

**ЭЛЕКТРОНИКА**

УДК 621.371:550.837.6

**ТРАНСФОРМАЦИЯ СПЕКТРАЛЬНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИМПУЛЬСНОГО СИГНАЛА ОТРАЖЕННОГО ОТ АНИЗОТРОПНОГО ОБРАЗОВАНИЯ С ТВЕРДЫМ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМ НАПОЛНИТЕЛЕМ**

Д.В. ГОЛОЛОБОВ, И.А. КАЧАН, К.В. КУНАШКО

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь**Поступила в редакцию 14 января 2010*

Проведена оценка трансформации спектральных характеристик импульсных сигналов прямоугольной формы, отраженных от анизотропного образования с твердым диэлектрическим наполнителем.

*Ключевые слова:* анизотропная среда, импульсный сигнал, спектральная характеристика, угол падения и отражения.

**Введение**

Для решения задач поиска, обнаружения и контроля объектов с конечными электродинамическими параметрами, находящихся на фоне относительно однородной подстилающей среды широко используются импульсные методы. Особый интерес представляет задача обнаружения анизотропных неоднородностей (АН), проявляющих плазмоподобные свойства за счет специфических физико-химических процессов, связанных с ее формированием. Строгое теоретическое обоснование процесса взаимодействия импульсных сигналов (ИС) с такими неоднородностями практически отсутствует. Основы построения систем радиолокационного подповерхностного зондирования объектов с одноосной анизотропией приведены в работе [1]. Однако они не затрагивают вопросов, связанных с трансформацией спектральной характеристики отраженного сигнала, влияния параметров подстилающей среды на отдельные составляющие амплитудно-частотной (АЧХ) и фазочастотной характеристики (ФЧХ) сигнала.

Безусловным преимуществом импульсного сигнала является его высокая средняя мощность и широкополосность по сравнению с гармоническим колебанием.

Возможные искажения импульсов выражаются не только в трансформации его формы, но и наложении на нее колебания от активной АН. Например, в электромагнитной разведке полезных ископаемых по низкочастотной составляющей дополнительного поля, возникающего за счет естественных условий залегания объектов со специфическими электродинамическими параметрами, проводят оценку конкретной геологической неоднородности [2]. Согласно электродинамической модели, описанной в этой работе, объем редуцированных пород над залежью играет роль индуктивности, а нефть — роль диэлектрика, подошва и надзалежная кромка — роль обкладок конденсатора. Таким образом, вся система является резонансной и генерирует колебания, определяемые геометрическими размерами конденсатора и глубиной залегания углеводородной залежи (УВЗ). В таком случае только за счет сепарации спектра сложного отраженного сигнала может быть достигнуто извлечение низкочастотного колебания из смеси импульсного и квазигармонического сигнала. При этом следует сформировать такой зондирующий сигнал, чтобы максимально разделить два колебания. Это существенно упрощает решение задачи фильтрации полезного (для приведенного примера — естественного излучения от УВЗ)

сигнала и оценку трансформации первоначального сигнала, воздействующего на среду с потерями.

Задачи, связанные с оценкой поведения электромагнитного поля на однородно-анизотропной границе, имеют сложности, определяемые физико-химическими особенностями возникающей анизотропии.

В работе рассмотрены результаты анализа трансформации спектральных характеристик отраженного ИС от среды с анизотропными свойствами плазмаподобного типа, имеющей плотный диэлектрический наполнитель.

### Основная часть

Пусть электромагнитная волна (ЭМВ) с вертикальной поляризацией падает на поверхность, разделяющую два полупространства, характеризуемые своими электродинамическими параметрами: верхнее —  $\epsilon_1, \mu_1, \sigma_1$  и нижнее, обладающее анизотропными свойствами —  $\xi_2, \mu_2, \sigma_2$  (рис. 1). Волна падает на границу раздела под произвольным углом  $\theta_n$ , отсчитываемым от внешней нормали, совпадающей с осью OZ. Отраженная ЭМВ характеризуется пространственными координатами, определяемыми углом отражения  $\theta_o$ . Плотность потока мощности падающей и отраженной волны определяется векторами Пойтинга  $\Pi_n$  и  $\Pi_o$ . Вектор поля подмагничивания  $H_r$  лежит в плоскости XOZ и ориентирован перпендикулярно границе раздела двух сред.

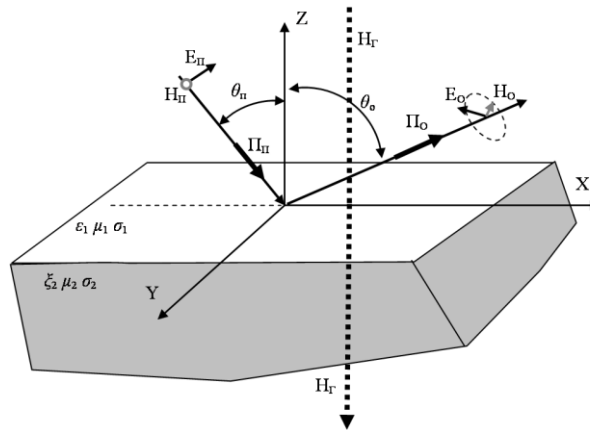


Рис. 1. Падение ЭМВ на анизотропную среду

ИС имеет следующую амплитудно-временную параметрическую зависимость

$$s(t) = s(A, Q, \omega), \quad (1)$$

где  $A$  — амплитуда импульса;  $Q=T/\tau$  — скважность;  $\omega=2\pi f$  — круговая частота.

В общем случае произвольное импульсное периодическое воздействие представляется рядом Фурье в комплексной форме

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n e^{j(n\omega_1 t - \varphi_n)}$$

с коэффициентами

$$c_n = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} s(t) e^{-jn\omega_1 t} dt = C_n(\omega) \exp(-j\varphi_n(\omega)) \quad (2)$$

где  $n$  — номер гармоники;  $\omega_1$  — частота первой гармоники;  $C_n(\omega), \varphi_n(\omega)$  — амплитудный и фазовый спектры.

Если рассматривать непериодический ИС, то его частотные свойства характеризуется спектральной плотностью, определяемой прямым преобразованием Фурье:

$$S(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)e^{-j\omega t} dt = S(\omega) \exp j\phi(\omega). \quad (3)$$

АН является многопараметрической, и обобщенная функция, описывающая ее физические свойства, характеризуется электродинамическими параметрами наполнителя  $\epsilon_r, \mu_r$ ;  $\sigma_r$  — диэлектрическая, магнитная проницаемости и проводимость; компонентами потока частиц  $N_i, v_i$  — концентрация частиц  $i$ -го сорта и частоты их столкновения;  $k_n, k_m$  — коэффициенты соотношения концентраций и масс частиц:

$$\Psi = \Psi(\epsilon_2, \xi_2, \mu_2, N_i, v_i, k_n, k_m, H_0, \omega). \quad (4)$$

При воздействии под произвольным углом  $\theta_n$  на АН, имеющей заданный комплект электродинамических параметров, набора волн с электрической напряженностью поля  $\vec{E} = E_m \exp j(n\omega_1 t - \vec{k}r)$  вертикальной поляризации, коэффициент отражения (коэффициент Френеля) определяется выражениям

$$\dot{R}_B = \frac{u_1 \cos \theta_n + u_3 (\cos^2 \theta_n - 1)}{u_2 \cos \theta_n + u_3 (\cos^2 \theta_n + 1)} = R_B \exp j\phi_B, \quad (5)$$

где  $u_{1,2} = \sqrt{\epsilon_R \epsilon_L} \pm 1$ ,  $u_3 = \sqrt{\epsilon_R} + \sqrt{\epsilon_L}$ ,  $u_4 = \epsilon_R + \epsilon_R \epsilon_L + \epsilon_L$ , а  $\epsilon_R$  и  $\epsilon_L$  — комбинационные элементы (КЭТ) тензора диэлектрической проницаемости (ТДП) [2].

При этом появляется кроссполяризация компонента

$$\dot{R}_{BG} = \frac{2(u_2 - 1)u_3 \cos \theta_n}{u_2 \cos \theta_n + u_3 (\cos^2 \theta_n + 1)} = R_{GB} \exp j\phi_{GB}, \quad (6)$$

обусловленная влиянием АН.

При известных коэффициентах отражения и амплитуде падающей волны несложно определить амплитудные значения гармонических составляющих отраженной волны, как

$$c_{n \text{отр}i} = c_n \overset{\square}{R}_i = C_n(\omega) R_i \exp j(\varphi_n + \phi_i(\omega)), \quad (7)$$

здесь индекс  $i$  введен для разделения вертикальной (5) и кроссполяризации (6) компоненты.

Спектральная характеристика отраженной волны при воздействии непериодического ИС оценивается выражением

$$S_{\text{отр}i}(j\omega) = S(\omega) R_i(\omega) \exp j(\varphi(\omega) + \phi_i) = S_{\text{отр}i}(\omega) \exp j\varphi_{\text{отр}i}(\omega), \quad (8)$$

где  $S_{\text{отр}i}(\omega)$  — АЧХ и  $\varphi_{\text{отр}i}(\omega)$  — ФЧХ отраженного сигнала.

### Оценка трансформаций спектра отраженного ИС

Для оценки искажений АЧХ и ФЧХ отраженного сигнала введем несколько параметров позволяющих провести количественное сравнение спектральных характеристик падающей и отраженной ЭМВ (рис. 2):

- ширина нормированной АЧХ по уровню 0,707 —  $2\Delta f_{0,7}$ ;
- уровень  $N$ -го лепестка АЧХ —  $S_N$ ;
- частота  $M$ -го нуля АЧХ —  $f_{0M}$ ;
- изменение фазы  $\Delta\varphi(f) = [\varphi(f) + \varphi_i(f) - n2\pi]$ .

Выбор этих параметров обусловлен возможным сужением главного лепестка и изменением положения нулей АЧХ, которые однозначно связаны с существенной потерей энергии ИС, необходимостью оценки поведения неглавных лепестков спектра, особенно при проявлениях сторонних малоамплитудных колебаний. В случае, если известна частотная характери-

ка коэффициента Френеля, временные параметры ИС следует выбирать так, чтобы его спектральная характеристика подверглась максимальным искажениям.

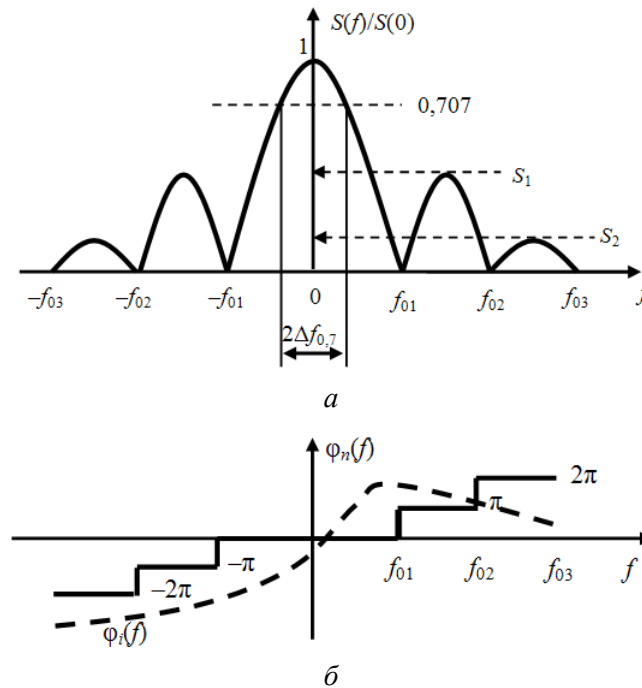


Рис. 2. Оценочные параметры искажений: *a* — АЧХ; *б* — ФЧХ

### Влияние электродинамических параметров магнитоэлектрического наполнителя АН на АЧХ ИС

Проведем анализ трансформаций спектральной характеристики ИС прямоугольной формы с амплитудой 10 В, скважностью  $Q=50$  и длительностью импульса  $\tau=20$  нс при вариациях параметров компонентов потока частиц и наполнителя.

На рис. 3 представлены графики зависимости введенных оценочных параметров АЧХ при изменениях концентрации частиц  $N=10^{15}-10^{19}$  м<sup>-3</sup> для трех углов падения ЭМВ. Как видно, при малых концентрациях  $N=10^{15}-10^{16}$  м<sup>-3</sup> ширина спектра сужается. Причем, чем больше угол падения, тем больше изменяется ширина спектра (рис. 3,а). Боковые лепестки АЧХ растут с увеличением концентрации частиц (рис. 3,б). Если оценивать коридор спектральной плотности, соответствующий принятым граничным значениям концентраций, то оказывается, что он уменьшается с увеличением номера лепестка. Так для принятых параметров ИС эти коридоры соответствуют:  $\Delta S_1=130$  мкВ/Гц,  $\Delta S_2=90$  мкВ/Гц,  $\Delta S_3=70$  мкВ/Гц. При увеличении угла наклона падающей волны до  $60^\circ$  на больших концентрациях происходит увеличение уровня боковых лепестков, а при  $\theta_{\text{п}} > 60^\circ$  параметр резко уменьшается.

Изменение частот столкновения частиц (учитываются наиболее энергоемкие столкновения между электронами и ион-электронные) оказывает противоположное воздействие на ширину главного лепестка АЧХ (рис. 4,а) — с ростом частоты столкновения электронов, когда коэффициент соотношения масс электрона и иона остается постоянным, происходит сужение ширины главного лепестка. Причем крутизна сужения ширины спектра  $K(\nu)=\Delta F/\Delta \nu$  увеличивается с ростом частоты столкновений. Боковые лепестки АЧХ ИС резко уменьшаются с ростом частоты столкновений (рис. 4,б). Увеличение угла наклона падающей ЭМВ приводит к большему уменьшению боковых лепестков.

Рассмотрим вопрос о влиянии параметров магнитоэлектрического наполнителя на спектральную характеристику ИС. На рис. 5,а приведена зависимость ширины главного лепестка АЧХ от относительной диэлектрической проницаемости и углов падения ЭМВ. Как видно, при изменении диэлектрической проницаемости наполнителя в пределах 5–15 ширина главного лепестка не изменяется, а увеличение угла падения ЭМВ приводит к дискретному

уменьшению ширины этого лепестка. Уровень боковых лепестков АЧХ уменьшается с ростом диэлектрической проницаемости при углах падения ЭМВ  $\theta_{\Pi} < 60^\circ$  (рис. 5,б), а при  $\theta_{\Pi} = 80^\circ$ , наоборот, возрастает (на рисунке показано стрелочкой).

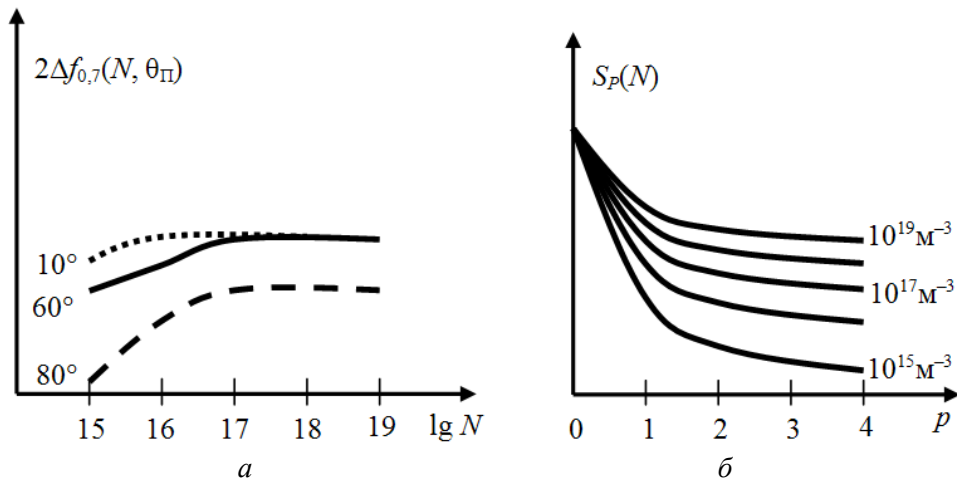


Рис. 3. Влияние концентраций частиц на оценочные параметры:  
 $a$  — ширину главного лепестка;  $b$  — уровень боковых лепестков для  $\theta_{\Pi} = 10^\circ$

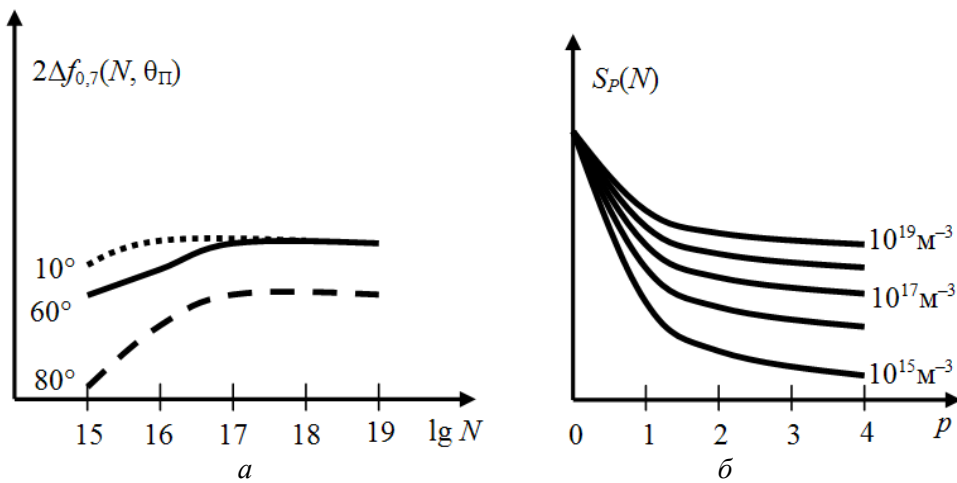


Рис. 4. Влияние частот столкновения частиц на оценочные параметры:  
 $a$  — ширину главного лепестка;  $b$  — уровень боковых лепестков для  $\theta_{\Pi} = 10^\circ$

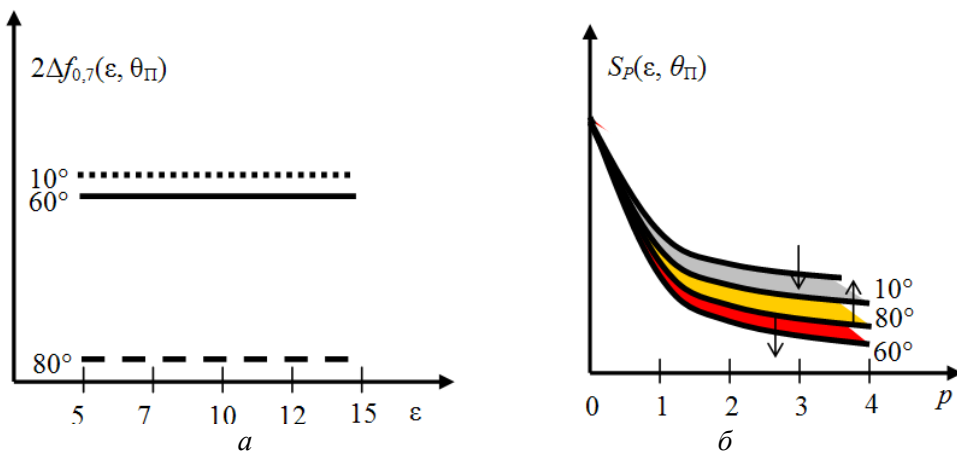


Рис. 5. Влияние диэлектрической проницаемости наполнителя на оценочные параметры:  
 $a$  — ширину главного лепестка;  $b$  — уровень боковых лепестков

При изменении удельной проводимости наполнителя в пределах  $0,1-0,0001$  См/м ширина главного лепестка АЧХ возрастает при больших проводимостях (рис. 6,а). Уровень боковых лепестков изменяется незначительно. По мере возрастания номера лепестка и проводимости уровень боковых лепестков изменяется в пределах объема показанного на рис. 6,б.

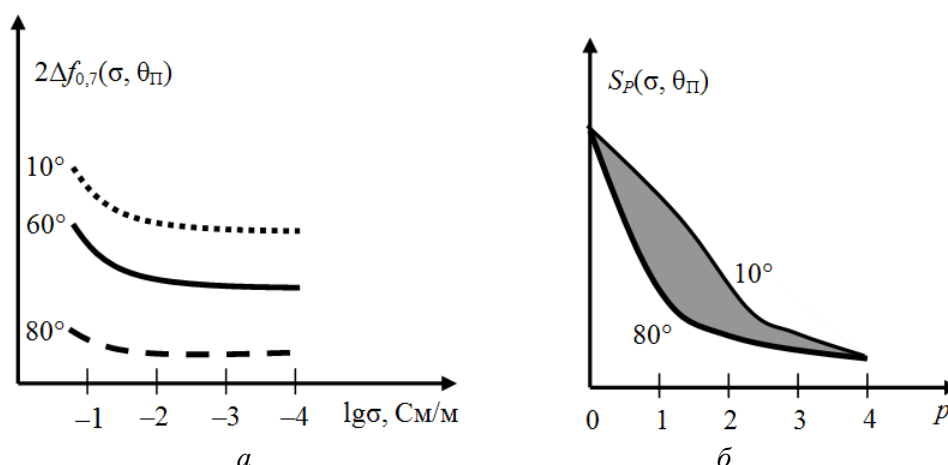


Рис. 6. Влияние проводимости наполнителя на оценочные параметры:  
 $a$  — ширину главного лепестка;  $b$  — уровень боковых лепестков

#### Влияние электродинамических параметров магнетодиэлектрического наполнителя АН на ФЧХ ИС

Анализ трансформаций ФЧХ ИС при изменении компонентов потока частиц и электродинамических параметров наполнителя свидетельствует о существенном влиянии угла падения волны при изменениях концентраций и частот столкновения частиц.

На рис. 7,а приведена ФЧХ отраженного сигнала, характерная для изменений диэлектрической проницаемости и проводимости при вариациях углов наклона падающей ЭМВ. Эта же характеристика соответствует изменению концентраций частиц при  $\theta_{П}=10^\circ$ . Когда  $\theta_{П}=60^\circ$ , фазовая характеристика существенно изменяется (рис. 7,б). Во-первых, ФЧХ становится квазилинейной, во-вторых, появляется инверсия фазы на  $90^\circ$  в первом нечетном лепестке при низких концентрациях частиц.

Одновременное изменение частот столкновений частиц и угла падения ЭМВ кардинально влияет на ФЧХ отраженного сигнала. Если при  $\theta_{П}=10^\circ$  наблюдается резкое изменение фазы в первом нечетном лепестке спектра (рис. 7,в), то при  $\theta_{П}=60^\circ$  скачки фазы проявляются в первом, втором и последующих лепестках (рис. 7,г).

#### Результаты и их обсуждение

В результате численных исследований процесса взаимодействия ИС и АН установлены закономерности трансформации спектральной характеристики отраженного сигнала при вариациях компонентов потока частиц и электродинамических параметров наполнителя. Для фиксированной скважности прямоугольных импульсов характерным является сужение главного лепестка спектра и увеличение его старших (боковых) лепестков. С ростом частоты столкновения частиц при постоянном коэффициенте соотношения масс электрона и иона также происходит сужение ширины главного лепестка, а боковые лепестки АЧХ резко уменьшаются. При изменении диэлектрической проницаемости наполнителя ширина главного лепестка не изменяется, а увеличение угла падения ЭМВ приводит к дискретному уменьшению ширины этого лепестка, уровень боковых лепестков АЧХ уменьшается с ростом диэлектрической проницаемости при изменении угла падения. Увеличение удельной проводимости наполнителя приводит к расширению главного лепестка АЧХ, а уровень боковых лепестков изменяется незначительно.

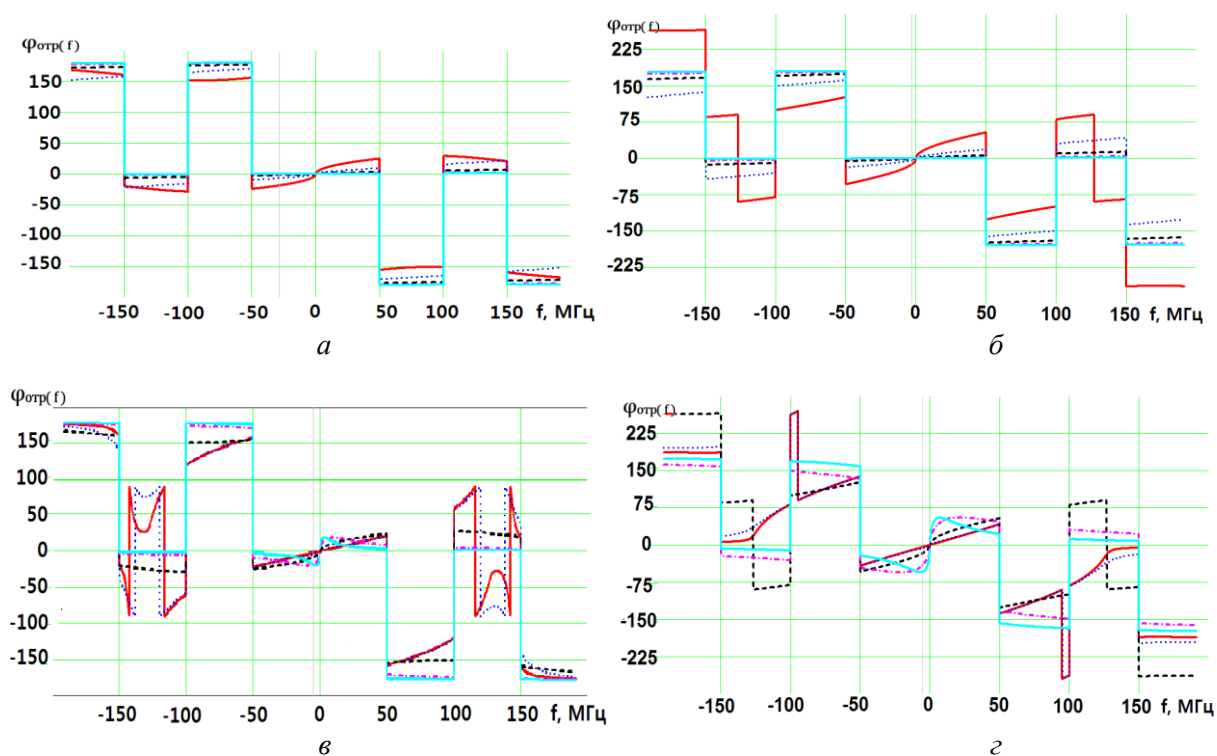


Рис. 7. Влияние концентрации ( $a, б$ ) и частот столкновения ( $в, г$ ) частиц на ФЧХ ИС при углах падения ЭМВ  $10^\circ$  ( $a, в$ ) и  $60^\circ$  ( $б, г$ )

## TRANSFORMATION OF SPECTRAL CHARACTERISTICS OF AN IMPULSE SIGNAL AT INFLUENCE ON ANISOTROPIC FORMATION WITH DIELECTRIC FILLING

D.V. GOLOLOBOV, I.A. KACHAN, K.V. KUNASHKO

### Abstract

The estimation of transformation of spectral characteristics of impulse signals of the rectangular shape reflected from anisotropic formation with a solid magnetic-dielectric filling medium is investigated.

### Литература

1. Финкельштейн М.И., Кутев В.А., Золоторев В.П. Применение радиолокационного подповерхностного зондирования в инженерной геологии. М., 1986.
2. Гололобов Д.В. Взаимодействие электромагнитных волн и углеводородных залежей. Минск, 2009.