

УДК 621.396.96

С.А. Горельшев

Академия Внутренних Войск МВС Украины, Харьков

## АНАЛИЗ СТАЦИОНАРНОЙ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИИ СЛОИСТОЙ СРЕДЫ

В статье исследовано рассеяния плоской волны на слоисто-однородном (стратифицированном) полупространстве с произвольными комплексными проницаемостями слоев. Проведены математические расчеты и анализ стационарных передаточных функций различных моделей стратифицированного материального полупространства при различных условиях зондирования и расположения точек наблюдения.

**Ключевые слова:** стационарная передаточная функция, стратифицированное полупространство, комплексная проницаемость, граница раздела.

### Введение

**Постановка проблемы.** Для ряда задач дистанционного зондирования слоистой материальной среды, а также объектов, находящихся вблизи поверхности такой среды, представляет интерес решение задачи получения стационарной передаточной функции слоисто-однородного полупространства.

Свойства волны, прошедшей в слоистую среду или отраженной от границ раздела в установившемся режиме, полностью определяются стационарной передаточной функцией [1] (отношением комплексных амплитуд рассеянного электрического поля в произвольной точке пространства и падающего поля при различной частоте зондирования).

Передаточная функция материальной среды зависит от частоты падающей волны, условий облучения, а также структуры слоистого полупространства. Для оценки вторичного излучения объектов, находящихся вблизи слоисто-однородного полупространства важно уметь рассчитывать характеристики отраженной волны, а для задач подповерхностного зондирования – характеристики прошедшей волны в слоисто-однородную материальную среду.

**Анализ последних публикаций и исследований.** Для весьма частных случаев эта задача уже получила решение в работах ряда авторов [1 – 3]. Однако, при расчетах накладывались некоторые ограничения, например рассматривался случай нормального падения монохроматической волны на границу однородного полупространства и произвольного падения волны на двухслойное полупространство. Но даже в этих случаях подробного анализа стационарной передаточной функции в широком диапазоне частот не проводилось, хотя это представляет несомненный интерес для решения практических задач зондирования.

В ряде случаев необходимо рассматривать слоисто-однородную среду с количеством слоев большим двух. В частности, земная поверхность с большой достоверностью описывается слоисто-однородным полупространством с произвольным количеством слоев  $m$  (рис. 1). При этом области

$G_j (j = 0, 1, \dots, m)$ , на которые разбито полупространство, имеют произвольную толщину  $\delta_j$  и комплексные проницаемости  $\epsilon_j, \mu_j$ . Эта модель достаточно точно описывает реальную ситуацию, учитывая порядок залегания различных геологических пород и их электродинамических характеристик.

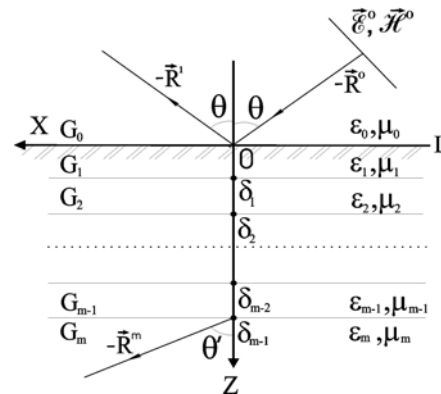


Рис.1. Модель слоисто-однородного полупространства

При решении данной задачи учитывались дисперсионные свойства слоев зондируемого полупространства. Комплексная диэлектрическая проницаемость слоев рассчитывалась по формуле  $\epsilon_j = \epsilon_{rj} (1 + iq_j)$ , приведенной в [1], где  $q_j = \sigma_j / \omega \epsilon_{rj}$  – тангенс угла потерь,  $\sigma_j$  – эквивалентная проводимость,  $\omega$  – круговая частота,  $\epsilon_{rj} = \epsilon'_{rj} \epsilon_0$  – вещественная диэлектрическая проницаемость.

В отличие от известных методов решения задачи рассеяния плоской монохроматической волны на полупространстве, метод расчета, предложенный в [4], основан непосредственно на решении граничной задачи для системы стационарных уравнений Максвелла, хорошо приспособлен к нахождению комплексных амплитуд полей в любой точке пространства (в том числе, в любом из слоев стратифицированного полупространства) при произвольных углах падения и поляризации падающей плоской волны.

Целью статьи является математическое моделирование и анализ стационарной передаточной функции слоисто-однородного полупространства с комплексными параметрами слоев при различных условиях зондирования и расположении точки наблюдения.

### Изложение основного материала

Используя методику расчета стационарной передаточной функции среды, изложенную в [4], было проведено математическое моделирование зависимости модуля стационарной передаточной функции от частоты не только для однородной среды (т.е. материальная среда представляет один слой с бесконечной толщиной), но и для среды состоящей из нескольких слоев различной толщины. Для исследований были взяты следующие модели:

– модель однородного полупространства с параметрами сухой почвы:

$$\varepsilon' = 7, \sigma = 10^{-3} \text{ См/м}, \rho = 2,58 \cdot 10^6 / f, \mu = 1;$$

– модель однородного полупространства с параметрами влажной почвы:

$$\varepsilon' = 15, \sigma = 1,2 \cdot 10^{-2} \text{ См/м}, \rho = 14,4 \cdot 10^6 / f, \mu = 1;$$

– модель, состоящая из двух слоев – влажная почва (верхний слой) с изменяющейся толщиной, и сухая почва. Третья модель описывает состояние материальной среды, возникающее либо во время дождя, либо после него, когда почву уже нельзя рассматривать как однородное полупространство. Расчеты проводились в широком диапазоне частот 1 кГц...10 ГГц. Результаты расчетов приведены на рис. 2 – 5.

На рис. 2 приведены зависимости значения модуля стационарной передаточной функции  $|E(d, f)|$  на границе раздела воздушной среды и материального полупространства ( $d = 0$ ) при приближении к границе из материальной среды от изменения частоты. Зависимости  $|E(d, f)|$  для различных моделей пронумерованы следующим образом: 1 – модель однородного полупространства сухой почвы, 2 – аналогичная модель для влажной почвы, 3...6 – модели, состоящие из двух слоев при различной толщине первого слоя (влажная почва): 3 – толщина 1 см, 4 – толщина 10 см, 5 – толщина 50 см, 6 – толщина 2 м. При зондировании плоской волной однородного полупространства наблюдается в низкочастотном диапазоне (верхняя граница  $f_1 = 0,51 \text{ МГц}$  – сухая земля и  $f_1 = 2,84 \text{ МГц}$  – влажная земля) возрастание величины модуля передаточной функции практически пропорционально  $\sqrt{f}$  (рис. 2, б; график 1, 2). В высокочастотном диапазоне (нижняя граница  $f_h = 12,8 \text{ МГц}$  – сухая земля и  $f_h = 72 \text{ МГц}$  – влажная земля) происходит установление значения модуля передаточной функции и зависимости от изменения частоты не наблюдается (рис. 2, в.). Ус-

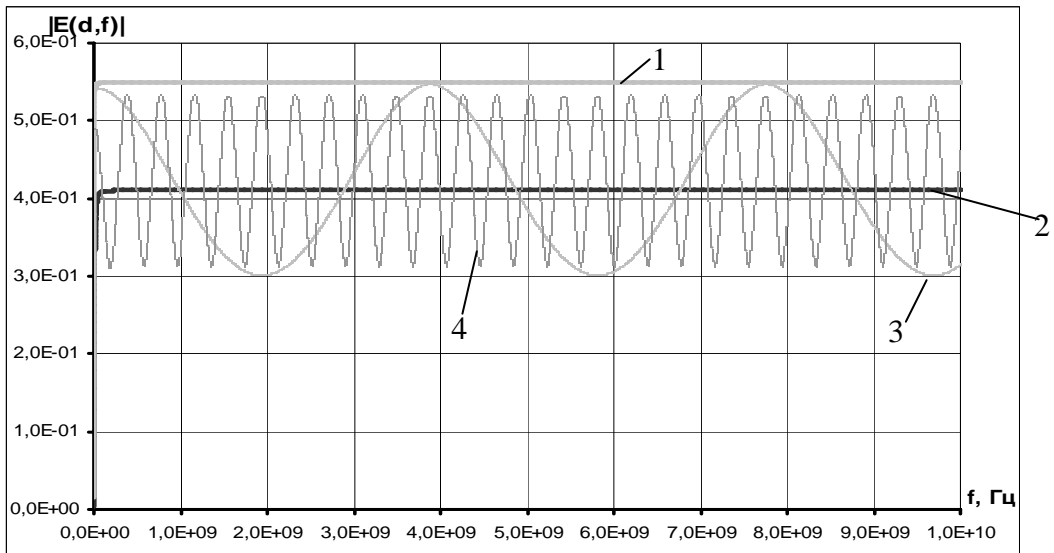
тановившиеся величины модуля передаточной функции для различных сред неодинаковые и зависят от параметров  $\varepsilon, \mu$ . Так, для сухой почвы это значение равно 0,5485, а для влажной – 0,4103 (табл. 1).

Интерес представляют результаты, полученные для модели, состоящей из двух слоев, причем толщина первого слоя переменна. Эти результаты приведены на рис. 2 (графики 3 – 6). Видно, что при слоистой структуре полупространства модуль передаточной функции материальной среды имеет гармонический характер. При этом параметры гармоник (амплитуда колебаний, период колебаний и средняя величина) зависят от толщины первого слоя (табл. 1). Так, при увеличении толщины слоя влажной почвы, происходит уменьшение средней величины модуля передаточной функции. Однако для всех этих моделей эта величина лежит в промежутке между «крайними» случаями – сухое или влажное полупространство. Размах гармонических колебаний уменьшается с увеличением толщины слоя и при толщине влажной почвы 2 м (график 6 рис. 2, в) колебания происходят вблизи графика 2, который соответствует влажному полупространству. При дальнейшем увеличении толщины первого слоя – влажной почвы – происходит переход в «крайний» случай (влажное полупространство). Из рис. 2 и табл. 1 видно, что период гармонических колебаний обратно пропорционален толщине первого слоя.

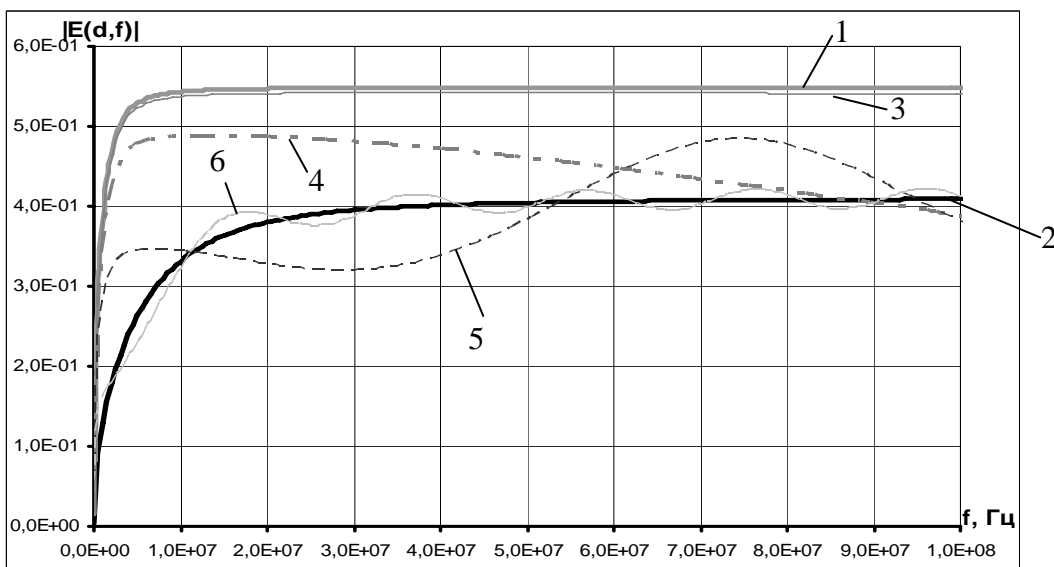
В низкочастотном диапазоне модуль стационарной передаточной функции большей частью еще не установился и происходит увеличение среднего значения модуля функции по экспоненциальному закону (рис. 2, б).

Были получены аналогичные зависимости модуля стационарной передаточной функции от частоты при  $d = 3$  м (рис. 3). Как и следовало ожидать, при увеличении глубины наблюдается более сильное затухание электромагнитных волн во влажной почве, чем в сухой. Так на глубине 3 м модуль передаточной функции в сухой почве составляет приблизительно 20% от его значения на границе раздела (на глубине 3 м – 0,4426; на границе – 0,5485), а во влажной – 83% (0,0711 и 0,4103 соответственно).

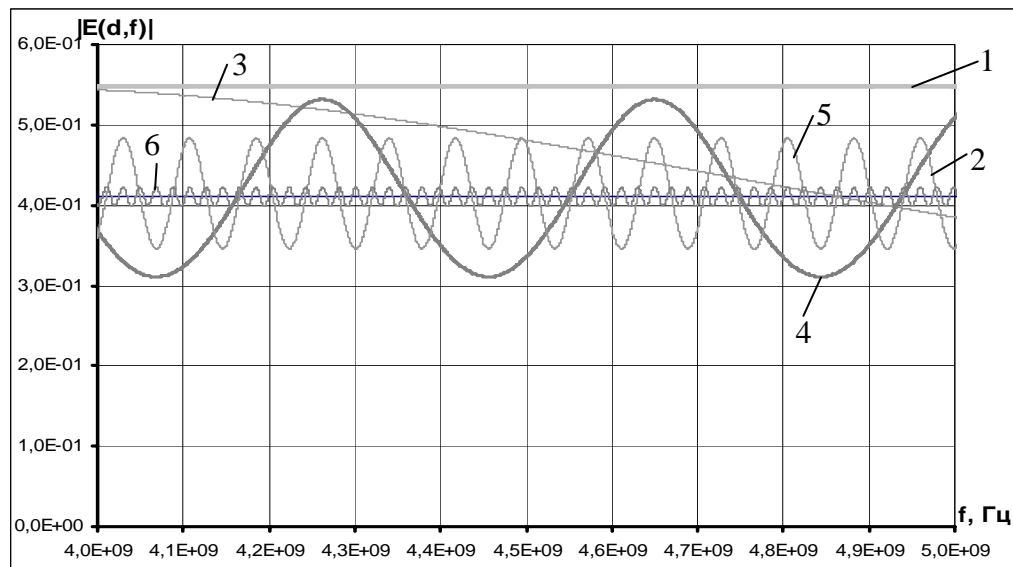
В слоистой среде передаточная функция также носит гармонический характер, причем периоды гармоник не зависят от глубины точки наблюдения, а зависят только от толщин слоев (в нашем случае, первого слоя). На рис. 3 мы наблюдаем, уменьшение средних величин гармоник при увеличении толщины влажного слоя и, по сравнению с рис. 2, а, видим их значительные различия. Это связано с тем, что чем больше толщина слоя влажной земли, тем сильнее происходит ослабление поля в этом слое. При толщине слоя влажной земли 2 м, в отличие от значения передаточной функции на границе, на глубине 3 м среднее значение гармоники модуля передаточной функции не достигает «крайнего» случая – однородного влажного полупространства.



а



б



в

Рис. 2. Частотная зависимость модуля стационарной передаточной функции на границе слоистого полупространства (а – весь частотный диапазон, б – низкочастотный диапазон, в – «вырезка» из высокочастотного диапазона)

Параметры колебаний модуля стационарной передаточной функции на границе слоистого полупространства.

Модель слоистого полупространства	Минимальное значение	Максимальное значение	Размах колебаний	Среднее значение	Период, ГГц
сухая земля	–	0,5485	–	–	–
влажная земля 1 см – сухая земля	0,3009	0,5467	0,2457	0,4238	3,88
влажная земля 10 см – сухая земля	0,3108	0,5316	0,2207	0,4212	0,388
влажная земля 50 см – сухая земля	0,3456	0,4834	0,1377	0,4145	0,077
влажная земля 2 м – сухая земля	0,3986	0,4223	0,0237	0,4104	0,019
влажная земля	–	0,4103	–	–	–

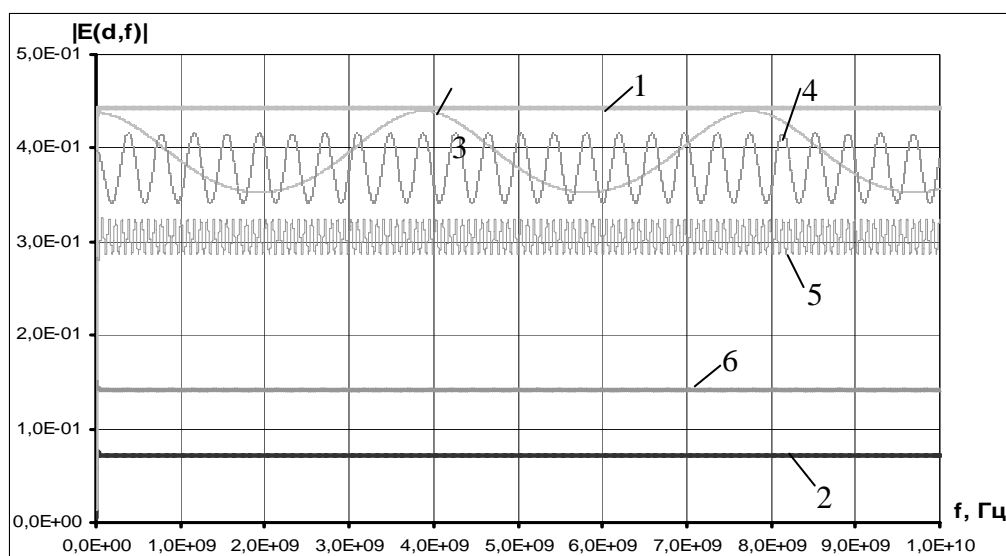


Рис. 3. Частотная зависимость модуля стационарной передаточной функции слоистого полупространства на глубине 3 м

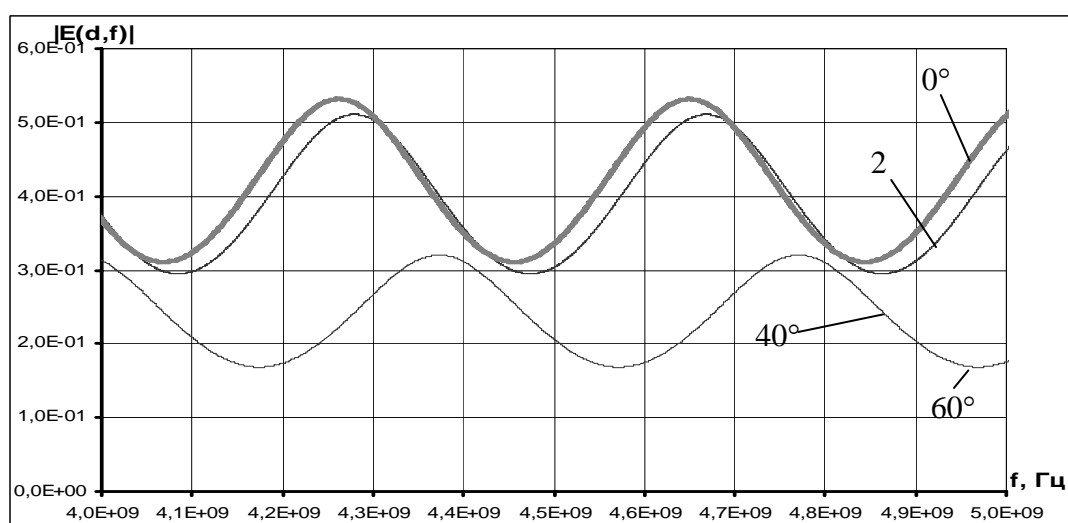


Рис. 4. Частотная зависимость модуля стационарной передаточной функции на границе двухслойного полупространства при различных углах падения («вырезка» из высокочастотного диапазона)

Разработанная методика расчета передаточной функции слоисто-однородной материальной среды позволяет провести математическое моделирование ситуаций, когда зондирование осуществляется не только по нормали к границе раздела, но и под произвольным углом. На рис. 4 приведены зависимости модуля передаточной функции среды, состоящей из двух слоев – влажная почва толщиной 10 см и сухая почва, при четырех различных углах падения. Значение стационарной передаточной функции рассчитывались в двухслойном материальном полупростран-

стве вблизи границы раздела сред. При увеличении угла падения наблюдается увеличение периода гармоник, что связано с увеличением длин геометрических путей до границы раздела первого и второго слоев. Кроме того, наблюдается уменьшение амплитуд передаточной функции при увеличении угла падения, так как большая часть волны отражается от границы воздушная среда и двухслойное полупространство. Из графиков видно, что при увеличении угла падения появляется смещение максимумов гармонических колебаний передаточной функции впра-

во, причеи смещение не пропорционально величине угла падения. Кроме того, были проведены расчеты стационарной передаточной функции в случае отражения от слоистого полупространства на высоте 10 м. Зондирование материальной среды осуществлялось по нормали к границе раздела.

Математические расчеты модуля передаточной функции слоисто-однородного материального полупространства (условия аналогичные предыдущим

расчетам) приведены на рис. 5. На этом рисунке график 1 соответствует отражению от материального полупространства – сухая почва, 2 – материального полупространства – влажная почва, 3 – модели первый слой влажная почва толщиной 1 см, второй – сухая и 4 – влажная почва толщиной 10 см, второй – сухая почва. При отражении наблюдается гармонический характер модуля передаточной функции при наличии двухслойной структуры.

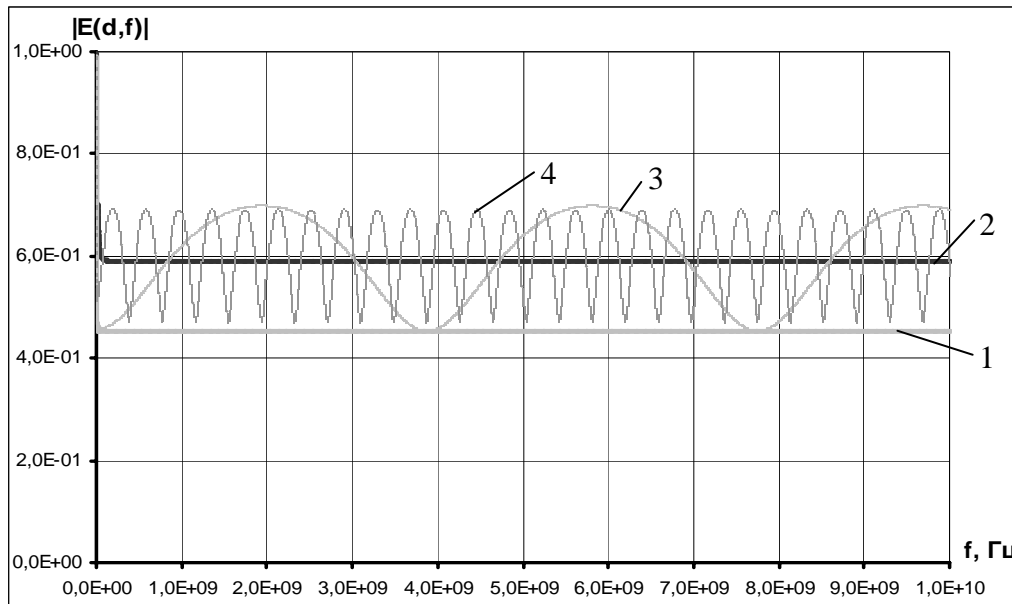


Рис. 5. Частотная зависимость модуля стационарной передаточной функции при отражении от границы слоистого полупространства на высоте 10 м

## Выводы

Таким образом, было проведено математическое моделирование стационарной передаточной функции слоистой материальной среды при различных количествах и толщинах слоев, произвольных углах падения и на различной глубине. Кроме того, промоделирована ситуация отражения волны от границы раздела слоистого полупространства.

В статье приведены зависимости модуля стационарной передаточной функции, которые позволяют сделать обоснованные выводы о влиянии материального полупространства на рассеяние радиолокационного сигнала при различных состояниях среды и условиях зондирования.

## Список литературы

1. Кинг Р., Смит Г. Антенны в материальных средах. – М.: Мир, 1984. – 882 с.
2. Nabulsi Khalid A. and Wait James R. Ray decomposition of the pulse responses of a two-layer half-space // IEEE Tr. On Geoscience and Remote Sensing. – 1997. – V. 35, № 2. – P.1 – 6.
3. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. – М.: Издательство АН СССР, 1957. – 365 с.
4. Фундаментальные и прикладные задачи теории рассеяния электромагнитных волн / Ю.К. Сиренко, И.В. Сухаревский, О.И. Сухаревский, Н.П. Яшина. – Х.: Крок, 2000. – 344 с.

Поступила в редколлегию 4.08.2008

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О.И. Сухаревский, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

## АНАЛІЗ СТАЦІОНАРНОЇ ПЕРЕДАТНОЇ ФУНКЦІЇ ШАРУВАТОГО СЕРЕДОВИЩА

С.А. Горелишев

Досліджено розсіювання плоскої хвилі на шарувато-однорідному (стратифікованому) півпросторі з довільними комплексними проникністями шарів. Проведено математичні розрахунки та аналіз стаціонарних передатних функцій різних моделей стратифікованого матеріального півпростору при різних умовах зондування та розташування крапок спостереження.

**Ключові слова:** стаціонарна передаточна функція, стратифікований півпростір, комплексна проникність, межа розділу.

## ANALYSIS OF STATIONARY TRANSFER FUNCTION OF THE LAYERED-UNIFORM HALF-SPACE

S.A. Gorelushev

In this article examine the scattering problem of the plane wave on of the layered-uniform half-space with arbitrary complex permeabilities of layers. Mathematical calculations and the analysis of stationary transfer functions of various models of the layered-uniform half-space are lead under various conditions of sounding and an arrangement of points of supervision.

**Keywords:** stationary transfer functions, layered-uniform half-space, complex permeabilities.