

Globalna rejestracja cząstek z kosmosu, projekt CREDO (cz. I)

Global registration of particles from space, CREDO project (p. I)

prof. nzw. dr hab. Robert Kamiński

Instytut Fizyki Jądrowej PAN im. Henryka Niewodniczańskiego,
projekt CREDO, ul. Radzikowskiego 152, 31-342 Kraków

mgr inż. Michał Niedźwiecki

Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki, projekt CREDO,
ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków

Streszczenie: W artykule przedstawiono opracowany w Instytucie Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk w Krakowie projekt CREDO. Omówiono metodę oraz znaczenie rejestracji i analizy promieniowania kosmicznego i radioaktywnego za pomocą małych detektorów znajdujących się np. w popularnych smartfonach. Rejestracja ta ma służyć wielkoskalowemu badaniu, m.in. różnorodnego promieniowania dochodzącego nieprzerwanie z kosmosu do Ziemi. Ma ono ogromne znaczenie naukowe i wywiera wpływ np. na życie biologiczne na Ziemi i na funkcjonowanie nowoczesnego sprzętu elektronicznego. Dla astrofizyków rejestracja ta może być nieocenionym źródłem informacji o mało znanym wysokoenergetycznym widmie promieniowania kosmicznego i przez to dostarczyć niezbędnych informacji do rozwiązania największych zagadek współczesnej kosmologii, jak np. ciemnej materii i energii. Zaproponowana metoda, ze względu na jej formę tzw. nauki obywatelskiej (popularna *citizen science*), ma także duże znaczenie socjologiczne i może obejmować wszystkich mieszkańców Ziemi.

Słowa kluczowe: promieniowanie kosmiczne, detektory światła, światłoczułe matryce, smartfony, szum elektromagnetyczny, piksele, citizen science

Abstract: The article presents the CREDO project developed at the Institute of Nuclear Physics of the Polish Academy of Sciences in Krakow. The method and meaning of registration and analysis of cosmic rays and radioactive radiation using small detectors located, for example, in the popular smartphones are discussed. This registration is to serve a large-scale study, among others, of various radiation reaching the Earth continuously from space and having great scientific significance and exerting influence on eg. biological life on Earth and on the functioning of modern electronic equipment. For astrophysicists, this registration can be an invaluable source of information about the little-known high-energy spectrum of the cosmic rays and thus provide the necessary information to solve the greatest mysteries of modern cosmology such as dark matter and dark energy. The proposed method, due to its form of citizen science is also of great sociological importance and can include all the inhabitants of the Earth

Keywords: cosmic radiation, light detectors, photosensitive matrices, smartphones, electromagnetic noise, pixels, citizen science

WPROWADZENIE

Badanie promieniowania kosmicznego i radioaktywnego ma bardzo duże znaczenie z punktu widzenia kosmologii, astrofizyki i... bezpieczeństwa ludzi. Obecnie działające w kilku miejscach na Ziemi detektory naukowe (np. Obserwatorium Pierre Auger w Argentynie czy IceCube na Antarktydzie [1,2]) są bardzo efektywnymi i dokładnymi urządzeniami, ale są zlokalizowane na stosunkowo małych obszarach w porównaniu z rozmiarami Ziemi. Projekt CREDO (*Cosmic-Ray Extremely Distributed Observatory*) oznacza Ekstremalnie Rozproszone Obserwatorium Promieniowania Kosmicznego i – w odróżnieniu od innych obserwatoriów – zbiera dane z detektorów rozproszonych po całej Ziemi. Jest to szczególnie istotne do badania tzw. strumieni cząstek, czyli kaskad milionów cząstek

docierających do powierzchni Ziemi, a będących efektem rozpadu lub zderzenia nawet pojedynczej cząstki kosmicznego promieniowania (tzw. pierwotnego) z np. innymi cząstkami lub promieniowaniem daleko od Ziemi. Dzięki detektorom rozproszonym po całej Ziemi będzie można badać ich rzeczywisty zasięg i energię, a dzięki temu dotrzeć do informacji o samej pierwotnej cząstce, która zderzyła się lub rozpadła daleko przed Ziemią. Takiego eksperymentu naukowego, o takim zasięgu, nigdy jeszcze nie robiono. Jego nowatorską cechą i główną zaletą jest łatwa dostępność, powszechność i niskie koszty.

Energie cząstek promieniowania kosmicznego mierzy się w elektronowoltach (eV). Najwyższe energie rejestrowanych do tej pory cząstek z kosmosu to ok. 10^{21} eV. Dla porównania masa elektronu to zaledwie $5 \cdot 10^5$ eV, mionu 10^8 eV, a protonu i neutronu prawie 10^9 eV. Najwyższe osiągalne energie w największym przyspieszacz cząstek LHC (*Large Hadron*

Collider) w CERN to 10^{13} eV. Ze względu na tak duże różnice między nimi a najwyższymi energiami osiągalnymi przez promieniowanie kosmiczne, jedynym dostępnym źródłem cząstek o naprawdę dużych energiach będzie, przez co najmniej wiele następnych dziesięcioleci, promieniowanie kosmiczne.

Bardzo ważnym, medycznym, znaczeniem badania cząstek z kosmosu jest fakt, że – ponieważ są one promieniowaniem jonizującym i przenikliwym – mogą powodować np. mutacje genetyczne i związane z tym choroby. Zastosowanie detektorów rozproszonych na dużej skali pozwoli analizować to zjawisko statystycznie i globalnie na całej Ziemi oraz badać np. przenikliwość tego promieniowania przez ściany budynków, co może mieć ścisły związek z prawdopodobieństwem powstawania mutacji i niektórych chorób.

Istnieją też wyniki badań wskazujące na istnienie silnego związku nagłych zmian w liczbie rejestrowanych promieni kosmicznych z trzęsieniami Ziemi [4]. Silnie ścierające się warstwy skalne w skorupie ziemskiej mogą znacznie zakłócić pole magnetyczne Ziemi i tym samym zmienić tory cząstek z kosmosu. Takie zjawisko może być widoczne nawet na kilka godzin przed nagłym rozprężeniem warstw skalnych, czyli przed samym trzęsieniem. Jest to wystarczający czas, aby ostrzec miejscową ludność i umożliwić ewentualną ewakuację.

Rejestrowanie promieniowania radioaktywnego jest we współczesnym świecie coraz bardziej istotne także ze względów bezpieczeństwa. Umożliwia ono bowiem kontrolowanie promieniowania pochodzącego z nagłych wypadków skażenia radioaktywnego, jak i badanie naturalnego promieniowania Ziemi w celu np. wyboru miejsca budowy domów.

Ciekawym praktycznym powodem dużego znaczenia badań promieniowania kosmicznego o największych energiach jest jego niszczący wpływ na urządzenia elektroniczne, szczególnie przechowujące dane, np. twarde dyski. Na szczęście liczba cząstek w kosmosie maleje bardzo szybko wraz ze wzrostem ich energii, więc występowanie cząstek o największej energii należy do rzadkości, jednak nie na tyle, żeby ten problem zbagatelizować. Znane są bowiem przypadki zniszczenia twardego dysku przez przelot przez nie takiego promieniowania. W ramach projektu CREDO tworzona jest globalna sieć detektorów promieniowania kosmicznego i radioaktywnego, które będą dostępne dla wszystkich w ramach ogólnie rozumianej *Citizen Science*. W związku z tym detektory muszą spełniać odpowiednie wymagania społecznościowe i naukowe, a w szczególności:

- muszą być tanie i proste w zbudowaniu i użyciu przez każdego uczestnika projektu,
- powinny skutecznie wykrywać promieniowanie kosmiczne oraz promieniowanie naturalne ziemskie oraz powstałe np. wyniku nagłego skażenia radioaktywnego,
- powinny wysyłać dane o zarejestrowanych sygnałach promieniowania do serwera projektu CREDO,
- dane te muszą być o odpowiedniej dobrej rozdzielczości czasowej i przestrzennej.

W wyniku prac nad projektowaniem sieci detektorów, trwających w IFJ PAN w Krakowie w ramach projektu CREDO od 2017 r., udało się stworzyć aplikację na powszechnie używane smartfony, która wykrywa promieniowanie kosmiczne

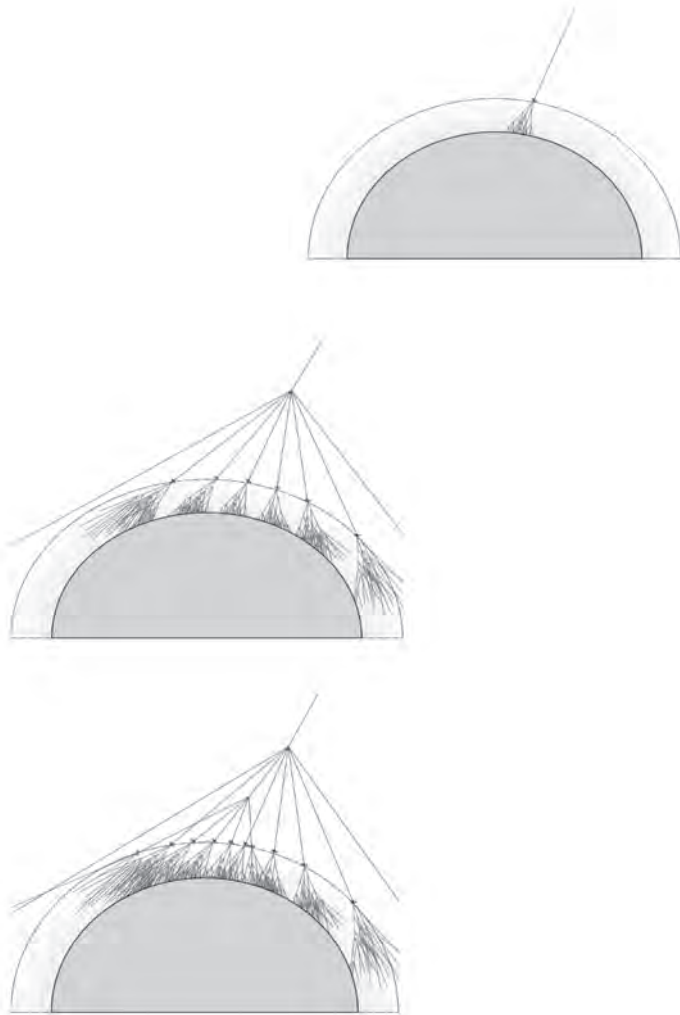
i radioaktywne uderzające w czujnik kamery smartfona. Aby dołączyć do projektu, uczestnik musi zainstalować aplikację, zakryć kamerę i włączyć detekcję. Aplikacja automatycznie analizuje obraz z kamery, wykrywa na nim promieniowanie i wysyła do serwera informacje o wykrytych śladach cząstek. Do tak gromadzonych danych ma dostęp każdy uczestnik projektu, a analizę sygnałów – ich częstości, miejsca i kierunku – przeprowadza grupa doświadczonych pracą w innych obserwatoriach astrofizycznych pracowników IFJ PAN. Projekt CREDO jest otwarty na udział w tych pracach także osób z zewnątrz.

ISTOTA I ZNACZENIE PROJEKTU

Promieniowanie kosmiczne to wysokoenergetyczne promieniowanie docierające do Ziemi spoza Układu Słonecznego. To tzw. promieniowanie pierwotne składa się głównie (~99%) z jąder atomów i z wolnych elektronów (~1%) rozpędzonych do bardzo wysokich energii, nawet ponad 10^{21} eV.

Cząstki pierwotnego promieniowania kosmicznego zderzają się z cząsteczkami powietrza w górnej warstwie atmosfery ziemskiej. W efekcie powstaje kaskada wtórnych cząstek, tzw. wielki pęk atmosferyczny, efekt lawinowego procesu tworzenia się kolejnych pokoleń cząstek, przez kolejne zderzenia z cząsteczkami powietrza. Wielkie pęki atmosferyczne w maksimum swojego rozwoju mogą liczyć nawet miliardy cząstek wtórnych. Docierają one do powierzchni Ziemi w postaci nagłego silnego strumienia cząstek tworzących mniej więcej płaski, cienki front o średnicy nawet kilku kilometrów. Gdy jednak do atmosfery Ziemi dociera nie pojedyncza cząstka pierwotna, ale jednocześnie np. tysiące cząstek rozchodzących się w wielkim stożku, których źródłem jest zderzenie lub rozpad cząstki pierwotnej już gdzieś daleko przed dotarciem do Ziemi, to mamy do czynienia z tysiącami kaskad uderzających jednocześnie w atmosferę nawet na całej półkuli Ziemi (Rys. 1). Właśnie ze względu na takie możliwe rozmiary pęku tych kaskad i ich duże rozproszenie na niebie projekt CREDO planuje rozmieszczenie milionów małych detektorów na całej Ziemi oraz wykonanie analizy dostępnych danych z już istniejących detektorów o różnej wielkości.

Mimo prowadzonych od kilkudziesięciu lat obserwacji promieniowania kosmicznego, ciągle jest wiele do odkrycia na temat jego natury i źródeł. Obserwatoria cząstek kosmicznych, którymi obecnie dysponują naukowcy, są profesjonalne, bardzo dokładne i efektywne, ale ponieważ są zlokalizowane w zaledwie kilku miejscach na Ziemi, mają niewielką powierzchnię roboczą w porównaniu z powierzchnią całej Ziemi. Jest to bardzo istotne ograniczenie, gdyż detektor może badać promieniowanie tylko wtedy, jeżeli pada ono bezpośrednio na niego. Dominująca większość promieniowania wtórnego docierającego do Ziemi jest zatem niewykrywana, co bardzo utrudnia, a czasami uniemożliwia badanie natury kaskad cząstek, ich natężenia, zasięgu czy częstotliwości występowania. Warto wspomnieć jest też to, że obserwatoria te są dość kosztowne w budowie i utrzymaniu oraz że angażują bezpośrednio stosunkowo niewielką liczbę ludzi – głównie



Rys. 1. Różne przypadki tworzenia się i rozwoju pęków atmosferycznych nad Ziemią (rysunek schematyczny)

naukowców. O wynikach wieloletnich czasami pomiarów reszta społeczeństwa dowiaduje się dopiero po ich opublikowaniu w specjalistycznych i powszechnie niezbyt dobrze znanych czasopismach.

Okazuje się jednak, że problemów tych można uniknąć dość tanio i szybko, wykorzystując fakt, że matryce nawet zwykłych aparatów cyfrowych, np. instalowanych w smartfonach, są w stanie wykrywać promieniowanie kosmiczne i radiacyjne. Stwarza to ogromne możliwości budowy detektora rozproszonego na całej Ziemi dzięki np. wolontariuszom, którzy użyją swoich kamer do eksperymentu, a jedynym wysiłkiem z ich strony będzie zainstalowanie, zarejestrowanie się i włączenie detekcji w aplikacji opracowanej przez CREDO. Projekt CREDO planuje też instalacje w możliwie jak największej liczbie miejsc innych niewielkich stacji detektorów stacjonarnych, które pracowałyby 24 godziny na dobę przez wszystkie dni w roku, co uniezależniłoby je od czynnika ludzkiego.

Zebrałe dane z takiego detektora rozproszonego umożliwią badanie zespołów wielkich pęków wielkości nawet średnicy Ziemi i mogą być użyte do potwierdzenia lub obalenia wielu

obecnych teorii naukowych wymagających przetestowania. Dane te będą również nieocenione w medycynie, jest bowiem wiele chorób, które mają nieznaną etiologię lub potwierdzone jest, że wywołuje je promieniowanie jonizujące.

Statystycznie ok. $\frac{1}{4}$ promieniowania jonizującego dostajemy właśnie od promieniowania kosmicznego, kolejne $\frac{1}{4}$ z radonu w glebie, kolejne $\frac{1}{4}$ z pożywieniem, a ostatnie $\frac{1}{4}$ z zabiegów medycznych (prześwietlenie, tomografia). Jeśli z atmosferą Ziemi zderza się cząstka o wyjątkowo wysokiej energii (albo grupa cząstek), powstaje kaskada cząstek wtórnych, która docierając do powierzchni Ziemi, może pokryć obszar o promieniu kilku kilometrów. Jeśli znajdzie się tam człowiek, nawet niekoniecznie w centrum wielkiego pęku, to może on otrzymać średnią roczną dawkę (lub większą, co zależy od odległości od rdzenia pęku) promieniowania w ciągu ułamka sekundy, a to, jak się uważa, może prowadzić do powstawania chorób nowotworowych. Ze względu na swoją dużą wagę społeczną pogląd ten wymaga dokładnego zbadania na obszarze całej Ziemi, w czym może być pomocny projekt CREDO. Jeżeli detektor rozproszony będzie zbierał dane przez kilka-kilkanaście lat, to możliwe będą analizy korelacji przestrzennych i czasowych rozkładów pęków promieniowania kosmicznego z rozkładami występowania nowotworów i ewentualnie innych chorób o nieznannej etiologii.

Jeżeli korelacje te potwierdziłyby się, to należałoby szukać sposobów ograniczenia ekspozycji ludzi na promieniowanie kosmiczne przez np. stosowanie odpowiednich materiałów budowlanych (lub ich opracowanie). W pierwszej fazie należałoby oczywiście sprawdzić, czy obecne budynki i technologie budowlane dostarczają dostatecznego zabezpieczenia.

Ciekawym przykładem walki z narażeniem ludzi na promieniowanie jest obrona przed radonem, którego gromadzenie się w piwnicach zostało lata temu zbadane i potwierdzone [5]. Są miejsca, gdzie radonu w glebie jest wyjątkowo dużo i może on gromadzić się w domach (choć jest go tam już znacznie mniej). Zapadalność na nowotwory układu oddechowego jest tam znacznie wyższa niż w innych rejonach. Dzięki systematycznemu badaniu problemu udało się zmniejszyć narażenie ludzi na promieniowanie za pomocą prostych zabiegów, jak lepsze uszczelnienie podłogi w piwnicach i wietrzenie ich na zewnątrz.

Kaskady promieniowania kosmicznego stanowią inny problem, bo nie da się przewidzieć gdzie cząstka kosmiczna (i kaskada) uderzy, a obserwatoria naukowe i detektory pokrywają zaledwie małe obszary, a nie całą Ziemię. Może jednak dzięki projektowi CREDO już za kilka lat każdy smartfon będzie mógł nadać ostrzeżenie: „uciekaj pod dach, bo właśnie nad tobą szaleje kosmiczna ulewa” i dzięki temu uchronimy się przed np. zachorowaniem na raka. Obecnie to ciągle tylko hipoteza, która ma jednak mocne uzasadnienie teoretyczne. Potrzebne jest tylko potwierdzenie przez wielkoskalowy eksperyment. Oprócz znaczenia medycznego globalne badanie promieniowania kosmicznego ma też inne bardzo ważne praktyczne, codzienne znaczenie. Promieniowanie to odpowiada bowiem za niespodziewane awarie elektroniki, które z rok na rok przybywa i od której jesteśmy coraz bardziej uzależnieni. Dotyczy to zarówno elektroniki lekkiej, jak komputery i urządzenia

domowe, biurowe czy szpitalne, jak i energetyki globalnej – znane są przypadki poważnych wielkoskalowych uszkodzeń linii przesyłowych prądu spowodowanych burzami magnetycznymi [6].

Promieniowanie kosmiczne jest promieniowaniem jonizującym i potrafi przenikać przez grube ściany budynków. Jeżeli cząstka promieniowania zderza się z elementem urządzenia elektronicznego, to dostarcza do układu porcję energii, która może zostać zamieniona na energię elektryczną. Taka dodatkowa energia elektryczna, dostarczana z zewnątrz układu elektronicznego, nazywana jest szumem elektromagnetycznym. Szum elektromagnetyczny może np. zmienić stan logiczny komórek pamięci elektronicznej. Jest to problem powszechnie znany w elektronice. W celu zniwelowania skutków tego efektu stosuje się różne mechanizmy np. korekcji danych w pamięciach komputerów, zarówno w pamięci trwałej jak i tymczasowej (np. RAM).

Chwilowy i punktowy szum wywołany uderzeniem cząstki promieniowania kosmicznego znacznie różni się od względnie stałego szumu generowanego przez fale radiowe i inne elementy elektroniczne. Urządzenia elektroniczne projektowane są w taki sposób, aby były odporne na ten jednostajny szum. Ten generowany przez inne elementy elektroniczne, np. cewki, kondensatory i nagłe zjawiska, jak zmiana napięcia i przepływ prądu w obwodzie, wytwarza zakłócenia we wszystkich elementach elektronicznych znajdujących się w zasięgu tego szumu (jego energia maleje z kwadratem odległości i w pewnej odległości zrównuje się z szumem radiowym). Dlatego też urządzenia elektroniczne projektuje się w taki sposób, aby elementy generujące taki szum były odpowiednio ekranowane lub znajdowały się w odpowiedniej odległości od elementów, których działanie mogłyby zakłócić. Jeżeli mimo wszystko taki szum zakłóci układ logiczny, to może doprowadzić do zawieszenia się układu i ewentualnego jego restartu.

W przypadku uderzenia w Ziemię kaskad wtórnego promieniowania kosmicznego nawet pojedyncza cząstka z tych kaskad może uderzyć w konkretną cząsteczkę urządzenia elektronicznego i dostarczyć energii do pojedynczych jego punktów w bardzo krótkiej chwili. Może to np. zmienić stan logiczny pojedynczego tranzystora, komórki pamięci elektronicznej lub grupy tych elementów znajdujących się w bardzo bliskim sąsiedztwie (rzędu ułamka milimetra). W ekstremalnych przypadkach uderzenie bardzo energetycznej cząstki może doprowadzić do trwałego zniszczenia twardego dysku lub innych nośników pamięci.

APARATURA BADAWCZA I EKSPERYMENT

Szum elektromagnetyczny jest bardzo dobrze widoczny podczas zbierania danych z czujników analogowych i zamiany tych danych na sygnał cyfrowy, zwłaszcza gdy mamy do czynienia z macierzą takich czujników. Przykładem takiej macierzy jest czujnik RGB kamery cyfrowej. Komórki czujnika kamery odbierają kwanty promieniowania widzialnego i zamieniają je na sygnał elektromagnetyczny, który następnie jest przetwarzany

i zapisywany w pamięci urządzenia elektronicznego w postaci cyfrowej mapy bitowej – siatki rzędów i kolumn pikseli. Pojedynczy piksel przechowuje informacje o kolorze i jasności pojedynczego punktu na siatce. Jasność piksela zazwyczaj podawana jest w skali od 0 do 255, gdzie 0 oznacza pełną czerń, a 255 maksymalną jasność dla danego czujnika przy danych parametrach pracy. Kiedy czujnik jest całkowicie zakryty przed promieniowaniem światła widzialnego, jasność pikseli powinna znajdować się na poziomie 0. W rzeczywistości jednak każdy piksel ma jasność 5-20 właśnie z powodu oddziaływania szumu elektromagnetycznego.

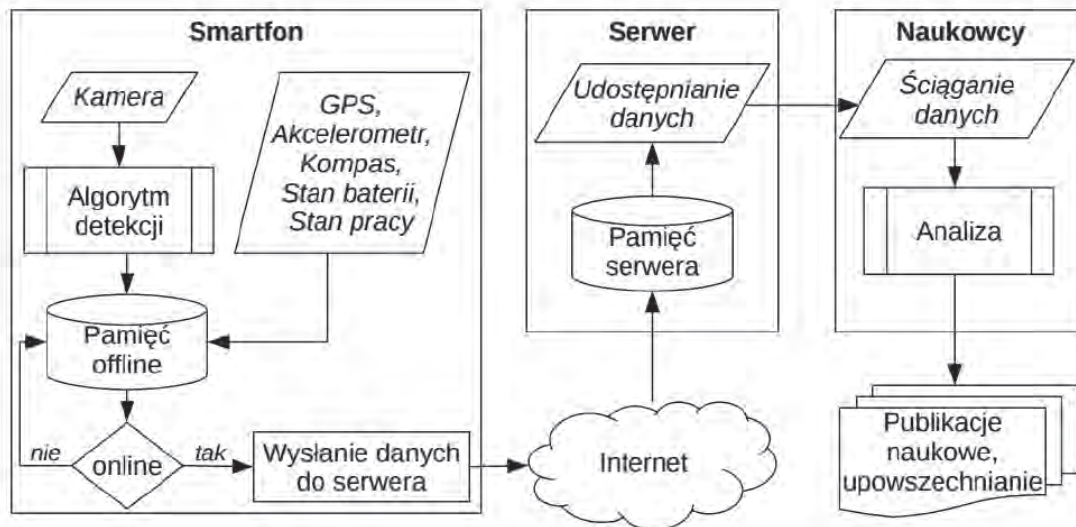
W Instytucie Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie przeprowadzono, w ramach prac nad projektem CREDO, eksperyment polegający na obserwacji szumu na obrazie z kamery cyfrowej smartfona, której czujnik został szczelnie zasłonięty przed światłem widzialnym. Okazało się, że:

- wartość szumu jest na ogół stała i nieznacznie wzrasta wraz z temperaturą urządzenia, dla większości modeli wynosi ona ok. 5-15, ale niektóre modele generują szum na poziomie ponad 40,
- niektóre egzemplarze czujników mają tzw. hot piksele, czyli obszary na matrycy, których poziom szumu jest znacznie wyższy niż na pozostałej części obrazu,
- okazjonalnie, około raz na godzinę, na pojedynczej klatce obrazu pojawiają się jasne rozbłyski o jasnościach znacznie wyższych niż poziom szumu.

Rozbłyski te mają kształt kulisty, o średnicy do ok. 10 pikseli, lub podłużny, o szerokości do kilku pikseli i długości do ok. 30 pikseli. Charakter i częstotliwość tych rozbłysków pozwala sądzić, że są to zarejestrowane efekty zderzenia cząstki promieniowania kosmicznego z komórkami matrycy aparatu cyfrowego. Jeżeli rozbłysk ma kształt kulisty, to najprawdopodobniej doszło do zderzenia z cząstką, której tor lotu był bliski prostopadłemu do powierzchni macierzy czujnika. Jeżeli rozbłysk ma kształt podłużny, najprawdopodobniej cząstka przeszła matrycę pod skosem. Dokładniejsza klasyfikacja rejestrowanych sygnałów jest zamieszczona pod koniec niniejszego artykułu i zilustrowana na rys. 5.

W eksperymencie wykorzystano powszechnie dostępne telefony komórkowe pracujące pod kontrolą systemu Android. Telefony pracowały z zasłoniętą tylną kamerą. Dane, które były zbierane przez aplikację działającą na telefonie:

- wycinek obrazu zawierający rozbłysk wraz z położeniem tego wycinka na klatce obrazu,
- czas zdarzenia z zegara wewnętrznego telefonu,
- całkowity czas pracy detektora,
- orientacja położenia telefonu względem powierzchni ziemi na podstawie akcelerometru,
- lokalizacja telefonu na podstawie GPS,
- orientacja telefonu względem biegunów Ziemi na podstawie kompasu cyfrowego (wspierane przez niektóre modele),
- temperatura pracy z termometru wewnętrznego (wspierane przez niektóre modele),
- statystyki na temat średniej jasności pikseli na klatce obrazu i średniej jasności najjaśniejszego piksela na klatce obrazu.



Rys. 2. Przepływ informacji o zarejestrowaniu rozbłysku od matrycy detektora do serwera

DZIAŁANIE DETEKTORA

Aplikacja detektora włącza kamerę w trybie preview (tryb podglądu na żywo) i przetwarza obraz w czasie rzeczywistym. Działa w dwóch trybach:

- tryb kalibracji,
- tryb detekcji.

W trybie kalibracji aplikacja zbiera statystyki na temat średniej jasności pikseli oraz średniej jasności najjaśniejszych pikseli. Następnie, po zebraniu statystyk z 500 klatek, obliczane są progi szumu:

- próg average = średnia jasność pikseli + 20,
- próg max = średnia jasność najjaśniejszych pikseli + 20,
- próg black = próg average.

Dodatkowo dla progów average i black przyjmuje się minimalne i maksymalne wartości, odpowiednio 10 i 60, a dla progu max odpowiednio 80 i 160.

W trybie detekcji aplikacja przetwarza każdą klatkę obrazu według algorytmu:

Faza 1: weryfikacja prawidłowego zasłonięcia kamery:

- Obliczenie średniej jasności pikseli oraz liczby pikseli ciemniejszych od progu black.
- Jeżeli średnia jasność klatki jest wyższa niż próg average lub liczba pikseli jaśniejszych od progu black jest wyższa niż 0,1%, algorytm pomija klatkę w dalszym przetwarzaniu.

Faza 2: wykrycie rozbłysków i wysłanie informacji o wykryciu do serwera:

- Różnica czasu między pobraniem klatki obrazu a czasem pobrania poprzedniej klatki obrazu zostaje doliczona do czasu pracy detektora.
- Jeżeli na obrazie znajdują się piksele jaśniejsze od progu max, to fragment obrazu zawierający je (współrzędne piksela z marginesem 10px) zostaje wycięty i wysłany do serwera wraz z pozostałymi danymi zbieranymi przez aplikację.

Schemat całego procesu zdobywania, gromadzenia i analizy danych z detektorów został przedstawiony na rys. 2.

Jasny rozbłysk, zarejestrowany przez kamerę HD (1280x720), zazwyczaj składa się z nie więcej niż 100 pikseli (pojedynczy rozbłysk) lub 300 pikseli (wiele rozbłysków) jaśniejszych od progu black. To odpowiednio 0,01% i 0,03% takiej klatki. Na podstawie wstępnych analiz wynika, że jeżeli kamera jest niedostatecznie szczelnie zakryta, to liczba jaśniejszych pikseli wynosi co najmniej kilka promili. Na podstawie tych obserwacji zastosowano próg ilościowy 0,1%, który skutecznie wykrywa szczelne zasłonięcie kamery i przepuszcza rozbłyski spowodowane przez promieniowanie kosmiczne.

IMPLEMENTACJA OPROGRAMOWANIA

Użycie telefonu komórkowego oraz systemu operacyjnego Android daje wiele możliwości, ale stawia też pewne wymagania. Aplikacja musi uwzględniać wymagania naukowe, techniczne i użytkowe projektu *citizen science*.

Wymagania naukowe

Z punktu widzenia naukowego najbardziej pożądanym trybem pracy kamery jest tryb, w którym obraz jest dostarczany w formacie surowym, czyli jest pozbawiony jakiegokolwiek obróbki poprawiającej jakość obrazu, a w szczególności automatycznego usuwania szumu, oraz jest pozbawiony kompresji stratnej. Ponadto sygnał powinien być zbierany ze wszystkich czujników na matrycy w sposób ciągły, czyli nie powinno być przerw w naświetlaniu kliszy cyfrowej, ponieważ tylko taki tryb pracy gwarantuje zarejestrowanie wszystkich uderzeń cząstek promieniowania kosmicznego.

Dodatkową wartość naukową dostarcza odczyt z czujników akcelerometru, GPS, kompasu cyfrowego i zegara systemowego, który jest automatycznie synchronizowany przez system operacyjny.

Wymagania techniczne

System Android daje dostęp do niewielu ustawień pracy kamery. Kamera może pracować w trybie nagrywania i trybie podglądu. W trybie nagrywania obraz jest zapisywany do pliku przy użyciu kompresji stratnej i wszystkich algorytmów poprawiających jakość obrazu oraz usuwających szum. Z tego powodu ten tryb pracy kamery jest nieprzydatny naukowo. Ten tryb pracy byłby też trudny do realizacji z powodów technicznych, ponieważ taki plik trzeba by składować w pamięci telefonu do czasu przetworzenia go przez algorytm detekcji i później kasować, a pamięć telefonu ma ograniczoną liczbę cykli zapisu.

W trybie podglądu aplikacja otrzymuje zawartość binarną klatek obrazu w czasie rzeczywistym. Dodatkowo, w celu oszczędzania energii, klatki obrazu dla podglądu nie są poddawane obróbce przez system operacyjny, ale niestety mogą być poddawane obróbce algorytmami zainstalowanymi bezpośrednio w kamerze, a obecnymi zwłaszcza w modelach high-end produkowanych od 2016 r. Dzięki temu, zwłaszcza w starszych modelach z niższej półki cenowej, możliwe jest wykorzystanie tego trybu pracy kamery do detekcji cząstek promieniowania kosmicznego.

W większości modeli telefonów kamera w trybie podglądu dostarcza klatki obrazu z częstotliwością 30 klatek na sekundę. Nie ma jednak informacji, przez jaki czas klatka obrazu była faktycznie naświetlana i czy w związku z tym wystąpiły przedziały czasu, w których czujnik kamery mógł nie zbierać informacji o zderzeniach z cząstkami promieniowania kosmicznego. Jednak jeżeli kamera została przez użytkownika szczelnie zakryta przed światłem zewnętrznym, można mieć pewność, że te przedziały czasu będą najkrótsze z możliwych dla danego modelu telefonu. Kamera w trybie podglądu nie pracuje z pełną rozdzielczością. Zazwyczaj system operacyjny umożliwia pracę z maksymalną rozdzielczością HD (1280x720) lub FullHD (1920x1080), podczas gdy kamera umożliwia nagrywanie lub robienie zdjęć w rozdzielczości 4K. Wstępne badania pokazały jednak, że nie stanowi to problemu. Przekątna typowego czujnika matrycy kamery wynosi około 5-6 mm i ma proporcje 4:3. Dzięki temu że uderzenie cząstki powoduje rozbłysk pokrywający kilka sąsiadujących ze sobą pikseli, zastosowanie tylko 1/4 pełnej rozdzielczości kamery nie powoduje pogorszenia dokładności detektora, a jednocześnie znacząco zmniejsza ilość danych do przetworzenia. Jest to tym bardziej istotne, że kamera umieszcza zawartość binarną klatek obrazu w odpowiednich buforach, które muszą zostać zwolnione po ich przetworzeniu przez aplikację. Jeżeli bufor nie zostanie zwolniony przed zarejestrowaniem kolejnej klatki, jej zawartość jest tracona.

Smartfon nie ma aktywnego chłodzenia. Dlatego, nawet jeżeli jest zasilany z ładowarki, to oszczędzanie energii jest konieczne, aby nie doszło do przegrzania. Przegrzanie telefonu nie powinno spowodować jego uszkodzenia, ponieważ ma on wiele systemowych mechanizmów zapobiegających. Jednym z nich jest spowolnienie pracy procesora głównego, innym automatyczne wyłączenie urządzeń (np. kamery) lub całego telefonu. Przegrzanie telefonu powoduje też szybsze zużycie baterii. W tym celu aplikacja, w miarę możliwości technicznych, korzysta z rozdzielczości stanowiącej 1/4 pełnej rozdzielczości kamery. Dodatkowo aplikacja wykorzystuje pewną funkcję systemu Android, która

pozwała na pracę kamery po wyłączeniu ekranu. Funkcja ta polega na tym, że najpierw tworzone jest okno wyświetlane nad oknami pozostałych aplikacji (ang. *top most*). Następnie pod to okno przekierowany zostaje podgląd z kamery. Dzięki temu kamera pracuje nadal, pomimo przełączenia na inną aplikację lub wyłączenia ekranu. Wyłączony ekran to dodatkowa oszczędność energii.

W celu jak największego zoptymalizowania procesu obróbki klatki obrazu odbywa się ona w osobnych wątkach, dzięki czemu wykorzystywane są wszystkie rdzenie procesora. Ponadto aplikacja ma wiele mechanizmów zabezpieczających przed przegrzaniem i rozładowaniem baterii. Jeżeli telefon ma termometr wewnętrzny, detekcja zostanie wstrzymana, gdy telefon osiągnie próg zbyt wysokiej temperatury, oraz zostanie wznowiona, kiedy temperatura spadnie poniżej odpowiedniego progu.

Pomimo podłączenia telefonu do ładowarki, bateria może być i tak rozładowywana, ponieważ moc ładowarki może nie pokrywać zapotrzebowania telefonu na energię. Dlatego jeżeli poziom naładowania spadnie poniżej progu niskiej wartości, detekcja zostanie wstrzymana do czasu, kiedy poziom naładowania energii nie osiągnie odpowiednio wysokiego progu. Progi temperatury i poziomu naładowania baterii można ustalać z poziomu ustawień aplikacji.

Z wykorzystaniem telefonów komórkowych wiążą się następujące problemy techniczne, które prowadzą do pewnych wniosków lub do użycia opracowanych sposobów radzenia sobie z nimi.

Problem: uczestnicy nie zawsze dopilnowują, by prawidłowo zakryć kamerę.

Metoda: zastosowanie progów jasności i autokalibracji tych progów. Jeżeli kamera nie jest prawidłowo zakryta, użytkownik jest o tym informowany w wyraźny sposób.

Problem: nowsze i droższe modele telefonów mają lepsze, sprzętowe mechanizmy usuwania szumów, które mogą skutecznie eliminować rozbłyski z klatki obrazu.

Wniosek: nowe i drogie telefony, z dobrym mechanizmem usuwania szumów, niestety nie nadają się do detekcji.

Problem: działanie kamery i algorytmu przetwarzającego obraz powoduje znaczne zużycie energii, co może prowadzić do szybkiego rozładowania baterii i nagrzewania się telefonu.

Metoda: zaleca się podłączać telefon do ładowarki podczas trwania detekcji. Ponadto aplikacja sama wstrzymuje detekcję, jeżeli temperatura telefonu osiągnęła wartość wyższą niż ustawiona lub poziom naładowania baterii spadł poniżej ustawionej wartości. W systemach Android do wersji 9.0 możliwa jest praca kamery pomimo wyłączenia ekranu. To pozwala znacząco zmniejszyć nagrzewanie się telefonu.

Pomimo opisanych trudności technicznych, przedstawiony detektor jest w stanie dostarczać dane wartościowe naukowo. Zegar telefonu jest automatycznie synchronizowany, dzięki czemu podaje on czas z dokładnością do sekundy. Rozbłysk na obrazie często ma kształt podłużny i jeżeli telefon jest wyposażony w kompas, można określić kierunek, z którego nadleciała cząstka. Te dwie wielkości: czas i kierunek wystarczają, aby dana obserwacja mogła mieć poważne znaczenie naukowe.

dokończenie w następnym numerze