

KIZILÖTESİ CCD KAMERALAR VE TEKNİK ÖZELLİKLERİ

Gürcan BÜYÜKSALİH

ÖZET

Bu çalışmada, ilk önce kızılötesi görüntüleyicilerin spektrumun görünür bölgesinde çalışan fotoğrafik sistemlere göre temel tasarım farklılıkları üzerinde ayrıntılı olarak durulmuştur. Daha sonra, kızılötesi CCD (Charge Coupled Devices – Yük Bağlamalı Düzen) kameraların yapıları ve bunların fotogrametrik uygulamalar için önemli olan geometrik ve radyometrik karakteristiklerine değinilmiştir. Ayrıca, piyasada mevcut olan kameraların performans karakteristikleri çizelgeler halinde sergilenmiştir.

ABSTRACT

In this study, the main design differences between the infrared imagers and the photographic systems that operate in the visible part of the electromagnetic spectrum have been primarily discussed in detail. Afterwards, structures of the infrared CCD cameras and their geometric and radiometric characteristics that are important for photogrammetric applications have been dealt with. Additionally, the performance characteristics of the currently available cameras have been given as tables.

1. GİRİŞ

Fotogrametrik çalışmalarda görüntü elde etme işlemi ana aşamadır. Çünkü bu aşamada, ilgili nesnenin üzerinde fotogrametrik ölçmeler yapabilmek için gerekli olan görüntüler elde edilir. Bu görüntü üzerinde yapılan ölçmeler daha sonra nesnenin özelliklerini veya boyutlarını belirlemek için bir veya birkaç fotogrametrik dönüşüme tabi tutulur. Genelde, fotogrametrik yöntem ile görüntü elde etme aşamasında optik işlemlere ihtiyaç duyulur. Bunun sonucu elde edilen görüntüler tipik olarak elektromanyetik spektrumun görünür veya ona yakın bölgelerine duyarlıdır. Fakat, uzun dalga boylarında çalışan mikrodalga radar ve radyometreler ise özel ve farklı yöntemler kullanılır. Bütün optik-tabanlı sistemlerde, dalga boyu göz önüne alınmadığında, nesne alanının perspektif izdüşümünün kaydı için bir mercek sistemi ve odak düzleminde yararlanılır.

Fotoğrafik uygulamalarda odak düzleminde elde edilen görüntü, film veya cam üzerine yerleştirilmiş gümüş halojen tabanlı emülsiyonlar tarafından algılanır. Fotoğrafçılık biliminin çok gelişmiş olması nedeniyle, fotoğrafik kayıtların tamamlılığı, durağanlığı ve uzun ömürlülüğü kontrol edilebilir. Fakat bazı uygulamalar için, klasik fotoğrafik emülsiyonların belirgin olumsuzlukları, banyo işlemleri için gerekli zaman ve görüntü kaydının işlemler tamamlandıktan sonraki değişmezliğidir. Fotoğrafın sağlam ve ulaşımının kolay olması ve daha önemlisi, özellikle arazi şartlarında, görüntünün gösterimi için ek bir alete gerek olmaması önemli avantajlardır.

1897 yılında katot ışınlu tüpün geliştirilmesi, fotoğrafik olmayan görüntü elde etme ihtimalini ortaya çıkarmıştır. Fakat, iyi görüntü elde edebilecek tüp kamerasının geliştirildiği 1923 yılına

kadar uygulanamamıştır. 1930'lerde yayım yapabilen televizyonların ortaya çıkışı, video görüntülemenin çok yönlü kullanımına sebep olmuştur. Video tüp kamera sistemlerinin harita üretiminde ilk kullanılışı 1950'lerde gerçekleştirilmiştir /8/. Bu gelişmelerle birlikte, görüntü alım sistemleri uzay görüntüleme, endüstriyel ölçüm kontrolü, ölçübilim, güvenlik sistemleri ve yersel fotogrametri gibi çok değişik uygulamalarda kullanılmışlardır. Termal kızılötesi görüntüleme için görüş alanının optik-mekanik taramasını yapan video çerçeve tarama sistemleri de askeri operasyonlarda, keşif çalışmalarında ve uzay ve hava uzaktan algılamasında geniş uygulama alanı bulmuşlardır.

Video tüp ve tarama sistemleri ya tarayıcılarda olduğu gibi hareketli parçalara ya da video tüp kameralarda olduğu gibi elektromanyetik ve çevresel etkilere duyarlı parçalara sahip olma gibi dezavantajları içerirler. Özellikle, görüntü tüpünde asli olarak varolan stabilite eksikliği ve video çerçeve tarayıcıların kompleks optik ve tarama elemanları ve yapıları bu sistemlerin doğruluğunu ve güvenilirliğini sınırlamaktadır.

CCD kameralar ise kızılötesi görüntüleme uygulamaları için kısa zaman önce kullanılabilir hale gelmişlerdir. Bu sistemlerde görüntü, fotoğrafik emülsiyonlarda meydana gelen kimyasal değişme veya video tüpün hedef levhasının yüzeyi üzerindeki yükte oluşan değişmeden farklı olarak gelen fotonların elektrik yüküne dönüşümü ile algılanır. Bu kameraların en önemli yararı, ışık veya radyasyona duyarlı elemanları kimyasal zemine yerleştirilmiş ve bu da onlara video tüp ve tarama sistemlerinden çok fazla geometrik doğruluk imkanı sağlamış olmasıdır.

CCD kameraların performansı devamlı olarak artmakta ve bunların yakın gelecekte görüntü elde etme konusuna bütünüyle hakim olması beklenmektedir. Fakat, günümüzde bu sistemler düşük çözünürlüğe, küçük dinamik aralığa ve format boyutuna sahiptirler. Bu bağlamda, bir CCD kamerası bir hava fotoğrafının verdiği bilgiyi içermesi için yaklaşık olarak 20000x20000 piksel, aynı şekilde yersel kameranın verdiği bilgiyi verebilmesi için 6000x6000 piksel çözünürlüğüne sahip olması gerekir /2/. Ayrıca fotoğraf, görünür ve yakın kızılötesi bölgede detayların çok keskin belirlenmesini sağlarken, orta ve termal kızılötesi bölgede ise kullanılmama dezavantajına sahiptir.

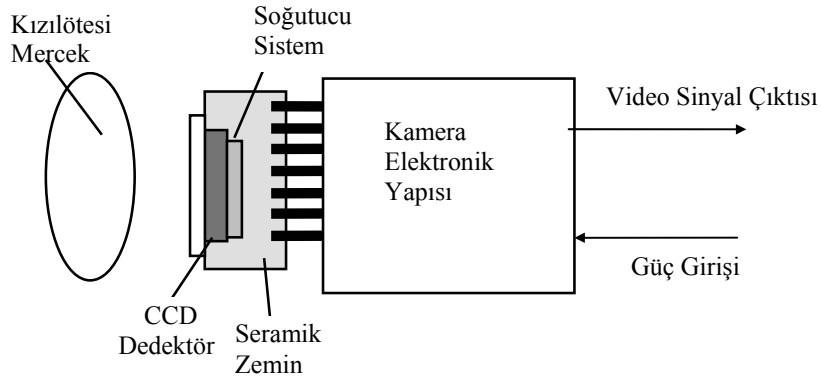
2. KIZILÖTESİ CCD KAMERALARIN ANA ELEMANLARI VE GENEL ÖZELLİKLERİ

Fotogrametrik uygulamalarda kullanılan kızılötesi CCD kameralar, elektromanyetik spektrumun orta kızılötesi bölgesinde çalışırlar. CCD kameralar değişik sistematiğe sahip mekanizmaların bütününden oluşan bir sistemdir. Şekil-1 de bir CCD kamerasının ana elemanları şematik olarak verilmiştir. Bu bölümde herbir elemanın temel işlevi ve özellikleri üzerinde durulacak ve ayrıntılı olarak açıklanacaktır.

a. Optik Sistem

Kızılötesi görüntüleme sistemlerinin uzun dalga boylarında çalıştırılması bunları optik ve elektronik olarak, görünür ve yakın kızılötesi bölgelerde kullanılan fotoğrafik sistemlerden farklı kılmıştır. Özellikle çözünürlük, aberasyon ve difraksiyon etkileri, kullanılan radyasyonun uzun

dalga boyunun bir fonksiyonudur. Bu durum kızılötesi optik sistemlerin görüntüleme karakteristiklerini sınırlamış ve sistemden elde edilen görüntüler üzerinde yapılan ölçmelerin doğruluğunu etkilemiş ve azaltmıştır /4/. Buna ek olarak, spektrumun görünür bölgesinde optik eleman olarak kullanılabilen birçok materyal, kızılötesi bölge için şeffaf yani geçirgen değildir. Fotoğrafik sistemlerde kullanılan silikat-tabanlı cam $2.5\mu\text{m}$ 'den daha büyük dalga boylu radyasyonu geçirmediğinden, kızılötesi görüntüleyicilerin imalatçıları, optik parçalarının üretimi oldukça pahalı ve zor olan ve kolay bulunmayan materyalleri kullanmak zorunda kalmışlardır. Silisyum ve germanyum camlar kızılötesi görüntüleme sistemlerinde yoğun olarak kullanılan mercek materyalleridir. Bunlardan silisyum-tabanlı materyaller orta-kızılötesi bölgesinde çalıştırılan CCD kameralarda, germanyum ise termal kızılötesi bölgede işletilen video çerçeve tarayıcılarında kullanılmaktadır.



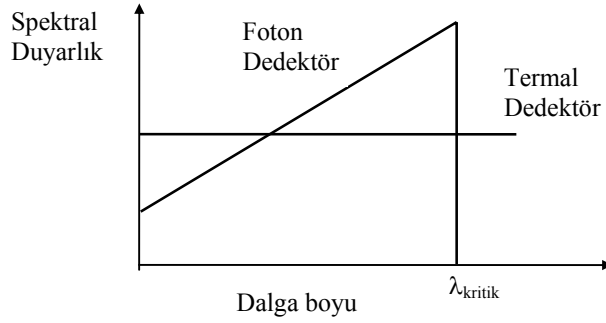
Şekil-1: Kızılötesi CCD Kamerasının Şematik Görünümü.

b. Elektronik Dedektörler

Elektromanyetik enerjinin algılanması ya fotoğrafik ya da elektronik olarak sağlanır. Fotoğrafik sistemler, görüntü alanında oluşan radyasyon değişimlerini algılamak için ışığa duyarlı film üzerinde oluşan kimyasal reaksiyonları kullanırlar. Oluşan görüntünün kimyasal olarak geliştirilmesiyle, algılanan sinyallerin kaydı sağlanmış olur. Burada film, hem algılayıcı hem de kaydedici mekanizma olarak görev yapar. Kızılötesi görüntüleme sistemlerinde ise, algılama ve kaydetme aşamaları, fotoğrafik emülsiyonlar orta ve termal kızılötesi bölgelere duyarlı olmadığından tamamıyla farklı anlamlarda yürütülmek zorundadır. CCD kameralar, fotoğrafik uygulamalardaki gümüş halojen tabanlı emülsiyonlar yerine nesneden yayılan veya yansıyan ve görüntüleme sisteminin optik elemanları tarafından toplanan radyasyonu algılamak ve onu elektrik sinyal formuna dönüştürmek için elektronik dedektörler kullanır. Kızılötesi görüntüleme sistemlerinde kullanılan dedektörler iki sınıfa ayrılabilir, bunlar termal ve foton dedektörlerdir.

Termal dedektörler ısıya duyarlı materyal kullanırlar. Gelen radyasyon dedektör üzerine düştüğünde, bu onun sıcaklığında artma veya azalma meydana getirir ve bu bir ölçülebilir fiziksel değişikliğe yol açar. Termal dedektörler gelen radyasyonun spektral dağılımına değil miktarına duyarlıdır. Bu nedenle, düşük termal duyarlıklarına ve oldukça yavaş algılamalarına rağmen çevre sıcaklığında çalıştırılma olanağına sahiptirler. Foton dedektörler ise termal dedektörlerden

farklı olarak üzerlerine düşen radyasyon onların kritik dalga boyundan küçükse tepki vermektedirler. Örneğin, CCD sistemlerinde yaygın olarak kullanılan InSb (İndiyum Antimonit), PbSe (Kurşun Selenyum), PbTe (Kurşun Tellürit) ve PtSi (Platin Silisit) gibi dedektörlerin kritik dalga boyu $7\mu\text{m}$ dir ve bu değerden daha büyük dalga boylu radyasyona cevap vermemektedirler. Şekil-2 de foton ve termal dedektörlerin spektral duyarlılıkları karşılaştırılmıştır.



Şekil-2: Foton ve Termal Dedektörlerin Spektral Duyarlılıkları /3/.

c. Dedektör Soğutucu Mekanizma

Gürültüyü en aza indirmek ve iletkenlerin ısınması sonucu doğan etkileri azaltmak için foton dedektörler belli bir sıcaklık değerine kadar soğutulmalıdır. Kızılötesi uygulamalarda kullanılan soğutma yöntemi, işletilen sıcaklığa ve sistem gereklerine göre değişir. Soğutucular dört ayrı grupta incelenebilir:

- (1) Sıvı nitrojen,
- (2) Joule-Thompson mini soğutucu,
- (3) Stirling devirli buzdolabı, ve
- (4) Peltier etki tabanlı termoelektrik soğutucu.

Bunlardan ilk üçü mekanik olarak çalışırken sonuncusu tamamen elektriksel bir olaydır.

Çizelge-1 den görülebileceği gibi, termal kızılötesi bölgesinde ($8-14\mu\text{m}$) ve 77°K (-196°C) de çalıştırılan dedektörlerin çoğu sıvı nitrojenle soğutulabilir. Bu çeşit soğutma işlemi, sıvı buharlaştıkça yeniden doldurmak gerektiğinden oldukça uygunsuz ve yorucu bir işlemden ibarettir. Bu nedenle sistem ancak sıvı nitrojen ihtiyacının rahatlıkla karşılanabileceği laboratuvar şartlarında kullanılabilir. Arazi şartlarında, operatör emeği gerektirmeyen Joule-Thompson mini soğutucusunu kullanmak daha uygundur. Fakat, günümüzde, Stirling devirli küçük buzdolaplarının kullanımı da hayli artmıştır.

Orta kızılötesi bölgede çalışan dedektörlerin çoğu Peltier etki tabanlı termoelektrik soğutucularla sağlanan 196°K (-77°C)'de çalıştırılırlar. Ancak, bu bölgede, InSb, PbSe ve PbTe gibi 77°K (-196°C)'de çalıştırılan dedektörler genelde mekanik soğutma sistemleri ile özellikle laboratuvar şartlarında kullanılan sıvı nitrojenle soğutulur.

Çizelge-1: Belli Başlı Foton Dedektör Materyalleri /4/.

Materyal	Operasyon Sıcaklığı (K)	Kritik Dalgaboyu (μm)	
InSb	196	6.0	Orta Kızılötesi
InSb	77	5.2	
PbSe	196	5.1	
PbSe	77	6.6	
PbTe	77	5.4	
Pb _{1-x} Sn _x Te			Termal Kızılötesi
x=0.85	77	10.0	
x=0.83	77	11.0	
x=0.81	77	12.0	
x=0.80	77	13.0	
Hg _{1-x} Cd _x Te			Termal Kızılötesi
x=0.219	77	10.0	
x=0.212	77	11.0	
x=0.206	77	12.0	
x=0.201	77	13.0	
x=0.314	196	4.2	Orta Kızılötesi
x=0.297	196	4.6	
x=0.282	196	5.0	
PtSi	77	5.1	

d. Kızılötesi Görüntülerin Nakli

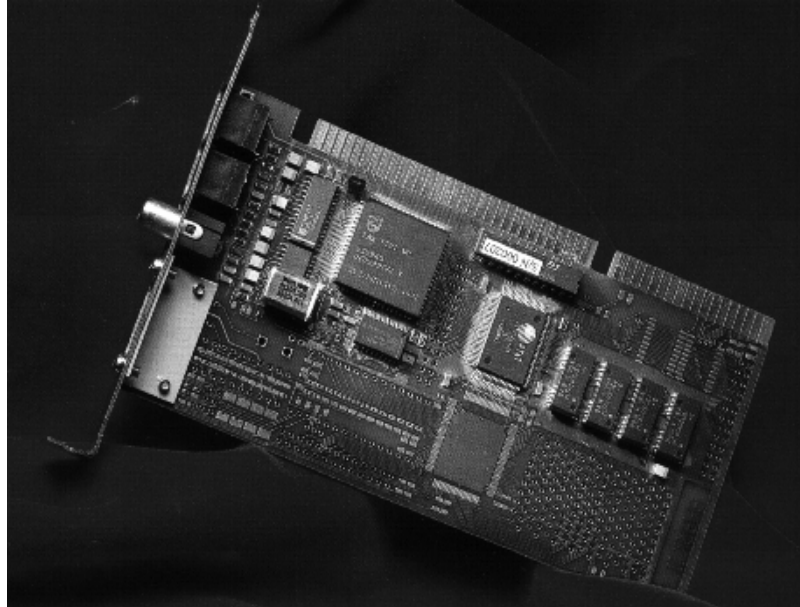
Bugün için kızılötesi radyasyonun insan gözü tarafından görülebilen formu mümkün olmadığından kızılötesi sistemlerle görüntü elde edilmesi, gösterimi ve kaydı video tabanlı olarak yapılmak zorundadır. Gerçekten günümüz kızılötesi tarayıcı ve kameralarını video teknolojisi desteği olmaksızın aktif hale getirmek olanaksızdır. Bundan başka, görüntülerin kızılötesi sistemlerden, kullanıcının gösterim ve işleme merkezine nakli televizyon yayımında uluslararası bazda kullanılan analog video sinyalleri ile sağlanır. Adından anlaşılacağı üzere analog video, devamlı sinyal formunda ve radyo frekansında, atmosfer veya koaksiyel (içiçe) kablo yoluyla geçirilir. Bu sinyallerin zaman ve teknik özellikleri televizyon yayım sistemleri için tanımlanmış ve geliştirilmiş özellikler ve standartlarla belirlenmiştir. Çizelge-2’de bu tür görüntülerin aktarılmasında kullanılan uluslararası televizyon standartları PAL, SECAM ve NTSC’nin sinyal karakteristikleri verilmiştir.

Çizelge-2: Uluslararası Televizyon Standartlarının Teknik Özellikleri /1/.

Standartlar	PAL	SECAM	NTSC
Çerçeve frekansı (Hz)	25	25	30
Alan frekansı (Hz)	50	50	60
Bir çerçevedeki çizgi sayısı	625	819	525
Bir çerçevedeki aktif çizgi sayısı	575	737	497
Çizgi frekansı (Hz)	15,625	20,475	15,750
Bir çizgideki piksel sayısı	767	982	663
Bir çizgi tarama zamanı (µs)	64.0	48.8	63.5

e. Dijital Görüntü Elde Edimi

Analog (continuous-devamlı) video sinyalleri kullanılarak oluşturulan ve kaydedilen kızılötesi görüntülerin bilgisayarla işlenmesi için dijital (discrete-ayrık) forma dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu dönüşüm, normalde PC ve diğer bir çeşit bilgisayara yüklenmiş olan video sayısallaştırıcı (frame grabber) ile gerçekleştirilir. Şekil-3’de bir örneği görülen bu alet, bellek ve işleme elemanlarından oluşmaktadır. Gelen analog sinyal önce dijital hale getirilmekte daha sonra da bilgisayar tarafından ulaşılabilen bellek kısmında saklanmaktadır. Böylece dijital görüntü istenildiği zaman bellekten çağrılmakta ve bilgisayar ekranında gösterimi yapılmaktadır. Bu da doğal olarak kullanıcıya görüntü üzerinden bir takım metrik ve yorumsal bilgileri alma ve ölçüler yapma olanağı vermektedir.



Şekil-3: Standart Video Sinyalleri İçin Shark II Video Sayısallaştırıcısı

3. DEDEKTÖR DİZİNLERİ (MATRİSLERİ)

İdeal olarak, maksimum duyarlık için görüntü alanındaki resim noktalarının bire-bir karşılığını veren ve yeterli sayıda dedektör elemanından oluşan iki boyutlu dedektörler dizini kullanılmalıdır. Bu çeşit dizinler, spektrumun orta-kızılötesi bölgesinde çalışan CCD kameralarda son yıllarda kullanılmaya başlanmışlardır. Bunların yapımındaki zorluk ve oluşan yüksek maliyet nedeniyle bugünkü teknoloji, uzay ve havadan görüntüleme uygulamaları için istenilen görüş alanlarını verecek büyük matrislerin üretimine izin vermemektedir. Fotogrametrik çalışmalarda kullanılan bir CCD kamera için en önemli parametreler, dedektör matrisinin boyutu ve piksel genişliğidir. Yukarıda açıklanan nedenlerden dolayı şu an piyasada mevcut kızılötesi CCD kameralar 35-50 μm piksel genişliğine sahip 320*240 veya 512*512 piksel boyutlarında dedektör matrisleri kullanabilmektedir. Fakat spektrumun görünür bölgesinde çalışan CCD kameralar ise 5120*5120 piksel gibi oldukça büyük dedektör matrisi kullanmakta ve piksel genişliği 10 μm 'nin altında olacak şekilde üretilebilmektedir. İki boyutlu dedektör matrislerinin üretimindeki teknoloji ve fabrikasyon geliştikçe büyük dizinlerin yapımı gerçekleştirilebilir. Böylece, bunların yakın zamanda kızılötesi görüntüleme pazarını tümüyle kaplamaları olanağı doğacaktır.

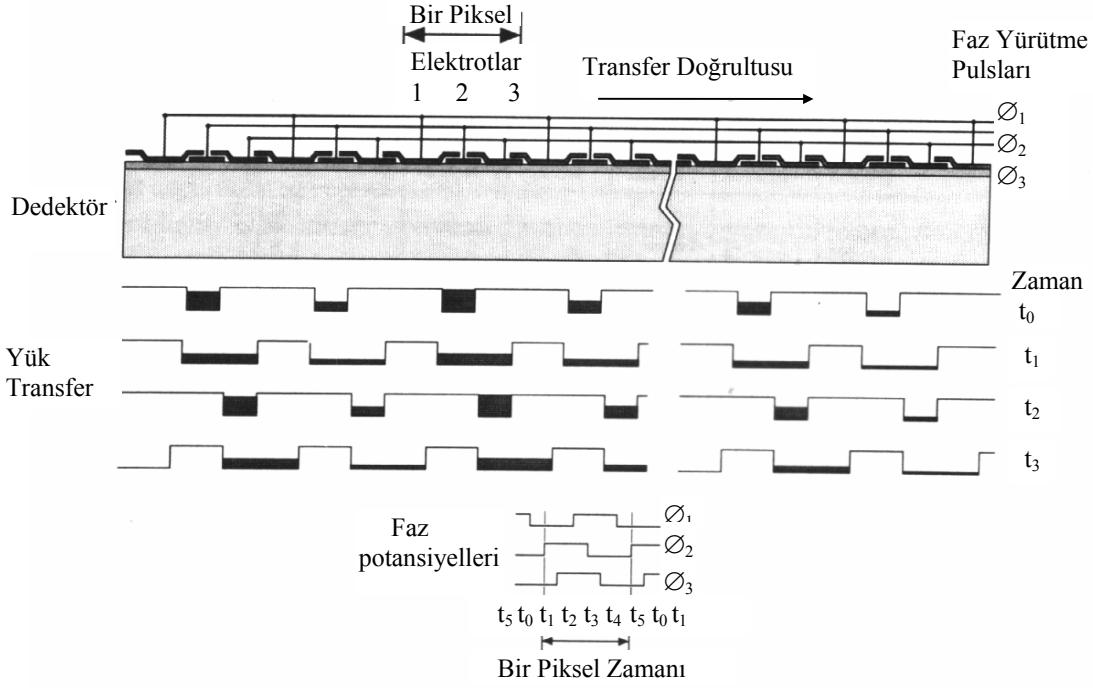
a. Dedektör Matrislerinin Veri-Çıkış Mekanizmaları

Dedektör matrisleri, her bir dedektör elemanında oluşan elektronik yükü, matrisin dışına transfer etmekte kullanılan veri-çıkış mekanizmalarına göre karakterize edilirler. Bu mekanizmalar aşağıdaki şekilde sınıflandırılabilirler:

- (1) Metal Oksit Yarı İletken (Metal Oxide Semi-Conductor - MOS),
- (2) Yük İçitimi Düzen (Charge Injection Devices - CID),
- (3) Yük Bağlamalı Düzen (Charge Coupled Devices - CCD).

CID ve CCD dedektör matrislerinin her ikisi de foton dedektör kullanırken, farklı veri-çıkış mekanizmasına sahiptirler. CCD matrislerinde kullanılan "Charge Coupling" olayı, komşu potansiyel kutularındaki yükü transfer etmek için bir elektrot çiftinin kullanıldığı işlemi tanımlar. Bu elektrotlardaki voltajlar yükü bir kutudan diğerine geçiren bir düzenle yürütülürler. Dedektör hattının sonunda yük çıkış kaydedicilerine transfer edilerek işlem tamamlanır.

Şekil-4'de, üç fazlı CCD nin (üç elektrotu kapsayan) çalışma prensibi görülmektedir. Buna göre, $t=t_0$ zamanında, ϕ_1 deki voltaj değeri ϕ_2 ve ϕ_3 den daha büyük olduğundan yük ϕ_1 elektrotunun altındaki potansiyel kutusunda biriktirilir. $t=t_1$ zamanında, ϕ_1 ve ϕ_2 üzerinde aynı voltaj mevcuttur. Fakat, ϕ_1 deki potansiyel kutusu biriktirilen yük nedeniyle kısmen dolduğu için ϕ_2 altındaki potansiyel kutusu ϕ_1 dekinden daha boştur. Bu durum ϕ_1 den ϕ_2 elektrotuna yük transferi işlemini sağlar. Böylece $t_1 < t < t_3$ de ϕ_1 elektrotu üzerindeki voltaj azalırken, yük ϕ_2 elektrotu altındaki bölgeye doğru azalmaya devam eder. $t=t_3$ zamanında yük tamamen ϕ_2 elektrotu altında birikmiş olur ve böylece pikselin 1/3'lük kısmındaki taşınma tamamlanmış olur. Daha sonra faz yürütme pulsları ile birlikte yük ϕ_2 den ϕ_3 'e taşınır ve aynı işlem bütün matris boyunca devam eder.



Şekil-4: CCD Dedektörlerde Yük Transferi İşlemi /10/.

b. CCD Dedektör Matrislerinin Farklı Organizasyonları

CCD dedektör matrisleri görüntüleme ve çıkış üniteleri için farklı tipte mantıksal organizasyonlar kullanırlar. Çerçeve Transfer (ÇT) CCD dedektör dizinleri, sadece dedektör elemanlarından oluşan görüntüleme alanlarına sahiptirler. Bu tip dizinler kendi içinde, Alan ÇT CCD ler ve Tam ÇT CCD şeklinde ayrılabilirler. Alan ÇT CCD'lerde dedektör dizini hem görüntüleme bölgesi hem de biriktirme alanını kapsarken, Tam ÇT CCD'lerde ise dizinler yalnızca algılayıcı elemanları içerirler. Diğer bir tip organizasyon oldukça karmaşık yapıya sahip Aralıklı Transfer (AT) dedektör dizinleridir. AT'lerdeki bu karmaşıklık dizinlerin görüntü çıkışını yapabilmek için algılama özelliği olmayan dedektörler kullanmasıdır.

c. CCD Dedektör Dizinlerinin Geometrik Karakteristikleri

CCD dedektör dizinlerinden beklenen geometrik performans büyük önem taşımaktadır. Dedektör eleman aralığının homojenliği ve dedektör yüzeyinin düzgünlüğü, elde edilebilecek geometrik doğruluğa etken başlıca faktörlerdir. Fakat imalatçılar dedektör elemanlarının yüzey düzgünlüğü veya aralık homojenliği hakkında herhangi bir özel bilgi sağlamamaktadırlar.

(1) Dedektör Elemanlarının Geometrisi

CCD dedektör dizinleri bir alt silikon tabakası üzerine katmanlar serisinin biriktirilmesi sonucu üretilir. Her katman belirli amaca yöneliktir, örneğin ya yalıtkan olarak ya da elektrotlar

serisi olarak görev yaparlar. Bu yığılmış katmanların geometrisi, silikon tabanlı elektronik devrelerin imalatında yaygın olarak kullanılan fotolitoğrafi işlemi ile kontrol edilir. Bu işlemde, aynı kartografik çalışmalardaki renk ayırımında olduğu gibi maskeler kullanılmaktadır. Kullanılan maskeler sonuç üründen oldukça büyük boyutta hazırlanırlar ve sonra optik ve fotoğrafik küçültme işlemleri kullanılarak doğru boyuta getirilirler. Yüksek performanslı devrelerin üretiminde yaygın olarak kullanılan fotolitografik araçlardan biri, kademeli tekrar sistemidir. Bu sistemin ölçü birimi, basılabilen en küçük karakter boyutu olarak adlandırılan tasarım değeridir. 1970'li yılların başlarında, tipik tasarım değeri olarak 6-8 μm kullanılırken bugünün optik tekrar sistemleri 0.2 μm 'ye ulaşan mikrometre-altı tasarım değerlerine sahiptirler. Ancak, özellikle büyük CCD dedektör dizinleri için hala tasarım değerleri 1.2 ila 2 μm arasında değişmektedir /9/. Kademeli tekrar sisteminin genel kapasitesi sütun hatalarına, ayar düzeneğinin presizyonuna ve parça adımcısının sıralama presizyonuna bağlıdır. Tasarım değerinin, sütun ve sıralama hatalarının kabul edilebilir düzeyde olması ve ayar düzeneği presizyonunun $\pm 0.1\mu\text{m}$ içinde kalması durumunda 0.5 μm 'lik tasarım değerine ulaştığı görülmektedir /7/. Diğer önemli bir parametre olan dedektör elemanları aralığı, yapılan laboratuvar ölçmeleriyle kontrol edilmiş ve 45.54 μm dedektör aralığı için imalatçının verdiği değerden en fazla $\pm 0.2\mu\text{m}$ sapıldığı görülmüştür /5/.

(2) CCD Matrislerinin Yüzey Düzgünlüğü

CCD dedektör dizininin düzgünlüğü hem silikon altlığının genel biçimi hem de onun yüzeyinin yapısı bakımından gözönüne alınması gereken bir sorundur. İlk CCD dizinleri düşük çözünürlüğe daha önemlisi küçük formata sahiptiler. O nedenle yüzey düzgünlüğü oldukça küçük bir sorundu. Zamanla, artan dizin çözünürlüğü, format boyutunda artış meydana getirdi. Buna rağmen günümüzde genelde CCD imalatçıların büyük çoğunluğu yüzey düzgünlüğü değerlerini vermemektedirler. Bunun sebebi, çoğunluğunun yüksek geometrik hassasiyet gerektirmeyen çalışmalarda kullanılmasıdır. Dedektör dizin yüzeyinin düz olmayışı ve yük transferinde kullanılan elektrotların yapısı yüzey pürüzlülüğüne yol açmaktadır. Yüzey pürüzlülüğü elektron mikroskobu ile ölçülmüş ve $\pm 0.5\mu\text{m}$ düzeyinde olduğu bulunmuştur /6/. Elektrotların ve yalıtkanların birkaç katmanının yığılması da $\pm 1\mu\text{m}$ düzeyinde ek bir yüzey değişimi oluşturmaktadır.

d. CCD Dedektör Dizinlerinin Radyometrik Karakteristikleri

Dizinin radyometrik karakterini değiştiren etkiler, bunlardan doğan sistematik ve sürekli olan parazit sinyallerdir. Bunlar ya CCD dedektör dizininin fabrikasyonundaki kusurlardan ya da CCD teknolojisindeki eksiklerden kaynaklanır. En önemli etkiler; koyu akım, fluluk, leke, kapanlar ve kusurlar olarak verilebilir. Bütün bu etkiler görüntü kalitesinde azalmaya sebep olur ve sadece CCD kamerasının radyometrik kalibrasyonu ile giderilebilir.

(1) Koyu Akım

Herhangi bir yarı iletkenin ısınması sonucu doğan ek yük koyu akım olarak adlandırılır. CCD'lerde, koyu akım dedektör dizini üzerine düşen radyasyona karşı cevap olarak doğan

elektronik yüklerden ayrılamaz. Bunun sonucu görüntü üzerinde farklı ve yanlış bir gri değeri oluşmasına sebep olur. Koyu akım, CCD kamerasının işletme sıcaklığına kuvvetli şekilde bağlıdır. Sıcaklığın 5 ila 10°C azaltılması koyu akımın 2 kat daha az meydana gelmesine sebep olur. 3 ila 5µm dalga boyları bölgesinde kullanılan orta kızılötesi CCD kameralar daha önce de belirtildiği gibi, içlerinde soğutucu sistemler bulundurlar ve böylece dedektör dizininin radyometrik duyarlılığını ve dinamik aralığını arttırmak için işletim sıcaklığını -77°C'ye düşürürler.

(2) Fluluk

Bir dedektör elemanı veya dedektör elemanları grubu üzerine oldukça fazla radyasyon düştüğünde, potansiyel kutuların yük kapasiteleri aşılmış olur. Bu durumda fazla yük komşu elemanlar üzerine taşar. Fluluk; CCD dedektör dizinlerinden tamamen giderilemezken anti-fluluk kanallarının eklenmesi ile bu problem günümüz CCD lerinde ilk CCD lere oranla oldukça azaltılmıştır. CCD'lerde fluluğu azaltmak için iki çeşit anti-fluluk yapısı eklenmiştir. Düşey anti-fluluk yapıları özel derin yayınımla ile ekstra yükü silikon altlığın içine çeken bir sistem kullanır. Yatay anti-fluluk yöntemi, ek elektrotlar ve kanal durakları yardımıyla fazlalık yükü ortadan kaldırırlar. Yatay anti-fluluk kanalları AT CCD'lerde transfer elektrotlarına yakın, ÇT CCD'lerde ise kanal duraklarına paralel olarak yerleştirilmişlerdir.

(3) Leke

Leke, yoğun radyasyon kaynağının sütun yönündeki parlaklığı etkilemesi olarak tanımlanabilir. Lekenin şekli bütün dedektör tiplerinde aynı olurken, fiziksel kaynağı farklı CCD tiplerinde farklı olabilir. ÇT CCD'lerde leke, yükün görüntüleme alanından biriktirme alanına transferi sırasında ortaya çıkan artım sonucu oluşur. Bu nedenle leke, ÇT CCD'lerde transfer için gereken zamanı azaltmak suretiyle büyük ölçüde giderilir. Fakat AT CCD'lerde ise leke, yük transferi sırasında radyasyonun içeri girmesiyle oluşur.

(4) Kapanlar

Kapanlar, yük transfer işleminin etkinliğinin azaltılmasına sebep olan kusurlu devreler olarak ortaya çıkar. Bunlar yük paketlerinden transfer edilmekte olan yükleri yakalar ve onları kapan içindeki yük dengeye geldiğinde yavaşça bırakır. Kapanlar, fabrikasyon işlemi sonucu oluşan tasarım bozuklukları, materyal eksikliklerinden meydana gelir. Bunlar fabrikasyon işlemi ve materyallerin kalitesini arttırmak suretiyle azaltılabilir. Diğer bir yol, kapanları sürekli yüklerle dolu tutmaktır. Ama bu teknik dedektör dizininin dinamik aralığını azaltma dezavantajını taşır.

(5) Kusurlar

CCD dedektör dizinleriyle elde edilen görüntü üzerindeki kusurlar sıkça silikon materyalin yapısındaki bozukluklardan veya fabrikasyon işlemi sırasında oluşan hatalardan meydana gelir. Kusurlar; nokta, alan ve sütun veya satır bozukluğu şeklinde karakterize edilir. Bunlar sırasıyla tek bir dedektör elemanı, dedektör elemanlar grubu veya bir sütun veya satır olarak etki yapar.

Nokta ve alan kusurları çoğunlukla elektrotlar veya elektrot ve silikon altlık arasındaki koyu akım kaynaklarından doğar. Yüksek koyu akıma sahip dedektör elemanları beyaz nokta veya alanlar üretir. Alan kusurları girdaplı düzende ve beyaz bulutlar halinde ortaya çıkar. AT CCD'lerdeki sütun kusurları genellikle kanal duraklarının fabrikasyonundaki eksikliklerden oluşur. Satır bozukluklu dedektörler genelde imalatçılar tarafından kusur düzeltme devrelerinin eklenmesiyle azaltılır.

4. PİYASADA MEVCUT CCD KAMERALAR

Daha öncede belirtildiği gibi, kızılötesi CCD kameralar son yıllarda askeri uygulamalardan, çok yönlü sivil kullanıma geçmişlerdir. Özellikle tıbbi ve belli endüstriyel kullanımlar gibi yersel uygulamalarda 1980'li yıllardan beri bu kameralardan yararlanılmaktadır. Yazar tarafından bilinen ve piyasada mevcut kızılötesi CCD kameraların performans karakteristikleri Çizelge-3'de verilmiştir. Bu özellikler, kameraları üreten firmalar tarafından yayınlanan broşürlerden elde edilmiştir. Çizelgeden görülebileceği gibi, kameralar arasındaki ana farklılıklar, kameraların kullandığı dedektör tipi ve çözünürlüğünden meydana gelmektedir.

5. SONUÇ

Kızılötesi görüntüleyiciler öncelikle askeri uygulamalarda kullanılmak üzere geliştirilmişlerdir. Günümüzde kızılötesi CCD kameralar, belirli hava ve uzay uygulamalarında kullanılmaya başlamasına rağmen en iyi kullanılabileceği alan yersel fotogrametri uygulamalarıdır. Bu tür kameralarla yapılan uygulamalarda, örneğin endüstri alanında, elde edilen görüntüler başka hiçbir yolla elde edilemeyecek bilgileri sağlamaktadır. Ancak; bunların fotogrametrik uygulamalarda kullanımları, düşük çözünürlükleri nedeniyle sınırlı düzeyde kalmıştır. Bu durumda bile, askeri personelden tıp uzmanlarına kadar çok geniş kullanıcı spektrumu tarafından yararlanılabilecek kızılötesi görüntülerden, belirli miktarda metrik ve topografik bilgi çıkarmak mümkündür. Elektromanyetik spektrumun görünür bölgesi ile karşılaştırınca ana eksiklik çözünürlüktür. Günümüzde piyasada mevcut olan kızılötesi CCD kameralar, çok yüksek çözünürlük isteyen fotogrametrik ölçmeler için uygun olmayan maksimum 512*512 piksel gibi düşük bir çözünürlüğe sahiptirler. Bunların çözünürlüğündeki artış, teknoloji tarafından üretilebilecek dedektör dizin boyutundaki artışa bağlıdır. Kızılötesi radyasyona duyarlı büyük boyutlu CCD dizinlerinin mevcudiyeti görüntülerle elde edilebilecek çözünürlüğün ve geometrik doğruluğun artışını sağlayacaktır. Büyük boyutlu dizin geliştirimi ise ancak dizinin radyometrik kalibrasyonu ile belirlenebilecek çok sayıda ölü ve kusurlu pikselin oluşumuna sebep olabilecektir. Ayrıca, bu kameralar görünür bölgedeki karşılıkları ile kıyaslanınca video çıktı sistemi, yük transfer ve veri-çıkış mekanizması gibi kullanılan elektronik ve fiziksel yapıların çoğunun benzer olduğu görülür. Temel farklılık, bu sistemlerde kullanılan materyallerdir. Bunun sebebi, kızılötesi kameraların çalıştırıldığı dalga boyunun görünür bölgeninkine göre yaklaşık 10 kat büyük olmasıdır.

TEŞEKKÜR : Bu yayının hazırlanmasında gösterdiği katkı ve verdiği fikirlerden dolayı yazar, bölüm çalışma arkadaşı Yrd.Doç.Dr. Hakan Akçin'e teşekkürlerini sunmaktadır.

Çizelge-3: Orta Kızılötesi Bölgede Çalışan CCD Kameraların Teknik Özellikleri

Model	Agema 550	Agema 510	Amber AE-4128	Amber AE-4256	Amber Radiance	Hadland Photonics PRISM	Mitsubishi IR-300	Mitsubishi IR-M500
Özellikler								
Dedektör	InSb	160 elemanlı lineer dizin	InSb	InSb	InSb	PtSi	PtSi	PtSi
Piksel çözünürlüğü	320 x 240	Bir alan için 160 çizgi	128 * 128	256 * 256	256*256	320*244	256*256	512*512
Piksel boyutu(μm)	50	-	43 * 43	38 * 38	35	-	-	-
Soğutma sistemi	Stirling devirli	Termoelektrik (Peltier etkili)	Sıvı nitrojen	Sıvı nitrojen	Sıvı nitrojen	Stirling devirli	Stirling devirli	Stirling devirli
Çalışma sıcaklığı	-15 to 50 ⁰ C	-20 to 55 ⁰ C	0 to 40 ⁰ C	0 to 40 ⁰ C	0 to 50 ⁰ C	-10 to 55 ⁰ C	-10 to 50 ⁰ C	-10 to 50 ⁰ C
Spektral duyarlık	3.6 to 5μm	3 to 5μm	1 to 5.5μm	1 to 5.5μm	3-5μm	3-5μm	3-5μm	3-5μm
Video çıktısı	PAL, NTSC	PAL, NTSC	PAL, NTSC	PAL, NTSC	PAL, NTSC	PAL, NTSC	PAL, NTSC	PAL, NTSC
Mercekler	10 ⁰ x 7.5 ⁰ / 1.5m 20 ⁰ x 15 ⁰ / 0.5m 40 ⁰ x 30 ⁰ / 0.3m	18 ⁰ x 9 ⁰ / 0.7m	-	-	11 ⁰ / 1.5m	-	-	-
Sıcaklık hassasiyeti	0.1 ⁰ C at 30 ⁰ C	0.1 ⁰ C at 30 ⁰ C	<20mK	10mK	0.025 ⁰ C	0.1 ⁰ C	0.2 ⁰ C(27 ⁰ C)	0.15 ⁰ C(27 ⁰ C)

KAYNAKLAR

- /1/ Amin, A.M., : Geometrical Analysis and Rectification of Thermal Infrared Video Frame Scanner Imagery and Its Potential Applications to Topographic Mapping, Ph. D Thesis, University of Glasgow, 1986
- /2/ Beyer, H., : Geometric and Radiometric Analysis of a CCD Camera Based on Photogrammetric Close-Range System, Dissertation, ETH-Zurich, 1992
- /3/ Burnay, S.G., : Applications of Thermal Imaging, Adam Hilger, London, 1988
Williams, T.L.,
Jones, G.H.,
- /4/ Büyüksalih, G., : Geometric and Radiometric Calibration of Video Infrared Imagers for Photogrammetric Applications, Ph. D Thesis, University of Glasgow, November 1997
- /5/ Curry, S., : Calibration of an Array Camera, Photogrammetric Engineering and
Baumrind, S., Remote Sensing, 52/5, 1986
Anderson, J.M.,
- /6/ Lee, T.H., : A 360000-Pixel Charge Coupled Image Sensor for Imaging
Tredwell, T.J., Photographic Negative, IEEE Transactions on Electron Devices,
Burkey, B.C., Ed-32/8, 1985
- /7/ Pol, V., : Excimer Laser Based Lithography : A Deep Ultraviolet Waper
Bennewitz, J.H., Stepper for VSLI Processing, Optical Engineering, 26/4, 1987
Jewel, T.E.,
Peters, D.W.,
- /8/ Rosenberg, P., : Information Theory and Electronic Photogrammetry,
Photogrammetric Engineering, 21/4, 1955
- /9/ Seitz, P., : From Pixels to Answers – Recent Developments and Trends in
Vietze, O., Electronic Imaging, International Archives of Photogrammetry and
Spirig, T., Remote Sensing, 30/5W1, 1995
- /10/ Shortis, M.R., : Sensor Technology for Dijital Photogrammetry and Machine
Beyer, H., Vision. In : K.B.Atkinson (ed), Close Range Photogrammetry and
Machine Vision, Whittles Publishing, 1996