

Kosmiczne kamery

Anna DURKALEC

Brzmi jak hasło reklamowe, i w dodatku to prawda. Urządzenia, o których mowa, znajdują się wszędzie tam, gdzie chcemy uchwycić obraz. Od teleskopów kosmicznych poprzez wyszukane aparaty cyfrowe po kamery w laptopach i telefonach komórkowych. Zawdzięczamy im zapierające dech w piersiach zdjęcia odległych mgławic i galaktyk (ostatnio nawet czarnych dziur), artystyczne fotoreportaż z Timbaktu i... łożnikowe selfie. Kamery CCD (*charged-coupled device*) i CMOS (*complimentary metal-oxide-semiconductor*), bo o nich mowa, zrewolucjonizowały fotografię. Ich twórcy, Willard S. Boyle i George E. Smith, w 2009 roku otrzymali Nagrodę Nobla z fizyki. A wszystko zaczęło się od tego, że astronomowie chcieli obserwować więcej galaktyk.

Wydańniejsza metoda obserwacji

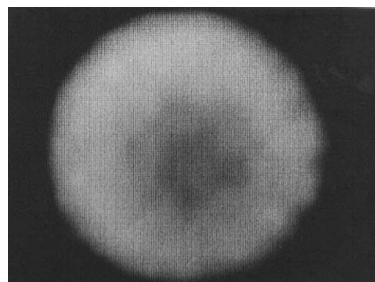
W 1839 roku Louis Jacques Mande Daguerre wykonał pierwsze w historii zdjęcie księżyca. Nie wyszło ono zbyt dobrze, było niewyraźne i przeświecone. Dało jednak początek astrofotografii. Ta z kolei pozwoliła astronomom na rzetelny zapis obserwacji niezależny od ich umiejętności artystycznych. Możliwe było udokumentowanie wyglądu Księżyca, Słońca (w szczególności plam słonecznych) i planet. Ale na naszym Układzie Słonecznym Wszechświat się przecież nie kończy. Astronomowie chcieli zobaczyć, co jest dalej. Szybko zorientowano się więc, że wydłużenie czasu naświetlania umożliwia obserwację tego, co wcześniej było niewidoczne – uchwycono obraz gwiazd, mgławic i galaktyk, emitujących zbyt mało światła dla ludzkiego oka.

W miarę rozwoju technologii podjęto próby skatalogowania jak największej ilości słabych obiektów. W 1948 roku rozpoczęto obserwacje w ramach *The Palomar Observatory Sky Survey* (POSS) – 10-letniego przeglądu całego nieba, którego wynikiem były zdjęcia nieba uwiecznione na 1872 płytach fotograficznych. Obserwacje były niesamowitym sukcesem, ale... pojawił się problem. Astronomowie zostali dosłownie zalani danymi – konkretnie 89 milionami obiektów (jak się okazało po cyfryzacji zdjęć), które trzeba było skatalogować ręcznie, po prostu przeglądając zdjęcia. Nie był to jedyny problem. Wykorzystanie płyt fotograficznych miało również inne technologiczne ograniczenia. Aby uzyskać zdjęcia słabszych obiektów, konieczny był bardzo długi czas naświetlania. Poza tym płyty zajmowały dużo miejsca, były drogie i jednorazowego użytku.

A astronomowie chcieli więcej. Krótco potem pojawiły się plany wysłania teleskopów na orbitę okołozemską, a tam wykorzystanie i wymiana klisz fotograficznych byłaby... no cóż, problematyczna. Stało się więc jasne, że aby móc robić większe i dokładniejsze przeglądy nieba, potrzebna będzie lepsza metoda rejestracji światła. I taka pojawiła się w 1970 roku, gdy w trakcie 5-minutowego wystąpienia konferencyjnego przedstawiono pierwszy detektor CCD, jednocześnie sucho stwierdzając, że może zostać wykorzystany do robienia zdjęć. Szybko zaadaptowano i rozpoczęto ulepszanie przetworników CCD do obserwacji astronomicznych, mimo że na początku charakteryzowały się gorszą rozdzielczością i mniejszym obszarem detekcji w porównaniu z płytami fotograficznymi. Detektory CCD miały jednak zasadniczą przewagę nad tradycyjną fotografią, dobrze radziły sobie z rejestrowaniem słabego promieniowania – były superczułe.

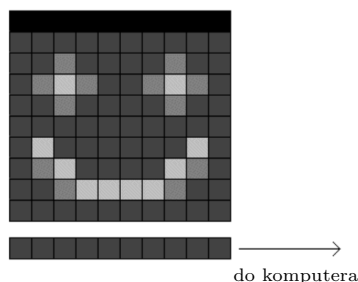
Już w 1976 roku, po raz pierwszy w historii, użyto kamery CCD do obserwacji astronomicznych, wykonując zdjęcie Urana (na marginesie). Astronomom opadła szczena... Kontrast zdjęcia, jak na tamte czasy, był niesamowity! A wszystko dzięki temu, że kamera CCD była czuła na słabe promieniowanie w bliskiej podczerwieni (NIR). Wkrótce nowy rodzaj detektora zaczął ustanawiać rekordy w obserwacjach najciemniejszych i najdalszych obiektów astronomicznych, takich które dalece wykraczały poza możliwości najczulszych filmów i płyt fotograficznych. Astronomia zmieniła się na zawsze. Technologia okazała się na tyle skuteczna, że NASA zdecydowała o zastosowaniu superczułej technologii CCD w Kosmicznym Teleskopie Hubble'a, co w rezultacie przyczyniło się do jej globalnego rozpowszechnienia. Ostatecznie ciągły rozwój kamer CCD

Każda płyta fotograficzna miała rozmiar 36 cm × 36 cm i mogła zarejestrować duży obszar nieba o rozmiarze ok. 36 stopni kwadratowych (dla porównania Księżyc na niebie zajmuje około 0,2 stopnia kwadratowego). Każdy region nieba został sfotografowany dwukrotnie, raz przy użyciu płytki czułej na kolor czerwony (Kodak 103a-E), a raz czułej na niebieski (Kodak 103a-O). Pozwoliło to na zarejestrowanie koloru każdego z obserwowanych obiektów.



Pierwsze astronomiczne zdjęcie wykonane kamerą CCD w 1976 roku (Fred Landauer, Larry Hovland i James R. Janesick), przedstawiające Urana. Planeta w tamtym czasie była zwrócona biegunem w kierunku Ziemi. Ciemniejszy obszar w środku przedstawia, wcześniej niemożliwe do obserwacji, chmury metanu otaczające biegun planety. Źródło: *Scientific Charge-Coupled Devices*, James R. Janesick

Kamery CCD zmieniały się w bardzo szybkim tempie. Na przykład w ramach polskiego projektu OGLE (*Optical Gravitational Lensing Experiment*) każda z czterech faz projektu wiązała się z zastosowaniem coraz lepszych detektorów. W krótkim odstępie czasu, pomiędzy 2001 a 2009 rokiem, kamera CCD była zmieniana trzykrotnie: z pojedynczej matrycy o rozmiarach 2048×2049 piksela i z ponad 2-minutowym czasem sczytywania obrazu do kamery składającej się z mozaiki 32 czipów, o rozmiarach 2048×4096 każdy, umożliwiającą jednoczesną obserwację $1,4$ stopnia kwadratowego nieba (około 7 tarcz Księżyca), z rozdzielczością $0,26$ arcsec/pixel i 20-sekundowym czasem sczytywania obrazu.



Schemat matrycy CCD. Obraz sczytywany jest rzędami, a ładunek elektryczny przetwarzany na sygnał cyfrowy możliwy do interpretacji przez komputer

od lat 80. do chwili obecnej dał nam urządzenia z ponad 100 milionami pikseli, możliwością odczytywania szumu tak niskiego jak sygnał od pojedynczego elektronu, sprawnością kwantową bliską 100% oraz bardzo użyteczną w astronomii czułością na różne zakresy długości fali – od promieniowania rentgenowskiego do bliskiej podczerwieni.

Jak działa CCD?

Ogólnie rzecz ujmując, przetwornik CCD (lub bardziej popularny w zastosowaniach komercyjnych CMOS) tłumaczy sygnał świetlny na elektryczny (czyli fotony na elektrony). Urządzenie składa się z szeregu komórek światłoczułych – siatki małych kwadratów (czasami trójkątów), które odpowiadają pikselom na końcowym zdjęciu. W zależności od urządzenia ich liczba może wahać się od kilku tysięcy do nawet kilkuset milionów. Generalnie, im jest ich więcej, tym lepsza końcowa rozdzielczość zdjęcia.

W czasie ekspozycji fotony (światło) uderzają w powierzchnię komórek światłoczułych, uwalniając elektron w wyniku efektu fotoelektrycznego. Wytworzony w ten sposób ładunek elektryczny gromadzi się w ścianach tych komórek, tworząc studnię potencjału. Jak łatwo się domyślić, liczba elektronów w takiej studni zależy od ilości światła, jaka padła na pojedynczą komórkę. W obszarach matrycy CCD, na które pada światło bardzo jasnej gwiazdy (emitującej wiele fotonów), komórki światłoczułe zawierają więcej ładunku elektrycznego niż w miejscach, do których dociera światło z ciemniejszych mgławic lub odległych galaktyk.

Po zakończeniu ekspozycji (poprzez zamknięcie migawki w aparacie) ładunek jest przeniesiony z przetwornika CCD do komputera i wyświetlony na monitorze. Jak? Metoda jest całkiem prosta. Zdjęcia są odczytywane po jednym wierszu na raz. Zgromadzony w każdej komórce ładunek elektryczny jest przesuwany w dół matrycy, a ostatni wiersz przenoszony do rejestru przesuwnego (*shift rejestr*). Tam do każdej komórki przypisywana jest wartość liczbową na podstawie zgromadzonej w niej liczby fotonów. Tak przekonwertowany sygnał cyfrowy jest z kolei wysyłany do komputera. Cały proces powtarza się aż do momentu, gdy elektrony każdej komórki zostaną przekonwertowane na wartość piksela. Wówczas mogą zostać wyświetlone na ekranie komputera jako surowy obraz.

Rewolucja w astronomii

Zastosowanie kamer CCD w astronomii dostarczyło nam niesamowitych ilości danych. Ich liczba jest tak duża, że aby identyfikować obiekty, które jesteśmy w stanie zarejestrować na zdjęciach, potrzebujemy pomocy komputerów i samouczących się algorytmów. Jedno zdjęcie wykonane kamerą CCD (np. *Hubble Deep Field Image* wykonane teleskopem Hubble'a) może zawierać obraz setek tysięcy galaktyk emitujących bardzo słabe promieniowanie docierające do nas sprzed miliardów lat. Dzięki kamerom CCD rejestrujemy promieniowanie niosące informacje o tworzeniu się i ewolucji galaktyk, obcych układów planetarnych i zmian na naszym Słońcu.

Technologia tak bardzo użyteczna w astronomii szybko znalazła zastosowanie w życiu codziennym i uległa swoistej ewolucji. Jej zmodyfikowaną wersję – detektor CMOS – nosisz codziennie w kieszeni. Zasada działania obu detektorów jest taka sama – wykorzystanie zjawiska fotoelektrycznego, różnią się jedynie sposobem sczytywania ładunku z matrycy. Początkowo detektory CMOS charakteryzowały się gorszą efektywnością w przekształcaniu sygnału świetlnego na elektryczny (sygnał obciążony był szumem), przez co w astronomii, skupionej na bardzo słabym sygnale, nie znalazły zastosowania. Jednak popularność detektorów CMOS, szczególnie zastosowanie w telefonach komórkowych, doprowadziły do ich udoskonalenia. Współcześnie efektywnością dorównują kamerom CCD, a do tego zużywają zdecydowanie mniej energii i pozwalają na szybsze sczytywanie obrazu (może się okazać przydatne w obserwacji planet). Zmiany zaszły tak daleko, że historia zatoczyła koło. Detektory CMOS są coraz częściej wykorzystywane przez rynek kamer astronomicznych i wkrótce prawdopodobnie całkowicie zastąpią kamery CCD.



Rozwiązanie zadania M 1619.

Oznaczmy przez s wspólną wartość sumy elementów w obydwu podziorach. Wówczas

$$2s \leq 1 + 2 + \dots + n = \frac{n(n+1)}{2},$$

czyli

$$s \leq \frac{n(n+1)}{4}.$$

Gdyby pewien z rozważanych podziorów miał $m \geq n/\sqrt{2}$ elementów, to jego suma elementów byłaby nie mniejsza od s

$$\begin{aligned} 1 + 2 + \dots + m &= \frac{m(m+1)}{2} \geq \\ &\geq \frac{n(n+\sqrt{2})}{4} \geq s. \end{aligned}$$

Uzyskana sprzeczność kończy rozwiązanie zadania.