



# ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ПРИ ВЫБОРЕ РЕШЕНИЯ ПО ИЗМЕРЕНИЮ КОЭФФИЦИЕНТА ШУМА В СВЧ ДИАПАЗОНЕ

Инженер 1 кат., А.Л. Ворожцов

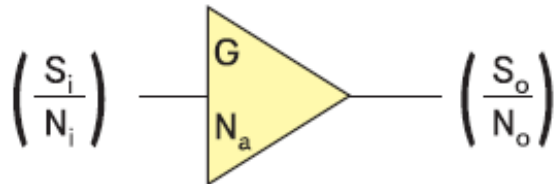


Пороговая чувствительность  $S$  – это такой уровень мощности сигнала на входе устройства, при котором уровень мощности сигнала на его выходе становится равным уровню мощности шумов этого устройства

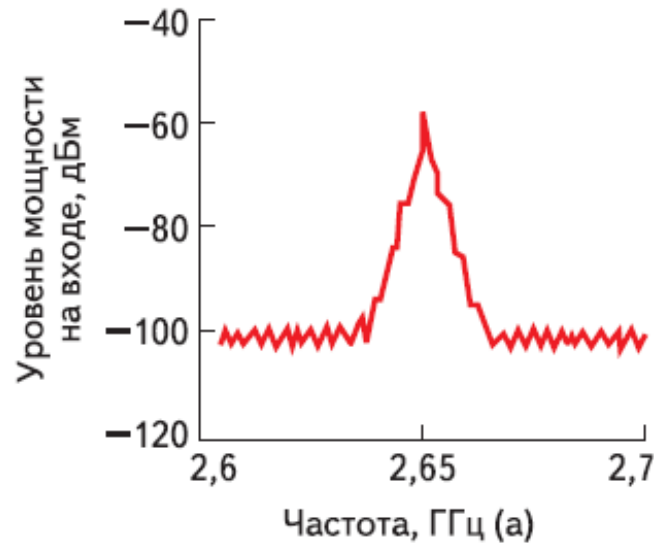
$$S = k \times T \times B \times NF$$

где  $k$  – постоянная Больцмана,  
 $T$  – температура,  
 $B$  – полоса пропускания  
 $NF$  – коэффициент шума.

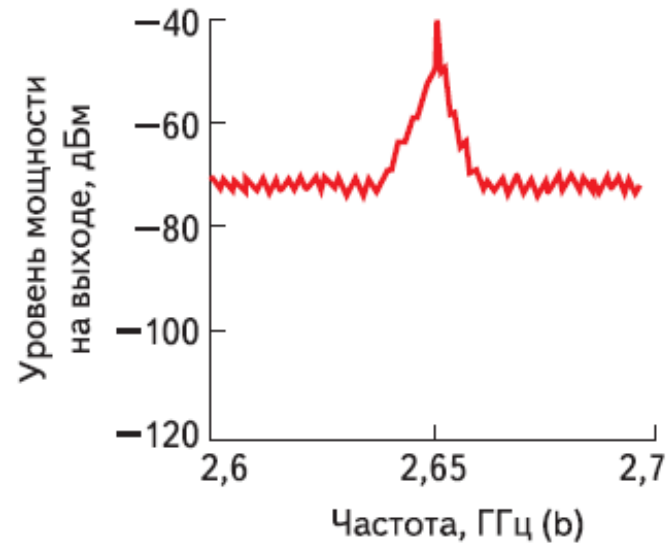
# Понятие «Шум»



- $S_i$  — полезный сигнал на входе усилителя;
- $N_i$  — шум на входе усилителя;
- $S_o$  — полезный сигнал на выходе усилителя;
- $N_o$  — шум на выходе усилителя;
- $G$  — коэффициент усиления усилителя;
- $N_a$  — дополнительный шум, генерируемый усилителем;



a



б



Мощность  $P$  (Вт) тепловых шумов, согласно формуле Найквиста

$$P = k \times T \times B$$

где  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Вт/Гц град - постоянная Больцмана,  
 $T$  – температура, К,  
 $B$  – полоса пропускания, Гц.



**Коэффициент шума**  $F$  это число, показывающее во сколько раз уменьшится отношение сигнал шум на выходе двухпортовой цепи по сравнению с тем же отношением на её входе

$$F = \frac{SNR_{in}}{SNR_{out}} = \frac{(S/N)_{in}}{(S/N)_{out}} = \frac{(P_s/P_n)_{in}}{(P_s/P_n)_{out}} = \frac{N_{dut} + G \times N_{in}}{G \times N_{in}}$$

Где SNR (signal-to-noise ratio) –

отношение сигнал шум на входе (*in*) и выходе (*out*),

$P_s$  и  $P_n$  – мощность сигнала и шума на входе (*in*) и выходе (*out*),

$N_{in}$  и  $N_{dut}$  – шум на входе и шум исследуемого устройства,

$G$  – коэффициент усиления исследуемого устройства



$$F = \frac{N_{dut} + G \times k \times T_0 \times B}{G \times k \times T_0 \times B}$$

Величину  $F$  иногда называют «коэффициент шума» (noise figure), но более часто её называют «шум-фактор» (noise factor), или иногда «коэффициент шума в линейных единицах» (noise figure in linear terms).

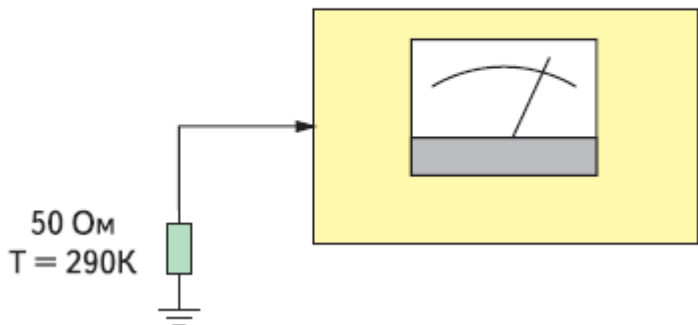
Современное употребление термина «коэффициент шума» (noise figure) обычно резервируется для величины  $NF$ , выраженной в децибелах

$$NF = 10 \times \log_{10}(F)$$

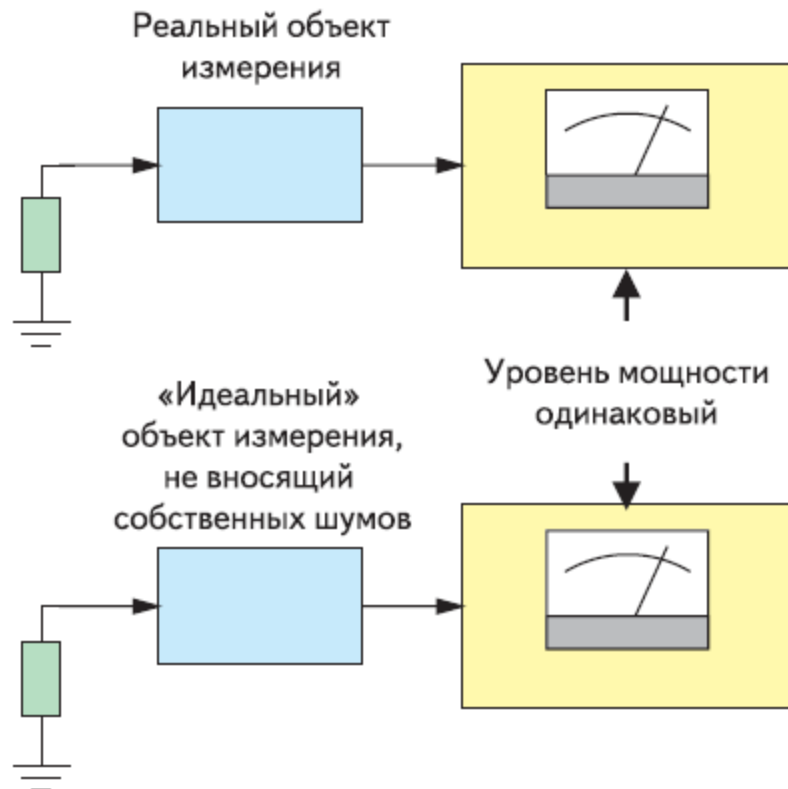
# Шумовая температура



Приемник для  
измерения уровня шума



50 Ом  
 $T = 290\text{K}$



50 Ом  
 $T = (290\text{K} + T_e)$   
 $T_e$  — эффективная температура  
шума объекта измерения



$$T_e = \frac{N_{dut}}{G \times k \times B}$$

$T_e$  – «эффективная температура входного шума» или «шумовая температура», которая эквивалентна температуре импеданса источника в идеальном (безшумовом) устройстве, который создавал бы такой же добавочный шум,  $N_{dut}$ .

$$T_e = T_0 \times (F - 1) \quad \text{где } T_0 - 290 \text{ К}$$



ENR (excess noise ratio)



$$ENR = 10 \times \lg \left( \frac{T_h - T_c}{T_0} \right)$$

где

$T_h$  – температура включенного («горячего») источника шума

$T_c$  – температура выключенного («холодного») источника шума

$T_0$  – 290 К



1. Метод Y-фактора [2, 3, 11, 14] (ранее в нашей стране, был известен как «метод двух отсчётов» [17]). Метод Y-фактора использует источник шума, установленного на вход измерительного устройства и задающий два уровня входного шума. Используется как с анализаторами спектра, так и с измерителями коэффициента шума.
2. Метод «холодного источника» или методом «прямого измерения» [12, 13]. В нём источник шума используется только для калибровки. Однако, этот метод требует независимого измерения коэффициента усиления исследуемого устройства. Метод используется с векторными анализаторами цепей, поскольку в этом случае может использоваться коррекция ошибки вектора для получения очень точных измерений коэффициента усиления.
3. Третий метод основан на вычислении мощности непрерывного сигнала и вычислении отношения мощности сигнала к мощности сумме сигнала и шума с помощью вычисления среднего и среднеквадратичного значения сигнала [15]. Для этого метода не требуется калиброванный источник шума, как для двух предыдущих решений, но необходима точная калибровка датчиков мощности векторного анализатора.

## Выбор источника шума



### Keysight noise sources

	Noise source	ENR	Frequency range
<b>Smart noise sources</b> <b>SNS Series</b>	N4000A	4.6 to 6.5 dB	10 MHz to 18 GHz
	N4001A	14 to 16 dB	10 MHz to 18 GHz
	N4002A	12 to 17 dB	10 MHz to 26 GHz
<b>Traditional noise sources</b> <b>346 Series</b>	346A	5 to 7 dB	10 MHz to 18 GHz
	346B	14 to 16 dB	10 MHz to 18 GHz
	346C	12 to 17 dB	10 MHz to 26 GHz
	346CK01	21 dB	1 to 50 GHz
	346CK40 <sup>1</sup>	8 db	1 to 40 GHz
<b>High frequency noise sources</b> <b>347 Series</b>	Q347B	6 to 13 dB	33 to 50 GHz
	R347B	10 to 13 dB	26.5 to 40 GHz

1. 346CK40 ships with the N8976B



1. Коэффициент шума анализатора спектра  $NF_{sa}$  должен быть на 3 дБ меньше ENR источника

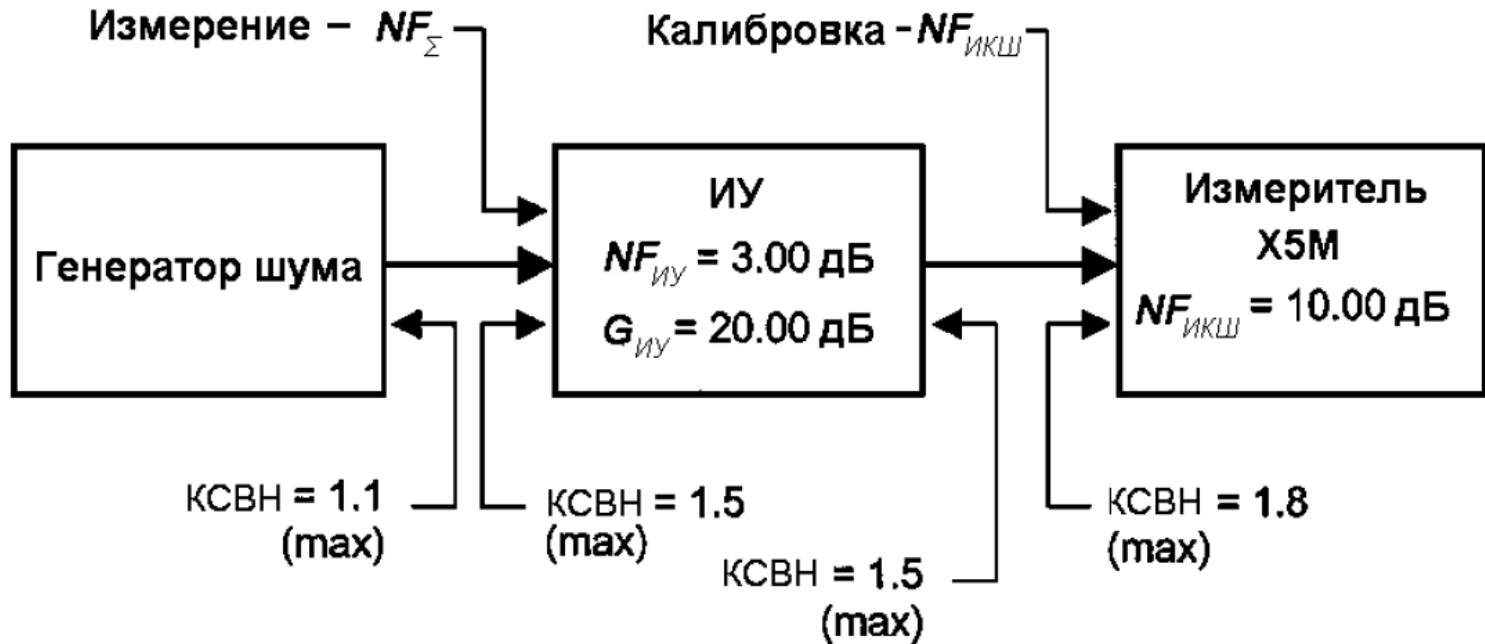
$$ENR > NF_{sa} + 3 \text{ dB}$$

2. Источник шума должен обладать ENR на 5 дБ больше, чем коэффициент шума исследуемого устройства  $NF_{dut}$

$$ENR > NF_{dut} + 5 \text{ dB}$$

3. Сумма коэффициента шума исследуемого устройства  $NF_{dut}$  и его коэффициента усиления  $G_{dut}$  должна быть, как минимум, на 1 дБ больше коэффициента шума анализатора спектра  $NF_{sa}$

$$NF_{dut} + G_{dut} > NF_{sa} + 3 \text{ dB}$$





$$\delta NF_{ИУ} = \sqrt{\left(\frac{F_{\Sigma}}{F_{ИУ}} \delta NF_{\Sigma}\right)^2 + \left(\frac{F_{ИКШ}}{F_{ИУ} G_{ИУ}} \delta NF_{ИКШ}\right)^2 + \left(\frac{F_{ИКШ} - 1}{F_{ИУ} G_{ИУ}} \delta G_{ИУ, \text{дБ}}\right)^2 + S \left(\left(\frac{F_{\Sigma}}{F_{ИУ}} - \frac{F_{ИКШ}}{F_{ИУ} G_{ИУ}}\right) \delta ENR\right)^2}$$

где  $F_{ИУ}$  – КШ ИУ в отн. ед.;

$NF_{ИУ}$  – КШ ИУ в дБ;

$F_{ИКШ}$  – КШ ИКШ в отн. ед.;

$NF_{ИКШ}$  – КШ ИКШ в дБ;

$F_{\Sigma}$  – КШ измерительной схемы в отн. ед.;

$NF_{\Sigma}$  – КШ измерительной системы в дБ;

$G_{ИУ}$  – коэффициент усиления ИУ в отн. ед.;

$G_{ИУ, \text{дБ}}$  – коэффициент усиления ИУ в дБ;

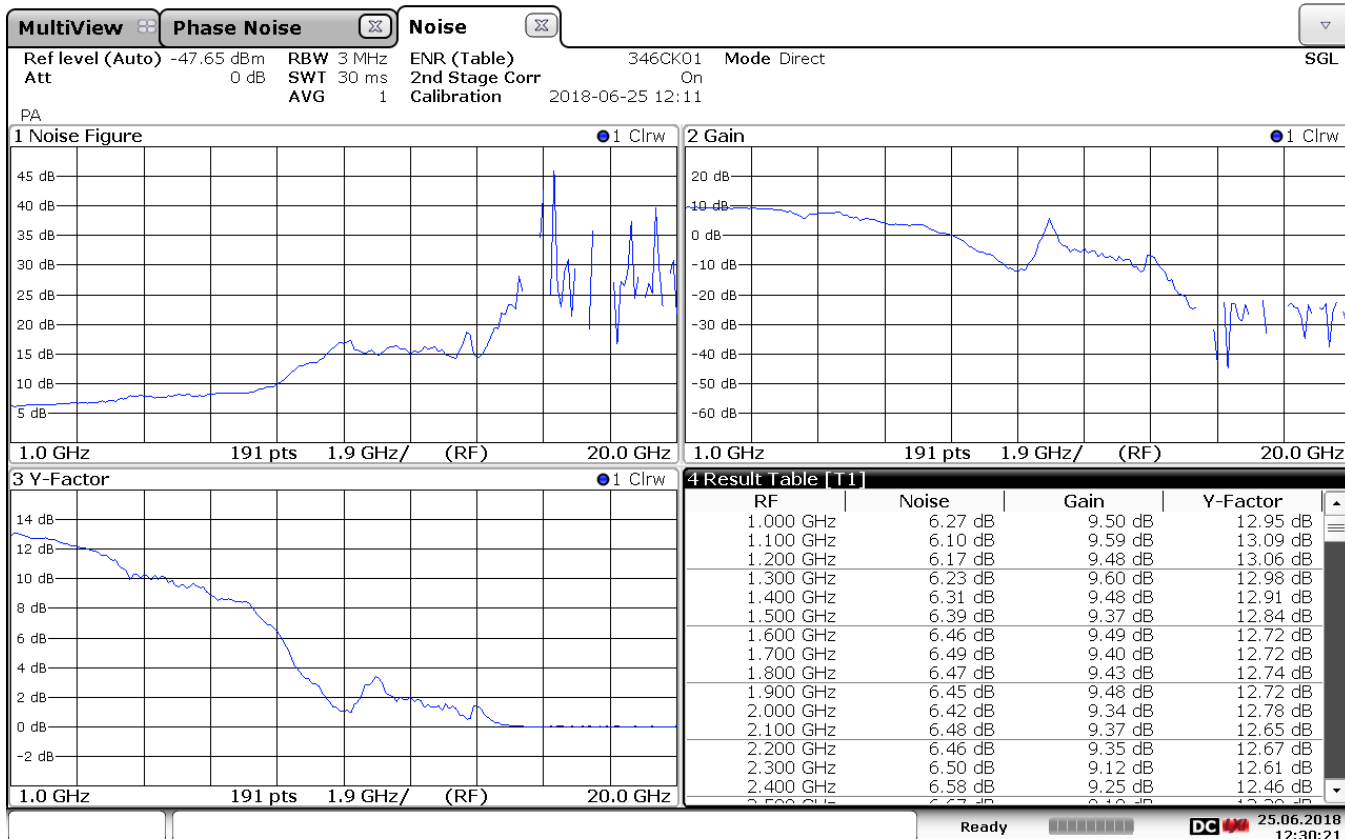
$ENR$  – ИОШТ ГШ в дБ;

$\delta$  – символ, связанный с погрешностью в дБ;

$S = 1$  – для измерений без преобразования частот;

$S = 0$  – для измерений, включающих преобразование частот.

# Измерений NF на FSWP-26



12:30:22 25.06.2018

# Калькулятор погрешности



**Rohde & Schwarz Noise Figure and Uncertainty Calculator 3.22**

File Option Web Help

### Noise Source

ENR:  dB  
Eff. ENR: 15,00dB  
Pon: kTB+15,14dB

Output Match: VSWR    
RL (dB)

Ambient Temp:  C  
Toff: 290,0K (62,3F)  
Ton: 9460,6K

ENR Uncertainty:  dB

Noise Source:

### DUT

Input Match: VSWR    
RL (dB)

Output Match: VSWR    
RL (dB)

Freq:  GHz  
Freq Conv.

NF:  dB

Gain:  dB

### Analyzer

Analyzer Input Match: VSWR    
RL (dB)

Ext PA

Analyzer: (Guaranteed noise level used)  
  Int PA

Analyzer Noise:  dB  
NF (dB)   
DANL (dBm/Hz)   
Net Analyzer NF: 11,22dB

SA Gain Unc:  dB  
SA NF Unc:  dB

### NF Measurement Uncertainty

**± 0,15 dB**

### Measurement Guidelines

Goal

- >3dE  ENR - NFsa = 3,78 dB
- >5dE  ENR - NFdut = 8,73 dB
- >1dE  (NF+G)dut - NFsa = 4,55 dB

### Calibration

NS On:  dBm  
NS Off:  dBm

NS  SA

NFsa: 11,22 dB  
Ycal: 5,30 dB

### Measurement

NS On:  dBm  
NS Off:  dBm

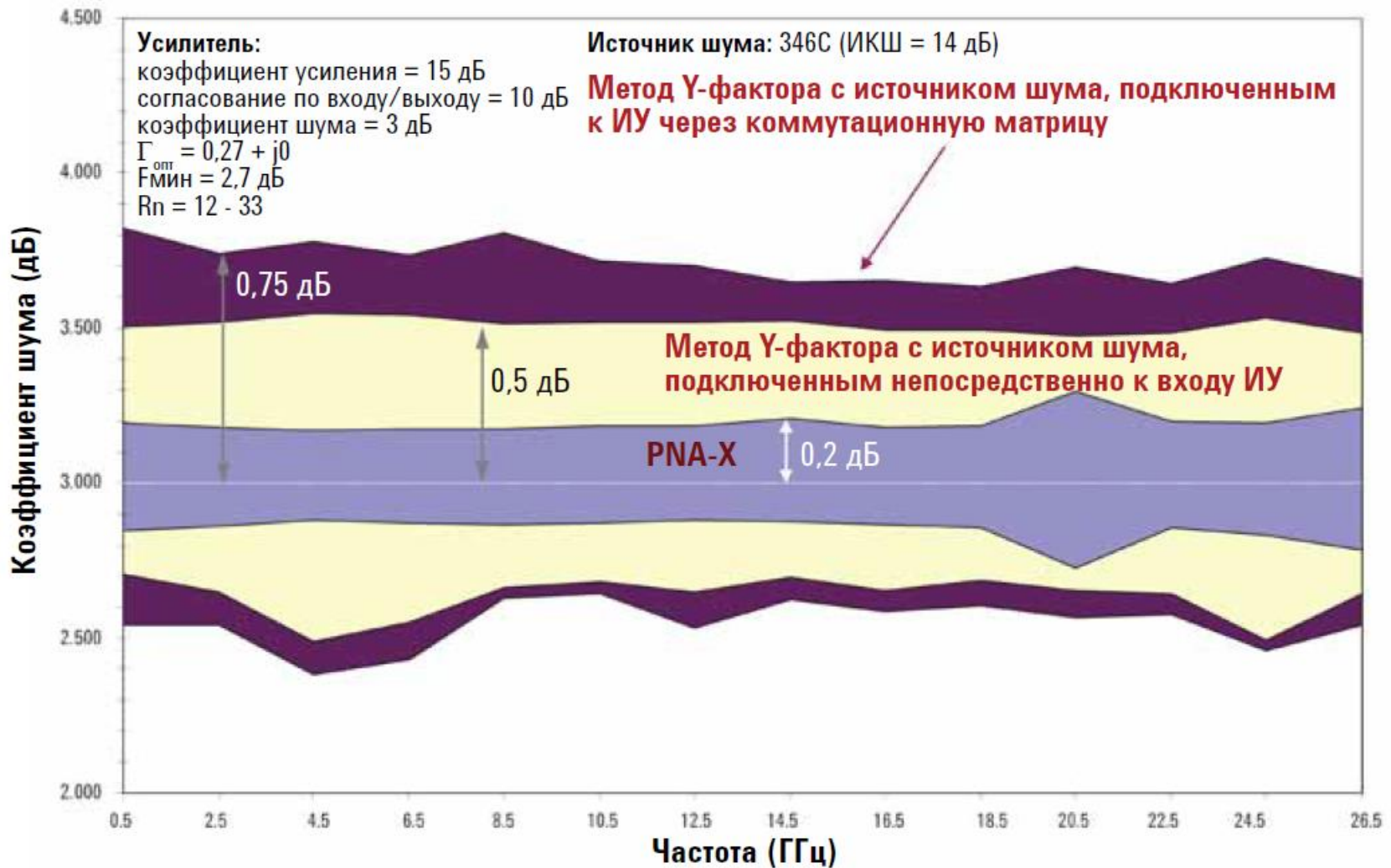
NS  SA

NF(dut+sa): 7,49 dB  
Ymeas: 8,22 dB

Enable manual entry of measurement values  
(NFdut, Gdut, and NFsa will be calculated)



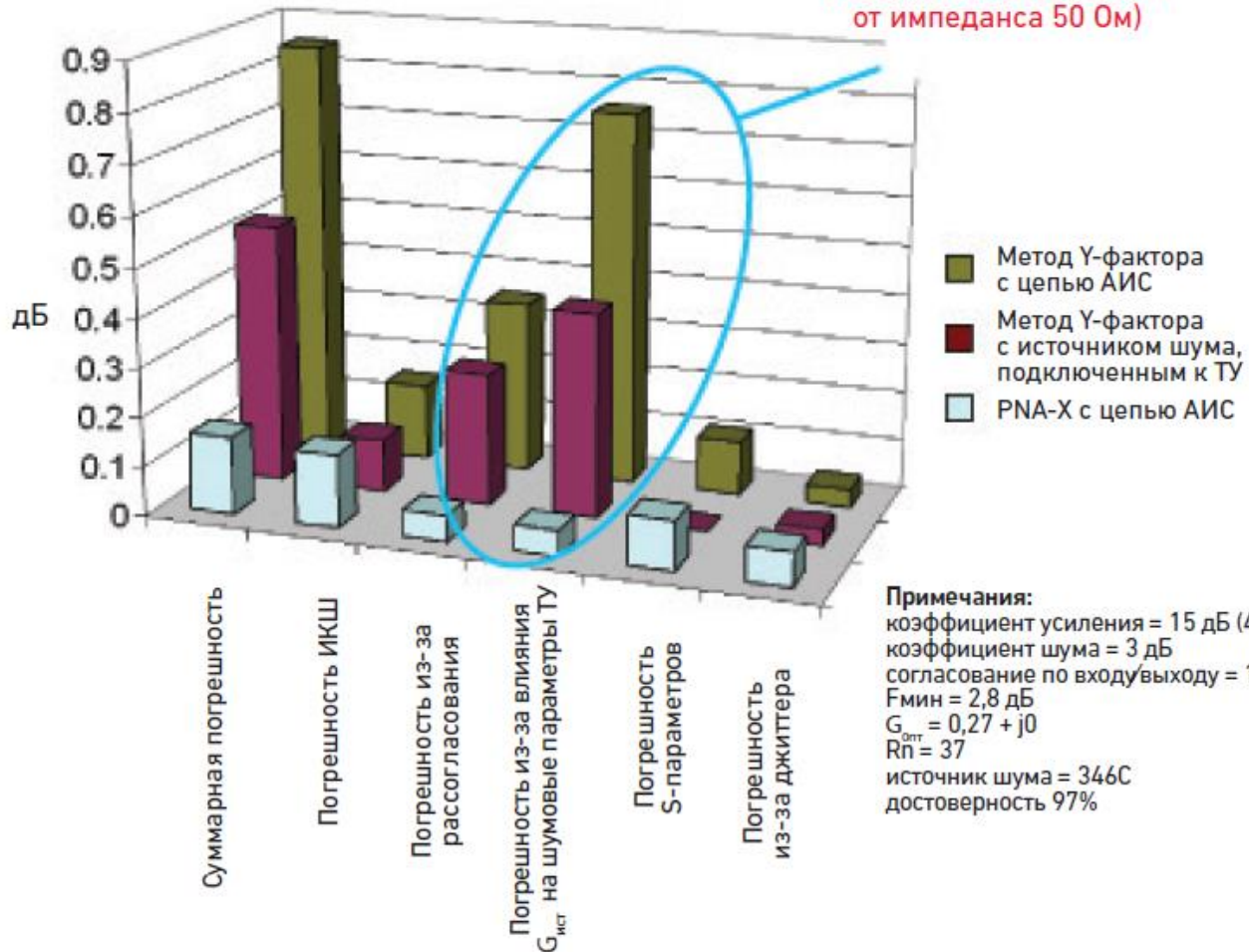
# NF МИС МШУ в корпусном исполнении



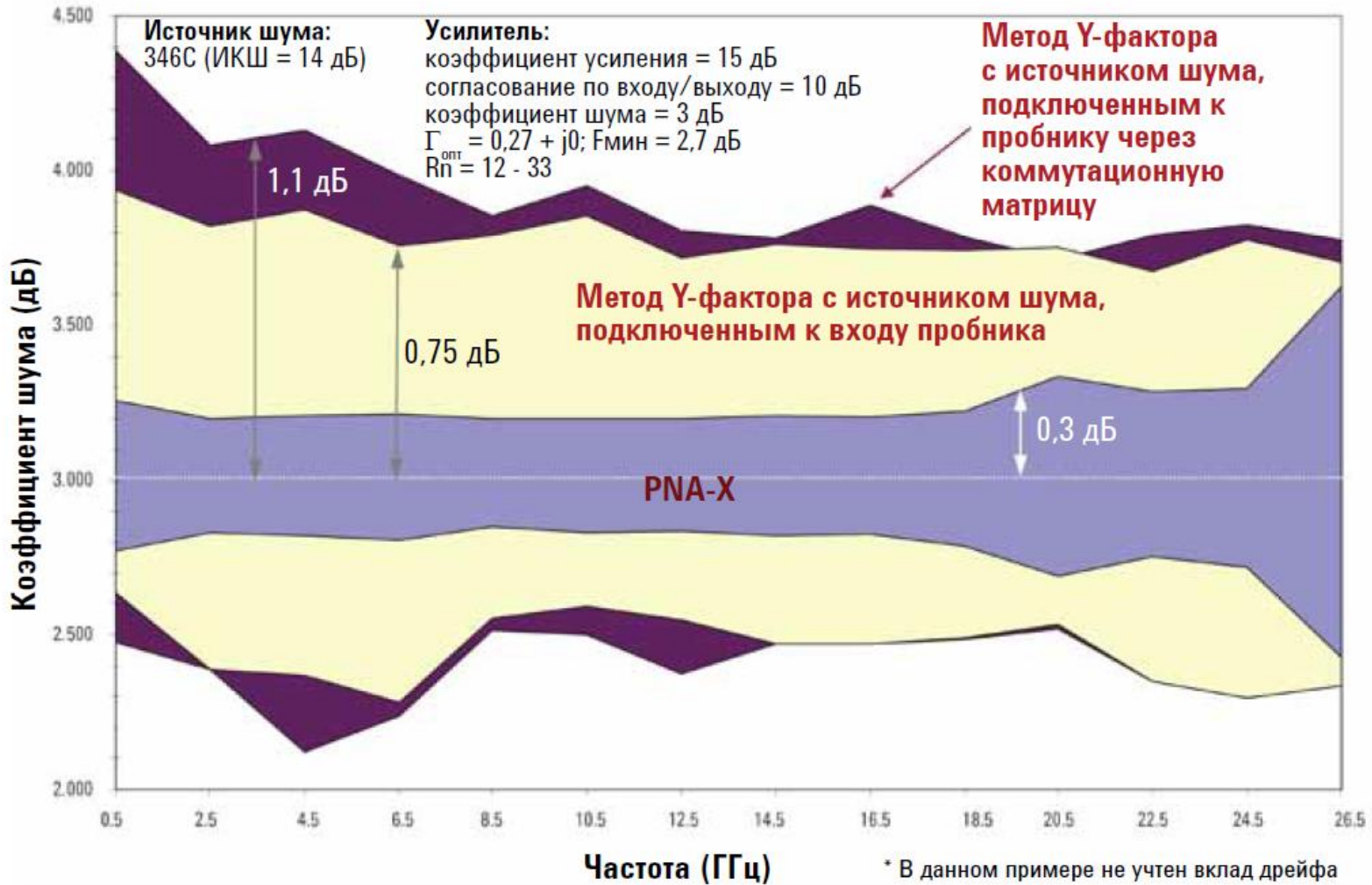
# NF МИС МШУ в корпусном исполнении



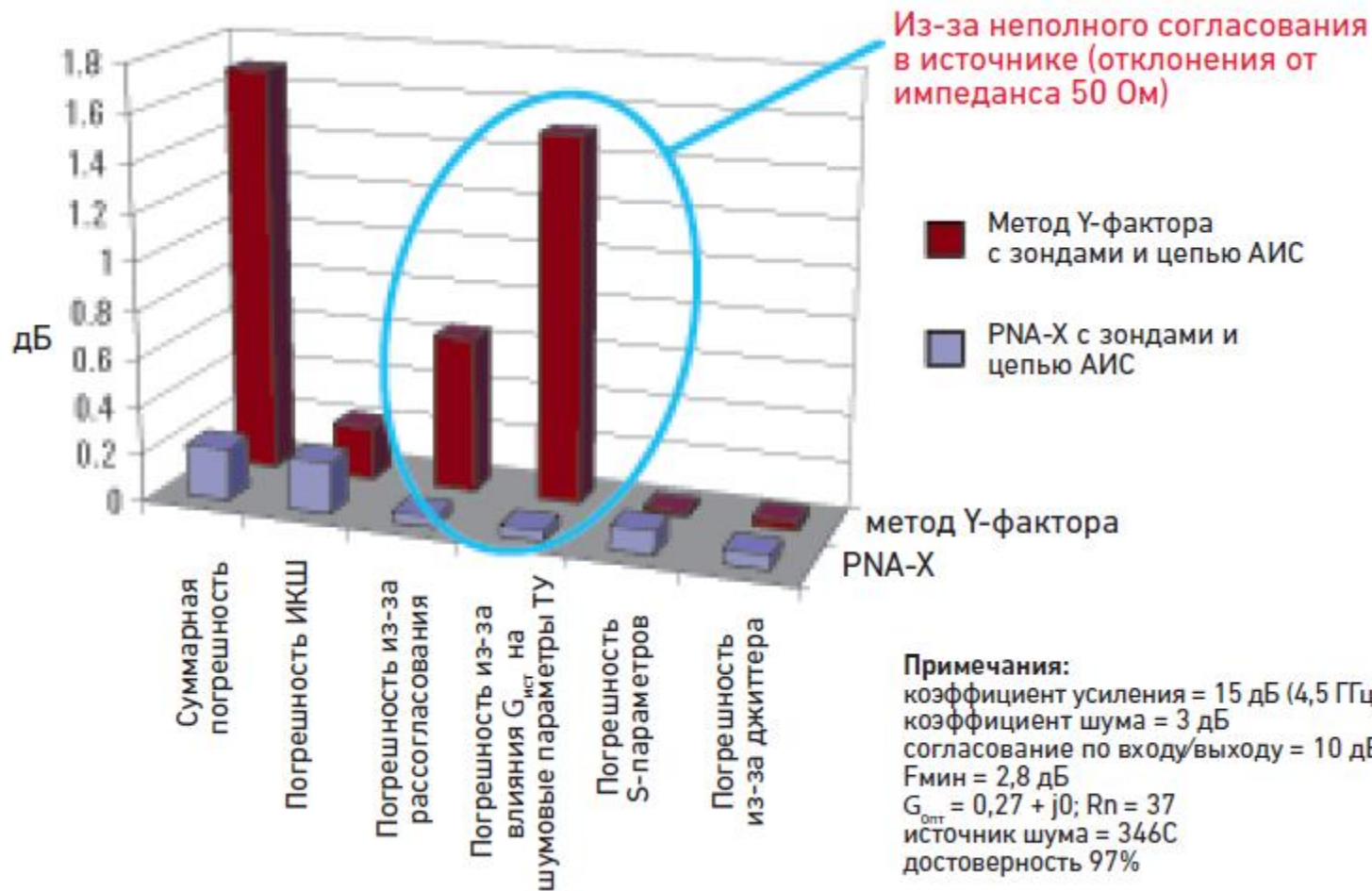
Из-за неполного согласования  
в источнике (отклонения  
от импеданса 50 Ом)

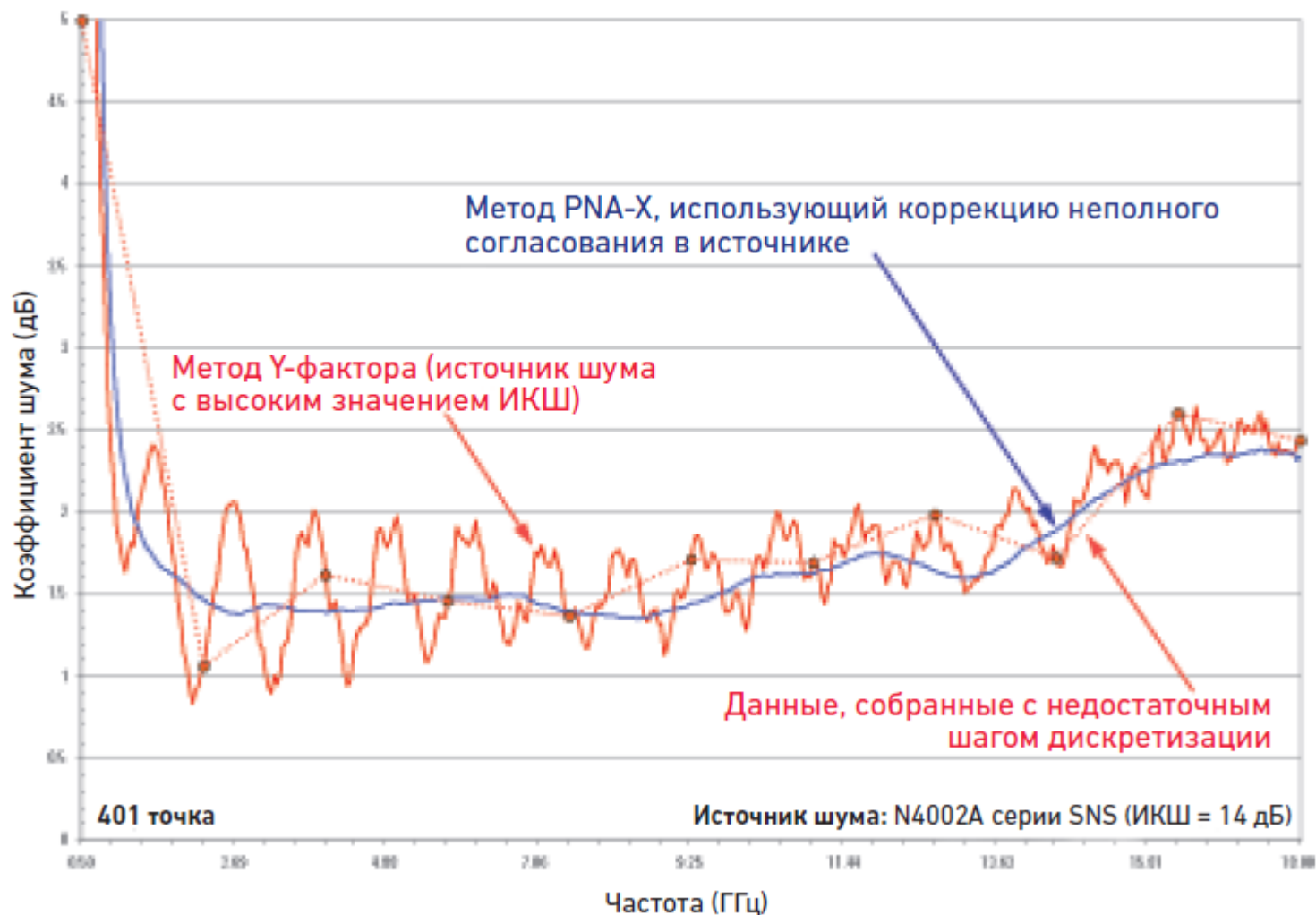


# NF МИС МШУ в бескорпусном исполнении

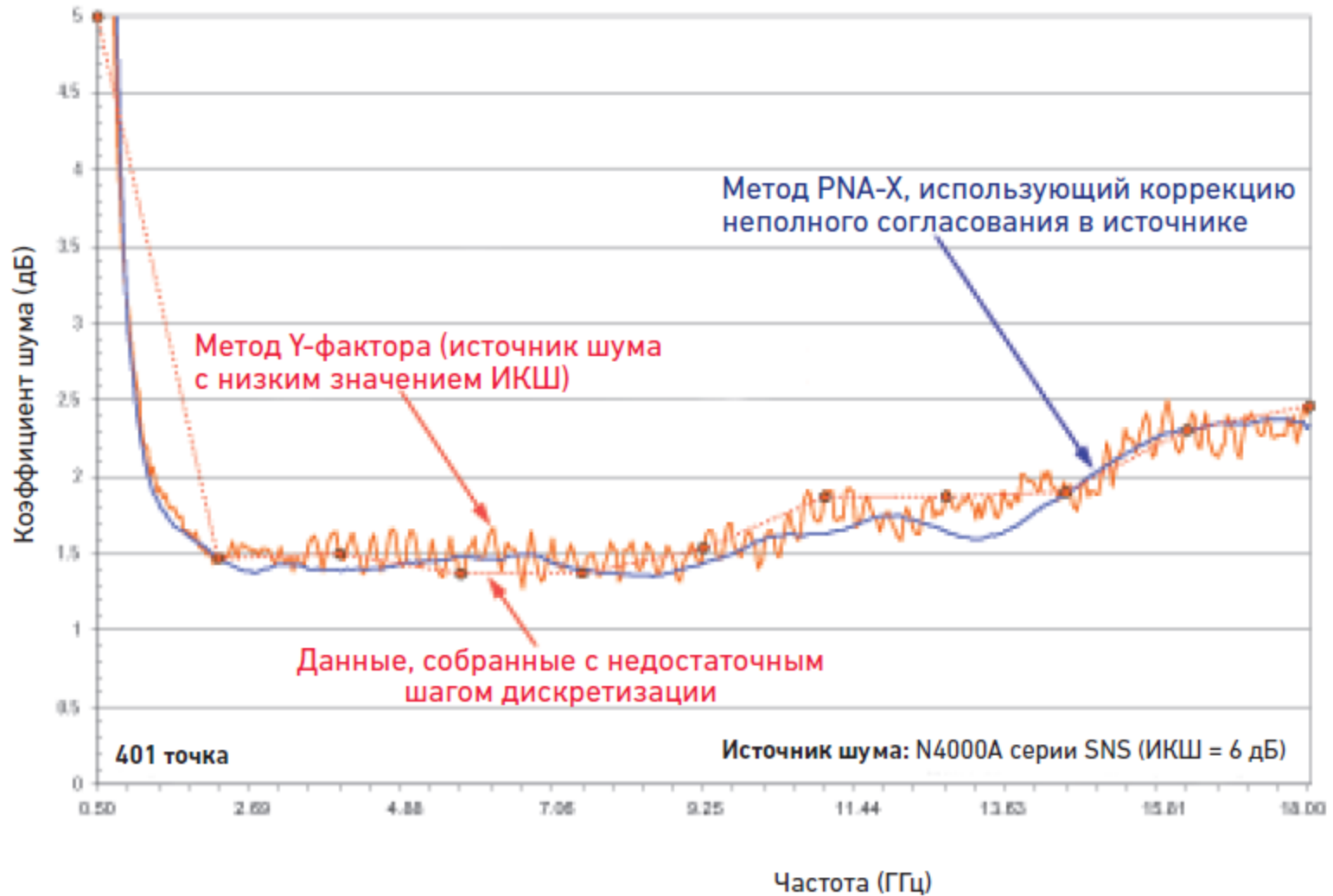


# NF МИС МШУ в бескорпусном исполнении





# Источник шума с низким ENR



## Список литературы



1. Алмазов-Долженко К.Н. Коэффициент шума и его измерения на СВЧ. М., Научный мир, 2000.
2. С. Бельчиков Коэффициент шума. Теория и практика измерений. М.: Компоненты и технологии №4-5, 2008
3. М. Соковишин Основы измерения коэффициента шума в радиочастотном и микроволновых диапазонах. М.: Современная электроника, №5-6, 2015
4. Глазов Г.Н., Горевой А.В. Методы измерений на СВЧ: т 2., кн. 1. Управляемые генераторы на СВЧ. Томск. 2015
5. Nyquist H. "Thermal agitation of electric charge in conductors", Phys.Rev. 1928 32 p110-113
6. Friis H.T. "Noise figure of radio receivers Proc. IRE. 1944 V.32 №7 N.Y. p.419-422
7. IRE Standards on Electron Tubes: Definitions of Terms, 1962 (62 IRE 7.52), Proc. of the IEEE, March, 1963, pp. 434-43
8. Keysight Technologies. Noise Figure Selection Guide Minimizing the Uncertainties. Selection Guide. Literature number 5989-8056EN
9. Keysight Technologies. Основы измерения коэффициента шума в радиочастотном и микроволновом диапазонах. Заметки по применению. Номер публикации K5952-8255RURU



10. Keysight Technologies. Noise Figure Measurement Accuracy: The Y-Factor Method. Application Note. Literature number 5952-3706E
11. Измеритель коэффициента шума X5M-04. Руководство по эксплуатации. ЖНКЮ.468166.021 РЭ
12. Векторный анализатор цепей P4M-18. Руководство по эксплуатации. ЖНКЮ.468166.006 РЭ
13. Keysight Technologies. Высокоточные измерения коэффициента шума с использованием анализаторов цепей серии PNA-X Рекомендации по применению. Номер публикации 5990-5800RURU
14. Rohde & Schwarz. The Y Factor Technique for Noise Figure Measurements. Application Note. 05.2012 - 1MA178\_0E
15. Rohde & Schwarz. Noise Figure Measurement without a Noise Source on a Vector Network Analyzer. Application Note. 10.2010 - 1EZ61\_2E
16. Белоусов А.П., Каменецкий Ю.А. Коэффициент шума. М. Радио и связь, 1981.
17. ГОСТ 8.475-82 Стандартный коэффициент шума и эквивалентная шумовая температура усилительных и приемных устройств. Методика выполнения измерений.
18. L. Colby and B. Heinz, "Accuracy of Noise Figure Measurement Systems", RF & Microwave Symposium and Exhibition, Hewlett Packard, 1988.





**Авторы:**  
**Инженер 1 категории,**  
**Александр Леонидович Ворожцов**  
**[aalek.vorog@yandex.ru](mailto:aalek.vorog@yandex.ru)**

**644027, Россия, г. Омск**  
**проспект Космический 24а**  
**e-mail: [ckba@omsknet.ru](mailto:ckba@omsknet.ru)**  
**[www.ckba.net](http://www.ckba.net)**  
**тел.: +7 (3812) 53-98-30**  
**факс: +7 (3812) 57-19-84**