

Aktivita A06: Realizácia aplikovaného výskumu/vývoja

Hlavným cieľom je vývoj prototypu magnetického sčítača dopravy.

- Základným komponentom prototypu sčítača dopravy je **magnetický snímač**. Tento umožňuje bezkontaktné detegovať prítomnosť vozidla na základe vyhodnocovania zmien, ktoré v magnetickom poli toto vozidlo pri prejazde v jeho blízkosti vyvolá.
- Vyvíjaný prototyp je primárne určený na krátkodobé a strednodobé dopravné prieskumy (profilové prieskumy intenzít dopravy).
- Základné požiadavky na prototyp sčítača dopravy:
 - neinvazívny,
 - kompaktný,
 - prenosný,
 - vlastný zdroj energie,
 - jednoduchá inštalácia a údržba,
 - jednoduché sťahovanie dát
 - nízkonákladový.
- Súčasťou vývoja je aj:
 - vývoj mobilnej aplikácie na ovládanie a nastavenie prototypu pri jeho inštalácii v profile cestnej komunikácie a sťahovanie, resp. posielanie dát,
 - vývoj desktopovej aplikácie na spracovanie, vyhodnotenie a prezentáciu nameraných dát.
- V rámci validácie prototypu sčítača dopravy - vývoj vlastného SW na automatické spracovanie obrazu. Výstupom je dataset zahrňujúci detekciu, kategorizáciu, trasovanie a určenie smeru objektu (vozidla) v profile umiestneného prototypu sčítača.

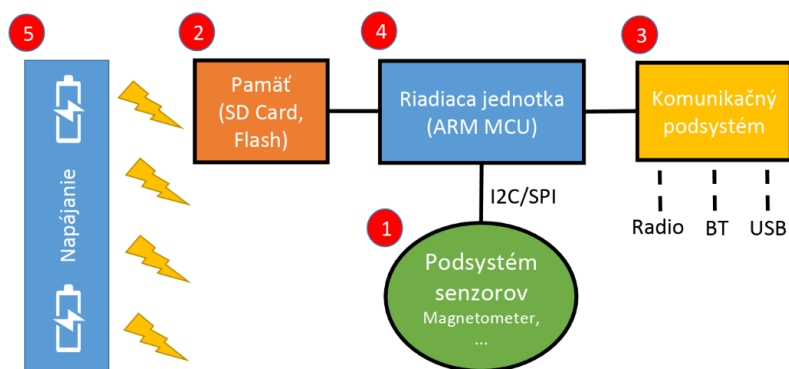
.....

✓ V prvej fáze projektu bol vytvorený základný koncept/štruktúra prototypu sčítača dopravy pozostávajúci z 5 základných súčastí:

1. podsystém senzorov,
2. pamäťový podsystém,
3. komunikačný podsystém,
4. riadiaca jednotka,
5. napájacia časť.

Určené boli minimálne technické parametre a funkcionality navrhovaného prototypu.

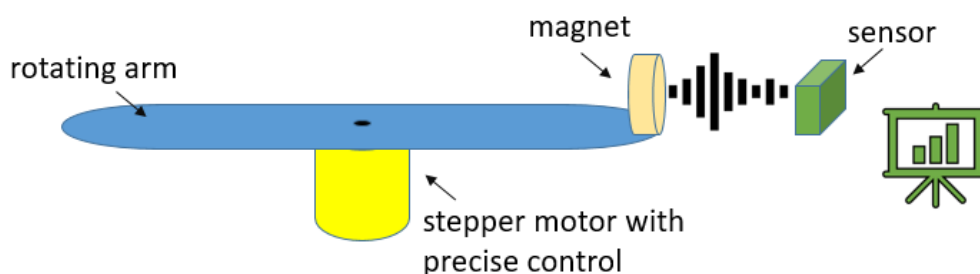
Základný koncept / štruktúra prototypu sčítača dopravy:



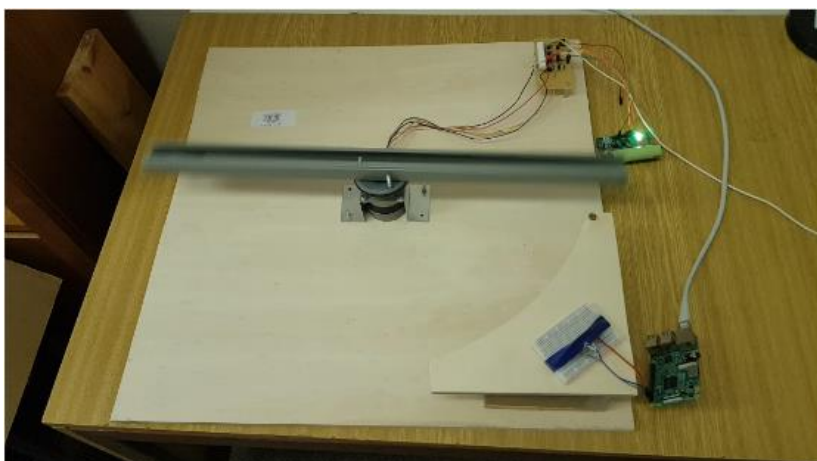
✓ Z 10 vybraných magnetometrov (AMR snímače) v rôznych variáciách z hľadiska technických parametrov, kvality a výrobcov boli na základe výsledkov laboratórnych testov vybrané dva magnetické snímače: FXOS8700CQ a RM3100.

Pre skupinový test magnetometrov v laboratórnych podmienkach bolo navrhnuté a zhotovené špeciálne testovacie zariadenie. Toto zariadenie je schopné navodiť rovnaké laboratórne podmienky pre každý z vybraných magnetometrov, a tým zaručiť opakovateľnosť meraní. Testovaná bola ich funkčnosť, možnosť kalibrácie, parametrizácie a spoľahlivosť komunikačného protokolu.

Schéma špeciálneho testovacieho zariadenia:

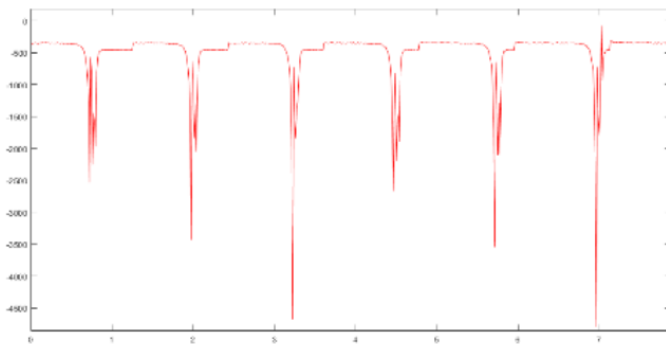


Špeciálne zariadenie pre laboratórne testovanie magnetometrov:



Špeciálnym zariadením boli testované nasledujúce parametre:

- rozlíšenie [uT/LSB],
- rozsah +- [uT],
- šum (RMS),
- frekvencia snímania [Hz],
- rýchlosť I2C [kHz]
- spotreba [uA].



Výsledky laboratórnych testov:

	Typ modulu	Adresa	Rozlíšenie [uT/LSB]	Rozsah +- [uT]	Šum	Frekvencia snímania [Hz]	Rýchlosť I2C [kHz]	Spotreba [uA]	Idle [uA]
1	LSM303AGR	0x1E	0.15	5000	0.3 uT RMS	100/150	>400	950/250 @ 100 Hz	2
2	LIS2MDL	0x1E	0.15	5000	0.3 uT RMS	100/150	>400	950/250 @ 100 Hz	1.5
3	LSM303AH	0x1E	0.15	5000	0.3 uT RMS	100/150	>400	950/250 @ 100 Hz	2.5
4	LSM303C	0x1E	0.058	1600	0.35 uT RMS	80	400	270/40 @ 20 Hz	6
5	LSM9DS1	0X1C, 0x1E	0.014-0.058	1600		80	400	600 @ 20 Hz, aj s akc.	
6	MPU9250	0x0C, 0x0D, 0x0E, 0x0F	0.15	4900		100	400	280 @ 8 Hz	3
7	FXOS8700CQ	0x1C, 0x1D, 0x1E, 0x1F	0.1	1200	<100 nT/Hz @ 100 Hz	800	400	575 @ 400 Hz	2
8	MLX90393	ľubovoľná	0.16-5.8	4800	závisí od nastavení	700	400	100 @ 10 Hz	2.4
9	HMC 5983	0x1E	0.07-0.4	100-800		220	>400	100 @ 7.5 Hz	2
10	HPM3	0x20, 0x21, 0x22, 0x23	0.05-0.013	800	30-15 nT	1600/n	>400	70-260 @ 8 Hz	1

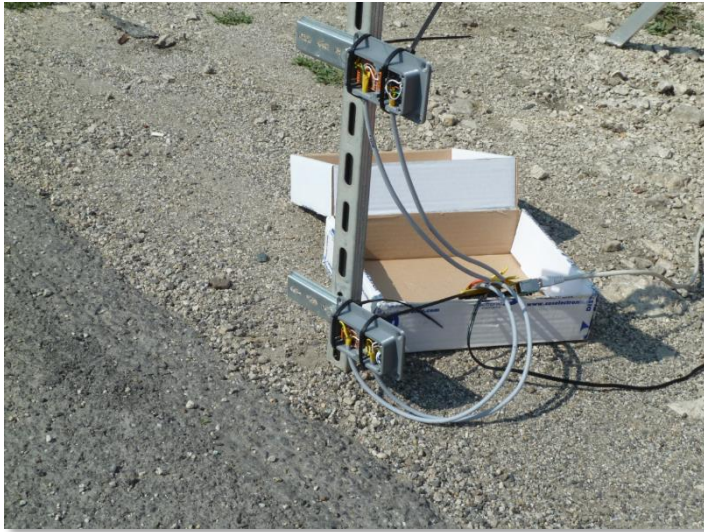
✓ Pre overenie výsledkov laboratórnych testov vybraných magnetometrov v praktickom scenári reálnej dopravy bol vytvorený funkčný model. Funkčný model pozostáva z BreakoutBoard-ov dvoch magnetometrov umiestnených v špeciálnom kryte, RaspberryPi 3B+ ako riadiacej jednotky s vyvedeným komunikačným rozhraním I2C a externej UART zbernice pre vzdialené ovládanie daného zariadenia. Magnetometre boli testované v rôznej výške a vzdialenosti od povrchu vozovky v testovacom profile cesty I/64 v Porúbke. Validácia nameraných údajov (detekcia vozidla) bola uskutočnená na základe:

- výsledkov spracovania obrazu získaného z kamerového záznamu (dataset obsahujúci smer a typ vozidla, presný čas prejazdu vozidla v profile umiestnenia magnetometrov, foto),
- údajov z mikrovlnného radaru Sierzega SR4 (dataset obsahujúci: čas, typ, rýchlosť a smer vozidla).

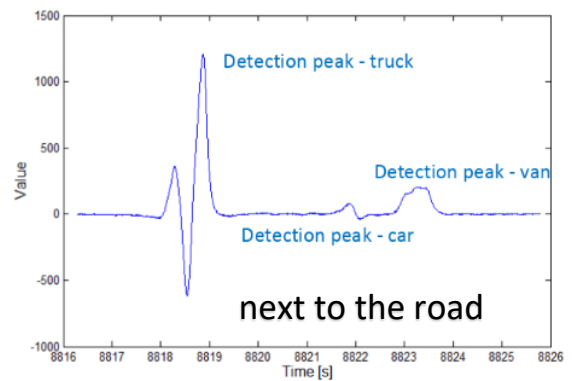
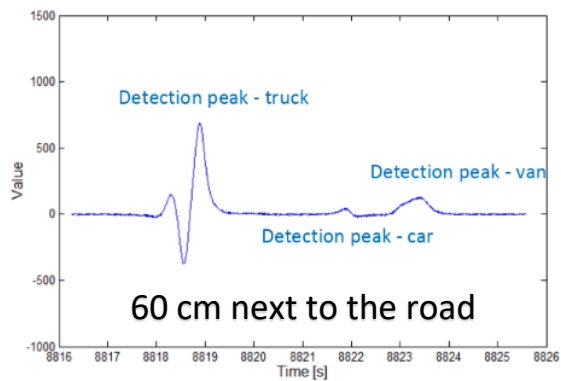
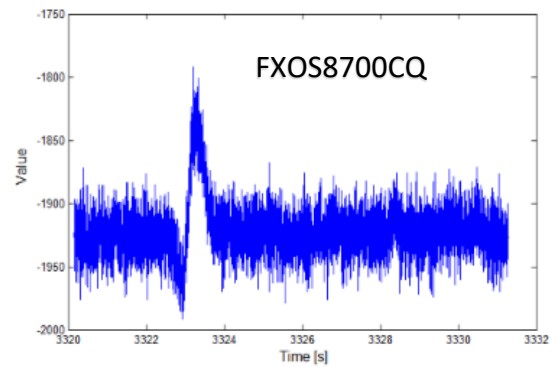
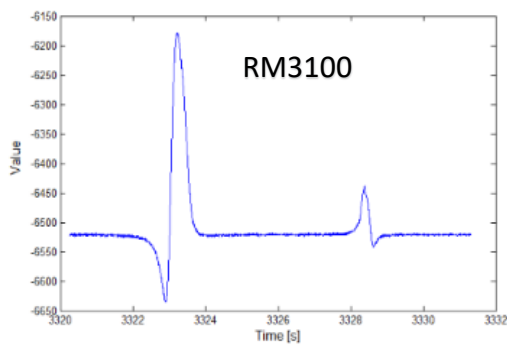
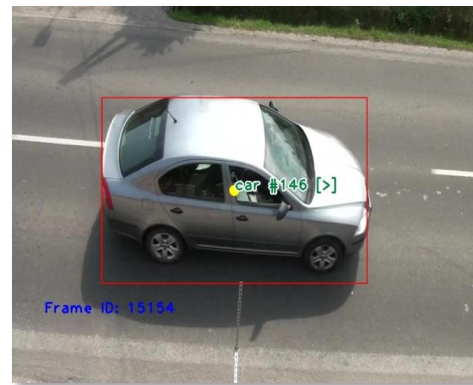
Testovací profil pri ceste I/64 v Porúbke:



BreakoutBoard –y dvoch senzorov v krycom obale – testovanie v rôznej výške a vzdialenosti od vozovky:



Príklady výstupov z testovania magnetometrov a spracovania videa (detekcia, kategorizácia, trasovanie a určenie smeru objektu):



Výsledky testov spoľahlivosti detekcie vozidiel pomocou magnetometrov v rôznej výške a vzdialenosti od vozovky – použitý jednoduchý algoritmus detekcie:

RM3100 next to the road, 30 cm above the ground			
Vehicle type	Number of vehicles	Number of non-detected	Accuracy [%]
motorbike	5	5	0
car	359	8	97,8
van	21	1	95
other	30	0	100
overall	415	14	96,6

RM3100 next to the road, on the ground			
Vehicle type	Number of vehicles	Number of non-detected	Accuracy [%]
motorbike	5	5	0
car	313	5	98,4
van	25	0	100
other	27	0	100
overall	370	10	97,3

RM3100 60cm next to the road, on the ground			
Vehicle type	Number of vehicles	Number of non-detected	Accuracy [%]
motorbike	5	5	0
car	313	56	82,1
van	25	0	100
other	27	0	100
overall	370	61	80,5

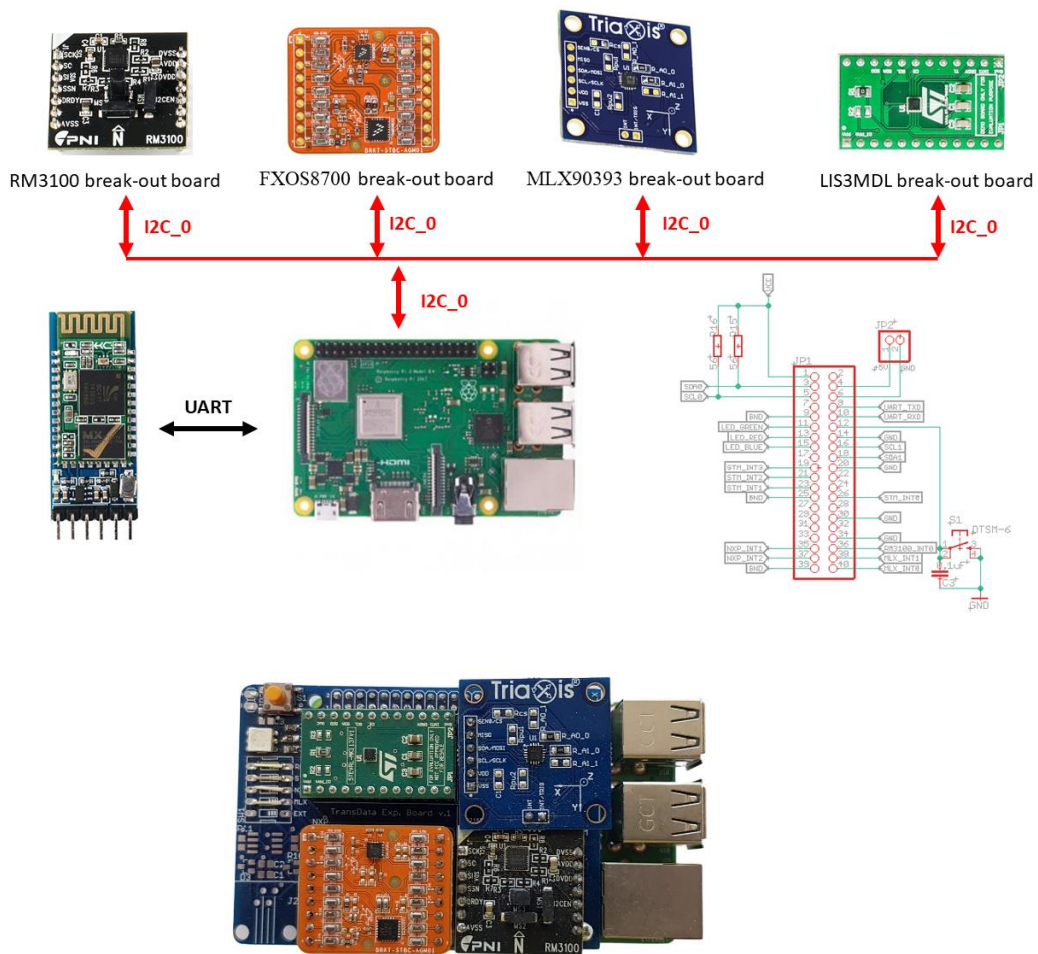
✓ Ďalšími testovacími meraniami sa preverovali v reálnych podmienkach okrem RM3100 a FXOS8700 ďalšie dva vybrané magnetometre: MLX90393 a LIS3MDL.

Základné parametre magnetometrov:

Snímač	Min. rozsah [μ T]	Citlivosť [LSB/ μ T]	Max. frekvencia [Hz]	Cena [€]
RM3100	± 800	> 100 ¹	$1600/n$ ¹	12.75
LIS3MDL	± 400	68.42	80/155	1.37
FXOS8700	± 1200	10	800	3.41
MLX90393	± 4800	6.21	717	1.65

¹ V závislosti na nastavenia CycleCount (CC)

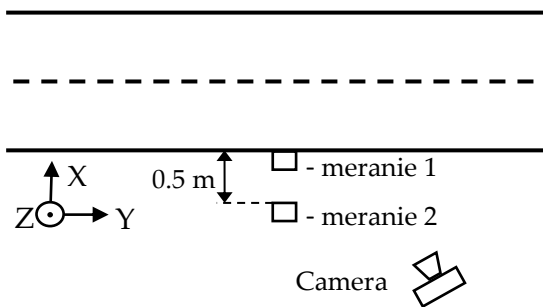
Vyvinutá meracia doska s testovanými magnetometrami:



Výsledky meraní v laboratóriu - smerodajná odchýlka šumu pre spoločné meranie [μT^2]:

Os X	RM3100	LIS3MDL	FXOS8700	MLX90393
Doska na RPi	0.012109	0.071062	0.241074	0.907603
Doska na kábli	0.023884	0.065095	0.216764	0.890775
Rozdiel [%]	+97.2	-8.4	-10.1	-1.8
Os Y	RM3100	LIS3MDL	FXOS8700	MLX90393
Doska na RPi	0.002546	0.074101	0.195486	0.721353
Doska na kábli	0.002911	0.059963	0.160871	0.762524
Rozdiel [%]	+14.3	-19.1	-17.7	+ 5.7
Os Z	RM3100	LIS3MDL	FXOS8700	MLX90393
Doska na RPi	0.005866	0.185112	0.438575	1.896881
Doska na kábli	0.003518	0.126429	0.447737	1.861972
Rozdiel [%]	-40.0	-31.7	+ 2.1	-1.8

Meranie v profile cesty I/64:



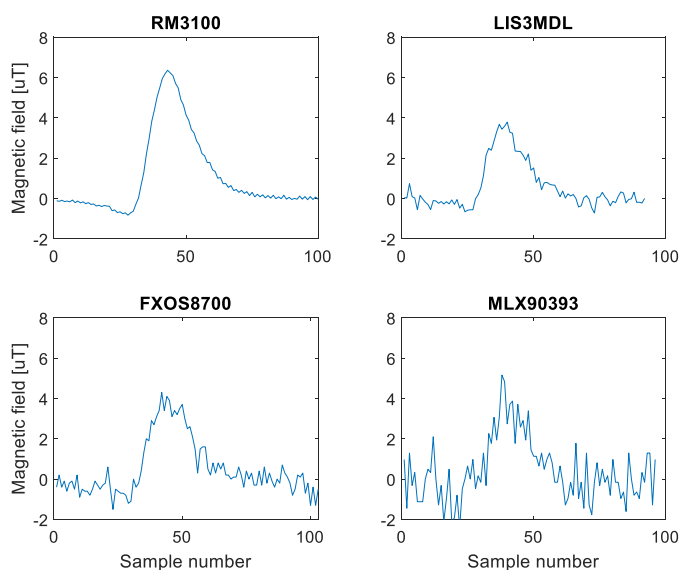
Veľkosť šumu v reálnych podmienkach [μT^2]

Magnetometer	Meranie 1			Measurement 2		
	X	Y	Z	X	Y	Z
RM3100	0.0028	0.0011	0.0104	0.0089	0.0007	0.0228
LIS3MDL	0.0899	0.0650	0.0935	0.0720	0.0692	0.1019
FXOS8700	0.1939	0.1740	0.4627	0.1823	0.1482	0.4200
MLX90393	0.6430	0.5899	1.7458	0.6419	0.6464	1.6755

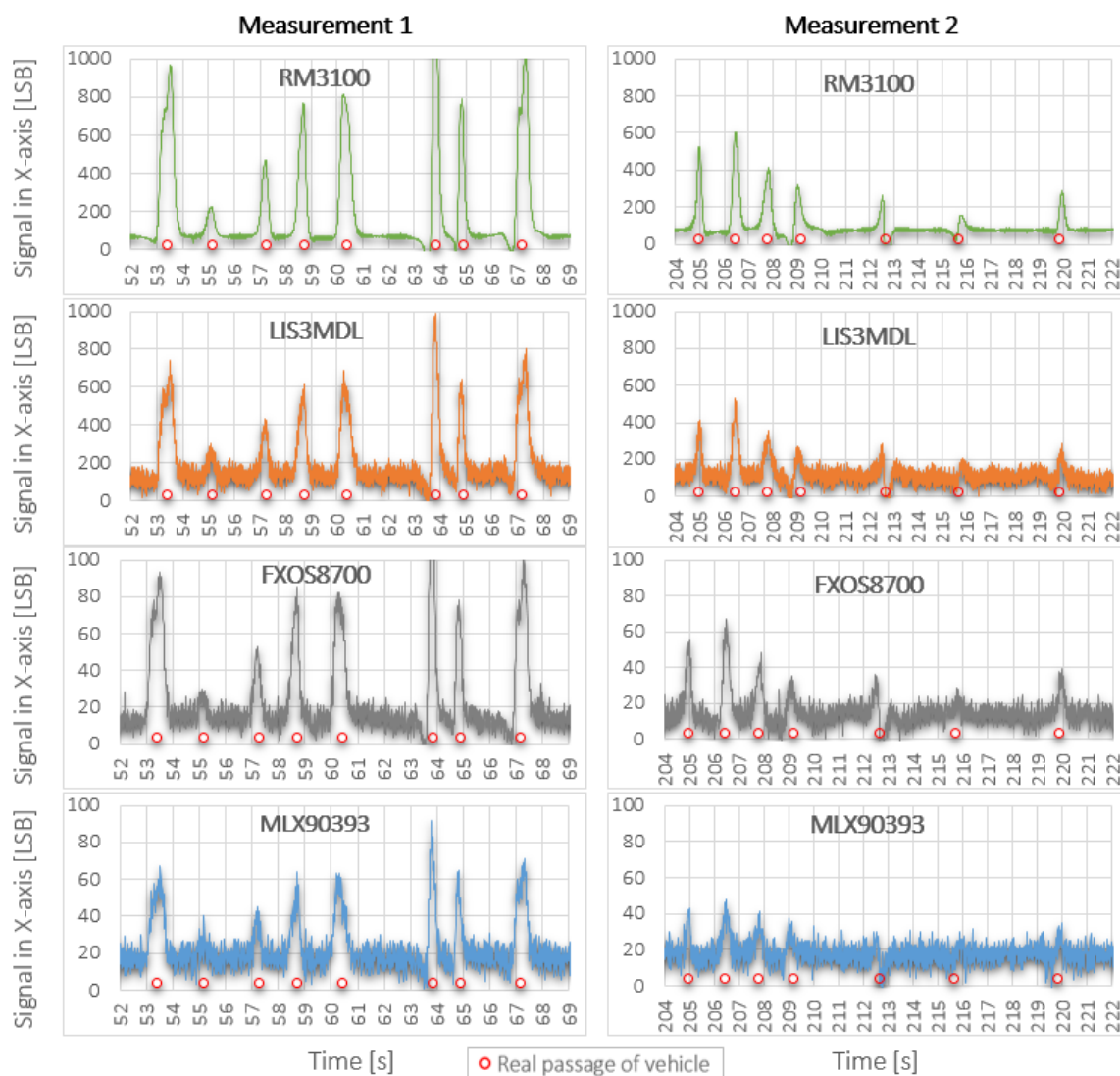
SNR [dB] pre osobný automobil

Sensor	Measurement 1			Measurement 2		
	X	Y	Z	X	Y	Z
RM3100	30.0	33.1	14.7	22.5	27.9	11.7
LIS3MDL	11.7	10.2	5.9	8.4	6.8	2.3
FXOS8700	10.9	9.1	3.2	6.9	5.0	1.2
MLX90393	6.4	4.2	1.1	3.5	1.6	0.3

Príklad záznamu prejazdu Ford Focus combi v osi X



Príklad záznamu signálu v osi X pre všetky senzory:



Umiestnenie senzorov podľa sledovaných parametrov:

Parameter	RM3100	LIS3MDL	FXOS8700	MLX90393
Citlivosť	1	2-3	2-3	4
Šum	1	2	3	4
SNR	1	2	3	4
Offset	1	4	2	3
Detekcia v jednej osi	1	3-4	2	3-4
Detekcia v dvoch osiach	1	3	2	4
Veľkosť	4	1	3	2
Cena	4	1	3	2
Spotreba energie	4	3	1	2



✓ Na základe výsledkov meraní bola navrhnutá a prakticky implementovaná prvá verziu prototypu zariadenia, ktorá pozostáva z návrhu:

- riadiacej elektroniky zariadenia,
- riadiaceho softvéru zariadenia,
- užívateľského rozhrania.

✓ Senzorická časť prototypu obsahuje dva vybrané magnetometre RM3100, ktoré sú v rámci zariadenia umiestnené vo vzájomnej vzdialenosti 10 cm.

.....

✓ Po oživení a laboratórnych testoch prebehli viaceré ad-hoc testy prvej verzie prototypu v rôznych reálnych prevádzkových podmienkach a nastaveniach prototypu:

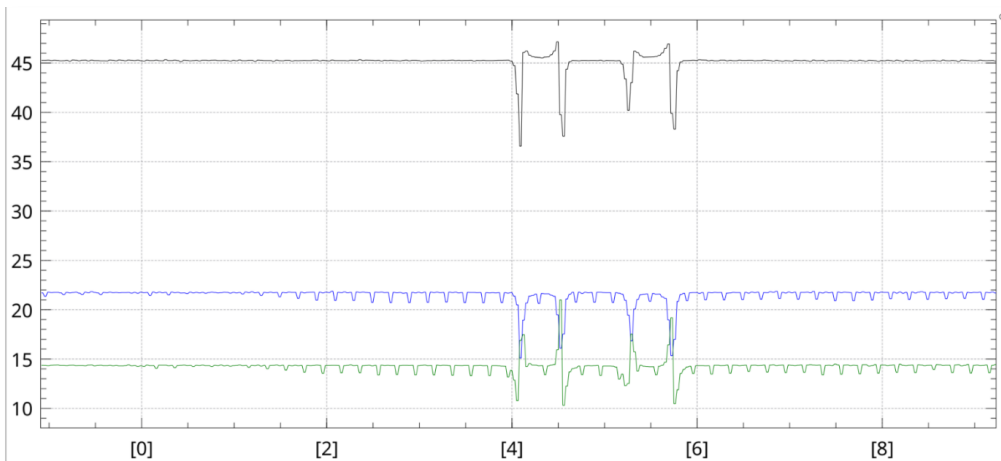
- podmienky umiestnenia prototypu – rôzna vzdialenosť od vodiacej čiary komunikácie, výška od vozovky, poloha sčítača vzhľadom na vozovku: kolmo/ vodorovne),
- dopravné podmienky - rýchlosť, intenzita, zloženie a časové odstupy dopravného prúdu, vozidlá v protismere,
- nastavenia magnetometrov - vzorkovanie počas merania, snímanie v jednej, dvoch alebo troch osiach x, y, z.

✓ Keďže výsledky týchto testov ukazovali, že navrhovaná vzdialenosť medzi dvojicou senzorov 10 cm v rámci jednej dosky je postačujúca len pre detekciu a určenie smeru vozidla, nie však na výpočet rýchlosti a kategorizáciu vozidla (podľa predpokladanej dĺžky), v rámci výskumu bola pripravená a ďalej testovaná rozšírená verzia prototypu s dvojicou senzorov vzájomne vzdialených 1,0 m.

✓ Súbežne s testovaním prototypu sa vykonávala optimalizácia riadiaceho softvéru pre vyvíjané zariadenie (obslužné programy k jednotlivým blokom zariadenia), súčasťou ktorej bola aj optimalizácia spotreby zariadenia.

✓ Pri testovacích meraniach sa zaznamenával kontinuálny priebeh deformácie magnetického poľa Zeme spôsobený prejazdom vozidla v snímacej oblasti magnetometrov. Filtrácia dát a algoritmus samotnej detekcie vozidla bol na základe podmienok a výsledkov meraní priebežne upravovaný a optimalizovaný.

Ad-hoc testovanie prvej verzie prototypu:



Ad-hoc testovanie prvej verzie prototypu:

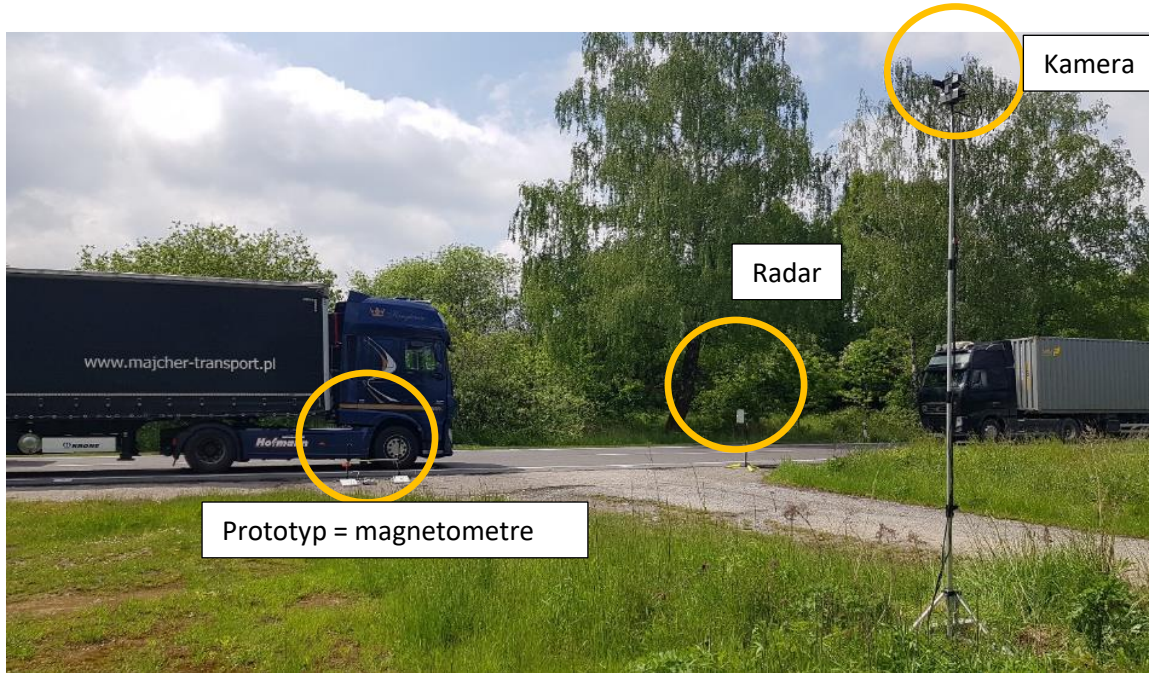


-
- ✓ V rámci II. fázy testovacích meraní boli uskutočnené viaceré merania s jednoduchou verziou prototypu (magnetometre vo vzájomnej vzdialenosti 10 cm integrované v rámci jednej dosky) a rozšírenou verziou prototypu (dvojica magnetometrov so vzájomnou vzdialenosťou 1,0 m). Testovania prebehli s rôznym nastavením vzorkovania a snímania v jednej alebo v troch osiach v magnetometri a s rôznou vzdialenosťou od jazdného pruhu.
 - ✓ Z dôvodu mimoriadnej situácie v súvislosti s pandémiou Covid-19 boli merania uskutočnené predovšetkým v profiloch ciest nachádzajúcich sa v Žilinskom kraji. Zabezpečená bola rôznorodosť z hľadiska: druhu a kategórie cesty, šírkového usporiadania, počtu pruhov, jazdnej rýchlosti vozidiel, intenzity a zloženia dopravného prúdu.
 - ✓ Súčasťou meracej zostavy bol kamerový set, ktorým sa zabezpečoval kontinuálny záznam z každého merania a mikrovlnný radar Sierzega SR4, ktorý slúžil pri testovaní rozšírenej verzie prototypu ako referenčné zariadenie pre validáciu analyzovaných rýchlostí prototypom.

**Testovanie jednoduchej verzie prototypu (magnetometre vo vzájomnej vzdialenosti 10 cm –
meranie v troch osiach):**



Testovacia zostava – prototyp (magnetometre s osovou vzdialenosťou 1,0 m), mikrovlnný radar Sierzege SR4, kamerový set:



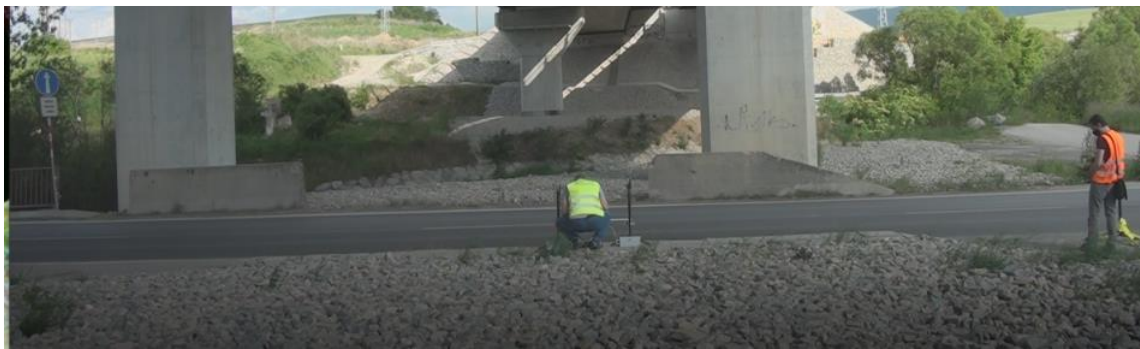
Testovanie prototypu s magnetometrami umiestnenými nad sebou:



Príprava na testovanie prototypu v profiloch cestných komunikácií:



Príprava na testovanie prototypu v profiloch cestných komunikácií:



-
- ✓ Súčasťou testovania prototypu boli aj merania v špecifických podmienkach, ktoré boli identifikované ako podmienky s potenciálnym vplyvom na kvalitu signálu z magnetometra (deformáciu magnetického poľa Zeme), a teda by mohli ovplyvniť alebo znehodnotiť výsledky merania na danom mieste - vplyv kovových konštrukcií, elektrických vedení, nízkych teplôt, vibrácií, ale aj kritických vplyvov z hľadiska dopravy - kolóny, veľmi nízke rýchlosti, veľmi malé časové odstupy, súbežné nákladné vozidlo v protismere.

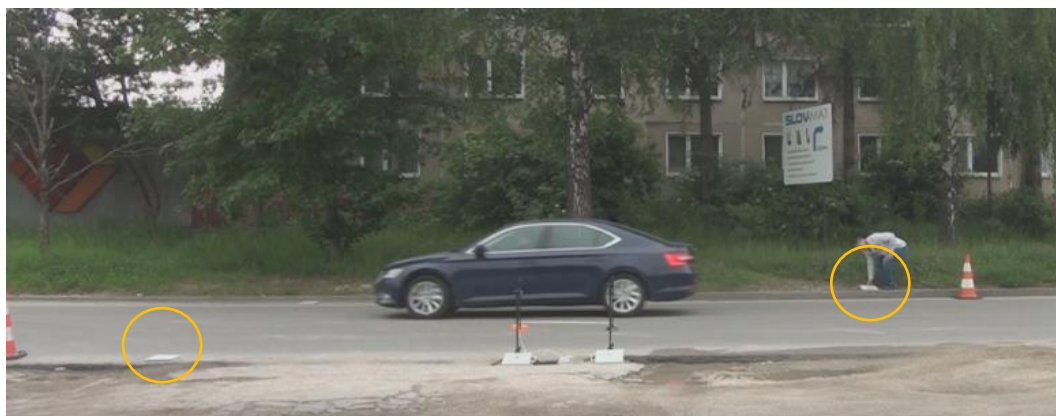
Testovanie prototypu v špecifických podmienkach

(pod mostným objektom pri kolónach, veľmi nízkych rýchlostiach na parkovisku, pri automatickej závore, kovovom stĺpe trolejového vedenia):



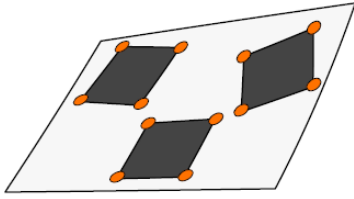
- ✓ Pre potreby validácie prototypu bola ďalej vyvíjaná metóda spracovania obrazu, ktorá bola postupne rozšírená o určovanie dĺžky a rýchlosti vozidiel. Pokračovalo sa v testovaní a upravovaní nového spôsobu výpočtu homografie na základe viacerých markerov.
- ✓ Výsledky metód automatizovaného spracovania obrazu sa používali v troch rovinách: na testovanie samotných implementovaných funkcionalít a spôsobov snímania scény; tvorbu datasetov, ktoré sa plánujú použiť na skúmanie možností presnejšej klasifikácie a odhadu rýchlosti týmito metódami; preskúmanie možnosti validácie v jednotlivých fázach vývoja sčítača.

Umiestňovanie markerov potrebných pre videodetekciu:

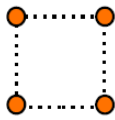


Ukážka použitia metód homografie:

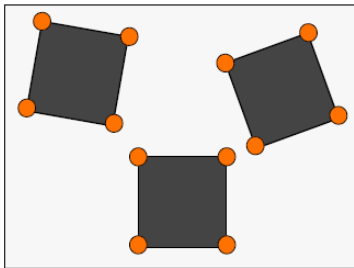
Input



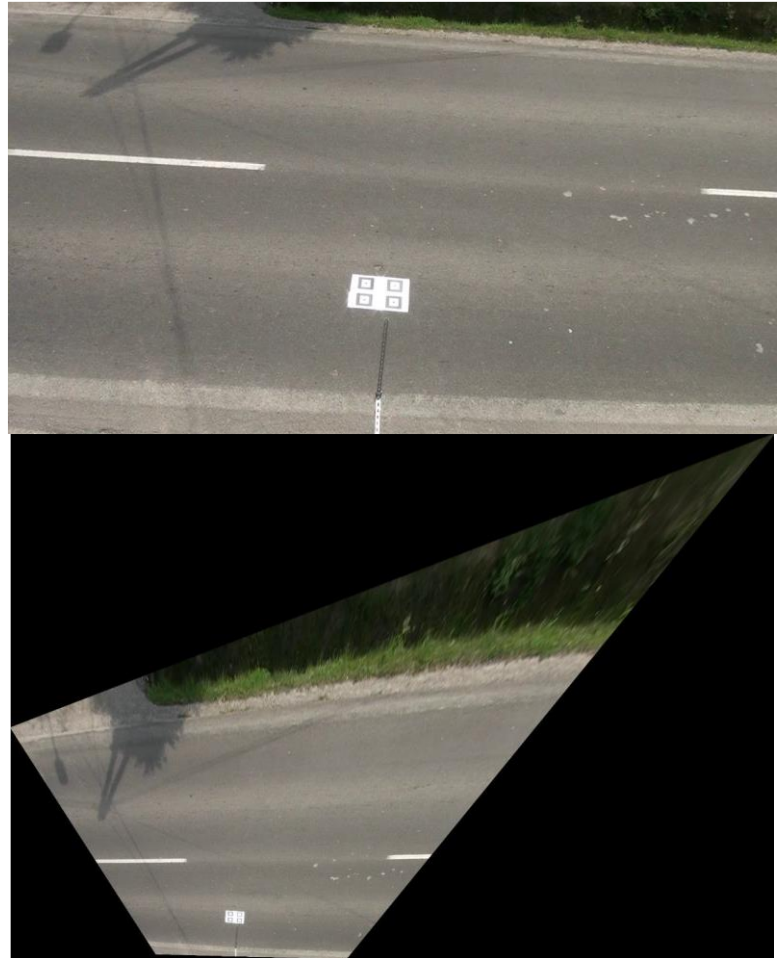
Warped keypoints
(warped image)



Known marker
(known relative positions of keypoints)



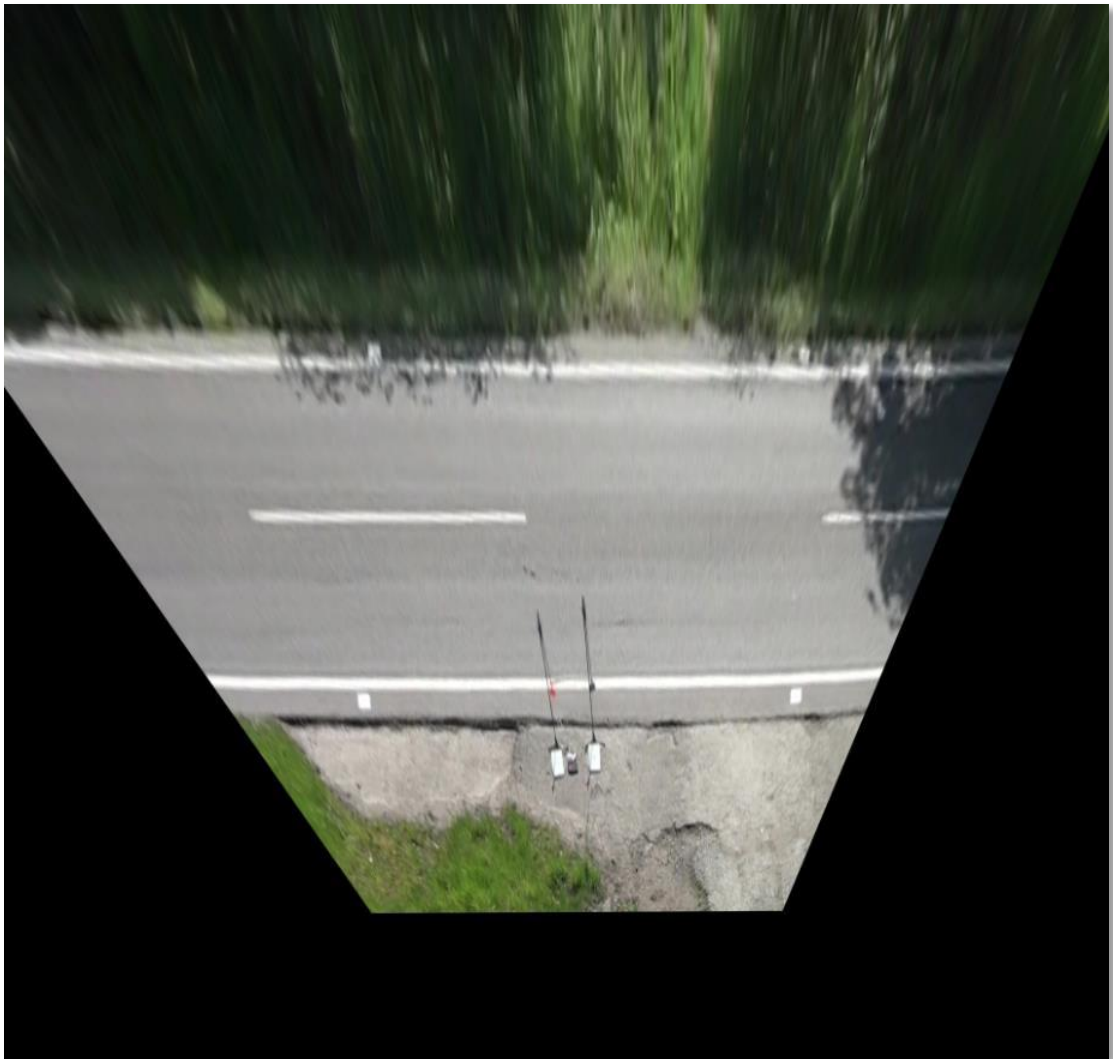
Rectified keypoints
(desired image)



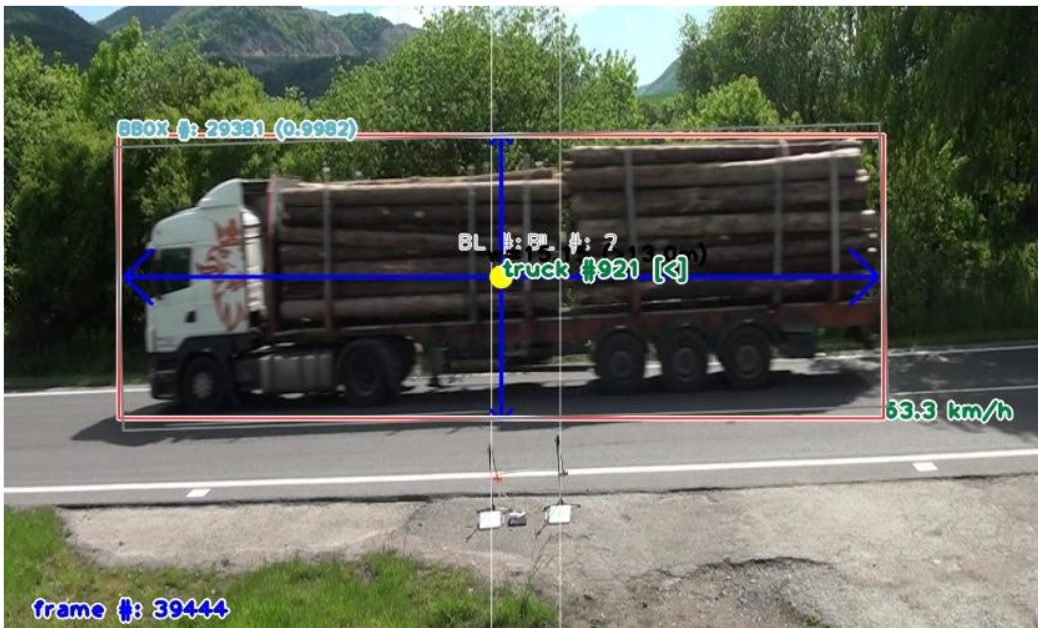
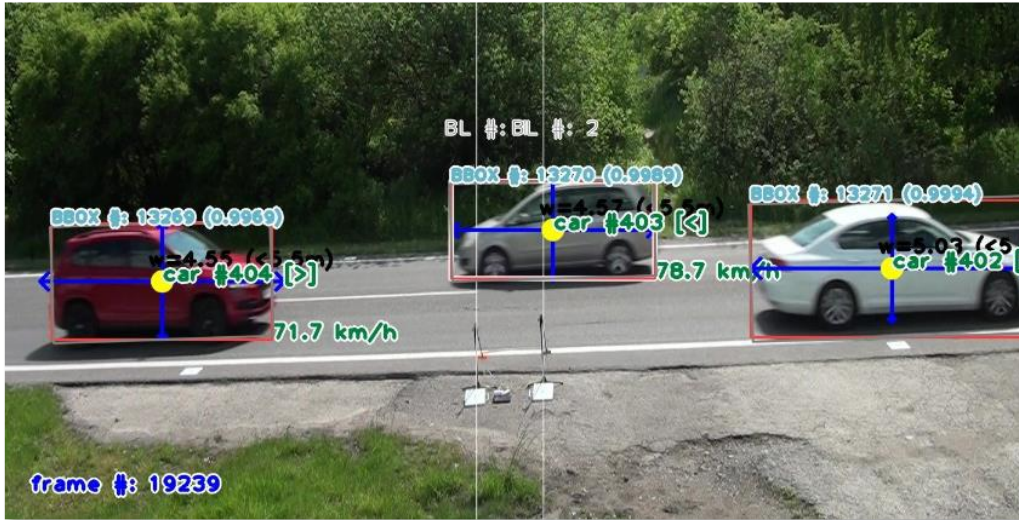
Ukážka použitia metód homografie:



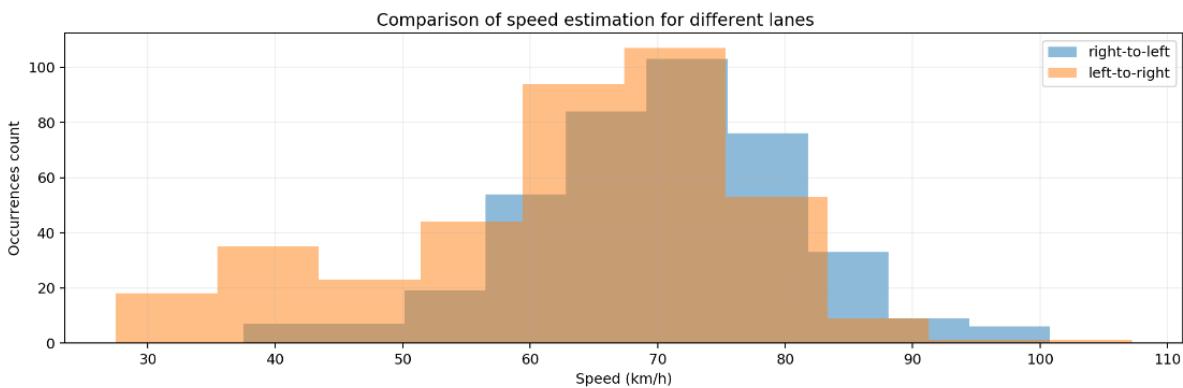
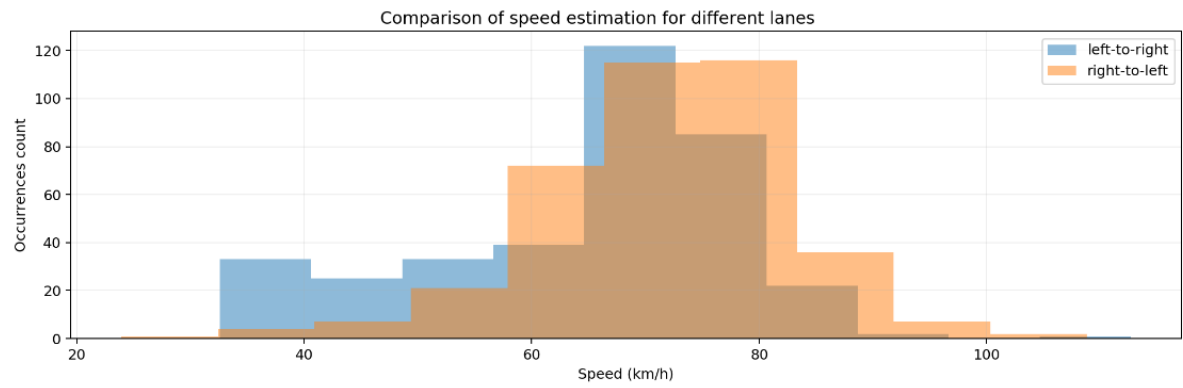
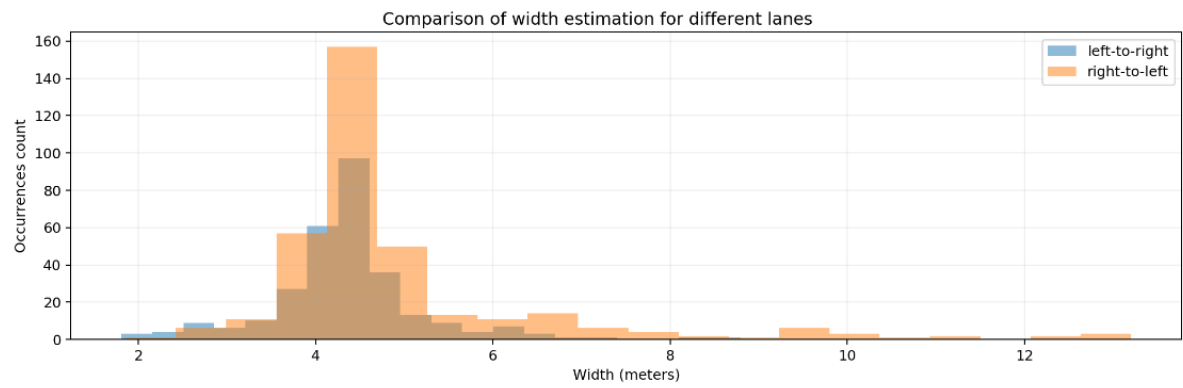
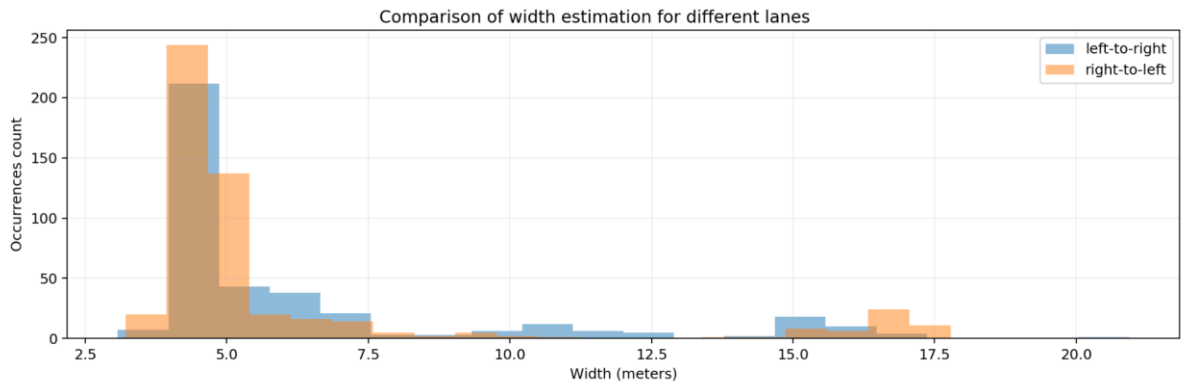
Ukážka použitia metód homografie:



Ukážky vizualizácie metódy pre spracovanie dát – výstupy z videodetekcie
detekcia, kategorizácia, trasovanie, určenie smeru, výpočet rýchlosti, dĺžky a výšky vozidla:

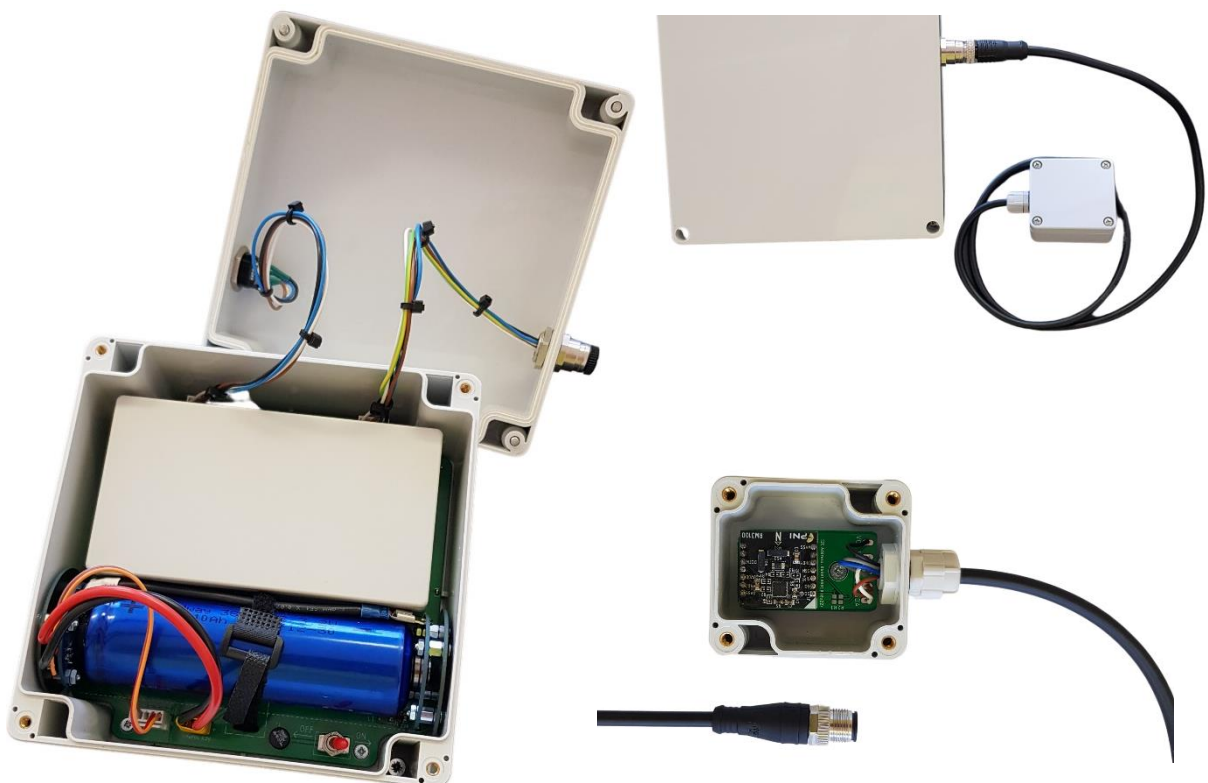


Ukážky histogramov rozpoznaných dĺžok a rýchlostí vozidiel pomocou metódy spracovania obrazu:

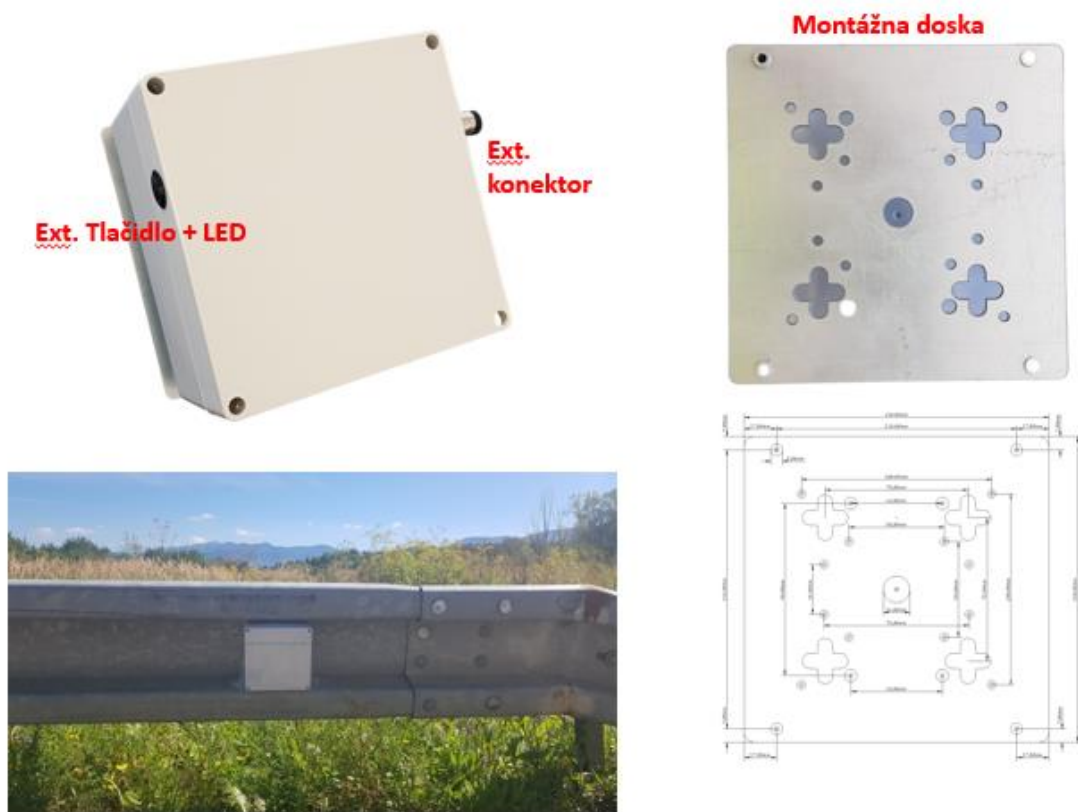


- ✓ V rámci projektu sa ďalej pokračovalo vo vývoji jednoduchšieho, kompaktniejšieho riešenia prototypu – magnetometre umiestnené priamo na doske plošných spojov. Hardvérové aj softvérové riešenie je však pripravené na alternatívu pripojenia externého senzora k prototypu (vo vzdialenosti 1,0-1,5 m), ktoré je možné v prípade potreby v budúcnosti ďalej rozvíjať.
- ✓ Pre finálnu verziu bol vybraný vhodný obal s ochranou IP65, určený pre teplotný rozsah -40 až 125°C. Usporiadanie vo vnútri obalu senzora bolo navrhnuté a prispôbené tak, aby všetky citlivé časti boli skryté a nedošlo k ich znehodnoteniu pri predpokladanom používaní v náročnom prostredí cestnej siete. Prístupné sú iba konektory pre akumulátor, ktorý je pri dlhodobom meraní potrebné vymeniť a dobiť.
- ✓ Navrhnutý a implementovaný bol univerzálny mechanický držiak, pomocou ktorého bude možné nainštalovať prototyp sčítacza na ľubovoľné zariadenie cestnej infraštruktúry. Pre tento účel bola navrhnutá a zhotovená špeciálna montážna doska, ktorá sa pomocou dištančných prvkov jednoducho pripojí k zariadeniu senzora, a ktorá umožní ďalšiu inštaláciu ľubovoľných úchytov, či už na zvodidlá, stĺpy verejného osvetlenia, dopravné značky, ale aj reklamné pútače umiestnené mimo monitorovanej cesty

Vnútorne usporiadanie obalu/krytu zabezpečujúce ochranu citlivej elektroniky, zabezpečenie možnosti pripojenia externého snímača:



Obal/kryt a montážna doska pre prototyp sčítača:



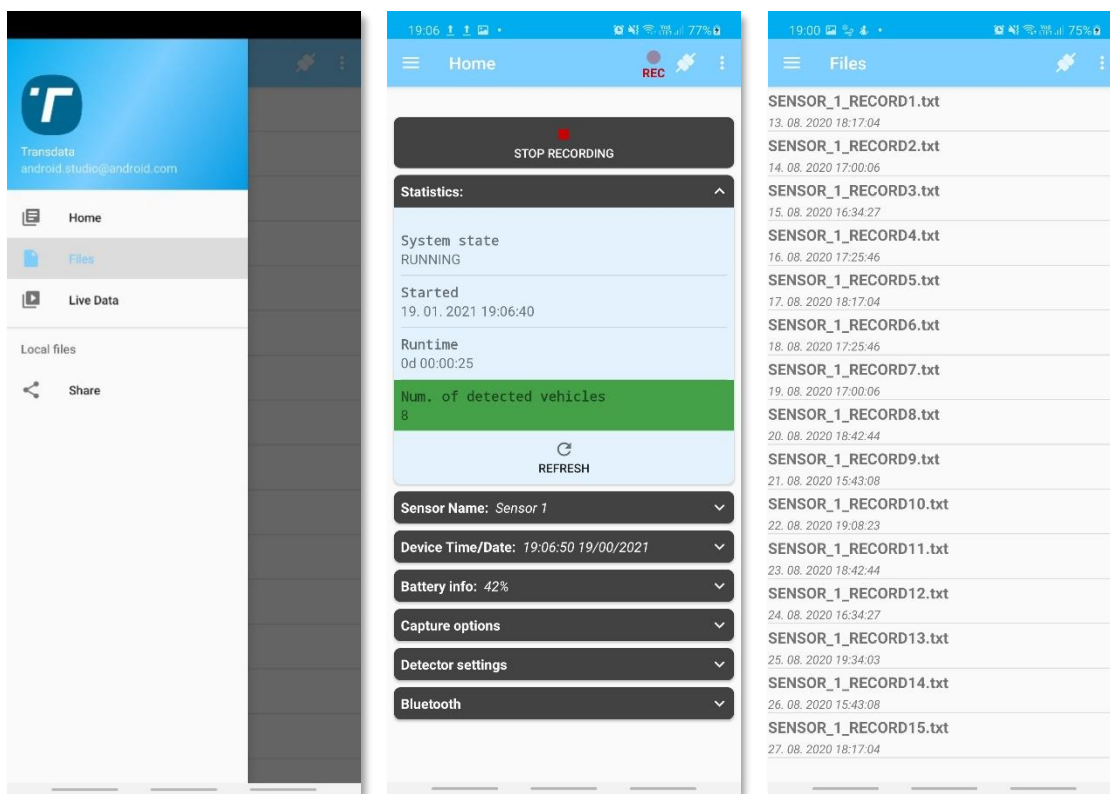
Kompatibilné držiaky pre montážnu dosku:



-
- ✓ Pre zabezpečenie jednoduchého ovládania prototypu bola vyvinutá mobilná aplikácia. Táto aplikácia je implementovaná do smart-zariadenia (telefónu alebo tabletu) s operačným systémom Android a slúži ako univerzálna riadiaca jednotka pre nastavovanie senzora na strane užívateľa.

Aplikácia bola vyvinutá pomocou programovacieho jazyka Kotlin. Umožňuje jednoduché ovládanie a nastavovanie senzora rôznymi telefónmi s Android OS. Pomocou nej je možné zaznamenať čas a dátum merania, umiestnenie senzora pomocou GPS lokalizácie, ako aj spustiť a zastaviť meranie a preniesť namerané dáta zo senzora do telefónu bez nutnosti vyberania integrovanej SD karty. Prostredníctvom aplikácie si je možné pozrieť aktuálny stav merania, stav a životný cyklus akumulátora.

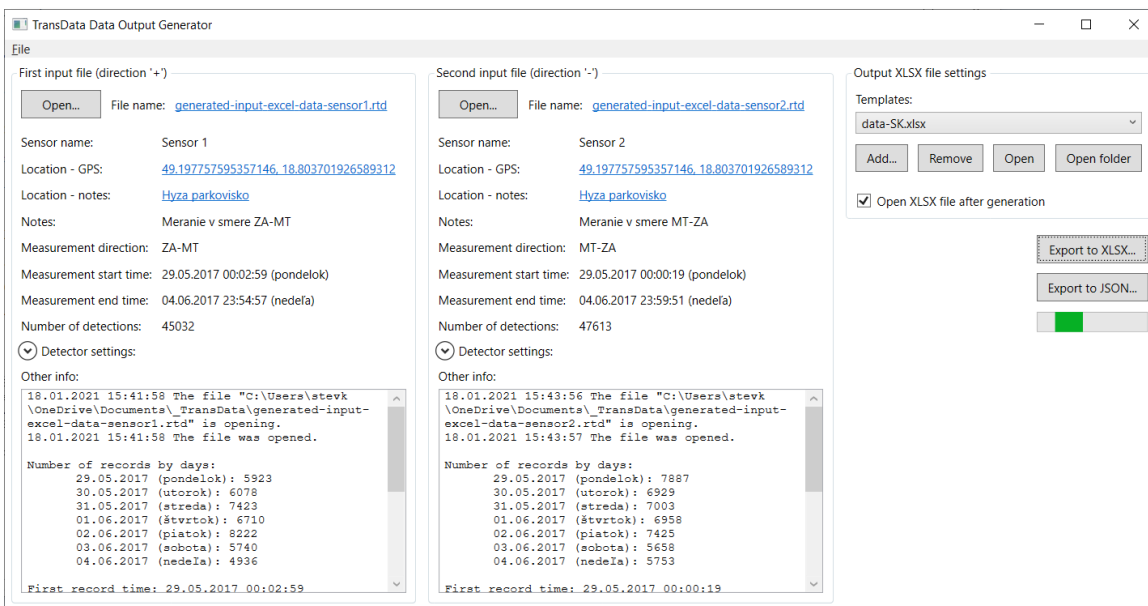
Používateľské rozhranie vyvinutej mobilnej aplikácie na ovládanie prototypu sčítača:



- ✓ Pre spracovanie a vyhodnotenie dát z prototypu sčítača bola vyvinutá desktopová aplikácia na spracovanie a vyhodnotenie nameraných dát a ich grafickú prezentáciu. Aplikácia umožňuje načítať údaje zo senzorov v navrhnutom binárnom formáte RTD. V tomto formáte sa nachádzajú metadáta o senzore, jeho umiestnení pri meraní, dátum začiatku merania, rôzne poznámky a hlavne záznamy detegovaných vozidiel. Je možné načítať dva takéto súbory súbežne (dva senzory merajúce dve strany cestnej komunikácie) s náhľadom základných metadát a s postupným načítavaním jednotlivých záznamov zaznamenaných sekvenčne. Počas čítania záznamov sa niektoré údaje spracúvajú a dopočítavajú, ako je napr. časový odstup medzi dvoma detegovanými vozidlami. Údaje sa analyzujú za účelom zobrazenia jednoduchšej štatistiky pre rýchly prehľad. Aplikácia umožňuje exportovať všetky spracované záznamy do súboru s formátom JSON, CSV alebo XLSX. Tento export obsahuje základné tabuľkové vyhodnotenie intenzít dopravy podľa smeru, podľa kategórie vozidla a to v prepočte na 15-minútové alebo hodinové intenzity. Vyhodnotené sú špičkové dopravné záťaž, zloženie dopravného prúdu, grafické priebehy 15-minútových, hodinových alebo denných

intenzít dopravy. Okrem automaticky vygenerovaných výstupných zostáv je možné do aplikácie pridať aj ďalšie vytvorené šablóny používateľom, čím aplikácia umožní export údajov do vlastných predpripravených excelovských súborov (tabuliek a hárkov) s vlastným dizajnom a s ďalšími dodatočnými výpočtami pre ich ďalšie spracovanie za účelom rýchleho získania požadovaných informácií.

Používateľské rozhranie vyvinutej desktopovej aplikácie pre spracovanie a vyhodnotenie dát z prototypu sčítaca:



Zobrazenie časti tabuľkovej a grafickej prezentácie automaticky vyhodnotených dát z prototypu sčítaca:

