

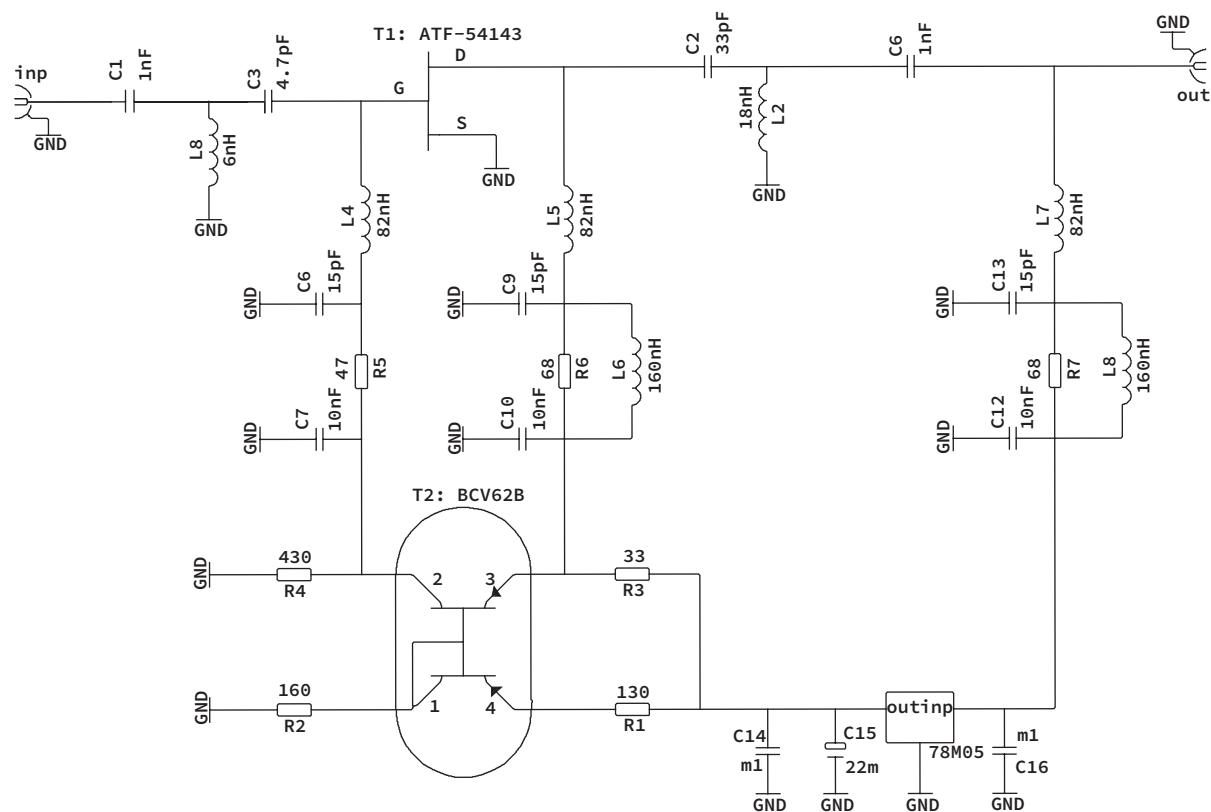
# **Praktický postup návrhu nízkošumových zesilovačů pomocí multiobjektové optimalizace a základní vlastnosti nízkošumových zesilovačů**

Josef Dobeš a Jan Míchal  
České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta elektrotechnická  
Katedra radioelektroniky

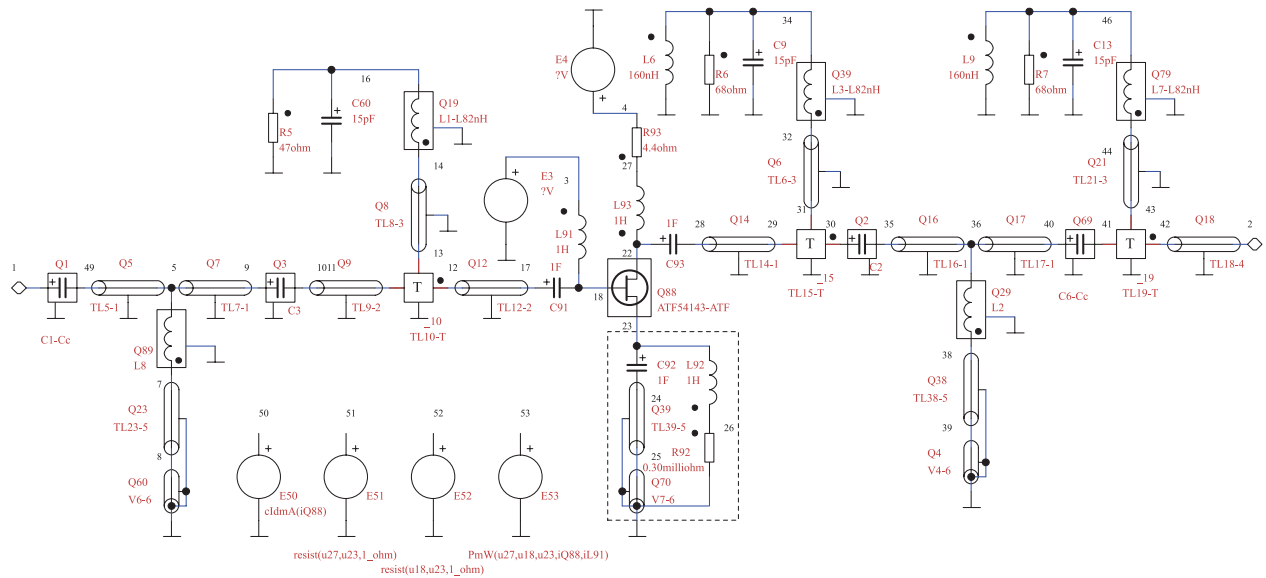
11. října 2022

*Architektura rádiových přijímačů a vysílačů*

# 1 Základní schéma LNA (zapojení bývá doporučené výrobcí pHEMT)

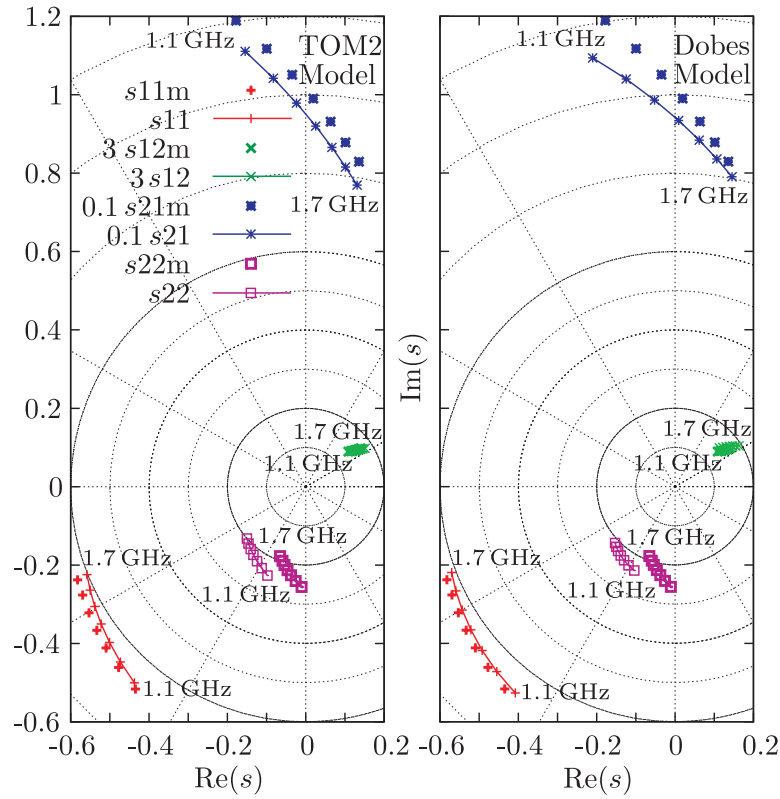


## 2 Náhradní schéma LNA



- Každá cívka je modelovaná kmitočtově závislou ekvivalentní indukčností a sériovým odporem
- Každý kondenzátor je modelován kmitočtově závislou ekvivalentní kapacitou a paralelní vodivostí
- Parametry našeho modelu pHEMT byly uvedeny do souladu s měřeními  $s$ -parametry firmy Avago
- Mikropásková vedení jsou definována  $s$ -parametry generovanými mikrovlnným simulátorem AWR
- Šumové modely jsou generovány pro všechny součástky s výjimkou rozbočnic ( $2 \times T$ -splitters)

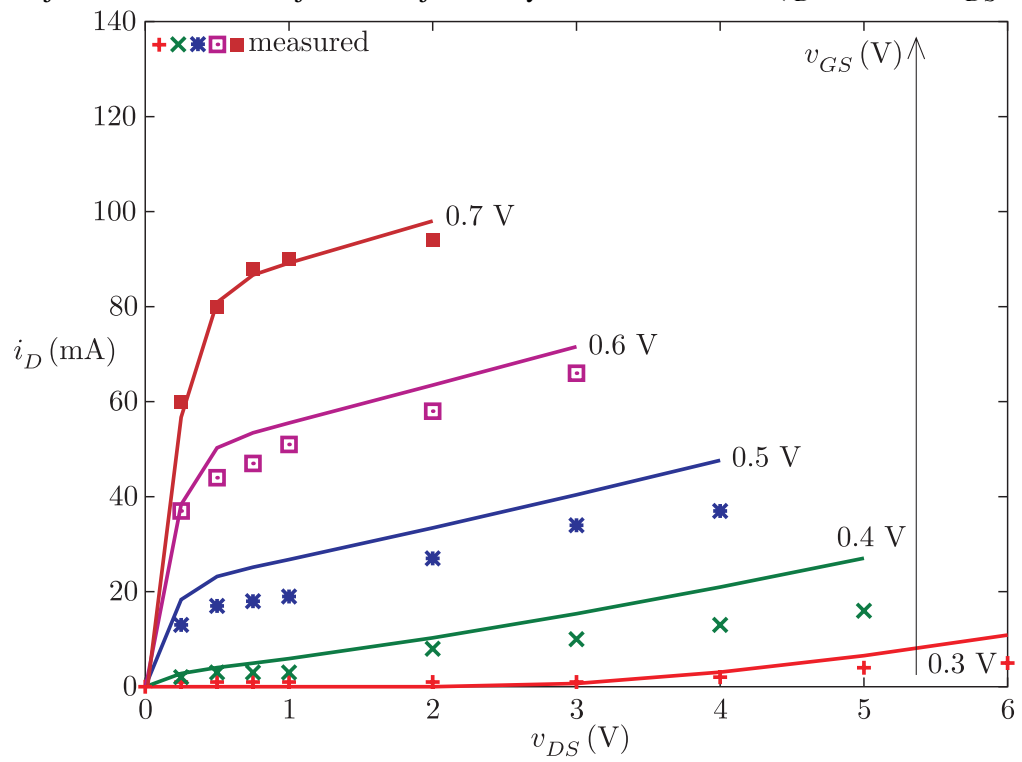
### 3 PHEMT: dynamický & statický model



Vypočtené (plné křivky) a naměřené (jednotlivé body)  $s$ -parametry odpovídají pracovnímu bodu  $i_D = 60 \text{ mA}$  a  $v_{DS} = 3 \text{ V}$ , přesnost modelování parametrů  $s_{11}$  a  $s_{21}$  je 3.09 % a 7 % pro model TOM2 (model firmy TriQuint) a 2.94 % a 6.06 % pro námi vyvinutý a používaný model Dobes. (Nazývají to takto v literatuře).

### 3.1 Statický model

Přesnost stejnosměrného modelu je samozřejmě nezbytné kontrolovat také ( $i_D = 60 \text{ mA}$  a  $v_{DS} = 3 \text{ V}$ ...):



## 4 PHEMT: šumový model

Pro maximální přesnost modelování šumu pHEMT doporučuji použít nový šumový model Curtice 3. Šumový zdroj (drain) je definován semiklasickou rovnicí:

$$\langle i_d^2 \rangle = \left( 4kTg_mP + 4kTg_mP \frac{F_{nc}}{f} + K_f \frac{i_D^{A_f}}{f^{F_{fe}}} \right) \Delta f, \quad (1)$$

kde  $k$ ,  $g_m$ ,  $P$ ,  $F_{nc}$ ,  $K_f$ ,  $A_f$ , and  $F_{fe}$  jsou Boltzmanova konstanta, trans-konduktance, koeficient šumu (drain) a čtyři parametry blikavého šumu.

Relativně novou částí modelu je šumový zdroj (gate), který výrazně roste s kmitočtem:

$$\langle i_g^2 \rangle = 4kTC_{gs}^2 \omega^2 \frac{R}{g_m} \Delta f, \quad (2)$$

kde  $C_{gs}$  a  $R$  jsou (bariérová) kapacita gate-source při nulovém připojeném napětí a koeficient šumu (gate).

Mezi oběma zdroji šumu existuje korelace (opět rostoucí s kmitočtem):

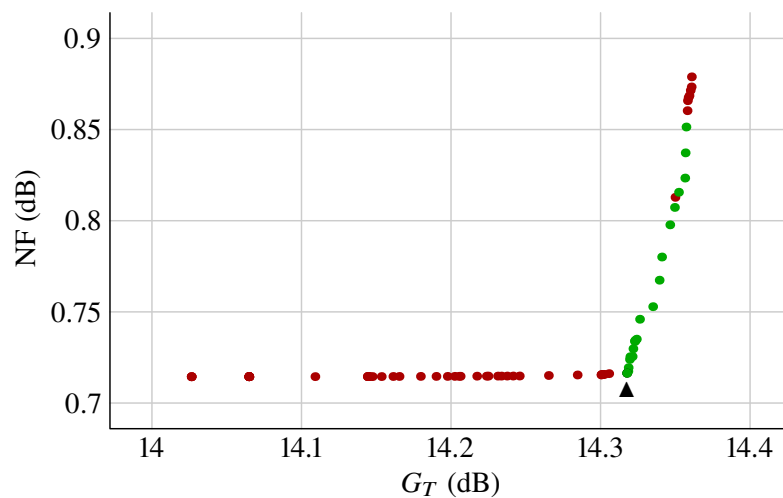
$$\langle i_g, i_d^* \rangle = 4kT_j C_{gs} \omega \sqrt{PR} C \Delta f, \quad (3)$$

A nakonec jsou (standardně) připojeny zdroje tepelného šumu způsobené sériovými rezistory:

$$\langle i_{G|S|D}^2 \rangle = \frac{4kT}{R_{g|s|d}} \Delta f. \quad (4)$$

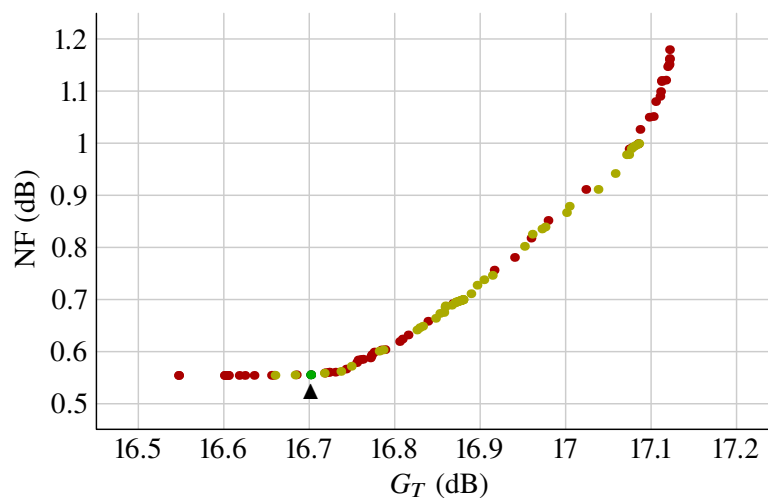
Klasické šumové modely pHEMT neobsahovaly (2) a při vyšších kmitočtech tak byly zatíženy chybou.

## 5 Paretova plocha: L&S-pásmo



- Červené body mají Rollettův činitel (velmi mírně) pod 1 a mohly by tedy (výjimečně) být nestabilní
- Zelené body mají Rollettův činitel přes 1 a jsou tedy stabilní za všech okolností (vš i/o impedance)
- Z množiny bodů s Rollettovým činitelem  $\geq 1$  byl vybrán zelený bod označený šipkou jako nejvhodnější kompromis mezi šumovým číslem a zesílením
- Kmitočtová charakteristika  $G_T$  (transducer power gain) a šumového čísla NF (noise figure) pro tento bod je detailně analyzována v následujících grafech

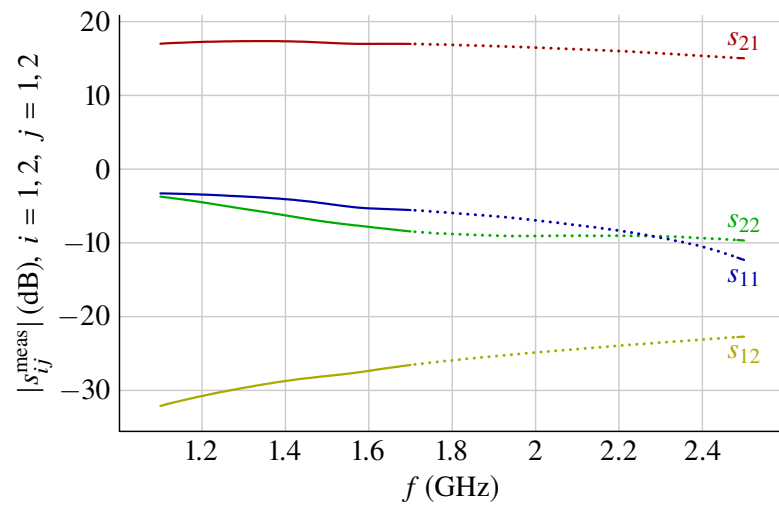
## 6 Paretova plocha: L-pásmo



- Pověšimněme si zásadního rozdílu mezi tvarem pro LNA s širším pásmem (viz předchozí obrázek) a užším pásmem – a také že pro lepší hodnoty pro  $G_T$  a NF je otázka stability stále významnější
- Červené body mají Rollettův činitel menší nebo rovný 0.99 a mohly by tedy být nestabilní
- Tmavě žluté body mají Rollettův činitel větší 0.99 a menší nebo rovný 1 – jsou tedy v oblasti potencionální nestability, ovšem většina z nich patrně stabilní bude
- Zelený bod má Rollettův činitel přes 1 a měl by tedy být stabilní za všech okolností (v i/o impedance) – logicky byl tedy vybrán tento bod

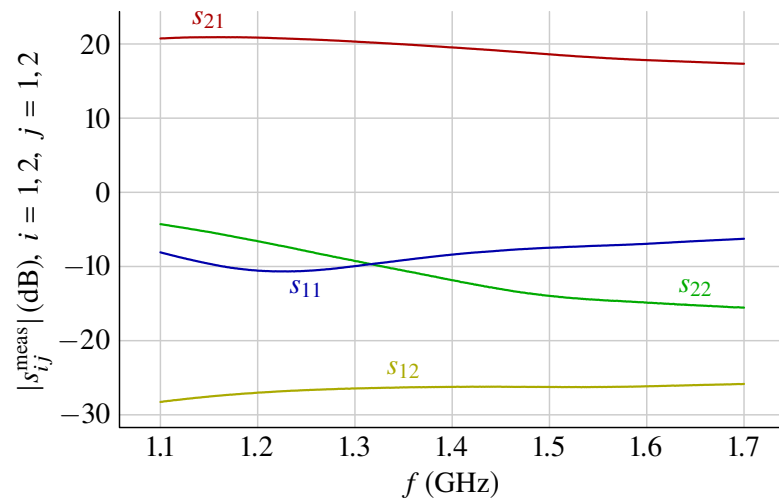


## 7 Měření $s$ -parametry: L&S



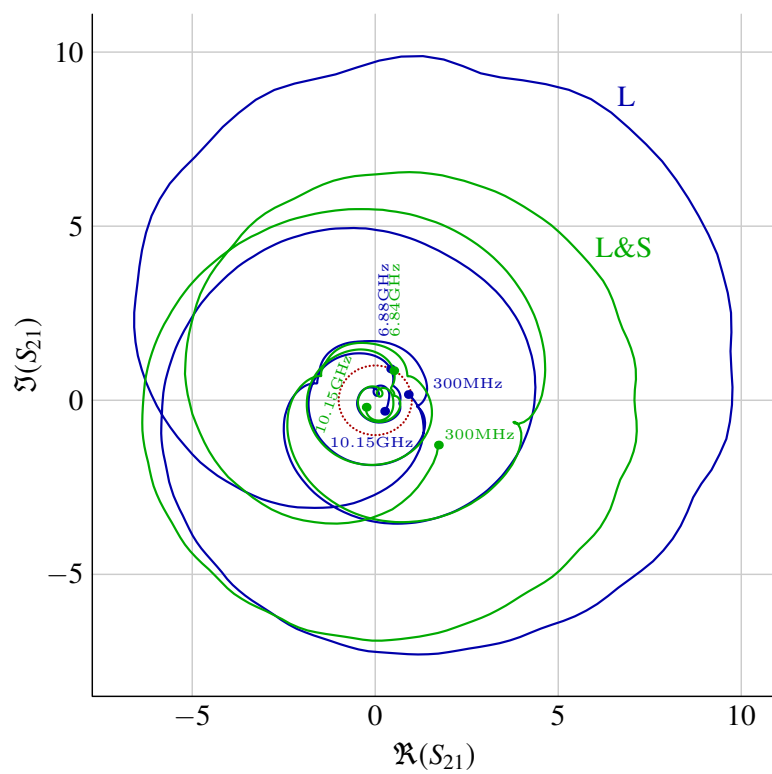
- Protože LNA je navržený jako kompromis (trade-off) mezi zesílením a šumovým číslem, nemůže být impedančně přizpůsobený (šumové přizpůsobení je odlišné od impedančního) a proto jsou hodnoty  $s_{11}$  a  $s_{22}$  ne zcela malé, v tomto případě zejména na začátku pásma
- Na konci pásma L jsou již hodnoty  $s_{11}$  a  $s_{22}$  poměrně nízké, velmi důležité ale je, že klesají dále a v úzkém pásmu S jsou již na hodnotách odpovídajících impedančně přizpůsobenému zesilovači.
- Hodnota  $s_{21}$  sice postupně roste, nicméně na kmitočtu 2.5 GHz má stále vyhovující hodnotu.

## 8 Měřené $s$ -parametry: L



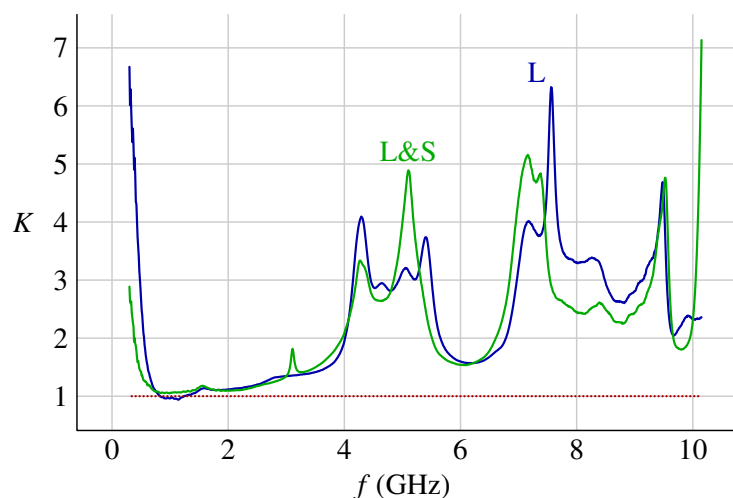
- Úloha pro samotné pásmo L je jednodušší a i hodnoty  $s_{11}$  a  $s_{22}$  vycházejí příznivěji (tj. jsou menší a tím jsou i menší odrazy na vstupu i výstupu)
- Dosáhne se tedy dobrého šumového čísla a zesilovač bude zároveň akceptovatelně impedančně přizpůsobený
- Zesílení charakterizované parametrem  $s_{21}$  je poměrně vysoké a stabilní

## 9 Polární graf $s_{21}$ : L&S a L



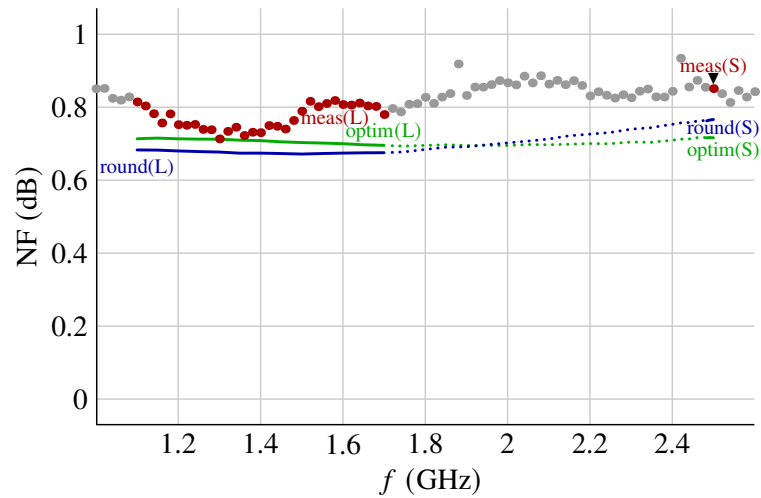
Z obou křivek – zobrazených pro měřené parametry od kmitočtu 300 MHz do kmitočtu 10.15 GHz – je jasné vidět odlišnost návrhu pro pásma L&S a (výhradně) pásmo L. Pro kmitočty charakteristické pro čtyři klasické poskytovatele družicové navigace (GPS, GLONASS, Galileo a BeiDou) se stává zesílení (modrá křivka) značně větším, avšak od určitého kmitočtu je naopak větší zesílení optimalizované pro L&S (zelená křivka). A současně je také naprosto zjevné, že kmitočtový průběh L&S je rovnoměrnější. Z průsečíků s červeným kruhem je dále zjevné, že obě varianty přestávají zesilovat při kmitočtu  $\approx 7$  GHz.

## 10 Graf Rolletova činitele stability v závislosti na kmitočtu: L&S a L



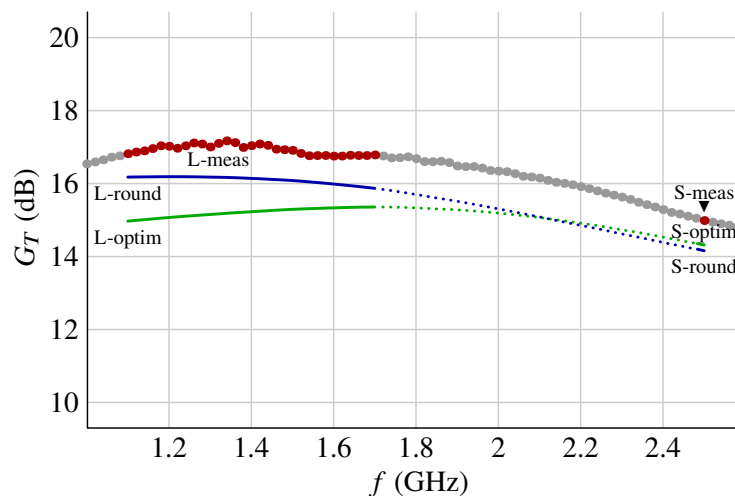
Obecně by stabilita zesilovačů měla být prověřována až do mezního kmitočtu použitých aktivních prvků, tj. v našem případě daleko přes 10 GHz. Rollettův činitel stability (přehled a upřesnění různých variant činitelů stability bude zopakováno a doplněno v následujících přednáškách) byl v našem případě počítán z měřených  $s$ -parametrů až do kmitočtu 24 GHz a zajímavá část výsledků je zobrazena pro stejné kmitočty jako v předcházejícím obrázku. Podle očekávání je rizikovější varianta zesilovače optimalizovaná (výhradně) pro pásmo L, která „škrtá“ kritickou linii jednotkového Rolletova činitele stability. V takovýchto těsných případech se lze však většinou na stabilitu spolehnout, protože nestabilita (a tudíž rozkmitání zesilovače) nastává zpravidla pro bizarní hodnoty vstupní nebo výstupní impedance (či obou).

## 11 L&S: Šumové číslo (průměr dvou měření s různými pHEMT, ICICDT'22 Hanoi) a $G_T$



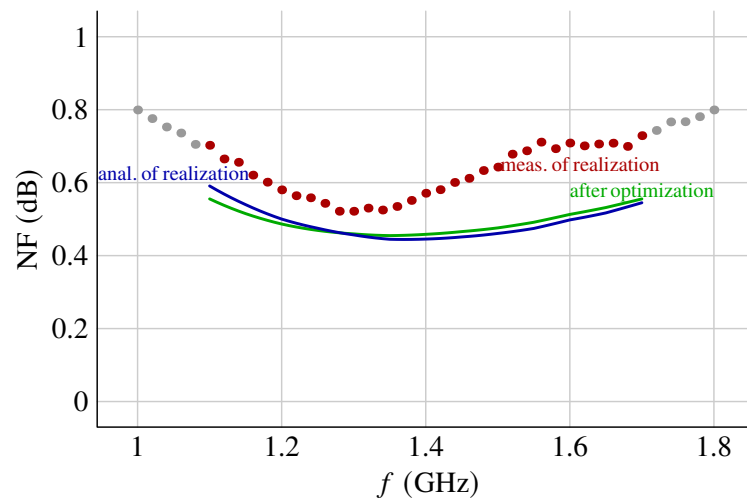
- Zelená křivka ukazuje výsledek po optimalizaci, tj. s nalezenými hodnotami L8, L2, C3 a C2 68.448424 nH, 3.1161062 nH, 3.7362289 pF a 3.6218839 pF (napětí 0.61887389 V, 4.0752192 V)
- Modrá křivka ukazuje šumové číslo pro obvod s hodnotami v příslušné řadě, tj. pro hodnoty 68 nH, 3.9 nH, 3.6 pF a 3.6 pF (napětí 0.629 V, 4.135 V – nastaveno rezistory, viz náhradní schéma LNA)
- Šipka ukazuje naměřenou hodnotu pro nový indický systém navigace; celkově naměřené body sledují trend teoretických hodnot a přirozeně jsou o něco vyšší vzhledem k dodatečným šumům v obvodu i chybě měřících přístrojů  $\pm 0.2$  dB. (Jasně je také vidět rušení GSM a Wi-Fi, body mimo.)

### 11.1 Výkonové zesílení (Transducer Power Gain, $G_T$ )



- V tomto případě jsme pro L2 neměli vhodnou hodnotu v řadě (řada výrobce obsahovala 2 nF a 3.9 nF), což se projevilo citelnější odchylkou mezi zelenou a modrou křivkou při nízkých kmitočtech (optimalizací stanovená hodnota 3.1161062 nH je příliš „uprostřed“ mezi těmito dvěma hodnotami)
- Napětí drain a gate byla multiobjektovou optimalizací stanovena na hodnoty 3.785 V (před cívkou 4.135 V) a 0.62898 V (před cívkou 0.629 V) – viz náhradní schéma LNA
- Naměřená křivka výkonového zesílení zde však sleduje vypočtené průběhy (tj. modrou křivku) velmi dobře. (A zesílení je o něco větší, protože výrobce tranzistory v každé sérii zdokonaluje.)

## 12 L: Šumové číslo (průměr tří měření s dvěma různými pHEMT, ICICDT'22 Hanoi) a $G_T$

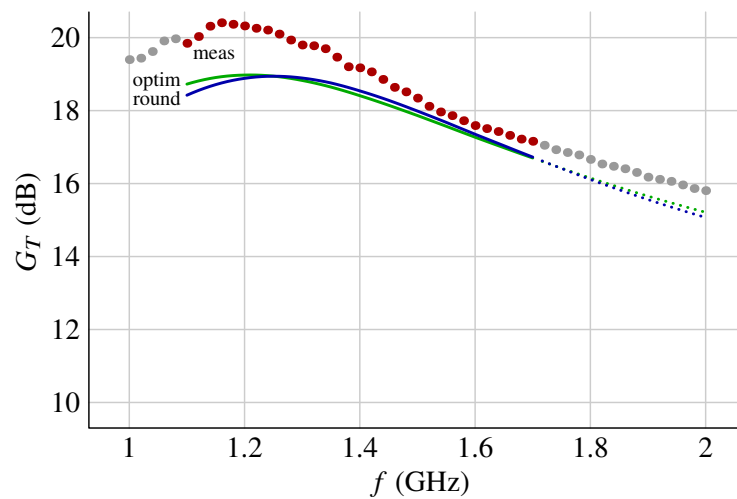


- Zelená křivka ukazuje výsledek po optimalizaci, tj. s nalezenými hodnotami L8, L2, C3 a C2 5.7998936 nH, 5.8635883 nH, 4.4360802 pF a 4.9225460 pF (napětí 0.61874951 V, 4.0797924 V)
- Modrá křivka ukazuje šumové číslo pro obvod s hodnotami v příslušné řadě, tj. pro hodnoty 5.6 nH, 5.6 nH, 4.3 pF a 5.1 pF (0.612 V, 4.112 V – opět nastaveno rezistory, jde o napětí před cívkami)
- Je jasné vidět, že při zaměření pouze na jedno pásmo (v tomto případě L) lze dosáhnout šumového čísla výrazně nižšího – i naměřené hodnoty nepřekračují v celém pásmu (navigačním, L) 0.7 dB

U (velmi) nízkošumových zesilovačů je však problematická otázka nepřesnosti měření ( pásma pro kalibrované/nekalibrované přístroje, měření takových zesilovačů se budeme věnovat v speciální přednášce):

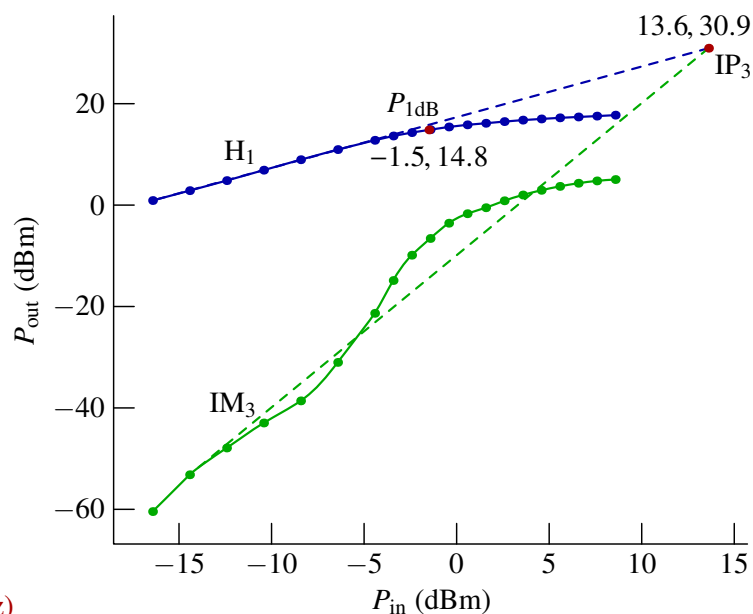


### 12.1 Výkonové zesílení (Transducer Power Gain, $G_T$ )



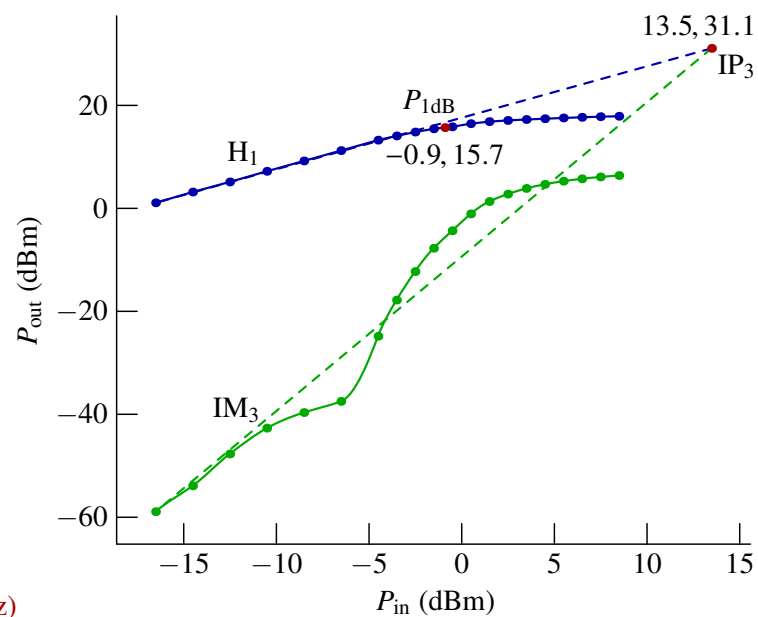
- Zaokrouhlení hodnot součástek do řady poskytované výrobcem v tomto případě výsledky téměř neovlivnilo
- Napětí drain a gate byla multiobjektovou optimalizací stanovena na hodnoty 3.7914 V (před cívkou 4.112 V) a 0.61198 V (a před cívkou prakticky totéž napětí 0.612 V) – viz náhradní schéma LNA
- Měřené výkonové zesílení vykazuje v tomto případě mírně (cca o 1 dB) vyšší hodnotu na nižších kmitočtech a téměř stejnou hodnotu na vyšších kmitočtech při srovnání s vypočtenými výsledky

### 13 Měřené $IP_3$ body: L&S pásmo



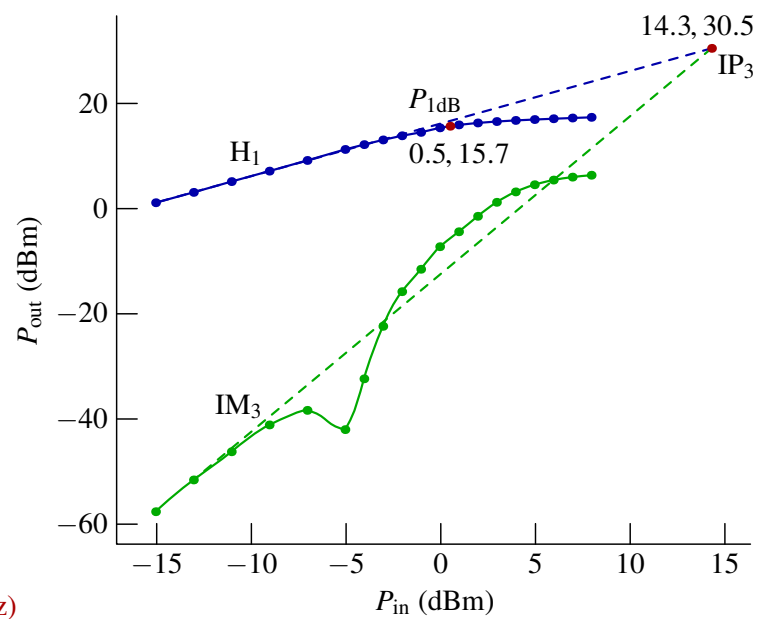
(1201+1202 MHz)

- Podle definice  $IP_3$  je třeba na zelené křivce najít bod, jehož směrnice je co nejvíce blízká poměru 3:1 a z tohoto bodu se vede směrnice; to projmutí na zelené křivce je pro obvody s pHEMT časté
- Najít bod na modré křivce se směrnicí 1:1 není zdaleka tak problematické; stejně tak není těžké jednoduchou interpolací najít i bod  $P_{1dB}$  (často se nesprávně označuje jako  $P_{1dBm}$ )



(1576+1577 MHz)

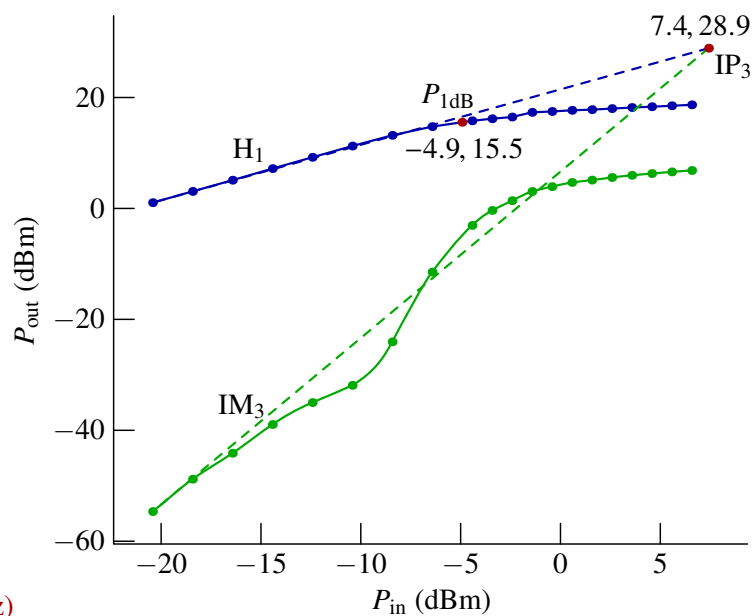
- Povšimněme si, že s rostoucím kmitočtem se tvar křivky  $IM_3$  začíná stále více podobat písmenu 'S', což je pro obvody s pHEMT časté a charakteristické



(2496+2497 MHz)

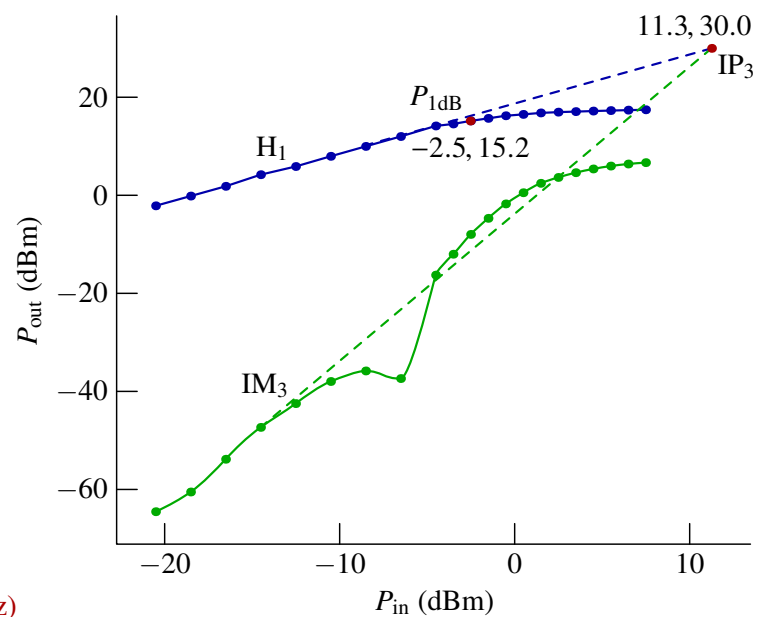
- Při nejvyšších kmitočtech je průhyb křivky  $IM_3$  největší

## 14 Měřené IP<sub>3</sub> body: L pásmo



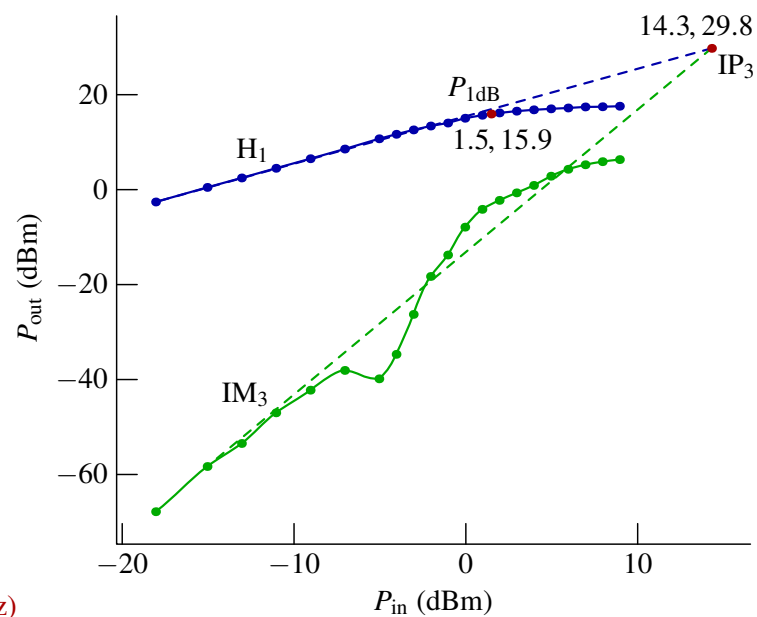
(1201+1202 MHz)

- Použité kmitočty  $f_1$  a  $f_2$  zde byly 1.201 GHz a 1.202 GHz a poměr výkonů  $\left(\frac{f_1}{f_2}\right)$  byl 1. (Pro předcházející měření byl použit stejný poměr výkonů.)



(1576+1577 MHz)

- Deformace křivky  $IM_3$  je opět větší než v předcházejícím případě
- Obecně zesilovače překračující v  $IP_3$  30 dBm patří k velmi dobrým; v důsledku většího zesílení je zde bod  $P_{1\text{dB}}$  posunut trochu doleva



(2496+2497 MHz)

- Deformace křivky  $\text{IM}_3$  je zde větší i pro  $P_{\text{in}} > 0$  dBm (výraznější hrbolek nad čárkovanou čarou)