

УДК 550.837.75:553.98

ОТРАЖАТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УГЛЕВОДОРОДНОЙ ЗАЛЕЖИ ПРИ ДВУХЧАСТОТНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ В РЕЖИМЕ МОЩНОГО НЧ-СИГНАЛА

С.В. КАЛИНЦЕВ, канд. физ.-мат. наук, доц. Н.В. ЦЫВИС,
канд. техн. наук, доц. В.Ф. ЯНУШКЕВИЧ
(Полоцкий государственный университет)

Для выделения материальных объектов на фоне окружающей среды используются отражательные характеристики, которые служат инструментом для оптимизации электрических параметров зондирующего сигнала. Исследуемая залежь углеводородов представлена в виде анизотропной неоднородности на трассе связи.

В общем случае пространственная ориентация внешней нормали к границе раздела сред и волнового вектора \vec{k} является произвольной (рис. 1) и процесс взаимодействия электромагнитных волн (ЭМВ) с локальным включением на трассе распространения радиоволн (РРВ) можно представить в виде режима наклонного падения плоской волны с вертикальной поляризацией на безграничную поверхность с анизотропным импедансом (в приближении больших характерных размеров неоднородности по сравнению с длиной волны зондирующего сигнала).

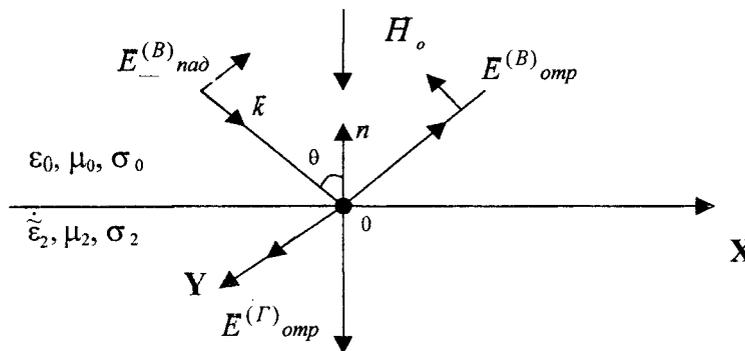


Рис. 1. Геометрия задачи для ЭМВ с вертикальной поляризацией поля

Отражательную способность среды над залежью углеводородов при воздействии ЭМВ с линейной поляризацией в режиме двухчастотного взаимодействия можно оценить по контрасту коэффициентов отражения между анизотропной средой (АС) и поляризацией поля (ПП) по формуле:

$$\Delta R = 20 \lg |R_p - R_{\text{ВВ}}|. \quad (1)$$

Значение коэффициента «подстилающей» среды R_p с конечной диэлектрической проницаемостью ϵ_p и проводимостью σ_p для ЭМВ с вертикальной поляризацией определяется по формуле:

$$R_p = \frac{\dot{\epsilon}_p \sin \Theta - \sqrt{\dot{\epsilon}_p - \cos^2 \Theta}}{\dot{\epsilon}_p \sin \Theta + \sqrt{\dot{\epsilon}_p - \cos^2 \Theta}} = R_p \exp j\varphi_p, \quad (2)$$

где $\dot{\epsilon}_p = \epsilon_p - j \frac{\sigma_p}{\omega \epsilon_0}$ – комплексная диэлектрическая проницаемость «подстилающей» поверхности.

На рис. 2 – 5 представлены частотные зависимости модуля $|R_{\text{ас}}|$ и фазы $\varphi_{\text{ВВ}}$ при $\theta = 0^\circ$ для различных соотношений частот и амплитуд двух воздействующих сигналов, рассчитанных по формулам (2).

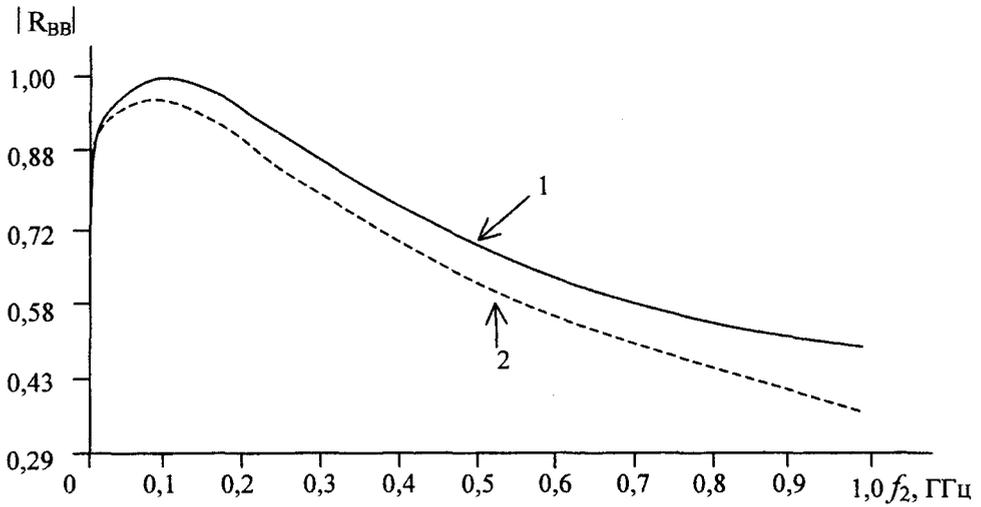


Рис. 2. Зависимости $|R_{BB}| = \varphi(f_2)$ при нормальном падении:
1 - для $k_\omega = 10^{-6}, k_E = 10^{-6}$; 2 - для $k_\omega = 10^{-6}, k_E = 10^{-1}$

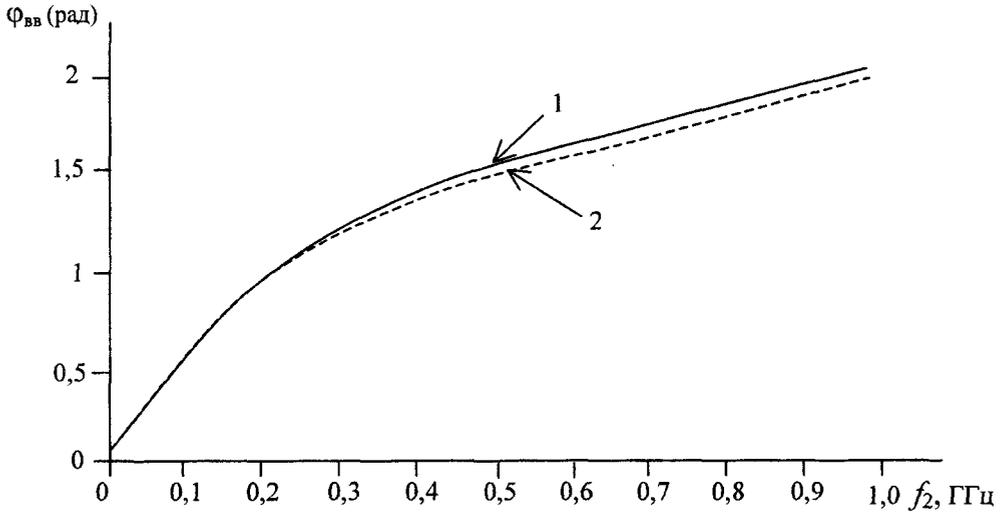


Рис. 3. Зависимости $\varphi_{BB} = \varphi(f_2)$ при $\theta = 0^\circ$:
1 - для $k_\omega = 10^{-6}, k_E = 10^{-6}$; для $k_\omega = 10^{-6}, k_E = 10^{-1}$

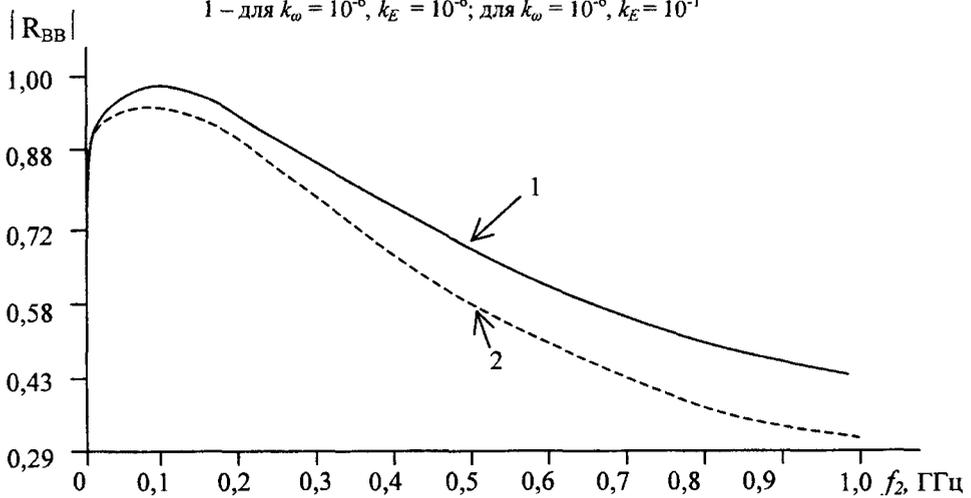


Рис. 4. Зависимости $|R_{BB}| = \varphi(f_2)$ при нормальном падении:
1 - для $k_\omega = 10^{-1}, k_E = 10^{-6}$; 2 - для $k_\omega = 10^{-1}, k_E = 10^{-1}$

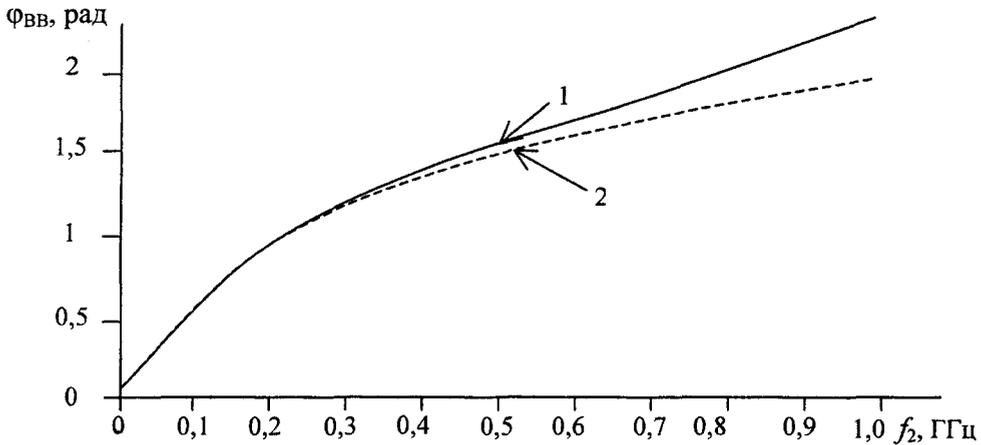


Рис. 5. Зависимости $\Phi_{\text{вв}} = \varphi(f_2)$ при нормальном падении:
1 – для $k_{\omega} = 10^{-1}$, $k_E = 10^{-6}$; 2 – для $k_{\omega} = 10^{-1}$, $k_E = 10^{-1}$

В исследуемом диапазоне частот наблюдается неравномерный характер изменения $|R_{\text{вв}}|$. Модуль коэффициента отражения имеет максимальное значение, равное 1,0 в диапазоне частот от 100 до 200 МГц. На частотах в диапазоне от 100 кГц до 100 МГц наблюдается рост этого коэффициента от 0,8 до 1,0, а на частотах выше 200 МГц – плавное уменьшение от 1,0 до 0,3 – 0,4 на частоте $f_2 = 1$ ГГц. Величина $|R_{\text{вв}}|$ зависит от соотношения амплитуд и частот взаимодействующих сигналов со средой над залежью, т.е. от параметров k_{ω} , k_E . Влияние коэффициента k_{ω} сказывается незначительно, наибольшие отличия величин $|R_{\text{вв}}|$ получаются при небольших значениях k_{ω} , например, при коэффициенте, равном 10^{-1} , а при $k_{\omega} = 10^{-3}$ и $k_{\omega} = 10^{-6}$ отличия характеристик практически не существенны. Влияние амплитуд взаимодействующих волн, т.е. параметра k_E проявляется более заметно. Например, при $k_{\omega} = 10^{-6}$ на частоте $f_2 = 1$ ГГц наблюдается уменьшение $|R_{\text{вв}}|$ до значения 0,36 при $k_E = 10^{-1}$ и до значения 0,50 при $k_E = 10^{-6}$. В целом характер изменения величины $|R_{\text{вв}}|$ от частоты f_2 при различных коэффициентах k_E и k_{ω} имеет одинаковый вид (рис. 6 – 8).

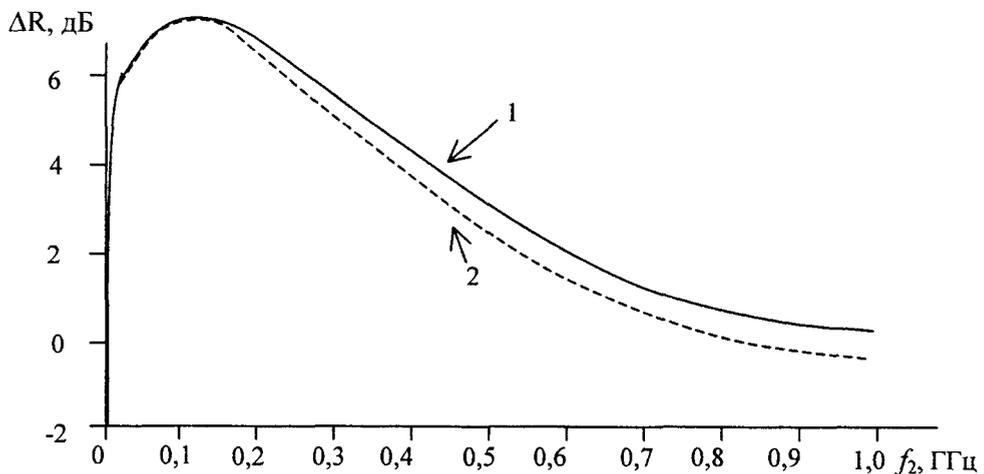


Рис. 6. Зависимости $\Delta R = \varphi(f_2)$ при $\theta = 0^\circ$:
1 – для $k_{\omega} = 10^{-6}$, $k_E = 10^{-6}$; 2 – для $k_{\omega} = 10^{-6}$, $k_E = 10^{-1}$

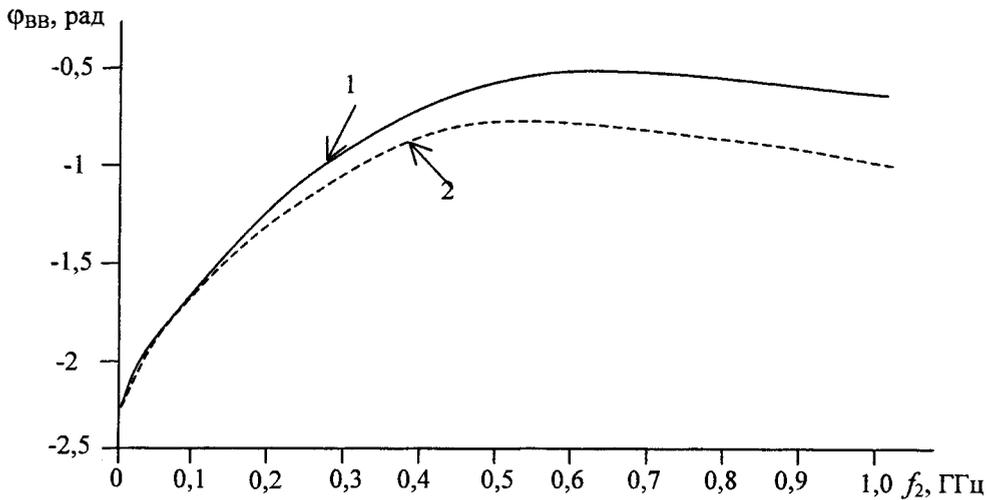


Рис. 7. Зависимости $\varphi_{\Delta R} = \varphi(f_2)$ при $\theta = 0^\circ$:
 1 – для $k_\omega = 10^{-6}$, $k_E = 10^{-6}$; 2 – для $k_\omega = 10^{-6}$, $k_E = 10^{-1}$

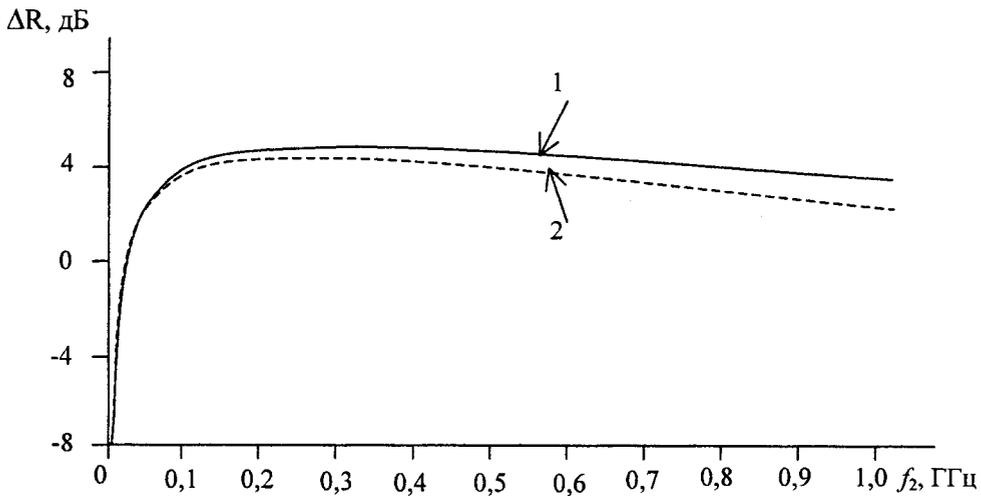


Рис. 8. Зависимости $\Delta R = \varphi(f_2)$ при $\theta = 50^\circ$:
 1 – для $k_\omega = 10^{-6}$, $k_E = 10^{-6}$; 2 – для $k_\omega = 10^{-6}$, $k_E = 10^{-1}$

Фазочастотные характеристики $\varphi_{\Delta R} = \varphi(f_2)$ нелинейно изменяются от значений 0,05 рад на частоте $f_2 = 10^6$ Гц до 1,8 – 1,9 рад на частоте $f_2 = 1$ ГГц. Влияние параметров k_ω и k_E сказывается несущественно на изменение фазы. При $k_\omega = 10^{-3}$ все характеристики практически сливаются в одну линию. Наиболее заметно отличие характеристик при $k_\omega = 10^{-1}$, т.е. при незначительном разnose частот f_1 и f_2 .

При $k_E = 10^{-1}$, $k_\omega = 10^{-6}$ происходит рост $\varphi_{\Delta R}$ до -0,9 рад на $f_2 = 450$ МГц и дальше его падение до -1,25 рад на $f_2 = 1$ ГГц.

При угле падения волны $\theta = 50^\circ$ контраст наиболее выражен в диапазоне 200 МГц – 1 ГГц и составляет (2 – 4) дБ, фазовые характеристики изменяются не существенно (рис. 9).

При $k_\omega = 10^{-1}$ общая закономерность характеристик контраста остается прежней, а фаза $\varphi_{\Delta R} = 0$ во всем диапазоне частот (рис. 10). При $\theta = 85^\circ$ наибольший контраст наблюдается в диапазоне частот 1 МГц – 50 МГц (рис. 11), причем величины k_ω и k_E не влияют на данный параметр. Фазовая характеристика ведет себя несколько по-иному. Влияние k_ω и k_E не проявляется: при $f_2 = 200$ МГц $\varphi_{\Delta R} = -0,018$ рад; при $f_2 = 1$ ГГц $\varphi_{\Delta R} \approx 0$ рад.

При нормальном и скользющем падении двухчастотной ЭМВ наибольший контраст на границе контура АС проявляется в низкочастотной части исследуемого диапазона частот (100 - 200 МГц). Зондирование на более высоких частотах оказывается эффективным для этих целей при наклонном падении ЭМВ.

Таким образом, приведенный метод может быть использован для разработки способов поиска и выделения углеводородных залежей на основе двухчастотного взаимодействия.

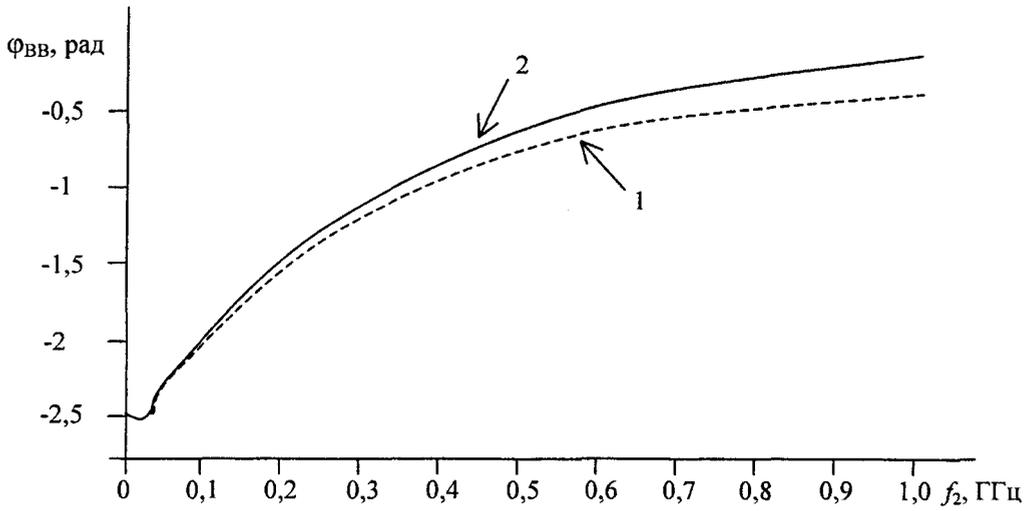


Рис. 9. Зависимости $\Phi_{\Delta R} = \varphi(f_2)$ при $\theta = 50^\circ$:
 1 – для $k_\omega = 10^{-6}$, $k_E = 10^{-6}$; 2 – для $k_\omega = 10^{-6}$, $k_E = 10^{-1}$

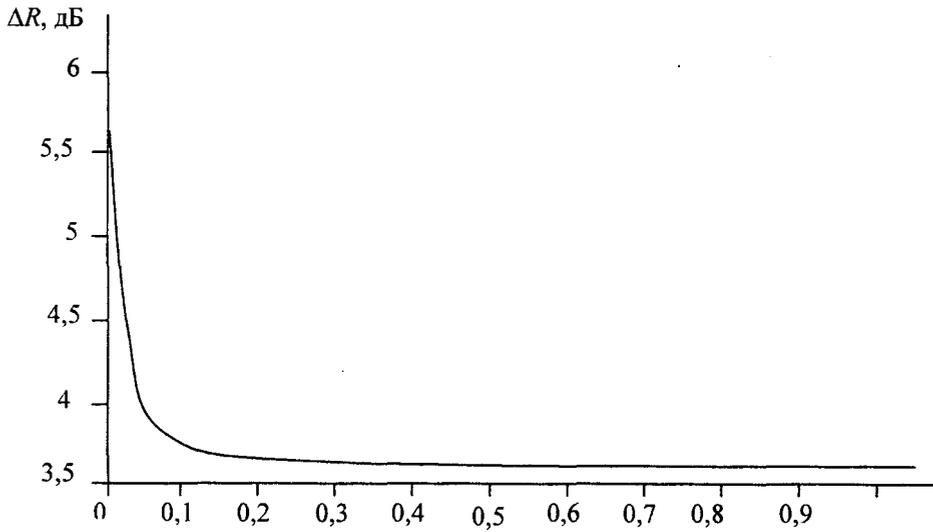


Рис. 10. Зависимость $\Delta R = \varphi(f_2)$ при $\theta = 85^\circ$

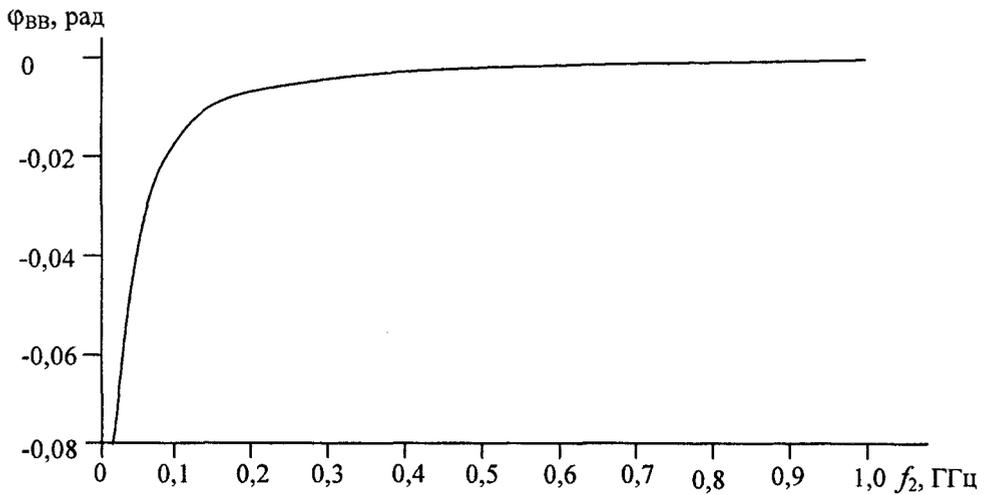


Рис. 11. Зависимость $\Phi_{\Delta R} = \varphi(f_2)$ при $\theta = 85^\circ$