

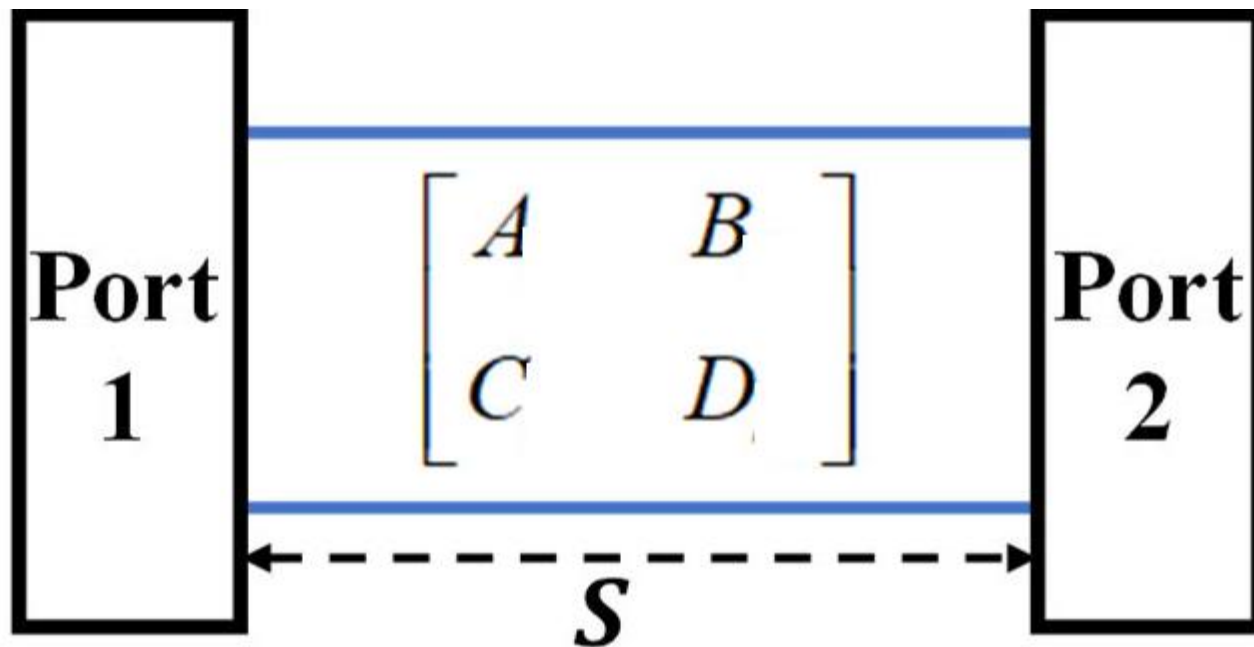
**О методах высокочастотных  
измерений комплексной  
диэлектрической  
проницаемости материалов**

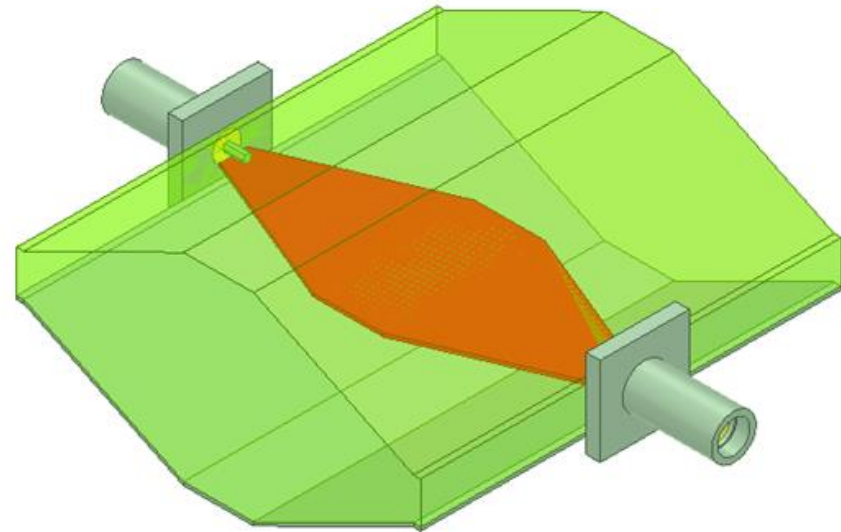
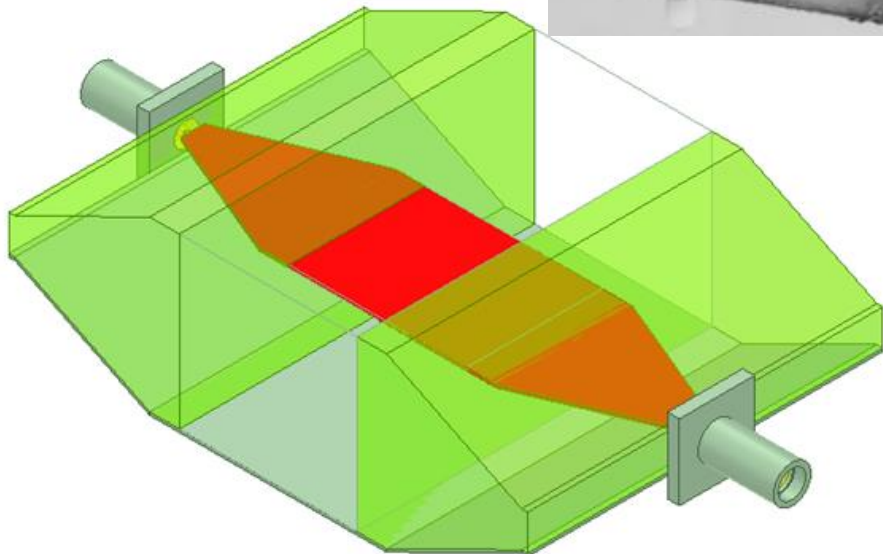
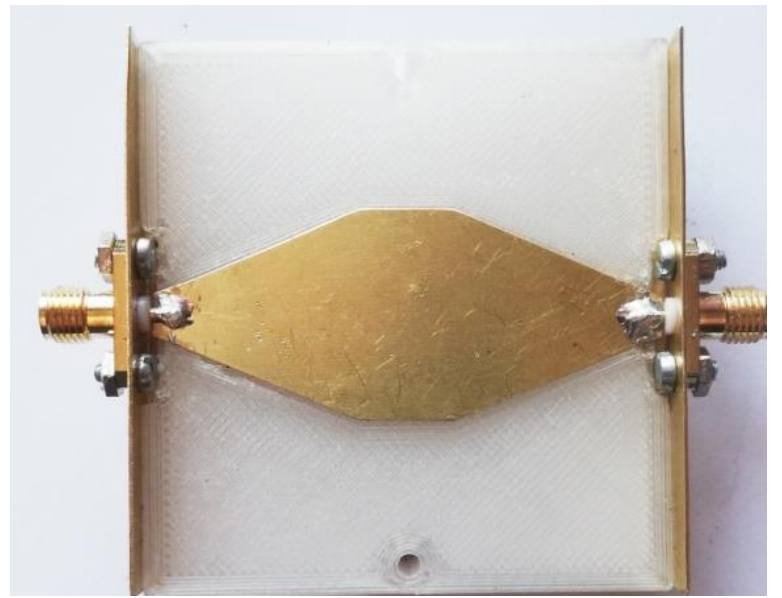
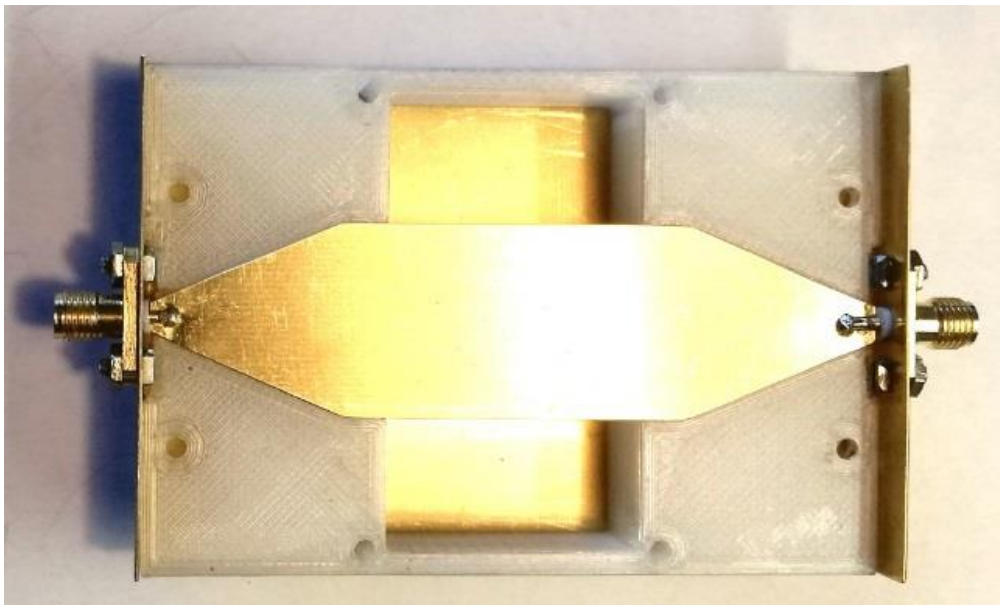
# Пабло Руис-и-Пикассо



Пабло Диего Хосе Франсиско де Паула Хуан  
Непомусено Мария де лос Ремедиос  
Сиприано де ла Сантисима Тринидад  
Мартир Патрисио Руис-и-Пикассо  
25 октября 1881 - 8 апреля 1973

# Измерения КДП материалов с помощью отрезков длинных линий





$$[A] = \frac{1}{2S_{12}} \begin{bmatrix} 1 - S_{11}^2 + S_{12}^2 & (1 + S_{11})^2 - S_{12}^2 \\ (1 - S_{11})^2 - S_{12}^2 & 1 - S_{11}^2 + S_{12}^2 \end{bmatrix} \quad \varepsilon' = \frac{\beta^2 - \alpha^2}{\beta_0^2}$$

$$[A] = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ch(\gamma l) & Z' sh(\gamma l) \\ \frac{1}{Z'} sh(\gamma l) & ch(\gamma l) \end{bmatrix} \quad \varepsilon'' = -\frac{2\alpha\beta}{\beta_0^2}$$

$$\gamma = \alpha + i\beta$$

$Z' = W/W_0$ ,  $W_0$  – волновое сопротивление линии без заполнения

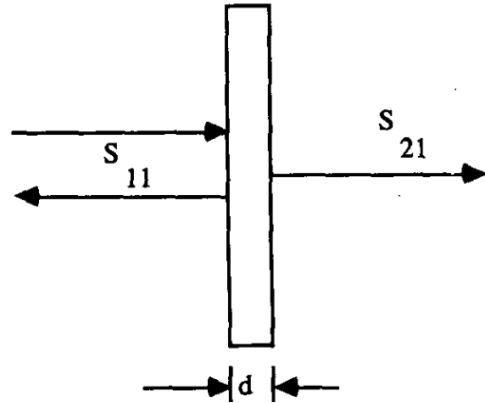
$$\gamma = \frac{i}{l} \ln (A_{11} + \sqrt{A_{12} \cdot A_{21}}) \quad Z' = \frac{W}{W_0} = \sqrt{A_{12}/A_{21}}$$

L. Cai, Z. H. Jiang and W. Hong, "Broadband Measurement of Substrate Complex Permittivity Using Optimized ABCD Matrix," in IEEE Access, vol. 8, pp. 224513-224521, 2020, doi:10.1109/ACCESS.2020.3044699.

Завьялов Арнольд Семенович, Григорий Ефимович Дунаевский, и В.С. Корогодов. "Измерение параметров материалов на сверхвысоких частотах:(учебное пособие)." (1985).

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon'}} \quad k_0 = \frac{\omega}{c} ; k = \frac{\omega}{v} ; \varphi_0 = k_0 \cdot l \quad \text{и} \quad \varphi = k \cdot l = \sqrt{\epsilon'} k_0 \cdot l$$

D. A. Robinson, S. B. Jones, J. M. Wraith, D. Or, S. P. Friedman; A Review of Advances in Dielectric and Electrical Conductivity Measurement in Soils Using Time Domain Reflectometry. *Vadose Zone Journal* 2003;; 2 (4): 444–475. doi: <https://doi.org/10.2113/2.4.444>



$$S_{11} = \frac{\Gamma(1 - T^2)}{1 - \Gamma^2 T^2}$$

$$S_{21} = \frac{T(1 - \Gamma^2)}{1 - \Gamma^2 T^2}$$

$$\gamma = [\log_e (1/T)]/d.$$

$$\epsilon^* = \frac{\gamma}{\gamma_0} \left( \frac{1 - \Gamma}{1 + \Gamma} \right)$$

$$\mu^* = \frac{\gamma}{\gamma_0} \left( \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} \right).$$

$$\sqrt{\frac{\mu^*}{\epsilon^*}} = \left( \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} \right).$$

$$S_{12} = \frac{T_3 T_4 \exp(ikd)}{1 - \Gamma_3 \Gamma_4 \exp(ikd)}, \quad k = \omega \sqrt{\epsilon^*}/c$$

$$\Gamma = K \pm \sqrt{K^2 - 1}$$

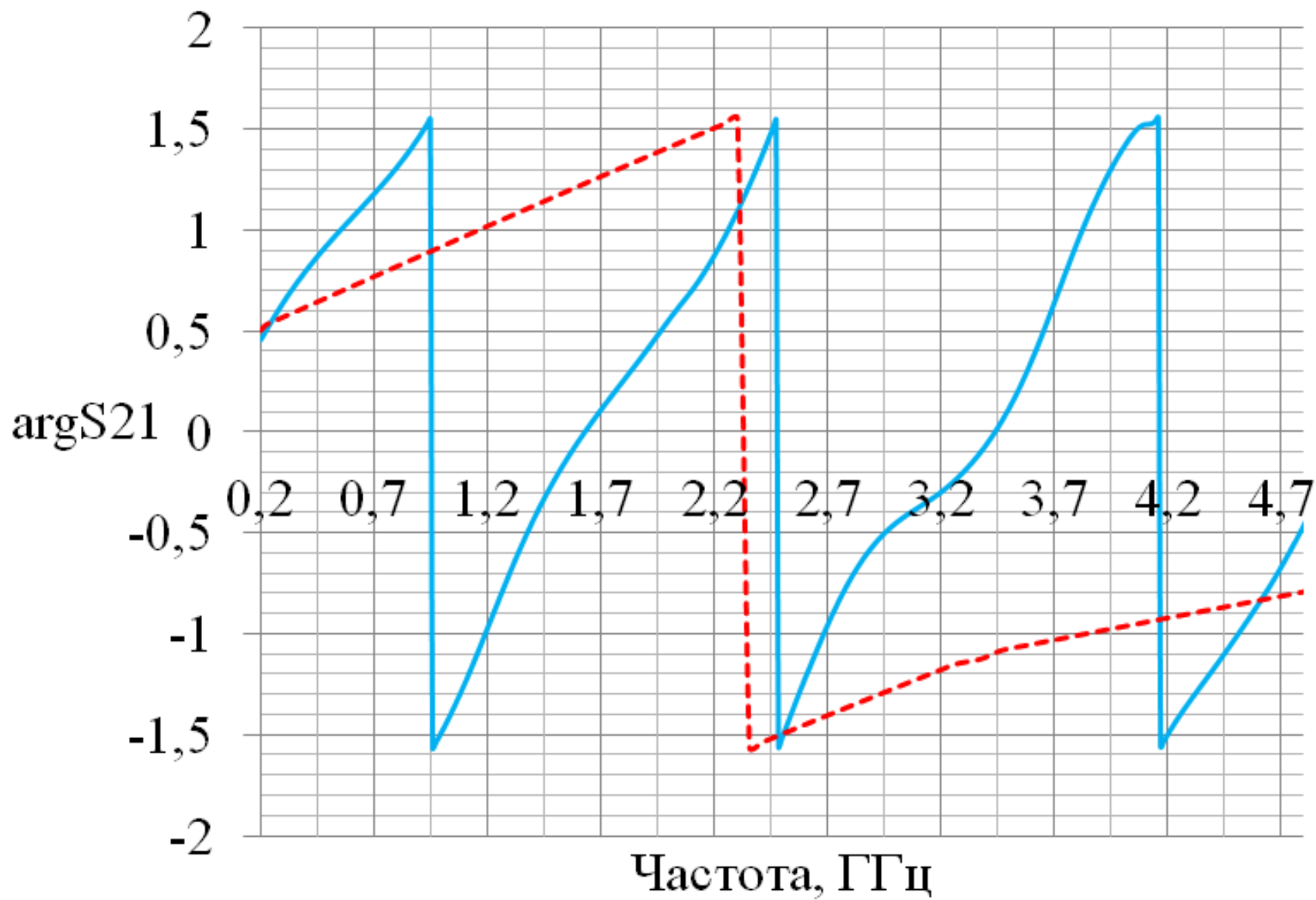
$$K = \frac{S_{11}^2 - S_{21}^2 + 1}{2S_{11}}$$

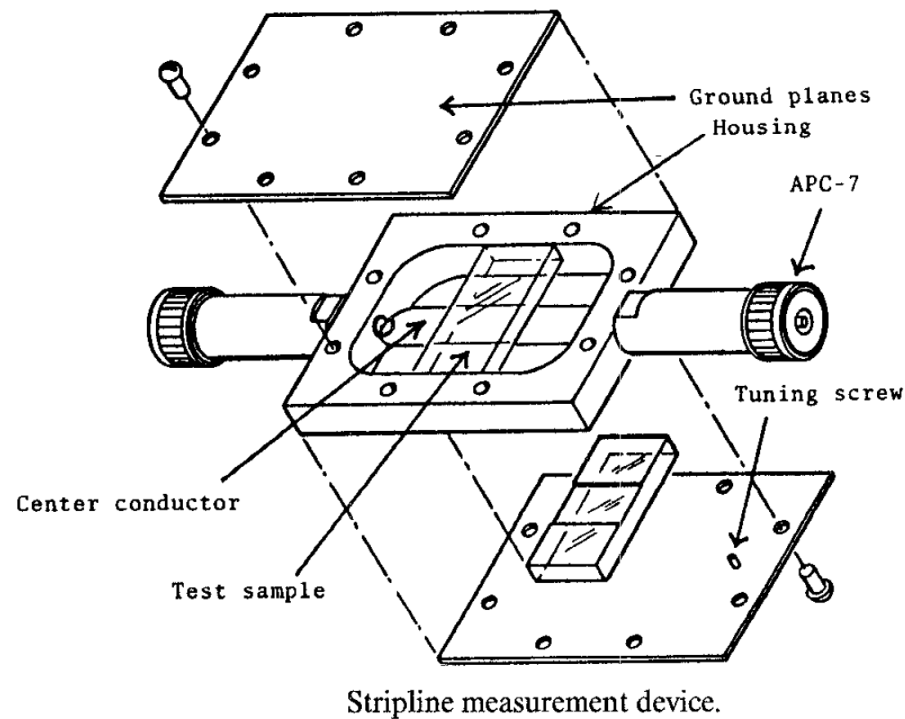
$$T = \left( \frac{S_{11} + S_{21} - \Gamma}{1 - (S_{11} + S_{21})\Gamma} \right).$$

D. K. Ghodgaonkar, V. V. Varadan and V. K. Varadan, "Free-space measurement of complex permittivity and complex permeability of magnetic materials at microwave frequencies," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 39, no. 2, pp. 387-394, April 1990, doi: 10.1109/19.52520.

M. A. B. Aris, D. K. Ghodgaonkar and N. Khadri, "Nondestructive and noncontact dielectric measurement methods for low-loss liquids using free space microwave measurement system in 8 - 12.5 GHz frequency range," *2004 RF and Microwave Conference (IEEE Cat. No.04EX924)*, Selangor, Malaysia, 2004, pp. 182-189, doi: 10.1109/RFM.2004.1411104.

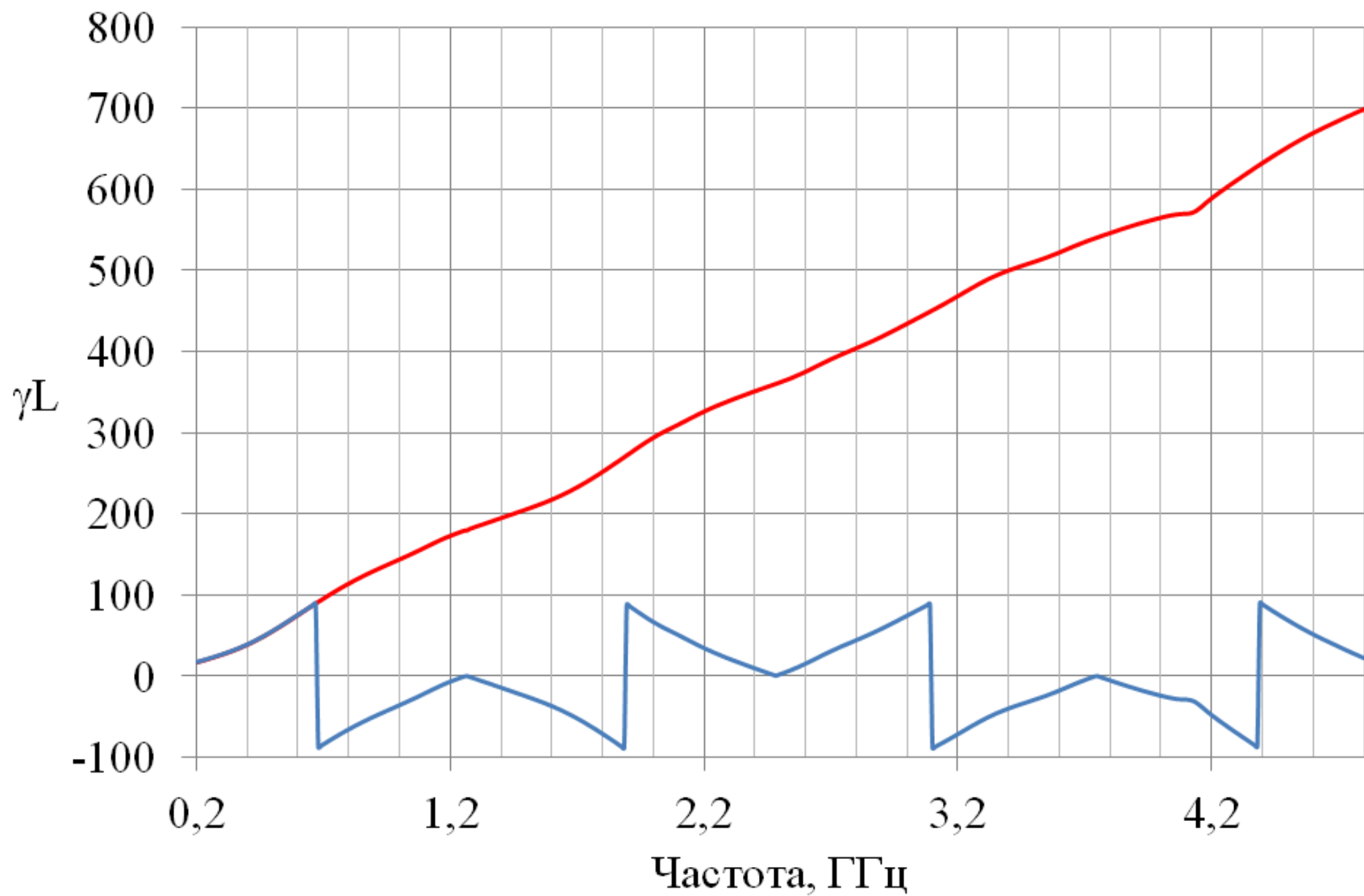
Миронов В. Л., Бобров П. П., Кондратьева О. В., и Репин, А. В. (2010). 16. ИЗМЕРЕНИЕ КОМПЛЕКСНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ РАЗЛИЧНЫХ ФОРМ ПОЧВЕННОЙ ВЛАГИ В МИКРОВОЛНОВОМ ДИАПАЗОНЕ.

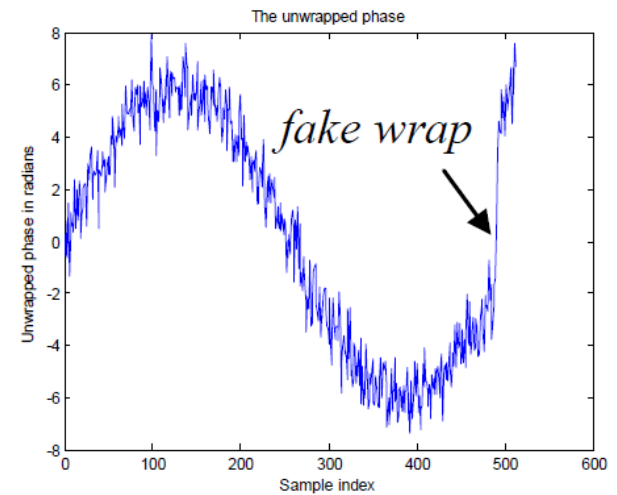
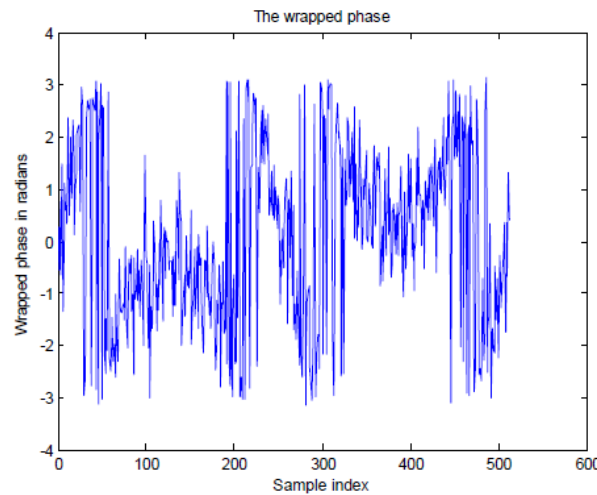
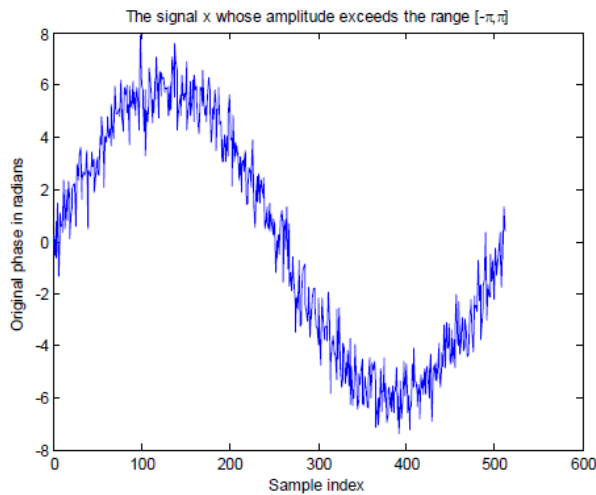
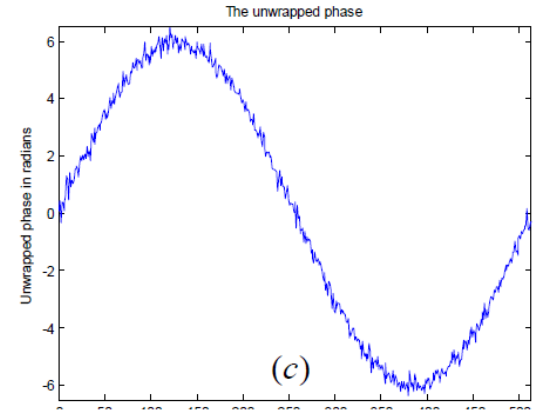
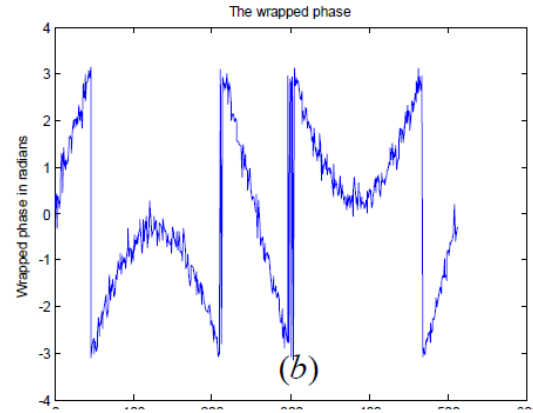
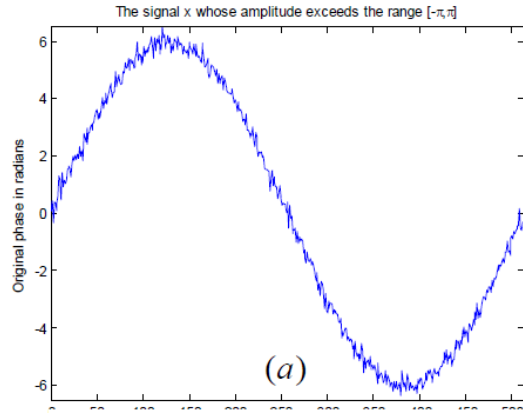




- W. Barry, "A Broad-Band, Automated, Stripline Technique for the Simultaneous Measurement of Complex Permittivity and Permeability," in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 34, no. 1, pp. 80-84, Jan 1986, doi: 10.1109/TMTT.1986.1133283.



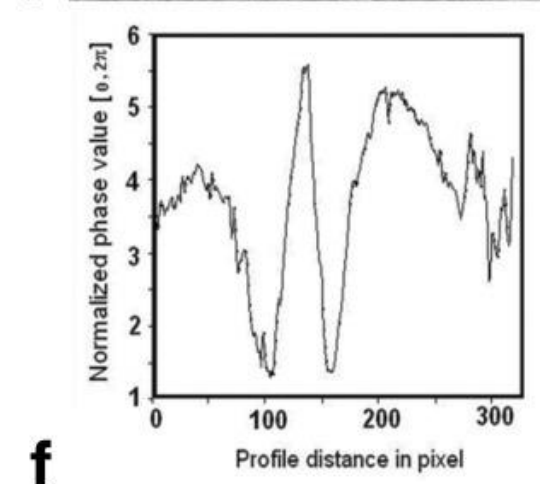
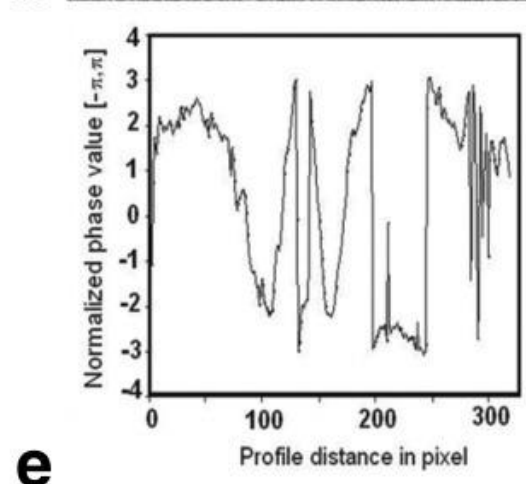
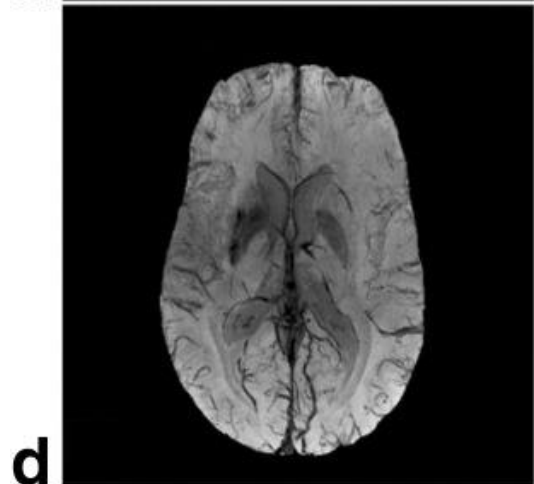
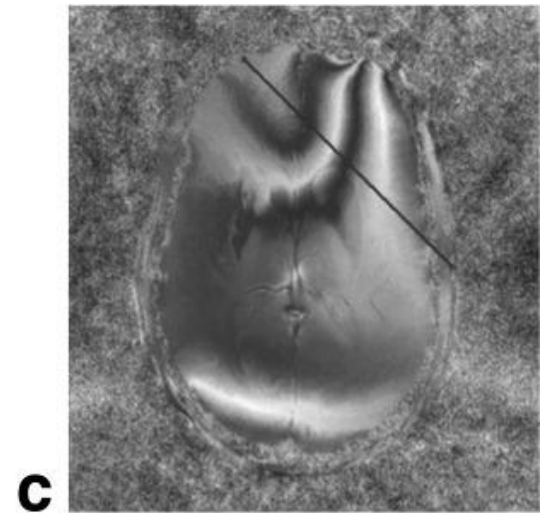
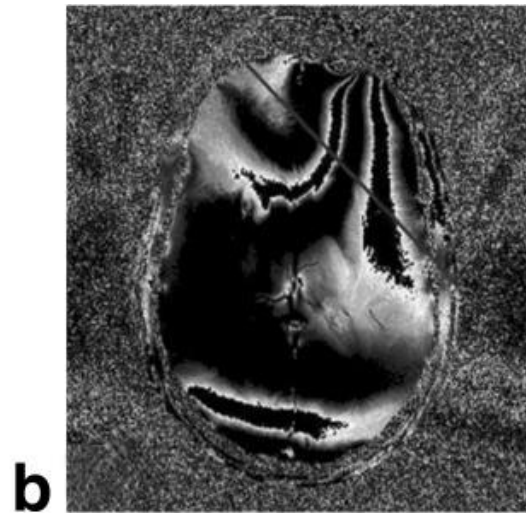
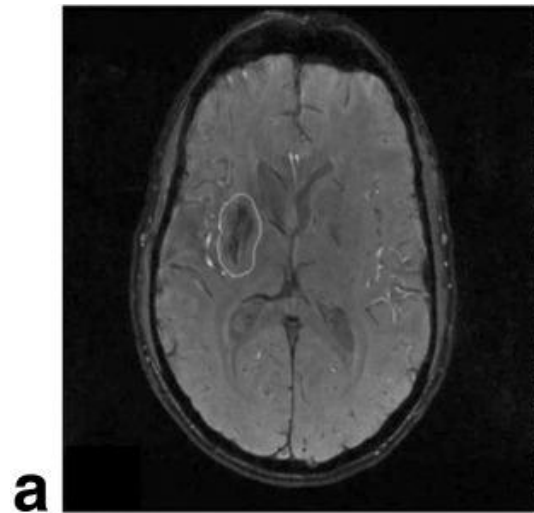




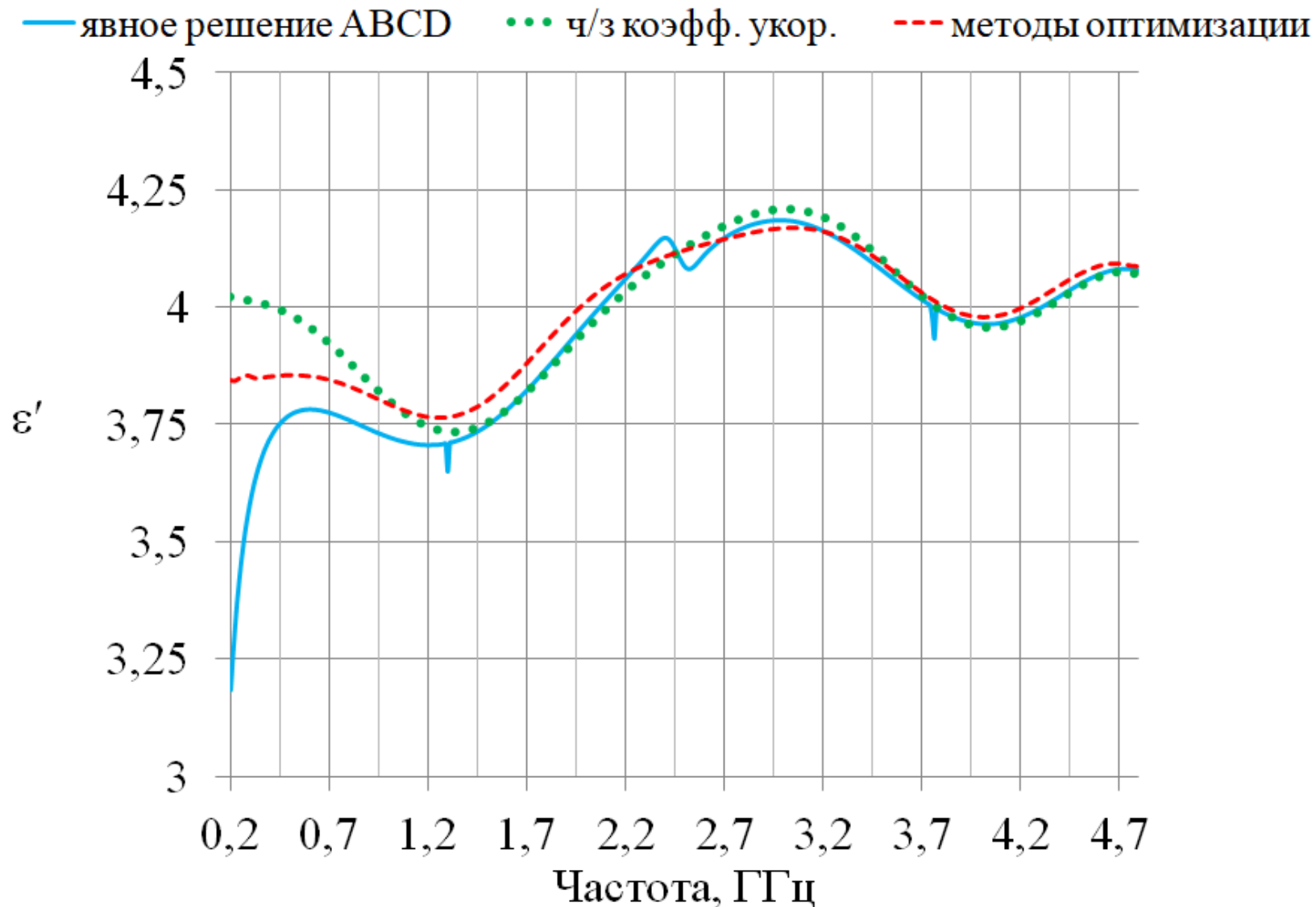
- Gdeisat M., Lilley F. One-dimensional phase unwrapping problem //signal. – 2011. – V. 4. – P. 6.

$$\phi(\mathbf{r}) = \phi_w(\mathbf{r}) + 2\pi n(\mathbf{r})$$

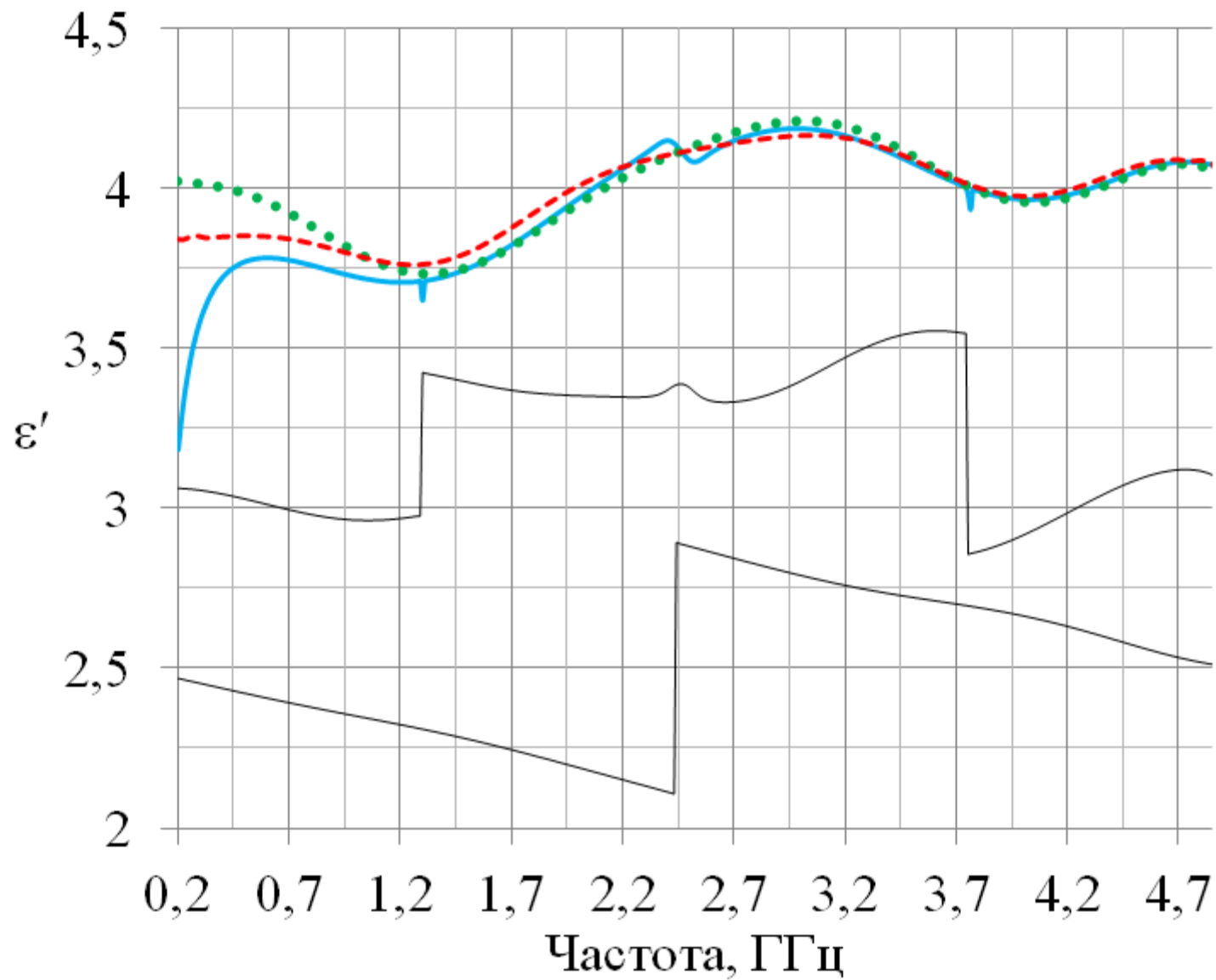
$$n(\mathbf{r}) = \frac{1}{2\pi} \nabla_{\perp}^{-2} [\nabla_{\perp}^{-2} \phi(\mathbf{r}) - \nabla_{\perp}^2 \phi_w(\mathbf{r})]$$



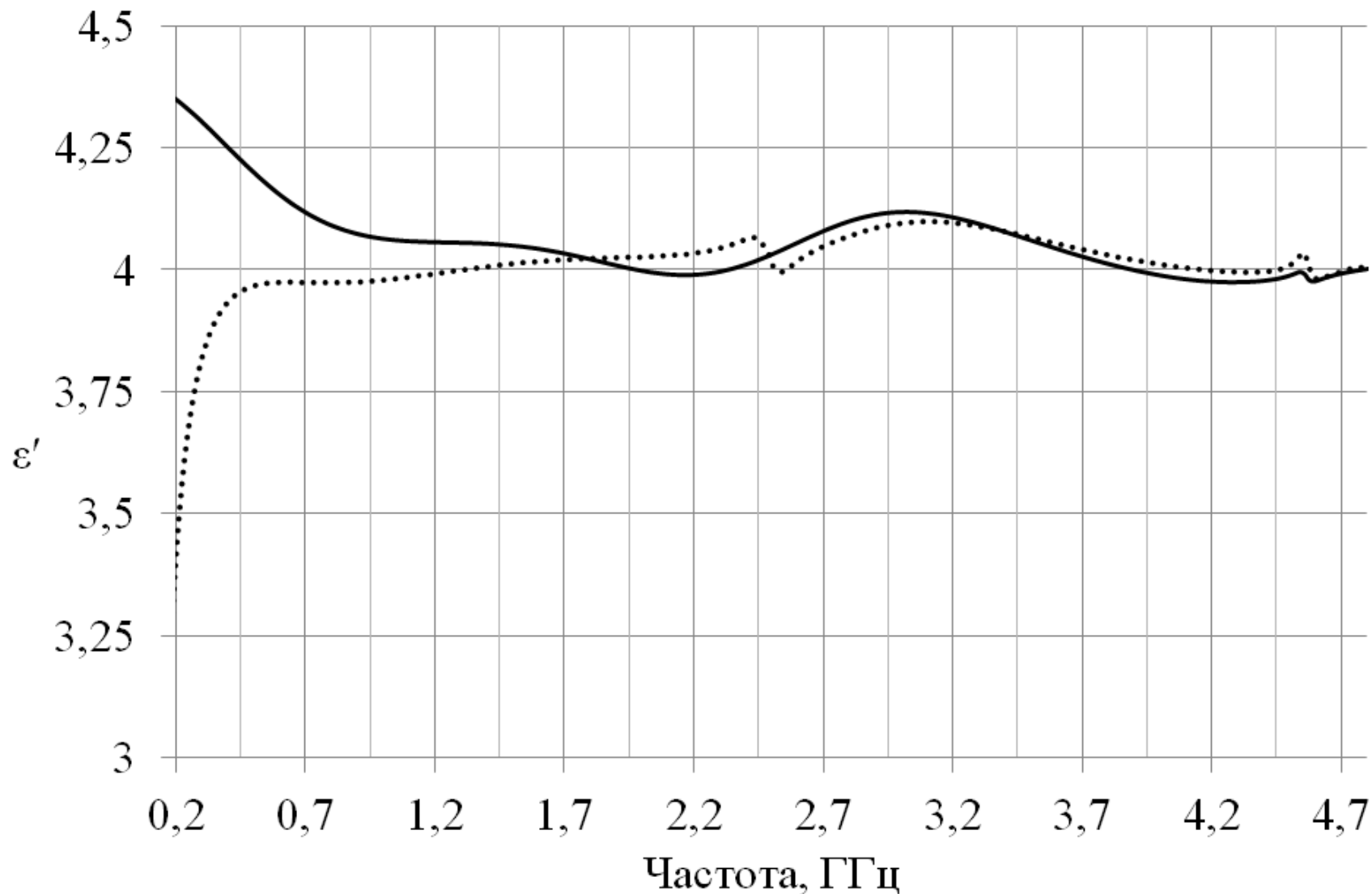
# $\varepsilon' = 4 \sigma = 0,01$ См/м, калибровка по пустой ячейке ( $\pm 6\%$ ВЧ)



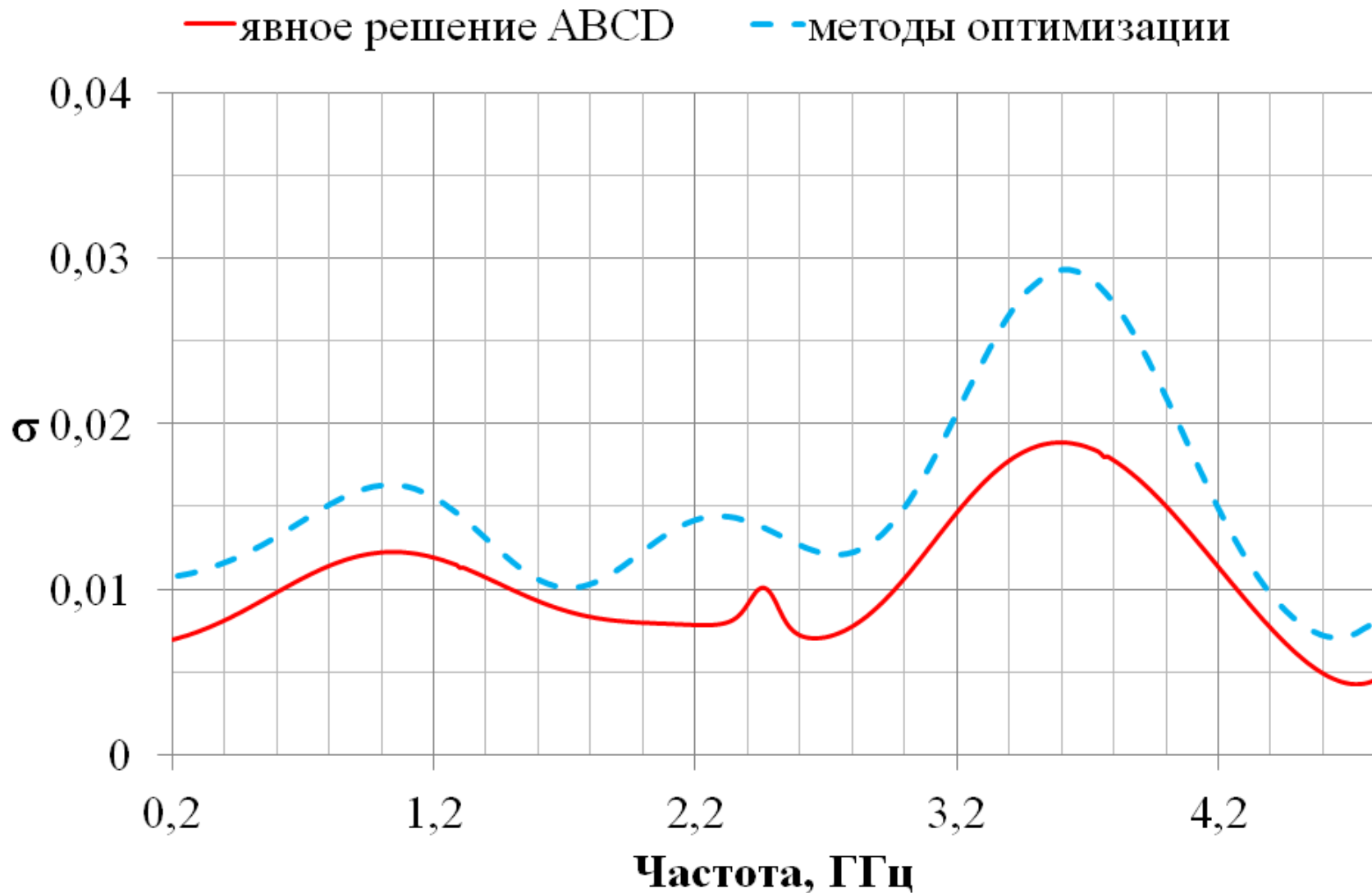
— явное решение ABCD    ••• ч/з коэфф. укор.    - - - методы оптимизации



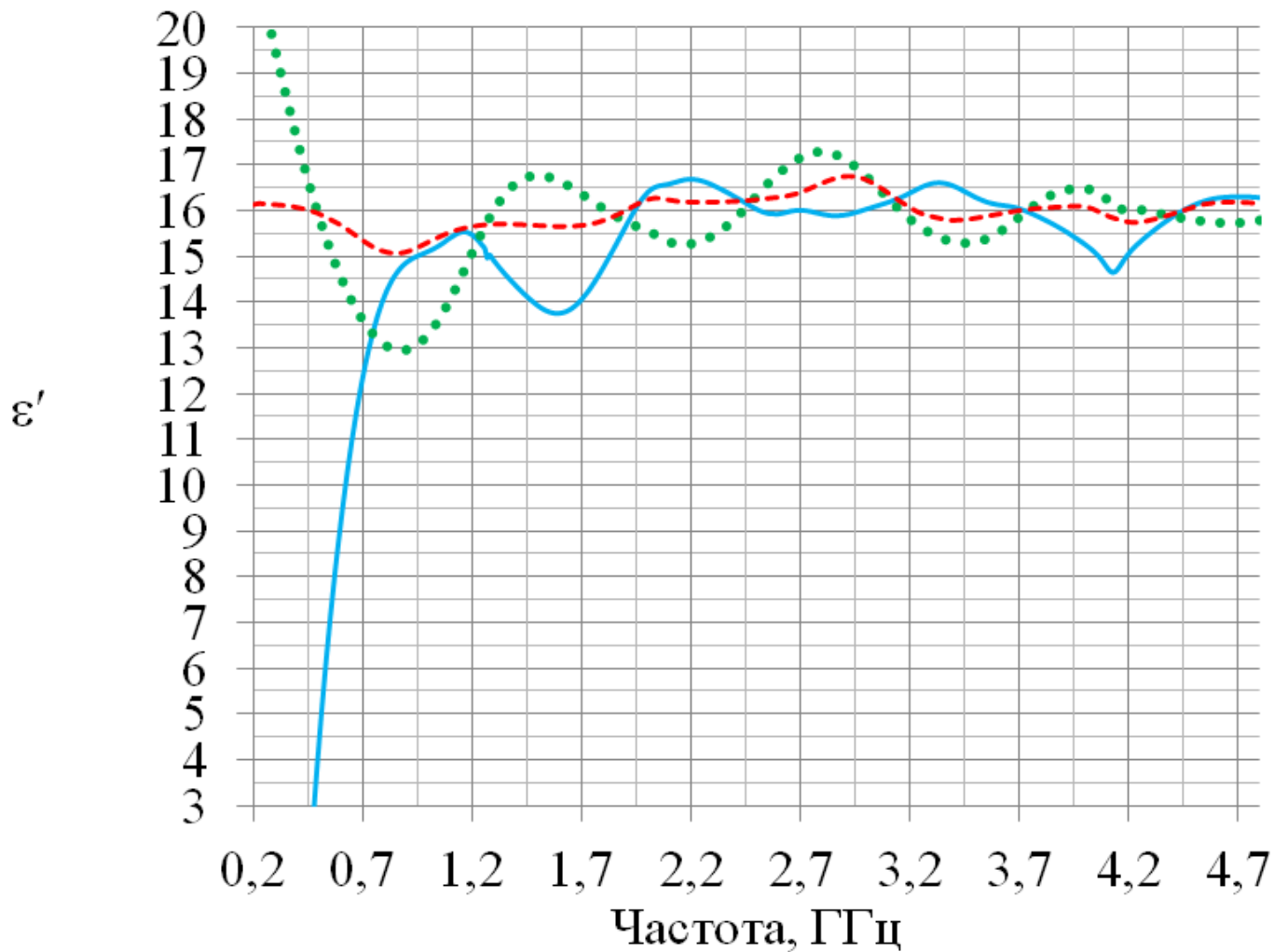
$\varepsilon' = 4$   $\sigma = 0,01$  См/м, применение калибровочной ячейки ( $\pm 2\%$  ВЧ)



$\varepsilon' = 4$   $\sigma = 0,01$  См/м, применение калибровочной ячейки (200% и 100% отклонения)



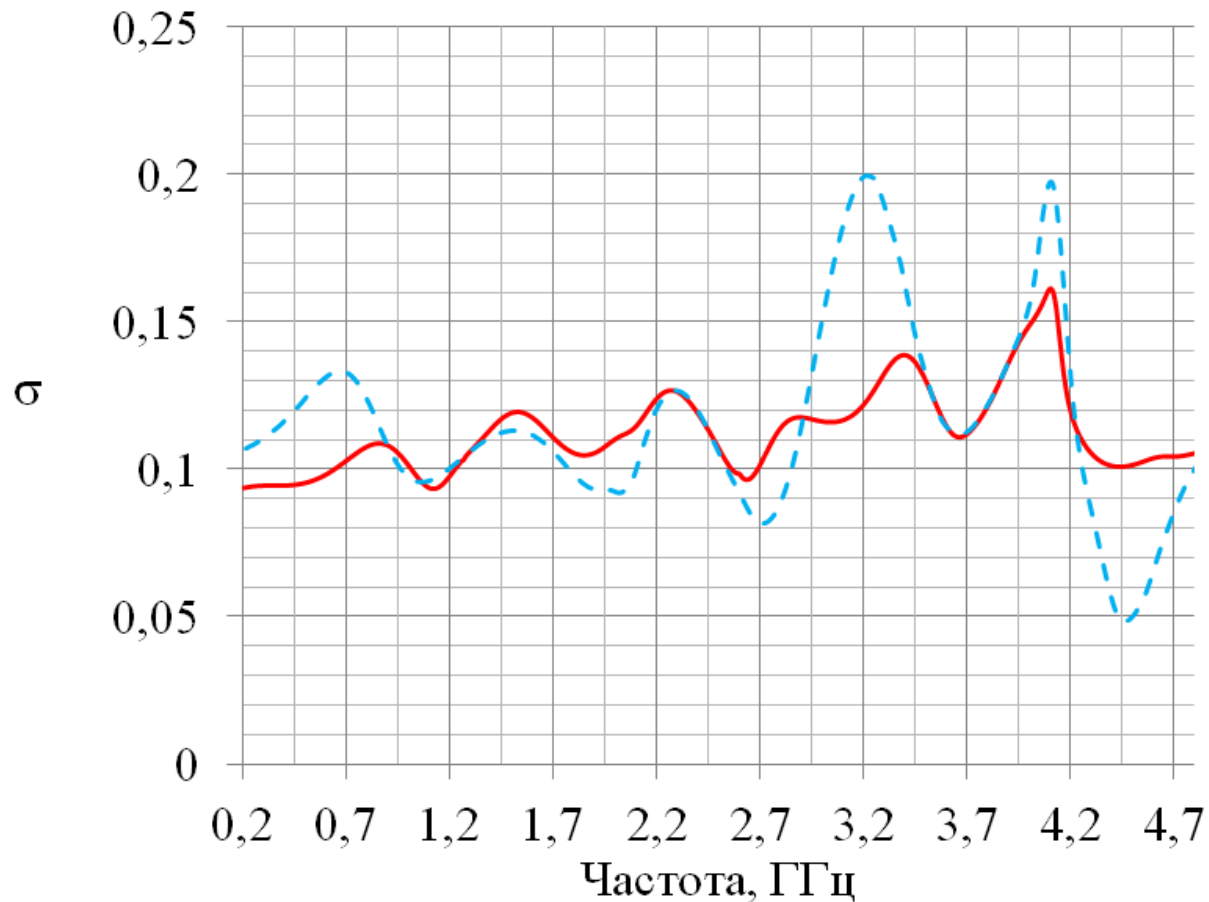
— явное решение ABCD    ••• ч/з коэфф. укор.    - - - методы оптимизации





$\varepsilon' = 4$   $\sigma = 0,01$  См/м, применение калибровочной ячейки (100% и 60% отклонения)

— явное решение ABCD      - - - методы оптимизации



Проведенный анализ методов измерения КДП материалов с помощью ячейки на базе отрезка симметричной полосковой линии позволяет сформулировать следующие рекомендации:

1. Измерения с привлечением калибровочной меры, представляющей собой измерительную ячейку без области измерения, повышают достоверность измерений.
2. Восстановление значений КДП по измеренным значениям элементов матрицы рассеяния методом оптимизации (неявного решения) отличается большей точностью.

БЛАГОДАРЮ

ЗА

ВНИМАНИЕ