

Možnosti návrhu a realizace simulátorů cílů pro testování automobilových radarů

P. Hudec

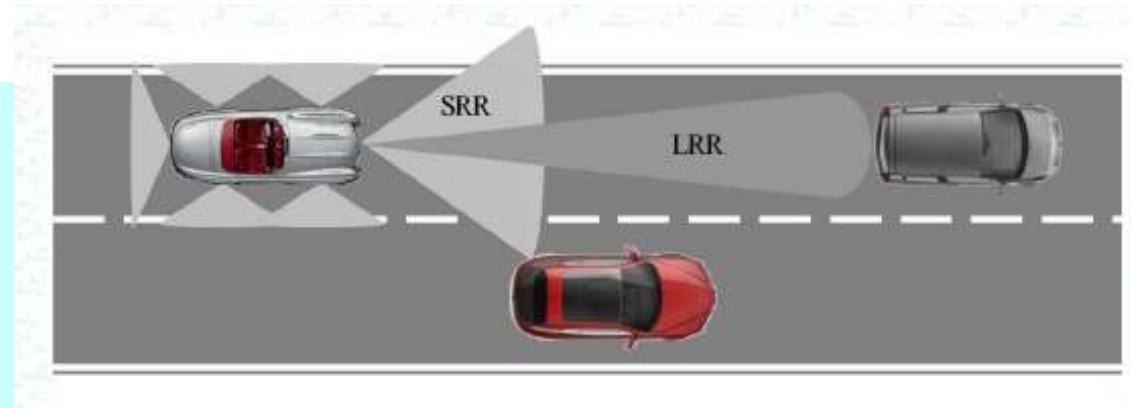
ČVUT-FEL, Fakulta elektrotechnická

hudecp@fel.cvut.cz



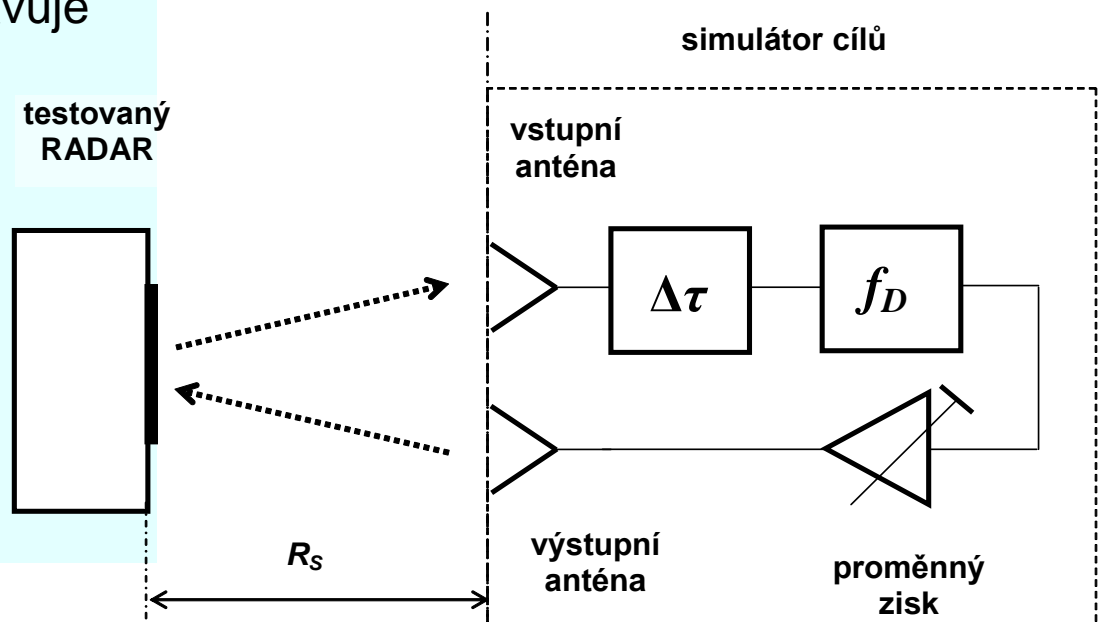
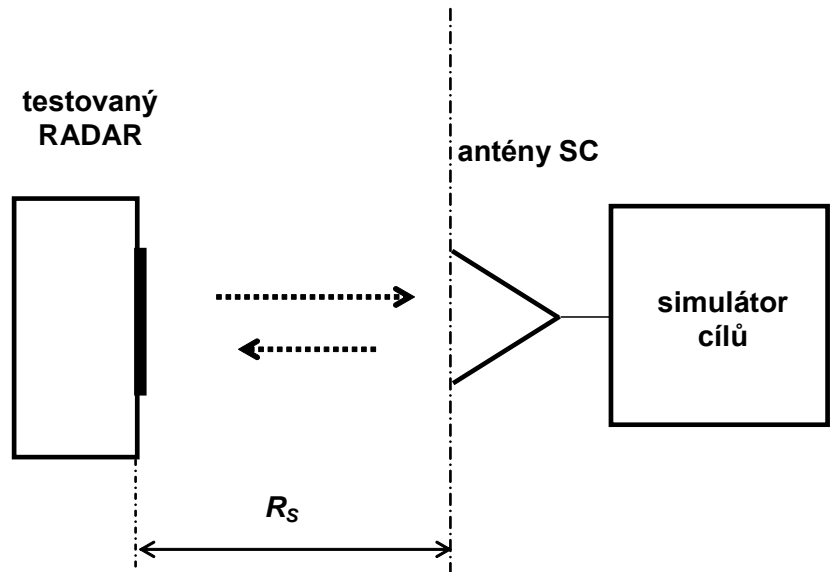
Motivace

- Rozvíjející se implementace AR
- 3 až 8 téměř v každém novém automobilu
- Mnoho funkcí:
 - brzdový asistent,
 - adaptivní tempomat,
 - sledování mrtvých úhlů, ...
 - zvyšování bezpečnosti provozu,
 - krok k autonomnímu řízení.
- Problémy:
 - Moderní automobily = extrémně složité systémy obsahující mnoho senzorů,
 - je složité je testovat komplexním způsobem,
 - v mnoha různých dopravních scénářích.
- Pro testování mohou být užitečné SC



Simulátor radarových cílů

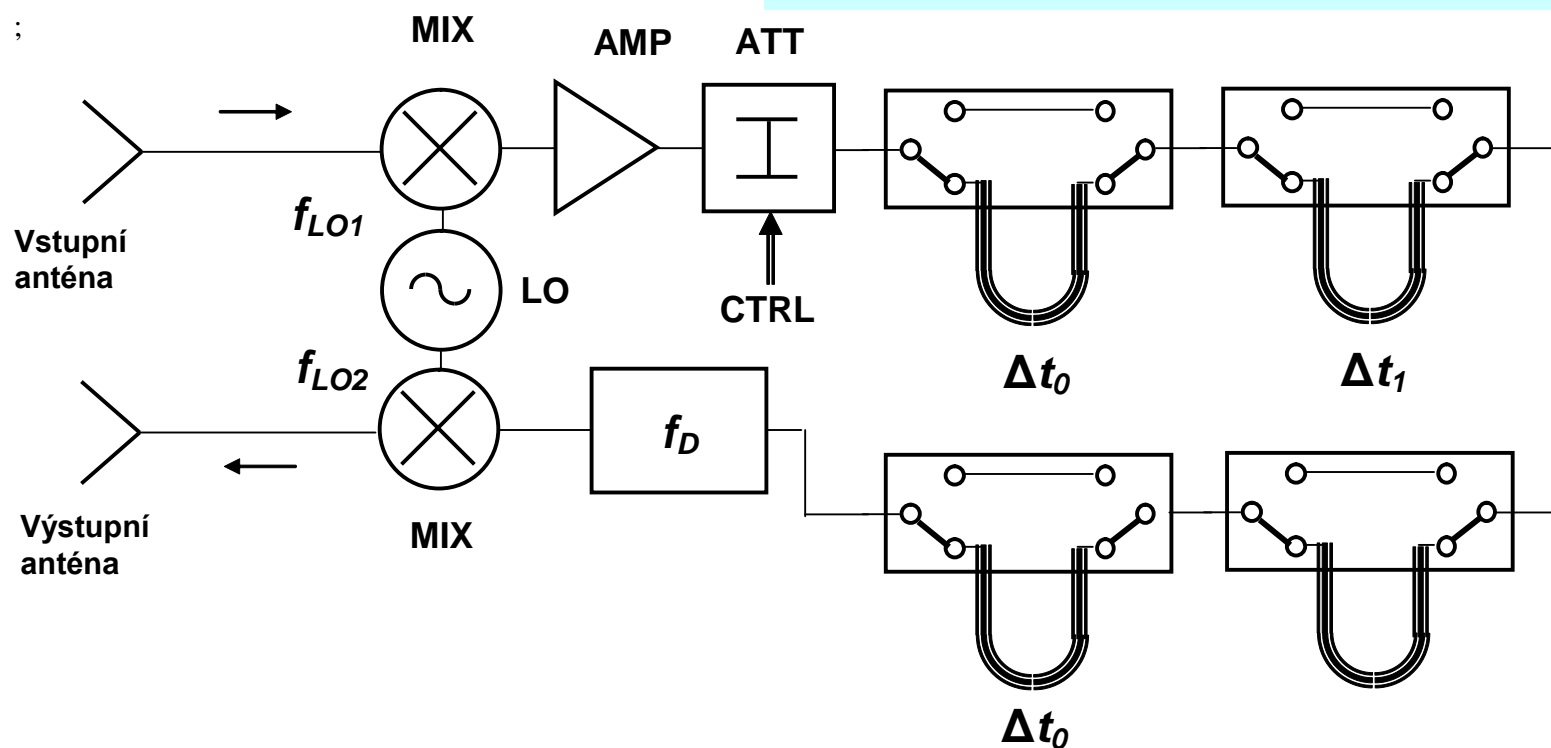
- „Krabice“ umístěná typ. 0,5 až 1 m před testovaným radarem
- Generuje cíle v definovaných vzdálenostech R , s odrazivostmi RCS a pohybujících se rychlostmi v
- V „krabici“ je typicky:
 - Vstupní, výstupní anténa
 - Obvod časového zpoždění ~ nastavuje vzdálenost R
 - Obvod dopplerovského posuvu ~ nastavuje rychlost v
 - Obvod nastavení amplitudy ~ nastavuje RCS
- Pracovní frekvence AR:
 - Standardně 76 – 81 GHz
 - Nutná je frekvenční konverze
- Realizace hlavních funkcí:
 - Analogově
 - Digitálně



Analogové řešení

- Časové zpoždění = přepínaná váhovaná zpoždovací vedení THRU/DELAY
- Dopplerovský posuv = dvě fázově zavěšené PLL
- Nastavení **RCS** = zesilovač + nastavitelný atenuátor

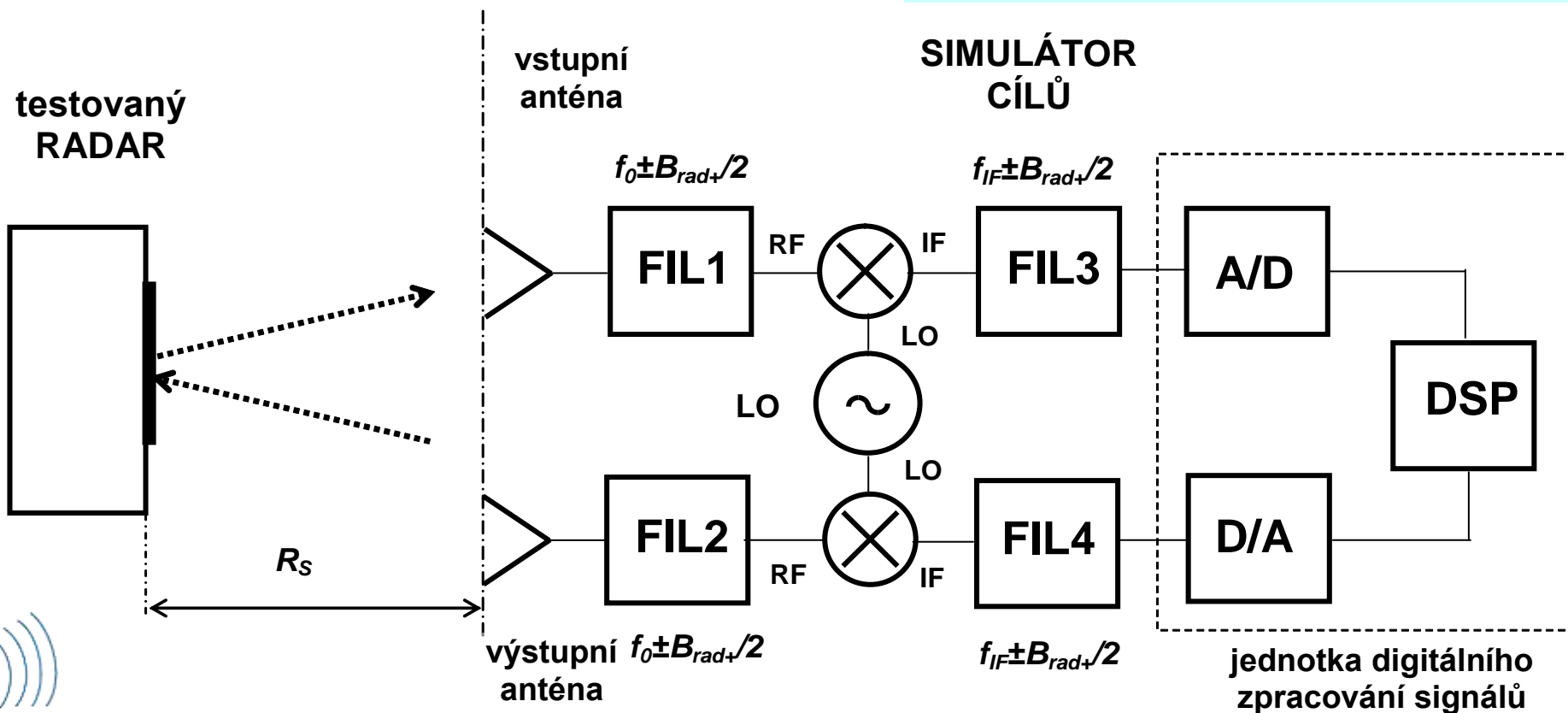
- Výhody:
 - Může simulovat malá **R**
 - Velmi širokopásmové **B=5 GHz**
 - Útlum kabelů zajišťuje přibližně konstantní **RCS**
 - ATT je potřeba jen pro základní nastavení
- Problémy:
 - Pro vysoká **R** = dlouhé úseky kabelů, rozměrné
 - Lze simulovat jen 1 cíl



Digitální řešení

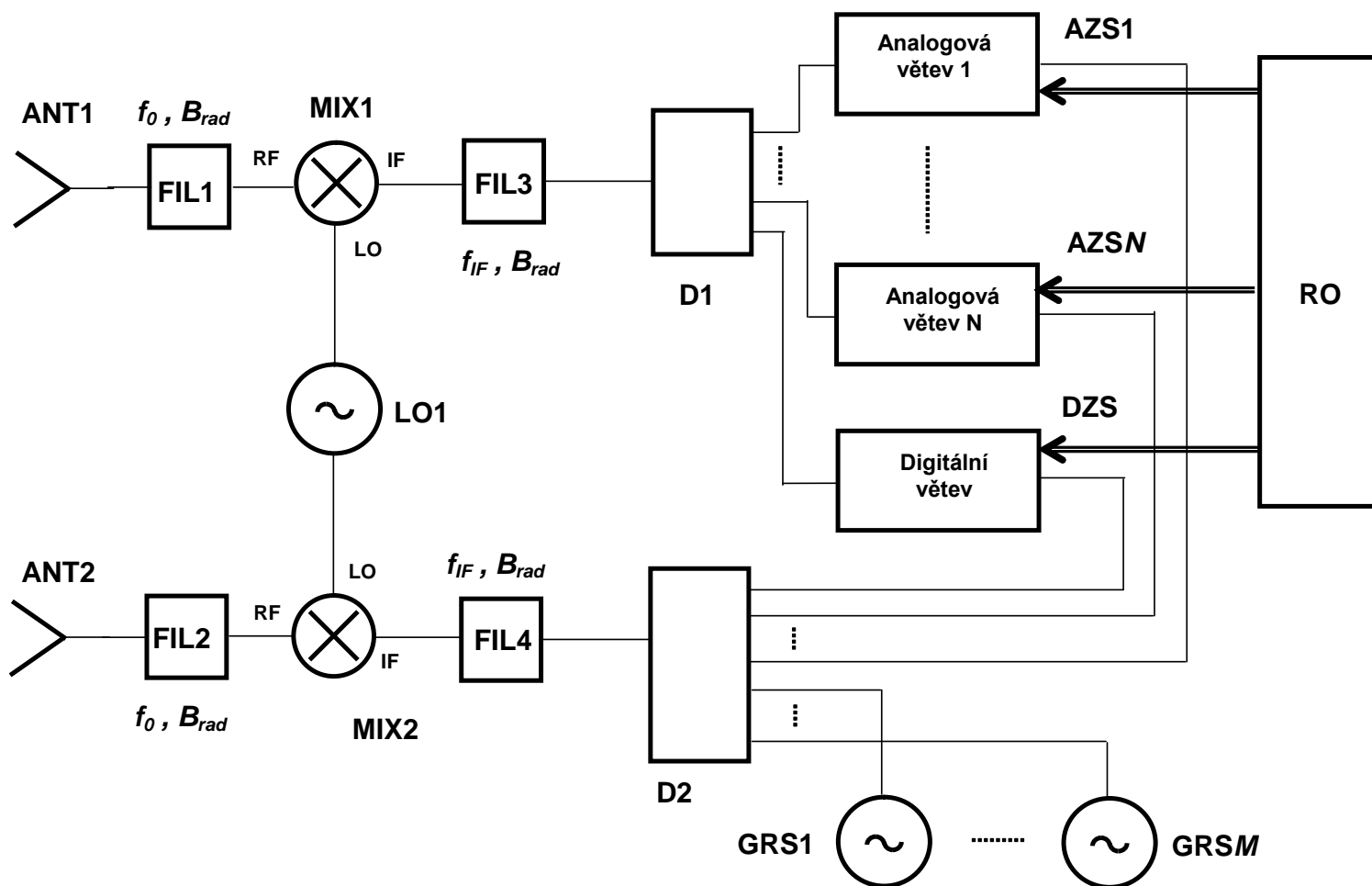
- Digitální zpracování signálů v DSP
- Zásadní výhody:
 - Lze realizovat i velmi dlouhá zpoždění
 - Současně lze simulovat více cílů
 - Lze snadno přeprogramovat, implementovat nové funkce

- Problémy:
 - Nutné rychlé vzorkování - používáme 2,5 Gsps, to vede na pásmo $B < 1$ GHz
 - Latence analogových i digitálních obvodů – určuje minimální R
 - Běžně 100-200 ns (15 – 30 m)



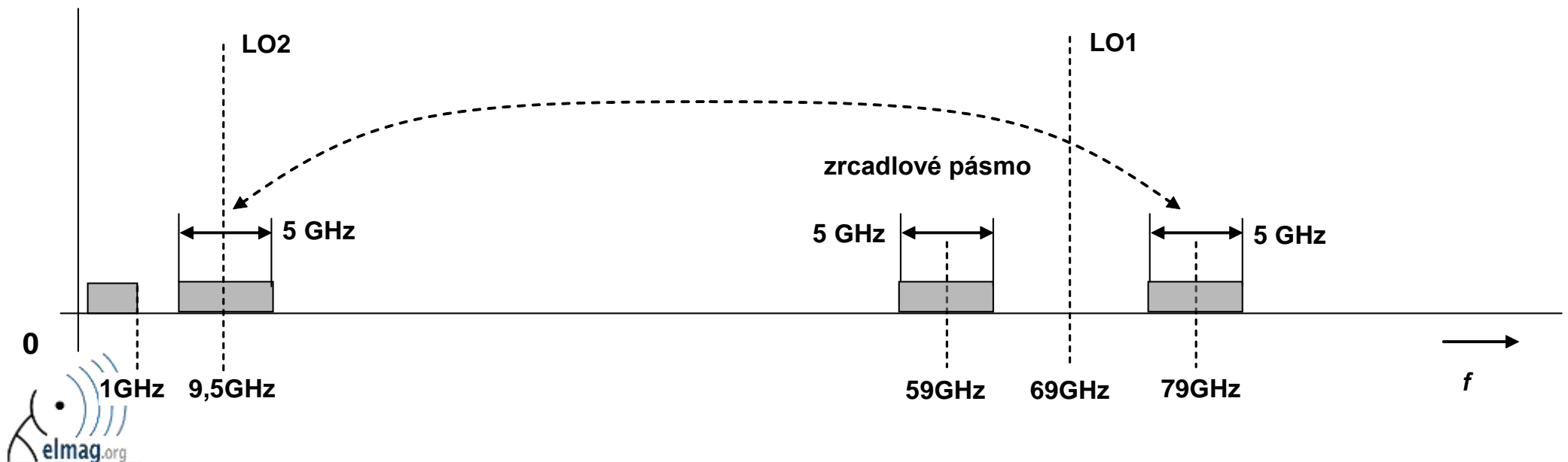
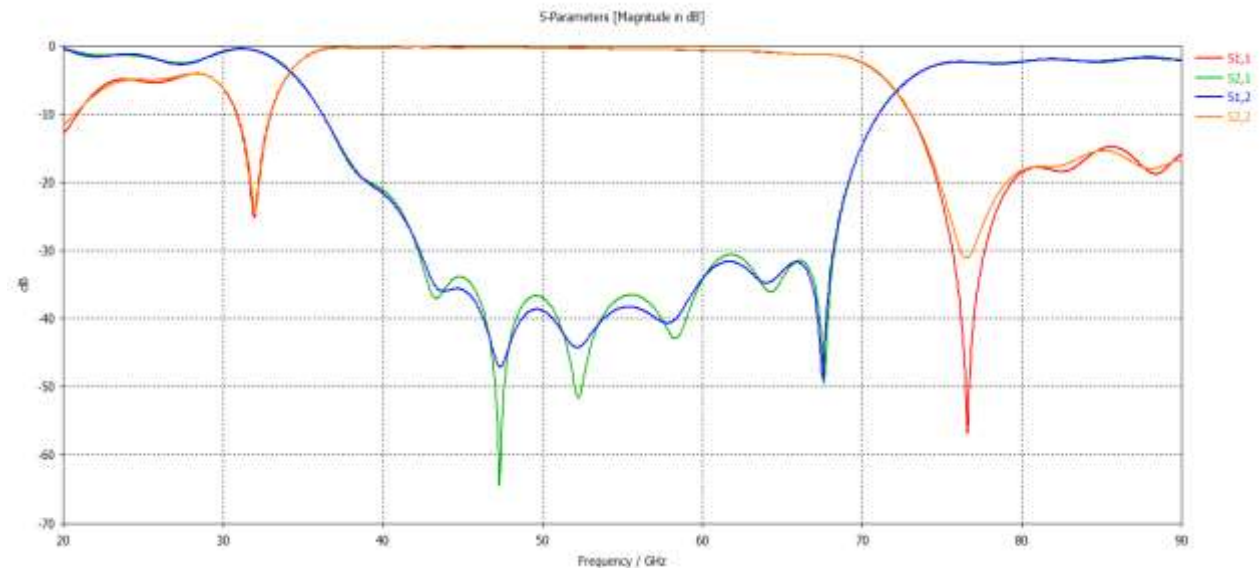
Analogově - digitální řešení

- Využívá výhody obou řešení
 - Vzdálené cíle (vícenásobné cíle) = digitální větev
 - 1 - 2 blízké cíle = analogová větev nebo větve

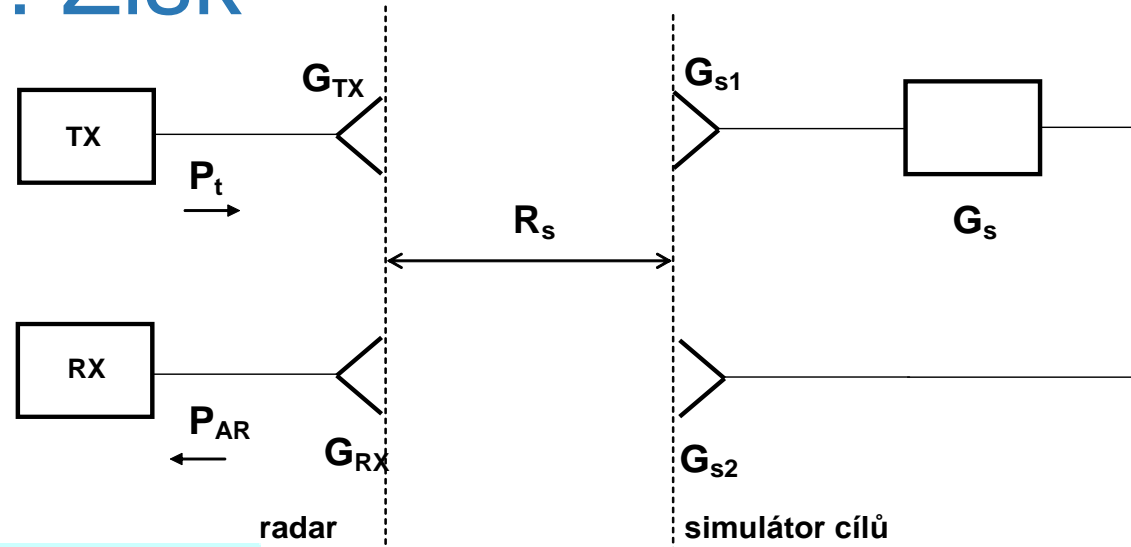


Frekvenční plán

- Musí řešit:
 - Zrcadlový příjem
 - Pásmo pro analogové zpracování
 - Vzorkovací frekvenci ADC
 - LO signál v pásmu = rušení
- Použito vícenásobné směšování



Systemový návrh: Zisk



- Výchozí = radarová rovnice
- RF výkon přijatý RX anténou SC
- RF výkon přijatý RX anténou AR
- RF výkon přijatý RX anténou AR při odrazu od reálného cíle

$$P_{s1} = P_t \frac{G_{s1} \lambda^2}{4\pi} \frac{G_{TX}}{4\pi R_s^2} = P_t \frac{G_{s1} \lambda^2}{(4\pi)^2} \frac{G_{TX}}{R_s^2}$$

$$P_{ARs} = G_s P_t \frac{G_{s1} G_{s2} \lambda^4}{(4\pi)^4} \frac{G_{TX} G_{AR}}{R_s^4}$$

$$P_{ARc} = P_t \frac{G_{TX} G_{RX} RCS \lambda^2}{(4\pi)^3 R_c^4}$$

Systemový návrh: Zisk

- Zisk SC pro udržení konstantního **RCS**
- Praktické hodnoty:
 - **RCS** v rozsahu 1 až 100 m²
 - **R_c** v rozsahu 3 až 10 m pro analogové zpracování
 - **R_c** v rozsahu 10 až 200 m pro digitální zpracování
 - **R_s** = 0,5 m
 - **G_{s1}** = **G_{s2}** = 14 dB
- Široký rozsah hodnot **G_s** v dB ↓

$$G_s = \frac{RCS 4\pi R_s^4}{G_{s1} G_{s2} \lambda^2 R_c^4}$$

R _c / RCS	1 m ²	10 m ²	100 m ²
3 m	0,0	10,0	20,0
10 m	-20,9	-10,9	-0,9
50 m	-48,8	-38,8	-28,8
100 m	-60,9	-50,9	-40,9
200 m	-72,9	-62,9	-52,9

Typické hodnoty *RCS*

- Praktické hodnoty ***RCS***:
 - max. 39 dBsm
 - zepředu 20 dBsm
 - min. 0 dBsm
 - průměr 10 dBsm
- Není jednoduché generovat vysoké hodnoty ***RCS*** v malé vzdálenosti
- Minimálně ale cca 10 m²
- Ve větších vzdálenostech mohou být hodnoty ***RCS*** s výhodou vyšší

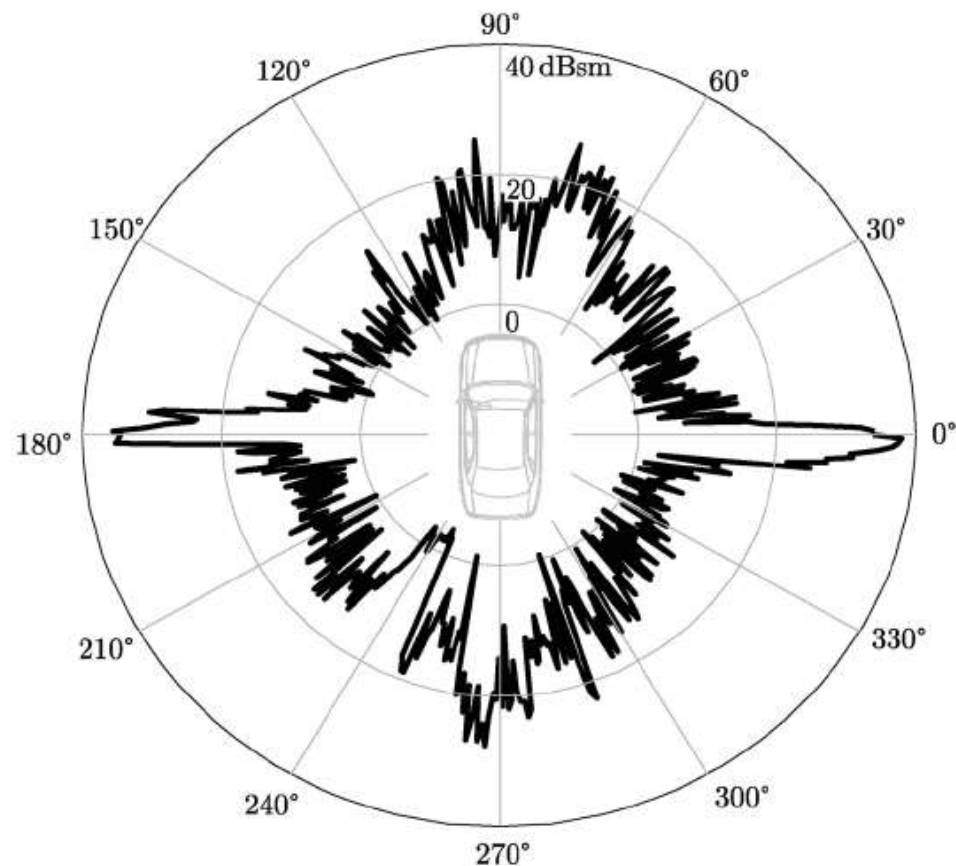


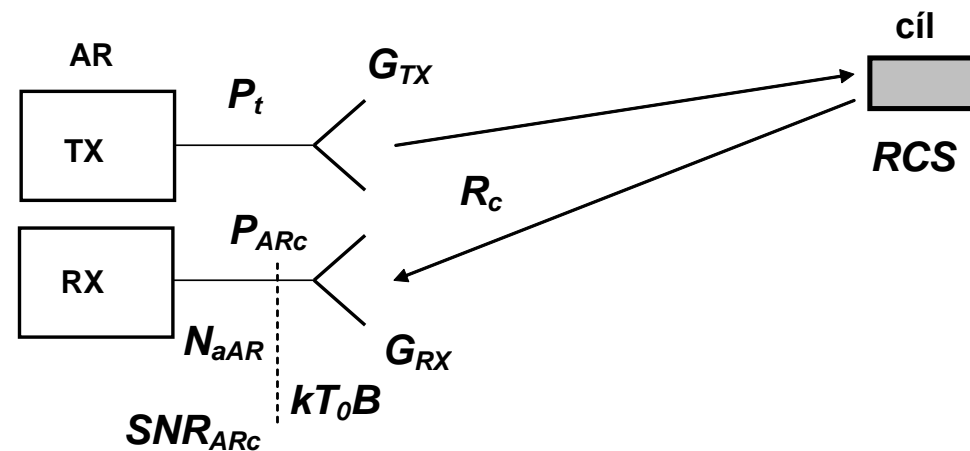
Fig. 3. Measured monostatic RCS of a vehicle.

Šumová analýza: AR - cíl

- Šum přidaný AR

$$N_{aAR} = (F_{AR} - 1)kT_0B$$

- SNR vztažený ke vstupu AR
- Vstupní výkon AR
- Typické hodnoty **SNR** v dB pro $P_{TX}=10$ dBm, $G_{TX}=20$ dB, $G_{RX}=10$ dB, $F_{AR}=15$ dB ↓



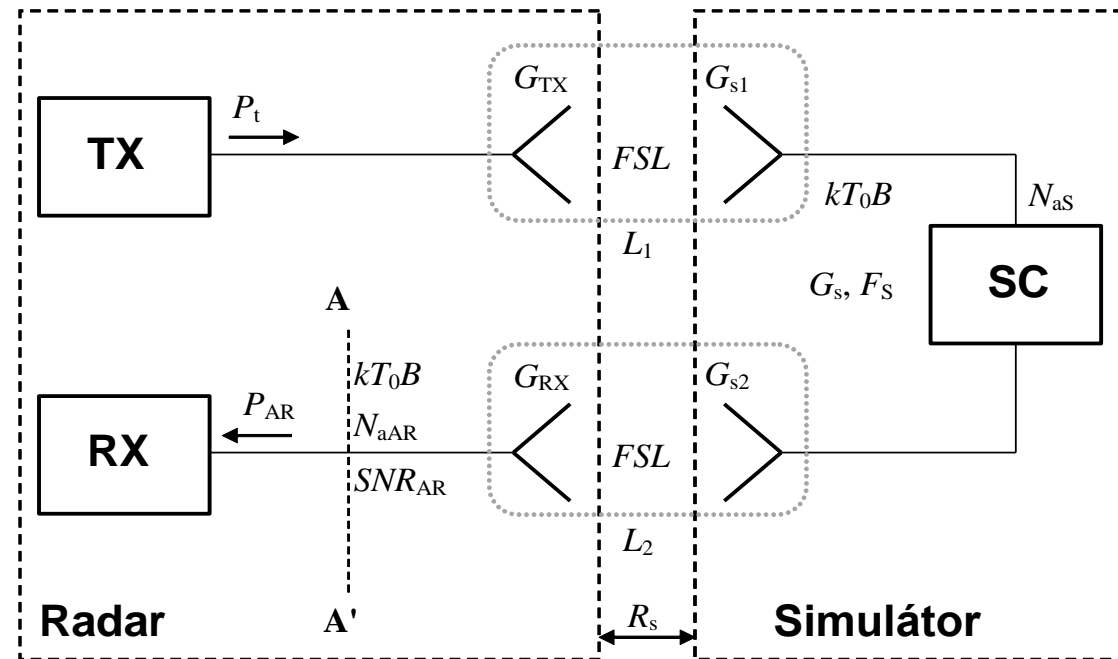
$$SNR_{ARc} = \frac{P_{ARc}}{kT_0B + N_{aAR}}$$

$$P_{ARc} = P_t \frac{G_{TX} G_{RX} RCS \lambda^2}{(4\pi)^3 R_c^4}$$

RCS / R_c	3 m	10 m	50 m	100 m
1 m ²	57,8	36,8	8,9	-3,2
10 m ²	67,8	46,8	18,9	6,8
100 m ²	77,8	56,8	28,9	16,8

Šumová analýza: AR-SC

- Dvě „cesty vzduchem“ = trochu složitější
- Lze využít definici útlumů L_1 a L_2 (antény SC „vidí“ přibližně 290K)



$$L_2 = \left(\frac{4\pi R_s}{\lambda} \right)^2 \frac{1}{G_{s2} G_{RX}}$$

$$SNR_{ARs} = \frac{P_{ARs}}{kT_0B \frac{G_s}{L_2} + N_{aS} \frac{G_s}{L_2} + kT_0B + N_{aAR}}$$

Šumová analýza: AR-SC

- Pro běžné parametry SC platí :
- Byly proto hledány hodnoty:
- Např. pokles o 1 dB ($K_F=0,79$):
- Výsledek:
- kde
- Vypočtené hodnoty F_{smax} v dB ↓

$$SNR_{ARs} = SNR_{ARc}$$

$$SNR_{ARs} = K_F \cdot SNR_{ARc}$$

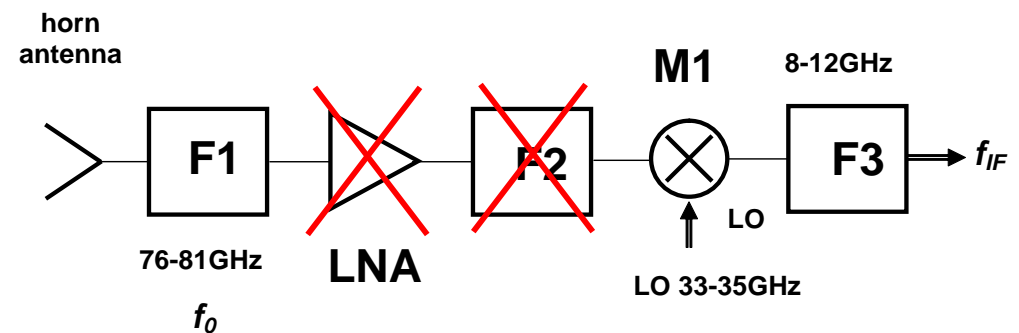
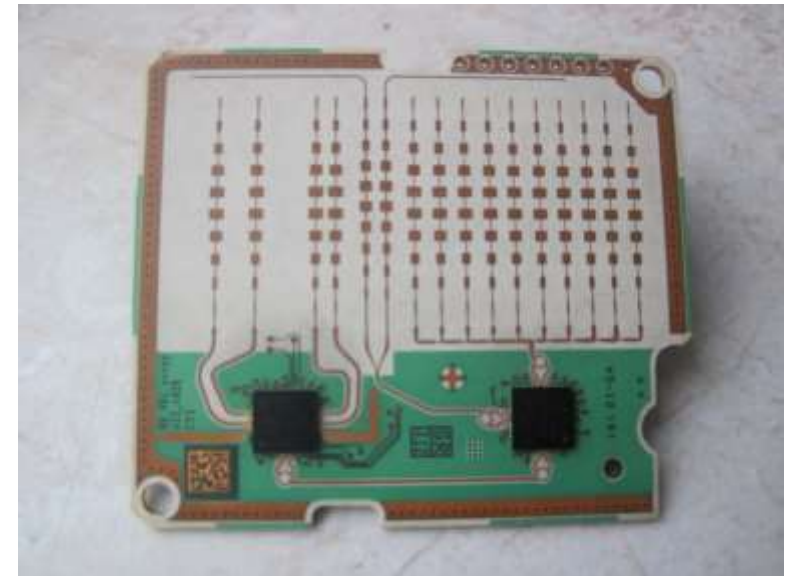
$$F_{smax} = \frac{N_{asmax}}{kT_0B} + 1$$

$$N_{asmax} = \frac{(kT_0B + N_{aAR})(1 - K_F)L_2}{K_F G_s}$$

R_c / RCS	1 m ²	10 m ²	100 m ²
3 m	49,2	39,2	29,2
10 m	70,1	60,1	50,1
50 m	97,9	87,9	77,9
100 m	110,1	101,1	90,1

Šumová analýza: Závěry

- Vypočtené hodnoty pro standardní AR typu MRR1 (Bosch)
- Nejnižší hodnota je 29 dB na $R_c=3$ m a $RCS=100$ m²
- Tam je ale $SNR=70$ dB, takže pokles o 1dB nemá vliv
- Jinak šumová čísla 80-90 dB
- Takže RX v SC nemusí obsahovat LNA
- To zjednodušuje návrh i realizaci SC
- Běžné konvertory s LNA jsou dokonce nevhodné



R_c / RCS	1 m ²	10 m ²	100 m ²
3 m	49,2	39,2	29,2
10 m	70,1	60,1	50,1
50 m	97,9	87,9	77,9
100 m	110,1	101,1	90,1

Šumová analýza: Fázový šum

- Až na malé výjimky – SC obsahují frekvenční konverzi a tedy i LO
- Zkoumali jsme vliv fázového šumu
- Uplatňuje se při down- i up-konverzi
- Model vlivu FŠ
- Impulsní odezva:

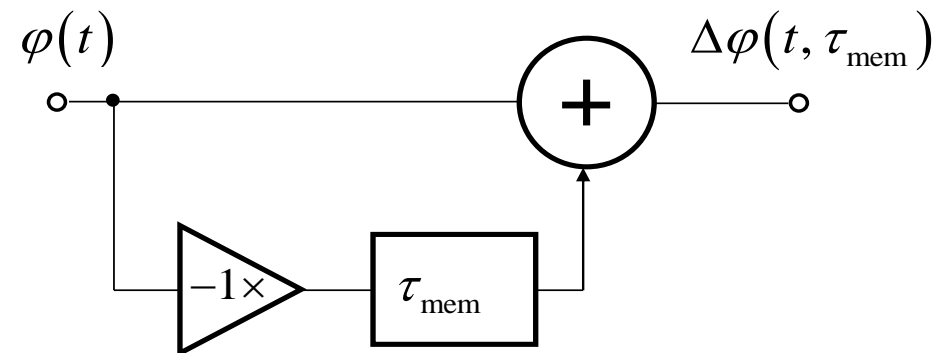
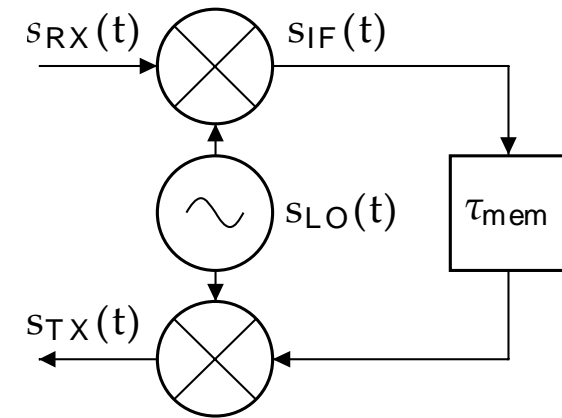
$$h(t) = \delta(t) - \delta(t - \tau(t))$$

- Přenosová fce:

$$H(f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) e^{-j2\pi ft} dt = \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) e^{-j2\pi ft} dt - \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t - \tau_{\text{mem}}) e^{-j2\pi ft} dt = 1 - e^{-j2\pi f \tau_{\text{mem}}}$$

- Výkonová fce:

$$G(f) = |H(f)|^2 = |1 - e^{-j2\pi f \tau_{\text{mem}}}|^2 = 2(1 - \cos(2\pi f \tau_{\text{mem}}))$$

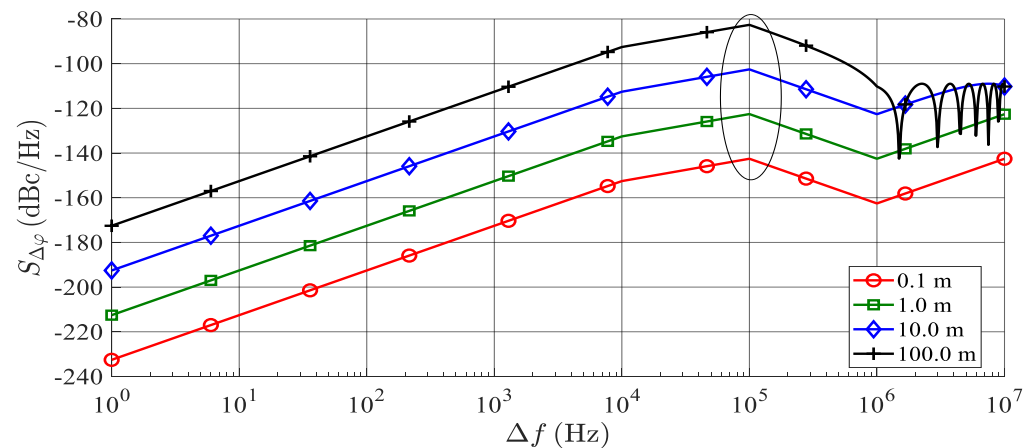
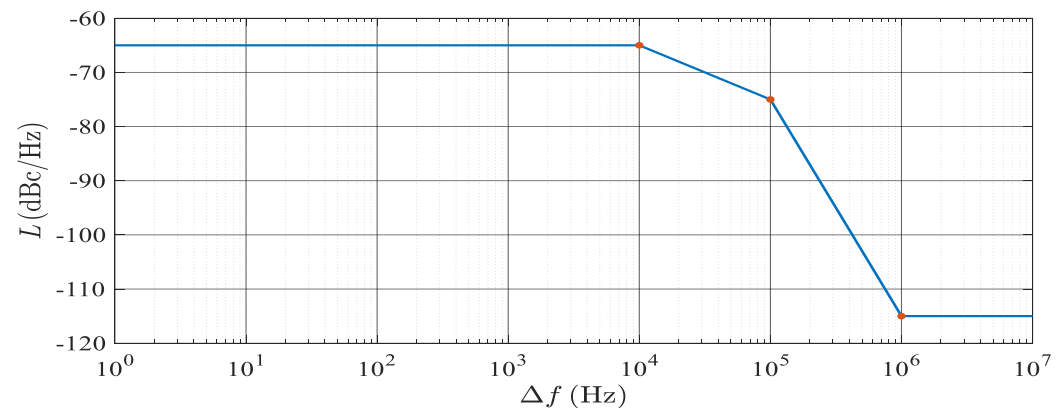
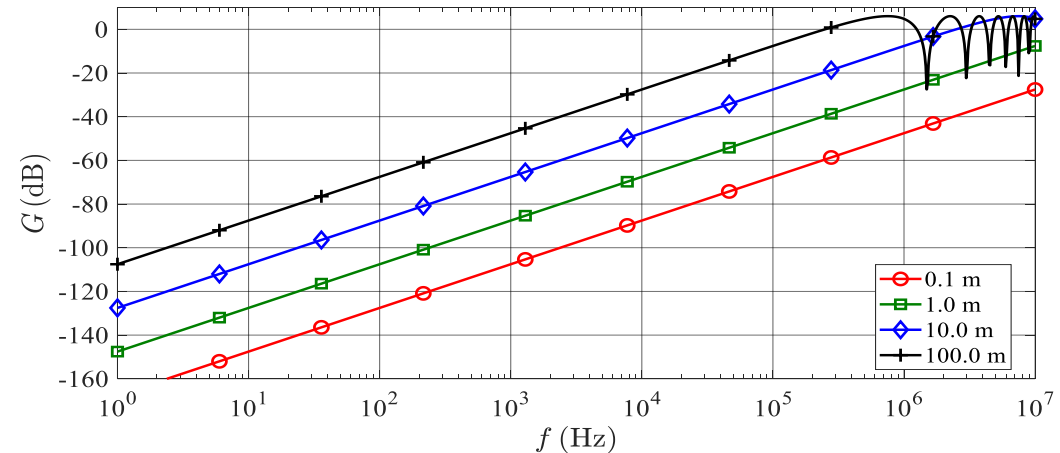


Fázový šum

- Výsledná PSD fázového šumu

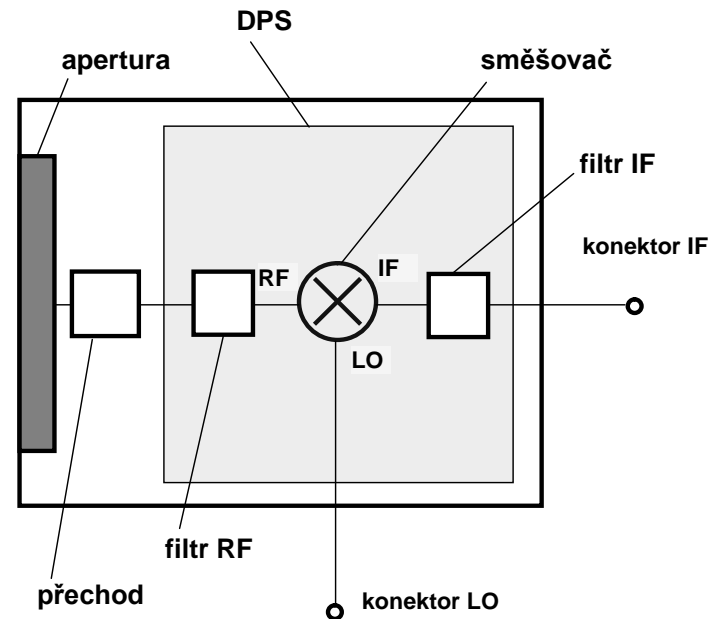
$$S_{\Delta\varphi}(f) = S_{\varphi}(f)G(f)$$

- FMCW – vyhodnocuje se bin se záznějem
- $B=1/T_{chirp}$, typ. 12,5 kHz
- Integrál **PSD** v okolí $\Delta f=0$ nemůže mít na činnost SC faktický vliv
- Lze použít i relativně „špinavé“ LO
- Problémem může být simulace více relativně blízkých cílů.



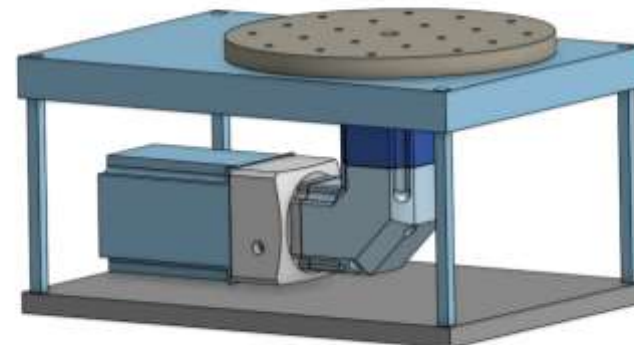
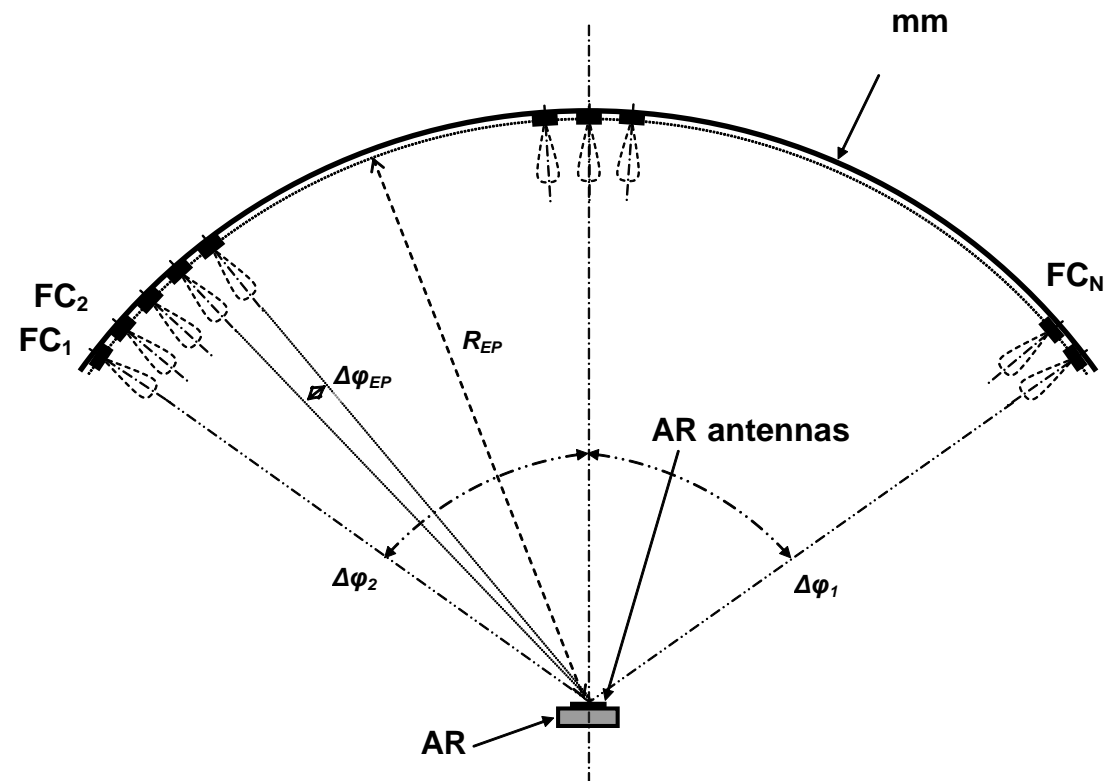
Integrované milimetrové jednotky

- Potřebné pro down- i up-konverzi
- Komerční = velmi drahé, 10^3 USD bez antény a LO
- Komunikační nejsou vhodné (obsahují LNA)
- Vývoj vlastních = integrovaná anténa + subharmonicky buzený směšovač
- Verze 14 dB = zisk rohu
- Verze 20 dB = zisk rohu
- Výhody:
 - Malé rozměry
 - pasivní
 - Relativně levné
 - LO 34 GHz /10 dBm
 - IF > 7-12 GHz



Simulace více cílů

- Problém:
 - „Surový“ obrázek AR obsahuje desítky různých cílů
 - okolní vozidla
 - infrastrukturní objekty
 - budovy, stromy
 -
 - AR v nich vyhledává podstatné cíle
- Možnosti simulace:
 - Řada transpondérů
 - Interpolace polohy cíle mezi transpondéry = aktuálně řešená problematika
- Pohyb v azimutu
 - Přepínání+interpolace v řadě
 - Rotátor pod AR (pokud to jde)



Realizace:

- AR= 2x4 MIMO modul TI
- Typický MRR
- Vše je přístupné a externě programovatelné
- Standardní AR – velký problém s odečtem parametrů = cílů



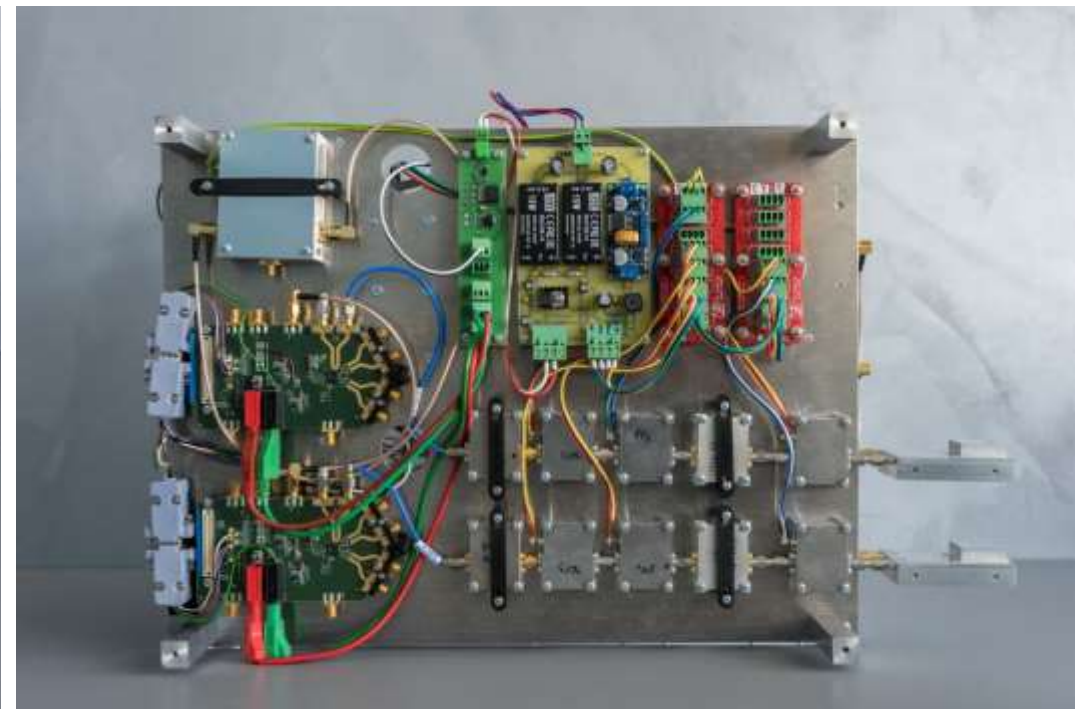
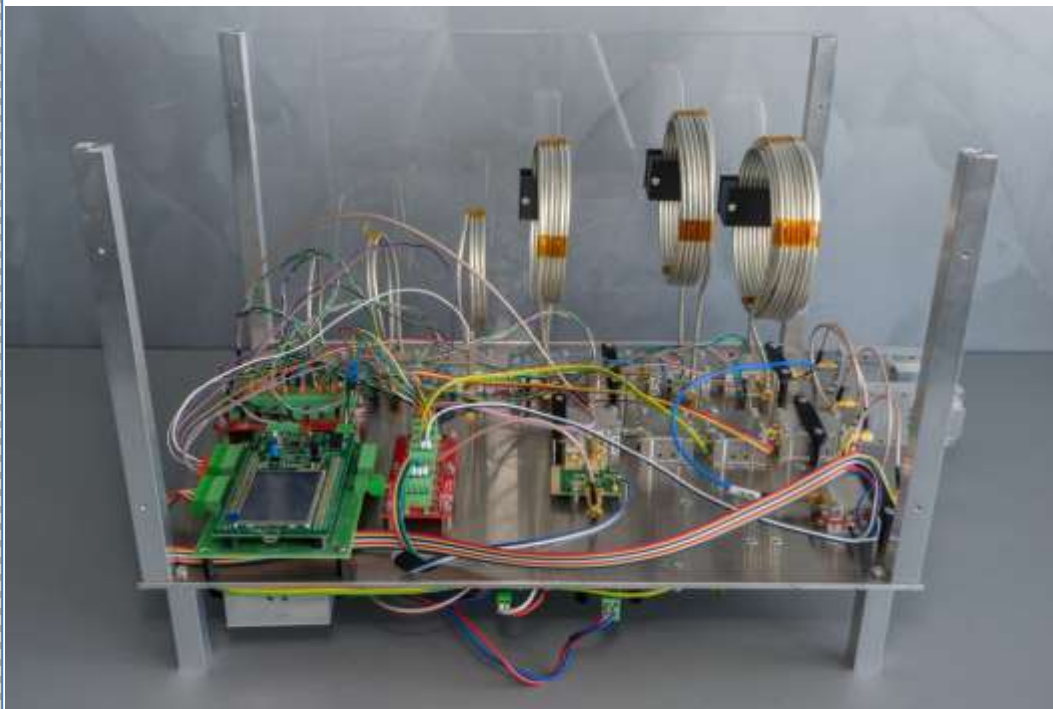
- Simulátory cílů
 - Teorie + „proof-of-concept“
 - „Krabičkové“ řešení
 - Spolu s řídicími a digitálními obvody na jednoduchých základnách 330x450mm
 - Vše lze rozmontovat, vyměnit, měřit, ...
 - Připravujeme i kompaktní varianty



Realizace: Analogové řešení

- IF = 7-12 GHz
- 6-bitové řízení DELAY i ATT
- Zisk zesilovačů typ. 60 dB
- Použití PLL1 a PLL2 pro nastavení dopplerovského posuvu (spektrálně čisté)
- Dosah 3 – 15,6 m

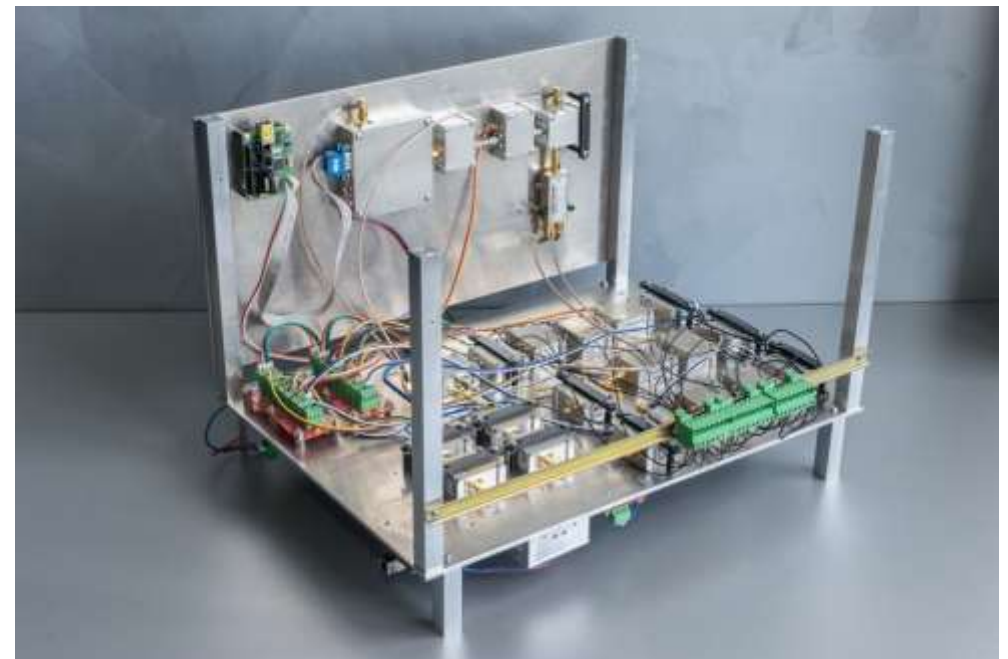
- DELAY:
 - Kabel Sucofor 141Cu (Huber-Suhner) 4,7 ns/m
 - 6,4 – 3,2 - 1,6 -0,8 - 0,4 - 0,2 m
→ dosah 3-15,6 m
 - Celk. 17,9 m kabelu, $L \sim 25$ dB
 - Přepínání délek udržuje přibližně konstantní **RCS**



Realizace: Digitální řešení

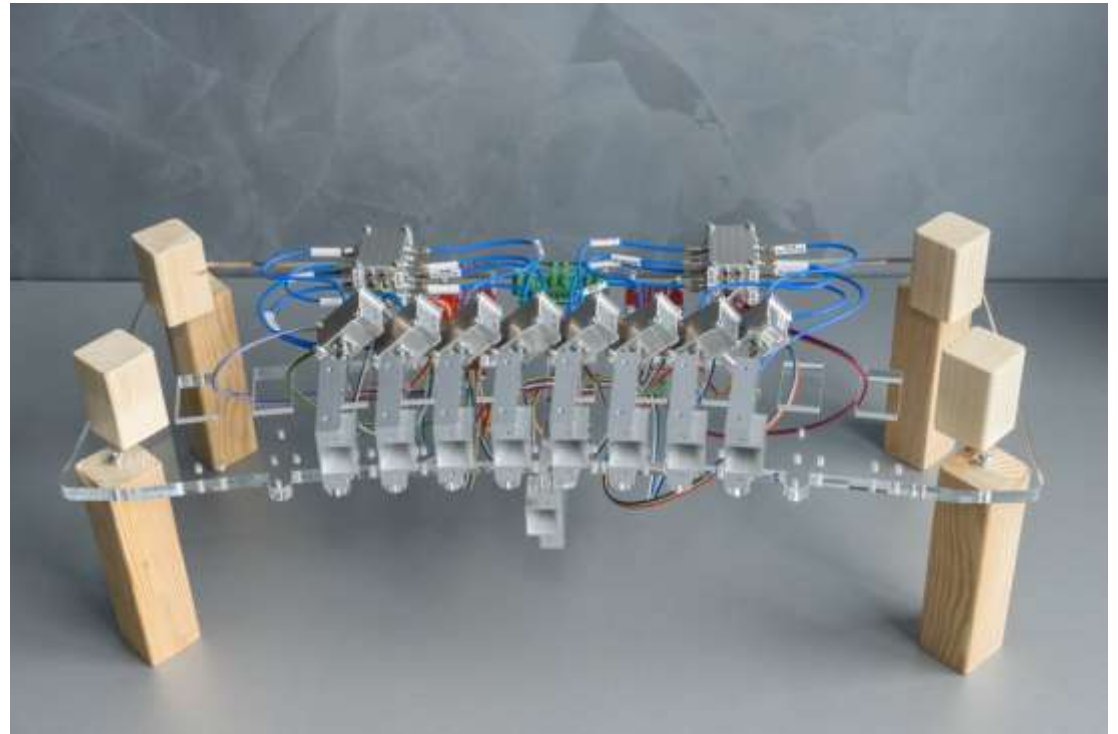
- ADC 2x 2,5 Gsaps
- FPGA
- DAC = vlastní návrh, 2x 2,5 Gsaps
- Celková latence <50 ns
- IF = 0,05 až 950 MHz

- 2x směšování
- Analogové obvody
- 4x budič LO 34 GHz
- Funkční od cca 10 m
- Zatím jsme simulovali cíle do 100 m
- S rotátorem – i pohyb po kružnici



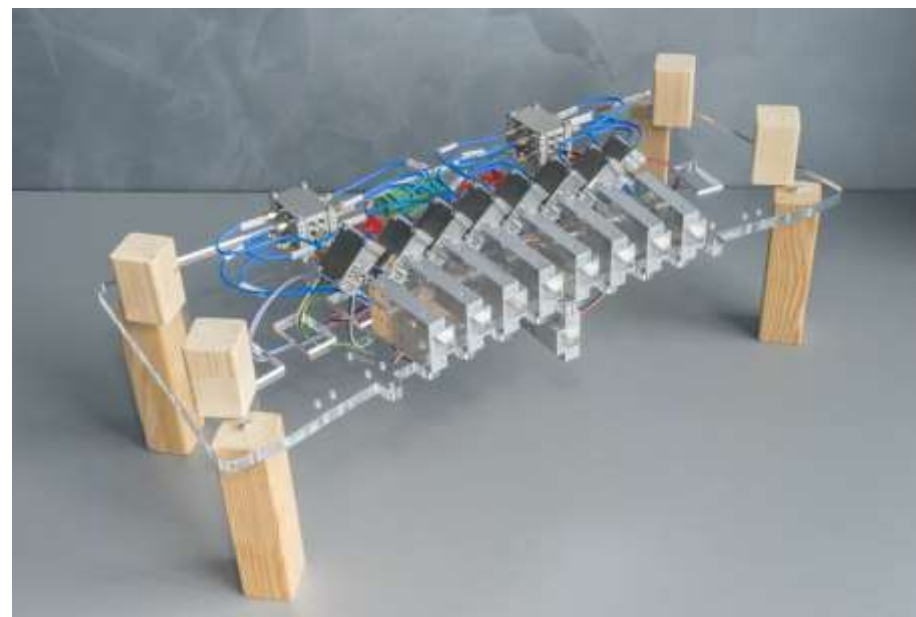
Realizace: Vícenásobné cíle

- Zatím 8-řada
- 1x přijímací IMJ
- 8x vysílací IMJ
- Použity nové IMJ s horny 20 dB
- Připravené měřicí režimy:
 - Přepínání
 - Interpolace mezi 2 transpondéry
- Aktuálně velmi „žhavá“ problematika
- Interpolace = zatím není úplně uspokojivě vyřešeno



PROJEKT

- Pokročilé testování automobilových radarů
- CZ.02.1.01/0.0/0.0/16025/0007318
- Sponzorován EU - MŠMT
- 2018-2020
- Spolupráce: Škoda Auto, Valeo
- Návrh nových struktur SC umožňujících jednodušší i pokročilé testování AR
- První praktická aplikace: ↓



- Testovací systém pro VALEO = testování LRR s měřením azimutu i elevace
- Finálně až 8 transpondérů = cílů s různými vzdálenostmi a rychlostmi



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MŠMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



Děkuji za pozornost