

Mateusz ŻMIJA¹

Skytinel – prototyp nowej kamery bolidowej all-sky

Skytinel – prototype of a new all-sky fireball camera

Abstract: This article presents the initial test results of an all-sky camera built by the author. The aim of the project is to densify the fireball network in Poland and increase the chances of detecting future meteorite falls as well as to improve the accuracy of strewn field calculations.

Keywords: fireball, fireball network, fireball camera, all-sky camera, meteorite falls

Kamery wideo już od ponad 20 lat są powszechnie wykorzystywane do rejestracji meteorów oraz bolidów przynoszących spadki nowych meteorytów. Wraz z postępem technologicznym, zapewnianym między innymi przez czułe sensory CCD i CMOS, możliwe jest stopniowe obniżanie kosztów stacji obserwacyjnych. To z kolei ułatwia rozbudowę istniejących sieci poprzez urządzenia instalowane prywatnie przez miłośników astronomii – zarówno amatorów, jak i profesjonalistów.

Wiele obecnie funkcjonujących sieci wykorzystuje stacje złożone z zestawu kilku kamer obejmujących wąskie wycinki nieba. Z takim podejściem mamy do czynienia w przypadku sieci AllSky7, Global Meteor Network, czy SonotaCo. Pewnym wyjątkiem jest projekt FRIPON/Vigie-Ciel, który bazuje na pojedynczych kamerach CCD o rozdzielczości 1,3 Mpix i obiektywach typu „rybie oko” zapewniających 180-stopniowe pole widzenia. Projekt ten został pierwotnie opracowany przez naukowców sześciu francuskich uniwersytetów, a następnie rozszerzony na wiele krajów, m. in. Włochy, Niemcy, Rumunię, Wielką Brytanię, Kanadę, Hiszpanię, Belgię i Szwajcarię. Obecnie w ramach FRIPON działa ponad 150 kamer i 25 stacji radarowych w kilkunastu krajach (Colas i in. 2020).

W Polsce, obserwacje bolidów są prowadzone głównie przez Pracownię Komet i Meteorów. Początki budowy Polskiej Sieci Bolidowej sięgają 2004 roku, a jej rozwój doprowadził do uruchomienia kilkudziesięciu stacji obserwacyjnych.

¹ Członek PTMet #197 oraz IMCA #6157; skarbykosmosu.pl

Obecnie działa ich 35, w tym dwie nowe stacje PFN76 Kozienice i PFN77 Suhora, wyposażone w kilka kamer megapikselowych AHD. Przedstawiciele PFN zwracają jednak uwagę, że: *Warunki meteorologiczne w Polsce wymagają dużej sieci działających kamer, aby maksymalnie wykorzystać dobrą pogodę. Znamy wiele doniesień o obserwacjach jasnych bolidów, jednakże niejednokrotnie brakuje nam wiążących detekcji* (Tymiński i in. 2022).

W odpowiedzi na te potrzeby, autor niniejszego opracowania postanowił zbudować własną stację bolidową all-sky wyposażoną w kamerę z nowoczesną matrycą CMOS i obiektywem pozwalającym na objęcie całego nieba przy użyciu pojedynczej kamery. Wszystko po to, by zagęścić sieć kamer bolidowych w Polsce, a także zwiększyć liczbę rejestrowanych zjawisk i dokładność obliczeń spadków meteorytów. Poniższy artykuł jest podsumowaniem ponad 6-miesięcznych prac nad przygotowaniem prototypu i jego pierwszych testów. Projekt jest rozwijany pod roboczą nazwą Skytinel, od połączenia słów *sky* (ang. niebo) i *sentinel* (ang. strażnik, zwiadowca).

Koncepcja kamery – sprzęt i oprogramowanie

Prace nad prototypem kamery bolidowej all-sky rozpoczęto od przeglądu rozwiązań i technologii dostępnych na rynku. W tym celu, nawiązano relacje z kilkoma producentami sprzętu klasy przemysłowej oraz uzyskano szczegółowe specyfikacje urządzeń i akcesoriów spełniających wymogi projektu. Podstawowymi kryteriami były (tab. 1):

Tabela 1. Kryteria wyboru technologii do budowy prototypu kamery bolidowej all-sky.
Table 1. Technology selection criteria for the prototype of all-sky fireball camera.

Kryterium	Uzasadnienie
Kamera z interfejsem GigE i zasilaniem PoE	Dzięki technologii PoE, przesyłanie danych i zasilanie kamery odbywa się wyłącznie jednym kablem UTP RJ-45 (Ethernet), co upraszcza instalację
Rozdzielczość matrycy 2 megapiksele	Zbyt niska rozdzielczość obrazu zwiększa niepewności pomiarowe oraz utrudnia analizę fragmentacji meteoroidów w atmosferze
Prędkość nagrywania 25 klatek/sek.	Zbyt niska prędkość nagrywania utrudnia pomiar dynamiki meteoroidu i odbiega od standardów przyjętych w istniejących sieciach bolidowych
Mocowanie obiektywu w standardzie C/CS	Obiektyw powinien współpracować z kamerami o średnich i dużych sensorach (co najmniej 1/1,8")
Dostępność obiektywów D/H/V 170° z wartością przystony f/1.6	Obiektyw powinien dysponować jak najszerszym polem widzenia, a jednocześnie rejestrować gwiazdy przy maksymalnej prędkości nagrywania w celu ułatwienia astrometrii i fotometrii
Rejestrowanie nieskompresowanego obrazu	Powszechne formaty kompresji obrazu (H.264, MJPEG i MPEG-4) obniżają jakość nagrań i nie są kompatybilne z oprogramowaniem UFO służącym do rejestracji i analizy meteoroidów
Współpraca z technologią DirectShow	Wiodący pakiet programów UFO stworzony przez SonotaCo wspiera wyłącznie kamery ze sterownikami opartymi na DirectShow

Po przeanalizowaniu dostępnych możliwości, wyselekcjonowano kilka modeli kamer spełniających powyższe kryteria. Ostatecznie, testy przeprowadzono na urządzeniach z monochromatycznymi matrycami CMOS: IMX249 (1/1,2", 2,3 Mpix) oraz IMX265 (1/1,8", 3,1 Mpix). Obie kamery wyposażono w obiektywy ZWO 2,5 mm (f/1,2), zapewniający pole widzenia o szerokości 170°.

W przypadku oprogramowania, zdecydowano się wykorzystać pakiet UFO, rozwijany od 2003 roku przez japońską sieć obserwacyjną SonotaCo. Kluczem do wyboru tego rozwiązania była prostota obsługi i współpraca z systemem Windows oraz fakt, że korzysta z niego Polska Sieć Bolidowa oraz sieci bolidowe w pobliskich krajach. Dzięki temu, wyniki obserwacji są dostarczane we wspólnym formacie, co ułatwia analizę nagrań.

Przygotowany prototyp na bazie kamer przemysłowych GigE okazał się w pełni kompatybilny z programem UFOCapture HD2 V4.80, niezależnie od producenta urządzenia. Dzięki temu oprogramowaniu, rejestracja zjawisk odbywa się automatycznie, a nagrania bolidów są niemal natychmiast gotowe do obróbki w pozostałych programach pakietu, takich jak UFOAnalyzer i UFOOrbit. Warto dodać, że twórcy oprogramowania błyskawicznie reagowali na uwagi zgłaszane w trakcie testów i przygotowali konieczne aktualizacje, np. związane z obsługą formatu RGB8 w UFOAnalyzer. Współpraca ta daje nadzieję, że kolejne wersje programów z serii UFO pozostaną kompatybilne z przygotowywanymi prototypami na bazie kamer dostarczanych przez różnych producentów.

Obudowa i dodatkowe podzespoły

Przeprowadzenie testów wymagało przygotowania specjalnie zaprojektowanej obudowy. Powstała ona od podstaw, we współpracy z kilkoma polskimi firmami.

Korpus prototypu został wykonany z aluminium lakierowanego proszkowo oraz wydruków 3D, do których wykorzystano filament odporny na wilgoć, nasłonecznienie, a także wysoką i niską temperaturę. Kamera została zamontowana bezpośrednio do elementu zamykającego obudowę od góry, do którego przykręcono akrylową kopułę wraz z materiałem uszczelniającym. W dolnej części obudowy znajduje się tuleja pozwalająca przymocować urządzenie do dowolnego uchwytu antenowego, a także wodoodporny przepust na kabel RJ-45.

W obudowie nie zamontowano dodatkowych elementów elektrycznych i elektronicznych. Ciepło generowane przez kamerę jest wystarczające, by ogrzać wnętrze obudowy i uniknąć parowania kopuły, a nawet rozpuścić cienką warstwę śniegu. Z kolei latem, aluminiowy korpus ułatwia przewodzenie ciepła na zewnątrz obudowy.

Prototyp pracował poprawnie w temperaturze powietrza od -20°C do 30°C . Jediną przerwę w działaniu kamery odnotowano przy temperaturze powietrza przekraczającej 30°C , ze względu na przegrzanie wnętrza obudowy i samej kamery. Co za tym idzie, prototyp w obecnym kształcie nie jest przeznaczony do obserwacji dziennych w czasie upałów. Nie ma jednak przeszkód, by umożliwić to w przyszłości.



Fot. 1. Prototyp kamery przygotowany do pierwszych rejestracji (fot. Mateusz Żmija).
Photo 1. Camera prototype prepared for first recordings (author: Mateusz Żmija).

Konfiguracja i kalibracja

Uruchomienie nowej stacji bolidowej z przygotowanym prototypem zajmuje ok. 2 godzin. Po zamocowaniu kamery na zewnątrz, podłączeniu jej do komputera z systemem Windows poprzez zasilacz PoE (albo kartę sieciową z funkcją PoE) i zainstalowaniu oprogramowania wraz ze sterownikami kamery, system jest gotowy do pracy.

W przypadku kamer bolidowych z obiektywami typu „rybie oko”, największą wątpliwością dotyczy ich skutecznej kalibracji oraz szczegółowości wyników. Z tego powodu, podczas testów wykorzystywano wyłącznie jasne obiektywy, po to by podstawowa astrometria i fotometria była możliwa przy czasie ekspozycji 1/25 sekundy. W profesjonalnych sieciach bolidowych opartych na kamerach wideo, takich jak FRIPON/Vigie-Ciel, do kalibracji stosuje się dodatkowe klatki naświetlane przez kilka sekund. Wymaga to jednak dedykowanego oprogramowania, którego rozwój nie ma finansowego uzasadnienia na etapie prototypowania.

Wyniki testów

Kamera z matrycą IMX249 i obiektywem $f/1,2$ rejestrowała obraz z prędkością 25 kl./s, zapewniając pole widzenia równe 170° . Udało się nią wykryć 45 gwiazd powyżej 30° nad horyzontem o jasności obserwowanej wyższej niż

3 mag, a przeciętny błąd kalibracji według UFOAnalyzer był równy $0,079^\circ$ ($4,74'$). Ze względu na niezadowalające rezultaty wynikające z niskiej rozdzielczości testowanej kamery, postanowiono porównać ją z modelem zapewniającym większą szczegółowość obrazu.

Rozpoczęto wówczas testy kamery z matrycą IMX265, zapewniającą rozdzielczość wyższą o 35%. Tego typu kamera, wyposażona w obiektyw ZWO 2,5 mm, pozwoliła zniwelować przeciętny błąd kalibracji do $0,027^\circ$ ($1,62'$), choć odbyło się to kosztem pola widzenia. W tej konfiguracji wynosiło ono 170° 130° , ze względu na mniejszy rozmiar matrycy, a do kalibracji wykorzystywano 60 gwiazd widocznych powyżej 30° nad horyzontem.

Osiągnięte rezultaty są obiecujące, dlatego po analizie wyników z powyższych zestawów, rozpoczęto testy kolejnych dwóch kamer z matrycami IMX264 ($2/3''$, 5 Mpix) oraz IMX178 ($1/1,8''$, 6,3 Mpix).

W kontekście dalszych obserwacji, doboru akcesoriów i rozbudowy sieci należy pamiętać, że w przypadku obiektywów szerokokątnych, aberracje rosną od środka pola widzenia w kierunku krawędzi obrazu. Co za tym idzie, w testowanym prototypie precyzja kalibracji była najwyższa w zenicie, a spadała w miarę zbliżania się do horyzontu. Ze względu na zaświecenie nieba sztucznym światłem i przysłonięte pole widzenia, prototyp zarejestrował tylko pojedyncze gwiazdy widoczne poniżej 30° nad horyzontem. Ich obraz był zniekształcony z powodu nierównomiernego dokręcenia śrób mocujących kopułę, co powodowało wzrost przeciętnego błędu kalibracji do $2,4'$ dla matrycy IMX265. Wpływ tego elementu zostanie zniwelowany w przyszłości, a do konstrukcji obudowy będą wprowadzone konieczne ulepszenia. Celem jest zniwelowanie przeciętnego błędu kalibracji do $<1,5'$.

Bez względu na to, zaleca się stosowanie obiektywów o jak najwyższej jakości i ustawianie kolejnych stacji w odległości 100–150 km od siebie. Wówczas istnieją większe szanse, że bolidy będą rejestrowane bliżej środka pola widzenia, gdzie obraz jest najmniej zniekształcony.

W przyszłości, wyniki astrometrii z programu UFOAnalyzer warto zweryfikować także za pomocą innych narzędzi, np. Skyfit, które pozwalają ocenić przeciętny błąd w poszczególnych fragmentach pola widzenia i wykryć zniekształcenia spowodowane brakiem osiowości obiektywu lub jakością kopuły zamykającej obudowę.

Rejestracje meteorów i bolidów

Kamera all-sky z matrycą IMX249 pracowała w prototypowej stacji od września 2023 roku do końca stycznia 2024 roku. Zarejestrowano wówczas cztery bolidy i kilkadziesiąt meteorów o jasności przekraczającej 1 mag. Część z nich uwieczniły także kamery Polskiej Sieci Bolidowej i stacje rozlokowane w Czechach oraz na Węgrzech, co pozwoliło porównać wyniki obserwacji.

Niestety, kamera nie zarejestrowała potencjalnego spadku meteorytu w okolicach Raniżowa, 17 grudnia 2023 r. o godz. 1:24 UTC. Przyczyniło się do tego zachmurzenie oraz przysłonięta północno-wschodnia część horyzontu.



Fot. 2. Ślad bolidu z 30 października 2023 roku, zarejestrowany kamerą all-sky z matrycą IMX249 i obiektywem 2,5 mm (fot. Mateusz Żmija).

Photo 2. The trail of the fireball visible on 30 October 2023, recorded with an all-sky camera with an IMX249 sensor and a 2.5 mm lens (author: Mateusz Żmija).

Tabela 2. Bolidy zarejestrowane przez prototyp kamery bolidowej all-sky.

Table 2: Phenomena recorded by the prototype all-sky fireball camera.

Data zjawiska	Jasność	Rój meteorów
18/09/2023, godz. 02:19:09 UTC	-5,1 mag	Orionidy
30/10/2023, godz. 02:49:03 UTC	-7,7 mag	Taurydy
14/11/2023, godz. 04:52:32 UTC	-4,8 mag	Meteor sporadyczny
20/01/2024, godz. 03:23:12 UTC	-4,2 mag	Eta Corvidy

Dla każdego zarejestrowanego bolidu udało się określić podstawowe parametry, m.in. prędkość początkową i końcową, wysokość rozpoczęcia i zakończenia jasnej fazy lotu, a także orbitę i ślad na powierzchni gruntu. Dane te mogłyby posłużyć do symulacji ciemnej fazy lotu oraz wskazania obszaru spadku meteoroidów, choć należy pamiętać, że na obecnym etapie testów są one obciążone dużą niepewnością.

Szczegółowe obliczenia wymagają budowy kolejnych stacji testowych, ponieważ zgodnie z wnioskami przedstawicieli sieci FRIPON: *Pomiary uzyskane przez kamery o niskiej rozdzielczości mogą być wystarczająco dokładne, aby obliczyć orbity i pola rozrzutu, pod warunkiem, że sieć jest gęsta i zawiera wiele kamer* (Colas et al. 2020). Prowadzi to do logicznego stwierdzenia, że uzupełnienie Polskiej Sieci Bolidowej kamerami all-sky o wysokiej rozdzielczości, może dać satysfakcjonujące efekty.

Podsumowanie

Prototyp kamery bolidowej all-sky przygotowany w ramach projektu Skytinel dowodzi, że istnieje możliwość efektywnego zagęszczenia sieci obserwacyjnej w Polsce za pomocą pojedynczych kamer obejmujących widok całego nieba.

Warto rozważyć zastosowanie kamer o rozdzielczości co najmniej 3 Mpix z obiektywami zapewniającymi pełne, 180-stopniowe pole widzenia. Tego typu konfiguracje będą nadal testowane przez autora. Aby wykorzystać możliwości tych urządzeń, konieczne będzie zastosowanie wysokiej jakości obiektywów „rybie oko” z wartością przysłony $f/1,6$, co zwiększy precyzję astrometrii oraz zmniejszy niepewności pomiarowe dla bolidów zarejestrowanych nisko nad horyzontem. Bez względu na to, kolejne stacje budowane według powyższej koncepcji, powinny powstawać w odległości 100–150 km od siebie.

Obecnie, w prototypowej stacji działa kamera oparta na matrycy IMX264 z obiektywem Fujinon 1,8 mm $f/1,4$, która rejestruje meteory w każdą pogodną noc. Autor prowadzi także sporadyczne obserwacje dzienne.

Dotychczasowe wyniki obserwacji skłaniają autora do rozwoju projektu Skytinel. Powodzenie tej inicjatywy może zapewnić współpraca z członkami Polskiej Sieci Bolidowej oraz Polskiego Towarzystwa Meteorologicznego. Autor zamierza także wzmacniać relacje z producentami sprzętu, twórcami oprogramowania i obserwatorami bolidów w sąsiednich krajach.

Podziękowania

Serdeczne podziękowania dla Bence Gucsika, za bieżące konsultacje i dodatkową analizę zarejestrowanych nagrań oraz Artura Jaśkiewicza, za udostępnienie danych ze stacji PFN76 Kozienice, pozwalających na porównanie wyników obserwacji.

Literatura

- Colas F., et al., 2020, *FRIPON: a worldwide network to track incoming meteoroids*, Astronomy & Astrophysics, vol. 644. doi:10.1051/0004-6361/202038649
- Tymiński Z., et al., 2022, *Raport z działalności PKiM oraz PFN w latach 2021–2022*, Acta Societatis Meteorologicae Polonorum, 14, s. 183–191.