

10. Носков В. Я., Игнатков К. А. Анализ искажений сигналов автодинных СВЧ датчиков вибраций. СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии // Тез. докл. 23-й Междунар. Крымской конф. Севастополь, 2013. С. 1042—1045.

11. Усанов Д. А. и др. Сверхвысокочастотный автодинный измеритель параметров вибраций // Приборы и техника эксперимента. 2004. № 5. С. 130—134.

12. Носков В. Я., Игнатков К. А. Экспериментальные исследования сигналов автодинных СВЧ-датчиков вибраций. СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии // Тез. докл. 23-й Междунар. Крымской конф. Севастополь, 2013. С. 1049—1050.

Дата принятия 13.05.2014 г.

621.396

Экспериментальная проверка когерентности радиолокационных сигналов от объектов с нелинейными электрическими свойствами

В. В. БЫСТРОВ, В. П. ЛИХАЧЕВ, Л. Б. РЯЗАНЦЕВ

Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина, Воронеж, Россия, e-mail: v.v.bystrov@mail.ru

Предложено обоснование устройства экспериментальной установки для исследования возможности когерентного накопления эхо-сигналов от объектов с нелинейными электрическими свойствами в синтезированной апертурной антенне. Экспериментально установлена зависимость отношения сигнал—шум от времени накопления, подтверждающая возможность когерентного накопления сигналов.

Ключевые слова: нелинейные электрические свойства, экспериментальная установка, когерентное накопление эхо-сигналов, отношение сигнал—шум.

The justification of a structure of experimental installation for the study of possibility of accumulation coherent echo-signals from objects with non-linear electric properties in synthetic aperture radars has been proposed. Signal—noise ratio accumulation time relationship proving the possibility of coherent signal accumulation has been experimentally determined.

Key words: non-linear electric properties, experimental installation, coherent echo-signals accumulation, signal-noise ratio.

В настоящее время мониторинг земной поверхности с помощью радиолокационной станции с синтезированной апертурой антенны (РСА) является распространенной технологией [1]. Такие станции позволяют решать задачи мониторинга лесных и сельскохозяйственных угодий, последствий экологических катастроф, а также проводить поисково-спасательные и другие работы в любое время суток в различных метеоусловиях.

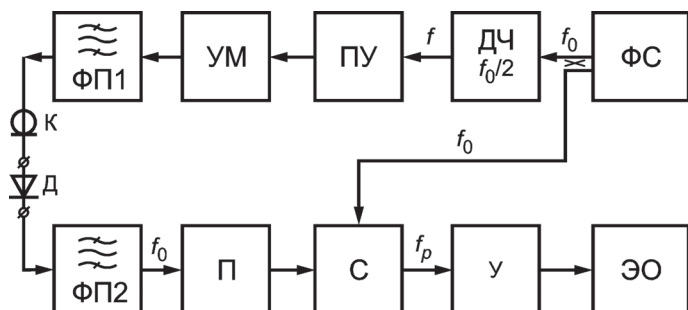


Рис. 1. Функциональная схема экспериментальной установки:

ФП1, ФП2 — фильтры; УМ — усилитель мощности 6 Вт; ПУ — предварительный усилитель; ДЧ — делитель частоты; ФС — формирователь сигнала; ЭО — осциллограф Infiniium 9000A; У — усилитель; С — смеситель; П — приемник; Д — диод Д405А; К — кабель RG-8X1; $f_0 = 1210...1390$ МГц; $f = 605...695$ МГц; $f_p = 51,4984$ кГц

Иногда при поисково-спасательных работах не обеспечивается эффективное обнаружение объектов на радиолокационных изображениях (РЛИ) земной поверхности, сформированных РСА. Это обусловлено тем, что РЛИ множества естественных объектов земной поверхности (камни, поваленные деревья и др.) имеют вид, аналогичный изображению искусственных объектов, например элементов летательного аппарата, потерпевшего катастрофу. Радиоэлектронное оборудование летательных аппаратов является объектом с нелинейными электрическими свойствами (ОНЭС), поэтому предложено наряду с классическими изображениями формировать нелинейные РЛИ (зондирование на частоте f_0 , прием на частотах $2f_0$ или $3f_0$) [2—6]. При этом объекты естественного происхождения на нелинейных РЛИ не будут отображаться. Использование РСА для обнаружения ОНЭС предполагает выполнение условия когерентности радиолокационных сигналов (далее, эхо-сигналов) в течение нескольких сотен миллисекунд. Однако возможность реализации основной процедуры — когерентного накопления эхо-сигналов ОНЭС в нелинейных радиолокационных станциях — до сих пор не исследована.

Цель данной работы — обоснование устройства экспериментальной установки и исследование возможности когерентного накопления эхо-сигналов от ОНЭС в РСА.

Для экспериментальных исследований разработана установка, которая по реализованным в ней процессам фор-

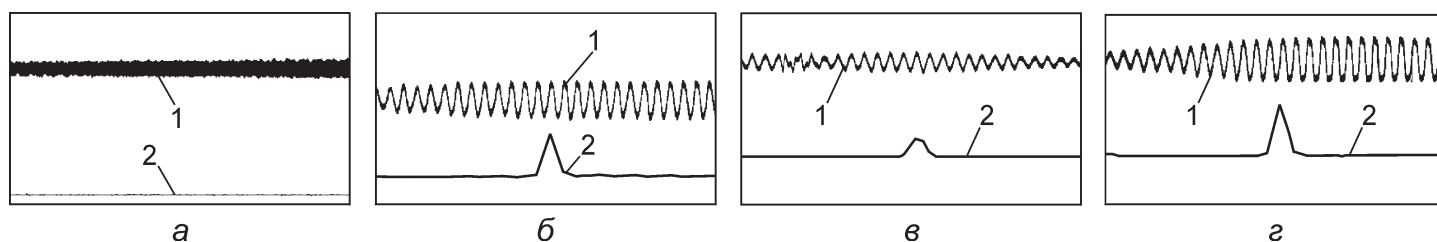


Рис. 2. Вид разностного сигнала во временной 1 и частотной 2 областях без подключения нелинейного элемента (а) и с нелинейными элементами — СВЧ-диодами Д405А (б), Д608А (в), 2Д203А (г)

мирования, распространения и обработки сигналов адекватна РСА, имеющей режим обнаружения ОНЭС. Функциональная схема такой установки представлена на рис. 1.

Принцип работы установки заключается в следующем. Формирователь сигнала — когерентный синтезатор частот, выполненный на основе фазовой автоподстройки частоты, вырабатывает зондирующий линейный частотно-модулированный (ЛЧМ) сигнал с несущей частотой $f_0 = 1300$ МГц, девиацией частоты $\Delta f = 180$ МГц и длительностью импульса $\tau_{\text{и}} = 1,6$ мс. В качестве опорной частоты используется сигнал с выхода высокочастотного кварцевого генератора. Формирователь сигнала дополнительно вырабатывает сигнал синхронизации, служащий для определения начала ЛЧМ-сигнала.

Условие приема эхо-сигнала на второй гармонике выполняется делением пополам частоты сигнала с формирователя. Полученный сигнал поступает на предварительный усилитель, который усиливает мощность зондирующего сигнала на входе усилителя мощности до 6 Вт и сохраняет его когерентность. Колебания с выхода усилителя через фильтр с полосой пропускания 605—695 МГц поступают в кабель RG-8X1 длиной $S = 110$ м и затуханием сигнала 36 дБ. Кабель имитирует задержку по времени на трассе и соответствует расстоянию 70 м в атмосфере. К выходу кабеля подключен анод СВЧ-диода, катод которого присоединен ко входу фильтра с полосой пропускания 1210—1390 МГц. Сигнал с выхода фильтра поступает на вход приемника, имеющего в своем составе малошумящий усилитель, выполненный по балансной схеме для расширения динамического диапазона приемного устройства. После усиления разностный сигнал приходит на вход осциллографа Infiniium 9000A. Разностная частота рассчитывается как

$$f_p = \Delta f \Delta t / \tau_{\text{и}},$$

где Δt — время задержки между зондирующим и принятым сигналами, $\Delta t = S/c$, S — расстояние от передатчика до приемника, c — скорость света в свободном пространстве.

В результате $f_p = S \Delta f / (\tau_{\text{и}} c)$.

Рассчитанное значение разностной частоты, составляет

$f_p^T = 41,250$ кГц. Учитывая коэффициент укорочения кабеля

RG-8X1 $k_y = 0,8$, имеем $f_p^T = 51,5625$ кГц [2].

Для подтверждения достоверности математических расчетов проведена экспериментальная проверка. Первоначально выход передатчика был соединен со входом приемника без нелинейного элемента (СВЧ-диода), рис. 2, а. В этом случае анализ вида сигнала во временной и частотных областях показал отсутствие разностного сигнала на выходе смесителя и наличие белого шума с равномерным спектром на выходе усилителя приемного тракта.

При подключении СВЧ-диодов Д405А, Д608А, 2Д203А в тракт прохождения сигнала наблюдается сигнал разностной частоты, вид которого во временной и частотной областях для различных типов СВЧ-диодов представлен на рис. 2, б—г.

Анализ результатов эксперимента показывает, что при подключении СВЧ-диода в трассу передачи сигнала, на выходе смесителя возникает одинаковая разностная частота

$f_p^3 = 51,4984$ кГц, пропорциональная дальности до ОНЭС и не зависящая от типа нелинейного элемента. С учетом погрешностей и неточностей измерений она соответствует теоретическим расчетам, т. е. $f_p^T = 51,5625$ кГц.

Уровень разностного сигнала зависит только от типа нелинейного элемента и для диодов Д608А, Д405А, 2Д203 составляет соответственно $U = 0,46; 0,93; 1,1$ В.

Проверку возможности когерентного накопления разностного сигнала проводили для СВЧ-диода 2Д203А за время накопления эхо-сигнала $t_{\text{н}}$ с шагом 0,27 мс. Максимальное время накопления эхо-сигнала составило 1,6 мс, что соответствует длительности ЛЧМ-сигнала. Результаты вычислений когерентного накопления разностного сигнала представлены в таблице.

Результаты вычислений когерентного накопления разностного сигнала

Количество отсчетов суммирования	Уровень шума без сигнала $U_{\text{ш}}, \text{В}$	Уровень сигнала $U_{\text{с}}, \text{В}$	Отношение сигнал—шум q
500	0,70	19,2	27,5
1000	1,07	46,0	43,0
1500	1,50	81,7	54,4
2000	1,84	116,0	63,0
2500	2,10	140,0	70,0
3000	2,40	202,0	83,0

Анализ результатов показывает, что увеличение количества отсчетов суммирования с 500 до 3000 с кратностью 500 приводит к увеличению уровня сигнала в 10,5 раз, уровня шума в 3,4 раза, а отношения сигнал—шум в 3 раза.

Графически отношение сигнал—шум q при разном времени когерентного накопления эхо-сигнала $t_{\text{н}}$ представлено на рис. 3, из которого следует, что зависимость q от $t_{\text{н}}$ имеет линейный характер. Проведя графический анализ получим, что за время $t_{\text{н}} = 1,35$ мс (интервал 0,27—1,62 мс) приращение отношения сигнал—шум составляет 55,5 (интервал 27,5—83), следовательно, увеличение времени накопления эхо-сигнала от ОНЭС в 1000 раз, например, при $t_{\text{н}} = 1$ с, приведет к увеличению отношения сигнал—шум на входе приемного тракта на 92 дБ/В.

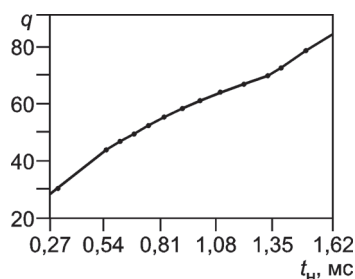


Рис. 3. Зависимость отношения сигнал—шум q от времени когерентного накопления сигнала t_n для СВЧ-диода 2Д203А

характер. Это подтверждает, что существует возможность когерентного накопления сигналов от ОНЭС, например, в нелинейных РСА [3—7].

Л и т е р а т у р а

1. Кондратенков Г. С., Фролов А. Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. М.: Радиотехника, 2005.

Таким образом, обосновано устройство экспериментальной установки, обеспечивающей адекватность процессов формирования, распространения и обработки сигналов от ОНЭС в РСА. Экспериментальным путем установлено, что для СВЧ-диода 2Д203А, зависимость отношения сигнал—шум q от времени накопления сигнала t_n имеет линейный

2. Ротхаммель К. Антенны. Минск, 2011.

3. Пат. 2347239 РФ. Способ формирования радиолокационного изображения объектов / В. П. Лихачев, Н. А. Усов // Изобретения. Полезные модели. 2009. № 5.

4. Пат. 2382380 РФ. Способ нелинейной радиолокации / В. П. Лихачев, Н. А. Усов // Изобретения. Полезные модели. 2010. № 5.

5. Пат. 2386979 РФ. Нелинейная РЛС с синтезированной апертурой антенны / В. П. Лихачев, Н. А. Усов // Изобретения. Полезные модели. 2010. № 11.

6. Пат. 2397509 РФ. Нелинейная РЛС с синтезированной апертурой антенны / В. П. Лихачев, Н. А. Усов // Изобретения. Полезные модели. 2010. № 23.

7. Иркутский О. А. и др. Дальность обнаружения объектов с нелинейными электрическими свойствами при синтезировании апертур антенны на гармониках и интермодуляционных составляющих зондирующих сигналов // Научные технологии. 2009. Т. 10. № 12. С. 40—43.

Дата принятия 16.06.2014 г.

53.083.2:537.226.3:537.226.4:621.3.083.2

Методика и устройство измерения СВЧ-параметров нелинейной керамики в управляющем электрическом поле

И. В. КОТЕЛЬНИКОВ*, В. Н. ОСАДЧИЙ*, Д. М. КОСЬМИН*, А. Д. КАНАРЕЙКИН*,
Е. А. НЕНАШЕВА**, А. Б. КОЗЫРЕВ*

* С.-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина), С.-Петербург, Россия, e-mail: igor-vit@rambler.ru

** Научно-исследовательский институт «Гириконд», С.-Петербург, Россия

Разработана методика и устройство, обеспечивающие измерения зависимостей тангенса угла диэлектрических потерь и диэлектрической проницаемости от напряженности управляющего электрического поля для нелинейной диэлектрической керамики в диапазоне частот 200—2000 МГц. Приведены данные этих зависимостей для сегнетоэлектрических керамических образцов $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ различного состава и управляющих напряжений до 10 кВ.

Ключевые слова: нелинейная керамика и диэлектрики, СВЧ-измерения, сегнетоэлектрик, диэлектрическая проницаемость, тангенс угла диэлектрических потерь, управляемость.

The procedure and device to measure the parameters of nonlinear ceramics, namely the dielectric dissipation factor and permittivity as functions of control electrical field strength for frequency range 200—2000 MHz are developed. The results of measurement of these dependencies at control voltages up to 10 kV for ferroelectric ceramic samples of $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ different composition are presented.

Key words: nonlinear ceramic and dielectrics, microwave measurements, ferroelectric, permittivity, dielectric dissipation factor, tunability.

Методики сверхвысокочастотных (СВЧ) измерений керамики линейных диэлектриков имеют долгую историю развития, стандартизированы как в России, так и за рубежом, и широко используются в метрологии элементной базы телекоммуникационных и радиолокационных систем [1—3]. Спектр СВЧ-элементов и устройств на основе линейной керамики чрезвычайно широк: подложки, резонаторы, фильтры, излучатели антенных решеток и др.

В связи с интенсивным развитием электроники предъявляются новые требования к указанным элементам и устройствам. Одно из основных требований — необходимость создания быстродействующих устройств с частотно-фазовой перестройкой вследствие приложения управляющих электрических полей. Использование керамики на основе нелинейных диэлектриков — сегнетоэлектриков в параэлектрическом состоянии — позволяет решить эти проблемы. Выпол-