

УДК 621.317 361 029 . 621 3.029 65/66

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТЫ С ВЫСОКОДОБРОТНЫМ РЕЗОНАТОРОМ ФАБРИ—ПЕРО

Ю. А. Дрягин

Предложен и опробован метод измерения частоты в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах волн с помощью высокодобротного ($Q \sim 10^6$) резонатора Фабри—Перо. Точность измерения частоты $\sim 10^{-5}$.

Измерение частоты в диапазоне коротких миллиметровых и субмиллиметровых радиоволн с высокой точностью обычно производят гетеродинным методом; при этом может быть получена (в случае кварцованного гетеродина) точность 10^{-6} и выше. Однако создание соответствующей аппаратуры, особенно построение многокаскадных умножителей эталонной частоты, является сложной и трудоемкой задачей.

В предлагаемой работе описывается метод, позволяющий определять частоту в указанном диапазоне с точностью $\sim 10^{-5}$ сравнительно простым методом. Метод базируется на использовании высокодобротного резонатора Фабри—Перо. Для рассматриваемого диапазона волн добротность таких резонаторов довольно высока (10^5 — 10^6), что обеспечивает высокую разрешающую способность по частоте. Однако реализовать ее в режиме обычного резонансного волномера весьма сложно из-за трудностей прецизионного отсчета длины.

Измерение частоты с помощью открытого резонатора можно выполнить и другим способом. Положим, что резонатор настроен на искомую частоту (это может быть стабильный источник миллиметрового излучения либо линия резонансного поглощения в веществе). Резонансная частота интерферометра Фабри—Перо равна

$$f = F(q + \pi^{-1} \arccos g), \quad (1)$$

где $F = c/2L$ — межмодовое расстояние, L — длина резонатора, c — скорость света, q — номер продольной моды, g — параметр резонатора, равный в случае одинаковых зеркал $1 - L/R$, R — радиус кривизны зеркал*. Таким образом, для определения f нужно найти F , q и g ; точность при этом определится лишь погрешностью измерения F (q — целое число, а g находится из геометрии резонатора и слабо влияет на результат).

Величина F может быть измерена с помощью вспомогательного генератора методом двойной модуляции, который широко известен в спектроскопии (см., например, [1]). Суть его, применительно к данной задаче, заключается в следующем. Если промодулировать генератор по частоте (или амплитуде) с частотой модуляции, равной F , то резонатор возбуждается на нескольких продольных модах, так как боковые составляющие спектра модулированного колебания совпадут с сосед-

* Строго говоря, в скобках выражения (1) должна быть малая поправка, сложным образом зависящая от геометрии резонатора и частоты. Специальный анализ показал, что поправка к частоте для резонатора, примененного в описываемой установке, не превышает 10^{-8} для волны короче 2 мм.

ними продольными резонансами. Для индикации равенства частоты модуляции значению F необходима вторая, медленная, частотная модуляция генератора (сканирование). Если частота модуляции несколько отлична от F , то при сканировании генератора вблизи измеряемой частоты в измерительной цепи, регистрирующей возбуждение резонатора, последовательно будут отмечаться несколько сигналов. Подбирая частоту модуляции так, чтобы отклики слились, т. е. возбуждение на всех продольных модах происходило одновременно, мы добьемся искомого равенства.

Для определения номера возбужденной моды q нужно изменить длину резонатора так, чтобы он возбудился на той же (измеряемой) частоте, но на другой продольной моде. При перестройке необходимо отсчитать, на сколько единиц изменится индекс q ; обозначим эту величину n . Затем вновь измеряется межмодовое расстояние F' . В этом случае из (1) следует

$$q = \frac{F'n}{F - F'} - \frac{F' \arccos g' - F \arccos g}{\pi(F - F')}, \quad (2)$$

где g' — параметр g для резонатора с новой длиной.

Так как g — целое число, точность этих измерений должна быть такова, чтобы абсолютная ошибка не превышала нескольких десятых. В описываемых ниже экспериментах это условие было выполнено. Заметим, что возможны и другие способы определения q (например, с помощью двух резонаторов). Разумеется, если значение f известно заранее с погрешностью, не превышающей $[(1/3) \div (1/5)]F$, то определение q возможно просто из выражения (1).

Таким образом, суть предлагаемого способа состоит в том, что здесь прецизионные измерения длины заменены измерениями частоты F в хорошо освоенном диапазоне. Необходимым элементом устройства является вспомогательный генератор, допускающий частотную модуляцию (с частотой F) вблизи определяемой частоты f .

Волномер с указанным способом отсчета построен и опробован в диапазоне волн 1—2 мм. Блок-схема установки показана на рис. 1. Измерительный резонатор имеет следующие геометрические размеры:

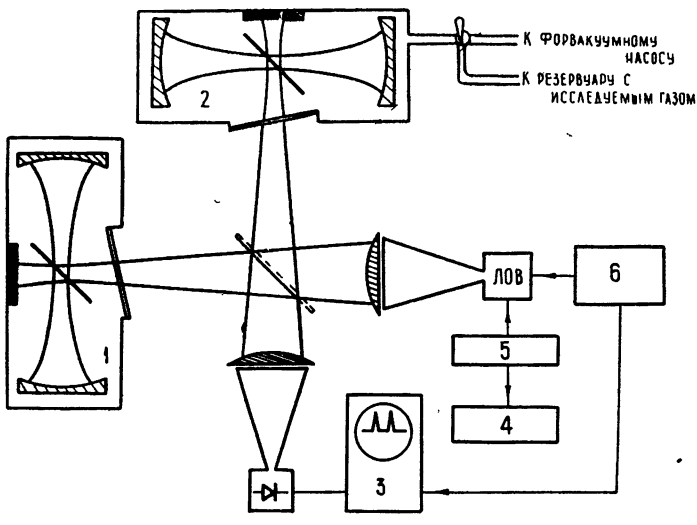


Рис. 1. Блок-схема измерительной установки:

- 1 — эталонный резонатор; 2 — измерительный резонатор; 3 — осциллограф;
4 — частотомер; 5 — модулятор; 6 — генератор сканирования.

$L = 300 \div 310$ мм, $R = 1200$ мм, диаметр зеркал — 110 мм. Зеркала стеклянные, покрыты слоем серебра толщиной 3—5 мк методом вакуумного напыления. Каркас резонатора изготовлен из инвара. Связь резонатора с измерительной цепью осуществляется посредством пленки (тефлон толщиной 5 мк), расположенной под углом 45° к оптической оси резонатора [2]. Дифракционные потери и потери на связь пренебрежимо малы. Добротность резонатора определяется в основном омическими потерями в зеркалах. Измеренная способом, описанным в [3], величина добротности оказалась $\sim 6 \cdot 10^5$.

СВЧ тракт квазиоптический; рупоры и корректирующие линзы обеспечивают ход лучей, показанный на рис. 1; связь с резонатором при этом получается наиболее эффективная, а возбуждение высших поперечных мод отсутствует (они ослаблены более чем на 25 дБ).

Вспомогательный микроволновой генератор — лампа обратной волны типа ЛОВ-1,5. Крутизна электронной перестройки подобного прибора очень высока [4], поэтому он может быть промодулирован с достаточным индексом в широком диапазоне частот. Для медленного сканирования использовалось напряжение сети; для высокочастотной модуляции (для использованного резонатора частота $F = c/2L$ порядка 50 Мгц) — генератор стандартных сигналов необходимого диапазона. Частота последнего измерялась цифровым частотомером (точность этих измерений не хуже 10^{-6}). Когда резонатор возбужден на одной из своих собственных частот, от элемента связи возникает отраженная волна [2], которая через полупрозрачную пластинку поступает на видеодетектор (см. [5]). Детектор подключен к осциллографу, развертка которого синхронизирована сетевым напряжением. Таким образом, когда генератор сканируется вблизи собственной частоты резонатора, сигнал на экране осциллографа представляет собой его резонансную характеристику. Высокочастотная модуляция с частотой, близкой к F , приведет к возбуждению соседних продольных мод резонатора, отклики от которых будут также видны на экране. Для определения F , как уже указывалось, необходимо так настроить модулирующий генератор, чтобы отклики на экране осциллографа слились. Зафиксировать этот момент можно с тем большей точностью, чем выше добротность резонатора и лучше отношение сигнал/шум на экране осциллографа. Генератор, детектор и система связи с резонатором обеспечивают указанное отношение (при полосе усилителя осциллографа ~ 50 кГц) на уровне 1000. Экспериментально обнаружено, что в этом случае отклики можно совместить с точностью не хуже $(1/20) \div (1/30)$ полосы резонатора; отсюда легко получить, что относительная погрешность измерения искомой частоты, на которую настроен резонатор, будет $\sim 3 \cdot 10^{-5}$.

Кроме измерительного резонатора в установку введен второй эталонный резонатор. Для измерения частоты он необязателен, однако очень удобен при измерениях. Например, любая возбужденная мода этого резонатора может быть использована в качестве объекта измерения частоты при настройке и проверке работы установки в целом. Кроме того, с его помощью можно «пометить» любую предварительно измеренную моду резонатора, так что при повторном включении аппаратуры ее легко вновь отыскать. Эталонный резонатор подобен измерительному по устройству и оба симметрично включены в тракт СВЧ. Для устранения влияния влажности и пыли в пространстве между зеркалами оба резонатора помещены в специальные камеры. Камера эталонного резонатора обычно заполнена сухим воздухом при атмосферном давлении, а камера измерительного резонатора представляет из себя вакуумный пост, позволяющий откачивать воздух и вводить в рабочее пространство резонатора газы или пары других веществ. Окна в обеих камерах установлены под некоторым углом к падающему лучу, что

исключает паразитное попадание микроволновой мощности в детектор; для этой же цели на пути лучей за резонатором установлены поглотители.

Проверкой описанного метода было измерение частоты вращательного перехода молекулы водяного пара на волне 1,64 мм. В вакуумную камеру вводился под малым давлением водяной пар, а измерительный резонатор настраивался на частоту молекулярного перехода. Если давление под колпаком достаточно мало, ширина пика поглощения определяется доплеровским уширением, которое при комнатной температуре должно быть около 240 кГц (ширина резонатора того же порядка). Характерная осциллограмма процесса показана на рис. 2а. После тщательной подстройки резонатора на центр линии проводятся измерения по описанной выше методике.

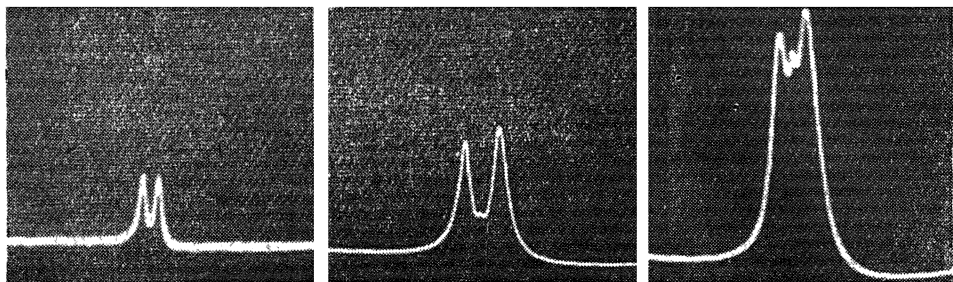


Рис. 2. Осциллограмма отклика измерительного резонатора, настроенного на линию поглощения водяного пара, при разных давлениях пара под колпаком:

а) 10^{-1} , б) 10^{-2} , в) 10^{-3} тор.

Отметим одно обстоятельство, которое позволяет повысить точность измерений. Если откачать часть водяного пара так, чтобы начало сказываться насыщение в поглощении молекулами воды, удается наблюдать явление, которое приводит к так называемому «провалу Лэмба», широко известному в физике газовых лазеров. Суть явления заключается в следующем. В резонаторе Фабри—Перо существуют две волны, бегущие навстречу. На центральной частоте линии поглощения с обеими волнами взаимодействуют одни и те же частицы (не имеющие составляющих скорости вдоль оси резонатора). На других частотах с каждой из волн взаимодействует своя группа молекул. Это приводит к тому, что на средней частоте насыщение проявляется раньше, чем на примыкающих частотах, а на осциллограмме отклика резонатора появляется дополнительная микроструктура (небольшой пик на дне провала при уменьшении давления водяного пара; см. рис. 2б, в). Это явление позволяет повысить точность измерения F и, следовательно, искомым частоты.

Окончательный результат по данным ряда измерений следующий:

$$f_{1,64} = 183\,312,6 \text{ Мгц.}$$

Разброс отдельных результатов укладывается в 3—4 Мгц, т. е. относительная ошибка единичного измерения 10^{-5} .

Отметим, что в ряде задач описанный метод измерения частоты благодаря своей простоте может конкурировать с методом гетеродинного сравнения с высокой гармоникой кварца. Например, в 1965 году Раском [6] была измерена частота того же молекулярного перехода гетеродинным методом с точностью, лишь на порядок превышающей нашу:

$$f_{\text{по Раску}} = 183310,12 \pm 0,10 \text{ Мгц.}$$

Расхождение между результатом Раска и нашим составляет ~ 2 Мгц и находится, вообще говоря, в пределах юшибки данного метода. Однако наше значение получено в результате усреднения по крайней мере сотни отдельных замеров, так что реальная погрешность, видимо, еще на порядок меньше. Поэтому причина расхождения пока неясна и вряд ли может быть объяснена ошибкой описанного метода.

В заключение автор выражает благодарность В. В. Паршину за помощь в эксперименте и И. Л. Берштейну за ценные замечания, сделанные при просмотре рукописи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ч. Таунс, А. Шавлов, Радиоспектроскопия, ИЛ, М., 1959.
2. G. Schulten, *Frequenz*, **20**, 10 (1966).
3. J. K. Chamberlain, *Electronic Engineering*, **38**, 579 (1966).
4. М. Б. Голант, Р. Л. Виленская, Е. А. Зюмина, З. Ф. Каплун, А. А. Негирев, В. А. Париков, Т. Б. Реброва, В. С. Савельев, ПТЭ, № 4, 136 (1965).
5. Ю. А. Дрягин, Л. И. Федосеев, Изв. высш. уч. зав. — Радиофизика, **12**, № 6, 813 (1969).
6. Rusk, J. *Chem. Phys.*, **42**, 493 (1965).

Научно-исследовательский радиофизический институт
при Горьковском университете

Поступила в редакцию
18 июня 1969 г.

A METHOD OF MEASURING THE FREQUENCY BY A HIGH-QUALITY FABRY—PEROT RESONATOR

Yu. A. Dryagin

A method of measuring the frequency in millimeter and submillimeter ranges using a high-quality ($Q \sim 10^6$) Fabry—Perot resonator is proposed and experienced. The accuracy of the frequency measurement is about of 10^{-5} .