

07

Квазиоптический диплексер и фильтр на основе поляризационного кольцевого интерферометра

© Л.Б. Князьков, Н.В. Руженцев

Радиоастрономический институт НАН Украины, Харьков
E-mail: ruzh@rian.kharkov.ua

Поступило в Редакцию 12 января 2007 г.

В окончательной редакции 3 апреля 2007 г.

Впервые продемонстрирована работа квазиоптического поляризационного кольцевого интерферометра в качестве диплексера, полосно-пропускающего и полосно-заграждающего фильтров. Показана возможность уменьшения потерь при фокусировке луча в интерферометре посредством шарообразных линз с низкой диэлектрической проницаемостью материала. Приведены результаты измерений передаточных характеристик образца поляризационного кольцевого интерферометра в 3-мм диапазоне длин волн.

PACS: 07.57.-с, 84.40.Lj

Для решения задач частотной селекции сигналов на входе малозагрязняющих приемных систем миллиметровых и субмиллиметровых диапазонов, в основном предназначенных для радиоастрономических и атмосферных наблюдений, находят применение многолучевые интерферометры Фабри–Перо (ФПИ) [1,2]. Резонансная особенность передаточных характеристик выгодно отличает их от двулучевых интерферометров. Диплексеры на основе ФПИ передают к смесителю излучение сигнала и гетеродина и одновременно подавляют шумы гетеродина в широкой полосе принимаемых частот. Фильтры на основе ФПИ

обеспечивают эффективное подавление шумов и паразитных сигналов зеркальной полосы частот. Однако достижению малых потерь ФПИ, особенно в субмиллиметровом диапазоне, препятствуют омические потери полупрозрачных отражателей (обычно двумерных проволочных сеток), связывающих резонатор ФПИ с внешним пространством [1].

В то же время, как показано в работе [3], такой же, как и у ФПИ, характер передаточных характеристик имеют поляризационные многолучевые интерферометры (ПМИ). Связь с внешним пространством (по одной линейно поляризованной компоненте волны) резонатора ПМИ обеспечивают одномерные (поляризационные) проволочные решетки, полностью отражающие и пропускающие волны взаимно перпендикулярных поляризаций. Для обеспечения полного отражения шаг проволоч поляризационных решеток выбирается в десятки раз меньшим длины волны, в отличие от двумерных сеток ФПИ, шаг проволоч которых подбирается в соответствии с заданным коэффициентом отражения и лишь в несколько раз меньше длины волны. Учитывая, что омические потери практически пропорциональны шагу проволоч [1], они пренебрежимо малы у одномерных решеток ПКИ. При этом ПМИ значительно проще в изготовлении и настройке, поскольку не предполагают специальной разработки полупрозрачных отражателей, а требуемые передаточные характеристики обеспечиваются установкой соответствующего угла взаимного поворота поляризационных элементов.

Модификацией ПМИ является поляризационный кольцевой интерферометр (ПКИ) [3], конструкция которого схематически показана на рис. 1. Кольцевой резонатор ПКИ образован четырьмя отражателями, ограничивающими объем прямоугольного сечения. Два смежных отражателя ПКИ представляют одномерные проволочные решетки, проволочки которых повернуты между собой так, что проекции направления проволоч на биссекториальную плоскость составляют между собой угол α .

При использовании ПКИ в качестве диплексера излучение сигнала и гетеродина поступает в плечи 1 и 2 (рис. 1) соответственно, будучи поляризованным (направление вектора электрического поля волны) перпендикулярно проволочкам, расположенным в этих плечах решеток, и беспрепятственно проходит в объем резонатора. Внутри резонатора излучение распространяется в режиме бегущей волны, причем переменной поляризации, поскольку последняя меняется при каждом отражении

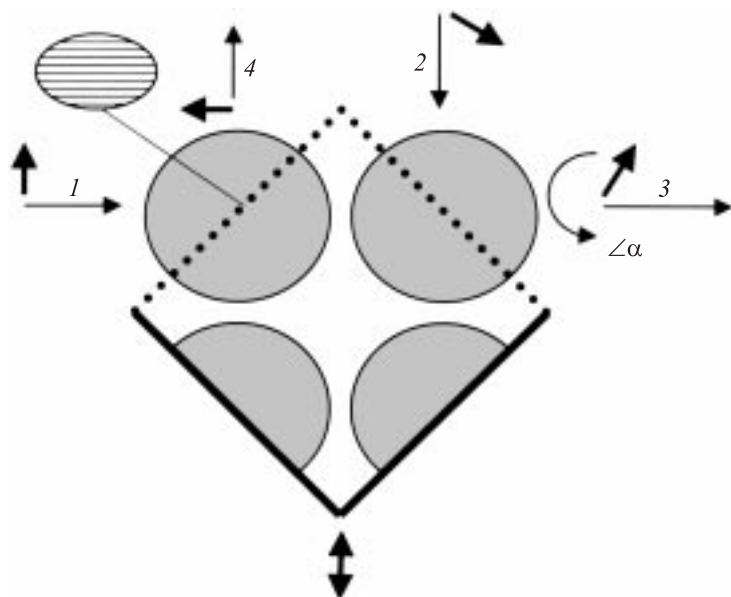


Рис. 1. Конструкция поляризационного кольцевого интерферометра.

от решеток. В общем плече 3 излучение сигнала и гетеродина поступает как напрямую, так и в процессе многократных проходов (в круговую) резонатора, будучи при этом поляризованным перпендикулярно проволокам решетки в плече 3. Перемещением металлических отражателей обеспечиваются резонансные условия прохождения на частоте гетеродина и нерезонансные в полосе принимаемых частот сигнала. При $\alpha \ll 90^\circ$ сигнал проходит плечо 3 без существенного ухудшения коэффициента передачи в широкой полосе частот между резонансами, и одновременно в этой полосе частот эффективно подавляются шумы гетеродина.

В полосно-пропускающем и полосно-заграждающем фильтрах на основе ПКИ, обеспечивающих однополосный режим приема, условия распространения излучения аналогичны описанным выше условиям распространения гетеродина и сигнала в диплексере соответственно. Установив в плече 2 согласованную нагрузку, а в плечах 3 и 4 приемники, можно обеспечить однополосный режим приема излучения,

поступающего в плечо 1 , на частотах верхней и нижней полос приема одновременно.

Для фокусировки луча в процессе многократных проходов в ФПИ с кольцевым резонатором [2] используется отражатель с вогнутой формой поверхности. В представленной конструкции ПКИ с этой целью предложено использовать четыре шарообразные линзы с низкой диэлектрической проницаемостью материала (пендиэлектрика). Две шарообразные линзы, состоящие из двух половин каждая, установлены на проволочных решетках, а две другие, выполненные в форме полушария, установлены на металлических отражателях (рис. 1).

Шарообразная форма линз обеспечивает равные условия распространения луча во взаимоперпендикулярных направлениях, а при малой диэлектрической проницаемости материала малы потери на отражение и поглощение в линзах [4]. Благодаря малому расстоянию между перетяжками луча может быть обеспечена фокусировка луча меньшего эффективного радиуса и соответственно уменьшена теряемая мощность излучения за краями отражателей фиксированного размера. С другой стороны, учитывая, что размеры отражателей определяют интервал между резонансными частотами, предложенный способ фокусировки также позволяет обеспечить более редкий спектр при приемлемых потерях в резонаторе.

Возможность не учитывать омические потери в отражателях значительно упрощает вывод выражений для передаточных характеристик ПКИ. Рассмотрев суперпозицию волн в плече 3 , поступивших из плечей 1 и 2 (рис. 1) и разное число раз прошедших резонатор, можно записать выражения для их комплексных амплитуд E_{13} и E_{23} соответственно как:

$$\begin{aligned} E_{13} &= E_0 e^{i\gamma/2} \left(L^{1/2} \cos \alpha - \sum_{n=1}^{\infty} (L^n \sin^2 \alpha \cos^{2n-1} \alpha) e^{i\gamma n} \right) \\ &= E_0 e^{i\gamma/2} \left(L^{1/2} \cos \alpha - \frac{(L \sin^2 \alpha \cos \alpha) e^{i\gamma}}{1 - (L \cos^2 \alpha) e^{i\gamma}} \right), \\ E_{23} &= \sum_{n=1}^{\infty} E_0 L^n \sin^2 \alpha \cos^{2(n-1)} \alpha e^{i\gamma n} = \frac{E_0 L e^{i\gamma} \sin^2 \alpha}{1 - (L \cos^2 \alpha) e^{i\gamma}}, \end{aligned}$$

где E_0 — комплексная амплитуда входной волны; L — коэффициент затухания по амплитуде (в разах) за один проход резонатора ПКИ; γ — электрическая длина пути луча в резонаторе ПКИ (в радианах).

Соответственно выражения для коэффициентов передачи T_{13} и T_{23} запишутся как:

$$T_{13} = 10 \lg \left| \frac{E_{13}}{E_0} \right|^2$$

$$= 10 \lg \frac{(1 - L - (L^{1/2} - L) \sin^2 \alpha)^2 + 4(L + (L^{1/2} - L) \sin^2(\frac{\gamma}{2}))L \cos^2 \alpha}{(1 - L \cos^2 \alpha)^2 + 4L \cos^2 \alpha \sin^2(\frac{\gamma}{2})},$$

$$T_{23} = 10 \lg \left| \frac{E_{23}}{E_0} \right|^2 = 10 \lg \frac{L \sin^4 \alpha}{(1 - L \cos^2 \alpha)^2 + 4L \cos^2 \alpha \sin^2(\frac{\gamma}{2})}.$$

Приведенные выражения позволяют рассчитать передаточные характеристики диплексера и фильтров на основе ПКИ при известном значении L . На рис. 2, *a, b* представлены зависимости от угла α максимального коэффициента передачи $T_{13 \max}$ ($\gamma = (2n - 1)\pi$), характеризующего потери сигнала в диплексере и полосно-заграждающем фильтре (рис. 2, *a*), и максимального коэффициента передачи $T_{23 \max}$ ($\gamma = 2n\pi$), характеризующего потери гетеродина в диплексере или потери сигнала в полосно-пропускающем фильтре (рис. 2, *b*). Затухания в резонаторе за один проход ($|20 \lg L|$) принимались равными 0.1, 0.2, 0.3 и 0.4 дБ.

В изготовленном образце ПКИ использовались проволочные решетки с шагом проволок $30 \mu\text{m}$ и диаметром $10 \mu\text{m}$. Шарообразные линзы имели диаметр 30 мм и изготавливались из пенополистирола. Материал (пенополистирол разной плотности) шарообразных линз подбирался экспериментально для уменьшения потерь.

Измерения передаточных характеристик проводились в 3-мм диапазоне по следующей схеме. По измеренной величине коэффициента передачи $T_{23 \max}$ определялась величина затухания за один проход по расчетным зависимостям (рис. 2, *b*), а затем измерялся коэффициент передачи $T_{13 \max}$ и сравнивался с ожидаемым результатом по расчетным зависимостям (рис. 2, *a*). Коэффициент передачи $T_{23 \max}$ измерялся по изменению уровня протектированного сигнала при установке ПКИ между двух облучателей. Наименьшие потери за один проход ПКИ наблюдались для пенополистирола с относительной диэлектрической проницаемостью 1.06. При этом коэффициент передачи $T_{23 \max}$ составил 3.2 ± 0.2 дБ при угле $\alpha = 12^\circ$, что соответствует потерям в резонаторе за один проход от 0.1 до 0.2 дБ (рис. 2, *b*). Для измерения коэффициента передачи $T_{13 \max}$ использовался радиометр с облучателем

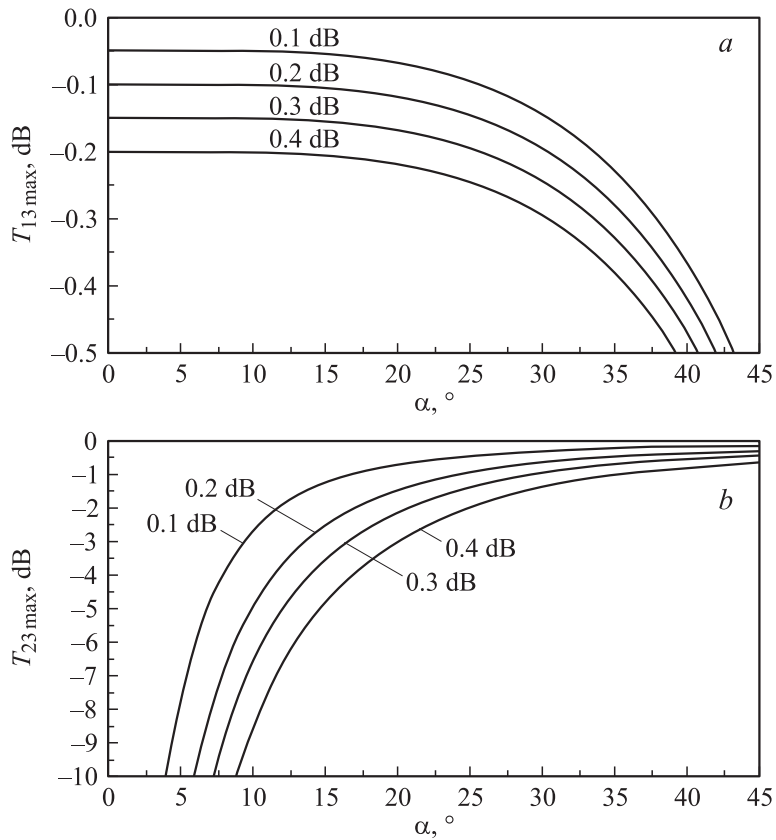


Рис. 2. Передаточные характеристики поляризационного кольцевого интерферометра. Зависимости от угла взаимного поворота поляризационных решеток α максимального коэффициента передачи $T_{13 \max}$ из плеча 1 в плечо 3 (а) и максимального коэффициента передачи $T_{23 \max}$ из плеча 2 в плечо 3 (б) при затухании в резонаторе за один проход 0.1, 0.2, 0.3 и 0.4 dB.

на входе. При измерениях определялось изменение разностного выходного сигнала („ступеньки“) от „холодной“ и „горячей“ нагрузок после установки ПКИ перед облучателем. Измеренное значение коэффициента передачи $T_{13 \max}$ при угле $\alpha = 12^\circ$ составило 0.06 ± 0.02 dB, что совпадает с результатами расчета (рис. 2, а).

В реализованном таким образом диплексере при углах α в интервале $15 \dots 25^\circ$ потери сигнала не превышают 0.15 dB при эффективности использования мощности гетеродина более 50% и подавлении шумов гетеродина не хуже -20 dB. В полосно-заграждающем фильтре при углах α в интервале $35 \dots 40^\circ$ потери сигнала не превышают 0.5 dB при полосе заграждения по уровню -10 dB более 100 MHz.

Продемонстрирована совокупность технических и эксплуатационных параметров в режимах фильтрации и диплексирования делает использование ПКИ более предпочтительным в приемных системах, в которых традиционно используются интерферометры Фабри–Перо.

Список литературы

- [1] *Goldsmith P.F.* // Infrared and Millimeter Waves / K.J. Button, Ed. New York: Academic, 1982. V. 6. P. 277–343.
- [2] *Batelaan P.D., Frerking M.A., Kuper T.B.H., Pickett H.M., Schaefer M.M., Zimmermann P., Luhmann N.C.* // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 1988. V. 36. N 4. P. 694–699.
- [3] *Knyaz'kov L.B.* // International Journal of Infrared and Millimeter Waves. 2003. V. 24. N 11. P. 1931–1939.
- [4] *Knyaz'kov L.B., Ruzhentsev N.V.* // International Journal of Infrared and Millimeter Waves. 2006. V. 27. N 2. P. 211–217.