

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДУЛЯЦИОННЫХ ПРИНЦИПОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ СПОСОБНОСТИ СВЧ-ДАТЧИКОВ

Современные измерительные приборы, которые создаются на основе СВЧ-датчиков, позволяют решать задачи неразрушающего контроля и диагностики сред, материалов и объектов. К достоинствам СВЧ-датчиков относятся простота применения и универсальность. Область применения этих датчиков можно существенно расширить, если дополнить конструкции измерителей устройствами, позволяющими модулировать те или иные параметры датчика или характеристики исследуемого объекта. Некоторое усложнение конструкции компенсируется преимуществами модуляционных измерений, нашедших широкое применение во многих областях научных исследований [1; 2]. Способы модуляции можно объединить в две основные группы – модуляции характеристик исследуемого объекта и параметров датчика.

Выходные параметры датчика  $u_i$  определяются совокупностью его технических параметров  $t_m$  и свойствами исследуемого объекта  $s_n$ :

$$u_i = U_i(t_1 \dots t_m, s_1 \dots s_n). \quad (1)$$

Исследуемые характеристики находятся решением системы уравнений относительно  $s_n$ .

Информационная способность измерительного прибора зависит от количества определяемых параметров  $s_n$  и точности их определения. Измерение некоторого числа выходных параметров  $u_i$  допускает однозначное решение не более чем для такого же числа параметров исследуемого объекта  $s_n$ . Технические параметры датчика  $t_m$  в данном случае формируют систему функций связи  $U_i$ . В идеальном случае изменение любого из этих параметров приводит к появлению новой  $U_i$  и, как следствие, к возникновению возможности получения информации еще об одной характеристике исследуемого объекта. При этом новый измеряемый параметр регистрируется тем же измерителем. На практике подобная идеализация допустима только в том случае, если отличие каждой новой функции от предыдущей превосходит разрешающую способность измерителя.

Для регистрации и определения значения каждого из  $u_i$  создается соответствующее измерительное устройство. При его создании стремятся достичь наивысших показателей. Как правило, именно совокупность этих показателей устройства определяет технические и экономические характеристики измерительного прибора в целом. Использование модуляционных подходов позволяет, не увеличивая количества и разнообразия базовых измерительных устройств, расширить множество измеряемых параметров или повысить точность измерения уже имеющихся. Этот путь более эффективен, так как одно модулирующее устройство может влиять на всю совокупность измеряемых параметров. Кроме того, модулирующие устройства могут быть дешевле и проще измерительных.

В том случае, когда модулирующее устройство непосредственно воздействует на исследуемый объект, изменяя один или несколько параметров  $s_n$ , можно, после внесения незначительных дополнений в методику измерений, получить информацию о новых физических свойствах объекта. А именно, фиксируются отклики его параметров  $s_n$  на заданное модулирующее воздействие. Измерительный блок при этом обычно дополняют корреляционным устройством, реализующим связь между модулирующим воздействием и измеряемыми параметрами. Такое решение, как правило, позволяет существенно повысить точность и улучшить помехозащищенность. Примером может служить внедрение фотомодуляционных методов измерения времени жизни подвижных носителей в полупроводниках. К непосредственным воздействиям можно отнести все виды радиации и излучений, температурные, механические и другие виды воздействий. Их использование целесообразно, если необходимо определить отклик образца на данный вид воздействий или известна связь между требуемым параметром и получаемым откликом. На практике такие случаи возникают при проектировании измерителей качества материалов, процентного состава смесей, влажности и пр.

Модуляция технических параметров СВЧ-датчика ограничивается случаями модуляции мощности и частоты зондирования, а также случаем изменения его геометрии. Модуляция мощности и частоты довольно широко применяется для обеспечения возможности включения в измерительный тракт корреляционного устройства с целью повысить точность измерений [1]. Именно данные виды модуляции используют для исследования нелинейных или частотно-зависимых объектов. Но в последнем случае эти виды модуляции можно отнести к непосредственным воздействиям, которые рассмотрены выше. Изменение геометрии датчика приводит к изменению граничных условий решения электродинамической задачи, которые, как правило, отличаются тем, что в них (за исключением условий для точеч-

ных зондов) нельзя выделить систему условий только для датчика или только для образца, как, например, при измерениях в дальней зоне антенны. Изменение геометрии датчика дает возможность установить пространственные распределения электрофизических характеристик исследуемого объекта. К крайним случаям реализации такой модуляции можно отнести измерители с распределенным полем приемников или же голографию, но они здесь не анализируются. Осуществить изменение или модуляцию геометрии датчика можно механическими устройствами или с помощью акустических волн. Рассмотрим условия применения и эффективность модуляционных методов для конкретного случая модуляции геометрии датчика, но сохраняя общность рассуждений для других видов модуляции.

Система уравнений (1) представляет собой результат аналитического или численного решения электродинамической задачи для данного датчика, когда  $t_m$  и  $s'_n$  считаются заданными. В простейшем случае, когда измеряется один параметр  $u_1$ , по которому определяется тоже один  $s_1$ , измерение называется прямым. Такая ситуация может возникнуть при использовании точечного зонда, перемещаемого в исследуемом пространстве. В этом случае поле зонда считается сосредоточенным в столь малом объеме, что параметры среды в нем можно считать постоянными. При конструировании таких датчиков стремятся ослабить влияние окружающих областей, в которых электрофизические параметры среды могут измениться.

Если поле зонда перекрывает неоднородную область, для определения ее параметров требуется проведение нескольких измерений с последующий весьма сложной обработкой, в основу которой положено численное решение системы (1). Такие измерения относятся к косвенным.

Косвенные измерения значительно более трудоемки, чем прямые. Информация, получаемая при их проведении, определяется количеством измеренных параметров и их точностью [3]. На практике не всегда удается достичь точности измерения параметров  $u_i$  и точности фиксации параметров датчика  $t_m$ , необходимых для достижения требуемой точности определения  $s_n$ . Исключение погрешности фиксации параметров  $t_m$  может быть осуществлено также путем увеличения числа регистрируемых параметров с последующим решением системы (1) не только относительно искомым  $s_n$ , но и относительно критических значений  $t_m$ . Подобные подходы зачастую являются предметом изобретений. Непосредственная оценка погрешности косвенного измерителя представляет собой достаточно сложную задачу, решаемую для каждого конкретного случая. При построении СВЧ-датчиков она усложняется тем, что, как правило, не удается получить прямых выражений искомым параметров.

При анализе модуляционных измерителей обычно ограничиваются случаем линейной модуляции [1]. Для СВЧ-датчиков необходимо рассматривать более общий случай. Модуляция некоторого параметра  $t_m$  позволяет по измеренным значениям  $u_i$  вычислить производные  $U_i$ , которые можно использовать так же, как и функции связи системы (1). При этом максимальный порядок производных определяется погрешностью измерителей  $\delta u_i$ :

$$\left| U_{t_m}^N \right| \frac{\Delta t_m^N}{N!} > \delta u_i. \quad (2)$$

Для простейшего случая измерения одного параметра, зависящего от одного модулируемого, имеем:

$$u(t) = U(t_0, s_n) + U' \Delta t + \frac{1}{2} U'' \Delta t^2 + \frac{1}{6} U''' \Delta t^3 + \dots \quad (3)$$

После вычисления значений производных параметры до  $s_n$  находятся решением системы уравнений, аналогичной (1); но в ней  $U_i$  являются производными из (3). Погрешности полученных значений  $s_n$  вычисляются на основании решения системы алгебраических уравнений, определитель которой составлен из первых производных по  $s_n$  от производных уравнения (3). В случае использования многопараметрического измерителя объем и сложность расчетов существенно возрастают.

Введение модуляционных устройств изменяет требования к проектированию приборов, проведению измерений и оценке погрешностей. Например, проектируя упомянутый выше датчик пространственного распределения электрофизических характеристик, необходимо стремиться к тому, чтобы поле датчика было неоднородным в исследуемой области.

Измерительные приборы на основе СВЧ-датчиков с модуляцией можно отнести к косвенным нелинейным измерителям, для которых нужно решать обратную задачу, представленную трансцендентными уравнениями. Определение эффективности работы таких измерителей — весьма сложная математическая задача, требующая значительной подготовки в каждом конкретном случае. Но усложнение математического описания и расчетов оправдывается существенным увеличением объема получаемой информации.

**Список литературы:** 1. Скрытник Ю.А. Модуляционные измерения параметров сигналов и цепей. М.: Совет. радио, 1975. 320 с. 2. Кардона М. Модуляционная спектроскопия: Пер. с англ. М.: Мир, 1972. 416 с. 3. Рабинович С.Г. Погрешности измерений. Л.: Энергия, 1978. 262 с.

Харьковский государственный технический университет радиозлектроники

Поступила в редколлегию 17.03.99