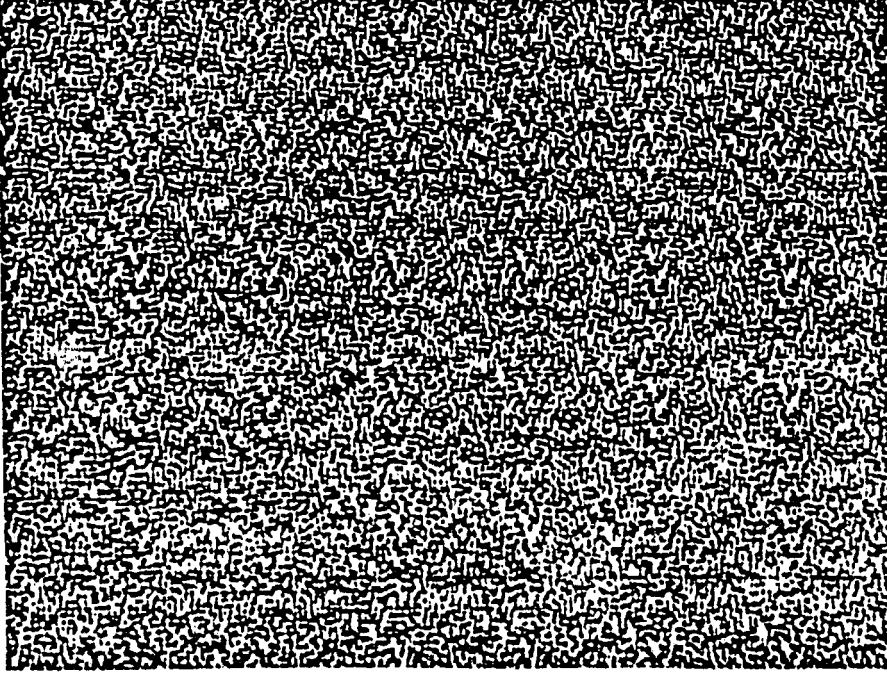
olarak yazılabilir. Burada A ve r_c değişmez sayılardır. Şekil 7.15'de 10 sektörlü spiral bir işaret dalgasının dairesele çizgili hologramı görülmektedir [31]. Şekil 7.16'da bu hologramdan elde edilen işaret gösterilmiştir. Şekil 7.17'de küresel bir işaret dalgası için yapılan bir diğer dairesele çizgili hologram görülmektedir [31]. Bu hologramın yarısı konkav, diğer yarısı konveks bir



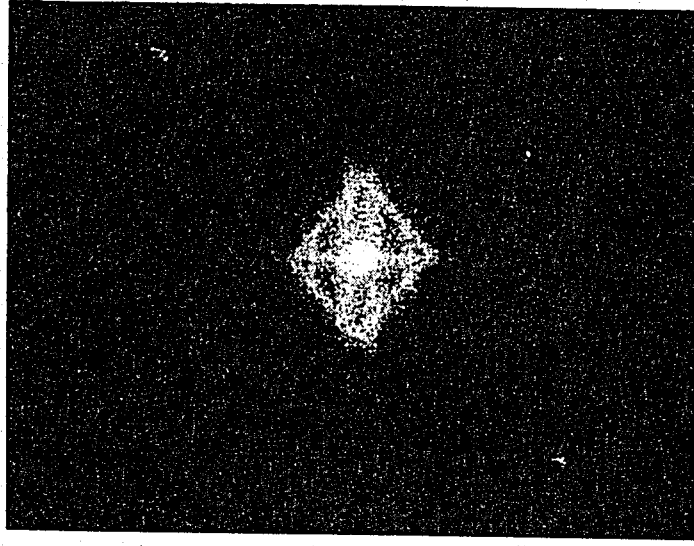
Şekil 7.9 - Kinoform yöntemi kullanılarak yapılan bir gerçel
hologram



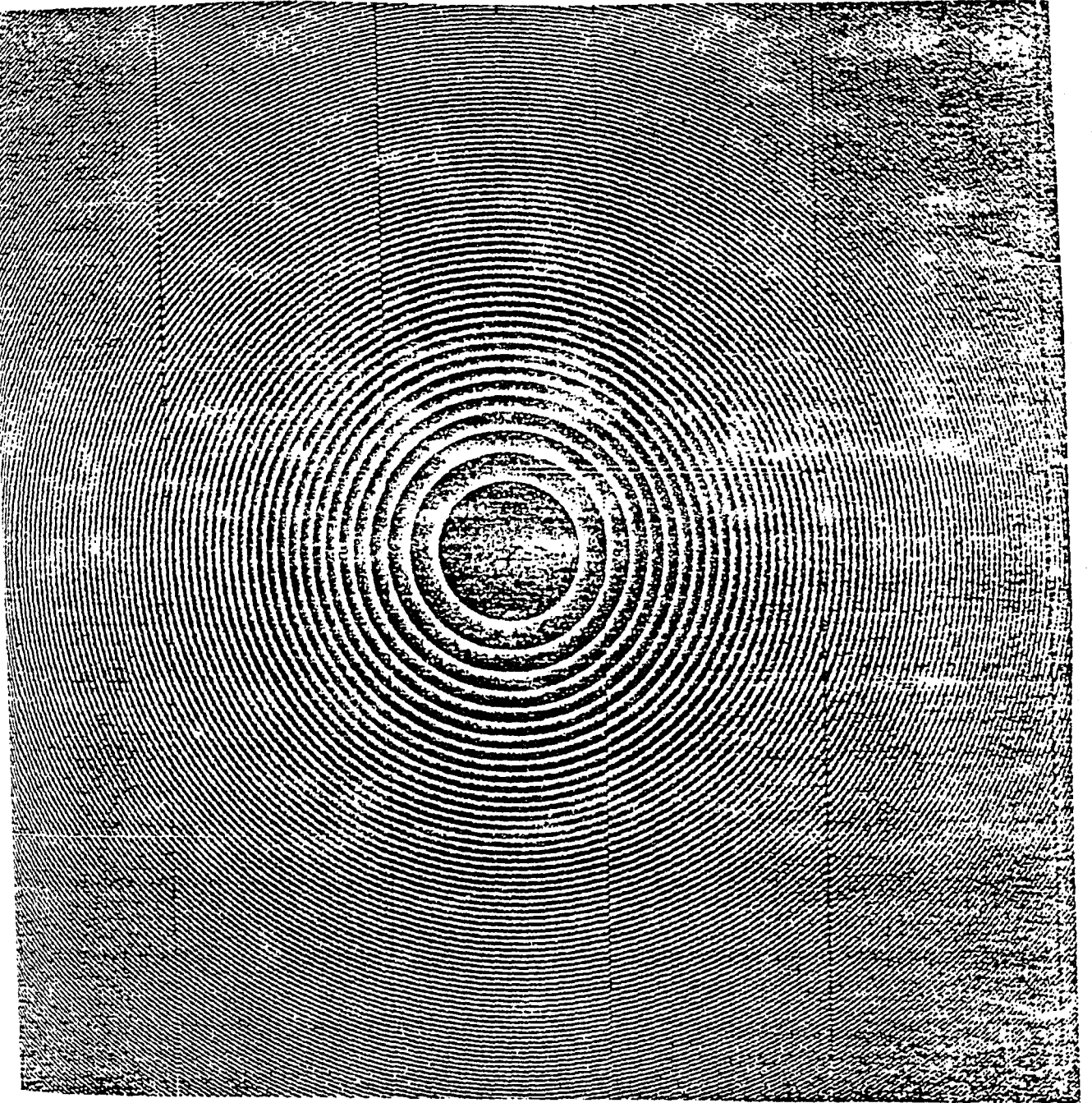
Şekil 7.10 - Kinoformdan elde ediden B harfi şeklindeki
işaret



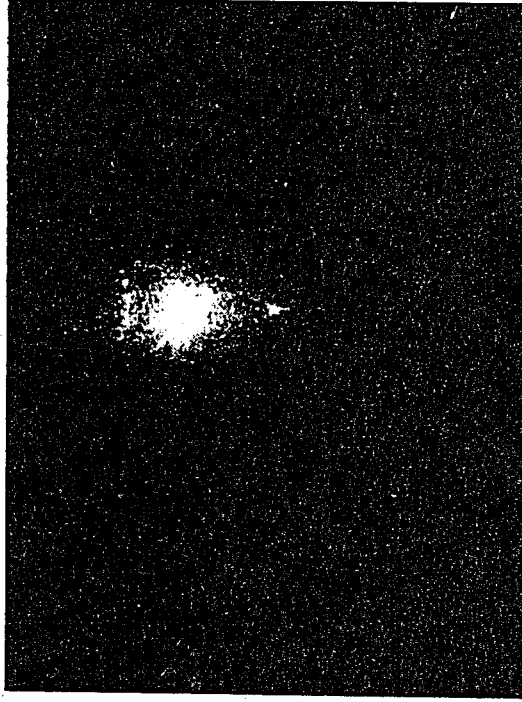
Şekil 7.11 - Kinoform yöntemi kullanılarak yapılan bir başka gerçel
hologram



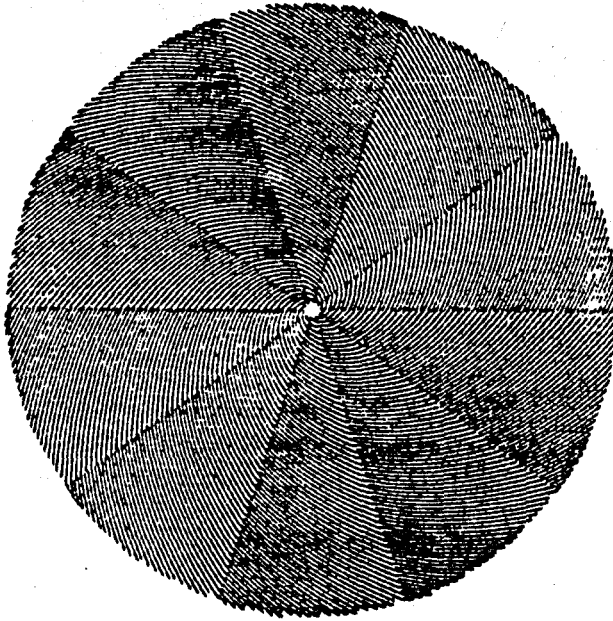
Şekil 7.12 - Kinoformdan elde edilen işaret



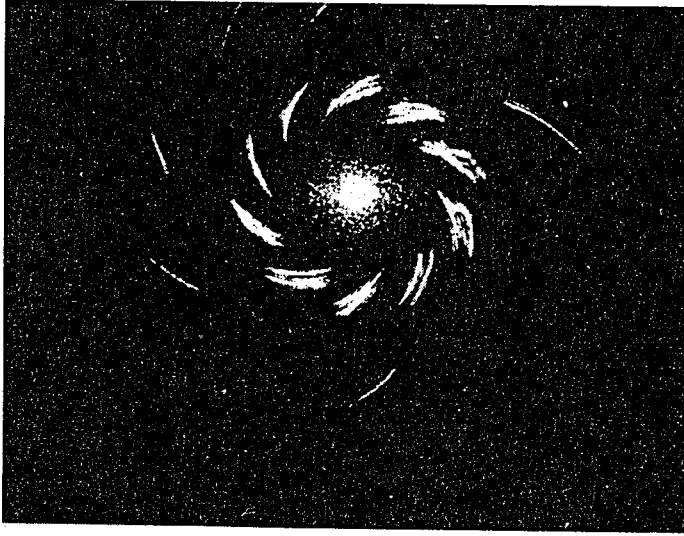
Şekil 7.13 - Geospace çizicisi ile çizilen bir sayısal gerçel mercek



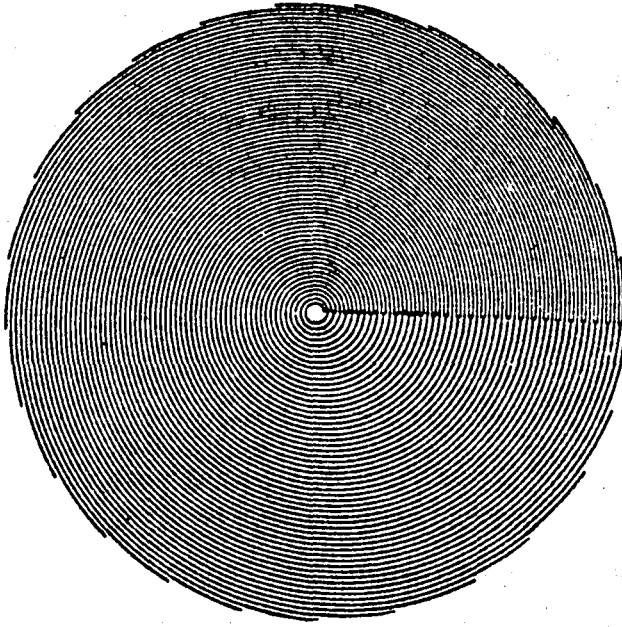
Şekil 7.14 - Sayısal mercekten elde edilen
tek nokta işaret



Şekil 7.15 - 10 sektörlü spiral bir dalganın dairesel
çizgili gerçel hologramı



Şekil 7.16 - Dairesel çizgili hologramdan elde edilen işaret

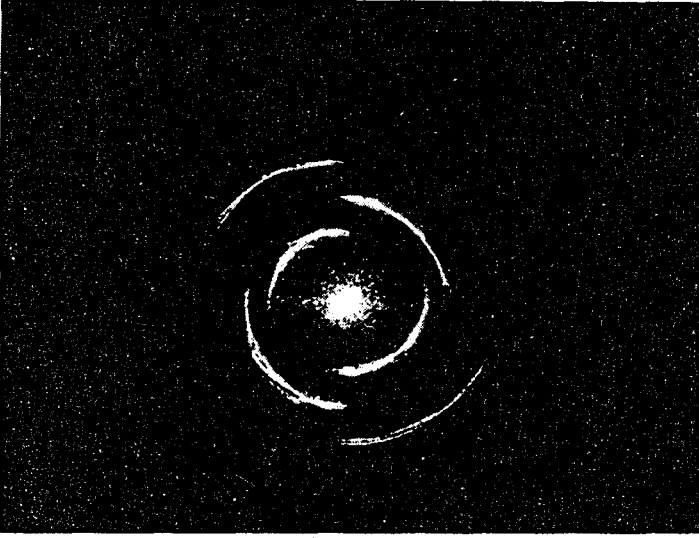


Şekil 7.17 - Spiral bir dalga'nın dairesel çizgili gerçel hologramı

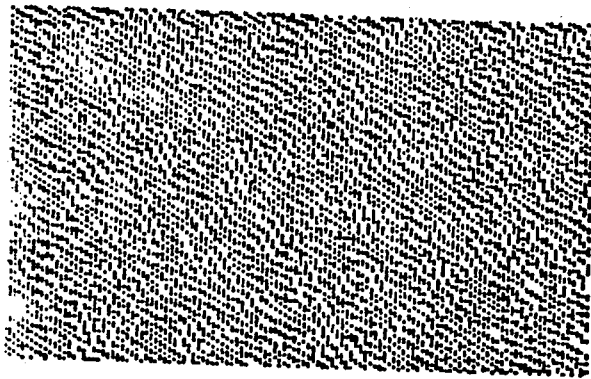
konik taşıyıcı dalga için yapılmıştır. Şekil 7.18'de bu hologramdan elde edilen işaret gösterilmiştir. Şekil 7.19'da fazın ikili düzeyde kuvantalanarak kodlandığı ve bilgisayarın satır yazıcısı ile çizilen bir sayısal Fourier dönüşümlü hologram görülmektedir [32]. Şekil 7.20'de bu hologramdan elde edilen V harfi şeklinde olan işaret ve onun harmonikleri gösterilmiştir. Bu harmonikler daha önce de belirtildiği gibi sonlu Fourier dönüşümü kullandığı için işaretin periyodik olduğunun varsayılmasından ileri gelmektedir. Şekil 7.21'de Lohmann yöntemiyle kodlanan sayısal bir hologram görülmektedir [33]. Şekil 7.22'de bu hologramdan elde edilen işaret ve onun eşleniği gösterilmiştir. Şekil 7.23'de optik eksenin bir tarafında kaydedilen bir Fresnel zon plâkası görülmektedir [34]. Fresnel zon plâkası tek bir işaret noktasından gelen küresel dalganın fazının ikili düzeyde kuvantalanarak kodlanan hologramı olarak düşünülebilir. Şekil 7.24'de Fresnel zon plâkasından elde edilen işaretler görülmektedir. Burada ikinci nokta harmonik işaret kamera düzleminde odaklanmıştır. Diğer harmonik işaretler virtüel holograma daha yakın yerlerde odaklanmaktadır.

7.5 Ses Dalgaları ile Virtüel Holografi

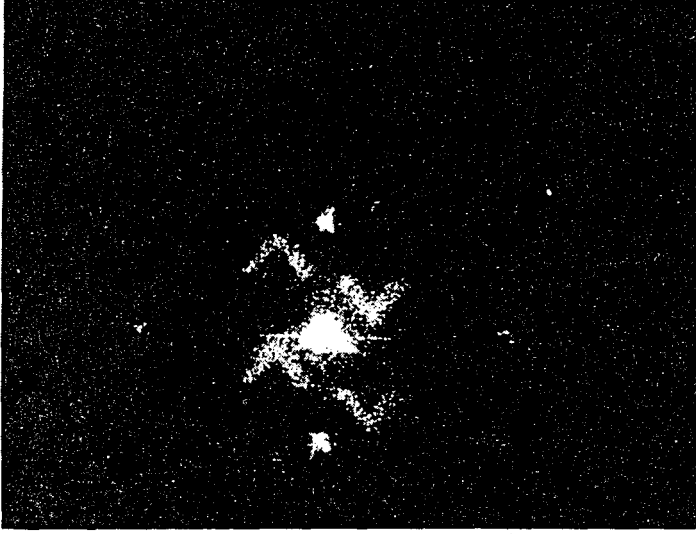
Bölüm 6'da belirli bir dalgaboyu olan dalgalarla yapılan bir hologramın görülebilen ışıık dalgaboyu olan taşıyıcı bir dalga ile aydınlatılan bir holograma dönüştürülmesi ve bu işlemin gerçek zamanda yapılabilmesi için virtüel holografi yönteminin kullanılabileceği belirtilmişti. Deneysel olarak bu yönde bazı kanıtlar bulabilmek için ses dalgaları ile yapılmış bazı hologramlar Şekil 7.1'de



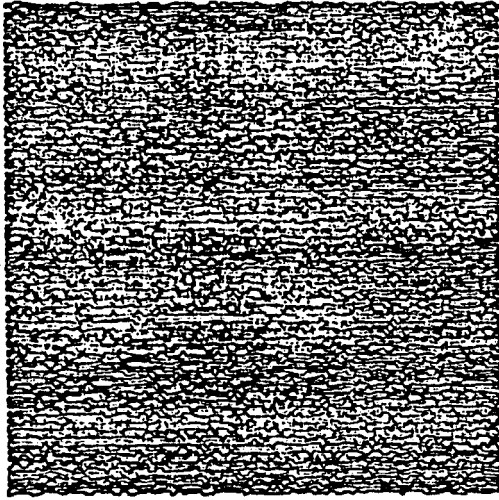
Şekil 7.18 - Dairesel çizgili hologramdan elde edilen işaret



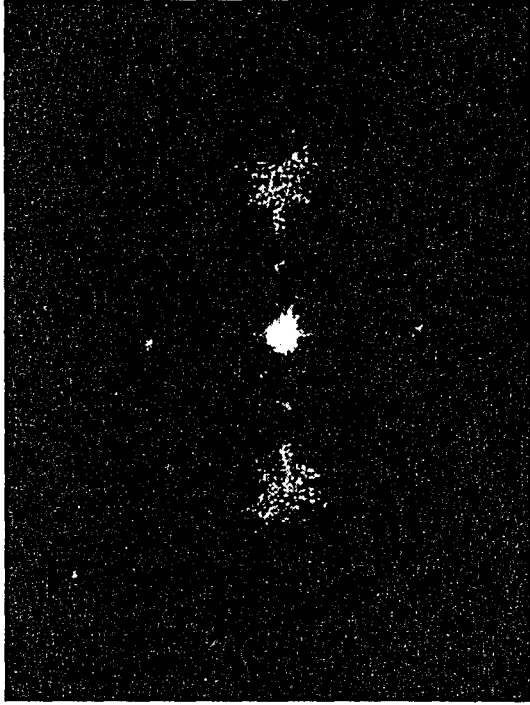
Şekil 7.19 - V harfi şeklindeki işaretin Fourier dönüşümlü gerçel
hologramı



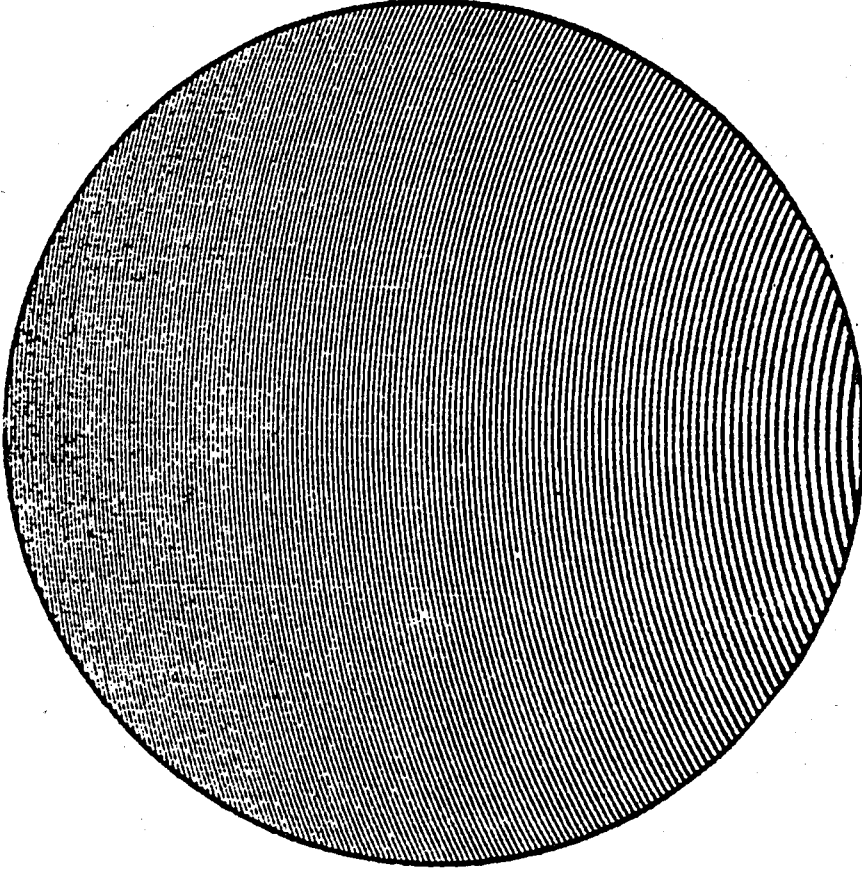
Şekil 7.20 - Fourier dönüşümlü hologramdan elde edilen işaret



Şekil 7.21 - Lohmann yöntemi ile gerçekleştirilen bir sayısal
gerçek hologram



Şekil 7.22 - Lohmann hologramından elde edilen işaret



Şekil 7.23 - Optik eksenin bir tarafında kaydedilen bir gerçel
Fresnel zon plâkası



Şekil 7.24 - Fresnel zon plâkasından elde edilen nokta harmonik işaretler

gösterilen düzen ile virtüel holograma dönüştürülüp işaretin elde edilmesine çalışılmıştır.

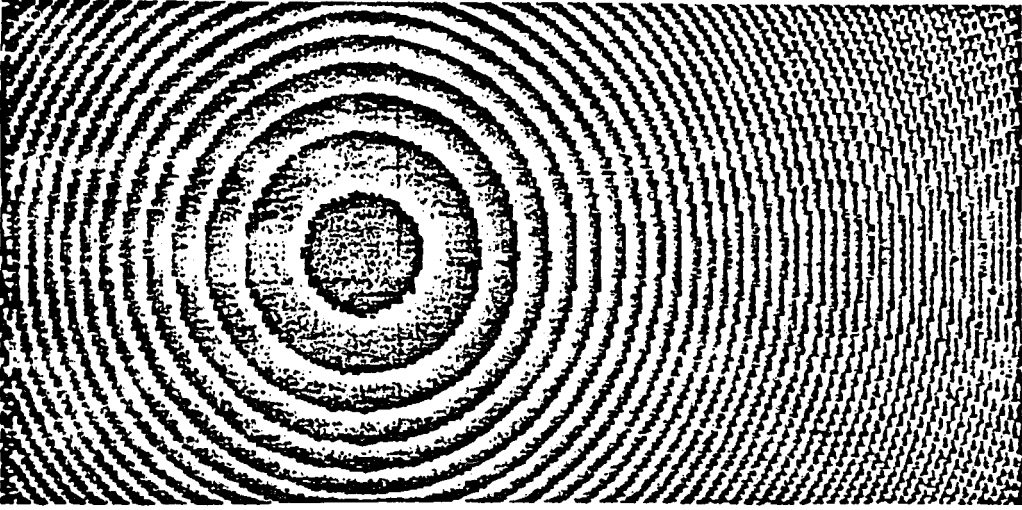
Şekil 7.25'de 1.0 mm çapında 5 MHz'de çalıştırılan Clevite PZT-4 dönüştürücüsünden (transducer) elde edilen dalganın ölçülen fazının kuvantalanarak bilgisayar yardımıyla çizilen resmi görülmektedir [35]. Şekil 7.26'da bu hologramdan elde edilen tek nokta işaret gösterilmiştir.

Şekil 7.27'de 200x200 elektrostatik dönüştürücü dizisi ile kaydedilen bir akustik hologram görülmektedir [36]. Elektrostatik dönüştürücülerin yapılışı oldukça sade bir teknolojiye dayandığından geleceği parlak görülmektedir. Şekil 7.28'de bu hologramdan elde edilen görüntü gösterilmiştir. Kullanılan optik sistemin çapı yeterli büyüklükte olmadığından işaretin uç kısımları sistemin kenarlarından süzgeçlenmektedir. Bununla beraber, IMTA 1973 yazısı okunulabilir yeterlidir.

7.6 Analog Virtüel Holografi ile İlgili Deneyler

Önceki bölümde analog virtüel holografi için gerekli yaklaşım geliştirilmişti. Yapılan ilk deneyler karışım çizgilerinin gözle kolaylıkla görülebilecek kadar alçak uzaysal band genişliğine karşılık olabileceğini göstermiştir. Dolayısıyla vidikon kamera gibi elektronik tarama aygıtlarıyla gerçel hologramın hızlı olarak kaydedilebileceği anlaşılmıştır.

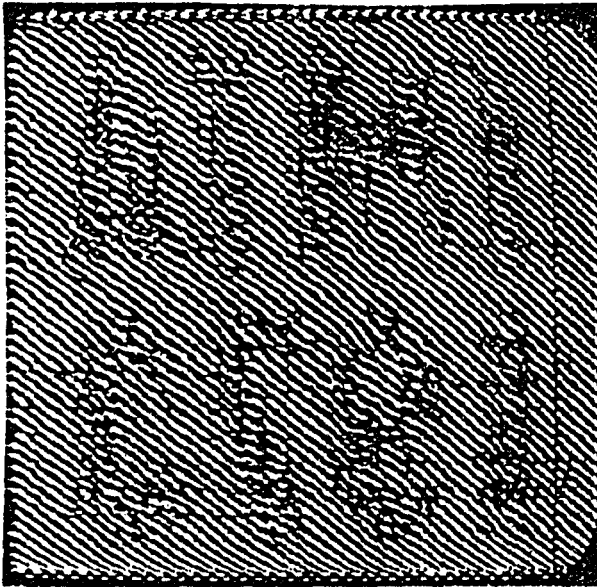
Şekil 7.29'da 1.25 cm çaplı bir delikten geçen ve deliğe 1.0 m uzaklıkta bir noktadan kaynaklanan He-Ne laser ışınının meydana



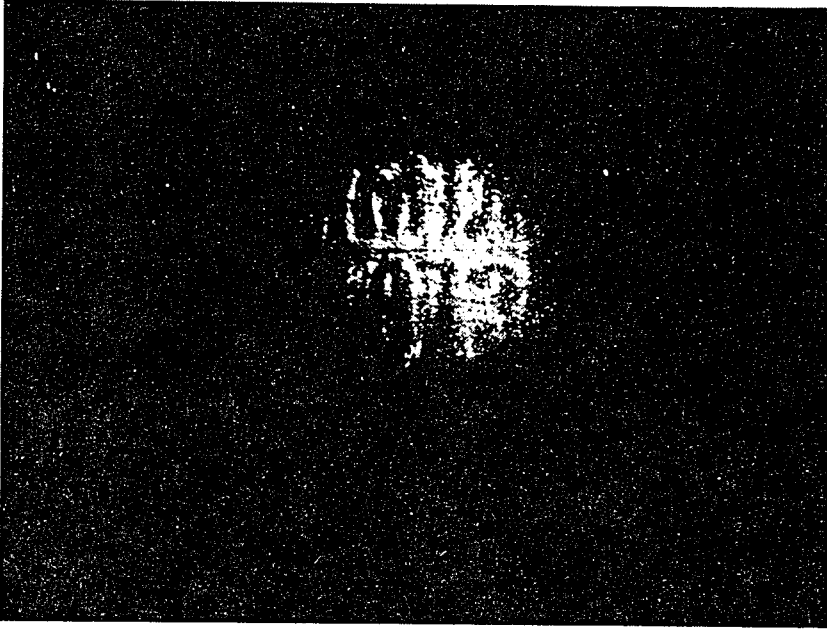
Şekil 7.25 - 1 milimetrelık dönüştürücü ile gerçekleştirilen ses dalgalarının fazının ölçölüp kuvantalanmasıyla elde edilen akustik hologram



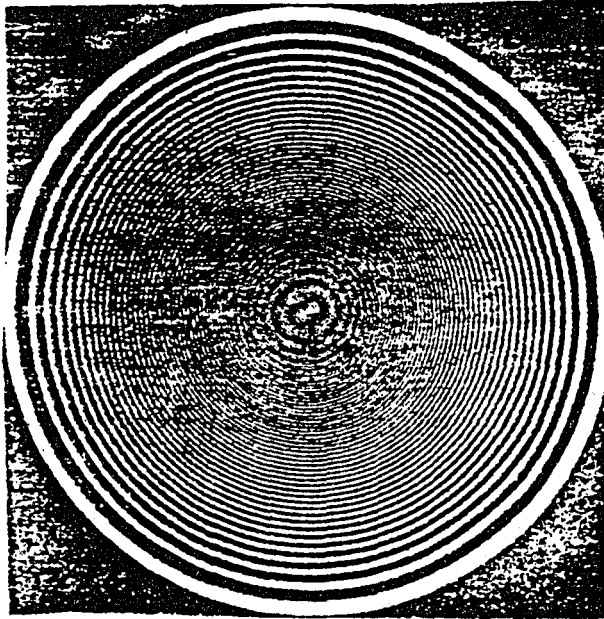
Şekil 7.26 - Akustik hologramdan elde edilen tek nokta işaret



Şekil 7.27 - Elektrostatik dönüştürücü dizisi ile kaydedilen
bir akustik hologram



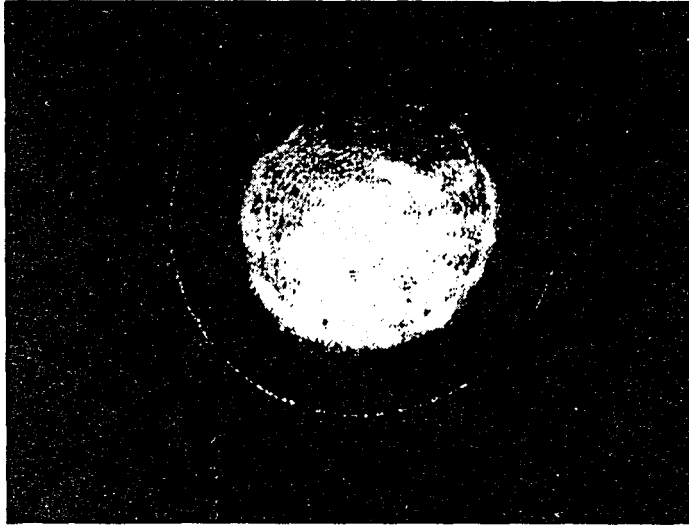
Şekil 7.28 - Akustik hologramdan elde edilen işaret



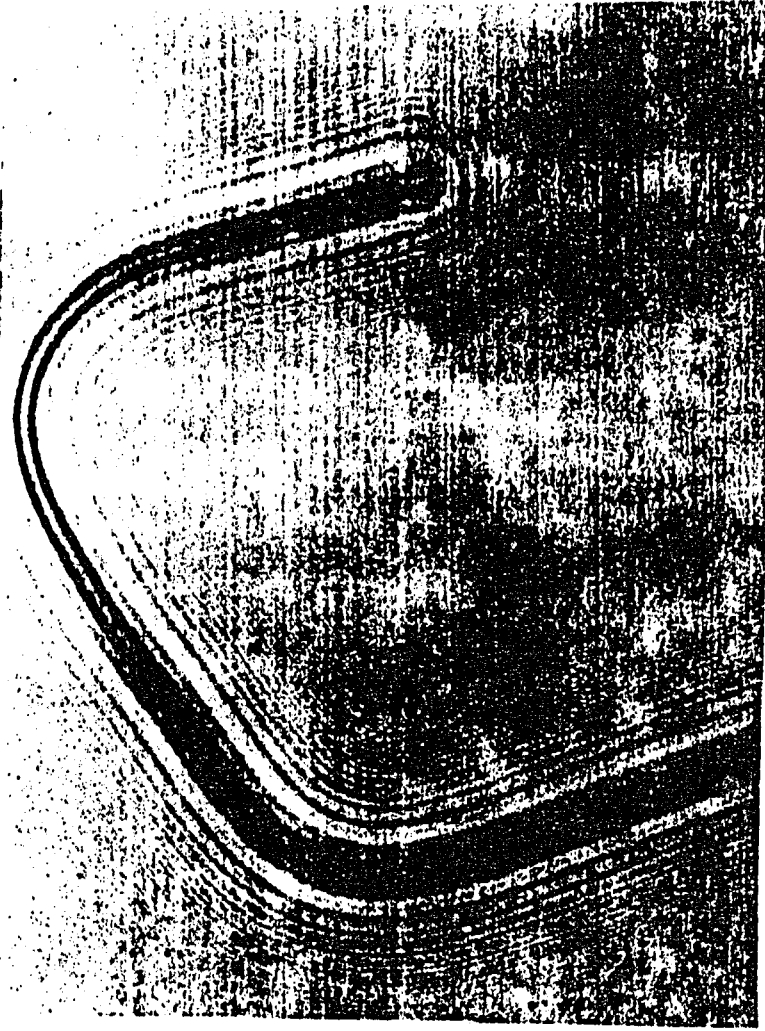
Şekil 7.29 - 1.25 santimetre çaplı bir delikten geçen ve deliğe 1 metre uzaklıkta bir noktadan kaynaklanan He-Ne laser ışığının meydana getirdiği karışımın büyütülmüş resmi

getirdiği karışım görüntüsünün büyütülmüş resmi görülmektedir [37]. Aynı görüntü optik sistemin önüne konan bir delikle elde edilmiştir. Bu karışım görüntüsünü delikten saçınım olmadan geçen küresel bir taşıyıcı dalga ile deliğin kenarlarından saçılan bir işaret dalgasının karışımından meydana gelen bir hologram olarak yorumlamak mümkündür. Bu düşünce tarzının doğru olduğu Şekil 7.30'da görülmektedir. Burada kullanılan deliğin daire şeklindeki kenarlarının meydana getirdiği işaret hologramın optik sistem ile virtüel holograma dönüştürülmesiyle elde edilmektedir. Şekil 7.31'de bir cisimden saçılan dalganın oluşturduğu Fresnel kırınım görüntüsü görülmektedir [38]. Bu görüntüde cisimden saçınım olmadan geçen bir taşıyıcı dalga ile cisimden saçılan bir işaret dalgasının karışımından meydana gelen bir hologram olarak yorumlanabilir. Şekil 7.32'de hologramın laser ışını ve optik sistem ile virtüel holograma dönüştürülmesiyle elde edilen işaret görülmektedir. Optik sistemin çapı yeterli büyüklükte olmadığı için işaretin bir kısmı süzgeçlenmiştir. Deneyler sırasında, hologramın yeri kaydırılarak işaretin süzgeçlenen kısımları da görünür hale getirilmiştir. Şekil 7.32'de harmonik işaretlerin zayıf olarak oluştuğu görülmektedir. Bunun sebebi hologramın sert bir film üstünde kaydedilmesi dolayısıyla şiddetin ikili düzeyde kuvantalanmasıdır.

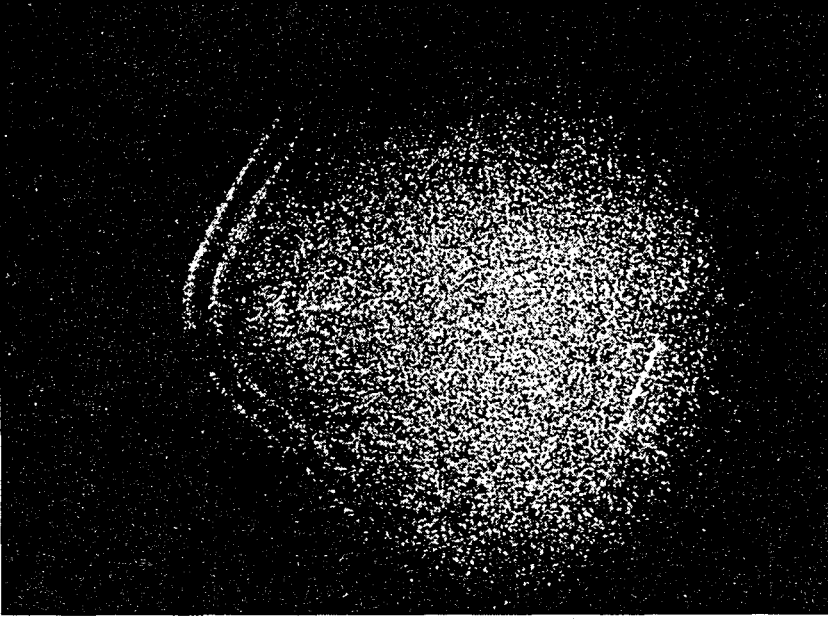
Bu deneylerden elde edilen kayda değer bir sonuç birçok yayında kırınım görüntüsü olarak sergilenen resimlerin hologram olarak yorumlanabilmesidir.



Şekil 7.30 - Hologramdan elde edilen daire şeklindeki işaret



Şekil 7.31 - Bir cisimden saçılan dalganın oluşturduğu Fresnel kırınım görüntüsünün büyütilmiş resmi



Şekil 7.32 - Hologramdan elde edilen işaret

BÖLÜM 8 - SONUÇLAR ÜZERİNE YORUMLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada sayısal ve analog holografinin iletişim, elektronik deteksiyon ve kaydetme ve bilgi işleme konuları ile olan ilişkileri araştırılmış ve belirli yöntemler geliştirilerek teknik uygulamaların kapsamının genişletilmesine ve karşılaşılan problemlerin çözümüne çalışılmıştır.

İlk olarak yeni sayısal ve analog holografi yöntemlerinin geliştirilmesinde faydalı olan, bilgisayar ile hızlı olarak hesaplamaya uygun bir uzaysal modülasyon yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntemde (3.9) bağıntısına göre seçilen hologram açıklıklarının yerleri taşıyıcı dalga ve işaret dalgasının çarpımından meydana gelen dalganın fazının sıfır geçişlerine karşılık olduğu noktalarda bulunmaktadır. Dolayısıyla yöntem bir uzaysal FM modülasyon yöntemidir. Aynı zamanda, uzay-bölmeli-çoğaltım esasına göre nokta işaretler meydana getirilmektedir. Hologram pencere büyüklüğü ve hologram üstündeki açıklık sayısı sonlu olduğundan hologram ile kaydedilen nokta işaret sayısı sınırlıdır. Yöntemin üçüncü bölümde belirtilen belli başlı üstünlükleri basit ve esnek oluşu, işaret noktalarının uzayda gelişigüzel yerlerde seçilebilmesi, işaret noktalarında duyarlı genlik kontrolü, yüksek işaret-gürültü oranı, yöntemin holograma yakın uzayda da geçerliliği ve hologram açıklıklarının yerlerinde yapılan hatalara karşı diğer yöntemlerden

daha az duyarlı oluşu şeklinde özetlenebilir.

Vurgulanması gereken diğer bir husus sayısal hologramların kodlanması için geliştirilen bu yöntem ile alınan sonuçların analog holografide de geçerli olmasıdır. Bunun nedeni tek bir işaret noktası için analog hologramlarda görülen karışım çizgilerinin bu yöntem ile elde edilen karışım çizgileri ile aynı özellikleri göstermesi ve tek bir işaret noktası için geçerli olan sonuçların doğrusalılık özelliği dolayısıyla birçok noktadan meydana gelen işaretler için de geçerli olmasıdır.

Geliştirilen uzaysal modülasyon yönteminin gelecekte daha faydalı olabildiğini sağlayacak üç önemli neden vardır:

- i) Bilgisayarların çalışma hızının devamlı olarak artması ve yöntemin basitliği dolayısıyla bir mini veya mikro bilgisayarının bütün hesaplamaları yapmaya yeterli olmasıdır.
- ii) Geniş kapasiteli yeni hologram kaydetme ortamlarının ve hacim hologramlarının geliştirilmesi ile nokta işaret sayısı sınırının büyük ölçüde arttırılabilmesidir.
- iii) Nokta işaret sayısı sınırının arttırılması için hologram açıklıklarının seçilmesinde istatistik yöntemlerden faydalanılabilmesidir. Böylece, hologram açıklıkları bütün işaret noktalarına en fazla faydalı olabilecek şekilde seçilebilir.

Sayısal bir hologramın geniş kapasiteli olması ve hızlı olarak çizilebilmesi için taramalı elektron mikroskop sistemi üzerinde durulmuştur. Burada elektron resistlerin özelliklerinin

anlaşılması önem kazanmaktadır. Bu nedenle teorik olarak geliştirilen ve deneylerle karşılaştırılan modelden alınan sonuçlar ek bölümde belirtilmiştir. Pozitif resistlerle ilgili sonuçların en önemlileri elektron ışını kullanılmadan önce erime kalınlığının (E.12) denklemine uygun olarak zamanla üssel olarak ve banyo bitim zamanının (E.15) denkleminde belirtildiği gibi yük yoğunluğu ile ters orantılı olarak değişmeleri şeklinde özetlenebilir. Negatif resistlerin en önemli özellikleri ise (E.17), (E.22), (E.23) ve (E.24) bağıntılarıyla ifade edilmiştir. Filmin erimemeye başladığı ve tamamının erimez hale geldiği anlardaki yük yoğunlukları başlangıç elektron enerjisi arttıkça artmakta ve resist film kalınlığı arttıkça azalmaktadır. Film kalınlığı çok ince veya başlangıç elektron enerjisi çok büyük olduğu zaman erimez kalınlığının film kalınlığına oranı yük yoğunluğu ile logaritmik olarak değişmektedir.

Taramalı elektron mikroskop sistemleri tümleşik devre, tümleşik optik ve holografik aygıtların yapılmasında güncellik kazanmıştır. Başarılı sonuçların alınması büyük ölçüde elektron resistlerin iyi kontrol edilmesine bağlıdır. Dolayısıyla elektron resistlerle ilgili olarak düşünülen modelin daha da geliştirilmesi faydalı olacaktır. Yığının etkisinin varlığı daha derin olarak incelenmelidir. Pozitif resistlerde eriyen kalınlığın çeşitli parametrelerle olan değişkenliği üstünde çalışılmalıdır. Aynı zamanda, teorik sonuçlar daha fazla sayıda deneysel verilerle karşılaştırılmalıdır.

Tek işaretli holografi yöntemi ile harmonik işaretlerin etkisiz kılınması amaç edinilmiştir. Bunun için, holograma yeterince yakın bir odak noktasından kaynaklanan küresel bir taşıyıcı dalga kullanarak harmonik işaretler uzayda holograma çok yakın yerlere taşınmış, dolayısıyla kodlama yönteminin bu işaretler için doğruluğu azaltılmış ve yayılmadan ötürü istenen işaretin bulunduğu bölgede harmonik işaretlerin etkisiz kılınması sağlanmıştır. (4.5), (4.11)-(4.18) denklemleri küresel taşıyıcı dalga ile hologramın nasıl kodlandığını göstermektedir. Bu bağıntılar analog hologramının analizi içinde geçerlidir.

Tek işaretli hologramın önemli üstünlükleri harmonik işaretler etkisiz kılındığı için istenen işaretin uzayda çok daha büyük bir bölgeyi kapsıyabilmesi, Fourier dönüşümü kullanıldığında periyodik işaretlerin birbiri üstüne binme probleminin yokedilişi, taşıyıcı dalganın odak noktasında bir nokta engel ile kolaylıkla süzgeçlenebilmesi, ve işaret büyüklüğünün optik sistemin ayarlanmasıyla kontrol edilebilmesi olarak özetlenebilir.

Virtüel holografi yöntemi ile teknik uygulamalarda karşılaşılan problemlerin çoğuna çözüm getirilmeye ve holografinin elektronik ve iletişim sistemleriyle bütünleştirilmesine çalışılmıştır. Virtüel holografi yönteminde iki ayrı hologram mevcuttur. Gerçek hologram fiziksel olarak gerçekleştirilen ve kullanılan teknolojinin gereksinimlerine uygun olarak seçilebilen hologramdır. Dolayısıyla gerçek hologram iletişim teorisindeki kaynak kodlamasının eşleniğidir. Virtüel hologram ise gerçek hologramın optik bir sistem yardımıyla fiziksel bir ortamda kaydedilmeden meydana getirilen imgesidir. Virtüel

hologram taşıyıcı dalga ile istenen işaretin gereksinmelerine uygun olduğundan iletişim teorisindeki kanal kodlamasının eşleniğidir.

Her iki hologramın birbirine dönüşümü bir optik sistem ile sağlanmaktadır. Virtüel hologram bir fiziksel ortamda kaydedilmeden uzayda mevcut olduğu için büyüklüğü, band genişliği ve ilgili diğer parametreleri kolaylıkla kontrol edilebilmekte ve değiştirilebilmektedir.

Gerçel hologram klâsik anlamda bir hologram değildir. Diğer bir deyimle, gerçel hologram optik sistem olmadan taşıyıcı dalga ile aydınlatılırsa, virtüel işaret olarak adlandırılan ve istenen gerçel işaretin dönüştürülmüş şekli olan bir işaret elde edilir. Bu dönüşüm (6.13)-(6.15) denklemleri ile ifade edilmektedir. Dolayısıyla virtüel holografide iki yaklaşım geçerlidir. Birincisi gerçel işareten başlayarak virtüel hologramı meydana getirmek ve daha sonra optik sistem ile virtüel hologramı gerçel holograma dönüştürmektir. Bu yaklaşımın sayısal holografide kullanılması çok uygundur. İkinci yaklaşım ise optik sistem ile gerçel işaretin virtüel işarete dönüştürülmesi ve virtüel işaret ile gerçel hologramın yapılmasıdır. Bu yaklaşım analog virtüel holografinin uygulanmasını kolaylaştırmaktadır. Aynı zamanda, virtüel işaret ile gerçel hologram büyüklükleri aynı seçilerek sayısal holografide konvolüsyon teoreminin kullanılabilmesi sağlanmaktadır.

Virtüel holografi yöntemini genelleştirerek birkaç optik sistem, birkaç virtüel hologram ve birkaç taşıyıcı dalgadan söz etmek mümkündür. Gerçel hologramı aydınlatan dalga gerçel taşıyıcı dalga olarak adlandırılmıştır. Her taşıyıcı dalganın katkısı olan faz

son virtüel hologram üstünde tüm faza eklenmektedir.

İncelenen optik sistemler içinde en uygun sistemin teleskopik sistem olduğu görülmüştür. Bu sistemin özellikleri (5.14)-(5.19), (6.2) ve (6.3)-(6.5) bağıntıları ile ifade edilmiştir. Teleskopik sistem virtüel taşıyıcı dalga gerçel işaret düzleminde odaklanacak şekilde ayarlandığında merceksiz Fourier dönüşümlü hologram düzeni elde edilmektedir.

Virtüel hologram bir ortamda fiziksel olarak kaydedilmediğinden virtüel hologram açıklıkları klâsik anlamdaki hologram açıklıklarından farklı özellikler göstermektedir. Hologram açıklıkları birbirlerini keser duruma geldiklerinde fiziksel olarak kaydedilen bir hologram geçerliliğini yitirmektedir. Fiziksel bir hologramın band genişliğinin sınırlı olmasının esas nedeni budur. Buna karşılık virtüel hologram açıklıklarının birbirlerini keser duruma gelmesi bir sorun olmamaktadır.

Virtüel hologram ve gerçel hologram boyutları (6.21) ve (6.22) bağıntıları ile ifade edildiği şekilde işaret noktalarındaki odaklama duyarlılığı ve gerçel hologramın band genişliği gereksinmelerine göre seçilmektedir. İşaret noktasında istenen büyüklük virtüel hologram boyutlarının alt sınırını belirlediği için gerçel hologramın ve optik sistemin boyutları gerçel hologramın kaydedilmesinde kullanılan teknolojinin band genişliği ve virtüel hologram boyutlarının alt sınırı gereksinmelerini karşılayacak şekilde seçilmelidir.

Hologramın içerdiği bilginin hızlı olarak kaydedilebilmesi ve işlenebilmesi için gereğinden fazla bilinin çıkartılması gerekmektedir. Bunun için virtüel hologram boyutları işaret noktasında

istenen büyüklük ile belirlenen alt sınır olarak seçilebilir. Bu şekilde hem işaret istenen duyarlılıkta elde edilmekte, hem de gerçel ve virtüel hologramlar mümkün olduğu kadar az karışım çizgisinden meydana gelmektedir.

Gerçel hologram az duyarlı aygıtlarla kaydedildiği takdirde, gerçel hologram virtüel hologramdan çok daha büyük seçilmektedir. Buna karşılık, virtüel hologram uzayında gerekli uzaysal frekanslar kaydetme aygıtlarının band genişliğinin altında ise virtüel hologram gerçel hologramdan daha büyük seçilerek işaretin duyarlılığı artırılabilir.

Gerçel hologram uzayı virtüel hologram uzayından çok daha büyük seçildiğinde hacim etkilerinin sağlanması kolaylaşmaktadır. Teleskopik sistemde (5.18) ve (5.19) denklemleri ile belirtildiği şekilde virtüel hologram uzayındaki boyutlar gerçel hologram uzayındaki boyutlara nazaran optik eksene dik yönde $1/F$ kadar, optik eksene paralel yönde $1/F^2$ kadar küçültülmektedir. F büyük bir sayı olarak seçilirse gerçel hologram uzayında bir hacim içinde ayarlamalar az duyarlı olarak yapılabilir. Bu nedenle gerçek zamanda hızlı olarak çalışan elektronik ve elektrooptik sistemlerin hacim hologramları yapılmasında ve optik bilgi işleme gayesi ile kullanılması kolaylaşmaktadır.

Gerçel hologram virtüel hologramdan daha büyük seçildiğinde (6.13)-(6.15) denklemlerinden görüldüğü gibi virtüel işaret uzayda gerçel işarete nazaran sıkıştırılmaktadır. İşaret dalgasının propagasyon yönü taşıyıcı dalgaının propagasyon yönünden farklı seçilerek taşıyıcı dalgaının ve gürültünün büyük bir kısmının süzgeçlenebilmesi bu sayede mümkün olmaktadır.

Virtüel hologram virtüel holograma yakın bir noktadan kaynaklanan küresel bir taşıyıcı dalga ile kodlandığında tek işaretli holografi yönteminin geçerliliği deneysel olarak kanıtlanmıştır. Bu şekilde eşlenik ve harmonik işaretler etkisiz kılınmakta ve uzayda yalnız istenen işaret bulundurulmaktadır.

İnsan gözünün etkin mercek büyüklüğü 2 mm mertebesinde olduğundan bu büyüklükte bir hologram da mümkün olduğu kadar fazla bilgi olması arzu edilmektedir. Buna karşılık hologram yapmakta kullanılan film ve aygıtlar genellikle bu boyuttan çok daha büyüktür. Gerçek hologramın boyutları sözü edilen film veya aygıtların büyüklüğüne göre, virtüel hologramın boyutları ise gözün özelliklerine göre seçilerek hologram bilgi kapasitesini klâsik holografidekinden çok daha etkin olarak kullanmak mümkün olmaktadır.

Hologramın yapılması ve hologramın aydınlatılması arasında yapılan taşıyıcı dalga ve hologram büyüklüğü değişiklikleri optik eksene dik ve paralel yönde olan büyüme oranlarının çok farklı olması dolayısıyla işaretin önemli distorsiyonlara uğramasına neden olmaktadır. Virtüel holografide bu probleme iki şekilde çözüm getirmek mümkündür. Birincisi, taşıyıcı dalganın dalgaboyu ve hologram büyüklüğü aynı oranda değiştirildiğinde sözü edilen distorsiyon olmadığı için, gerçek hologram büyüklüğünü istenildiği gibi, virtüel hologram büyüklüğünü ise dalgaboyu değişikliğine göre seçmektir. İkinci çözüm yolu ise virtüel hologram büyüklüğü için bir sınırlama getirilmeden küresel virtüel taşıyıcı dalganın odak noktası koordinatlarının (6.32)-(6.38) denklemlerine göre seçilmesidir.

Hologramın yapılması ve hologramın aydınlatılması değişik dalgaboylu taşıyıcı dalgalar ile yapıldığında bütün işlemlerin hızlı olarak, örneğin gerçek zamanda yapılabilmesi virtüel holografi ile mümkün olmaktadır. Bunun için gerçel hologram birinci dalgaboyu olan taşıyıcı dalga ve işaret dalgasına uygun olarak ve ikinci dalgaboyu olan taşıyıcı dalga ile aydınlatılabilecek şekilde yapılmalıdır. Virtüel hologram ise ikinci dalgaboyu olan taşıyıcı dalgaya uygun olarak seçilmelidir. Bu durumda optik sistem birinci dalga-boyundan ikinci dalgaboyuna dönüşümü sağlamaktadır.

Radar, sonar, bilgisayar bellekleri, sismik çalışmalar, biyomedikal veriler, üç boyutlu resim, faksimile, üç boyutlu televizyon gibi büyük bilgi miktarlarını içeren işaretlerin virtüel holografi ile etkin ve hızlı olarak iletimi mümkün gözükmektedir. Hızlılık band genişliğinin ve gereğinden fazla bilinin virtüel holografi ile azaltılması ile mümkün olmaktadır. Vericide işaretin kodlanması, alıcıda kod çözülmesi benzer iki virtüel holografi sistemiyle yapılmaktadır. Tüm sistemin gerçekleştirilmesi mümkün gözüken üstünlükleri iletişim kanallarındaki gürültüye az duyarlılık, hızlı iletişim ve bilgi işleme, üç boyutlu işaretlerin kolaylıkla iletilebilmesi, hem analog hem de sayısal iletişim olanağı, optik sistem ile Fourier dönüşümü ve optik süzgeçleme gibi işlemlerin gerçek zamanda yapılabilmesi ve sistemin hızlı olarak uyarlanabilmesi, akustik ve mikrodalga ile kaydedilen işaretlerin ara işlemleri olmadan görülebilen ışıık dalgası ile elde edilebilmesi şeklinde özetlenebilir.

Geliştirilen yöntemlerin çeşitli uygulamalarda başarıyla kullanılabilmesi için yapılması gereken önemli çalışmaların bir kısmı şöyle sıralanabilir:

- i) Uzaysal FM modülasyon yönteminin istatistik yöntemlerden faydalanarak geliştirilmesi faydalı olacaktır.
- ii) Tek işaretli holografi yönteminin analog holografide uygulaması üstünde çalışılmalıdır.
- iii) Virtüel holografi, iletişim teorisi, optik, elektronik ve elektrooptik sistemlerin ilişkisi üstünde uygulamaya dönük çalışmalar yapılmalıdır.
- iv) Çeşitli incelemelerde kullanılan optik sistemin yalnız kırınım olayı ile sınırlı olduğu varsayılmıştır. Optik elemanlarda mevcut aberasyonlar işaret-gürültü oranını azaltan bir etkidir. Dolayısıyla uygulamada gerekli optik sistemin meydana getirilmesi için çeşitli aberasyonlardan arındırılmış optik elemanların kullanılması faydalı olacaktır.

EK 1 - REFERANSLAR

- [1] D. Gabor, *Nature*, 161, 1948, s. 777.
- [2] B.W.Vatz, "Specification and Error Budgeting of Optical Signal Processors", BMDATC-R Raporu, Nisan 1977.
- [3] J.T. Tippett, et.al., *Optical and Electrooptical Information Processing*, MIT Press, Cambridge, Mass., 1965.
- [4] E.N. Leith, J. Upatnieks, *J. Opt. Soc. Am.*, 52, 1962, s. 1123.
- [5] L.J. Cutrano, et.al., *Proc.IEEE*, 54, 1966, s.1026.
- [6] I.M. Firth, *Holography and Computer Generated Holograms*, Mills and Boon Limited, 1972.
- [7] E. Camatini, *Optical and Acoustical Holography*, Plenum Press, 1972.
- [8] R.M. Gagliardi, S. Karp, *Optical Communications*, J. Wiley, 1976.
- [9] S.G. Lipson, H. Lipson, *Optical Physics*, Cambridge University Press, 1969.
- [10] J.W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics*, McGraw Hill, 1968.
- [11] M. Born, E. Wolf, *Principles of Optics*, Pergamon Press, 1959.
- [12] F.T.S. Yu, *Introduction to Diffraction, Information Processing and Holography*, MIT Press, 1973.
- [13] S. Schwartz, *Integrated Circuit Technology*, McGraw Hill, 1967.
- [14] R.D. Heidenreich, L.F. Thompson, E.D. Feit, C.M. Melliar-Smith, *J. Appl. Phys.*, 44, 1973, s.4039.
- [15] M. Hatzakis, *J. Electrochemical Soc.*, 116, 1969, s.1033.
- [16] R.J. Collier, C.B. Burckhardt, L.H. Lin, *Optical Holography*, Academic Press, 1971.
- [17] J.W. Cooley, J.W. Tukey, *Math. Comput.*, 19, 1965, s.297.
- [18] A. Kozma, D.L. Kelly, *Appl. Opt.*, 4, 1965, s.387.

- [19] A.W. Lohmann, D.P. Paris, *Appl.Opt.*, 9, 1970, s.639.
- [20] L.B. Lesem, P.M. Hirsch, J.A. Jordan, *IBM J.Res.Develop.*, 13, 1969, s.150.
- [21] W.H. Lee, *Appl.Opt.*, 9, 1970, s.6.
- [22] C.B. Burckhardt, *Appl.Opt.*, 9, 1970, s.1949.
- [23] D.C. Chu, J.R. Fienup, J.W. Goodman, *Appl.Opt.*, 12, 1973, s.1386.
- [24] A. Gerrard, J.M. Burch, *Introduction to Matrix Methods in Optics*, J.Wiley, 1975.
- [25] G.W. Stroke, *An Introduction to Coherent Optics and Holography*, Academic Press, 1969.
- [26] A. Yariv, *Quantum Electronics*, J. Wiley, 1967.
- [27] H.J. Caulfield, S. Lu, *The Applications of Holography*, Wiley-Interscience, 1970.
- [28] M. Veda, K. Layasu, *Optik*, 42, 1975, s.107.
- [29] L.B. Lesem, P.M. Hirsch, J.A. Jordan, IBM Rapor No. 320-2371, Ekim 1969.
- [30] J.A. Jordan, P.M. Hirsch, L.B. Lesem, D.L. Van Rooy, IBM Rapor No. 320-2351, Ekim 1968.
- [31] W.H. Lee, *J.Opt. Soc. Am.*, 65, 1975, s. 518.
- [32] K. Nagashima, T. Asakura, *Optical Communications*, 17, 1976, s.273.
- [33] T. Yotagai, *Appl. Opt.*, 15, 1976, s.2722.
- [34] W.E. Kock, *Engineering Applications of Lasers and Holography*, Plenum Press, 1975.
- [35] A.L. Boyer, IBM Rapor No. 320-2402, Mayıs 1971.
- [36] N.H. Farhat, *Advances in Holography*, V.1, Marcel Dekker Inc., 1975.
- [37] L.P. Boivin, *Appl. Opt.*, 14, 1975, s.2002.
- [38] G. Wright, *Elementary Experiments with Lasers*, Wykeham Publications Ltd., 1973.
- [39] O. Ersoy, "Electron and Ion Beam Science and Technology", Seventh International Conference, 1976, s. 240.

- [40] T.E. Everhart, P.H. Hoff. J. Appl. Phys., 42, 1971, s.5837.
- [41] W. Ehrenberg, D.E.N. King, Proc. Phys. Soc., 81, 1963, s.751.
- [42] M. Hatsakis, A.N. Broers, 11th Symposium on Electron, Ion and Laser Beam Technology, 1971, s.337.
- [43] B. Broyde, BSTJ, 1970, s. 2095.
- [44] N. Atoda, K. Kanaya, B. Electrotechnical Lab., 33, 1969, s.1297.
- [45] P.J. Flory, J. Phys. Chem., 46, 1942, s.132.

EK 2 - ELEKTRON IŞINI İLE POZİTİF VE NEGATİF RESİSTLERİN ETKİNMESİ

Aşağıda elektron ışını ile pozitif ve negatif resistlerin etkinmesi olayını açıklamak için geliştirilen modelin özeti sunulmaktadır. Bu çalışmayla ilgili daha ayrıntılı bilgiler Referans [39] da bulunabilir.

E.1 Giriş

Son zamanlarda pozitif ve negatif resistlerin elektron ışınıyla etkinmesi olayı elektronik, optik ve holografik aygıtların geliştirilmesinde önem kazanmıştır. Bu nedenle resistlerin özellikleri, elektron ışınının parametreleri ve developman teknikleri arasındaki bağıntıların anlaşılması gerekmektedir.

Binlerce kimyevi bağdan meydana gelen uzun zincirli polimerlerde radyasyonun iki etkisi vardır. Birincisi karşılıklı eklenme (cross-linking) adı verilen moleküllerin birbirine eklenerek molekül ağırlığının artması olayıdır. İkinci etki birinci etkinin tersine moleküllerin daha küçük moleküllere parçalanmasıdır. Birinci etki üstün geldiğinde negatif resist, ikinci etki üstün geldiğinde ise pozitif resist meydana gelmektedir. Pozitif resistlerde etkinen bölgeler film banyo edilirken erimekte, negatif resistlerde ise etkinmeyen bölgeler erimektedir.

Elektronların madde içindeki karakteristikleri ancak son zamanlarda anlaşılmaya başlanmıştır [14], [40], [41]. Elektronların moleküllerle çarpışarak yayılması sonucu meydana gelen enerji kaybı ampirik olarak şu şekilde ifade edilmektedir [40]:

$$\frac{dE}{dz} = - \frac{E_0}{R_G} \Lambda(f) \quad (E.1)$$

Burada E_0 elektronların keV biriminde başlangıç enerjisi, z elektronların propagasyonu yönündeki koordinatı, $\Lambda(f)$

$$\Lambda(f) = 0.74 + 4.7f - 8.9f^2 + 3.5f^3 \quad (E.2)$$

$$f = z/R_G \quad (E.3)$$

ifadeleriyle belirlenen derinlik-doz (depth-dose) fonksiyonu ve R_G

$$R_G = \frac{0.046}{\delta} E_0^{1.75} \quad (E.4)$$

ifadeleriyle belirlenen Grun uzaklığıdır. δ maddenin g/cm^3 biriminde düşünülen yoğunluğudur.

E.2 Pozitif Resistler

Negatif resistlerde filmin banyo edilmesinden sonra görülen şişme ve küçülme olayı pozitif resistlerde görülmemektedir. Dolayısıyla pozitif resistler ile istenilen ölçülerde ve keskin kenarlı imgelerin (image) elde edilmesi daha kolaydır.

Pozitif resistler ile ilgili deneysel olarak şu gözlemler yapılmıştır:

1. İnce resist filmlerin banyo edilerek erimesi doyma olayına tabidir. Diğer bir deyişle, filmin solübilitesi film incel-dikçe azalmaktadır [42]. Bu olayın filmin başlangıç kalın-lığıyla değişkenlik gösterdiği görülmüştür.
2. Solübilite elektron akımı arttırıldıkça artmakta ve resistin duyarlılığı başlangıç elektron enerjisi E_0 arttıkça azalmak-tadır.

Geliştirilen model bu gerçeklere göre düşünülmüş ve Şekil E.1'de gösterilmiştir. Pozitif resistlerde elektron ışınının ana etkisi moleküllerin parçalanması ile solübilitenin arttı-rılmasıdır. Düşünülen modelde t_m zamanı içinde eriyen Δ kalınlığı

$$\Delta = t_m \int_{(m-1)\Delta}^{d_t} K(z) dz \quad (E.5)$$

şeklinde yazılmaktadır. Burada d_t resistin kalınlığı, $K(z)$ ise elektronların enerjisi ile ilgili bir fonksiyondur. Bu fonksiyonun elektronların enerji kaybıyla orantılı olarak arttığı varsayılırsa,

$$K(z) = K_1(z) \frac{QE_0}{R_G} \Lambda(f) + K_2(z) \quad (E.6)$$

ifadesi elde edilir. Burada Q elektronların coulomb/cm² biriminde yük yoğunluğudur ve

$$Q = It_e/A \quad (E.7)$$

ifadesi ile belirlenir. I amper cinsinden elektronların akım şiddeti, t_e saniye olarak etkinme süresi, A cm² olarak elektron ışınının alanıdır. n sayısı kadar Δ kalınlığı olduğu varsayıldığı için tüm eriyen kalınlık d

$$d = nt_n \frac{\int_0^t K(z) dz}{(n-1)\Delta} \quad (E.8)$$

şeklinde yazılabilir. Bütün Δ kalınlıkları eşit seçildiğinden, (E.5) denklemini kullanarak

$$\frac{t_m}{t_n} = \frac{\int_0^t K(z) dz}{\int_0^t K(z) dz} \frac{d}{(n-1)\Delta} \quad (E.9)$$

ifadesi elde edilir. Dolayısıyla filmin banyo edilme zamanı t

$$t = t_n \left[\frac{1}{\int_0^t K(z) dz} + \frac{1}{\int_0^t K(z) dz} + \dots + \frac{1}{\int_0^t K(z) dz} \right] \frac{d}{(n-1)\Delta} \quad (E.10)$$

olarak yazılabilir. Δ kalınlığı sıfıra, n sayısı sonsuza yaklaştırılırsa, bu eşitlik

$$t = \int_0^d \frac{dx}{\int_x K(z) dz} \quad (E.11)$$

şeklini alır. (E.11) denklemi eriyen kalınlık d, etkinme süresi t, yük yoğunluğu Q, başlangıç elektron enerjisi E_0

ve film kalınlığı d_t arasındaki bağıntıyı gösteren genel bir ifadedir.

$K_1(z)$ ve $K_2(z)$ fonksiyonlarını bilmeden (E.11) denkleminin çözülmesi olanaksızdır. Elektron ışını kullanılmazsa, $K_1(z)$ sıfır olur. $K_2(z)$ değişmez olarak seçilirse, (E.11) denkleminin

$$\frac{d}{dt} = 1 - e^{-t/K_2} \quad (E.12)$$

sonucu elde edilir. Bu denklem Hatzakis'in polymethylmethacrylate ile elde ettiği deneysel verilerle karşılaştırılmıştır [42]. En ufak kareler yöntemi ve Gauss-Newton iterasyonları kullanarak, K_2 parametresinin en uygun değeri bulunmuştur. Elde edilen sonuç Şekil E.2'de gösterilmiştir. (E.12) denkleminin deneysel verilere çok iyi uyduğu bu şekilde gözlenebilir.

Elektron ışını ile birlikte $K_1(z)$ fonksiyonunun ne şekilde seçilebileceği üstünde yapılan çalışma [39] numaralı referansta bulunabilir. Elektron ışını yeterince kuvvetli olduğu zaman, $K_1(z)QE_0\Lambda(z)/R_G \gg K_2$ olduğu varsayılabilir. Bu durumda, (E.11) denklemi

$$\frac{tQE_0}{R_G} = f(d, d_t, R_G) \quad (E.13)$$

$$f(d, d_t, R_G) = \int_0^d \frac{dx}{\int_t^{\infty} K_1(z) dz} \quad (E.14)$$

şeklinde yazılabilir. (E.13) denkleminde filmin erime zamanı t_c

$$t_c = \frac{R_G}{QE_0} f(d_t, d_t, R_G) \quad (E.15)$$

olarak yazılabilir. Bu denklemden filmin erime zamanı t_c 'nin akım yoğunluğu Q ile ters orantılı olduğu görülmektedir. Deneysel verilerle yapılan karşılaştırma Şekil E.3'de gösterilmiştir. (E.11) denklemi, aynı zamanda, $K_1(z)QE_0\Lambda(z)/R_G \ll K_2(z)$ olduğu zaman elektron ışıının etkisi olmayacağını göstermektedir.

E.3 Negatif Resistler

Çeşitli negatif resistlerin üretimi pozitif resistlerden daha kolay olduğu için özellikleri daha iyi bilinmektedir. Negatif resistlerde aşağıdaki deneysel bulgular görülmüştür [14], [43], [44], [45]:

1. Negatif elektron resistleri belirli bir yük yoğunluğu Q_s 'den daha az yük yoğunluğu kullanıldığında hiçbir değişiklik göstermemektedir.
2. Yük yoğunluğu Q Q_s değerinin üstünde arttırıldıkça erimeyen resist kalınlığı doyma özelliği göstererek artmaktadır. Diğer bir deyişle, yük yoğunluğu Q arttırıldıkça, erimeyen kalınlık d 'nin artışı d resist kalınlığı d_t 'ye yaklaştıkça azalmaktadır. Belirli bir yük yoğunluğu Q_e 'de en büyük d kalınlığı elde edilmektedir.

3. Başlangıç elektron enerjisi E_0 arttırıldıkça resistin duyarlılığı azalmakta, hem Q_s hem de Q_e yük yoğunlukları artmakta, d kalınlığının Q yükü arttırıldıkça doyuma uğrayışı daha belirli bir şekil almakta ve dolayısıyla tezat fonksiyonu olarak adlandırılan $r \equiv Q_s/Q_e$ azalmaktadır.
4. Resist kalınlığı d_t 'nin arttırılışı ile başlangıç elektron enerjisi E_0 'nun arttırılışı benzer neticeler vermektedir.
5. Negatif resist filminin banyo edilmesi resistin ilk önce şişmesine, daha sonra küçülmesine neden olduğundan en büyük d kalınlığı genellikle resist kalınlığı d_t 'den daha azdır.

Yukarıda belirtilen deneysel verilerin kuramsal olarak açıklanması zor olmuştur [43],[44], [14]. Heidenreich ve arkadaşları [14] karşılıklı eklenen moleküllerin sayısının elektronların enerji kaybına orantılı olduğunu ve bu sayının z derinliğindeki çok ince bir resist kalınlığının erimez duruma gelmesi için belirli bir değere eşit olması gerektiğini varsayımlamışlardır. Bu durumda,

$$\frac{QE_0}{R_G} \Lambda(z) = C \quad (E.16)$$

denklemi elde edilir. Burada C değişmez bir sayıdır. Resist kalınlığı d_t $0.328R_G$ sayısından daha küçük ise, Q_s ve Q_e yük yoğunlukları ile r tezat fonksiyonu

$$Q_s = \frac{R_G}{E_o} \frac{C}{\Lambda(d_t)} \quad (E.17)$$

$$Q_e = \frac{R_G}{E_o} \frac{C}{0.74} \quad (E.18)$$

$$r = \frac{0.74}{\Lambda(d_t)} \quad (E.19)$$

olarak yazılabilir. Resist kalınlığı d_t $0.328 R_G$ sayısından daha büyük ise

$$Q'_s = \frac{R_G}{E_o} \frac{C}{\Lambda(0.328 R_G)} \quad (E.20)$$

olarak ifade edilen Q'_s yük yoğunluğunda ($d_t - 0.328 R_G$) kalınlığının tamamının bir anda erimez duruma geldiği varsayılmaktadır.

Yukarıdaki denklemler deneysel verilere bir miktar uyuyorsa da üç önemli eksiklik dikkati çekmektedir. Birincisi (E.16) denkleminde elde edilen d kalınlığının Q yük yoğunluğu ile değişimini gösteren eğri deneysel olarak elde edilen eğriden çok daha diktir. İkincisi (E.19) denklemini ile belirlenen tezat fonksiyonu ölçülen değerinden çok daha büyüktür. Üçüncüsü Q_e yük yoğunluğunun resist kalınlığı d_t azaldıkça arttığının görülmesine karşılık, (E.18) denklemini ile ifade edilen Q_e d_t ile değişmemektedir.

Yukarıda belirtilen uyumsuzluklar pozitif resistlerde de varsayıldığı gibi bir yığın etkisinin olasılığını işaret etmektedir. Yukarıdaki verilere uygun olarak şu varsayımlar yapılacaktır:

1. Moleküllerin sayısı arttıkça erimezliğe neden olan karşılıklı eklenmeler arttığı için z derinliğinde meydana gelen çok ince bir erimez kalınlık Δd moleküllerin sayısına orantılıdır.
2. Δd kalınlığı aynı zamanda elektronların z derinliğinde kaybettiği enerji miktarına orantılıdır.
3. Karşılıklı eklenmeler arttıkça yeni karşılıklı eklenmelerin olması zorlaştığından ve birim hacimdeki ortalama karşılıklı eklenme sayısı elektronların birim hacimde kaybettiği ortalama enerjiye orantılı varsayılabileceği için, Δd kalınlığı bu ortalama enerji kaybına ters orantılıdır.

Yukarıdaki varsayımları kullanarak Δd kalınlığı

$$\Delta d \propto \frac{\Lambda(d_t - d)\Delta Q}{d_t^2 \int_0^Q \Lambda(z)dz} \quad (E.21)$$

olarak yazılabilir. Bu denklemin integrali alınırsa,

$$y(t) = A \log Q - B \quad (E.22)$$

$$y(t) = \frac{1}{d_t^2} \int_0^{d_t} \Lambda(z)dz \int_{d_t-d}^{d_t} dz/\Lambda(z) \quad (E.23)$$

neticesi elde edilir. Burada A ve B değişmez sayılardır.

(E.22) ve (E.23) denklemleri en ufak kareler yöntemi kul-

lanarak deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Şekil

E.4 ve E.5'de görülen sonuçlar başarılı bir uyum sağlandığını göstermektedir.

Dikkate değer olan bir husus $d_t \rightarrow 0$ veya $E_0 \rightarrow \infty$ sınırında (E.22) denkleminin

$$\frac{t}{d_t} = A \log Q - B \quad (E.24)$$

şeklini aldığıdır.

Şekil E.4'den elde edilen KTFR resisti için Q_s başlangıç yük değerleri Şekil E.6'da (E.17) denklemi ile karşılaştırılmalı olarak gösterilmiştir. Bu denklemin yeterliliği kabul edilirse, B sayısı

$$B = A \log \frac{R_G}{E_0} \frac{C}{\Lambda(d_t)} \quad (E.25)$$

olarak yazılabilir.

E.4 Sonuçlar

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar pozitif ve negatif resistlerde bir yığın etkisinin söz konusu olduğunu göstermektedir.

Pozitif resistler ile ilgili sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

1. Pozitif resistler elektron ışını kullanılmadan banyo edildikleri zaman (E.12) denklemine uygun olarak erime özelliği göstermektedirler. Resistin solubilitesi banyo için kullanılan eriyiğin yoğunluğu arttırıldıkça artmaktadır.
2. Elektron ışını resistin solubilitesini (E.11) denkleminde görüldüğü şekilde arttırmaktır. Elektron ışını ile etkilenen

ve etkinmeyen kısımlar aynı anda banyo edildiği için en fazla profil derinliğinin görüldüğü bir zaman olmalıdır. Bu zamandan sonra banyo devam ederse derinlik azalmaktadır.

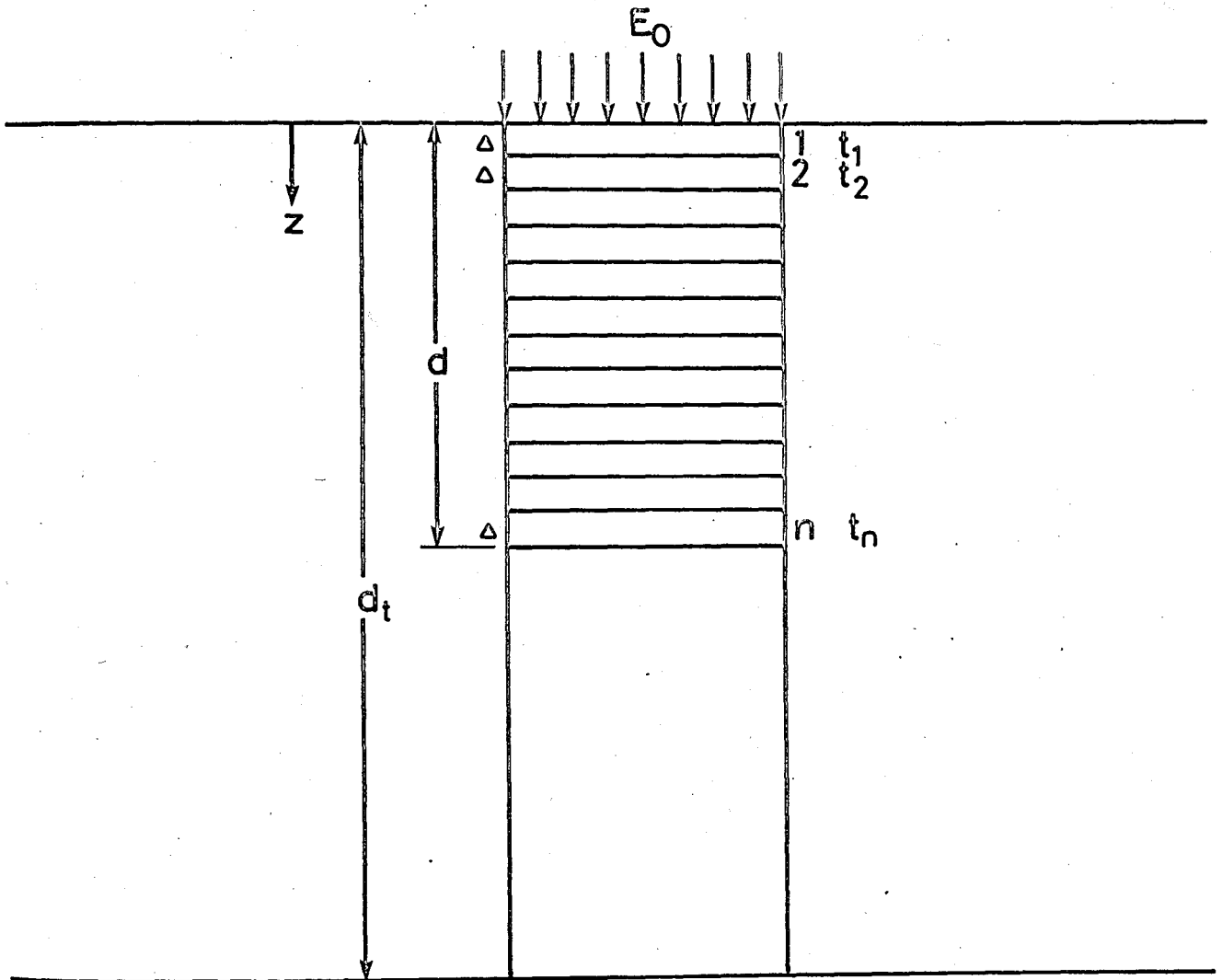
3. Banyo bitim zamanı (E.15) denkleminde belirtildiği şekilde yük yoğunluğu ile ters orantılı olarak değişmektedir.

Negatif resistler ile ilgili sonuçlar da şu şekilde özetlenebilir:

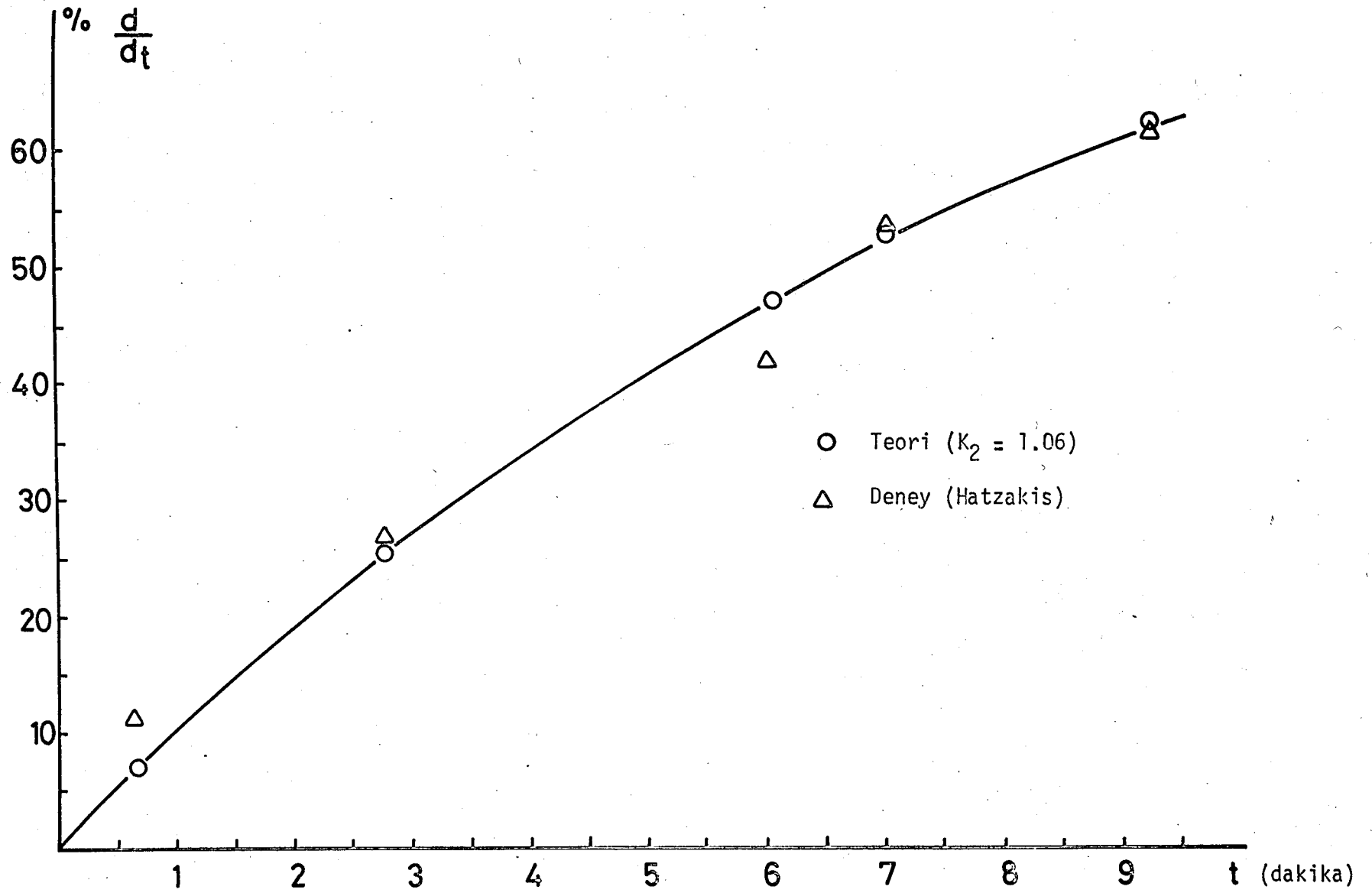
1. Negatif resistin erimemeye başladığı andaki yük yoğunluğu Q_s (E.17) denkleminde belirtildiği şekilde başlangıç elektron enerjisi E_0 arttıkça artmakta ve resist film kalınlığı d_t arttıkça azalmaktadır.
2. Erimez kalınlık d ile yük yoğunluğu Q arasındaki bağıntı (E.22) ve (E.23) denklemleri ile ifade edilmiştir. Film kalınlığının tamamının erimez hale gelmesi için gerekli yük yoğunluğu Q_e başlangıç elektron enerjisi E_0 arttıkça artmakta ve film kalınlığı d_t arttıkça azalmaktadır.
3. Film kalınlığı d_t çok ince veya başlangıç elektron enerjisi E_0 çok büyük olduğu zaman d/d_t oranı yük yoğunluğu Q ile (E.24) denkleminde belirtildiği gibi logaritmik olarak değişmektedir.

QE_0/R_G veya $Q/E_0^{0.75}$ sayısı pozitif ve negatif resistler için önemli bir parametre olarak düşünülebilir. Resistin duyarlılığı büyük ölçüde bu parametreye bağlıdır. Dolayısıyla, Q yük yoğunluğunun arttırılması veya E_0 başlangıç elektron enerjisinin azaltılması benzer sonuçlar vermektedir.

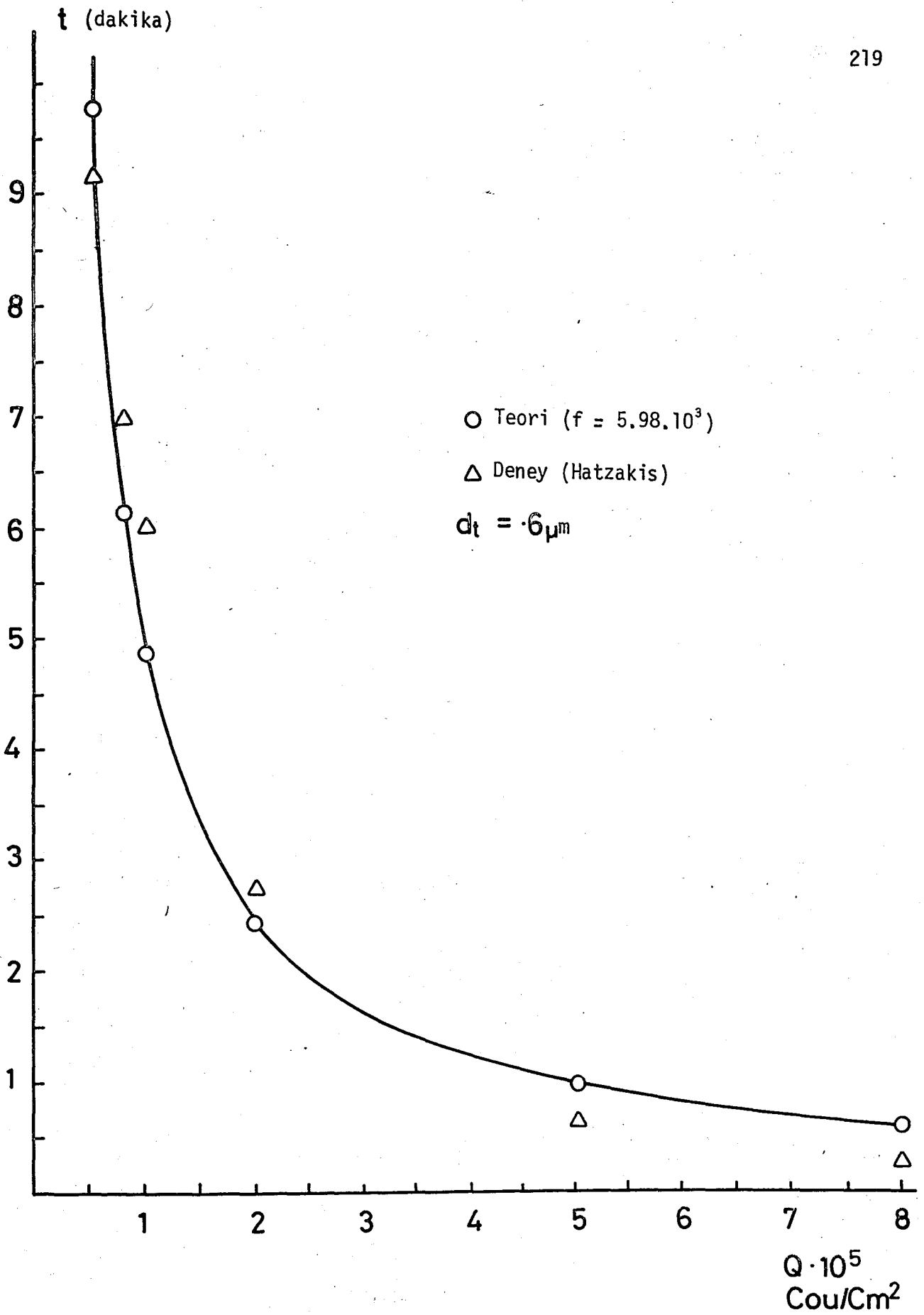
- t : banyo bitiş zamanı = $\sum_{i=1}^n t_i$
 : t_i zamanı içinde eriyen kalınlık
 E_0 : başlangıç elektron enerjisi
 d_t : film kalınlığı
 d : eriyen kalınlık



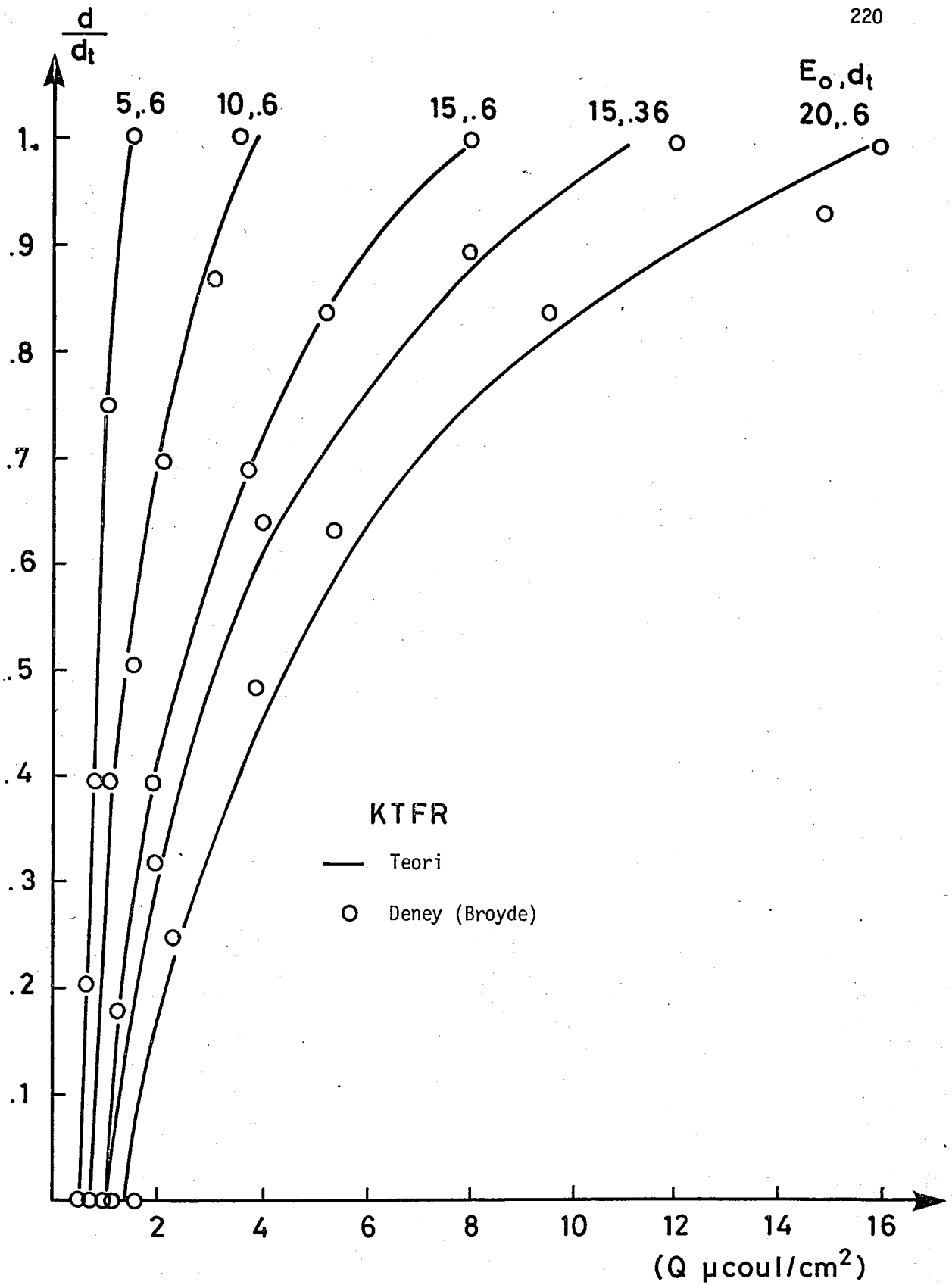
Şekil E.1 - Pozitif resistler için düşünülen model



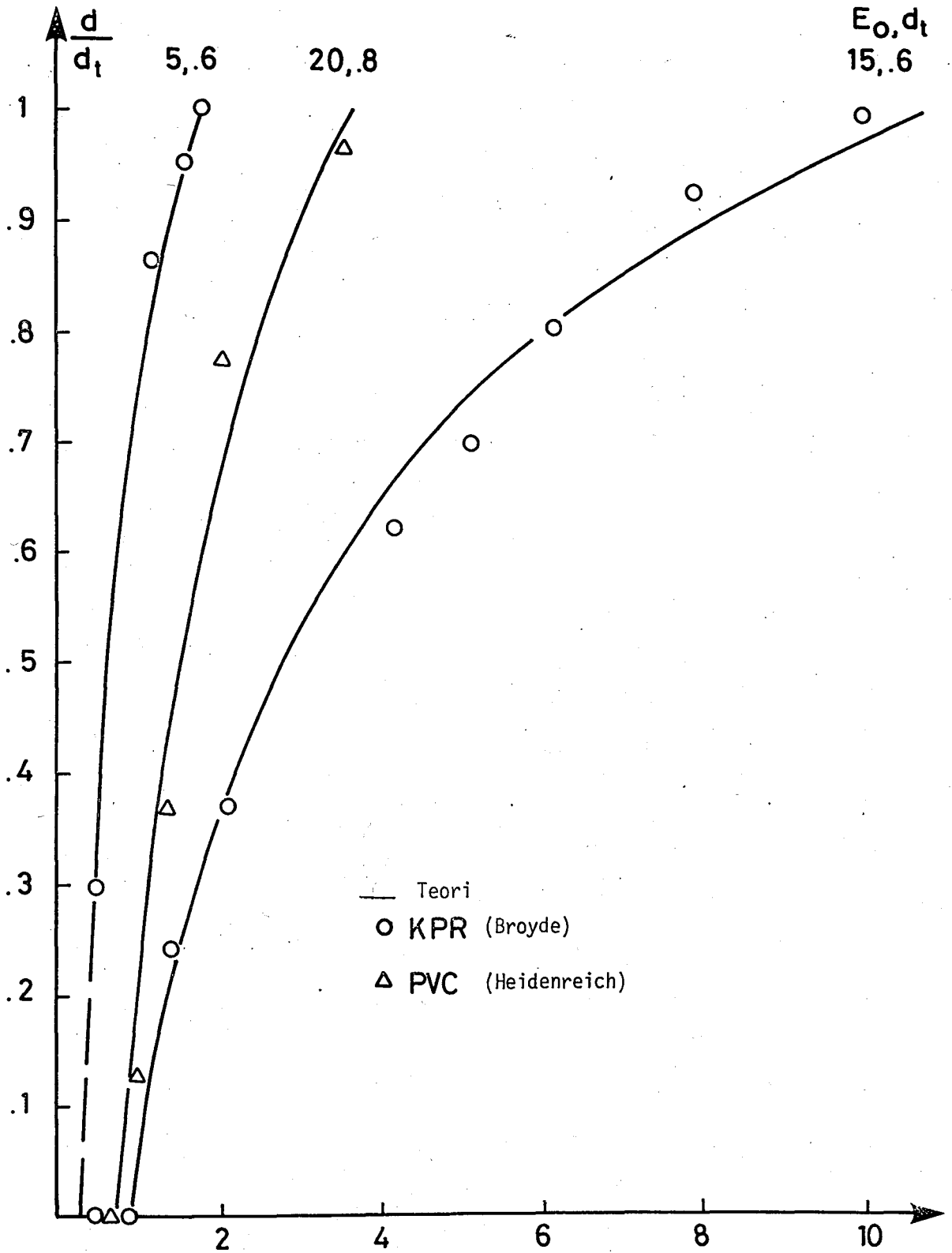
Şekil E.2 - Polymethylmethacrylate resist filminin elektron ışını kullanmadan banyo edilişi



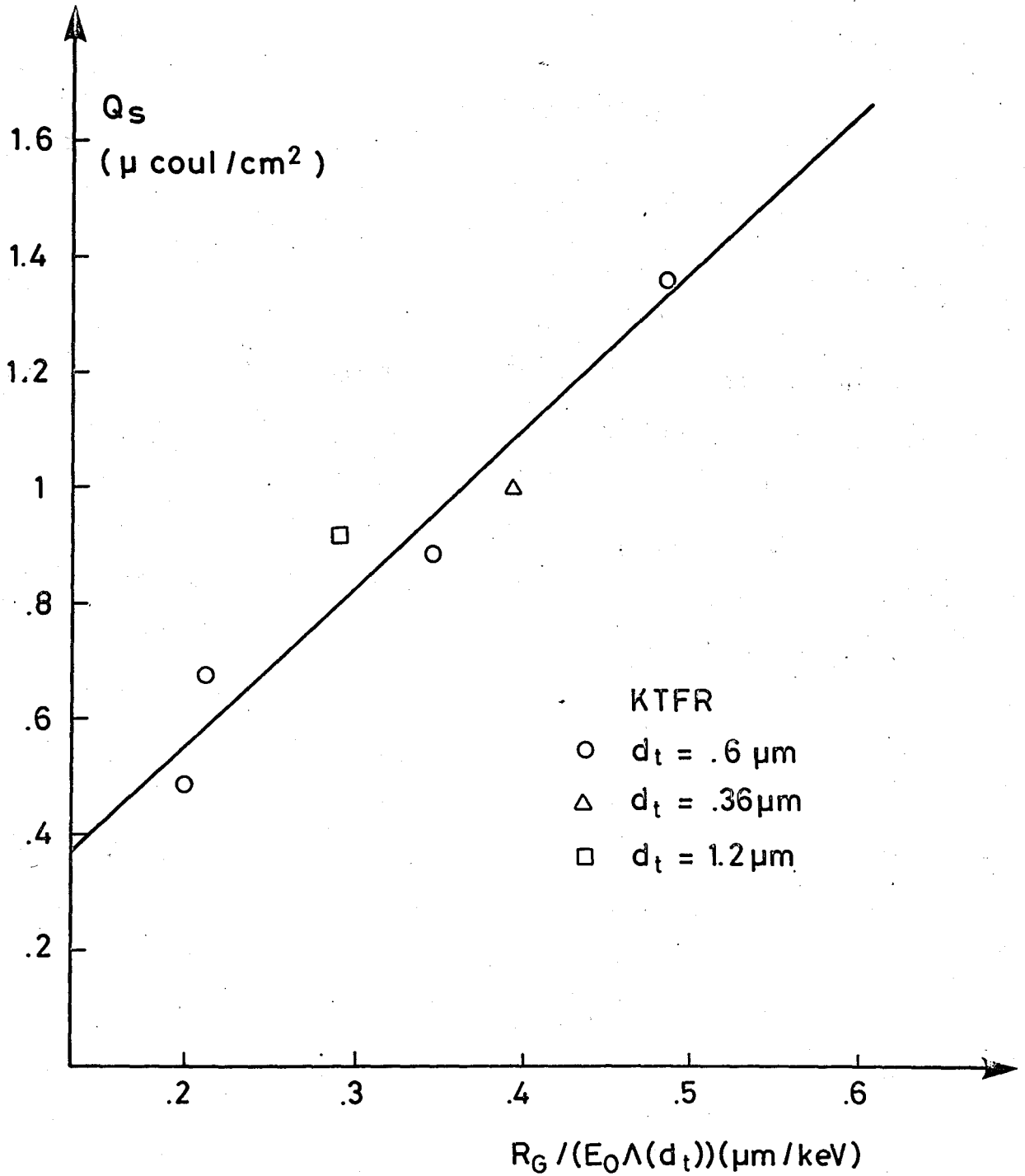
Şekil E.3 - Polymethylmethacrylate resist filminde banyo bitiş zamanının yük yoğunluğu ile değişimi



Şekil E.4 - 5, 10, 15 ve 20 keV elektron ışınları ile kalınlığı 0.6 ve 0.36 μm olan KTFR resist filmlerinin etkinmesi



Şekil E.5 - 5 ve 15 keV elektron ışınları ile kalınlığı 6 μm olan KPR resist filminin etkinmesi



Şekil E.6 - Çeşitli kalınlıktaki KTFR resist filmleri için başlangıç yük yoğunluğunun elektronların enerji kaybı ile değişimi

EK 3 - BİLGİSAYAR PROGRAMLARI

Aşağıda üçüncü ve dördüncü bölümlerde geliştirilen kodlama yöntemi ile hologramın hesaplanması için gerekli programların listesi verilmiştir. Ana program NEFRON olarak adlandırılmıştır. Düzlem bir taşıyıcı dalga için GEN altprogramı, küresel bir taşıyıcı dalga için GENS ve FIKS altprogramları kullanılmaktadır. INPUT altprogramı işaret noktalarının koordinatlarının belirtilmesi için yazılmıştır. TNEF altprogramı hologramın Textronix 4014 grafik aygıtı ile çizilmesini sağlamaktadır. RANDI altprogramı rassal sayıları meydana getirmektedir.

```

C NEFRON
C PARAMETERS
C ID=APERTURE SIZE      NLA<0 MEANS FO<0   NLA>0 MEANS FO>0
C NPT>0 WITH LENS      <0 WITHOUT LENS   NHH=NO OF HOLOGRAMS
C MR1 AN ODD NUMBER FOR RANDI  MR=REDUCTION (<0 IF MAGNIFICATION)
C FC=FOCAL LENGTH      TES=TOLERANCE      IDS=HOLO SIZE   KMX=MAX. ITER.
C DIMENSION XX(200),YY(200),ZZ(200),XH(40),YH(40).
* IXS(2),IYS(2),NP(200)
CALL OPEN('L-P ',5.0)
CALL OPEN('DATA ',3.0)
NHH=1
CALL SETDS(3.4095,1.1)
NR1=5097
WLI=1.2656
DO 600 JK=1,NHH
XH(JK)=0.
YH(JK)=0.
CALL INPUT(XX,YY,ZZ,NP,NN,JK)
WRITE(1,25)
25  FORMAT(10X,'INPUT NLA (FOR FO),NPT (LENS?),',
* KMX (MAX ITER),TES (TOLERANCE)',/)
INPUT(1) NLA,NPT,KMX,TES
WRITE(1,16)
16  FORMAT(10X,'IDS (HOLO SIZE), MR (REDUCTION)',/)
INPUT(1) IDS,MR
WRITE(1,20)
20  FORMAT(10X,'FOCAL LENGTH',/)
INPUT(1) FC
WRITE(5,45) FC
WRITE(5,15) ID,NLA,NPT,IDS,KMX,MR,TES
WRITE(1,39)
39  FORMAT(10X,'PARAMETERS ISX,ISY,NPTS',/)
INPUT(1) ISX,ISY,NPTS
WRITE(1,41)
41  FORMAT(10X,'NO PLOTTING,NO STORING : NEG NO',/)
INPUT(1) IPL,IPD
DIS=FLOAT(NPTS)/FLOAT(IDS)
CALL CLEAR
RM=IADS(MR)
IF(MR.LT.0) RM=1./RM
FOCAL POINT PARAMETERS
IF(FC.LT.0.) GO TO 150
ZLC=0.
YLC=0.
ZLC=(FC/RM)*DIS
150 CONTINUE
XL=XLC/RM*DIS
YL=YLC/RM*DIS
ZL=ZLC/RM*DIS
UL=WLI/RM*DIS
WL2=1./UL
TMS=1.-TES
ID2=ID/2
IDH=NPTS-ID2

```

```

DO 800 NC=1,NN
X0=XX(NC)*RM*DIS
Y0=YY(NC)*RM*DIS
Z0=ZZ(NC)*RM*DIS
JR=1
NPP=NP(NC)
IF(ID-1) 21,21,22
21 NPP=NPP/2+.5
JR=2
GO TO 23
22 IXS(2)=ID
IYS(2)=ID
23 CONTINUE
DO 800 NR=1,NPP
JT=0
DO 800 JC=1,JR
KIT=0
900 CALL RANDI(NR1,X1)
CALL RANDI(NR1,X2)
IX=X1*IDH
IY=X2*IDH
IF(NPT) 6,6,9
6 CALL GEN(IX,IY,X0,Y0,Z0,ID2,UL,JT,IDH,KIT,KMX,TES,TXS,IXS,IYS)
GO TO 9
9 CALL GENS(IX,IY,X0,Y0,Z0,XL,YL,ZL,ID2,UL2,JT,IDH,HLA,TES,KIT,
* KMX,TXS,IXS,IYS)
8 IF(JT,LT,JC) GO TO 900
800 CONTINUE
IF(IPL,LT,0) GO TO 42
CALL TNEF(IXS,IYS,ISX,ISY)
42 IF(IPD,LT,0) GO TO 800
WRITE(3,101) (IXS(I),IYS(I),I=1,2)
800 CONTINUE
600 CONTINUE
40 FORMAT(3F10.0)
45 FORMAT(2F10.1)
15 FORMAT(6I10,3F10.3)
101 FORMAT(4I6)
102 FORMAT(//2I10//)
69 FORMAT(4I10)
CALL APOS(0,0)
CALL SETH(1)
STOP
END
SUBROUTINE INPUT(XX,YY,ZZ,NP,NN,JK)
DIMENSION XX(1),YY(1),ZZ(1),NP(1)
WRITE(1,16)
FORMAT(10X,'NO OF POINTS',/)
INPUT(1) NN
WRITE(5,15) NN
DO 10 I=1,NN
WRITE(1,10)
10 FORMAT(10X,'XX,YY,ZZ,NP',/)
INPUT(1) XX(I),YY(I),ZZ(I),NP(I)

```

```

10  WRITE(5,40) XX(I),YY(I),ZZ(I),NP(I)
40  CONTINUE
15  FORMAT(3F10.0,I10)
    FORMAT(3I10)
    RETURN
    END
    SUBROUTINE GEN(IX,IY,X0,Y0,Z0,ID2,UL,J,IDH,K,KMX,TES,TXS,IXS,IYS)
    DIMENSION IXS(1),IYS(1)
    UL2=UL*UL
    X=X0-IX-ID2
    Y=Y0-IY-ID2
    CALL REF3(RN,X,Y,Z0)
    RN=RN/UL
    FN=AMOD(RN,1.)
    IF(FN.LT.TES) GO TO 20
    IF(FN.GT.TXS) GO TO 20
    RN=RN*INT(RN)
    IF(FN.GT..5) RN=RN+1.
    X1=UL2*RN*RN
    X2=Z0*Z0+Y*Y
    50  X=SQRT(X1-X2)
    IF(X0.GT.0.) IX=X0-X-ID2+.5
    IF(X0.LT.0.) IX=X0+X-ID2+.5
    IF(IX.LT.0) GO TO 10
    IF(IX.GT.IDH) GO TO 10
    20  J=J+1
    IXS(J)=IX
    IYS(J)=IY
    GO TO 15
    10  K=K+1
    IF(K.LT.KMX) GO TO 15
    60  WRITE(6,60)
    FORMAT(1H0,'MAX ITERATIONS')
    STOP
    15  RETURN
    END
    SUBROUTINE GENS(IX,IY,X0,Y0,Z,XL,YL,ZL,ID2,UL2,J,IDH,NLA,TES,
* K,KMX,TXS,IXS,IYS)
    DIMENSION IXS(1),IYS(1)
    FIX=IX-ID2
    FIY=IY-ID2
    X=X0-FIX
    Y=Y0-FIY
    XF=XL-FIX
    YF=YL-FIY
    CALL REF3(RN,X,Y,Z)
    CALL REF3(F0,XF,YF,ZL)
    IF(NLA.LT.0.) F0=-F0
    CALL FIKS(RO,F0,X,XF,DEL,UL2,TES,TXS)
    IX=FIX+DEL+.5
    IX=IX-ID2
    IF(IX.LT.0) GO TO 10
    IF(IX.GT.IDH) GO TO 10
    J=J+1

```

```

      IXS(J)=IX
      IYS(J)=IY
      GO TO 15
10    K=K+1
      IF(K.LT.KMX) GO TO 15
      WRITE(6,76) IX,IY,K,DEL,FX,RO,FO,X,XF,WL2,TES,TXS
70    FORMAT(1X,316.8E10.4)
      WRITE(6,60)
60    FORMAT(1H0,'MAX ITERATIONS')
      STOP
15    RETURN
      END
      SUBROUTINE FIKS(RO,FO,X,FX,DEL,WL2,TES,TXS)
      Z=X*WL2
      FZ=FX*WL2
      RW=RO*WL2
      FU=FO*WL2
      S=RW+FU
      B=AMOD(S,1.)
      IF(B.LT.TES) GO TO 11
      IF(B.GT.TXS) GO TO 11
      IF(B-.5) 1,1.2
2    CONTINUE
      IF(B) 3,5,5
3    B=B+1.
      GO TO 1
5    B=B-1.
1    CONTINUE
      A1=1./FU
      A2=RW*A1
      T=B*(Z+FZ)*A1-(A2*FZ+Z)
      XFX=Z-FZ
      C2=1.+A2-(XFX*A1)*(XFX/S)
      C3=2.*B*RW
      C4=T/C2
      C5=(C3/T)/C4
      IF(C5.GT.1.) GO TO 2
      DEL=C4*(SQRT(1.-C5)-1.)
      DEL=DEL/WL2
      GO TO 12
11    DEL=0.
12    CONTINUE
      RETURN
      END
      SUBROUTINE TNEF(IXS,IYS,ISX,ISY)
      DIMENSION IXS(1),IYS(1)
      DO 1 I=1,2
      IXS(I)=IXS(I)+ISX
      IYS(I)=IYS(I)+ISY
      CALL ABOT(IXS(I),IYS(I))
1    CONTINUE
      CALL SETM(1)
      RETURN
      END

```

```
C SUBROUTINE RANDI(NR1,X)
C THIS SUBROUTINE GENERATES A SUPPLY OF PSEURANDOM REAL NUMBERS(X)
C UNIFORMLY DISTRIBUTED BETWEEN 0.0 AND 1.0 . A SATISFING VALUE
C NR1 MUST BE SUPPLIED (ANY ODD INTEGER)
NR1=NR1*259
X=FLOAT(NR1)*.30517578E-4
IF(X.LT.0) X=-X
END
C SUBROUTINE REF3(R,X,Y,Z)
C FINDS DISTANCE R
Z2=1./Z
Z1=(X*X+Y*Y)*Z2
R=Z*SQRT(Z1*Z2+1.)
RETURN
END
EOF
```