

Wstęp

Celem pracy jest projekt detektora promieniowania kosmicznego, który będzie wykorzystywany przez społeczność Citizen Science. Detektor musi spełniać odpowiednie wymagania. W szczególności musi być:

- tani i prosty w zbudowaniu przez uczestnika Citizen Science,
- prosty w użyciu,
- skutecznie wykrywać promieniowanie kosmiczne,
- wysyłać dane o detekcji do serwera projektu CREDO.

W wyniku prac nad projektem detektora, udało się stworzyć aplikację na powszechnie używane smartfony, która wykrywa promieniowanie kosmiczne uderzające w sensor kamery telefonu. Uczestnik instaluje aplikację, zakrywa kamerę i włącza detekcję w aplikacji. Aplikacja analizuje obraz z kamery, wykrywa na nim promieniowanie kosmiczne i wysyła na serwer informacje o wykryciach.

Badanie promieniowania kosmicznego jest bardzo istotne z punktu widzenia kosmologii i astrofizyki. Obecnie działające detektory naukowe są detektorami bardzo dokładnymi, ale zlokalizowanymi na małym obszarze umieszczonymi w kilku miejscach na kuli ziemskiej. Ten projekt pozwoli na zbudowanie detektora rozproszonego, który jest w stanie pokryć ogromny obszar powierzchni Ziemi. Jest to szczególnie istotne do badania tzw. pryszniców strumienia cząstek czyli całej kaskady cząstek, jaka dociera do powierzchni Ziemi będącej efektem zderzenia pojedynczej cząstki promieniowania pierwotnego z górnymi warstwami atmosfery. Taki prysznic przy powierzchni Ziemi może mieć średnicę rzędu 6km. Dzięki rozproszonemu detektorowi, będzie można badać jego rzeczywisty zasięg i energię.

Ponieważ promieniowanie kosmiczne jest promieniowaniem jonizującym i przenikliwym, może powodować mutacje genetyczne i związane z tym choroby. Zastosowanie rozproszonego i masowego detektora pozwoli też badać przenikliwość tego promieniowania przez ściany budynków. Istnieją też badania wykazujące związek zarejestrowaniem promieniowania kosmicznego z trzęsieniami ziemi.

Rozwinięcie

Promieniowanie kosmiczne to wysokoenergetyczne promieniowanie docierające do Ziemi spoza Układu Słonecznego. W przestrzeni kosmicznej spotykamy promieniowanie pierwotne. Pierwotne promieniowanie kosmiczne to głównie (~99%) jądra atomów i wolne elektrony (~1%) rozpędzone do bardzo wysokich energii, nawet do $3 \cdot 10^{20}$ eV.

Cząstki promieniowania pierwotnego zderzają się z cząsteczkami powietrza w górnej warstwie atmosfery ziemskiej. W efekcie powstają wtórne cząstki promieniowania kosmicznego, które zderzają się z kolejnymi cząsteczkami atmosfery. Powstaje tzw. kaskada

cząstek. Kolejne kaskady promieniowania wtórnego docierają do powierzchni Ziemi. Pojedyncza cząstka promieniowania kosmicznego może wywołać miliony kaskad, które docierają do powierzchni Ziemi w postaci tzw. prysznicy cząstek.

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 zmienić stan logiczny komórek pamięci elektronicznej. Jest to problem powszechnie znany w elektronice. W celu zniwelowania skutków tego efektu stosuje się różne mechanizmy korekcji danych w pamięciach komputerów, zarówno w pamięci trwałej jak i tymczasowej (np. RAM).

Szum wywołany uderzeniem cząstki promieniowania kosmicznego różni się od szumu generowanego przez fale radiowe i inne elementy elektroniczne. Szum generowany przez fale radiowe ma wartość względnie stałą. Urządzenia elektroniczne projektowane są w taki sposób aby były odporne na ten szum.

Szum generowany przez inne elementy elektroniczne, np. cewki, kondensatory, nagła zmiana napięcia i przepływ prądu w obwodzie, generuje szum we wszystkich elementach elektronicznych znajdujących się w zasięgu tego szumu (energia szumu maleje z kwadratem odległości, w odpowiedniej odległości zrównuje się z szumem radiowym). Urządzenia elektroniczne projektuje się w taki sposób aby elementy generujące taki szum znajdowały się w odpowiedniej odległości od elementów, które mogłyby zakłócić, lub są odpowiednio ekranowane. Jeżeli mimo wszystko tak szum zakłóci układ logiczny, to może doprowadzić zawieszenia się tego układu i ewentualnego jego restartu.

Szum generowany przez uderzenie cząstki promieniowania kosmicznego ma charakter punktowy. Cząstka uderza w konkretną cząsteczkę w urządzeniu elektronicznym i dostarcza energii w pojedynczych punktach tego urządzenia. Np. może zmienić stan logiczny pojedynczego tranzystora, komórki pamięci elektronicznej, lub grupy tych elementów znajdujących się w bardzo bliskim sąsiedztwie (rzędu ułamka milimetra).

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 sensor RGB kamery cyfrowej. Komórki sensora 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.

Mapa bitowa składa się z siatki pikseli ułożonych w rzędy i kolumny. Siatka pikseli przechowuje cały obraz klatki kadru kamery. Pojedynczy piksel przechowuje informacje o kolorze i jasności pojedynczego punktu na siatce. Jasność piksela zazwyczaj podawana jest

w skali 0 do 255, gdzie 0 oznacza pełną czerń, a 255 maksymalną rejestrowalną jasność dla danego sensora przy danych parametrach pracy.

Kiedy sensor jest całkowicie zakryty przed promieniowaniem światła widzialnego to jasność pikseli powinna znajdować się na poziomie 0. W rzeczywistości jednak, każdy piksel posiada jasność 5-20. Jest to właśnie efekt oddziaływania szumu elektromagnetycznego.

Obserwacja szumu na obrazie z kamery cyfrowej, której sensor został szczelnie zasłonięty przed światłem widzialnym pokazała że:

- wartość szumu jest na ogół stała, nieznacznie wzrasta wraz z temperaturą urządzenia, dla większości modeli wynosi ona około 5-15 ww. skali, niektóre modele generują szum na poziomie 6, a inne ponad 40,
- niektóre sztuki sensorów posiadają 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.

Te rozbłyski mają kształt kulisty, o średnicy do ok. 10 pikseli, lub podłużny o średnicy do kilku pikseli i długości do ok. 30 pikseli. Charakter i częstotliwość tych rozbłysków pozwala domniemywać, 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 w stosunku do powierzchni macierzy sensora. Jeżeli rozbłysk ma kształt podłużny, najprawdopodobniej cząstka przeszła matrycę pod skosem.

Aparatura badawcza

W eksperymencie wykorzystano powszechnie dostępne telefony komórkowe pracujące pod kontrolą systemu Android. Telefony pracowały z zasłoniętą tylną kamerą, z której przetwarzany był obraz. Dane jakie są 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 telefonu względem 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, średniej jasności najjaśniejszego piksela na klatce obrazu.

Działanie detektora

Aplikacja detektora włącza kamerę w trybie preview i przetwarza obraz w czasie rzeczywistym. Aplikacja działa 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 progów max odpowiednio 80 i 160.

W trybie detekcji aplikacja przetwarza każdą klatkę obrazu według algorytmu:

1. Faza 1: weryfikacja prawidłowego zasłonięcia kamery:
 - a. Obliczenie średniej jasności pikseli oraz liczbę pikseli ciemniejszych od progów black.
 - b. Jeżeli średnia jasność klatki była wyższa niż próg average lub liczba pikseli jaśniejszych od progów black była wyższa niż 0,1% to algorytm pomija klatkę w dalszym przetwarzaniu.
2. Faza 2: wykrycie rozbłysków i wysłania informacji o wykryciu do serwera
 - a. Różnica czasu pobrania klatki obrazu od czasu pobrania poprzedniej klatki obrazu zostaje doliczona do czasu pracy detektora.
 - b. Jeżeli na obrazie znajdują się piksele jaśniejsze od progów max, to fragment obrazu je zawierający (współrzędne piksela z marginesem 10px) zostaje wycięty i wysłany do serwera wraz z pozostałymi danymi zbieranymi przez aplikację.

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 progów black. To odpowiednio 0,01% i 0,03% takiej klatki. Na podstawie wstępnych analiz, jeżeli kamera była niedostatecznie szczelnie zakryta to ilość jaśniejszych pikseli wynosiła 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.

Techniczna implementacja oprogramowania

Aplikacja musi uwzględniać wymagania użytkowe projektu Citizen Science, wymagania techniczne i wymagania naukowe.

Wymagania Citizen Science

Citizen Science to społeczność wolontariuszy, która chce brać udział w prowadzeniu badań naukowych. Społeczność składa się z osób w różnym wieku, o różnym poziomie i kierunku wykształcenia oraz mówiących w różnych językach.

Aby maksymalnie wykorzystać potencjał uczestników, aplikacja musi być jak najbardziej prosta w instalacji i użytkowaniu oraz jak najszerszej dostępna. To gwarantuje, że uczestnik będzie potrafił prawidłowo zbudować urządzenie badawcze i je włączyć.

Aplikacja została napisana na system Android, ponieważ jest to najpopularniejszy system operacyjny na smartfony, zwłaszcza smartfony tanie, których kamery nie posiadają zaawansowanych mechanizmów odszumiania. Instalacja aplikacji jest możliwie bezproblemowa. Wystarczy zainstalować aplikację z ogólnego sklepu Google Play. Niestety, używanie konta Google Play wymaga zalogowania się na konto Google. Nie każdy użytkownik chce zakładać i używać konta Google, dlatego aplikację można też pobrać ze stron internetowej projektu i zainstalować ręcznie.

Interfejs aplikacji został uproszczony do minimum. Przy pierwszym uruchomieniu, aplikacja prosi o zalogowanie się lub rejestrację nowego konta uczestnika projektu CREDO. Po pomyślnym zalogowaniu się, aplikacja wyświetla ekran z krótkim opisem projektu i jednym przyciskiem, po kliknięciu w który aplikacja przechodzi do ekranu detektora. Ekran detektora zawiera jeden przycisk, którego naciśnięcie powoduje włączenie detekcji. Jeżeli detekcja została włączona, a użytkownik nie zasłonił poprawnie kamery, to aplikacja wyświetli duży wyraźny napis z tą informacją. Dzięki takiemu podejściu jak największa grupa uczestników powinna poradzić sobie z prawidłowym uruchomieniem detekcji.

W czasie działania detekcji, aplikacja wyświetla podstawowe statystyki: czas działania detektora oraz ilości wykryć. Bardziej zaawansowani użytkownicy mogą kliknąć w przycisk "statystyki dla nerdów". Powoduje to wyświetlenie dodatkowej tabeli, która zawiera dodatkowe informacje jak średnia jasność klatki obrazu czy średnia jasność najjaśniejszego piksela.

Uczestnicy Citizen Science chcą znać swój wkład w eksperyment naukowy. Dlatego aplikacja po rozwinięciu menu daje dostęp do zaawansowanych funkcji. Jedną z tych funkcji jest przegląd wykryć. Ekran przeglądu zawiera wycinek obrazu zawierający rozbłysk wraz z pozostałymi informacjami zebranymi w czasie wystąpienia zdarzenia i wysłanymi na serwer projektu.

Uczestnicy często interesują się w jaki sposób działa ich narzędzie badawcze i chcą się aktywnie angażować w jego udoskonalanie. Dlatego kod źródłowy aplikacji został udostępniony publicznie na licencji MIT. Każdy uczestnik, który potrafi programować, może ściągnąć kod źródłowy z serwisu GitHub, dokonać w nim zmian i wysłać poprawki do autorów aplikacji.

Wymagania naukowe

Użycie telefonu komórkowego oraz systemu operacyjnego Android daje szereg możliwości ale nakłada też szereg ograniczeń.

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, w szczególności automatycznego usuwania szumu oraz pozbawiony kompresji stratnej. Ponadto sygnał powinien być zbierany ze wszystkich sensorów na matrycy oraz 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 z powodów technicznych, gdyż 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 zaimplementowanym bezpośrednio w kamerze obecnymi zwłaszcza w modelach high-end produkowanych od 2016 roku. 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 w związku z tym czy wystąpiły przedziały czasu w których sensor kamery mógł nie zbierać informacji o zderzeniach z cząstkami promieniowania kosmicznego. Jednak, jeżeli kamera została przez użytkownika szczelnie zakryta przed światłem z zewnątrz, można mieć pewność, że te przedziały czasu będą najkrótsze z możliwych dla danego modelu.

Kamera w trybie podglądu nie pracuje z pełną rozdzielczością kamery. Zazwyczaj system operacyjny umożliwia pracę z maksymalną rozdzielczością HD (1280x720) lub FullHD (1920x1080) podczas gdy kamera umożliwia nagrywanie lub robienie zdjęć w rozdzielczości 4K. Jednak wstępne badania pokazały, że nie stanowi to problemu. Przekątna typowego sensora matrycy kamery wynosi około 5-6mm 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 posiada 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 posiada on szereg systemowych mechanizm zapobiegających temu. 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 pozwala na pracę kamery po wyłączeniu ekranu. Ta funkcja polega na tym, że najpierw tworzone jest okno wyświetlane nad oknami pozostałych aplikacji (ang. top most). Następnie pod to okno przekierowanych 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 posiada szereg mechanizmów zabezpieczających przed przegrzaniem i rozładowaniem baterii. Jeżeli telefon posiada termometr wewnętrzny, detekcja zostanie wstrzymana jeżeli telefon osiągnie próg zbyt wysokiej temperatury oraz zostanie wznowiona gdy 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.

Analiza danych

W chwili pisania tego artykułu zgromadzono 280000 obrazów zderzeń, które zostały nadesłane od 3300 uczestników.

Wnioski

Pomimo wielu początkowych 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. Jeżeli telefon jest wyposażony w kompas, można określić kierunek z którego nadleciała cząstka.

Problemy techniczne

Z wykorzystaniem telefonów komórkowych wiązą się następujące problemy techniczne:

- uczestnicy nie zawsze dopilnowują by prawidłowo zakryć kamerę,
- nowsze i droższe modele telefonów posiadają lepsze, sprzętowe mechanizmy odszumiania, które skutecznie usuwają rozbłyski z klatki obrazu,
- działanie kamery i algorytmu przetwarzającego obraz powoduje znaczne zużycie energii co prowadzi do szybkiego rozładowania baterii i nagrzewania się telefonu.

Problem weryfikacji prawidłowego zakrycia kamery udało się rozwiązać przez zastosowanie progów jasności i autokalibracji tych progów. Jeżeli kamera nie jest prawidłowo zakryta, użytkownik jest o tym informowany w sposób wyraźny.

Nowe i drogie telefony, z dobrym mechanizmem odszumiania, niestety nie nadają się do detekcji.

Z powodu szybkiego wyczerpywania się baterii 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.

Podsumowanie

Przedstawiony projekt detektora spełnia warunki Citizen Science i dostarcza dane wartościowe naukowo. Uczestnik Citizen Science do zbudowania detektora potrzebuje smartfonu, którego zapewne posiada lub może osiąść niskim dla niego kosztem. Następnie musi na nim zainstalować odpowiednią aplikację, co też nie jest operacją trudną. Musi też zadbać o to by telefon miał dostęp do internetu (np. przez skonfigurowanie sieci Wifi). Użycie detektora sprowadza się do włączenia aplikacji i zakrycia kamery telefonu. Cała reszta odbywa się już automatycznie.