



DOĞRUSAL DİZİN (*PUSHBROOM*) GÖRÜNTÜLEME SİSTEMLERİ

Gürcan BÜYÜKSALİH

Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeodezi ve Fotogrametri Bölümü, 67100/Zonguldak

Geliş Tarihi : 15.07.1999

ÖZET

Bu çalışmada, son teknoloji uydu görüntüleme sistemlerinde yoğunlukla kullanılan doğrusal dizin (pushbroom) tarayıcılar incelenmiştir. Tarihsel gelişim süreçlerine değinildikten sonra, günümüzde bu teknikten yararlanan uzayda yerleşik uydu algılayıcılarının; özellikle Fransız SPOT, Alman MOMS, Hint IRS ve Japon JERS uydularının optik ve geometrik tasarımları üzerinde detaylı olarak durulmuştur. Son olarak, bu sistemlerin harita yapım amaçlı kullanımlarda sağlayacakları doğruluk düzeyleri ortaya koyulmuştur.

Anahtar Kelimeler : Doğrusal dizin tarayıcı, Yük bağlamalı düzen, Stereoskopik alım, Resim elemanı

LINEAR ARRAY (*PUSHBROOM*) IMAGING SYSTEMS

ABSTRACT

In this study, the linear array (pushbroom) scanners that have been used widely in the current generation of spaceborne imaging systems are described. After discussing the historical evaluation of these systems, the imaging sensors; e. g. French SPOT, German MOMS, Indian IRS and Japanese JERS satellites which have utilized this kind of imaging technique at the present day have been dealt with in detail. Lastly, the accuracy levels for mapping applications that are provided by these systems have been explained.

Key Words : Pushbroom scanners, Charge coupled devices, Stereoscopic coverage, Piksel

1. GİRİŞ

Geometrik açıdan bakıldığında, uzaydan uydu görüntülerini elde etmede kullanılan sistemler üç ayrı kategoride incelenebilir :

- Çerçeve görüntüleme sistemleri;
- Satır tipli tarayıcılar;
- Mikrodalga radar görüntüleyiciler.

Çerçeve görüntüleme sistemleri; görüntülenen alanın tümünü bir anda pozlayan sistemler olarak

tanımlanabilir. Çok genel bir örnek, herbir çerçevenin kamera obtratorü tarafından pozlandığı ve gizli görüntünün fotografik emülsiyon üzerine kaydedildiği hava kamerasıdır. Yerin uzaydan ilk yüksek çözünürlüklü görüntüleri 1965 yılında NASA (National Aeronautical and Space Administration) Gemini 4 uzay mekiğinde yer alan bu tip bir fotografik kamera ile çekilmiştir. 1973 yılında ardarda gönderilen üç ayrı Skylab denemesinde yer alan S190B ETC (Earth Terrain Camera) kamerası ile de yerin çok sayıda düşeye yakın stereoskopik fotoğrafları elde edilmiştir. Aslında yüksek performanslı bir keşif kamerası olan S190B ETC, yer piksel boyutu 5 ila 10

m arasında olabilen oldukça yüksek çözünürlüklü fotoğraflar üretmiştir (Colwell, 1983). ETC deneyinin başarısı sırasıyla 1983 ve 1984'de Amerikalılar tarafından fırlatılan uzay mekiklerinde yer alan ESA (European Space Agency)'nın ürettiği Metrik Kamera ve NASA'nın geliştirdiği Geniş Format Kamera'nın yapımına sebep olmuştur. Günümüzde bu kategorideki görüntüleyicilerle elde edilen fotoğrafların büyük bir çoğunluğu Rus kameraları ile çekilmiştir. Rusya, 1960'dan beri fotoğrafik sistem tabanlı birçok farklı serideki insanlı ve insansız platformu, uzaktan algılanmış veri toplamak için uzaya yerleştirmiştir. Rusya'nın Cosmos, Soyuz, Salyut, RESURS ve MIR platformlarında bulunan KFA-1000, KFA-3000, KWR-1000, KATE-200, MR-4 ve TK-350 kameraları ile elde edilen fotoğrafik görüntüler piyasada mevcut haldedirler.

Optik-mekanik ve doğrusal dizin (pushbroom) tasarımlar olarak sınıflandırılabilen satır tipli tarayıcılar, platformun ileri hareketi ile ardışık olarak sağlanan tek ve devamlı şerit halindeki görüntüyü pozlar. Optik-mekanik satır tarayıcılarda tarama işlemi, mekanik olarak dönen veya salınan ayna ile gerçekleştirilir. Halbuki pushbroom sistemlerde görüntülen alanın taranması diye bir olay yoktur. Aksine, görüntünün her bir satırı aletin odak düzlemine yerleştirilmiş tek boyutlu doğrusal CCD (Charge Coupled Devices) detektör dizininin üzerine direk olarak görüntülenir. Daha sonra, her bir satır elektronik olarak taranır. Optik mekanik tarayıcılara en iyi örnek, Landsat MSS ve TM algılayıcılarıdır. Pushbroom sistemler ise SPOT HRV, Hint IRS-1A, 1B, 1C ve 1D, Japon JERS-1 ve Alman MOMS-01, MOMS-02 ve MOMS-2P uydularında kullanılmıştır.

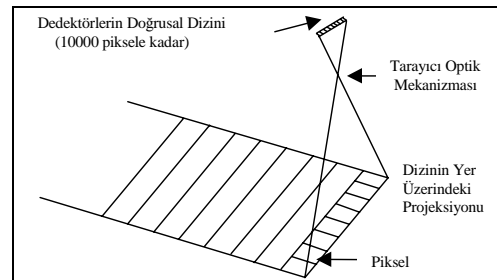
Mikrodalga radar görüntüleyicilerde, üzerinde anten ekli verici olan uydu platformu tarafından gönderilen mikrodalga enerjisi, yer yüzeyinden yansdıktan sonra platformda mevcut alıcı sayesinde geri alınır. Sistem aslında gönderilen (yayılan) ve alınan (yansıtılan) sinyaller arasında geçen zamanı ölçer ve bu zaman değerlerini ardından uzaklık cinsine dönüştürür. Böylece sistemin objelere olan uzaklığının bir kaydı olan çok değişik türde bir görüntü elde edilmiş olur. 1980'li yılların başlarında Seasat SIR-A ve -B denemeleri ile elde edilen radar görüntülerinden sonra, üretim 1991 yılında ESA'nın ERS-1 SAR (Synthetic Aperture Radar) denemesi ile elde edilenlerle devam etmiştir. Hemen ardından 1992 yılında Japon JERS-1 SAR yörüngeye yerleştirilmiştir. 1994 yılında, SIR-C/X SAR on günlük deneme için uzay mekiğinde yer almıştır. 1995 yılında ESA, ERS-1

ile çok benzer bir ikinci uydu ERS-2'yi yörüngeye yerleştirmiştir.

Yukarıda verilen görüntüleme sistemleri arasında, pushbroom tarayıcılar son teknoloji uydu sistemlerinde uzaktan algılanmış veri elde edilmesinde yoğun olarak kullanılmaktadır. Bu durum, sağladıkları görüntünün dijital formda olması, yüksek uzaysal çözünürlüğe ve basit geometrik yapıya sahip olmalarından kaynaklanmaktadır. Bu çalışmada, ilk önce pushbroom teknolojisinin geometrik yapısı ve tarihsel gelişimi üzerinde durulacak. Daha sonra, bu teknolojiyi kullanan son yer gözlemleri uydularından ayrı ayrı bahsedilecektir. Yazı, bu uyduların harita yapım amaçlı kullanıma uygunluğunun değerlendirilmesinin farklı fotogrametrik kriterler dikkate alınarak yapılmasıyla tamamlanacaktır.

2. DOĞRUSAL DİZİN VEYA PUSHBROOM TARAYICI SİSTEMLER

En basit biçimiyle (Şekil 1), pushbroom görüntüleme sistemi odak düzleminde yerleşik detektörlerin bir doğrusal dizinini içermektedir. Bu dizinin yeryüzüne izdüşümü, uzun kenarı uçuş yönüne dik yönde olan oldukça dar bir dikdörtgen oluşturur. Platform veya uydunun ileri hareketi, görüntüleme sisteminin yörünge izi doğrultulu (along-track) taramasını sağlarken yörünge izine dik doğrultudaki (cross-track) tarama doğrusal dizinin yeryüzüne izdüşümü ve bunun sonucu oluşan veri-çıkışı ile sağlanır. Doğrusal dizin görüntüleme sistemi normalde çok sayıda CCD detektör içermektedir. Şekil 1'den görülebileceği gibi; her bir detektör elemanı (piksel), herhangi verilen tarama satırı boyunca tek bir yer çözünürlük hücresindeki enerjiyi algılamaya vakfedilmiştir. Her bir tarama satırı için veri, dizin boyunca her bir elemanı örnekleme yoluyla elektronik olarak doğurulur (böylece tarama aynası ihtiyacı ortadan kalkar).



Şekil 1. Tek boyutlu doğrusal ve iki boyutlu matris CCD dizinleri

Doğrusal dizini oluşturan her bir detektörün boyutu, merceğin odak uzaklığı ile birlikte, tek bir piksel karşılık gelen her bir yer elemanının boyutunu belirler. Multispektral pushbroom tarayıcılarda, algılayıcının her bir spektral bandı veya kanalı kendi doğrusal dizinini ve optik filtresini gerektirmektedir.

Doğrusal dizinlerin kullanımı ayna tarama esasına dayanan optik-mekanik sistemlere göre belirgin avantajlara sahiptir. Bunlar;

- 1) Daha yüksek uzaysal ve radyometrik çözünürlük sağlayabilmeleri,
- 2) Her bir tarama satırının kaydında detektör elemanları arasında bulunan sabit ilişkiden dolayı daha yüksek geometrik bütünlüğe sahip olmaları,
- 3) Her bir tarama satırı boyunca olan geometrinin hava kamerasınıninkine benzemesi,
- 4) Ağırlık ve boyut bakımından küçük olmaları ve operasyonları için az güç gerektirmeleri, ve
- 5) Hareketli parçalara sahip olmadıklarından yüksek güvenilirlik ve uzun ömre sahip olmalarıdır.

Optik - mekanik tarayıcılara göre doğrusal dizinin bir dezavantajı, geometrik ve radyometrik olarak yüksek doğruluklu kalibre edilmesi gereken çok sayıda detektöre sahip olmasıdır. Diğer bir sınırlama, kullanılan CCD detektörlerin nispeten sınırlı spektral duyarlılıklarıdır. Yakın kızılötesi bölge ötesinde dalgaboylarına duyarlı CCD-tabanlı dizinler mevcut olmasına rağmen bunların çözünürlüğü görünür bölgede çalışan sistemlere göre oldukça düşüktür (Büyüksalih, 1997).

3. PUSHBROOM TEKNOLOJİSİNİN TARİHSEL GELİŞİMİ

İlk pushbroom görüntüleme sistemi, 1932 yılında kullanılan ve "Sonne Kamera" olarak bilinen şerit kameradır. Bu görüntüleme sistemini uçakta kullanma fikri, Amerikan Hava kuvvetlerinden General Goddard'dan gelmiştir. Daha sonra teknolojisinde meydana gelen gelişmeler sonucu bu kameralar II. Dünya Savaşında düşük-irtifalı ve yüksek-hızlı keşif uygulamalarında kullanılmıştır. 1960 yılında Chicago Hava Endüstrisi tarafından Amerikan Hava Kuvvetleri için üretilen KA-18A şerit kamerası bu sistemlere örnektir.

Şerit kameralarda, çerçeve kameraların aksine odak düzlemi dar bir yarık ile sınırlıdır. Platform görüntülen alan üzerinde hareket ettikçe, filmin

yarığın izin verdiği kadar kısmı pozlanmaktadır. Yeryüzünün fotoğraf film üzerine ardışık olarak pozlanmış dar şeritlerinin birleştirilmesiyle uzun ve devamlı formda görüntü oluşturulmuş olur. Stereoskopik alım, biri ileri diğeri geri bakışlı iki mercekli donatılmış kamera kullanılarak sağlanabilir. Böylece merceklerin biri objeyi uçak üzerinden geçmeden önce fotoğraflarken diğeri onu uçak geçtikten sonra pozlamaktadır.

Ancak, 1950 ve 60'li yıllarda şerit kamera görüntülerinin harita yapımında kullanımı üzerine oldukça az yayın yapılmıştır. Masry (1969)'a göre, bu ilgi eksikliği şerit kameraların dinamik yapısından kaynaklanmaktadır. Bu yapı nedeniyle, dış yöneltme elemanları şerit boyunca devamlı şekilde değişmektedir. Bu durum, bu tip fotoğrafçılığı oldukça karmaşık yapmakta ve bunun klasik fotoğrafçılığa göre kullanımını zorlaştırmaktadır. Ayrıca o yıllarda şerit kamera görüntülerini harita üretimi amaçlı değerlendirebilecek ve onun değişken dış yöneltme elemanlarını belirleyebilecek fotogrametri aleti olmamasının da bunda etkili olduğu belirtilmelidir.

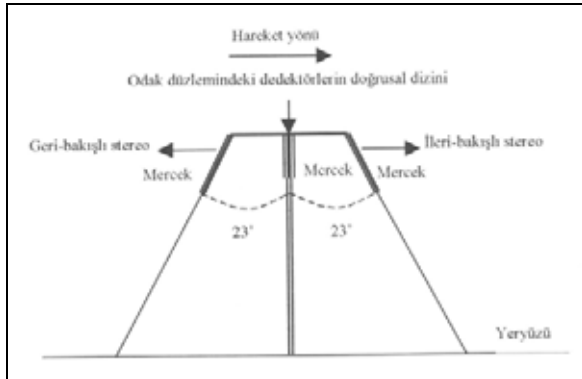
Daha sonraları, fotogrametrik aletlerde meydana gelen gelişmeler araştırmacıları şerit görüntüleri harita yapım amaçlı kullanma yönünde ciddi olarak düşünmeye itmiştir. Bilgisayar-tabanlı analitik değerlendirme aletleri ile görüntü ve model koordinatlarının hesabı ve devamlı olarak değişen dış yöneltme parametrelerinin değerlendirilmesi mümkün olmuştur. Bu gelişme, şerit kamera fotoğrafçılığı üzerindeki ilgiyi yenilemiş ve Konency (1972)'de şerit fotoğrafların geometrisinin detaylı analizi diğer sistemlerle karşılaştırmalı olarak yapılmıştır. Ayrıca, stereoskopik şerit fotoğrafların analitik değerlendirmesi Case (1966), Masry (1969) ve Derenyi (1973) tarafından araştırılmıştır.

Hareketli parça içermeyen CCD doğrusal dizinlerin geliştirilmesiyle şerit kameraların yerini bu yeni tip algılayıcı almaya başlamıştır. CCD-tabanlı görüntüleme sistemlerinin hızlı gelişimi ve dijital görüntü üretmesi bilim adamlarını bu görüntüleyicileri uzayda kullanma yolunda ciddi olarak düşünmeye itmiştir. Doğrusal dizinler, görüntü verisini uydudan yeryüzüne doğrudan iletilebildiği için yerkürenin uzaydan üç boyutlu veya iki-boyutlu haritasının yapımı ihtimalini ortaya çıkarmıştır.

1970'li yıllarda doğrusal dizin CCD sistemleri kullanılarak yapılan deneyler günümüzde DASA (Deutsche Aerospace AG) olan Alman MBB (Messerschmitt-Bolkow-Blohm) firmasınınca

gerçekleştirilmiştir. Bunun sonucu, 1978 yılında havadan tek satırlı pushbroom tarayıcı EOS ile çekilmiş ilk görüntüler elde edilmiştir. Ancak bu çalışmadan önce Amerikalıların askeri keşif amaçlı gerçekleştirdiği çalışmalar vardır. Gerçektende çok sayıda Amerikan keşif uyduları bu teknolojiye önyak olmuşlardır fakat bunlar hakkında çok az detay bilinmektedir.

1977'de ilk sivil stereoskopik görüntüleme uydusunu tanımlamak için NASA ve USGS (United State Geological Survey) tarafından ciddi çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Doğrusal dizin teknolojisinden Landsat ve diğer uzay görüntüleme sistemlerinden kazanılan tecrübelerle birleştirilmesi sonucu, 1981 yılında Itek firması USGS için along-track stereoskopik görüntüleme sistemi MAPSAT'ı tanımlamıştır (Şekil 2). Bu sistem biri düşey (nadir) ve diğer ikisi eğik (düşeyden $\pm 23^\circ$ eğik olarak yerleştirilmiş ileri ve geri-bakışlı) üç doğrusal dizin algılayıcıyı içerir. İleri ve geri bakışlı görüntüler baz-yükseklik oranı yaklaşık 1.0 olan görüntüler sağlarken, düşeyi ya ileri yada geri-bakışlı görüntü ile beraber kullanmak, baz-yükseklik oranı yaklaşık 0.5 olan stereoskopik görüntü sağlamaktadır.



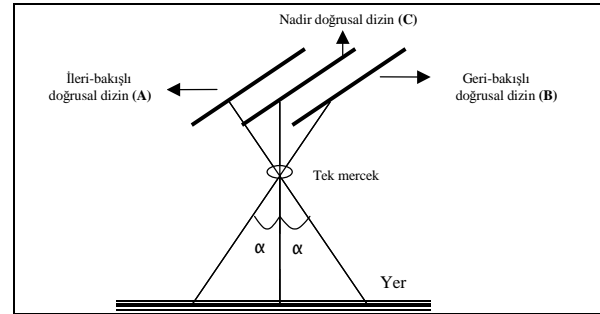
Şekil 2. MAPSAT sensör konfigürasyonu

MAPSAT ile aynı zamanda NASA'nın JPL (Jet Propulsion Lab)'ı benzer proje olan stereosat'ı başlatmıştır. Bu proje, yeryüzeyinin stereoskopik kaplamasını üç doğrusal dizinli görüntüleme sistemi ile üretme yeteneğine sahip uydu misyonunu önermekteydi. Ancak, MAPSAT ve Stereosat projeleri finansal kaynak bulamamaları nedeniyle devam ettirilememişlerdir.

Almanyada EOS hava görüntüleme sisteminin başarısından sonra Alman BMFT (German Federal Ministry of Research and Technology), MOMS (Modular Optoelectronic Multispectral Scanner)

pushbroom tarayıcısının uzay mekiğinden görüntü alımı amacıyla geliştirilmesi için çalışma başlatmıştır. MOMS-01 1983 ve 84 yıllarında yörüngeye iki defa yerleştirilmiştir. İkiside deneysel amaçlı olan bu misyonlarda sadece monoskopik görüntüler elde edilmiştir. Bu nedenle, MOMS-01 uydusu üç-boyutlu fotogrametrik değerlendirmelere izin vermemiştir. Sistemin kapasitesini genişletmek için Alman bilim adamları, Amerikalılar tarafından MAPSAT ve stereosat projeleri için geliştirilen üç doğrusal dizin fikrini uygulamaya koydular. Üç doğrusal dizinli tarayıcıları kullanmak için Almanyada iki ayrı fikir geliştirilmiştir:

- 1) İlk fikir, MAPSAT projesine benzer olarak üç farklı odak düzlemine sahip üç ayrı optik sistemle ileri, nadir ve geri-bakışlı görüntüler elde edilmesini kapsamaktadır (Şekil 2).
- 2) İkinci yaklaşım, tek bir optik sistemin odak düzlemine yerleştirilmiş paralel üç doğrusal dizinin kullanımını içermektedir. Buna göre, α geliş açısına sahip ışık ışınları A ve B doğrusal dizinleri tarafından algılanabilirken, nadir doğrultudan gelenler ise C doğrusal dizini üzerine odaklanırlar (Şekil 3).



Şekil 3. Tek mercek kullanan üç doğrusal dizinli tarayıcı konfigürasyonu

İlk fikir MOMS-02 için kullanılmışken, ikincisi MEOSS (Monocular Electro-Optical Stereo System) ve DPA (Digital Photogrammetric Assembly) hava tarayıcısında uygulanmıştır. Bütün bu sistemlerle along-track stereoskopik görüntüler çekilmiştir. MEOSS 1988 yılında Hint uydusuna yerleştirilmeye çalışılmış fakat başarısız olunmuştur. Bundan sonra MEOSS'un hava versiyonu işleme konulmuştur. 1993'de tekrar MEOSS diğer bir Hint uydusuna yerleştirilmiş fakat bu seferde kaybolmuştur. DPA ise günümüzde bir hava platformunda işletilmektedir.

1980 yılında, Fransada doğrusal dizin teknolojisini kullanarak uydu programı geliştirmek için ciddi

araştırmalara başlamıştır. CNES (Centre National d'Etudes Spatiales) hem monoskopik hemde cross-track stereoskopik görüntü alımı amacıyla tasarlanmış SPOT (Système Probatoire d'Observation de la Terre)'ü geliştirmiştir. Bu tasarım, HRV (High Resolution Visible) algılayıcısı adı verilen ve odaklanabilen doğrusal dizin sistemleri kullanmaktadır. 1986'da SPOT-1 yörüngeye yerleştirilmiş ve pushbroom tarayıcı kullanan ilk sivil yer gözlemleri uydusu olmuştur. O zamandan beri, 3 tane daha SPOT serisi yörüngeye yerleştirilmiştir. SPOT'un stereoskopik modunda yüksek baz-yükseklik oranına (1.0) sahip stereoskopik görüntü üretilebilmektedir.

1988 ve 1991'de, Hindistan IRS-1A ve IRS-1B isimli iki uzaktan algılama uydusunu yörüngeye yerleştirmiştir. Bu iki uyduda sadece monoskopik görüntü üreten LISS (Linear Imaging Self Scanner) isimli CCD-tabanlı üç tane pushbroom tarayıcı taşımaktadır. 1995 yılının sonlarında ve 1997 yılı Eylül ayında Hindistan sırasıyla IRS-1C ve -1D isimli uyduları yörüngeye yerleştirmiştir. Bunlarda pushbroom tarayıcı çalıştırmakta ve cross-track stereoskopik görüntü elde edimine izin vermektedirler.

1992 yılında, Japonya OPS (Optical Sensor) pushbroom tarayıcısını JERS (Japanese Earth Resource Satellite) -1 uydusu üzerine yerleştirmiştir. Herbir pikseli 18.3 m x 24.2 m dikdörtgen formata sahip olan 8 doğrusal dizinli algılayıcı içeren bu sistem oldukça düşük baz-yükseklik oranı (0.3) ile along-track stereoskopik görüntü elde etme yeteneğine sahiptir.

1993 yılında, MOMS-02 sadece on günlüğüne deneysel amaçlı olarak uzay mekiğinde işletilmiştir ve sabit baz-yükseklik oranı (0.8) ile yeryüzeyinin sınırlı bir kısmının stereoskopik görüntülerini elde etmiştir. Daha geniş kaplama sağlamak için MOMS-02 yenilenmiş ve MOMS-2P olarak 1996 yazında başlayan Rus MIR uzay istasyonunun PRIRODA modülüne yerleştirilmiştir. Fakat, Haziran 1997'de MIR istasyonunda meydana gelen problemlerden dolayı bundan beklenen başarı alınamamıştır. Gerekli onarımlar yapıldıktan sonra, 1998 yılının sonlarına doğru MOMS-2P tekrar görüntü alımına başlayabilmiştir.

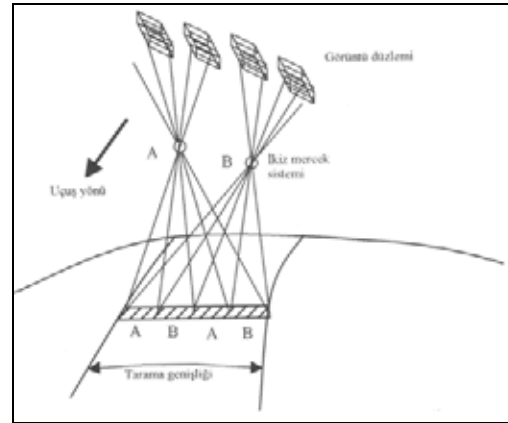
Amerikada, birkaç ticari firma kendilerinin yüksek çözünürlüklü pushbroom görüntüleme sistemini yörüngeye yerleştirmeyi planlamaktadır. EarthWatch Inc., Orbimage Inc. ve Space Imaging Inc. 1997'den

itibaren kendi sistemlerini yörüngeye yerleştireceklerini anons etmişlerdir.

4. MOMS-01

MOMS-01, iki uzay mekiğinde deneysel amaçlı olarak işletilmiştir. Bu misyonların ilki Haziran 1983'de, diğeri Şubat 1984'de gerçekleştirilmiş ve bunlarla CCD doğrusal dizin teknolojisinin uzay şartlarında geçerliliğinin gösterilmesi amaçlanmıştır.

MOMS-01 optik sistemi pushbroom prensibini kullanan dört tane doğrusal CCD dizini kullanmaktadır. Bu dizinlerin herbiri, 1728 pikseli Reticon CCD detektörleri içermektedir (Şekil 4). 16µm'ye eşit piksel boyutu 300 km'lik yörünge yüksekliğinden yerde 20 x 20 m'lik alanı kaplamaktadır. Algılayıcı ile sadece monoskopik görüntü elde edilebilmekte ve 6912 (1728 x 4) piksellik görüntü şeridi ile yer üzerinde yaklaşık 140 km (6912 x 20 m)'lik genişlik örtülmektedir.



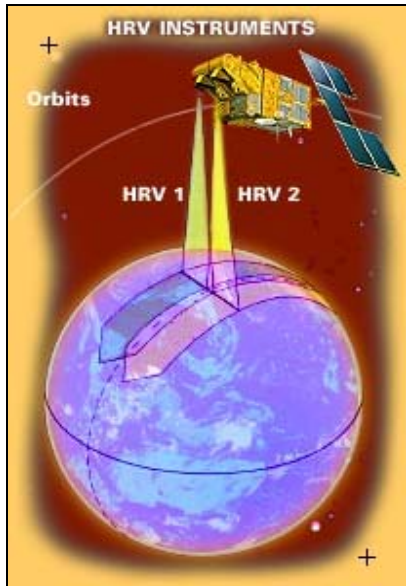
Şekil 4. MOMS-01 uydusunun optik sisteminin geometrik yapısı

14 günlük iki MOMS-01 uzay misyonu boyunca 28.5° Kuzey 28.5° Güney enlemleri arasındaki alanı kapsayan toplam 26 görüntü serisi kaydedilmiştir. Bu iki misyon, MOMS-01 fikrinin performans kapasitesini tamamıyla ortaya koymuştur. Böylece daha gelişmiş sistemin yerleştirilmesi için gerekli şartlar görülmüştür.

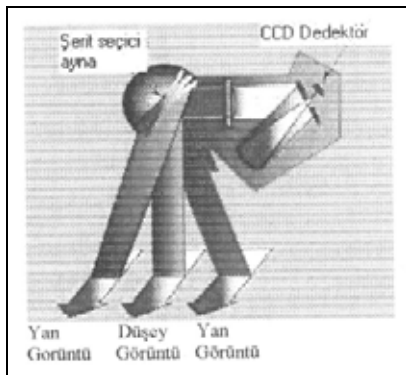
5. SPOT

Dairesel, yakın-kutupsal, 832km yükseklikli güneş-eşzamanlı yörüngeye ve 98.7° yörüngesel eğime sahip

SPOT-1, 21 Şubat 1986'da yörüngeye yerleştirilmiştir. SPOT uydusu, iki tane aynı HRV görüntüleme sistemi ve bunlara ekli kaydedicileri içermektedir. Herbir HRV algılayıcısı (Şekil 5), iki ayrı algılama modundan birinde pushbroom tarayıcı olarak işletilmek üzere tasarlanmışlardır. Bunlar; 10 m piksel boyutlu ve 6000 detektör eleman dizimli pankromatik (siyah-beyaz) P-modu ve 20 m piksel boyutlu ve 3000 detektör eleman dizimli multispektral (renkli kızılötesi) XS-modudur. HRV algılayıcısının optik sistemi 1082 mm odak uzaklıklı ve f/3.5 açıklıklı teleskop içermektedir (Şekil 6). Yer yüzeyinden gelen yansıtılmış güneş radyasyonu şerit-seçici ayna sayesinde teleskop girişinde 90° döndürülür. Yer komutu ile her iki yönde döndürülebilen bu ayna 0.6°'lik adımlar halinde düşeyden 27°'ye kadar görüş açısı sağlamaktadır.



Şekil 5. HRV algılayıcıları



Şekil 6. HRV algılayıcısının optik sistemi

Bir HRV aletinin görüş açısının mutlak değeri 7.5°'den büyükse eğik bakış durumundadır. Bu nadir-ötesi yetenek kullanılarak, her iki sistem uydunun yer izinden 475 km uzaktaki alanları görüntüleyecek şekilde eğilebilirler. Bu sayede tarama genişliği 60km'den 80 km'ye çıkarken ve yeniden geçme zamanı da 26 gün yerine 5 gün'e inecektir. Fotogrametriciler için büyük önem taşıyan stereoskopik alım, HRV'nin nadir-ötesi bakış yeteneği sonucu mümkün olabilmektedir. İki ardışık gün boyunca, stereoskopik baz uzunluğu uçuş yüksekliğinin yarısıdır. $\pm 27^\circ$ maksimum eğiklik açısını kullandığında baz/yükseklik oranı yaklaşık 1.0 olacaktır.

5. 1. SPOT ve Geleceğe Dönük Planlamalar

SPOT-1 ile aynı özelliklere sahip SPOT-2 ve -3, sırasıyla Ocak 1990 ve Eylül 1993'de yörüngeye yerleştirilmişlerdir. SPOT-3'ün görüntü kaydetme mekanizması bozulmuş olmakla birlikte görevini sürdürmektedir. SPOT-2 ise halen görüntü almına devam etmekte ve elde ettiği görüntüleri gerçek-zamanlı olarak yeryüzüne iletmektedir. Önceki SPOT uyduları ile hemen hemen aynı görüntüleme kapasitesi ve geometrik karakteristiklere sahip olan SPOT-4, 1998 yılı için planlanmış ve başarıyla yörüngeye yerleştirilmiştir. Bu uydudan gelen ilk görüntüler Amerikanın Tampa şehrinde 1998 yazında yapılan ASPRS (American Society of Photogrammetry and Remote Sensing) kongresinde sergilenmiştir. SPOT-5 projesi ise 4 Ekim 1994'de Fransız Hükümeti tarafından onaylanmıştır. SPOT-1, -2, ve -3 gibi 830 km yükseklikteki kutupsal, güneş eş-zamanlı aynı yörüngeye Ariane taşıyıcısı tarafından yerleştirilecektir. Fakat SPOT-5, SPOT-1,-2 ve -3'deki iki HRV algılayıcısı yerine üç tane aynı HRG (High Resolution Geometric) aleti taşıyacaktır. Önceki SPOT serisi uydularla karşılaştırıldığında, SPOT-5'de geometrik kapasiteyi arttıracak önemli değişiklikler mevcuttur. Bunlar şöyle sıralanabilir:

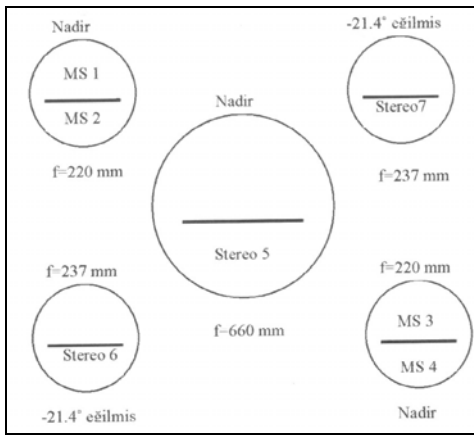
- 1) Pankromatik modda kullanılan yer piksel boyutu 5m olacaktır (önceki tasarımlarda 10 m).
- 2) Multispektral mod hem 20 m hemde 10 m'lik yer piksel boyutu üretecek (önceki SPOT serisi uydularda 20 m).
- 3) Stereoskopik görüntüleme along-track (ileri ve geri-bakışlı görüntüler) konfigürasyonu sayesinde gerçekleştirilecektir.
- 4) Herbir HRG aleti, optimum tekrar geçme zamanı için cross-track yeteneğe sahip olacaktır.

SPOT-5'in 2001 yılında yörüngeye yerleştirilmesi planlanmıştır ve önceki SPOT serileri gibi İsveç ve Belçika ile işbirliği içinde geliştirilecektir.

6. MOMS-02

MOMS-02, 26 Nisan ve 6 Mayıs 1993 tarihleri arasında geçen 10 gün boyunca uzay mekiği STS-55'deki Alman Spacelab D2 misyonunda deneysel amaçlı olarak uçurulmuştur. Sistem; 296km yükseklik, 28.5° yörüngesel eğimli uzay mekiğinde işletilmiştir. 10 gün boyunca 48 veri serisi kaydedilmiştir. Bunun sonucu, ana test alanı Ekvatoryal bölge olacak şekilde belirlenmiştir (Konency, 1995).

MOMS-02 pushbroom tarayıcısının teknik nitelikleri fotogrametrik ve tematik bilimlerdeki ihtiyaçlara göre düzenlenmiştir. Farklı kullanıcı ihtiyaçlarını karşılamak için, MOMS-01 ile başarısı ispatlanan modüler yapı seçilmiştir. Optik sistem 5 tane mercekten oluşmaktadır. Bunların üçü (biri nadir, diğer ikisi ileri ve geri-bakışlı olarak) along-track stereoskopik görüntü alımı yapacak şekilde tasarlanmıştır. Geri kalan iki ise görünür ve yakın-kızılötesi arasındaki sahada multispektral görüntüler elde etmektedir (Band 1, 2, 3, 4 olarak numaralanmış 4 kanal halinde). Şekil 7, MOMS-02'nin optik yapısını göstermektedir. 660 mm odak uzaklıklı nadir bakışlı merkezi mercek (band 5), 296 km yörüngesel yükseklikten 4.5 m yer piksel boyutu veren oldukça yüksek çözünürlüklü görüntü alımı yapmakta ve sistemin göbeğini teşkil etmektedir. Yeterli ve yüksek çözünürlüklü tarama genişliği elde etmek için, iki tane doğrusal detektör dizini odak düzleminde optik yolla birleştirilmiştir.



Şekil 7. MOMS-02'nin optik yapısı

237.2 mm odak uzaklıklı diğer iki mercek (band 6 ve 7), uçuş yönüne göre sırasıyla + 21.4° ve - 21.4° eğilebilirler. Böylece bu iki mercek, merkezi merceklerle birlikte stereoskopik görüntü elde etmeyi mümkün kılmaktadır. MOMS-02, ileri ve geri-bakışlı mercekler kullanıldığı zaman 0.8 gibi sabit bir baz/yükseklik oranı sağlar. Bu merceklerin odak uzaklıkları, yüksek çözünürlüklü kanalın yer piksel boyutu (4.5 m x 4.5 m) ile iki eğilmiş stereoskopik kanalın yer piksel boyutu (13.5 m x 13.5 m) arasında 1:3 oranı verecek şekilde seçilir.

Yüksek çözünürlüklü kanalın tarama genişliği 37 km, diğerlerinin ise 78 km'dir. İki stereoskopik kanalın 21.4° bakış açısı nedeniyle, bu kanalların yer yüzeyi üzerinde görüntü genişlikleri nadir kanalından yaklaşık 120 km ayrılmıştır. MOMS-02, SPOT uydusundaki gibi ikinci bindirilmiş görüntüyü almak için günler, haftalar hatta aylar beklemek yerine bağlantılı stereoskopik görüntüleri 40sn aralıklarla çekmektedir. Böylece MOMS-02, günün diğer bir zamanında veya diğer bir mevsimde farklı güneş yüksekliğinde poz miktarında meydana gelecek değişiklikten dolayı görüntüler arasında oluşacak radyometrik farklılığı ortadan kaldırır.

220 mm odak uzaklıklı geri kalan iki mercekte, toplam 4 kanalın multispektral görüntülenmesini sağlamaktadır. Herbir multispektral tarayıcının odak düzleminde kendilerine özgü filtreleri ile iki tane algılayıcı vardır. Bu tarayıcıların odak uzaklığı, eğilmiş stereoskopik kanalların piksel boyutuna eşit yer pikseli üretecek şekilde seçilmiştir.

6. 1. MOMS-2P

Spacelab D2'nin başarılı deneysel misyonundan sonra, MOMS-02 yeniden düzenlenmiş ve 1996 yazında Rus uzay istasyonu MIR'in PRIRODA modülüne yerleştirilmek üzere uzaya gönderilmiştir. Fakat, yukarıda bahsedilen problemlerden dolayı ancak 1998 yılının sonlarında görüntü alımına başlayabilmiştir.

MOMS-2P, ± 51.6° enlemleri arasında 18 aylık zaman diliminde 2 ila 7 gün tekrar oranında veri elde etmektedir. Sayısal arazi modeli üretmek amacı ile kullanılacak yüksek prezisyonlu görüntü verisini desteklemek için gerekli konum ve açılal parametreleri sağlayacak GPS seti bulunmaktadır. MOMS-02 PRIRODA misyonunun D2 ile karşılaştırıldığında başlıca avantajları (Seige, 1993):

- 1) Uzun zamanlı gözlem kapasitesine sahip olması,
- 2) 51.6° kuzey ve güney enlemleri arasındaki geniş bölgeyi kapsamamasıdır.

7. IRS-1A, -1B, -1C, -1D UYDU SİSTEMLERİ

İlk Hint uzaktan algılama uydusu IRS-1A, yer gözlemi amaçlı olarak Mart 1988'de yörüngeye yerleştirilmiştir. Hindistan üzerinde uzaktan algılama verisinde devamlılık sağlamak için IRS-1A ile benzer ikinci işletimsel Hint uzaktan algılama uydusu IRS-1B Ağustos 1991'de uzaya gönderilmiştir.

IRS-1A ve 1B; 904km yükseklikli, 99.5° eğimli kutupsal ve güneş eş-zamanlı yörüngeye sahiptirler. Bu sistemler için yörüngesel periyod 103.2 dakika ve tekrar devri 2 gündür. Yerin görüntüsünü çekmek için, bu uyduların ikisi de CCD detektör dizinleri ile donatılmış ve LISS-I, LISS-IIA ve LISS-IIB olarak adlandırılan üç multispektral pushbroom görüntüleyici kullanılmaktadır. LISS-I; 72.5 m yer piksel boyutlu ve 148 km tarama genişlikli veri sağlarken, LISS-IIA ve IIB; 36.25 m yer piksel boyutlu 74 km tarama genişlikli veri sağlamaktadır.

IRS-1A ve 1B ilk jenerasyon uyduların başarılı operasyonundan sonra Hindistan Aralık 1995'de IRS-1C'yi yörüngeye yerleştirmiştir. Bu uyduda; 817 km yükseklikli, güneş eş-zamanlı, dairesel, 98.69° eğimli ve 20 gün tekrarlı bir yörüngeye sahiptir. Bu uyduda birisi pankromatik bantta diğer ikisi multispektral bantlarda işletilen üç tane kapasiteleri artırılmış tarayıcı kullanılmaktadır. Pankromatik algılayıcı, 6m yer piksel boyutlu ve 70 km tarama genişlikli görüntü sağlamaktadır. Ayrıca, IRS-1C nadir-ötesi bakış yeteneği ile, hava koşullarına bağlı olarak, yaklaşık 5 gün içinde yerin cross-track stereo-görüntülerini alma imkanına sahiptir. Nadir-ötesi bakış açısı en fazla $\pm 26^\circ$ olacak şekilde yerden kontrol edilebilir. LISS-III, görünür ve yakın kızılötesi bantlara ek olarak orta kızılötesi bantı barındıran ilk multispektral algılayıcıdır. LISS-III 23.5 m yer piksel boyutlu ve 148km tarama genişlikli görüntü sağlamaktadır. Üçüncü algılayıcı WIFS (Wide Field Sensor) 188 km yer piksel boyutlu ve 770 km tarama genişlikli görüntü sağlamakta ve iki görünür bantta işletilmektedir.

Uyduda yerleşik bulunan kayıt mekanizması, IRS-1C'ye yerküre üzerinde Hindistan dışındaki alanların görüntüsünü kaydetme imkanı verir ve veriyi hem Hindistan'daki hem de diğer yerdeki alıcı

istasyonlara nakleder. Hindistan son olarak IRS-1C ile aynı özelliklere sahip IRS-1D'yi 1997 yılı Eylül ayında yörüngeye yerleştirmiştir.

8. JERS-1 OPS SİSTEMİ

JERS-1, Japon ulusal uzay dairesi NASDA ile Ticaret ve Endüstri bakanlığı MITI tarafından gerçekleştirilen ortak projedir ve Şubat 1992'de H-I roketiyle 570km yüksekliğindeki yörüngesine yerleştirilmiştir. Bu uyduda hem yapay açıklıklı radar SAR ve OPS isimli optik algılayıcıyı taşımaktadır. Ayrıca, yer istasyonlarının yokluğunda doğacak veri kaydı problemini ortadan kaldırmak için veri kaydı mekanizmasına sahiptir.

OPS yeryüzeyini gözlemlemek için 8 tane doğrusal dizin algılayıcı barındırır. JERS-1 uydusu ile OPS sisteminin özellikleri Tablo 1 ve 2'de verilmiştir.

Tablo 1. JERS Uydusunun Özellikleri

Yükseklik	570 km
Eğim	98°
Period	96 dakika
Boyut	93 x 183 x 316 cm ³
Ağırlık	1400 kg

Tablo 2. OPS Sisteminin Özellikleri

Band	1	2	3	4
(μm)	0.52-0.60	0.63-0.69	0.76-0.86	0.76-0.86
Band	5	6	7	8
(μm)	1.60-1.71	2.01-2.12	2.13-2.25	2.27-2.40
I FOV	18			
Tarama genişliği	75 km			
Stereoskopik açı	15.33°			
B/H	0.3			
Yer piksel boyutu	18.3 m x 24.2 m			

15.33° ileri-bakışlı band 4 hariç, OPS sensörlerinin hepsi nadir bakışlıdır. Sensör 3 ve 4, 0.76 μm ile 0.86 μm dalgaboyları arasındaki yakın kızılötesi bantta işletilmekte ve kombinasyonları along-track stereoskopik görüntü sağlamaktadır. MOMS-02'da bahsedildiği gibi, bu çeşit stereoskopik görüntü alım tasarımı iyi stereoskopik çift oluşturma imkanını artırma avantajını getirmektedir. Ancak OPS, nadir ve ileri bakışlı merceklerin kombinasyonunu kullanılmaktadır. Bu nedenle bu sistemle üretilen stereo-çiftin baz-yükseklik oranı (0.3), $\pm 21.4^\circ$ ve $\pm 27^\circ$ eğik bakış açısı kullanarak görüntü elde eden MOMS-02 (0.8) veya SPOT (1.0) uydularınınkinden daha iyi değildir.

9. YENİ AMERİKAN TİCARİ GÖZLEM UYDULARI

Yakın gelecekte uzay teknolojisindeki durum, cross ve along-track konfigürasyonların her ikisini kullanabilen ve 1 ila 3 m yer piksel boyutu ile yüksek çözünürlük veren Space Imaging EOSAT (IKONOS1), EarthWatch (EarlyBird ve QuickBird) ve ORBIMAGE (OrbView) gibi ticari yer gözlemleri uyduları ile

tamamıyla değişmeye haizdir. Onların ana karakteristikleri, varolan uydu ve tarayıcı sensörlerle (SPOT, IRS-1C/D, MOMS, vb.) birlikte Tablo 3’de verilmiştir. Stereoskopik alım yeteneğinin yanısıra bu sistemler orta ölçekli hava fotoğrafının verdiği çözünürlüğü ile karşılaştırılabilecek ayırma gücü veren görüntüler üretebileceklerdir. Ayrıca, bunlar sahip oldukları yüksek baz-yükseklik oranları ile DEM üretimi için yüksekliklerin daha doğru düzeyde belirlenmesini sağlayacaklardır.

Tablo 3. Yeni Amerikan Ticari Uyduları ve Pushbroom-Tabanlı Uzay Görüntüleme Sistemlerinin Ana Özellikleri

Tarayıcı Sistem	Sensör Dizin Tipi	Yörünge Yüksekliği (km)	Tarama Genişliği (km)	Yer Kaplaması (km)	Yer Piksel Boyutu (m)	Operasyon Modu		Yörünge Eğimi	B/H Oranı
						Along Track	Cross Track		
SPOT	Doğrusal	822	60	60 x 60	10	Hayır	± 27°	98.7°	1.0
IRS-1C/D	Doğrusal	817	70	70 x 70	6	Hayır	± 26°	98.7°	1.0
MOMS-02	Doğrusal	296	78	78 x 78	13.5	± 21.4°	Hayır	28.5°	0.8
MOMS-2P	Doğrusal	380/405	97/105	100 x 100	18	± 21.4°	Hayır	51.6°	0.8
OPS	Doğrusal	570	75	75 x 75	18 x 24	0 / 15.3°	Hayır	98°	0.3
EarlyBird	Matris	475	6	6x6	3	±30°	±30°	97.3°	Değişken
QuickBird	Doğrusal	470	36	36x36	1	±30°	±30°	52°	Değişken
IKONOS 1	Doğrusal	680	11	11x11	1	±45°	±45°	98.1°	Değişken
OrbView 3	Doğrusal	460	8	8x8	1	±45°	±45°	97.3°	Değişken

10. DOĞRUSAL DİZİN ALGILAYICILARIN HARİTA YAPIMI AMAÇLI ANALİZLERİ

Yukarıda verilen bilgiler ışığında, doğrusal dizin (pushbroom) teknolojisini kullanan uydu sistemlerinin harita üretim amaçlı olarak yapılacak analizlerinden şu sonuçlar çıkarılabilecektir:

- 1) Fransız SPOT sistemi 1 : 50000 ölçekli harita yapımı için yeterli konum doğruluğu sağlamakla birlikte, genelde 1 : 50000 ve 1 : 25000 ölçekli haritalarda bulunması gereken detayların çıkarılması için yeterli değildir.
- 2) Japon JERS-1 OPS sistemi orta-ölçekli harita yapımı gereklerini karşılayamaz. Bunun sebebi, düşük baz-yükseklik oranı (0.3) ve obje tanınabilirliği (35-50 m) düzeyidir.
- 3) Hint IRS-1C ve 1D uyduları ile elde edilen görüntüler, SPOT görüntüleri ile benzer geometriye sahip olmalarına karşın daha küçük (iyi) yer piksel boyutu (6 m) sağlarlar. Aynı SPOT gibi, bunlar da 1 : 50000 ölçekli harita için yeterli konum doğruluğu sağlarken, ana problem yeryüzündeki detayların çekilen görüntüler üzerinden çıkarılması ve yorumlanmasındadır.

- 4) Alman MOMS-02 pushbroom sisteminde üç doğrusal dizin (ileri, nadir ve geri-bakışlı) birlikte gözönüne alındığında, nadir-bakışlı görüntünün vereceği piksel boyutu 4.5m olduğundan, bu konfigürasyon 10m ila 12 m düzeyinde obje tanınabilirliği üretecektir. Böylece, 1 : 50000 ölçekli haritalar için yeterli olan doğruluk düzeyi sağlanacaktır. Fakat, bu durumda, MOMS-02 stereoskopik görüntüsü ile kaplanan tarama genişliği 78 km’den 37 km’ye (bütün ileri, nadir ve geri-bakışlı görüntüler gözönüne alındığında) düşecektir.
- 5) Yeni Amerikan ticari gözlem uyduları, 1 : 50000 ve 1 : 25000 ölçekli haritalar için gereken geometrik doğruluk düzeyini sağladığı gibi yeteri kadar görüntülerden detay-çıkarma imkanını da verecektir.

11. KAYNAKLAR

Büyüksalih, G. 1997. Geometric and Radiometric Calibration of Video Infrared Imagers for Photogrammetric Applications, 497 s. Ph. D Thesis, University of Glasgow.

Case, J. B. 1966. The Analytical Reduction of Panoramic and Strip Photography. *Photogrammetria*, 22 (4), 127-141.

Colwell, R. N. 1983. Manual of Remote Sensing, 240 s. American Society of Photogrammetry, Falls Church, Virginia, USA.

Derenyi, E. E. 1973. Orientation of Continuous Strip Imagery. *Photogrammetric Engineering*, 39 (12), 1329-1335.

Konency, G. 1972. Geometric Aspects of Remote Sensing. *International Archives of Photogrammetry*,

19 (4), 47.

Konency, G. 1995. Current Status and Future Possibilities for Topographic Mapping from Space. *EARSEL Advances in Remote Sensing* 4 (2), 1-18.

Masry, S.E. 1969. Analytical Treatment of Stereo Strip Photos. *Photogrammetric Engineering*, 35 (12), 1255-1262.

Siege, P. 1993. Status of the MOMS-02 Experiment on the Spacelab Mission D2. **Proceedings Workshop and Conference on "International Mapping from Space", ISPRS Working Group IV/2**, Hannover, 39-50.