

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

Základní schéma LNA ...
Náhradní schéma LNA
PHEMT: dynamický & ...
PHEMT: šumový model
Paretova plocha: L&S- ...
Paretova plocha: L-pásmo
Měření s -parametry: L&S
Měření s -parametry: L
Polární graf s_{21} : L&S a L
Graf Rolletova činitele ...
L&S: Šumové číslo a G_T
L: Šumové číslo a G_T
Měření IP_3 body: L&S ...
Měření IP_3 body: L pásmo

Domovská stránka

◀◀ ▶▶

◀ ▶

Strana 1 z 23

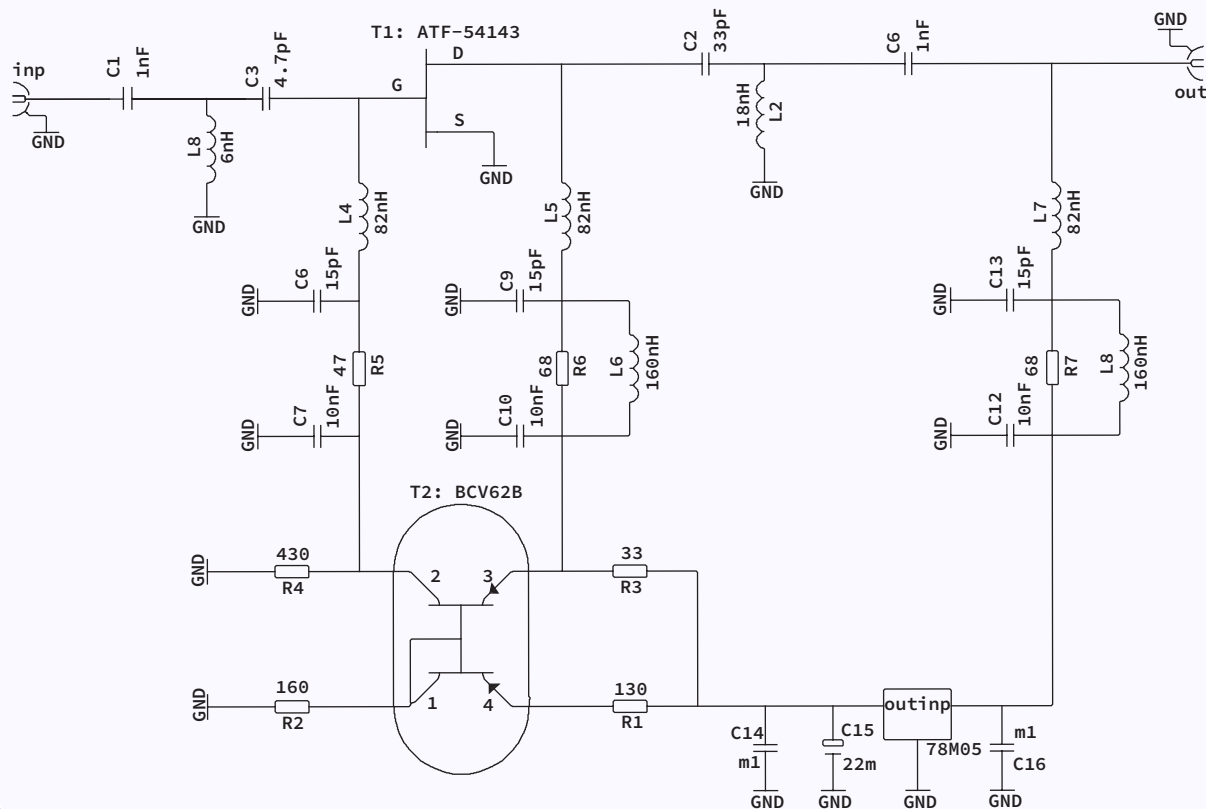
Vrátit se

Celá obrazovka

Zavřít

Konec

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



Základní schéma LNA...

Náhradní schéma LNA

PHEMT: dynamický &...

PHEMT: šumový model

Paretova plocha: L&S-...

Paretova plocha: L-pásmo

Měření s-parametry: L&S

Měření s-parametry: L

Polární graf s_{21} : L&S a L

Graf Rolletova činitele...

L&S: Šumové číslo a G_T

L: Šumové číslo a G_T

Měření IP_3 body: L&S...

Měření IP_3 body: L-pásmo

[Domovská stránka](#)

◀

▶

◀

▶

Strana 2 z 23

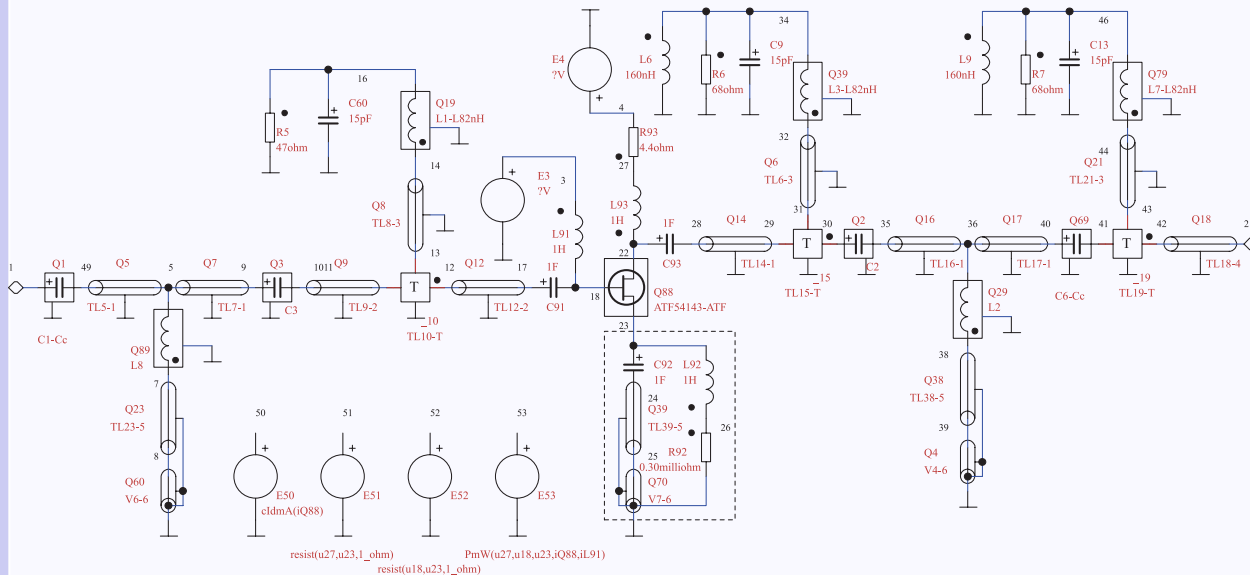
[Vrátit se](#)

[Celá obrazovka](#)

[Zavřít](#)

[Konec](#)

2. Náhradní schéma LNA



Základní schéma LNA ...

Náhradní schéma LNA

PHEMT: dynamický & ...

PHEMT: šumový model

Paretova plocha: L&S- ...

Paretova plocha: L-pásmo

Měření s -parametry: L&S

Měření s -parametry: L

Polární graf s_{21} : L&S a L

Graf Rolletova činitele ...

L&S: Šumové číslo a G_T

L: Šumové číslo a G_T

Měření IP_3 body: L&S ...

Měření IP_3 body: L-pásmo

Domovská stránka



Strana 3 z 23

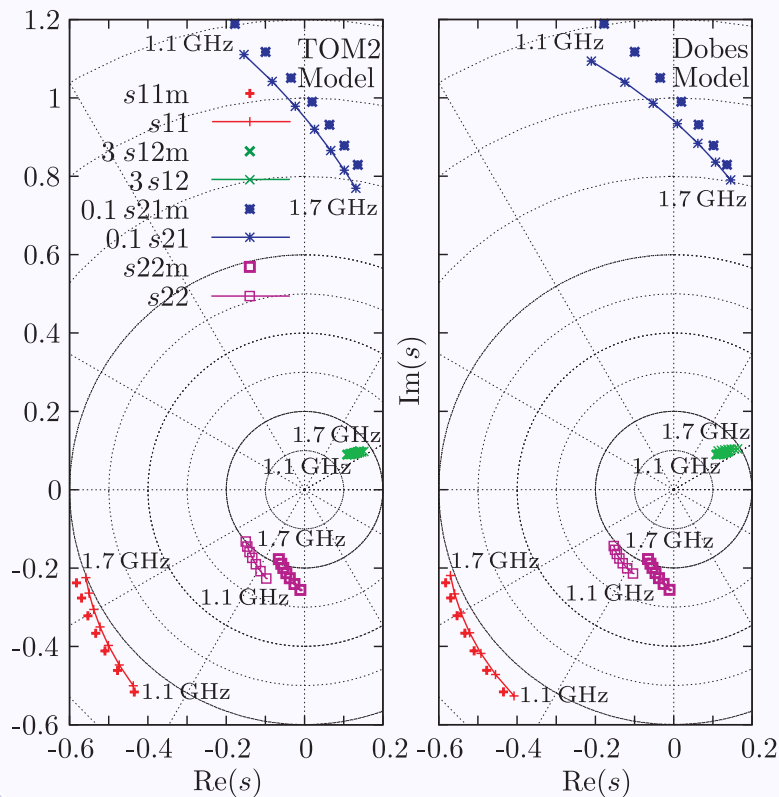
Vrátit se

Celá obrazovka

Zavřít

Konec

3. PHEMT: dynamický & statický model



Základní schéma LNA ...

Náhradní schéma LNA

PHEMT: dynamický & ...

PHEMT: šumový model

Paretova plocha: L&S-...

Paretova plocha: L-pásmo

Měření s -parametry: L&S

Měření s -parametry: L

Polární graf s_{21} : L&S a L

Graf Rolletova činitele...

L&S: Šumové číslo a G_T

L: Šumové číslo a G_T

Měření IP_3 body: L&S...

Měření IP_3 body: L pásmo

Domovská stránka

◀

▶

◀

▶

Strana 4 z 23

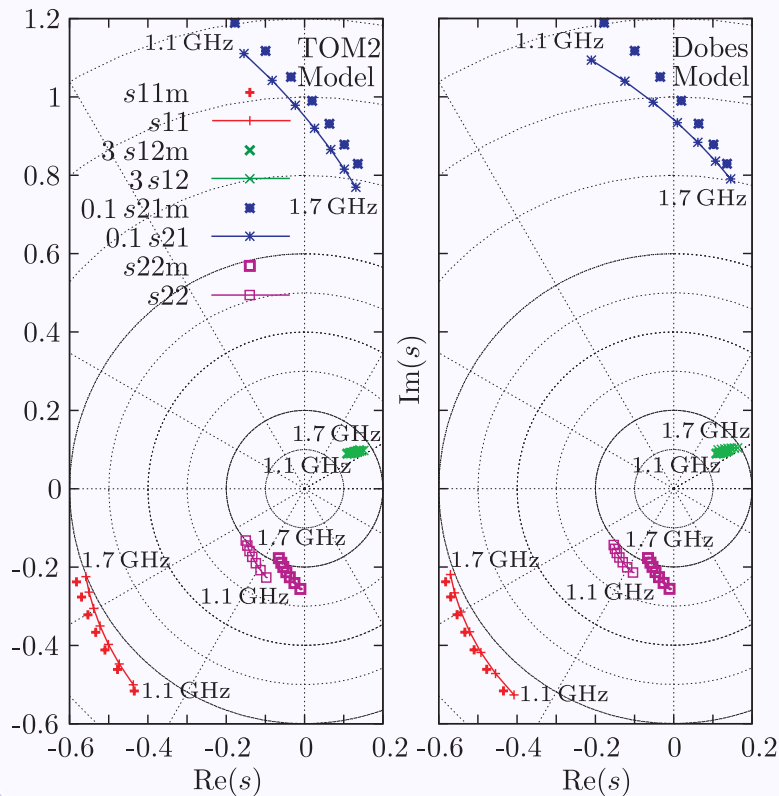
Vrátit se

Celá obrazovka

Zavřít

Konec

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).

Základní schéma LNA ...

Náhradní schéma LNA

PHEMT: dynamický & ...

PHEMT: šumový model

Paretova plocha: L&S- ...

Paretova plocha: L-pásma

Měřené s -parametry: L&S

Měřené s -parametry: L

Polární graf s_{21} : L&S a L

Graf Rolletova činitele ...

L&S: Šumové číslo a G_T

L: Šumové číslo a G_T

Měřené IP_3 body: L&S ...

Měřené IP_3 body: L-pásma

Domovská stránka

◀ ▶

◀ ▶

Strana 4 z 23

Vrátit se

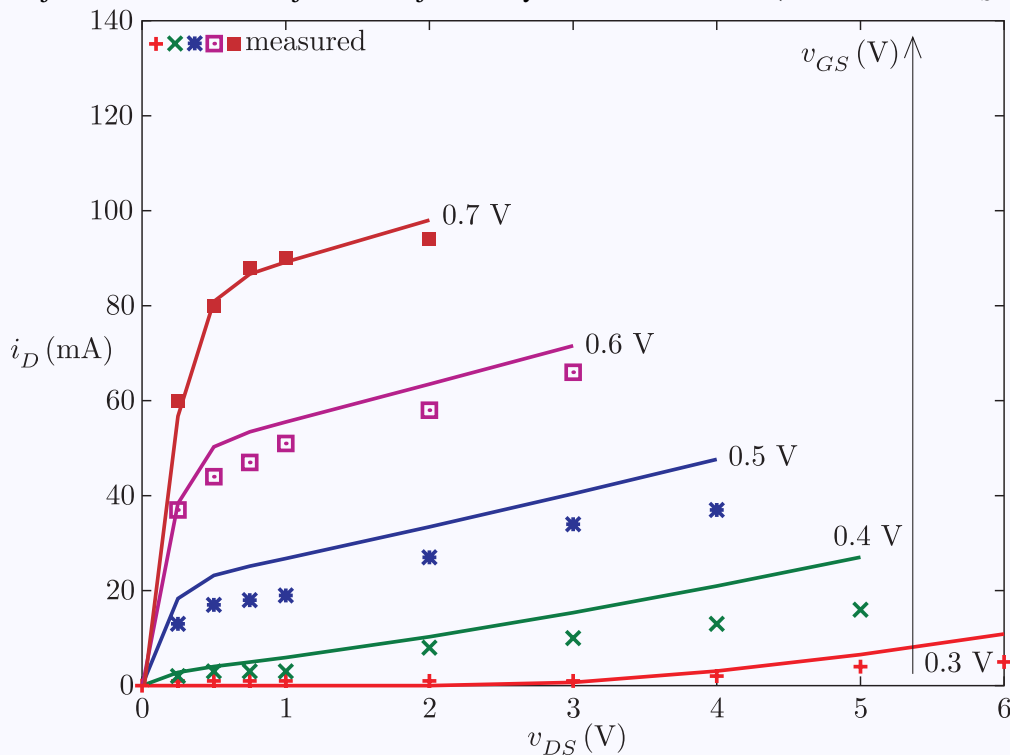
Celá obrazovka

Zavřít

Konec

3.1. Statický model

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



Základní schéma LNA ...
Náhradní schéma LNA
PHEMT: dynamický & ...
PHEMT: šumový model
Paretova plocha: L&S-...
Paretova plocha: L-pásmo
Měření s -parametry: L&S
Měření s -parametry: L
Polární graf s_{21} : L&S a L
Graf Rolletova činitele...
L&S: Šumové číslo a G_T
L: Šumové číslo a G_T
Měření IP_3 body: L&S...
Měření IP_3 body: L pásmo

Domovská stránka

◀

▶

◀

▶

Strana 5 z 23

Vrátit se

Celá obrazovka

Zavřít

Konec

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.

Základní schéma LNA ...

Náhradní schéma LNA

PHEMT: dynamický & ...

PHEMT: šumový model

Paretova plocha: L&S-...

Paretova plocha: L-pásmo

Měření s-parametry: L&S

Měření s-parametry: L

Polární graf s_{21} : L&S a L

Graf Rolletova činitele ...

L&S: Šumové číslo a G_T

L: Šumové číslo a G_T

Měření IP_3 body: L&S ...

Měření IP_3 body: L pásmo

Domovská stránka

◀◀

▶▶

◀

▶

Strana 6 z 23

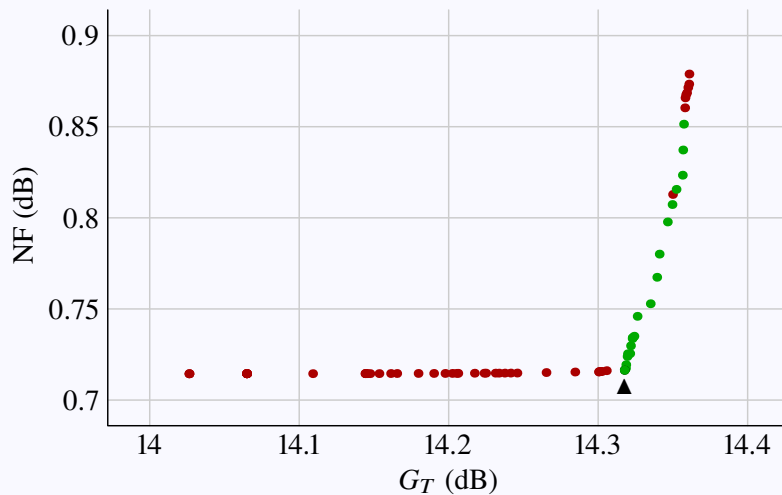
Vrátit se

Celá obrazovka

Zavřít

Konec

5. Paretova plocha: L&S-pásmo



Základní schéma LNA ...
Náhradní schéma LNA
PHEMT: dynamický & ...
PHEMT: šumový model
Paretova plocha: L&S-...
Paretova plocha: L-pásmo
Měřené s -parametry: L&S
Měřené s -parametry: L
Polární graf s_{21} : L&S a L
Graf Rolletova činitele ...
L&S: Šumové číslo a G_T
L: Šumové číslo a G_T
Měřené IP_3 body: L&S ...
Měřené IP_3 body: L pásmo

Domovská stránka



Strana 7 z 23

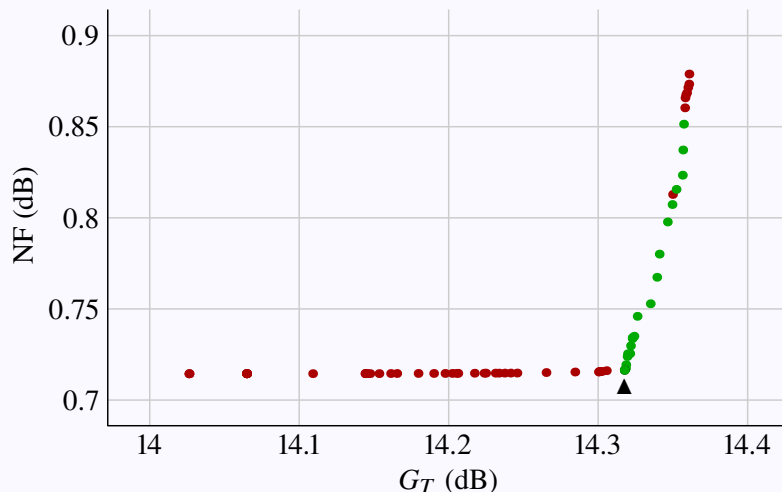
Vrátit se

Celá obrazovka

Zavřít

Konec

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 (v i/o impedance)
- Z množiny bodů s Rollettovým činitelem ≥ 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

Základní schéma LNA ...
Náhradní schéma LNA
PHEMT: dynamický & ...
PHEMT: šumový model
Paretova plocha: L&S-...
Paretova plocha: L-pásmo
Měřené s -parametry: L&S
Měřené s -parametry: L
Polární graf s_{21} : L&S a L
Graf Rollettova činitele ...
L&S: Šumové číslo a G_T
L: Šumové číslo a G_T
Měřené IP_3 body: L&S ...
Měřené IP_3 body: L pásmo

Domovská stránka



Strana 7 z 23

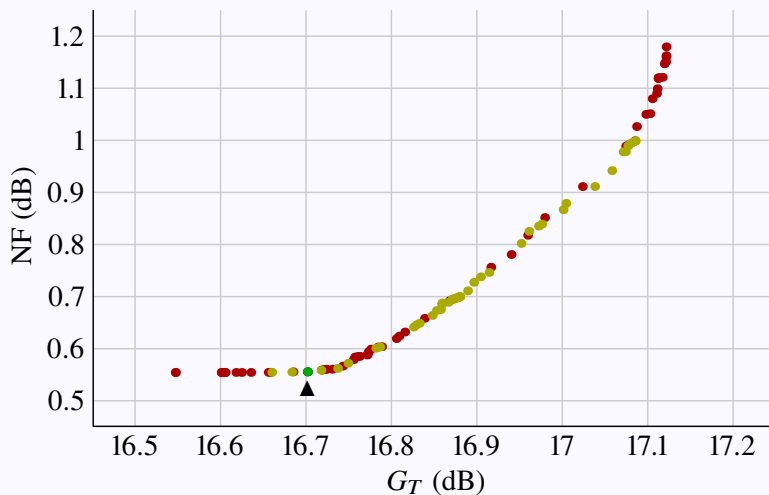
Vrátit se

Celá obrazovka

Zavřít

Konec

6. Paretova plocha: L-pásmo



Základní schéma LNA ...
Náhradní schéma LNA
PHEMT: dynamický & ...
PHEMT: šumový model
Paretova plocha: L&S- ...
Paretova plocha: L-pásmo
Měřené s -parametry: L&S
Měřené s -parametry: L
Polární graf s_{21} : L&S a L
Graf Rolletova činitele ...
L&S: Šumové číslo a G_T
L: Šumové číslo a G_T
Měřené IP_3 body: L&S ...
Měřené IP_3 body: L pásmo

[Domovská stránka](#)



Strana 8 z 23

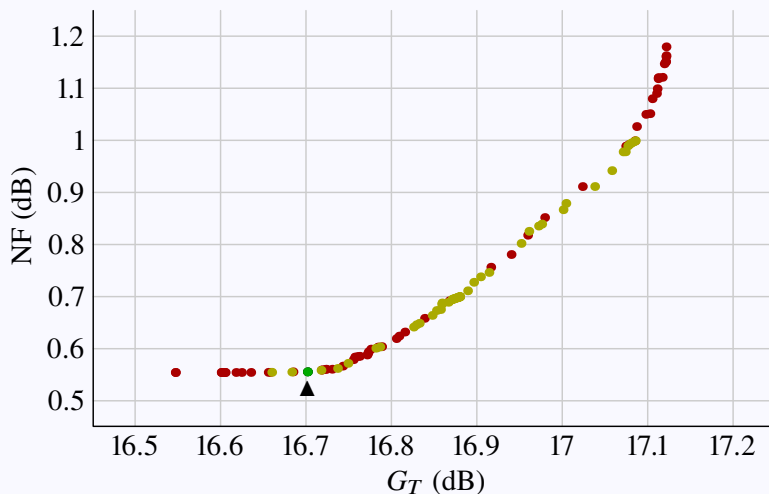
[Vrátit se](#)

[Celá obrazovka](#)

[Zavřít](#)

[Konec](#)

6. Paretova plocha: L-pásmo



- Povšimněme 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

Základní schéma LNA ...
Náhradní schéma LNA
PHEMT: dynamický & ...
PHEMT: šumový model
Paretova plocha: L&S- ...
Paretova plocha: L-pásmo
Měřené s -parametry: L&S
Měřené s -parametry: L
Polární graf s_{21} : L&S a L
Graf Rollettova činitele ...
L&S: Šumové číslo a G_T
L: Šumové číslo a G_T
Měřené IP_3 body: L&S ...
Měřené IP_3 body: L pásmo

Domovská stránka



Strana 8 z 23

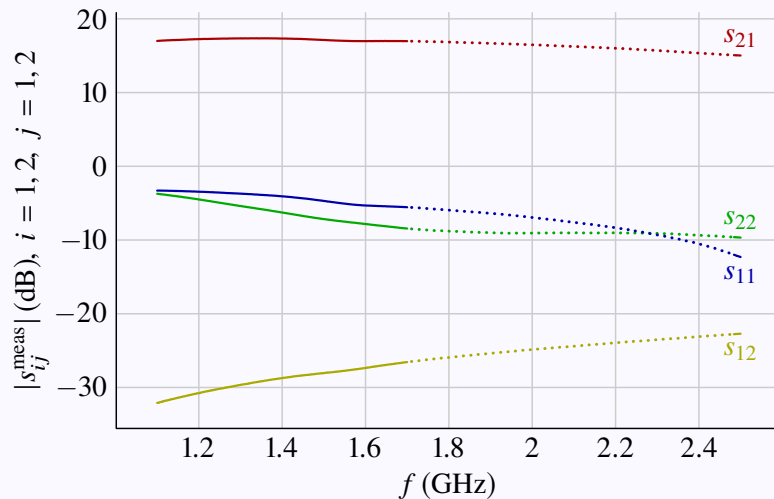
Vrátit se

Celá obrazovka

Zavřít

Konec

7. Měření s -parametry: L&S



Základní schéma LNA ...

Náhradní schéma LNA

PHEMT: dynamický & ...

PHEMT: šumový model

Paretova plocha: L&S-...

Paretova plocha: L-pásmo

Měření s -parametry: L&S

Měření s -parametry: L

Polární graf s_{21} : L&S a L

Graf Rolletova činitele ...

L&S: Šumové číslo a G_T

L: Šumové číslo a G_T

Měření IP_3 body: L&S...

Měření IP_3 body: L-pásmo

Domovská stránka



Strana 9 z 23

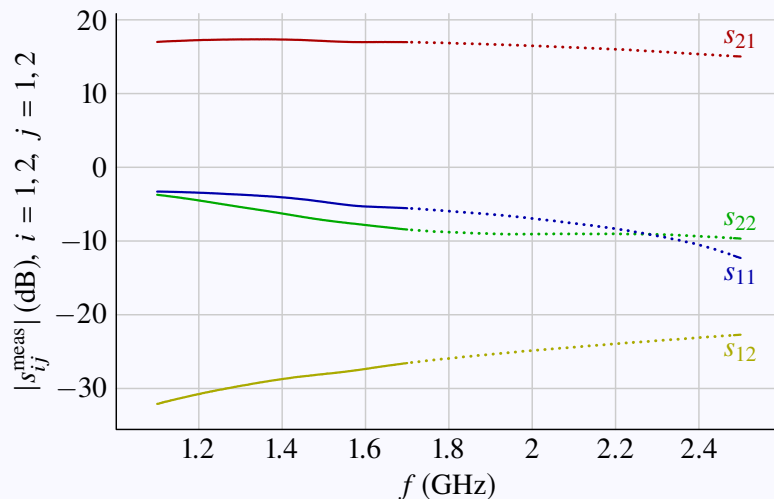
Vrátit se

Celá obrazovka

Zavřít

Konec

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.

Základní schéma LNA ...
Náhradní schéma LNA
PHEMT: dynamický & ...
PHEMT: šumový model
Paretova plocha: L&S- ...
Paretova plocha: L-pásmo
Měření s -parametry: L&S
Měření s -parametry: L
Polární graf s_{21} : L&S a L
Graf Rolletova činitele ...
L&S: Šumové číslo a G_T
L: Šumové číslo a G_T
Měření IP_3 body: L&S ...
Měření IP_3 body: L pásmo

Domovská stránka



Strana 9 z 23

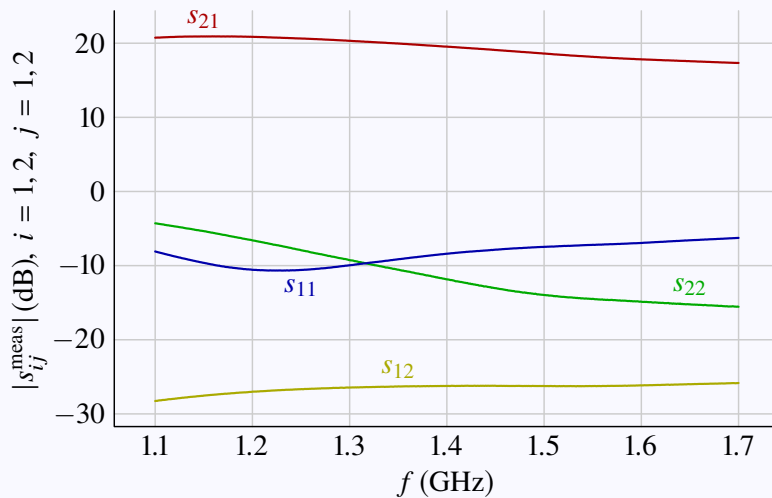
Vrátit se

Celá obrazovka

Zavřít

Konec

8. Měření s -parametry: L



Základní schéma LNA ...

Náhradní schéma LNA

PHEMT: dynamický & ...

PHEMT: šumový model

Paretova plocha: L&S-...

Paretova plocha: L-pásmo

Měření s -parametry: L&S

Měření s -parametry: L

Polární graf s_{21} : L&S a L

Graf Rolletova činitele ...

L&S: Šumové číslo a G_T

L: Šumové číslo a G_T

Měření IP_3 body: L&S...

Měření IP_3 body: L pásmo

Domovská stránka



Strana 10 z 23

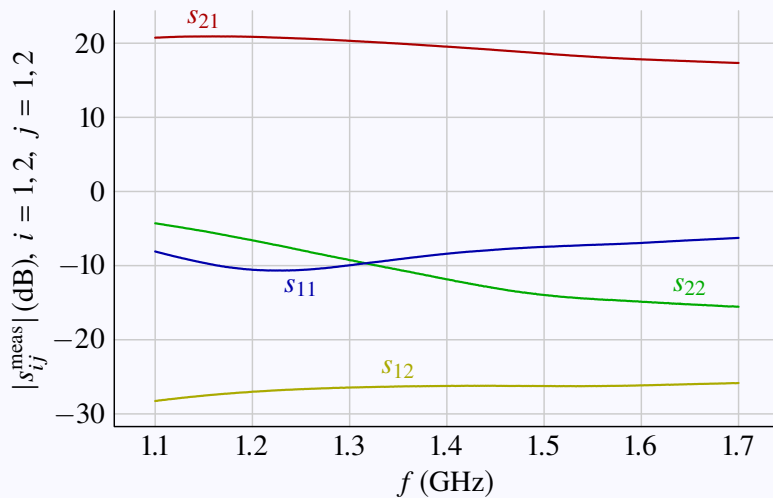
Vrátit se

Celá obrazovka

Zavřít

Konec

8. Měření 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

Základní schéma LNA ...
Náhradní schéma LNA
PHEMT: dynamický & ...
PHEMT: šumový model
Paretova plocha: L&S- ...
Paretova plocha: L-pásmo
Měření s -parametry: L&S
Měření s -parametry: L
Polární graf s_{21} : L&S a L
Graf Rolletova činitele ...
L&S: Šumové číslo a G_T
L: Šumové číslo a G_T
Měření IP_3 body: L&S ...
Měření IP_3 body: L pásmo

Domovská stránka



Strana 10 z 23

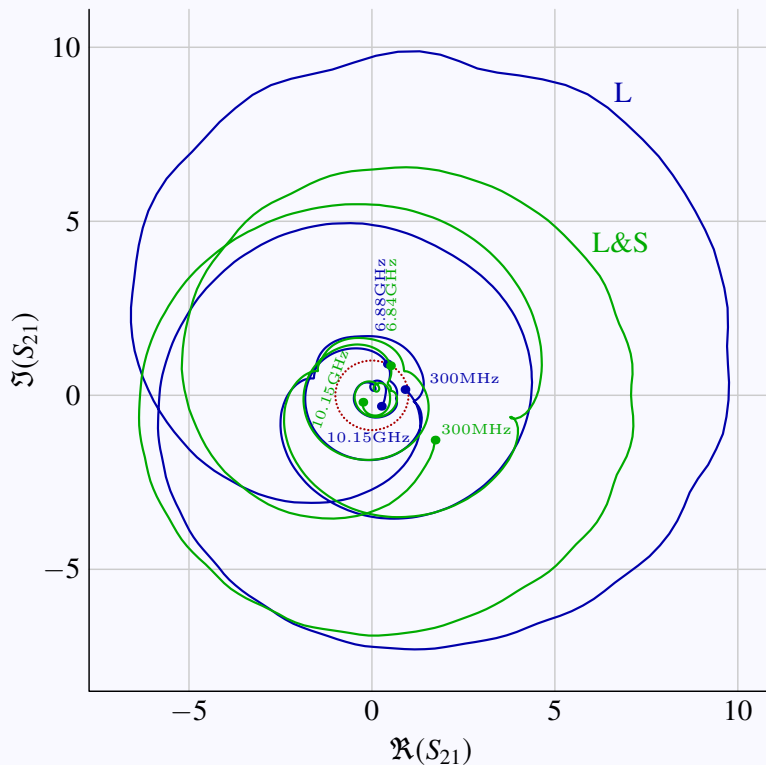
Vrátit se

Celá obrazovka

Zavřít

Konec

9. Polární graf s_{21} : L&S a L



Základní schéma LNA ...
Náhradní schéma LNA
PHEMT: dynamický & ...
PHEMT: šumový model
Paretova plocha: L&S- ...
Paretova plocha: L-pásmo
Měření s -parametry: L&S
Měření s -parametry: L
Polární graf s_{21} : L&S a L
Graf Rolletova činitele ...
L&S: Šumové číslo a G_T
L: Šumové číslo a G_T
Měření IP_3 body: L&S ...
Měření IP_3 body: L pásmo

[Domovská stránka](#)



Strana 11 z 23

[Vrátit se](#)

[Celá obrazovka](#)

[Zavřít](#)

[Konec](#)

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).

[Základní schéma LNA ...](#)

[Náhradní schéma LNA](#)

[PHEMT: dynamický & ...](#)

[PHEMT: šumový model](#)

[Paretova plocha: L&S- ...](#)

[Paretova plocha: L-pásmo](#)

[Měřené \$s\$ -parametry: L&S](#)

[Měřené \$s\$ -parametry: L](#)

[Polární graf \$s_{21}\$: L&S a L](#)

[Graf Rollettova činitele ...](#)

[L&S: Šumové číslo a \$G_T\$](#)

[L: Šumové číslo a \$G_T\$](#)

[Měřené \$IP_3\$ body: L&S ...](#)

[Měřené \$IP_3\$ body: L pásmo](#)

[Domovská stránka](#)



Strana 12 z 23

[Vrátit se](#)

[Celá obrazovka](#)

[Zavřít](#)

[Konec](#)

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 ≈ 7 GHz.

Základní schéma LNA ...
Náhradní schéma LNA
PHEMT: dynamický & ...
PHEMT: šumový model
Paretova plocha: L&S- ...
Paretova plocha: L-pásmo
Měřené s -parametry: L&S
Měřené s -parametry: L
Polární graf s_{21}: L&S a L
Graf Rolletova činitele ...
L&S: Šumové číslo a G_T
L: Šumové číslo a G_T
Měřené IP_3 body: L&S ...
Měřené IP_3 body: L pásmo

Domovská stránka



Strana 12 z 23

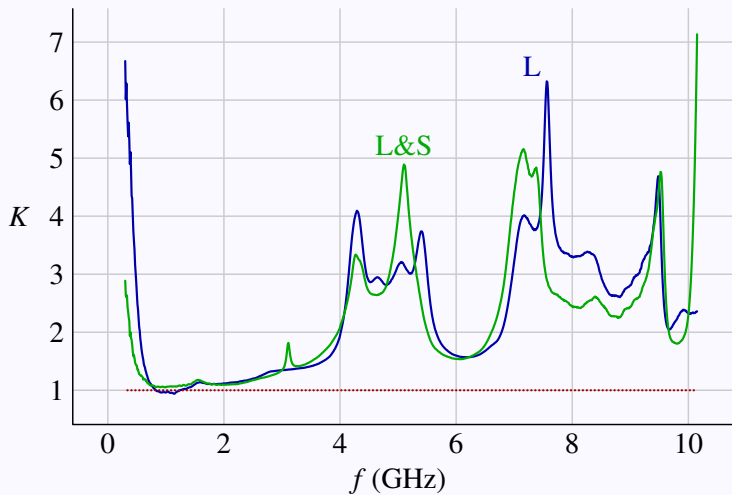
Vrátit se

Celá obrazovka

Zavřít

Konec

10. Graf Rollettova 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 Rollettova 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).

Základní schéma LNA ...
Náhradní schéma LNA
PHEMT: dynamický & ...
PHEMT: šumový model
Paretova plocha: L&S- ...
Paretova plocha: L-pásmo
Měření s -parametrů: L&S
Měření s -parametrů: L
Polární graf s_{21} : L&S a L
Graf Rollettova činitele ...
L&S: Šumové číslo a G_T
L: Šumové číslo a G_T
Měření IP_3 body: L&S ...
Měření IP_3 body: L pásmo

Domovská stránka



Strana 13 z 23

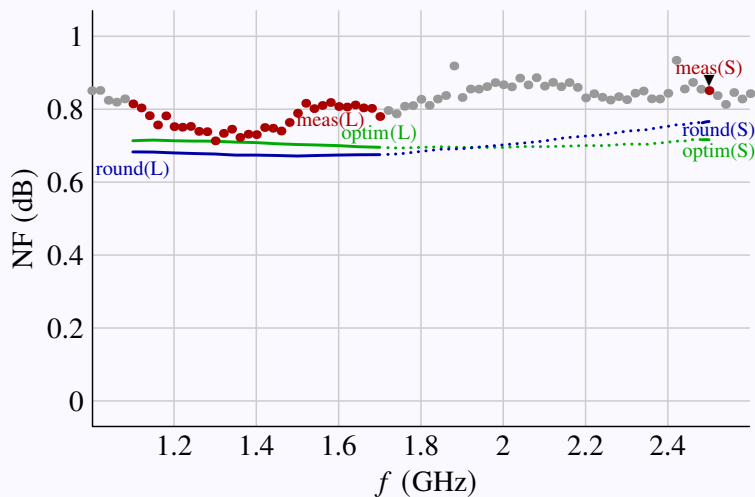
Vrátit se

Celá obrazovka

Zavřít

Konec

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



Základní schéma LNA ...

Náhradní schéma LNA

PHEMT: dynamický & ...

PHEMT: šumový model

Paretova plocha: L&S-...

Paretova plocha: L-pásmo

Měření s -parametry: L&S

Měření s -parametry: L

Polární graf s_{21} : L&S a L

Graf Rolletova činitele ...

L&S: Šumové číslo a G_T

L: Šumové číslo a G_T

Měření IP_3 body: L&S...

Měření IP_3 body: L pásmo

Domovská stránka

◀

▶

◀

▶

Strana 14 z 23

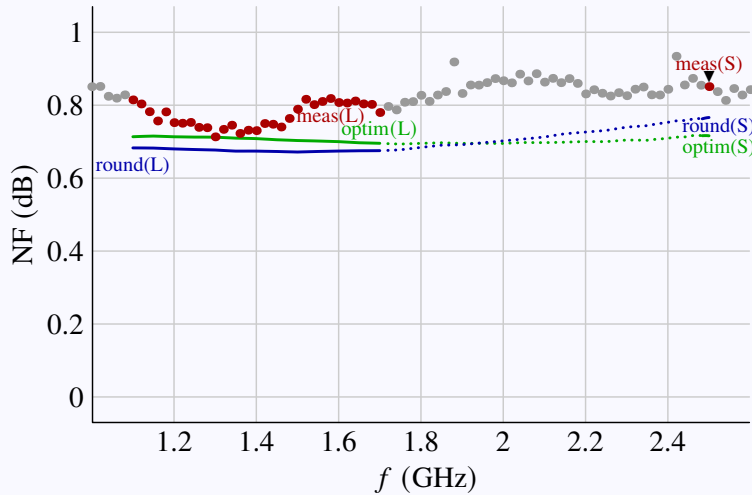
Vrátit se

Celá obrazovka

Zavřít

Konec

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 ± 0.2 dB. (Jasně je také vidět rušení GSM a Wi-Fi, body mimo.)

Základní schéma LNA ...
 Náhradní schéma LNA
 PHEMT: dynamický & ...
 PHEMT: šumový model
 Paretova plocha: L&S- ...
 Paretova plocha: L-pásmo
 Měření s-parametry: L&S
 Měření s-parametry: L
 Polární graf s_{21} : L&S a L
 Graf Rolletova činitele ...
L&S: Šumové číslo a G_T
 L: Šumové číslo a G_T
 Měření IP_3 body: L&S ...
 Měření IP_3 body: L pásmo

Domovská stránka



Strana 14 z 23

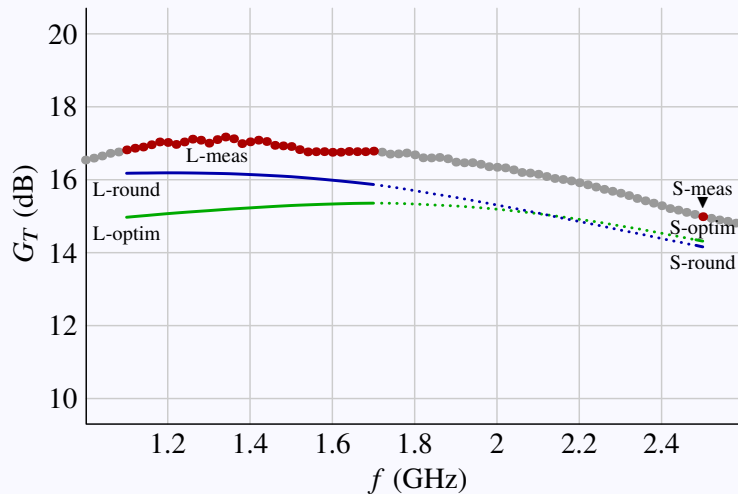
Vrátit se

Celá obrazovka

Zavřít

Konec

11.1. Výkonové zesílení (Transducer Power Gain, G_T)



Základní schéma LNA ...

Náhradní schéma LNA

PHEMT: dynamický & ...

PHEMT: šumový model

Paretova plocha: L&S-...

Paretova plocha: L-pásmo

Měření s -parametry: L&S

Měření s -parametry: L

Polární graf s_{21} : L&S a L

Graf Rolletova činitele...

L&S: Šumové číslo a G_T

L: Šumové číslo a G_T

Měření IP_3 body: L&S...

Měření IP_3 body: L pásmo

Domovská stránka

◀

▶

◀

▶

Strana 15 z 23

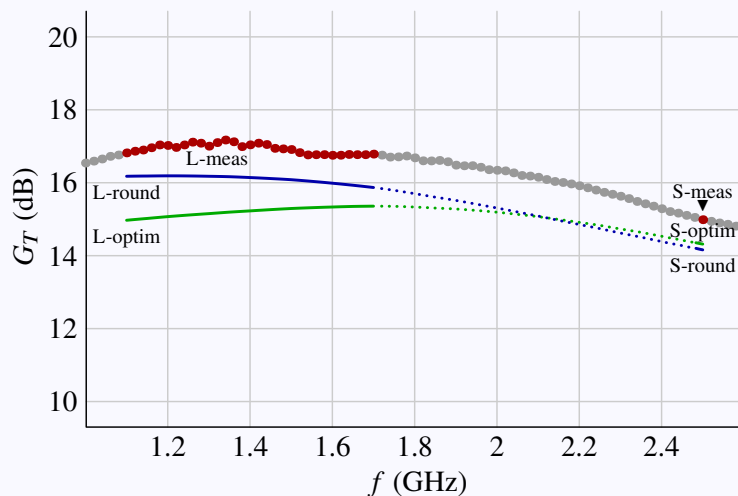
Vrátit se

Celá obrazovka

Zavřít

Konec

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.)

Základní schéma LNA ...

Náhradní schéma LNA

PHEMT: dynamický & ...

PHEMT: šumový model

Paretova plocha: L&S-...

Paretova plocha: L-pásmo

Měření s-parametry: L&S

Měření s-parametry: L

Polární graf s_{21} : L&S a L

Graf Rolletova činitele ...

L&S: Šumové číslo a G_T

L: Šumové číslo a G_T

Měření IP_3 body: L&S ...

Měření IP_3 body: L-pásmo

Domovská stránka

◀

▶

◀

▶

Strana 15 z 23

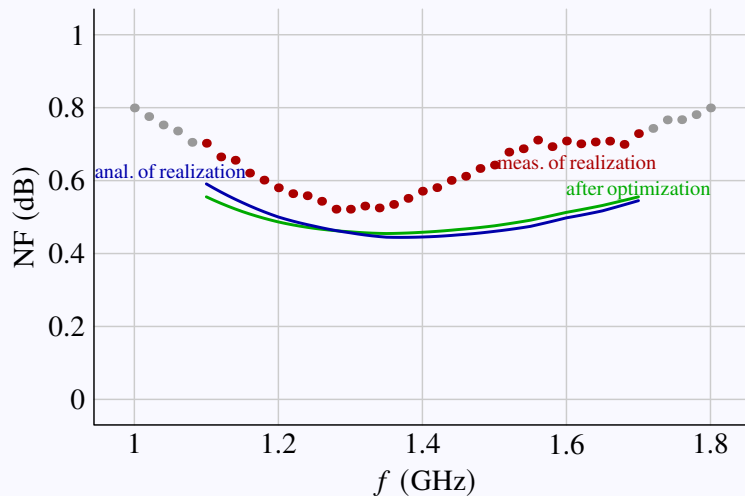
Vrátit se

Celá obrazovka

Zavřít

Konec

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



Základní schéma LNA ...

Náhradní schéma LNA

PHEMT: dynamický & ...

PHEMT: šumový model

Paretova plocha: L&S- ...

Paretova plocha: L-pásmo

Měření s -parametry: L&S

Měření s -parametry: L

Polární graf s_{21} : L&S a L

Graf Rolletova činitele ...

L&S: Šumové číslo a G_T

L: Šumové číslo a G_T

Měření IP_3 body: L&S ...

Měření IP_3 body: L pásmo

Domovská stránka



Strana 16 z 23

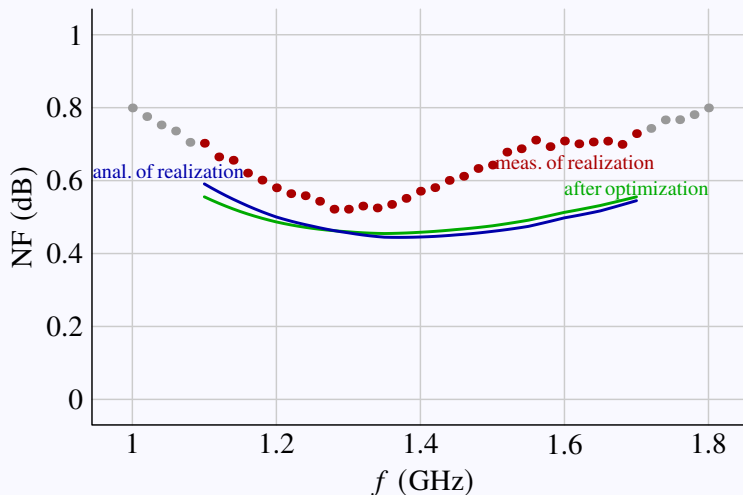
Vrátit se

Celá obrazovka

Zavřít

Konec

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/nekalirované přístroje, měření takových zesilovačů se budeme věnovat v speciální přednášce):

Základní schéma LNA ...
Náhradní schéma LNA
PHEMT: dynamický & ...
PHEMT: šumový model
Paretova plocha: L&S- ...
Paretova plocha: L-pásmo
Měření s-parametry: L&S
Měření s-parametry: L
Polární graf s_{21} : L&S a L
Graf Rolletova činitele ...
L&S: Šumové číslo a G_T
L: Šumové číslo a G_T
Měření IP_3 body: L&S ...
Měření IP_3 body: L pásmo

Domovská stránka



Strana 16 z 23

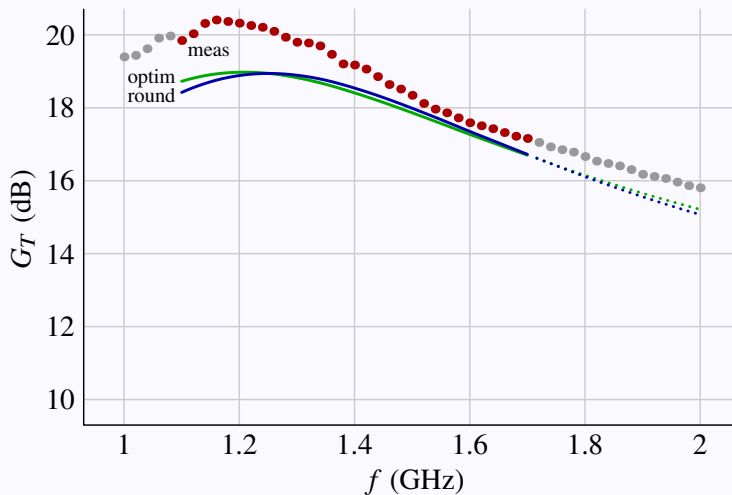
Vrátit se

Celá obrazovka

Zavřít

Konec

12.1. Výkonové zesílení (Transducer Power Gain, G_T)



Základní schéma LNA ...

Náhradní schéma LNA

PHEMT: dynamický & ...

PHEMT: šumový model

Paretova plocha: L&S-...

Paretova plocha: L-pásmo

Měření s -parametry: L&S

Měření s -parametry: L

Polární graf s_{21} : L&S a L

Graf Rolletova činitele ...

L&S: Šumové číslo a G_T

L: Šumové číslo a G_T

Měření IP_3 body: L&S...

Měření IP_3 body: L pásmo

Domovská stránka

◀◀

▶▶

◀

▶

Strana 17 z 23

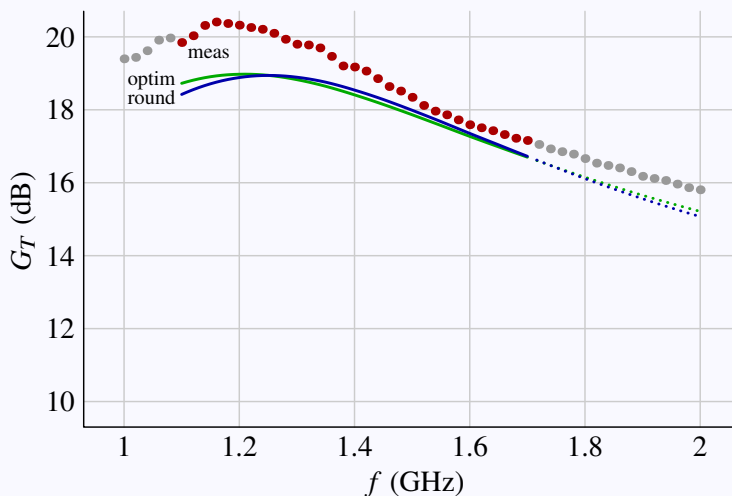
Vrátit se

Celá obrazovka

Zavřít

Konec

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

Základní schéma LNA ...
Náhradní schéma LNA
PHEMT: dynamický & ...
PHEMT: šumový model
Paretova plocha: L&S- ...
Paretova plocha: L-pásmo
Měření s-parametry: L&S
Měření s-parametry: L
Polární graf s_{21} : L&S a L
Graf Rolletova činitele ...
L&S: Šumové číslo a G_T
L: Šumové číslo a G_T
Měření IP_3 body: L&S ...
Měření IP_3 body: L pásmo

Domovská stránka



Strana 17 z 23

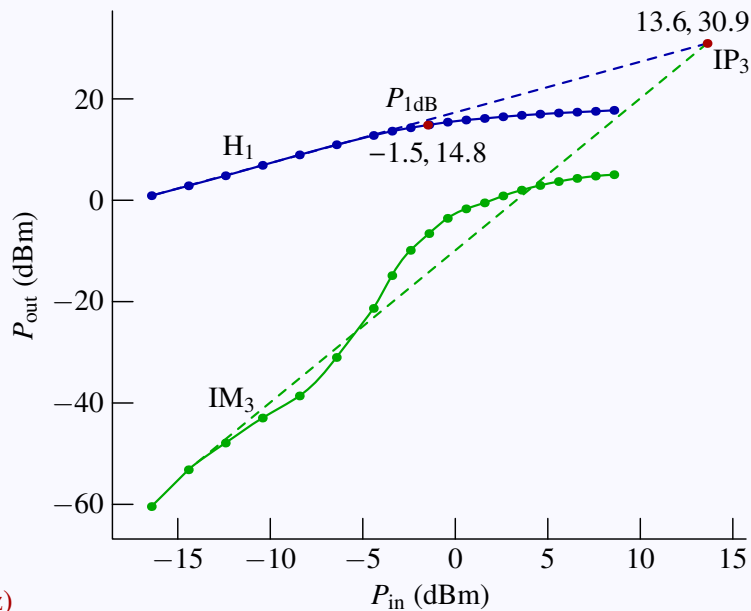
Vrátit se

Celá obrazovka

Zavřít

Konec

13. Měření IP_3 body: L&S pásmo



Základní schéma LNA ...

Náhradní schéma LNA

PHEMT: dynamický & ...

PHEMT: šumový model

Paretova plocha: L&S- ...

Paretova plocha: L-pásmo

Měření s -parametry: L&S

Měření s -parametry: L

Polární graf s_{21} : L&S a L

Graf Rolletova činitele ...

L&S: Šumové číslo a G_T

L: Šumové číslo a G_T

Měření IP_3 body: L&S ...

Měření IP_3 body: L pásmo

Domovská stránka

◀

▶

◀

▶

Strana 18 z 23

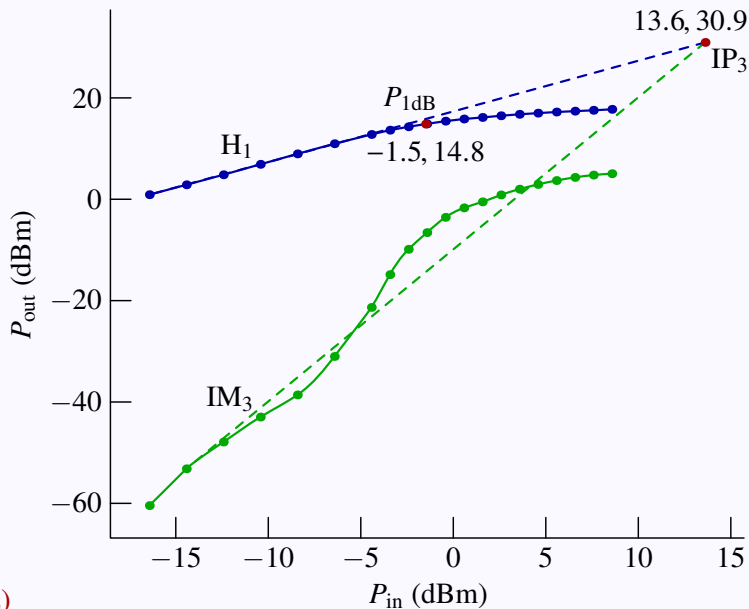
Vrátit se

Celá obrazovka

Zavřít

Konec

13. Měření 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})

Základní schéma LNA ...

Náhradní schéma LNA

PHEMT: dynamický & ...

PHEMT: šumový model

Paretova plocha: L&S- ...

Paretova plocha: L-pásmo

Měření s -parametry: L&S

Měření s -parametry: L

Polární graf s_{21} : L&S a L

Graf Rolletova činitele ...

L&S: Šumové číslo a G_T

L: Šumové číslo a G_T

Měření IP_3 body: L&S ...

Měření IP_3 body: L pásmo

Domovská stránka

◀

▶

◀

▶

Strana 18 z 23

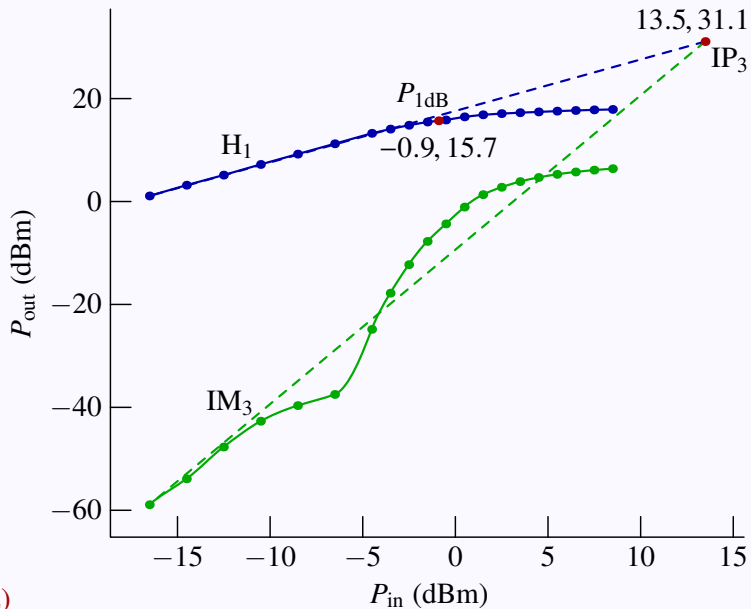
Vrátit se

Celá obrazovka

Zavřít

Konec

(1576+1577 MHz)



Základní schéma LNA ...
Náhradní schéma LNA
PHEMT: dynamický & ...
PHEMT: šumový model
Paretova plocha: L&S-...
Paretova plocha: L-pásmo
Měření s -parametry: L&S
Měření s -parametry: L
Polární graf s_{21} : L&S a L
Graf Rolletova činitele...
L&S: Šumové číslo a G_T
L: Šumové číslo a G_T
Měření IP_3 body: L&S...
Měření IP_3 body: L pásmo

Domovská stránka



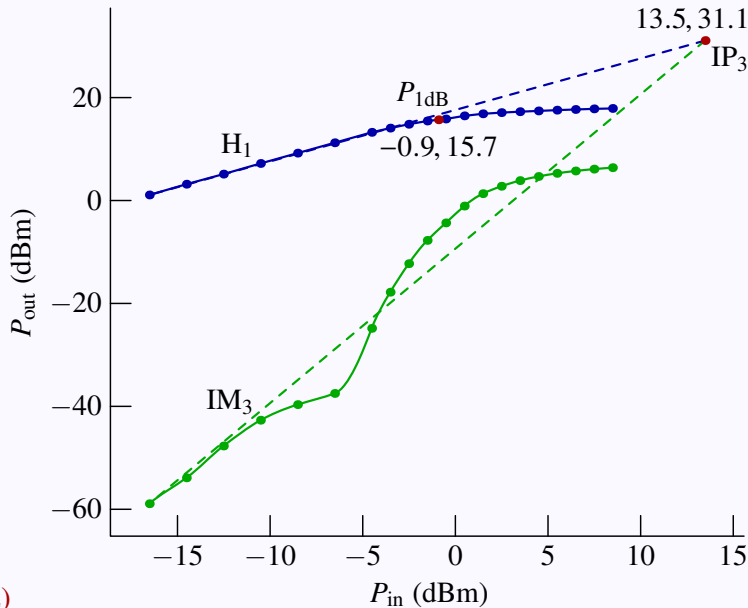
Strana 19 z 23

Vrátit se

Celá obrazovka

Zavřít

Konec



(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

Základní schéma LNA ...
Náhradní schéma LNA
PHEMT: dynamický & ...
PHEMT: šumový model
Paretova plocha: L&S- ...
Paretova plocha: L-pásmo
Měření s -parametry: L&S
Měření s -parametry: L
Polární graf s_{21} : L&S a L
Graf Rolletova činitele ...
L&S: Šumové číslo a G_T
L: Šumové číslo a G_T
Měření IP_3 body: L&S ...
Měření IP_3 body: L pásmo

Domovská stránka



Strana 19 z 23

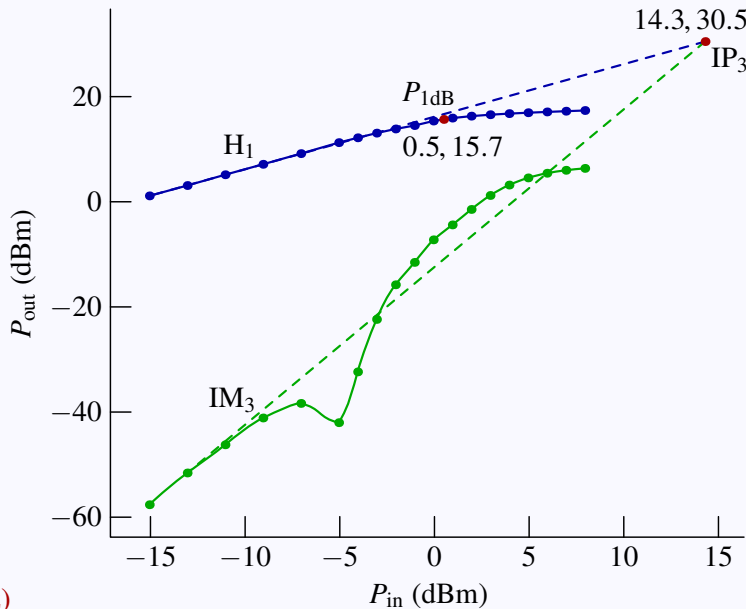
Vrátit se

Celá obrazovka

Zavřít

Konec

(2496+2497 MHz)



Základní schéma LNA ...
Náhradní schéma LNA
PHEMT: dynamický & ...
PHEMT: šumový model
Paretova plocha: L&S- ...
Paretova plocha: L-pásmo
Měření s -parametry: L&S
Měření s -parametry: L
Polární graf s_{21} : L&S a L
Graf Rolletova činitele ...
L&S: Šumové číslo a G_T
L: Šumové číslo a G_T
Měření IP_3 body: L&S ...
Měření IP_3 body: L pásmo

Domovská stránka



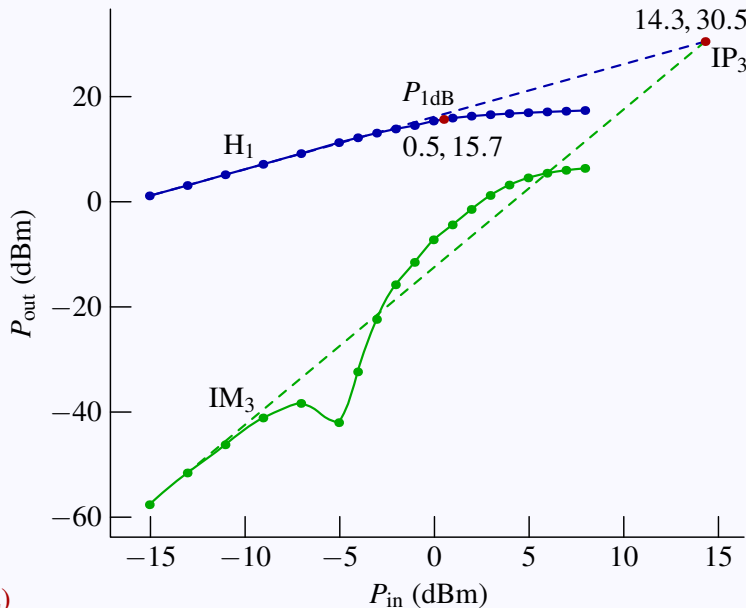
Strana 20 z 23

Vrátit se

Celá obrazovka

Zavřít

Konec



(2496+2497 MHz)

- Při nejvyšších kmitočtech je průhyb křivky IM_3 největší

Základní schéma LNA ...
Náhradní schéma LNA
PHEMT: dynamický & ...
PHEMT: šumový model
Paretova plocha: L&S- ...
Paretova plocha: L-pásmo
Měření s -parametry: L&S
Měření s -parametry: L
Polární graf s_{21} : L&S a L
Graf Rolletova činitele ...
L&S: Šumové číslo a G_T
L: Šumové číslo a G_T
Měření IP_3 body: L&S ...
Měření IP_3 body: L pásmo

Domovská stránka



Strana 20 z 23

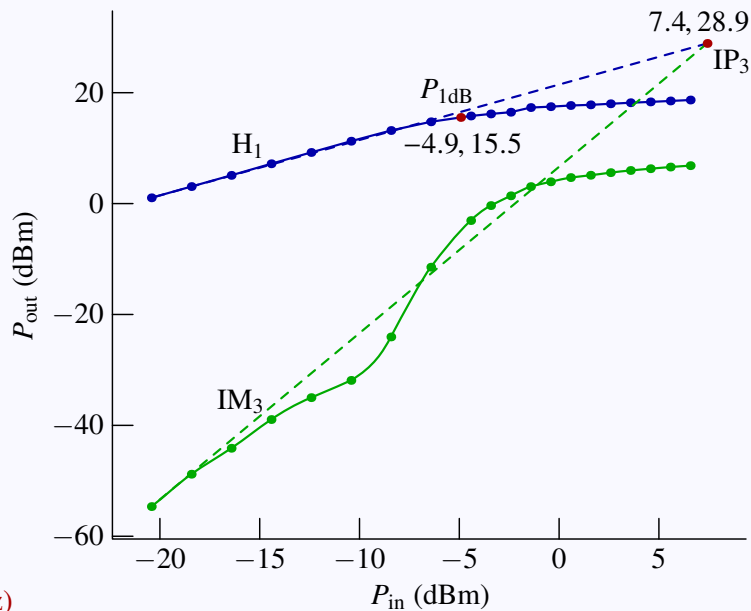
Vrátit se

Celá obrazovka

Zavřít

Konec

14. Měření IP_3 body: L pásmo



(1201+1202 MHz)

Základní schéma LNA ...

Náhradní schéma LNA

PHEMT: dynamický & ...

PHEMT: šumový model

Paretova plocha: L&S- ...

Paretova plocha: L-pásmo

Měření s -parametry: L&S

Měření s -parametry: L

Polární graf s_{21} : L&S a L

Graf Rolletova činitele ...

L&S: Šumové číslo a G_T

L: Šumové číslo a G_T

Měření IP_3 body: L&S ...

Měření IP_3 body: L pásmo

Domovská stránka

◀

▶

◀

▶

Strana 21 z 23

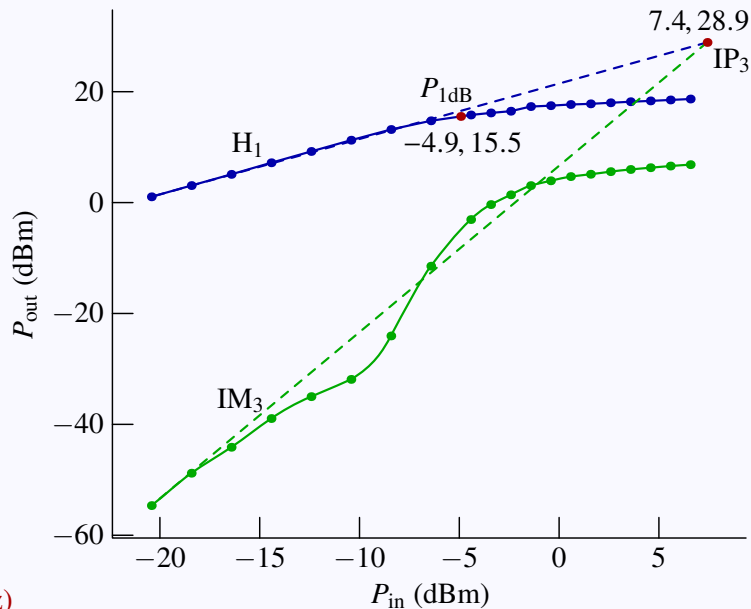
Vrátit se

Celá obrazovka

Zavřít

Konec

14. Měření IP_3 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.)

Základní schéma LNA ...
Náhradní schéma LNA
PHEMT: dynamický & ...
PHEMT: šumový model
Paretova plocha: L&S- ...
Paretova plocha: L-pásmo
Měření s -parametry: L&S
Měření s -parametry: L
Polární graf s_{21} : L&S a L
Graf Rolletova činitele ...
L&S: Šumové číslo a G_T
L: Šumové číslo a G_T
Měření IP_3 body: L&S ...
Měření IP_3 body: L pásmo

Domovská stránka



Strana 21 z 23

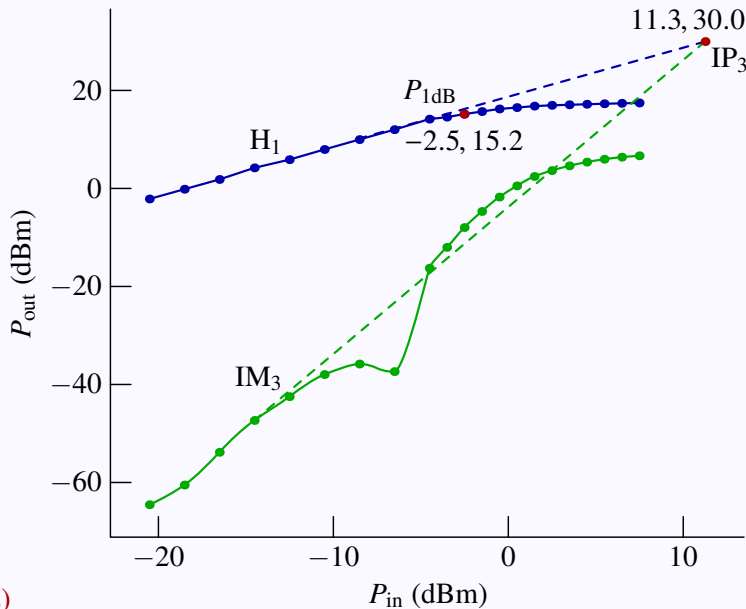
Vrátit se

Celá obrazovka

Zavřít

Konec

(1576+1577 MHz)



Základní schéma LNA ...
Náhradní schéma LNA
PHEMT: dynamický & ...
PHEMT: šumový model
Paretova plocha: L&S- ...
Paretova plocha: L-pásmo
Měření s -parametry: L&S
Měření s -parametry: L
Polární graf s_{21} : L&S a L
Graf Rolletova činitele ...
L&S: Šumové číslo a G_T
L: Šumové číslo a G_T
Měření IP_3 body: L&S ...
Měření IP_3 body: L pásmo

Domovská stránka



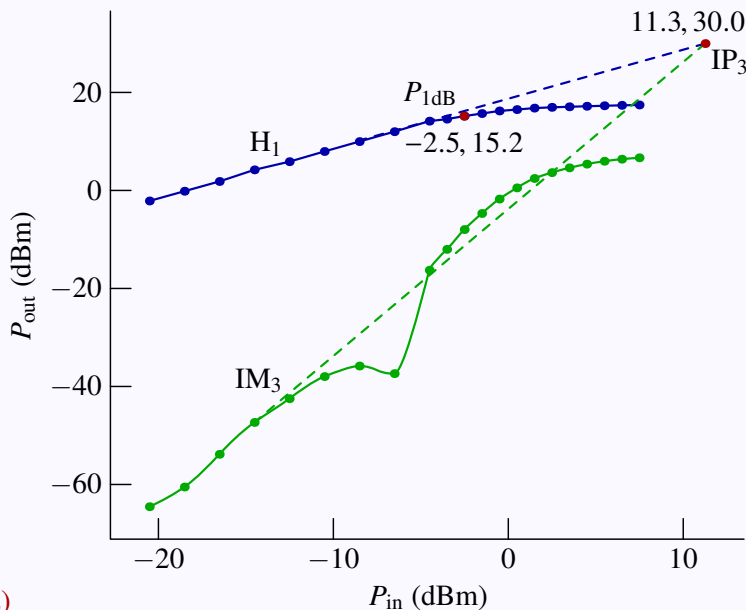
Strana 22 z 23

Vrátit se

Celá obrazovka

Zavřít

Konec



(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_{1dB} posunut trochu doleva

Základní schéma LNA ...
Náhradní schéma LNA
PHEMT: dynamický & ...
PHEMT: šumový model
Paretova plocha: L&S- ...
Paretova plocha: L-pásmo
Měření s -parametry: L&S
Měření s -parametry: L
Polární graf s_{21} : L&S a L
Graf Rolletova činitele ...
L&S: Šumové číslo a G_T
L: Šumové číslo a G_T
Měření IP_3 body: L&S ...
Měření IP_3 body: L pásmo

Domovská stránka



Strana 22 z 23

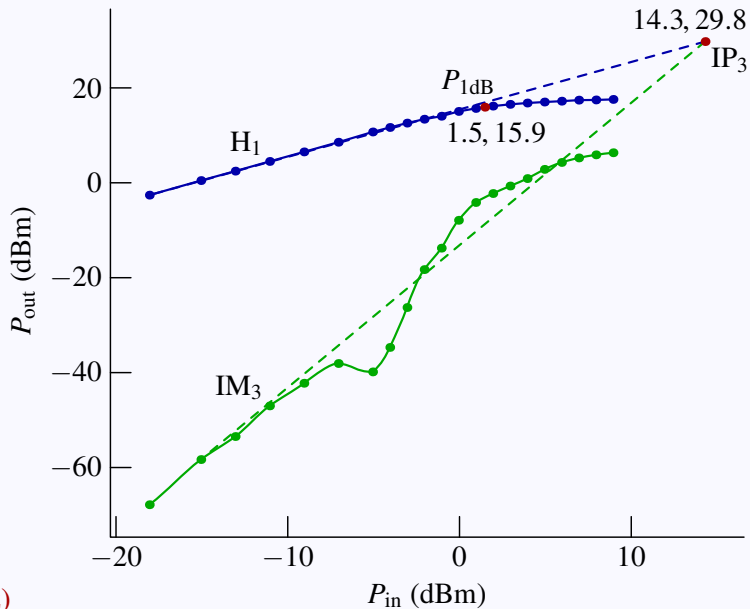
Vrátit se

Celá obrazovka

Zavřít

Konec

(2496+2497 MHz)



Základní schéma LNA ...
Náhradní schéma LNA
PHEMT: dynamický & ...
PHEMT: šumový model
Paretova plocha: L&S- ...
Paretova plocha: L-pásmo
Měření s -parametry: L&S
Měření s -parametry: L
Polární graf s_{21} : L&S a L
Graf Rolletova činitele ...
L&S: Šumové číslo a G_T
L: Šumové číslo a G_T
Měření IP_3 body: L&S ...
Měření IP_3 body: L pásmo

Domovská stránka



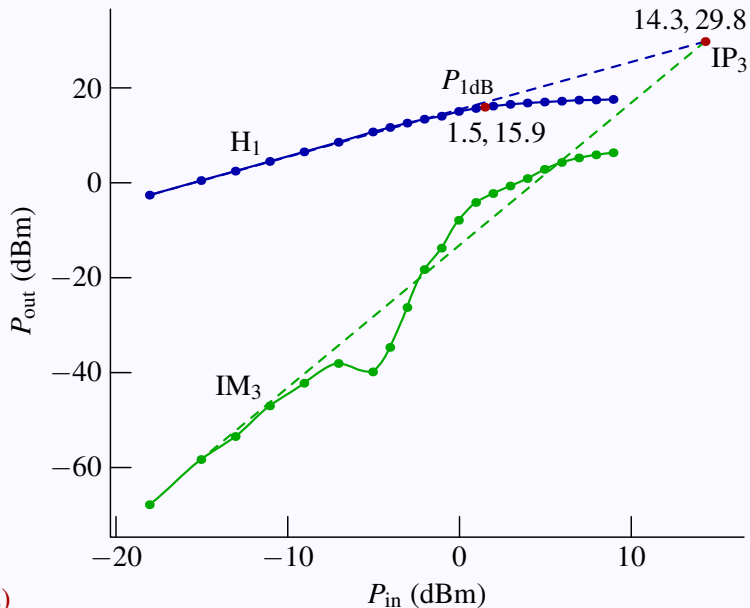
Strana 23 z 23

Vrátit se

Celá obrazovka

Zavřít

Konec



(2496+2497 MHz)

- Deformace křivky IM_3 je zde větší i pro $P_{in} > 0$ dBm (výraznější hrbolek nad čárkovanou čarou)

Základní schéma LNA ...
 Náhradní schéma LNA
 PHEMT: dynamický & ...
 PHEMT: šumový model
 Paretova plocha: L&S- ...
 Paretova plocha: L-pásmo
 Měření s -parametry: L&S
 Měření s -parametry: L
 Polární graf s_{21} : L&S a L
 Graf Rolletova činitele ...
 L&S: Šumové číslo a G_T
 L: Šumové číslo a G_T
 Měření IP_3 body: L&S ...
Měření IP_3 body: L pásmo

Domovská stránka



Strana 23 z 23

Vrátit se

Celá obrazovka

Zavřít

Konec