

УДК 681.31

И.В. Руженцев, Ю.В. Козлов, М.Н. Копоть

Харьковский национальный университет радиотехники, Харьков, Украина

**УМЕНЬШЕНИЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ СВЧ-СИГНАЛОВ**

В статье проанализировано влияние изменения длины волны в тракте, а также методы учета и коррекции систематических погрешностей, обусловленных этими изменениями. Рассмотрена возможность уменьшения неопределенности измерения параметров СВЧ-сигналов за счет измерения частоты методом обратного счета в его классическом варианте с учетом специфики двоичной арифметики, обеспечивающим потенциальную точность измерения частоты, и последующего пересчета измеренной частоты в длину волны.

**Ключевые слова:** СВЧ-мультиметр, неопределенность измерений, измерение частоты.

**Введение**

**Постановка проблемы.** Применение многозондовой измерительной линии позволяет реализовать многофункциональные быстродействующие средства измерения энергетических параметров сигнала (мощности) и параметров нагрузки (модуля и фазы комплексного коэффициента отражения) линии передачи СВЧ – мультиметры СВЧ [1]. При их проектировании одним из главных требований является обеспечение широкополосности и независимости от изменения частоты, что может быть достигнуто различными техническими или алгоритмическими методами.

**Анализ последних достижений и публикаций.** Принято считать, что наиболее перспективным является применение алгоритмических методов учета изменения частоты в тракте, а также учета и коррекции систематических погрешностей, обусловленных этим изменением [1 – 3]. Длина волны в линии передачи определяется путем обработки сигналов, снятых с размещенных вдоль передающего тракта зондов, по известным формулам [3].

Путем математического моделирования были оценены погрешности измерения проходящей  $P_{\text{прох}}$ , падающей  $P_{\text{пад}}$  и отраженной  $P_{\text{отр}}$  мощностей (рис. 1) и длины волны (рис. 2) в полосе частот и в зависимости от значений модуля комплексного коэффициента отражения (ККО). Погрешности рассчитывались при условии погрешности коэффициента передачи одного из зондов  $\delta k = 1,0\%$ .

Как видно из графиков, в некоторых условиях небольшая погрешность коэффициента передачи одного из зондов в полосе частот волновода может вызвать увеличение результирующей погрешности определения проходящей мощности и длины волны при помощи частотонезависимого алгоритма до 10% и 5,5% соответственно (суммарная стандартная неопределенность, в предположении равномерного закона распределения погрешностей и доверительной вероятности 0,95 [с. 174, 4], не будет превышать 5 и 2,75%).

Это предопределяет целесообразность использования частотомера, работающего в диапазоне СВЧ, для косвенного измерения длины волны в ли-

нии передачи, актуальность и цель данной статьи – исследование возможности уменьшения неопределенности измерений СВЧ-мультиметра.

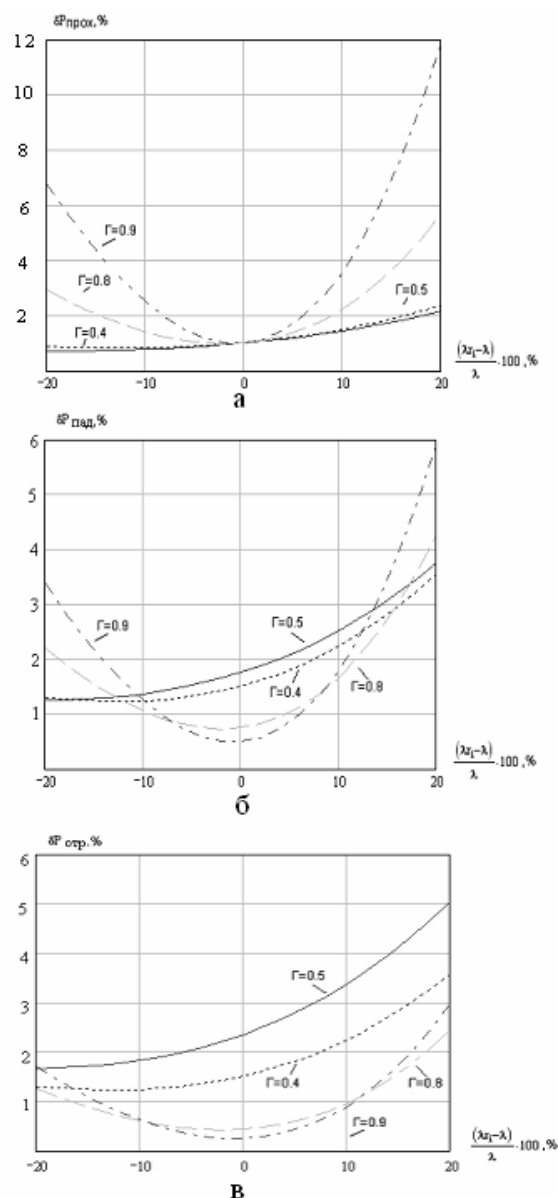


Рис. 1. Погрешности определения проходящей (а), падающей (б) и отраженной (в) мощностей

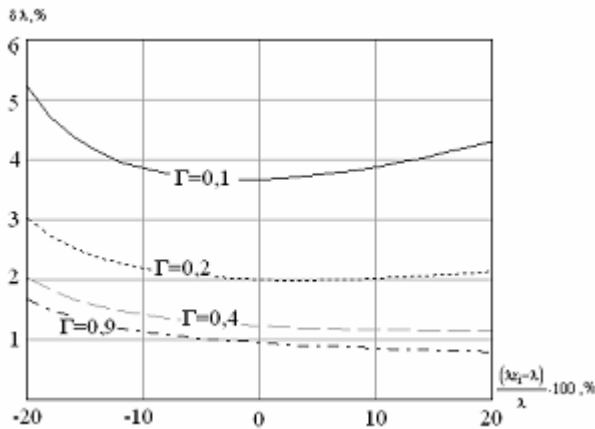


Рис. 2. Погрешности определения длины волны в полосе частот

**Изложение основного материала**

В качестве одного из возможных решений поставленной задачи можно рассмотреть метод, предусматривающий измерение частоты  $f$  [5] с последующим ее пересчетом в длину волны по известным формулам. Для реализации такого подхода необходим частотомер, работающий в требуемом диапазоне частот.

Измерение частоты на СВЧ целесообразно выполнять методом обратного счета, сущность которого состоит в том, что за время счета  $T_c$  одновременно подсчитывают количество  $N$  периодов  $T_x$  измеряемой частоты и количество  $M$  импульсов образцового генератора с периодом  $T_0$  [4]. Из равенства  $N \cdot T_x = M \cdot T_0$  выходит

$$T_x = \frac{M}{N} \cdot T_0; \quad f_x = \frac{N}{M} \cdot f_0. \quad (1)$$

Относительная погрешность вычисления (измерения) частоты :

$$\delta f_x = \delta N + \delta f_0, \quad (2)$$

где  $\delta N = 1/N$  – относительная погрешность счета количества периодов измеренной частоты, а  $\delta f_0$  – нестабильность опорной частоты.

Если учесть специфику двоичной арифметики и определить разрядность счетчиков  $N$  и  $M$  равной  $k$ , а частоту  $f_0$  образцового сигнала взять кратной секунде и делить подекадно, то уравнения измерений (1) приобретут следующий вид:

$$T_x = \frac{M}{2^k} \cdot 10^n; \quad f_x = \frac{N}{2^k} \cdot 10^{-n}. \quad (3)$$

Операция деления на  $2^k$  имеет коммутационный смысл, множитель кратности  $10^n$  (коэффициент деления частоты  $10^{-n}$ ) определяется оператором или автоматически.

Чтобы пренебречь нестабильностью опорной частоты, надо чтобы  $\delta N$  была приблизительно на порядок больше, чем  $\delta f_0$ , то есть надо, чтобы выполнялось условие:

$$10(1/2^k) \approx (1/10^n).$$

После несложных преобразований и логарифмирования можно записать выражение для определения требуемой разрядности двоичного счетчика:

$$k \approx (n + 1)/0,301. \quad (4)$$

Например, что при стабильности генератора опорной частоты  $\delta_0 = 10^{-7}$  для удовлетворения условия (4) разрядность двоичного счетчика  $k \approx (7 + 1)/0,301 \approx 27$ , то есть при разрядности счетчика меньше 27 нестабильностью опорной частоты можно пренебречь, считая, что

$$\delta f_x \approx \delta N = 1/2^k. \quad (5)$$

В микропроцессорном частотомере ЧЗ-64 для определения частоты используется довольно громоздкое расчетное соотношение [6]:

$$f_x = \frac{k_d \cdot N_E}{10 \cdot (N_0 + \frac{N_1}{k_1} - \frac{N_2}{k_2} - N_{II} \cdot \Delta N_{cp})}, \quad (6)$$

где  $k_d$  – коэффициент деления делителя частоты;  $N_E$  – суммарное количество периодов сигнала несущей частоты;  $N_0$  – суммарное количество импульсов опорной частоты за время счета;  $N_1, N_2$  – суммарное количество импульсов интерполяторов;  $k_1, k_2$  – коэффициенты расширения интерполяторов;  $N_{II}$  – количество радиоимпульсов;  $\Delta N_{cp}$  – поправочное число.

Относительная погрешность вычисления определяется методом геометрического суммирования относительных погрешностей соответствующих составляющих выражения (6).

Если считать, что разрядность счетчиков одинакова и выбрана из условия (4), то есть

$$\delta k_d = \delta N_E = \delta N_0 = \delta N_1 = \delta k_1 = \delta N_2 = \delta k_2 = \delta N_{II} = \delta(\Delta N_{cp}),$$

то можно записать

$$\delta f_x \approx \sqrt{9\delta N_E^2} = 3\delta N_E, \quad (7)$$

где  $N_E$  – величина, тождественная  $N$ , то есть

$$\delta f_x = 3\delta N. \quad (8)$$

Итак, сравнение (5) и (8) позволяет сделать вывод, что погрешность измерений по формуле (3) втрое меньше погрешности метода (6), реализованного в микропроцессорном частотомере ЧЗ-64.

Из технического описания [6] и из рассмотрения функциональных схем частотомера ЧЗ-64 следует, что разрядность операндов вычислительного алгоритма составляет:  $N_1$  – 16 двоичных разрядов (четыре тетрады (декады) для двоично-десятичного представления операнда);  $N_2$  – 16 двоичных разрядов (четыре тетрады для двоично-десятичного представления операнда);  $N_E$  – 40 двоичных разрядов (десять тетрад для двоично-десятичного представления операнда);  $N_0$  – 40 двоичных разрядов (десять тетрад для двоично-десятичного представления операнда);  $N_{II}$  – 16 двоичных разрядов;  $\Delta N_{cp}$  – 16 двоичных разрядов.

Разрядность счетчиков  $N_E$  и  $N_0$  и их структура “привязаны” к разрядности устройства индикации результата измерений (десять декад). Разрядности счетчиков  $N_1, N_2, N_{II}$  и  $\Delta N_{cp}$  и их структуры обусловлены максимально возможными значениями суммарного количества импульсов интерполяторов, количества радиоимпульсов и разрядностью поправочного числа.

Результат измерения  $f_x$  представлен 32 разрядами (4 байта), то есть 8 декадами.

Поскольку вычисление выполняется микропроцессором, допустим также, что:

– умножение на коэффициент деления  $k_d$  в числителе реализуется микропроцессором, как операция сдвига влево операнда  $N_E$  на соответствующее количество тетрад;

– деление на  $k_1$  и  $k_2$  в знаменателе реализуется сдвигом соответственно операндов  $N_1$  и  $N_2$  вправо на 8 двоичных разрядов, то есть 2 тетрады;

– операция деления на 10 в знаменателе реализуется сдвигом вправо вычисленного в знаменателе выражения на одну тетраду.

Такие предположения предусматривают отсутствие погрешностей, связанных с перечисленными выше операциями, и позволяют переписать выражение для оценивания погрешности дискретности измерения частоты в следующем виде:

$$\delta N \approx \sqrt{\delta^2(N_E) + \delta^2(N_0) + \delta^2(N_1) + \delta^2(N_2) + \delta^2(N_H) + \delta^2(\Delta N_{cp})}$$

При разрядности операндов, приведенной выше, в этом выражении определяющими будут одинаковые по величине погрешности  $\delta N_1$ ,  $\delta N_2$ ,  $\delta N_H$  и  $\delta(\Delta N_{cp})$ , которые почти на шесть порядков больше погрешностей  $\delta N_E$  и  $\delta N_0$ . Поэтому можно считать

$$\delta N \approx \sqrt{4\delta^2(N_1)} = 2\delta N_1 \quad (9)$$

В приложении технического описания частотомера ЧЗ-64 [6] приведены графики зависимости погрешностей измерений частоты (и периода) от значений измеряемой частоты при различных отношениях шум/сигнал и уровней сигнала с учетом погрешности запуска  $\delta_{зап}$ , обусловленной шумами на входе прибора и нестабильностью уровня запуска, рассчитанных в соответствии с выражением

$$\delta_f \approx \pm(10^{-9}/T_{сч} + \delta_{зап}), \quad (10)$$

где  $T_{сч}$  – устанавливаемое время счета, с.

Погрешности для  $T_{сч} = 1$  с и фиксированных уровней сигнала  $U_{вх} = 0,5$  В и  $U_{вх} = 0,05$  В отличаются от действительных на величину  $\delta f_0$  относительной погрешности по частоте (нестабильности) внутреннего кварцевого генератора или внешнего опорного генератора и “идеализируют” погрешности вычисления частоты микропроцессором (так, как если бы разрядность всех счетчиков составляла десять декад, что не соответствует техническому описанию) [7].

В выражении (10) первая составляющая в скобках записана некорректно, так как является размерной величиной, хотя должна отражать относительную погрешность дискретности.

Вообще же погрешность измерения частоты

$$\delta_f = \pm(\delta f_0 + \delta N + \delta_{зап}). \quad (11)$$

Если привести алгоритм расчета частоты к исходному алгоритму (3) метода обратного счета и соответствующим образом выбрать разрядность  $k$  двоичных счетчиков, то погрешность (11) можно уменьшить

[5]. Очевидно, что увеличение разрядности счетчиков уменьшает вклад составляющей  $\delta N$  в погрешность измерения частоты, а условие, при котором этой составляющей можно пренебречь, имеет вид

$$k \approx (n/0,301) + 2. \quad (12)$$

Например, для  $\delta f_0 = 10^{-9}$  (нестабильность генератора опорной частоты частотомера ЧЗ-64) необходимо выбрать разрядность счетчиков  $k \approx 32$ . Такая разрядность счетчиков соответствует разрядности современных персональных компьютеров (ПК), которые могут выполнять вычисление с удвоенной точностью и могут быть использованы для построения “виртуального” СВЧ-мультиметра.

Таким образом, погрешность предложенного способа измерения частоты в линии передачи определяется только нестабильностью опорной частоты применяемого генератора и не будет превышать значения  $\delta f_0 = 10^{-9}$ . Тогда суммарная стандартная неопределенность в предположении равномерного закона распределения внутри границ, согласно [4] будет равна:

$$u_c = \frac{\delta f_0}{t_{p(1)}} = \frac{10^{-9}}{\sqrt{3}} = 0,58 \cdot 10^{-9}.$$

Погрешность измерения частоты частотомером ЧЗ-64 равна  $\delta_\Sigma = 10^{-7}$ . Соответственно, суммарная стандартная неопределенность в предположении равномерного закона распределения внутри границ равна:

$$u_c = \frac{\delta_\Sigma}{t_{p(1)}} = \frac{10^{-7}}{\sqrt{3}} = 0,58 \cdot 10^{-7}.$$

Таким образом, предложенный способ позволяет уменьшить неопределенность измерения частоты на два порядка.

## Выводы

1. Предложен способ измерения частоты и периода, который можно использовать в составе СВЧ-мультиметра для получения априорной информации о длине волны.

2. Предложенный способ позволяет уменьшить неопределенность измерения частоты на порядок и более.

## Список литературы

1. Волков В.М. Проектирование средств измерения проходящей мощности: учебное пособие / В.М. Волков. – Х.: ХТУРЭ, 2000. – 160 с.
2. Бондаренко И.К.. Автоматизация измерений параметров СВЧ трактов / И.К.. Бондаренко, Г.А. Дейнега, З.В. Магачев. – М.: Советское радио, 1969. – 303 с.
3. Пат. 22620А Україна, МКІ G 01 R 23/06. Пристрій для вимірювання надвисоких частот / В.М. Волков, О.Б. Індіна (Україна). – №9601026; Заявлено 23.01.96; Опубл. 17.03.98, Бюл. № 3. – 2 с.
4. Захаров И.П. Теория неопределенности в измерениях / И.П. Захаров, В.Д. Кукуш. – Х.: Консум, 2002. – 256 с.
5. Пат. 85951 Україна, МПК G 01 R 23/00. Спосіб вимірювання частоти та періоду / Ю. П. Белокурсський, В.С. Козлов, Ю.В. Козлов, Г.М. Козлова, І.В. Руженцев. – Заявлено 17.07.2007; Опубл. 10.03.2009, Бюл. № 5. – 4 с.

6. Частотомер електронно-счетный вычислительный ЧЗ-64: Техническое описание и инструкция по эксплуатации. В двух книгах. Кн. 1. – 1987. – 160 с.

Поступила в редколлегию 2ю07.2009

7. Козлов В.Е. Характеристики похибки сопроцессора-частотомера / В.Е. Козлов, Ю.В. Козлов // Системи обробки інформації: зб. наук. пр. – Х.: ХВУ, 2004. – Вип. 12 (40). – С. 89-91.

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. И.П. Захаров, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков.

#### **ЗМЕНШЕННЯ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВИМІРЮВАНЬ ПАРАМЕТРІВ НВЧ-СИГНАЛІВ**

I.V. Ruzhentsev, Y.V. Kozlov, M.N. Kopoty

*У статті проаналізований вплив зміни довжини хвилі в тракті, а також методи обліку і корекції систематичних похибок, обумовлених цими змінами. Розглянуто можливість зменшення невизначеності вимірювань параметрів НВЧ-сигналів за рахунок вимірювання частоти методом зворотного рахунка в його класичному варіанті з урахуванням специфіки двійкової арифметики, що забезпечує потенційну точність вимірювань частоти, і наступного перерахування вимірної частоти в довжину хвилі.*

**Ключові слова:** НВЧ-мультиметр, невизначеність вимірювань, вимірювання частоти.

#### **DIMINISHING OF UNCERTAINTY OF MEASURING PARAMETERS OF OHF-SIGNALS**

I.V. Ruzhentsev, Y.V. Kozlov, M.N. Kopoty

*In the article, influencing of change of wave-length in a waveguide and also methods of account and correction of systematic errors, conditioned these changes is analysed. Possibility of diminishing of uncertainty of measuring parameters of OHF-signals due to measuring of frequency the method of reverse calculation in his classic variant taking into account the specific of binary arithmetic, providing potential exactness of measuring of frequency, and subsequent count of the measured frequency in a wave-length is considered.*

**Keywords:** OHF-multimeter, uncertainty of measuring, measuring of frequency.