

УДК 621.391.26

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОРОШКООБРАЗНЫХ ПОЧВОСОДЕРЖАЩИХ  
МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ КОМБИНИРОВАННЫХ ЭКРАНОВ ЭМИ**

Н.В. КОЛБУН, ХАЙ НГУЕН ВАН, ФАН НЬЯТ ЗАНГ, В.Б. СОКОЛОВ, Т.В. БОРБОТЬКО

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь**Поступила в редакцию 12 февраля 2007*

Исследуется возможность создания широкополосных поглотителей электромагнитного излучения (ЭМИ), эффективных в различных диапазонах — радиоволновом, оптическом, ближнем инфракрасном — с управлением электромагнитными свойствами материалов. Предлагается использовать композиционные материалы для снижения коэффициента отражения металлических объектов с получением заданных характеристик в зависимости от вида подстилающей поверхности. Показано, что использование композиционных материалов позволяет достичь коэффициента отражения электромагнитной энергии экранированного объекта на уровне характеристик окружающего фона.

*Ключевые слова:* электромагнитное экранирование, композиционные материалы, экранирующие характеристики.

**Введение**

Различия в характеристиках электромагнитного сигнала, отраженного от объектов, позволяют сделать выводы об их природе, структуре, зачастую и составе на основе анализа радиолокационного портрета некоторой области пространства. Основным средством скрытия наземных объектов от обнаружения радиолокационной техникой является установка маскирующих радиопоглощающих материалов, позволяющих преобразовать отражаемый от металлических поверхностей и объектов сложной формы сигнал в сигнал с другими характеристиками, близкими к фону окружающей обстановки [1].

К таким материалам предъявляются требования по гибкости, небольшому весу для скрытия объектов сложной формы или мобильных объектов, они должны обладать не только низким коэффициентом отражения, но и возможностью получения характеристик на заданном уровне при изменении условий окружающей среды.

Синтез композиционных материалов позволяет достичь широкополосности свойств, в том числе и электромагнитных, путем варьирования параметров изготовления, состава и размера частиц наполнителей, структуры и формы матрицы и т.д., что делает их перспективными для разработки эффективных конструкций поглотителей ЭМИ, удовлетворяющих вышеназванным условиям [2].

Использование в композитах порошкообразных наполнителей с диэлектрическими, магнитными или проводящими свойствами позволяет получать гибкие экранирующие конструкции с низким коэффициентом отражения [3, 4]. Эффективность экранирования в различных частотных диапазонах обеспечивается применением частиц разных размеров, градиентным изменением концентрации наполнителей по глубине, формированием геометрических неоднородностей на поверхности [5].

Как известно, уровень отражаемой электромагнитной энергии определяется разницей волновых сопротивлений граничащих сред и зависит от соотношения между электрическими и магнитными свойствами. Следовательно, увеличение электромагнитных потерь приводит к увеличению отражения ЭМИ от поверхности экрана, что создает задачу оптимизации свойств конструкций и материалов.

Исследования [6] показали, что использование пористых влагосодержащих силикагелевых материалов позволяет получить поглотители ЭМИ с низким коэффициентом отражения на уровне  $-6\div-8$  дБ.

Показано [7], что основная эффективность экранирования ЭМИ обеспечивается применением влагосодержащих материалов, причем коэффициент отражения волн определяется разницей характеристических сопротивлений воздуха и экрана, зависящего от диэлектрической проницаемости растворного наполнителя и его удельного содержания в матрице [8].

При взаимодействии электромагнитного излучения сверхвысоких частот с материалами необходимо иметь в виду, что характеристики коэффициентов отражения и ослабления электромагнитной волны с длиной  $\lambda$  для плоского однородного слоя, обладающего потерями, при нормальном падении представляют собой осциллирующие функции с амплитудой, убывающей по мере возрастания толщины слоя  $h$  или отношения  $h/\lambda$  [9]. Период этой функции определяется длиной волны  $\lambda$  и показателем преломления измеряемого слоя, а степень убывания — коэффициентом ослабления волны. На рис. 1 приведены зависимости коэффициента отражения ЭМИ двумя материалами при малом значении толщины. Как видно, период функции обратно пропорционален диэлектрической проницаемости исследуемого слоя. Таким образом, при взаимодействии падающей электромагнитной волны с плоским диэлектрическим слоем характер отраженного сигнала зависит от значений  $\epsilon$  и тангенса диэлектрических потерь  $\text{tg } \delta$  и определяется явлением интерференции падающей и отраженных от границ раздела волн.

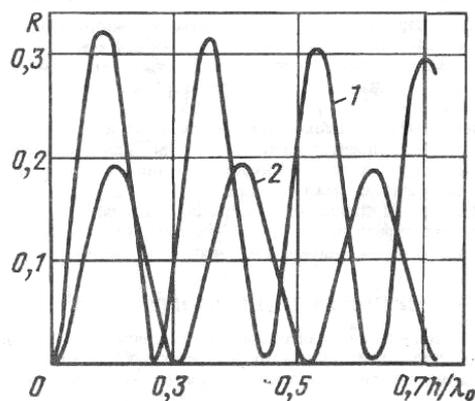


Рис. 1. Зависимость коэффициента отражения от толщины плоского слоя для двух диэлектриков: 1 — гипсобетон ( $\epsilon=3,83$ ;  $\text{tg } \delta=0,01$ ); 2 — оргстекло ( $\epsilon=2,7$ ;  $\text{tg } \delta=0,01$ )  $\lambda=8,6$  мм

Ставится задача получения характеристик отражения электромагнитной энергии объектов, закрытых радиопоглотителем, близких по значению к показателям природных подстилающих сред, свойства которых зависят от вида и структуры материала — различные виды почв, растительный покров и т.д., и, кроме того, обеспечивающих требуемые характеристики в оптическом диапазоне.

Для радиолокационных исследований чаще всего используется электромагнитное излучение, диапазон частот которого находится вблизи 1–10 ГГц, поэтому исследования экранирующих характеристик разработанных материалов производили в диапазоне частот 8–12 ГГц.

Образцы представляли собой слои из почвосодержащих порошкообразных материалов, закрепленных в силиконе, выполняющем функции связующего и герметизирующего материала (рис. 2). В качестве исследуемых материалов были выбраны: силикагель, сухой растительный материал, морской песок, торф. Все образцы изготавливались методом размолла с образованием

фракций до 0,5 мм. Из смеси порошкообразного материала со связующим формировался слой толщиной 3 мм с гладкой поверхностью.

Как показывают исследования [10], равновесное влагосодержание силикагеля в обычных комнатных условиях составляет порядка 30 %, молекулы воды удерживаются за счет образования химических связей с силоксановыми группами и удаляются из силикагеля только при нагревании до 150°C. Благодаря герметизации, концентрация сорбированной жидкости в силикагеле стабильна, и параметры материалов мало изменяются с течением времени или условий эксплуатации. Влагосодержание остальных материалов очень мало — порядка 3–5 %.

Доля связующего составляла 30% от всего объема композиционного материала.

При использовании нескольких составляющих доля каждого составляла 50 % от объема порошкообразного наполнителя.

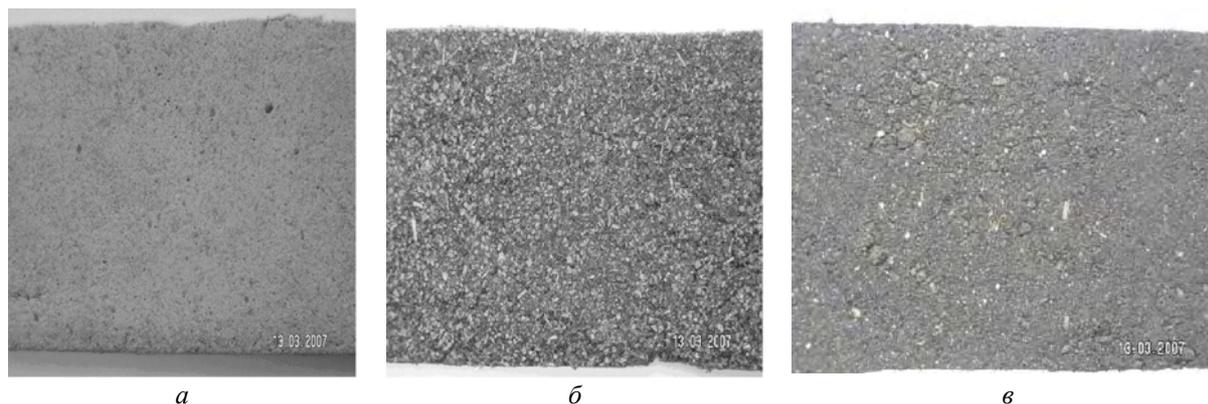


Рис. 2. Внешний вид исследованных образцов композиционных материалов: *a* — содержащих песок и силикагель; *b* — содержащих силикагель и сухой растительный материал; *c* — содержащих торф

Для исследования экранирующих свойств образцов в диапазоне частот 8–12 ГГц использовался панорамный измеритель КСВН и ослабления (генератор РГ4-14 и индикатор Я2Р-70) и волноводный измерительный тракт. Перед проведением измерений проводились стандартные калибровки тракта на проход и отражение, а затем образец помещался между фланцами волноводов. Инструментальная погрешность измерений составляла порядка 5 % для измеряемого диапазона значений. Результаты измерений коэффициентов ослабления и отражения ЭМИ представлены на рис. 3–7.

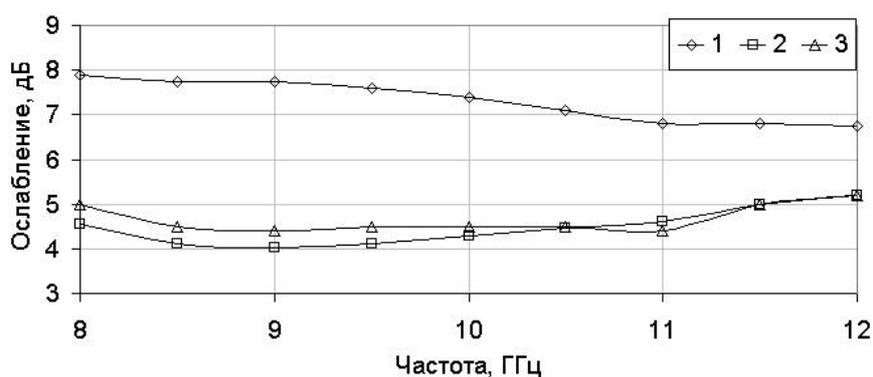


Рис. 3. Ослабление ЭМИ композиционными материалами: 1 — образец с силикагелем; 2 — образец с силикагелем и сухим растительным материалом; 3 — образец с торфом

Ослабление образцов, содержащих силикагель, выше, чем образцов с почвосодержащими порошкообразными материалами, что объясняется более высоким равновесным влагосодержанием силикагеля. Это видно из сравнения характеристик образцов 1 и 3. Кроме того, при уменьшении объемной доли содержания силикагеля в образце до 50 % (образец 2, рис. 3), величина ослабления также снижается с 7–8 дБ до 4–5 дБ. Силикон

обладает небольшими диэлектрическими потерями [11], что также вносит вклад в ослабление ЭМИ образцов. Электромагнитная энергия практически свободно проникает сквозь сухие порошкообразные материалы, а уменьшение мощности ЭМВ обеспечивается за счет взаимодействия с микрообъемами воды, адсорбированной в порошкообразных средах.

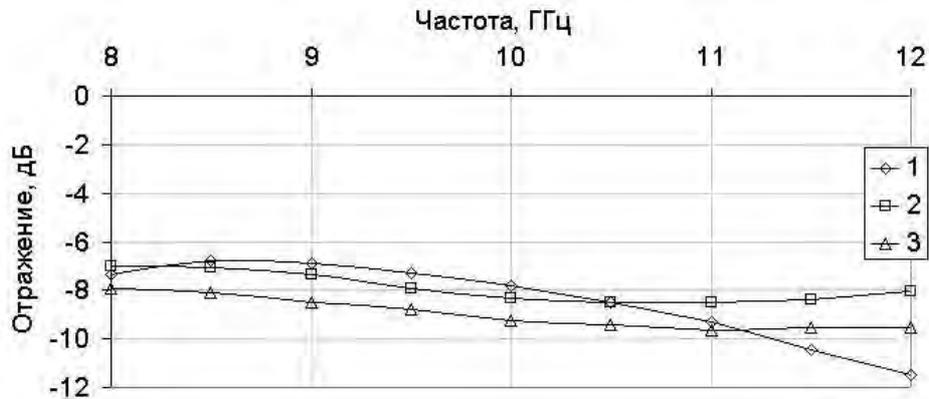


Рис. 4. Отражение ЭМИ композиционными материалами: 1 — образец с силикагелем; 2 — образец с силикагелем и сухим растительным материалом; 3 — образец с торфом

Отражения всех образцов с различным содержанием силикагеля и почвосодержащих материалов незначительно (на 1–1,5 дБ) отличаются друг от друга. Это объясняется относительно невысоким влагосодержанием силикагелевых материалов.

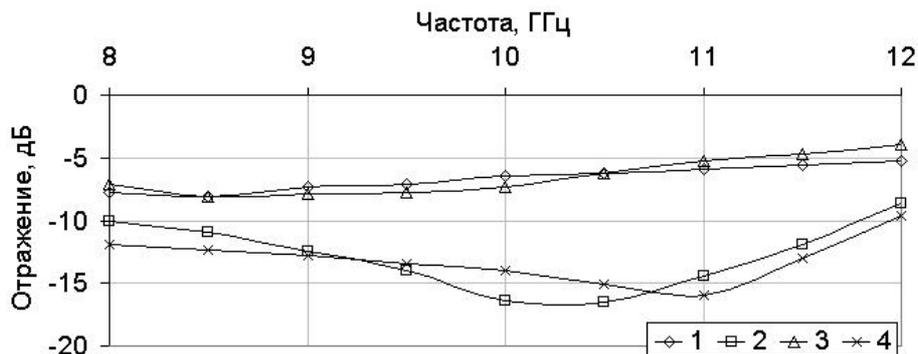


Рис. 5. Отражение ЭМИ композиционными материалами с металлическим отражателем: 1 — образец с силикагелем; 2 — образец с силикагелем и сухим растительным материалом; 3 — образец с торфом; 4 — образец с сухим растительным материалом

При установке металлического отражателя за экранирующим материалом создаются условия для переотражения электромагнитных волн между границами слоев. При определенной длине волны может возникнуть явление интерференции волн, отраженных от различных слоев и находящихся в противофазе. Проникновение ЭМВ в материал, обладающий диэлектрической проницаемостью, приводит к трансформации длины волны излучения пропорционально  $\sqrt{\epsilon}$ , что необходимо учитывать при определении толщины диэлектрического слоя перед металлическим отражателем для создания резонансных четвертьволновых поглотителей [12].

Заметное снижение отражения (до -17 дБ) вблизи частот 10–11 ГГц наблюдалось у образцов на основе порошкообразного сухого растительного материала без либо с добавкой силикагеля. Коэффициент отражения образцов с силикагелем и торфом составляет -8÷-5 дБ. Коэффициент отражения ЭМИ образцов 1 и 3 с металлическим отражателем в диапазоне 8–9 ГГц сравним с отражением однослойных образцов (-8÷-7 дБ), а с увеличением частоты возрастает.

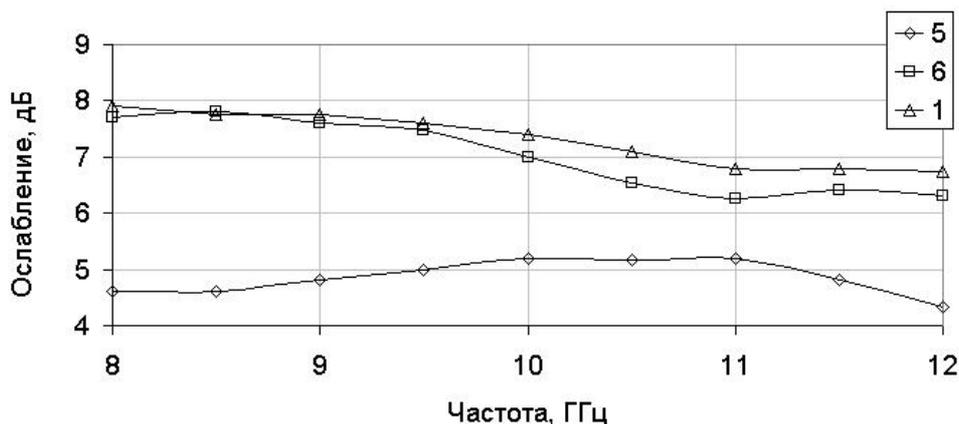


Рис. 6. Ослабление ЭМИ композиционными материалами: 1 — образец с силикагелем; 5 — образец с песком; 6 — образец с силикагелем и песком

При исследовании образцов на основе силикагеля и мелкозернистого кварцевого песка было показано, что ослабление ЭМИ также создается в основном за счет присутствия силикагеля (6,5–8 дБ). При сравнимом размере фракций порошкообразных материалов развитая поверхность силикагеля и его пористая структура способствует адсорбции влаги из окружающего воздуха даже без предварительной пропитки образца, что и создает ослабление ЭМИ при взаимодействии с образцом. Частицы песка обладают гладкой поверхностью и непористым строением, а их влагосодержание очень мало. Это еще раз показывает большой вклад воды в поглощение электромагнитного излучения.

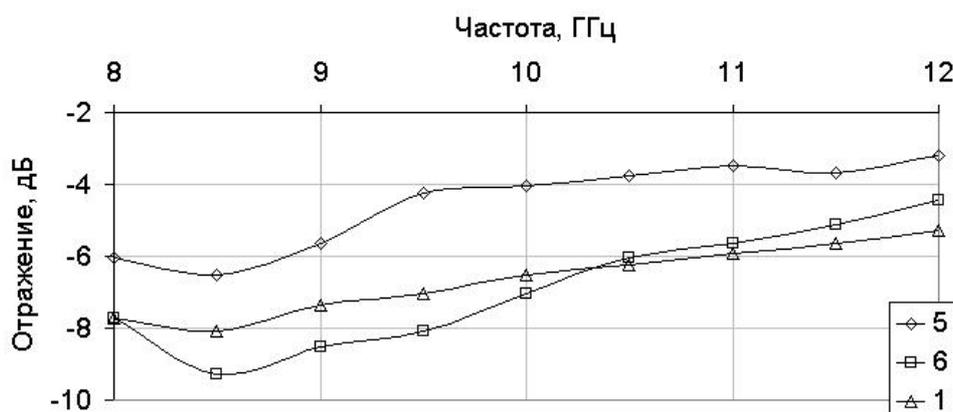


Рис. 7. Отражение ЭМИ композиционными материалами с металлическим отражателем: 1 — образец с силикагелем; 5 — образец с песком; 6 — образец с силикагелем и песком

Отражение ЭМВ образцов с песком составляет  $-6 \div -9$  дБ, характеристика носит неравномерный характер с уменьшением в сторону более высоких частот. При использовании металлического отражателя коэффициент отражения снижается до  $-8 \div -9$  дБ вблизи частоты 8–9 ГГц и возрастает до  $-3 \div -5$  дБ на частоте 12 ГГц.

Частотные зависимости отражения образцов толщиной 3 мм из сухого растительного материала и песка с силикагелем и без с установленными металлическими отражателями носят резонансный характер, частота минимума отражения определяется толщиной образца и диэлектрическими свойствами материала наполнителя. Образцы из силикагеля и торфа такими свойствами в диапазоне частот 8–12 ГГц не обладали, что может быть связано со сдвигом резонансной частоты за пределы исследуемого диапазона для такой толщины и состава образцов.

## Заклучение

Использование композитов на основе порошкообразных почвосодержащих материалов позволяет снизить коэффициент отражения ЭМВ от металлического отражателя до уровня отражения подстилающих поверхностей, что может быть использовано для снижения заметности металлических объектов на окружающем фоне.

## APPLICATION OF POWDERLIKE SOILS-CONTAINING MATERIALS FOR COMBINED EMR SHIELDS

N.V. KOLBUN, HAI N. VAN, PHAN ZANG, V.B. SOKOLOV, T.V. BORBOTKO

### Abstract

Broad band electromagnetic radiation absorbers effective in different ranges — radio, optical, near infrared — with electromagnetic properties control are developed. Composite materials are proposed for decreasing of reflection EMR from metal objects with certain characteristics achieving, depending on the kind of underlying surface. It is shown that composite materials application allows to lower EMR reflection by the shielded object down to surrounding background level.

### Литература

1. *Лифанов Ю.С., Саблин В.Н., Федоринов А.Н., Шапошников В.И.* // Успехи современной радиоэлектроники. 1998. № 5. С. 3–14.
2. *Пирумов В.С., Алексеев А.Г., Айзикович Б.В.* // Зарубежная радиоэлектроника. 1994. № 6. С. 2–8.
3. *Лыньков Л.М., Богущ В.А., Глыбин В.П. и др.* Гибкие конструкции экранов электромагнитного излучения / Под ред. Л.М. Лынькова. Минск, 2000. 284 с.
4. *Лыньков Л.М., Богущ В.А., Борботько Т.В., Украинец Е.А., Колбун Н.В.* // Докл. БГУИР. 2004. Т. 2, № 5. С. 152–167.
5. *Bogush V., Borbot'ko T., Kolbun N., Lynkov L.* // Proceedings of the 16th International conference on microwaves, radar and wireless communications (MICON 2006), Krakow, Poland, 22–24 may, 2006. Vol. 2. P. 345–348.
6. *Лыньков Л.М., Борботько Т.В., Колбун Н.В., Фан Н. Занг, Терех И.С.* // Тез. докл. МНК по военно-техническим проблемам, проблемам обороны и безопасности, использованию технологий двойного применения. Минск: ГУ "Бел ИСА", 2005. С. 42–43.
7. *Колбун Н.В., Фан Н. Занг, Лыньков Л.М.* // Докл. БГУИР. 2006. Т. 4, № 1. С. 59–62.
8. *Богущ В.А., Зубаревич О.И., Колбун Н.В., и др.* // Материалы 15-й Международной Крымской конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2005). Севастополь, 12–16 сент. 2005 г. Севастополь, 2005. С. 637–639.
9. *Клюев В.В., Соснин Ф.Р., Филинов В.Н. и др.* // Неразрушающий контроль и диагностика. Справочник / Под ред. В.В. Клюева. М., 1995. 488 с.
10. *Колбун Н.В., Фан Н.Занг.* // Материалы 9 МНТК "Современные средства связи", Нарочь, осень 2004. №2(18)/2. 2004. С.158-159.
11. *Соколов В.Б., Колбун Н.В.* // Новые технологии изготовления многокристалльных модулей: Материалы докладов и краткие сообщения Междунар. научно-технич. конференции, 25–29 сентября, 2006. Минск: БГУИР, 2006. С. 79.
12. *Ковнеристый Ю.К., Лазарева И.Ю., Раваев А.А.* Материалы, поглощающие СВЧ-излучения. М., 1982.