

*В.А. Яцкевич, Е.О. Биловол*  
*Вологодский государственный университет*

## **Устройство для обнаружения взрывчатых веществ, скрытых под одеждой**

*Предложено устройство, предназначенное для обнаружения переносимых на теле предметов, например, взрывчатки, наркотиков, или других скрытых предметов, которые не могут быть выявлены металлодетекторами. Принцип работы устройства основан на облучении человека радиоволнами малой интенсивности, приеме отраженного сигнала и его обработке. В отличие от известных аналогов, предлагаемое устройство является более простым в изготовлении и эксплуатации.*

**Ключевые слова:** электродинамическая модель тела человека, логопериодическая антенна.

**Введение.** Среди мер, необходимых для предотвращения террористических актов, важное место занимает досмотр людей при проходе в аэропорты, вокзалы и на другие места массового скопления людей. В настоящее время существуют эффективные способы обнаружения металлических предметов, скрытых под одеждой. Более сложной задачей является обнаружение скрытых диэлектрических предметов, к которым относится, например, пластичное взрывчатое вещество (пластид) в виде прилегающего к телу слоя, дополненного поражающими элементами из твердого диэлектрика. Известные устройства, решающие эту задачу, являются технически сложными, дорогостоящими и требуют высокой квалификации персонала. Более простой способ решения данной задачи предложен в [1]. Способ основан на облучении тела человека электромагнитными волнами СВЧ-диапазона и анализе характеристик отраженной волны в широкой полосе частот. При этом измеряется как модуль коэффициента отражения, так и его фаза. На наш взгляд, имеется возможность дальнейшего упрощения таких устройств.

*Цель настоящей работы* – показать возможность обнаружения скрытых под одеждой диэлектрических предметов путем измерения только модуля коэффициента отражения.

Блок схема предлагаемой установки показана на рис. 1. В блоке 3 генерируется синусоидальный СВЧ-сигнал, который поступает по кабелю 2 на антенну 1, прикладываемую к одежде проверяемого. Частота сигнала автоматически изменяется, а на дисплее компьютера 4 отображается график коэффициента отражения волны (по модулю) в выбранной полосе частот. Проверяющий перемещает антенну по поверхности одежды человека и наблюдает за изображением на дисплее. Появление на графике аномалии служат сигналом к необходимости проведения личного досмотра у проверяемого лица.

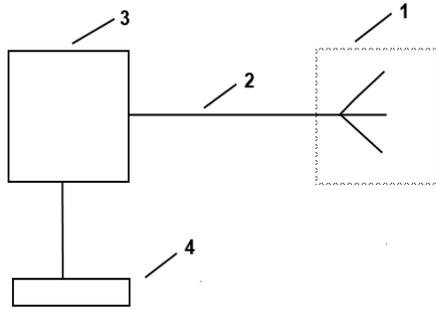


Рис. 1. Блок-схема предлагаемого устройства:  
 1 – широкополосная антенна в корпусе;  
 2 – гибкий радиочастотный кабель;  
 3 – измеритель модуля коэффициента отражения;  
 4 – компьютер (ноутбук).

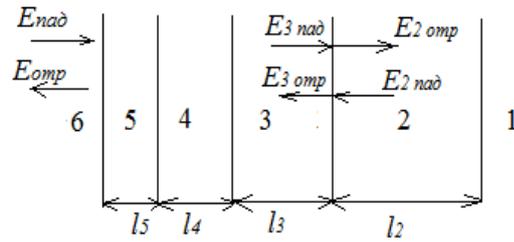


Рис.2. Модель облучаемого объекта:  
 1 – мышцы; 2 – жир; 3 – кожа;  
 4 – скрытый объект (пластид);  
 5 – одежда; 6 - воздух

Теоретическое исследование проводилось в два этапа. На первом этапе рассматривалась одномерная модель, позволившая выбрать полосу частот и оценить возможности данного устройства.

**Анализ одномерной модели.** Рассмотрим электродинамическую модель фрагмента тела человека в виде многослойной структуры, образованной из плоских слоев (рис. 2). Из воздушной среды 6 на слой 5 падает по нормали плоская волна. Для каждого слоя заданы: диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon_n$ , удельная электропроводность  $\sigma_n$ , толщина слоя  $l_n$ , где  $n$  – номер слоя:  $n=1, 2, \dots 5$ . Слой 1 (мышцы) ограничен только с одной стороны, так как в мышечной ткани волна сильно затухает. Комплексная диэлектрическая проницаемость, волновое число и волновое сопротивление выражаются через указанные параметры:

$$\tilde{\varepsilon}_n = \varepsilon_n - i 18 \sigma_n / f; \quad k_n = (2\pi / \lambda_0) \sqrt{\tilde{\varepsilon}_n}; \quad W_n = 120 \pi / \sqrt{\tilde{\varepsilon}_n}, \quad (1)$$

где  $f$  – частота, выраженная в ГГц;  $\lambda_0$  – длина волны в свободном пространстве. Магнитная проницаемость всех слоев равна единице.

Очевидно, что в каждом слое возможны только плоские волны вида  $e^{\mp i k_n x}$ , где координата  $x$  отсчитывается по нормали к поверхности слоя. Пусть  $R_1$  – коэффициент отражения волны от слоя 1,  $R_{33}$  и  $R_{22}$  – коэффициенты отражения волны на границе раздела слоев 2 и 3, а  $T_{32}$  и  $T_{23}$  – коэффициенты прохождения волны через эту границу. Для этих величин известны выражения [2]:

$$R_{22} = \frac{W_3 - W_2}{W_3 + W_2}; \quad R_{33} = \frac{W_2 - W_3}{W_3 + W_2}; \quad T_{23} = \frac{2W_2}{W_2 + W_3}; \quad T_{32} = \frac{2W_3}{W_2 + W_3}; \quad R_1 = \frac{W_1 - W_2}{W_1 + W_2}, \quad (2)$$

где волновые сопротивления слоев  $W_n$  вычисляются согласно (1).

Учитывая переотражения волны от границ раздела, получим коэффициент отражения от слоя 2:

$$R_2 = \frac{E_3^{omp}}{E_3^{nad}} = R_{33} + \frac{T_{32} T_{23} R_1 e^{-i2k_2 l_2}}{1 - R_{22} R_1 e^{-i2k_2 l_2}}. \quad (3)$$

Используя (2), запишем (3) в виде:

$$R_2 = \frac{W_2 - W_3}{W_2 + W_3} + \frac{4W_2W_3R_1e^{-i2k_2l_2}}{(W_3 + W_2)^2 - (W_3^2 - W_2^2)R_1e^{-i2k_2l_2}}. \quad (4)$$

Обращаясь к рисунку 2, заметим: чтобы получить коэффициент отражения волны от слоя 3, достаточно в выражении (4) увеличить все индексы на единицу. Поступая таким образом последовательно, мы на четвертом этапе получим окончательное выражение для коэффициента отражения волны от слоя 5:

$$R_5 = \frac{W_5 - W_6}{W_5 + W_6} + \frac{4W_5W_6R_4e^{-i2k_5l_5}}{(W_6 + W_5)^2 - (W_6^2 - W_5^2)R_4e^{-i2k_5l_5}}, \quad (3)$$

где  $R_4$  - коэффициент отражения, полученный на предыдущем этапе.

Данная рекуррентная процедура реализована нами в программном обеспечении Mathcad. При расчетах использовались значения диэлектрической проницаемости и удельной электропроводности, приведенные в [3] (см. таблицу 1). На рисунке 3 приведен пример расчета, когда скрытый объект имеет толщину  $l_4=1,5$  см и параметры  $\epsilon_4 = 6$ ;  $\sigma_4 = 0$ , что соответствует слою пластида с керамическими поражающими элементами. Параметры одежды:  $l_3 = 1$  см;  $\epsilon_3 = 2$ ;  $\sigma_3 = 0$ .

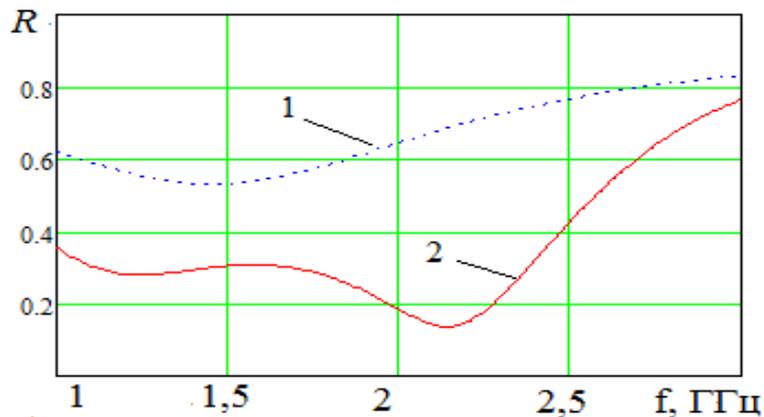


Рис. 3. Коэффициент отражения волны в полосе частот (одномерная модель):  
1 – без пластида; 2 – со слоем пластида ( $l = 1,5$  см;  $\epsilon = 6$ )

**Анализ трехмерной модели.** На втором этапе использовалась электродинамическая модель, адекватная реальному объекту. Для моделирования нами использована профессиональная компьютерная программа, основанная на численном решении уравнений Максвелла методом конечных интегралов.

Основным элементом устройства является приемно-передающая антенна, работающая в широкой полосе частот. В отличие от [1], где использован набор узкополосных антенн, мы используем одну антенну, в качестве которой нами выбрана логопериодическая антенна (ЛПА). Достоинство ЛПА – хороший уровень согласования и направленные свойства в полосе частот, ширина которой принципиально не ограничена. Нами использована ЛПА, выполненная по гибридной технологии: вибраторы и линия передачи выполнены по печатной технологии в виде металлических полосок на обеих сторонах диэлектрической платы, а на две полоски, образующие линию передачи, наложены (с электрическим контактом) медные трубки (рис. 4). Как и в известной ЛПА

трубчатой конструкции, питающий кабель прокладывается внутри одной из трубок со стороны неизлучающего конца, то есть наибольшего вибратора, и припаивается к наименьшему вибратору, что позволяет обойтись без симметрирующего устройства. Геометрия антенны (размеры вибраторов и их расположение) определялась в расчете на полосу частот 1–3 ГГц по методике, изложенной в [4]. Антенна выполнена на основе материала ФАФ-4Д с диэлектрической проницаемостью 2,5 и толщиной 1,5 мм. Размеры антенны: длина – 23 см., ширина – 13,2 см.

На рис. 5 показана модель облучаемого объекта – фрагмента тела человека в области пояса. Здесь позиции 1-5 такие же, как на рис. 2, а позиция 6 - антенна в корпусе, выполненном в виде диэлектрического цилиндра.

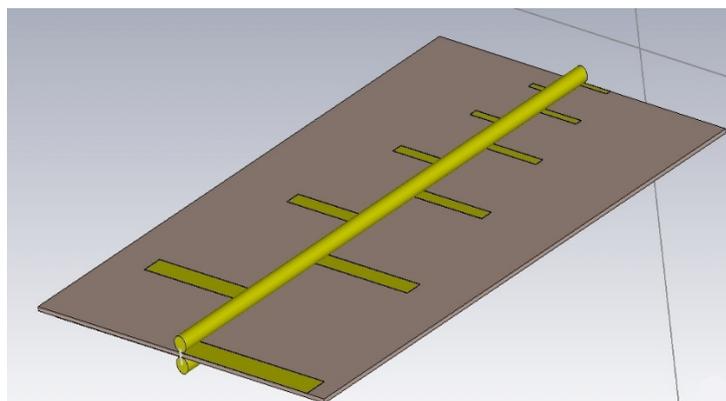


Рис. 4. Модель антенны-зонда

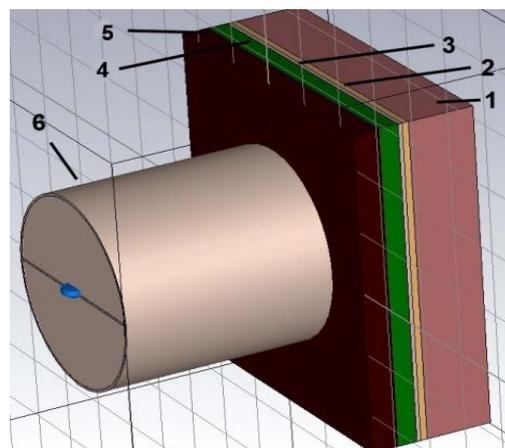


Рис. 5. Трехмерная модель объекта

Компьютерная программа решает следующую граничную задачу электродинамики: источник с заданным напряжением подключен к входу антенны; рассчитывается распределение электромагнитного поля, возникающего в пространстве, а также коэффициент отражения на входе антенны. Пример расчета приведен на рис. 6.

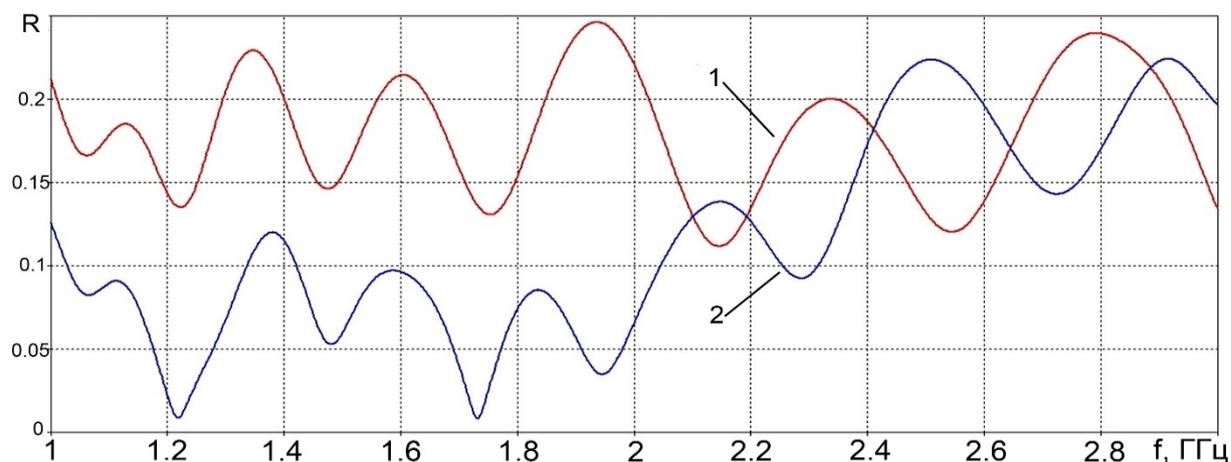


Рис. 6. Коэффициент отражения волны в полосе частот (трехмерная модель):  
1 – без пластида; 2 – со слоем пластида ( $l = 2$  см;  $\epsilon = 6$ )

Как одномерная, так и более точная трехмерная модель, показывают, что в полосе частот 1-2 ГГц значение модуля коэффициента отражения при наличии скрытого объекта

заметно меньше, чем без последнего, что может служить критерием обнаружения переносимых взрывчатых веществ.

Следует учесть, что результаты измерений у проверяемых людей могут заметно различаться, поскольку коэффициент отражения зависит от параметров скрытого объекта, тела и одежды. Для надежного обнаружения объекта необходимо заранее проделать измерения для контрольной группы людей с различным телосложением и одеждой. Пусть функция  $R_i(f)$  – значение коэффициента отражения (по модулю) в полосе частот, измеренное для человека из контрольной группы при отсутствии объекта;  $R_i^{об}(f)$  – аналогичная функция, измеренная в контрольной группе при наличии объекта;  $i$  – номер измерения:  $i = 1, 2, \dots, N$ . Полученная база данных должна храниться в памяти компьютера, подключенного к прибору.

Пусть при обследовании человека в рабочем режиме получен коэффициент отражения  $R(f)$ . По составленной программе компьютер вычисляет нормы разности и суммирует их:

$$\delta = \sum_i \|R_i(f) - R(f)\| ; \quad \delta^{об} = \sum_i \|R_i^{об}(f) - R(f)\| .$$

Затем программа сравнивает полученные величины. В случае, если  $\delta^{об} < \delta$ , подается тревожный сигнал, указывающий на необходимость личного досмотра обследованного человека. Тем самым производится сравнение полученного результата с имеющимися в памяти компьютера контрольными результатами. Указанная обработка данных происходит практически мгновенно.

Таким образом, предлагаемый способ обнаружения скрытого объекта сводится к измерению только модуля коэффициента отражения, что позволяет использовать сравнительно недорогую аппаратуру, например, измерительный прибор Р2М-04.

**Таблица 1. Электрофизические параметры, используемые в расчетах**

Название слоя	Мышцы	Жир	Кожа	Пластид	Одежда
Номер слоя, $n$	1	2	3	4	5
$\epsilon_n$	51	5,75	44	2-6	1,5-3
$\sigma_n, 1/\text{Ом м}$	1,27	0,073	1,1	0	0
Толщина слоя $l, \text{см}$	$\infty$	0,5	0,3	1-2	0,5-2

Библиографический список

1. Петров П.В., Лазарев Ю.Н., Филиппин Н.Н. Способ обнаружения предметов, скрытых под одеждой людей. Патент РФ №2301432. Опубл. 20.06. 2007.
2. Никольский, В.В. Электродинамика и распространение радиоволн – М.: Наука, 1989.
3. Березовский В.А., Колотков Н.Н., Костюк П.Г. Биофизические характеристики тканей человека – Киев: Наукова думка, 1990. – 224с.
4. Яцкевич В.А. Проектирование логопериодических антенн: монография. – Вологда, ВГПУ, 2012. – 148 с.