

## Интерференционный метод измерения мгновенной частоты СВЧ импульса

*In memory prof. Andew Chubykalo*  
*Unidad Académica de Física,*  
*Universidad Autónoma de Zacatecas*

**Аннотация.** В статье описан метод измерения частоты внутри короткого СВЧ импульса. Метод легко реализуется с использованием стандартных элементов волноводного тракта. Показаны результаты экспериментального изменения мгновенной частоты импульсов магнетрона 3-см. диапазона.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Задача измерения мгновенной частоты внутри СВЧ импульса является актуальной по многим причинам.

Во-первых, измерение мгновенной частоты необходимо при экспериментальном исследовании новых импульсных СВЧ приборов.

Во-вторых, измерение мгновенной частоты необходимо при исследовании внеполосных излучений, ухудшающих электромагнитную совместимость электронных устройств.

В-третьих, измерение мгновенной частоты необходимо для проверки частотного кодирования импульсного сигнала и т.д. К сожалению, существующие методы измерений мгновенной частоты внутри СВЧ радиоимпульса являются громоздкими и требуют много времени на получение информации об изменении частоты внутри короткого импульса.

Мы выбрали тему измерения мгновенной частоты внутри СВЧ импульса. Обычно в учебниках и справочниках [1], [2], [3] этой проблеме уделяется не много внимания. Ниже мы описываем интерференционный метод измерения мгновенной частоты радиоимпульса при наличии частотной или фазовой модуляции.

### 2. ПРИНЦИП ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТЫ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫМ МЕТОДОМ

На сверхвысоких частотах ширина спектра даже у коротких импульсов невелика по сравнению с величиной несущей частоты. Поэтому мы можем рассматривать радиосигнал в первом приближении как монохроматический сигнал.

Мы описываем идею интерференционного метода измерения. Рассмотрим короткозамкнутый волновод прямоугольного сечения (волна  $H_{10}$ ). Электромагнитная волна распространяется вдоль волновода. Волна отражается от короткозамкнутой перемычки и движется в обратном направлении. В результате интерференции образуется стоячая волна, как показано на Рис. 1. Мы будем считать, что потери в волноводе отсутствуют. Запишем поле на расстоянии  $z$  от короткозамкнутого конца. Будем считать, что сигнал узкополосный и фазовая скорость волны постоянна в области существования спектральной плотности сигнала.

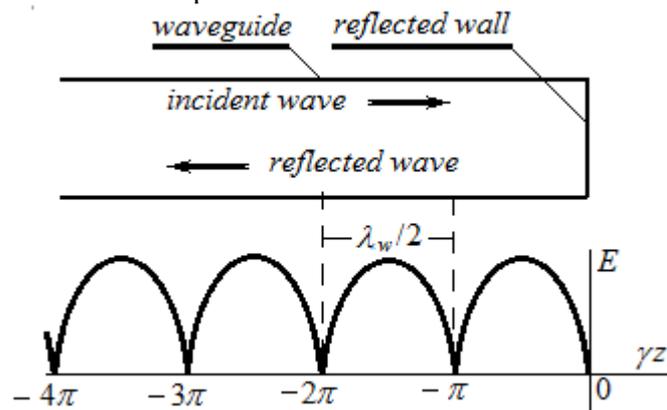


Рис. 1

Запишем суммарное электрическое поле электромагнитной волны. Поле  $E$  равно сумме поля падающей волны и поля отраженной волны

$$E = E_i + E_r = E_0 \cos(\omega t - \gamma z + \varphi) - E_0 \cos(\omega t + \gamma z + \varphi) = 2E_0 \cos(\omega t + \varphi) \cos(\gamma z)$$

где:  $\Delta\omega$  – частота СВЧ импульса;  $\varphi$  – начальная фаза;  $\gamma = \omega/v_p$  – постоянная распространения,  $v_p = c/\sqrt{1 - (\omega/\omega_c)^2}$  – фазовая скорость волны,  $\omega_c$  – критическая частота.

Очевидно, что поле равно нулю в точках  $z_{on} = n\pi/\gamma(\omega)$ . Таким образом, измеряя значение  $z$  по минимуму электрического поля, мы можем вычислить значение частоты сигнала СВЧ в точке  $z$ .

### 3. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Описанный метод измерения мгновенного значения частоты с успехом использовался при анализе структуры сигнала, при настройке СВЧ импульсных генераторов, при исследовании областей внутри импульса, связанных с генерацией внеполосных излучений и других задачах. Устройство для измерения мгновенной частоты изображено на Рис. 2. Устройство содержит:

- целевая измерительная волноводная линия **1**;
- фиксированный аттенюатор (10 – 15 дБ) **2**; он служит для поглощения отраженной волны;
- аттенюатор для регулировки мощности **3**,
- штыревая антенна **4**; она связывает широкополосный объемный резонатор **5** с волноводом, объемный резонатор **5**,
- детектор **6**, сигнал с которого поступает на осциллограф **8**,
- плунжер **7** для настройки резонатора.

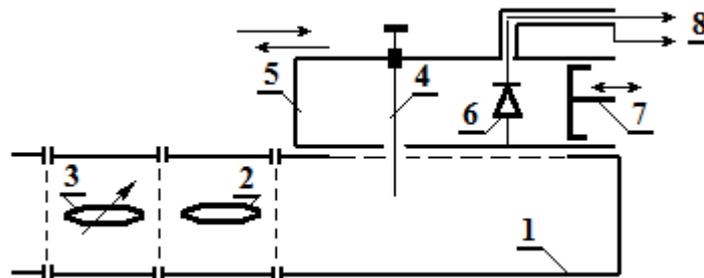


Рис. 2 Обозначения: 1 – целевой волновод; 2 – согласующий аттенюатор; 3 – переменный аттенюатор; 4 – штыревая антенна; 5 – объемный резонатор; 6 – диод; 7 – плунжер.

Введение звена из согласующего устройства (фиксированного аттенюатора 2) необходимо по следующей причине. Отраженный сигнал может вторично отразиться от переменного аттенюатора и вызвать ошибки измерений. При включении звена отраженный сигнал проходит к переменному аттенюатору без отражений, но с ослаблением. Обычно согласование осуществляется до проведения измерений. Опыт практических измерений показал, что при имеющейся погрешности приборов и при малой величине отражений от фиксированного аттенюатора мы можем использовать узкополосное согласование.

### 4. ОШИБКИ ИЗМЕРЕНИЙ

Поскольку мы ограничиваемся анализом ошибок в первом приближении, мы можем рассматривать каждый фактор отдельно, независимо от влияния других.

Величина запаздывания падающей волны от отраженной волны. Волна, пройдя волновод в прямом направлении, отражается от конца волновода и распространяется в обратном направлении. Рассмотрим некоторую точку  $z$ , в которой встречаются падающая волна и отраженная волна. Очевидно, падающая волна по фазе будет отставать, поскольку отраженная волна успела пройти путь, равный  $2z$ . Фаза запаздывания равна  $z_{on} = n\pi/\gamma(\omega)$ . Время запаздывания равно

$$t = \frac{2z}{v_p} = \frac{2z}{c} \sqrt{1 - (\omega/\omega_c)^2}$$

**Влияние потерь на измерение расстояния .** Обычно потери в волноводе не очень большие. Мы оценим их влияние на картину поля. Для удобства мы сместим начало отсчета на время  $\tau / 2$ . Электрическое поле с учетом потерь есть

$$E = E_i + E_r = E_0 e^{\delta\tau} \cos[\omega(t - \tau/2) - \gamma z + \varphi] - E_0 e^{-\delta\tau} \cos[\omega(t + \tau/2) + \gamma z + \varphi]$$

Мы можем учесть малую величину потерь  $e^{\delta\tau} = 1 + \delta\tau$  и  $e^{-\delta\tau} = 1 - \delta\tau$

Итак, мы имеем

$$\begin{aligned} E &= E_0 e^{\delta\tau} \cos[\omega t + \varphi - \omega\tau/2 - \gamma z] - E_0 e^{-\delta\tau} \cos[\omega t + \varphi + \omega\tau/2 + \gamma z] = \\ &= E_0 \cos[\omega t + \varphi - \omega\tau/2 - \gamma z] - E_0 \cos[\omega t + \varphi + \omega\tau/2 + \gamma z] + \\ &+ \delta\tau \{ E_0 \cos[\omega t + \varphi - \omega\tau/2 - \gamma z] + E_0 \cos[\omega t + \varphi + \omega\tau/2 + \gamma z] \} = \\ &= 2E_0 \sin(\omega t + \varphi) \sin(\omega\tau/2 - \gamma z) + 2\delta\tau E_0 \cos(\omega t + \varphi) \cos(\omega\tau/2 - \gamma z) \end{aligned}$$

Как известно, мощность пропорциональна квадрату амплитуды поля. Мы запишем квадрат амплитуды

$$\begin{aligned} E^2 &= 4E_0^2 \sin^2(\omega\tau/2 - \gamma z) + 4(\delta\tau)^2 E_0^2 \cos^2(\omega\tau/2 + \gamma z) = \\ &= 4E_0^2 - 4E_0^2 [1 - (\delta\tau)^2] \cos^2(\omega\tau/2 + \gamma z) \end{aligned}$$

Минимум поля реализуется в тех же точках, что и в волноводе без потерь. Однако мы уже не можем достичь нулевого значения в минимуме  $E^2 = 4(\delta\tau)^2 E_0^2$ .

В окрестности узлов напряженности поля при  $\gamma z = n\pi$  мы будем иметь резонанс с эквивалентной добротностью  $Q$ .

$$Q = 2\pi / \lambda_w \delta$$

где  $\lambda_w$  - длина волны в волноводе. Отметим, что добротность не зависит от длины  $z$ , т.е. от расстояния между узлом напряженности и коротко замыкающей стенкой в волноводе (или от  $n$ ). Это связано с тем, что при увеличении  $n$  скорость изменения поля вблизи минимумов растет с увеличением  $n$ . Таким образом, в первом приближении потери слабо влияют на точность измерения.

**Влияние изменения амплитуды на фронтах импульса.** Теперь мы должны оценить влияние крутизны фронтов на точность измерения. Будем считать, что потери в волноводе отсутствуют. Тем же способом мы можем получить приближенное выражение для квадрата амплитуды электрического поля:

$$\begin{aligned} E^2 &= 4E_0^2 \sin^2(\omega\tau/2 - \gamma z) + 4 \left[ \frac{\partial E(t)}{\partial t} \frac{\tau}{2} \right]^2 E_0^2 \cos^2(\omega\tau/2 - \gamma z) = \\ &= 4E_0^2 - 4E_0^2 \left\{ 1 - \left[ \frac{\partial E(t)}{\partial t} \frac{\tau}{2} \right]^2 \right\} \cos^2(\omega\tau/2 - \gamma z) \end{aligned}$$

Здесь мы наблюдаем тот же эффект, что и при наличии потерь в волноводе. Крутые фронты импульса уменьшают добротность резонансной кривой, но не смещают минимум *в первом приближении*. Сразу же отметим, что изменение амплитуды практически не влияет на смещение точки отсчета частоты от истинного значения. Как показывают подсчеты, в реальных случаях это не приводит к заметному ухудшению добротности.

Итак, в первом приближении скорость изменения фронта мало влияет на точность измерений.

## 5. ИЗМЕРЕНИЕ МГНОВЕННОЙ ЧАСТОТЫ ВНУТРИ ИМПУЛЬСА

Рассмотрим теперь случай, когда мы измеряем мгновенную частоту. Пусть частота зависит от времени

$$\begin{aligned} E &= E_i + E_r = E_0 \cos(\varphi(t - \tau/2) - \gamma z) - E_0 \cos(\varphi(t + \tau/2) + \gamma z) = \\ &= 2E_0 \sin(\omega(t)t + \varphi) \sin(\gamma z) \end{aligned}$$

где:  $\varphi(t)$  - мгновенная фаза сигнала,  $\omega(t) = \partial\varphi(t) / \partial t$  - мгновенная частота сигнала.

Как обычно мы рассматриваем измерение отклонений частоты в первом (линейном) приближении.

$$E = E_i + E_r = E_0 \cos[\varphi(t - \tau/2) - \gamma z] - E_0 \cos[\varphi(t + \tau/2) + \gamma z] =$$

$$= 2E_0 \cos(\omega(t)t + \varphi) \cos[\omega(t)\tau/2 - \gamma z]$$

Квадрат амплитуды равен

$$E^2 = 4E_0^2 \sin^2[\omega(t)\tau/2 - \gamma z]$$

Выражение равно нулю в точках, где  $\omega\tau/2 - \gamma z = n\pi$ . Мы будем считать, что существует несущая частота и небольшие отклонения от нее  $\omega = \omega_0 + \Delta\omega$ . Если , тогда минимумы электрического поля располагаются в точках  $z_{0n} = n\pi/\gamma(\omega_0)$ . Если частота изменилась на величину  $\Delta\omega$ , тогда получит приращение .

$$(\omega_0 + \Delta\omega)\tau/2 + \gamma(\omega_0 + \Delta\omega)(z_{0n} + \Delta z) = n\pi$$

Раскрывая скобки и пренебрегая членами второго порядка малости, получим

$$\frac{\Delta\omega}{\omega_0} = - \frac{\gamma(\omega_0)\Delta z}{\omega_0 \left[ \tau/2 + \frac{\partial\gamma}{\partial\omega} z_{0n} \right]} = \frac{\Delta z}{z_{0n}} \frac{1}{1 + v_p/v_g}$$

где  $v_p$  - фазовая скорость волны;  $v_g$  - групповая скорость волны.

## 6. ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА

Описанный метод измерения мгновенного значения частоты с успехом использовался при анализе структуры сигнала, при настройке СВЧ импульсных генераторов, при исследовании областей внутри импульса, связанных с генерацией внеполосных излучений и других задачах

Установка (см. Рис.2) содержит измерительную линию, подключенную к осциллографу, с помощью которой производится непосредственное измерение частоты заполнения СВЧ импульса, узкополосного согласующего устройства, фиксированного аттенюатора (10 – 15 дБ) и переменного аттенюатора для регулировки мощности. Единственным дополнением является устройство точного измерения перемещения. Мы можем использовать микрометрический нониус или устройство лазерного типа. Устройство позволяет производить измерение относительного перемещения резонатора над волноводом с точностью до 0.001 мм.

На экране осциллографа высвечивалась огибающая импульса после квадратичного детектирования. В силу этого сигнал пропорционален мощности. На рис. 3 (позиция 1, 2, 3) изображены характерные формы импульсов (1 – импульс с плоской частью, 2 – импульс с пологим задним фронтом, 3 – импульс с пологими передним).

Введение звена из согласующего устройства и фиксированного аттенюатора необходимо по следующей причине. Сигнал, отраженный от кз стенки, может вторично отразиться от переменного аттенюатора и вызвать ошибки измерений. При включении звена отраженный сигнал проходит к переменному аттенюатору без отражений, но с ослаблением. Если от него теперь сигнал вновь отразится, то он ослабнет еще раз ослабится и уже не вызовет существенных искажений при измерениях.

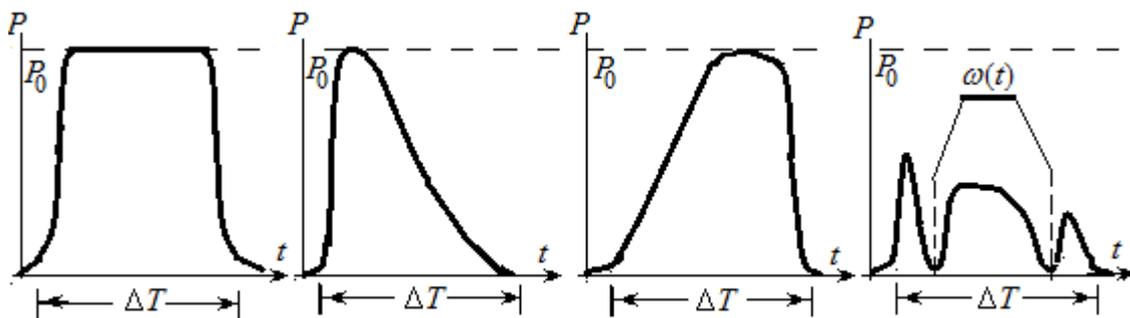


Рис.3. 1 – импульс с плоской частью, 2 – импульс с пологим задним фронтом, 3 – импульс с пологими передним фронтом, 4 – «провалы» в огибающей импульса за счет интерференции.

Обычно согласование осуществляется со стороны кз стенки до проведения измерений. При проведении практических измерений оказалось, что при имеющейся погрешности приборов и при малой величине отражений от фиксированного аттенюатора можно обойтись узкополосным согласованием.

Расстояние от кз стенки до измерительной линии определяет число полуволн  $n$ , укладываемых на этом расстоянии. При большом их числе возрастает разрешающая способность прибора. Однако следует помнить, что диапазон измерения частоты «умещается». Ниже приведены результаты исследования влияния мощности импульса на отклонение частоты от номинального (рабочего) значения. Эксперименты проводились с магнетроном МИ-2. Параметры:

- Генерируемая мощность – 50кВт,
- Рабочая длина волны – 3,2 см.
- Длительность импульса 1 мксек.

График экспериментальной зависимости приведен на Рис.4. Экспериментальные точки соответствуют формам импульсов, изображенных на рис. 3:

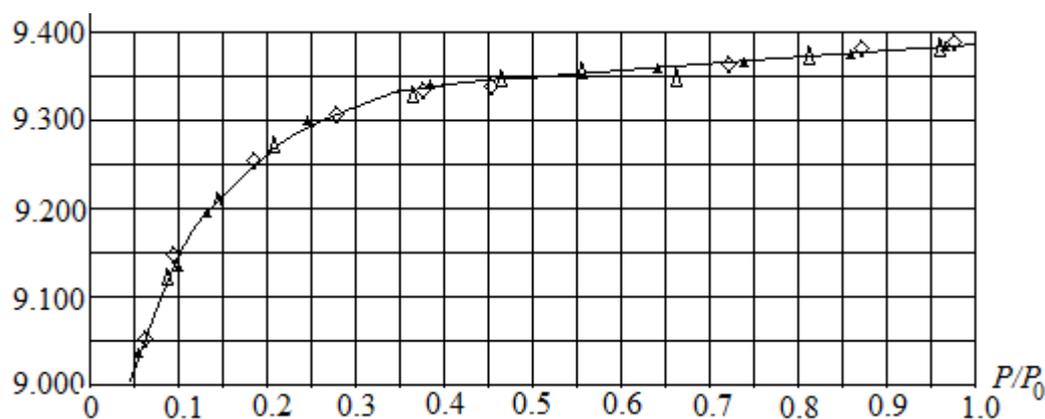


Рис.4. Экспериментальная зависимость отклонения частоты от величины мощности импульса. Экспериментальные точки позиции 1 (Рис.3) имеют обозначение  $\diamond$ , экспериментальные точки позиции 1 (Рис.3) имеют обозначение  $\Delta$ , экспериментальные точки позиции 1 (Рис.3) имеют обозначение  $\blacktriangle$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

Мы можем сделать следующие выводы:

1. · Метод измерения прост в реализации, поскольку в нем используется стандартное оборудование.
2. · Метод позволяет быстро и просто проводить измерения отклонения частоты внутри импульса с достаточно высокой точностью.
3. · Ошибки измерений из-за потерь в волноводе и из-за изменения амплитуды импульса в первом приближении не влияют на точность отсчета.

## ССЫЛКИ:

1. R. Witte (1993) Principles of Microwave Measurements. Publisher: the Institution of Engineering and Technology; Revised edition/ ISBN-13: 978-0863412967, ISBN-10: 0863412963
2. R. Witte (1993) Spectrum and Network Measurements (Electromagnetic Waves) 2nd Edition Scitech Publishing, ISBN-13: 978-1613530146, ISBN-10: 1613530145 3.
3. J. Dunsmore (2012) Handbook of Microwave Component Measurements: with Advanced VNA Techniques 1st Edition. WILEY. ISBN-13: 978-1119979555, ISBN-10: 1119979552