

Л и т е р а т у р а

1. Bloom B. J. e. a. An optical lattice clock with accuracy and stability at the 10^{-18} level // Nature. 2014. V. 506. P. 71—75.
2. Орнатский П. П. Автоматические измерения и приборы (аналоговые и цифровые). Киев: Вища школа, 1986.
3. ITU-T O.171. Jitter and wander measuring equipment for digital systems which are based on the synchronous digital hierarchy. 1997.
4. Дюкин А. Б., Медведев С. Ю., Мишагин К. Г. Перспективный цифровой частотный компаратор/анализатор фазовых шумов // Вестник метролога. 2011. № 2. С. 18—20.
5. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов. СПб.: Питер, 2002.
6. Игнатьев В. К., Никитин А. В., Бернардо-Сапрыкин В. Х., Орлов А. А. Измерение разности фаз квазигармонических сигналов в реальном времени // Наука и образование. 2013. № 7. [Электрон. версия] <http://dx.doi.org/10.7463/0713.0588392> (дата обращения 21.07.2015 г.).
7. Игнатьев В. К., Никитин А. В., Юшанов С. В. О единственности квазигармонического представления // Вестник ВолГУ. 2010. Сер.1. Вып. 13. С. 137—150.

8. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. М.: Радио и связь, 1989.
9. ГОСТ Р8.607—2004. ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений девиации частоты.
10. Игнатьев В. К., Станкевич Д. А. Аппаратно-программный комплекс для параметрического анализа сигналов в задачах технической диагностики // Инженерный вестник Дона. 2013. № 3. [Электрон. версия] http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_106_ignatjev.pdf_1843.pdf (дата обращения 26.04.2015 г.).
11. Крамер Г. Математические методы статистики. М.: Мир, 1975.
12. Nicholas III, H. and Samueli, H. An Analysis of the Output Spectrum of Direct Digital Frequency Synthesizers in the Presence of Phase-Accumulator Truncation // 41st Annual Frequency Control Symposium. 1987. P. 495—502.
13. Flanagan M. J., Zimmerman G. A. Spur-Reduced Digital Sinusoid Synthesis // IEEE Trans. Commun. 1995. V. 43. N. 7. P. 2254—2262.

Дата принятия 15.09.2015 г.

681.518.3.621.371

Линеаризация частотной характеристики сверхвысокочастотного датчика с помощью виртуальной шкалы времени

Д. В. ХАБЛОВ

Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН,
Москва, Россия, e-mail: dkhablov@mail.ru

Предложен способ линеаризации частотных характеристик сверхвысокочастотных датчиков в результате изменения частоты выборок при записи сигнала биений. Использовано прямое непрерывное вейвлет-преобразование.

Ключевые слова: частотная модуляция, непрерывное вейвлет-преобразование, радиоволновый датчик, сигнал биений.

The way to linearization frequency modulated microwave sensors, due to changes in the frequency of samples when record beating signal is proposed. The procedure uses direct continuous wavelet transform.

Key words: frequency modulation, continuous wavelet transform, microwave sensor, beat signal.

Сверхвысокочастотные (СВЧ) датчики с частотной модуляцией широко используют в измерительных системах для контроля уровня жидких и сыпучих сред, толщины диэлектрических материалов, потока, влажности и состава технологических сред. Сверхвысокочастотные датчики актуальны, когда проводят работы в жёстких условиях агрессивных химических сред и при высоких температурах. По способам измерений такие датчики подразделяют на бесконтактные, радиолокационного типа, а также с использованием волноводных и резонаторных систем [1].

Точность измерения СВЧ-датчиков с частотной модуляцией зависит от линейности преобразования частоты генератора и линейности амплитудно-частотных характеристики всех активных и пассивных компонентов, включая антенну, поскольку в указанных датчиках непосредственно частоту излучения не измеряют, а определяют её косвенно по фазово-временным параметрам. В результате получают либо частоту биений в радиолокационных датчиках, либо расположение максимума пика на временной оси при развёртке амплитудно-частотной характеристики датчика резонатор-

ного типа. Также точность определения измеряемых величин повышается с увеличением диапазона перестройки частоты СВЧ-генератора или девиации частоты. Для обеспечения такой полосы применяют устройство с твёрдотельным резонатором на основе железо-итриевого граната (так называемую «ЖИГ-сферу»), резонансная частота которого изменяется в зависимости от воздействия магнитного поля, созданного катушкой, управляемой источником тока. На более высоких частотах применяют схемы с варакторами. Иногда для снижения стоимости датчиков используют управление частотой транзисторных генераторов по цепям питания. При этом во всех устройствах, присутствует нелинейность преобразования, поэтому приходится задействовать сложные схемы заводской настройки и градуировки генераторов, существенно увеличивающие их стоимость. Когда разработчики измерительных систем подключают дополнительно пассивные и активные элементы — антенны, переходы, направленные ответвители, усилители, циркуляторы, делители и т. д., тоже имеющие частотные характеристики, возникает общая системная нелинейность преобразования «напряжение — частота». На нелинейность систем также влияет температурный дрейф по цепям питания и эффекты старения элементов.

Таким образом, задача линеаризации частотной характеристики датчика на уровне ввода в процессор предварительно обработанных данных посредством специально разработанного алгоритма, достаточно актуальна. Высокая стоимость СВЧ-датчиков препятствует их широкому внедрению в промышленность. Ранее комплектующие для СВЧ-датчиков разрабатывали в некоммерческих структурах и в условиях недостаточного развития вычислительной техники. Их использовали для военной промышленности, радиолокационных станций и космической связи. В связи с появлением дешёвых и мощных компонентов микропроцессорных устройств возникли предпосылки к разработке датчиков с упрощёнными СВЧ-блоками, характеристики которых можно компенсировать более сложной обработкой сигналов. В [2] невысокая линейность СВЧ-генератора компенсируется фазовой линеаризацией, для сглаживания дискретной погрешности применяют спектральную обработку и вейвлет-преобразования [3, 4].

В настоящей работе предложен способ линеаризации частотной характеристики СВЧ-датчика на основе переформатирования временного масштаба с предварительной об-

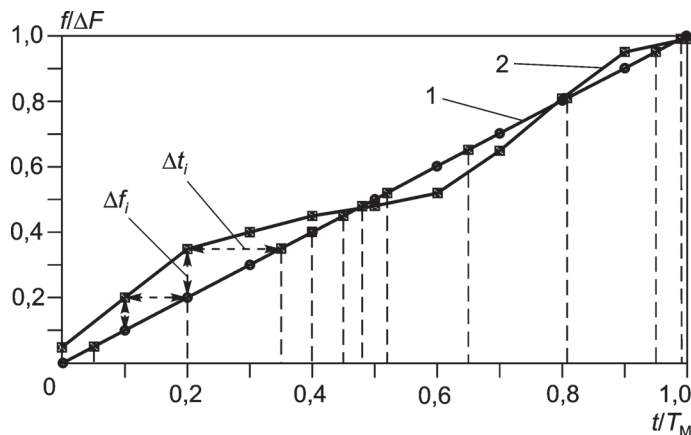


Рис. 1. Изменения частоты при линейной частотной модуляции в идеальном (1) и реальном (2) случаях

работкой данных с помощью прямого непрерывного вейвлет-преобразования.

Фазовая линеаризация частотной характеристики СВЧ-датчиков. На рис. 1 показана идеальная линейная частотная характеристика датчика и его реальная нелинейная характеристика. Обе кривые представлены на графике в относительных единицах $f/\Delta F$ и t/T_m , где f — частота; ΔF — максимальная девиация; t — время; T_m — период модуляции.

Рассмотрим влияние нелинейности характеристики на примере датчика расстояний. СВЧ-излучение с линейной частотной модуляцией с помощью антенны направляется от генератора в сторону объекта, расположенного на расстоянии L , отражается от него и возвращается через антенну на один вход смесителя. На другой вход подаётся часть электромагнитных волн непосредственно от генератора. На выходе смесителя выделяются сигналы разностной частоты или биений $U(t)$ с частотой f , определяемой из разности текущего сигнала и сдвинутого по времени на τ . Поскольку $\tau = 2L/c$, где c — скорость света в воздухе, то частоту f можно определить по формуле

$$f = 2L\Delta F/(cT_m). \quad (1)$$

Этот сигнал непрерывен от 0 до окончания периода модуляции T_m , при этом частота СВЧ-генератора изменяется на ΔF . Из (1) следует, что по частоте биений можно определить расстояние до объекта, но лишь при условии, что первая производная частоты от времени для источника СВЧ-излучения неизменна за время модуляции. Если период модуляции разбить на сумму N отрезков времени Δt_i — $T_m =$

$$= \sum_{i=1}^N \Delta t_i, \quad i = 1, 2, \dots, N, \text{ где каждому отрезку соответствует из-}$$

менение частоты на Δf_i , то частота биений будет постоянной только при условии равенства всех отношений $\Delta f_i/\Delta t_i$, т. е. производная должна быть постоянной. Если же она изменяется в течение T_m , то частота биений также будет постоянно колебаться, что в итоге приведёт к расширению спектра сигнала биений и увеличению погрешности при определении расстояния.

Следовательно, для выполнения условия линейности необходимо поддерживать постоянство производной df/dt . С помощью метода фазовой линеаризации необходимо измерить все N значений $\Delta f_i/\Delta t_i$, и в случае отклонения Δf_i от постоянного значения Δf , увеличить или уменьшить Δt_i . В результате временные интервалы изменятся, а кривая линеаризуется в новом временном масштабе. Количество интервалов в этом случае может измениться (см. рис. 1).

Фазовая линеаризация с помощью прямого непрерывного вейвлет-преобразования (ПНВП). Главная проблема реализации описанного алгоритма — измерения частот Δf_i на локальных отрезках времени Δt_i , что является непростой задачей из-за ограниченности времени по сравнению с периодами колебаний, соответствующими этим частотам. Однако локальное измерение частот можно выполнить с помощью ПНВП [4]. Запишем выражение для сигнала биений в виде суммы сигналов на N одинаковых временных интервалах:

$$U(t) = \sum_{i=0}^N U_i(t). \quad (2)$$

На каждом интервале Δt_i существует сигнал

[illegible]

Для его линеаризации необходимо обеспечить постоянство производной df/dt , а частоту выборки в каждом из одинаковых интервалов Δt_i нужно изменять пропорционально частотному отклонению Δf_i . Тогда для всех $\Delta f_i/\Delta t_i$ будем иметь $\Delta f_i/\Delta t_i = \Delta F/T_m = \text{const}$ и, после переформатирования по новому нелинейному масштабу по оси абсцисс, *кривая 2* линеаризуется (см. рис. 1).

Для численного моделирования введём следующие исходные данные: $T_m = 1$ с; $\Delta F = 1$ ГГц; $N = 11$; $\Delta t = 0,1$ с; $L = 10$ м, количество выборок — 1100, по 100 на каждый участок Δt . Тогда частота биений согласно (1) равна 66,66 Гц. Нелинейная частотная характеристика датчика соответствует кривой 2 (см. рис. 1). Вычислим по (2) коэффициенты ПНВП для модельного сигнала биений $U(t)$:

$$C(a, b) = \int_0^{T_M} U(t) a^{-1/2} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt,$$

где a — частотный масштабирующий коэффициент; b — коэффициент временного масштаба; ψ — вейвлетная функция (в рассматриваемом примере — комплексный вейвлет Гаусса 4-го порядка). Результат вычислений представлен на рис. 2, а.

Далее на каждом временном интервале Δt_i частота выборок изменяется пропорционально частоте отклонения от линейной зависимости (см. рис. 1) и, следовательно, обратно пропорционально отклонению a . Коэффициенты a связаны с частотой сигнала передаточной функцией [5]

$$f(a) = F_C/a\Delta,$$

где F_C — центральная частота вейвлета; Δ — частота выборки для соответствующего сегмента Δt_j .

Частоту в этом случае удобнее пересчитать в относительные единицы, что позволит линеаризовать частотную характеристику во всем диапазоне ΔF , локально изменив частоты выборки (см. рис. 1). Затем массив данных с виртуальной нелинейной шкалой по горизонтальной координате вновь перемасштабируется с равномерным количеством выборок и выполняется ПНВП. Полученная линеаризация данных представлена на рис. 2, б. Максимумы энергетической плотности коэффициентов концентрируются на линии $a = 10,1$, что соответствует частоте биений 66,66 Гц.

Эффективность описанной процедуры показана на рис. 3, где сравниваются два спектра сигнала биений $U(t)$: 1 — для нелинеаризованной характеристики датчика, 2 — после обработки выходного сигнала по описанной процедуре.

Из графиков следует, что сигнал биений после обработки по процедуре линеаризации имеет ярко выраженный спектральный максимум при частоте 66,66 Гц в отличие от нелинеаризованного сигнала, что значительно повышает точность определения частоты биений, а, следовательно, и связанный с ним параметр измерений (расстояние, уровень, толщину и т. п.). В данном случае — расстояние.

Линеаризация выполняется в отдельном входном модуле обработки данных, содержащем в программном коде алгоритм, который можно разделить на следующие этапы:

проводится калибровка, т. е. линеаризация, в результате чего создаётся и запоминается массив данных со значениями частот выборок на локальных интервалах времени;

текущие данные фиксируются в соответствии с созданным управляющим массивом выборок;

записанная информация переформатируется в линейном масштабе и передается для обработки.

Далее процедура осуществляется автоматически, начиная со второго этапа. В случае необходимости тестирования вновь выполняется первый этап.

Заключение. Процедура ПНВП требует дополнительного включения в блок-схему датчика процессорного модуля предварительной обработки данных. В последние годы стоимость миниатюрных вычислительных модулей снижается,

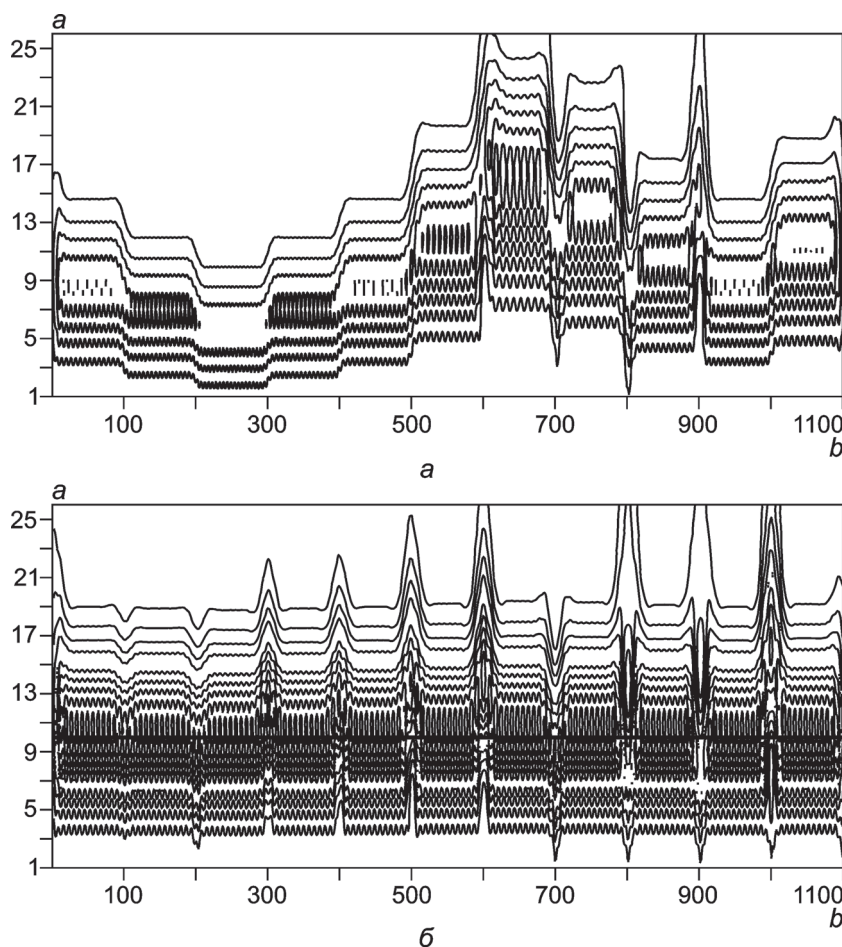


Рис. 2. Коэффициенты $C(a, b)$ прямого непрерывного вейвлет-преобразования сигнала биений при нелинейной частотной характеристике СВЧ-датчика с частотной модуляцией (а) и после линеаризации частотной характеристики (б)

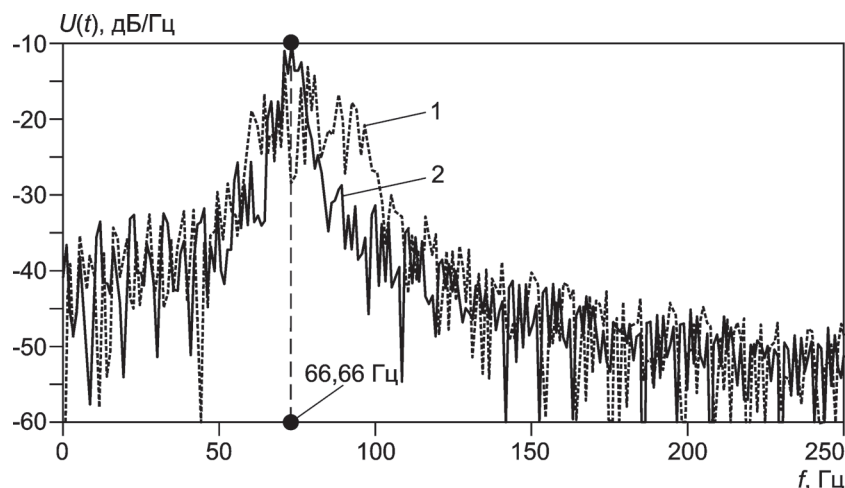


Рис. 3. Спектральная плотность сигнала биений до линейризации (1) и после неё (2)

а их качественные характеристики растут. Однако СВЧ-компоненты остаются дорогими, что препятствует широкому распространению в промышленности СВЧ-датчиков с частотной модуляцией при всех их неоспоримых преимуществах. Описанная процедура была успешно протестирована при нелинейностях до 10 %. Датчики на основе СВЧ-компонентов с такими параметрами будут во много раз дешевле [2]. Поэтому имеются серьезные основания полагать, что дальней-

шее развитие СВЧ-датчиков с частотной модуляцией пойдет по пути упрощения схем СВЧ-устройств с одновременным усложнением блоков обработки сигналов.

Литература

1. **Викторов В. А., Лункин Б. В., Совлуков А. С.** Радиоволновые измерения параметров технологических процессов. М.: Энергоатомиздат, 1989.
2. **Ruser H., Magori V., Tränkler H.-R.** Correlated microwave-ultrasonic multi-sensor for reliable measurements of velocity and range // Proc. of the 19th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference. 2002. V. 1. P. 25—30.
3. **Атаянц Б. А., Давыдович В. М., Езерский В. В., Паршин В. С., Смольский С. М.** Прецизионные системы ближней частотной радиолокации промышленного применения. М.: Радиотехника, 2012.
4. **Хаблов Д. В.** Прямое непрерывное вейвлет-преобразование в обработке сигналов радиоволновых датчиков // Измерительная техника. 2013. № 5. С. 31—35.
5. **Хаблов Д. В.** Повышение точности ЧМ уровнемера при помощи вейвлет преобразования // Датчики и системы. 2013. № 7. С. 52—56.

Дата принятия 18.11.2015 г.

621.317.08

Измерение параметров полупроводниковых приборов на пластине

А. А. САВИН¹, В. Г. ГУБА², О. Н. БЫКОВА²

¹ Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
² Научно-производственная компания «ТАИР», Томск, Россия, e-mail: saasavin@mail.ru

Рассмотрен метод измерений *S*-параметров полупроводниковых приборов с помощью векторного анализатора цепей и зондовой станции в миллиметровом диапазоне частот. Высокая точность измерений достигнута последовательным исключением всех источников погрешностей. Приведены соотношения, связывающие эффективные параметры измерительной системы и максимальную погрешность. Выполнен эксперимент и показаны результаты в сравнении с аналогичными исследованиями.

Ключевые слова: векторный анализатор цепей, зондовая станция, полупроводниковая пластина, *S*-параметры.

Features of an *S*-parameters measuring method of semiconductor devices using a vector network analyzer and probe station are reviewed. The exclusion of all error sources is required for high-precision measurements. The relations between effective parameters of the measuring system and maximum error are presented. An experiment was made, and the results are shown in comparison with similar experiments.

Key words: vector network analyzer, probe station, semiconductor wafer, *S*-parameters.

Проектирование современных электронных устройств основано на моделях их электронных компонентов. Достоверность моделей зависит от точности измерений параметров компонентов в корпусе или на подложке, поэтому тестирование полупроводниковых приборов на пластине для оп-

ределения *S*-параметров является важной задачей. Метод измерений *S*-параметров СВЧ-транзисторов с помощью двойного 12-портового (6-портового) рефлектометра рассмотрен в [1]. Калибровка системы в этом случае предполагает использование мер холостого хода, короткого замыка-