

К ТЕОРИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИ УПРАВЛЯЕМЫХ ДИСПЕРСИОННЫХ ФАЗОВРАЩАТЕЛЕЙ

Л. Н. Дерюгин, В. К. Нурмухаметов и В. Е. Сотин

С помощью соотношения Боде, связывающего кривые фазовой дисперсии среды с кривыми поглощения, рассмотрены вопросы теории электрически управляемых дисперсионных фазовращателей, действие которых основано на штарковском или зеemanовском расщеплении линий поглощения среды и к которым, в частности, относятся фазовращатели, использующие электрооптические и магнитооптические эффекты. Показано, что условием работы таких фазовращателей является наличие линий поглощения вблизи рабочей частоты, и развита теория фазовращателя, работающего вблизи одиночной лорентцовой линии поглощения. Получены простые соотношения между характеристиками такого фазовращателя и показано, что с помощью принципа наложения они могут быть применены для анализа фазовращателей с более сложными кривыми поглощения.

Электрически управляемые фазовращатели, в которых сдвиг фазы достигается в результате воздействия на рабочую среду управляющего электрического или магнитного поля, являются существенными элементами современной оптики [1] и техники сверхвысоких частот [2, 3]. Опыт создания подобных фазовращателей показал, что во всех случаях стремление к увеличению фазовых сдвигов ограничивается ростом потерь проходящей мощности. Целью настоящей работы является выяснение физических причин указанного ограничения и анализ на этой основе целесообразных режимов работы и возможностей фазовращателей. В работе изучается случай прохождения плоской волны через однородную рабочую среду. Включение рабочей среды в волновод или резонатор, как показано в [3], всегда приводит к появлению дополнительных потерь.

Ниже рассматриваются фазовращатели, в основе действия которых лежит расщепление энергетических уровней диспергирующих сред во внешнем поле. Общий принцип работы этих фазовращателей, которые мы будем называть дисперсионными, состоит в следующем. В результате расщепления энергетических уровней происходит штарковское или зеemanовское частотное расщепление линий поглощения рабочей среды. Это приводит к деформации амплитудно-частотной характеристики (кривой поглощения) среды $\alpha(f)$, представляющей зависимость от частоты f коэффициента поглощения среды по мощности α . Соответственно деформируется и амплитудно-частотная характеристика фазовращателя (по полю) $A(f) = 0.5l\alpha(f)$, где l — длина фазовращателя. Фазо-частотная характеристика (кривая фазовой дисперсии) фазовращателя $B(f)$, представляющая зависимость от частоты разности фаз между колебаниями на выходе и входе фазовращателя, связана с его амплитудно-частотной характеристикой преобразованием

$$B(f) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{dA(f')}{df'} \ln \left| \frac{f+f'}{f-f'} \right| df', \quad (1)$$

полученным Боде в теории четырехполюсников [4, 5]. Согласно (1), деформация амплитудной характеристики $A(f) \rightarrow A_g(f)$ сопровождается деформацией фазовой характеристики $B(f) \rightarrow B_g(f)$, что и обеспечивает требуемый сдвиг фазы $\Delta B(f) = B_g(f) - B(f)$.

В соответствии с квантовомеханическими представлениями магнитные эффекты Коттона—Мутона и Фарадея представляют следствия тех же расщеплений энергетических уровней в магнитном поле, которые приводят к явлению Зеемана. Точно также, поперечный электрооптический эффект Керра и продольный электрооптический эффект обусловлены расщеплением энергетических уровней в электрическом поле, которые приводят к явлению Штарка [6]. Поэтому известные фазовращатели, в которых используются указанные эффекты, являются дисперсионными и работают по описанному выше принципу.

Так как преобразование Боде $B(f) = L\{A(f)\}$ является линейным, то $L\{A_g(f) - A(f)\} = L\{A_g(f)\} - L\{A(f)\}$ и, следовательно, $\Delta B(f) = L\{\Delta A(f)\}$. Последнее означает, что сдвиг фазы фазовращателем $\Delta B(f)$ может быть определен как преобразование Боде от деформации кривой поглощения фазовращателя $\Delta A(f) = A_g(f) - A(f)$. При этом, как видно из (1), наибольший вклад в фазовый сдвиг дают те деформации, которые расположены вблизи рабочей частоты фазовращателя.

Приведенные соотношения указывают на принципиальную связь между сдвигом фазы и потерями в дисперсионном фазовращателе и показывают, что условием его эффективной работы является наличие линий или полос поглощения вблизи рабочей частоты. Например, для ферритовых и плазменных фазовращателей СВЧ это линии поглощения ферромагнитного и гиромангнитного резонансов соответственно, для оптических фазовращателей с ячейками Керра это ближайшие к рабочей частоте полосы поглощения (например, полоса основного поглощения в ультрафиолетовой части спектра).

Преобразование Боде может служить основой для анализа различных типов дисперсионных фазовращателей по известной (по крайней мере в окрестности рабочей частоты) кривой поглощения рабочей среды и ее деформации под действием управляющего поля, которая определяется характеристиками расщепления спектральных линий: числом, величиной и частотными сдвигами π - и σ -компонент расщепления. Разумеется, что строгому анализу препятствует как недостаток исходных данных, так и трудности интегрирования (1) для реальных кривых поглощения. Однако применяя преобразование Боде к простым формам кривых поглощения и к наиболее простым случаям расщепления, можно получить некоторые общие выводы, полезные при разработке фазовращателей и выборе подходящих рабочих сред, особенно в новых частотных диапазонах.

В первую очередь целесообразно применить преобразование Боде к анализу фазовращателя, работающего за счет частотного смещения одиночной линии поглощения с наиболее простой и характерной лорентцовской формой (рис. 1, а)

$$A = \frac{A_0}{1+x^2} = \frac{\alpha_0 l}{2(1+x^2)}, \quad (2)$$

где $\Delta f = f - f_0$ и $x = \Delta f / \delta$ — абсолютная и относительная расстройки, определяющие положение рабочей частоты фазовращателя f относительно центральной частоты f_0 линии поглощения с полушириной δ , $A_0 = 0.5 \alpha_0 l$ — коэффициент поглощения фазовращателя по полю на частоте f_0 , α_0 — коэффициент поглощения среды по мощности на частоте f_0 . Применив к (2) преобразование Боде, получим фазо-частотную характеристику фазовращателя. При условиях $\delta/f_0 = 10^{-3} \div 10^{-8} \ll 1$ и $x < 200$, которые обычно имеют место в оптическом диапазоне, эта характеристика принимает вид (рис. 1, б)

$$B = A_0 \frac{x}{1+x^2}. \quad (3)$$

Рассмотрим простейший случай расщепления спектральной линии¹ — простое (нормальное) продольное явление Зеемана, которое, как из-

¹ В более общем случае сложного («аномального») явления Зеемана исходная спектральная линия расщепляется на группу компонент, частотные сдвиги которых

вестно, сопровождается эффектом Фарадея. В этом случае для волны с круговой поляризацией (по часовой стрелке) эффект расщепления сводится к простому смещению амплитудно- и фазо-частотных характеристик одной из σ -компонент расщепления по оси частот на величину Δf (Гц) = $= 1.4 \cdot 10^6 H$ (э), пропорциональную приложенному магнитному полю H , что приводит к фазовому сдвигу ΔB на выходе фазовращателя (рис. 1, б).

Дифференциальная (т. е. при малых частотных сдвигах $\Delta f_0 \ll \delta$) фазо-частотная чувствительность фазовращателя Θ может быть определена

$$\Theta = -\frac{dB}{df} = -\frac{dB}{dx} \frac{dx}{df}$$

(рис. 1, б). Дифференцируя (3), находим, что

$$\Theta = \frac{A_0}{\delta} \frac{1-x^2}{(1+x^2)^2} = \frac{\alpha_0 l}{2\delta} \frac{1-x^2}{(1+x^2)^2}. \quad (4)$$

Из (4) явствует, что в принципе фазо-частотная чувствительность может быть сделана сколь угодно большой путем увеличения длины фазовращателя l или выбора линии с большим коэффициентом поглощения α_0 . Однако при этом, согласно (2), растет коэффициент поглощения на рабочей частоте. Комбинируя (2) с (4), найдем, что

$$\Theta = \frac{A}{\delta} \frac{1-x^2}{1+x^2} \leq \frac{A}{\delta}. \quad (5)$$

Из (5) следует, что фазо-частотная чувствительность прямо пропорциональна коэффициенту поглощения фазовращателя A и, следовательно, ограничена допустимыми потерями в фазовращателе. При заданном A она может быть повышена лишь путем уменьшения полуширины линии поглощения δ , что следует иметь в виду при выборе сред для фазовращателей. Длина фазовращателя, обеспечивающая заданный коэффициент поглощения A , согласно (2), будет

$$l = 2A \frac{1+x^2}{\alpha_0}. \quad (6)$$

Соотношение (5) показывает также зависимость фазо-частотной чувствительности от положения рабочей точки фазовращателя x (рис. 1, в). Оптимальными в отношении фазо-частотной чувствительности являются области $|x| \ll 1$ (аномальная дисперсия) и $x \gg 1$ (нормальная дисперсия), причем при $|x| < 5^{-1}$ и $|x| > 5$ фазо-частотная чувствительность отличается от своей максимальной величины $\Theta_{\max} = A/\delta$ не более чем на 8%. Однако с точки зрения уменьшения длины фазовращателя, как видно из (6), область аномальной дисперсии гораздо выгоднее области нормальной дисперсии.

Препятствием к реализации эффективного фазовращателя в области аномальной дисперсии $|x| < 1$ является то обстоятельство, что при частотных сдвигах, превышающих ширину линии поглощения ($\Delta f_0 > 2\delta$), рабочая точка выходит за пределы этой области, вследствие чего фазовый сдвиг начинает уменьшаться. Из (3) и рис. 1, б видно, что наибольший фазовый сдвиг в области аномальной дисперсии достигается при частотном

определяются соответствующими множителями Ланде. Штарковское расщепление также имеет многокомпонентную структуру со сложной зависимостью частотных сдвигов компонент от приложенного поля.

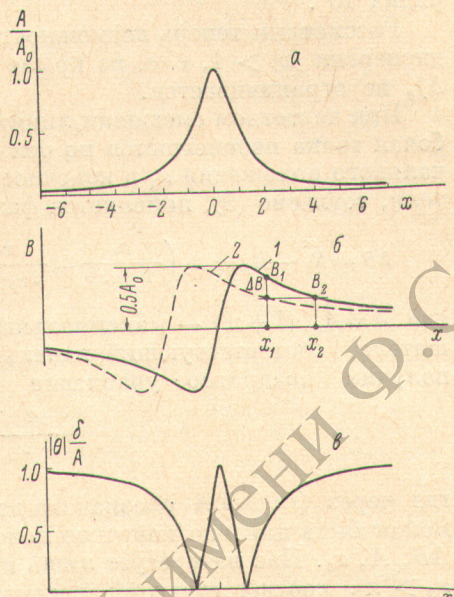


Рис. 1. Зависимости параметров фазовращателя от относительной расстройки x .

a — нормированная лорентцовская кривая поглощения, $б$ — кривые фазовой дисперсии (1 — исходная, 2 — смещенная); $в$ — нормированная кривая фазо-частотной чувствительности.

сдвиге $\Delta f_0 = 2\delta$ между экстремумами фазовой характеристики ($x = \pm 1$) и составляет (в радианах) $\Delta B = A$, т. е. численно равен максимальному коэффициенту поглощения фазовращателя в непереходах. При допустимых потерях 20% проходящей мощности $A = 0.1$ и $\Delta B = 0.1$ радиан $\approx 6^\circ$. В случае, когда требуется фазовый сдвиг $\Delta B = \pi$ радиан (полуволновой фазовращатель), $A_0 = \pi$ и потери проходящей мощности составляют 99.8%. Таким образом, при приемлемых потерях в области аномальной дисперсии можно обеспечить лишь незначительные фазовые сдвиги порядка 10° .

Рассмотрим теперь возможности фазовращателя в области нормальной дисперсии $|x| > 1$, т. е. на крыле фазовой характеристики, где величина Δf_0 не ограничивается.

При частотном смещении линии поглощения влево на величину Δf_0 рабочая точка перемещается по оси x вправо на расстояние $\Delta x = \Delta f_0 / \delta$ из начального положения x_1 в конечное положение x_2 , и на выходе фазовращателя, согласно (3), появляется фазовый сдвиг (рис. 1, б)

$$\Delta B = B_1 - B_2 = A_0 \left(\frac{x_1}{1 + x_1^2} - \frac{x_2}{1 + x_2^2} \right) = A (1 + x_1^2) \left(\frac{x_1}{1 + x_1^2} - \frac{x_2}{1 + x_2^2} \right), \quad (7)$$

где $A = A_0 / (1 + x_1^2)$ — максимальный коэффициент поглощения фазовращателя, соответствующий начальной рабочей точке x_1 . Преобразуя (7), получим квадратное уравнение

$$\frac{x^2}{1 + x^2} = \frac{x_1 - Q}{1 + x_2^2}, \quad (8)$$

где через $Q = \Delta B / A$ обозначена добротность фазовращателя, из которого может быть найдено конечное положение рабочей точки x_2 при заданных ΔB , A , x_1 . Нас интересует лишь положительный корень этого уравнения $x_2 > x_1$, соответствующий рассматриваемому смещению рабочей точки вправо, который существует лишь при $x_1 > Q$. Только при этом условии может быть обеспечена заданная добротность фазовращателя.

Для фазовращателей, представляющих практический интерес, добротность должна существенно превышать единицу. Например, для полуволнового фазовращателя ($\Delta B = \pi$) с приемлемыми потерями ($A = 0.1$), добротность составляет $Q = 10\pi = 31.4$. Поэтому в уравнении (8) можно положить $1 + x_1^2 \approx x_1^2$ и $1 + x_2^2 \approx x_2^2$. Тогда

$$x_2 = \frac{x_1^2}{x_1 - Q} \quad \text{и} \quad \Delta x = x_2 - x_1 = \frac{Q}{1 - \frac{Q}{x_1}}.$$

Имея в виду что $\Delta x = \Delta f_0 / \delta$, находим

$$\frac{Q}{1 - \frac{Q}{x_1}} = \frac{\Delta f_0}{\delta} = \frac{x_1 \frac{\Delta B}{A}}{x_1 - \frac{\Delta B}{A}}. \quad (9)$$

Зависимость $\Delta f_0 / \delta$ (Q , x_1 / Q) представлена на рис. 2. Разрешая (9), относительно $\Delta B / A$ имеем

$$\frac{\Delta B}{A} = \left(\frac{1}{x_1} + \frac{\delta}{\Delta f_0} \right)^{-1}. \quad (10)$$

Соотношение (10) вместе с выражением (6) для длины фазовращателя связывает основные характеристики фазовращателя, работающего в области нормальной дисперсии, и показывает, что такой фазовращатель позволяет получить любой достаточно большой фазовый сдвиг ΔB при любом достаточно малом коэффициенте поглощения A , если только можно обеспечить достаточно большие значения относительного частотного сдвига линии поглощения $\Delta f_0 / \delta$ и длины фазовращателя l .

Однако возможности увеличения частотного сдвига Δf_0 и длины l в реальных конструкциях всегда ограничены вследствие соответствующего

возрастания управляющей мощности и габаритов системы, опасности перегрева, усложнения управляющего устройства, снижения быстродействия фазовращателя и т. п. Поэтому всегда целесообразно стремиться к минимальным Δf_0 и l .

Как видно из (9), необходимые значения Δf_0 и l зависят от выбора начальной рабочей точки x_1 . Необходимое значение частотного сдвига уменьшается с ростом x_1 и достигает минимальной величины $(\Delta f_0/\delta)_{\min.} = Q$ при $x_1 \rightarrow \infty$. Наоборот, необходимая длина фазовращателя имеет минимальное значение $l_{\min.} = A(1 + Q^2/2\alpha_0)$ при $x_1 = Q$ и быстро увеличивается с ростом x_1 . Поэтому выбор начальной рабочей точки определяется имеющимися резервами величин $\Delta f_0/\delta$ и l в реальных конструкциях. В качестве компромиссного можно взять значение $x_1 = 2Q$, при котором $(\Delta f_0/\delta) = 2(\Delta f_0/\delta)_{\min.}$ и $l \approx 4l_{\min.}$, т. е. обе указанные величины не слишком сильно отличаются от своих минимальных значений. В этом случае $\Delta x = 2Q = x_1$ и $x_2 = 2x_1$. Для полуволнового фазовращателя с поглощением $A = 0.1$ имеем $Q = 31.4$. Если взять $x_1 = 2Q = 62.8$, то $\Delta f_0/\delta = 62.8$ и $l = 800/\alpha_0$.

В заключение отметим, что соотношения, полученные выше для простейшего случая фазовращателя, когда фазовый сдвиг обусловлен частотным смещением лишь одной из σ -компонент одиночной лорентцовой линии поглощения при простом продольном эффекте Зеемана, могут быть с помощью принципа суперпозиции применены для анализа более общих случаев сложного расщепления нескольких линий на группы зеемановских или штарковских компонент с различными частотными сдвигами. Действительно, в этих случаях вследствие линейности преобразования Боде результирующий фазовый сдвиг может быть представлен в виде суммы парциальных фазовых сдвигов, каждый из которых обусловлен частотным смещением одной из компонент расщепления одной из линий поглощения. При этом суммирование должно проводиться по всем компонентам расщепления всех линий поглощения, которые существенны для работы фазовращателя (с учетом поляризации его рабочей волны).

Предлагаемая методика, разумеется, предполагает, что кривые поглощения (до и после расщепления) с той или иной степенью точности могут быть аппроксимированы лорентцовыми кривыми или сведены к некоторой суперпозиции этих кривых.

При работе фазовращателя в области нормальной дисперсии (относительно всех существенных линий поглощения) влияние дополнительных линий поглощения и дополнительных компонент расщепления на фазовый сдвиг может быть легко прослежено с помощью простых соотношений (7) и (10).

Литература

- [1] Г. П. К а т ы с. Модуляция и отклонение оптического излучения. Изд. «Наука», 23, 1967.
- [2] Сканирующие антенные системы СВЧ, т. III. Р. С. Х а н с е н, перевод с англ. под ред. Г. Т. М а р к о в а, А. Ф. Ч а п л и н а. Изд. «Сов. радио», М., 97—140, 1971.
- [3] М. Г. К у з н е ц о в. Сб. «Сканирующие антенны СВЧ» под ред. Л. Н. Д е р ю г и н а. Изд. «Машиностроение», М., 1964.
- [4] Г. Б о д е. Теория цепей и проектирование усилителей с обратной связью, 378. ИЛ, 1958.
- [5] D. E. T o m a s. Bell Syst. Techn. J., 43, 637, 1963.
- [6] Физический энциклопедический словарь. 2, 354, 505, 1962—1966; 5, 292, 1962—1966.

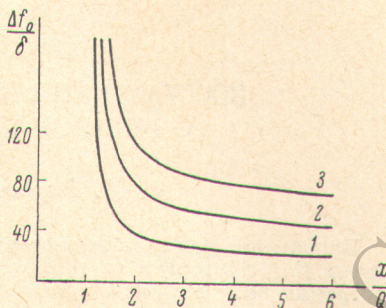


Рис. 2. Зависимость требуемого относительного частотного сдвига $\Delta f_0/\delta$ от добротности Q и положения начальной рабочей точки x_1 для фазовращателя, работающего в области нормальной дисперсии.

1 — $Q=20$, 2 — $Q=40$, 3 — $Q=60$.

Поступило в Редакцию 19 мая 1971 г.