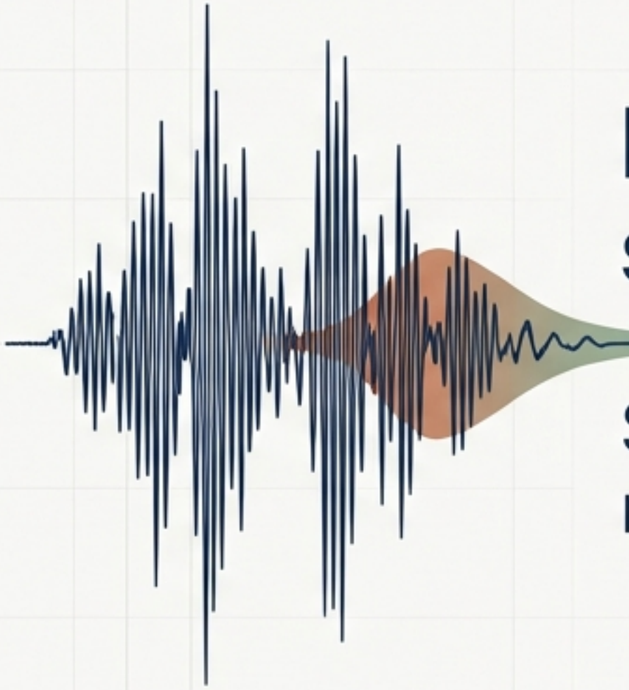


Klasifikacija urbanih zvukova u saobraćaju korišćenjem TinyML-a

Sistem za detekciju buke u realnom vremenu na mikrokontrolerima sa ograničenim resursima

NotebookLM

Sistemski odgovor na ekološki izazov

Buka je drugi po redu ekološki uzrok zdravstvenih problema u Evropi. Tradicionalni sistemi ne vrše automatsku klasifikaciju i zavise od cloud infrastrukture.

Tradicionalni Cloud Monitoring:

- Visoka latencija (zavisnost od mreže)
- Visoka potrošnja energije
- Rizik po privatnost (audio se šalje na server)
- Ograničena prostorna pokrivenost

TinyML Edge Pristup:

- **Gotovo real-time odgovor (~144 ms)**
- Niska potrošnja (baterijsko napajanje)
- **GDPR usklađenost** (lokalna obrada, bez slanja audija)
- **Distribuirani senzorski čvorovi**

NotebookLM

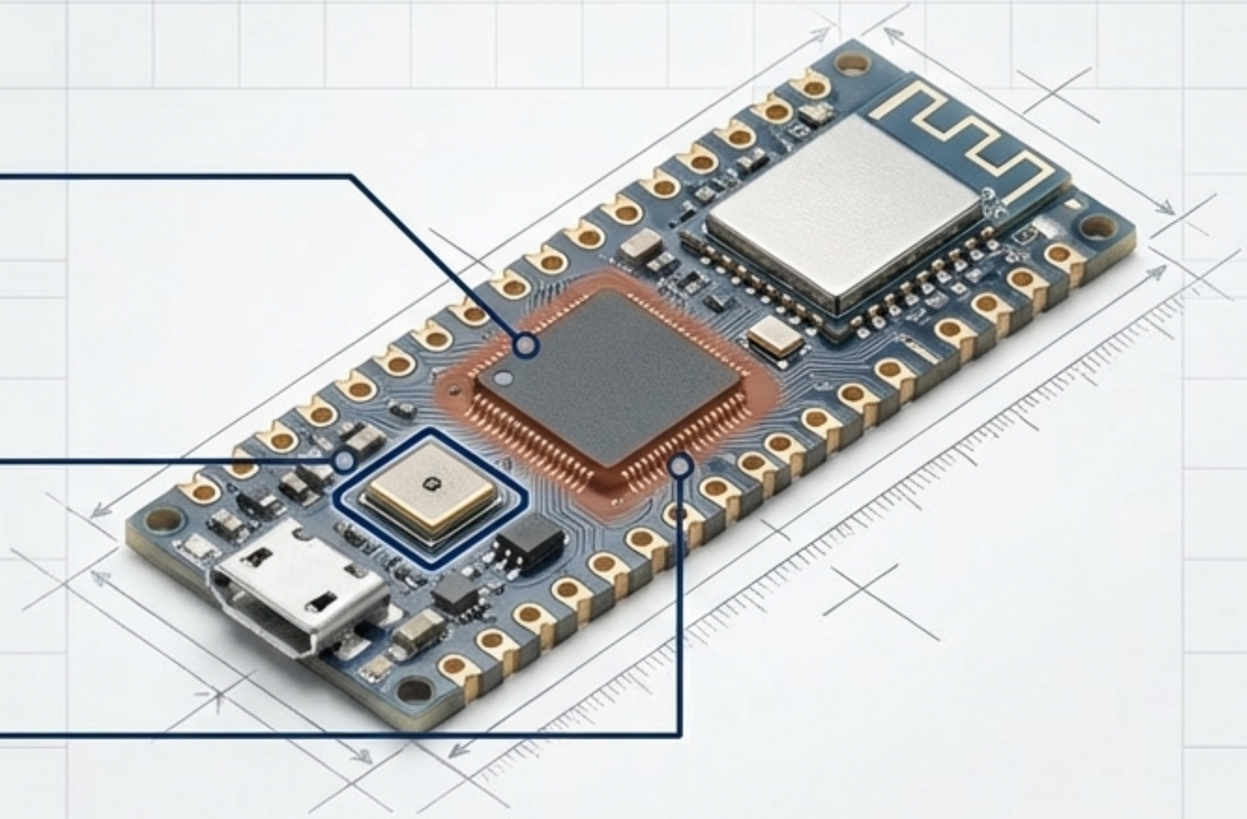
Hardverska osnova: Arduino Nano 33 BLE Sense Rev2

Kompaktna platforma koja integriše akviziciju zvuka i obradu neuronskih mreža na jednom čipu.

Mikrokontroler: nRF52840 (Arm Cortex-M4F, 64 MHz). Kapacitet: 1 MB Flash, 256 KB SRAM.

Senzor zvuka: MP34DT06JTR. Omnidirekcioni PDM mikrofon, snima na 16 kHz bez eksternog hardvera.

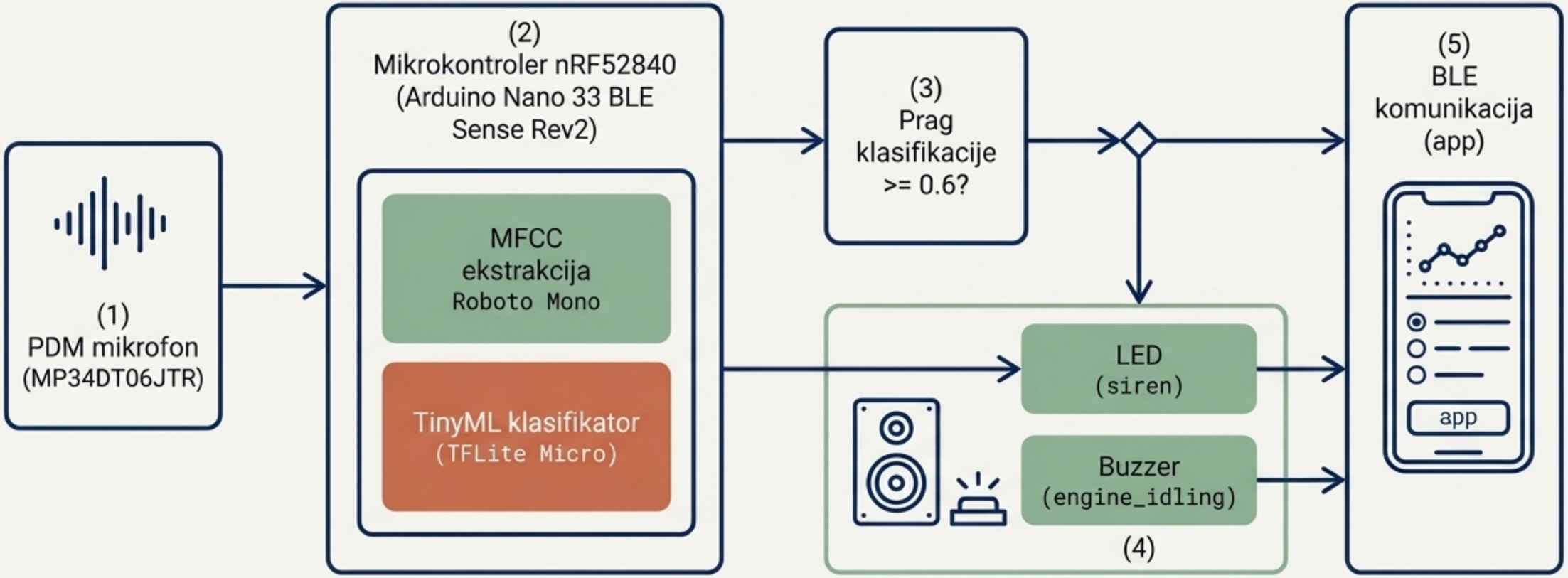
Komunikacija: Bluetooth 5 Low Energy modul za bežični prenos rezultata.



NotebookLM

Arhitektura sistema: Životni ciklus signala

Softverski i hardverski slojevi su integrisani putem Edge Impulse platforme za optimizaciju procesa od akvizicije do aktuacije.



NotebookLM

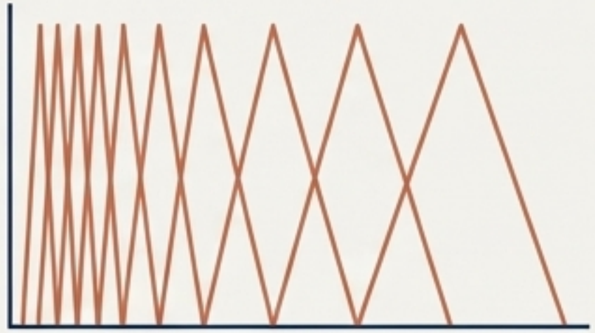
Ekstrakcija karakteristika: Prevođenje zvuka za mašine

Sirovi audio signal (16.000 uzoraka) je prevelik za direktnu analizu. Koristi se MFCC (Mel-Frequency Cepstral Coefficients) za kompresiju ključnih zvučnih obrazaca.

[Step 1]: Sirovi Audio

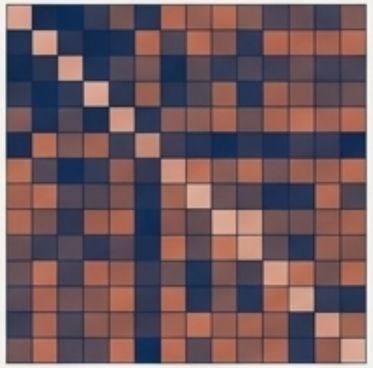
Segmentacija u okvire i primjena `Brze Furijeove Transformacije` (FFT).

[Step 2]: Mel-Filterbank



Aproksimacija ljudskog sluha (linearno ispod `1000 Hz`, logaritamski iznad).

[Step 3]: MFCC Matrica

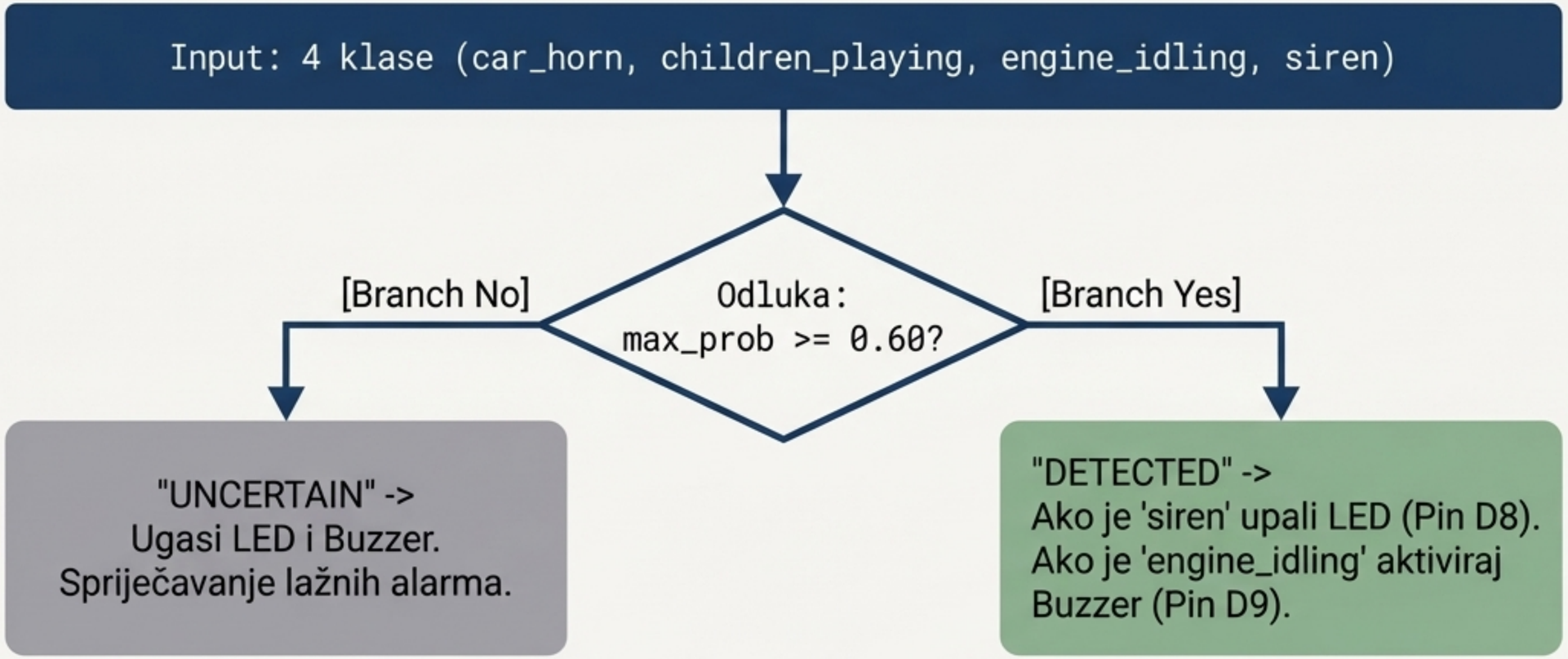


`Diskretna kosinusna transformacija` (DCT) kreira komprimovanu reprezentaciju za neunsnroom za neuronsku mrežu.

NotebookLM

Logika odlučivanja i fizička aktuacija

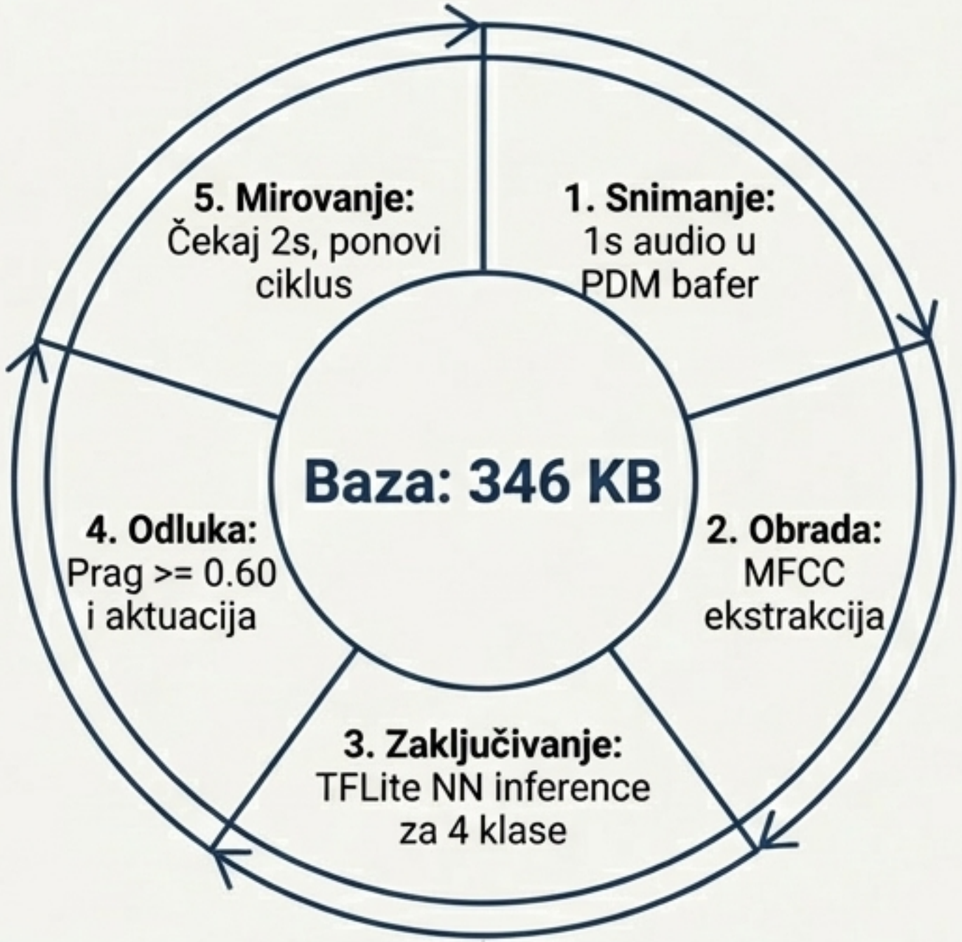
TensorFlow Lite Micro model računa vjerovatnoće za 4 ciljane saobraćajne klase.
Sistem zahtijeva prag sigurnosti pre pokretanja aktuatora.



NotebookLM

Ugrađena programska petlja

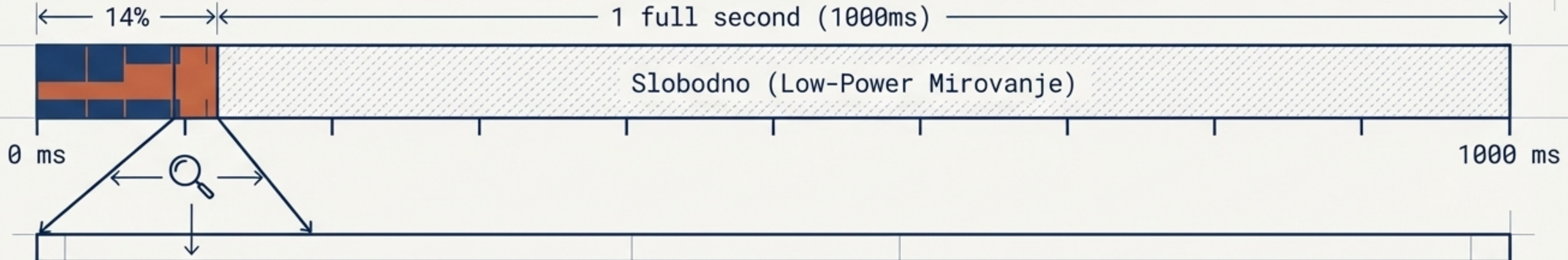
Generisani firmware iznosi tačno 346.968 bajtova (85 stranica od 4 KB flash memorije), što omogućava neprekidno funkcionisanje bez eksternih zavisnosti.



NotebookLM

Performanse u realnom vremenu: Arhitektura niske latencije

Sistem obrađuje čitavu sekundu zvuka za manje od 150 milisekundi, ostavljajući procesor slobodnim za low-power režime rada.



- DSP (MFCC ekstrakcija):	116–136 ms
- Inference (NN klasifikacija):	6–8 ms
- Postprocessing:	~50 µs
- Ukupno po ciklusu:	**~144 ms**

[Insight annotation]: Samo 6 do 8 ms je potrebno neuronskoj mreži da klasifikuje obrađeni zvuk.

NotebookLM

Dijagnostika tačnosti: Realni testovi na uređaju

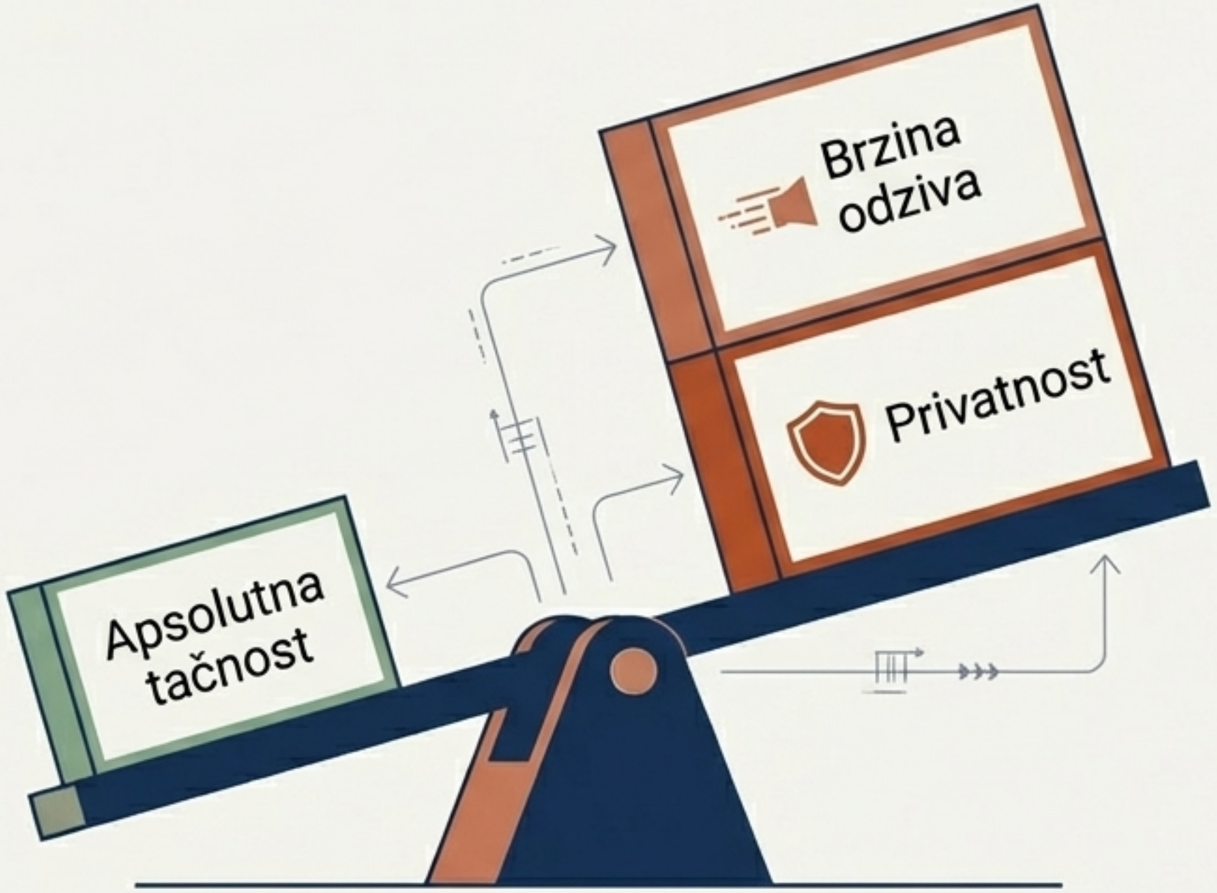
Ukupna tačnost na test setu iznosi 63.67% (F1 Score: 0.83). Međutim, realni testovi pokazuju drastičnu razliku između kontinuiranih i kratkotrajnih izvora zvuka.

Class: Siren (Sirena)	Vjerovatnoća: 0.984	Result: DETECTED	Insight: Visoka pouzdanost.
Class: Engine_idling (Motor)	Vjerovatnoća: 0.820	Result: DETECTED	Insight: Operativno upotrebljivo.
Class: Children_playing (Dječija igra)	Vjerovatnoća: 0.590	Result: UNCERTAIN	Insight: Potrebno obogaćivanje dataseta.
Class: Car_horn (Truba)	Vjerovatnoća: 0.246	Result: UNCERTAIN	Insight: Zvuci su prekratki i previše varijabilni za pouzdanu klasifikaciju.

NotebookLM

Sinteza: Balansiranje kompromisa na ivici mreže

Da li je 64% tačnosti dovoljno za pametan grad?



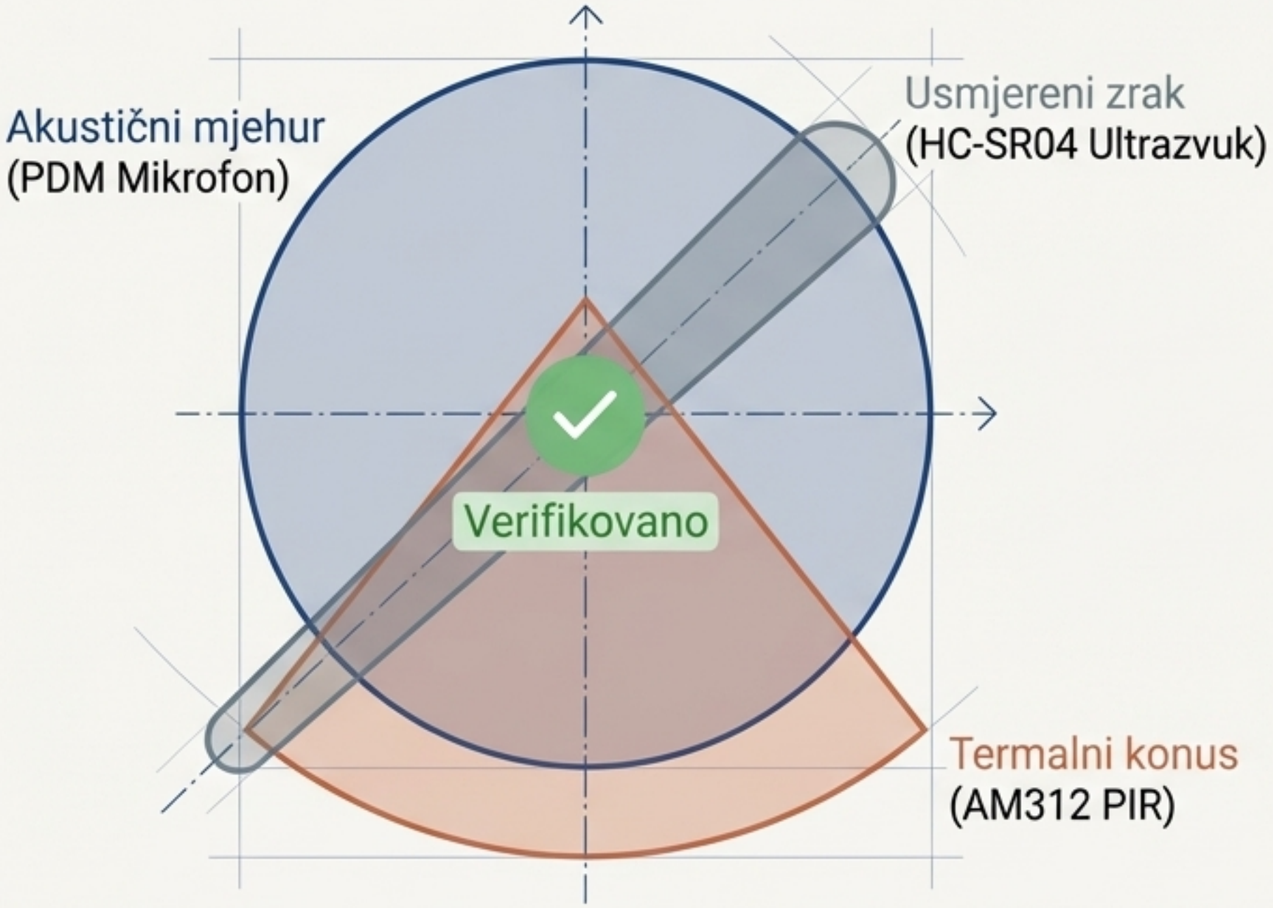
U TinyML ekosistemu, apsolutna tačnost se namjerno žrtvuje u korist hiper-lokalne, bezbjedne i trenutne reakcije.

- **Privatnost iznad svega**: Odbacivanjem cloud obrade, audio nikada ne napušta ulicu, rješavajući ključni problem GDPR-a.
- **Specifična primjenjivost**: Iako sistem griješi kod haotičnih zvukova (trube), njegova tačnost od >98% za kritične alarme (sirene) dokazuje punu operativnu zrelost za prioritetne gradske koridore.

NotebookLM

Mapa puta: Sensor Fusion za eliminaciju lažnih alarma

Budući razvoj podrazumijeva integraciju više jeftinih senzora koji rade u tandemu kako bi se kompenzovala ograničenja samog mikrofona.



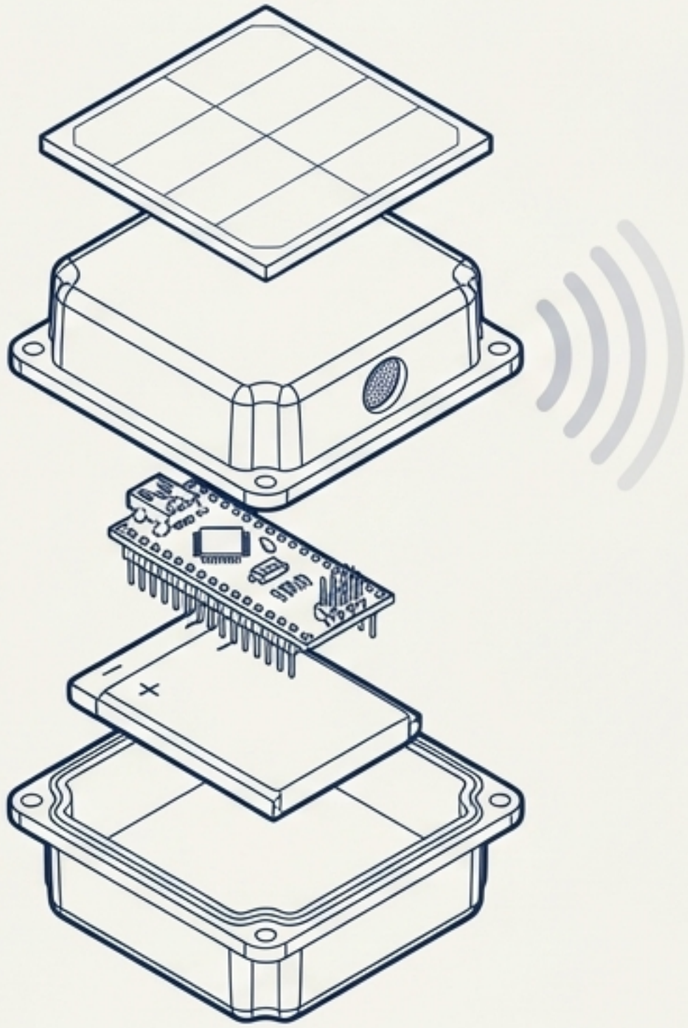
- **Audio klasifikacija:** Detektuje zvučni potpis motora ili sirene.
- **+ PIR senzor (AM312):** Potvrđuje fizičko prisustvo i pokret objekta.
- **+ Ultrazvuk** (HC-SR04): Mjeri tačnu udaljenost i eliminiše pozadinsku buku iz daljine.

Rezultat: Audio algoritam se budi iz low-power režima tek kada PIR senzor detektuje promjenu u okruženju, štedeći energiju.

NotebookLM

Skaliranje za pametne gradove: Fizička implementacija

Da bi se prototip transformisao u distribuiranu mrežu senzora, neophodna su tri arhitektonska unapređenja:



Autonomno napajanje:

Integracija solarnih panela sa Li-Po baterijama, koristeći low-power režime mikrokontrolera.

Fizička zaštita:

Dizajniranje IP67 vodootpornog kućišta sa specifičnim akustičnim otvorom za outdoor akviziciju zvuka.

Distribuirani monitoring:

Aktivacija ugrađenog Bluetooth 5 modula za prenos isključivo tekstualnih klasifikacionih rezultata (ne zvuka) ka centralnom gateway uređaju.

NotebookLM

Zaključak: Arhitektura spremna za implementaciju

Projekat dokazuje da su mikrokontroleri sa ograničenim resursima potpuno sposobni za pokretanje naprednih edge AI aplikacija.

Kombinacijom Arduino Nano 33 BLE Sense platforme i Edge Impulse okruženja, stvoren je energetski efikasan, GDPR-kompatibilan sistem čije inference vrijeme od svega 7–8 ms postavlja novi standard za lokalni monitoring urbanog saobraćaja. Tehnologija je spremna za ulice.

NotebookLM