

УДК 620.176.18

ОБ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПОДПОВЕРХНОСТНЫХ ОБЪЕКТОВ ПО АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ ОТКЛИКА В СВЧ-ДИАПАЗОНЕ

В. П. Лубов, В. М. Грузнов

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3
E-mail: GruznovVM@ipgg.nsc.ru*

Рассмотрены резонансные свойства диэлектрических подповерхностных объектов в СВЧ-диапазоне. Приведены формулы и экспериментальные результаты по определению свойств ряда малоразмерных ($\varnothing \sim 200$ мм) диэлектрических объектов, находящихся в песке влажностью 6 % на глубинах до 8 см, в частотном диапазоне 270–620 МГц, а также металлических пружин, которые могут быть в составе этих объектов, в частотном диапазоне 900–1200 МГц. Показана возможность идентификации объектов по их амплитудно-частотным характеристикам в СВЧ-диапазоне.

Ключевые слова: СВЧ-диапазон, балансные антенные датчики, спектры отраженных сигналов.

Введение. Разработка и совершенствование приборов поиска и идентификации металлических и диэлектрических объектов в непрозрачных средах, в том числе в грунтах, являются актуальными для широкого круга задач инженерной геологии, археологии, дефектоскопии, строительства, поиска мин и т. д. Целью данной работы является исследование возможности идентификации ряда характерных объектов по их амплитудно-частотным характеристикам в частотном диапазоне 270–1200 МГц.

Объемные резонансы некоторых подповерхностных объектов. Косвенными признаками, характеризующими тип подповерхностного объекта, являются его объем и электромагнитные параметры вещества, заполняющего этот объем. Наличие двух и более границ раздела сред приводит к интерференции электромагнитных (ЭМ) волн, рассеянных этими границами, и соответственно к резонансным явлениям.

Перед тем как оценивать частотный диапазон возможных интерференционных эффектов для объемных диэлектрических тел, оценим толщину скин-слоя проникновения в среду ЭМ-поля СВЧ-диапазона, который будет экранировать обнаруживаемый объект. Толщина z_0 экранирующего слоя грунта зависит от его проводимости g и диэлектрической проницаемости ε . Проводимость и относительная диэлектрическая проницаемость большинства поверхностных грунтов определяются их влажностью и в диапазоне частот 250–1500 МГц находятся в пределах $g = 0,20\text{--}0,01$ См/м и $\varepsilon_{\text{отн}} = 18\text{--}3$ [1]. Запишем комплексную постоянную распространения k и выражения для ее вычислений согласно работе [2, с. 348], но в общепринятом виде [3]:

$$k = \sqrt{\omega^2 \mu \varepsilon - i \omega \mu g} = a - ib, \quad (1)$$

где a — фазовый коэффициент:

$$a = \omega \sqrt{\frac{\mu \varepsilon}{2} (\sqrt{1 + \alpha^2} + 1)}; \quad (2)$$

b — коэффициент затухания:

$$b = \omega \sqrt{\frac{\mu \varepsilon}{2} (\sqrt{1 + \alpha^2} - 1)}; \quad (3)$$

ω — круговая частота; μ — магнитная проницаемость; ε — диэлектрическая проницаемость; $\alpha = g/(\omega\varepsilon)$ — отношение плотностей тока проводимости к току смещения.

Толщина слоя среды, в котором напряженность электрического поля уменьшается в e раз, определяется из условия

$$bz_0 = 1. \quad (4)$$

Теперь можно построить семейство кривых зависимости толщины слоя проникновения ЭМ-волн от частоты для грунтов различной влажности. Из работы [4], например, можно определить диэлектрическую проницаемость и проводимость для серого суглинка с эквивалентной сухой плотностью $1,4 \text{ г/см}^3$ при различной влажности. По этим данным и согласно (3), (4) для иллюстрации и общего представления о толщине проникновения ЭМ-волн были построены зависимости, приведенные на рис. 1. Из графиков видно, что для сухих грунтов с частотой проникновения ЭМ-волн до 1000 МГц толщина слоя составляет метры, для влажных грунтов на этих частотах она уменьшается до сантиметров. К примеру, при влажности около 10 % на частотах выше 500 МГц грунт толщиной 10 см снижает амплитуду напряженности ЭМ-поля в e раз.

Если рассматривать обнаруживаемый объект как резонатор с плоскопараллельными поверхностями для плоской ЭМ-волны [5], то для высоты h в пределах 110–180 мм и диаметра 200 мм объекта, заполненного веществом с эффективной относительной диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_{\text{отн}} = 4\text{--}6$, можно ожидать появления резонансных откликов в СВЧ-диапазоне. Основной резонансный отклик будет наблюдаться при выполнении условия $h = \lambda/2$.

Из условия $\alpha = g/(\omega\varepsilon) < 1$ для обнаруживаемых объектов частоты f ожидаемых резонансных откликов будут иметь вид [2, с. 350]

$$f = \frac{V_{\Phi}}{2h} = \frac{1}{2h\sqrt{\varepsilon\mu}}, \quad (5)$$

где V_{Φ} — фазовая скорость ЭМ-волны. При изменении h от 180 до 110 мм и $\varepsilon_{\text{отн}}$ от 6 до 4 резонансные частоты будут находиться в интервале 340–680 МГц.

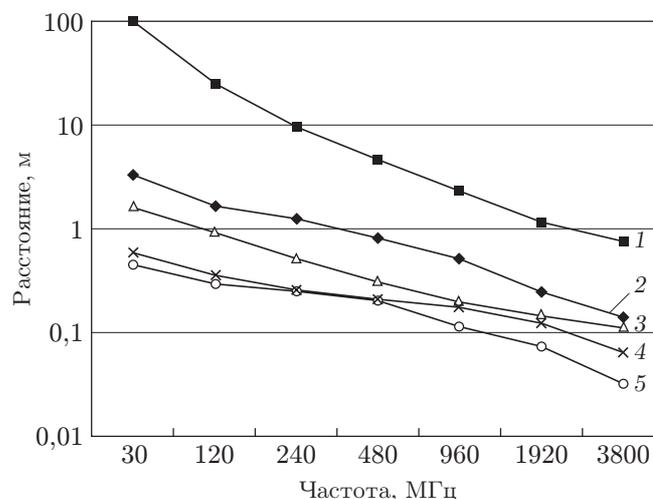


Рис. 1. Зависимости толщины слоя проникновения напряженности ЭМ-волн от частоты для грунтов различной влажности (кривая 1 — влага 0; 2 — 2,5; 3 — 5; 4 — 10; 5 — 20 %)

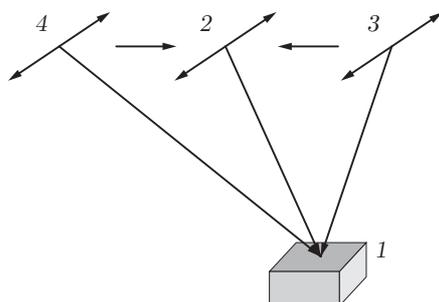


Рис. 2. Расположение вибраторов и объекта в балансной СВЧ-схеме: 1 — объект, 2 — приемный вибратор, 3, 4 — противофазные излучающие вибраторы

Экспериментальная проверка резонансных свойств некоторых подповерхностных объектов. Для проверки резонансных свойств объектов был разработан и изготовлен радиоволновой макет обнаружителя с электронной перестройкой частоты в диапазоне 340–620 МГц. Антенная система макета датчика выполнена по балансной схеме: две излучающие в противофазе антенны и одна приемная между ними с резонансной частотой полуволновых вибраторов около 560 МГц (рис. 2). При этом в качестве антенн применены гребенчатые вибраторы, изготовленные по технологии печатных плат, что позволило расширить полосу резонансных частот на 20 % по сравнению со штыревыми антеннами.

На рис. 3 приведены спектральные характеристики ряда объектов. Сигнал разбаланса \mathcal{B} возникает за счет расстройки приемоизлучающих вибраторов, точная балансировка которых крайне сложна в широком диапазоне частот. Из рисунка видно, что имеются от-

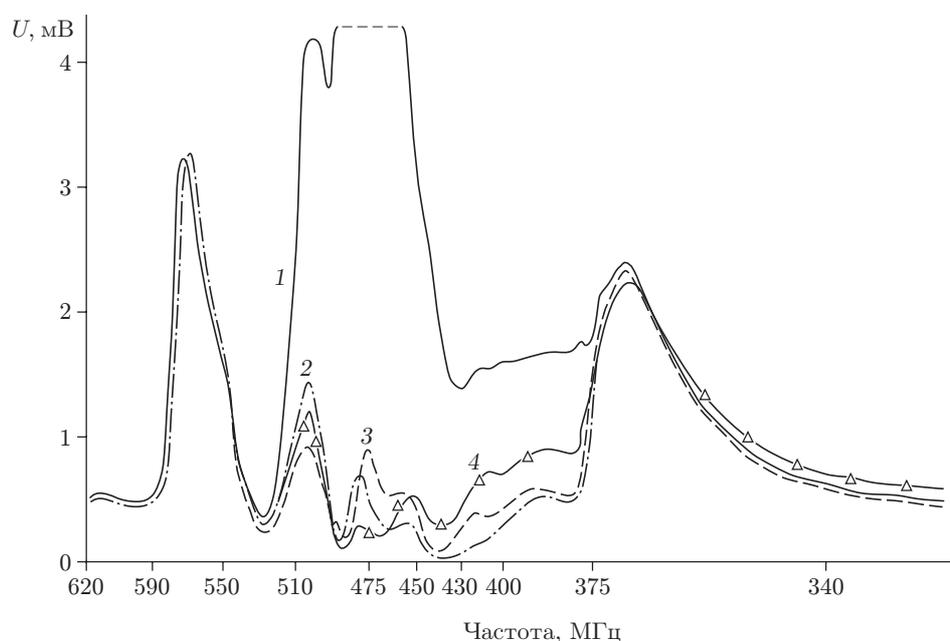


Рис. 3. Спектры резонансного отражения от объектов: кривая 1 — брусок из бука ($h = 180$ мм, $l = 200$ мм, $d = 100$ мм) с $\varepsilon_{\text{отн}} = 4,0\text{--}4,5$ на поверхности песка; 2 — брусок из бука, погруженный в песок на глубину 8 см; 3 — сигнал разбаланса датчика над стендом; 4 — цилиндр: $h = 180$ мм, $\varnothing = 200$ мм, корпус пластиковый, заполненный веществом с $\varepsilon_{\text{отн}} = 4$, находящийся на глубине 8 см в песке

личия сигнала искомого объекта 4 от сигнала разбаланса 3 и сигналов 1, 2 от бруска из бука соответственно в области частот 475 и 400 МГц. Обнаружение объектов подобного типа следует проводить на частотах около 380–400 МГц по увеличению входного сигнала, а идентификацию искомого объекта 4 — по превышению сигнала более чем в 2 раза на частоте 400 МГц по сравнению с сигналом на частоте 475 МГц.

Таким образом, используя свипирование в диапазоне частот 300–500 МГц в СВЧ-устройствах поиска и сопоставляя уровни сигналов на различных частотах, можно провести идентификацию объектов по размерам и относительной диэлектрической проницаемости $\varepsilon_{\text{отн}}$, даже незначительно отличающихся по этим параметрам.

Собственные резонансы пружин. Ряд объектов поиска представляет композицию: пластиковый корпус, диэлектрическое вещество и металлические пружины [5]. Последние также могут иметь резонансные особенности в СВЧ-диапазоне. Для ЭМ-волны металлическая пружина представляет собой спиральную замедляющую систему, обладающую резонансными свойствами. Резонанс наступает в момент, когда длина пружины L сравнивается с половиной длины волны ЭМ-излучения, при этом пружина выполняет роль полуволнового диполя и происходит дополнительное переизлучение на резонансной частоте.

Фазовую скорость ЭМ-волны V_{Φ} в замедляющей системе типа спирали, находящейся в свободном пространстве, можно оценить из соотношения [6]

$$V_{\Phi} = \frac{cS}{\sqrt{(2\pi a)^2 + S^2}}, \quad (6)$$

где c — скорость света в вакууме; S — шаг спирали ($S = L/N$, здесь L — длина спирали, N — число витков); a — средний радиус спирали ($a = (D - d)/2$, здесь D — внешний диаметр спирали, d — толщина металлической проволоки, из которой навита спираль).

Обозначения, приведенные выше и использованные в таблице, поясняются фрагментом на рис. 4.

Если пружина расположена в среде с относительной диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_{\text{отн}}$, то скорость распространения уменьшается и резонансные частоты окончательно можно записать в виде

$$f_r = \frac{V_{\Phi}}{2L\sqrt{\varepsilon_{\text{отн}}}} = \frac{c}{2N\sqrt{\varepsilon_{\text{отн}}((\pi(D-d))^2 + (L/N)^2)}}. \quad (7)$$

В таблице представлены характерные размеры пружин объектов поиска и их расчетные резонансные частоты без учета окружающего вещества, т. е. в воздухе, и для сред с низкой диэлектрической проницаемостью. Для справки приведено отношение фазовой скорости к скорости света. Из таблицы видно, что резонансные частоты пружин № 1 и № 3

Тип объекта	Параметры				Резонансные частоты пружин			V_{Φ}/c
	L , мм	D , мм	d , мм	N , витки	f , ГГц ($\varepsilon = 1$)	f , ГГц ($\varepsilon = 3$)	f , ГГц ($\varepsilon = 9$)	
Пружина № 1	20,5	7,5	1,5	7,0	1,12	0,65	0,37	0,15
Пружина № 2	8,0	14,5	0,5	5,0	0,68	0,39	0,23	0,04
Пружина № 3	11,0	4,0	0,5	12,0	1,13	0,65	0,38	0,08

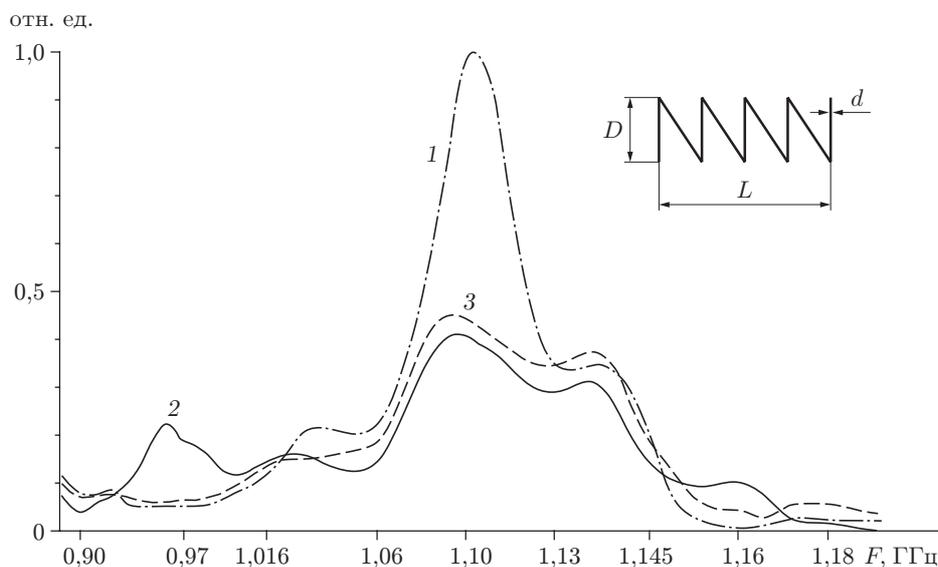


Рис. 4. Экспериментальные значения сигналов резонансного отражения от пружины № 1: кривая 1 — сигнал от свободной пружины в пространстве на расстоянии 5 см от датчика; 2 — сигнал от пружины, помещенной в корпус из оргстекла с резиновой крышкой; 3 — сигнал разбаланса датчика

лежат немного выше 1 ГГц, а пружины № 2 — в области 0,65 ГГц для среды с диэлектрической проницаемостью, равной единице. Обычно диапазон частот для радиоволновых обнаружителей лежит в пределах 400–800 МГц. Если пружина находится в среде с относительной диэлектрической проницаемостью, не равной единице, для нее по-прежнему сохраняется резонансное соотношение между длиной проволоки, из которой навита спираль, и длиной волны излучения в среде. Поэтому можно ожидать, что в СВЧ-диапазоне проявятся резонансные свойства пружин. В таблице приведены ожидаемые резонансные частоты пружин, вычисленные для сред с эффективной проницаемостью $\varepsilon_{\text{отн}}$ от 3 до 9 единиц.

Экспериментальная проверка резонансных свойств пружин. Для проверки резонансных свойств пружин был использован модернизированный датчик макета радиоволнового обнаружителя с перестройкой частоты СВЧ-генератора, управляемого напряжением, в диапазоне частот 900–1200 МГц. Резонансная частота полуволновых вибраторов антенной системы (см. рис. 2) составляла около 1100 МГц.

Экспериментально полученные сигналы в относительных единицах с детекторной секции датчика для пружины № 1 представлены на рис. 4.

Уменьшение амплитуды резонансного пика для пружины, помещенной в оргстеклянный корпус, обусловлено малой передачей энергии ЭМ-поля от излучающих антенн (с резонансом на 1100 МГц) к пружине, резонирующей уже на частоте около 950 МГц.

Заключение. В данной работе показано, что существует возможность идентификации рассмотренных диэлектрических и металлических объектов по их амплитудно-частотным характеристикам в СВЧ-диапазоне. В частности, для обнаружения малоразмерных диэлектрических подповерхностных объектов (цилиндр: $h = 180$ мм, $\varnothing = 200$ мм, корпус пластиковый, заполненный веществом с $\varepsilon_{\text{отн}} = 4$) рекомендуется использовать диапазон частот 380–500 МГц и дополнительно проводить идентификацию по металлическим деталям на частотах около 1 ГГц. Для реализации этой возможности требуется применение широкополосных антенных систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Нестеров В. М., Перфильева В. Д.** Исследование комплексной диэлектрической проницаемости некоторых почв в диапазоне СВЧ при изменении влажности и температуры // Электромагнитные методы исследования и контроля материалов (ЭМИКМ): Сб. ст. Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 1977. С. 179–188.
2. **Брунов Б. Я., Гольденберг Л. М., Кляцкин И. Г., Цейтлин Л. А.** Теория электромагнитного поля. М.: ГЭИ, 1962. 510 с.
3. **Кауфман А. А., Курилло В. Н.** Введение в теорию диэлектрического каротажа при возбуждении поля электрическим диполем // Электромагнитные поля в геофизических методах исследования. М.: Наука, 1970. С. 77.
4. **Хишп Д. Е.** Зависимость электромагнитных характеристик почвы от влажности, плотности почвы и частоты // ТИИЭР. 1974. **62**, № 1. С. 122–127.
5. **Гутенко П. Д., Матин Г. А.** Минное оружие. М.: Изд-во ДОСААФ, 1988. С. 37.
6. **Лебедев И. В.** Техника и приборы СВЧ. М.: Высш. шк., 1972. Т. 2. С. 206.

Поступила в редакцию 14 июля 2008 г.
