

В. Ф. ЗАХАРЬЯШ
(Новосибирск)

ВЛИЯНИЕ РЕЗОНАНСНОГО УСИЛИТЕЛЯ-ОГРАНИЧИТЕЛЯ И СИСТЕМЫ ФАЗОВОЙ ПРИВЯЗКИ ЧАСТОТ НА ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТЫ

Основой измерений точного значения частоты He — Ne/CH₄-лазера является метод сравнения частот лазеров по гармоникам [1—7]. Это сравнение частот позволяет, проводя радиотехническую обработку сигнала биений, измерить частоту He — Ne/CH₄-лазера или осуществить фазовую привязку (ФАП) по измеряемому лазеру. Сигналы биений обычно малы из-за свойств умножительно-смесительного элемента и высокого порядка смещения, а также из-за ограниченной мощности лазеров. Как показывает практика, обработка малых сигналов может приводить к погрешности, обусловленной затягиванием [5—6].

Настоящее сообщение посвящено исследованию эффекта затягивания при обработке сигналов малой амплитуды с широким спектром при несовпадении резонансной частоты измерительного усилителя-ограничителя (УО) и частоты измеряемого сигнала. Рассматривается также влияние такого УО на работу системы ФАП.

В работе [6] измерение частоты He — Ne/CH₄-лазера проводилось по схеме, изображенной на рис. 1, где первоначально измерение осуществлялось при отсутствии фазовой привязки управляемого генератора К7 и самого К7, т. е. разность частот $F_x \approx 10$ МГц усиливалась резонансным усилителем-ограничителем и подавалась непосредственно на частотомер. Частота He — Ne/CH₄-лазера рассчитывалась по формуле:

$$\nu_{\pm} = \pm 126F_x + 1386F_{K5}^{\pm} + F_{K1} + 3F_{K3} - 21F_{K4} - 15F_{K2} + 106 \text{ МГц.} \quad (1)$$

Результаты измерений частоты He — Ne/CH₄-лазера представлены на рис. 2, причем восемь старших знаков значения частоты (88376181 МГц) не изображены на рис. 2 и 6 из соображений удобства. Как видно из рис. 2, полученные результаты при плюсовой отстройке по частоте синтезированного сигнала СВЧ (~ 716 ГГц) от частоты привязанного НСООН-лазера отличны от результатов минусовой отстройки тех же генераторов, и результаты плюсовой и минусовой отстроек не перекрываются между собой. Некоторое различие в характере поведения дисперсий измеряемых частот связано с изменением спектров сигналов, из которых синтезировался сигнал СВЧ.

Поскольку измерения при плюсовой и минусовой отстройках сходятся к различным значениям частот, высказывалось предположение, что в результате несовпадения резонансной частоты УО и частоты измеряемого сигнала, а также из-за малости измеряемого сигнала (14 ÷ 18 дБ) и его широкого спектра (~ 50 кГц) происходит затягивание измеряемой частоты к частоте резонансного УО.

Для проверки этого предположения была собрана установка по схеме, изображенной на рис. 3.

Синтезатор частоты Ч6-31 позволял выставлять строго определенную частоту и проводить ее частотную модуляцию с помощью генератора и схемы согласования уровней. Атенуатор генератора Г4-102 давал возможность устанавливать желаемую амплитуду сигнала на входе УО.

К резонансному УО предъявлялось требование, чтобы уровень его выходного сигнала был больше уровня порога частотомера, причем даже при отсутствии сигнала на входе УО. Это позволило убедиться в том, что показания частотомера совпадают с резонансной частотой УО. Коэффициент усиления УО составлял $\sim 10^7$.

Для контроля входного сопротивления ($R_{вх}$) УО на любой из частот выбиралась согласующая цепь, изображенная на рисунке, что позволило, измерив уровень сигнала в точке А (см. рис. 3) в режиме большого сигнала, определить $R_{вх}$ резонансного УО, хотя $R_{вх}$ могло быть и рассчитано.

Результаты экспериментальных измерений затягивания получились для различных $R_{вх}$ (в диапазоне $R_{вх}$ диода металл — окисел — полупроводник), различных резонансных частот усилителей и отстроек частот сигналов от резонансных частот этих усилителей. Типичные зависимости затягивания от уровня сигнала изображены на рис. 4. Каждая экспериментальная точка получена усреднением 5 ÷ 20 измерений по 10 с в зависимости от амплитуды сигнала, подаваемого на вход УО. Так как среднеквадратичное отклонение σ от среднего будет $\sigma \approx \Delta\omega / (\tau_m N_{вх})$, где $\Delta\omega$ — полуширина полосы пропускания УО, τ_m — время измерения, а $N_{вх}$ — отношение сигнал/шум на входе УО, ошибка в разбросе измерений по частоте не превосходит $\pm 0,01\%$. Из экспериментальных кривых видно, что измеряемая частота действительно испытывает затягивание в сторону резонансной частоты УО, причем тем больше, чем больше индекс модуляции β ($\beta = \Gamma/\Delta\omega$, Γ — девиация модулированного сигнала) и меньше амплитуда сигнала.

Аналитическое описание затягивания без определенных допущений чрезвычайно затруднительно, так как в литературе нет данных по этому вопросу. Однако если положить, что затягивание по частоте пропорционально отношению сигнал/шум, то задача о затягивании переходит в задачу нахождения отношения сигнал/шум

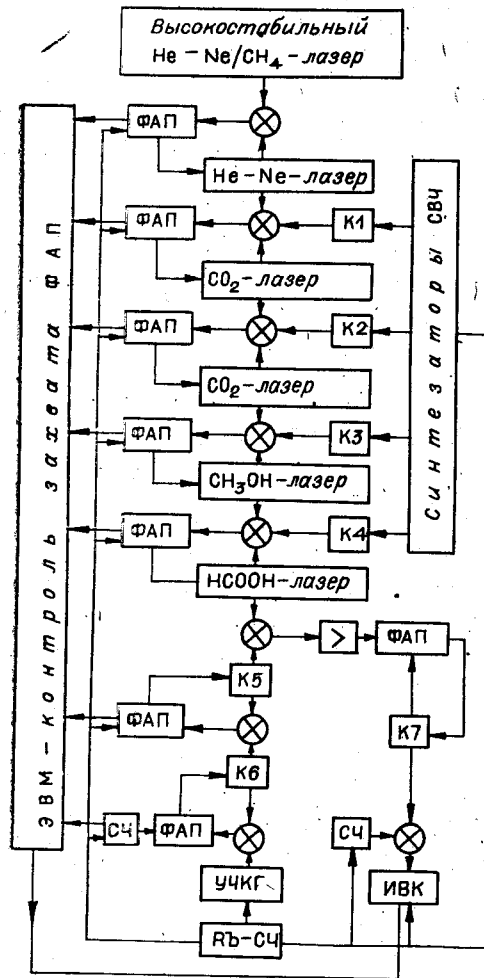


Рис. 1. Блок-схема установки для измерения частоты He-Ne/CH₄-лазера:

Rb - СЧ - рубидиевый стандарт частоты; СЧ - синтезатор частоты; ИВК - измерительно-вычислительный комплекс; УЧКГ - умножитель частоты кварцевого генератора; К1 - К6 - клистронные генераторы.

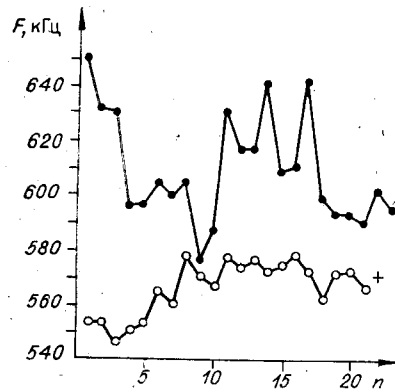


Рис. 2. Частота He-Ne/CH₄-лазера от измерения к измерению (n) при $\tau_n = 1$ с, $\nu_- = 88376181610,039$ кГц, $\nu_+ = 88376181566,519$ кГц, $\Delta\nu = \nu_- - \nu_+ = 43,519$ кГц.

на выходе резонансного УО. Такая задача рассматривалась в [8] Стоуном и др. Окончательное выражение для спектральной плотности выходного сигнала на выходе УО дается в такой форме:

$$\Phi(s, \gamma, y) = \Phi(s, \gamma, 0) \exp[-y^2, \gamma, m(\gamma, s)], \quad (2)$$

где $\Phi(s, \gamma, y)$ — спектральная плотность сигнала на выходе УО при наличии шума и сигнала на входе; $\Phi(s, \gamma, 0)$ — спектральная плотность сигнала на выходе УО при наличии только шума на входе; y — отношение сигнал/шум на входе УО; $\gamma = \omega_1/\omega_2$, здесь ω_1 — резонансная частота УО, а ω_2 — частота сигнала ($\gamma \approx 1$); $m(\gamma, s)$ — некоторая функция, описывающая вероятность наблюдения определенных спектральных составляющих с комплексной частотой s .

Предположим, что

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \Phi(s, \gamma, 0) \rightarrow |\omega_2 - \omega_1| = \Omega;$$

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \Phi(s, \gamma, y) = |\omega_2 - \omega_n| \rightarrow \Delta\Omega;$$

$$\lim_{T \rightarrow \infty} [\exp(-y^2, \gamma, m(\gamma, s))] \rightarrow \exp[-\gamma N_{\text{вых}}^2],$$

где

$$N_{\text{вых}} = (N_{\text{вх}}/K_m) [1 + (\Omega/\Delta\omega)^2]^{-1/2}$$

(так как резонансный контур стоит до ограничения), ω_n — частота, показываемая частотомером в зависимости от y , K_m — коэффициент шума входного транзистора по напряжению в работе взят для расчета $K_m = 7$ дБ (так как на входе УО использовался транзистор ГТ 311И), а член $[1 + (\Omega/\Delta\omega)^2]^{-1/2}$ учитывает падение коэффициента усиления сигнала вследствие отстройки от центра контура усиления резонансного УО. Тогда (2) можно переписать в виде

$$\Delta\Omega = \Omega \exp[-\gamma N_{\text{вых}}^2] = \Omega \exp\{-\gamma [(N_{\text{вх}}/K_m) (1 + (\Omega/\Delta\omega)^2)^{-1/2}]^2\}. \quad (3)$$

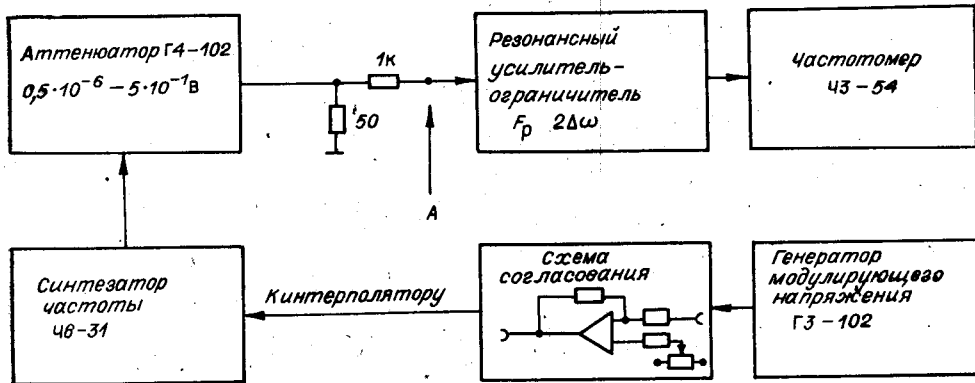


Рис. 3. Блок-схема установки измерения затягивания частоты резонансным УО.

Расчетные кривые изображены совместно с экспериментальными кривыми на рис. 4, причем в (3) $N_{\text{вх}} = U_c/U_{\text{ш}} = U_c/(8kTR_{\text{вх}}\Delta\omega)^{1/2}$.

Из сравнения экспериментальных и теоретических кривых можно видеть, что затягивание действительно описывается зависимостью (3) для немодулированного сигнала. Незначительные отклонения экспериментальных данных от теоретических кривых могут быть объяснены недостаточной симметрией контура усиления усилителя.

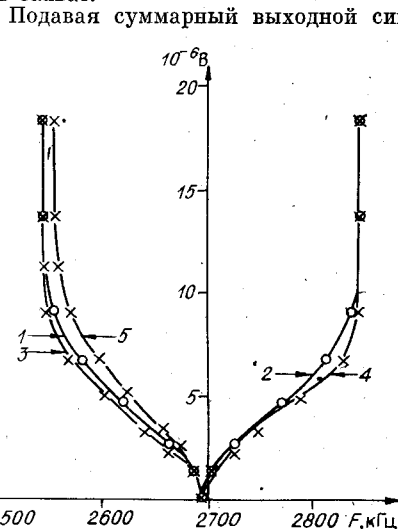
Для случая модулированного сигнала найти аналитическую зависимость затягивания чрезвычайно сложно, так как при частотной модуляции изменяется Ω и показатель в экспоненте (3), что в конечном итоге неизбежно приводит к эллиптическому интегралу.

Однако можно грубо оценить величину затягивания в случае модулированного сигнала, вводя определенные упрощения. Так, учитывая измерения частоты He — Ne/HC₄-лазера и то, что средняя величина сигнала ~ 16 дБ; $\Omega = (0,1 \div 0,2)\Delta\omega$; $\Delta\omega \approx 50$ кГц, и заменяя шумовую модуляцию сигнала на модуляцию меандром с девиацией 50 кГц, можно получить оценку усреднением затягивания в двух точках. Тогда на частоте $F_x \approx 10$ МГц найдем $\Delta\Omega \approx (80 \div 170)$ Гц. Учитывая удвоение ошибки и умножение в 126 раз (1), получим на частоте He — Ne/CH₄-лазера $2\Delta\Omega \approx (20 \div 50)$ кГц, что по порядку величины хорошо согласуется с результатом рис. 2.

Результат затягивания частоты резонансным УО можно достаточно просто интерпретировать, если заметить, что $N_{\text{вх}}^2 \approx P_{\text{с.вх}}/P_{\text{ш.вх}}$, где $N_{\text{вх}}$ — отношение сигнал/шум на выходе резонансного УО, $P_{\text{с.вх}}$ — мощность сигнала на выходе УО, а $P_{\text{ш.вх}}$ — мощность шума там же. Таким образом, суммарное воздействие сигнала и шума $U_c \cos(\omega_c t + \varphi_c) + U_{\text{ш}} \cos(\omega_{\text{ш}} t + \varphi_{\text{ш}})$ (где $U_{\text{ш}}$, $\omega_{\text{ш}}$ и $\varphi_{\text{ш}}$ находятся по преобразованию Гильберта [9]) приводит к конкуренции шумового сигнала и полезного, и независимо от их отношения они всегда влияют на показания частотомера.

Но если резонансный УО дает затягивание измеряемой частоты, то возникает вопрос о затягивании частоты в кольцах фазовой привязки, поскольку каждое кольцо ФАП содержит резонансный УО.

Рассмотрим случай, когда $U_{\text{с.вх}}/U_{\text{ш.вх}} = N_{\text{вх}} > 1$ и система ФАП переходит в захват.



Подавая суммарный выходной сигнал УО на нормированный усилитель-перемножитель, являющийся хорошим приближением фазового детектора, и пренебрегая высшими гармониками, получим

$$\begin{aligned}
 X_{\text{ФД}}(t) &= [U_{\text{ш.вх}} \cos(\omega_{\text{ш}} t + \varphi_{\text{ш}}) + \\
 &+ U_{\text{с.вх}} \cos(\omega_c t + \varphi_c)] E_{\text{ФД}} \cos(\omega_{\text{Ф}} t + \varphi_{\text{Ф}}) = \\
 &= (N_{\text{вх}} / (N_{\text{вх}} + 1)) \cos[(\omega_{\text{Ф}} - \omega_c) t + \\
 &+ \varphi_{\text{Ф.с}}] + (1 / (N_{\text{вх}} + 1)) \cos[(\omega_{\text{Ф}} - \omega_{\text{ш}}) t + \\
 &+ \varphi_{\text{Ф.ш}}], \quad (4)
 \end{aligned}$$

Рис. 4. Экспериментальная (X) и теоретическая (O) зависимости показаний частотомера от амплитуды входного сигнала при плюсовой и минусовой отстройках частоты входного сигнала и резонансной частоты:

$R_{\text{вх}} = 458$ Ом, $2\Delta\omega = 230$ кГц, $\Omega = 150$ кГц; 1, 2 — $\Gamma \ll \Delta\omega$ — расчет по формуле (3); 3, 4 — $\Gamma \ll \Delta\omega$ (эксперимент); 5 — $\Gamma/\Delta\omega = 4,46$ (эксперимент).

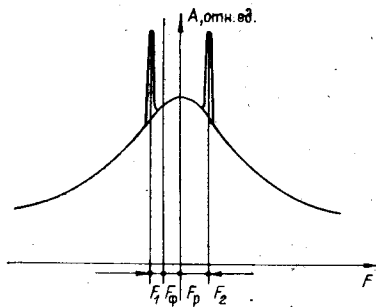


Рис. 5. Распределение спектральной плотности амплитуды резонансного контура, измеряемого сигнала и F_ϕ на частотной оси.

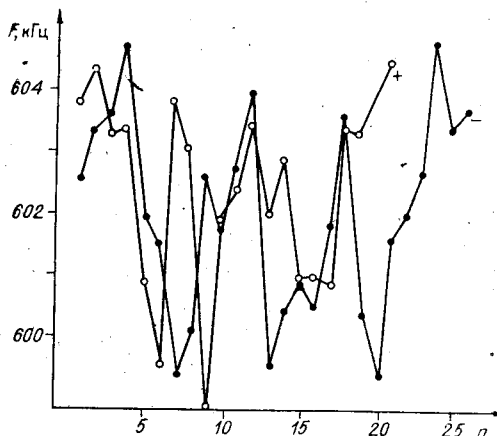


Рис. 6. Частота He—Ne/CH₄-лазера от измерения к измерению (n) при $\tau_n = 1$ с, $\bar{\nu}_- = 88376181602,0973$ кГц, $\bar{\nu}_+ = 88376181602,467$ кГц, $\Delta\bar{\nu} = \bar{\nu}_+ - \bar{\nu}_- = 0,37$ кГц.

где $X_{\text{ФД}}(t)$ — выходной сигнал перемножителя, E_ϕ , ω_ϕ , F_ϕ — параметры, характеризующие опорный сигнал.

Таким образом, на выходе перемножителя имеем сумму двух управляющих сигналов, первый из которых является полезным, а второй — помехой. Замыкая цепь обратной связи и замечая, что управляющее напряжение ФАП не меняет частоту второго члена в (4), можно рассматривать второй член как наводку, действующую на выходе фазового детектора. Эта наводка приводит к паразитной модуляции управляемого генератора [10], однако поскольку система ФАП — астатическая система регулирования по частоте, то среднее отклонение по частоте за достаточно длительное время будет равно нулю.

Второй эффект отстройки резонансной частоты УО от ω_ϕ можно понять из рис. 5, где для точек F_1 и F_2 имеем $N_{\text{вых}} = 1$. При отстройке происходит перекося полосы регулирования системы ФАП, что при прочих равных условиях приводит к необходимости выбирать полосу регулирования меньше $F_1 F_\phi$.

Результаты измерения частоты He—Ne/CH₄-лазера при наличии кольца ФАП с перестраиваемым привязываемым генератором К7 (см. рис. 1), приведенные на рис. 6, показывают, что в системе с ФАП затягивания частоты не наблюдается. Из этого рисунка видно, что частота He—Ne/CH₄-лазера может быть измерена с точностью ~ 200 Гц, однако для этого необходим стандарт частоты с воспроизводимостью на уровне 10^{-12} . Поскольку увеличение сигнала биений, поступающего на измерение, — чрезвычайно сложная техническая задача, то наличие системы ФАП при измерении частоты малых широкополосных сигналов является необходимым. В то же время отстройка резонансного УО от частоты измеряемого сигнала даже при использовании ФАП приводит к добавочной модуляции, статическая ошибка по частоте от которой при достаточном времени измерения равна нулю, и к перекося полосы регулирования.

Итак, расхождение результатов измерения частоты He—Ne/CH₄-лазера [2—7] может быть обусловлено применением усилителей-ограничителей без ФАП и недостаточным временем измерения для усреднения шумового спектра возмущения умноженного СВЧ-сигнала, синтезированного из сигналов стандарта частоты [11].

ЛИТЕРАТУРА

1. Bagayev S. N., Chebotayev V. P. Frequency stability and reproducibility of the 3,39 μm He—Ne laser stabilized on the methane line.—Appl. Phys., 1975, vol. 7, p. 71.
2. Blaney T. G. et al. Absolute frequencies of the methane-stabilized He—Ne laser (3,39 μm) and the CO₂R(32) stabilized laser (10, 17 μm).—J. Phys. D. Appl. Phys., 1976, vol. 9, p. 1323.
3. Домнин Ю. С., Кошелевский М. Б., Татаренков В. М., Шумяцкий П. С. Абсолютные измерения частот ИК-диапазона.—Письма в ЖЭТФ, 1979, т. 30, с. 273.
4. Knight D. J. E., Edwards G. I., Pears P. R., Cross N. R. Measurement of the frequency of the 3,39 μm methane-stabilized laser to ± 3 parts in 10^{11} .—IEEE J. Trans. Instrum. Measur., 1980, vol. IM-29, p. 257.
5. Домнин Ю. С., Кошелевский М. Б., Татаренков В. М., Шумяцкий П. С. Измерение частоты He—Ne/CH₄-лазера.—Письма в ЖЭТФ, 1981, т. 34, с. 175.

6. Chebotayev V. P. et al. Development of an optical time scale.— Appl. Phys., 1982, vol. B29, p. 63.
7. Багаев С. Н. и др. Оптический стандарт времени.— Автометрия, 1983, № 3, с. 37—58.
8. Stone W. M., Brock R. L., Hammerle K. I. On the first probability of detection by radar receiving system.— IRE Trans. on Inform. Theory, 1959, vol. IT-5, N 1, p. 9—11.
9. Радиотехнические цепи и сигналы/Под ред. К. А. Самойло.— М.: Радио и связь, 1972.
10. Шахильдян В. В., Ляховкин А. А. Системы фазовой автоподстройки частоты.— 2-е изд.— М.: Связь, 1982.
11. Гольдорт В. Г., Захарьян В. Ф. Синтезатор стабильных сверхвысокочастотных колебаний миллиметрового диапазона (до 80 ГГц).— ПТЭ, 1982, № 6, с. 401.

*Поступило в редакцию 28 марта 1984 г.;
окончательный вариант — 26 июня 1984 г.*
