# Мобильный комплекс для измерения коэффициента отражения радиопоглощающих материалов и покрытий

К. Басков
А. Политико
В. Семененко
В. Чистяев
С. Просыпкин

**Разработан мобильный комплекс для измерений частотных зависимостей коэффициента отражения радиопоглощающих материалов и покрытий. Проведены сравнительные измерения частотных зависимостей коэффициента отражения образцов радиопоглощающих материалов и покрытий, расположенных на металлической подложке двумя способами: с помощью созданного перспективного мобильного комплекса и измерителя коэффициента отражения в традиционном исполнении. Показаны технические и эксплуатационные преимущества портативного измерителя нового типа.**

## Введение

Современный этап развития сверхширокополосной антенной техники характеризуется использованием радиопоглощающих покрытий, имеющих низкие значения коэффициента отражения (КО) в рабочей полосе СВЧ-диапазона [1]. Такие покрытия предназначены для решения различных задач как военного, так и гражданского назначения. Например, радиопоглощающие покрытия успешно внедряются для улучшения радиотехнических характеристик антенных систем. Применение радиопоглощающих покрытий позволяет повысить помехозащищенность антенн, стабилизировать ширину главных лепестков диаграмм направленности антенн в широкой полосе частот, улучшить их поляризационные характеристики. В зависимости от конкретного назначения радиопоглощающие покрытия могут обладать высокой эффективностью как на выделенных (фиксированных) частотах, так и в отдельных частотных диапазонах.

Нанесение таких покрытий на крупногабаритные антенны и другие объекты антенной техники является весьма сложной и трудоемкой процедурой, в процессе которой приходится решать задачи и технологического, и радиофизического характера. Если говорить о радиофизической составляющей технологии нанесения покрытий, то контроль радиопоглощающих покрытий осуществляется, как правило, непосредственно в процессе нанесения их на объект. Кроме этого, радиофизический контроль необходим и после нанесения покрытий для оценки их качества в ходе эксплуатации изделия. В большинстве случаев наиболее информативным измеряемым параметром при проведении радиофизического контроля становится частотная зависимость КО покрытия.

На практике часто возникает ситуация, когда возможность проведения измерений в лабораторных условиях на стационарных стендах отсутствует. В связи с этим для осуществления радиофизического контроля непосредственно на изделии необходимо иметь мобильный измерительный комплекс [2]. Как вариант можно использовать для этих целей портативный измеритель КО покрытий, позволяющий оценивать соответствие параметров покрытия заданным техническим характеристикам. К такому измерителю КО покрытий предъявляется ряд требований: малые размеры и масса, возможность работы вне помещений, простота применения, невысокая стоимость, широкий динамический диапазон (не менее 40 дБ), возможность проведения измерений в широкой полосе частот и т. д.

Появление портативных векторных рефлектометров позволило создать мобильный измеритель КО материалов и покрытий нового типа, обладающий рядом существенных преимуществ перед традиционными измерителями на базе векторных анализаторов цепей. К этим преимуществам можно отнести более широкий частотный и динамический диапазоны измерения КО; меньшие эксплуатационные расходы, связанные с отсутствием необходимости применения фазостабильных высокочастотных кабелей; удобство пользовательского интерфейса; возможность реализации сложных алгоритмов обработки измерительной информации средствами портативного персонального компьютера, а также более низкую итоговую стоимость реализации.

## Мобильные измерители коэффициента отражения

Как правило, портативные измерители КО покрытий традиционно строятся на базе портативного векторного анализатора цепей (ВАЦ) и соединенного с ним с помощью фазостабильного кабеля антенного зонда (рис. 1).

Использование достаточно дорогого радиочастотного кабеля с высокой фазовой стабильностью диктуется необходимостью применения при обработке измеренных данных алгоритмов векторной компенсации влияния как самого кабеля, так и антенного зонда.

Отметим основные недостатки традиционного решения. Во-первых, наличие соединительного кабеля длиной около 1,5 м между рефлектометром портативного ВАЦ и антенным зондом вносит дополнительные ослабления, что в итоге приводит к уменьшению динамического диапазона измерений КО на 3–6 дБ в зависимости от частоты.

Во-вторых, в процессе работы кабель постоянно подвергается изгибам и влиянию окружающей среды, что отрицательно сказывается на его фазовой стабильности. Поэтому со временем становится невозможным применение алгоритмов векторной компенсации при обработке измерительной информации. По сути, в данном техническом решении кабель является достаточно дорогим расходным материалом.

В-третьих, при калибровке и измерениях КО покрытий используются достаточно сложные алгоритмы обработки получаемой информации, такие как векторное вычитание, использование алгоритмов цифровой фильтрации сигнала (например, Time

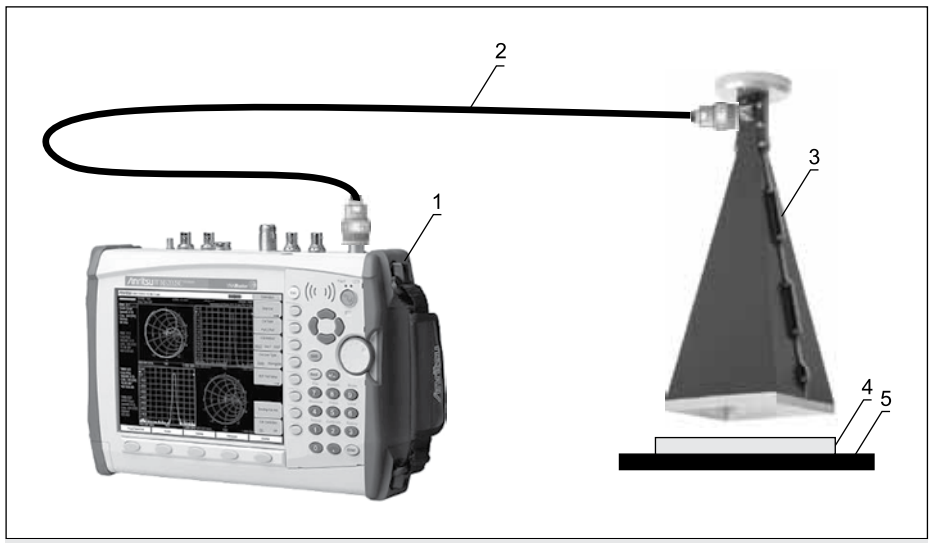


**Рис. 1.** Структурная схема мобильного комплекса для измерения КО радиопоглощающих покрытий в традиционном исполнении:
1 — портативный векторный анализатор цепей; 2 — радиочастотный кабель;
3 — антенный зонд; 4 — исследуемое покрытие; 5 — металлическая пластина

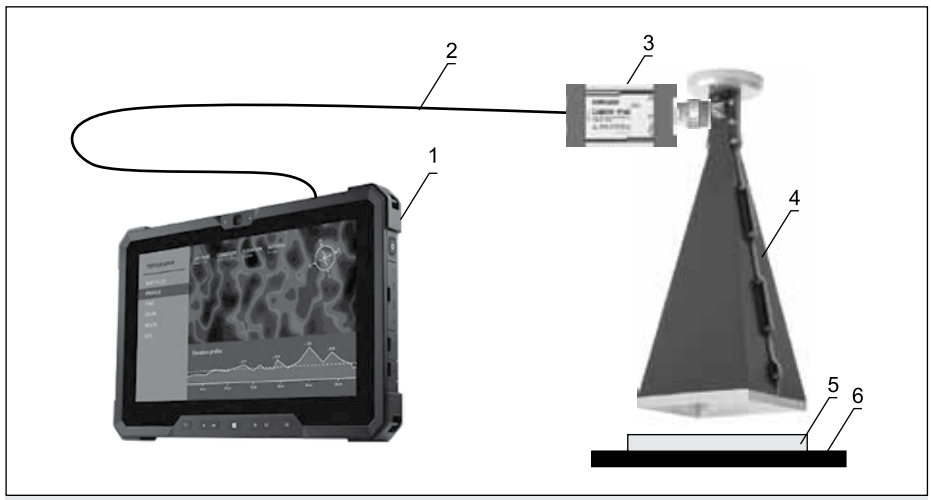


**Рис. 2.** Структурная схема перспективного мобильного комплекса для измерения КО радиопоглощающих покрытий:
1 — планшетный компьютер; 2 — USB-интерфейсный кабель; 3 — рефлектометр;
4 — антенный зонд; 5 — исследуемое покрытие; 6 — металлическая пластина

Domain). Реализация этих алгоритмов средствами пользовательского интерфейса ВАЦ без помощи внешнего компьютера приводит к сложной последовательности интерфейсных команд и требует от оператора высокой квалификации, глубокого понимания процесса калибровки и измерений. Немаловажным фактором является и достаточно высокая цена портативных ВАЦ зарубежного производства и фазостабильных кабелей.

В качестве альтернативы традиционному решению предлагается перспективный портативный измеритель КО покрытий, структурная схема которого представлена на рис. 2.

В основе схемы лежит рефлектометр малых размеров, подключаемый к антенному зонду без СВЧ-кабелей. Для управления измерительным комплексом, а также для отображения и экспресс-обработки информации используется планшет, который через USB-разъем подсоединяется к рефлектометру, как видно на рис. 3. Предлагаемая реализация свободна от всех вышеперечисленных недостатков традиционного решения. Отсутствие радиочастотного фазостабильного кабеля в измерительной схеме расширяет динамический диапазон измерений. Жесткое механическое соединение рефлектометра непосредственно с антенным зондом устраняет проблему фазовой нестабильности кабеля. Использование компьютера в исполнении для жестких условий эксплуатации при обработке измерительной информации предоставляет возможность реализовать удобный пользовательский интерфейс. При этом немаловажно, что цена перспективного решения существенно ниже традиционного.

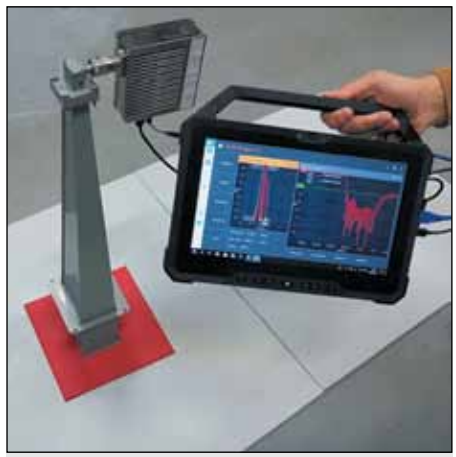

**Рис. 3.** Мобильный комплекс для измерения КО радиопоглощающих покрытий на базе рефлектометра

## Проведение измерений и анализ полученных результатов

Для сравнения традиционного и перспективного технических решений были проведены экспериментальные исследования — измерения КО на металлической подложке нескольких образцов покрытий. Традиционный портативный измеритель КО покрытий был выполнен на базе векторного анализатора цепей Anritsu MS2028C (5 кГц – 20 ГГц) и модифицированной рупорной антенны (зонда), рассчитанной на диапазон длин волн 3 см. Перспективный измеритель КО состоял из рефлектометра R140 (85 МГц – 14 ГГц), портативного компьютера (планшета) и той же самой рупорной антенны. Раскрыв рупорной антенны имеет размеры 10×6 см. Длина рупора от раскрыва до фокусного центра составляет приблизительно 60 см (48 см от коаксиально-волноводного перехода до раскрыва рупора). Измерения КО образцов покрытий проводились в диапазоне частот 7–13 ГГц. Частотный диапазон измерений ограничивался волноводным входом рупора и коаксиально-волноводным переходом (КВП) с рабочим сечением волновода 23×10 мм. Следует отметить, что рупорная антенна была подвергнута специальной доработке, целью которой являлось ослабление высших волноводных мод электромагнитной волны, возбуждающихся в рупоре.

Помимо сравнения результатов измерений КО покрытий двумя вышеуказанными методами были также проведены измерения КО образцов радиопоглощающих материалов и покрытий с помощью стационарного измерительного стенда для определения параметров материалов и покрытий в свободном пространстве с нормированными метрологическими характеристиками [3]. Результаты измерений, полученные на данном стенде, принимались за эталонные показатели при проведении сравнительного анализа. Стационарный стенд позволяет выполнять измерения целого ряда радиотех-

нических параметров образцов материалов и покрытий:

- коэффициентов отражения и прохождения образцов при нормальном падении волны в диапазоне частот 2–40 ГГц;
- диэлектрической и магнитной проницаемостей образцов материалов в том же диапазоне частот 2–40 ГГц;
- угловых зависимостей коэффициента прохождения образцов в диапазоне частот 2–24 ГГц при углах падения волны 0–75°;
- температурных зависимостей коэффициента отражения образцов покрытий на металлической подложке в частотном диапазоне 2–24 ГГц и в интервале температур –80…+200 °С.

В работе [3] подробно описывается принцип проведения измерений радиотехнических параметров образцов материалов и покрытий на стационарном стенде. Измерительный стенд, внешний вид которого приведен на рис. 4, реализован на базе векторного анализатора цепей R&S ZVA40 и рупорных линзовых антенн. При проведении измерений исследуемые образцы помещаются в окно диафрагмы, расположенной в ближней зоне рупорных антенн. В процессе измерения коэффициента отражения в зоне за диафрагмой устанавливается согласованная нагрузка — пирамидальный радиопоглощающий блок с низким коэффициентом отражения в рабочей полосе частот (не выше –50 дБ), который необходим для исключения дополнительных паразитных переотражений от окружающего пространства. Для устранения влияния переотражений между измеряемым образцом и рупорными антеннами используются методы цифровой обработки сигнала — временная селекция мешающих отражений (Time Domain) с подавлением эффекта Гиббса.

Важно отметить, что данный стенд, так же, как и методика выполнения измерений, аттестованы аккредитованными метрологическими организациями.

На рис. 5 представлены измеренные тремя описанными выше способами частотные зависимости КО образцов полимерных радиопоглощающих покрытий, нанесенных на металлические подложки размером 200×200 мм.

Из частотных зависимостей, представленных на рис. 5, видно, что мобильный комплекс для измерения КО покрытий на базе рефлектометра имеет несколько более широкий частотный диапазон, чем рабочий диапазон частот КВП. Отсутствие ослабления в соединительном кабеле позволяет проводить измерения за границами полосы пропускания КВП. В то же время портативный измеритель КО покрытий в традиционном исполнении на базе ВАЦ Anritsu MS2028C ограничен полосой пропускания КВП, что выражается в появлении довольно сильных осцилляций на краях диапазона в окрестности граничных частот 7,5 и 12,5 ГГц (загибы кривых 3, наблюдаемые на графиках).

Разброс измеренных значений КО образцов покрытий, полученных с помощью портативного измерителя на базе рефлектометра и путем измерений на стационарном стенде, который принимался при сравнительном анализе в качестве эталонного измерителя, находится в границах ±1 дБ при уровнях КО до –20 дБ. Расхождение в результатах измерений КО образцов, полученных различными способами, также связано с некоторой неоднородностью образцов радиопоглощающих покрытий, выраженной в небольшой разнотолщинности слоев материала покрытий по поверхности образцов. Кроме того, следует отметить, что в стационарном стенде

**Рис. 4.** Стационарный стенд для измерения радиотехнических параметров образцов материалов и покрытий

в качестве излучающего и принимающего устройства используется линзовая рупорная антенна с размером апертуры примерно 350×260 мм, которая при измерениях облучает всю поверхность образца. Таким образом, происходит измерение интегрального КО всего образца. Модифицированная рупорная антенна, применяемая в портативном измерителе КО, имеет небольшие размеры — раскрыв составляет около 100×60 мм, то есть в данном случае при измерениях облучается не вся поверхность образца, а лишь определенная локальная зона.

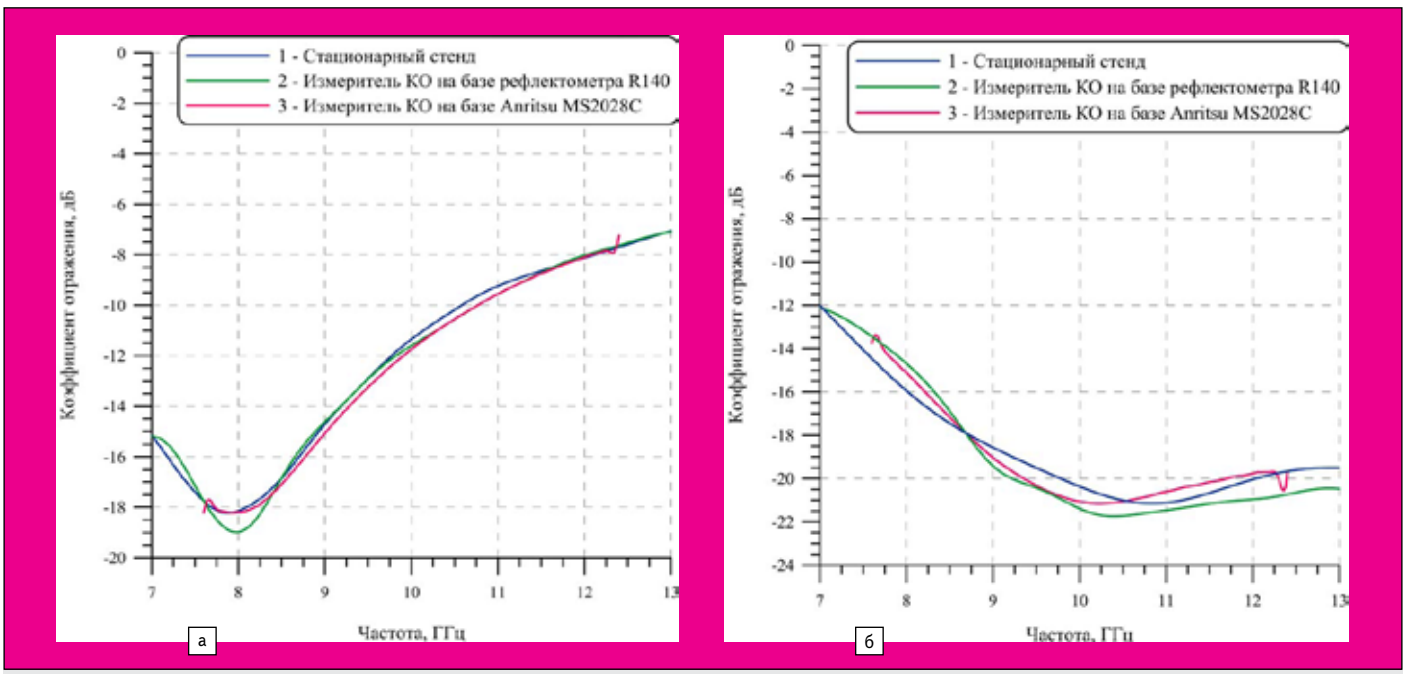


**Рис. 5.** Частотные зависимости КО (измеренные различными способами) на металлической подложке образца радиопоглощающего покрытия: а) № 1; б) № 2

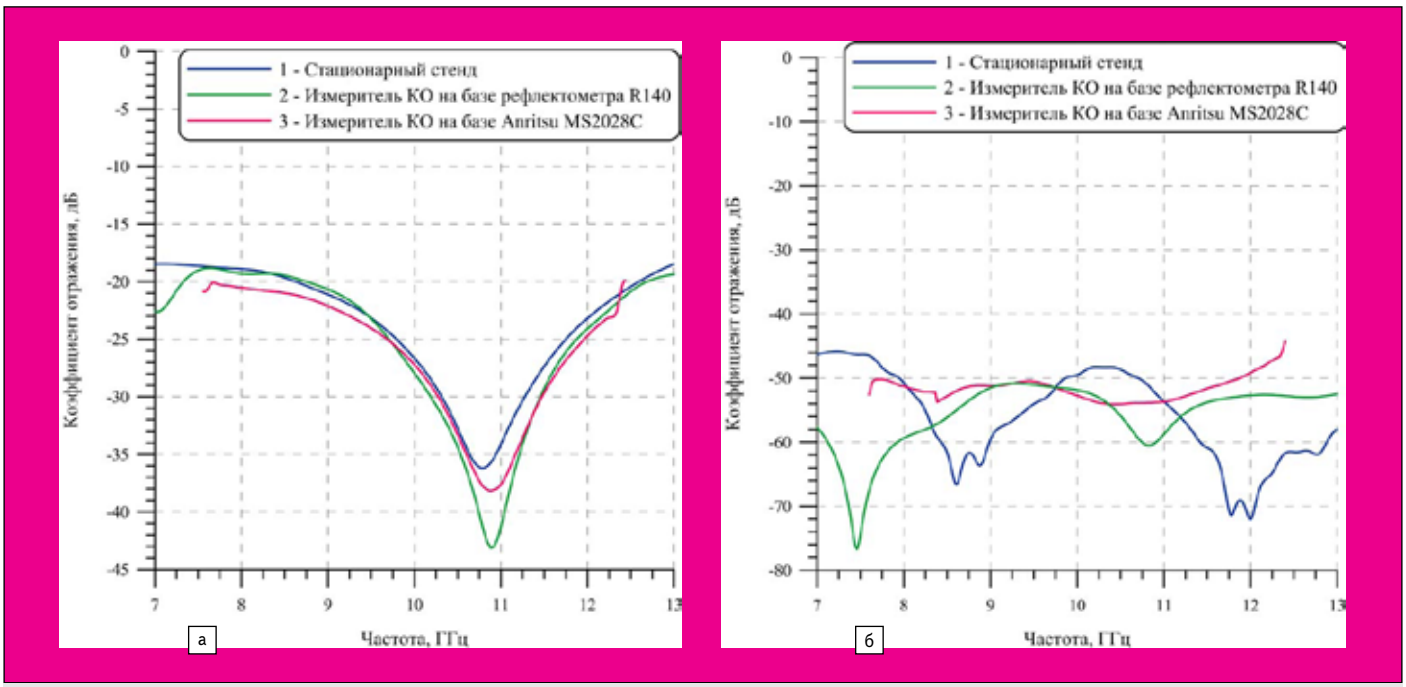


**Рис. 6.** Частотные зависимости КО (измеренные различными способами) на металлической подложке образца:
а) листового радиопоглощающего материала; б) пирамидального радиопоглощающего материала

На рис. 6 показаны измеренные различными способами частотные зависимости КО на металлической подложке образцов листового и пирамидального радиопоглощающих материалов на основе пенополиуретана.

Анализ частотных зависимостей КО образцов радиопоглощающих материалов, представленных на рис. 6, позволяет оценить динамический диапазон портативных измерителей КО в традиционном и перспективном исполнении, который составляет 40–50 дБ, что является достаточным для решения большинства практических задач.

## Заключение

Предложена практическая реализация перспективного мобильного комплекса для измерения КО радиопоглощающих материалов и покрытий на базе рефлектометра R140 и модифицированной рупорной антенны. Проведены сравнительные измерения в диапазоне 7–13 ГГц частотных зависимостей КО на металлической подложке образцов радиопоглощающих материалов и покрытий двумя различными способами: с помощью традиционного портативного измерителя КО покрытий на базе ВАЦ Anritsu MS2028C и с помощью перспективного измерителя на базе рефлектометра. Дополнительно измеренные частотные зависимости сравнивались с результатами измерений КО тех же образцов на аттестованном стационарном стенде с нормированными метрологическими характеристиками.

В результате можно сделать заключение, что предлагаемый вариант перспективного мобильного комплекса для измерений КО покрытий на основе рефлектометра имеет ряд существенных преимуществ по сравнению с традиционным техническим решением, в котором используется мобильный ВАЦ: более широкий частотный и динамический диапазоны измерения КО; меньшие эксплуатационные расходы, связанные с отсутствием необходимости использования фазостабильных высокочастотных кабелей; более низкая итоговая стоимость реализации.

## Литература

1. Басков К. М., Бобков Н. И., Краснолобов И. И., Семененко В. Н. Моделирование сверхширокополосной зеркальной антенны // Журнал радиоэлектроники. 2013. № 4.
2. John W. Schultz, et al. Ruggedized Compact Microwave Probes for Mapping Material Properties of Structures. 14th Int. Symposium on Nondestructive Characterization of Materials (NDCM 2015). Marina Del Rey, CA, USA, 2015.
3. Semenenko V. N., Chistyaev V. A., Politiko A. A., Baskov K. M. Ultrawide measurement bench for measuring electromagnetic properties of materials in free space in a microwave range // Measurement Techniques. 2019. Vol. 2.