Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University 41:2 (2026) 959-966

Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi
Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University
Elektronik / Online ISSN : 1304 - 4915
Basılı / Printed ISSN : 1300 - 1884

Forward motion compensation in earth observation satellite cameras via intentional mirror tilting

Ümit Yılmaz[1], Özgür Selimoğlu[2]*

[1]Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Sivas University of Science and Technology, 58000, Sivas, Türkiye
[2]Department of Energy Systems Engineering, Faculty of Engineering, Ankara University, 06830, Ankara, Türkiye

Highlights:

- Forward Motion Compensation (FMC) Method
- Intentional tilting of telescope's mirror
- Improvement of satellite camera exposure time

Keywords:

- High resolution earth observation satellite cameras
- Forward Motion Compensation (FMC)
- Korsch TMA
- Tilt mirror
- Exposure time

Article Info:

Research Article
Received: 05.05.2024
Accepted: 28.03.2026

DOI:

10.17341/gazimmfd.1478887

Acknowledgement:

This study was supported by Scientific and Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) under the Grant Number 222M439. The authors thank to TUBITAK for their supports

Correspondence:

Author: Özgür Selimoğlu
e-mail: ozgur.selimoglu@ankara.edu.tr
phone: +90 312 485 1605 / 5574

Graphical/Tabular Abstract

Earth observation satellites have to move continuously to remain in their orbits. This movement causes the image formed in the focal plane to move at a speed of approximately 7000 m / s during the exposure time. The effects of the tilt mirror method, in Figure A, as Forward Motion Compensation (FMC) method which is planned to be used to compensate the image motion occurring in the focal plane, are investigated.

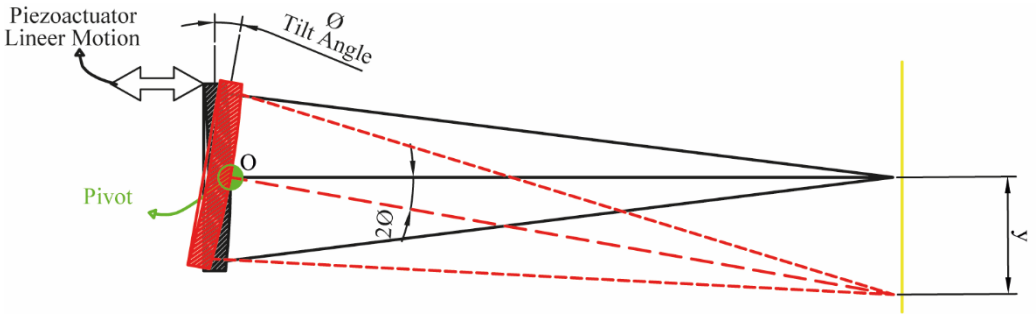


Figure A. Forward Motion Compensation with mirror tilting

Purpose: A mechanical method is proposed to compensate the Forward Motion of the satellite. The proposed method is based on applying an intentional tilt motion to the existing secondary mirror (M2) of a Korsch Three-Mirror Anastigmat (Korsch TMA) telescope. The objective is to evaluate whether the M2 mirror can be employed as an internal mechanical compensation element to mitigate image degradation caused by the forward motion of the satellite and thereby increase the allowable exposure time of the satellite camera. This study aims to determine the maximum applicable tilt angle, assess the limitations of the proposed method, and identify the operational range in which forward motion compensation can be achieved without causing significant degradation in imaging performance.

Theory and Methods: In this study, the tilt motion of the secondary mirror (M2) is theoretically investigated as a mechanical Forward Motion Compensation (FMC) approach to increase the allowable exposure time of a satellite camera. The proposed method was analyzed using Zemax OpticStudio software. Within this scope, different tilt angles were applied to the M2 mirror in the Korsch TMA optical model, and the corresponding variations in image quality were evaluated through optical simulations. Thus, the feasibility and limitations of using M2 tilt as an internal compensation mechanism were examined.

Results: The simulation results demonstrated that approximately 70-pixel image motion on the focal plane can be achieved by applying a ±42 arcsecond tilt motion to the secondary mirror. It was observed that the proposed tilt motion caused only an approximately 10% reduction in the Modulation Transfer Function (MTF) performance of the optical system, while the MTF values still satisfied the system requirement limit of 0.3. These results indicate that the proposed M2 tilt-based FMC approach can provide significant image motion compensation with limited degradation in optical performance.

Conclusion: The obtained results indicate that the proposed mechanical FMC method has the potential to increase the effective exposure time of the satellite camera by approximately 70 times without requiring the use of Time Delay Integration (TDI) sensors. In addition, the study demonstrates that forward motion compensation can be achieved through controlled tilt motion of the existing secondary mirror without introducing additional optical components into the system

Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi
Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University
Elektronik / Online ISSN : 1304 - 4915
Basılı / Printed ISSN : 1300 - 1884

Yer gözlem uydu kamerası için kasıtlı ayna eğiminin ileri hareket telafisi yöntemi olarak kullanılması

Ümit Yılmaz[1], Özgür Selimoğlu[2]*

[1]Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 58000, Sivas, Türkiye
[2]Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, 06830, Ankara, Türkiye

ÖNEÇIKANLAR

- İleri Hareket Telafisi (İHT) Yöntemi
- Teleskop aynasına kasıtlı eğim hareketi verilmesi
- Uydu kamerası pozlama süresi artırımı

Makale Bilgileri
Araştırma Makalesi
Geliş: 05.05.2024
Kabul: 28.03.2026

DOI:
10.17341/gazimmfd.1478887

Anahtar Kelimeler:
Yüksek çözünürlüklü yer gözlem uydu kameraları, ileri hareket telafisi (İHT), Korsch TMA, eğim aynası, pozlama süresi

ÖZ

Yer gözlem uydularının sağladığı görüntü kalitesinin yüksek olması için, yer örnekleme mesafesi düşürülürken, modülasyon transfer fonksiyonu ve sinyal-gürültü oranı gibi önemli görüntü kalite parametrelerinin yeterli seviyede tutulabilmesi gerekmektedir. Daha küçük detayları algılayabilmek için mümkün olan en alçak yörüngeye yerleştirilen görüntüleme uyduları, yörünge yüksekliklerini koruyabilmek için yörüngelerinde yüksek hızla hareket etmek zorundadır. Bu yörünge hareketi, uydu kameralarının çok hızlı hareket eden bir platform üzerinde görevlerini yerine getirmesine sebep olmaktadır. Kamera pozlama süresince sürekli var olan bu görüntü hareketi, optik sistem odak düzleminde görüntünün bir yöne doğru akmasına, elde edilen yer görüntülerinde kaymalar oluşmasına ve görüntülerin bulanıklaşmasına sebep olmaktadır. İleri Hareket Telafisi (İHT) yöntemleri, uydu kameralarının odak düzlemindeki görüntü akışını engelleyerek veya azaltarak yüksek kaliteli yer görüntülerinin elde edilmesine imkan sağlamaktadır. Bu çalışmada, İHT yöntemi olarak teleskopun ikinci aynasına kasıtlı eğim hareketi verilmiştir. Örnek uydu kamerası optik sistemi olarak Korsch Üç Aynalı Anastigmat teleskop tasarımı gerçekleştirilmiştir. Optik sistemde yer alan ikincil aynaya eğim verildiğinde optik sistem görüntü kalitesinde meydana gelen değişimler modülasyon transfer fonksiyonu ve nokta grafikleri kullanılarak analiz edilmiştir. Görüntü kalitesinin korunması koşulu ile teleskopun ikincil aynasının ±42 ark saniye aralığında döndürülebilmesinin mümkün olduğu gösterilmiştir. Kasıtlı eğim hareketi yöntemi kullanılarak, tasarımı verilmiş olan uydu kamerasının pozlama süresinin 70 kat artırılması mümkün olmaktadır.

Forward motion compensation in earth observation satellite cameras via intentional mirror tilting

HIGHLIGHTS

- Forward Motion Compensation (FMC) Method
- Intentional tilting of telescope’s mirror
- Improvement of satellite camera exposure time

Article Info
Research Article
Received: 05.05.2024
Accepted: 28.03.2026

DOI:
10.17341/gazimmfd.1478887

Keywords:
High resolution earth observation satellite cameras, forward motion compensation (FMC), Korsch TMA, tilt mirror, exposure time

ABSTRACT

To achieve high image quality from Earth observation satellites, it is essential to reduce the ground sampling distance and maintain the image quality parameters at sufficient levels. These satellites, placed in the lowest possible orbit to detect smaller details and need to move at high speeds in their orbits to maintain their orbital altitudes. This motion requires satellite cameras to perform their tasks on a rapidly moving platform. Image motion occurring during the camera exposure leads to image flow in the optical system's focal plane, causing shifts in the acquired Earth images and resulting in image blur. Forward Motion Compensation (FMC) methods enable the limitation or reduction of the image flow in the focal plane of satellite cameras, allowing the acquisition of high-quality Earth images. In this study, the tilt mirror method is intended to be used as an FMC method. The optical design of the satellite camera based on the Korsch Three-Mirror Anastigmat telescope is performed. Changes in image quality due to using the secondary mirror as a tilt mirror in the optical system is analyzed using modulation transfer function and spot diagrams. The designed satellite camera optics demonstrated the allowance of tilting the secondary mirror within a range of ±42 arc seconds. This tilt motion is shown to increase the exposure time by approximately 70 times for the designed Korsch Three-Mirror Anastigmat telescope-based satellite camera.

*Sorumlu Yazar / Yazarlar / *Corresponding Author / Authors: uyilmaz@sivas.edu.tr, *ozgur.selimoglu@ankara.edu.tr / Tel: +90 312 485 1605 / 5574

1. Giriş (Introduction)

Yeryüzü görüntüleme amacıyla alçak dünya yörüngesine konumlandırılan gözlem uyduları, savunma, sivil ve ticari alanlarda her geçen gün daha da artan bir kullanım alanına sahiptir. Uydu görüntülerinden temel beklenti, kameraların yeryüzünden daha ayrıntılı bilgi aktarmasıdır. Bu nedenle görüntülerin modülasyon transfer fonksiyonu (İng. Modulation Transfer Function, MTF) ve sinyal gürültü oranı (İng. Signal-to-Noise Ratio, SNR) gibi parametreleri sabit tutulurken, kameranın çap ve hacim zarfı izin verdiği ölçüde görüntünün yer örnekleme mesafesinin düşürülmesi beklenmektedir.

Uydular konumlandırıldıkları yörüngede tutunabilmek için yörüngelerinde yüksek hızlarda hareket etmek zorundadır. Geliştirilen bir kamera statik laboratuvar ortamında yüksek görüntü kontrastına sahip olsa bile, uzaydaki dinamik koşullar altında uyduların yörünge hareketi sonucu meydana gelen etkiler neticesinde, istenilen kontrastın ve sinyal seviyesinin eş zamanlı elde edilmesi zorlaşmaktadır [1]. Uydunun yere göre hareketli olması, uydu kamerasının odak düzleminde görüntünün bir yöne doğru hızlı bir şekilde akmasına ve pozlama süresi içerisinde sahnenin hareketli olması nedeniyle sensör tarafından kaydedilen görüntünün bulanıklaşmasına sebep olmaktadır. Elde edilen görüntülerde bulanıklığın önüne geçmek için kamera pozlama süresinin, kamera piksel kayma süresinden daha küçük olması gerekmektedir. Fakat bu seviyelerdeki düşük pozlama süreleri, elde edilen görüntünün sinyal/gürültü oranını (SNR) azaltmakta ve bunun sonucu olarak gürültülü ve düşük kaliteli görüntüler ortaya çıkmaktadır. Uydunun yere göre hareketi yanında, uydunun yönelim hatalarının neden olduğu görüntü hareketi, senkronizasyon sorunları ve uydudaki tepki tekeri gibi hareketli parçalar içeren modüllerin oluşturduğu mekanik titreşimler de görüntü kalitesini olumsuz etkilemektedir [2-5].

Şekil 1'de uydu kameralarında meydana gelen hareketlerin telafisi için akademik literatürden elde edilen genel yaklaşımlar özetlenmiştir. Uyduların yönelim belirsizlikleri yüksek hassasiyetli uydu kontrolü ile çözülebilmektedir [6]. Aynı zamanda optik sistem açıklığının artırılıp, pozlama süresinin azaltılması da uydu yörünge-yönelim belirsizliğinden kaynaklı odak düzlem hareketini azaltabilmektedir [6, 7]. Mekanik titreşimlerin etkilerini azaltmak veya ortadan kaldırmak için kamerayı titreşimden izole etmek veya titreşim azaltmak için aktif kontrol yöntemleri kullanmak gerekmektedir [8-10].

Uydunun yörüngedeki hareketinden kaynaklanan görüntü bozulmalarını engellemek için özel sistem çözümleri geliştirilmiştir. Yöntemlerin temel hedefi uyduların veya hava platformlarının ileri yönlü hareketinden kaynaklanan görüntü hareketinin en azından pozlama süresi içerisinde kısa süreli de olsa dondurulması ve elde edilen görüntülerin daha kaliteli olmasının sağlanmasıdır [11].

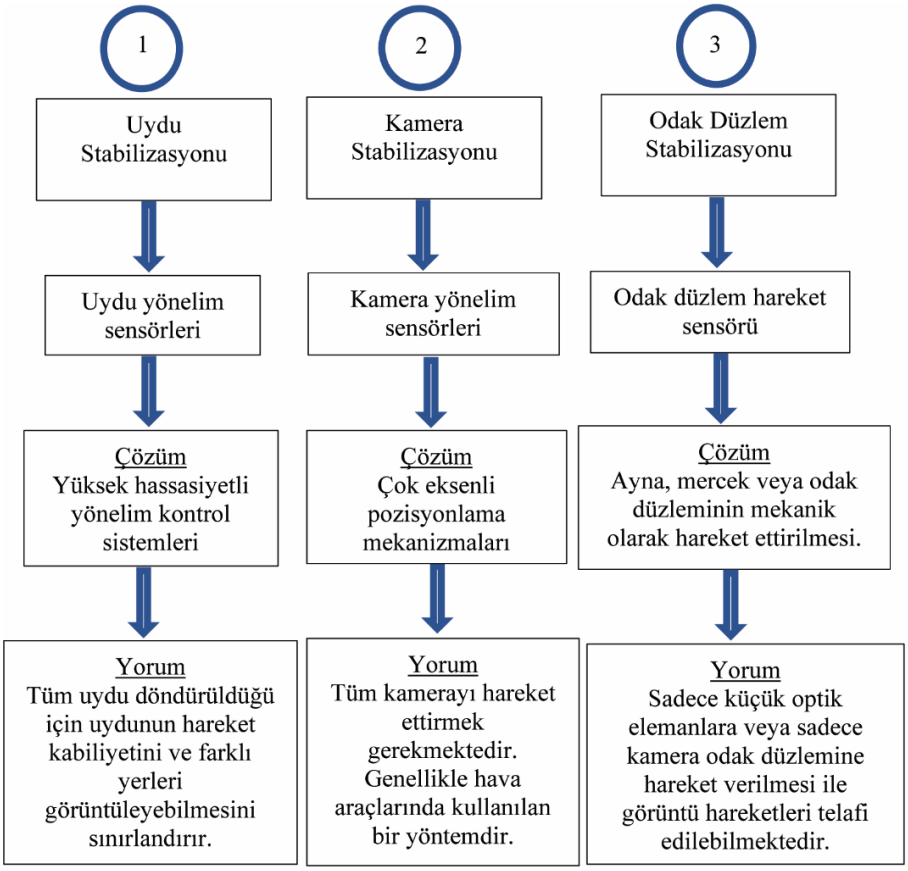
Kameranın gimbal sistemi ile hava ve uzay aracının hareket yönünün tersine hareket ettirilmesi, odak düzlemindeki görüntü sensörünün hareket ettirilmesi veya fotoelektronları harekete eş zamanlı kaydıran TDI sensör kullanılması gibi uygulamalar İleri Hareket Telafisi (İHT) yöntemi olarak değerlendirilmektedir [4, 7, 12]. Kameraların tümüyle hareket ettirilmesi yöntemi genellikle hava araçları için kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem, görüntü alımı sırasında stabilizasyonu artırarak aynı zamanda uzay araçlarında yıldız gözleminin daha uzun pozlama süreleri ile yapılmasını sağlamaktadır [13]. Bu tekniklerin yanında optik bileşenlerin hareket ettirilmesi de ileri hareket telafisi için kullanılabilir. Optik yola eklenen düz katlama aynasına eğim hareketi verilmesi ile hareketli sahnenin görüntüsünün pozlama süresince dondurulması da literatürde bir çözüm olarak önerilmiştir. [8, 13-15]. Bu yöntem, kamera bakış açısının değişimini çok hızlı tespit eden sensörlerle birleştirildiğinde, uydunun yörünge-yönelim belirsizliklerini ve platformdan kaynaklanan titreşimlerin görüntüde sebep olduğu sorunları azaltmak amacıyla da kullanılabilmektedir. Yönteme alternatif olarak ise yük bağlaşımlı aygıt (İng. Charge-Coupled Device, CCD) sensörler, zaman gecikmesi ve entegrasyon (İng. Time Delay and Integration, TDI) modunda kullanılarak fotoelektronlar odak düzleminde hareket yönüne uygun şekilde kaydırılmaktadır [3]. Yörünge hareketi nedeniyle görüntünün kameranın odak düzleminde pozlama süresince akmasından kaynaklanan sorunlar TDI görüntüleme sensörleri ile de çözülebilmesine rağmen, TDI sensörlerde kullanılan piksellerin daha büyük yapıda olması ve görüntü akışındaki sürekliliğe rağmen görüntüleme sensörünün pikselli yapısının görüntüyü piksellerin tam katı olarak adımlar halinde kaydırabilmesi görüntüye ek bulanıklık getirmektedir [6, 9, 16]. TDI sensörlerin kullanım alanının dar olması sebebiyle sistem tasarımında optimizasyona izin veren yeterli sensör çeşitliğinin olmaması da kamera sistem tasarımcılarına ek sorunlar getirmektedir.

Walter vd. [17] mikro uydularda kullanılması amacıyla yörünge hareketinden kaynaklanan görüntü kaymasını azaltmak için dijital TDI ve senkronize hareket edebilen optik bileşen kullanılması yöntemlerini araştırmıştır. Kamera objektifi ve görüntüleme sensörü arasına konumlandırılan katlama aynasına eğim hareketi verilerek ileri hareket telafisi yeteneği kazandırılmıştır. Eğim hareketi için piezo eyleyiciler içeren mikro mekanik yapılar tasarlanmıştır. Aynı yerin görüntüsünün çoklu olarak çekilmesi ve bu görüntülerin işlenerek yüksek SNR'lı tek görüntü elde edilmesi için yüksek işlemci gücü gerekmesi nedeniyle dijital TDI işleminin düşük bütçeli mikro uydularda kullanımını uygun bulmadıklarını açıklamışlar ve objektifin önünde hareketli bir ayna kullanarak yörünge hareketinin sebep olduğu görüntü bozulmasını gidermeye çalışmışlardır [18].

Janschek vd. [6, 16] odak düzleminde görüntüleme sensörünün yakınına yerleştirilen ikinci bir 2D matris (alan) görüntü sensöründen alınan yüksek frekanslı görüntüleri kullanarak ve bir optik görüntü eşleştirici ile yakın gerçek zamanda işleyerek, platform titreşimlerinin ve uydu yönelim belirsizliğinin ortaya çıkardığı görüntü hareket vektörlerini zamana bağlı olarak tespit etmişlerdir. Elde edilen zamana bağlı vektörel kayma bilgisi kullanılarak piezo eyleyiciler ile görüntünün optik düzlemdeki hareketinin giderilmesi için odak düzlemi hareket ettirilmiştir. Benzer şekilde Chen vd. [19] odak düzlemindeki hareketin öngörülmesi ve odak düzlemindeki görüntü hareketini sönümleyecek şekilde odak düzleminin hareket ettirilmesi konusunda çalışmışlardır.

Wang vd. [3] hava fotoğrafçılığı uygulamasında, görüntü alınırken görüntülenen nesne ve kamera arasındaki bağıl hareketin sebep olduğu problemleri gidererek görüntü kalitesini yükseltmek için tarama aynasının hareket ettirilmesi ile ileri hareket telafisi sağlanması üzerine çalışmışlardır. Kontrol algoritmasını hızlandırmak için dijital sinyal işleme çipi kullanan bir ileri hareket telafi sistemi önermişlerdir.

Elde edilen literatür verileri incelendiğinde uydu kameraları için önerilen ileri hareket telafisi yöntemleri olarak, TDI özelliğine sahip sensörlerin kullanımı, odak düzleminin mekanik olarak hareket ettirilmesi ve optik sisteme ek tarama aynası yerleştirilerek [3] bu aynanın hareket ettirilmesi yöntemlerinin sıklıkla kullanıldığı görülmüştür. Fakat optik sistemde ek optik eleman kullanmadan, optik sistemde yer alan ikincil aynanın hareket ettirilerek ileri hareket telafisi sağlanmasına yönelik olarak bir çalışmaya ulaşılamamıştır. Bu çalışmamızda, Opticstudio (Zemax) programı kullanılarak, sadece aynalardan oluşan Korsch tipi Üç Aynalı Anastigmat (İng. Three-



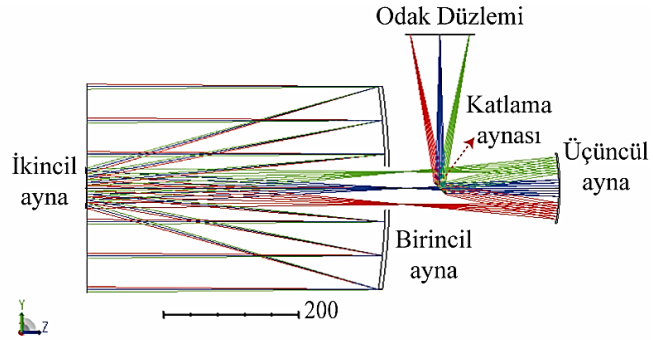
Şekil 1. Uydu kamerası görüntü stabilizasyon yaklaşımları (Satellite camera image stabilization approaches)

Mirror Anastigmat, TMA) optik teleskop tasarımı gerçekleştirilmiştir ve ileri hareket telafisi sağlamak amacıyla optik sistemdeki ikinci teleskop aynasına kasıtlı eğim hareketi verilmesi ile meydana gelecek görüntü kalitesindeki değişimler simülasyon ortamında incelenmiştir. Modülasyon Transfer Fonksiyonu, nokta dağılım göstergeleri (spot diagram) ve odak düzlemindeki görüntü hareketi analiz edilmiştir. Çalışmamızda ikincil aynaya uygulanabilecek maksimum eğim açısı ve yöntemin limitleri belirlenmeye çalışılmıştır.

2. Deneysel Metot (Experimental Method)

Bu çalışmada referans olarak kullanılan Korsch Üç Aynalı Anastigmat teleskobunun optik tasarım ve analiz çalışmaları Zemax OpticStudio yazılımında gerçekleştirilmiştir. İlk aşama olarak kırınım sınırında performansa sahip bir teleskop optik sistem tasarımı gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon çalışmaları sonucunda ortaya çıkan tasarım parametreleri Şekil 2'de ve Tablo 1'de verilmiştir. Çalışmada Korsch TMA teleskop tasarımının seçilmesinin nedeni, sadece aynalar ile yüksek optik kalite sağlaması, hacimce ve kütle olarak kompakt olması ve görüş alanının geniş olmasıdır [20-23]. Tüm bu avantajlarının yanı sıra Korsch yapılar, optik sistemlerde en önemli dört kusur olan küresel, koma, astigmatizm ve alan eğriliği kusurlarını düzeltebilmektedir [24, 25].

Uydu kamerasının optik kısmını oluşturmak amacıyla tasarlanan Korsch TMA teleskobun birincil aynası 300 mm ve görüş alanı ±0,5°'dir. MTF ve kırınım gibi performans parametreleri görünür bölge için 0,486, 0,588 ve 0,656 μm'lik üç farklı dalga boyu referans alınarak hesaplanmıştır. Tasarım parametresi olarak 5000 mm odak uzunluğu, 9 μm sensör piksel boyutu ve 500 km yörünge yüksekliği seçildiğinde yer örnekleme mesafesi 0,9 m olarak hesaplanmıştır.



Şekil 2. Korsch TMA teleskop optik sistem tasarımı
(Korsch TMA telescope optical system design)

Pozlama süresi boyunca uydu kamerasının odak düzleminde görüntünün ne kadar kayacağı (δ), uydunun dünya yörüngesindeki hızına (v), yörünge yüksekliğine (h), pozlama süresine (t) ve kameranın odak uzunluğuna (f) bağlıdır. Nadir bakış durumu için kayma miktarı Eş. 1 kullanılarak hesaplanabilmektedir [11, 26, 27].

$$\delta = \frac{f*v*t}{h} \quad (1)$$

Dünya yüzeyinin yükseltisinin farklı lokasyonlarda değişiklik göstermesi, uydunun dünyaya göre bakış açısı ve uydu yörüngesinin ideal bir daire teşkil etmemesi gibi etmenler uydu kamerasının maruz kaldığı görüntü kayma hızını değiştirmektedir. Aynı zamanda farklı enlemler için dünyanın çizgisel dönüş hızı farklıdır. Bu fark bileşke hız hesabında dikkate alınarak görüntü kayma hızı ($\boldsymbol{v}$) belirlenmelidir [28].

Tablo 1. Uydu kamerası tasarım parametreleri
(Satellite camera design parameters**)**

Teleskop Odak Uzunluğu, f (mm)	5000
Birincil ayna (M1) çapı, D_1 (mm)	300
İkincil ayna (M2) çapı, D_2 (mm)	60,8
Üçüncül ayna (M3) çapı, D_3 (mm)	103,1
İkincil ayna engel çapı, (mm)	70
İkincil aynanın engel oranı, k	0,233
Birincil aynanın eğrilik yarıçapı, R_1 (mm)	1066,830
İkincil aynanın eğrilik yarıçapı, R_2 (mm)	226,285
Üçüncül aynanın eğrilik yarıçapı, R_3 (mm)	287,967
Birincil ayna ve ikincil ayna arası mesafe, d_1 (mm)	442,0
İkincil ayna ve üçüncül ayna arası mesafe, d_2 (mm)	699,0
M1 konik sabiti	-0,983
M2 konik sabiti	-2,005
M3 konik sabiti	-0,598
Piksel boyutu, (μm)	9,0
Nyquist frekansı, (lp/mm)	55,5
Uydunun yer örnekleme mesafesi, GSD (m)	0,90

500 km yükseklikte dünya yörüngesinde görev yapan görüntüleme uydusunun yersel hızı 7075 m/s olmaktadır. Yer örnekleme mesafesi 0,9 m olan uydu kamerası için piksel kayma süresi 0,127 ms olarak hesaplanmıştır. Diğer bir ifade ile, görüntü 7861 px/sn hız ile kayarak odak düzleminde hareket etmektedir.

Tasarlanan optik sistemimizin uydu yörünge hareketi kaynaklı görüntü hareketlerini telafi edebilmesi amacı ile optik sistem ikincil aynasına kasıtlı eğim hareketi verilmesi hedeflenmiştir. Tasarlanan optik sistemin ikincil aynasına eğim hareketi verebilmek ve etkilerini incelemek amacıyla OpticStudio programında farklı eğim açı değerlerinde konfigürasyonlar oluşturulmuştur. Çalışmamızda eğim açısı değerleri 0, 18, 36, 54, 72, 90 arksaniye olarak alınmıştır. En iyi optik sistem tasarımını elde edebilmek amacı ile oluşturulan konfigürasyonlar ile birlikte optimizasyon çalışmaları tekrarlanmıştır. Zemax OpticStudio programında, dönme noktası aynanın merkez noktası olacak şekilde analizler gerçekleştirilmiştir (Şekil 3).

3. Sonuçlar ve Tartışmalar **(Results and Discussions)**

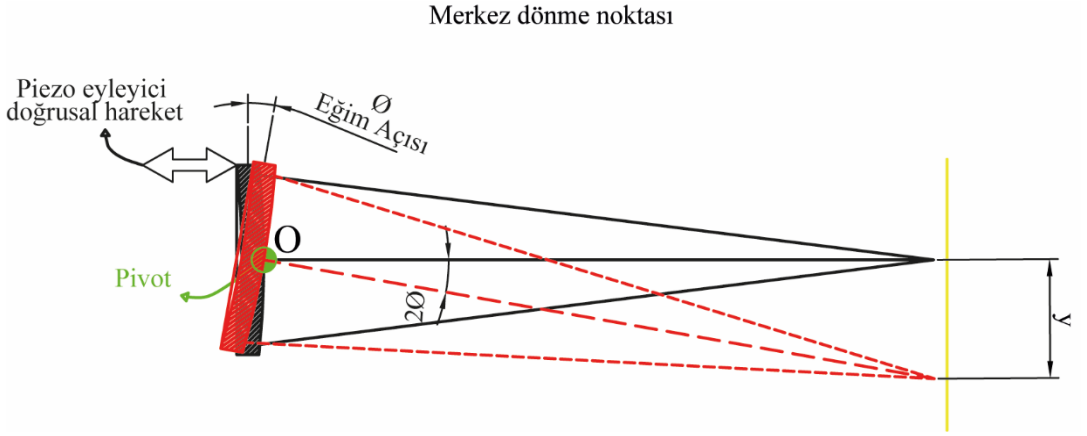
Uydu kameralarının yörünge hareketinden kaynaklanan görüntü kaymalarını sınırlamak amacıyla önerdiğimiz mekanik ileri hareket telafisi yönteminin optik simülasyon ve analizleri farklı eğim açıları için gerçekleştirilmiştir. Optik sistem görüntü kalitesi için asgari gereksinim olarak Nyquist frekansındaki MTF değerinin tüm görüş alanında %30 dan büyük olması hedeflenmiştir.

Tasarlanan optik sistemde piksel boyutu 9 µm olup, bu değer için hesaplanan Nyquist frekansı 55.5 çevrim/mm'dir. İkincil aynaya kasıtlı olarak uygulanan eğim hareketi sonucunda MTF değerlerinde eğime bağlı bir azalma gözlemlenmiştir. Özellikle ±42 yay saniyelik eğim açısının üzerine çıkıldığında, MTF değerinin tasarım kriteri olan %30 eşiğinin altına inmeye başladığı tespit edilmiştir (Şekil 4–5). Bu bulgu, önerilen TSM-FMC yönteminin belirli bir eğim aralığında etkin olduğunu, ancak daha yüksek açılarda sistem performansının optik kalite kriterlerini karşılayamayacağını ortaya koymaktadır.

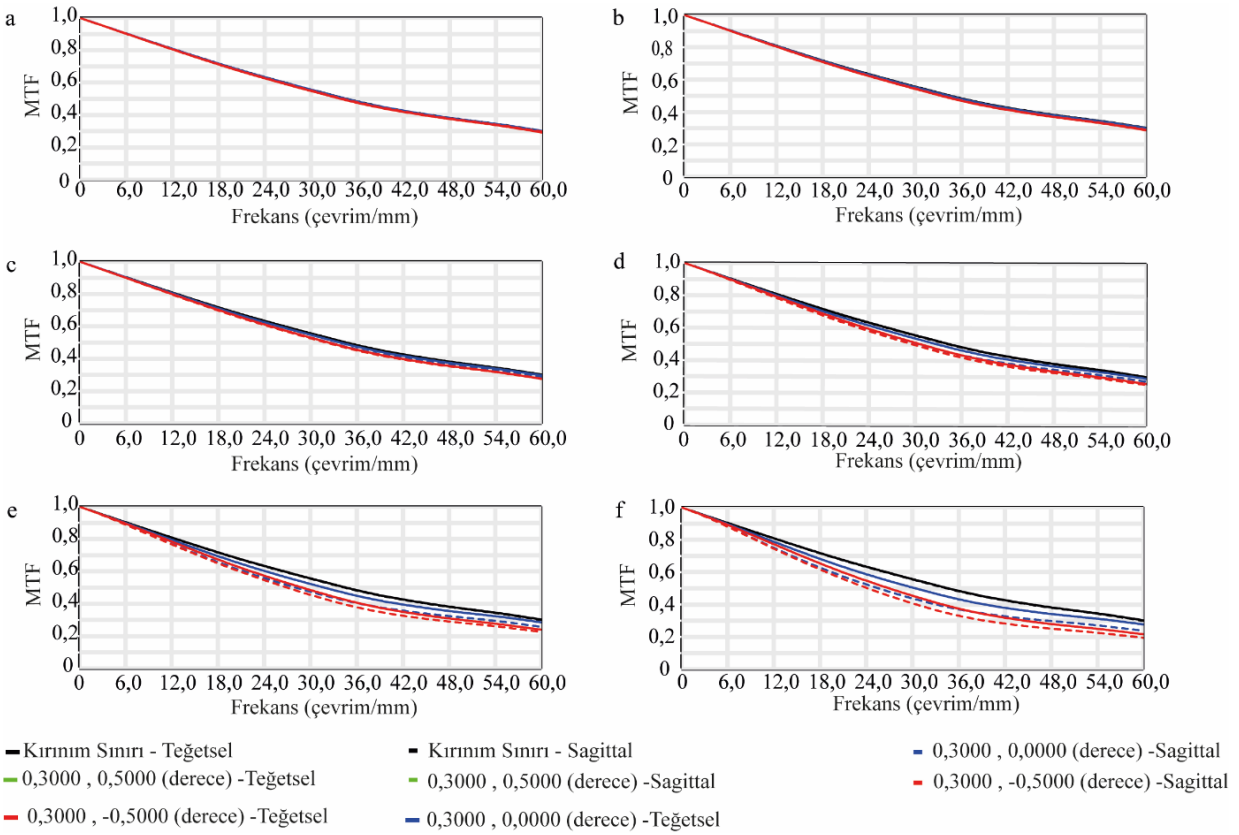
Şekil 5'te, farklı eğim açısı değerleri için Nyquist frekansında elde edilen MTF sonuçları grafiksel olarak sunulmaktadır. Analiz sonuçları, tüm görüş alanı için ±42 yay saniyesinin üzerindeki eğim hareketlerinde MTF değerinin sistem gereksinimi olarak belirlenen limitin altına düştüğünü göstermektedir. Bu bulgu, ileri hareket telafisi amacıyla ikincil aynaya uygulanacak kasıtlı eğim hareketinin belirli bir sınırın ötesinde optik performansta kayıplara yol açtığını ortaya koymaktadır. Dolayısıyla, tasarlanacak piezoelektrik eyleyici ile hareket ettirilen eğim mekanizmasının güvenli çalışma bölgesi olan ±42 yay saniyesi altında kalacak şekilde işletilmesi, önerilen yöntem için yeterli olacaktır. Bu sınır, hem sistemin görüntü kalitesi kriterlerini karşılamasını hem de eyleyici tasarımında mekanik güvenilirlik ile kontrol doğruluğu açısından makul bir çalışma aralığı sağlanmasını garanti etmektedir.

Tasarlanan Korsch TMA teleskop optik sisteminde, eğim açısına bağlı olarak odak düzleminde meydana gelen kayma miktarı nokta diyagramları üzerinden belirlenmiştir. İkincil aynaya uygulanan ±42 yay saniyelik eğim hareketi, odak düzleminde yaklaşık ±35 piksellik kaymaya karşılık gelmektedir. Şekil 6'da, ikincil aynaya farklı açılarda uygulanan eğim hareketleri sonucunda elde edilen nokta diyagramları sunulmuştur. Grafiklerden de görülebileceği üzere, eğim açısı arttıkça ışınların odak düzlemi üzerindeki dağılımı genişlemekte ve görüntü bozulmaları daha belirgin hale gelmektedir.

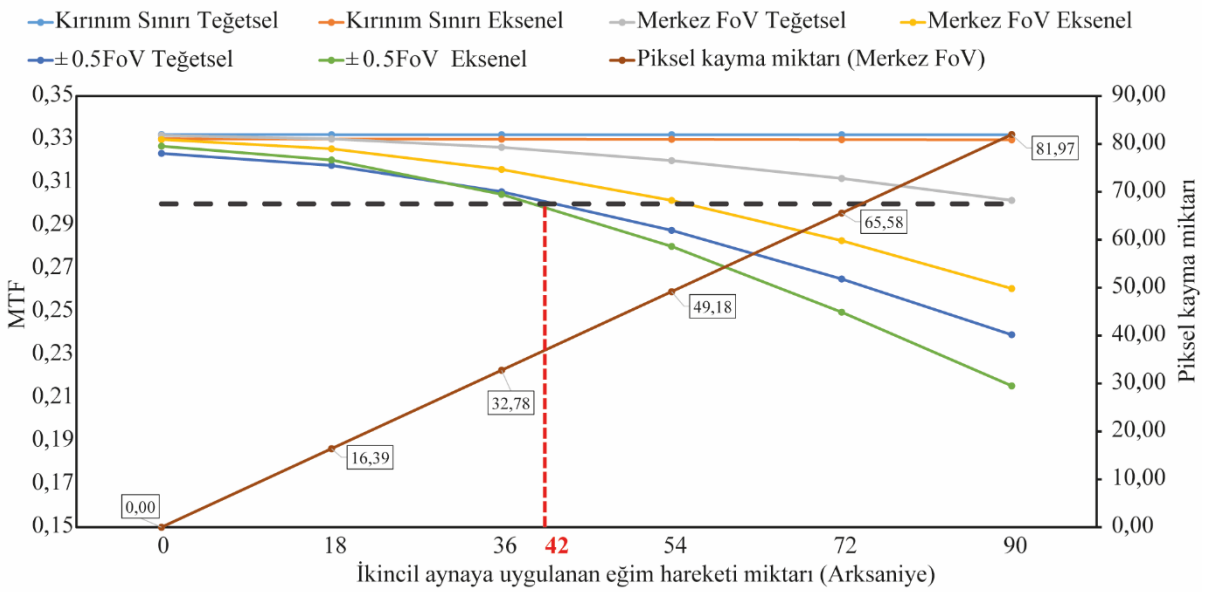
TDI görüntüleme sensörleri için genellikle CCD dedektör teknolojisi tercih edilmektedir [29]. TDI tekniği, prensipte termal görüntüleme sistemlerine uygulanabilse de mevcut kızılötesi odak düzlemi dizilerinin okuma devre mimarileri tarafından kısıtlanmaktadır. Bu diziler çoğunlukla CMOS tabanlı okuma devreleri kullandığından, TDI uygulaması bu sistemlerde sınırlı kalmaktadır.



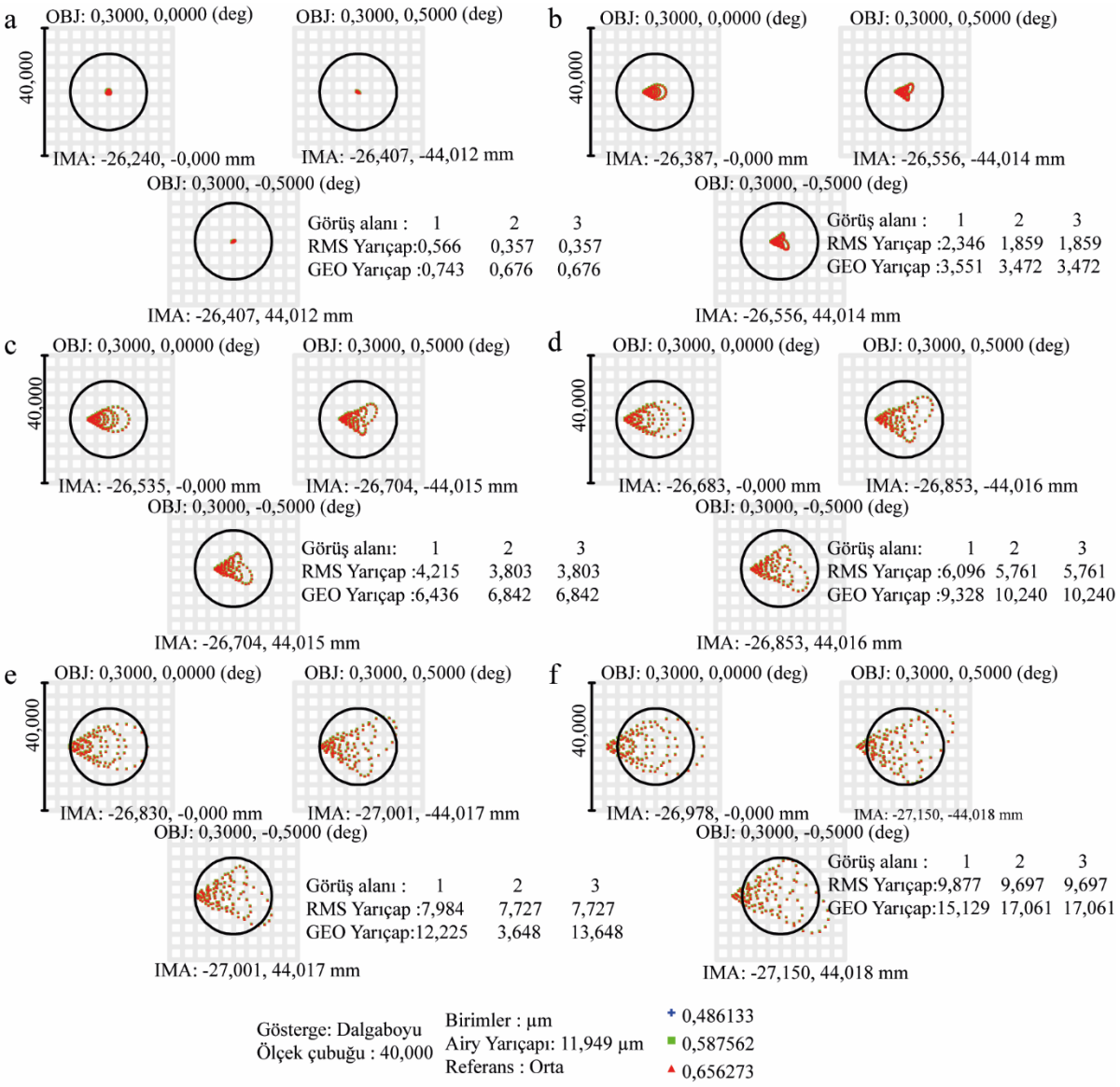
Şekil 3. Piezo eyleyici kullanarak ikincil aynaya eğim hareketi kazandırılması
(Imparting tilt motion to the secondary mirror using a piezo actuator)



Şekil 4. Tasarlanan Korsch TMA teleskop optik sisteminin ikincil aynasının farklı miktarlarda döndürülmesi ile oluşan MTF grafikleri
((MTF graphs of the designed Korsch TMA telescope optical system with different amounts of tilt of the secondary mirror)
a) 0″ b) 18″ c) 36″ d) 54″ e) 72″ f) 90″



Şekil 5. Farklı eğim açıları için odak düzlemde meydana gelen görüntü kayma miktarı ve Nyquist frekansında MTF değerlerinin değişimi
(Variation of the amount of image shift in the focal plane and MTF values at Nyquist frequency for different tilt angles)



Şekil 6. İkincil aynasının farklı miktarlarda döndürülmesi ile oluşan nokta grafikleri
(Spot diagrams with different amounts of tilt of the secondary mirror) a) 0″ b) 18″ c) 36″ d) 54″ e) 72″ f) 90″

CCD'lerin aksine, CMOS devreleri doğrudan yük birikimini desteklemez ve bu da TDI işlevselliğini uygulamak için karmaşık devreler gerektirir. Bu durum, sistem karmaşıklığını artırır ve entegrasyon aşamalarının sayısını kısıtlar [30, 31], bu da kızılötesi görüntüleme sistemlerinde CCD tabanlı TDI teknolojisinin doğrudan benimsenmesini teknik olarak zorlayıcı ve ekonomik olarak olanaksız hale getirir. Özellikle MWIR (Orta Dalga Kızılötesi) bandında büyük TDI elemanlarına sahip CCD dizileri şu anda ticari olarak mevcut değildir ve bu tür sistemlerin geliştirme maliyetleri oldukça yüksektir [32]. Bu bağlamda önerilen yöntem, klasik CCD-TDI çözümlerine kıyasla; CMOS tabanlı kızılötesi sistemlerle daha uyumlu bir yapı sunmakta, ilave donanımsal karmaşıklığı azaltmakta ve uzay tabanlı SWIR ve LWIR görüntüleme sistemlerinde uygulanabilirlik avantajı sağlamaktadır.

4. Sonuçlar (Conclusions)

Çalışmamızda, uydu ileri yönlü hareketi kaynaklı kamera odak düzlemi görüntü hareketinin telafi edilmesi amacı ile kullanılması planlanan eğim aynası yönteminin görüntü kalitesine olan etkileri analiz edilmiştir. Tasarlanan optik sistem için görüntü kalitesinin eşik değeri olarak MTF değerinin %30'dan büyük olması seçilmiştir. Çalışmamızda ikincil aynaya uygulanabilecek maksimum eğim açısı ve yöntemin limitleri belirlenmeye çalışılmıştır. Tasarlanan Korsch TMA teleskop optik sistemi ikincil aynasına 42 arksaniyenin üzerinde eğim hareketi uygulandığında yaklaşık %10 MTF düşüşüne karşılık gelmekte ve sistem gereksinimi olarak belirlenen MTF değerinin limitin altına düştüğünü göstermektedir.

Odak düzlemindeki kayma miktarı, MTF ve spot büyüklükleri eğim hareketine bağlı olarak elde edilmiştir. Tasarlanan optik sistemin ±42 arksaniye'ye kadar M2 aynasının kasıtlı döndürülmesine izin verebildiği analizler ile gösterilmiştir. Bu hareket odak düzleminde ±315 mikron harekete karşılık gelmektedir. Bu hareket aralığı ikincil aynanın kasıtlı hareketi ile uydunun bakış yönünün ± 35 piksel kaymasına karşılık gelmekte ve tüm hareket imkanı kullanıldığı durumda, görüntünün pozlama süresinin 70 kat artırılması mümkün olmaktadır. Önerilen eğim aynası yöntemi, yüksek çözünürlüklü uydu

kameralarının pozlama sürelerini ve sistem SNR değerini artırarak, yüksek çözünürlüklü uydu görüntülerinin TDI sensörler olmadan da elde edilmesini mümkün kılmaktadır.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 222M439 Numaralı proje ile desteklenmiştir. Projeye verdiği destekten ötürü TÜBİTAK'a teşekkürlerimizi sunarız.

Kaynaklar (References)

1. Jing, H., Dai, W., Xiaodong, G., Image motion compensation realization of large resolution digital aerial survey camera, Opto-Electronic Engineering, 33 (5), 27-31, 2006.
2. Chengkang, Y., Qinghui, L., Motion compensation realization for satellite borne camera [J], Infrared and Laser Engineering, 40 (6), 1090-1097, 2011.
3. Dejiang, W., Haipeng, K., Xichang, C., Zhi-Ming, L., Xue-Fei, Z., Digital implementation of forward motion compensation in TDI-CCD panoramic aerial camera, Optics and Precision Engineering, 16 (12), 2465-2472, 2008.
4. Pacey, R., Fricker, P., Forward motion compensation (FMC)-is it the same in the digital imaging world?, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 71 (11), 1241-1242, 2005.
5. Dejie, Y., Shuyan, X., Chengshan, H., Effect of aerocraft attitude on image motion compensation of space camera [J], Opt. Precision Eng, 16 (11), 2199-2203, 2008.
6. Janschek, K., V. Tehernykh, Optical correlator for image motion compensation in the focal plane of a satellite camera, IFAC Proceedings Volumes, 34 (15), 378-382, 2001.
7. Collette, F., Gline, S., Losseau, J., Lecharlier, L., Geometric properties of mechanical forward motion compensation system controlled by a piezoelectric drive, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 39 (B5), 2012.
8. Janschek, K., Tchernykh, V., & Dyblenko, S., Integrated camera motion compensation by real-time image motion tracking and image deconvolution, 2005 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, (1437-1444), IEEE, 2005.
9. Janschek, K., Valerij T., Serguei D., Grégory F., A Visual Feedback Approach for Focal Plane Stabilization of a High Resolution Space Camera (Ein Ansatz zur Bildgestützten Regelung für die Fokalebenenstabilisierung einer Hochauflösenden Satellitenkamera), Automatisierungstechnik, 484-492, 2005.
10. Lin, Z., Wu, C., Yu, F., Kang, X., The design of image stabilization control system, Electro-Optical Remote Sensing, Photonic Technologies, and Applications VI, SPIE, 2012.
11. Yuxin, Z., Yu, L., Wenqi, G., Development and prospect of image motion compensation technology, Chinese Journal of Optics and Applied Optics, 3 (2), 112-118, 2010.
12. Li, J., Liu, X., Fang, J., Sun, T., Xu, C.P., External swing method for forward motion compensation of airborne digital camera, MIPPR 2011: Multispectral Image Acquisition, Processing, and Analysis, SPIE, 8002, 28-35, 2011.
13. Che, X., Hu, C., Qi, X., Ma, Z., Li, W., Niu, H., Yan, C., In-Orbit Image Motion Compensation Technology for Long-Integration Time Space Cameras Using a Two-Axis Pointing Platform", Applied Sciences, 14 (13), 5791, 2024
14. Janschek, K., Tchernykh, V., Dyblenko, S., Flandin, G., Harnisch, B., Compensation of focal plane image motion perturbations with optical correlator in feedback loop, Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites VIII, SPIE, 5570, 280-288, 2004.
15. Jo, J.-b., J.-H. Hwang, J.-S. Bae, Optical design for satellite camera with online optical compensation movements, Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences, 43 (3), 265-271, 2015.
16. Miller, B., E.Y. Rubinovich, Image motion compensation at charge-coupled device photographing in delay-integration mode, Automation and Remote Control, 68, 564-571, 2007.
17. Janschek, K., Tchernykh, V., Dyblenko, S., Performance analysis of opto-mechatronic image stabilization for a compact space camera, Control Engineering Practice, 15 (3), 333-347, 2007.
18. Walter, I., J. Schönekeβ, Application of micro-mechanic devices for motion compensation of space-borne CCD-imaging systems, Acta Astronautica, 46 (2-6), 269-277, 2000.
19. LiaoSK, L., High frequency motion compensation system based on PZT actuator, Infrared and Laser Engineering, 40 (3), 539-543, 2011.
20. Dolkens, D. and Kuiper, J.M., A deployable telescope for sub-meter resolutions from microsatellite platforms, International Conference on Space Optics-ICSO 2014, SPIE, 10563, 992-1000, 2017.
21. Dolkens, D. and Kuiper, H., Design and end-to-end modelling of a deployable telescope, International Conference on Space Optics-ICSO 2016, SPIE, 10562, 630-638, 2017.
22. Korsch, D., Anastigmatic three-mirror telescope, Applied optics, 16 (8), 2074-2077, 1977.
23. Simonetti, F., Romoli, A., Mazzinghi, P., Bratina, V., Reflecting telescopes for an orbiting high-resolution camera for Earth observation, Optical Engineering, 45 (5), 053001-053001-8, 2006.
24. Costes, V., Laubier, D., Darré, P., Perret, L., Optical design and active optics for next generation space telescopes, UV/Optical/IR Space Telescopes and Instruments: Innovative Technologies and Concepts VI, SPIE, 8860, 76-82, 2013.
25. Korsch, D., A three-mirror space telescope, Optical Engineering, 14 (6), 533-535, 1975.
26. Changb, Y., Forward motion compensation for digital aerial photogrammetric camera. J, Journal of the PLA Institute of Surveying and Mapping, 15 (2), 105-108, 1998.
27. Sandau, R., Digital airborne camera: introduction and technology, Springer Science & Business Media, 2009.
28. Han, J., Yang, X., Yue, W., Xu, T., Wang, S., Chang, L., Yang, C., Image motion of remote sensing camera with wide field of view over the Antarctic and Arctic, IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 14, 3475-3484, 2021.
29. Guo, S., Lahav, A., Zhou, Q., Boulenc, P., Klekachev, A. V., Zhuang, X., Wang, X., Design of TDI Imaging Sensor Pixel for Low Power Consumption and High-Speed Applications, IEEE Electron Device Letters, 2025.
30. Tao, S., Zhang, X., Xu, W., Qu, H., Realize the image motion self-registration based on TDI in digital domain IEEE Sensors Journal, 19 (23), 11666-11674, 2019.
31. Jia, J., Wang, Y., Zhuang, X., Yao, Y., Wang, S., Zhao, D., ... Wang, J., High spatial resolution shortwave infrared imaging technology based on time delay and digital accumulation method, Infrared Physics & Technology, 81, 305-312, 2017.
32. Kendrick, S. E., Harwit, A., Kaplan, M., Smythe, W. D., MWIR imaging spectrometer with digital time delay integration for remote sensing and characterization of solar system objects in Infrared Spaceborne Remote Sensing and Instrumentation XV. SPIE, 2007.